

国道9号京都西共同溝アーバンリング立坑と 共同溝シールドの地中高水圧下での凍結工法 による接続

高田 信夫¹

¹近畿地方整備局 京都国道事務所 (〒600-8234京都市下京区西洞院通塩小路下る南不動堂町808)

国道9号京都西共同溝は、災害時重要インフラを信頼性高い地下トンネルに収容し安全・安心に繋げる施設。「七本松通」から「桂川」の下くぐり「桂川街道」まで延長約3.3km(シールド区間約2.7km)の事業。

桂川左岸の葛野西通交差点の立坑設置は、夜間でも4車線のうち2車線通行確保必要で、通常のRC立坑構築できない。オープンケーソン工法の「鋼製アーバンリング制御圧入工法」で最小クラスかつ小判型の断面(内径約2.8m×4.2m)を採用し、制御圧入と水中掘削、水中不分離コンクリート打設の後、地中の共同溝シールドに深さ約24mで約20t/m²高水圧下での凍結工法での接続を行ったもの。

凍結工法は、地中固める工法では信頼性高く、凍結工法の特徴と留意事項など、貴重な施工状況報告を行うもの。「最小クラス小判型アーバンリングのシールド直上接続」の厳しい条件に加え、桂川氾濫原の沖積層玉石の先行掘削破砕と、鋼製アーバンリング初の工場コンクリート充填で自重増大での圧入。特別製作の上向施工可能な小型回転打撃式の凍結管削孔など、数々の対応を紹介。今後の、施工条件厳しい都市部の施工などで貴重な参考になると思われる。

キーワード 共同溝シールド, 共同溝立坑, アーバンリング立坑, 凍結工法, 水中不分離コンクリート, 沖積層玉石, 都市部施工

1. 国道9号京都西共同溝の位置図



図-1 位置図 桂川左岸[中間シャフト立坑]

2. 共同溝シールド工事と地下の地質状況

地下の地質は、深さ14.8m(中間シャフト立坑付近)より上層(Dg1)が沖積層玉石で、下層(Dg2)が洪積層シルト混じり砂礫となっている。発進立坑からの共同溝シールド掘進は、下層(Dg2)を順調に進み、シールド機の全断面が(Dg1)玉石層に進入した到達立坑から約80m手前で泥水の逸泥が増加して20m手前で停止した。

残り20mは薬液注入で地山を固めてシールド機を撤去したと聞いている。(図-2)

共同溝シールドの内径はφ4.7mで、リニア地下鉄と同等の内径である。

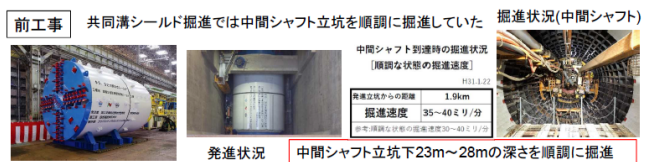
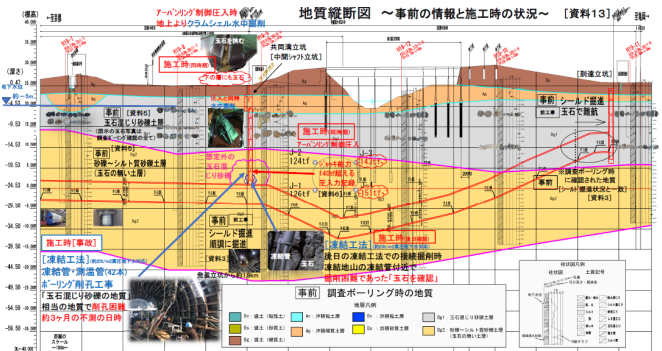


図-2 地質縦断面図とシールド工事 [前工事]

2. アーバンリング立坑の施工(中間シャフト立坑)

(1) 施工手順の概要

- 車線切替→覆工板設置(以降ほとんど夜間施工)
- 仮設土留め矢板打設(ロックカット先行掘削)→掘削及び山留支保工(地下1階に施工用機械室)
- アーバンリング先行掘削(ロックカット工法)
- アーバンリング制御圧入と水中掘削(小型クラムシェル)

