

国道 176 号名塩木之元電線共同溝における 低コスト手法の導入について

権藤 拓洋¹

¹近畿地方整備局 兵庫国道事務所 工務第一課 (〒650-0042 神戸市中央区波止場町3番11号)

道路の無電柱化については、昭和61年度より計画的に取り組んできたところである。無電柱化の主な課題の一つはコストであり、一層の低コスト化が求められている。平成28年に、埋設深さの基準や電力線と通信線の離隔距離に関する基準が緩和された結果、「浅層埋設」や「小型ボックス活用埋設」といった、低コスト手法による整備が可能となり、一部の地域で適用され始めているところである。今回は、兵庫国道事務所での低コスト手法による整備について、現時点での検討状況を取りまとめた。

キーワード 電線共同溝、無電柱化、コスト削減、低コスト手法、新技術

1. 低コスト手法の導入の現状

現在、無電柱化の手法として最も採用されている電線共同溝方式は、歩道幅員の狭い道路や歩道のない道路では管路・柵の計画が困難である場合が多く、整備費用が高いことも相まって、その適用には限界が来ており、今後より一層の低コスト化が求められている。上記の背景のもと、H26年度より低コスト化に向けた技術的検証が実施され、埋設深さの基準の緩和や、電力線と通信線の離隔距離に関する基準の緩和が行われた。基準の緩和を受けて「浅層埋設」「小型ボックス活用埋設」等の低コスト手法による整備が可能となり、「道路の無電柱化、低コスト手法導入の手引き(案) Ver.2 H31.3. 国土交通省道路局環境安全・防災課¹⁾」が策定・発出されている。

近畿地方整備局においても「電線共同溝マニュアル令和2年1月近畿地方整備局道路管理課²⁾」にリニューアルされ、管路方式に適用される「浅層埋設方式」について埋設深さの縮小や、従来に比べてより低コストである新管路材がマニュアルに収録されて電線共同溝設計において採用が可能となっている。一方「小型ボックス活用方式」については、近畿地方整備局管内の直轄国道では整備事例が無いことや参画企業から構造等について同意が得られていないことを理由に、マニュアルへの収録が見送られており、早期のマニュアル化が望まれている。

本事業においては、低コスト手法の採用による整備検討を行う中で、一部区間に近畿地整管内の直轄国道では初めてとなる小型ボックス方式の検討を実施しており特に詳述する。

以下、「低コスト手法導入の手引き(案) Ver.2

H31.3 国土交通省道路局環境安全・防災課」→「低コスト導入の手引き」、電線共同溝マニュアル 令和2年1月近畿地方整備局道路管理課」→「電線共同溝マニュアル」と記載する。

2. 国道176号名塩木之元地区の路線状況

国道176号名塩木之元電線共同溝は、「名塩道路」に位置しており、西宮市名塩木之元町付近の木之元バス停前交差点から生瀬1丁目交差点間の延長約1800mである。

この区間は、一般国道176号名塩道路事業として、交通混雑の緩和、交通安全の確保等を目的に現道拡幅を主体とした4車化の事業がおこなわれている。



図-1 名塩道路 木之元地区

3. 設計条件

(1) 道路条件

路線名 : 一般国道 176 号 (名塩道路)
 道路規格 : 第 3 種第 2 級
 設計速度 : V=60km/h
 幅員構成 : 表-1 (歩道幅員 3.5m)
 ※電線共同溝は歩道部に片側整備

(2) 起終点

- ・ 起点 : 西宮市名塩木之元 (木之元バス停前交差点)
- ・ 終点 : 西宮市生瀬 1 丁目 (生瀬 1 丁目交差点)

(3) 参画企業・配線要望

本路線において電線共同溝整備事業に参画を要望した企業は 4 社である。

表-1 設計条件表

起点	西宮市名塩木之元(木之元バス停前交差点)		
	宝塚方面	三田方面	
中間点	大多田橋付近(工事中)		
	三田方面	宝塚方面	
終点	西宮市生瀬1(生瀬1丁目交差点)		
	宝塚方面	三田方面	
道路標準断面	標準部 24.0		
配線要望	参画企業		要条数(幹線管路)
	関西電力送配電(株)	φ 100	2~4
		φ 75	1
	エヌ・ティ・ティ インフラネット(株)	φ 150	1
	(株) オプテージ	φ 100	1~2
(株) ベイコムコミュニケーションズ	φ 75	1	

4. 検討を実施した低コスト整備手法

本路線で検討を実施した低コスト整備手法は次のとおりである。

- ・ 浅層埋設方式
- ・ 新管路材の採用
- ・ NTT 既存ストックの活用
- ・ 小型ボックス方式の採用

小型ボックス方式については参画企業 4 社との調整会議方式による勉強会を開催し、構造詳細を決定している。

(1) 浅層埋設方式

「電線共同溝マニュアル²⁾」により、歩道一般部のアスファルト舗装において最小土被り 14cm の採用が可能となっている。本路線延長 L=1800m のうち、乗入 II 種・乗入 III 種の計画が見込まれない約 320m の区間において、参画企業の下承のもと最小土被りを採用している。

浅層埋設方式による土被り縮小自体は大きなコスト削減効果が得られるわけでは無いが、地下空間の有効活用に効果を発揮する。

(2) 新管路材の採用

「電線共同溝マニュアル²⁾」により新たな管路材として角型 FEP 管と ECVP 管の採用が可能となった。従来から使用されてきた管路材 (SVP 管・KGP 管・PV 管等) と比較検討の上、電力系管路と通信系管路別に幹線管路・連系管路・引込管路別に経済比較を実施し、適用管路材を決定した。(表-2)

表-2 適用管路材

適用箇所		企業名	管径	細分	選定管路材	備 考		
電力系管路								
幹線	幹線	関西電力	φ 100	電力用	角型 FEP			
			φ 75 (80)	保安設備用	角型 FEP (81)			
		オプテージ	φ 100	電力系通信用	角型 FEP			
			φ 75 (80)	保安設備用	ECVP	異種管継手 [2]KGP [※]		
		関西電力	φ 100	電力用	ECVP	異種管継手 [2]KGP [※]		
			φ 75 (80)	保安設備用	角型 FEP (81)	異種管継手 [2]KGP [※]		
		オプテージ	φ 100	電力系通信用	ECVP	異種管継手 [2]KGP [※]		
			φ 75 (80)	電力用	KGP	2:274 [管種指定]		
		関西電力	φ 100	電力系通信用	KGP	2:274 [管種指定]		
			φ 75 (80)	保安設備用	KGP	2:274 [管種指定]		
		オプテージ	φ 100	電力系通信用	ECVP			
			φ 75 (80)	保安設備用	ECVP			
関西電力	φ 100	電力用	PV	異種管継手 [2]KGP [※]				
	φ 80	電力用	PV					
引込	引込	オプテージ	φ 100	電力系通信用	ECVP			
		関西電力	φ 80	電力用	PV			
通信系管路								
幹線	幹線	NTT	φ 150	小径ボックス方式	VP			
			φ 75	配管	角型 FEP (75)			
		他企業	φ 75		角型 FEP (75)			
			φ 75		角型 FEP (75)			
		道路管理者	φ 75		角型 FEP (75)			
			φ 75		角型 FEP (75)			
		連系	連系	NTT	φ 50	PV	異種管継手 [2]PV	
				他企業	φ 75		角型 FEP (75)	
		連系	連系	NTT	φ 50	PV	異種管継手 [2]PV	
				他企業	φ 75		PV	
		連系	連系	NTT	φ 75		PV	
				他企業	φ 75		PV	
引込	引込	NTT	φ 50		PV			
		他企業	φ 50, φ 25		PV			
公安	公安	φ 75		※2	※2: 公安協議による			
		φ 50		※2	※2: 公安協議による			

(3) NTT 既存ストックの活用

路線の一部に既存 NTT 設備 (管路・柵) が埋設されているため、これを電線共同溝の一部として活用する場合と新設整備する場合において経済比較を実施した。本路線においては道路高が最大約 2m 高くなる計画であり、既存柵の改良が必要になり、マンホール首高が高くなるため維持管理に問題があることやコスト面において有利とならないため、既存ストックの活用は見送っている。

(4) 小型ボックス方式の採用

小型ボックス方式とは、従手法である管路部を小型ボックス（U型トラフ構造）としたものであり、適用地としては、歩道に埋設スペースがあることや、大型車の乗り入れやケーブル条数を考慮した需要密度が比較的 low、需要変動が少ない地域とされており、採用に当たっては次の特徴を考慮する必要がある。

- ・電力線と通信線を同一収容することによるコンパクト化（掘削土量や仮設材の削減）
- ・U型トラフ構造の採用（支障埋設物移設の低減（埋設物管理者が上空占有を承認する必要あり））
- ・路面露出型の蓋を採用（ケーブル敷設や保全が容易であり、高いメンテナンス性を確保）
- ・小型ボックスを曲線部に設置する場合は、継ぎ目等から雨水・泥等が入る可能性がある（止水・ごみ等の流入防止対策が必要）
- ・部外者が蓋を開けることの出来ない構造が必要であり鍵の設置の検討が必要（コスト増）
- ・歩道部の平坦性が要求される（乗入部の設置や歩道形式の変更が困難）

本路線においては、沿道への引込線の発生が少なく、車両乗入の計画が見込まれない大多田橋前後の上り線約160m（沿道が道路の法面）と下り線約200m区間（沿道が武庫川）において、検討を実施することで参画企業側と合意した。以下詳細について記載する。

5. 小型ボックス方式採用区間の小型ボックス本体

小型ボックス方式による整備事例は全国的に少なく、小型ボックスの蓋が路面に露出する方式は、「新潟県見附市」「愛知県東海市」に見られるのみである。

本検討ではこれらの事例を参考とし、「低コスト導入の手引き¹⁾」に準拠することで参画企業と合意、小型ボックス本体構造を決定した。（表-4）

(1) 小型ボックスの標準断面

「低コスト導入の手引き¹⁾」に記載されている収容ケーブル条数の目安と標準断面の内空について本路線での比較を表-4に示す。小型ボックス方式は本来、住宅地の生活道路に適用することを念頭に置いた方式であり、直轄国道である本路線とはケーブルの種類（幹線と引込ケーブル）が大きく異なる。参画企業側に使用するケーブル条数および仕様のヒアリングを行い、ケーブル実寸法を小型ボックス断面内に図示した小型ボックス本体ケーブル占有状況図を参画企業に提示して、ケーブルの取り出しや維持管理において問題の無いことを確認・了承を得ている。

(2) 小型ボックスの蓋の構造

小型ボックス蓋の開閉方法は人力とし、内空 300×300 の蓋の重量約 60kg 程度以下（形状 360 幅×1000 長さ×70 厚さ）で参画企業より了承を得た。また蓋にL型突起の噛み合わせによるセキュリティを施し、柵間に3か所（端部2か所+中央部1か所）シリンダー錠によるロック構造を配置した。

(3) 小型ボックスの蓋の落下防止対策

小型ボックス蓋は人力による開閉口としたことから、維持管理時に蓋落下によるケーブル破損を防ぐ必要がある。小型ボックスのU型の受枠に鉄筋 D16 (ctc 50cm) に配置することで、蓋開閉時の落下防止とする。その他の対策としてネット防護、2重蓋構造が考えられるが、簡易で経済性を重視した構造を採用した。

(4) 小型ボックス本体の止水構造

小型ボックスの U 型構造と蓋の隙間から入り込む水・土砂の流入対策として各種の止水材を検討した結果、EPDM の中空型を U 型構造と蓋及び蓋と蓋の継ぎ目に設置することとした。

表-3 小型ボックス本体構造

小型ボックス標準断面の比較	
低コスト導入の手引き	検討案
内空寸法	幅300×高さ300(車道部400)
ケーブル条数(目安)	電力:幹線×2条 通信:幹線×3条・引込×18条
沿道状況(目安)	一般家屋20軒/100m程度(両側)
小型ボックスの蓋の構造	
落下防止対策	
止水構造	
材質	EPDM シリコン クロロプレン
製品写真	
耐候性	◎ ◎ ◎
耐劣化性	◎ △ ◎
長期荷重時の復元性	○ ◎ ◎
経済性	◎: 500円/m ×: 1200円/m △: 900円/m
総合評価	◎ △ ○

6. 小型ボックス方式採用区間の概

小型ボックス方式においては、小型ボックス本体と柵に、通信ケーブルと電力低圧ケーブルを収容することが基本である。ただし、「低コスト導入の手引き¹⁾」において「電力地上機器部内の通信ケーブル敷設は協議が必要」、 「電線共同溝マニュアル²⁾」に「従来から参画事業者との協議の結果、保安上からⅡ型方式（分離型）が使用されている」と記載があることから、现阶段で小型ボックスの全ての電線共同溝設備に通信ケーブルと電力低圧ケーブルを収容することは時期尚早である。これらの点を踏まえ、小型ボックス方式区間に採用する電共同溝柵の構造は次の方針とした。

- 方針1：通信接続柵は通信ケーブルと電力低圧ケーブルを収納，電力柵は関西地区で採用されているⅡ型方式（分離型）とし，電力ケーブルおよび電力系通信ケーブル（オプテージ通信線）を収納する。
- 方針2：柵の構造は、「電線共同溝マニュアル²⁾」に収録されている柵タイプより採用する。

(1) 通信接続柵

a) 使用目的

小型ボックスの端部・中間部に設置する柵であり、通信ケーブルと電力低圧ケーブルを収容するが、電力高圧ケーブルは収容しない。

b) 構造・内空

通信接続柵は「電線共同溝マニュアル²⁾」に収録されているクロージャ引き上げ方式の通信柵（内空幅 500×長さ 1500×高さ 1050）を採用する。

ただし、柵の端部は維持管理時のケーブル引き上げ・引き下ろしに対応するため、U型構造とする必要がある。

c) 蓋の構造

柵端部のU型構造に合わせて、蓋受枠の端部が脱着可能な構造を採用した。これによりケーブル入線・入れ替え作業時に対応している。

d) さばき部

小型ボックスと通信接続柵の接続部には、ケーブル垂れ下がり考慮した「さばき部」が必要である。参画企業よりケーブル曲げ半径のヒアリングを実施し、図-2に示す幅 400×高さ 1155×長さ 1000 の「さばき部」の形状を決定した。

(2) 電力地上機器柵

a) 使用目的

小型ボックス区間の両端部に設置する電力柵として使用するが、小型ボックスとは直接に接続せず、通信接続柵から電力低圧ケーブル、小型ボックス U 型の下面に配置する電力高圧ケーブルを管路方式で平行に接続する。

b) 構造・内空

小型ボックス区間に使用する電力柵は従来型の管路が接続する管路方式と同じ構造であり、本区間においては内空幅 900×長さ 3000×高さ 1100（機器 2 連）を使用した。

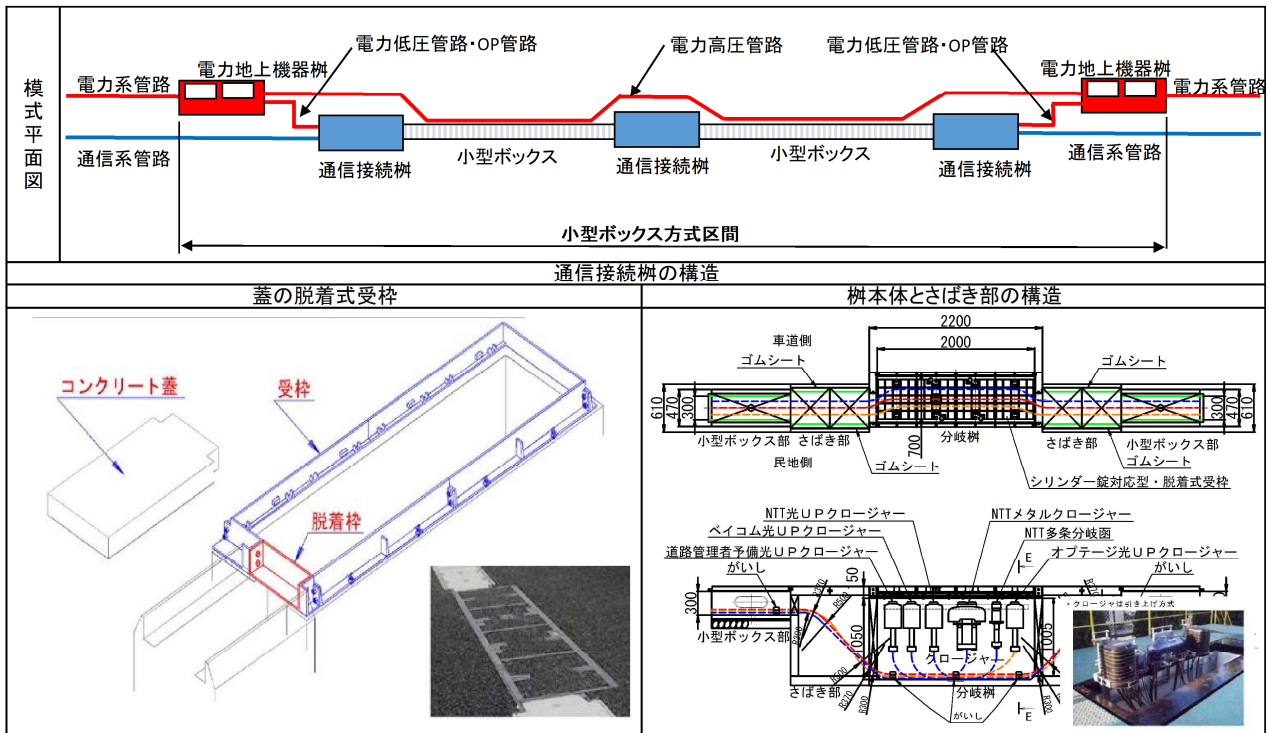


図-2 模式平面図と通信接続柵構造

7. コスト低減効果の検証と今後の小型ボックスの活用

最後に、管路方式（従来管路材）、管路方式（新管路材）、小型ボックス方式における経済比較を実施した。

(1) 直接工事費比較結果

管路方式（従来管路材）に比較して、管路方式（新管路材）と小型ボックス方式は2割強の工事費削減効果が得られた。（表-4）

工事費項目別で考察すると、管路工において管路方式（新管路材）と小型ボックス方式は大きな削減効果が得られている。また小型ボックス方式は特殊部工において管路方式よりコスト増になっており、管路方式（新管路材）と比較して工事費が大きくなる主因となっている。

小型ボックス方式において特殊部工の工事費が管路方式より大きくなる要因は、通信接続柵蓋の脱着式受枠の採用やさばき部の設置である。今後、小型ボックス方式が一般化された場合、蓋やさばき部の低価格化が期待され、更にコスト削減化が図れることが期待できる。

(2) 今後の小型ボックスの活用方法

小型ボックス方式は今後、次のような路線で活用が見込まれ、必要性が高まると思われる。

- ・沿道が土地区画整理地等で建築物が未定な路線
- ・管路方式では支障となる地下埋設物があり、移設が不可能な区間（上空占用の了承が必要）

8. おわりに

小型ボックス本体や柵の内空・構造等については、参画企業に確認・合意が得られているが、加えて実証実験による検証が必要である。

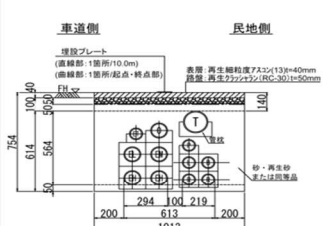
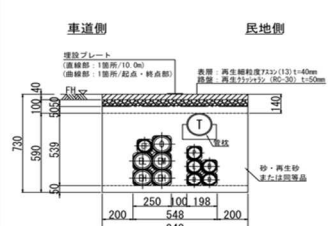
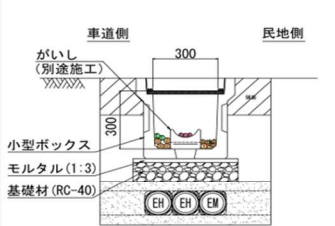
特に通信接続柵内は通信ケーブルと電力低圧ケーブルが輻輳し、柵内でクロージャに接続する通信ケーブルや電力低圧ケーブルの引き上げが可能であるかの検証が求められ、実際にフィールドで柵や小型ボックスを組み立てて、ケーブルを入線し、ケーブルの切り回しや引き下げ引き上げ等、維持管理に問題が無いことの確認を行う必要がある。また、本検討の小型ボックス方式の電力柵は、従来型であるⅡ型（分離型）を採用しており、小型ボックスの端部にのみ設置可能である。今後、小型ボックス方式を汎用的に使える方式とするには、小型ボックスの中間部に配置可能な通信ケーブルと電力低圧ケーブルを収容する電力柵構造の検討が必要であり、「電線共同溝マニュアル²⁾」の改訂とともに、このことに配慮した構造検討に取り組む必要がある。

謝辞：本稿の執筆にあたっては、調整会議に参加頂いた参画企業者様および担当者様、「兵庫国道事務所管内無電柱化協議資料作成業務」の受注者である（株）近代設計様に多大なるご協力をいただきました。この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 道路の無電柱化，低コスト手法導入の手引き（案）Ver.2 H31.3. 国土交通省道路局環境安全・防災課
- 2) 電線共同溝マニュアル 令和2年1月近畿地方整備局道路管理課

表-4 工事費比較（直接工事費）

延長		延長約L=260m、電力機器柵4箇所・通信接続柵6箇所		
整備方式	管路方式		小型ボックス方式	
	従来管路材(SVP・PV・FA管)	新管路材(FEP・FA管)		
標準断面				
工事費 (直接)	管路工	1.6千万円	1千万円	0.9千万円
	特殊部工	0.55千万円	0.55千万円	0.8千万円
	土工	0.2千万円	0.2千万円	0.16千万円
	舗装工	0.05千万円	0.05千万円	0.04千万円
	合計	2.4千万円 (100%)	1.8千万円 (75%)	1.9千万円 (79%)
m当たり工事費	93千円/m	71千円/m	73.4千円/m	

環境に配慮した土留材の引き抜き工法について

西 靖彦

CPA西技術士事務所 代表 (〒569-1115大阪府高槻市古曾部町2-18-6)

環境に配慮しSDGSに貢献する仮設工法として、鋼矢板等の鋼製の土留杭を周辺地盤の沈下を抑制しながら引き抜くことを可能とした工法で、全国で約400件、近畿管内においても新名神高速道路等において約50件の実績があります。高規格道路や鉄道、都市部のビル等の民間建物への近接施工において周辺地盤の沈下を抑制し安全に引き抜くことができ、鋼材のリサイクル、コスト縮減、地下空間の有効活用などが可能です。存置された土留杭除去による道路陥没防止、同時充填による河川堤防の危険性排除や土壌汚染拡大抑止も可能となります。

キーワード SDGS, リサイクル, 地盤沈下抑制、近接施工、コスト縮減、地下空間有効活用

1. 土留部材引抜同時充填工法とは

本工法は、仮設の鋼矢板、鋼管矢板、仮設栈橋のH杭、既設杭などの杭を引抜く場合の沈下対策の特許工法です。

本工法専用の充填材を引抜ながら同時に充填することで、引抜後も周辺地盤にほとんど影響を及ぼさず、安心して撤去できるようになりました。

本工法は、軟弱地盤はもちろんのこと、あらゆる地盤条件、引抜き方法において採用可能です。

近年は集中豪雨による大災害が頻発していることもあり、河川やため池堤防における仮設工事において、水みちを作らないオンリーワン対策工法として河川管理者にも注目されています。水中での施工も可能です。

さらに土壌汚染修復工事の分野でも汚染物質の移動を遮断する方法として施工実績が増えています。

図1は、充填完了後の状況です。これは鋼矢板ではありません。本工法により生成されたものです。

鋼矢板引き抜き後の空洞に瞬時に充填剤が充填され、固化したことで矢板の形状をなしているものです。

隙間を確実に埋め合わしている状況が確認できます。

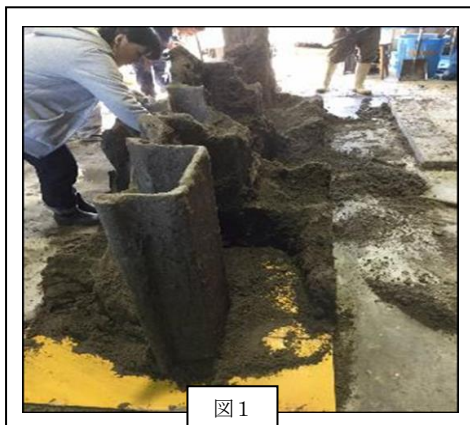


図1

2. 鋼矢板引き抜きの周辺地盤への影響

図2は、鋼矢板設置から引き抜きまでの期間における周辺地盤の沈下量を示したものです。

引き抜き時の沈下量は、大きく、距離ゼロ地点では、埋戻し時の7cmに対し17cmと約2.5倍の沈下が発生しています。その差は距離20mでは更に広がり、埋戻し時1cmに対し、引き抜き時4cmと4倍の沈下が発生しています。また、沈下の影響範囲も、掘削・埋戻し時は山留壁から10mを超えるとほぼ終息しているのに対し、引き抜きによる沈下は、40m離れた地点にならないと終息せず、30mでも2cmの沈下量が発生しており、近接家屋等に与える影響の大きさを示しています。

図3は、沈下量を時系列で示したものです。

矢板引き抜き時の230日あたりから急速に沈下量が大きくなっていることが確認できます。距離ゼロ地点では、230日から20日間で7cmから15cmと沈下量が急増（沈下速度＝8cm/20日＝0.4cm/日）しており、掘削から引き抜きまでの沈下速度（7cm/230日＝0.03cm/日）と13倍の沈下速度となっています。鋼矢板引き抜きによる沈下が、その影響範囲、沈下速度ともに、掘削、埋戻しの数値を大きく上回っており、施工地に近接して家屋や鉄道などがある箇所においては、家屋の沈下や鉄道施設への影響が大きく懸念され、未対策の場合の事業損失や家屋への損害賠償へのリスク回避として本工法による対策があります。

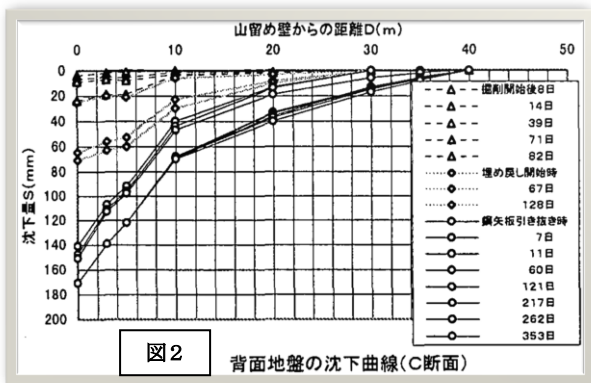


図2 背面地盤の沈下曲線(C断面)

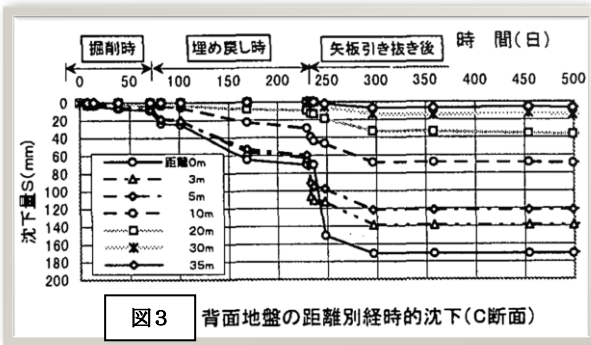


図3 背面地盤の距離別経時的沈下(C断面)

出典：鋼矢板引き抜きの周辺地盤への影響 堀内孝英 他 土木学会

3. 工法の原理

本工法では、まず充填菅を鋼矢板に沿わせて据付けておき、施工機械によって一定の長さ（50cm）ごとに引拔を行い、空隙が生じる度に充填菅から充填剤を充填します。この作業を鋼矢板が全て引き抜かれるまで繰り返します。充填された充填剤は約1分でゲル化して空隙を埋めるので、半永久的な地盤対策が可能となります。

充填剤が空隙に入っているイメージを現したのが、図4ですが、ここにこの工法の原理があります。鋼矢板を50cm引きあげると、鋼矢板が占めていたスペースが空洞となり、その空間は負圧状態となり、空洞周辺の土粒子や水分、空気はその空間へ引き寄せられようとします。

その際、周辺土壌が挙動するより早く、引き抜きと同時に水より密度の高い充填剤を負圧と同レベルの圧力で注入させます。この結果、負圧のかかった空間のみに充填剤がいち早く充填されることとなり、不要な土壌への圧入も発生させず、鋼矢板の形状をした空間が充填剤で満たされ、数分で固化し、充填剤の鋼矢板が発生することとなります。このことが、周辺地盤の沈下発生を生じさせる余地を無くす本工法の原理です。

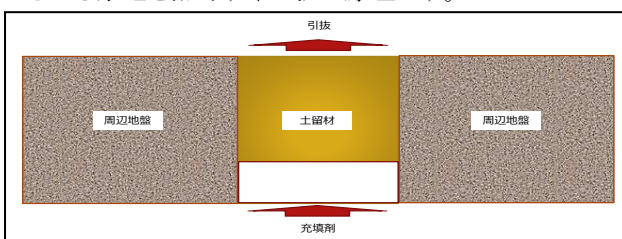


図4

4. 充填剤の特性

充填剤は、本工法用に独自に開発された恒久的なセメント系注入材の一つで、2液を混合することで約1分のゲルタイム（流動性がなくなる時間）でゼリー状に固まります。約3時間で人が乗っても壊れない硬さが得られ、強度発現も早いのが特徴です。下図に示すとおり、最終的にはN値15～30程度なので、将来的な地下空間を活用した他工事の地中障害物にもなりません。

また、収縮もしないことから地下水の流路となる恐れもありません。施工方法は、図5の2液を別々のホースでロッドの先端まで供給し、先端モニター内で混合していきます。

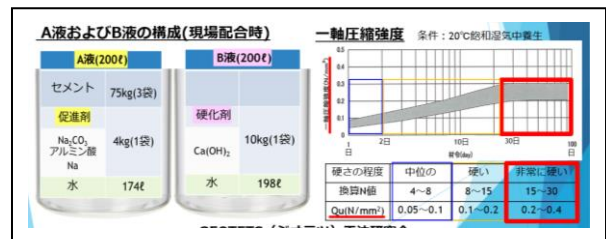


図5

5. 施工法

本工法には、充填菅の設置方法により2つの工法が存在します。鋼矢板を打ち込む前に充填菅を溶接固定しておくYT-1工法と、鋼矢板の打ち込み後、鋼矢板の直近でボーリングマシンにて削孔し、充填菅を据付けるYT-3工法の2工法があります。YT-1工法は削孔の必要がないため、削孔しがたい固い地盤に対し施工性に優れています。YT-3工法のメリットは、打ち込みが終わっている鋼矢板に後付けで施工することができる点です。

現場条件の検討によりいずれかの工法を選択することとなります。（図7参照）

充填菅は、鋼矢板一枚ごとに必要になるわけではなく、図6のように、一本の充填菅で6枚の鋼矢板充填が可能です。開発当初は、2枚程度でしたが、宮崎大学との合同研究、施工実績等により6枚まで可能となり、コストも大きく縮減されました。

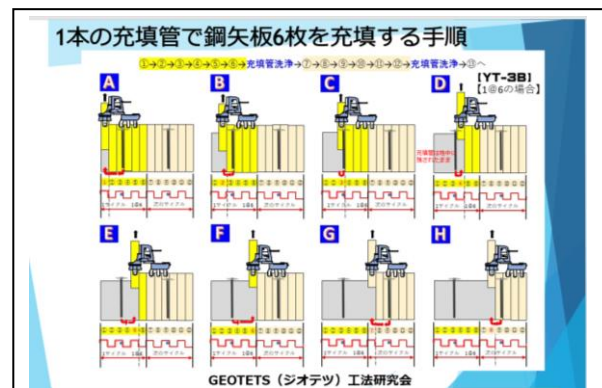


図6

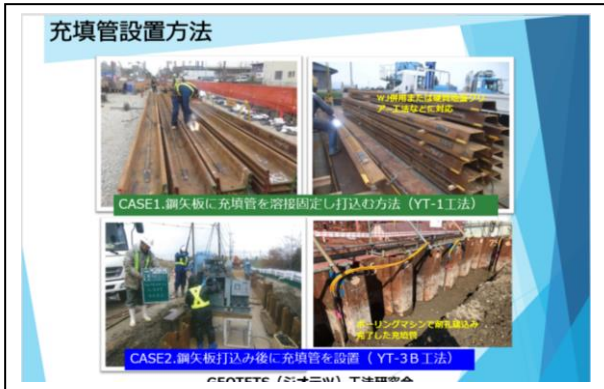


図7

5 他工法との比較

従来より、杭引き抜きによる沈下対策としては、引き抜き完了後に、後を追う形でCB等の充填剤を注入する方法がありますが、図8に示すように、引抜作業と近接しての施工はできないため、引抜後、数時間以上経過してからの充填となり、そのロスタイムに地中の引抜き後の孔壁は、空洞が地上までつながり負圧解放された状況となり、周辺土壌の空洞への側方流動が進み、空洞に崩壊しながら流入し、空洞が土壌で埋まっていきます。

その結果、徐々に孔壁周辺の地盤から緩みが始まり、しいては地盤面の沈下へとつながります。

ですので、すでに沈下の始まりを許した状態からの充填開始となり、密度も上がり負圧もなくなった状態に充填していくこととなります。当然、加圧が必要となり、かつ充填時間も長くなり、その充填範囲の把握も推測が困難ですし、効果を発現させるための所要量の把握もしにくいものと言えます。

本工法は、引抜直後のオンタイムで負圧発生直後に流動性の高い充填剤を孔壁が崩壊する前に空洞に充填させるために、瞬時に上記従来工法の課題を解決していただくことが可能となります。充填剤は、ゲルタイム1分なので、側方の土壌の土圧に変形されずに硬化が進み、かつ長期的にも収縮しない材質を有していますので、周辺地盤の緩みや沈下を大きく抑制することが可能な工法です。

比較項目	従来工法 (横道い器液注入)	新工法 GEOTETS工法
①材料種別	CB (又は急結CB)	本工法専用の充填材
②充填注入剤	すぐに固まらず、収縮する (1分ゲルタイム (例的に収縮せず長期的に安定、1分で固まる 0.5N/mm2程度))	恒久的に収縮せず長期的に安定、1分で固まる 0.2N/mm2程度、地下障害物にならないように強度をコントロールしてある。
③対策概要	CBを注入し、引抜き直後に地盤に対して	乱れる前の地盤に対して引抜きと同時に
④充填 (注入) のタイミング	引抜き直後に地盤に対して	乱れる前の地盤に対して引抜きと同時に
⑤充填 (注入) の特徴	圧力を掛けてゆっくり押込む	負圧を利用して、余分な圧力は掛けずに早く多量に
⑥充填注入管	引抜き箇所から安全距離を確保した上で、後を追いかけてボーリングマシンを移動させながら設置	引抜き前日までに事前に設置しておく、1@6が標準
⑦充填 (注入) 量	どれだけの注入量になるかやってみないと全く分からない。予測不能	豊富な施工実績データに基づき、施工条件に応じた適切な量で計画できる。

図8

6. 公共事業実施による事業損失を未然に防ぐ

例えば、家屋に近接して河川改修工事を実施する場合、改修工事完了後、時間の経過とともに杭の引抜による地盤沈下が発生するリスクがあります。2.で示した土木学会での発表のとおり、引き抜き箇所から最大30mの範囲まで沈下影響の可能性があるため、完成後、河川周辺の家屋から家屋の傾斜やひび割れ等の被害の報告があり、事業損失補償をめぐる、因果関係を立証する手段も見当たらず、訴訟となる可能性があります。

また、道路下にボックスカルバートを敷設する工事の場合にも、敷設工事完了後、道路内に残存物件は認められないので引き抜くこととなりますが、沿道家屋、さらに背後地の家屋にまで、時間の経過とともに地盤が沈下し、特に背後地の家屋には事前顔育調査をしていないケースもあり、因果関係が示せず訴訟となる可能性があります。さらに新設ボックスカルバートについても、カルバートより深く打ち込んでいた杭の引き抜きにより、カルバート本体が沈下するケースがあります。水路構造物の場合、逆勾配になるなど流水機能が満たされなくなり、再構築しなくてはならない可能性もあります。

また、このような沈下を恐れて、やむなく上部のライフライン等の占用空間のみ切断し、それより深い部分は残す場合がありますが、将来的な地下空間計画の支障物となるだけでなく、図9のとおり、止水性の異なる土留材に沿って地下水の流路が生成されるケースもあり、この場合、夏季には、空洞化により供用中の道路面が陥没し、重大事故につながるリスクがあります。

このように様々な事業損失、もしくは社会的な損害の発生を未然に防ぐために、速やかに土と同等の材質で復し、沈下の余地を与えない本工法による事前対策は、長期的に見てもトータルコストを大きく軽減しますし、長期化する損害補償訴訟や道路管理瑕疵などを引き起こすことを防ぎ、安定した公共財の提供となります。

また、過去に様々な要因で存置せざるを得なかった杭についても引抜が可能ですので、道路面下の空洞調査を実施し、その進捗状況が激しいケースへの対応として本工法による残存物の除去と同時充填は、リスク回避として有効な手段となります。

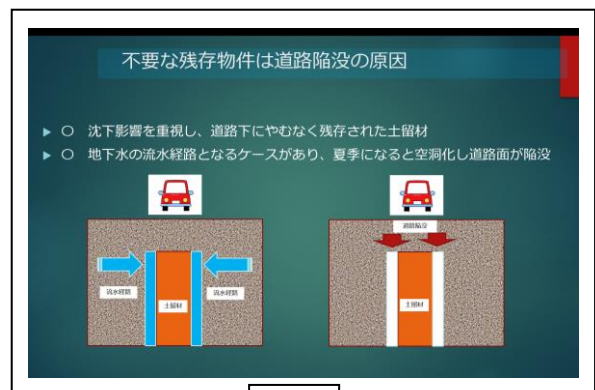


図9

7. 河川堤防の崩壊を防ぐ

河川区域内で道路橋や鉄道橋、河川施設、公共下水道施設、農業用施設などの工事を実施する場合、河川堤体内に新たに橋台や放流堰、そして仮設橋などの仮設構造物を設置することになり、土留杭を堤体内に打設し、最終的に引き抜くこととなります。

ここでも、最近、杭引き抜き後の堤体内の安定度を高め、堤体崩壊を防ぐ手法として本工法が注目されています。下図に簡単な崩壊へのイメージ図を示していますが、杭引き抜きによる連続した空隙の空間が、十分な充填や補強がなされていない場合、時間の経過とともに地下水の流路が形成され、最悪の場合、河川内の流水につながる流路となり、堤体が崩壊するリスクがあります。

本工法では、土留材の引抜き時に瞬時に空洞を充填し、早期にその強度も周辺土壌と同程度になり、長期的にも収縮が発生しませんので、図10のような流水経路が形成されるリスクを大きく軽減することができます。

昨年7月の前線豪雨による球磨川の崩壊など、昨今の集中した短時間での豪雨による災害では、東北や九州での大規模河川の堤体崩壊など、従来の基準を超えた崩壊モデルを目のあたりにしており、その更なる強靱化が求められています。堤体崩壊による被災影響は甚大なものとなりますので、日常的にその安定性を確保していくことが必要ですので、河川区域内工事による下図のような崩壊モデルを事前にリスク回避できる本工法の有効性が評価され、施工事例も急増しています。

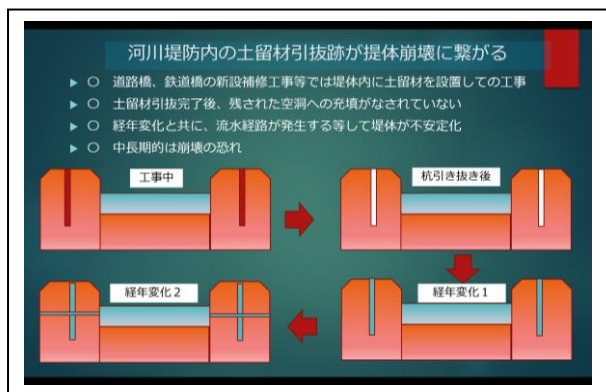


図10

8. 土壌汚染土対策 SDGSへの取り組み

地下に浸透する汚染物質に対し、地下水脈に載った周辺地盤への浸透影響を敷地内で防ぐ手段として本工法の適用事例が増えてきています。図11に示すように、汚染源から浸透移動する汚染物質水に対し、本工法による充填剤で構築された止水壁で囲い込むことで周辺への浸透を抑止することが可能です。図のように深部の難透水層が存在する場合には、その層まで突入させることで

らに浸透抑制効果は高まることとなります。従来は、鋼製の止水構造を地下に構築するなどの方法によるものですが、本工法を実施し、短期に充填剤で構築する矢板が連続することで、コストは大きく削減され、鋼製や板を繰り返し利用することで対策が可能となります。

止水性は、周辺土壌の間隙率等により左右されるので、充填剤の材質、補給量やその圧力調整による、対象土壌別の対策が必要となりますが、不要な資材を残さない本工法の適用は、SDGSへの取り組みとして環境対策上、有効です。また、本対策は、公共事業実施に伴う、農地の水枯れ、さらに井戸水の水枯れなどの補償工法としての利用にも活用の余地を残しており、いずれも自然環境の保全にもつながるSDGSな工法です。

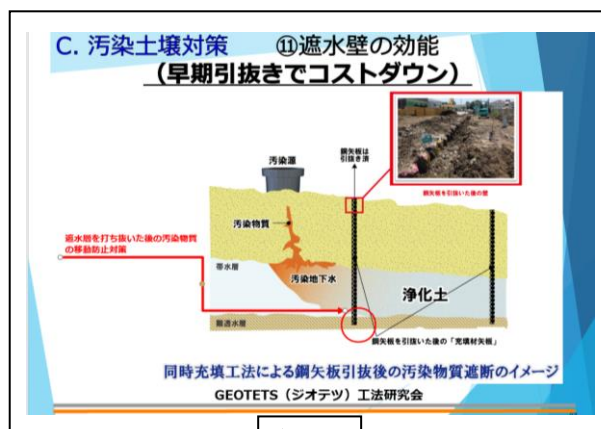


図11

9. 施工実績

図12に施工実績一覧及び本工法の特許内容を示しています。また目的別施工実績数を以下のとおりです。

- 1) 近接施工 231件
 - ① JR線軌道隣接、軌道近接
 - ② 民家に近接
 - ③ 地中障害物撤去時ビル近接
 - ④ 幹線道路（埋設管）
 - ⑤ 主要な生活道路と橋脚
 - ⑥ 下水道幹線の更新
 - ⑦ 杭基礎への影響抑止(水中施工)
 - ⑧ 道路防災工事
- 2) 堤防の水みち対策 150件
 - ① ため池/H杭引抜き(水中施工)
 - ② 一級河川堤防
- 3) 汚染土壌対策 15件
 - ① 遮水壁の効能
- 4) 既成杭の引抜 2件
 - ① 民家近接、河川堤防
 - ② 杭の引抜跡



図12

10. 宮崎大学との共同研究

本工法は、GEOTETS工法研究会と宮崎大学との共同研究により開発されたもの（開発時の工法名は土留部材引抜同時充填工法）です。図13のとおり、宮崎大学で実施した検証実験では、大規模な試験施工を実施しました。鋼矢板を圧入し、固化した充填剤を掘り出して地盤沈下などの抑制効果を確認しており、また1で記載した図1のとおり、充填剤でできた矢板形状を確認して大規模な試験施工を実施しており、鋼矢板を圧入し、固化した充填剤を掘り出して地盤沈下などの抑制効果を確認しており、また1で記載した図1のとおり充填剤でできた矢板形状を確認しています。



図13

11. 今後の研究課題

これまでの施工地で得られた地盤変形に関するデータの数値解析によるモデル化、統計的解析による評価や要因分析を進め、本工法の更なる機能向上につなげることとしている。また、周辺地下水の浸透性能の把握や透水機能の変化の分析にも着手し、止水性の向上に適した充填剤の開発にも着手し、適用範囲を広げ、さらにSDGSに貢献できる工法となるよう進めていく予定である。

環境に優しく防災に強い！港湾構造物における リサイクル骨材の適用促進への挑戦

千葉 大輝

近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 設計担当

(〒651-0082 兵庫県神戸市中央区小野浜町7番30号)

港湾構造物では波浪に対する構造物の安定性の確保は当然のことながら、環境負荷低減の観点からリサイクル骨材の利用促進が望まれている。その中で、銅スラグ細骨材（CUS）は高密度の特徴を有する。港湾構造物の場合、自重を増すことで波浪に抵抗することができる高密度コンクリートの方が望ましい場合があり、近年強大化している台風等への対策の一助と考えられる。一方で近畿地方はかねてより天然骨材の不足が問題視されている。これらの背景を受け、港湾空港技術研究所と連携し、2017年（平成29年度）から4年をかけてCUSを多量に用いた高密度コンクリートの港湾構造物への適用性について検討した。

キーワード 港湾構造物，リサイクル骨材，銅スラグ細骨材

1. はじめに

本研究は、港湾・海岸におけるコスト削減、天然資源に替わる再生材料利用や環境への配慮のために、近畿地方整備局管内の港湾・海岸整備において、リサイクル骨材を用いたコンクリートの港湾・海岸構造物への適用性に関する検討を行うことを目的としている。

現在、近畿地方整備局管内の港湾・海岸整備では、リサイクル骨材を用いたコンクリートはほとんど使用されていない。コストが高い、性能や使用するメリットが不明確等が主な理由である。リサイクル骨材は全国で種々なものがあるが、本研究では、近畿地方で入手が容易な産業副産物である銅スラグ細骨材（CUS）¹⁾²⁾を主たる検討対象とし、港湾・海岸構造物におけるリサイクル骨材を用いたコンクリートの適用性に関し、以下の2項目について検討する。

（1）リサイクル骨材を用いたコンクリートの港湾・海岸構造物への適用性の検討

- ① 2017年（平成29年度）に無筋コンクリートブロック試験体を製作し、海水シャワーを用いた暴露試験を行いコアを採取し、調査（強度確認、塩化物イオン浸透抵抗性確認、内部組織の劣化状態の確認等）を行う。
- ② 2019年（令和元年度）に無筋コンクリート円柱試験体を製作し、海水循環干満帯水槽を用いて暴露試験を行い調査（強度確認、塩化物イオン浸透抵抗

性確認、内部組織の劣化状態の確認等）を行う。

（2）リサイクル骨材を用いたコンクリートによる実構造物の安定性の検討

リサイクル骨材の使用によるコンクリートの比重の増加が、防波堤等の断面に及ぼす影響について試算する。

2. 銅スラグ細骨材

(1) 概要（近畿地方での最近の動向）

銅スラグ（図-1）は、銅製錬の際に銅精鉱を処理する溶錬炉で発生するスラグである。現在は、国内4製錬所（小名浜製錬所、玉野製錬所、東予工場、佐賀関製錬所）で製造されている。銅スラグは、密度が大きく粒度は砂と同等であり、水硬性もほとんどない。このような特徴からコンクリート用骨材、本土工中詰材、地盤改良工（サンドコンパクションパイル工法）などの地盤材料、アスファルト混合物用骨材などの舗装工材料として利用されている。



図-1 銅スラグ細骨材

コンクリート用細骨材としては既に JIS 化されている。また、最近では、近畿地方では利用普及に向けた動きがあり、日本コンクリート工学会近畿支部において、2016年から「銅スラグ細骨材の土木用コンクリートへの適用に関する研究専門委員会」が設置されている。近畿管内においては以下の3つの生コンプラントにおいて、「銅スラグ細骨材 (CUS2.5: 東予工場製)」を常備しているとのことである。

- ・ワールド (株) (大阪府茨木市宮島3丁目3番27号)
- ・大開産業 (株) (兵庫県小野市大開町100番地)
- ・大弘平和共同プラント (和歌山市湊1342-4)

(2) 銅スラグ細骨材を用いた示方配合

銅スラグ細骨材を用いた示方配合を表-1に示す。鉄筋コンクリート想定的小型ケーソン試験体はW/Cを50%とし、普通細骨材と普通粗骨材を用いたN-N_50.0と、普通細骨材をCUSに容積比25%置換したCUS25-N_50.0とした。無筋コンクリート想定のパラペット試験体はW/Cを60%とし、普通細骨材をCUSに容積比25%及び100%置換したCUS25-N_60.0及びCUS100-N_60.0とした。表中の単位体積重量(kg/m³)について、小型ケーソン試験体の方では、N-N_50.0に比べてCUS25-N_50.0は約3.0%増加しており、パラペット試験体ではCUS25-N_60.0に比べてCUS100-N_60.0は約11.2%増加している。以上のことから、高密度の銅スラグ細骨材を多く用いるほどコンクリートの単位体積重量は普通細骨材を用いるよりも大きくなることが明らかである。

3. 環境安全品質

(1) 溶出量試験値

環境安全品質基準²⁾に設定された化学物質について、JIS K 0058-1による溶出量試験を行った結果の一例を表-2に示す。全ての項目について基準値未満又は定量限界未満であった。

表-1 銅スラグ細骨材を用いた示方配合

試験体	記号	水セメント比	細骨材率	単位量(kg/m ³)								単位体積重量(kg/m ³)
				工業用水 W	高炉B種 C	海砂 S1	砕砂 S2	CUS2.5 S3	砕石150φ G1	砕石2010φ G2		
小型ケーソン	N-N_50.0	50%	43.4	170	340	374	377	0	445	546	2252	
	CUS25-N_50.0	50%	43.4	170	340	282	284	252	445	546	2319	
パラペット	CUS25-N_60.0	60%	44.7	172	287	297	299	266	445	546	2312	
	CUS100-N_60.0	60%	51.0	170	283	0	0	1236	398	484	2571	

表-2 銅スラグの溶出量試験結果の一例 (mg/L)

製造所区分	A	B	C	D	E	基準値 (一般用途)	基準値 (港湾用途)
骨材種類	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	(一般用途)	(港湾用途)
カドミウム	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	≦0.003	≦0.009
鉛	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
六価クロム	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.05	≦0.15
ひ素	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	≦0.0005	≦0.0015
セレン	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01	≦0.03
ほう素	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	≦1.0	≦20
ふっ素	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	≦0.8	≦15

表-3 銅スラグの含有量試験結果の一例 (mg/kg)

製造所区分	A	B	C	D	E	基準値 (一般用途)
骨材種類	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	CUS5-0.3	(一般用途)
カドミウム	34	<15	<15	<15	<15	≦150
鉛	630	940	230	200	440	≦150
六価クロム	<25	<25	<25	<25	<25	≦250
ひ素	270	50	390	250	230	≦150
水銀	<1	<1	<1	<1	<1	≦15
セレン	<15	<15	<15	<15	<15	≦150
ほう素	<400	<400	<400	<400	<400	≦4,000
ふっ素	<400	<400	<400	<400	<400	≦4,000

(2) 含有量試験値

環境安全品質基準に設定された化学物質について、JIS K 0058-2に基づく含有量試験値の一例を表-3に示す。六価クロム、水銀、ほう素、ふっ素は定量限界未満であった。一方、ひ素と鉛は、一般用途における基準値より高くなっていた。

以上のことから、「一般用途」として使用する場合は、他材料との混合利用が前提となる。一方、含有量に関する基準が適用されない港湾用途においてはそのまま使用することができる。ただし、含有量に関する基準値の10倍未満であることを確認されたものを使用する必要がある。

4. 長期耐久性の検討

港湾構造物の長期耐久性において、最も重要なのは塩害に対する抵抗性である。塩害とは鉄筋腐食により鉄筋欠損及びコンクリートのひび割れ・剥離を指す劣化現象である。本研究では、2017年(平成29年度)及び2019年(令和元年度)に製作した試験体を調査し、高密度スラグ骨材を用いたコンクリートの塩分浸透抵抗性の調査を行った。

(1) 長期暴露試験

ブロック試験体を、港湾空港技術研究所の海水シャワー暴露場に設置した。海水シャワー暴露場とは、屋外



図-2 海水シャワー場（飛沫帯を模擬）

に設置された、飛沫帯を模擬する試験施設である。その外観写真を図-2に示す。ポンプにより久里浜湾（神奈川県横須賀市）より採取した実海水を用い、3時間の試験体への散水と、9時間の乾燥を1日に2回繰り返す環境である。

本研究では、2017年（平成29年度）に製作した海水シャワー暴露場に2.6年間暴露した「ブロック（300*800*高さ600mm）」から鉛直方向にコアを採取し、塩化物イオン濃度及び圧縮強度等の調査を実施した。

(2) 塩化物イオン濃度分布

a) 塩化物イオン濃度分布（見かけの拡散係数Dap）

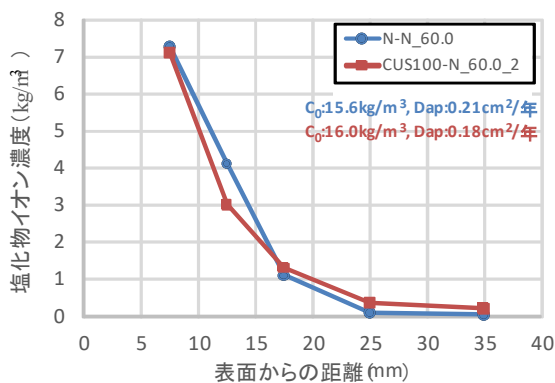


図-3 平成29年度ブロック試験体の塩化物イオン濃度分布

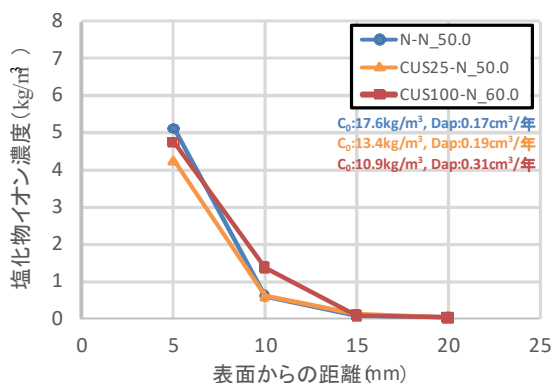


図-4 令和元年度コアの塩化物イオン濃度分布

2017年（平成29年度）に製作したブロック試験体から採取したコアから得られた塩化物イオン濃度分布を図-3に示す。また、2019年（令和元年度）に製作した小型ケーソン及びパラペット試験体から採取したコアから得られた塩化物イオン濃度分布を図4に示す。

図-3は、暴露2.6年目における塩化物イオン濃度分布である。塩化物イオンの浸透深さは、N-N_60.0及びCUS100-N_60.0は17.5mm程度まで認められた。また見かけの拡散係数 D_{ap} （以下、 D_{ap} ）は、N-N_60.0, CUS100-N_60.0の順に0.21cm²/年、0.18cm²/年となり、高炉セメントB種による優れた塩分浸透抵抗性と、CUSの使用による塩分浸透抵抗性の向上が見られた。ただし、後者はブリーディングによる実質的なW/Cの低下が原因である可能性があり、CUSが直接の原因となるかは不明である。

図4は、暴露0.67年目の塩化物イオン濃度分布である。塩化物イオン浸透深さはどの配合も深度15mmのスライス（12.5~17.5mm）が微増していることから、少なくとも12.5mmまでは浸透していたものと考えられる。 D_{ap} は、N-N_50, CUS25-N_50, CUS100-N_60の順に0.17cm²/年、0.19cm²/年、0.31cm²/年となった。N-N_50及びCUS25_50の比較から、銅スラグを25%程度の使用は初期段階における D_{ap} に大きな影響を与えないと考えられた。CUS100-N_60はW/Cが他の2配合と異なるため比較はできないが、暴露0.67年目での D_{ap} が0.31cm²/年という数値は非常に低く問題ない数値であることから、CUSを100%使用した場合でも問題がないと考えられた。

図-5は、図-3および図-4から得られた D_{ap} と、「港湾施設の技術上の基準・同解説⁵⁾（以下、港湾基準）」

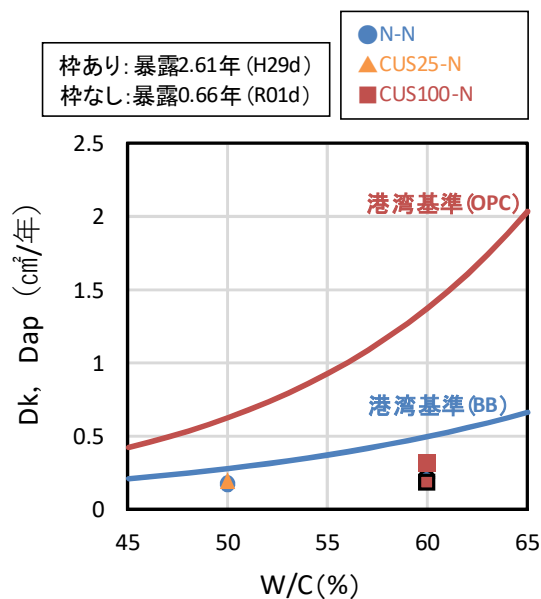


図-5 W/CとDkおよびDapとの関係

に記載されている塩化物イオン拡散係数の特性値 D_k (鉄筋腐食開始時期の予測に用いられる) との比較を行ったものである。以下に OPC (普通ポルトランドセメント) の場合の式を(1a), BB (高炉セメント B種) の場合の式を(1b)と示す。図-5では, それぞれを港湾基準 (OPC), 港湾基準 (BB) と記載する。

$$\log_{10} D_k = 3.4(W/C) - 1.9 \quad (1a)$$

$$\log_{10} D_k = 2.5(W/C) - 1.8 \quad (1b)$$

図-5より, D_{ap} は港湾基準 (BB) 以下であることが確認できた。港湾基準 (BB) は普通コンクリートの D_{ap} を数多く収集し, それらから最も誤差が少なくなるように算出されたものである。したがって, 高密度スラグ骨材を用いた場合においても, 塩化物イオン濃度浸透抵抗性については, 普通コンクリートと同程度であると考えられた。

b) 中性化深さ

暴露2.6年における中性化深さを表4に示す。中性化深さはN-N_60.0が0.67mm, CUS100-N_60.0_2が0.50mmであった。このことから, 中性化に対する抵抗性については, 高密度スラグ骨材を多量に用いても, 普通コンクリートと同等程度の性能を有していると考えられた。

