

国道2号淀川大橋の大規模修繕について (中間報告)

大前 利夫¹

¹近畿地方整備局 大阪国道事務所 (〒536-0008大阪府大阪市城東区関目2-5-25) .

国道2号淀川大橋は、供用後90年以上が経過しており、これまでも補修補強を行ってきたが、補修箇所の再劣化など抜本的な対策が必要な時期となっているため、大阪国道事務所は2016年度（平成28年度）から床版を取り替える大規模修繕に着手した。

現場条件として、建設から90年以上が経過していることから、建設当時の詳細な記録が残っていないという不確実性や、施工時の各部材の応力状態が不明であるなど、仕様の前提となる現場の実態把握が困難なことから、直轄で初めて「設計交渉・施工タイプ」の契約方式を採用して、施工業者による実施設計を行い、採用された技術提案内容を盛り込んで、現在、工事を進めている。その新しい契約方式を活用した橋梁の老朽化対策の施工事例を紹介する。

キーワード 橋梁, 老朽化, 大規模修繕, 床版取替

1. はじめに

(1) 淀川大橋の概要

国道2号淀川大橋は、大阪市福島区と大阪市西淀川区の区境にある淀川を渡河する橋長724m、橋梁形式が、中央径間の鋼6径間単純上路式ワーレントラス橋、両側径間が鋼12径間単純桁橋からなる橋梁である。(図-1) 淀川大橋は、1926年(大正15年)に大阪府により建設され、1945年(昭和20年)の第二次世界大戦時の大阪大空襲で被災したり、高度経済成長時に大阪平野の地盤沈下の影響を受けたり、1975年(昭和50年)までは、橋梁幅員の中央を路面電車が走行していたりと、90年以上にわたり多くの歴史を刻んできて、今なお阪神間の動脈として約34千台/日の自動車交通や5千人/日以上自転車歩行者の交通を支えている橋梁である。



図-1 淀川大橋の位置図

(2) 工事概要

本橋は、戦災や地盤沈下、兵庫県南部地震と損傷を受けており、主なものだけでも今までに11回の補修・補強工事を行ってきた。適切な時期に適切な維持管理を行うことで90年以上供用してきたが、直近の2013年度(平成25年度)の点検に基づく橋梁の健全度判定は「Ⅲ」と診断されている。具体的な損傷内容は、主桁の腐食、主構トラスの亀裂・腐食、縦桁の腐食、床版のうき・剥離・鉄筋露出と、主要部材で多くのC2判定となっており損傷が著しい状況である。(写真-1)



写真-1 床版や橋桁の損傷状況

なお、総合診断結果には特記事項として、「床版は劣化して防水性が失われており、それからの漏水により橋梁全体にわたり腐食が進行しており、個別損傷に対する対症療法的な補修では、本橋を長期にわたり健全な状態を維持することは困難と想定され、建設後 90 年以上経過した現状では抜本的な大規模修繕が必要。」と記載され、今回床版の取り替えを行うこととした。

また、本工事は老朽化対策が最大の目的であるが、本橋の現在の耐震性能は低いため、老朽化対策以外にも耐震性能を向上させる必要があることから、今回の工事で取り替える床版に鋼床版を採用した。現在のRC床版から鋼床版に取り替えることにより上部工荷重を大幅に軽減させ、橋脚の補強をすることなく耐震性能を向上させることも目的としている。

なお、本橋は重要な幹線道路であることから、本工事による通行止めはできないため、橋全体を 3 ブロックに分割して施工することとし、工事期間中の約 3 年間は片側 2 車の車道を片側 1 車に規制して工事を行うものである。

2. 契約方式

(1) 「設計交渉・施工タイプ」の適用について

本橋は、建設当時の詳細な記録が残っていないという不確実性や、施工時の架設時応力、現在の各部材の応力状態が不明であるという状況および度重なる補修・補強の影響などにより今回工事の施工段階、完成時の構造物の挙動について、具体的な施工方法に基づく検討が必要となることや、施工者独自の最新の技術や知見等を反映し、施工時のリスクを低減し効率的な検討を行う必要があるため、直轄で初めて「設計交渉・施工タイプ」の契約方式を採用した。「設計交渉・施工タイプ」は、競争参加者から提出される技術提案に基づいて選定された優先交渉権者と設計業務の契約を締結し、施工者による実施設計を行い、設計の過程で技術提案内容や価格等の交渉を行い、交渉が成立した場合に工事の契約を締結する契約方式である。



写真-2 対傾構の上に床版が載荷している

技術提案書には、「床版撤去時及び完成後の橋の構造体としての安全性を確保する提案」「交通規制期間短縮に向けた提案」「維持管理費の低減や維持管理の効率化に資する提案」の3つのテーマを設けて、最も高い評価の提案者を優先交渉権者として、実施設計業務の契約を締結した。

3. 工事着手後の損傷状況

(1) 不可視部（主桁上フランジ）の損傷状況

本橋の鈹桁部は、主桁の上フランジが床版の中に埋まっている変わった構造となっている。通常の橋梁は、主桁の上フランジの上に床版が設置されているところであるが、本橋の床版は、主桁に連結された対傾構の上に設置された構造となっている。これは、建設当時に、電車荷重を考慮して主桁間隔の約 3m に耐えられる床版とすると、非常に厚い床版となることから、対傾構を約 1m 毎に設置して、その上に床版を設置することで、床版厚を薄くする当時の工夫の結果と思われる。そのため、床版の主鉄筋も通常の橋軸直角方向では無く、橋軸方向に設置された構造となっている。その後、路面高を調整するため、床版の上に調整コンクリートを設けたことから、主桁の上フランジが床版の中に埋まった構造になっている。（写真-2,3）

点検時に確認出来ている可視部の鋼材が著しい腐食状況であることから推察すると、床版の中にある主桁上フランジも腐食が著しく、最悪の場合は、上フランジが腐食により無くなっていることも想定しながら工事着手したところである。

今回の床版取替については、淀川の非出水期（10/16～6/15）の間しか施工が出来ないため、床版撤去後に上フランジの健全性が損失している場合、その対策を行っている、非出水期中の施工が困難になることから、交通規制開始早々に、可視部における損傷状況を参考に代表 3 径間分だけ抽出して床版の試掘を実施した。

試掘の結果は、上フランジの上面しか確認出来ないが、橋の下から確認している鋼材部分とは違い、比較的健全



写真-3 主桁上フランジが床版の中に埋まっている



写真-4 床版に埋もれている主桁上フランジ及びウェブ上部の状況

な状況であった。実際に、床版撤去の段階で確認しても、一部孔食している部分も確認されているが、全般的には、上フランジの上面は健全な状況であったと言える。しかし、上フランジの下面やウェブ上部で床版に埋まっていた部分については、上面より水が滞留しやすい状況だった様で、腐食による孔食や減肉箇所も多数確認されている。（写真-4）ただ、当て板補強等で収まるレベルの損傷具合のため、新しい床版架設の工程に影響を与えるものではなく、工事着手1年目の状況としては、計画通りの工程で進められている状況である。