- ー最小クラス小判型 (内径2.8m×4.2m)
- ーアーバンリングのシールド直上接続 [珍しい]
- ー鋼製アーバンリング初の工場でのコンクリート充填 (玉石層のなか自重増大で確実な高精度制御圧入)
- ーアーバンリング制御圧入と凍結管・測温管設置の削孔を同時施工 [珍しい]
- ーシールド坑内から凍結管・測温管設置
- ・水中不分離コンクリート打設 (オープンケーソンでは必須)
- ・アーバンリング内の水を汲み上げドライアップ
- ・シールド坑内からアーバンリング内に削孔連結管設置
- ・アーバンリング内側に凍結管・測温管貼付け
- ・凍結工法での凍結機運転→地山凍結
- ・水中不分離コンクリートを乾式コアドリリング削孔して撤去
- ・凍土掘削しながら接続部6リングを設置 (リング設置作業のためシールド坑内側鋼製セグメント一部切断)
- ・接続部6リングの背面にモルタル充填
- ・凍結機運転停止→解凍
- ・接続箇所シールド坑内側の鋼製セグメント切断
- ・接続箇所アーバンリング側の二時覆工コンクリート打設
- ・接続箇所シールド坑内側の鋼製セグメント二次覆工コンクリート打設

(2) 仮設土留め矢板を打設 (ロックカット先行掘削)

掘削及び山留支保工を設置して、覆工板下の地下一階にアーバンリングを施工するための機械室を設置。大量の玉石で、破碎した状態でも約20cmの大きさがあるものまであった。(図-3)

夜間深夜の施工であったが、玉石を割りながら、低騒音・低振動で施工完了でき、通行車両の音にかき消される程度の低騒音だった。



図-3 現地で大量の玉石が出ている地質状況

(3) アーバンリング制御圧入及び水中掘削の施工

土留矢板打設で大量の玉石が存在し周囲玉石のはみ出しで圧入力不足になるケースがあり、アーバンリング圧入が停止しない様に以下の2つの対策を行った。

- ① アーバンリング制御圧入の前にDg1層にロックカット先行掘削を行い確実な施工を目指した
- ② 鋼製アーバンリング初の工場コンクリート充填で自重増大 (約49 t 増) での制御圧入

(a) アーバンリング制御圧入

4箇所ジャッキ (定格能力各140 t) にアンカーを設置してアーバンリング制御圧入を行った。高さ1mの6分割の1リングを、一晩で組み立て、一晩で水中掘削と制御圧入を実施する二晩サイクル。(分割位置は1リングずつずらせた設計)

傾斜センサー設置、ジャッキ4箇所圧入力と傾斜の画面表示を見ながら、制御圧入を行った。(図-4)



図-4 アーバンリング制御圧入の状況

(b) アーバンリング内水中掘削 (小型クラムシェル)

小型クラムシェルでの水中掘削は、仮設材を跨いでの水中掘削のため、特別製作の薄型バケット使用。クレーンの先のカメラの映像を見て操作し、ここでも玉石があり、玉石を噛むとバケットが締まらず水と土砂が漏れることも。(図-5)

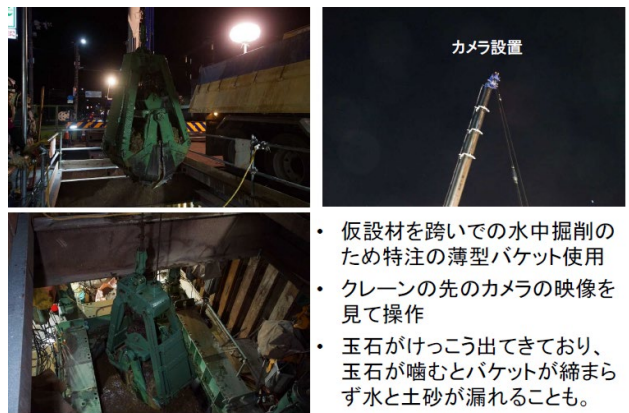


図-5 小型クラムシェルでの水中掘削の状況

(c) 鋼製アーバンリング制御圧入での工場コンクリート充填の自重増大の効果 (確実な施工)