(3) 圧縮強度

2017年 (平成29年度) ブロック試験体から採取したコアの圧縮強度の結果を図-6に示す。W/Cは同一ではあるものの, CUS100-N_60.0がN-N_60.0よりも高い傾向を示した。これは, ブリーディング量の違いにより, CUS100-N_60.0の実質的なW/Cが60%よりも小さくなっている可能性が挙げられる。ただし, 実質的なW/Cは不明ではあるが, 強度の増進がN-N_60.0より大きく, 少なくとも普通コンクリートと同等以上の性能を有していると考えられる。

表4 中性化深さ

	平均
N-N_60	0.67mm
CUS100-N-60_2	0.50mm

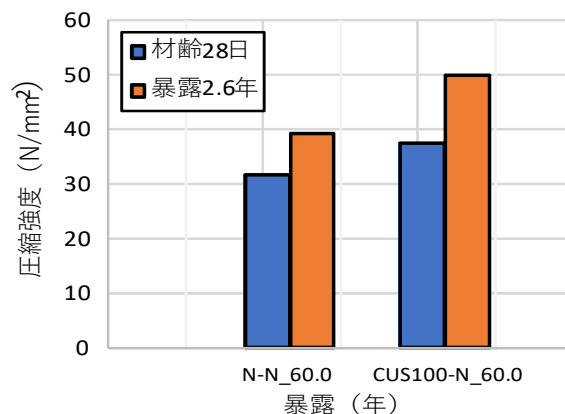


図-6 圧縮強度

(4) 長期耐久性のまとめ

塩化物イオン浸透抵抗性に関して, 高密度スラグ骨材を多量に用いたコンクリート (以下, 高密度リサイクルコンクリート) は, 普通コンクリートと同程度の D_{ap} を示した。

圧縮強度については, 暴露2.6年において, 高密度リサイクルコンクリートは, 普通コンクリートよりも高い圧縮強度となる傾向を示した。これは, 高密度スラグ骨材を用いた場合にはブリーディング量が多くなるため, 実質的なW/Cが低下したことが原因である可能性もある。ただし, 強度の増進は普通コンクリートより大きく, 圧縮強度については普通コンクリートと少なくとも同等程度の性能を有していると考えられる。

5. 安定性の検討

前章の各種試験により, 高密度リサイクルコンクリートは, フレッシュ性状を管理することができれば, 使用に問題ない可能性が示された。したがって, 次の段階の検討として, 高密度リサイクルコンクリートを使用した場合に, 実構造物の安定性等に及ぼす影響について把握しておく必要がある。

そこで, 防波堤断面の一部にCUSを適用することで, 安定性に及ぼす影響を, 簡易な検討により確認した。

(1) 対象断面

設計の対象断面は, A 港の現断面 (図-7) とした。高密度リサイクルコンクリートを使用する部分には, 上部工及び遊水室直下の隔室内の中詰材 (図-7 中赤点線囲み) を選定し, 両方を高密度リサイクルコンクリートに変更したケースを検討する。

(2) 検討内容

検討項目は、滑動、転倒、基礎の支持力、円弧滑りの4項目とした。

(3) 検討結果

ここでは、パラペット天端を増加させた際の影響（設

計波高を増加させた際の影響）を検討した。安全率の計算結果を表-5に示す。

中詰材および上部工を高密度リサイクルコンクリートに変更した場合、重量が増加した結果、必要なマウンド幅が狭くなり、パラペットの天端を現状+1.0mまで引き上げることができる計算結果となった。

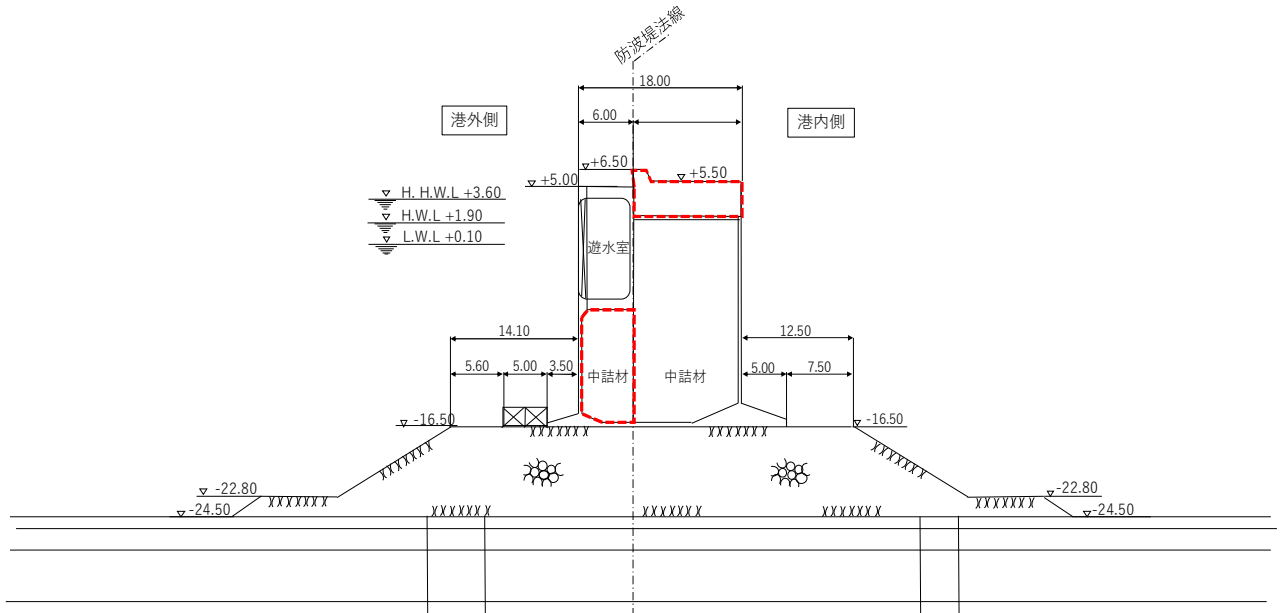


図-7 設計対象断面（赤：上部工，遊水室直下の隔壁内の中詰材）

表-5 安定性の検討結果

天端高	パラペット天端高 D.L.+6.50m	パラペット天端高 D.L.+7.00m	パラペット天端高 D.L.+7.50m	パラペット天端高 D.L.+8.00m
標準断面図				
滑動	1.373 > 1.2・・・OK	1.361 > 1.2・・・OK	1.350 > 1.2・・・OK	1.342 > 1.2・・・OK
転倒	2.255 > 1.2・・・OK	2.213 > 1.2・・・OK	2.175 > 1.2・・・OK	2.142 > 1.2・・・OK
基礎の支持力 マウンド幅 変更なし(7.50m)	1.034 > 1.0・・・OK	1.021 > 1.0・・・OK	1.008 > 1.0・・・OK	0.997 < 1.0・・・NG
基礎の支持力 マウンド幅変更あり	必要マウンド幅5.5m 1.010 > 1.0・・・OK	必要マウンド幅6.5m 1.009 > 1.0・・・OK	現況マウンド幅7.5mの条件では滑動及び転倒は安全率を満たしているが、基礎の支持力が安全率を満たしていない。基礎の支持力を満足させるにはマウンド幅が8.5m必要となる。	
評価	マウンド幅が5.5mの時点で滑動、転倒、基礎の支持力が安全率を満たしている。	マウンド幅が6.5mの時点で滑動、転倒、基礎の支持力が安全率を満たしている。		

6. おわりに

本研究は2017年（平成29年度）から2021年（令和2年度）において、一連を港湾空港技術研究所に委託していたものである。

港湾・海岸におけるコスト縮減，天然資源に替わる再生材料利用や環境への配慮のために，高比重である銅スラグを骨材とした高密度コンクリートの適用性について検討した。

結果としては，港湾・海岸構造物において高密度コンクリートは少なくとも普通コンクリートと同等以上の性能を有していると考えられる。また，実構造物の安定性に及ぼす影響についてはパラペットの天端を現状+1.0mまで引き上げることができる計算結果となった。

以上の事から，波浪に対する構造物の安定性が向上し，

パラペット天端高を増加させた場合でも安定性を保持することができるため，現況の天端を嵩上げし越波量を減少させることによって構造物の粘り強い化につながると思われる。

今後，港湾空港技術研究所資料及び各種マニュアル類への成果の反映と，各種暴露試験体の試験継続を予定している。

参考文献

- 1) 土木学会：銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計施工指針，コンクリートライブラリー147，2016.
- 2) 国土交通省港湾局，航空局：港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン（改訂）2018.
- 3) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾・空港工事における非鉄スラグ利用技術マニュアル 2015.
- 4) 山路徹：海洋に位置するコンクリート構造物の耐久性能照査手法に関する研究，港湾空港技術研究所資料No.1232，2011.
- 5) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説 2018.

鉛を含む塗膜の素地調整工法について

宝塚土木事務所 道路第2課 職員 石川 滉太

キーワード 鋼橋、鉛、塗装塗替え

1. はじめに

橋梁等の鋼構造物では、機能を保持するために防食対策として塗装がなされている。「鋼道路橋防食便覧（以下防食便覧）」によれば、橋梁の塗装塗替えにおいて素地調整をブラスト処理（素地調整程度1種）し重防食塗装とすることがLCCに優れているとされている。しかし、旧塗膜に鉛等が含まれている場合、ブラスト工法では有害物質を飛散させてしまう事から、安全に塗膜除去するために塗膜剥離剤を用いるのがよいとされている。そのため塗膜に鉛等を含む鋼橋の塗装塗替えは、多くが剥離剤による塗膜の除去後にブラスト処理を行っている状況であり、費用がかさむ事が課題として挙げられる。

本論では、塗膜に鉛を含む橋梁の塗装塗替えについて、LCCを考慮した維持管理コストの減少に寄与することを目的とし、素地調整工法の選定方法を提案するものである。

表-1 素地調整程度と作業内容

素地調整程度	さび面積	塗膜異常面積	作業内容	作業方法	表面写真(例)	素地状態
1種	-	-	さび、旧塗膜を全て除去し鋼材面を露出させる。	ブラスト法		鋼材
2種	30%以上	-	旧塗膜、さびを除去し鋼材面を露出させる。ただし、さび面積30%以下で旧塗膜が厚い塗装系の場合はソリッドプライマーやジンクリッチペイントを残し、ほかの旧塗膜を全面除去する。	ディスクサンダー、ワイヤホイールなどの動力工具と手工具との併用		さび 鋼材
3種A	15~30%	30%以上	活膜は残すが、それ以外の不良部(さび、割れ、膨れ)は除去する。	同上		さび 活膜 鋼材
3種B	5~15%	15~30%	同上	同上		
3種C	5%以下	5~15%	同上	同上		
4種	-	5%以下	粉化物、汚れなどを除去する。	同上		活膜 鋼材

2. 素地調整について

素地調整とは、塗装に備えて表面を処理する事を指し、性能保持において塗装作業の中で最も重要な工程である。塗膜の劣化状態及び周辺環境等に応じて表-1から適正な素地調整方法を選択する。

また、素地調整程度が同じであっても、水を使用するか否かで乾式と湿式に分けられる(図-1)。

3. 鉛含有塗膜の乾式による施工の可否

3. 1. 法令の確認

有害塗膜の除去において、粉じんの発生をいかに抑えるかが課題となる。厚生労働省の通達では、鉛等の有害物が確認された場合、湿式による作業を実施することとしている。また、鉛中毒予防規則第四十条の一で「当該鉛業務は、著しく困難な場合を除き、湿式によること」と記載されている。しかし、解釈例規で「『著しく困難な場合』とは、サンドブ

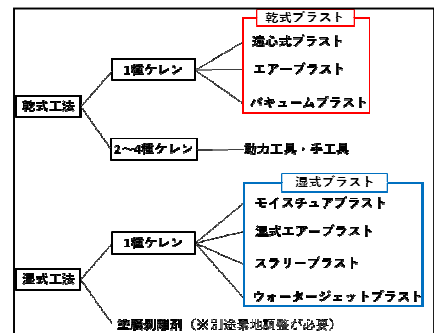


図-1 工法例

ラスト工法を用いる場合又は塗布面が鉄製であり、湿らせることにより錆の発生がある場合等をいう」と示されていることから、鉛を含む塗膜を有する鋼橋における乾式工法の採用は法令上において適合している。

3. 2. 安全対策

鉛等有害物を含有する塗料の剥離やかき落とし作業において、労働者の健康障害の防止および周辺環境への影響の軽減を図らなければならない。具体的な対策内容として、局所排気装置・全体換気装置・集じん装置・洗身装置（クリーンルーム）の設置や足場シート、防護服、呼吸用保護具等を利用し、作業環境を湿潤化させた場合と同等程度の粉じん濃度まで低減させた上で作業を実施する必要がある。

4. 工法選定の提案

コンサルタントによる補修設計成果では、防食便覧や厚労省通達を根拠とした湿式工法の採用を前提としているケースが多いが、3. 1より乾式による施工は法令上において適合している事から、「乾式による施工が湿式に比べ工事費用を抑えられる」といった仮設を立て、素地調整工法別での工事費用を算出し、比較検討を行なう。

4. 1. 積算モデル

表－2に示すとおり素地調整工法別に4モデルを想定した。なお、施工面積等の算出には、宝塚土木事務所管内の实在橋梁をモデルとしている。

表－2 積算モデル

	モデルA	モデルB	モデルC	モデルD
素地調整方法	ブラスト工法	塗膜剥離剤+ブラスト工法	塗膜剥離剤+動力工具と手工具の併用	動力工具と手工具の併用
素地調整程度	1種	1種	2種	2種
乾式・湿式	乾式	湿式+乾式	湿式+乾式	乾式
仮設工	吊足場・枠組足場・単管足場 板張防護・遮音シート 安全対策施設	吊足場・枠組足場・単管足場 板張防護・遮音シート	吊足場・枠組足場・単管足場	吊足場・枠組足場・単管足場 安全対策施設
処分項目	鉋さい+廃プラ混合物 = 汚泥	鉋さい、廃プラ	廃プラ	廃プラ
共通	橋梁型式：横断歩道橋（鋼製） 橋長 等：L=31.3m、W=1.9m 塗装系：重防食塗装（Rc） 塗装面積：570㎡ 使用単価：兵庫県土木工事積算基準(R2.11.1単価)、土木コスト情報、土木施工単価、建設物価・積算資料、過年度工事見積、Web情報			

ブラスト工法を用いるモデル A,B では、粉じんによる外部への影響を低減させる板張防護や、騒音対策として遮音シートを仮設工に計上している。また、乾式による施工であるモデル A,D では、作業員の安全対策として、安全対策施設費を一定額計上するものとした。処分項目について、旧塗膜は廃プラスチックとして処分し、ブラスト用の研削剤は鉋さいとして処分する。また、モデル A については旧塗膜と研削剤が混合する事になり、これは汚泥に分類される。いずれのケースにおいても、旧塗膜に鉛が含まれている事から、特別管理産業廃棄物の扱いとなるため「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」における取扱いに従い適正に処分することになる。

4. 2. 設定条件

比較モデルの選定及び費用算出にあたり、下記の条件を設定している。

①旧塗膜に鉛が含まれている

鋼橋の塗装塗替えの場合、鉛、ポリ塩化ビフェニル(PCB)、六価クロム等の有害物質が各法令の定める基準値に適合しているかを確認するため、事前に含有量試験及び溶出試験を実施する必要がある。本論では鉛のみが検出されたものとしている。

②補修後の供用期間が20年以上（架け替えや撤去の予定がない）

長期に渡る供用を予定している場合、一般塗装系からの塗替えは重防食塗装とすることがLCCに優れている。そのため積算にあたってはモデルA～Dの全てを重防食塗装としている。また、塗膜の耐久性が大幅に劣る素地調整程度3種以下を除外している。

③湿式ブラストを除外

湿式ブラスト工法は、使用する水の飛散・漏洩などに対する対策や排水処理などが必要となり、全国的にも事例が少ないことから除外している。

④塗膜剥離剤の2回塗布

塗膜剥離剤の使用において、1回での塗布では塗装が全て剥離せず、複数回の塗布が必要となる場合がある。本論では筆者の工事経験から、最も事例が多かった2回塗布を基本としている。

4. 3 比較結果

表-3に各工法の比較結果を示す。

表-3 比較結果

		モデルA	モデルB	モデルC	モデルD
素地調整程度		1種	1種	2種	2種
施工能力		○	△	×	×
粉じん		×	△ 有害物質を含まない	○	○
騒音		×	×	△	△
経済性	概算工事費	27,320,700円(1.0)	44,564,300円(1.63)	33,830,500円(1.24)	15,810,300円(0.61)
	期待耐用年数	○		○～△ 鋼材面に錆が発現していない場合、塗装内容が同じ1種ケレンと同様の年数が期待できる	○～△ 鋼材面に錆が発現していない場合、塗装内容が同じ1種ケレンと同様の年数が期待できる
適用不可条件		狭あい部の施工の場合や第三者によってブラストの使用が容認されない		なし	旧塗膜がA,a塗装系

塗替前の発錆量が多い場合、平面方向への広がりと共に深さ方向にも進むため、2種ケレンでは凹部の素地調整が不十分となり耐用年数が短くなる。鋼橋塗膜の寿命については、上記の他にも劣化の要因が多数あり、その作用は複雑であることから、一律的な判定は大変困難とされている。そのため、今回は1種ケレンを基準とした場合の簡単な比較に留めている。

防食便覧より旧塗膜がA,a塗装系^{*}の場合、モデルDの採用が出来ない。

※塗装系とは防食便覧で規定された塗料を用いて組み合わせたものを指し、それぞれの仕様により A, a~D, d の塗装系に分類される。

表-4 各工法の総評

モデルA	周辺環境への影響が少ない等、ブラストが使用可能な箇所に適用する 鋼材面の錆が軽微かつ、旧塗装系がA,a以外の場合はモデルDが経済的に有利
モデルB	費用が高く非経済的であることから、 選択しない事が望ましい
モデルC	ブラストが使用不可の場合に適用する
モデルD	施工費用が最も安い。鋼材面の錆が軽微である場合に適用する

5. 考察

前項で比較した工法の総評を表-4に示す。また、総評をもとに鉛を含む鋼橋の素地調整における工種選定のフロー案を図-2のとおり提案する。

ブラスト工法の採用は、法令上適合しているものの、必要十分な安全対策のラインが不明瞭であるため、DID 地区であるかどうかや、現場周辺の民家数等を判断材料とし、第三者への影響が少ない箇所での適用が望ましい。

本フロー採用における課題として、下記3点が挙げられる。

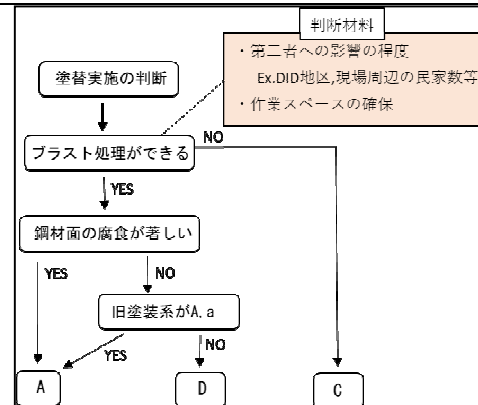


図-2 素地調整工法の選定手順案

①「鋼材面の腐食が著しい」の判断基準の設定

錆の発現状況は部材毎に異なる場合が多く判断が難しい。ブラスト処理の採用が難しい場合でも、従来の動力工具と同程度の施工性を持ちブラスト面が形成できる「ブラスト面形成動力工具」を用いるなど、現場毎に柔軟な対応が求められる。

②動力(手)工具は大規模施工に向いていない

素地調整程度 2 種に用いられる動力工具・手工具は施工性が悪く大面積の施工には不向きであることから、工期が長引く場合があることや、施工規模による工事費補正もないため入札不調となる懸念がある。

③鉛を含む鋼橋において、モデルDの採用実績が少ない

モデル A での施工実績は数多く報告されているものの、モデル D の実績を見つけることが出来なかった。鋼橋である場合、鉛中毒予防規則の解釈例規に該当するため法令上問題はなく、ブラストに比べ粉じんの発生も少ないが、作業員の安全確保を徹底する必要がある。

6. おわりに

今後、橋梁修繕に伴う塗装塗替え工事が引き続き取り組まれることから、維持管理費用の抑制がより一層求められる。

通達本来の目的である作業員の健康障害の防止や周辺環境への影響の軽減を第一に考えなければならないが、湿式施工を前提とするのではなく、今後の維持管理を効率的に行なうために経済性を考慮した最適な工法を選択することができるようになることを願う。

地理情報システムを活用した建設型応急住宅の 建設地選定の迅速化について

岩崎 翼

兵庫県 北播磨県民局 加東土木事務所 まちづくり建築課
(〒673-1431 兵庫県加東市社字西柿1075-2兵庫県社総合庁舎)

災害時の建設型応急住宅の供給にあたり、平時から市町と連携して建設候補地の確保に努めているが、候補地の所在地等の情報は表計算データにより集計しており、建設地選定に当たっては地図とデータを比較するアナログな手順が想定され、災害発生後の迅速な建設地選定時に一定の時間を要することとなる。

そこで、地理情報システムを用いて集計した建設候補地のデータの視覚化による情報管理を提案する。建設候補地の位置や建設可能戸数などの選定に必要な情報を一目で把握し、建設候補地周辺の情報も地図から読み取ることができるスキームを構築し、建設地選定における選定作業の簡略化を図る。作業の簡略化により発災後は現地調査に注力することができ、建設地選定の意思決定に要する時間の短縮に繋がる。

キーワード 地理情報システム 応急仮設住宅

1 はじめに

大規模災害が発生した際に、住宅を失った被災者の住居を早急に確保するため、災害救助法（昭和 22 年法律第 118 号）に基づき応急仮設住宅が供与されており、本県では阪神・淡路大震災などの災害で応急仮設住宅が建設されている。

応急仮設住宅は、避難所等での避難生活の長期化を避けるためにも、早期に供給することが求められており、被災後の対応が円滑に行えるよう供与にかかる事務等について平時から準備する必要がある。

本稿では、応急仮設住宅のうち、発災直後に用地を確保した上で整備する必要のある建設型応急住宅の建設地選定を迅速化する手法として、地理情報システムを活用した建設候補地の情報管理及びその活用方法について提案する。

2 現状・課題整理

(1) 建設型応急住宅の供与のための取組

本県では、兵庫県地域防災計画において「市町は、平時から、あらかじめ建設可能な土地を把握しておくこと」と定めている。市町は候補地の選定、県はその候補地の取りまとめを行っており、毎年 6 月に候補地一覧の更新を行うなど、平時から市町と連携した建設

候補地の把握に努めている。

市町から提出される各候補地のデータは、所在地のほか用途地域やインフラの整備状況、土砂災害警戒区域等の災害危険区域の指定状況、最寄り駅までの距離等、建設地選定に必要な情報も取りまとめている。それらの情報は表計算データでリスト化して管理しており、地域ごとの建設可能戸数や確保面積といった数値情報の集計や、ソート機能により候補地の並び替えを容易に行うことができる。

(2) 建設候補地の選定における課題

現状の取組を通じて、現状の管理方法及び発災後の建設地選定の作業において以下の 2 点の課題が整理できた。

a) 建設候補地の利便性等が確認できない

東日本大震災では、津波災害があったことから建設候補地の確保に想定以上の労力を費やしたことや、高台や内陸地などの高齢者の生活に適さない敷地に応急仮設住宅が建設されたこと等の課題が明らかとなった。

本県における候補地の選定においては、敷地の有効面積や建設可能戸数、インフラの整備状況等の要素を重視しており、候補地周辺の利便施設の有無や敷地の高低差等も考慮した候補地選定のプロセスの構築ができていない。

大規模自然災害では応急仮設住宅での暮らしが長期化することを鑑みると、今後の建設候補地の選定においては、平時から各候補地の利便性を考慮した建設

地選定の仕組みの構築が必要であると考える。

b) 建設候補地選定作業の煩雑さ

表計算データでの情報管理では、各建設候補地がどこに位置しているかを確認するためには、リストの情報と地図を比較する作業が必要となる。建設候補地の決定においては、候補地の場所の把握に加えて、以下の手順の作業が必要となる。

表-1 表計算データでの建設候補地選定の手順

Step1	建設候補地の場所を地図等で確認
Step2	周辺の利便施設の有無等の敷地周辺の環境を確認
Step3	確認できた状況と候補地の諸情報を検証し、候補地を評価
Step4	Step3 の評価結果を基にした各候補地を比較、建設地（仮）の絞り込み
Step5	建設地（仮）について、現地調査を実施。調査結果から活用の可否を検討

Step1からStep3を手作業で進めることとなるため、1つの候補地につき、インターネットが利用できる状況下において5分から10分を要する。発災時にインターネットが不通となった場合、住宅地図等の印刷物を用いた作業となるため、確認作業に更なる手間を要することが想定される。

また、これらの作業を各建設候補地において実施する必要があり、被災箇所が広域となった場合、建設候補地の確認作業に莫大な時間を要することが考えられる。緊急性が求められる災害直後の状況下では、これらの作業の煩雑さが課題である。

3 課題解決方法の提案及び実証

課題の解決に当たっては、平時から発災後の検討作業を実施できるような仕組みを構築することにより、発災後の作業が削減され、発災から建設地の決定に至るまでのプロセスの迅速化に繋がると考える。そこで、前述の2つの課題を解決するため、建設候補地の情報管理における地理情報システムの活用を提案する。

(1) 【提案1】 地理情報システムを活用した建設候補地の情報分析による選定作業の簡略化

地理情報システム (GIS : Geographic Information System) とは、位置に関する情報 (地理空間情報) を地図上に可視化し、業務の効率化や方針決定を迅速化する

ることができる技術の総称である。GIS を活用することで、様々な情報を一目で把握できるほか、複数の情報を重ね合わせて表示しそれぞれの情報の関連性を整理することによって各情報の分析が容易となる。本県では、フリーのオープンソースである QGIS を利用している。

建設候補地は、各候補地の所在地を緯度・経度へ変換したのち、QGISに一括で取り込む。候補地は、ポイントで表示されるため、候補地の位置を可視化することができる。

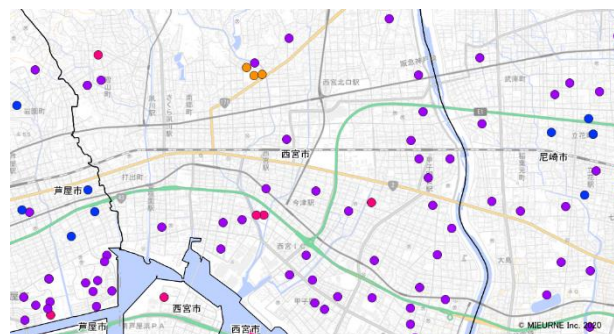


図-1 QGIS での建設候補地の表示

これにより、「表-1 建設候補地選定作業の手順」のうち、Step1からStep3までの作業をQGIS上で一括して行うことが可能となる。他のレイヤーで地図や標高図、航空写真を表示することによって候補地周辺の状況を確認することもでき、住宅地図等の印刷物だけでは読み取りにくい、建設地周辺の利便施設の有無や高低差、駅から建設地までの高低差の情報をシステム上で一目で確認することができ、Step1及びStep2の作業が簡略化される。

また、各ポイントには用途地域等の候補地の情報が付与されており、ポイントを選択することでそれらの情報を確認することができる。Step3において地図等から確認できた情報と候補地の諸情報の検証による候補地の評価については、評価検討作業及びその評価結果を候補地の情報として付記し、そのとりまとめをQGIS上で行うことができる。

QGISを用いることによって、Step1からStep3の選定作業が大幅に削減され、一つの候補地の選定に要する時間が5分の1程度に圧縮することができるため、課題「b) 建設候補地選定作業の煩雑さ」が解消される。

さらに、各候補地の建設可能戸数等の数値情報やStep3の評価結果に基づいて、ポイントの大きさや色を変更することで、各候補地の差異を視覚的に表現することができる。これにより、Step4における各候補地の比較においては、ポイントの大きさや色に基づいた比較となり、迅速な判断が可能となる。

表-2 作業内容の比較と QGIS 活用による効果

	従来の作業	QGIS での作業	効果
Step1	建設候補地の位置を一件ずつ確認	QGIS に取り込み、各候補地をポイントにて一括して表示	確認作業に要する時間の短縮
Step2	敷地周辺環境を地図から読み取り	航空写真や地図などを活用し候補地周辺環境の確認	様々な資料を用いた比較作業が容易に
Step3	確認結果と敷地の情報を検証し、候補地を評価。評価結果を地図にプロット	確認結果と敷地の情報を検証し、候補地を評価。評価結果に応じてポイントの表示形式を変更	各候補地の差異を視覚的に把握することが可能に
Step4	Step3 の評価結果を基に各候補地を比較	Step3 の評価結果を基に候補地を QGIS 上でより視覚的に比較	各候補地の比較作業が容易に
Step5	現地調査及び活用の可否を検討	発災後速やかに現地調査及び活用の可否を検討	発災後は現地調査のみに注力できる

(2) 【提案 2】建設候補地の優先度による評価

建設候補地の選定にあたっては、敷地の有効面積や建設可能戸数などの従来の数的指標だけでなく、候補地の利便性等を評価指標に加え評価が重要である。

前述の通り、QGIS を活用することによって、選定・検討作業が削減できることから、QGIS を用いて建設候補地の優先度を平時から設定し、その設定に当たっては利便性等を評価指標に加えた優先度とすることによって課題「a) 建設候補地の利便性等が確認できない」の解消に繋がる。

候補地の優先度の設定にあたっては、候補地の被災状況や利便性、地域バランス等の比較検討により設定することとなる。

平時から各候補地の評価を行うことにより、発災後の選定作業量が削減できる。これにより、発災後は Step5 の現地調査時にインフラの使用可能状況や敷地の活用の可否を確認する作業に注力することができる。

また、建設型応急住宅の供与にあたっては、優先度の高い建設地に重点的に建設することとなるが、事前の優先度の設定によって優先度の高さに基づき現地調査の箇所を限定することができるため、発災後の現地調査が効率化される。これにより、発災から建設地決定に至るまでに要する時間の削減にもつなげることが出来る。

4 地理情報システムの更なる活用

地理情報システムの活用による現状の課題の解決に加えて、地理情報システムの応用により、以下の 3 点の

実現も期待できる。

(1) 福祉型仮設住宅の建設戸数の検討

高齢者や障害者などの日常生活上特別な配慮を必要とする被災者（以下、住宅確保要配慮者という）の住宅として、建設型応急住宅の一部を、老人居宅介護等事業等を利用しやすい福祉型仮設住宅として整備することが求められる。

また、住宅確保要配慮者は避難所等での避難生活が困難であることから、福祉型仮設住宅を通常の仮設住宅より優先して整備する必要がある。

福祉型仮設住宅の建設にあたっては、被災地域の住宅確保要配慮者の人数に基づき必要戸数を決定することとなるが、事前に必要戸数の推計を行うことが業務の迅速化に繋がる。

あらかじめ市町の町域単位で住宅確保要配慮者の人数や障害の種別等の情報を市町において調査・集計し、それらの情報を QGIS 落とし込み可視化する。その情報と各候補地の優先度や建設可能戸数を勘案して各候補地の福祉型仮設住宅の建設戸数を推計する。

発災後は、実際の被災状況に応じて推計結果に基づいて戸数等を調整することで福祉型仮設住宅の速やかな供給が可能となる。

(2) 市町への候補地見直しの働きかけ

建設候補地は、市町ごとに箇所数や確保面積だけでなく、候補地の分散状況にも差がある。例えば、阪神南地区においては、図-2 のとおり候補地を分散して確保できている。一方で、東播磨地区においては図-3 のとおり、候補地が偏在しており、局所的には候補地が不足していることが確認できる。



図-2 阪神南地区の建設候補地の分布

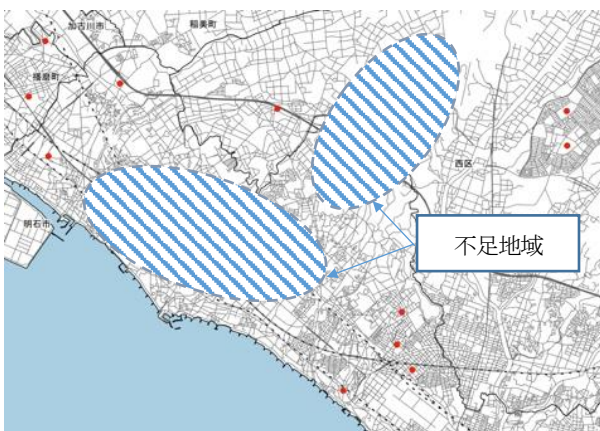


図-3 東播磨地区の建設候補地の分布

阪神淡路大震災での経験から、被災者の生活環境を大きく変えないように被災前の居住地から大きな移動を要しない位置に応急仮設住宅を確保することが望ましいため、市町域内にバランスよく分散した候補地の確保に努めるべきである。

従来の表計算データによる管理では、県及び市町が候補地の分散状況を把握することは困難である。しかし、候補地一覧の更新の際に建設候補地の位置を可視化し、資料として提示することによって、各市町の建設候補地確保状況を明らかにすることができ、市町ごとの候補地確保における課題の抽出につなげることができ、分散した建設候補地確保を働きかけることが可能となる。

また、他の市町との確保箇所数の差を明確に示すこともできる。これにより、確保面積や確保箇所数が少ない市町へは候補地確保へ更なる確保を促す手段として効果的であると考えられる。加えて、市町境に位置する地区においては、隣接市町と連携した候補地の確保が期待できる。

(3) 応急仮設住宅の入居者情報の手法での活用

建設候補地のデータを応用し、実際に建設された戸数や入居者数などの情報を追加することにより建設後の入居情報（被災者）の把握にも活用することができる。例えば入居情報を、地理情報システムを用いて把握することにより、被災世帯数などの数的情報と地図情報を連携することができる。被災地域に必要な災害公営住宅の戸数検討や当該地域に求められる福祉施策の検討など、復興段階における施策の検討においても活用が可能である。

入居情報の把握及び施策の検討においては、建設型応急住宅だけでなく、賃貸型応急住宅への入居者情報についても地理情報システムにより一体的に把握することが効果的であると考えられる。賃貸型応急住宅については本県においては所管課が異なっているため、地理情報システムの導入や活用手法については今後検討していく必要がある。

5 地理情報システムの活用における課題

本稿の提案及び実証を通じて得られた課題として、組織内での情報の共有が困難なことがあげられる。QGIS がインストールされている PC が限られており、担当者のみが管理や編集作業を行うこととなる。

また、他のアプリケーションやソフトウェアへの互換性がないため、データの共有にあたっては、管理データを PDF 化するなどのアナログな手法に制限されることが問題となる。

QGIS の操作自体は比較的容易であるため、他の業務でも利用する機会を設けることなどによって、作業が特定の人物に限られることなく情報の共有も容易な環境の整備を今後検討していく必要がある。

6 まとめと今後の展望

本提案は、筆者が昨年度の所属における所掌内容の課題解決を目的とした論文である。

地理情報システムの活用は、建設候補地選定作業の効率化だけでなく、市町への建設候補地の見直しの働きかけによるより良い候補地選定にもつなげることができる仕組みとなった。

地理情報システムは、複数の情報を重ね合わせて表示により各情報の分析が容易となるツールである。建設型応急住宅に限らず、賃貸型応急住宅や既設公的住宅などの情報を包括して管理・活用することによる更なる業務の効率化や、災害後の住宅確保の施策にも寄与できるような仕組みになることが望まれる。

和歌山下津港海岸の津波対策事業における被覆材への人工石活用について

清水 恭平

近畿地方整備局 和歌山港湾事務所 海岸課 (〒640-8404 和歌山県和歌山市湊葉種畑の坪1334)

本稿は和歌山下津港海岸で実施している海岸保全施設整備事業における、護岸の被覆材への人工石活用事例について述べたものである。人工石とは産業副産物である鉄鋼スラグを原料とするリサイクル資材であり、近年海洋工事を主として利用事例が増加している。近畿地方整備局港湾空港部では和歌山下津港海岸での活用が初めてであり、実際に活用することによって材料調達から施工の各段階における天然石と人工石の相違点等について確認することができた。

キーワード リサイクル, 鉄鋼スラグ, 人工石, 海岸工事, 護岸, 被覆材

1. 工事におけるリサイクル資材活用の促進

我が国では主要な資源の大部分を輸入に依存しているとともに、経済の発展に伴い各種副産物の発生量も極めて多く、リサイクルの一層の推進が望まれている。

このような社会的状況の中で、主に臨海部に位置する高炉一貫製鉄所や石炭火力発電所から大量に鉄鋼スラグや石炭灰等の建設資材となりうる産業副産物が排出されており、再資源化といった有効活用の促進が必要とされている。また、海岸工事を含む港湾・空港等工事では埋立用材や構造物等の建設資材として山土や砂・石材等の天然資源を大量に消費しており天然資源の保護や持続可能な社会構築の観点からも、建設副産物及び産業副産物等を積極的に活用し、天然資源の消費抑制、環境負荷の低減、建設コストの低減を図ることが望まれている。

こうした背景を踏まえ、国土交通省港湾局・航空局では平成13年より「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」¹⁾を策定・改訂し、海岸工事を含む港湾・空港等工事における各種副産物の再資源化、再生利用の促進を図ってきたところである。ガイドラインの策定より浚渫土砂の再利用やスラグ等のコンクリート骨材への使用など一定の成果をあげているが、上述した理由によりさらなる各種副産物の有効活用が必要である。

本稿は、各種副産物の有効活用促進のために近年活用され始めている人工石について、より一層の活用を進めるため、和歌山下津港海岸における被覆材への人工石活用事例を挙げ、その有用性や留意すべき事項等について述べたものである。

2. 和歌山下津港における海岸工事

和歌山県北部の和歌山市から海南市にかけて位置する和歌山下津港海岸においては、背後地域に行政・防災中核機能や主要交通施設に加え、世界的シェアを誇る高付加価値製品の製造企業群が集積している。しかしながら当該地区には今後30年以内に70～80%の確率で南海トラフで発生する地震に伴う津波の襲来が予測されており、津波来襲時にはきわめて甚大な被害の発生が危惧されている。

このため近畿地方整備局和歌山港湾事務所では当該地区の護岸や防波堤の補強・嵩上げ、津波防波堤及び水門を設置し、津波浸水被害の軽減を図る海岸保全施設整備事業(図-1)を実施している。



図-1 和歌山下津港海岸における海岸保全施設整備事業

3. 人工石について

(1) 材料

人工石は以降に示す材料により作られる鉄鋼スラグ水和固化体を所定の大きさに破碎したものである。

a) 高炉スラグ微粉末

「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」で扱われている産業副産物等には石炭灰、貝殻、破碎瓦の他に各種スラグ（鉄鋼スラグ、非鉄スラグ、エコスラグ）がある。スラグとは鉄、ニッケル、クロムなどの鉱物を乾式精錬する際に生じた目的成分以外の溶融物質のことである。高炉スラグは鉄鋼製造工程で生じるスラグであり、高炉内に鉄鉱石、コークス、石灰石などの原料を装入し熱風を送ることにより鉄鉱石が還元され、溶銑及び溶融スラグを比重差（溶銑：7，溶融スラグ：2.6～2.7）によって分離、回収したものである。溶銑1tに対し約300kgの高炉スラグが発生し、冷却方法により高炉徐冷スラグと高炉水砕スラグの2種類に分類される。

鉄鋼スラグ水和固化体の原料である高炉スラグ微粉末は高炉水砕スラグを粉砕したものであり、日本国内では年間約2,400万t発生（平成30年時点）している。鉄鋼スラグ水和固化体の製造において、高炉スラグ微粉末は刺激材の存在下で水和反応により硬化し、各材料を強固に結び付け強度を発現させる主要な役割を持つ。

b) 製鋼スラグ

製鋼スラグは鉄鋼から不要な成分を除去し、靱性・加工性のある鋼にする製鋼過程で生じるスラグであり、日本国内では年間約1,400万t発生（平成30年時点）している。

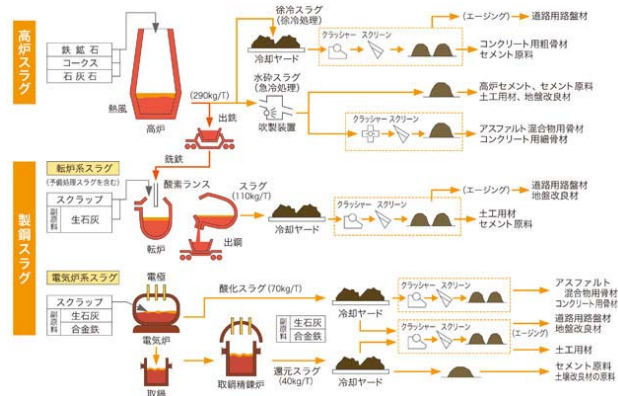


図2 鉄鋼スラグ製造フロー



図3 製鋼スラグ（左）、高炉スラグ微粉末（右）

製鋼スラグは鉄鋼スラグ水和固化体のうち質量比で通常60%以上を占め、高炉スラグ微粉末に対する刺激材、フライアッシュのポズラン反応のカルシウム供給源、骨材としての役割を持つ。

c) その他の材料

鉄鋼スラグ水和固化体の製造には必要に応じて、製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末の他に、アルカリ刺激材（消石灰、各種セメント等）、微粉炭燃焼ボイラで発生するフライアッシュ、細骨材相当の高炉水砕スラグ、混和剤等を添加する。このうちフライアッシュは長期強度の増進やアルカリ性の低減を図る役割を持つ。

(2) 人工石の製造方法

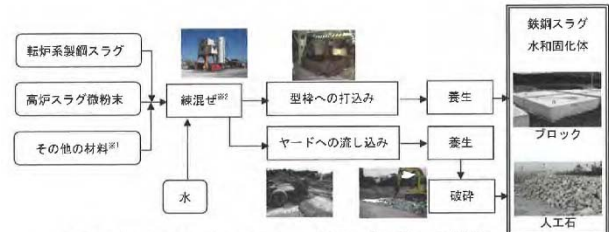
鉄鋼スラグ水和固化体は先に述べた材料（製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末、必要に応じてその他の材料）と水を混練し、ヤードへ流し込み、固化させ養生する。また所定の大きさに加工する際は、コンクリート破碎機などの重機等を用いて所定の大きさに加工する。

a) 混練

製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末、水等の材料を混練し、アジテータ車等に積み込み、固化用のヤードまで運搬する。なお、各種材料の混練については、コンクリートを製造する過程と全く同様の設備（コンクリートプラント）を使用することができる。

b) 固化、条切り、養生

固化用ヤードに流し込んだのち、固化・養生を行う。



※1 必要に応じて、アルカリ刺激材、フライアッシュ、高炉水砕スラグ（細骨材）、湿和剤を使用
 ※2 生コンクリート製造設備使用

図4 人工石製造フロー



図5 人工石製作状況（条切り）

なお、型枠を用いない場合は、所定の大きさに破碎されるように固化中に条切りを行う場合がある。図-5に示している条切りは鉄板により行っている。

c) 破碎

養生後、コンクリート破碎機などにより粗破碎し、所定の大きさに加工する。破碎方法によって、粒径300mm程度以下に調整した砂礫状の石材と粒径100~1,000mm程度に調整した割ぐり石状の石材の製造が可能である。

(3) 人工石の性質

a) 適用範囲

人工石は主に準硬石相当の天然石材（砂岩ざり及び割ぐり石）及びセメントコンクリートの代替材として、海洋工事においては非液状化埋立柱材、裏込め石及び傾斜護岸埋立柱材、藻場材、被覆材、消波ブロックなどに適用されている。

b) 特徴

鉄鋼副産物を用いて製造されるため、天然資源の保護につながることや、破碎方法により種々の形状や粒度を有する石材製造が可能であることから幅広い利用が期待できる。また天然石に比べ、海藻等の生物付着性が優れていることも人工石製造者による試験施工で確認されている。



図-6 人工石

表-1 人工石の品質の範囲

品質項目	指標		品質の範囲
物理的性質	粒度	D ₅₀ mm	砂礫状 1.0以上
		均等係数 U _c =(D ₆₀ /D ₃₀)	砂礫状 5~45
	粒度の範囲	割ぐり石状	1.3~3 ^{*1}
		砂礫状	0~300mm
	割ぐり石状 ブロック状	5~2,000kg/個 ^{*2} (寸法の目安 100~1000mm)	
絶対密度(g/cm ³)	JIS A 1110	1.8~2.7	
吸水率(%)	JIS A 1110	5~20	
母材の圧縮強度(N/mm ²) 28日強度(標準養生)	JIS A 1108	9.8~35	
力学的性質	せん断抵抗角(°)	JGS 0541	U _c ≥5で35°以上
	二次圧縮係数(%)	砂礫状	準硬石の天然石材と同等以下
環境適合性	スレーキング率(%)	砂礫状	準硬石の天然石材と同等以下
	pH(JGS 0211 海水溶媒 固液比 1:10)		9.0以下
	生物付着性(付着藻類・ペントスの種類数・付着質量)	砂礫状	天然石材と同等
	有害物質の溶出・含有		海洋汚染防止法水底土砂基準または土壌環境基準の基準値以下
膨張	膨張 JIS A 5015 (水中落下試料 80°C10日)	砂礫状	膨張しないこと (JIS A 5015 80°C水浸膨張試験 10日 で0.2%以下)
	鉄鋼スラグ水和固化体技術 マニュアル付属書2	割ぐり石状 ブロック状	有害なひび割れなし

*1: φ≥35° を目標とする場合には、粒度調整により U_c≥5の製造可能
*2: 製造寸法については、別途製法所に確認要

4. 和歌山下津港海岸における人工石活用

(1) 概要

和歌山港湾事務所においては令和元年度及び令和2年度に船尾南護岸の被覆材として人工石を採用した。以降に採用に至るまでの検討内容及び施工により確認できた事項について述べる。

(2) 護岸構造

船尾南護岸の構造形式は図-8に示すように鋼管矢板に上部工を打設し、前面に基礎捨石及び被覆材を投入する構造である。本構造は和歌山下津港海岸の護岸の中で標準的な構造形式の一つである。

(3) 設計検討

被覆材として人工石を活用するにあたり、以下に述べる項目について確認及び検討を行った。

a) 内部摩擦角の確認

人工石の活用にあたり、天然石と同等の内部摩擦角が確保されるか検討を実施した。「低拘束圧条件下におけるロック材料強度に関する研究」²⁾によると、ロック材の強度評価は低拘束圧域においては三軸圧縮試験における最も低拘束圧の条件でのφ₀を与えるという強度設定方法を適用することが可能であると提案されている。よって、人工石の製造者が実施した三軸圧縮試験により均等係数U_c≤2でも低拘束圧下であれば、内部摩擦角φ₀は天然石と同等の40°以上期待できることを確認している。



図-7 船尾南護岸位置図

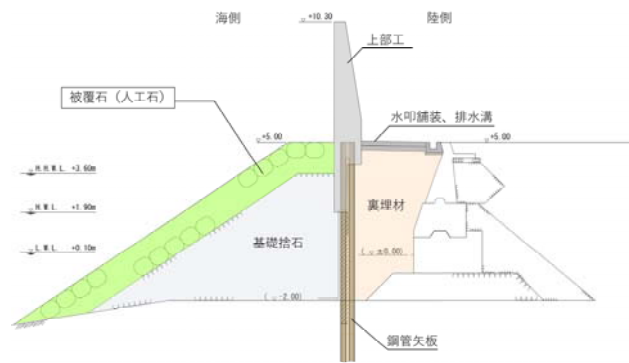


図-8 護岸標準断面図



図-9 人工石据付状況



図-10 人工石据付完了状況

b) 単位体積重量の確保

被覆材としての単位体積重量は従来の天然石の施工と同様に間詰をしっかりと行い、空隙が少なくなるように施工すれば設計上必要な単位体積重量は確保できる。

c) 津波流速に対する安定性の確認

当該護岸の設計において天然石を用いた場合の被覆材の所要質量は水理模型実験により天然石1,000kg/個以上である。当該護岸に使用する人工石の密度は2.45～2.5t/m³であることを考慮し、人工石を用いた場合の当該護岸の被覆材の所要質量をイスバッシュ式より求めると、1.115t～1.023tの質量が必要となる。よって人工石1個あたりの質量が1.2tとなる形状で製造すれば天然石と同等の安定性が確保できる。なお和歌山下津港海岸において、護岸の被覆材は1層積が標準であるが、当該護岸断面を想定した水理模型実験を行ったところ平均以上の津波流速により被覆材が部分的に飛散する可能性があることが確認されたことから、安全性確保のため被覆材は2層積として設計されている。

(4) 施工時の留意点

人工石の調達について、天然石と異なり、強度発現までの養生期間を含む製作期間が必要であり、船尾南護岸の工事においては現場搬入までに約2カ月程度期間を要した。天然石とは異なり人工石は養生を含めた期間を要する必要があることに留意する必要がある。積込及び運搬においては、天然石と概ね同様の施工性であったが、天然石と比較し割れが生じやすく、割れ方によっては所定の重量を満足しない恐れもあることから、グラブ等の作業機械による扱い時には割れが生じないように留意する必要がある。また、据付においては、破碎時にある程度成形されていることから据付しやすく、被覆材間の空隙を少なくすることができるため、被覆材間に詰める間詰石も天然石の施工と比べ少なくすることができた。しかしながら形状が整っているがゆえに、法尻や法肩などの異形部については形状の適する人工石が限られることに留意する必要がある。

5. 課題

人工石を活用した結果、調達から運搬までに強度発現のための期間を見込む必要があること、天然石と比較し割れが生じやすく割れ方によっては所定の重量を満足しない恐れがあること、据付については天然石より据付しやすく使用する間詰石も少量であることが確認できた。

また、和歌山下津港海岸は人工石の製造者が近傍である条件下であるため、他の港湾等工事で人工石を同様に活用するには運搬も含めた経済比較の検討が必要である。

6. まとめ

天然資源の消費抑制や持続可能な社会構築の実現のため日常生活から公共工事まで幅広くリサイクル資源の活用の促進が求められている。そうした社会状況下において、海岸及び港湾工事においても今後より一層のリサイクル資源の活用が求められるものと予想される。

本稿で述べた和歌山下津港海岸における被覆材への人工石活用事例は海岸及び港湾工事における人工石活用の有効性を確認する基礎資料になると考える。

文献

- 1) 国土交通省 港湾局、航空局：港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン(平成30年4月)
- 2) 土木研究所水工研究グループ ダム構造研究チーム：低拘束圧条件下におけるロック材料強度に関する研究(平成20年)
- 3) 財団法人 沿岸技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル(平成20年2月)
- 4) 財団法人 沿岸技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体の性質および活用事例について(平成13年)
- 5) 鉄鋼スラグ協会 HP (<https://www.slg.jp/>)

瀬田川洗堰管理制御処理設備の課題解決に向けた検討について

名坂 純哉¹・嶋田 幸平²

¹近畿地方整備局 琵琶湖河川事務所 管理課 (〒520-2279滋賀県大津市黒津4-5-1)

²近畿地方整備局 京都国道事務所 管理第二課 (〒600-8234京都市下京区西洞院通塩小路下る南不動堂町808)

琵琶湖河川事務所で所管する瀬田川洗堰の堰管理制御処理設備は、2000-2001年度に製作・据付され、2012-2013年度に機器取替等の改良工事が行われている。2021年度末時点で電子機器は標準取替年の8年を経過し、更新時期を迎えようとしている。現状の運用や管理体制を踏まえ、既設設備の課題やコスト縮減、また新旧設備の切替を考慮した更新に向けた検討・設計を行ったので参考として報告する。

キーワード 瀬田川洗堰、ダム・堰管理用制御処理設備、設備更新

1. はじめに

瀬田川洗堰は、瀬田川に設置された可動堰であり、放流量を調節することにより、琵琶湖周辺の洪水防御、下流淀川の洪水流量の低減、琵琶湖の水位維持、下流淀川の流水の正常な機能の維持、及び下流淀川の水道用水・工業用水の供給を行っている。本堰は1961年3月に建設されたものであり、建設60周年を迎えた。1992年3月には琵琶湖総合開発事業の一貫でバイパス水路が完成し、より細やかな流量調節を行えるようになった。放流設備は、本堰ゲート（鋼製二段式ローラーゲート：10門）、流量調節ゲート（鋼製三段式ローラーゲート：2門）、流量調節バルブ（JFG：1門）、小水力発電設備（S型チューブラ型）で構成されている。



写真-1 瀬田川洗堰 本堰ゲート

堰管理制御処理設備（以下、「堰コン」という）は、流水管理に関わる堰水流量演算を行い、放流設備の遠方操作を行うものであり、瀬田川洗堰の運用を司る重要な設備である。本報では、堰コンの更新に向けて課題への対応を検討し、設計を実施したのでそれを紹介する。

(1) 既設設備の概要

現在運用している堰コンは、2000-2001年度に「ダム管理用制御処理設備標準設計仕様書（案）平成7年3月 財団法人ダム水源地環境整備センター」に準拠して設計・製作されたものである。その後、2012年度に構成装置のパソコン・PLC(Programable Logic Controller)の更新、2013年度にバイパス水路放流設備のゲート機側操作盤に伴う改修工事が実施されている。

表-1 工事履歴

年度	工事	工事内容
2000 2001	瀬田川洗堰管理用制御処理装置改修工事 瀬田川洗堰管理用制御処理装置設置工事	既設設備更新
2003	瀬田川洗堰制御処理装置改修工事	機能追加改造
2012	瀬田川洗堰管理制御処理設備設置工事	電子機器更新
2013	瀬田川洗堰機側伝送装置他設置工事	機側～遠方間 FL-net化

a) 機側～遠方間の接続方式

既設堰コンの導入時は、すべてのゲート機側操作盤の制御回路はリレー式であり、堰コンとは機側伝送装置を介して接続する方式がとられていた。また、放流設備が隣接している堰の特徴を活かし、リング型（ループ）で接続する構成となっていた。

バイパス水路のゲート機側操作盤の更新に合わせて、2013年度の改修時には、機側～遠方間は「ダム管理用制御処理設備標準設計仕様書（案）平成16年7月 国土交通省」に基づき、2系統化・スター型接続（FL-net伝送）へ改修された。本堰ゲートの機側操作盤は既設流用となっていたが、将来更新時にスムーズに移行できるよう機側伝送装置のFL-net化が実施された。なお、本堰ゲートの機側伝送装置PLCは、機側操作盤に実装されている。

b) 装置構成

放流設備の遠方操作は、事務所3階の操作室に設置されている表示設定操作卓、遠方手動操作卓で行う。鋼製のコントロールデスク型の専用卓であり、表示設定操作卓では設定値操作を、遠方手動操作卓では手動操作を行える。



写真-2 表示設定操作卓・遠方手動操作卓

入出力処理装置、演算処理装置、情報伝達処理装置等の収容架は、事務所4階の電算室に設置されている。

(2) 更新の必要性

上述の通り、構成する機器のうち、FAパソコンやPLCは2012年度に更新されており、経過年数や保守部品の枯渇から、施設の機能維持及び適切な運用を行うため、設備更新を計画する。

設備の更新に向け、現状の運用や管理体制を踏まえ、既設設備の課題とその対応について検討を行ったので、次項より示す。

2. 信頼性の向上

(1) 洗堰放流量の把握方法（精度向上）

本堰ゲートは、二段式ローラーゲートであり、5つのゲート状態がある。本堰ゲート放流量は、②越流時、③ドン付時のみ千町水位をもとに計算式から演算される。これらゲート放流量の和が洗堰放流量となる。一方、④潜流時、⑤全開時では、本堰ゲート放流量の演算が出来ないため、洗堰放流量は約1.5km上流に位置する橋本流量観測値（流速換算値、HQ換算値）による。橋本流量は、橋本流量観測所に設置されている超音波流量観測装置から入力される流量値である。

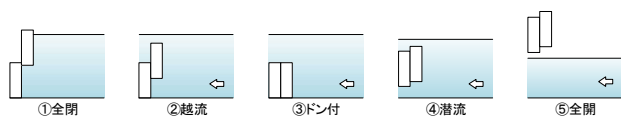


図-1 本堰ゲート状態のイメージ図

a) 観測地点

橋本流量観測所下流には、宇治発電所への導水路が位置しており、洗堰放流量は、橋本流量から宇治発電所取水量を控除する必要がある、リアルタイムでの流量把握が難しい状況にある。