(2) 各部位の損傷状況

定期点検により近接目視による点検を実施しているため、損傷状況を把握できているが、直近点検が2013年度（平成25年度）で、点検後4年が経過していること、また、点検時とは違い、固定足場を設置しての点検になるので、より詳細な状況把握ができることから、再度、詳細調査を行った。

全体的な傾向としては、桁端部は伸縮装置部からの漏水の影響で、各部材とも腐食がかなり著しい状況である。また、鋼床版に取り替えることにより不要となる部材の縦桁、横桁も、腐食がかなり進行している。

鈹桁部については、主桁の上フランジ、ウェブ、下フランジの状況を報告する。上フランジの上面については、前項のとおりであるが、本橋梁は、伸縮装置の位置と主桁の遊間の位置が一致していない特殊な構造となってお

り、伸縮装置の下部については、漏水により腐食が著しく、箇所によっては孔が空いている状況が見受けられた。（写真-5）ウェブについては、上フランジの下面同様に、床版に埋もれている部分が、腐食している状況であった。下フランジについては、水が滞留しやすい箇所が著しく腐食していた。具体的には、下フランジの上面で、僅かな傾きで排水できず滞留する様な場所になる。（写真-6）

トラス部については、主構の状況を報告する。トラスについても鈹桁と同様で、フランジの下面で水切りの悪い箇所、フランジの上面で、水が滞留しやすい箇所に、著しい腐食が確認された。

これらの腐食損傷部に対しては、詳細調査、減肉量の計測により補修要否を判断し、当て板補強、部材取り替え等を実施した。



写真-5 伸縮装置の下部について腐食が著しい



写真-6 腐食による孔食状況

4. 床版取替時の応力状況

本橋は、古い時代に建設された長大橋で、建設当時の詳細な記録も残っていない不確実性や、既存部材にかかる応力状態が不明である状況下で、一般車両を供用させながらの施工になるため、常に各部材に応力がかかった状態での床版撤去時及び設置後の橋の構造体としての安全性を確保する必要があることから、最初に着手する鈹桁1径間とトラス1径間において、応力状態の計測を行い、事前に解析等で設定した応力状態と比較しながら施工を行った。

(1) 鈹桁の応力状態

鈹桁の下フランジについては、引張部材になる。I期施工の施工範囲になるG1桁～G3桁については、RC床版撤去中はクレーンが載荷されていることから、施工前より引張応力が大きくなり、RC床版撤去後は応力が最も小さくなり、鋼床版架設後は応力が増加するが施工前より小さい応力状況となった。(図-2)

支間中央のウェブは、元々、せん断応力が小さいこともあり、施工状態の違いによる応力変動は、あまり見られなかった。

桁端のウェブについては、RC床版撤去中は応力に大きな変動は見られず、RC床版撤去完了時に応力が小さくなり、鋼床版架設により荷重が載荷されると、応力は僅かに大きくなる傾向である。施工前に比べると小さい応力状態になっている。(図-3)

いずれも、事前の解析値と同様の傾向であり、I期施工の範囲外になるG5桁～G7桁は、施工の影響を受けにくいため、応力変動は僅かなものであった。

(2) トラス部の応力状態

次にトラス部の応力状態として、上弦材は圧縮部材である。I期施工の範囲になるG1～G2については、RC床版撤去中は、クレーン荷重により施工前より圧縮方向の応力が微増し、RC床版撤去完了後は死荷重軽減により圧縮方向の応力が軽減し、鋼床版架設により荷重が載荷されると、圧縮方向の応力が増加する傾向であった。

下弦材については引張部材である。RC床版撤去中のクレーン荷重により施工前より引張方向の応力が大きくなり、RC床版撤去完了後は死荷重軽減により引張方向の応力が軽減し、鋼床版架設により荷重が載荷されることで、引張方向の応力が増加する傾向であった。(図-4)

斜材については、圧縮部材と引張部材からなる。RC床版撤去中のクレーン荷重により、圧縮部材は圧縮方向に、引張部材は引張方向にそれぞれ大きくなる。RC床版撤去完了後は、死荷重軽減により引張部材・圧縮部材ともに応力がそれぞれ軽減した。鋼床版架設により荷重が載荷されることで、圧縮部材・引張部材はともに、そ

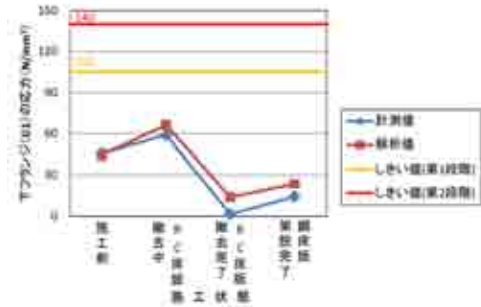
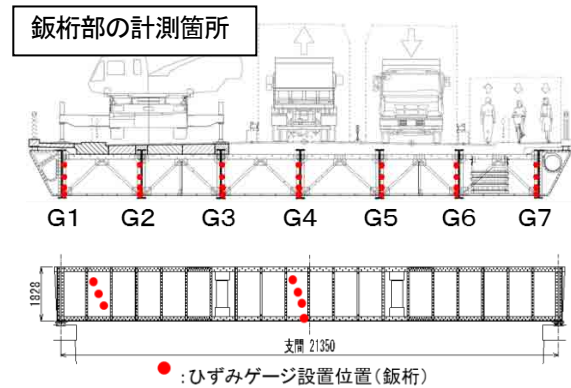


図-2 下フランジ (G1) の応力

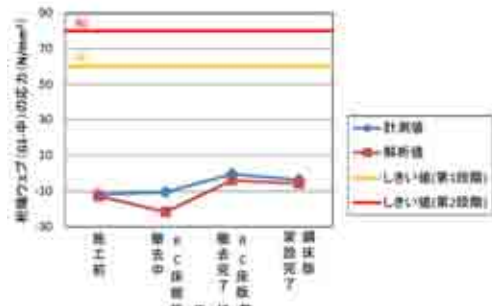


図-3 桁端のウェブ (G1) の応力

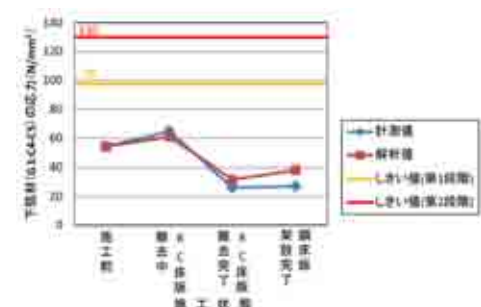
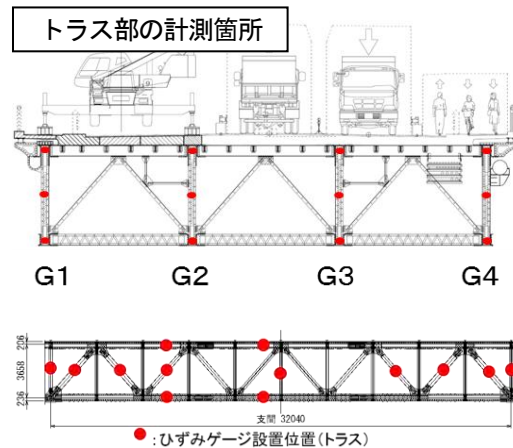