アーバンリング制御圧入においては、深さ16.4mからジャッキ圧入力が各々の能力の80%を超える様になり、深さ18.4mから20.3mでは定格能力の140 tを少し超え151 t~143 tとなった。(図-6)

ジャッキの能力を少し超えることはあったが、工場でのコンクリート充填で自重を49 t 増大させていた事が功を奏し無事圧入完了することができた。

自重49 t 増大がなければ、圧入に最大200 t のジャッキ圧入力が必要となり、圧入できなかったと考える。

地下約18.4m~20.3mの深さでジャッキ能力を超える圧入力を記録[ボーリング削孔工事深さ18.8m~24.9m]
アーバンリング制御圧入時のジャッキ荷重の変動とボーリング削孔工事深さの関係

ボーリング機	種別	名称	掘削深さ(m)	掘削速度(m/min)	掘削時間(h)	掘削圧力(kN)	掘削圧力(MPa)	ジャッキ荷重 (T) 140Tジャッキ×4=560T				掘削圧力(MPa)	掘削圧力(MPa)	掘削圧力(MPa)	
								J-1	J-2	J-3	J-4				
コンクリート 未充填	①	対面ボーリング	001#	1.5m	5.4	5.4	0.6	GL-6.405m	7/11	101	110	119	110	440	445
		対面ボーリング	002#	1.0m	4.2	5.6	1.6	GL-7.905m	7/15	57	52	50	54	213	223
		対面ボーリング	003#	1.0m	3.7	13.3	2.6	GL-8.481m	7/18	54	77	77	53	261	274
		対面ボーリング	004#	1.0m	3.7	17.1	3.5	GL-9.490m	7/20	74	52	63	88	277	294
		対面ボーリング	003#	1.0m	9.9	27.0	4.5	GL-10.518m	7/22	64	81	76	67	288	315
		対面ボーリング	004#	1.0m	9.9	36.9	5.5	GL-11.426m	7/25	101	84	85	101	371	408
		対面ボーリング	003#	1.0m	9.9	46.9	6.5	GL-12.422m	7/28	80	67	68	84	299	346
		対面ボーリング	004#	1.0m	9.9	56.8	7.5	GL-13.426m	7/30	81	68	67	81	297	354
		対面ボーリング	003#	1.0m	9.9	66.8	8.5	GL-14.432m	8/2	109	106	111	111	437	504
		対面ボーリング	004#	1.0m	9.9	76.7	9.5	GL-15.428m	8/4	94	87	87	100	368	445
工場 コンクリート 先行充填 約4.9mの 厚さあり 掘削時の 振動打コン クリート 掘削	②	対面ボーリング	005#	1.0m	8.4	85.1	10.5	GL-16.431m	8/6	99	102	102	130	433	518
		対面ボーリング	006#	1.0m	9.4	94.5	11.4	GL-17.424m	8/9	92	92	137	136	457	552
		対面ボーリング	007#	1.0m	9.4	103.9	12.4	GL-18.431m	8/10	126	124	143	151	544	648
		対面ボーリング	008#	1.0m	9.4	113.3	13.4	GL-19.318m	8/10	117	118	126	150	511	624
		対面ボーリング	009#	1.0m	9.4	122.8	14.4	GL-20.267m	8/20	118	119	119	119	475	598
		対面ボーリング	008#	1.0m	3.2	126.0	16.0	GL-21.297m	8/25	107	135	136	102	480	606
		対面ボーリング	007#	1.0m	3.2	126.3	16.0	GL-22.297m						129	
		対面ボーリング	008#	1.2m	3.5	132.8		18.8m~24.9m						133	
		対面ボーリング	009#	1.2m	3.5	132.8									
		対面ボーリング	008#	1.2m	3.5	132.8									