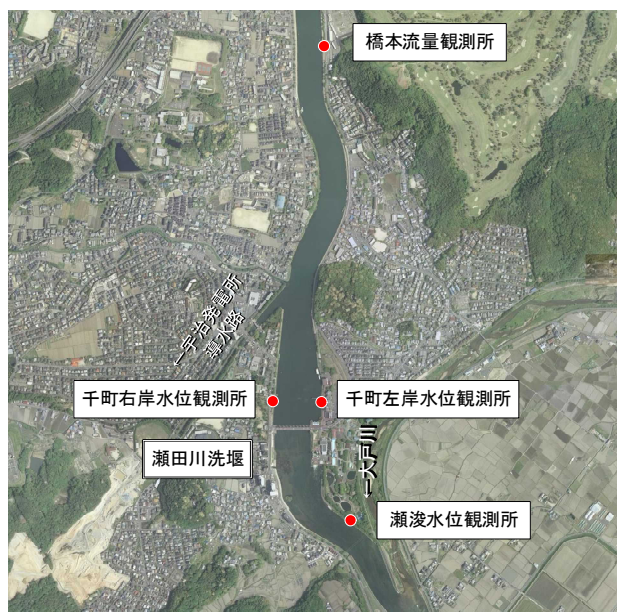


図-2 水位・流量観測所位置図

洗堰放流量は、流入や分水（取水）の影響のない堰地点、堰直上流・直下流地点のいずれかで流量を観測することになる。流量観測地点は、一般的に河床変動が少ない、断面や河幅に大きな変化がない等の条件となる。また湾曲部では、流れが偏りやすく精度が悪くなるため、流量観測地点は、直線区間が適切である。

堰直下流の瀬湊地点は、湾曲部となっているため、流量観測装置の設置には適していない。堰地点は、断面が大きく変化することから、1号ごとに後述する非接触型の設置が考えられるが、予備ゲート設置用クレーンのレール等により配線ができないため、堰柱への固定設置ができない。一方、堰上流の千町地点は、河道が概ね矩形断面で、直線部であるため、流量観測場所として適している。

b) 観測方法

流量を観測する方法は、接触型には超音波流速計、H-ADCPなどがある。また非接触型には電波や超音波を用いて河川の表面流速を測るドップラー方式（電波流速計、超音波流速計）と、ビデオ画像から河川表面の波紋や濃淡等の模様を測る画像処理方式（PIV法、STIV法等）がある。画像処理方式は、夜間観測の必要性やリアルタイム性から堰水流量として利用するには適さないと判断した。非接触型の電波／超音波流速計は、千町地点には橋梁等の河川横断構造物はないことから、設置困難となる。よって、接触型の超音波流速計、H-ADCPが候

補となる。超音波流速計は、水平方向の平均的な流速を検出する方式である。一方、H-ADCPは、ドップラー流速計 (Acoustic Doppler Current Profiler) を水平設置し、センサから発信された超音波とはね返ってくる超音波のドップラー効果により、センサ設置高の流速横断分布を計測することができる。

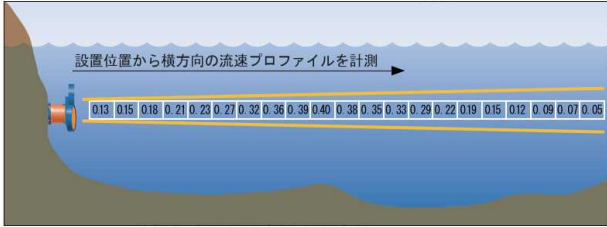


図-3 H-ADCP概念図¹⁾

H-ADCPは比較的新しい技術であるが、国土交通省では、固定設置型流量観測設備 (常設) として、20箇所以上の設置実績がある。近畿地方整備局管内では、姫路河川国道事務所に1箇所、淀川河川事務所に3箇所設置されている。H-ADCPは、横断方向の平均流速を計測する超音波流速計に比べ、本堰ゲート10門の開操作状況に応じた流速の横断分布計測により高精度リアルタイム観測が可能であり、約2,000万円程度安価でもある。よって、堰コンの更新に合わせて、千町地点にH-ADCPを設置することを計画する。

(2) 入出力装置・遠方手動操作装置の構成

機側～遠方間がFL-net化に伴い、設定値操作系と手動操作系の2系統化された構成となっている。2013年度のFL-net化を行うにあたり、インタフェース装置を追加して、新旧伝送仕様を相互接続している。各ゲート機側操作盤・機側伝送装置から、入出力用/遠方手動用インタフェース装置に2系統でFL-net接続されている。それぞれ全ゲートが接続されているため、いずれかのインタフェース装置に障害発生した場合は、全てのゲートの操作系統に影響が及んでしまう状況にある。例えば、入出力用インタフェース装置が故障した場合は、全ての放流設備に対して設定値操作ができなくなってしまう。ただし、遠方手動操作用インタフェース装置により遠方手動操作によるバックアップは可能である。

遠方・機側間通信共通仕様書 (案) では、FL-netの共通メモリの割付から、入出力装置1台あたりの制御可能機側盤の数は17設備としている。メモリの予備領域があるため、それ以上の設備数でも可能ではあるが、瀬田川洗堰では、本堰ゲート上段扉の自動操作を考慮 (上段扉と下段扉を個別にカウント) すると、接続する放流設備は、27設備と多くなる。装置故障による操作系統への影響を小さくし、信頼性を向上する目的で、入出力装置と遠方手動装置は2台構成として、接続するゲートを分散するものとした。

放流能力から流量調節バルブと流量調節ゲート5m、流量調節ゲート5mと流量調節ゲート15mは、それぞれ代替放流が可能であることから異なる入出力装置/遠方手動操作装置に接続し、冗長化できるものとした。また本堰ゲートも同様に1～5号、6～10号に分けて接続するものとした。これにより仮に入出力装置のいずれか1台が故障した場合でも、300m³/sの放流に対して、150m³/sの放流能力が確保できるようになり、操作の信頼性を向上することが可能と考える。

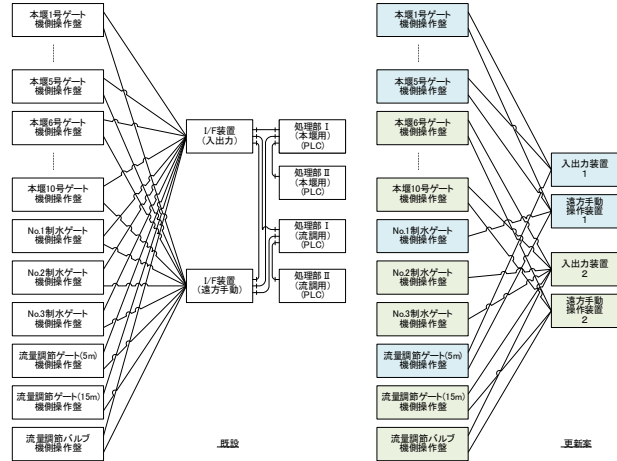


図-4 機側～遠方接続系統 (左: 既設、右: 更新案)

(3) 簡易シーケンス型の採用

堰コン更新と同時に本堰ゲート機側操作盤の更新も計画されている。ダムコン標準設計仕様書では、機側操作盤PLCに開度制御機能を実装し、入出力装置から目標開度を伝送する方式を標準としている。

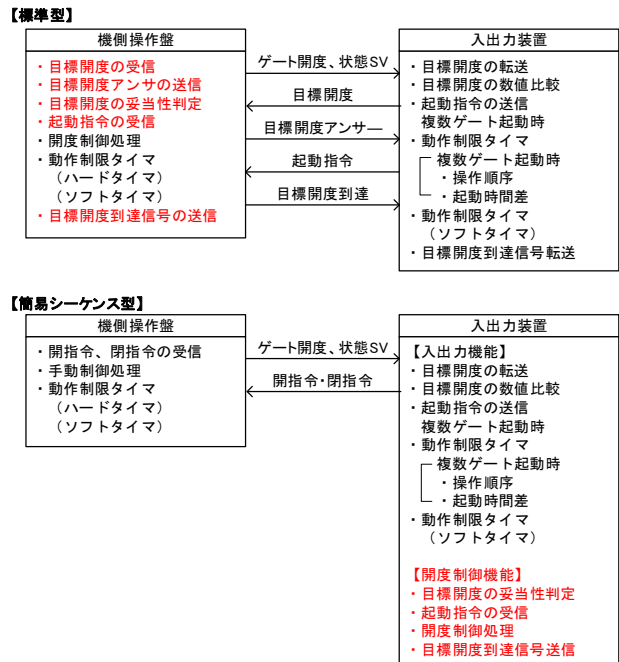


図-5 操作系統図 (上: 標準型、下: 簡易シーケンス型)

機側操作盤PLCは、アンサー処理、妥当性判定、起動

指令の送受信処理等を行って、開度制御処理を行うなど比較的複雑な通信や処理を行うことになる。これは、ダムコンに処理負荷の集中を避けて、機側操作盤に機能分担させることを考慮したものである。

瀬田川洗堰では本堰ゲートに上屋がなく、機側操作盤は屋外設置となり、過酷な条件下となる。機側操作盤への機能分担は、機側操作盤内部の温度上昇の原因となり、操作制御設備全体として信頼性の向上にならないと判断し、開度制御機能は入出力装置に実装し、遠方から開閉指令のみのオンオフ制御に簡素化する簡易シーケンス型を採用する。以上のように、機側操作盤PLCの負荷軽減することで内部温度上昇を抑え、機器故障を軽減できると考えられ、信頼性の向上を目指す。

3. コスト縮減対策

(1) 入力信号の系統整理

瀬田川洗堰では、放流量を演算するために、堰直上流の千町左岸水位観測所からの水位、千町右岸水位観測所から水位、さらに上流の橋本流量観測所から流量を入力している。また堰下流の瀬浚水位観測所から水位2量を入力している。これらの入力系統は、入出力処理装置と情報伝達処理装置にそれぞれ分かれており、システムが複雑化している。

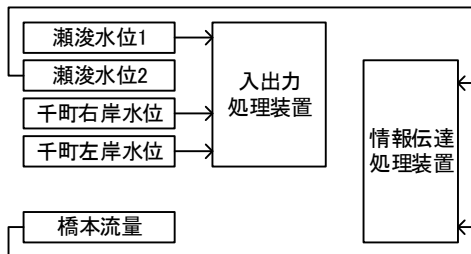


図-6 計測信号入力系統 (既設)

ダムコン標準設計仕様書では、制御系LANに接続される装置にリアルタイムの水文量演算処理する情報を入力し、流域水文量のような定時データを情報入力提供装置 (=情報伝達処理装置) から入力する方法としている。各水位・流量値は、流域水文量の定時データではなく、リアルタイムの水文量演算処理を行うための情報であることから、堰コンの更新にあたり、入力系統を単純化することで、コスト縮減を目指す。

(2) 計測装置の集約化

既設堰コンでは、水位、流量情報は、1量ずつ専用の計測装置 (PLC) が設置され、入力処理を行っている。保守費用は装置数によるため、イニシャルコストだけでなく、ライフサイクルコストに影響する。

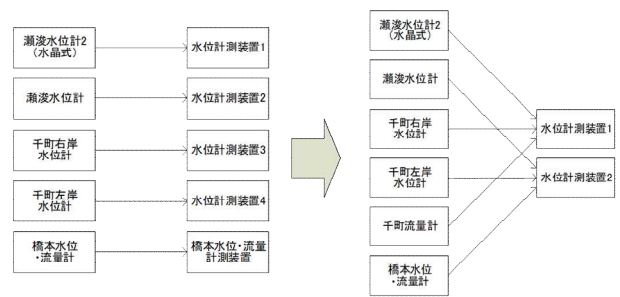


図-7 計測装置の接続構成 (左: 既設, 右: 更新案)

PLCの信頼性は高く、またデータ処理能力は1量のみに限らないことから、計測装置の機器集約化を図るものとした。ただし、二重化されている水位は、別々の計測装置に入力するものとし、冗長化を図る。これによりPLCを5台から2台に減らすことができ、およそ200万円×3台=600万円程度のコスト縮減を図るものとした。

(3) 表示装置

既設の大型ディスプレイは、従来のグラフィックパネルの代替として、ベゼル幅の狭いディスプレイを4面組み合わせたものである。従来の内容や文字高を維持し、視認性を考慮したものであるが、画面の分割処理、表示処理のソフトウェア費、特注の架台にコストがかかっている。



写真-3 グラフィックパネル (旧設備)



写真-4 大型ディスプレイ (既設)

現状の運用状況を踏まえ、大型ディスプレイは1面構成とした。これにより、約1800万円のコスト削減を図る。なお、CCTV用の天吊モニタに堰コン画面を出力できるように改善し、常時監視できるように配慮する。

(4) 管理項目の見直し

従来ダムコン・堰コンは、ダム・堰に関わる情報を一元管理する設備として構築されてきたが、現在は流水に関わる情報のみを取り扱うものとしている。既設堰コンでは、電気室に機側伝送装置を設置して、受変電設備の状態信号を入力している。これらは流水管理に関わるものではなく、別途設備での管理、監視が可能である。コスト削減の観点から更新後はこれらの情報を取り扱わないものとした。電気室の機側伝送装置が不要となり、これにより約500万円のコスト削減が可能となる。

また、バイパス水路には、水位計と共に流量計が設置され、堰コンに入力している。バイパス水路水位は、流量調節ゲート・流量調節バルブの放流量演算で利用しているが、流量計値は演算に利用していない。検証用の計測設備で役目を終えており、バイパス水路流量は、堰コン更新後は取り込まないものとする。これにより入力処理や入力インタフェースを削除することができ、コスト削減となる。

4. 省力化

既設堰コンからの出力帳票は日報のみであり、月報の出力機能は実装されていない。管理上、堰コンの記録データを利用して、別途月報を作成しており、操作職員の負担になっている。

更新後は月集計処理を行い、月報を自動作成する機能を実装し、操作職員の負担軽減、支援できるようにする。

5. 更新時の運用 (切替計画)

堰コンは、堰水流量の演算、放流設備の遠方操作を行い常時稼働している管理上非常に重要な設備である。仮に堰コンが機能停止となった場合は、事務所操作室から流入量・放流量等の堰水流量が把握できなくなるとともに、遠方操作ができなくなる。機器の据付・調整は、以下の方法で、新旧設備の更新時の機能停止期間を極力短くする計画とした。

- ①移行は1)更新装置を空きスペースに仮設、2)順次切替を行った上で動作確認、3)既設装置を撤去、4)更新装置本設の段階的な据付・調整を行うことを計画する。
- ②堰水位は、堰操作に必要な放流量、流入量を演算するために不可欠である。新旧並列で堰水流量演算を行う

ために、2台構成となっている堰上水位となる千町水位計のうち、1台を更新堰コンに先んじて接続し、新旧堰コンでの並行した堰水流量演算処理を可能とする。

③ゲート設備の切替時でも、堰水流量演算処理を継続する必要がある。既設堰コンには、水位計や開度計の点検時でも、計測値を手入力できる保守設定機能があり、設定入力値をもとに堰水流量演算を継続できる。更新堰コンにも同様に保守設定機能を実装し、この機能を活用して新旧ともに必要な演算値を暫定値として得る。

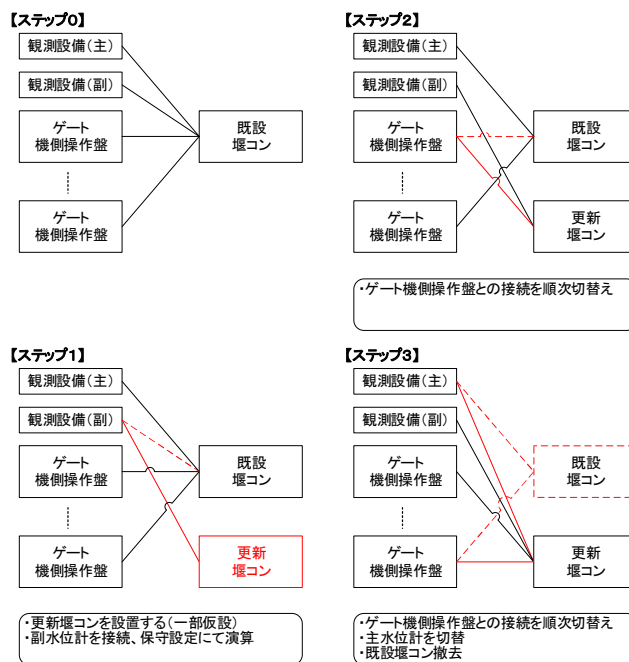


図-8 切替ステップ

6. 終わりに

堰コン更新にあたり、瀬田川洗堰の運用上、既設設備に対する諸課題について、改善方法・対応を検討した。同様に他ダム・堰でのダムコン・堰コンの更新時に参考になれば、幸いである。本検討の結果をもとに、今後更新工事を実施する計画である。工事実施にあたっては、施工業者からの提案があれば、さらなるコスト削減や改善を進めていきたい。また流量把握の精度向上については適切な瀬田川洗堰の操作・管理に資するよう検証を行っていきたい。

参考文献

- 1) ワークホースH-ADCPカタログ 株式会社ハイドロシステム開発

すさみ串本道路における生産性向上の取り組み ～遠隔臨場やCo覆工自動打設～

井出 善太¹・笹嶋 和彦²

¹近畿地方整備局 琵琶湖河川事務所 工務課 (〒520-2279滋賀県大津市黒津4-5-1)

²近畿地方整備局 京都国道事務所 京都第一出張所 (〒612-8208京都府伏見区下鳥羽但馬町25) .

紀南河川国道事務所では、和歌山県西牟婁郡すさみ町と東牟婁郡串本長を結ぶ一般国道42号すさみ串本道路の早期供用を目指している。その事業の中で、生産性向上の取り組みの一部として遠隔臨場及びCo覆工自動打設がある。本稿では、その二つの取り組みの内容についての説明を行い、そして有効性及び課題についてまとめたものである。

キーワード 遠隔臨場, Co覆工自動打設, 生産性向上

1. すさみ串本道路の概要

一般国道42号「すさみ串本道路」(図-1,2参照)は、近畿自動車道紀勢線の一部として、和歌山県西牟婁郡すさみ町と東牟婁郡串本町との間を結ぶ延長19.2kmの自動車専用道路であり、2014年度に事業化された。現在紀伊半島南部にある幹線道路は現道の国道42号のみであり、線形が厳しいことに加えて台風や豪雨などの異常気象発生時には度々通行止めとなっている。そのため、すさみ串本道路は、本地域における災害時の信頼性・安全性の確保、救急医療活動の支援、観光活性化等を目的に整備が行われている。また、近い将来高い確率での発生が懸念されている南海トラフの巨大地震に伴う大津波により、現道の大部分は浸水区間内に入ると想定されており、浸水区間を回避する高さに計画されているすさみ串本道路は、「命の道」として1日も早い供用が期待されている。すさみ串本道路は、既に供用済みとなっている近畿自動車道紀勢線の区間に加えて事業中の串本太地道路(2018年度事業化)・新宮道路(2019年度事業化)・新宮紀宝道路(2015年度事業化)と合わせて紀伊半島を1周する高規格幹線道路となる予定である。本論文では、R2年度に施行された遠隔臨場と事業の一部である二色トンネル工事の中のCo覆工自動打設について記載する。

2. Co自動覆工打設について

(1)すさみ串本道路二色トンネル工事の概要

一般国道42号すさみ串本道路二色トンネルは、和歌山県東牟婁郡串本町閘野川地先から二色地先に位置し、トンネル延長365m、掘削断面積124m²、内空幅が12mの上半

3心円扁平大断面トンネルである(図-1)。工事着手は2019年月4月12日、覆工開始は2020年7月29日である。施工基面の地質は、新生代第三紀中新世の堆積岩である熊野層群敷屋累層に属する泥岩、泥岩優勢互層が分布し、破碎帯を介在する(図-2)。延長の約40%は地山強度比が0.4~1.6の低強度地山であり、延長の56%は小土被りである。実施したトンネル支保パターンは、表-1に示す。掘削方法は、トンネルの切羽の安定と作業性に優れる球面切羽による大背先行上半先進ベンチカット工法爆破掘削を基本にして、施工サイクルの切羽で1日1回のDigital出来形測量を実施、掘削面や吹付け面、切羽形状の出来形を確認して、施工を確実にしている(図-3)。覆工は、トンネル掘削完了後に開始する。覆工施工単位(BL)の1ブロック長は、10.5mである。これらを考慮して、覆工コンクリート移動型枠を計画する。

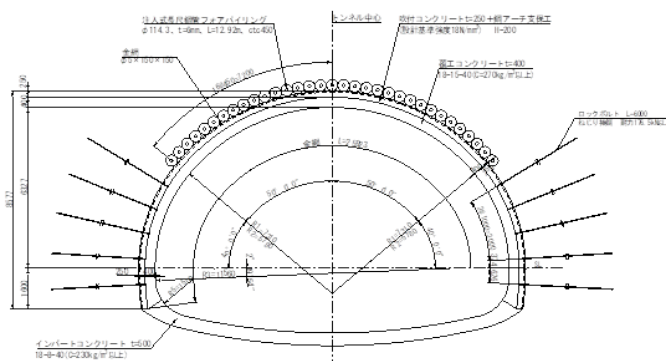


図-1 坑口DIIIa1パターン概要

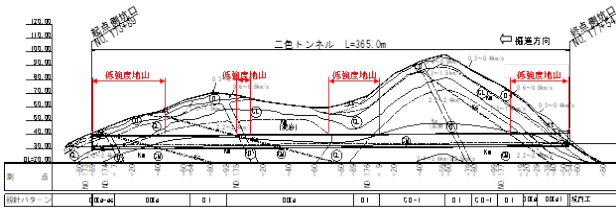


図-2 地質縦断面

表-1 トンネル支保パターン諸元

支保パターン	D Ⅲa (D Ⅲa1)	C Ⅱ i	D Ⅰ
地山等級	D Ⅰ, D Ⅱ	C Ⅱ	D Ⅰ
一振進長 (m)	1.00	1.20	1.00
吹付け厚 (cm)	25	15	20
鋼アーチ支保工サイズ	H-200	H-150	H-150
ロックボルト, 周方向間隔	L=6m, 1.0m	L=4m, 1.2m	L=6m, 1.0m
掘削補助工	(注入式炭尺先受)		



図-3 球面切羽全景 (大背先行上半先進ベンチカット工法) (2)現場流動覆工コンクリート施工について

a) 現場流動覆工コンクリート自動施工システム概要

JIS 認定生コン工場製造ベースコンクリートに増粘剤一液タイプ流動化剤 (FD) を高速攪拌させた現場流動覆工コンクリートの締固めは、「型枠バイブレータ (VB) の加振で、打込んだコンクリート表面が水平となり、流動が止まる状態にする」を基本とし、流動性に優れ、材料分離がない現場流動覆工コンクリートの特性を活かす合理的な吹上げ方式の打込みとする。コンクリート圧送、配管切替え、打込み装置の打込み口への移動、型枠バイブレータ (VB) 締固めは、作業をパターン化し、PC システムによる機械制御で、覆工コンクリート施工を自動化する (図-4)。打込み締固めの施工パターンは、PC システムの計画 DB で規定する。PC システムは、各種センサからのリアルタイムデータで施工状況を把握、監視し、計画 DB の施工手順に従ってマンピュレータ方式配管切替えと打込み装置、型枠バイブレータシステムなどの各種装置およびコンクリートポンプを自動制御する。施工状況や締固め状態は、数値で確認でき、実施 DB に保存する。

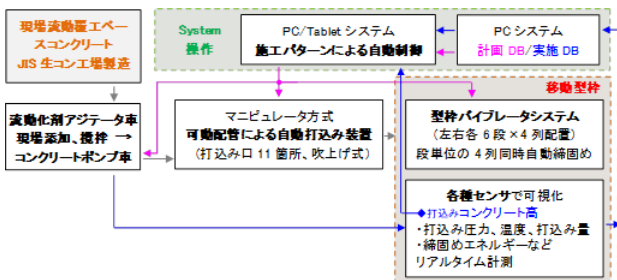


図-4 自動覆工システムフロー図

b) 覆工自動施工計画

現場流動覆工コンクリートの特性を活かすコンクリート打込みは、切羽妻側からの吹上げ方式を採用する。コンクリート打込み口と配管切替えは、PC 制御の機械による自動打込みとし、締固めは、型枠バイブレータ (VB) による自動パターン締固めである。アーチ部のコンクリート打込み締固めがトンネル品質に大きく影響する上半 3 心円大断面トンネルの現場流動覆工コンクリート自動施工システム計画の考え方と主な機能は、以下に示す。

①移動型枠にマンピュレータ方式打込み装置と型枠バイブレータを装備し、PC システムで自動制御する。

②打込み締固めの 1 施工単位は、側部と肩部はコンクリートボリュームを 2m³ずつ、天端部は 4m³を基本とし、打込み箇所番号 (①~⑮) で規定する (図-5)。この箇所の施工で使用する打込み口 (IL, IR) と型枠バイブレータ (VL, VR) は、PC システムの計画 DB に登録する。

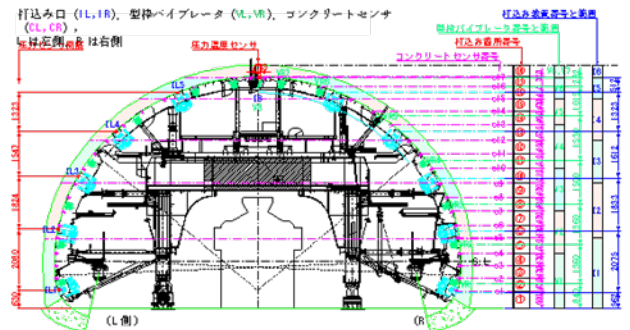


図-5 打込み箇所番号・装置の打込み範囲と締固め範囲 (妻側断面図)

③1 施工単位は、打込み高を 30~60cm とし、移動型枠中央 (4 間目) に配置するコンクリートセンサ (CL, CR) でコンクリート表面位置を検知、到達を確認して打込み箇所の打込みを終える (図-6)。

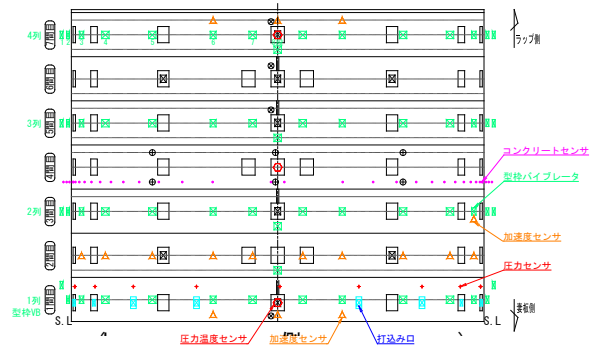


図-6 各種センサ配置概要 (平面図)

④打込み速度は、打込み高さ 1.5~2.0m/h、コンクリートボリューム 12~16m³/h を目安とする。

⑤打込み口は、トンネル周方向に 1.5~2.5m 間隔、左右に 5 箇所、天端に 1 箇所の計 11 箇所を妻側に設ける (図-7)。左右 5 箇所の打込み口の切替えは、打込み箇所番号との対応で PC が判断し、打込み口シャッタを閉めてから上方の打込み口に移動する。天端の打込み口 1 箇所 (I6) は、上半 3 心円扁平大断面トンネルであるので、

固定式の検査窓式打込み口とする。

⑥型枠バイブレータ (VB) は、周方向最大 1.5m 間隔、延長方向 3.0m 以内を目安に配置する。

⑦コンクリートの打込みは、多関節コンクリート可動配管のマニピュレータ方式打込み装置を左右に装備し、吹上げ方式で打込む。この PC 制御の打込み装置は、打込みノズルと打込みノズル移動台車で構成され、移動レールに沿ってトンネル周方向に移動する。打込みノズルは、油圧シリンダ PC 制御でトンネル軸方向前後に移動でき、打込みノズル挿入口に挿入、固定、解除、引抜きができる (写真-1)

⑧型枠バイブレータ (VB) によるコンクリート自動締固めは、10cm 以上のコンクリート被りを確保し、適正締固めエネルギー 3.7J/L 以上の加振を基本とする。締固めエネルギーは、コンクリート表面下の加振段について、締固めの都度、最大加速度を求め、締固めエネルギー換算式で算定する。

⑨型枠バイブレータは、段単位の稼働とし、最大 4 台の同時加振、段当たり 15 秒、最大 5 回の稼働とする。

⑩天端部は、コンクリートボリューム 4m³ 単位の自動打込みとし、その都度、左右 (V7) と天端 (V8) の型枠 VB を順次稼働させて締固める。防水シート表面天端中央の圧力温度センサがコンクリート圧力を検知した時点で、打込み締固めのパターン施工を終え、「打止め画面」に切り替えて、密充填のための打込みを継続する。

⑪コンクリート打止めは、管理値による自動打止めを基本とし、天端中央および既施工ラップ側と妻側の両端部の圧力温度センサがコンクリート圧力を検知し、移動型枠の沈下が管理値を超えた時点で密充填と判定し、覆工自動施工を完了する。

⑫覆工コンクリート養生は、脱型枠までの移動型枠養生である。

主要使用機械を表-2 に示す。施工状況、締固め状態、コンクリート打止めと脱型枠を数値で可視化し、施工管理するための各種センサは、表-3 に示す。



写真-1 マニピュレータ方式自動打込み装置全景

表-2 主要使用機械

機械名	用途
コンクリートポンプ車	コンクリート圧送、PS制御
アジテータ車	コンクリート運搬、流動化攪拌
流動化剤添加装置	印字記録付き
マニピュレータ方式打込み装置	吹上げ方式コンクリート打込み
打込み口	移動型枠妻側、シャッター自動開閉
打込むノズル	マニピュレータ方式自動打込み装置
打込みノズル移動台車	マニピュレータ方式自動打込み装置
型枠バイブレータ	コンクリート締固め
スライドセントル	覆工自動施工用移動型枠

表-3 各種センサ

センサ名	用途
コンクリートセンサ	打込みコンクリート表面位置検知
圧力センサ	打込みコンクリート圧力など
加速度センサ	締固めエネルギー算定
圧力温度センサ	打止め圧力、積算温度
沈下計	移動型枠沈下量

c) 覆工パターン施工

覆工コンクリート施工は、PC システムの計画 DB に施工パターンと装置の動きを規定する。覆工コンクリート自動施工順序は、打込み箇所番号①から⑰を左右切り替えながら施工フローにしたがって行う (図-8)。(1)の打込みは、PC システムから打込み箇所番号の打込み開始の確認が求められ、オペレータは PC 画面で確認、開始を指示する。これによりコンクリートポンプが稼働し、打込みを開始する。打込み箇所の打込み高をコンクリートセンサが検知した時点でポンプは自動停止、打込みを終える。その後、(2)型枠バイブレータ締固めを開始し、15 秒間稼働する。この(1)(2)を PC 画面で確認しながら打込み箇所番号⑰まで繰り返す。

天端部の打込み箇所⑱は、コンクリートボリューム 4m³ 単位の打込みとし、その都度、左右 (VL7, VR7) と天端 (V8) の型枠バイブレータ (VB) を順次稼働させて締固める。トンネル天端中央の圧力温度センサがコンクリート圧力を検知した時点で打込み締固めのパターン施工を終え、ポンプ車ストローク単位の打込みに切り替える。コンクリート打止めは、管理値の天端 3 箇所のコンクリート圧力 (0.005N/mm² 以上を目安) と移動型枠の沈下 (最大 5mm) で密充填を確認、判定し、覆工施工を終える。

なお、覆工コンクリート自動施工システムの安定性を確認後、自動運転に切り替え、システムと施工状況およ

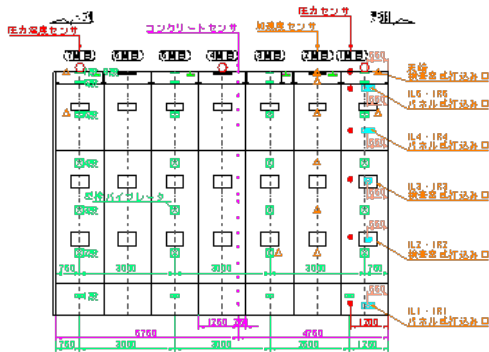


図-7 打込み口・型枠バイブレータ・各種センサ配置概要

び締固め状態を画面で確認、監視する。

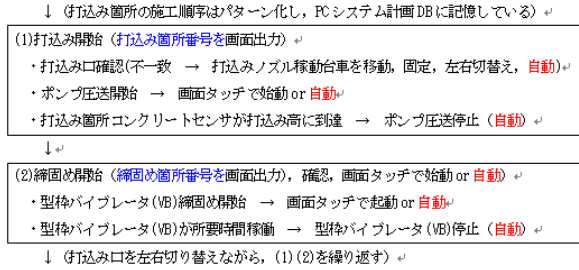


図-8 打込み箇所の自動施工フロー

d) 覆工施工パラメータ計測

打込み口 11 箇所のコンクリート圧力とポンプ車コンクリート押し出し圧力を連続計測し、施工状況を把握、確認する。締固めエネルギーは、締固めの都度、19 箇所の加速度センサで最大加速度を求め、締固めエネルギーを算定、累積、PC 画面に出力し、締固め状態と締固め時間を確認する。トンネル中心天端の妻側、中央、ラップ側の 3 箇所の防水シート表面に圧力温度センサを貼り付け、コンクリート圧力と温度を 2 秒間隔に自動計測、同時に移動型枠 4 箇所の沈下計からの沈下量を確認して、密充填を判断、打止める。脱型枠時の若材齢強度は、コンクリートの積算温度と実機試験時に求めた若材齢強度推定式を用いて算定し、脱型枠に必要とする圧縮強度との比較で、脱型枠を確認、判断する。移動型枠に作用するコンクリート圧力は、圧力センサでリアルタイム計測し、打込み速度を確認する。

e) 覆工コンクリート性能評価

現場流動覆工コンクリートの力学特性は、覆工 3 週後に、テストハンマーによる強度推定試験 (JSCE-G 504-2007) で数値化し、強度特性を確認する。試験断面は、覆工ブロック端から 1m 離れの妻側とラップ側の両端、締固めエネルギー評価の移動型枠 2 間目の計 3 断面である。測点箇所は、天端部、左右 SL 部とし、計 9 箇所である。覆工仕上がり表面品質は、剥離、気泡、砂すじ、色むら、打重ね線、目地不良、窓枠段差について目視観察で評価する。

(3)施工結果および得られた知見

a) 打込み締固め状況

覆工コンクリート自動施工システムの機械や装置、システムにトラブルはなく、PC システムは有効に機能し、所要性能を満たすことを確認した。T-1 (AdF) のフレッシュコンクリートの品質は安定しており、吹上げ方式打込み後のフレッシュコンクリート表面は、型枠バイブレータ (VB) 締固め後も同様であり、概ね水平を保ち、ブリージング水はなく、材料分離はみられず良好であった。5BL 施工時の坑内気温は 24℃、コンクリート温度は 27℃であった。生コン製造後から打込み完了までの時間は、

最大 1 時間、FD 後は 20 分であった。

b) 打込コンクリート圧力

FD=C×0.4%で無筋 5BL の打込み箇所打込み口のコンクリート圧力とコンクリートポンプ押し出し口圧力は、図-10 に示す。コンクリート押し出し口圧力の平均は 5.5N/mm² である。打込み口 11 箇所における打込み箇所別コンクリート圧力は、0.002~0.044N/mm² となり、打込み箇所が打込み口より上方になるにしたがい大きくなり、増加傾向は同様である。天端打込み箇所⑬は 0.023N/mm²、最大値は打込み口 II の 5 層時 (打込み箇所番号⑤) の 0.044N/mm² であり、ポンプ押し出し圧力の 0.7% 以下と小さく、吹上げ方式コンクリート打込み方法に課題はないということがわかった。

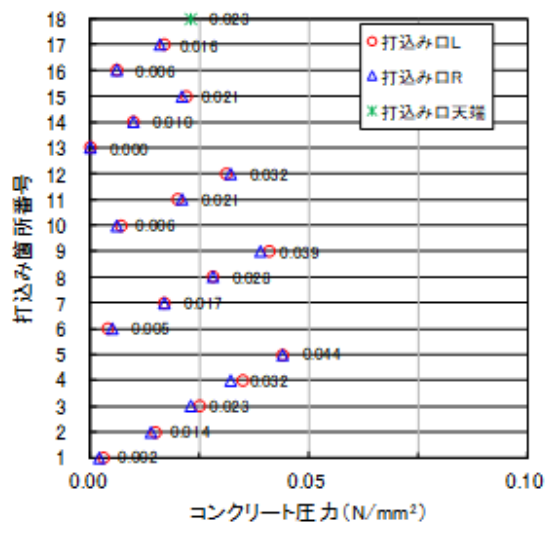


図-10 打込み箇所の打込み口コンクリート圧力

c) 打止めコンクリート圧力

5BL の妻側、中央、ラップ側 3 箇所の天端防水シート表面のコンクリート打止め時コンクリート圧力は、管理目標値の 0.005N/mm² を超えており、打ち込まれたコンクリートは圧力作用下であり、移動型枠が-2.0~-4.6mm 沈下、密充填を確認したので打止めた。その点で覆工コンクリートの自動施工を可能に出来た。打止め圧力が大きい妻側は、締固めエネルギーも大きかった。これは、ラップ側にはすでに打設したコンクリートがあるため圧力が伝わり安い状態にあったと考えられる。

d) 覆工コンクリート仕上がり品質

初回の 3BL と 2 回目 2BL の覆工表面の仕上がり状態を写真-4 に示す。この覆工ブロックは、坑口 IIIa の鉄筋区間で流動化剤添加量は FD=C×0.2% であり、スランプフローは管理値の範囲内にある。しかしながら、吹上げ方式打込みでは、目視観察から、覆工表面 SL 部にコンクリート移動跡が確認された。これが FD=C×0.5% では、フレッシュコンクリート移動跡は少なくなり、覆工表面仕上がり状態は、剥離、気泡、色むら、打重ね線などは見ら

れず、アーチ部のコンクリート打込み締固めがトンネル品質に大きく影響する上半3心円大断面トンネルにおける吹上げ方式自動打込みと型枠バイブレータのパターン締固めによる自動施工の覆工仕上がり面は、良好であることを確認した。ただし、 $FD-C \times 0.5\%$ よりも多く添加した場合についてはスランプフロー規定値上限の50cmを超えてしまうので施工はしていない。

e) 覆工コンクリート強度について

5BLの妻側、ラップ側の天端および2間目の天端と左右SL部の計5箇所のテストハンマー試験による3週推定強度は27.4~32.1N/mm²であり、設計基準強度 $f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 以上である推定強度の最大最小差は、天端部は1.1N/mm²、SL部は1.4N/mm²であり、ばらつきは小さい。推定強度は、打込みコンクリート圧力の違いによる有意な差はない。

これらから、吹上げ方式自動打込みとパターン締固め方法が覆工コンクリートの強度特性に及ぼす影響は小さく、覆工強度のばらつきが小さい覆工施工法であることが示された。

f) 覆工出来形確認

3Dスキャナによるターゲット自動認識法Digital出来形測量検測システムを用いて7BLの覆工出来形を測量、設計との差を色調表示した(表-4, 図-11)。覆工出来形は、レジストレーション誤差が3mmであり、許容値の設計±5cmの範囲にある。覆工厚は、覆工内空面と防水シート前吹付け面の点群データを用いて、仮想単位平面中心における空間離れを算定、これを覆工厚とし、設計厚との差を色調表示した(表-5, 図-12)。覆工厚の算定値は、設計厚40cm+余巻き10cmの範囲内にあり、設計厚は確保できた。

表-4 覆工内空出来形色調表示

閾値	色
覆工内空線-5cm, 内空側	赤
覆工内空線-5cm~-1cm	黄
覆工内空線±1cm	青
覆工内空線+1cm~+5cm	緑
覆工内空線+5cm, 地山側	桃

表-5 覆工厚色調表示

閾値	色
設計厚未滿	赤
(設計厚+余巻き)未滿	青
(設計厚+余巻き)以上	緑

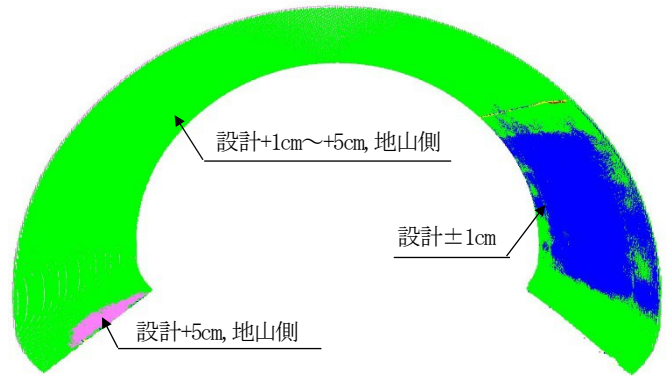


図-11 覆工出来形 (7BL, 起点側から終点, 道路平面線形は右カーブ)

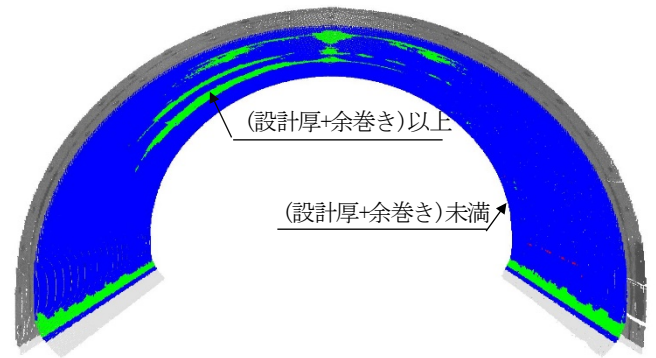


図-12 覆工厚分布 (7BL, DI)

3. 遠隔臨場の試行について

(1)遠隔臨場の概要

a) 遠隔臨場とは

動画撮影用のカメラ(ウェアラブルカメラ等)により撮影した映像と音声をWeb会議システム等を利用して「段階確認」,「材料確認」と「立会」を行うものである。本件の試行を行う際は、「建設現場の遠隔臨場に関する試行要領(案)(以下、「本要領」という。)」に従うものとする。なお、2020年度では、すさみ串本道路事業の中では3工事試行しており、また紀南河川国道事務所全体では6工事施工している。

b) 遠隔臨場に使用する機器構成と仕様

遠隔臨場に使用する動画撮影用のカメラ(ウェアラブルカメラ等)の資機材は受注者が準備、運用するものとする。機器構成については図-13に示す。



図-13 遠隔臨場機器構成

また、動画撮影用のカメラ(ウェアラブルカメラ等)に関する仕様については表-6に示す。

表-6 動画撮影用カメラの仕様

項目	仕様	備考
映像	画素数：640×480以上	カラー
	フレームレート：15fps以上	
音声	マイク：モノラル（1チャンネル）以上	
	スピーカー：モノラル（1チャンネル）以上	

c) 試行状況について

すさみ串本道路事業において動画撮影用カメラの内訳は、3工事中ウェアラブルカメラが2工事、タブレットタイプが1工事となった。また、紀南河川国道事務所管内ではウェアラブルカメラタイプが3工事、タブレットタイプが2工事、スマートグラスタイプが1工事であった。

d) 遠隔臨場における課題及び効果について

今回、すさみ串本道路事業を含めて紀南河川国道事務所内で試行を行っている施工業者にアンケート調査を行った。遠隔臨場における課題及び効果を図-14、図-15に示す。また全体評価についても表-7に示す。

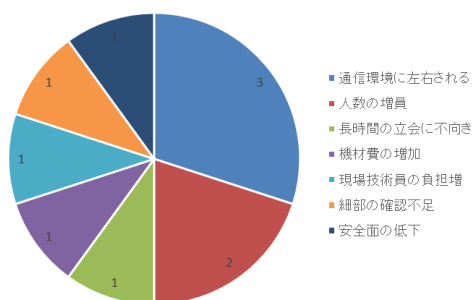


図-14 遠隔臨場における課題

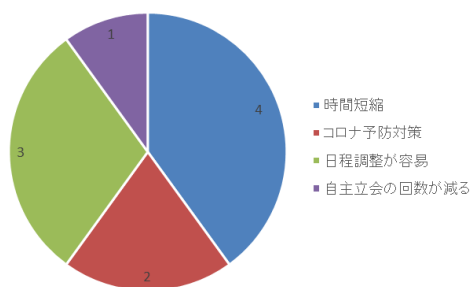
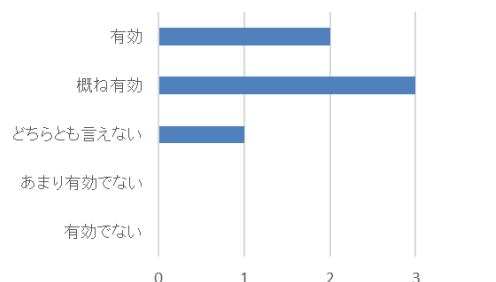


図-15 遠隔臨場における効果

表-7 総合評価



遠隔臨場の課題については、「通信環境に左右される」「人数の増員」が主に上げられた。紀南河川国道事務所管内は、山間部での施工が多いため電波が届かない状態になりうる可能性が高いため、通信環境が悪くなりやすい。また、遠隔臨場を行う際、基本的に撮影者が必要となり施工業者側の負担が大きくなるということがわかる。

反対に、遠隔臨場における効果であるが、「時間短縮」、「日程調整が容易」が主に上げられた。現場臨場をする際は基本的に監督員との調整を省くことができることが一番のメリットであることが読み取れる。そのため、総合的には、遠隔臨場が有効であることがわかった。ただし、今後より普及させていくには、通信環境の向上や現場での機材の小型化をすることで受注者の施工しやすい環境づくりが必要であると考えます。

4. おわりに

本稿では、すさみ串本道路における生産性向上の取り組みとしてCo覆工自動打設、遠隔臨場に注目して、執筆を行った。

Co覆工自動打設については、生産性向上(省人化・品質の均一化・安全性の向上)の観点から非常に有効な手段であるとわかった。しかし、依然として国土交通省内での活用実績が乏しいので今後、すさみ串本道路事業以外の場所でも普及していく方がよいと考えます。

また、遠隔臨場については、基本的には有効であることは確認されているが、本来必要である山間地等での利用・受注者の負担の観点において課題が散見される状況であるので今後ハード・ソフトの両面から課題の克服に取り組む必要があると考えます。

参考文献

1) 笹嶋和彦, 扁平大断面トンネル覆工を現場流動コンクリートを用いて自動施工

建設発生土の築堤材への有効活用について

土井 美里¹

¹近畿地方整備局 福知山河川国道事務所 計画課 (〒620-0875京都府福知山市字堀小字今岡2459-14)

昨今、建設業界では多くの建設副産物が処分されていることが問題視されている。今後の河川治水事業、道路改築事業等の社会資本整備に伴い建設副産物の排出量が増大し、より多くの建設副産物が処分されることが予測されることから、公共建設工事において再生資源の利用及び再資源化施設の活用の推進に取り組む必要がある。

このような背景から、紀の川において、河道掘削工事で発生した建設発生土を築堤工事にて使用することで建設副産物の有効活用を図ることとした。

本論文では、建設副産物の有効活用で得られた効果と、今後の課題について報告する。

キーワード 建設リサイクル, 建設発生土, 再利用

1. はじめに

(1) 紀の川概要

紀の川は、日本の中で最も多雨地帯として知られる大台ヶ原を水源に、支川を集めながら中央構造線に沿って流れ紀伊水道に注ぐ流域面積1,750km²、幹線流路延長136kmの一級河川である。

その流域は、上流は奈良県、下流は和歌山県にまたがり、和歌山市や橋本市、五條市など吉野・紀北地方の社会・経済・文化の基盤をなしている。

紀の川の水源である大台ヶ原は日本で有数の多雨地帯であり、台風等の影響で容易に氾濫を繰り返すことから治水事業を進めているところである。また、紀の川中下流部では狭窄部、紀の川上流部では無堤部が点在しており、流下能力が不足している。



図-1 紀の川流域図



図-2 奈良県五條市無堤部区間

(2) 建設発生土の再利用

和歌山県橋本市神野々地区の河道掘削工事と、奈良県五條市野原西地区の築堤工事を対象として、建設発生土の再利用検証を行うこととする。

神野々地区と野原西地区の距離は約12kmあり、神野々地区は河川内に堆積した土砂の陸上掘削である。

2. 築堤材の品質について

(1) 築堤材利用の条件

建設発生土を築堤材に再利用するにあたり、「河川土工マニュアル¹⁾」に示される条件を満たす必要がある。

「河川土工マニュアル¹⁾」に示されている築堤材として望ましい土の条件を表-1に、望ましい土の粒度分布範囲を図-3に示す。

表-1 築堤材に望ましい土の条件

項目	解説	望ましい土質分類
粒度分布のよい土 (半透水性部材料が望ましい)	締固めが十分行われるためにいろいろな粒径が含まれているのがよいのであるが、粗粒分は粒子のみ合わせにより強度を発揮させるのに効果があり、細粒分は透水係数を小さくするのに必要であるから、これらが適当に配合されていることが堤体材料としては好都合である。	{G.F},{S.F}, {M},{C}
最大寸法は10~15cm以下	施工時のまき出し厚の制限から決まるものであるが、粒径の最大寸法があまりにも大きくなると、締固めの効果が十分に発揮されないことも生ずるので注意が必要である。	
細粒分(0.075mm以下の粒子が土質材料(75mm以下の粒子)の15%以上)	不透水性を確保するための条件で、堤体漏水の多くはこの条件をはずれた材料の堤防にみられることが報告されている。	
シルト分のあまり多くない土	降雨による浸食、浸透土によるり面崩壊は水がある程度通しやすく、含水比の増加によりせん断抵抗の低下する土に起こった例が多いが、そのような状態になるのはシルト分の影響が大きいと考えられる。	
細粒分(0.075mm以下の粒子)のあまり多くない土	細粒分が50%以上のものは乾燥時にクラックの入る危険性があるので細粒分が50%以下のものが望ましい。	

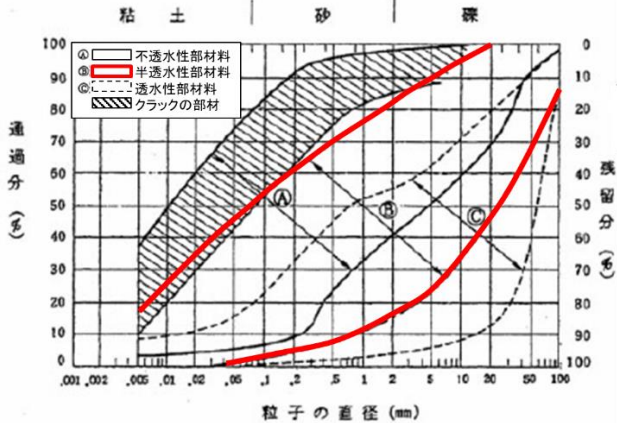


図-3 築堤材に望ましい土の粒度分布範囲

(2) 発生土の品質について

神野々地区の発生土について、4つのサンプルを採取し室内土質試験により物理特性を調べたところ、表-2の結果及び図-4のような粒度分布が得られた。表-2より、細粒分(0.075mm以下の粒子)が土質材料(75mm以下の粒子)の15%以下であることがわかった。また、図-4より半透水性部材料のレンジ内ではあるが細粒分(0.075mm以下の粒子)がほとんどないことがわかった。

上記より、神野々地区の発生土は細粒分が足りず、築堤材に望ましくない土砂という結果となった。

(3) 品質確保のための対応

対応として神野々地区の発生土を一部砕き細粒分を増やすもしくは細粒分を多く含んだ土砂と混合改良することが考えられたが、発生土を砕いた場合、発生土を砕くヤードとなる野原西地区が民家に近く騒音、粉塵が問題になることが懸念されたため、混合改良を採用することとした。

混合改良に使用する細粒分を多く含んだ土砂を確保するために、野原西地区の築堤施工箇所近傍の高水敷において試掘調査をしたところ、細粒分を含んだ粘性土を一定量採取することができた。したがって、図-5のフローに示すように粘性土と発生土の配合割合を検査し混合改良することとした。改良する築堤材のことを以下、リサイクル土という。

表-2 神野々地区発生土の室内土質試験結果

試料名	神野々No.1	神野々No.2	神野々No.3	神野々平均
	GWS	GWS	GWS	GWS
日本統一土質分類				
土粒子の密度(g/cm ³)				
含水比(%)	5.9	3.0	3.1	4.0
最大粒径(mm)	37.5	53	53	53
泥分(%)	67.9	80.7	70.2	72.9
砂分(%)	29.4	18.5	29.4	25.8
シルト分(%)	2.7	0.8	0.4	1.3
粘土分(%)				
75mm				
53mm		100.0	100.0	100.0
37.5mm	100.0	85.5	84.6	90.0
26.5mm	87.1	75.6	76.2	79.6
19mm	82.0	62.8	59.1	68.0
9.5mm	60.7	46.4	47.9	51.7
4.75mm	41.8	31.8	39.0	37.5
2mm	32.1	19.3	29.8	27.1
0.85mm	17.8	9.3	16.2	14.4
0.425mm	10.1	3.2	4.1	5.8
0.25mm	5.8	1.7	1.1	2.9
0.106mm	3.0	0.9	0.5	1.5
0.075mm	2.7	0.8	0.4	1.3
液性限界(%)				
塑性指数				
湿潤密度(g/cm ³)	2.197	2.098	2.079	2.125
乾燥密度(g/cm ³)	2.075	2.037	2.016	2.043
コンデン率(kN/m ³)	3411	2554	2057	-

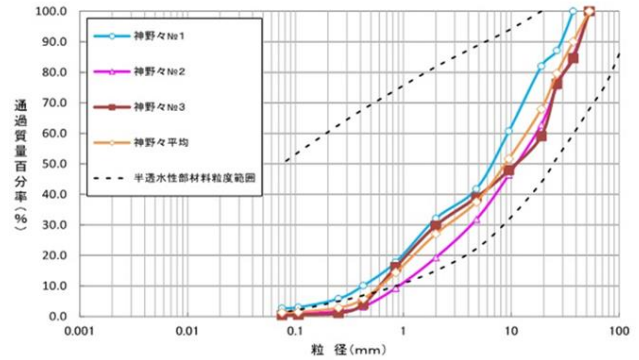


図-4 神野々地区発生土の粒度分布

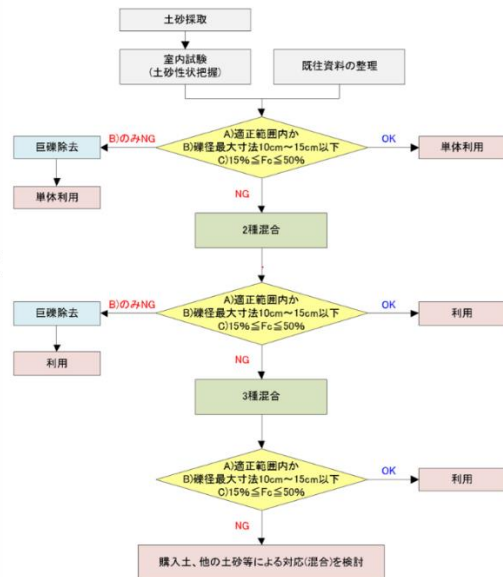


図-5 土砂配合割合検査フロー

3. リサイクル土の作製

(1) 配合割合の検討結果

野原西地区粘性土と神野々地区建設発生土の配合割合を表-2に示す4ケースを設定し、それぞれで室内土質試験を行った。試験から得られた数値を表-3に、粒度分布図を図-6に示す。

なお、土質試験においては、「河川土工マニュアル」

及び「建設発生土利用基準²⁾」に基づき試験・品質管理を行った。

表-2 配合割合

番号	野原西地区 粘性土	神野々地区 建設発生土
ケース1	30	70
ケース2	40	60
ケース3	50	50
ケース4	60	40

表-3 ケース1~4の室内土質試験結果

資料名	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	
含水比(%)	10	12.2	14.5	17	
礫分(%)	70.4	51	38.9	26.1	
砂分(%)	16.7	31.8	39.3	47.2	
シルト分(%)					
粘土分(%)	12.9	17.2	21.8	26.7	
室内土質試験結果 通過質量百分率(%)	通過質量百分率(%)				
	75mm	100	100	100	100
	53mm	100	100	100	100
	37.5mm	92.4	93.3	94.2	95.2
	26.5mm	84.5	86.3	88.2	90.2
	19mm	75.6	78.4	81.4	84.7
	9.5mm	63.1	67.4	72	76.8
	4.75mm	52.3	57.9	63.8	70.1
	2mm	44.4	50.7	57.6	65
	0.85mm	2	42.1	50.1	58.6
	0.425mm	27.7	35.9	44.7	54
0.25mm	23.4	31.1	39.3	48.1	
0.106mm	13.7	18.3	23.2	28.4	
0.075mm	12.9	17.2	21.8	26.7	

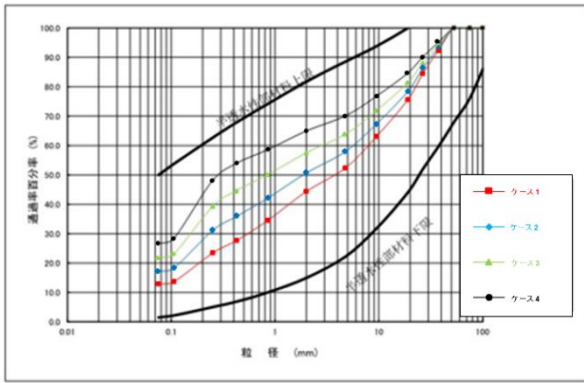


図-6 ケース1~4の粒度分布図

室内土質試験結果より、ケース1は細粒分(0.075mm以下の粒子)が土質材料(75mm以下の粒子)の15%以下となったため不採用とした。

ケース2~4については、3ケースとも細粒分(0.075mm以下の粒子)が土質材料(75mm以下の粒子)の15%以上50%以下となり、シルト分も多くないため築堤材として使用できる結果となったが、確保できる粘性土量が不明であることと、できるだけ多くの発生土を再利用することが重要であるため、3ケースの中で1番発生土の割合が高いケース2を採用した。