図-4 下弦材 (G1) の応力

れぞれ応力が増加する傾向であった。

施工中の応力状況については、事前の解析値と同様の傾向を示し、力学的にも想定通りであった。また、たわみにおいても、鈹桁・トラス共に床版撤去後に桁が上方に上がり、鋼床版架設により下がるという傾向を示しており、施工中の挙動も想定通りであったため、安全性を確保しながらのⅠ期施工の床版取替が完了できた。

5. まとめ

道路管理施設の老朽化が進んでいる中で、不確定要素の多い条件の橋梁に対して直轄で初めての契約方式を適用して、橋梁の大規模修繕に着手した施工事例を紹介した。

初めての契約方式のため、手探りの部分も多いが、不確実な条件下での工事に対して、工事着手前には、3Dスキャナを用いて、実物の橋梁の計測を行うことにより、

現地に適合する製作部材の製作図を正確に作成したり、橋桁の高さを正確に把握できたことにより鋼床版の高さ調整に反映できた。また、床版に埋もれている主桁上フランジについては、当初、腐食により著しい損傷が想定されていたが、試掘で健全性を確認すると共に、リベットの配置間隔が下フランジと一緒にあることを確認して高さ調整のフィラープレートの製作にも活用できた。事前に不確実な条件を着実に確実なものにしていくなど施工業者が実施設計を行ったメリットや、施工業者の技術力を反映した契約内容であったことから、現在、工事は順調に進んでおり、全体の1/3の床版取替が完了したところである。今後、工事が完成した段階で報告を行う予定である。

本工事に着手するまでにご協力いただいた方、また現在、本工事にご尽力いただいている工事受注者、そして、工事実施にご理解頂いている地元の方や淀川大橋利用者に、この場を借りて深くお礼申し上げたい。

国立京都国際会館展示施設の新築工事における「墨入れコンクリート」の施工管理について

○赤池 亨¹・岩村 正一²

¹近畿地方整備局 京都営繕事務所 (〒606-8395京都府京都市左京区丸太町川端入ル東丸太町34-12)

²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)

国立京都国際会館展示施設の新築工事において、既存建物との調和を図るため意匠設計上の要求として「墨入れコンクリート」の施工が計画された。「墨入れコンクリート」とするには、調合計画、スランプ値の管理、打設計画に至るまで、通常の施工計画とは異なる検討が必要となった。近畿地方整備局営繕部においては「墨入れコンクリート」の打設は初めてであり、その施工管理手法については手探り状態で進めた。様々な検討と試験を繰り返した結果、良好な表面仕上げの墨入れコンクリートを打設する事ができたので、その結果について報告する。

キーワード コンクリート、新手法、施工管理

1. はじめに

国立京都国際会館は1966年に整備された我が国最初の国立国際会議場である。当館本館はコンクリート打ち放し仕上げの外観であり、一部に「墨」を添加したプレキャストコンクリートを使用している。本館建築後既に50年が経過し、展示スペースの確保が不十分となったことなどの理由により、敷地内に展示施設を増築する運びとなった。そこで、今回増築する展示施設外観に本館外観と調和するよう「墨入れコンクリート打ち放し仕上げ」を採用した。この仕上げはJISを外れた規格であり、また近畿地方整備局営繕部では現場打設の施工実績がないため、採用に当たり施工段階での検証が必要となった。

今回、良好な表面仕上げの「墨入れコンクリート」を打設することを目指し、そのために適切な調合計画および適切な施工計画についての検証を行ったので、その結果について報告する。



写真-1 国立京都国際会館本館全景

2. 施設概要および墨入れコンクリートの採用

当館本館は「周辺の山並みの美しさに調和させる自然に溶け込むデザイン」、「当時の現代的社会的機能への対応」、「自然および歴史的建築的風土との照応」をデザインコンセプトに建設された建物である。

当施設は京都市景観条例の対象地区に立地している。今回、展示施設を増築にあたり景観に配慮した建物となるように市と協議を行い、「既存施設との調和と革新」を展示施設のデザインコンセプトとした。展示施設の工事概要を次に示す。

工事場所：京都市左京区岩倉大鷲町422

敷地面積：154,246㎡

構造規模：展示場、鉄骨鉄筋コンクリート造

(一部鉄骨造) 地上2階、延べ床面積 4,527㎡

工期：平成28年3月～平成30年6月



図-1 今回建設の展示施設全景パース

「調和」の具体的な手法としては、既存施設の基壇部分と高さを統一することや、既設本館に合わせた墨入れコンクリート仕上げを採用することとした。

特に、既設本館には「墨を添加したプレキャストコンクリート」を一部使用しており、展示施設の外壁にも一部に「墨入れコンクリート仕上げ」を採用した。

今回はコンクリートに黒色の「顔料」を添加することで「墨入れコンクリート」とし、薄い黒色となるようにした。顔料の主成分は無機顔料の酸化鉄を使用した。

設計段階にて、無機顔料を添加してもコンクリート性能に影響が無いことを示す技術資料を建築主事へ提出し、了解を得ていた。この際の顔料添加量は概ねセメント重量比 4% 程度とした。

力をコンクリートで負担する構造である。補正値を追加した強度（以下呼び強度）が 30 N/mm² 以上となるかを確認する。

1回目の試験練りの結果、強度は十分満足した。しかし、スランプ値は顔料添加前の 19.5cm に対して、顔料添加後は13cm となり、かなりのスランプロスが生じた。スランプロスとは、例えば生コンの存置時間、気温、配合など何らかの原因により流動性能が著しく落ちた状態のことである。

スランプロスを軽減させるため、調合計画を再検討する事になった。（表-1 参照）

表-1 試験練り 1回目の結果

《 2017年1月27日 試験練結果 》					
※30-18-20N 呼び強度30N/mm ² スランプ値18cm 粗骨材最大20mmを示す。					
No.	配合	混和剤	顔料	スランプ (cm)	備考
1	30-18-20N	T社 高性能A E 減水剤 収縮低減型	—	19.5	ベース コンクリート
2	30-18-20N	T社 高性能A E 減水剤 収縮低減型	4%	13.0	顔料 No. 4330 (粉末)

3. 調合計画における検証

現場施工段階では、顔料を添加しても施工性に問題が無いことを実際に確認する必要があった。

まず、「コンクリート打設前の調合計画」について検証を行った。

3-1. 当初設計時の調合計画による試験練り

当初設計図書に明示された調合計画の一部を次に示す。

- ・顔料添加前のコンクリート：JIS規格品とする
- ・材料：普通ポルトランドセメント
- ・設計基準強度：24 N/mm²
- ・スランプ値：18cm（スランプの許容差±2.5cm）
- ・顔料：重量比 4%程度含有