図-6 定格能力の140 tを少し超え151 t~143 tの圧入力

(4) 凍結工法の選定と凍土造成範囲について

(a) 凍結工法の選定理由

アーバンリング立坑を共同溝シールドに地中約24mの深さで接続する際に、高圧の地下水と土砂の噴出による地山崩壊を防止する工法を選定する必要がある。「凍結工法」「高圧噴射攪拌工法」「薬液注入工法」が考えられるが、「薬液注入工法」は改良強度が小さく高水圧下で止水性確保の信頼性が確保できない。「高圧噴射攪拌工法」の検討では、交差点のため範囲限定される地上からの施工では、噴射の陰で、未改良部ができ、止水性の確保が困難であった。

これら検討の結果、「凍結工法」が確実な止水効果と地盤強度が得られ、同様条件での施工実績も多く、今回のアーバンリング立坑で適用されることとなった。

(b) 必要凍土厚の算定

必要凍土厚の算定はアーバンリング下端と鋼製シールドセグメント上端の両端に支持された中間1支点梁の地山開放時の区間の長さの梁として算定する。

共同溝シールドに対し北側に偏心のため、この長さは北側でL=4.15m、南側でL=3.5mとなる。

凍土壁の曲げ強度2,850KN/m²(砂質土:凍土温度マイナス11℃、塩分濃度0%)で凍土厚を算定すると北側T=1.4m、南側T=1.2mとなった。

(c) 凍土造成のための凍結管の配置

余掘を含む掘削断面から0.4m離れた位置に、鋼製シールドトンネルから地山の中に上向きに凍結管を約0.8m間隔1列を削孔して埋設し、凍結管から片側に0.8m厚さの凍土でT=1.2mの凍土造成を基本に、施工スペース小さいところは片側0.95m厚さの凍土造成、北側のT=1.4mの凍土厚が必要な箇所は凍結管を1列追加した。

(5) 凍結工法の準備工

(a) シールド坑内から凍結管・測温管設置

アーバンリング外側の地山の凍結管・測温管設置で、シールド坑内から上向きにボーリング削孔を42本行った。ジャッキのアンカー設置後、アーバンリングに凍結管・測温管が接近する所を除き、アーバンリング制御圧入と並行で削孔作業実施した。

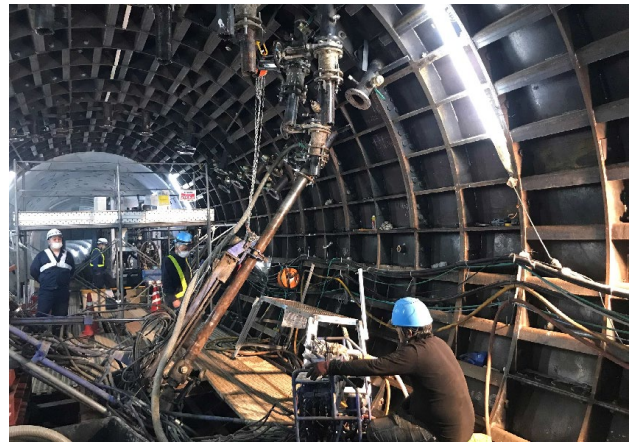


図-7 凍結管・測温管設置のための上向き削孔ボーリング(小型22kw転打撃式で上向き施工可能な特別製作のボーリング機械)

事前ボーリング調査やシールド掘進記録で想定できない深さ(Dg2)で玉石が存在(接続時の地山開放時に確認)し、この深さはアーバンリング制御圧入力がジャッキ能力を超えていた深さと一致した。

削孔ボーリング機械においても、Dg2の当初想定は洪積層シルト混じり砂礫層であったが、工期短縮を目的に、より削孔能力の高い機械を使用。(図-7)

シールド坑内に持ち込める大きさの制約から、小型22kwだが回転打撃式で上向き施工可能な特別製作のボーリング機械を使用した。

当初想定されない玉石が出てきて、削孔に時間がかかったが、小型だが特別製作の回転打撃式ボーリング機械を使用したことで、無事、削孔を終えた。

(b) 水中不分離コンクリート打設

オープンケーソン工法(アーバンリングはオープンケーソン工法の1種)では、地中高水圧のため、そのまま坑内の水を抜いてドライアップすると、底面の土砂が地下水と一緒に吹き出す「ボイリング現象」が発生する。この力は、地下水の深さに比例するため、今回では約20 t/m²(約200kN/m²)もの力になる。この力に対抗するため、あらかじめ底版を固めておいてから坑内の水を抜く必要があり、水中不分離コンクリートを打設して底版を固めている。