(2) 土砂混合方法及び品質管理

土砂混合には、混合精度、施工性及び経済性の観点からNETIS名「万能土質改良機による建設発生土再利用システム」を採用した。また、野原西地区築堤工事の築堤材作製ヤードを図-7に示すように配置計画した。

盛土は土を材料とするところから、本来的に均質性の確保の難しい工事対象物である。したがって、均質化を図るためには日常的な品質の確認が極めて重要である。

「河川土工マニュアル」によれば堤体材料については、あらかじめ土の締固め試験を行い最大乾燥密度、最適含水比を把握し、品質管理基準値を定め日々管理するよう記載されている。今回の築堤現場においても毎朝リサイクル土の含水比を測り日々管理を行いながら施工した。

4. 効果

(1) 再生資源の利用

今回野原西地区の築堤工事において、盛土量32,000m³のうち約20,000m³を他工事から発生した建設発生土を活用することで、再生資源の利用及び建設副産物の処分を抑えることができた。

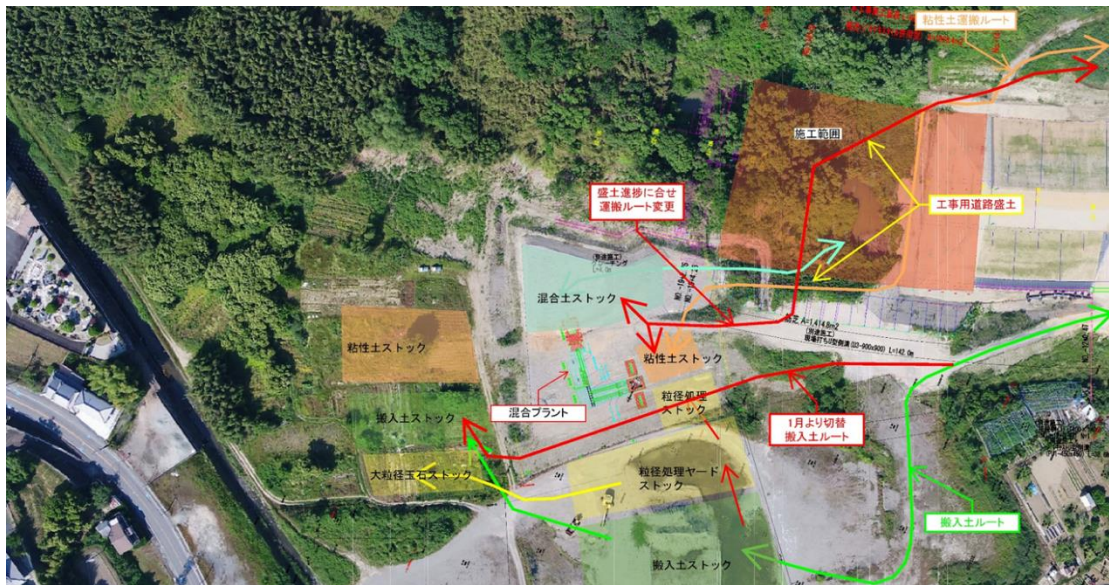


図-7 土砂混合ヤード配置計画図

(2) コスト縮減

従来築堤材に使用していた購入土の場合と、リサイクル土に変更した場合のコスト比較を表-3に示す。

表-3 コスト比較

	リサイクル土	購入土
盛土材料費	61,118,310円	97,905,000円

※リサイクル土には、粒径処理、粘性土採取、小運搬費用を含む。

購入土で盛土した場合と、リサイクル土で盛土した場合とでは、直接工事費で約3,500万円のコスト縮減をすることができた。

それ以外にも、河道掘削工事で発生した建設発生土の処分費を削減することができた。

5. 今後の課題

(1) 施工ヤード

リサイクル土を作製するのに大規模な施工ヤードが必要であった。現在、紀の川築堤事業をしている野原西地区及び二見地区については借地（民間）や敷地提供（県敷地）により施工ヤードを確保している状況である。今後は施工ヤード確保のさらなる検討及び施工ヤードの条件も把握した上で発注計画に反映する必要があると考える。

(2) 現地採取土（粘性土）の確保

今後紀の川上流の築堤事業の整備を進めるにあたり、紀の川中下流部に堆積した土砂は砂礫まじり土砂であることがわかったため、混合する細粒分を多く含んだ土砂の確保が必要となる。

今回築堤工事においては、結果として築堤施工箇所付近で粘性土を必要量確保できたが、工事発注されてから試掘して粘性土探すという作業をしていては、工期を圧迫し大きな設計変更につながりかねない。

今後は、紀の川流域における粘性土採取可能箇所及び採取可能量の調査を行い、発注計画に反映する必要があると考える。

6. まとめ

本論文では、河道掘削工事の発生土を粘性土と混合することで、築堤材料に有効活用を図った。

有効活用から得られた効果は、下記のとおりである。

- ・約20,000m³の土砂を再利用することができ、建設副産物の処分を抑えることができた。
- ・築堤材料費において、従来築堤材に使用していた購入土の場合に比べ、リサイクル土を作製した場合は直工で約3,500万円のコスト縮減をすることができた。また、河道掘削工事で発生した建設発生土の処分費も同時に削減することができた。

また、課題として浮かび上がったのは下記のとおりである。

- ・リサイクル土の作製には大規模な施工ヤードが必要になるため、今後築堤工事におけるヤード確保のさらなる検討が必要である。
- ・今後リサイクル土を作製するにあたり、細粒分を多く含んだ粘性土の確保が必要となる。紀の川流域における粘性土採取可能箇所及び採取可能量の調査を行い、発注計画に反映していく必要がある。

異動に伴う対応

元和歌山河川国道事務所五條出張所、現在福知山河川国道事務所計画課在籍

参考文献

- 1)河川土工マニュアル：平成21年4月 財団法人国土技術研究センター
- 2)建設発生土利用基準：平成18年8月10日付け大臣官房技術調査課長、大臣官房公共事業調査課長、大臣官房官庁営繕部計画課長通達

排水樋門の扉体修繕に関する コスト縮減事例の紹介

森脇 茂樹

近畿地方整備局 京都国道事務所 管理第二課 (京都市下京区西洞院通塩小路下る南不動町808)

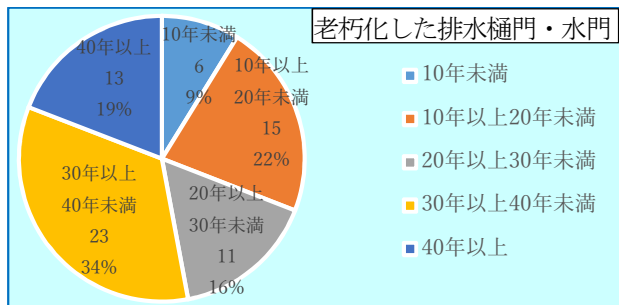
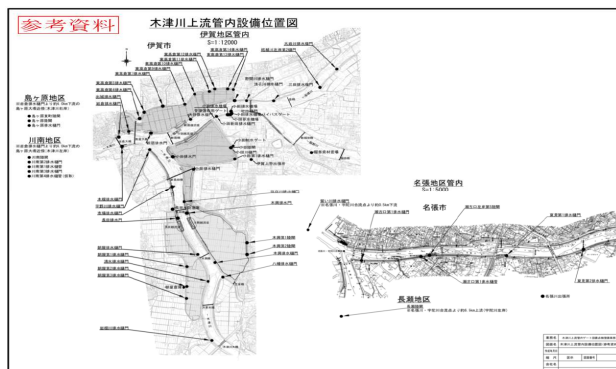
木津川上流河川事務所では樋門・水門59箇所68門を管理しているが、これら施設を適切に維持管理するには多大な維持管理コストが必要となり財政的に厳しい事務所の現状では喫緊の課題である。今回の発表は課題解決の一助となる事例を紹介するものである。

老朽化のため200箇所を超える不具合箇所の修繕を効率的に対策を行うため、不具合数の分類を行い、効率的な修繕に取り組んだ。本論文では、これらのうち、特に問題であった、ローラ式ゲートのローラ固着問題について、ローラを構成するどの部品がなぜ、どのように固着するか、対策、そのときの注意点について調べたことをまとめたものである。

キーワード コスト縮減, ゲート設備, ローラ固着, 滑り軸受, 滑剤, 四フッ化エチレン, 黒鉛

1-1. 老朽化した排水樋門・水門

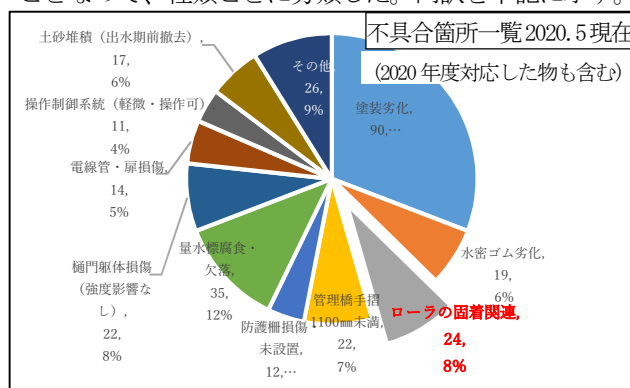
木津川上流河川事務所では直轄河川112kmを管理しており、そこには合計59箇所68門の排水樋門・水門が設置されている。半数以上が設置後30年以上経過している。



1-2. 排水樋門・水門の不具合箇所

老朽化が進んだ結果、不具合箇所が一気に増加し、2020年5月の不具合発見箇所は292箇所であった。(ただし2020年度末は121箇所の対策は完了。)

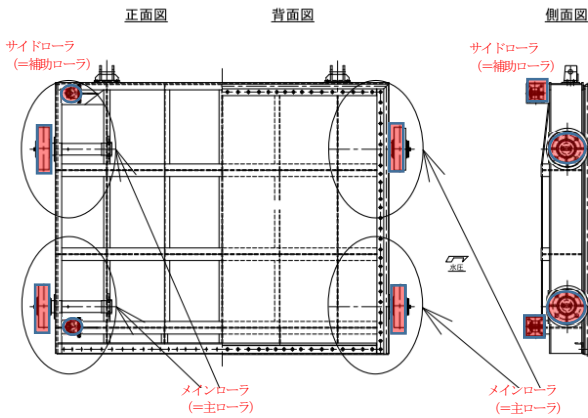
軽微だが数多くの不具合箇所の修繕を効率的に行うには、優先的に修繕する項目を選定し、まとめて修繕することなので、種類ごとに分類した。内訳を下記に示す。



1-3. ローラの固着は優先的に対策すべき箇所

ゲートの開閉操作時の開このうち最も機能に影響する不具合は、ローラの固着に関するものである。

閉荷重低減のために取り付けられており、開閉荷重が設計値を上回るとは運転に支障をきたすおそれがあるため優先度が高い。



2-1. ローラの固着の程度

ローラの動作点検は、点検員が直接ローラを手で回して行っており、昨年度の点検結果は次のとおりだった。

R2の点検結果よりローラ部分抜粋

設備名称	不良箇所及び状況	評価	初回確認年月
新居排水門	扉体主ローラ-固着	△1	H29年
出城排水樋門	扉体主ローラ-固着	△2	H29年
出城排水樋門	扉体補助ローラ-固着	△1	H30年
岩倉排水樋門	主ローラ-固着	△2	H29年
岩倉排水樋門	扉体補助ローラ-固着	△1	R1年
大坪排水樋門	扉体主ローラ-固着	△2	H29年
野間川排水樋門	サイドローラ-固着	△2	H29年
野間川排水樋門	主ローラ-上部2箇所固着	△2	H30年
小田新田排水樋門	扉体主ローラ-固着	△1	H29年
小田排水機場吐出樋門	主ローラ、サイドローラ-固着	△2	H29年
小田排水門	主ローラ、サイドローラ-固着	△2	H29年
小田排水門	主ローラ、サイドローラ-固着	△2	H29年
小田第1排水樋門	扉体ローラ-固着	△3	R2年
小田陸開	サイドローラ-固着	△1	R1年
大岩川排水樋門	No.1、No.2主ローラ、サイドローラ-固着	△2	H29年
柘植川左岸第2樋門	No.1、No.2サイドローラ-固着	△2	H29年
木興排水門	扉体ローラ-固着	△3	R2年
往古川排水樋門	サイドローラ、一部固着	△1	H30年
長田排水門	主ローラ、一部固着	△2	H30年
平野川排水樋門	主ローラ-固着、サイドローラ-固着	△1	H29年
朝屋排水樋門	扉体主ローラ-固着	△2	H29年
清水排水樋門	扉体ローラ-全箇所固着	△1	R2年
岩根川排水樋門	主ローラ-固着	△2	H29年
瀬古口第1排水樋門	主ローラ-固着	△2	H29年

修繕の優先順を決定する際に、固着気味についてどの程度の固着かが不明である問題があった。また、当事務所のように点検対象設備が多い場合、複数班で点検を行うが、点検者による判断のバラツキの問題があった。

2-2. ローラ固着程度の判断方法の提案

そこで、ローラの固着の有無・程度を判断できる点検方法について、①点検者によるバラツキがなく、②固着ぎみの程度が正確に判断でき、③特殊な器具を使わない安価な方法、を考えた。

ローラの点検は点検員がローラを手で回して確認するが、複数の異なる回し方で判断する方法を考案した。

A	全く廻らない
B	B1 両手で何とか廻る
	B2 両手で廻る
	B3 両手で軽く廻る
C	C1 片手で何とか廻る
	C2 片手で廻る
	C3 片手で軽く廻る
D	D1 指で何とか廻る
	D2 指で廻る
	D3 指で軽く廻る

この妥当性について、A, B, C, Dのレベルが点検者により変わることがなければ妥当な点検方法といえる。これについて以下の考察をした。

統計情報（日本の握力平均）では、握力の差は年齢・性別の差に関係なく、最大と最小の比は2倍以下である。このことから、点検員の体力について最大と最小の比が2倍以下になる確率は非常に高い。

両手と片手の差（BとCの差）は2倍程度と考えられる。指と手の力の差（CとDの差）は2倍以上と考えられる。つまり、AとB, BとC, CとDのそれぞれの力の差 2倍以上 > 体力の個人差 2倍程度以下 点検者の個人差による影響は出にくい。よって、妥当と言える。

日本の握力平均(平成26年度)

年齢	男性平均	女性平均
20~24歳	46.46kg	28.24kg
25~29歳	47.26kg	28.15kg
30~34歳	47.36kg	28.73kg
35~39歳	47.64kg	28.97kg
40~44歳	47.23kg	29.12kg
45~49歳	46.62kg	29.21kg
50~54歳	46.31kg	28.04kg
55~59歳	44.90kg	27.51kg
60~64歳	42.87kg	26.01kg
65~69歳	39.77kg	24.72kg
70~74歳	37.46kg	23.75kg
75~79歳	35.02kg	22.34kg

文部科学省データより

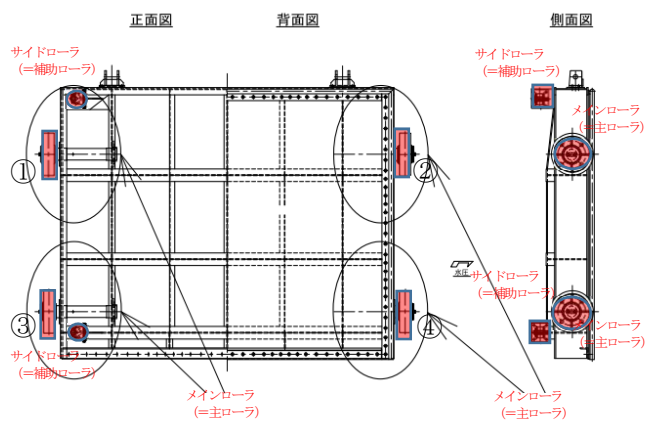
2-3. ローラ固着程度の判断の実施結果

上記の点検表に基づき、ローラの問題箇所の再点検を行った（下表）。実施結果は次のとおりである。

R2点検結果後のローラ固着程度の判断

設備名称	R2点検結果	評価	再点検再評価				整備レベル	不具合確認	経過年数
			①番	②番	③番	④番			
出城排水樋門	メインローラ 固着	△2	B1	B1	B2	B2	R2軸受取替実施	H29年	10年経過
岩倉排水樋門	メインローラ 固着	△2	C1	C1	D1	D1	軸受取替計画	H29年	20年経過
小田新田排水樋門	メインローラ 固着	△1	C2	C1	A	D3	軸受取替計画	H29年	26年経過
小田排水機場吐出樋門	メインローラ 固着	△2	A	A	A	A	軸受取替計画	H29年	25年経過
小田第1排水樋門	メインローラ 固着	△1	-	-	A	D2	軸受取替計画	R2年	20年経過
往古川排水樋門 (2門)	メインローラ 固着	△1	C2	B2	A	C2	軸受取替計画	(1号) H30年 (2号) H29年	16年経過
平野川排水樋門 (2門)	メインローラ 固着	△1	C1	C2	C2	C2	軸受取替計画	(2号) H29年 (1号) H29年	22年経過
清水排水樋門	メインローラ 固着	△1	C2	D2	D3	D3	整備しない	R2年	20年経過

扉体



一般的なローラゲートは下記のとおり、メインローラ

4個、サイドローラ4個が取り付けられており、ローラの取り付け場所は図のとおりで、点検結果表とは番号の位置が同じである。

再点検しところ、固着気味の判断は点検者によって大きく異なっていた。

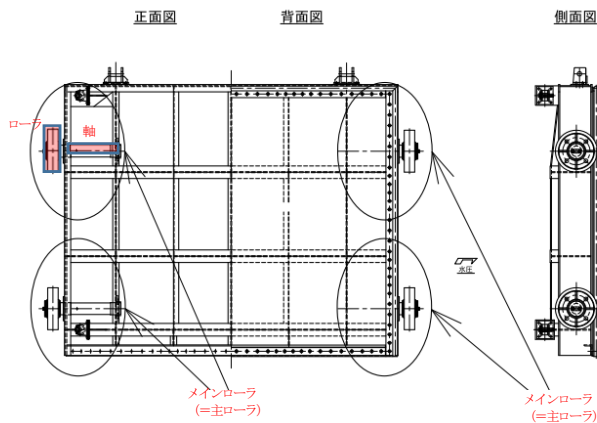
固着気味の評価のものには、回すことが困難なものから、力を入ると回せるものまで存在した。

このチェックシートで点検すると、固着の程度が明確になり、点検員によるバラツキは減ると思われる。

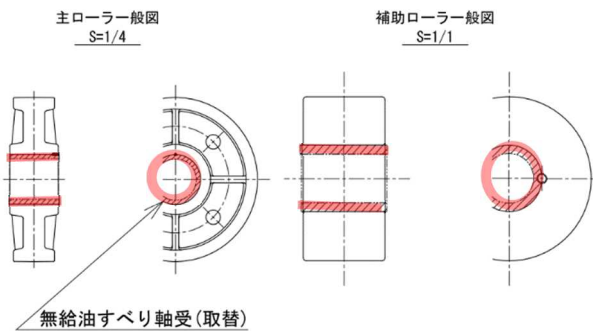
3-1. ローラの構造と固着原因の推測

ローラの位置とローラの詳細図は下記のとおりである。

メインローラ及びサイドローラ共に、ローラと軸を組み込み、それをゲート本体に取り付けている構造である。



ローラを拡大するとこのような構造である。



メインローラ（主ローラ）とサイドローラ（補助ローラ）は同じ構造である。

ローラのすべり軸受はピンで固定されており、軸に対してローラ及びすべり軸受が一体で、回転する構造である。

固着する原因は、軸表面とすべり軸受表面の摩擦が大きくなる問題と考えられる。

その原因は、①鏽、②異物混入等、が考えられるが、軸と軸受の隙間は、メインローラφ100の場合で0.372mm～0.461mmであり、サイドローラφ30の場合で0.280mm～0.356mmの加工精度で作られている。このため、異物混

入は考えにくい。

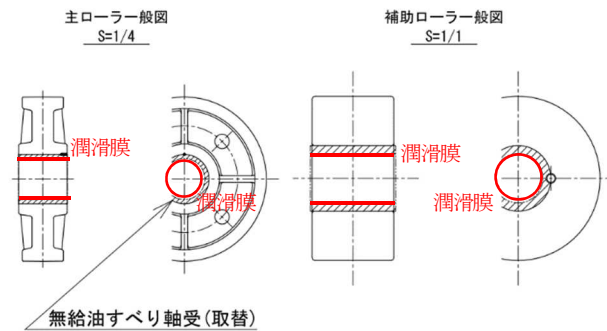
3-2. 滑り軸受の動作原理

摩擦力低減を目的とした軸受は、ベアリング等の転がり軸受、プッシュとも呼ばれる筒状のすべり軸受、磁力で軸と軸受の離隔を確保する磁気軸受、軸の周辺を流体で満たした流体軸受に分類される。ゲート設備では摩擦低減には多少劣るものの軸との隙間を小さくできることからよくすべり軸受が採用されている。

固着気味のものは、すべて、滑り軸受けであった。

滑り軸受けの動作原理は、ローラに組み込まれたすべり軸受と軸との間に潤滑膜が形成されることで、摩擦低減の機能を果たす。

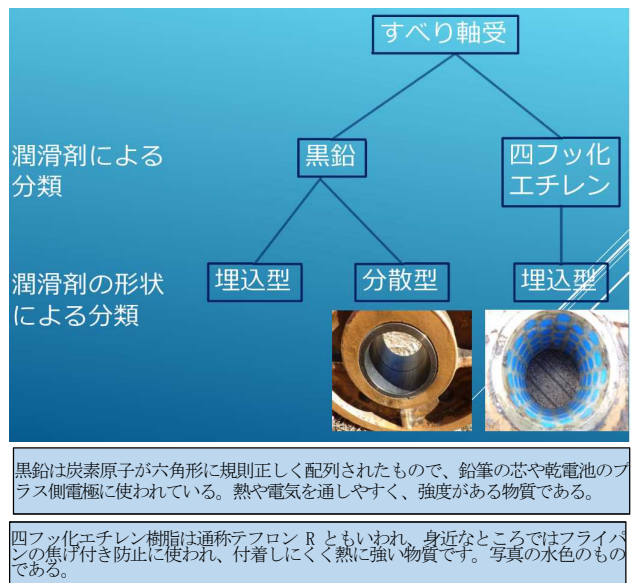
潤滑剤がすべり軸受に埋め込まれており、回転摩擦により削られて、軸と軸受の間に潤滑膜が形成される。



3-3. ゲートに使用するすべり軸受について

材質に着目すると、潤滑膜を形成するための潤滑剤は、『黒鉛』と『四フッ化エチレン』がある。

潤滑剤の形状に着目すると、軸受に埋め込む方法は、築受けに開けられた穴にチップとして埋め込む『埋込型』と、細かい粒と軸受を一体成型させる『分散型』がある。

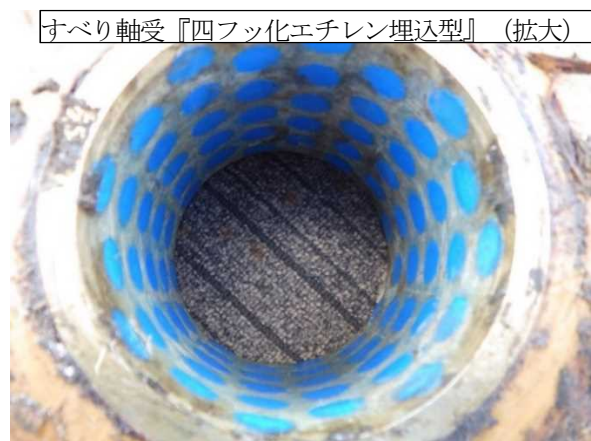


○すべり軸受『埋込型』の例

写真は黄銅製すべり軸受の四フツ化エチレン埋込型が、ローラにとりつけられている状態。軸から外した状態の写真。青色のチップが四フツ化エチレンのチップである。



すべり軸受『四フツ化エチレン埋込型』



すべり軸受『四フツ化エチレン埋込型』(拡大)

○すべり軸受『分散型』の例

写真は青銅製すべり軸受の黒鉛分散型が、ローラにとりつけられている状態。軸から外した状態の写真である。下の拡大写真では、黒鉛の黒く細かいのチップが青銅の中に点々と混ざっている。青銅を溶かして黒鉛の粒と一体成型するためこのようになる。



すべり軸受『黒鉛分散型』



すべり軸受『黒鉛分散型』(拡大)

3-4. 固着したローラを分解

ローラの軸受の交換方法について軸受メーカーに問い合わせたところ、「通常、軸受は油圧ジャッキ類で外すが、外れなかった場合は壊すしかない」とのことから、壊さずに外して固着原因を調べることを優先し、固着しているなかで最も程度のいいゲート「出城排水樋門ゲート」を選定し、分解整備をした。



出城排水樋門ゲートとローラ取り外し作業



ローラ取り外して露出した軸

ローラはジャッキで外すことができた。
○表面は硬くなったグリスが付着
○四フツ化エチレンの潤滑膜は形成されていない

メインローラを外したところ、表面は硬くなったグリスが付着しており、粘りがあった。また、四フツ化エチレンの潤滑膜は形成されていなかった。固着もしくは固着気味だった原因は劣化したグリスであった。

グリスは、外気に長期間さらされると油分の減少、油

分の酸化、潤滑剤、増ちょう剤の凝集による粘性が増加して劣化する。粘性が増加している状態であった。



○表面は劣化により粘性が増加したグリスが付着
○四フッ化エチレンの潤滑膜は形成されていない

(費用) 分解組立35万円、軸取替10万円、
軸受50万円、ローラー150万円、合計245万円
(50年コスト) 245万円×50年/30年=408万円
加工精度がいいので30年で試算

(※) 加工精度については、軸と軸受の隙間は、メインローラφ100の場合で0.372mm~0.461mmであり、サイドローラφ30の場合で0.280mm~0.356mmとなっている。

長期的に (50年コスト) 見ると最安価な②案で行った。加工精度については、当初の施工が設計値に対して申し分ない精度を確保されていたため、問題なく滑り軸受の取り付けはできた。

3-5. コストを重視した修繕方法

原因がグリスの劣化によるものであることを確認したが、修繕方法については、以下の3とお考えられる。費用については1門 (メインローラ4個+サイドローラ4個=計8個) あたりである。

① 古いグリスを灯油で洗浄し、再度グリスを塗って組み立てる。

(長所) 分解・組立・洗浄の費用のみで、材料は発生しないので短期的には安価。

(短所) ただし、10年程度毎の固着気味の症状があるので、長期的に見ると高額。

(費用) 分解組立35万円、軸受分解組立10万円、
洗浄10万円 合計55万円

(50年コスト) 55万円×50年/10年=275万円

② グリス不要の軸受けに交換。

(長所) 長寿命が期待できる。

分解・組立・材料 (軸受け) の費用なので、比較的安価。

(短所) 現在軸の形状が設計寸法に対して、実際に加工した寸法が不明。加工精度は交差の範囲で加工されていることのみわかっている。

軸受けを製作する際に設計値寸法で製作すると組み込めない心配がある。軸受けの穴は交差の範囲で大きめにし、加工精度管理(※)を慎重に行う必要がある。

(費用) 分解組立35万円、軸受取替10万円、
軸受50万円、 合計95万円

(50年コスト) 95万円×50年/20年=238万円

グリス固着がなければ20年はもつので20年で試算

③ ローラ、軸、軸受けをセット交換する。

(長所) 軸の加工精度と軸受けの加工精度(※)については、同一工場での加工なので、**精度管理の問題はない。**

(短所) 分解組立・材料 (ローラ・軸・軸受け) の費用なので、高額。

3-6. 設置時に軸受けグリスを塗布していた理由

すべり軸受は、ダム堰施設技術基準では無給油軸受ともいい、潤滑剤は黒鉛もしくは四フッ化エチレンの潤滑膜で摩擦低減するが、この出城排水補門ゲートでは潤滑剤に四フッ化エチレンを使用して、グリスを用いていた。その理由について、調べた。

四フッ化エチレンを潤滑剤とするすべり軸受のメーカーカタログにも**初期の潤滑膜形成のためグリスを塗布**する記載があった。四フッ化エチレンの潤滑剤をする場合はグリスの塗布が必要である。

他のローラの固着に関する不具合があるゲートについて調べたところ、すべて潤滑剤に四フッ化エチレンを使用するすべり軸受を使用していた。

潤滑剤の四フッ化エチレンはひっつきにくい性質があるので、軸や軸受に付着して初期潤滑膜を作ることが困難である。このためグリスを塗布していた。

3-7. すべり軸受に使用する潤滑剤 (四フッ化エチレンと黒鉛) の比較と考察

すべり軸受の潤滑剤に使用する四フッ化エチレンと黒鉛について、ダム堰施設技術基準の滑り軸受の記述と比較する。

四フッ化エチレンについては形状は分散型はないので埋め込み型で比較する。

黒鉛については形状は分散型と埋め込み型があるが、ゲートに使用する場合は、分散型が使用できる状況では分散型が有利なので、これで比較する。

項目	四フッ化エチレン	黒鉛
○すべり摩擦係数0.2以下。 青銅系は0.15、黄銅系（面圧1N/mm2程度の場合）0.23	黄銅系 △	青銅系 ○
○原則は異種間金属腐食を起こさない四フッ化エチレン。	○	△ 腐食検討
○軸受面圧14N/mm2以下は青銅系も可能。	○	○
○分散型は黒鉛が主流になるため、電位差腐食の恐れがあるので定期的に給油が望ましい。	— ※1	— ※2
○分散型は低頻度運転、間欠運転、微小運転等の潤滑膜に形成されにくい使用条件に適合する。	× ※3	○
○初期潤滑をよくするため固形潤滑剤と同成分のコーティング剤を塗布して取り付けるのが望ましい。	× ※4	○ ※5

（※1）四フッ化エチレンの分散型はない。

（※2）滑り軸受けの国内シェアトップクラスメーカーによると黒鉛塗布後に給油は厳禁。黒鉛製品国内シェアトップクラスのメーカーによると、潤滑剤として使用している黒鉛に給油すると摩擦が大きくなり、加熱されるので、油が燃えることもあるとのこと。

（※3）適合しない。現場は低頻度運転。四フッ化エチレンの分散型はない。

（※4）四フッ化エチレンと同成分のコーティング剤はない。これとメーカー仕様にもあるので、グリスを塗布した可能性がある。

（※5）メーカー仕様でも据付時に黒鉛コーティングを行う。

結論：異種間金属腐食の検討をして問題なければ、黒鉛分散型は固着の問題は解決し、適合性が高い。

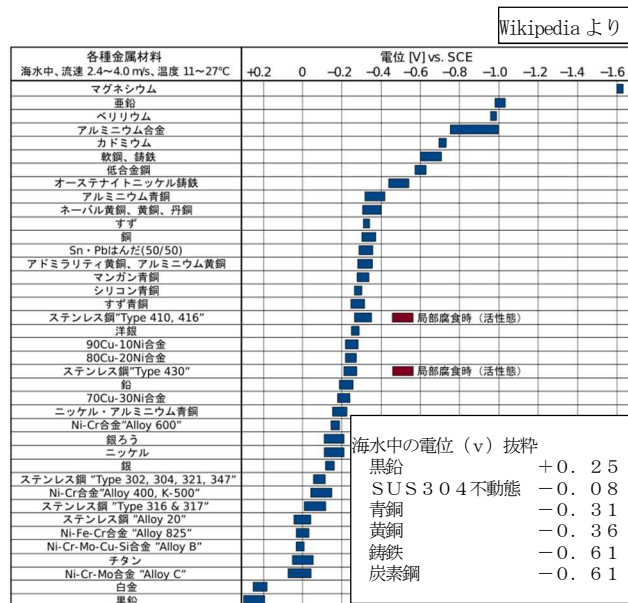
念のため、すべり軸受の潤滑剤に黒鉛を使用した実績を確認すると、民需では屋外設備でも数多く使われている。また、ゲートに着目して、国内トップクラスメーカーの使用実績資料によると、電力会社、国（関東が圧倒的に多いが、全国的に使用実績あり）、自治体と数多く使われている。

3-8. 異種間金属腐食について

二種類の金属の電位差から水分のあるもとで、電流が流れて電位の低い方の金属が酸化腐食する現象である。

電気腐食の試験方法は食塩水中で電圧を測定するもの

であり、海水中の電位は試験結果と同じなので、あちこちで公開されている。しかし、淡水中のデータは公開されているものがない。腐食のしやすさの順位は変わらないので参考にする。



黒鉛メーカー、滑り軸受メーカーの話では、
○海水中（食塩水中）ではこの表のとおり金属の腐食が起こりやすい。

○ただし、塩分を含まない水の場合は、潤滑剤として黒鉛を使用しても、青銅やステンレス等の金属には問題はない。
○使用する金属が腐食性が低ければ問題ない。

以上から、

- 水門・水車用として耐腐食性を向上させた青銅合金（青銅よりもさらに耐腐食性向上）の製品。
 - 使用条件が、常時、乾燥状態であり、出水時にゲートを稼働させたときのみ水中（淡水）の状態である。
 - ゲート、水車等の水中での使用実績が多数（数十以上）ある製品。
- の、条件を満たせば問題ないと判断。

3-10. 今後の課題

固着問題が解決したが、稼働頻度が少ない当該現場においても、黒鉛の潤滑膜が確保されているか、長期に確認しておく必要がある。

この確認方法については、前述の点検シートを活用して、点検車による判断のバラツキがないように配慮しながら行う。

謝辞

本論文で紹介したことは、既存資料の調査や現地の詳細な調査の協力者、発注者の提案に対して、コスト削減を考慮した修正提案をしてくれる受注者の協力で実施できたものである。設備維持修繕業者の(株)上田新工業、そして、木津川上流河川事務所の管理部門職員・技術員に感謝するものである。

河川堤防の植生転換による堤防植生機能確保とコスト縮減の取り組み

山崎 裕治¹

¹近畿地方整備局 近畿技術事務所 品質調査課 (〒573-0016 大阪府枚方市山田池北町11番1号)

近年の維持管理費縮減に伴う除草回数減少により、河川堤防植生はノシバから外来植物への遷移・繁茂が進行し、耐侵食性や視認性の低下などの問題が生じている。これに対し、近畿地方整備局では、「植生転換」が中・長期的なコスト縮減対策の1つとして位置づけられている。

本報告は、河川堤防の「低草丈草種への植生転換」による、適正な堤防植生機能確保と維持管理コスト縮減に向けた取り組みについてとりまとめたものである。検討結果は、「堤防植生管理の導入の手引き(案)植生転換の施工・維持管理編」としてとりまとめた。近畿技術事務所では、管内への試行拡大に向けて、この手引き(案)を用いた現場への技術支援を行った。

キーワード 堤防除草、堤防点検、コスト縮減、植生転換、低草丈草種

1. はじめに

堤防除草は、堤防点検などによる状態把握のための環境整備及び堤体の保全のため、年2回を基本として実施している。

近畿地方整備局管内においては、除草費は維持管理にかかる費用の内の1/5を占めており(図-1)、河川改修事業(堤防強化等)の進捗に伴い、除草面積が増加することから、今後、除草費がさらに増加することが想定されるため、堤防除草コスト縮減を図っていく必要がある。

平成28年度、河川維持管理計画の改訂の検討に伴い、近畿地方整備局管内で取り組まれた4つのワーキングのうちの1つである堤防除草コスト縮減ワーキングでは、短期的なコスト縮減対策である「遠隔式草刈機による除草」、「堆肥化」、「ロール化」、「刈放し」、「野焼き」、「動物除草」等の導入、及び中・長期的なコスト縮減対策である「低草丈草種による植生転換」の試行が位置づけられた¹⁾。

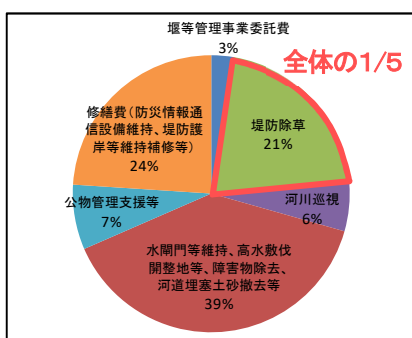


図-1 R3年度河川維持修繕費の内訳

2. 植生転換の概要

(1) ノシバによる堤防管理の課題

堤防植生とは、「堤防法面の表面を覆う植生」を示す。土堤による新堤防(高上げ、拡幅等による補強等を含む)の築造後の法面保護には、通常ノシバが用いられる。

ノシバは、①国内全域において、根の活着が早く、健全に生育すること、②入手及び施工上の取り扱いが容易であること、③堤防植生に求められる機能に優れていることなどから、堤防管理上望ましい植生である²⁾。

そのノシバを維持するためには、年4回以上の除草が必要であるが、近年、年3~5回から年2回に除草回数が減少し、シバ以外の他の植生の侵入・繁茂によりノシバの衰退が進行している。また、シバを維持するうえで重要となる養生期間の抜根除草等が行われていない堤防が多く、ノシバの衰退を助長している。

ノシバの衰退等により、植栽後10年程度までに高茎草本等の他の植生に遷移する事例が多い(図-2)。

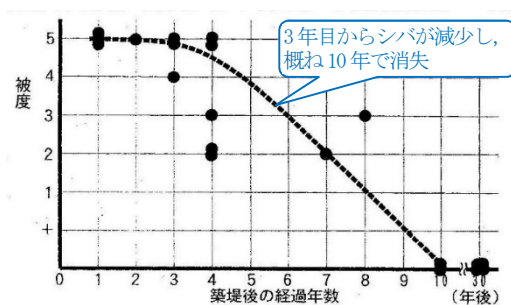


図-2 シバの被度の経年変化(年2回除草)³⁾



図-3 ノシバによる堤防管理の課題

高茎草本等の他の植生の侵入・繁茂により、堤体の耐侵食性の低下、堤防点検等の状態把握及び水防活動への支障、刈草量の増加による堤防除草コスト（処分費）の増加等の問題が発生している（図-3）。

以上より、そのような問題を解決するとともに、現状の年2回除草で維持可能な、ノシバに代わる堤防植生への転換が必要である。

(2) 植生転換とは

植生転換とは、堤防の維持管理に支障を及ぼす高茎草本等の現況堤防植生を草丈の低い他の植生（以下、低草丈草種という。）に転換することをいう。低草丈草種による植生転換は、年2回程度の除草により、草丈が低く、根張りの良い植生が堤防法面を密に被覆し、雑草の侵入・生育を抑制する。それにより、堤防植生に求められる機能（堤体の耐侵食性の確保、堤体の変状等を発見しやすい視認性の確保、堤防除草コストの縮減）を長期的に保持するとともに、中長期的なコスト縮減効果が期待できる。

(3) 植生転換に用いる低草丈草種

植生転換に用いる低草丈草種は、近畿地方整備局管内の河川堤防における試験施工の結果より、堤防植生機能に優れ、雑草抑制効果が高い草種は、現時点で在来種3種（改良コウライシバ（TM9）、改良ノシバ（エルトロ）、ノシバとコウライシバの種間雑種（ビクトール））及び外来種2種（改良ムカデシバ（ティフブレア）、改良イヌシバ（ザッソレス））の計5種の適用が考えられる。ただし、植生転換の試行では在来種を用いることを基本とし、外来種を用いる場合には地域のコンセンサスを取得することを基本とする⁴⁾。

(4) 植生転換のコスト縮減効果

植生転換の10年間のコスト試算では、TM9張芝による植生転換により、従来のノシバ張芝よりも10年間で維持管理コストが最大約30%の縮減を見込まれる（図-4）。

【コスト試算の考え方】

- ・ イニシャルコストは、TM9 張芝（2,453 円/m²）とノシバ張芝（1,681 円/m²）の施工単価（表土剥ぎ取り・埋め戻しを含む）から算出した。
- ・ ランニングコストは、以下の通り算出した。
 - TM9は、1～3年目まで年2回抜根除草、4～10年目まで年2回機械除草に係るコストを計上した。
 - ノシバは、1～3年目まで年2回抜根除草、4～10年目まで年2回機械除草・集草に係るコストを計上した。
 - ノシバは、年2回除草では衰退し、堤防植生の機能を保持できない事例が多いため、張替え1回のコスト（単位面積分）を計上した。ノシバの衰退によるセイバンモロコシ等の高茎草本の繁茂等による刈草量（運搬・処分費）の増加は考慮していない。

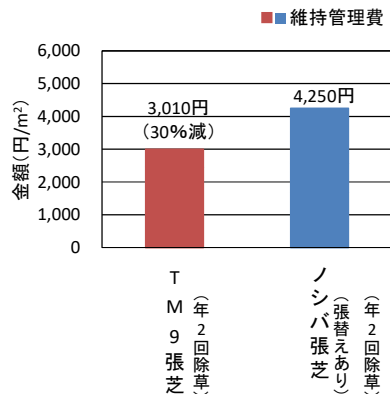


図-4 10年間トータルコスト試算結果

(5) 植生転換の試行

平成28年度の堤防除草コスト縮減ワーキングより、植生転換の試行拡大における今後5年間（平成29～令和3年度）の目標は、近畿地方整備局管内における全除草面積約1,700万m²のうち、その全除草面積の1%である約18万m²（年間約4万m²）を対象とすることが位置づけられた。

令和元年度時点では約9万m²の植生転換が試行され、3箇年の達成度は約50%である。

3. 生育調査による堤防植生機能の効果検証

(1) 調査目的

植生転換に用いる低草丈草種（5種）についての生育調査では、堤防植生機能の効果等を検証することを目的とする。

(2) 調査内容

5草種による植生転換箇所（近畿技術事務所 研修用堤防）において、堤体の視認性を把握するため、導入種及び侵入種の草丈を測定するとともに、堤体の耐侵食性を把握するため、導入種・侵入種の被度及び根系強度を測定した。植生転換箇所の維持管理方法は、主に施工1～3年目まで年2回抜根除草（6・9月）、施工4年目以降は年2回機械除草（5-6月、9-10月）を実施した。

(3) 植生転換の評価の目安 (案)

植生転換の評価は、堤防植生機能（「雨水に対する侵食防止機能」及び「流水に対する侵食防止機能」としての耐侵食性と視認性）の達成・維持、及びコスト縮減に着目して設定した（表-1）。具体的な評価目安としては、導入した低草丈草種による、①被度（地表面を覆う割合）の達成、②低草丈の維持、③根系強度の達成、及び④侵入雑草の抑制が挙げられる。

表-1 植生転換の評価目安(案)

評価項目		評価目安 (案)
耐 侵 食 性	雨水に対する侵食防止機能	導入種の被度 70%以上
	流水に対する侵食防止機能	導入種の被度 70%以上、かつ根系強度 250 kg・cm 以上
視認性		草丈 10 cm 以下の導入種は被度 70%以上であること、かつ草丈 10 cm 以上の侵入雑草は被度 50%以下であること
コスト		標準的なトータルコスト以下*

※「堤防除草コスト縮減対策の導入の手引き (案) (H27.2) 近畿地方整備局 近畿技術事務所」参照

(2) 低草丈草種の生育状況モニタリングによる効果検証

前節で挙げた評価項目毎に植生転換の効果を検証した。低草丈草種（5種）の草丈や根系強度等については期待される効果が確認されたが、侵入雑草との競合によって3~4年目以降に被度等の低下傾向が確認され、効果の持続的な発揮には、侵入雑草対策が課題であることが確認された。

- a) 導入種の被度：各草種とも施工3年目までは70%以上を維持しているが、改良コウライシバ（TM9）及びノシバ・コウライシバの種間雑種（ビクトール）は、その後徐々に減少傾向である。
- b) 草丈の維持：改良コウライシバ（TM9）は、草丈10cm以下を維持している。その他草種についても概ね20cm前後を維持している。
- c) 根系強度の達成：施工2年目の時点では、概ね各草種ともに250 kgf・cmを達成したが、4年目には一部根系強度が低下した草種（ビクトール）もみられた。
- d) 雑草の被度：エルトロ、ビクトールを除き、施工3年目までは50%以下であった。

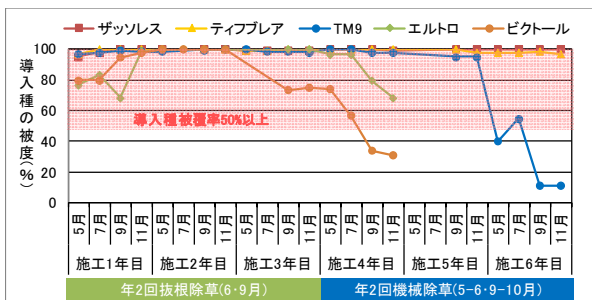


図-5 各導入草種の被度

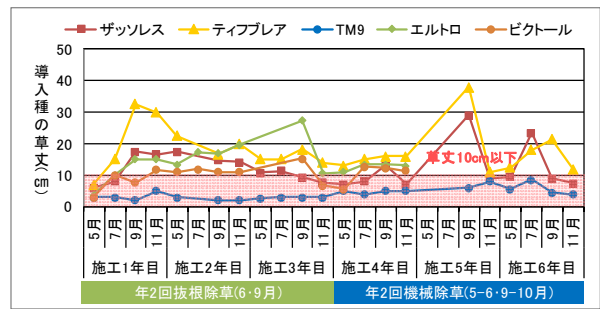
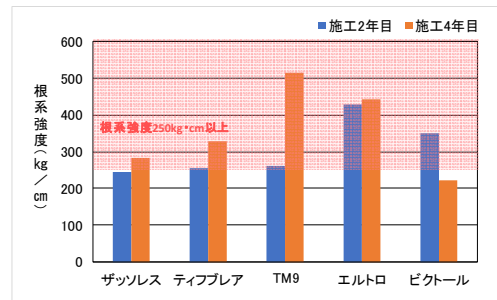


図-6 各導入草種の草丈



<参考: 植生タイプ別の根系強度>
 ・シバタイプ : 400~600 kgf・cm
 ・チガヤタイプ : 250~400 kgf・cm
 ・外来牧草タイプ : 200~350 kgf・cm
 ・広葉タイプ : 100~250 kgf・cm

図-7 各導入草種の根系強度

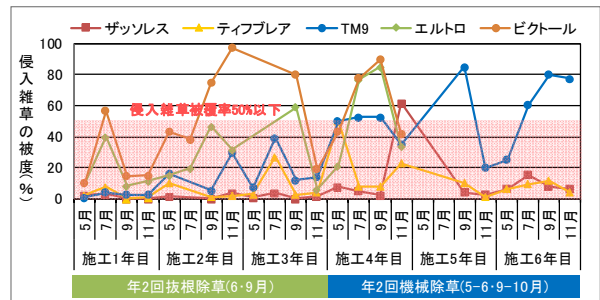


図-8 各導入草種の雑草被度

4. 刈草量調査によるコスト縮減効果の検証

(1) 調査目的

低草丈草種による植生転換箇所における刈草量調査では、養生期間中に抜根除草を実施することによる堤防除草コスト縮減効果等を定量的に検証することを目的とする。

(2) 調査内容

改良コウライシバ（TM9）による植生転換箇所（奈佐川、木津川上流、紀の川）において年2回抜根除草後の刈草量を測定するとともに、植生転換していない箇所（対照区）において年2回機械除草後の刈草量を測定し、比較した。

(3) 調査結果

各植生転換箇所において年2回抜根除草を2年間継続した刈草量は、植生転換していない対照区（年2回機械除

草を2年間継続)と比べて大幅な削減(刈草量削減率31~79%)が確認された。

また、10年間の維持管理コスト試算では、紀の川を事例として、植生転換箇所では植生転換していない箇所と比べて26%コスト削減が見込まれる(図-9)。

今後、各植生転換箇所において、抜根除草を3年間継続し、通常管理以降(施工4年目以降)の刈草量と植生転換していない対照区の刈草量を比較することで、通常管理以降後の刈草量の削減率や集草の要否を確認する必要がある。

【維持管理コスト試算(紀の川)の考え方】

- ▶ 植生転換箇所は、1~3年目まで年2回抜根除草(処分費は測定した刈草量を反映)、4~10年目まで年2回機械除草(集草・処分なしと想定)に係るコストを計上した。なお、3年目は2年目の処分費を採用した。
- ▶ 植生転換していない箇所は、1~10年目まで年2回機械除草・集草(処分費は測定した刈草量を反映)に係るコストを計上した。なお、3年目以降は2年目の処分費を採用した。

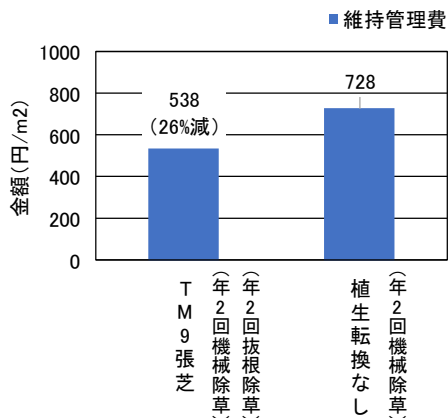


図-9 10年間維持管理コスト試算結果

5. 植生転換効果持続に向けた管理手法の検討

(1) 植生転換における雑草の侵入状況

植生転換における雑草の侵入状況について、改良コウライシバ(TM9)を例として、施工初期の記録がある施工2年目の侵入種を「流用土由来の侵入種」と仮定して、施工2年目及び最新年(施工6年目)の侵入種を比較した。

施工6年目に確認された草種数(29種)に対して、施工2年目及び施工6年目ともに確認された草種数(12種)の割合は約4割(41%)である。そのため、施工6年目における流用土からの侵入種率は約4割、周辺からの侵入種率は約6割と考えられる。また、流用土からの侵入種(施工2年目:19種)のうち、施工6年目まで生育していた種(施工1~3年目の年2回抜根除草で抑制できなかったと推定される種:12種)の割合は約6割(63%)であった。

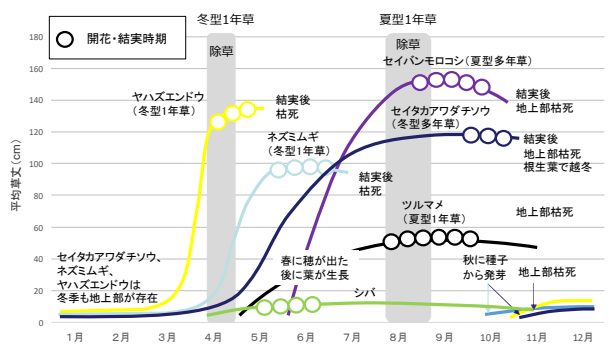
表-2 流用土由来の侵入種のうち、施工6年目までの生育草種

区分	特徴	種名
夏型1年草	春から秋までに生育し、夏から秋頃に結実する1年生雑草	アレチヌスビトハギ
		キンエノコロ
		ヒメムカシヨモギ
冬型1年草	秋から翌年にかけて生育し、春に結実する越年生雑草	カスマグサ
		ヤハズエンドウ
		ヒメジョオン
夏型多年草	春から秋までに生育し、夏から秋頃に結実・枯死する多年草	セイバンモロコシ
		スギナ
		スゲ属
冬型多年草	秋から翌年にかけてロゼット状で越冬し、春から秋に生育、夏から秋頃に結実する多年草	ヨモギ
その他	-	イネ科 sp①
		イネ科 sp②
合計		12種

(2) 草種の生活史に応じた除草時期(案)の提案

前節の雑草の侵入状況及び維持管理状況等を踏まえ、雑草の草種に対する効果的な除草時期(案)を検討・試行した。除草時期(案)の検討にあたっては、各草種の生態・生活史から4分類に区分して設定した(図-10)。

- ①夏型1年草：結実前の夏季、又は秋季に機械除草
 - ②冬型1年草：結実前の春季に機械除草
 - ③夏型多年草：通常管理、又は除草頻度を増やす等※
 - ④冬型多年草：通常管理、又は除草頻度を増やす等※
- ※今後、効果的な管理手法の検討が必要



※除草による影響を考慮しない状態での標準的な生活史として表現した。

図-10 主な雑草の生態・生活史

6. 堤防植生管理の導入の手引き(案) 5)

(1) 目的

堤防植生管理の導入の手引き(案)(以下、手引き(案)という)は、平成29年度から各河川で試行されている植生転換について、“施工・維持管理の段階で失敗しない”ことを目的として、近畿技術事務所がこれまでに蓄積してきた知見等を基に、植生転換の施工及び維持管理の方法をとりまとめたものである(初版H29.3,現時点R3.3)。

(2) 失敗しないポイント

a) 【基盤造成】施工範囲

植生転換を実施する施工範囲は、堤防法肩から法尻ま

での法面全体を対象とすることが望ましい。法面上部、又は下部のように法面の一部を施工範囲とした場合、植生転換を実施していない箇所から植生転換の施工範囲内に外来植物が侵入・繁茂する可能性がある。

b) 【基盤造成工】表土剥ぎ取り・客土埋め戻し

現況法面等への施工の場合、表土剥ぎ取り後に埋め戻す客土材は種子や根茎が混入している流用土を使用しないことが望ましい。植栽草種の生育に適した土性である購入土を推奨する。なお、剥ぎ取り・埋め戻し厚さは15cm程度とし、クズ、イタドリ等の深根性の雑草の場合は30cm程度が望ましい。

c) 【植生工】芝の品質確保

近年、堤防に施工された芝において、張芝施工後の初期段階に現地及び周辺の植生と異なる種類の雑草が生育している箇所が見受けられる。これは、施工時に納入された芝に混入していた雑草が生育していたものと考えられ、張芝に求められる機能を早期に低下させる大きな要因となる。そのため、施工時におけるシバの品質規格の確認方法(案)により、芝の品質を確認することが望ましい(図-11)。

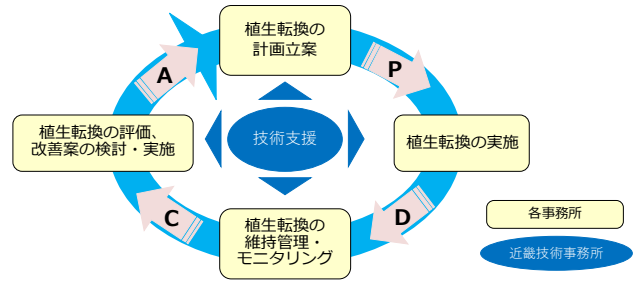


図-12 植生転換の技術的支援の流れ及び内容

トの縮減を図る中・長期的な対策として、低草丈草種による植生転換の試行実施が位置づけられた。

この低草丈草種による植生転換を現場で適切かつ円滑に進めるためには、植生転換のPDCAサイクルの各段階において管内各事務所に対して技術的な支援が必要である。近畿技術事務所では、平成25年度から低草丈草種による植生転換の調査・検討を実施しており、これまでに多くの知見・技術を蓄積してきている。これらのノウハウを最大限に活かし、平成29年度までに各河川事務所を技術的に支援する体制を構築した(図-12)。

また、技術的な支援等を通じて、平成29～令和3年度までの5年間で植生転換に関する知見を蓄積し、より効率的・効果的な植生転換技術を確立することを目指している。

7. 植生転換の技術支援

(1) 技術的支援の体制

平成28年度、改訂に向けて検討された近畿地方整備局管内各河川の河川維持管理計画において、堤防除草コス

(2) 技術的支援の流れ及び内容

近畿技術事務所では、各河川事務所が立案した植生転換の計画及び導入状況を把握し、導入箇所の状況等に応じた施工及び維持管理の留意点等を該当事務所へ提示する。また、植生転換の異常等が発生した場合には、該当事務所への情報提供又は該当事務所からの依頼に応じて原因究明・対策検討を行い、対応等を提案する(図-13)。

(3) RiMaDISを用いた河川巡視による点検・評価の確立

各河川事務所で行った植生転換箇所について、全試行箇所においてモニタリング調査を行うことは現実的ではないため、RiMaDISを用いた河川巡視(図-14)による点検・評価手法を確立した。

河川巡視による植生転換の状態把握は月1回(上月)とし、「RiMaDISを利用した植生転換の状態把握及び異常発生等の登録マニュアル(案)⁶⁾」に基づいて記録することとした。

植生転換の状態把握結果の評価は、RiMaDISにて出力された様式の全景及びコドラート写真より、導入種及び侵入種の概ねの被度を算出し、設定した評価目安から評価を行う。

芝の品質規格チェック表(案)

工事名	確認日	平成	年	月	日	
施工業者名						
項目	内容	確認方法				
□ 品種	指定した品種であること 【確認項目】 □ 産地証明書で証明されていること	産地証明書				
□ 葉	正常な葉形、葉色を保ち、萎縮、徒長、蒸れがなく、生き生きとしていること。全体に、均一に密生し、一定の高さに刈込であること。 【確認項目】 □ 葉に茶色、又は黒色に変色する蒸れ(黄色への変色は問題ない)がないこと。(冬施工以外) □ 全体に、均一に密生していること。 □ 全体に、一定の高さに刈込であること。 □ 芝生の刈込みを定期的に実施していること。(目安として最低年3回以上) □ 窒素、リン、カリの三要素が配合された適量の肥料を施していること。(目安として年間の施肥量が1㎡当たり10g以上)	現地目視①②③ 現地目視③④ 現地目視①③④ 生産業生管理表				
□ ほふく茎	ほふく茎が、生氣ある状態で密生していること。 【確認項目】 □ ほふく茎になびて、ちぎれやすいものがないこと。 □ ほふく茎に茶色、又は黒色のものがないこと。 □ 全体に、隙間なく密生していること。 □ 芝生の刈込みを定期的に実施していること。(目安として最低年3回以上) □ 窒素、リン、カリの三要素が配合された適量の肥料を施していること。(目安として年間の施肥量が1㎡当たり10g以上)	現地目視②③④ 現地目視②③④ 現地目視③④ 生産業生管理表				
□ 根	根が、平均にみずみずしく張っており、乾燥したり、土くずれのないもの。 【確認項目】 □ 根に乾燥や土くずれがないこと。 □ 平均にみずみずしく張っていること。 □ 全体に、隙間なく密生していること。 □ 芝生の刈込みを定期的に実施していること。(目安として最低年3回以上) □ 窒素、リン、カリの三要素が配合された適量の肥料を施していること。(目安として年間の施肥量が1㎡当たり10g以上)	現地目視②③④ 現地目視②③④ 現地目視③④ 生産業生管理表				
□ 病害虫	病害(病斑)がなく、害虫がいないこと。 【確認項目】 □ 葉にバツバツや不規則な枯れがないこと。(冬施工以外) □ 葉に損傷された跡がないこと。(冬施工以外) □ 葉にガの幼虫などの害虫がいないこと。(冬施工以外) □ 芝生の刈込みを定期的に実施していること。(目安として最低年3回以上)	現地目視①②③④ 現地目視①②③④ 現地目視①②③④ 生産業生管理表				
□ 雑草等	小石、雑草、異なる品種の芝草等が混入していないこと。また、根際に対しカサや枯れ葉が堆積していないこと。 【確認項目】 □ 小石やごみ等が混入していないこと。 □ 雑草や異なる品種の芝草等が混入していないこと。 □ 根際に対しカサや枯れ葉が堆積していないこと。 □ 人為的除草による跡を行っていること。(目安として最低年1回以上) □ 適正な除草剤の散布を行っていること。	現地目視①②③④ 現地目視①②③④ 現地目視①②③④ 生産業生管理表				

注：一般的に、張芝は冬施工(12～3月)であるため、冬施工を標準として項目を設定した。なお、春及び秋施工の場合を想定して、「冬施工以外」の項目を追加した。

図-11 芝の品質規格チェック表(案)

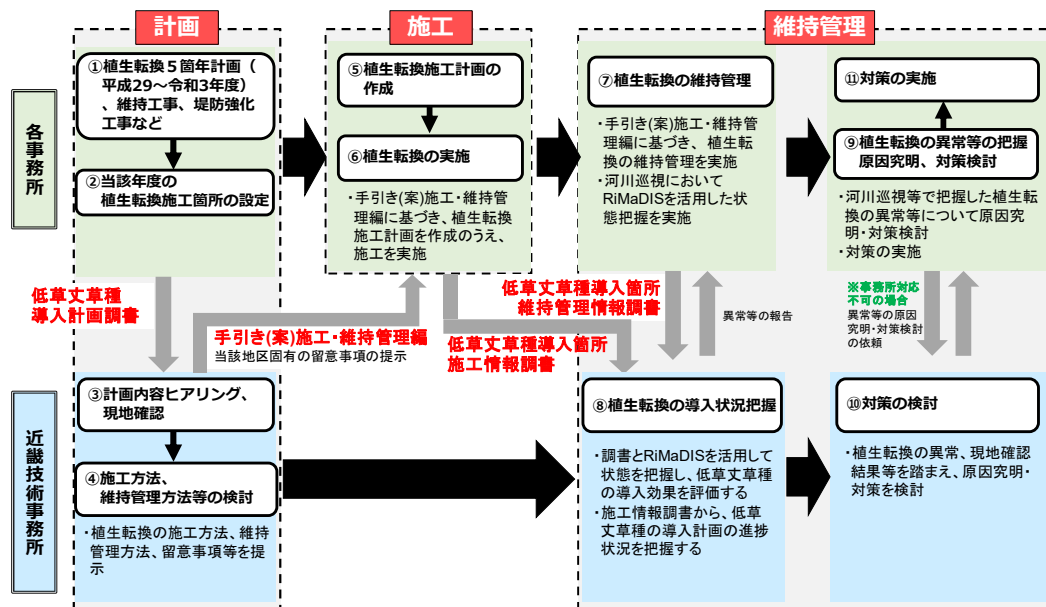


図-13 植生転換の技術的支援体制



図-14 RiMaDISを用いた河川巡視結果例

8. 今後の課題

低草丈草種による植生転換では、適正な堤防植生機能の確保、及び養生期間の施工1~3年目までの抜根除草による維持管理コスト削減効果が検証された。通常管理以降の植生転換箇所では、侵入雑草の被度増加が一部草種

で確認された。今後、雑草に強い新たな草種による試験施工及び基盤土壌の雑草抑制対策を検証する必要がある。また、刈草量調査を継続し、長期的なコスト削減効果の検証が必要である。

参考文献

- 1) 第1回堤防除草コスト削減WG：資料-3 堤防除草コスト削減WGについて(目的と概要)，H28.11.1.
- 2) 山本嘉昭ほか：堤防植生の課題に応じた新たな堤防管理のあり方の提案，河川技術論文集，土木学会 水工学委員会，2017年6月，第23巻.
- 3) 北川明ほか：植生の遷移と堤防の管理，水工学論文集 第39巻 1995.
- 4) 芝以外の植生による堤防管理の試行について，水管理・国土保全局河川環境課，H24.3.30事務連絡.
- 5) 堤防植生管理の導入の手引き(案)【植生転換の施工・維持管理編】(令和3年3月)国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所品質調査課.
- 6) RiMaDISを利用した植生転換の状態把握及び異常発生等の登録マニュアル(案)(平成30年3月)国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所品質調査課.