顔料の主原料は酸化鉄とし、メーカー既製品から黒色 No. 4330（粉末状のもの）を選定した。

なお、固まる前の生コンクリートの流動性を増して施工性を高めるため、次の混和剤を使う予定とした。

- ・混和剤 T社 高性能AE減水剤 収縮低減タイプ

【2017年 1月27日】（試験練り 1回目）

まずは、設計図書通りの配合計画で問題が無いが、施工現場へ持ち込んで良いかどうかを確認するために、事前に工場にて1回目の試験練りを行った。

一つ目のポイントはコンクリートがほどよく打設が出来るかどうかの施工性の確認である。ここではスランプ値が大きく関係する。スランプ値が大きいと流動性の高いコンクリートとなるが、値が大きすぎるとゆる過ぎるコンクリートとなり、セメントと骨材が打設時に分離するなど、均質なコンクリートにならない事もある。そのため建築工事としてはスランプ値の標準を概ね 18cm 程度としている。

もう一つのポイントは固まった後の圧縮強度の確認である。鉄筋コンクリートは引張力を鉄筋で持たせ、圧縮



写真-2 JIS規格品の調合コンクリートに顔料を添加

3-2. スランプロスの原因追及

顔料を添加した事によりスランプロスが発生したのは明確であったため、顔料メーカーへ過去の事例について問合せしたが、今回の様にかかなりのスランプロスが生じた事例はなかったと回答があった。その為、現場主体で試験練りを繰り返し行うことで、スランプロスの原因の追及を行った。

【2017年 2月 2日】（試験練り 2 回目）

2回目の試験練りでは、顔料添加前のコンクリート（以下ベースコンクリート）のスランプ値を大きくして、顔料添加後のスランプ値が規定値内に収まるかどうかの

検証を行った。

1回目の試験結果を考慮し、JIS規格は外れることになるが顔料添加前のスランプ値を22.5cm にして検証した。結果は顔料添加後のスランプは18cm となり、スランプロスが発生したがちょうど良いスランプ値となった。

【2017年 4月 4日】（試験練り 3 回目）

2 回目の試験結果を踏まえ、より細かい調査による検証を行った。顔料添加前の時点でJIS規格は外れることになるが、

- ・細骨材率を 2%下げて粗骨材の割合を変えたもの
 - ・水量を重量比で 5kg増やしたもの
- をそれぞれ調合したものを比較した。

その結果、細骨材率や水量がスランプロスに関係する事が分かった。

一般的に関西地区の骨材事情は良くないとされている。それは、きめの細かい丸みを帯びた流動性の高い「山砂」が手に入れにくく、山の岩を細かく砕いた「砕砂」を利用しているからである。当然砕砂は山砂に比べて尖った部分が多く、流動性を増すために水を多く必要とする。コンクリート量と水量の比率では水量が多くなり、乾燥収縮によりひび割れの発生原因にもなり、品質上は好ましくないため、一般的なコンクリートには各種混和剤を添加して調合補正を行い品質を確保している。(図-2 参照)

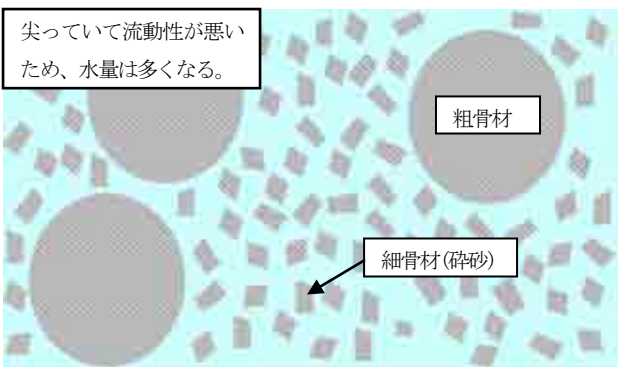


図-2 細骨材を砕砂とした場合のイメージ

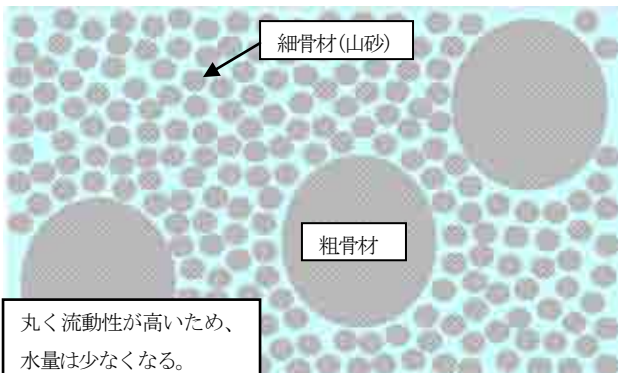


図-3 細骨材を山砂とした場合のイメージ

一方で、京都地区は良質な山砂が確保できるため、その分水量を減らした調合計画が可能となるが、今回はそのことが災いする皮肉な結果となった事が分かった。(図-3 参照)骨材事情の悪い関西地区で、顔料添加後にスランプロスの発生がみられなかった理由が想定出来た。

3-3. 調合計画変更による改善策の検討

前述のとおり、スランプロスは細骨材と水量に関係することが分かった。しかしながら、顔料添加前のコンクリートをJIS規格の認定品とする際には、どのメーカーのどの種類の混和剤とするか、どこの産地の骨材を利用するかを決められている為、容易に材料を変更することが出来ない。そのため、今回使用する細骨材を京都地区以外のものに変更することは出来なかった。

【2017年 5月24日】（試験練り 4 回目）

今回は、3回目までの試験結果を踏まえ、施工業者からの提案を基に次のように変更し試験練りを行った。

- ・顔料添加後のスランプロスが確実に起こることが分かったため、設計と協議し、ベースコンクリートのスランプ値を18cmから21cmに変更した。スランプ値の変更が構造的に問題無い事は確認している。
- ・顔料添加率は 3%, 4 %の 2種類を比較した。

なお、コンクリートの練り混ぜ後の時間経過によるスランプ値の確認も同時に行った。(表-2 参照)

表-2 試験練り 4 回目の結果

《 2017年5月24日 試験練り結果 》					
No.	配合	混和剤	顔料	スランプ (cm)	備考
1	30-21-20N	T社 高性能A E 減水剤 収縮低減型	—	20.5	ベース コンクリート
				↓	
			3%	14.0	顔料 No. 4330 (粉末)
		スランプ ロス発生	3%	15.0	5分経過後
			3%	12.5	練混ぜ時間60 秒増
3	30-21-20N	T社 高性能A E 減水剤 収縮低減型	—	20.5	ベース コンクリート
				↓	
			4%	14.0	顔料 No. 4330 (粉末)
		スランプ ロス発生	4%	12.5	5分経過後
			4%	12.5	練混ぜ時間60 秒増

その結果、ベースコンクリートのスランプ値を変更し、顔料の配合を変えても、想定通り施工性の確保が十分出来る値にはならない事が分かった。

【2017年 6月 9日】（試験練り5回目）

今までの試験練りではJIS規格のコンクリートを調査した後に顔料を添加していたが、今回は混和剤を配合する前に顔料を添加し、スランプロスとなるかの検証を行った。その結果、顔料添加後にスランプロスが発生した。また、経時が経過するにつれ、更にスランプロスが進むことが分かった。