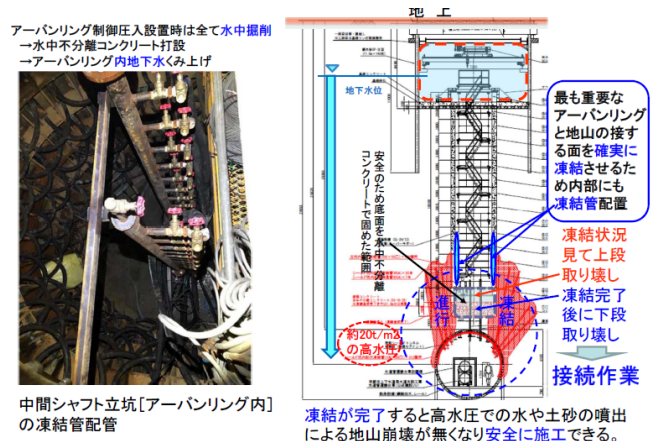


図-8 凍結造成範囲と凍結管の配置

オープンケーソン工法の立坑等では、底版を固めるのに水中不分離コンクリートの使用が必須であり、水中不分離コンクリートが開発されたためオープンケーソン工法が可能になったとも言われる。(図-8)

(c)アーバンリング内の水を汲み上げドライアップシールド坑内からアーバンリング内に削孔し連絡管設置
共同溝シールド坑内からアーバンリング立坑内へ上下の連絡管を設置。アーバンリング立坑内に、シールド坑内凍結機からの凍結管・測温管の配置を可能とし、連絡管より接続リング製作のための測量を行う。

(d)アーバンリング内部に凍結管・測温管貼付け
最も重要な、アーバンリングと地山の接する面を確実に凍結させるため、アーバンリング立坑内にも凍結管・測温管を設置するもの。(図-8)(図-9)



図-9 ドライアップが完了した状態

(6)凍結工法の実施

(a)凍結工法での凍結機運転→地山凍結して凍土造成
約-30℃のブライン液（塩化カルシウム30%水溶液）をアーバンリング内外の凍結管に循環させ地盤を約-20℃まで冷却して地山を凍結させた。(図-9)



図-10 冷凍機運転しての凍結工法実施状況

(b)水中不分離コンクリートを乾式コアドリリング削孔して撤去

アーバンリング内底部は、狭隘かつ連絡管と干渉のため機械施工（小型バックホウ）での取壊しが不可能なのとあわせ、厚生労働省の「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」では、

湿式またはこれと同等以上の粉塵対策を行うことになっている。

凍結工法下では散水しても凍結し湿潤状態にならず人力施工（手持ち式ブレイカ）も不可能。このため、同等以上の粉塵対策が可能な集塵機付きの乾式コアドリリングで削孔して撤去した。

なお、水中不分離コンクリートの厚さ2mのうち、上半分の1mについては、凍土造成が進み水圧がかからない状態（凍結管と凍結管の間の凍結範囲がつながる）になれば、応力解析を行い安全を確認した上で、乾式コアドリリングでの削孔による撤去を行い、全ての範囲の凍土造成が完了した段階で、下半分1mの削孔による撤去を行った。(図-11)

(c)凍土掘削しながら刃口リングを解体して撤去

凍土造成完了後、凍土掘削しながら刃口リング（高さ1.5m）を解体して撤去した。(図-11)

(d)凍土掘削しながら接続部6リングを設置して接続

鋼製の接続部6リングの工場製作にあたっては、連絡管よりの現地測量を3DCAD化して製作を行い、1/10鋼製模型を製作して本製作の確認を行ったほか、狭小空間での施工のため1/1鋼製模型を製作して、工場で現地組立設置の確認を行った。