鉄道アンダーパス部におけるパイプルーフ工法の施工について

山本 歩

近畿地方整備局 姫路河川国道事務所 工務第二課 (〒670-0947 姫路市北条1-250)

姫路河川国道事務所では、兵庫県南西部の一般国道2号(65km)を管理しており、そのうち、兵庫県相生市～赤穂市の総延長8.6kmについて、安全で円滑な交通確保と環境改善を目的に、「相生有年道路事業」として、現道拡幅及びバイパス整備による4車線化事業を進めている。バイパス整備区間では、バイパスとJR山陽本線が立体交差する計画となっており、JR山陽本線と近接した施工となるため、軌道への影響を最小限にし、かつ、鉄道の運行の確保や安定性確保が必要となる。そのため、非開削工法の1つである、フロンテジャッキング工法(以下=FJ工法)を用い、アンダーパス(幅員:32.5m,線路下延長:21.6m)を新設する工事を行っている。本論文では、本工法の経緯及び現在の進捗状況について報告をする。

キーワード 相生有年道路事業, バイパス整備, アンダーパス, フロンテジャッキング工法

1. はじめに

一般国道2号は、大阪市を起点とし北九州に至る延長約671kmの道路であり、京阪神地方と中国・九州を結ぶ主要幹線道路の機能を担っている。このうち、兵庫県南西部に位置する相生市・赤穂市域では、東西方向の幹線道路として一般国道2号と山陽自動車道が通過しているが、一般国道2号においては依然として通過交通と地域内交通の混在により交通混雑が発生している。交通量は2車線で約25,000台と多く交通容量も超過しており、大型混入率も56%と多いことから、騒音についても昼夜問わず環境基準を超過している状況である。さらに、渋滞等により事故(正面衝突及び追突事故)の発生割合も高く、自転車歩行者道の未整備区間もあることから、車両と歩行者・自転車の通行が接近して危険な状態となっており、それらの解消を目的とし、姫路河川国道事務所では、兵庫県相生市～赤穂市の総延長8.6kmを、安全で円滑な交通確保と環境改善を目的に、「相生有年道路事業」として現道拡幅及びバイパス整備による4車線化事業を進めている。



【図-1 国道2号 相生有年道路新設事業位置図】

バイパス部では、JR山陽本線の交差部がアンダーパスによる立体交差構造となるため、JR山陽本線と近接した施工となる。JR山陽本線の姫路市～上郡区間は、平均通過人員約27,000(人/日)と、山陽本線全線の平均通過人員の約7割となっており、地域の移動、生活を担っているとともに物流機能としての重要な役割もあるため、通常の運行に支障がない工法を選定する必要がある。そのため、施工にあたっては、鉄道の運行を確認しながらの工法とあわせて、鉄道交通の安定性確保が必要であり、軌道への影響を最小限にする必要があるため、それらの課題を克服しながらの難工事となる。

2. 工事概要

工 事 名 : 有年上郡有年Bv新設
 事 業 者 : 国土交通省 近畿地方整備局
 姫路河川国道事務所
 施 工 者 : 西日本旅客鉄道(株)
 近畿統括本部 神戸土木技術センター
 工 事 場 所 : 兵庫県赤穂市有年原
 山陽本線 有年・上郡間
 工 期 : 2018年9月1日～2025年3月31日
 工 事 概 要 : 山陽本線(有年・上郡間)と一般国道2号新バイパスとの交差部において、非開削工法の1つあるFJ工法にて線路直下に地下道を新設する工事である。

3. 工法選定

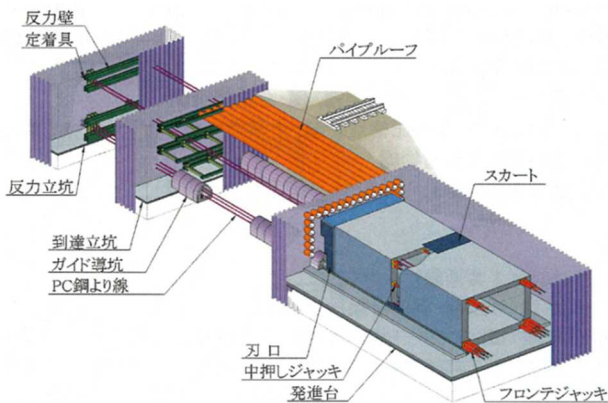
1) FJ工法の選定

当該区間は、JR山陽本線との交差点であり、鉄道運行を確保しながら、かつ、軌道への影響を最小限する安全性の高い工法の選定が必要となる。また、相生有年道路については、一部令和4年秋の開通を目指しており、当該区間についても早期開通を目指して整備を進めている。今回の立体交差点部分については令和7年3月の完成を目指して整備を進めている区間となっており、鉄道運行及び安全な施工を確保しつつ、早期開通にむけた計画的な施工ができる工法選定が必要となる。

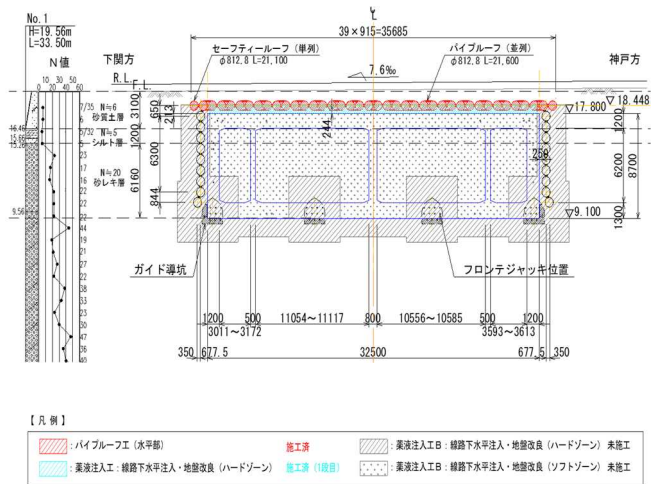
鉄道線路下にアンダーパスを構築する工事では、開削工法による工事桁工法が考えられるが、鉄道下での施工期間も長くなることから鉄道への影響期間が長くなり、リスクも高まることから、今回は採用しないこととし、鉄道運行に支障のない非開削工法で鉄道直下に巨大な函体を掘削しながら移動させる非開削での工法であるFJ工法を選定し、軌道への影響を最小限に抑えた工法を選定した。

2) FJ工法の概要

非開削工法の一つであるFJ工法とは、鉄道や道路等の直下に先行してパイプルーフ等の防護管を貫入し、その後、到達側に設けた反力体（地盤や構造物等）と発進側に築造した函体間をPC鋼線で連結し、フロンテジャッキを使用して函体をパイプルーフ防護工で囲われた範囲内の土中にけん引・推進する方法である。コンクリートの函体を土中にけん引して施工するため安全性が高く、函体断面の大きさを問わずあらゆる土質条件でも施工が可能である。また、パイプルーフ推進と函体構築を両立坑で同時施工が可能のため、施工期間を短縮することができる。



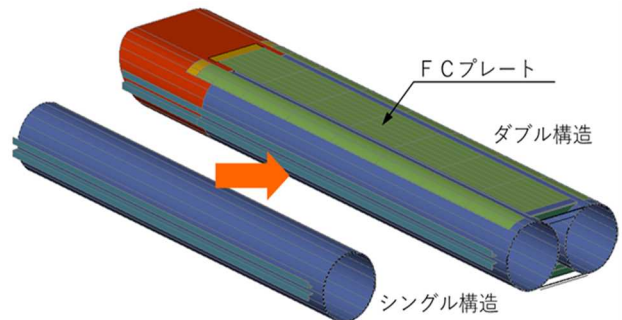
【図-2 FJ工法 片引き分割けん引方式概要図¹⁾】



【図-3 有年Bv工事 断面一般図²⁾】

3) 今回適用した手法

今回の施工区間においてはFJ工法を採用したが、鉄道への影響を最小限にするため、パイプルーフ防護管の施工期間を短縮する方法の検討を実施した。FJ工法で使用するパイプルーフについて、通常シングルパイプルーフではなくダブルパイプルーフを採用することで、推進作業が1.5倍となり、鉄道への影響期間を短縮できるとともに、鉄道への影響期間が短縮され、また保安費や計測費の削減にもつながる。



【図-4 シングル・ダブル管概要図³⁾】

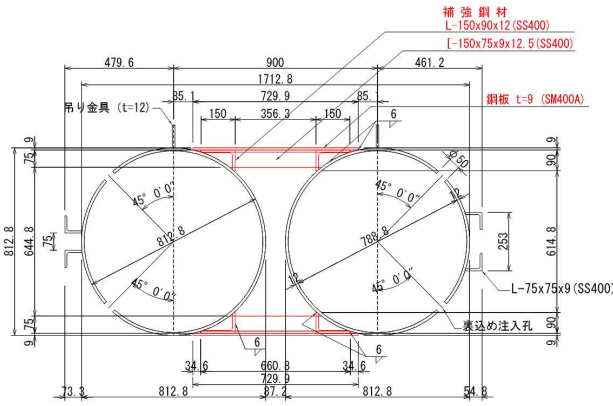
4. 発生する課題・問題点

上記手法適用の場合、工期短縮、軌道影響工事の短期間化等について一定の効果が期待できるが、切羽解放面積が大きくなることから、適用に向けては鉄道の安定性確保をするための検討が必要となる。ダブルパイプルーフ化に伴う切羽開放面積拡大が与える軌道への影響を最小限化し、かつ切羽地盤の安定性を確保することを課題とし、以下の取組みを实践した。

5. 課題・問題解決のための具体的取組

1) パイプルーフの構造改良

パイプルーフは、推進時及び推進完了時に周辺土圧に耐え得る構造であるとともに、函体けん引時に発生する下面地盤のゆるみに対し梁構造として上載設備を仮受支持できる構造としなければならない。ダブルパイプルーフを新たに制作をすると、管厚の増大等の大幅な制作コストの増加が懸念されたことから、図-5に示す部分補強を施した構造改良を実施したもので、大幅なコスト増への対策を実施した。



【図-5 ダブルパイプルーフ構造断面図⁴⁾】

2) 3次元FEM解析 (弾塑性解析)

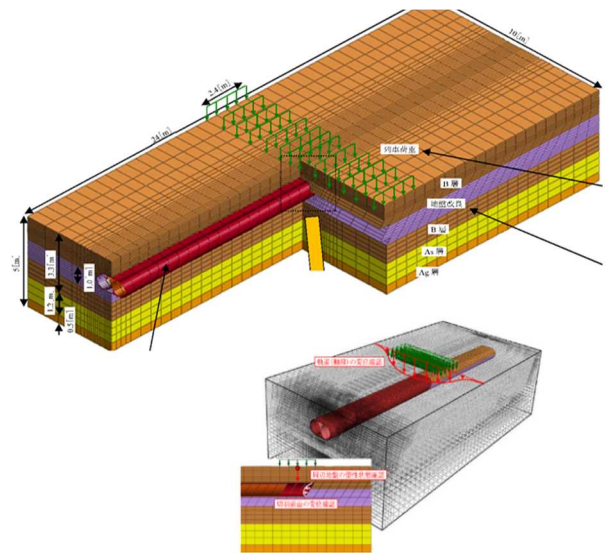
コストの観点から特殊なダブルパイプルーフを使用するが、鉄道への安全性等についてリスクも懸念されるため、施工にあたっては、推進施工時における軌道路盤と切羽安定性について数値解析 (3次元FEM解析) を用いた事前検討を行った。

従来解析手法としては円弧すべり解析手法や二次元FEM解析手法によることが一般的であるが、今回は、鉄道直下という近接施工の観点もあり、施工過程における構造系や荷重条件の変化、側方地盤の影響を考慮する必要があると考え、3次元FEM解析手法を選定した。

また、今回はダブルパイプルーフ使用による切羽開放面積拡大及び列車荷重作用の有無が与える軌道路盤や切羽地盤状態を事前解析のため、地盤構成モデルは施工過程やメッシュ毎の地盤の弾性・降伏・弾塑性・全塑性状態を表現できる弾完全塑性モデル (MCモデル) を適用した。

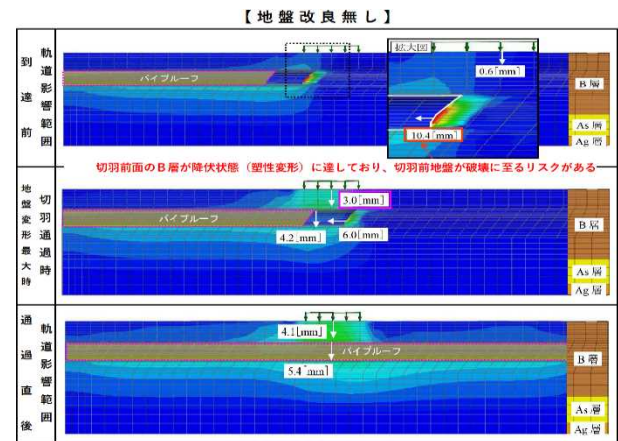
さらに、既存の解析モデル範囲設定根拠⁵⁾や列車荷重作用時の地盤影響予測⁶⁾を参照し、シングル管とダブル管双方の構造 (異なる切羽開放面積での比較) について、切羽開放 (応力解放) や列車荷重作用による地盤の変形量や降伏状態を解析した。

判定の指標としては、軌道路盤変位量が軌道整備目標値以内であることとし、許容変位量を7mm/10m (線路等級: 1級線の高低値, 通り値) とした。



【図-6 3次元FEM解析モデル図⁷⁾】

また切羽地盤については、切羽開放時の周辺地盤の塑性変形進行により地盤破壊に至らないかに着目し、解析を行った。

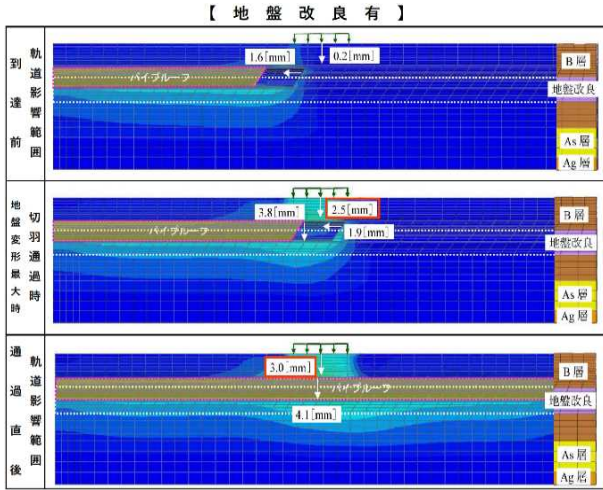


【図-7 3次元FEM解析図 (地盤改良無し)⁸⁾】

上図-7は、ダブルパイプルーフ推進過程に発生する軌道及び切羽路盤の変形量を示すものである。解析結果としては、軌道路盤変位は許容値内であるものの、列車荷重載荷により切羽前面の地盤が塑性化し、切羽面の地山崩壊が懸念された。切羽地盤の崩壊は切羽内作業員の安全性を脅かすことや上部地盤の陥没を誘発するものであるため、3)に示す地盤改良工事を補助工法として検討した。

3) 補助工法の検討 (地盤改良工)

現地の土質条件としては礫混り砂質土層であり、粒径が比較的大きく、かつ粘着力が期待できないことから軌道路盤の沈下低減や崩壊し難い自立切羽の形成、列車荷重作用による切羽地盤の変位抑制を目的とした地盤改良を行った。

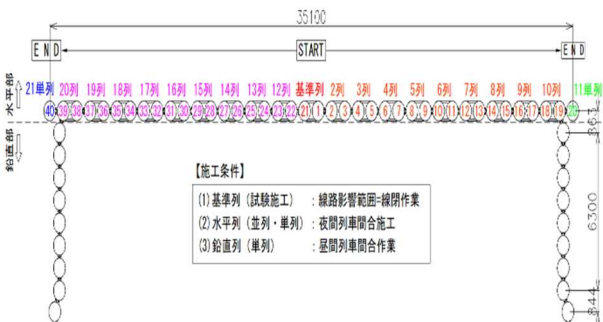


【図-8 3次元FEM解析図 (地盤改良有) 9)】

上図-8は、地盤改良効果を見込んだダブルパイプルーフ推進過程に発生する軌道及び切羽路盤の変形量を示す解析図である。地盤改良前比較では、特に切羽前面の地盤変形量が抑制された結果となった。

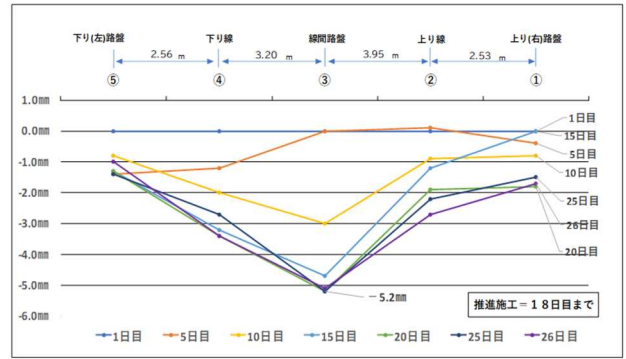
6. 実施結果

パイプルーフ推進時の路盤や軌道の沈下量、変位収束日を以下に示す。

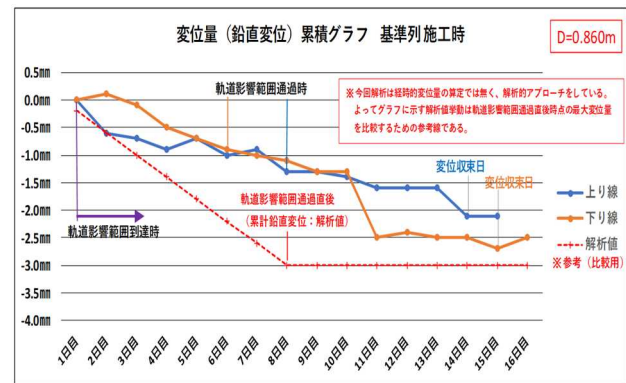


【図-9 パイプルーフ断面配置図 10)】

(1) W ループ推進 (基準列, 試験施工)

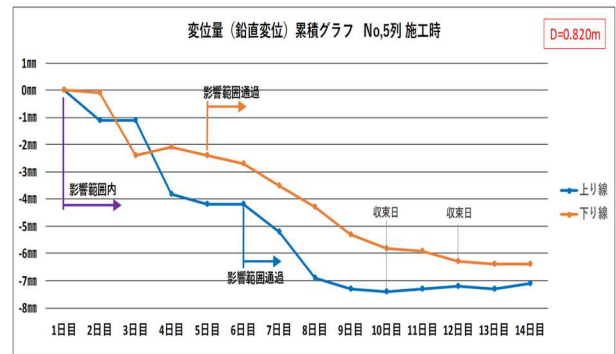


【図-10 軌道・路盤沈下量 (基準列施工時) 11)】



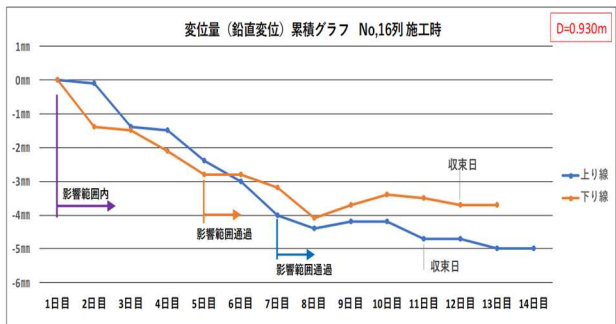
【図-11 変位量累積グラフ (Wループ, 基準列施工) 12)】

(2)-1 W ループ, 標準列施工 (No, 5 列) 支障物有



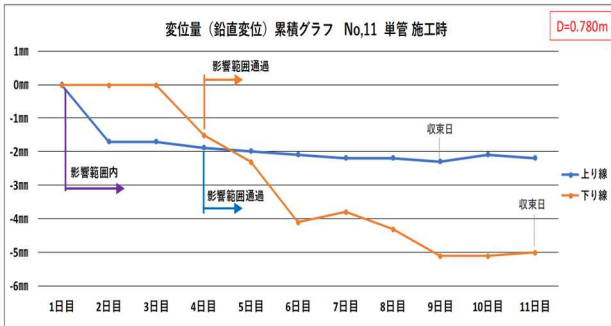
【図-12 変位量累積グラフ (Wループ, 標準列施工) 13)】

(2)-2 W ループ, 標準列施工 (No, 16 列) 支障物有



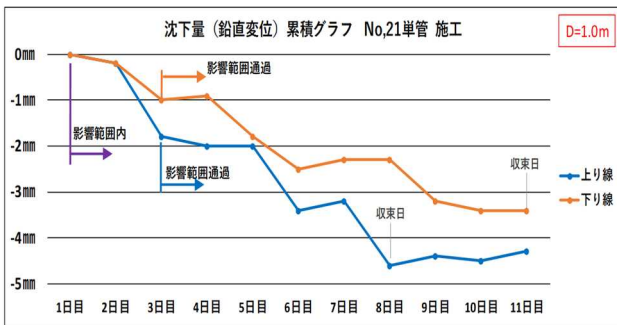
【図-13 変位量累積グラフ (Wループ, 標準列施工) 14)】

(3)-1 Sループ施工 (No, 11 単列) 支障物有



【図-14 変位量累積グラフ (Sループ施工) ¹⁵⁾】

(3)-2 Sループ施工 (No, 21 単列) 支障物有



【図-15 変位量累積グラフ (Sループ施工) ¹⁶⁾】

検討にあたっては、鉄道影響範囲通過時の影響が最も大きいため、シングルパイプルーフとダブルパイプルーフでの解析を実施した。3次元FEM解析結果においては、基準値7mmをクリアする結果となった。また、施工時点の実績は、3次元FEM解析より沈下量が多い結果となったが、基準値はクリアしている結果となった(図-16)。

	FEM解析 (mm)	実績 (mm)	基準値 (mm)
シングルルーフ	-1	-2	±7
ダブルルーフ	-2.5	-4	

【図-16 沈下量比較表 (鉄道影響範囲通過時)】

実施工の方がやや沈下量が大きかった理由としては、①支障物(玉石、間知石、CON塊等)撤去時に発生した微小な空隙、②パイプルーフ自体の変形量が加算されたこと、③施工完了している隣接パイプルーフの影響については解析に反映していないことが推察される。また、最終沈下量についても、解析結果では-3mm程度(ダブルパイプルーフ適用時)であったが、実績値としてはダブルパイプルーフ及びシングルパイプルーフ適用時共に-5mm程度であり、実施工の方がやや沈下量が大きかった同様の結果となった。

以上の通り、今回得られた結果からは、ダブルパイプルーフまたは、シングルパイプルーフ適用時の最終沈下量の差は微小であることが確認できた。

7. 実施結果を踏まえた今後の取組

今回の検討段階においては、ダブルパイプルーフを採用したものの切羽安定性が確保できなかったため、地盤改良を併用した対策を検討し施工を行った。計測結果からみて、いずれの条件(ダブル or シングル)においても、基準値を十分満足しており、事前検討の想定内での施工ができたと考えている。施工時にあたっては、切羽拡大に対する崩壊し難い地盤形成や、計測による変位量の常時把握等を併用することで、ダブルパイプルーフでの施工が安全実施できる結果となっており、今後同様の工事への拡大も十分可能と考える。また、ダブルパイプルーフ施工は、工期短縮に伴い、鉄道への影響期間が短縮されることから、保安費や計測費の縮減にもつながると考えられる。鉄道への影響を小さくすることで安全かつ計画的に、またコストの観点でも優れている本工法に今後の拡大も期待をしたい。

道路事業を進めるうえで、鉄道だけに限らずアンダーパスの構造は多くあり、工法等の検討にも苦慮しており、工事実施時においても計画的な施工等課題を多く抱えているところである。今回は、鉄道の運行を確保したうえでの難工事であったが、工事条件や現場状況、リスクを把握し比較検討したうえで工法選定を行ったため、安全かつ計画的に道路事業が進められている。この取り組みが、全ての道路事業において参考になれば幸いである。

8. 現在の進捗状況

現在、水平パイプルーフの施工が完了し、函体を築造するための立坑構築を線路両側で進めているところである(写真-1)。工事全体の進捗率は29.5%であり、工事は予定どおり進んでいる。



【写真-1 有年Bv工事 空撮写真 (2021.3.31時点)】

謝辞：本事業にご協力を頂いております地域住民の皆様、設計コンサルタント様、施工業者様、関係機関の皆様にご心より感謝申し上げます。また、本論文の作成にあたり多大なるご協力を頂きました、西日本旅客鉄道（株）様をはじめ大鉄工業（株）様に心より感謝申し上げます。引き続き工事は続いていきますが、無事完了することを祈念いたします。

参考文献

- 1) アンダーパス技術協会 「フロンテジャッキング工法技術資料」
- 5) (財) 鉄道総合研究所 「都市鉄道構造物の近接施工対策マニュアル」
- 6) 西日本旅客鉄道（株） 「地盤掘削による影響の予測」
- 2) 3) 4) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 大鉄工業（株）技術誌論文 「開放型刃口推進W化施工が与える線路影響と効果に関する研究」

国立国会図書館関西館の書庫棟における 空調設備設計について

大西 功一

近畿地方整備局 営繕部 整備課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

国立国会図書館は、法律により納本された出版物を、国民共有の文化的資産として永く保存する施設である。国立国会図書館関西館の増築工事においては、今後も増え続ける出版物に対し、書庫の収蔵能力確保のために新たに500万冊規模の書籍が収蔵可能な書庫棟を建設した。書庫棟内の収蔵スペースは書籍の保存のために年間を通して一定の温湿度に保つ必要があるため、設計においては建物・空調設備について多角的に検討する必要があった。書庫棟の整備にあたり検討した設計手法について報告する。

キーワード 図書館、書庫、空調設計

1. はじめに

国立国会図書館関西館は、東京都千代田区にある東京本館の収蔵能力の補完のために京都府相楽郡精華町に建設された施設である。関西館の施設は、書庫の収蔵能力等を勘案しながら段階的に整備していく計画となっており、2002年に第1期施設として「関西館本館」が竣工、開館した。その後2014年には、今後も増え続ける出版物を収蔵するためには既存書庫スペースでは不足するなどの理由により、第2期施設として「書庫棟」の計画が国会に勧告され、今回、保存を目的とした書庫棟を増築する運びとなった。

書庫内は書籍の保存のために年間を通して一定の温湿度に保つ必要があるため、今回の書庫棟の計画においては建築技術はもとより、設備システムにおいても工夫が求められ、温湿度を一定に保つために設計段階での検証が不可欠であると考えた。

今回、書庫棟を整備するにあたり執った設計手法について報告する。

2. 施設概要

関西館本館は、文化と豊かな自然に恵まれた関西文化学術研究都市の、雑木林が茂る一面に位置する。建物全体の規模に対しボリュームを感じさせないように設計されたものとなっており、景観上の調和を見据えることを設計の基本思想としたものである。今回の書庫棟は関西館本館の南側に位置するが、このような景観への配慮を

踏襲し、関西館本館よりも高さを低くしてボリューム感を抑え、また横幅を揃えることで関西館本館に付随する形で配置している。(写真-1参照)

書庫棟 建物概要

所在：京都府相楽郡精華町

敷地面積：約 82,665 m²

用途：図書館（保存書庫）

構造規模：鉄骨造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造）

地上7階、地下1階

延床面積 約 24,998 m²

竣工：2020年2月

書庫内温湿度条件：通年 22℃±2℃、55%±5%
(急激な変動が無いこと)

書籍収蔵規模：約500万冊



写真-1 国立国会図書館関西館全景

3. 空調設備概要

主な空調設備は、以下の構成となっている。

| | | | |
|-------------|------|------|-----------|
| 吸収冷温水機 | 二重効用 | 冷凍能力 | 422 kW×1台 |
| チリングユニット | | 冷凍能力 | 166 kW×1台 |
| 簡易貫流ボイラー | | 定格出力 | 313 kW×2台 |
| コンパクト形空気調和機 | | | 61台 |

年間を通して常に一定の温湿度を保つために冷水・温水を同時に作り出し、どのような気候条件であっても冷暖房や加湿・除湿に対応できるシステムとして設計している。



写真-2 地下1階熱源機械室

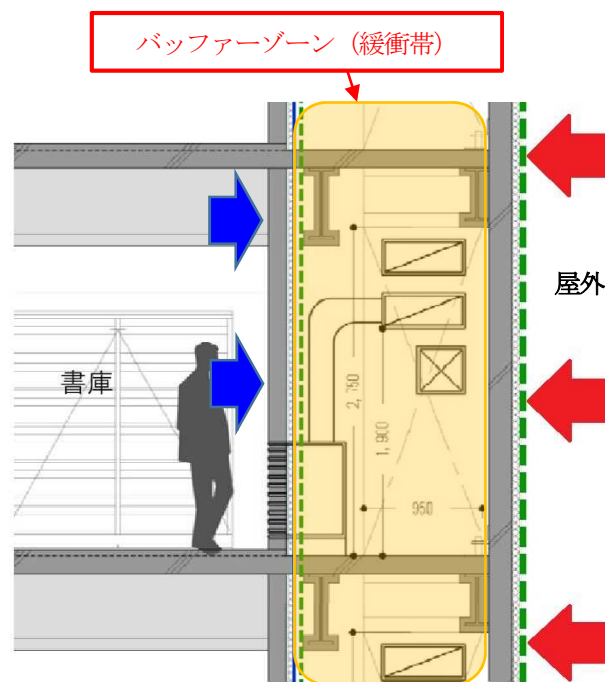


図-1 バッファゾーンのイメージ

今回は、バッファゾーンにかかる空調負荷そのものの軽減を図ることを目的に、外断熱工法の採用とクールピットの導入も行っている。(クールピットのイメージを図-2に示す。)

4. 保存書庫としての設計上の課題

今回の書庫棟において体積の大きな書庫全体を一定の温湿度に保つためには、建物外部からの熱の影響を極力抑えるとともに、書庫全体に空調空気を行き渡らせるように空気の流れを作ることが重要であると考えた。そのため、本設計では、主に建物外部からの熱の影響を抑えるための建築計画と、書庫全体に気流をつくるための空調設備計画の2点について検討を行った。

5. 建築計画の検討

(1) 書庫の配置について

今回の計画では、書庫外壁が直接外部環境と接するため、書庫内部の温湿度を変動させる要因となる外乱(外気温湿度や日射など、建物外部から影響を受ける熱変動)が書庫の体積全体に対して影響することとなる。そのため、建物外部と書庫の間に緩衝帯となる空間(以下、「バッファゾーン」)を設け、直接外部環境に接しないことで書庫内部への外乱の影響を最小限に抑えるとともに、書庫内部からの熱の流出も防ぐことが出来るように考えた。(バッファゾーンのイメージを図-1に示す。)

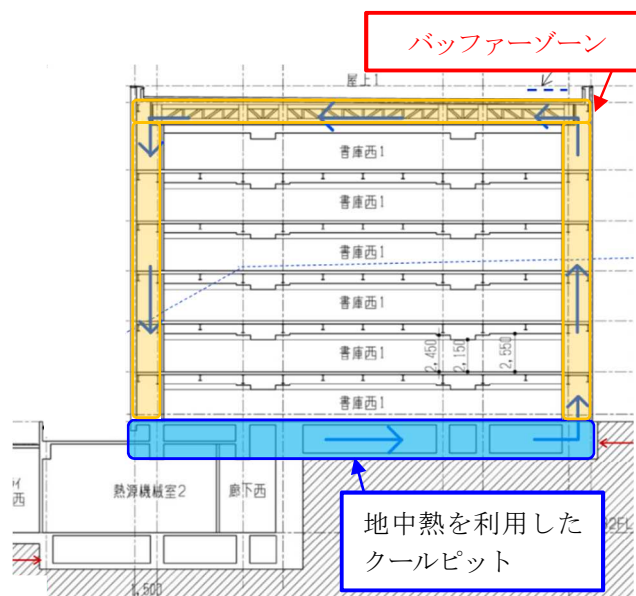


図-2 クールピットのイメージ

6. 空調設備計画の検討

(1) 書庫環境に配慮した空調設備計画について

一般的に、人を対象とした空調設備を設計する場合の温湿度は、建築物等の衛生的環境の確保に関する法律に

基づき建築物環境衛生管理基準に定められた数値の範囲内となる様に設計される。(表-1参照)

表-1 建築物環境衛生管理基準より抜粋

| | |
|------|--|
| 温度 | (1) 17℃以上 28℃以下
(2) 居室における温度を外気の温度より低くする場合は、その差を著しくしないこと。 |
| 相対湿度 | 40%以上 70%以下 |
| 気流 | 0.5 m/秒以下 |

この範囲内において、更に省エネ化を図るために、近年では夏は28℃、冬は19℃を調整目標値として設計している。

これに対し今回の書庫棟設計では、施設管理者との打合せにより、書庫内は書籍の保存環境として温度22℃±2℃、相対湿度55%±5%を調整目標値とし、年間を通して一定の温湿度を維持することが要求され、また書籍の劣化防止対策として気流を作りだし空気を動かすことも求められた。

(2) CFD解析による気流シミュレーションについて

書庫内の温湿度を調整目標値の範囲内で安定させるためには、温湿度を変動させる要因となる外乱や、照明などによる内部発熱が小さければ、一定の温湿度に調整した空調空気を書庫内に気流分布させることで制御可能であると考えた。

今回は保存書庫であることから、基本的に内部発熱が発生する要因が少なく、外乱についてはバッファゾーンにより影響を最小限に抑えているため、一度書庫内の温湿度が安定すれば、その後は変動しにくい状態を維持出来る。そのため、空調設備設計に際しては、場所により温湿度のムラが出ないように、書架や書籍の配置に影響を受けない適切な位置に空調の吹出口と吸込口を配置し、空調機により一定の温湿度に調整した空調空気を書庫内に気流分布させることが重要である。

今回の設計では、書庫内の気流分布の状況を確認するために、CFD解析を用いた気流シミュレーションを行った。

CFD解析とは、数値流体力学(英: computational fluid dynamics)の略称で、流体力学の方程式とコンピュータシステムを駆使することによって流体の流れを観察する数値解析・シミュレーション手法のことで、モックアップなどの試作品を作ること無く様々な状況をシミュレーションできるのが特徴である。

このCFD解析を利用し書架の周囲の気流をシミュレーションにより検証した。シミュレーションは柱間の1モジュールをモデル化し、実運用での収蔵率をもとに70%程度書籍が配置されている状態を条件とした。(CFD解

析モデルを図-3に示す。)

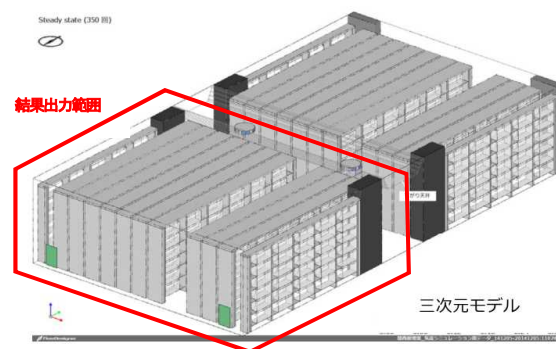


図-3 CFD解析モデル

また書架内にも空調空気が循環する様に、通路の上部に吹出口を、下部に吸込口を配置したモジュールとした。(書庫内気流イメージを図-4に示す。)

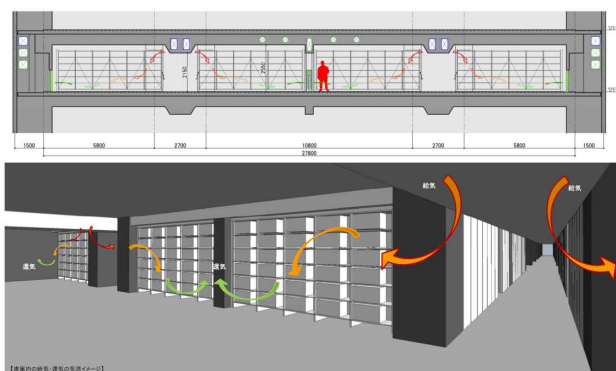


図-4 書庫内気流イメージ図

(3) CFD解析結果について

図中、波のように広がっている箇所が空気の動きを表しており、気流の方向や速さを確認することが出来る。(各図中の矢印はCFD解析結果の気流の流れが分かりやすいように追記したもの。)

図-5は高さ2,450mmでの水平断面を表しており、書庫の上部付近の状態となっている。吹出口がある通路部分から吸込口に向かって、全体的に気流が生じていることが確認できる。

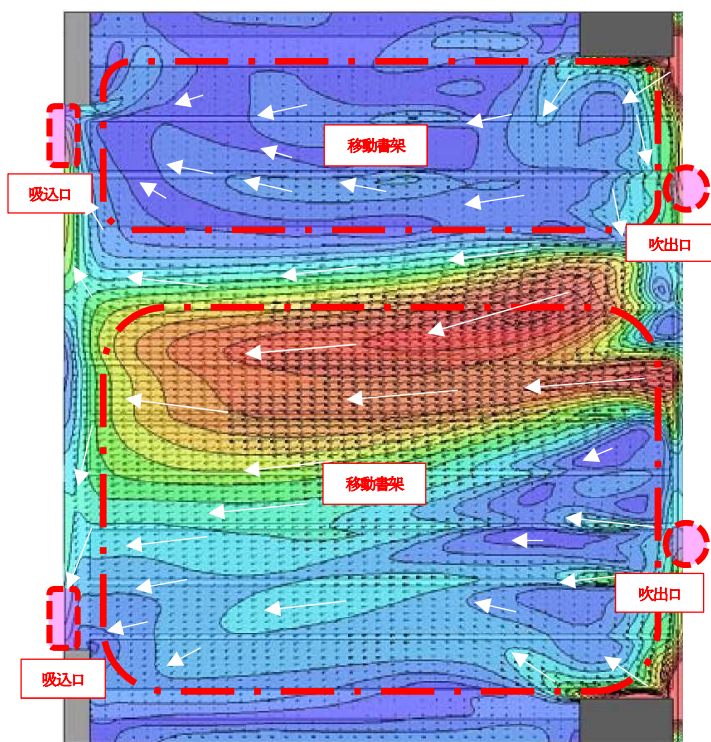


図-5 CFD解析結果 (高さ=2,450mm)

図-6は高さ1,175mmでの水平断面を表しており、書庫の中間付近の状態となっている。吹出口と吸込口がある付近については書架内まで気流が確認できるが、中央付近については気流が生じにくい状態となっていることが確認できた。

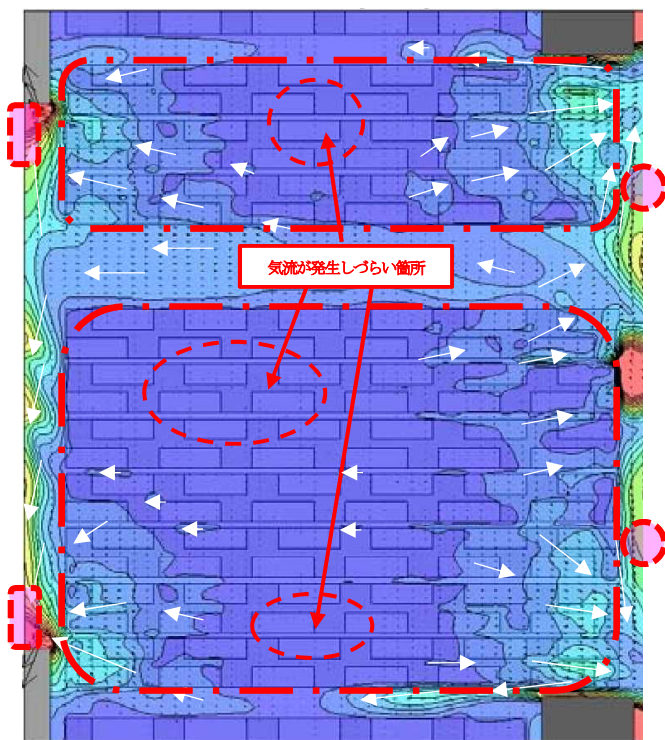


図-6 CFD解析結果 (高さ=1,175mm)

図-7は高さ100mmでの水平断面を表しており、書庫の床面付近の状態となっている。吹出口がある通路部分から吸込口に向かって、全体的に気流が生じていることが確認できる。

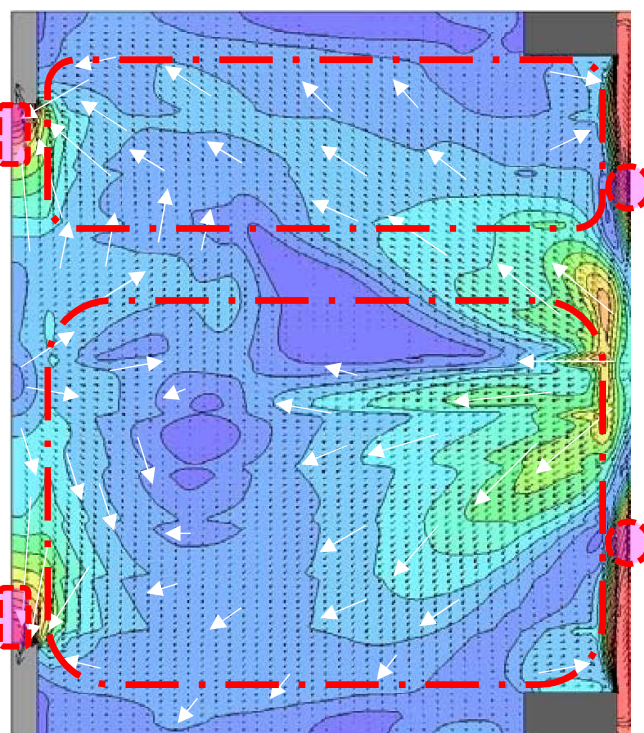


図-7 CFD解析結果 (高さ=100mm)

CFD解析結果より、空調の吹出口と吸込口を、天井と対角の下部にそれぞれ配置することで、書籍が70%程度配置されている状態であっても書架の周りには気流が廻り込んでいることが確認できたが、書架の内部付近については気流が入り込みにくい状態となっていた。このため、書架の内部にまで空調空気を循環させるように、写真-3の様な風が通り抜けやすい構造の書架を採用した。



写真-3 書架

7. 施工から運用管理へ

(1) 工事施工段階での確認について

設計段階でシミュレーションを行い確認した気流分布について、工事施工段階においても試運転調整を通じて確認・調整し、書籍搬入前の状態ではあるが設計の目的であった一定の温湿度となっていることを確認した。

(2) 施設運用段階での測定結果について

工事完成引渡し後、施設管理者と協力し施設運用段階における書庫内の温湿度測定を実施した。

測定は、書籍が保管されている書庫内の書架部分にデータロガー付き温湿度センサーを設置し、2020年8月下旬から24時間連続して測定している。温湿度センサーの設置位置は、高さや吹出口・吸入口からの距離によりムラが出来ていない事を確認するために、床面からの高さはそれぞれ約600mm、約1,550mm、約2,150mmの3段階にし、センサー相互の間隔を約1,000mm空けて各高さごとに5個ずつ、計15個を設置した。

図8～10は床面からの高さごとの温湿度測定データをグラフ化したものである。15個全ての測定結果で、調整目標値である温度 $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $55\% \pm 5\%$ の範囲内で運用出来ていることを確認しており、設計段階のCFD解析シミュレーションで懸念があった書架の中央付近についても一定の温湿度となっていることが確認できた。

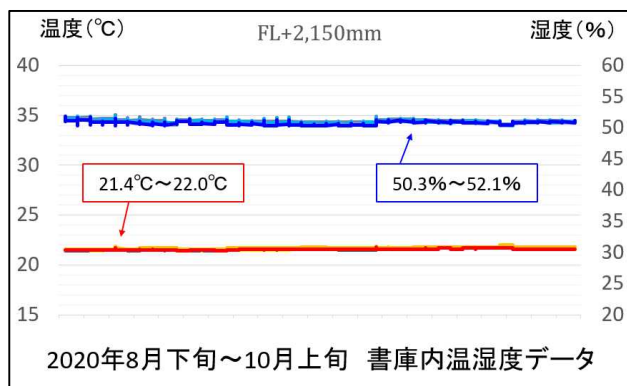


図8 書庫内温湿度測定データ (高さ=2,150mm)

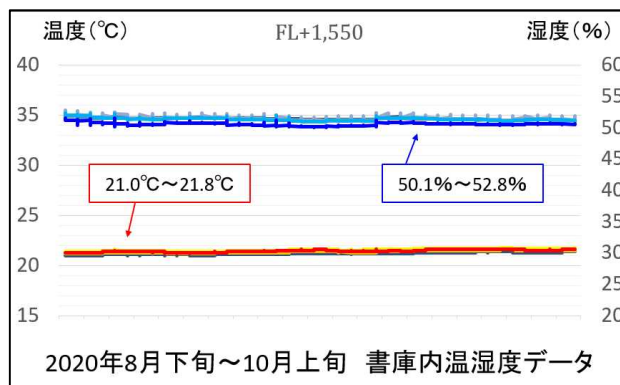


図9 書庫内温湿度測定データ (高さ=1,550mm)

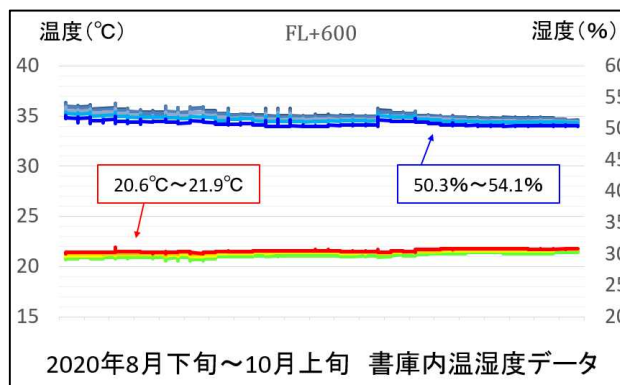


図10 書庫内温湿度測定データ (高さ=600mm)

8. まとめ

年間を通して書庫内を一定の温湿度に保つために行った設計段階での各種工夫について、CFD解析シミュレーションにより事前にその効果や懸念となるポイントについて把握することができ、そのシミュレーション結果を実施設計に活かすことで当初の目的を達成することができた。

今後も特殊条件による空調システムを要求される案件についてはCFD解析などの技術を取り入れ、事前検証を行いながら検討を進めたいと考える。

堺泉北港における産業関連副産物の 実証試験について

杉田 徹¹・宇野 健司¹

¹近畿地方整備局 港湾空港部 海洋環境・技術課 (〒650-0024神戸市中央区海岸通29番地)

2010年度に大阪湾内の堺泉北港堺2区北泊地において、潜堤の腹付材に産業関連副産物である製鋼スラグを活用して実証試験を実施した。約10年にわたるモニタリング結果から、出来形変位では概ね、当初の形状を維持できており、強度についてもコーン指数の値が腹付材の最奥部において表面付近より高い値であることが確認された。安全性の確認では、腹付材の間隙水のpHが高くなる時期がみられたものの、周辺海域へのアルカリ溶出による影響はみられず、腹付材が生物に影響を及ぼしている可能性は低いと考えられた。また、製鋼スラグによるリン等の吸着効果が確認されるとともに、アルカリ成分溶出試験により、海底泥からのカルシウムイオンは溶出していないことが示され、その結果、海水中のpHにほとんど影響がないことが判明した。

キーワード 浚渫土砂、製鋼スラグ、潜堤、リン吸着効果

1. はじめに

産業副産物である製鋼スラグは、海域における環境修復である干潟、浅場、覆砂等の造成材として技術開発・利用等が進められているところである。

一方、大阪湾には、海域環境悪化の原因の一つとされている海底窪地が21箇所存在している。また、今後の港湾整備に伴い発生する浚渫土砂は土砂処分場の残余容量が逼迫していることもあり、海底地形修復などの環境改善施策への有効活用が求められている。

このため、海底地形修復や浅場造成等に必要となる潜堤構造物や基礎地盤への浚渫土砂・産業副産物の有効性を確認するため、2010年度に大阪湾内の堺泉北港堺2区北泊地において、潜堤構造物の腹付材に製鋼スラグと浚渫土砂の混合材を活用した実証試験を行った。

本稿では、2010年度から2020年度に実施したモニタリング調査結果を整理し、腹付材の強度等の安定性及び水質等の環境面の安全性の評価について報告する。

2. 堺2区北泊地の現況及び環境条件

堺2区北泊地は大阪湾奥部の堺泉北港（国際拠点港湾）の北部に位置し、周囲を埋立地に囲まれ、高度成長期に発生した浚渫窪地により、夏季を中心に貧酸素水塊が発生しやすい閉鎖性が高い海域である。北泊地には連続的な水質データを取得・常時モニタリングしている水

質定点自動観測装置が設置してあり、図-3に示すように夏季の底層DOが極めて低い状態である。また、背後には流域面積が1,070km²に及ぶ一級河川の大和川が存在するため、淡水の影響を受けやすく、特に表層で塩分が低い状態である。

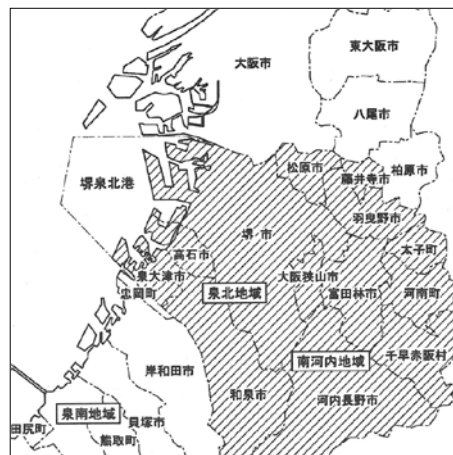


図-1 堺泉北港の位置



図-2 堺泉北港堺2区北泊地の位置

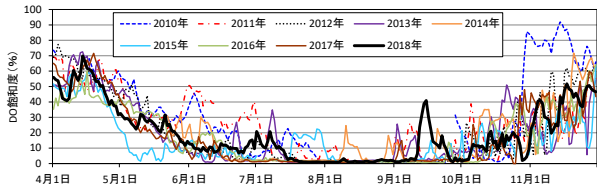


図-3 大阪湾定地点自動観測による底層DOの経年変化

3. 実証試験の概要

(1) 使用材料

浚渫土砂は大阪港夢洲地区の浚渫工事から発生する土砂をスラグは市販の製鋼スラグ (JIS A5015) を用いて、混合率20%で浚渫土砂と製鋼スラグを混合した。

なお、2010年度の現地実証試験前に実施した製鋼スラグと浚渫土砂の事前配合試験 (室内) により、コーン指数及び一軸圧縮強さのいずれにおいても、製鋼スラグ混合率の増加に応じて値が大きくなることが示された。

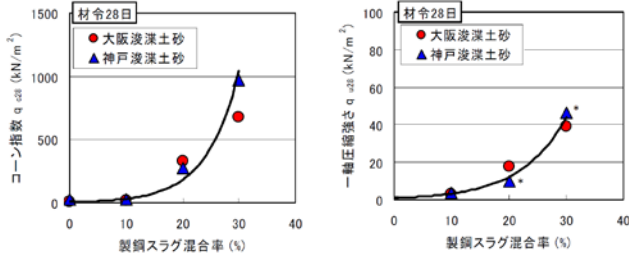


図-4 配合試験の結果 (左: コーン指数, 右: 一軸圧縮強さ)

(2) 試験形状

今回試験を行う腹付材の形状は、将来計画の浅場造成を想定し、その土留堤となる潜堤の一部に浚渫土砂と製鋼スラグの混合材を使用した。

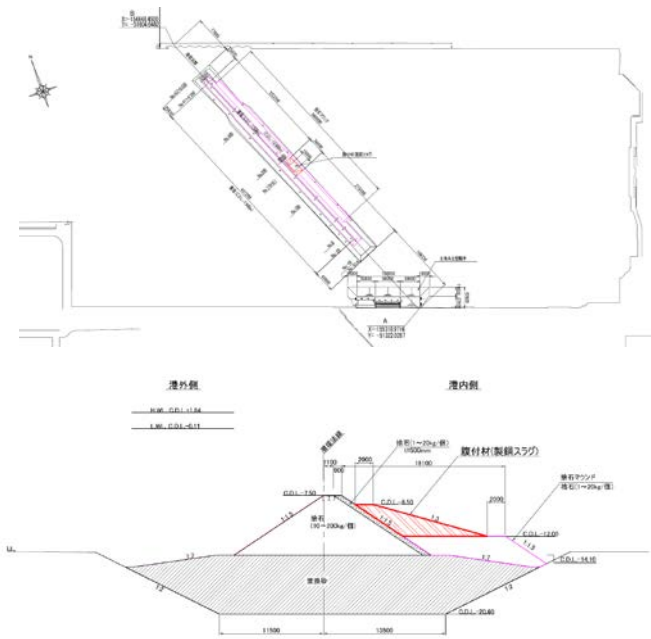


図-5 潜堤の平面図 (上) 及び断面図 (下)