【2017年 6月16日】（試験練り6回目）

今回は、次の様に条件を設定して、JIS規格調合と「混和剤」の相性の検証を行った。

- ・実際には京都地区では使用できないが大阪地区で使用可能な混和剤を使用して比較をした。
- ・顔料を粉末タイプと顆粒タイプを用いて比較した。顆粒タイプとは粉末タイプをのりの様なもので少しだけ固めて、つぶつぶ状にしたものである。
- ・顔料添加率を 2 %にして比較した。

なお、ベースコンクリートのスランプ値は 21cm を基本とした。

顔料添加率、顔料タイプ、混和剤を変更した結果、スランプロスは改善されて、良好な結果を得ることが出来た。（表-3参照）

3-4. 調査計画の決定

【2017年 6月23日】（試験練り 7回目）

前回の大阪地区で使用可能な混和剤の良好な結果を踏まえて、今回は、京都地区において実現可能な配合計画の検証を行った。コンクリート工場や工事受注者の本社研究担当とも協議した結果、次の条件にて検証を行った。

- ・実際に京都地区で使用可能な混和剤の中から、別メーカーの「遅延型」の混和剤を使用した。なお、遅延型にはコンクリートの硬化を遅らせる効果がある。
- ・顔料添加率は 3%, 4%で比較した。
- ・顔料を粉末タイプと顆粒タイプで比較した。

検証の結果、次の配合がスランプロスが少なく、時間経過による変化も少ない良質で安定した材料となることが分かった。（表-4 参照）

- ・混和剤は別メーカーの「遅延型」とする。
- ・顔料は「顆粒タイプ」とする。
- ・顔料添加率は「3 %」とする。

混和剤は当初「T社 高性能 AE 減水剤 収縮低減タイプ」を使用する予定であった。しかし、様々な検証を行い、京都地区特有の骨材事情を把握した結果、コンクリートのひび割れ防止抑制効果のある「収縮低減型」よりも、顔料添加後のスランプロスを減らせるであろうと思われる「遅延型」を使用の方が良好な結果になることが分かった。

表-3 試験練り 6 回目の結果

《 2017年6月16日 試験練り結果 》					
No.	配合	混和剤	顔料	スランプ (cm)	備考
1	30-21-20N (JI S外)	M社 高性能AE 減水剤 (大阪地区採用)	-	21.0	ベースコンクリート
		混和剤を大阪地区のものに変更	4%	19.5	顔料 No. 4330 (粉末)
			4%	18.0	30分後
			4%	13.5	60分後
4	30-21-20N	T社 高性能AE 減水剤 収縮低減型	-	22.0	ベースコンクリート
		顔料を顆粒に変更	4%	20.0	顔料 No. 355 GP (顆粒)
			4%	17.0	30分後
			4%	13.5	60分後 テストピース採取
3	30-21-20N	T社 高性能AE 減水剤 収縮低減型	-	22.0	ベースコンクリート
		含量を2%に変更	2%	21.5	顔料 No. 4330 (粉末)
			2%	20.5	30分後
			2%	17.0	60分後 サンプル作成

表-4 試験練り 7 回目の結果

《 2017年6月23日 試験練り結果 》					
No.	配合	混和剤	顔料	スランプ (cm)	備考
1	30-21-20N (JI S適合)	M社 高性能AE 減水剤 (遅延型)	-	20.0	ベースコンクリート
		混和剤を遅延型に変更	4%	20.0	顔料 No. 4330 (粉末)
			4%	18.0	30分経過後
			4%	16.0	60分経過後
2	30-21-20N (JI S適合)	M社 高性能AE 減水剤 (遅延型)	3%	21.0	顔料 No. 4330 (粉末)
		顔料を3%に変更	3%	19.0	30分経過後
			3%	18.5	60分経過後
			3	30-21-20N (JI S適合)	M社 高性能AE 減水剤 (遅延型)
顔料を顆粒に変更	3%	21.0			30分経過後
	3%	19.0			60分経過後

【2017年 7月 6日 (試験練り 8 回目 最終確認)

7回目の試験練りで良好な結果が出たが、1回の結果で進めることはせず、外気温や湿度が違う状況でも同様の結果が出るかの検証を行った。

その結果は良好であった。前回同様に顔料添加率は4%よりも3%の方が施工性が良質であった。

顔料添加率を3%まで減らすと「墨入れコンクリート」の仕上がりの色が薄くなるのが懸念された。しかし、その色味を設計担当に確認したところ、イメージした色とはさほど変わらないと確認できたため、添加率を3%に変更する事の実現性が得ることが出来た。

以上により、約5ヶ月間にわたる検証の結果、調査計画が決定した。

4. 施工計画における検証

次に、「コンクリート打設時の施工計画」について検証を行った。

4-1. 施工計画時の課題

施工性の良い材料を使用してもコンクリート打設時に慎重に施工を行わない限り、型枠を脱型した後、良好な表面仕上げのコンクリート打放しとする事は出来ない。例えば、コールドジョイントによる色むらやジャンカと呼ばれる打設不良箇所などが生じてしまうことがある。(写真-3 参照) そのため、打設時点での施工手順を慎重に検討する必要がある。

コンクリート打設時はバイブレーターで振動を与えたり、木づちをたたきながら施工する必要があるが、どの程度の間隔や時間で行えば一番良い打設が出来るかを検証する必要がある。バイブレーターは現代のコンクリート打設になくはならない道具であるが、長い時間かけ過ぎたり、施工の間隔をとらずに使うと、コンクリートに過剰な振動がかかり、セメントと水、骨材などを分離させてしまう危険性があり、品質を低下させる原因にもなり得る。



写真-3 ジャンカの不具合例

4-2. モックアップを作成しての試験施工

コンクリートは一度打設をすればやり直しが出来ないため、慎重に施工を行う必要がある。そのため、モックアップを作り試験施工による検証を行った。

試験用の型枠を組んで、バイブレーターをかける時間を10秒、20秒、30秒、40秒の4パターンで行い、型枠脱型後にどのような仕上がりになるかを確認した。(図-4 参照)

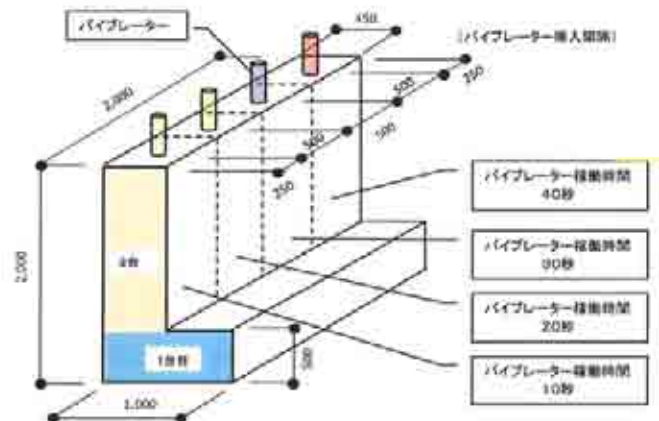


図-4 モックアップによる試験施工

その結果、バイブレーターをかける時間の違いによる仕上がりの変化は見られなかった。(写真-4 参照) 混和剤を「遅延形」にしたため、コンクリートが固まりにくくなったことが影響したと推測される。