接続部6リングの設置には、刃口リングが設置されていた背面の地山の凍土を約5cm程度掘削してから、接続リングを組み立てて接続を行った。

接続上部4リングについては、順次、1リングずつ凍土掘削しながら組み立てを行った。(図-12)

次に、鋼製シールドセグメントを切断してシールド坑内の足場から作業ができる様にしてから、接続下部リングの組み立てを行い、取り付け位置にセット（仮設置）した。

その次に接続中間部リングの組み立てを行った。（下端には工場で溶接プレートが設置）

接続中間部リングの溶接プレート背面に止水シールを貼付け漏水対策を行った。

その次に接続中間リングの溶接プレートと接続下部リングの溶接を行った。

最後に、接続下部リングと鋼製シールドセグメントとの接続部分の切断成型を行ってから、最後に接続部分の溶接を行い接続完了となった。

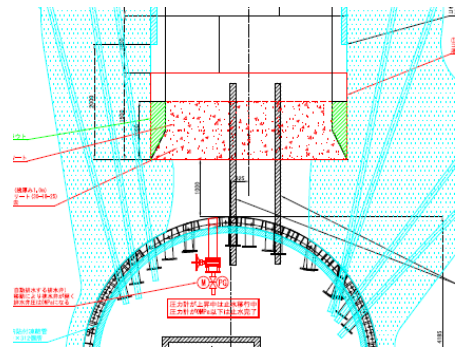
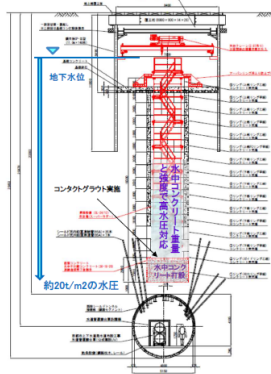


図-11 凍土掘削しながら刃口リング撤去

水中コンクリートの強度と重量で高水圧に対応安全にドライアップを実施



凍結完了後、刃口リングH=1.5mを撤去し、地山むき出しの状態

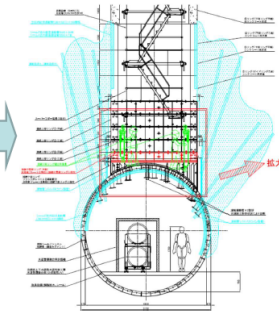


図-1.2 凍土掘削しながら接続部6リング設置して接続

(e) 接続部6リングの背面にモルタル充填

解凍時の周辺地山への影響を防止するため、接続部6リング背面に凍結時に使用可能な耐凍害性(アイスレンズの発生しない)モルタルをグラウト充填して、地山との隙間を無くした。

なお、この上のアーバンリング制御圧入の区間でも地山との隙間を無くすため、順次上に向けて地山との背面にコンタクトグラウトを行った。

(f) 凍結運転停止→解凍

地山凍結下での全ての施工工程完了を確認し、安全を十分確認した上で、凍結機の運転を停止し自然解凍した。

(g) 接続箇所鋼製シールドセグメント切断

地山の凍土解凍後、鋼製シールドセグメントの残りの部分(周囲の部分)の仕上げ切断を行い、鋼製シールドセグメントの切断を完了した。

(h) 接続箇所鋼製アーバンリング側の二次覆工コンクリート打設

接続箇所鋼製アーバンリング側にひび割れ防止鉄筋φ10mmを組み立て、工場製作の型枠を設置し、高流動コンクリート(自己充填性ランク2)で二次覆工コンクリートを打設した。

鋼製アーバンリング形状から、充填不足やエアが溜まり易く、この防止のため、ジューテングーや吸気ホースを使用し、バイブレーターの効果を含めた充填状況確認、エア抜きを行っている。(接続箇所以外は工場で充填済み)

(i) 接続箇所鋼製シールドセグメントの二次覆工コンクリートとモルタルの打設

鋼製シールドセグメントの下半鉄筋を組み立て、インバートコンクリートを打設してから、上半鉄筋を組み立て、工場製作の下半型枠を組み立て、下半の二次覆工コンクリートを高流動コンクリート(自己充填性ランク2)で打設した。