(3) 実証試験の施工

2010年12月26日～27日に実証試験を行うための潜堤及び腹付材の施工を実施した。

施工は、大阪港主航路横で浚渫土砂400m³を採取して土運船で現地へ運搬し (2010年12月26日), 翌日にガット船で運搬してきた製鋼スラグ100m³を土運船内に投入して、起重機船上のバックホウ (2台) により混合・攪拌を2時間以上行った。混合・攪拌を行ったスラグ混合材は、砂撒船に設置したトレミーにより濁りに十分注意しながら所定の水深に投入した。



図-6 製鋼スラグと浚渫土砂の混合材投入状況

(4) 実証試験のモニタリング項目

実証試験では、安定性については、腹付工の出来形変位、腹付材の強度等を確認し、環境面の安全性については、水質調査、底質分析試験、底生生物調査、アルカリ成分溶出試験等を確認した。モニタリング調査は、潜堤施工後の2010年度から2020年度の11年間にわたって実施した。詳細な調査地点・時期・項目・頻度等については、表-1及び表-2を参照することができる。

なお、表-2に示すとおり、強度等確認は年度によって実施項目・実施方法が異なっている。

表-1 (1) 実証試験の実施状況 (安定性)

| 安定性 | | |
|------|-----------------------------|---------------------------------------|
| | 腹付工の出来型変位測定 | 腹付材の強度等確認 |
| 年度 | 2010年度 (施工時)
: 6点 (土運船内) | 2010年度 (施工時) |
| | 2010年度、2020年度
: 5測線 | 2010年度 (施工28日後)
: 1点 |
| | 2016年度: 6測線 | 2016年度
: 3点 |
| | | 2020年度
: 腹付材の表面、中央部、最奥部 (捨石との境界付近) |
| | 水深、形状確認 | コーン指数、含水比、
湿潤密度、乾燥密度 |
| 2010 | 冬 | 冬 |
| 2016 | 秋 | 秋 |
| 2020 | 秋 | 秋 |

表-1 (2) 実証試験の実施状況 (安全性)

| 安全性 | | | | |
|------|-------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------|
| 年度 | 水質調査① | | | 水質調査② |
| | 水質計 | | 採水 | 水質計 |
| | No. 150* | No. 170* | No. 150* | No. 2, 3 |
| | 上層及び下層 | マウンド底面上10cm
間隙水深さ5cm、
間隙水深さ10cm | 上層及び下層 | 上層及び下層 |
| | 水温、塩分、DO、pH | pH | COD、T-N、
T-P、PO ₄ -P | pH |
| 2010 | 冬 | | 冬 | — |
| 2011 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 |
| 2012 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 |
| 2013 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 |
| 2014 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 |
| 2015 | — | — | — | — |
| 2016 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 | — | 春夏秋冬 |
| 2017 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 | — | 春夏秋冬 |
| 2018 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 | — | 春夏秋冬 |
| 2019 | 春夏秋冬 | 春夏秋冬 | — | 春夏秋冬 |
| 2020 | 夏秋冬 | 夏秋冬 | 夏秋冬 | 夏秋冬 |

| 安全性 | | | |
|------|---------------|------------------------------|------------------------------|
| 年度 | 底質分析試験 | 底生生物調査 | |
| | 潜水土による採泥 | 潜水土による目視観察 | |
| | No. 170* | 1測線
潜堤近傍の対照区
(No. 150) | 1測線
潜堤腹付材の法面
(No. 170) |
| | 表層泥 | — | — |
| | 付着動植物、カニ類、魚類等 | | |
| 2010 | 冬 | — | — |
| 2011 | 冬 | — | 春夏秋冬 |
| 2012 | 冬 | — | 春夏秋冬 |
| 2013 | 冬 | — | 春夏秋冬 |
| 2014 | 冬 | — | 春夏秋冬 |
| 2015 | — | — | — |
| 2016 | — | 春・秋 | 春・秋 |
| 2017 | — | 春・秋 | 春・秋 |
| 2018 | — | 春・秋 | 春・秋 |
| 2019 | — | 春・秋 | 春・秋 |
| 2020 | 冬 | 夏秋冬 | 夏秋冬 |

※水質調査①、②及び底質分析試験のNo. 150は潜堤腹付材の法尻部、No. 170は潜堤腹付材の中央部

表-2 強度等確認の実施状況

| 項目 | 試験方法 | 2010年度 | | | | 2016年度 | 2020年度 |
|------------|------------------------|--------|-----|-------------|------------|--------|--------|
| | | 原料 | スラグ | 土運船
より採取 | 施工
28日後 | 3地点 | No.170 |
| 土粒子の密度 | JIS A 1202 | ○ | — | — | — | — | — |
| 粗骨材の密度・吸収率 | JIS A 1109(JIS A 1110) | — | ○ | — | — | — | — |
| コーン指数 | JGS 1431 | — | — | ○ | — | — | — |
| | JIS A 1228 | — | — | — | ○ | ○ | ○ |
| 含水比 | JIS A 1203 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 粒度試験 | JIS A 1204 | ○ | ○ | — | — | — | ○ |
| フロー試験 | JIS A 1150 | — | — | ○ | — | — | — |
| | JIS R 5201 | — | — | — | — | — | ○ |
| 液性限界・塑性限界 | JIS A 1205 | ○ | — | — | — | — | ○ |
| 湿潤密度 | JIS A 1225(JGS 0191) | ○ | — | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 乾燥密度 | 含水比及び湿潤密度より算定 | — | — | — | ○ | ○ | ○ |
| 単位容積試験 | JIS A 1104 | — | ○ | — | — | — | — |
| コーン指数より換算 | | — | — | — | ○ | — | — |
| 一軸圧縮強度 | JIS A 1216 | — | — | — | — | — | ○ |

調査地点No.150は、潜堤腹付材の法尻部で製鋼スラグによる影響等を確認するため、No.170は潜堤腹付材中央部の対照区としている。No.2,3は周辺海域の状況を確認するため設定しており、No.2は腹付工施工位置から600mの地点、No.3はNo.2から2,000mの地点である。

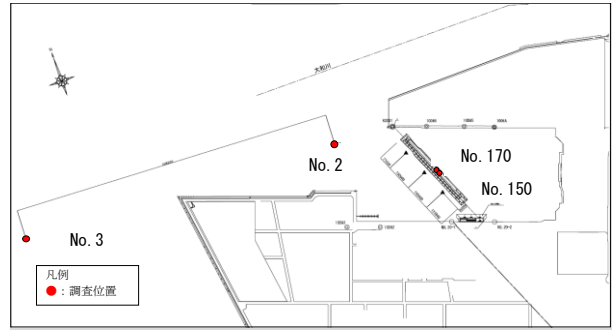


図-7 水質及び底質の調査地点図

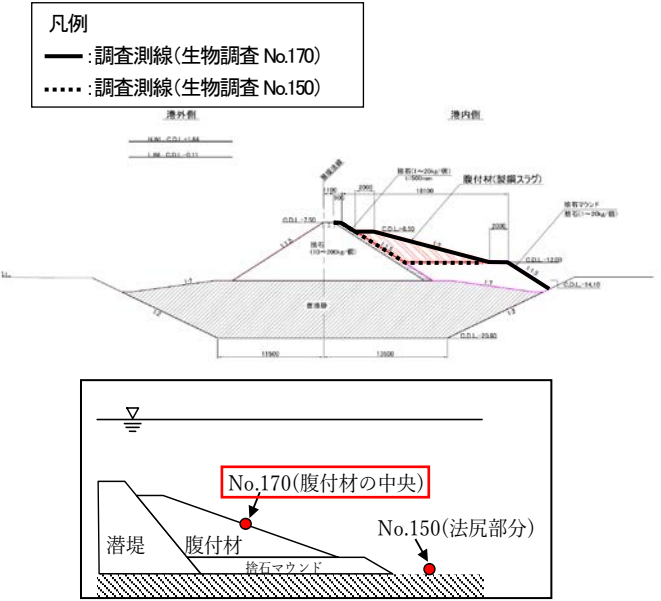


図-8 底生生物の調査測線

4. 実証試験のモニタリング結果

(1) 安定性の確認

a) 腹付工の出来形変位

腹付工の出来型変位測定結果より、中央付近の測線であるNo.170の法尻付近(⑥)では1.0m以上の地盤高の上昇が、腹付工の南側測線であるNo.152の法尻付近(④、⑤)では1.0m以上の地盤高の低下がみられた。ただし、製鋼スラグを使用した腹付材(側線①~④)では10年以上経過しても概ね出来形の形状を維持できていた。

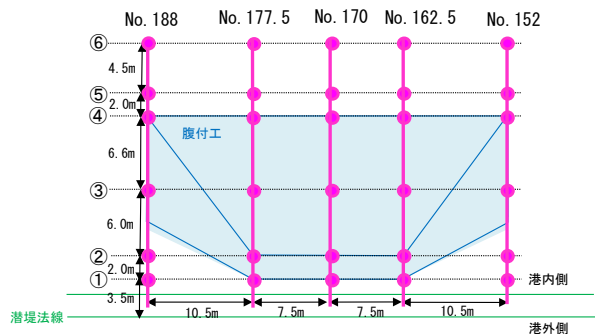


図-9 測線及び調査地点

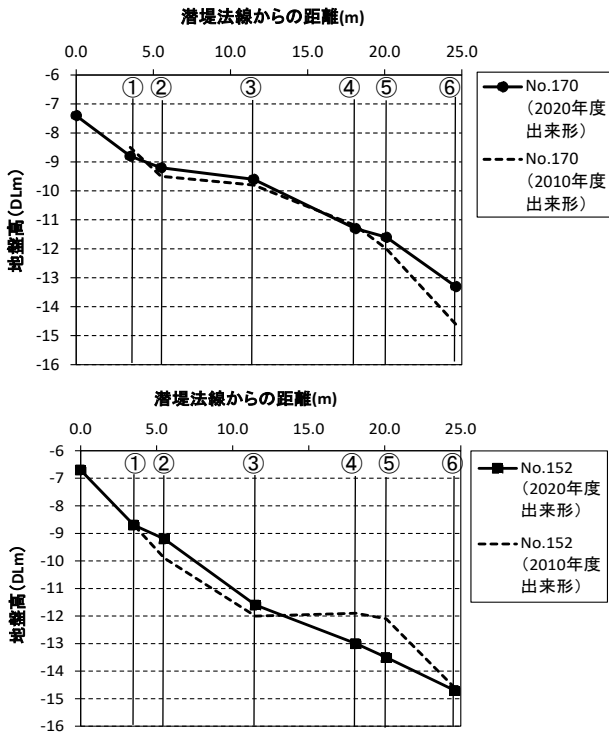


図-10 出来形との比較 (上: No. 170, 下: No. 152)

b) 腹付材の強度等確認

2020年度のコーン指数及び一軸圧縮強度の結果は、層ごとの差が大きく、最奥部がもっとも大きくなっていた。コーン指数の2010年度は腹付工を施工した箇所から採取した3検体の平均値、2016年度は潜堤腹付材中央部 (No.170) から採取 (15cm程度) した3検体の平均値、2020年度は潜堤腹付材中央部 (No.170) から採取したコア (60cm程度) を表面、中央部、最奥部に3等分した3検体である。

2020年度 (表面) のコーン指数は2016年度の87kN/m²より低く、45kN/m²となっていた。中央部や最奥部では表面より大きな値となっていることから、表面では海水と触れることで吸水による強度が低下したり、浮泥の堆積等によりコーン指数が低下していると考えられる。中央部では表面より含水比がやや大きいが、シルト・粘土分がやや少ないことや、表面と比較して浮泥の堆積による影響が少ないと考えられることから、表面より強度が上昇しやすいと考えられる。一方で、中央部のコーン指数は最奥部の約半分の値であることから、表面と比較して海水の影響は小さいものの、吸水により強度が低下していると考えられる。

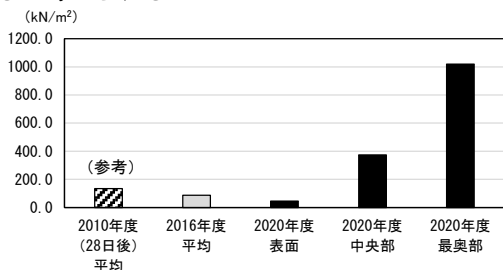


図-11 コーン指数の経年変化

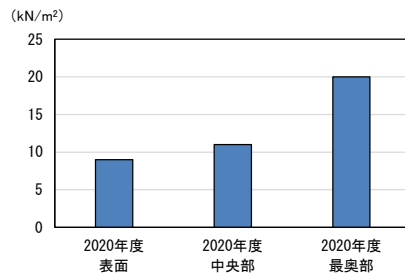


図-12 一軸圧縮強度の調査結果 (2020年度: No. 170)

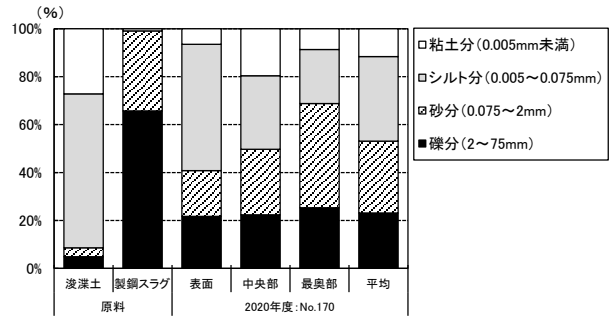


図-13 原料と腹付材 (2020年度: No. 170) の粒度組成の比較

(2) 安全性の確認

a) 水質

水質の安全性を確認するため、海水中の水素イオン濃度 (pH) を評価指標として検討した。図-14に海水中及びスラグ混合材の間隙水中の施工後から毎年pHの経年変化を示す。潜堤腹付材中央部 (No.170) の間隙水のpHは施工1ヶ月後から高い値で推移していた。これは、製鋼スラグの主な化学成分が石灰、二酸化ケイ素、酸化鉄等であり、石灰によりpHが上昇する性質を有しているためと考えられる。しかし、潜堤腹付材中央部 (No.170) 直上10cmのpHは低い値であり、かつ腹付材法尻部 (No.150) や周辺海域 (No.2,3) の下層と同程度であり、アルカリ溶出による影響は見られないと考えられる。また、各自治体が毎月測定している周辺海域の公共用水域測定結果においても、環境基準値 (7.8 以上8.3以下) を超える場合が確認されており、腹付材直上の値が環境基準値を超えていたとしても腹付材法尻部 (No.150) や周辺海域 (No.2,3) と同程度である。

以上のことから、本試験による周辺海域のpHの影響の程度は小さいと考えられる。

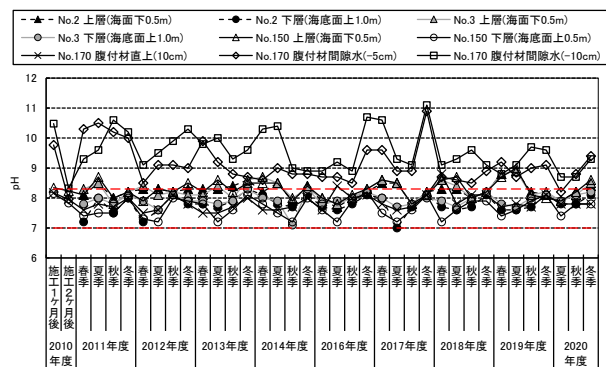


図-14 水質 (pH) の経年変化

b) 底質

原料（浚渫土砂，製鋼スラグ）及び潜堤腹付材中央部（No.170）で採取した底質分析の結果，2014年度までの調査においては，一般的な水底土砂の環境基準である以下のいずれについても基準値を満足していた。

- ・海洋汚染防止法基準値に関する分析
- ・廃棄物の処理及び清掃に関する法律に規定する油分を含む産業廃棄物に係る判定基準に関する分析
- ・底質の暫定除去基準に関する分析
- ・ダイオキシン類による水底の底質の汚染に係る環境基準に関する分析
- ・廃棄物の処理及び清掃に関する法律に規定する金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準に関する分析

基準値が定められていない土のpH試験については，施工2ヶ月後に高い値（11.3）を示したものの，それ以降は10以下で推移していた。2020年度の腹付材の値が若干上昇しているが，施工後より低い値を示しており，土のpHが安定してきていると考えられる。

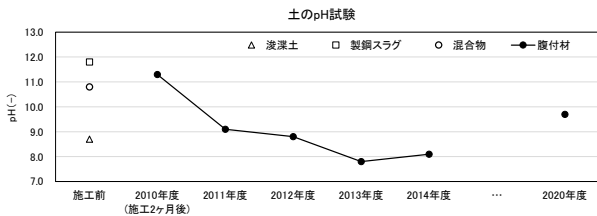


図-15 土のpH試験結果の経年変化

c) 底生生物

底生生物調査は潜堤腹付材中央部（No.170）及び腹付材法尻部（No.150）を対象として四季において実施した。その結果，四季のうち，春季を中心として生物が生息していることが確認された。また，出現種や被度をみても潜堤腹付材中央部（No.170）と腹付材法尻部（No.150）では生物の種類に大きな違いはなく，スラグ混合材が生物に影響を及ぼしている可能性は低いと考えられる。

表-3 底生生物の出現種一覧

| No. | 門 | 綱 | 目 | 科 | 種名 | No. 170 | No. 150 |
|---------|-------|--------|--------|--------------|---------|---------|---------|
| 1 | 刺胞動物門 | ヒトドロ虫綱 | - | - | ヒトドロ虫綱 | ◎ | ◎ |
| 2 | | 花虫綱 | イキシヤク目 | - | イキシヤク目 | ◎ | ◎ |
| 3 | 軟体動物門 | 腹足綱 | 裸貝目 | カミカワリ科 | カミカワリ | ◎ | ◎ |
| 4 | | | 真後鰓目 | キワガキ科 | キワガキ | ◎ | |
| 5 | | | | アマラシ科 | アマラシ | ◎ | |
| 6 | 環形動物門 | コカイ綱 | ケリムシ目 | カンザシコカイ科 | カンザシコカイ | ◎ | ◎ |
| 7 | 節足動物門 | 軟甲綱 | 十脚目 | Inachoididae | イカクモカニ | ◎ | ◎ |
| 8 | 棘皮動物門 | ヒトゲ綱 | アカトゲ目 | イトマキヒトゲ科 | イトマキヒトゲ | ◎ | ◎ |
| 9 | | | | マヒトゲ科 | マヒトゲ | ◎ | ◎ |
| 10 | | ウニ綱 | フンブク目 | ヒラフンブク科 | オホフンブク | ◎ | |
| 11 | 原索動物門 | ウツギ綱 | マメボヤ目 | ユレイボヤ科 | ユレイボヤ | ◎ | ◎ |
| 12 | | | マホヤ目 | シロホヤ科 | シロホヤ | ◎ | ◎ |
| 13 | 脊椎動物門 | 硬骨魚綱 | スズキ目 | スズキ科 | スズキ* | ◎ | |
| 15 | | | | マツ科 | マツ* | ◎ | |
| 16 | | | | ハゼ科 | ハゼ* | ◎ | |
| 17 | | | カレイ目 | カレイ科 | カレイ | ◎ | |
| 18 | 不明 | - | - | - | 泥集 | ◎ | ◎ |
| 出現種類数合計 | | | | | | 16 | 11 |

注) 1. ユレイボヤの生息場所には，カタユレイボヤが混在することがあるが，ユレイボヤと示す。
 2. 泥集は，ヨコエビ類あるいは多毛類の生息巣を示す。
 3. 種名に*をつけたものは，遊泳性の魚類を示す。
 4. 測線 No.170 は 2011 年度春季以降の 24 回調査の結果を，No.15 は 2014 年度春季以降の 12 回調査の結果を示す。



ウミフクロウ (撮影：2017年5月)



マヒトゲ (撮影：2011年6月)

図-16 主な出現種の写真

5. 製鋼スラグによるリン等の吸着効果

製鋼スラグはCa²⁺の供給によるアルカリ性のため，リンを不溶化して吸着する性質を持つことが知られている¹⁾。一般的に窒素・リン等の栄養塩類は富栄養化による環境悪化の要因の一つと考えられている²⁾。水質調査の結果より，潜堤腹付材中央部（No.170）の間隙水のPO₄-P（リン酸態リン）及び硫化物は，腹付材法尻部（No.150）と比較して低い値を示していた（図-17及び図-18参照）。本実証試験においても，スラグ混合材がPO₄-P及び硫化物の低下に寄与したと考えられる。

6. アルカリ成分溶出実験

(1) 実験概要

潜堤腹付材中央部（No.170）の腹付材と腹付材法尻部（No.150）の海底泥を，内径10cmのアクリルパイプを用いてそれぞれ採取（共に25cm長）し，図-19に示すようなアルカリ成分溶出実験を行った。

(2) 実験結果

a) 水質分析結果

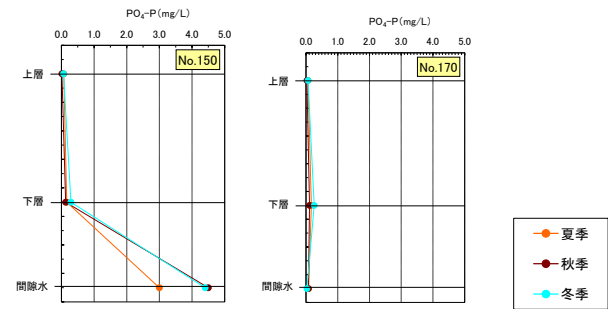


図-17 PO₄-Pの鉛直分布

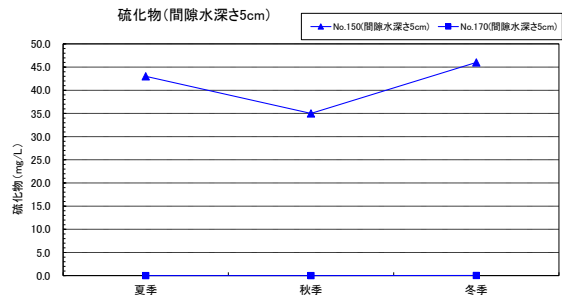


図-18 硫化物の季節変化

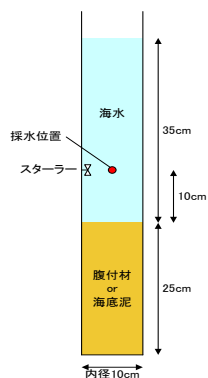


図-19 実験イメージ

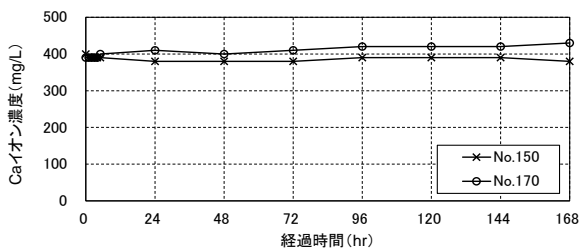


図-20 実験期間中のカルシウムイオン濃度の経時変化

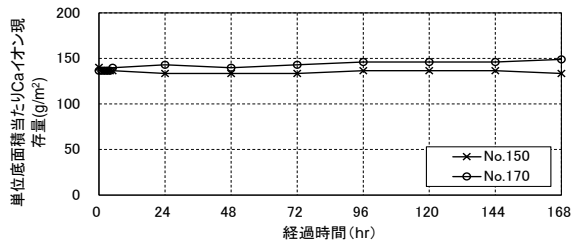


図-21 直上水中の単位底面積当たりのカルシウムイオン現存量の経時変化

カルシウムイオン濃度は、海底泥を用いたケース (No.150) ではわずかな減少傾向を示し、実験開始時の400mg/Lが168時間後には380mg/Lとなっていた。一方、腹付材を用いたケース (No.170) では1日後以降に、徐々に増加する傾向を示し、実験開始時の390mg/Lが168時間後には430mg/Lとなっていた。

b) カルシウムイオンの溶出速度

各ケースにおける直上水中のカルシウムイオンの現存量を算定し、単位底面積当たりの現存量に換算すると、図-21に示すとおりとなる。カルシウムイオンの現存量の算定にあたっては、採水による系外への移動分を補正した。

直上水中のカルシウムイオンの単位底面積当たりの現存量の増減傾向を直線近似し、単位面積当たりの腹付材及び海底泥からのカルシウムイオン溶出速度を算出した。その結果、海底泥 (No.150) からのカルシウムイオン溶出速度は-11.65mg/m²/hrとなり、海底泥からカルシウムイオンが溶出していないことが示された。一方、腹付材 (No.170) からの溶出速度は、69.48mg/m²/hrと算定された。また、溶出したカルシウムイオンが実海域にどの程度拡散したか岩井の拡散式を用いて予測した結果、その

濃度は0.01mg/L未満であった。室内実験から得られたカルシウムイオン濃度とpHの関係式からpHを推定すると0.000035程度であり、海水中のpHにほとんど影響がないことが判明した。

7. まとめ

潜堤の腹付材に産業関連副産物である製鋼スラグを活用して、2010年度から実証試験を実施し、以下のとおり、長期的な安定性及び環境面の安全性を確認した。

- 出来形変位は、スラグを使用した腹付工では10年以上経過しても概ね出来形の形状を維持していた。
- 腹付材の強度は、コーン指数や一軸圧縮強度の結果から表面よりも最奥部の方が大きな値を示した。
- 腹付材の間隙水のpHは高い値で推移しているものの、腹付材直上のpHは近傍や周辺海域の下層と同程度であり、アルカリ溶出による影響は見られなかった。
- 潜堤腹付材中央部の底質は環境基準値を満足していた。また、基準値が定められていない土のpH試験については、施工2ヶ月後に高い値 (11.3) を示したものの、それ以降は10以下で推移していた。
- 潜堤腹付材中央部及び腹付材法尻部における底生生物の被度及び出現種に大きな違いはなく、腹付材が生物に影響を及ぼしている可能性は低いと考えられた。

潜堤腹付材中央部 (No.170) の間隙水のPO₄-P及び硫化物は、腹付材法尻部 (No.150) と比較して低い値を示していた。これは、腹付材のスラグ混合材の吸着効果によりPO₄-P及び硫化物の低下に寄与したと考えられた。また、アルカリ成分溶出試験により、海底泥からカルシウムイオンは溶出していないことが示され、その結果、海水中のpHにほとんど影響がないことが判明した。

これらの実証試験の結果を踏まえて、今後は、製鋼スラグ及び浚渫土砂の混合材を用いた海域での有効利用を推進していく。

また、堺2区北泊地潜堤における実証試験の評価等ととりまとめて、全国に展開できるように、製鋼スラグの有効活用に向けた技術資料を作成した。技術資料では、製鋼スラグの位置付けについて、マニュアル、ガイドライン等での記載状況等を整理するとともに、海域における活用事例集についても掲載しているため、各海域で製鋼スラグを活用する際に参照されたい。

参考文献

- 1) 社団法人日本鉄鋼連盟 (2008) : 「転炉系製鋼スラグ海域利用の手引き」 p.13
- 2) 藤原建紀 : 内湾の貧栄養化—窒素・リン負荷量削減が海域のCOD, 栄養塩レベルにおよぼす影響—, 沿岸海洋研究第52巻第1号, pp.11-27, 2014

超軟弱粘土層へ打設する鋼管矢板の 施工時の安定対策について

大住 俊揮¹

¹近畿地方整備局 大阪港湾・空港整備事務所 第一建設管理官室(〒552-0007 大阪市港区弁天1丁目2番1-1500号)

大阪港では、主航路浚渫において発生する浚渫土砂の土砂処分場として新島地区護岸の整備を行っている。本航路の浚渫は、ポンプ浚渫で計画され、同工法は海水とともに土砂を吸引し、直接土砂投入場所へ放出する仕様から、大量の排水が場外へ放流されることになるため、環境対策として沈殿池を計画した。沈殿池と土砂投入場所の中仕切りには、大阪港沖の超軟弱粘性土地盤(N値=1以下)が厚く堆積する区域であり、経済性を考慮し自立鋼管矢板構造で計画された。今般鋼管矢板を施工したところ、打設の影響により矢板周辺の地盤強度の低下が想定以上に大きく、支持力不足により自沈する事象が発生した。

本報告は、超軟弱地盤に施工する鋼管矢板施工時の支持力不足等の検討及びその対策について報告する。

キーワード 軟弱粘性土、施工検討、鋼管杭、対策検討、土砂処分場

1. はじめに

大阪港では、国際コンテナ戦略港湾事業を推進するために不可欠な大阪港主航路の増深・拡幅時に発生する浚渫土砂を受け入れる土砂投入場所を主航路に隣接する新島地区(図-1)に現在整備中である。

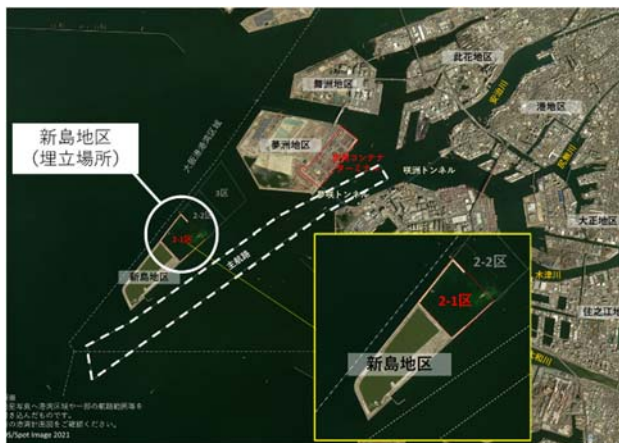


図-1 大阪港及び新島地区航空写真

大阪港主航路の浚渫方法は、ポンプ浚渫で計画されており、大量の排水が場外へ放流されることになることから、環境対策として、鋼管矢板形式の沈殿池を計画、施工中である。

新島地区周辺は大阪港沖であるため、軟弱な粘土層となっている。今般沈殿池を施工したところ、鋼管矢板の打設に伴い自沈する事象が発生した。

本論文では、超軟弱粘性土地盤に施工する鋼管矢板について、施工時の自沈に対する要因の検討及びその対策工について報告を行う。

2. 新島地区護岸埋立について

新島地区は、大阪港主航路の浚渫により発生する土砂を受け入れる施設である。夢洲地区につながる主航路の浚渫で、約530万m³の土砂により新島地区を埋立する計画となっている。港湾事業において、浚渫方法はポンプ浚渫の他にグラブ浚渫があるが、浚渫面積が広く、大量の土砂を扱う浚渫となるため今回はポンプ浚渫方式で計画している。

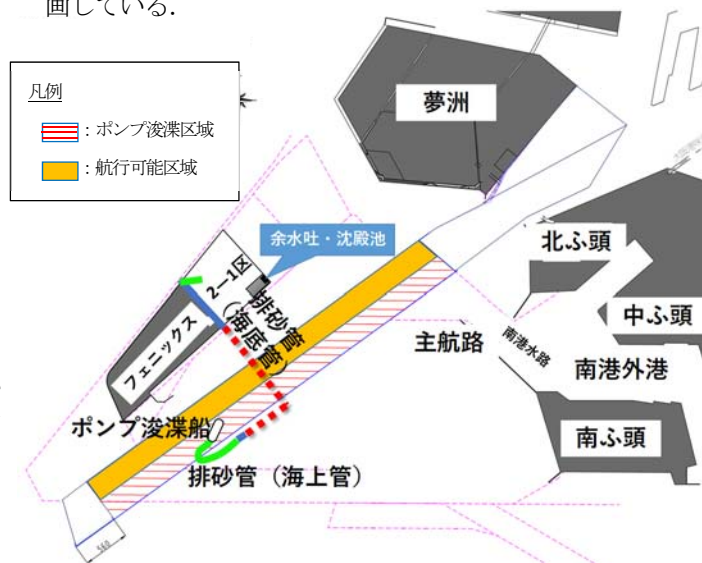


図-2 新島地区護岸埋立計画

(1) ポンプ浚渫について

ポンプ浚渫とは、スパッドにより船体を固定し、固定点を中心に船体をスイングさせながら、海底に土砂を吸い込む装置(カッターヘッド)をおろして、海底の土砂を海水とともに吸い込んで、土砂を取り除く浚渫方法である。詳細な工程は以下のとおり。

- ① 船の先端にある吸水管を海底に降ろす。
- ② 吸水管の先端についているカッターヘッドを回転させて、海底の土砂を切り崩す。
- ③ 切り崩された土砂は、船に内蔵されているポンプの力によって海水と一緒に吸い込まれ、船の後ろに続く長い排砂管の中を通り、埋立地へ投入される。

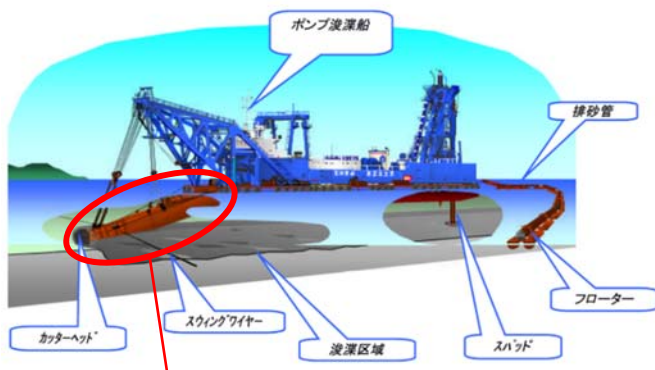
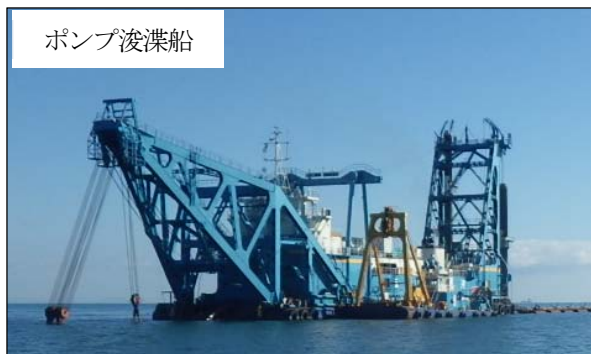


図-3 ポンプ浚渫船の構成

(2) 沈殿池施設について

新島地区2-1区は、大阪主航路の浚渫による浚渫土砂を投入する。ポンプ浚渫において、海水とともに土砂を投入するため、環境対策として泥水以外の余水のみ護岸の外へ排出する余水排水のための「沈殿池」施設を整備中である。沈殿池施設については、軟弱粘土層に設置す

ることを考慮し、経済性等を踏まえ自立鋼管矢板構造(図-5)で設計した。

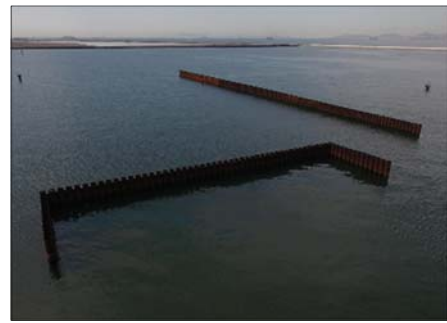


図-4 2021年3月末時点の余水吐施設

3. 沈殿池、余水吐施設

前述のとおり、土砂投入における環境対策として、沈殿池及び余水吐施設を整備中である。

(1) 余水吐施設について

新島地区では、濁りを管理しながら泥水を基準値以下で排出するため、沈殿池方式の余水吐施設を計画している。仕組みは以下の通り。

- 沈殿池という小さな枠を設けることで、
- ① 埋立地のなかに投入した泥水の中の土砂のみを沈殿池に到達するまでに沈降させてゆく。
 - ② 沈殿池に到達し、越流堰を上澄みの泥水のみ越流堰させる。越流堰を超えた泥水は、土砂のみ汚濁防止膜により沈降する。そしてさらに濁りの低くなった泥水内の土砂を余水吐に到達するまでさらに沈殿池のなかで沈降させてゆく。

この行為を埋立地内と沈殿池内で2段階行い護岸の外に排出する際には濁りを基準内におさえる。

埋立地と沈殿池、沈殿池と余水吐の間には、高さのある越流堰という堰をもうけることで、沈降した土砂を侵入させないという仕組みとした。

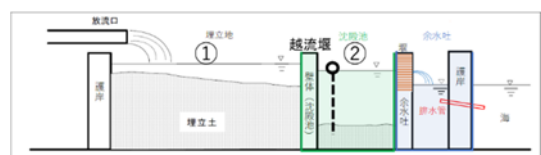
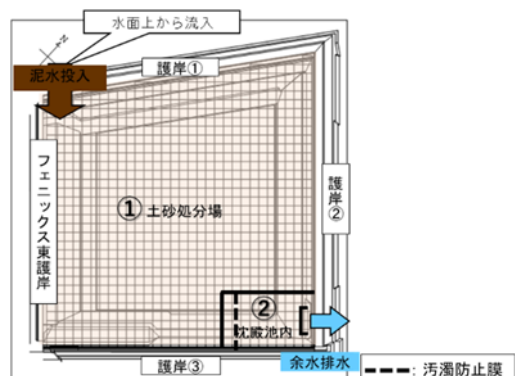


図-5 沈殿池施設の概念図

(2) 沈殿池構造形式

構造形式については、経済性や施工性を考慮し鋼管矢板形式を採用しており、沈下量、地盤条件（改良、未改良）、波圧（施工時）、土圧（埋立て時）によって杭径、板厚が設定されている。なお、水平方向荷重（波圧、土圧）が検討対象となるため、支持力については検討されていない。また、根入れ長（杭長）の決定ケースは波圧作用時（施工時）である。

未改良部：φ900×t10, L=29.5m
改良部：φ800×t9, L=35.0m

(3) 鋼管矢板施工方法

鋼管矢板の打設工法は、油圧式バイプロハンマによる振動工法であり、下記手順による。

- ① 鋼管矢板打設位置と施工時の安定を確保するため、導杭、導梁からなる導材を設置。
- ② 導材を利用し、所定の位置へ鋼管矢板打設
- ③ 鋼管矢板を所定の本数打設後、導材を撤去
- ④ ①～③繰り返し
- ⑤ 鋼管矢板打設完了後、継手処理

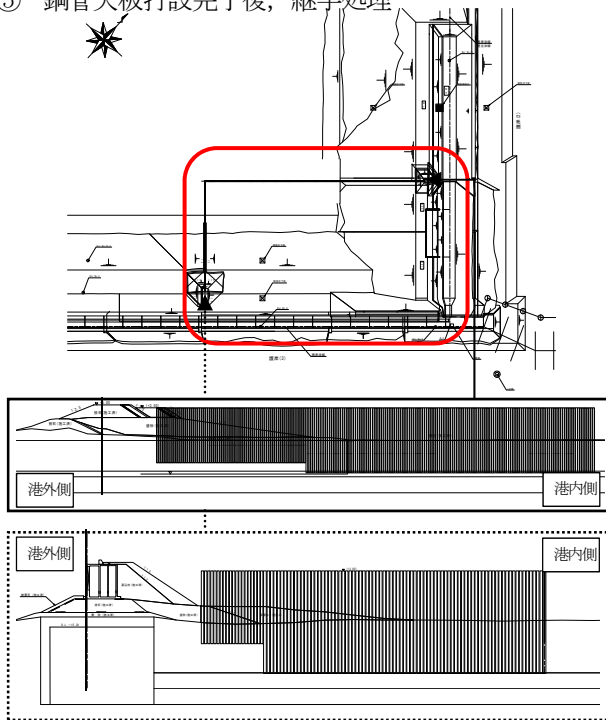


図-6 沈殿池施設の位置図・断面図

4. 粘性土地盤周面支持力不足の判明と対策

(1) 鋼管矢板打設時の状況

沈殿池の鋼管矢板打設において、改良部の鋼管矢板（No. 100）打設完了後に、未改良部の鋼管矢板を打設するため、導杭を打設したところ、導梁設置前に導杭の沈下が発生した。導杭は突出長（16.3m）と長いため、それ以上の根入れ長を確保することに配慮し、導杭長は

L=33.0mとしていた。

さらに、近傍柱状図よりN値が上がり始め、先端支持力にも期待できる可能性がある砂混りシルトまで導杭を延長（L=42.0m）する対策を実施したが、同様に自重で沈下したため、未改良部の導杭施工は不可能と判断した。

次に、未改良部の鋼管矢板：L=35mについても、同様に自重で沈下する可能性が考えられたため、試験的に単杭（No. 146）として打設した。バイプロハンマを用いて打設後、30分間経過観測：131mmで沈下が収束した。また、試験杭を引き抜くためバイプロハンマを杭頭に設置したところ、さらに沈下が進行した。

鋼管矢板が導杭と同様に沈下すると天端高の確保が困難となるため、沈下対策について検討する。

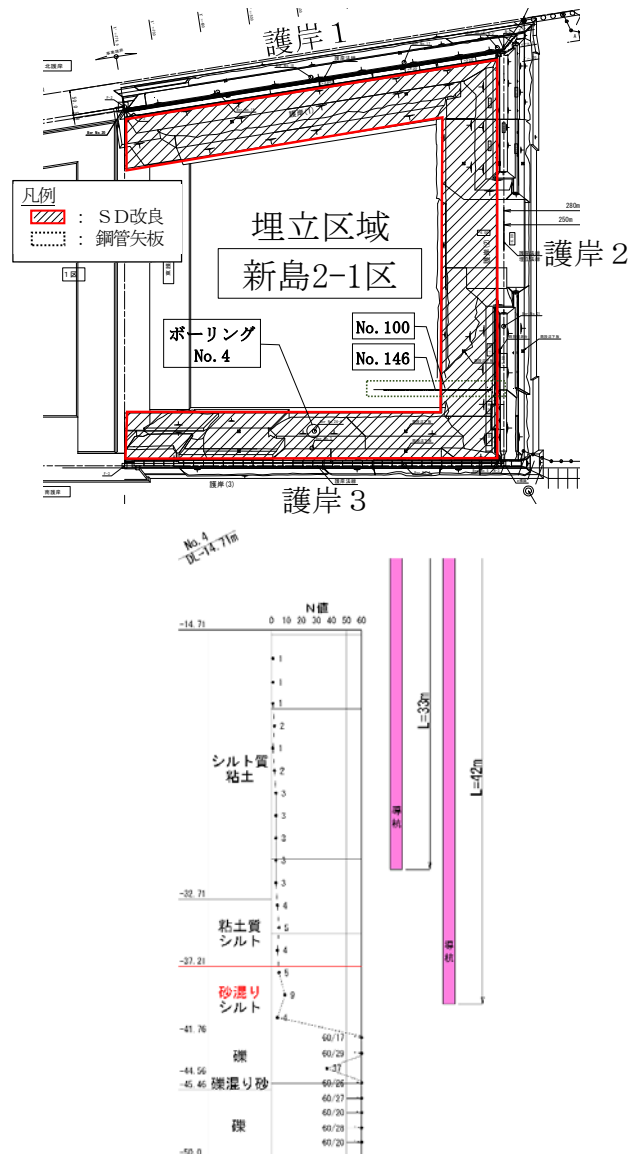


図-7 地盤改良の状況、柱状図及び土質条件

(2) 導杭, 鋼管矢板打設時沈下の要因

要因としては, 以下が考えられる.

- ① 原地盤のバラツキにより, 設計の想定よりも周面摩擦力や先端支持力が小さかった.
- ② バイブロハンマの振動により地盤が乱され, 周面摩擦力が低下した.

以上の沈下要因を踏まえ, 今後の課題は以下のとおりとした.

- ① 原地盤の土質定数を見直すには, 追加土質調査が必要となり早期の対応が困難である.
- ② 地盤の乱れに着目し, 施工時の周面摩擦力を確保するための対策を提案する.

(3) 鋼管矢板打設時の対策工

導杭の打設結果より, バイブロハンマ打設後乱された土質である原地盤の先端支持力, 周面摩擦力には期待できない.

そこで, 一般的に粘性土地盤に比べてセットアップ率が小さく, 回復時間が早い砂質土 (敷砂) を投入し, 周面摩擦力を確保する.

セットアップは杭打設により周辺地盤で乱された土粒子が, 時間とともに再形成され回復する現象のことを表す.

セットアップ終了のおおよその目安は, 砂質土で5日以上, 粘性土では14日以上とされている¹⁾. なお, バイブロハンマによる強度低下, 強度回復について明確に示された文献がないため, 打撃工法に関する文献を参照した²⁾.

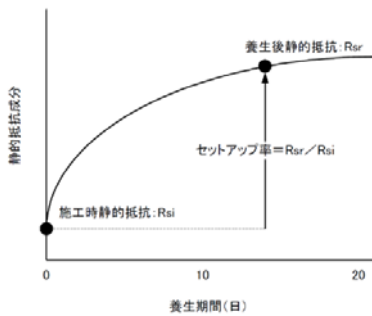


図-8 セットアップ概念図

表-1 セットアップ概念図

| 項目 | セットアップ率 | |
|---------|---------|---------|
| | 小 ← | → 大 |
| 地盤の種類 | 砂質土 | 粘性土 |
| 抵抗場所 | 先端 | 周面 |
| ハンマーの性能 | 打撃間隔が長い | 打撃間隔が短い |

1) 強度低下 (セットアップ率)

セットアップ率のバラツキは大きいですが, 沖積層の周面支持力の平均は図-9より11.8倍≒12倍である. このことから, 強度低下率 1/12 と仮定した.

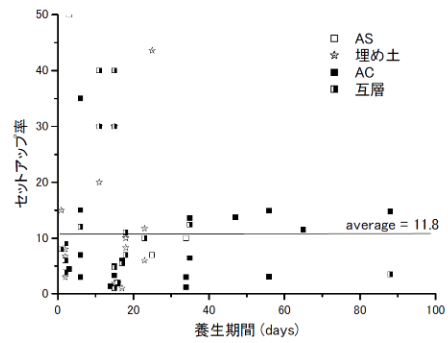


図-9 セットアップ率

2) 敷砂層厚

敷砂は, N値=3とし, 強度低下がないものとして極限支持力と杭自重のつり合いより層厚を設定した³⁾. なお, 安全側に粘性土の支持力には期待しないこととし, 次式(1a)(1b)より算出する.

$$r_{fs} = 2 \cdot N \tag{1a}$$

$$R_{fs} = r_{fs} \cdot L_{fs} \cdot U \geq W \tag{1b}$$

r_{fs} : 周面摩擦力度, R_{fs} : 周面摩擦力, L_{fs} : 層厚

N : N値, U : 周長, W : 杭自重

3) 設置範囲

設置範囲については, 鋼管矢板諸元が仮設時 (波浪) にて決定されていることを考慮し, 水平力に対しても抵抗できるように, 受働崩壊角を考慮して次式(1c)より設定した.

$$B_s = L_{fs} / \tan \zeta_s \tag{1c}$$

B_s : 天端幅, ζ_s : 受働崩壊角 (20.7度)

この結果, 未改良部分の軟弱粘性土地盤については層厚4.0m, 天端範囲22m(片側10.6mずつ)の敷砂を行うことで周面摩擦力を確保し施工することとした.

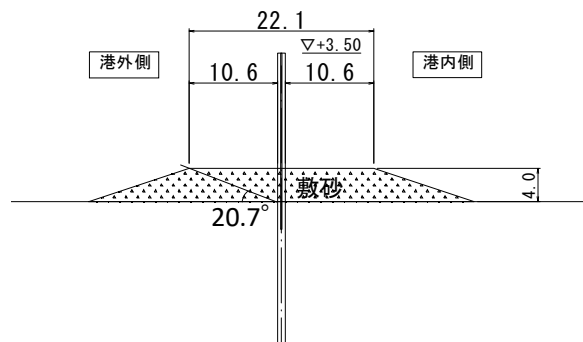


図-10 対策工断面図

5. 試験杭による載荷試験

対策工に於いて、打設時の鋼管矢板自重は敷砂の周面摩擦力のみで負担する。しかし、今回事象の要因となっている沖積粘土層 (Ma13) は、大阪港一体に分布する軟弱地盤であり、今後も同様の課題が起りうる。このため、沖積粘土層の特性を少しでも明確にすることを目的に、簡易な載荷試験を実施した。

(1) 試験杭の設定

試験杭は、工事期間内に手配可能なH型鋼杭H-400とした。また、下記のとおり杭長を設定した。

最小長さ：横抵抗杭とした場合の必要根入れ長 $2.5/\beta$ を確保する長さ (21.0m)

最大長さ：H型鋼杭自重と周面摩擦力が釣り合うを長さ (26.0m)

決定長：載荷時の偏心などを考慮し、突出長と同程度以上の根入れ長を確保する長さ (26.0m)

(2) 試験方法

正式な試験方法としては「静的載荷試験」や「動的載荷試験」などがあるが、本試験は、現地施工が進行中であり、短期間にて方針を決定する必要がある。さらに簡易なものであることから、クレーン吊り荷重による押込み試験を実施する。不採用とした試験の選定理由を以下に示す。

表-2 試験方法の選定

| 試験 | 不採用理由 |
|---------|---------------------------------------|
| 静的載荷試験 | 反力装置(反力杭, 載荷梁)が大掛かりとなるため |
| 動的載荷試験 | 杭先端地盤が軟弱粘性土地盤のため、打撃時沈下量が大きくなるリスクがあるため |
| クレーン引抜き | 地盤と杭の縁が切れる際の衝撃が大きくなるリスクがあるため |

(3) 試験実施時期と反力装置について

試験実施時期は、杭打設直後、地盤強度回復途中、地盤強度回復後の三段階が考えられる。しかし、本試験はクレーン吊り荷重を利用するため、荷重の微調整が困難である。大きな杭の沈下、傾斜が発生するリスクがあるため、杭打設直後の試験は実施しないこととした。

地盤強度回復途中の試験は鋼管矢板打設完了時点(試験杭打設から7日後)とし、地盤強度回復後の試験は、確実に回復完了している数ヶ月後とした。

反力装置は、H鋼杭を把持しながら載荷することができるパイプロハンマを使用する。なお、パイプロハンマは試験杭及び導杭打設に使用する [CM2-160] とする。パイプロハンマ重量を以下に示す。

表-3 反力パイプロハンマ [CM2-160] 諸元

| | 単位 | 荷重 |
|-------|------|-------|
| 本体重量 | (kg) | 8,400 |
| | (t) | 8.4 |
| 試験杭重量 | (t) | 3.9 |
| 反力合計 | (t) | 12.3 |

(4) 計画最大荷重

計画最大荷重は極限支持力 (11.8t) 以上とした。また、回復途中 (7日後) の極限支持力は50%程度まで強度回復しているものと仮定した。なお、今回確認する「粘性土」の周面摩擦力は全体の7割を占める。

表-4 荷重, 支持力一覧

| 支持力 | 極限支持力 | | | 比率 | |
|-------|-------|-------|------|------|------|
| | 回復後 | | 回復途中 | | |
| | (kN) | (t) | (t) | | |
| 先端支持力 | 15.8 | 1.6 | 0.8 | 0.08 | |
| 周面摩擦力 | 砂質土 | 38.4 | 3.9 | 3.9 | 0.20 |
| | 粘性土 | 139.0 | 14.2 | 7.1 | 0.72 |
| 合計 | 193.2 | 19.7 | 11.8 | | |

(5) 載荷方式, 測定項目について

載荷方式には、段階載荷方式、連続載荷方式がある。本試験では、クレーン操作で対応可能な範囲で段階載荷方式とした。

(6) 実施工及び結果

試験結果を、以下に示す。

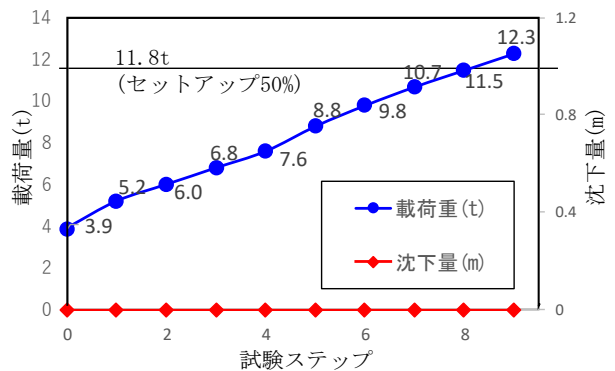


図-11 試験結果

試験杭は沈下せず、想定していた極限支持力11.8t以上の支持力を確認できた。想定以上の支持力が発揮された要因として下記事項が考えられるが、今回試験結果から要因の特定は難しい。

- ① セットアップ率が想定より大きかった
- ② 現地盤のバラツキにより粘性土地盤の強度が想定より大きかった
- ③ 砂質土の周面摩擦力度が想定より大きかった
- ④ 砂質土の層厚が想定より厚かった

6. おわりに

試験杭打設から7日後に実施した載荷試験結果より、想定以上の支持力を確認できた。このことから、導杭及び鋼管矢板打設直後の沈下は、バイブロハンマの振動によって粘性土地盤の周面摩擦力が低下したことが要因で発生したものと考えられる。

また、敷砂による対策工を実施した結果、導杭及び鋼管矢板の打設直後の沈下を発生させることなく施工完了することができた。このことから、打設直後においても敷砂の周面摩擦力が発揮され、対策工として有効であったといえる。

今回の試験では砂質土（敷砂）と粘性土の周面摩擦力の分離や打設直後に強度低下した軟弱粘土層の周面

摩擦力を直接確認できていない。これらの解明は今後の課題である。

数ヶ月後に実施予定の試験では、強度回復後の周面摩擦力を確認できる。この結果から、強度低下率を推定できる。その際、砂質土と粘性土を分離することが望ましい。（例えば、押込み試験後、杭撤去途中で砂質土部で、載荷試験を実施する等）

参考文献

- 1) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説
- 2) 港湾空港技術研究所：載荷試験を活用した鋼管杭の設計・施工管理手法の体系化，No1202，2009
- 3) 株式会社エコー：大阪港北港南地区航路(-16m)汚濁防止施設構造検討業務 報告書

真空井戸を用いた真空圧密 「BOLVAC工法」について

高橋 真一¹・梅原 由貴¹

¹(株)大林組 技術研究所 (〒204-8558東京都清瀬市下清戸4-640) .