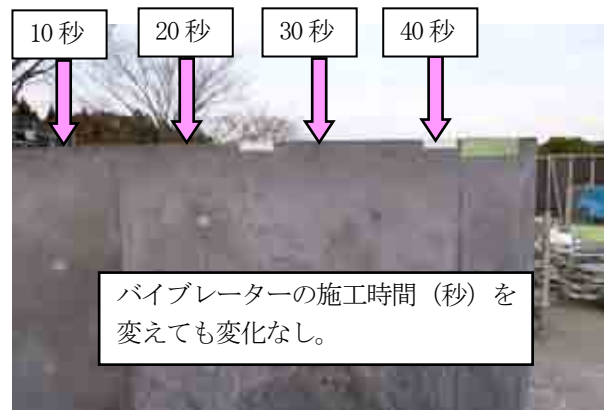


写真-4 モックアップの墨入れコンクリート

4-3. 新たなる課題

しかし、モックアップにおける試験施工時に新たなる課題が発生した。通常のコンクリートは1時間もしないうちに段々硬化していくが、混和剤に「遅延型」を使った今回のコンクリートはなかなか硬化しない傾向であった。このため、試験施工した型枠の下部からコンクリートが抜け落ちてしまい、通常の施工工程区分で施工する事は難しい事が分かった。(図-5 参照)

「遅延型」の混和剤により流動性がよくなりジャンカ等の出来にくいコンクリートとなった反面、数時間しても固まらないコンクリートを施工する事となった。

この調合計画で良好な表面上げの墨入れコンクリートとするための最善の施工計画の検討を行った。

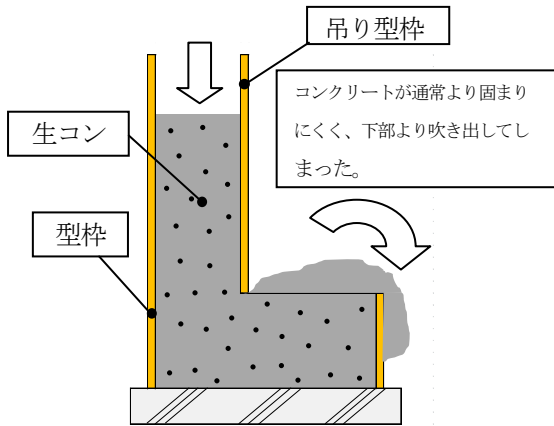


図-5 試験施工時の打設状況

- ・リートが上がった状態でタタキをしっかりと行った。
- ・ブリーディング水の影響が色ムラの原因となるため、ブリーディング水が出始める前の打設後約60分を目安に打ち重ねを行った。

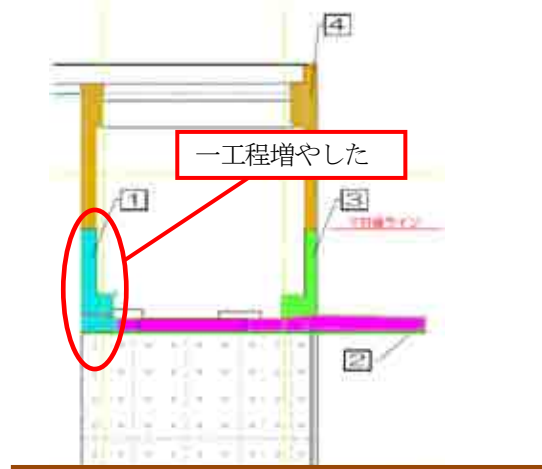


図-7 検討後の打設順序 (断面図)

4.4. コンクリート打設工程の一部変更

モックアップの試験施工の結果を踏まえ、型枠下部からコンクリートの吹き出しが起こらないように、当初想定していた打設順序の変更を検討した。(図-6 参照)

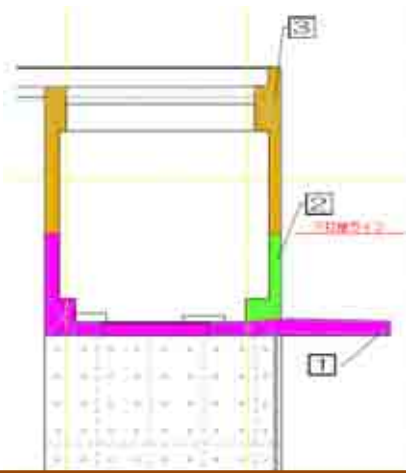


図-6 当初想定した打設順序 (断面図)

検討の結果、打設手順を細分化して一工程増やす事で吹き出し防止対策を行った。(図-7 参照)

これらの試験施工の状況を鑑みて、打設計画について、次の基本方針を立て本施工に取りかかった。

- ・試験施工時に塗装型枠に水湿をしたところ、表面が白濁したので、打設当日の型枠への水湿を控えた。
- ・固まりにくいコンクリートのため、振動系パイプレーターの使用に頼りすぎず、竹棒なども併用した。
- ・打設時には、足元だけでなく型枠天端近くまでコンク

5. まとめ

これまでの検証をもとに施工を試みた結果、コンクリート強度は基準値を満たした上で、薄い黒色で良好な表面仕上げの墨入れコンクリートを打設する事が出来た。(写真-5)

今回、「墨入れコンクリート打ち放し仕上げ」に関して、調合計画および施工計画について検証を重ねることができ、その中で新たに品質管理の重要性に気づくことが出来た。それと共に、今後の「通常のコンクリート打ち放し仕上げ」の施工管理においても今回の検証が参考になるであろうと考えている。



写真-5 墨入れコンクリート仕上がり状況

当該建物の設計、施工
設計：日建設計 施工：(株)大林組(図・写真等提供)
(国立京都国際会館展示施設建築工事)

塩分吸着型エポキシ樹脂コンクリート補修材 (ハイブリッドエポキシ樹脂) の性能及び適用 事例について

千賀 年浩¹・山内 匡²

¹日本国土開発 (株) 土木事業本部技術部 技術開発グループ (〒107-8466東京都港区赤坂4-9-9)

²日本国土開発 (株) 土木事業本部技術部 技術開発グループ (〒107-8466東京都港区赤坂4-9-9)

エポキシ樹脂に塩分吸着剤を添加した「塩分吸着型エポキシ樹脂」の塩分吸着効果、また塩害劣化した鉄筋コンクリートの補修材として適用することによる鉄筋腐食抑制効果を、暴露試験及び試験施工によって検証した。その結果、「塩分吸着型エポキシ樹脂」はセメントペースト中の塩化物イオンの吸着が確認された。また、「塩分吸着型エポキシ樹脂」をひび割れ注入材や断面修復工法のプライマー及び鉄筋防錆材として適用した場合、鉄筋の分極抵抗値は増加し、自然電位は貴の傾向となり、鉄筋腐食抑制効果を有することが確認された。