その次に、工場製作の上半型枠を組み立て、上半の二次覆工と接続下部リングを高流動モルタルで打設一体化させた。

なお、上半の二次覆工では、鋼製セグメントの形状から最も充填不足やエアが溜まり易く、これを防止するため、高流動モルタルとしている。

なお、上半二次覆工では、長期の耐久性確保のため、塗布型高性能収縮低減材で養生を行ったうえ、比較的塗膜の厚い剥落防止材を塗布している。

(7) 凍結工法実施の留意点とその対応

(a) 凍結管列の凍結結合に対する地下水流の影響

凍結管の配置計画上の留意点としては、地下水流による影響を考慮する必要があり、地下水流の速いところでは、凍結造成が進まない。

凍結可能な地下水流の限界流速は1m/日程度と大変遅い流速が目安とされる。

地下水が①均一に流れる状態から、凍土造成進行につれ、凍結管と凍結管の間の地下水流れる断面が狭くなり、②凍土と凍土の隙間の地下水流速が早まる。③凍土が一体化されダムアップで周囲の地下水流速が早まる。

今回の鋼製アーバンリング中間シャフト立坑の凍結工法の実施では、③の地下水流速が早まる位置がアーバンリングと地山の接触面になる可能性があるため、アーバンリングの内側と外側の両側に凍結管を配置して確実に凍結させる様にしているもの。凍結し難いところから先に凍結させるのが確実な方法である。

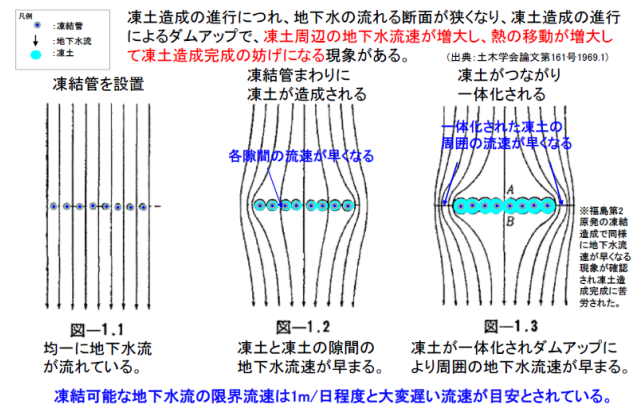


図-1.3 凍結管列の凍結結合に対する地下水流の影響

(b) 凍土造成の状況把握と凍結機の24時間維持管理

凍土造成の状況把握は、测温データからの凍土予想図コンターで確認した。

地山開放の工事実施の際には、西松建設の社内で「凍結工法の委員会」を開催し、予定通りの凍土造成の完了の安全確認を行った。

事前に予想していた凍土造成完了に必要な日数は42日間で、予定通りの日数で凍土造成完了した。

また、凍結機の運転停止は、凍土が溶けて危険な状態となるため、24時間維持管理を行った。

(8) アーバンリングの施工精度と品質について (大変良好な施工精度で施工完了)

大量の玉石層を始めとした、非常に厳しい施工条件のなか、安全確実に施工できるための各種工法を組み合わせることで施工を行った結果、施工精度及び品質とも大変良好な結果となった。(図-14)