軟弱粘性土を用いた埋立工事では、造成後の残留沈下が問題になることが多い。造成後の残留沈下抑制対策として、真空井戸・透水層・ドレーンを組み合わせが挙げられる。本報ではその地盤改良効果について、FEM解析と実験により検証した内容を示す。室内小規模実験では、真空圧密させた粘性土と上載圧で圧密させた粘性土の圧密進行の特性を確認した。屋外大規模実験では、真空井戸・透水層・ドレーンについて高含水粘土を用いて実験を行った。地盤沈下や間隙水圧、実験後地盤の含水比等を計測し、透水層とドレーンの設置によって真空井戸にかいた負圧が広範囲に伝達し、効率的な圧密促進が可能となることを確認した。

キーワード 浚渫粘土、圧密促進、真空井戸、バーチカルドレーン、真空圧密

1. はじめに

空港建設用地利用の可能性が考えられる臨海部の埋立工事では、付近の海底から浚渫された土砂を用いる場合がある。このような浚渫土砂は高含水比で軟弱な粘性土を含むことが多く、埋立造成後には地盤の圧密沈下が問題となる。埋立工事における圧密沈下対策には、プレロード盛土工法やバーチカルドレーン工法に代表される圧密促進工法や、機械式攪拌混合や事前混合による固化改良工法等が用いられる。それぞれ工期やコストの面で一長一短があり、施工条件に応じて適切な工法を選択することとなる。

本論文では、軟弱粘性土を用いた埋立工事における残留沈下抑制のための地盤改良工法として、真空井戸・透水層・ドレーンを組合せた真空圧密BOLVACTM (Bottom Loaded Vacuum Consolidator) に着目した。その適用可能性についてFEM解析と室内小規模実験、屋外大規模実験によって検討し、効果を検証した。

2. 工法概要と特長

(1) 工法概要

真空井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた真空圧密(BOLVACTM)工法の概要図を図-1に示す。この工法は、改良対象の軟弱粘性土層下面に位置する透水層と、その透水層から上部へ伸びる真空井戸、透水層中から上

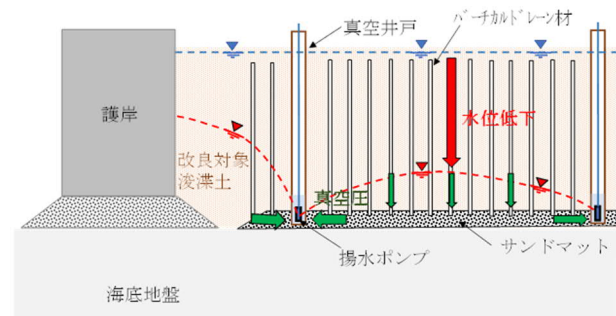


図-1 BOLVAC工法の概要

部の粘性土層中まで伸びるバーチカルドレーン材を構成要素とするものである。真空井戸は、外部の負圧発生装置によって井戸内に負圧をかけることができる構造である。加えて、井戸の透水層相当深度に設置したストレーナを通じて流入した水を井戸内に設置した揚水ポンプにより排出できる構造である。

施工は、①埋立工事を行う領域に護岸を施工、②海底面上に透水層と透水層中まで届くような真空井戸を設置、③改良対象の粘性土による埋立工を開始、の手順となる。このとき、粘性土層厚がある程度以上となったら真空井戸に負圧をかけるとともに揚水を開始する。これにより、粘性土の埋立期間中も真空圧密による圧密促進が可能である。埋立が完了したら、改良対象層にバーチカルドレーンを打設し、下端を透水層に貫入させる。この状態で放置し、目標の沈下量を得られたら真空圧密を完了する。

(2) 工法の特長

工法の特長を以下に述べる。

- 1)負圧と水位低下 (2つの圧密促進効果) : 井戸内の負圧と揚水による井戸内水位低下の2種類の圧密荷重を載荷することが可能である。改良対象層厚が厚い場合、水位低下分の圧密荷重が大きくなり、特に効果的と考えられる。プレロード盛土を用いないため、盛土施工・撤去が不要となるメリットがある。
- 2)透水層による水平方向への真空圧密効果の伝達: 改良対象層下部への透水層敷設により、真空井戸による圧密効果を水平方向に広範囲に伝達させる。
- 3)ドレーンによる鉛直方向への真空圧密効果の伝達: 透水層中から改良対象層までバーチカルドレーン打設により、圧密効果を鉛直方向に伝達させる。
- 4)埋立期間中も圧密促進可能: 真空井戸を埋立工開始前から設置することで、埋立期間中も負圧を真空井戸に作用させながら揚水を行うことが可能である。これにより埋立期間中も圧密促進が可能となり、その分工期短縮が見込まれる。

同様の工法は大阪湾沿岸部で使用実績が報告されている^{1) 2)}が、工法適用中の地盤の間隙水圧消散状況等の詳細を測定し圧密促進効果の確認や効率的な施工管理に生かした事例は少なく、現場適用に向けては解析・実験により更なる知見の蓄積が必要と考えられる。

3. 土水連成FEM解析による効果検証

(1) 解析方法

自社開発の解析ソフトGRASP3D (Grasp Real 3D Action of Subsoils and Pore water)³⁾を用いた3次元土水連成FEM解析を行い、当該工法の有効性を検証した。土水連成FEM解析は、Biotの3次元圧密理論⁴⁾に基づき、地盤の変形・応力解析と間隙水の浸透流解析を連立させて解くものである。GRASP3Dでは、粘性土の非線形な変形・強度特性を表現するため、関口・太田の弾塑性モデル・弾粘塑性モデル⁵⁾を導入しているが、今回は弾塑性モデルで解析した。

解析モデルを図-2に示す。縦L240m×横W240m×層厚H20mの地盤をソリッド要素でモデル化した。

解析ケースは表-1の通り4ケースである。Case1は従来工法としてプレロード盛土+バーチカルドレーン工法による圧密促進工法を想定した。層厚19mの軟弱粘性土層を改良するために上部に層厚1mのサンドマット層を設け、さらにその上部に層厚4m程度のプレロード盛土に相当する荷重70kN/m²をかけ圧密させた。盛土荷重は5cm/dayの施工を想定し80日間で漸増させて与えている。軟弱粘性土層中には1m正方形配置でドレーンを設置した。

一方、Case2からCase4は井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた真空圧密工法を想定したものである。層厚

19mの軟弱粘性土層を改良するために下部に層厚1mの透水層(サンドマット層)を設け、軟弱粘性土層中には1m正方形配置でドレーンを設置した。Case2からCase4の違いは、井戸の配置間隔である。井戸のモデル化は真空圧と水位低下分による圧密荷重として与える全水頭値 H=27mをどの要素に与えるかで表現した。Case2では H=27mをサンドマット層全域に与え、サンドマット層全域に水頭低下が伝わった理想ケースとした。Case3, 4ではそれぞれ井戸ピッチを120m, 240mの正方形配置と想定し、サンドマット層中それぞれ120m, 240mピッチの井戸底部にあたる要素にのみH=27mを与えた。なお、本解析では埋立過程は考慮せず、埋立完了後の軟弱状態から圧密を開始したとして検討した。実工事では2.1節で述べた通り、当該工法では埋立過程からも真空圧密による圧密促進が可能となるため、実際はさらに工期短縮効果が見込めると考えられる。Case2からCase4では一定量の地表面沈下量が得られた時点で真空圧密停止を表す井戸底部の水頭をゼロに変更し、その後の挙動も観察した。

全水頭Hの初期条件として全節点にH=0.0mを与えた。地盤の側面は排水境界とした。地盤変形の境界条件として、モデル側面・底面の面外方向の変位を拘束した。

主な材料定数を表-2に示す。軟弱粘性土層・サンドマット層については実施工で想定される各材料の値を入

表-1 解析ケース

| ケース | Case1 | Case2 | Case3 | Case4 |
|------|--|--------------------------------|-------|-------|
| 工法 | プレロード盛土+バーチカルドレーン | 真空井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた真空圧密 | | |
| 地層構成 | (上)サンドマット層 1m
(下)軟弱粘性土層 19m | (上)軟弱粘性土層 19m
(下)サンドマット層 1m | | |
| ドレーン | 1m 正方形配置(解析中では□16m) | | | |
| 井戸配置 | 無 | 全域 | □120m | □240m |
| 圧密荷重 | 上載荷重 70kN/m ²
(漸増 80 日間) | サンドマット層井戸部に全水頭 H=27m | | |

備考: 表中の「□」は、正方形配置を示す

表-2 材料定数

| 材料 | 透水係数 | | 水中密度
ρ [g/cm ³] | 圧密パラメータ | | |
|-----|--|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|
| | 水平
k _x , k _y
[m/s] | 鉛直
k _z
[m/s] | | 圧縮
指数
C _c | 膨潤
指数
C _e | 過圧
密比
OCR |
| 粘性土 | 2.56×10 ⁷ | 1.00×10 ⁹ | 0.70 | 0.318 | 0.0697 | 1.0 |

※ドレーンピッチ正方形配置 1m を正方形配置 16m にモデル化するため、粘性土 k_x, k_y は k_z の 16 倍とした

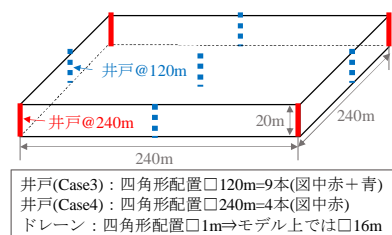


図-2 解析モデル

力した。ドレーン材については、一般的なプラスチックボードドレーンの値を参考に決定した。

(2) 解析結果

解析により得られた時間沈下曲線を図-3に示す。沈下量は地表面全地点の平均値である。これを見ると、Case1（従来工法）では圧密度90%となる沈下量1.2mを達成するのに410日要するところ、Case2からCase4ではそれぞれ35、95、225日に短縮している。すなわち目標沈下量到達時点で真空圧密をとめることを想定すると、従来工法よりも短時間で圧密することが可能である。

一方、当該工法の懸念点として真空圧停止後のリバウンドと井戸やドレーン配置による不同沈下があげられる。Case2からCase4の地表面のリバウンドは0.2~0.3m生じる結果となった。しかし、ドレーンを用いた真空圧密工法の実施工で生じるリバウンドは10cm程度の場合が多い。軟弱粘性土での入力パラメータの整合性からリバウンド量の解析結果は過大に評価されることが多いため、実験で検証を行うこととした。別途整理した地表面の不同沈下については、Case1は盛土荷重が解析領域全域にかかるため不同沈下が生じないのに対し、例えばCase3ではドレーン直上では沈下1.6m、ドレーン間(井戸間)では沈下1.0mと沈下量に0.6mの比較的大きな不同沈下が生じた。今回の解析ではメッシュ数低減のためドレーン間隔を実際の16倍とするとともに地盤の透水係数のモデル化を行っているため、ドレーンまでの距離に依存する沈下量の差が過大に評価されたと考えられる。不同沈下についても実験で再度確認することとした。

4. 室内小規模実験による効果検証

(1) 実験方法

負圧により真空圧密された粘性土の挙動や真空圧密時の排水条件の影響について知見を得るために、室内で直径Φ100mm、高さh200mmの粘性土試料に対して、荷重条件や排水条件を変化させた小規模な圧密実験を実施した。実験概要図を図-4に、実験ケースを表-3に示す。図-4のように、Φ100mm、h300mmの圧密試験用鋼製モールドに粘性土を初期高さh200mm投入し、上載荷重もしくは下部の排水コックを経由した負圧によって圧密させた。ドレーン材には、幅94mm、厚さ3.6mmのプラスチックボードドレーン材を幅20mmに切断して用いた。ドレーン材は粘性土層下端から150mmの高さまで鉛直に設置し、位置を安定させるため粘性土層下部には層厚20mm分の珪砂7号を敷いた。

実験で用いた粘性土は、大阪咲州から採取した沖積粘土に珪砂7号を混合した混合試料である。以下では粘性土1と称する。混合比率は乾燥重量比で海成粘土:珪砂7号=7:3である。混合後の粘土1の塑性指数Ipは21.6%で

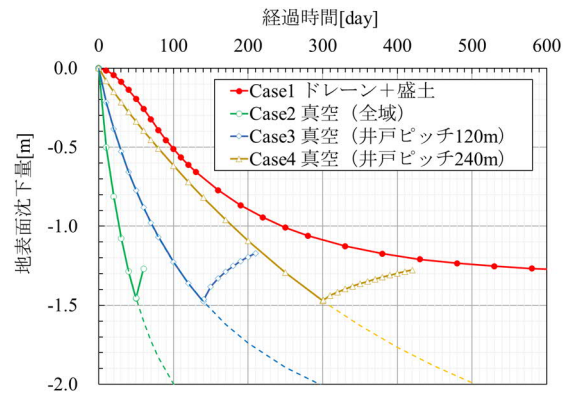


図-3 FEM解析による地表面沈下

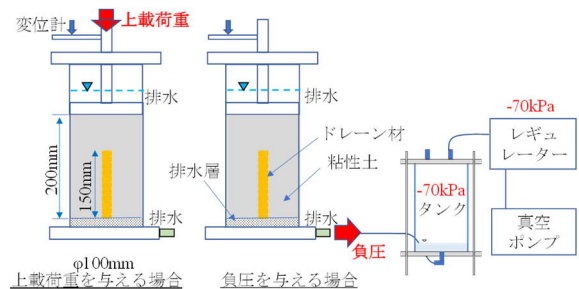


図-4 小規模実験概要図

表-3 小規模実験ケース

| ケース | 上載圧 [kPa] | 圧力 [kPa] | ドレーンの有無 |
|-------|-----------|----------|---------|
| Case1 | 70 | 0 | 無 |
| Case2 | 35 | 0 | |
| Case3 | 0 | -70 | |
| Case4 | 70 | 0 | 有 |
| Case5 | 35 | 0 | |
| Case6 | 0 | -70 | |
| Case7 | 20 | -70 | |

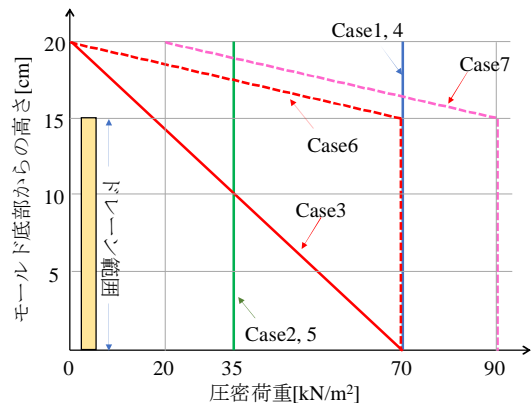


図-5 圧密荷重

ある。粘性土1の実験開始時初期含水比は60%であり、液性限界 w_L の約1.3倍(1.3 w_L)である。

(2) 実験結果

図-6に各ケースの時間沈下曲線を示す。Case1では、最終沈下量は42mm程度であり約7日で収束した。これに比べ、同じくドレーンを用いないCase2, 3は最終沈下量35mm程度、約13日程度で収束している。この沈下量の差は、前述の図-4に示した通り圧密荷重がCase1と比べてCase2, 3で小さいためである。圧密時間については、圧密荷重が大きいと圧密係数が大きくなるためCase1の収束にかかる時間がCase2, 3より短くなったと考えられる。この圧密荷重の違いによる沈下曲線の違いは、ドレーンを使用したCase4からCase6についても同様となった。

一方、ドレーン有無による圧密時間の違いについて、Case1, 4を比較するとドレーン有のCase4は沈下量42mmに4日程度で収束している。沈下量はCase1と同等だが圧密時間が1/2に短縮された。Case1は排水距離が100mm程度であるのに対し、Case4は排水距離が50mm程度であったためである。この傾向は他のケースでも同様であった。Case3, 6について比較すると、Case3の沈下量は35mm程度、Case6は39mm程度と1割の差が生じた。負圧での圧密の場合、ドレーンを用いると試験体下部にかかった負圧70kPaがドレーン先端まで伝達され、図-6の通り圧密荷重がドレーンを用いない場合より大きくなると考えられる。この差が沈下量の差異に現れたと考える。今回の実験では上載荷重70kPa分の最終沈下量を負圧併用で実現しようとした場合、Case7のように負圧70kPaに上載荷重20kPaを併用することで可能とわかった。実施工では上載荷重を盛土荷重で与えられることが多く、盛土施工・撤去の工期を要する。上載盛土荷重を低減させてその分負圧で補う方式は工期的にもメリットがあると考えられる。

図-7に実験終了後の含水比の深度分布を示す。含水比は35-45%程度であり、沈下が大きいケースほど含水比が低下する傾向であった。Case3, 6を比較すると、Case3では上部の含水比が47%程度と比較的高く、下部ほど含水比は低い。一方、Case6では上部も40%程度の含水比となった。ドレーンによって負圧が上部まで伝達され、圧密荷重が上部でも大きくなったためと考えられる。ドレーンを用いることでより深度方向に広い範囲に圧密促進が可能と考えられる。

以上のことから、小規模実験において得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 負圧を与えることで粘性土の圧密促進が可能
- 2) 負圧による圧密時もドレーン材を用いることで圧密時間を短縮可能
- 3) 特に井戸を用いた工法では粘性土の上層部の圧密のためにバーチカルドレーンが有効

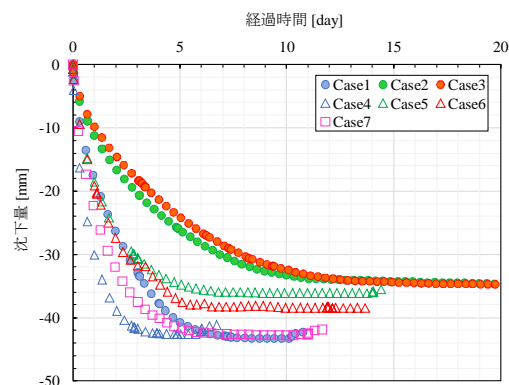


図-6 小規模実験による時間沈下曲線

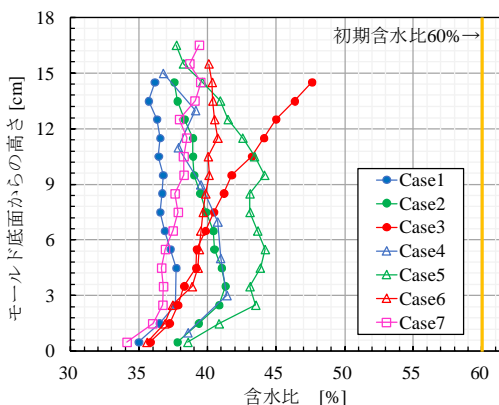


図-7 小規模実験後の含水比深度分布

- 4) 当該工法では水面からの浸透流が発生し、沈下が収束しても排水は継続

5. 屋外大規模実験による効果検証

(1) 実験方法

大型土槽(長さL7.6m×奥行W1.6m×高さH2.4m)内に実施工と同様の大きさの真空井戸・透水層・ドレーンの材料を設置して、大規模な真空圧密実験を実施した。軟弱粘性土を真空圧密させた際の沈下・水圧消散挙動を計測するとともに、圧密後地盤の性状、実験後の透水層やドレーンの性状についても確認した。

実験土槽断面図・平面図を図-8に、土槽外観と土槽上部から撮影した模型状況を写真-1に示す。模型は、改良対象の粘性土層、粘性土層下部に敷設した透水層、土槽中央に設置したΦ400mm鋼管を利用した真空井戸、図-8の左半分に設置した幅94mm、厚さ3.6mmのプラスチックボードドレーンが主な構成要素である。真空井戸は内部を密閉できる蓋を有する鋼管で、外部に設置した真空ポンプで井戸内に負圧を与えることができる。また、井戸下部の碎石層相当深度に設置されたスクリーンと井戸内の揚水ポンプにより、粘性土層からの排水を揚水できる構造である。

粘性土は、市販のシルト質粘土(以下粘性土2と称す

る)を、初期含水比 $w=38.8\%$ (1.3mL)に調整して使用した。主な特性を表-4に示す。

模型作製手順としては、まず土槽底面に真空井戸とドレーンを固定し、層厚0.2mの碎石層を敷設・転圧した。その後含水比調整した粘性土2を土槽上部から層厚2mとなるまで投入し、その後上部に水深0.1m分の水を張った。真空圧密開始時は、井戸内の揚水ポンプによる揚水を開始してから井戸内に負圧70kPaをかけた。この状態で約3か月間放置し挙動を確認した。計測は、図-8に示す測点において地表面沈下計、層別沈下計、間隙水圧計により行い、井戸内の圧力と揚水量は井戸上部に設置した圧力計と流量計により管理した。

井戸内の水位制御は、井戸内水位が粘性土GL-1.7mで揚水開始した後、GL-2.0mで停止の条件で進めた。実験中の揚水量の実績値は25L/day程度で、時間的な変化は見られなかった。放置期間終了後は、真空ポンプと揚水ポンプを停止し3日間放置したのちに地盤調査を行った。実験後の地盤のコーン貫入抵抗、ベーンせん断抵抗、含水比、一軸圧縮強さ、圧密降伏応力の深度方向の分布を図-10に示す。圧密降伏応力については、初期圧密圧力 2.5kN/m^2 で段階圧密試験を行って算出した。図をみると、深度が深くなるほど含水比は小さく、コーン貫入抵抗、ベーンせん断抵抗、一軸圧縮強さは大きくなることわかる。これは圧密が深い深度ほど進んでいるためと考えられる。土槽天端からの深さ100~150cm程度の中層部において、ドレーン有の測点①②のほうがドレーン無の③④よりもベーンせん断抵抗が大きく、含水比が小さい。なお、真空圧密開始時点では粘性土層の自重圧密は完了していないことから、各測定結果は自重圧密と真空圧密の両方が作用した結果である。

(2) 計測結果

地表面沈下量測定結果を図-9に、層別沈下測定結果の一例とともに示す。図中には無対策時の圧密理論計算結果も付記した。図より、無対策の場合では、真空圧密開始後79日時点で圧密度 $U=30\%$ となるのに対し、今回の測定結果から双曲線法で算出した圧密度 U はドレーン有の場合(測点①②平均)73%、ドレーン無(測点③④平均)の場合63%と大きく、真空圧密による圧密促進効果が確認された。図中には示していないが、下部層GL-100~-150cmはドレーン有無によらず70日時点で65mm程度沈下し、ドレーンによる沈下促進効果は比較的小さかった。一方図中付記の上部層GL±0~-50cmでは、ドレーン有(測点②)の沈下は70日時点で32mm程度であり、ドレーン無(測点③)の16mmの2倍となったことから、上部層になるほどドレーンによる効果が大きいといえる。

(3) 地盤調査結果と考察

実験後に碎石層を掘り出し、碎石層中への粘性土2の侵入状況を観察した。層厚20cmの碎石層のうち、粘性土

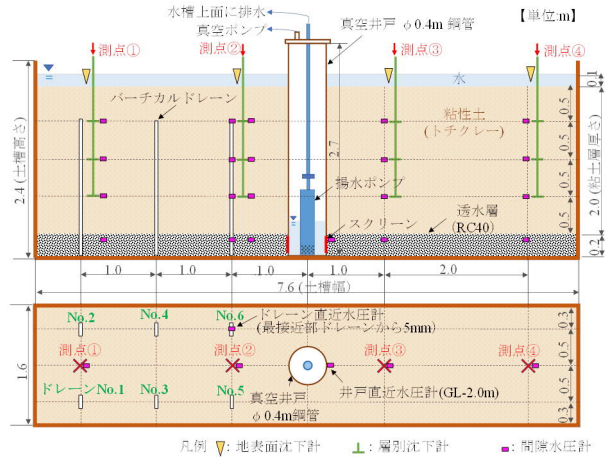


図-8 屋外大規模実験土槽断面図(上)・平面図(下)



写真-1 屋外大規模実験土槽外観

表-4 粘性土2の物性・圧密特性

| 土粒子密度
$\rho_s[\text{g/cm}^3]$ | 初期含水比
$w_0[\%]$ | 液性限界
$w_L[\%]$ | 塑性限界
$w_P[\%]$ | 塑性指数
I_P |
|----------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| 2.69 | 38.8 | 29.0 | 19.0 | 10.0 |

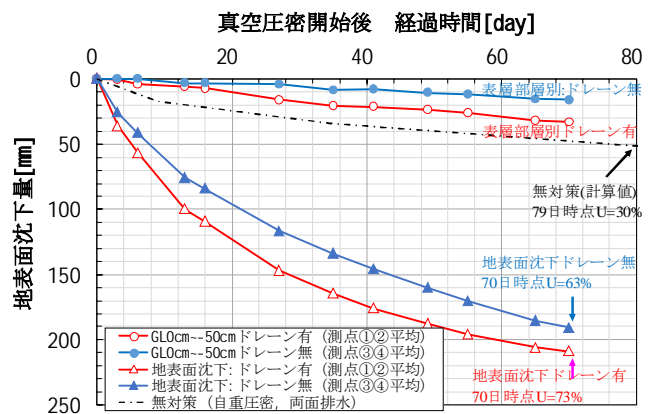


図-9 地表面沈下計測結果

2の侵入が確認できたのは最大上部2cm程度であった。実験中の碎石層間隙水圧計測結果を考慮しても碎石層の透水性は実験中も低下せず十分であったと考えられる。

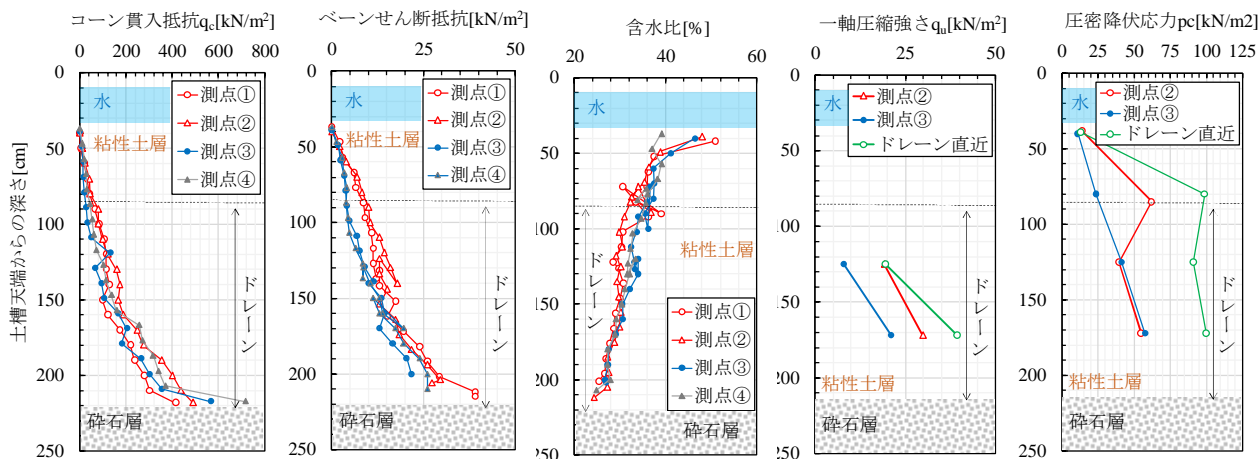


図-10 コーン指数・ペーンせん断抵抗・含水比・一軸圧縮強さ・圧密降伏応力の深度分布

また、ドレーン有の測点②とドレーン直近の一軸圧縮強さは、ドレーン無の測点③よりも大きかった。圧密降伏応力については、ドレーン無の測点③の圧密降伏応力は深度が大きくなるにつれて大きくなる傾向にある一方、ドレーン有の測点②とドレーン直近については、土槽天端からの深さが85cm以深の結果で大きくなっている。これらの結果は、土槽天端からの深さ85cm程度まで設置されているドレーンにより粘性土層中層部の圧密が促進されたためと考えられる。また、圧密降伏応力について測点②と③の土槽天端からの深さ125cm以深のデータはほぼ同じような値を示している。下層部では、測点③についても砕石層からの負圧伝達で圧密促進効果があるためと考えられる。

大規模実験により得られた知見を以下に示す。

- 1) 当該工法で圧密促進が可能
- 2) 透水層とドレーンの設置により負圧が粘性土層に効率的に伝達され沈下促進に有効
- 3) ドレーンを用いると、より上層の粘性土層で特に圧密が促進（この傾向は、層別沈下計から得られた深度別の沈下量の増加だけでなく含水比低下やペーンせん断抵抗の増加、圧密降伏応力の増加等からも確認）
- 4) 大規模実験で使用した透水層・ドレーンの材料について、実験中は排水機能を保持

5. まとめ

真空井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた真空圧密工法について、FEM解析、小規模実験、大規模実験により効果を検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) FEM解析によれば、当該工法により圧密期間の短縮効果が見込まれる。定量的な効果としては、本文中で提示した試算条件では従来のプレロード盛土+バーチカルドレーン工法と比較して圧密期間を1/4に短縮する効果が期待できた。
- 2) 小規模実験によれば、ドレーン打設した場合、ドレ

ーンを通じて負圧の伝達によって圧密促進効果の範囲の広がりが見込まれる。

3) 大規模実験によれば、真空井戸、透水層とドレーンの設置により負圧载荷の平面的な広がりが十分に見込まれる。

粘性土層厚が厚いほどドレーンによる効果が大きくなると予想されることから、今後は、より粘性土層が厚い地盤を模擬した遠心模型実験等でも効果検証を行う予定である。また、解析により井戸ピッチやドレーンピッチ等各種パラメータが圧密促進効果に与える影響を検討し、簡易な設計手法の確立を目指す。

謝辞：本編をまとめるに際しましては、港湾空港技術研究所森川嘉之地盤研究領域長様、杉山友理研究官様に、有益な助言をいただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 社団法人土質工学会関西支部：海底地盤-大阪湾を例として-, 1995
- 2) 東京国際土質基礎工学会議：大阪南港の水位低下による地盤改良工事，ケースヒストリー集 8. 臨海地域の埋立工事，1981
- 3) Ohta, H., Iizuka, A., Omote, Y. and Sugie, S.: 3D-analysis of soil/water coupling problems using elastoviscoplastic constitutive relationships, Proceedings 7th International Conference of Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol. 2, pp. 1191-1196, 1991
- 4) Biot A. M.: General theory of three dimensional consolidation, J. Applied Physics, Vol. 2, pp. 155-164, 1941
- 5) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clay, Proceedings 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Specialty session 9, pp. 229-239, 1977

ジェットフローゲート水密性能向上 における一考察 ～シールリング形状に着目して～

下園 英世¹

¹ 独立行政法人水資源機構 下久保ダム管理所 管理班
(〒367-0313 埼玉県児玉郡神川町大字矢納 1356-3)

川上ダムの小容量放流設備にはジェットフローゲートを採用しており、工場製作時に行う漏水試験において施工管理基準が示す許容漏水量内を満足しない事象が生じた。

今回のジェットフローゲートの製作においては、受注者の設計思想のもとに製作していたが、許容漏水量内を満足しなかった原因を追究、調査並びに工場における実験を実施し、シールリングの形状を改良したことで許容漏水量内に抑え、据付を完了している。

本稿では、ジェットフローゲートの水密性能を向上させるに至ったシールリング形状の検討、調査及び改良結果について報告するものである。

キーワード ジェットフローゲート、シールリング、漏水量、面幅

1. はじめに

川上ダムは、淀川水系木津川の左支川である前深瀬川が伊賀市川上地先で川上川と合流した直下に建設する堤高84mの重力式コンクリートダムで、洪水調節、新規利水及び流水の正常な機能の維持を目的とした多目的ダムである。

川上ダムの放流設備は、洪水調節で使用する常用洪水吐き設備のほか、河川の水量維持等で使用される利水放流設備及び流入水バイパス放流設備の3つを有しており、そのうちの利水放流設備及び流入水バイパス放流設備については、ジェットフローゲート（以下、「JFG」という。）を採用している。今回、流入水バイパス放流設備のJFGに限り、工場製作時に行う漏水試験において許容漏水量内を満足できない状況が発生し、その対応を行った。

本稿では、ジェットフローゲートの水密性能を向上させるに至ったシールリング形状の検討、調査及び改良結果について報告するものである。

2. 漏水試験

川上ダムに設置する放流設備は全てダム堤体へ据付ける前に事前に工場において所定の品質管理試験を行い基準を満足した設備であることを確認している。具体的に

は、「機械設備工事施工管理基準」（以下、「施工管理基準」という。）に基づき、「小容量放流ゲート・バルブ」の機能を確認するため「漏水試験」を実施した。¹⁾

「漏水試験」とは「設計水圧で10分間保持し、水密構造部からの漏水量が次で求めた値以下とする。」と施工管理基準で定められており、「次で求めた値」とは、「口径が600mm以下のもの：漏水量ml/min＝バルブ口径cm/12.5」、「ジェットフローゲートについては、前記で求めた値の1/2」となる。

当初に行った3基の漏水試験結果を表-1に示す。流入水バイパス放流設備主ゲート（以下、「流入水JFG」という。）については、許容漏水量の約3倍の漏水量となったが、他の利水放流設備主管主ゲート（以下、「主管JFG」という。）及び分岐管主ゲート（以下、「分岐管JFG」という。）は、いずれも許容漏水量内であった。

3. 原因究明のための調査

JFGは、扉体スキンプレート上流面にあるシールリン

表-1 漏水試験結果（当初）

| 名称 | 口径
(mm) | 許容漏水量
(ml/min) | 漏水量
(ml/min) |
|----------|------------|-------------------|-----------------|
| 流入水 JFG | 300 | 1.20 | 3.70 |
| 主管 JFG ※ | 1300 | 46.41 | 15.42 |
| 分岐管 JFG | 400 | 1.60 | 0.39 |

※ 口径が600mm以上のため上述の算出方法とは異なる

グ (アルミ青銅鋳物製) がメタルタッチすることによって水密を図る構造 (図-1 参照) となっている。

今回の漏水原因を究明するため、図-2 に示す調査内容を抽出した。

(1) 副開度計の影響

副開度計は、ゲート開度を計測するための検出棒が扉体に直接連結されている (写真-1 参照)。この検出棒は、扉体開閉用の棒 (ロッド) に比べ細くすることが一般的だが、同口径 (φ50mm) としたために2本の棒が扉体と連結していることによって、ねじれを生じさせていることが疑われたため、検出棒を外して漏水試験を行ったが漏水量の改善は図れなかった。

(2) 扉体のたわみ度

扉体のたわみ度は、「ダム・堰施設技術基準(案)」

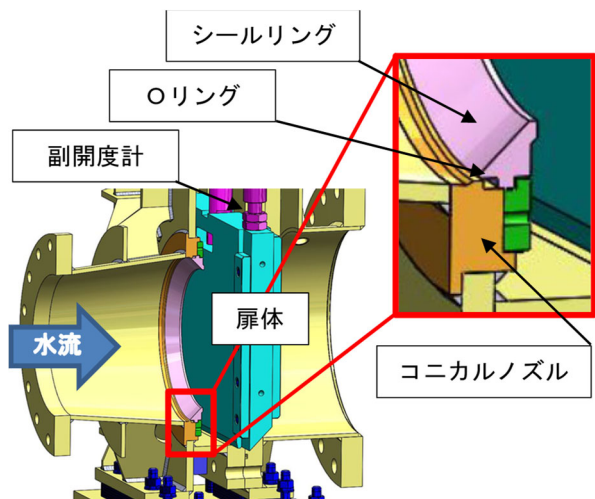


図-1 JFG 全体の構造及び止水部の構造

(以下、「ダム堰基準」という。) によって、「径間の1/2000 以下に抑えること」と定められている。²⁾ 当該ゲートのたわみ度は 1/3122 (たわみ量 0.163mm) であり、3D 解析によるたわみ量の計測結果においても設計値と同等の値を示し「ダム堰基準」を満たしている。

また、漏水試験においても、扉体背面側にH形鋼と油圧ジャッキを取付け、扉体を拘束し物理的にたわみ量を抑えた (図-3 参照) が、漏水量の改善は図れなかったため、たわみによる漏水ではないと判断した。

(3) 製作上の問題

製作上の問題としては、表面粗さ及び各部位の寸法精度が想定された。表面粗さについては、扉体およびシールリングの接触する面の表面粗さが実績のある同規模ゲートと同等 (Ra0.2 以下) であること、また、各部位の寸法精度についても許容値以内であることを確認したため、製作上の問題ではないと判断した。

(4) 水密部

水密部は、Oリング及びシールリングが想定された。Oリングについては、異なる径 (φ6mm、φ7mm) によって漏水試験を行なったが漏水量の改善は図れなかった。

シールリングは、これまでの実績と同様の設計によって製作しているが、シールリングの面幅 (扉体に接する面) を変更することによって漏水量の改善が図れるか確認されていなかったことから、今回、シールリングの異なる面幅による検証実験を行うことにした。

なお、シールリングの設計にあたっては、「ダム用小容量放流設備標準設計 (案)」 (以下、「小容量放流設計」という。) に基づき、基本寸法の二等辺三角形として強度計算を行うこととしている。³⁾

結果、図4 に示すとおり、当初は、過去に製作された

- ① 副開度計の影響
- ② 扉体のたわみ度
- ③ 製作上の問題
- ④ 水密部

図-2 抽出した調査内容

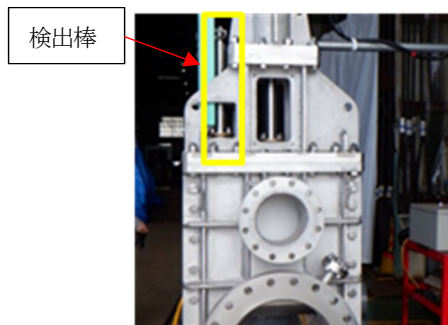


写真-1 副開度計検出棒

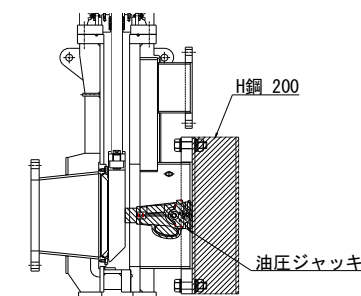


図-3 扉体拘束状況 (漏水試験時)

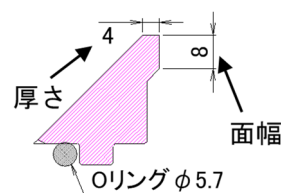


図4 シールリング構造 (当初)

口径 φ300mm : 漏水量 0.58ml/min の実績により面幅 8mm の構造としていた。

4. シールリング形状検証実験

(1) 実験結果

シールリングの面幅を当初の 8mm から 0.5~1.0mm 刻みに変更した面幅毎の漏水量を、図-5、表-2 に示す。

漏水量は、施工管理基準に基づき、試験水圧 1.65MPa を 10 分保持した状態で 3 回計測した平均値である。結果は、当初の 8mm から 7mm に変更することで漏水量を最も抑えられることがわかった。

(2) 検証

実験によって、漏水箇所がシールリングからによるもので、面幅を 7mm に改良することで漏水量を抑えられることが特定できた。

なお、同一メーカーかつ同口径における各シールリング寸法の漏水量を表-3 に示す。表からシールリングの寸法は一律ではないことが確認できる。

5. 機構内における JFG の状況

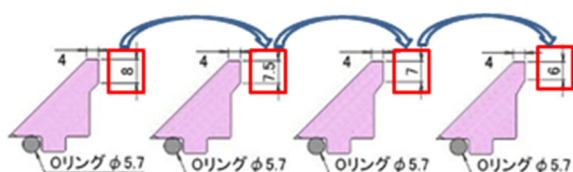


図-5 シールリングの異なる面幅

表-2 変更した面幅毎の漏水量

| 面幅 (mm) | 許容漏水量 (ml/min) | 漏水量 (ml/min) | 判定 |
|---------|----------------|--------------|----|
| 8.0 | 1.20 | 2.21 | × |
| 7.5 | | 1.17 | ○ |
| 7.0 | | 0.47 | ○ |
| 6.0 | | 1.90 | × |

表-3 各シールリング寸法の漏水量

| ゲート名 | 口径 (mm) | 寸法 (mm) | | 漏水量 (ml/min) |
|---------|---------|---------|----|--------------|
| | | 面幅 | 厚さ | |
| 流入水 JFG | φ300 | 8 | 4 | 2.21 |
| 〃 (改良) | φ300 | 7 | 4 | 0.47 |
| 実績 JFG | φ300 | 8 | 5 | 0.58 |

4. (2) 検証で述べたとおり、同一メーカーにおいてシールリングの寸法が一律ではないことから、シールリング寸法の傾向・特徴を特定するため、機構に設置されている JFG45 基のうち、38 基について調査を行った。シールリング寸法のうち、金属水密部であるシールリングの面幅に着目し、JFG の口径とシールリングの面幅の関係性について、「施工監理基準」で定められる許容漏水量の口径区分に基づき、図-6 のとおりグラフを作成した。図-6 に示すとおり、各区分とも口径と面幅の関係性はないことがわかる。また、JFG の設計水深とシールリングの面幅の関係においても図-7 に示すとおり、関係性は確認できなかった。

6. 考察

今回のシールリングの形状に関する調査及び検証実験において得られた知見を以下に示す。

(1) JFG のシールリング形状は統一性がない

口径や設計水深によってシールリングの面幅が決められていないことが確認できた。

シールリングの面幅については、「ダム堰基準」や「小容量放流設計」に定められていないため、各製作メーカーのノウハウによって決定されていると思われる。

なお、シールリングの背面側（水圧を受けない側）の

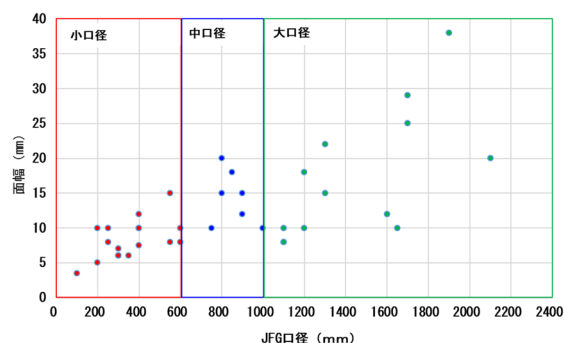


図-6 JFG 口径と面幅の関係

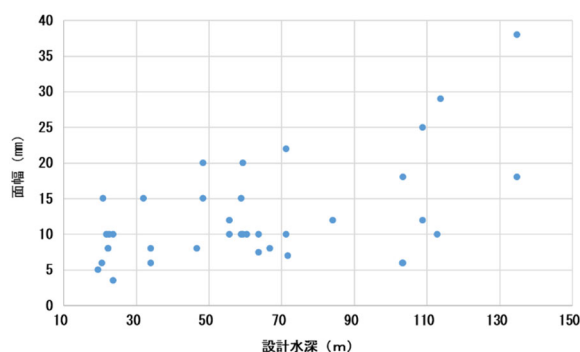


図-7 設計水深と面幅の関係

形状について、図-8に示すとおり、緩やかに擦り付ける場合（上図）とシールリングの厚さ相当を切り欠く場合（下図）があることが確認されたが、水密性にどのような影響を与えているかはわからなかった。

(2) シールリングの最適な形状が特定できなかった

38基を対象に調査することによって、水密性能が優れたシールリングの形状を特定することを試みたが、傾向を掴めないデータだったことから最適な形状を特定するまでには至らなかった。

(3) 実績によるシールリングの製作

流入水JFGの当初のシールリング面幅8mmにおいて、許容漏水量を満足しない事態となったが、製作メーカーのこれまでの実績に基づき製作されたものであり、設計段階で想定することは難しいと思われる。

幸いにも、今回の許容漏水量を満足しない事象によって行った検証実験結果が、適正な面幅を特定することに繋がり、また、水密性能を向上させるには、シールリングの面幅を検討する必要があることを導き出すことができた。

7. まとめ

JFGは、コンカルノズルによって放流水が戸溝に干渉することを防ぎ、また、シールリングが扉体の開閉動作

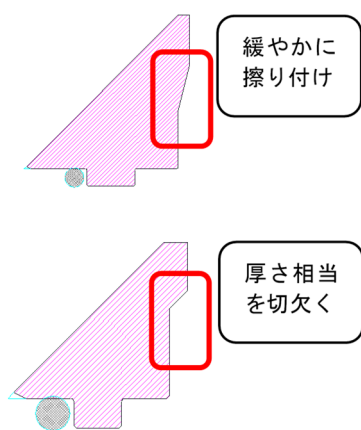


図-8 シールリングの背面側の形状

にも追従できる構造のため水理特性及び水密性能に優れたゲートである。

今回、そのJFGにおける重要なシールリングの形状に着目し検討、調査及び改良を行った。

今回の検討、調査によってわかったことを以下に示す。

- ①流入水JFGのシールリング面幅は7mmが最適
- ②シールリングの水密性は、面幅が重要
- ③形状の決定は、製作メーカーのノウハウによるもの
- ④シールリングの背面形状には特徴がある

近年、JFGはメンテナンス性にも優れていることから多くのダムで採用されているため、今後、経年劣化等によって漏水量が増加するJFGが増えていくことが予想される。

シールリングについては、維持管理を行っていくうえで将来交換することを想定して設計されているため、交換する際には、今回の調査結果を参考にシールリングの面幅の形状を検討・改良することによって水密性能を向上させることができると考える。

今後、シールリングに関する改良した結果を共有していくことによって、今回できなかった最適なシールリング形状を特定することができ、「漏水量ゼロのJFG」が製作されることに繋がるのではないかと考える。

謝辞

本稿をとりまとめるにあたり、多くの方々より図面等の提供にご協力頂きましたこと感謝申し上げます。

本論文は、著者の前任地である(独)水資源機構川上ダム建設所での成果についてとりまとめたものである。

参考文献

- 1)独立行政法人水資源機構.2012年4月.-機械設備施工管理基準 -p.154.
- 2)社団法人ダム・堰施設技術協会.2011年7月.-ダム・堰施設技術基準(案)(基準解説編・マニュアル編)第二版-p.95.
- 3)財団法人ダム技術センター.2000年3月.-ダム用小容量放流設備標準設計(案) -p.128.

IRI ワイヤレス路面測定技術～ACTUS による路面モニタリング～

中園 康平¹ 原田 秀敏²

¹株式会社ニュージェック 交通・都市部門 道路グループ (大阪) (531-0074 大阪市北区本庄東 1-1-10)

²株式会社ニュージェック 交通・都市部門 道路グループ (九州) (812-0013 福岡市博多区博多駅東 2-14-1)

日常の道路管理を進める中で、①今後の効率的な舗装繕計画の立案に向け経時的な変状データ・資料収集を定期的に精度よく取得する ②得られた各種情報の記録・図化を自動化・可視化 といった項目が道路管理者からのニーズとして求められるところである。

本稿では、国際標準的な舗装路面性状の評価手法である IRI (International Roughness Index ; 国際ラフネス指数) を普通乗用車へ実装し、今回奈良県内の直轄国道を試験フィールドに走行・データ取得を行うとともに、路面性状モニタリング結果・データ再現性・位置精度向上等の研究結果について考察・報告する。

なお、本技術は近畿地方整備局における現場ニーズと技術シーズとのマッチング取組みにおいて採択 (令和3年1月21日) されたものである。

キーワード：新技術 維持管理 路面性状調査 GPS IRI モニタリング

まえがき

高度成長期の道路構造物が更新時代を迎える中、利用者の維持管理に対する「量」から「質」へのニーズ変化に応えるべく、道路舗装においても路面平坦性モニタリングの高度化・効率化が急務とされる。

加えて、平成28年10月に舗装点検要領¹⁾が制定され、地方自治体を含むすべての道路管理者は定期的な路面点検実施が必須となり、近年の維持管理コスト縮減傾向を踏まえ、簡便かつ効率的な点検技術の需要が高まっている。

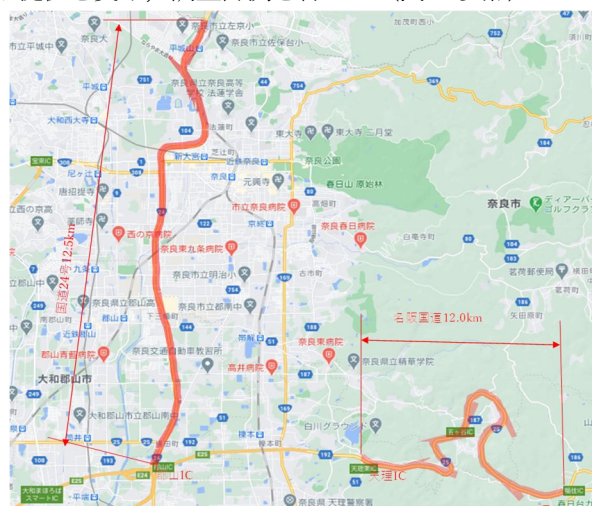
一方、国土交通省では「新技術の発掘」や「企業間連携」を推進し、新技術の開発促進・普及拡大を図ることを目的に、現場ニーズと技術シーズをマッチングさせる取組みを行っている²⁾とあり、上述要旨に示す通り、本技術が採択されたところである。

本技術展開にあたっては、H27年度よりMPM (: Mobile ProfiloMeter) コンソーシアムを中心に実装化に向けた研究を進めており、今回マッチングに伴うフィールド提供を受け、本技術研究の実装化に向けた基礎検討を行ったものである (MPM コンソーシアムメンバー ; 北見工業大学, 東京農業大学, (株) Profict Lab, (株) ニュージェック, (株) コトブキエンジニアリング, iシステムリサーチ (株))。

1. 調査概要

(1) 調査概要・実施箇所位置図

調査実施にあたっては、奈良国道事務所管内の国道24号 (L=12.5km ; 奈良市～大和郡山市) 及び25号名阪国道 (L=12.0km ; 天理IC～福住IC) を対象にフィールド提供を受け、調査計測を行った (図1参照)。



<出典: GoogleMap より引用・加筆>

図1 調査箇所位置図

(2) 主たる着眼点 (ニーズ及びシーズ)

ニーズ : 道路の路面凸凹状況と位置情報の自動記録

1) 路面応急対策等により凸凹箇所が増え、沿道住民

等からの苦情要望が増加しているため、舗装打替え計画の基礎となるデータ・資料収集が必要。

- 例えばスマートフォン等を自動車に置いておくだけで、路面からの振動（衝撃）と位置情報を関連付けて記録・図化し、データ蓄積も自動化できるような新たな技術があれば活用したい。

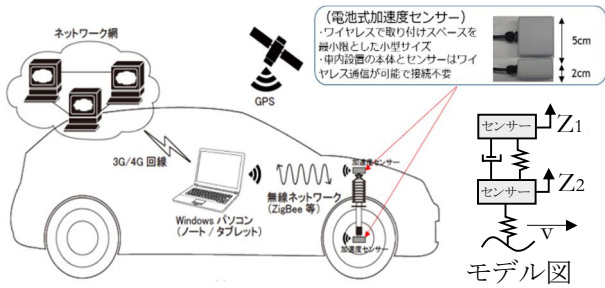
シーズ：ACTUSによる路面モニタリングと自動記録

- 普通乗用車へ簡易に取付が可能で、走行するだけでリアルタイムにIRIの取得・確認が可能。
- 位置情報はGPS及び車速パルス（ジャイロ等）を使用し、トンネル内等GPSが受信できない箇所でも関連付けが可能。加えて、地図上や道路台帳等CAD上にIRIの状態をプロットし結果確認が可能。

(3)ACTUS（アクタス）技術概要

IRI 簡易計測システム「ACTUS: Advanced Compact Telecommunications Unwired-accelerometer System」は、加速度センサー及びGPSにより構成され、汎用車両へ設置可能であるとともに、取得データはワイヤレスで測定車搭載PC・タブレットへ送信が可能である。

本装置は道路維持管理の実情に即した簡易舗装点検に資するとともに、維持管理費低減を見据えた次世代指向の路面平坦性モニタリングシステムとして位置付けている。



$$IRI = \left(\int_0^{L/v} |\dot{z}_1 - \dot{z}_2| dt \right) / L$$

(サスペンションのたわみ累積量を走行距離で除した値)

図 2 ACTUS 構成図

本技術の主な特徴

- 車両のバネ上下に加速度計を設置し、上下加速度データの伝達関数から任意の間隔でIRIを計測
- IoT活用：ワイヤレス加速度計 ⇒ 無線送信 ⇒ データ受信 ⇒ リアルタイム解析
- 路面データとGPSデータを結合し、走行軌跡上の路面凸凹をPCでリアルタイムにモニタリング
- バージョンアップに向けたさらなる取り組み

IRI計測位置のさらなる精度向上のため、高精度で高速計測可能な「GNSS-RTK」を利用することとした。なお、GNSS-RTKには「Sept-SOI」を採用した。その主な特徴と機能を以下に示す。

- 多種のGNSS（GPS 米国、BeiDou 中国、みちびき 日本等）を利用し、高精度な計測が可能。
- 多くの衛星を捉えることで高FIX率を維持するため、ビル近くを通っても正確な計測が可能、道路計測においては車線の違いも明確になる 等

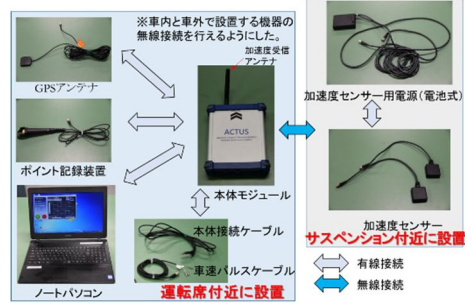


図 3 ACTUS 本体機器概要

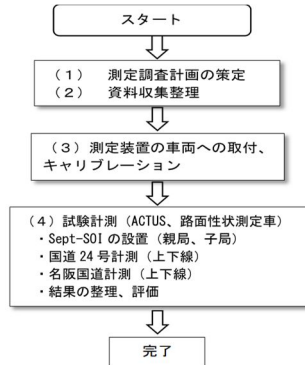


図 4 SeptSOI のイメージ図

2. 現地計測

現地計測実施に際し、従来型との計測データ比較を行うため、現地に路面性状測定車を持ち込み、追走するような形で同時刻帯での計測を実施した。

(1)計測実施フロー



| 項目 | 12月 | 1月 | 2月 |
|------------|-----|----|----|
| 作業計画の策定 | ■ | | |
| 測定準備(取付等) | ■ | | |
| 試験走行 | | ■ | ■ |
| IRI解析・結果評価 | | | ■ |

図 5 現地計測フロー及び工程表

(2)機器取付作業及び現地計測状況



図 6 機器取付状況 (左:ジャッキアップ, 中:加速度計設置, 右:車内機器設置)



図 7 現地計測状況 (左:ACTUS 設置車両, 右:路面性状測定車)

3. 計測データ取得・整理

(1) 計測データについて

計測データは下記の通り。

- ①位置情報 (座標: 緯度・経度) ②累積距離
- ③車両走行速度 ④上下加速度データ (計測ピッチ)
- ⑤IRI データ (10m or 100m ピッチ)

結果表示は専用ソフトウェアにて地図上(地理院地図)にプロットし、路面凸凹情報を可視化する。IRIの算出は伝達関数法を用いた手法とし、今回のデータ整理に際し、マップ上のプロットはIRI/10mにて、過年度との比較においては、通常の維持管理で使用されるIRI/100mにて行った。

IRIと路面性状のおおよその目安については図8の通りとなっており、先述の舗装点検要領における健全度判定基準を表1に合わせて付記する。

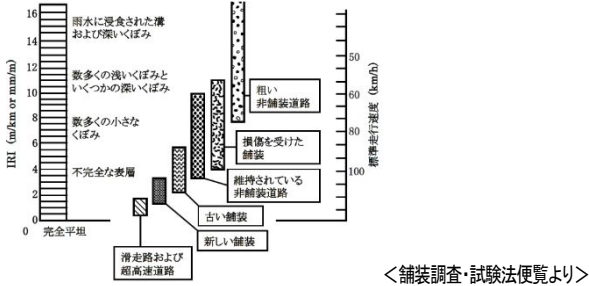


図8 IRIと路面損傷の関係

表1 IRIと舗装健全度の関係

| 区分 | ひび割れ率 | わだち掘れ量 | IRI |
|-------------|---------|-----------|------------|
| I 健全 | 20%未満程度 | 20mm 未満程度 | 3mm/m 未満程度 |
| II 表層機能保持段階 | 20%以上程度 | 20mm 以上程度 | 3mm/m 以上程度 |
| III 修繕段階 | 40%以上程度 | 40mm 以上程度 | 8mm/m 以上程度 |

<舗装点検要領:H28.10;国土交通省より>

(2) 計測区間のゾーニング

今回計測区間では、交通量、沿道・地形条件等によってデータ特性が異なるため、表2の通り区間分類を行った。

表2 計測区間の分類(上:24号、下:25号名阪国道)

| 区間 | 特徴 |
|----------------------------|---------------------------------------|
| ① 都市近郊区間 35.5~37.4kp 1.9km | ・交通量は中程度
・比較的、走行性の良い区間 |
| ② 市街地区間 37.4~42.0kp 4.6km | ・平面交差点で渋滞区間含む
・大型車交通量最大
・立体交差含む |
| ③ 都市近郊区間 42.0~45.5kp 3.5km | ・大型商業施設付近で渋滞区間あり
・交通量が多い |
| ④ 地方部区間 45.5~47.6kp 2.1km | ・郡山IC付近で渋滞発生
・交通量は中程度 |

| 区間 | 特徴 |
|---------------------------------|-----------------|
| ① 福住IC~五ヶ谷IC 83.4~89.4kp 6.0km | 線形が悪く、縦断勾配が急な区間 |
| ② 五ヶ谷IC~天理東IC 89.4~93.3kp 3.9km | 線形が悪く、縦断勾配が急な区間 |
| ③ 天理東IC~天理IC 93.3~94.7kp 1.4km | 線形が良い区間 |

(3) 計測時の走行速度

国道24号では、当日の渋滞状況や天候等により異なるが、平均計測速度は40km/h程度、自専道となる名阪国道では、60km/h程度を保持した平均速度を目指した。

4. 計測結果

(1) 路面性状測定車との比較

各区間の測定結果を取りまとめたものを下表に示す。

表3 区間別測定値一覧(上段:24号、下段:25号)

| 種別 | 機器 | 単位 | 区間① | 区間② | 区間③ | 区間④ | 全体 |
|----|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | 34.9~37.3KP | 37.4~41.9KP | 42.0~45.4KP | 45.5~47.6KP | 34.9~47.6KP |
| 上り | ACTUS | mm/m | 1.29 | 2.23 | 1.94 | 3.59 | 2.13 |
| | 路面車 | mm/m | 1.47 | 2.22 | 2.14 | 3.11 | 2.15 |
| | 比較 | AC/路面 | 0.88 | 1.01 | 0.91 | 1.15 | 0.99 |
| | 平均速度 | km/h | 50.5 | 35.7 | 37.0 | 36.1 | 39.6 |
| 下り | ACTUS | mm/m | 1.60 | 2.36 | 2.13 | 2.77 | 2.17 |
| | 路面車 | mm/m | 1.73 | 2.27 | 2.31 | 3.22 | 2.27 |
| | 比較 | AC/路面 | 0.92 | 1.04 | 0.92 | 0.86 | 0.96 |
| | 平均速度 | km/h | 50.3 | 43.9 | 40.5 | 37.3 | 37.3 |

| 種別 | 機器 | 単位 | 区間① | 区間② | 区間③ | 全体 |
|----|-------|-------|--------|---------|--------|-------|
| | | | 福住~五ヶ谷 | 五ヶ谷~天理東 | 天理東~天理 | 福住~天理 |
| 上り | ACTUS | mm/m | 2.43 | 2.53 | 1.40 | 2.39 |
| | 路面車 | mm/m | 2.39 | 2.27 | 1.41 | 2.23 |
| | 比較 | AC/路面 | 1.02 | 1.11 | 1.00 | 1.07 |
| | 平均速度 | km/h | 55.1 | 46.9 | 57.3 | 52.4 |
| 下り | ACTUS | mm/m | 1.87 | 1.91 | 1.66 | 1.86 |
| | 路面車 | mm/m | 1.99 | 2.12 | 1.89 | 2.03 |
| | 比較 | AC/路面 | 0.94 | 0.90 | 0.88 | 0.92 |
| | 平均速度 | km/h | 61.4 | 65.6 | 60.0 | 62.9 |