キーワード エポキシ樹脂、塩害、ひび割れ、鉄筋腐食、塩分吸着剤、補修

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、海洋からの飛来塩分や冬季に散布される凍結防止剤等の外来塩分、また洗浄不十分な海砂の使用による内在塩分の影響により、コンクリート構造物中の鉄筋が腐食する塩害劣化が顕在化している。塩害で劣化した鉄筋コンクリート構造物は、構造耐力に影響を及ぼす前に補修等による対策が施されるが、コンクリート内部の塩分の除去が不十分であることや、補修後に再度塩分が浸入すること等により、再劣化が生じている事例も見られる。

このような塩害による劣化や再劣化は、近年問題視され様々な対策が講じられている。その対策の一つとして、亜硝酸リチウムや塩分吸着剤を用いた補修材が開発されている。これらの材料は、無機系材料が用いられる、断面修復材等に添加され多く活用されている。しかし、無機系材料のみならず、補修材として多く使用される有機系材料を用いた活用が可能となれば、塩害対策として更なる展開が期待される。例えば、ひび割れ注入材や断面修復工法のプライマー、また床版防水等である。一般にひび割れ注入材は塩害対策としては選択されない。しかしながら、ひび割れ注入材に塩分吸着剤を添加することで塩害対策にも適用可能となり、かつ、ひび割れ追従性も期待される。また、断面修復材のプライマーであれば、接着性の確保と同時に塩害対策も講じられる可能

性がある。

このような背景のもと、有機系材料としてエポキシ樹脂に着目し、エポキシ樹脂に塩分吸着剤を添加した「塩分吸着型エポキシ樹脂」の開発を行ってきた。既往の研究において、「塩分吸着型エポキシ樹脂」をひび割れ注入材として用いることによる、鉄筋腐食抑制効果を室内試験によって確認している。

本稿では、「塩分吸着型エポキシ樹脂」の塩分吸着効果、また塩害劣化した鉄筋コンクリートの補修用途別に適用した鉄筋腐食抑制効果を、暴露試験及び試験施工によって検証した結果を述べる。コンクリートの初期欠陥の一つである温度ひび割れなどのひび割れ先行型ひび割れの補修には、「ひび割れ注入材」を適用し、塩分がコンクリート中に浸透して鉄筋が腐食する腐食先行型ひび割れの補修には、断面修復工法における「プライマー及び鉄筋防錆材」を適用した。それぞれの適用イメージを図-1及び図-2に示す。

2. 塩分吸着型エポキシ樹脂の構成材料

(1) 塩分吸着剤

塩分吸着剤は、層状複水酸化物の一種であり、層間に陰イオンを取り込み、保持している陰イオンとイオン交換する性能を有する。

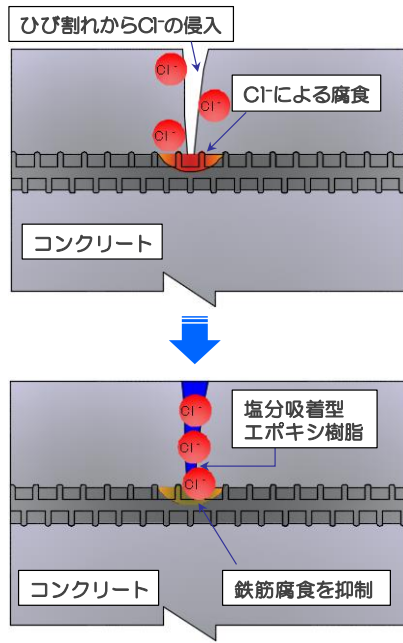


図-1 ひび割れ注入材への適用イメージ

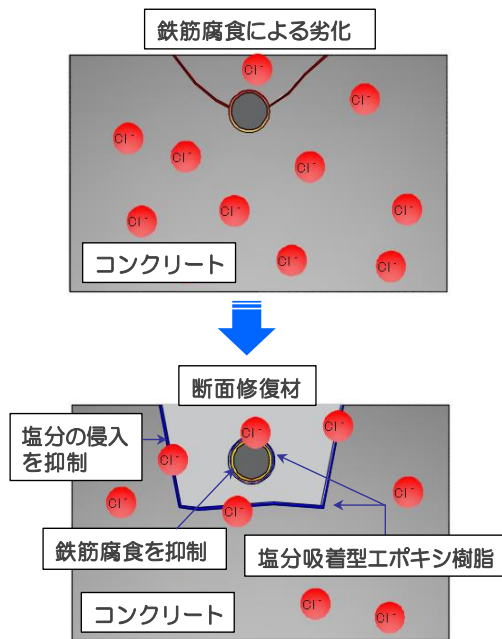


図-2 プライマー及び鉄筋防錆材への適用イメージ

本稿では、この陰イオンのイオン交換性能を向上させるため、層状複水酸化物の結晶子サイズを10nm程度に小さく調整し、また、その層間には工業的に利用しやすい塩化物イオンとのイオン交換がされる、硝酸イオン(NO_3^-)を担持させたものを塩分吸着剤として用いた。

層状複水酸化物の塩化物イオン(Cl^-)の吸着及び硝酸イオン(NO_3^-)の放出イメージを図-3に示す。

(2) エポキシ樹脂及び塩分吸着型エポキシ樹脂

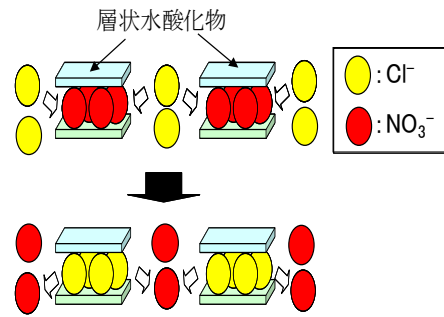


図-3 層状複水酸化物のイオン交換イメージ

エポキシ樹脂は、2液混合型の硬質形低粘度形エポキシ樹脂を用いた。また、塩分吸着型エポキシ樹脂は、上述のエポキシ樹脂の質量に対し、塩分吸着剤を20%置換したもの(以降、“HEP”と記す)である。なお、本HEPは、ひび割れ注入材としては、JIS A 6024「建築補修用注入エポキシ樹脂」の硬質形低粘度形冬の規格を満たし、鉄筋防錆材としては、NEXCO 構造物施工管理要領の「鉄筋防錆材の性能照査」の規格を満足している。HEPの性状を表-1に示す。

表-1 HEPの性状

性状 樹脂	比重	粘度 ($\text{mPa}\cdot\text{s}$; 23°C)	引張強さ (N/mm^2)	接着強さ(標準条件)
				(N/mm^2)
HEP	1.21	330	35	8.1