特に、アーバンリング制御圧入の施工精度については、「アーバンリング最高水準の精度」であった。

圧入深さ：設計との差0mm（刃口リングで確認）

鉛直軸：傾斜0°

平面位置：D=48mm（南に18mm、東に45mm）

ローリング：反時計方向1.0°

（規格値：D=300mm D=48mmは規格値の16%）

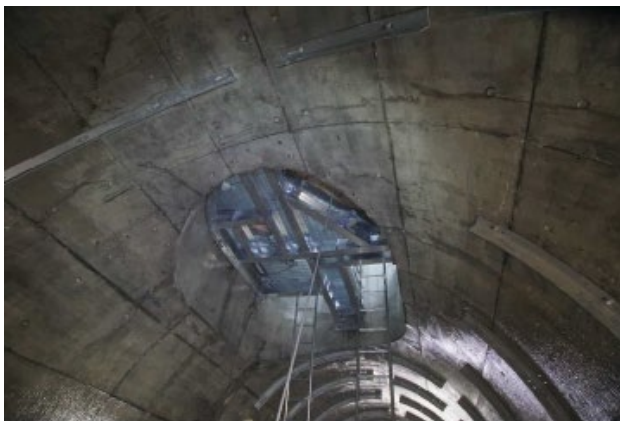


図-14 アーバンリング立坑と共同溝シールドの接続箇所

3. 地下防水扉の設置と施工上の課題

(1) 地下防水扉の必要性～桂川の地下を横断～

河川管理施設等構造令第71条に関し、河川地下を横断するトンネルに関する規定で、工作物設置許可基準の第18章「河底横過トンネル」第36の1の③に「兩岸の堤内地側に制水ゲートを設置するものとする」とされる。

桂川の河川水が大規模地震等による共同溝の崩壊により、共同溝シールド坑内に流入した場合、地下防水扉により堤内地（市街地）への河川水の流入を防止するもの。

共同溝シールドトンネルは、開削トンネルと比較して地震等には比較的強い構造だが、工作物設置許可基準の解説にシールドトンネルが対象になると明記され、桂川兩岸の地下防水扉は、万が一の大規模災害の発生の際に必要な施設で、防水扉は地下の堤防の様なもの。

(2) 地下防水扉の機能と構造

地下防水扉は、桂川兩岸地下の堤内地側にそれぞれ設置され、桂川がHWLに達した際に、河川水が大規模地震等による共同溝シールド損壊により坑内流入の場合の水圧に耐える構造で、水圧は到達立坑側17 t/m²、中間シャフト立坑側30 t/m²。長期耐久性考慮し材質SUS304、板厚は到達立坑側30mm、中間シャフト側40mmとなる。

防水扉には、維持管理用が入る60cm幅の扉が各々2枚設けられ、水圧で閉まる方向に扉が設置されている。設備の完成時には自動開閉装置を整備予定。

また、それぞれの参画企業者の施設を通せる構造にな

っており、参画企業者の施設が整備されるまでは、堤外側からの水圧に耐えられる蓋が設置されている。(図-15)



図-15 中間シャフト側地下防水扉（右に水道管Φ600mm）

4. アーバンリング立坑の凍結工法での接続の感想

(1) 凍結工法の歴史

「凍結工法」は、海外では鉱山の立坑の補助工法に使用され始めたが、日本では都市部のシールドトンネル工事の立坑で使用される国内開発技術で発展し、東京湾横断道路での使用はじめ、500件以上の施工事例。

(2) 地山強度確保と高い信頼性での凍結工法の適用性

「凍結工法」は、凍結状態管理を適切に行えば、確実な強度の凍土造成が行える工法で、高い地山強度確保や深い施工深さなどで他工法で対応できない場合に有効な工法で今後も使用されると思われる。地中深くで地山開放して作業を行う必要がある場合、地山強度だけでなく信頼性の面からも唯一の工法であると考えられる。

(3) 今回の凍結工法を実施しての感想

地中深くでは、深さに比例し高圧の地下水と土砂の噴出が課題となる点を、改めて認識した。アーバンリング坑内水中掘削の時点では水圧でバランスされるが、水中不分離コンクリートを坑内底盤に打設し抵抗させ、水を抜きドライアップしたところからは、高水圧など自然の力を安易に考えてはいけない事を痛感した。

謝辞：今回の鋼製アーバンリング制御圧入や凍結工法での接続や地下防水扉の設置で、同一坑内での水道本管工事と輻輳するなか、数々の技術的な提案と対応で安全確実に工事を完了させた西松建設（株）と、アーバンリング制御圧入の加藤工業（株）、凍結工法を開発され多数の施工実績を持つ（株）精研と、地下防水扉ではステンレス加工技術の愛知製鋼（株）など、各専門業者の一体的な協力で、安全確実に素晴らしい施工精度と品質で工事が完成したことに感謝します。

参考文献

土木学会：土木学会論文集第161号1969.1凍結管列の凍結結合に対する地下水流の影響について