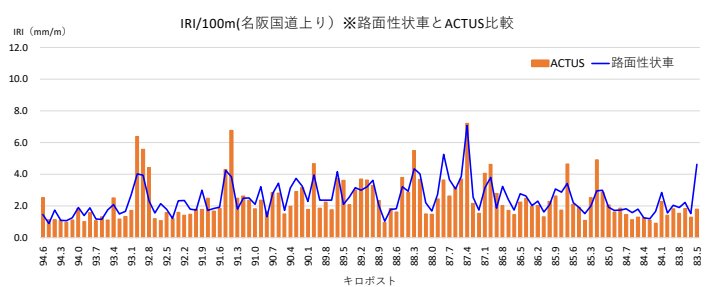
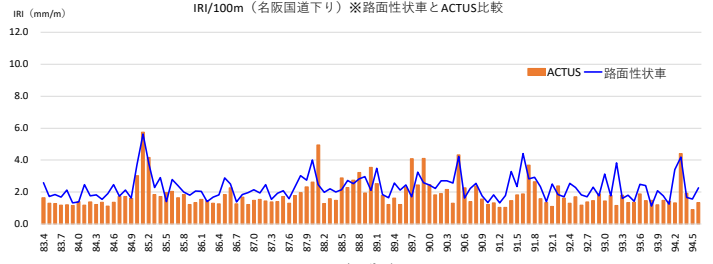
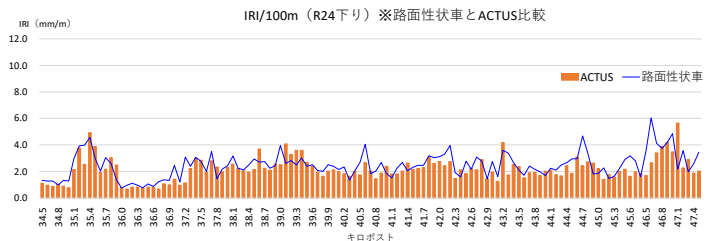
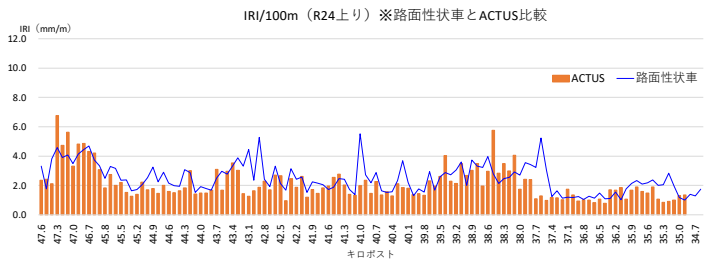


図9 国道24号・25号 IRI/100m計測結果比較

主な傾向として、

- IRI 波形データは、路面性状測定車との相関も比較的高く、IRI も落ち着いている（平均 IRI=2~3 であり、概ね同等である）。
- 局所的に ACTUS のほうが大きな IRI 値を検出しているところがある。
- IRI が 6mm/m 以上となる箇所は局所的に発生しているが、場所によって大きく異なる。

(4) 測定結果の図化検証について

今回のニーズが、路面からの振動（衝撃）と位置情報を関連付けて記録・図化が可能となり、データの蓄積も自動化できるような新技術に向けた展開を目指すべく、ここでは各区間での特徴的な箇所を抽出し、所定の地図上に IRI がプロットできているかについて検証を行った。

1) 国道 24 号 (41.0KP~42.5KP)

- 10m ごとの IRI は地図上にプロットされている
- 値の識別表示も適切である
- 高架区間のジョイント部が再現されている
- 管理上は問題ないが、車線位置をずれる箇所が見受けられる

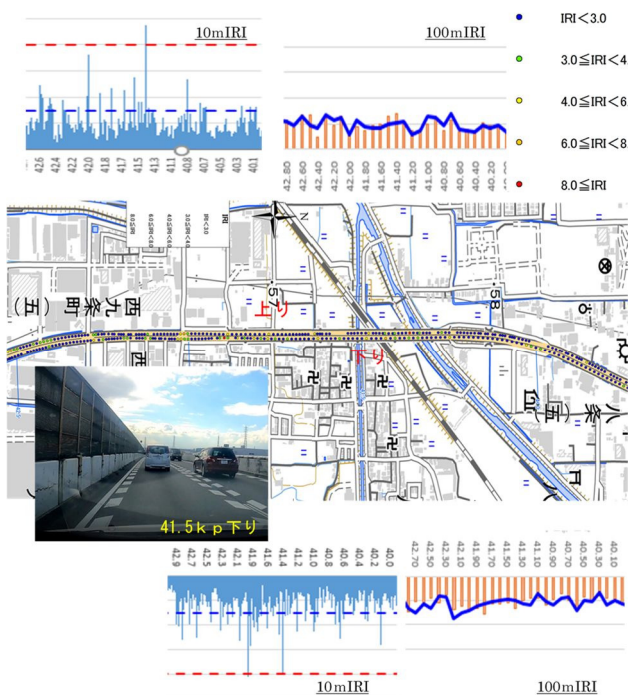


図 10 国道 24 号記録・図化表示の一例

1) 国道 25 号 (87.0KP~89.5KP)

- 10m ごとの IRI は地図上にプロットされている
- 値の識別表示も適切である
- 橋梁区間のジョイント部および速度抑制標示が再現されている

- 管理上は問題ないが、車線位置をずれる箇所が見受けられる

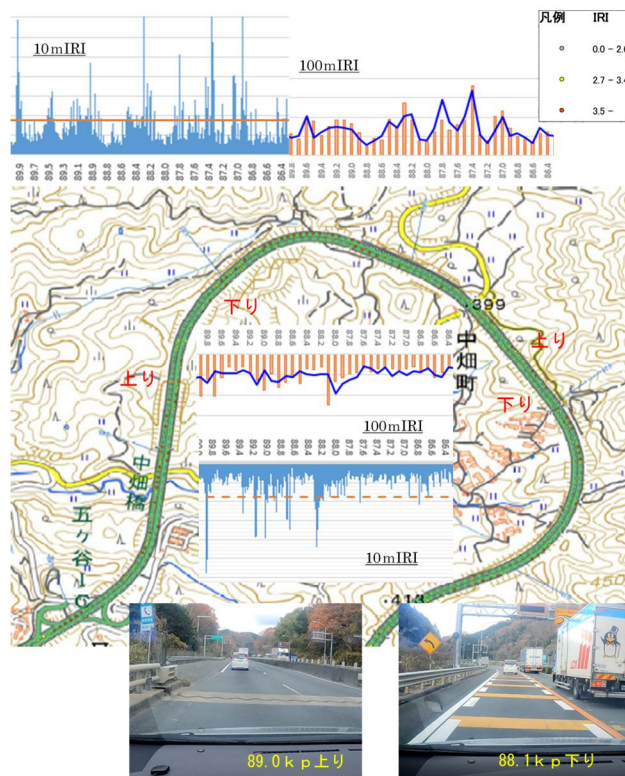


図 11 国道 25 号記録・図化表示の一例

(5) 測定結果のまとめ

測定結果をまとめると、国道 24 号では、

- 1) 全体的には 3.0mm/m 未満となっており、損傷度としては小以下（I 健全）。
- 2) 区間別には、一部 3.0mm/m 以上となるため、中程度（II 表層機能保持段階）となる。
- 3) IRI/10m では④地方部、③市街地部、②都市近郊部で局所的に 8.0mm/m を超える値が確認され、局所的な維持修繕が必要。

一方、国道 25 号では、

- 4) 全体的には 3.5mm/m 未満となっており平坦性の基準値以下。
- 5) 局所的に見た場合には基準値を大幅に上回る箇所が多数見られた
⇒橋梁のジョイントや速度抑制路面表示などが影響しており、これらの区間を除いたところで局所的な維持修繕が必要となる。

5. コスト評価（今回試験計測の実績；税抜）

- 概略費用（調査費、機器装置使用量）：1,685,700 円
- 調査距離 100km を想定（今回の調査距離約 50km より算定）

調査費用：1,453,700 円

◇現地調査 3 日：289,200 円（事前調査・試験走行 2.0 日、本調査 1.0 日）

⇒一日あたり内訳：技師 B1 名、技術員 2 名

◇机上作業 17 日：1,164,500 円（計画立案 2 日、データ処理・分析 8 日、マッピング表示 4 日、報告書 3 日）

⇒一日あたり内訳：技師 B1 名、技術員 1 名

機械経費：232,000 円（レンタカー、ACTUS・GNSS 受信機損料、機器取付費）

6. 工程評価（今回試験計測の実績に基づく）

現地調査 3 日

（事前調査・試験走行：2 日、本調査：1 日）

机上作業 17 日

（計画立案：2 日、データ処理・分析：8 日、マッピング表示：4 日、報告書：3 日） 計：20 日

7. 成果及び考察

前述した今回のニーズに対し、提供したシーズとなる ACTUS 試験走行を実施した成果及び課題を以下に示す。

【主な成果】

- (1) 普通乗用車に ACTUS を用いることで路面の IRI を検出し、記録・図化・データ蓄積が可能となった。
- (2) 機器取付は 1 時間弱で完了、スマートフォンほど簡易ではないが、一般車両での簡易計測が可能。
- (3) 計測時の路面状況をアクションカメラにより自動保存することができる。
- (4) 舗装打ち替え計画の参考となるデータ・資料収集にあたり、高精度な路面凹凸データおよび位置情報データの蓄積が可能となり、台帳等へのプロットも円滑に行いつつ、舗装点検要領に沿った評価が可能

【今後の課題等】

- ①業務としての実績づくり
- ②機器装着のより一層の効率化(スマートフォンのアプリ機能との同期化 等)
- ③データロガー等活用によるパソコン操作の省略化検討
- ④今後データ蓄積の自動化にあたり、インターネットのクラウドサーバー活用により、さらなるデータ連携の円滑化が可能
- ⑤高性能 GNSS と ACTUS の一体化検討(さらなる精度向上に向けた取組)

8. 今後に向けた展開

今回の試験走行を踏まえ、今回得られた要注意箇所に着目し、今後定期的に計測を重ね、経時変化（進行性）

を把握していくことが重要と言える。

ACTUS 活用に向けた今後の展開を以下に示す。

【中期的目標】

- 1) 指定路線以外の路線でも継続して計測を実施する。
- 2) 維持パト車等に取り付け、日々計測を可能とする。

【最終目標】

- 1) 車内で PC 操作等せずにデータロガーにてデータ収集自動化を可能にする。
- 2) 長期的なモニタリングの実施により、管内のデータの蓄積を行い、ビッグデータの取扱いも見据え舗装の長寿命化計画への寄与を目指す。

あ と が き

本研究実施に際し、フィールド提供頂いた奈良国道事務所様、本局施工企画課様、(一社)先端建設技術センター様、指導頂いた北見工業大川村教授、東京農業大山崎教授に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 舗装点検要領：国土交通省道路局；H28.10.
- 2) 近畿地方整備局「現場ニーズと技術シーズのマッチング」技術の現場試行結果について（IRI ワイヤレス路面測定技術）：
<https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/i-construction/matching.html>

保安林整備事業における丸太筋工の改良による負担軽減の取り組みについて

橋本 徹

林野庁 近畿中国森林管理局 計画保全部 治山課 (〒530-0042大阪府大阪市北区天満橋1-8-75)

保安林を適切に管理するため、林分の過密化や表土が流出するなど保安林機能が低下した林分について、本数調整伐や丸太筋工を実施し、保安林機能を回復させるための保安林整備事業を行っている。

しかし、丸太筋工に使用する鉄線は人力で運搬する必要があるが、運搬に大変な労力を要し受注者の大きな負担となっている。また、鉄線は林地に長期間残存し環境負荷にもなる。

これらのことから、運搬労力・環境負荷の軽減に繋がるよう丸太筋工を改良し試験施工を行った結果を報告する。

キーワード 保安林整備, 丸太筋工, 環境負荷, 労力軽減, 間伐材の利用

1. はじめに

保安林の水源涵養機能及び山地災害防止機能等の公益的機能の持続的な発揮を図るため、管内の国有林において保安林整備事業を実施している。

保安林整備事業では、林分の過密化及び林内表土が侵食されるなど水土保持機能が低下した保安林において、本数調整伐(間伐)を実施し、立木及び下層植生の健全な成長を促進させ、本数調整伐で生じた伐倒木を利用した丸太筋工を設置し表土の侵食及び流出防止を図っている。

丸太筋工の従来工法は、伐倒木を現地でチェーンソーにより加工し横木及び杭木として利用し鉄線で結束するものである。(写真-1)



写真-1 従来型の丸太筋工

横木と杭木を結束する鉄線は人力で作設現場まで運搬する必要があるが、本数調整伐を行う施工地は、林道から遠く離れた現場が多いことから、重量のある鉄線の運搬に大変な労力を要している。

丸太筋工を100m施工した場合、50kg以上の鉄線を運搬することになり、森林整備に従事する作業員が高齢化し減少している中、結束資材である鉄線の運搬労力は受注者の大きな負担となっている。

また、丸太は腐朽し林地還元するが、結束に使用する鉄線は長期間林地に残るため、環境負荷になり、後々の造林作業を行う上での支障にもなる。

これらのことから、運搬労力・環境負荷の軽減に繋げることを目的として、丸太筋工の施工方法の改良を行い試験施工を行ったので報告する。なお、本改良は伐倒木(間伐材)の利用促進にも有効なものである。

2. 施工箇所の概要

(1) 試験施工

構造検討に当たって、三重県いなべ市北勢町に位置する、悟入谷国有林で試験施工を実施した。

悟入谷国有林は、岐阜県境と接する尾根伝いに細長く所在する面積約1,000haの国有林である。

気候は、年間降水量2,111mmと全国平均(1,700mm)よりやや多く、冬期間は大雪に見舞われることもある。

(2) 検証施工

改良した丸太筋工を保安林整備事業の実行箇所である三重県多気郡大台町に位置する大杉谷国有林で実施し検証した。

大杉谷国有林は、奈良県境と接し、主に水源かん養保安林に指定された、面積約5,000haの国有林である。

気候は、年間降水量3,148mmで全国平均(1,700mm)の約2倍と、非常に雨が多い地域である。(図-1)

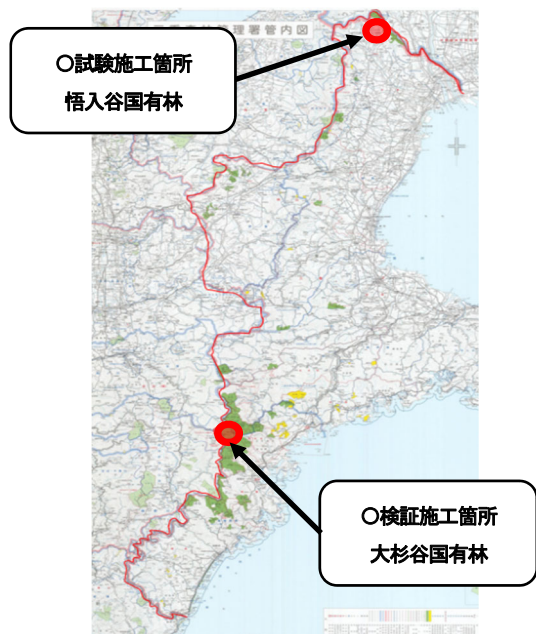


図-1 位置図

(2) 試験施工

考案した挟込式丸太筋工について、材料の加工しやすさや扱いやすさについても考慮し、杭木の長さ・横木の直径といった材料の規格を検討し、下記のとおり従来型から変更を行った。(表-1, 写真-2, 写真-3)

表-1 杭木, 横木の規格変更

| | 鉄線緊結式 | 挟込式 |
|----|--------------|----------------|
| 杭木 | 末口径 6.0cm以上 | → 6.0cm~9.0cm |
| | 長さ 0.9m~2.4m | → 1.0m |
| 横木 | 末口径 7.0cm以上 | → 7.0cm~15.0cm |
| | 長さ 2.0m | → 変更なし |



写真-2 試験施工で作成した杭木

3. 構造検討及び試験施工, 検証施工

(1) 構造の検討

従来型の丸太筋工について、材料の運搬労力の軽減、施工のしやすさ、間伐材の利用を念頭に構造の改良を検討し、鉄線で緊結せずに横木を両側から杭木で挟込む形で固定を図る丸太筋工(以下、「挟込式丸太筋工」という。)を考案した。(図-2)



写真-3 試験施工完成状況

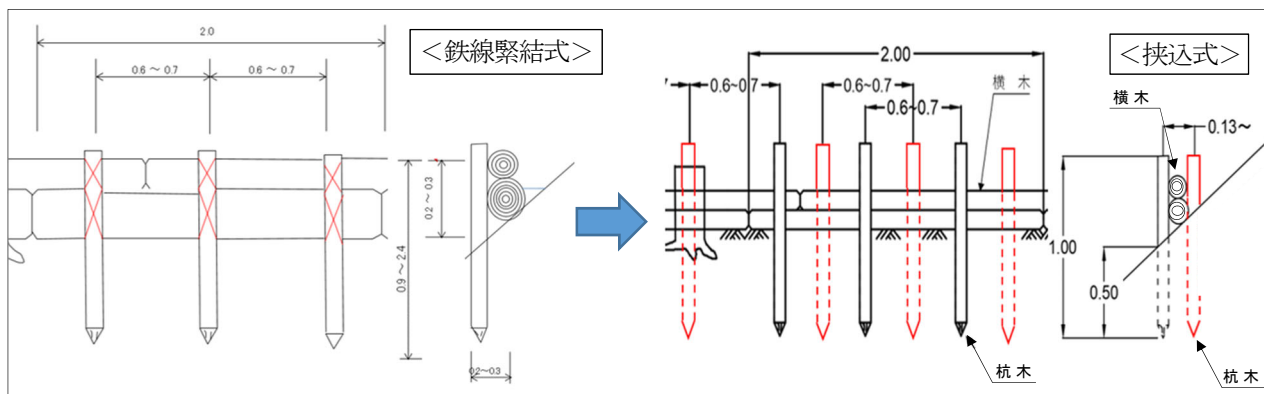


図-2 構造の検討

試験施工後3ヶ月、5ヶ月後の経過観察では、転石による衝撃テストを行うとともに、挟込式丸太筋工の背面部の土砂堆積状況を確認した。

挟込式で施工を行った場合の作業工程は、下記の比較フローのように鉄線の運搬及び緊結作業が不要となる。(図-3)

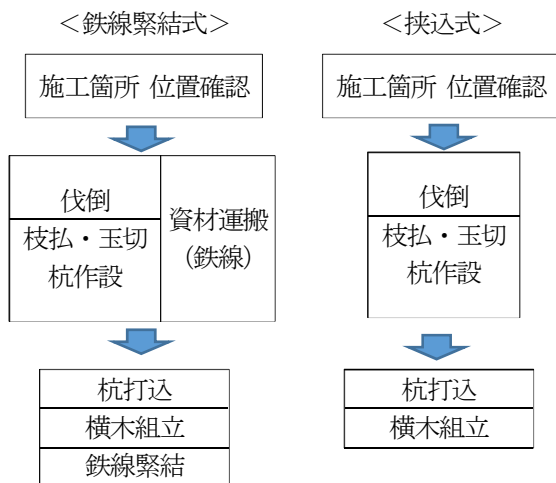


図-3 作業工程比較フロー

(3) 検証施工

試験施工結果をもとに、保安林整備事業の請負実行箇所にて従来型の鉄線緊結式と挟込式の施工を行い、それぞれの工程調査を実施し、受注者から施工のしやすさ、改善要望等について聞き取りを行った。(写真-4, 写真-5)



写真-4 鉄線緊結式丸太筋工 完成状況



写真-5 挟込式丸太筋工 完成状況

4. 工種毎の調査結果

検証施工で得られた、10m当たりの人工数の結果を以下に示す。

(1)杭打込について、鉄線緊結式は0.41人、挟込式は0.56人で従来比136%。(図-4)

(2)横木組立について、鉄線緊結式は0.12人、挟込式は0.23人で従来比192%。(図-5)

(3)鉄線緊結について、鉄線緊結式は0.20人、挟込式は不要であるため0人となり従来比は0%。

また、鉄線緊結式の施工費用のうち33%は鉄線材料費が占めており、費用に占める材料費の割合が高くなっている。(図-6)

(4)丸太筋工を10m作設する場合と比較すると、鉄線緊結式は0.73人、挟み込み式は0.79人で従来比108%..

m当たりの施工単価での比較では、119%と若干のかかり増しの結果となった。(図-7)

一方、丸太使用材料では130%増となり間伐材の利用促進に繋がった。

受注者からの感想は、「重い鉄線の運搬や加工が不要となる点は大いに評価でき、作業ロスもなく特段問題もなく施工することができ、施工は容易である」とのことであったが、「杭打ち本数が増加するため材料の確保が要点となる」との意見もあった。

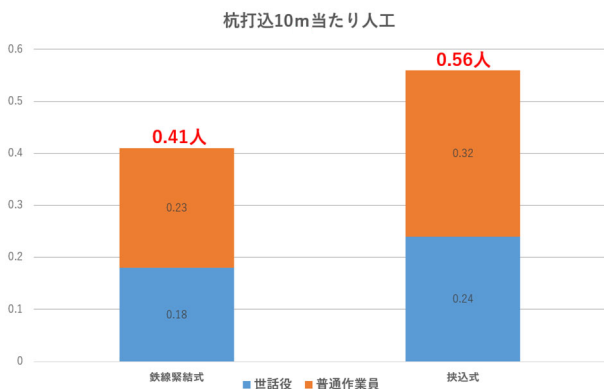


図4 杭打込 実行結果

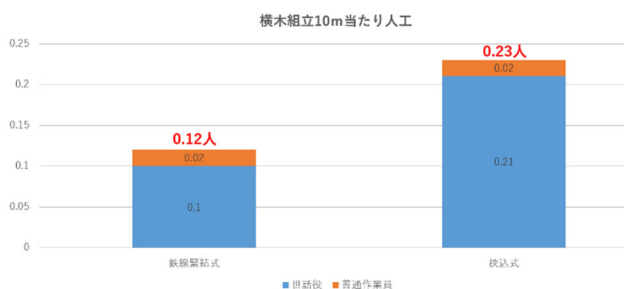


図5 横木組立 実行結果

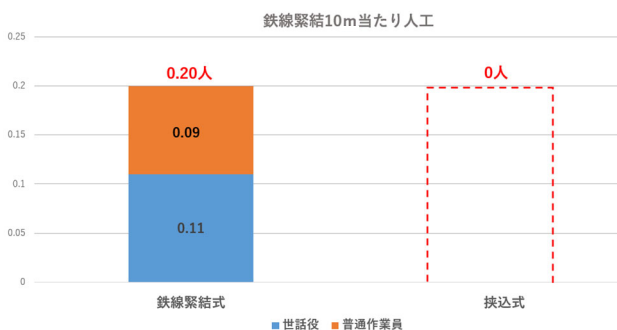


図6 鉄線緊結 実行結果

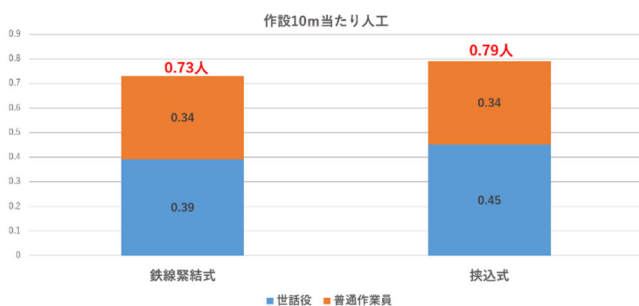


図7 作設全体 実行結果

5. 考察

工程調査から、杭打込はかかり増しとなったものの、鉄線の運搬・緊結工程の削減から、丸太筋工の施工トータルでみた場合では、事業工期に影響するような遅れは生じなかった。

挟込式の構造が分かりやすく、作業に慣れやすい点も施工のしやすさにつながったものと考えられる。

また、従来型の鉄線緊結式と同様の強度であることが確認でき、背面部には降雨後に土砂の堆積も確認でき、表土流出防止の効果も認められた。

今回、横木を両側から挟込む形で杭木を打ち込み固定する工法を検証したが、当初の目的は達成できたと考えられる。

挟込式は、鉄線の運搬・加工・緊結が不要ことから、現場作業者の肉体的負担の軽減効果は大きいと思われる。

しかし、杭打込工程や施工単価についてはやや増加する結果となり、これは、丸太筋工の施工経費は、そのほとんどを人件費が占めるため、杭打ち本数の増加分が、そのまま施工単価に上乗せとなったためであり、この点は、今後の検討課題である。

6. まとめ

森林土木工事における木材利用の推進は、地球温暖化の防止や資源循環型社会の実現に貢献するものである。

今回の検証で、運搬労力・環境負荷の軽減、耐久性・施工性について一定の効果を確認できたと同時に、間伐材の利用促進の面でも有効性を確認することができた。

また、分かりやすい構造としたため特殊な技術・道具を必要とすることなく作設することができた。

一方で、作業工程・施工単価については増加傾向の結果となった点については、地形は事業地ごとに異なり、作業の段取りも受注者により異なることから、複数の保安林整備実行箇所で作業工程等の調査を実施し、調査データの収集を行う必要がある。

また、現地に応じた杭打ち間隔の工夫など構造の改良が必要と考えている。

これらの点について、今後も検証を重ねながら、作業工程・施工経費の削減に繋がるよう、丸太筋工の構造の改良に取り組むこととする。

※本稿の内容は、前所属である三重森林管理署で担当した事業成果である。

ダム・河川向け水中地形および堆砂状況の 自動計測技術について

前田 文孝・今坂 尚志

古野電気株式会社 技術研究所 第1研究部 知能制御研究室 (〒662-8580兵庫県西宮市芦原町9-52)

長期間の運用が必要となるダム・河川では、近年増加しつつある激甚災害等に伴い、堆砂量などの定期的かつ正確な3次元状況の把握の必要性が高まってきているが、これを安価かつ高精度に実現するという手法がこれまで実現されてこなかった。本稿では低動揺艇体・最適航法制御アルゴリズムを搭載した自律航行無人艇と低価格マルチビーム計測システムを用いた堆砂状況の安価高精度3次元把握手法について提案する。著者らは奈良県川上村の大滝ダムにおいて提案技術を用いた3次元堆砂状況調査を行い、結果として提案手法による機材費用や測量時間が低減でき、河川地形の3次元形状の把握や定量化が一定の精度で可能であることを示した。

キーワード 安価高精度, 堆砂状況計測, マルチビーム, 自律航行, 省力化, 省人化,

1. はじめに

ダム・河川では、流水等によって生じた河床の経年変化を定期的に深淺測量にて把握を行い、堆砂量を評価しながら堆砂浚渫工事の計画を行っている。測量方法は、河川を一定の距離間隔で横断面の深淺測量を行い、平均断面法を用いて堆砂量を算出している。

特にダムにおいては、ダム計画時において計画堆砂量が検討されていることから、堆砂の進行状況を把握するために毎年正確な状況把握が必要である。しかしながら、現在用いている平均断面法では測線上の横断測量は実施されているが測線間の状況は正確には把握しきれていないのが実態であることから、より正確な地形把握（堆砂状況の把握）が求められている。

正確な水面下地形を把握する手法としては、港湾の土木工事などで利用されるマルチビーム深淺測量²⁾がある。この手法は船舶に艀装したマルチビームソナーやGNSS測位装置を用いる事で3次元の測深位置が把握できる。このため測線上の位置と水深の2次元断面しか計測しない従来のシングルビーム音響測深に対し正確な貯水量管理が可能になる事が期待できる。

しかし現在国内で販売されるマルチビーム測深システムは1式3000～5000万円と非常に高額で、船の動揺が大きいと艀装設備のたわみや動揺そのものにより測深精度が従来技術より悪化する³⁾。更に、測深機のオペレーションには従来よりも多くの人数を必要とし、シングルビーム測深よりも計測データが多くなる。このため内外業務に要するマンパワーも従来技術の数倍の時間を必要とし、3次元計測に対するニーズは高いとされつつも港湾ほど積

極的に導入されているケースが少ない。

これを少しでも低コスト化するために、測深点数の少ない安価なマルチビームソナーを用いる手法や、省人化のために無人ボートにマルチビームソナーを搭載させたものなどがこれまでに提案されてきているが、従来技術と同等程度のコストで3次元計測が実現できるものは存在しない。

筆者らは、自社で長年研究してきた小型船向けオートパイロット技術を応用した、蛇行や動揺の少ない操船制御技術を搭載させた自律航行無人艇と、安価マルチビームを用いて、一定の測量精度を維持しつつ、省力化と省人化を実現し、作業時間を短くする事で3次元地形計測を従来技術と同等のコストで実現する測量システムについて提案する。

2. 提案する新技術の概要

筆者らの提案する技術を搭載した計測システムを図-1に示す。本技術は自社で長年研究してきたプレジャーボート向けのオートパイロット技術を応用したものである。具体的には、測線に対して航走する際に、横流れから復帰する際に生じる蛇行や、操船によって生じる動揺を最小にするための操船制御アルゴリズムが搭載されている。

これによって、蛇行による未測をなくすることができるだけでなく、動揺による精度悪化を最小限に抑え、測深点の精度指標としてIHO⁴⁾で規定されるTPU⁵⁾を従来技術と同等に保った3次元測深データが多数得られる。

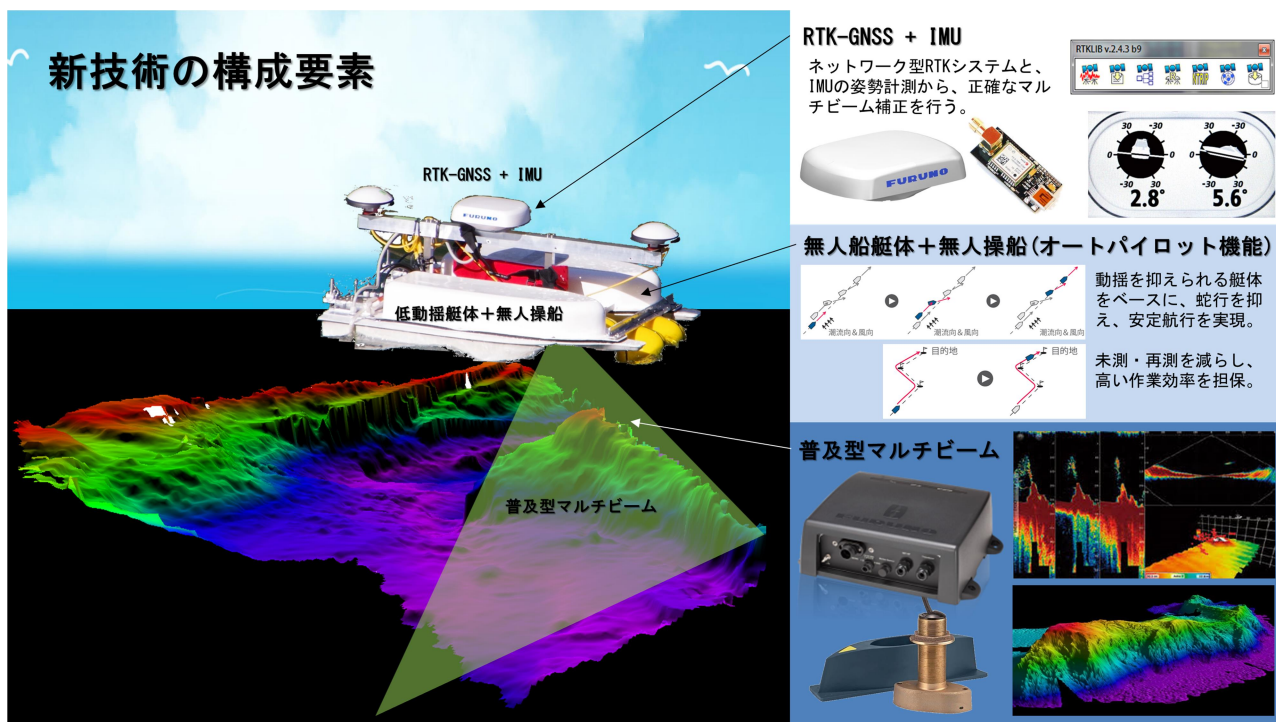


図-1 新技術のシステム構成。RTK-GNSS/IMU、無人船艇体と無人操船(オートパイロット操船)制御、そして普及型(安価)マルチビーム技術で構成される。

図-1に示すそれぞれの要素について、下に説明する。

- RTK-GNSS+IMU**
 サテライトコンパス(GNSS-IMU)技術を応用し、ネットワーク型 RTK 測位信号処理を付加することで従来製品よりも高精度の測位・動揺計測を実現した。
- オートパイロット機能**
 自律航行無人艇が受ける波風の中で、定点保持や安定ルート航走が可能になるように、最適航行制御アルゴリズムを実装した。
- 普及型マルチビーム**
 魚群探知機として開発され、最大 64 点の測深点が得られるマルチビーム測深機で、従来技術であるシングルビーム測深機と同等の精度を持つ。

本システム仕様について表-1に示す。新技術として使用した各装置は基本的には市販品または社内生産品をもとにカスタマイズしたものである。

表-1 新技術を搭載した自律航行無人艇の仕様

| 項目 | 仕様 | |
|--------|--------|---|
| 船体仕様 | 航行方式 | 自律航行 (FF精密操船) |
| | 寸法・重量 | 1200×800×500(mm)、35kg |
| | 稼働時間 | 4時間 |
| | 最高船速 | 4kt(約2.0m/s) |
| | 通信距離 | インターネット:特に制限なし |
| | 適用環境 | 流速2.0m/s、風速5.0m/s、波高15cm未満 |
| マルチビーム | 諸元 | 周波数:165kHz ビーム幅:7°×12° |
| | 測深点数 | 1ピング(送受信)あたり最大64点 |
| | 測深精度 | 10.0+(水深/100.0)cm以下(水深60m以浅) |
| | ソフトウェア | 水路測量/港湾・ダム・河川向け深淺測量対応マルチビーム処理ソフトウェア |
| 測位・動揺 | GNSS | RTK-GNSS、精度:0.01m+1ppm CEP |
| | IMU | 精度:ロール・ピッチ(～0.1°)、方位(0.1°)、ヒープ(5% or 5cm) |
| 運用環境 | 温度範囲 | 0～55℃ |

これに基づき、同事務所が管理する奈良県川上村の大滝ダムにて技術性・経済性などの現場試行実験を実施する許可を頂いて、2021年2月に現場にて実験を実施した。

3. 現場試行実験

筆者らは、本提案手法を近畿地方整備局が主催する2020年度の技術マッチングイベントにて新技術として提案し、紀の川ダム統合管理事務所においてニーズとして募集していた「ダム湖内の堆積土砂の堆砂状況を安価で精度良く確認できる手法」としてマッチングが成立した。

(1) 実験場所

実験場所としては、上流側の河川測量が実施できる、水深30m程度のナメキ地区と、下流側の大滝ダム堤体に近く、過去に大規模な崩落があったとされる迫地区の2か所で実施した。

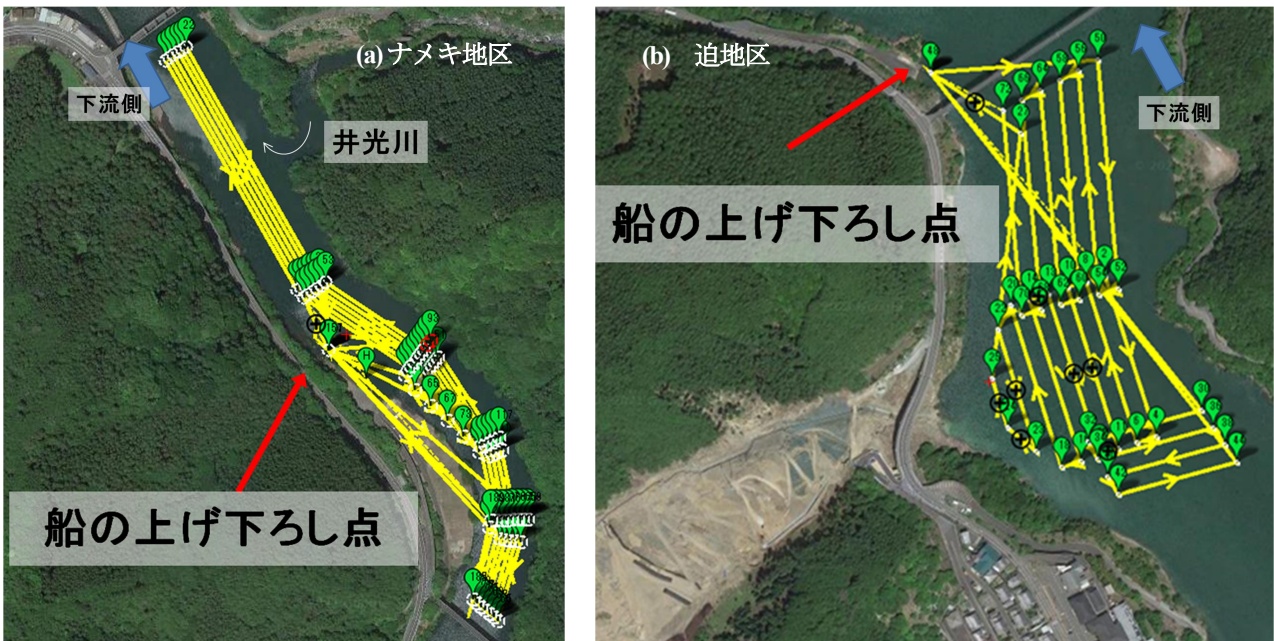


図-2 現場試行時の、新技術による面測量計画測線図。写真は Google Map API から取得。

(2) 実験内容

それぞれの地区では、以下に示す実験を行った。

a) ナメキ地区 :

図- 2(a)に示す計画測線を設けて横断測量・面測量を実施し、新技術で計測したTPUを評価しつつ、従来技術による測量の精度と比較検証した。

b) 迫地区 :

図- 2(b)に示す計画測線を設けて横断測量・面測量を実施し、3D地形の概況評価と、従来技術と新技術を用いた体積計算結果について比較検証した。

なお、現場試行の実施時期の水位は、計画時に使用したGoogle Map APIで表示される水位よりも10mほど低くなっており、浅瀬の事前把握が難しかった。このため、測線計画は安全を見込んで、図- 2に示したように汀線より内側の領域にとどめた。

(3) 施行作業の工程

現場試行作業は、それぞれの地区において、表- 2に示す工程で実施した。今回の試行では、現場で試作機器の動作確認及びパラメータ調整が必要であったため、横断面及び全面計測の前に調整作業を行った。

なお、2月2日と2月26日は強風及び大雨などの悪天候のため、作業を中断した。

表-2 現場試行工程

| | | 2021年 | | | | | |
|-------|--------------------------------|-------|------|-----------------|----------------|----------------|------------------|
| | | 2月1日 | 2月2日 | 2月3日 | 2月4日 | 2月5日 | 2月24-26日 |
| ナメキ地区 | 動作確認・調整
オフセット確定
(パッチテスト) | | | 横断面計測
(精度検証) | | 全面計測
(縦断計測) | |
| 迫地区 | | | | | 全面計測
(縦断計測) | | 横断面計測
(比較検証用) |

4. 結果と考察

(1) ナメキ地区の計測 :

ナメキ地区での計測は、図- 2(a)、表- 2、及び表- 3に従い、全部で5エリアに分割して実施した。水中音速度プロファイル計測は無人艇の運用中にゴムボートで川の中腹で計測した。川幅は広いところで75mほどしかなく、水深が浅いため測線間隔は短く取る必要があったが、5か所の分割エリアの合計面積約3.3haを、5時間程度で計測できた。

表-3 ナメキ地区作業工程：行方向の数字は時刻

| | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|-----------|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 現場到着・機材展開 | ■ | | | | | | | | | |
| 動作確認・機器調整 | | ■ | | | | | | | | |
| 計測(エリア1) | | | ■ | | | | | | | |
| 計測(エリア2) | | | | ■ | | | | | | |
| バッテリー交換 | | | | | ■ | | | ■ | | |
| 計測(エリア3) | | | | | | ■ | | | | |
| 計測(エリア4) | | | | | | | ■ | | | |
| 計測(エリア5) | | | | | | | | | ■ | |
| 水中音速度計測 | | | ▼ | | ▼ | | ▼ | | | |
| 機材回収 | | | | | | | | | ■ | |
| 掃投 | | | | | | | | | | ▼ |

結果の3Dイメージを図- 3(a)に示す。計測の結果、次の状況が確認できた。

- ・左岸側がやや浅く、曲がった流路の内側に堆砂があるか、外側の流れが速いために掘れやすくなり、結果的にやや深くなっている。
- ・右岸側の飛び出た崖の当たりで左岸側に流れが移動している。この流れの衝突のためかぶつかる場所が他の場所よりも若干深く掘れているように見える。
- ・支流（井光川）との合流地点で流れの衝突があると思

われ、流速が相対的に弱まると考えられる付近では土砂の堆積が生じているのではないかと、と思われる。

(2) 迫地区の計測：

迫地区での計測作業は図-2(b)、表-2及び表-4に従い、全部で3エリアに分割して実施した。この地区は最大水深が60m近くに達するエリアで、計測効率はナメキ地区よりも高かった。各エリアの合計面積約9.2haを実質3時間ほどで計測できた。水中音速度プロファイル計測はナメキ地区と同様に無人艇の運用中に計測した。川幅は200mほどあったが、やはり1回の計測あたり10分程で実施でき、実用上の問題はなかった。

結果の3Dイメージを図-3(b)に示す。計測の結果、次の状況が確認できた。

表-4 迫地区作業工程：行方向の数字は時刻

| | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|-----------|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 現場到着・機材展開 | ■ | | | | | | | | | |
| 動作確認・測線計画 | | ■ | | | | | | | | |
| パッチテスト | | | ■ | | | | | | | |
| バッテリー交換 | | | | ■ | | | | | | |
| 計測(エリア1) | | | | | ■ | | | | | |
| 計測(エリア2) | | | | | | ■ | | | | |
| 計測(エリア3) | | | | | | | ■ | | | |
| 水中音速度計測 | | | ▼ | | | ▼ | ▼ | | | |
| 機材回収 | | | | | | | | | ■ | |
| 帰宅 | | | | | | | | | | ▼ |

- ・左岸側の大規模崩落のあったエリアにはなだらかな斜面があり、そこより上流下流は形状が異なっている。
- ・崩落のなかった所では旧道の状況が立体的に可視化で

き、概況の調査としては十分な情報が得られていると考えられる。

- ・上流右岸側に構造物らしき地物が確認できた。1998年度撮影のダム運用前の航空写真を用いて検証した結果、橋脚が乗る土台であったことが分かった(図-4)。

(3) 性能検証

性能検証としては、測深の精度と、測量の成果から得られる解析結果について、従来技術と比較を行った。

a) 測深精度について

従来技術で要求される測深機の測定精度は $\pm(10.0 + \text{水深(m)} / 100.0)\text{cm}$ である。マルチビーム測深精度はシングルビーム測深とは考え方が異なるため、今回は計測システムとして得られた計測結果の評価という観点で、TPUで評価を行った。ナメキ地区においてそれぞれ5m、10mの水深エリアで測深エリアを1mグリッドで分割し、そのグリッド内で最も計測回数の多い(計測点数の多い)エリアを選んでTPUを評価し、次の結果を得た。

- 水深5mエリア $\pm 7.7\text{cm}$
- 水深10mエリア $\pm 12.7\text{cm}$

この結果から、ナメキ地区の水深の範囲では要求精度をクリアできていることがわかり、水深が比較的浅い場所ではシングルビーム測量結果と同等の精度で計測が期待できることが分かった。

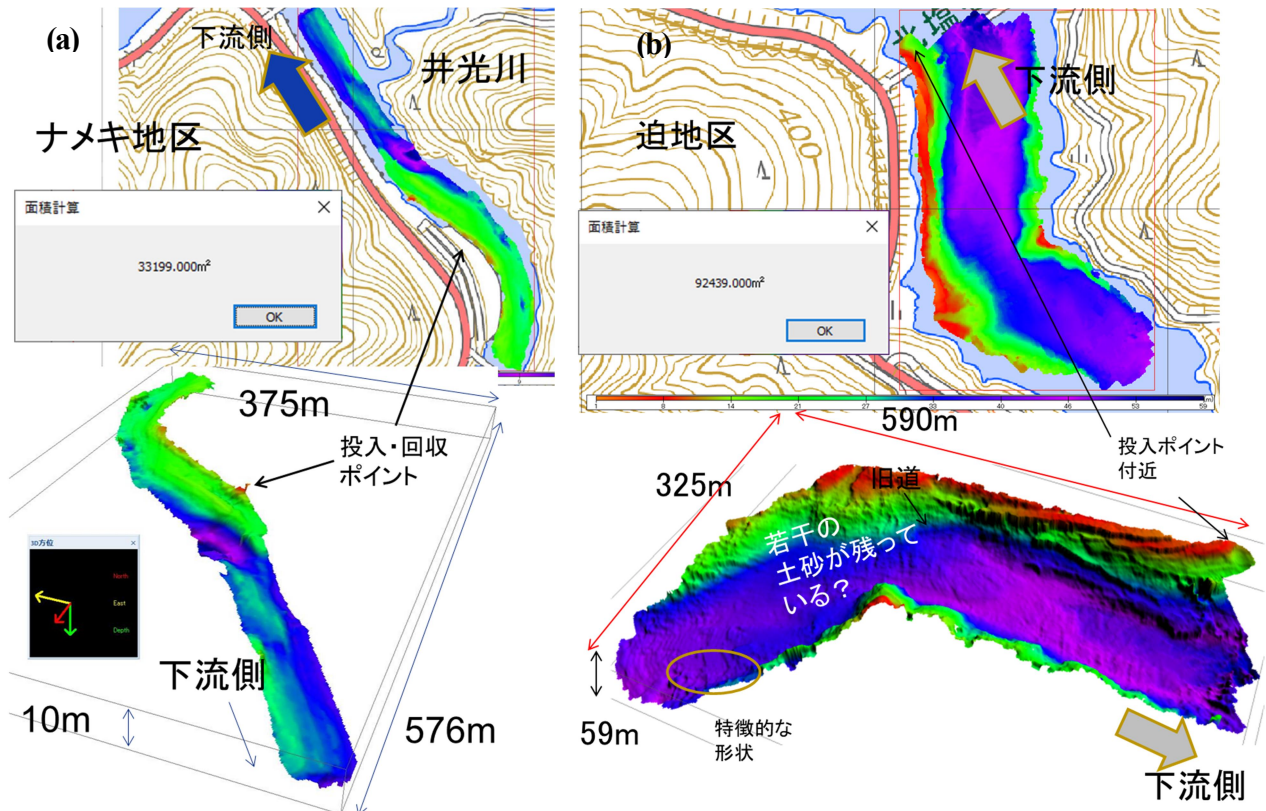


図-3 ナメキ地区(a)及び迫地区(b)の計測結果を示す3Dイメージ。

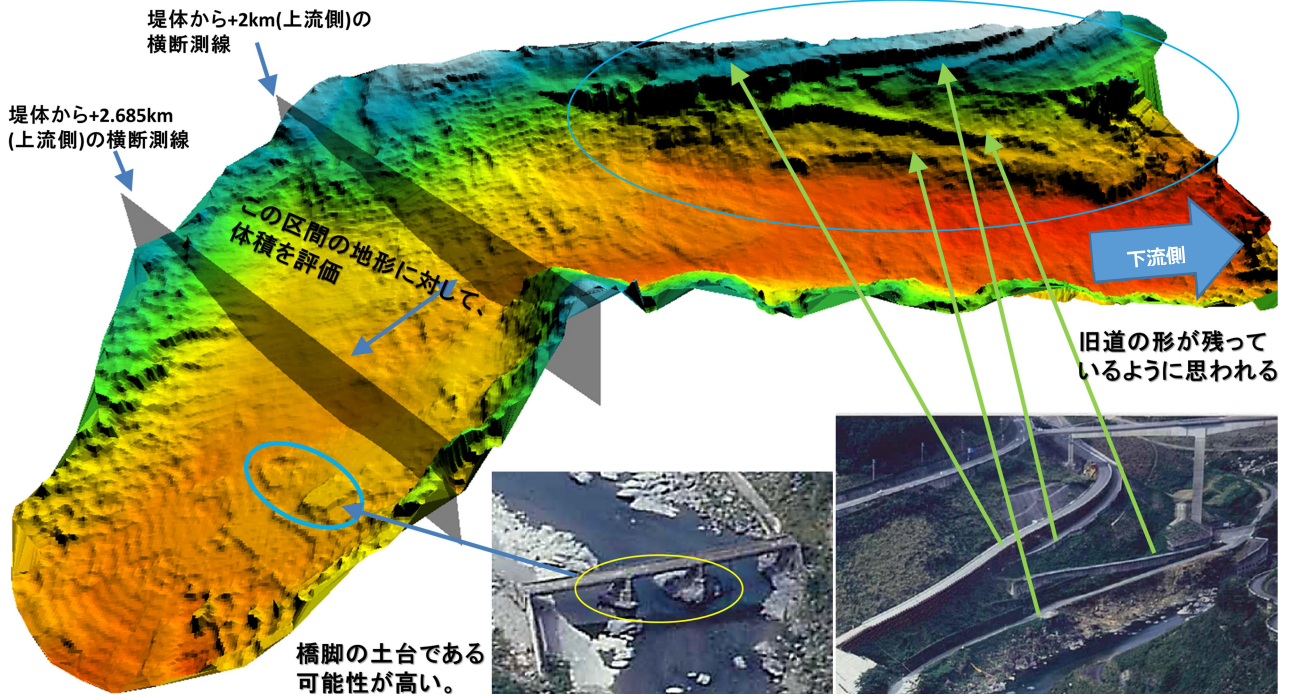


図-4 航空写真との対比により判明した箇所(迫地区)

表-5 各手法による算出体積の評価結果。

| 計算手法 | 面積(m ²) | | 体積評価 | |
|------|---------------------|----------|------------------|-------|
| | @2.6km | @2.685km | 体積m ³ | 差分(%) |
| ① | 4320.80 | 5421.70 | 416491.88 | - |
| ② | 4361.01 | 5421.41 | 418198.46 | -0.4 |
| ③ | - | - | 413791.42 | +0.6 |

- ① : 従来技術(横断面計測+平均断面法)
- ② : 新技術(3D計測→横断面算出+平均断面法)
- ③ : 新技術(3D計測→TINモデル法⁶⁾)

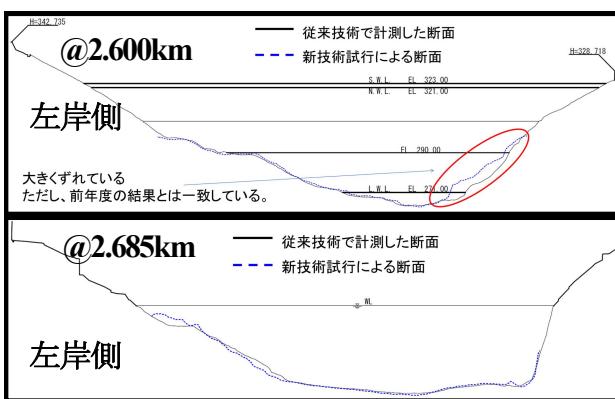


図-5 ダム艇体から2.6km(上)及び2.685km(下)の位置にある測線での断面比較。

b) 断面比較

従来技術の横断面測量と、新技術による3次元データを用いた同じ横断面の切り出し結果を図-5に示す。2.6kmの中心部～右岸よりの断面は、従来技術で得た最新の結果

が前年度の結果と比べて大きく異なっており、新技術の結果は前年度までとほぼ同じ結果となった。それ以外の場所では、いずれも最新の断面測量結果に対して50cm程度のズレしかなく、要求精度は満たしていた。

c) 河川管理視点での地形データについての評価

従来技術では測線ごとに算出した断面面積と水位から貯水量を計算する。マルチビームで3次元計測を行うとTINモデルを用いてより正確な貯水量が得られる。この比較として、表-5に示す3通りの方法で評価を行った。

各種法に対する体積の計算結果を表-5に示す。①②の差分は計測方法の違いを示すもので、体積量のずれは0.4%程度となった。これは計測精度として1%程度(水深50mの場合)が許容される従来技術と比較すればほぼ同等の精度で計測できていると考えてよい。

次に、①と③との違いは平均断面法とTINモデル法の違いが加味される。平均断面法は両断面間の内挿面が相互に滑らかに変化するという仮定で計算するが、TINモデルは断面間の起伏や狭広も正確に積算するため、当然両者の結果には断面感の地形に依存する差が生じる。この結果は正誤というより地形形状に起因する違いが表れていると考えるべきである。

(4) 現場試行の評価

現場試行評価項目について、表-6に示す。提案した新技術に関しては、6項目いずれも従来技術を上回る結果が得られた。今回は社内試作評価機を用いた応募であったため、製品として販売するためにはものづくりとしてクリ

表-6 技術マッチングイベントにおける現場試行評価結果のまとめ

| | 従来技術 (シングルビーム+有人計測) | 新技術 |
|--------|--|---|
| 経済性 | <ul style="list-style-type: none"> ・導入価格：一式 350万円(計測用システム) ・シングルビーム測深機 150万円 ・RTK-GNSS 100万円 (1式) ・データ処理ソフトウェア 100万円 (1式) ・維持費：
備船費 300万円
(15日間×2現場 単価10万円/日) | <ul style="list-style-type: none"> ・導入価格：500万円以下(基本システム販売価格) 構成部品：
①ドローン船本体 ②マルチビームソナー ③RTK-GNSS+IMU
④データ収録/操船制御システム⑤バッテリー⑥携帯通信端末 ・維持費：
3Dデータ処理クラウドシステム・通信費 月額15万円程度
(月額定額利用サービスの場合) |
| | <ul style="list-style-type: none"> ・直接測量経費：130万円
(ナメキ地区を10mメッシュで3次元グリッド作成) | <ul style="list-style-type: none"> ・直接測量経費：101万円
(ナメキ地区を1mメッシュで3次元点群を作成) |
| 工程 | <ul style="list-style-type: none"> ・設置工程：0.5日/毎日 ・計測工程：荒天時など自然条件に左右される ・延べ日程：27日(外業4人、内業1人) | <ul style="list-style-type: none"> ・設置工程：0.3日/毎日(バッテリー交換含む) ・計測工程：日中の時間帯は無人計測可能。 ・延べ工数：16日(外業2人、内業1人) |
| 品質・出来形 | <ul style="list-style-type: none"> ・計測精度：規定は 10 + (水深) / 100 (cm)。 ・備船への機器取付精度で結果が変わる
(日々の計測時間が長いと精度低下) ・取付位置が変わる/データ処理後に未測発見したら翌日再測が必要などのリスク大 | <ul style="list-style-type: none"> ・計測精度：規定の 10 + (水深) / 100 (cm) はクリア。 ・取付オフセット(機器位置、角度等)計測済み ・全機器が船内フレームに固定→取付精度担保。 ・計測確認しながら未測あれば直に追加計測可能。 |
| 安全性 | <ul style="list-style-type: none"> ・計測中は操船者、機器操作者、周囲警戒者が常に水上作業。 | <ul style="list-style-type: none"> ・計測中は陸上で自船位置確認と指示、計測状態の確認のみ。 |
| 施工性 | <ul style="list-style-type: none"> ・機器が雨や波浪で濡れないように注意し操作する必要あり | <ul style="list-style-type: none"> ・機器は防水船体内にあるため降雨波浪の心配なし。 |
| 環境 | <ul style="list-style-type: none"> ・備船は動力船のためガソリン使用による環境への影響がある | <ul style="list-style-type: none"> ・船は電気推進で対環境性良好。陸上局で別途電源がある事が望ましい。発電方法により環境配慮が必要(半日程度ならバッテリーで問題ない)。 |

アすべき課題が残っているが、技術としてニーズを達成できるという見込みを得られた。

(5) 全体の考察と今後の課題

本試行では迫地区でのMBES計測精度の検証は実施していないが、取得したデータから評価は可能である。マルチビーム測深精度はビーム方向(片舷最大45°程度)や水深に依存するため、高い精度を要求する計測も考慮し、対応するセンサーを搭載したシステムも提案可能である。

今回の結果は、過去に3D計測による地形データを得ていない事から、本提案技術ではこれ以上の精度検証は難しい。地形の正確さなどを今後検証していくためには更に高精度の計測評価する必要があり、よりハイエンドのシステムを試作し、正解に近い地形データを得て評価を進める予定である。また更なる測量効率向上のために無人艇の軽量化や運動制御アルゴリズムの洗練により、少人数でスピーディに現場作業が終えられる改良を進める。

5. 結論

ダム河川における管理者のニーズに合う、3次元堆砂状況を安価高精度に計測できる無人航行計測システムを開発し、現場試行実験を行ってその有用性について評価した。従来技術では評価できない断面間の地形などについても詳細なイメージや解析結果が得られ、提案する新技術が従来技術より有用である評価結果が得られた。

今後はシステムの改良と共に現場での詳細な調査実験を行いつつ、その結果を用いて製品化やサービスの開発

を目指す。

謝辞： 今回の研究発表に当たっては、2020年度技術マッチングを主催頂いた国土交通省近畿地方整備局様にお世話になった。また紀の川ダム統合管理事務所様には、ダム運用の観点から計測時期や場所の選定、安全面についてアドバイスを頂いたと共に、計測結果に対し航空写真や過去の断面データ等の検証情報の提供を頂き、検証を進める上で大変お世話になった。

最後に、マッチングイベントの進行に際し、一般社団法人先端建設技術センター様には、官民の仲立ちをして頂き、現場でも当社の技術に興味を持っていただきつつ、成果を出すための有益なアドバイスを頂いた。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省編, “令和2年度(4月版)土木工事数量算出要領(案)-第1章 共通事項”, 2020年4月,
- 2) 国土交通省 港湾局編集, “マルチビームを用いた深浅測量マニュアル(浚渫工編)(令和2年4月改定版)”, 2020年3月,
- 3) 末次 忠司ほか, “堆砂測量手法の概要とその得失,” 「ダム貯水池における堆砂測量」第2回, pp.15-17, リザーバー2008年3月
- 4) International Hydrographic Organization “Standards for Hydrographic Surveys,” IHO Publication Number 44, 6th edition, Mar, 2020.
- 5) TPUは Total Propagated Uncertainty(統合伝搬不確定性)の略。
- 6) 国土交通省編, “令和2年度(4月版)土木工事数量算出要領(案)-第1章 共通事項”, 2020年4月,