3. 塩分吸着型エポキシ樹脂の塩分吸着効果

(1) 試験及び供試体概要

セメントペースト中の塩化物イオンに対する、塩分吸着型エポキシ樹脂の吸着効果について検証を行った。

検証方法は、塩分を含有するセメントペースト硬化体にHEPを打継いだ後、塩化物イオン(Cl^-)の移動と吸着を促す所定の養生期間を経て、電子線マイクロアナライザ(以下“EPMA”と記す)によりHEPが吸着する塩化物イオン(Cl^-)の Cl と、放出する硝酸イオン(NO_3^-)を構成する N の移動の可視化を行った。図-4に供試体作製フローチャートを示す。

(2) 試験結果

Cl のEPMAによるマッピング結果を図-5に示す。また、(a)は23°Cの養生槽で45日養生を行った供試体、(b)は60°Cの養生槽でさらに1か月間養生を行った供試体を示し、図中の左側がセメントペースト、右側がHEPを示す。

図-5より、(a)においては塩化物イオンの変化は観られなかった。図中でHEPに Cl が検出されているのは、HEP中のエポキシ樹脂に固定化された塩化物イオンが含

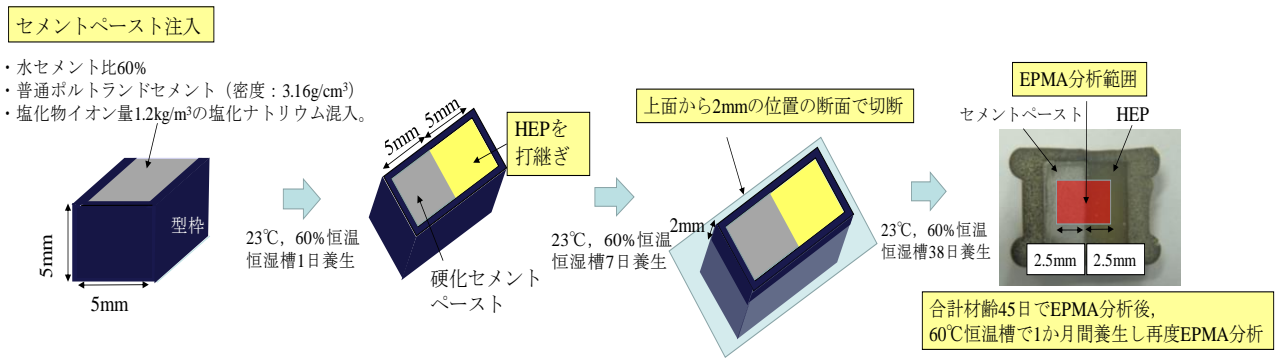
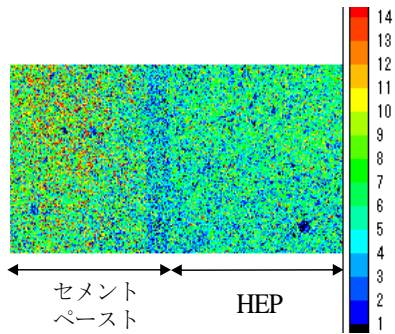
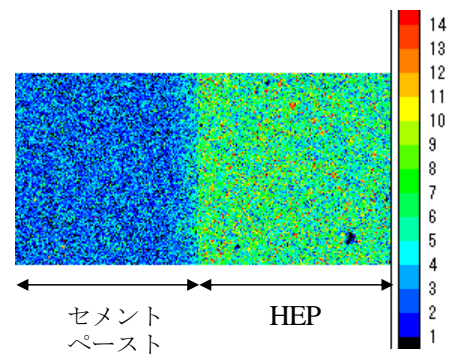


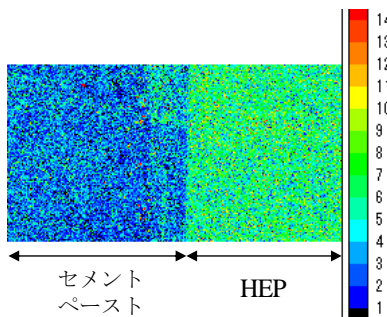
図-4 供試体作製フローチャート



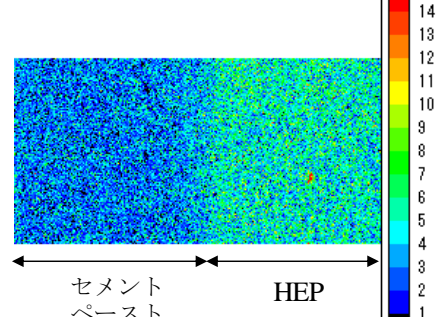
(a) 23°C 45日養生



(a) 23°C 45日養生



(b) 60°C 1か月間



(b) 60°C 1か月間

図-5 ClのEPMA結果

図-6 NのEPMA結果

まれていることによる。(b)はセメントペースト中の塩化物イオンがHEPの方へ移動したことが分かる。これはHEPがセメントペースト中の塩化物イオンを吸着したものと考えられる。NのEPMA結果を図-6に示す。(a)と(b)を比較すると、(b)はHEP領域における窒素イオン量が減少し、セメントペースト領域の窒素イオン量が増加していることが分かる。これはHEPが塩化物イオンを吸着し、それに伴って硝酸イオンの放出、すなわち窒素イオンを放出したことによる増加減少と考えられる。

以上より、セメントペースト中の塩化物イオンに対して、塩分吸着型エポキシ樹脂の、塩分吸着ならびに硝酸イオンの放出が確認された。

4. ひび割れ注入材として適用した場合の鉄筋腐食抑制効果の検証

(1) 試験概要及び供試体

ひび割れ先行型ひび割れを有する鉄筋コンクリートを模擬した供試体を一定期間暴露し、内部の鉄筋に腐食が発生し始めた後、塩分吸着型エポキシ樹脂を注入し、その鉄筋腐食抑制効果を供試体の分極抵抗と自然電位の測定によって検証した。

供試体は、直径100mm、高さ200mmのVP塩ビ管を型枠とし、長さ150mmの異形鉄筋D13を、塩ビ管の高さ中央に水平に設置し、コンクリートを打込んだ。コンクリートの配合を表-2に示す。コンクリート打込み後、

表-2 コンクリート配合

セメントの種類	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G		
普通ポルトランドセメント	20	50	44	145	290	832	1052	8.0	5.0

脱型を行わず型枠のまま気中で 28 日間養生した後、割裂引張荷重により鉄筋の直角方向にひび割れを発生させた。ひび割れを発生させた 3 検体の供試体のひび割れ幅を表-3 に示す。

表-3 供試体のひび割れ幅

供試体NO.	NO.1	NO.2	NO.3
ひび割れ幅 (mm)	0.2	0.35	0.6

供試体は、後述する暴露試験場にて暴露させ、供試体中の鉄筋の分極抵抗及び自然電位を測定し、ASTM C 876 の飽和硫酸銅基準で 90%以上の確率で腐食と判定される、-350mv より卑の値を示したことによって鉄筋腐食の可能性がみられた後、HEP をひび割れに注入し、再度暴露を継続した。供試体の作製概要を図-7 に示す。

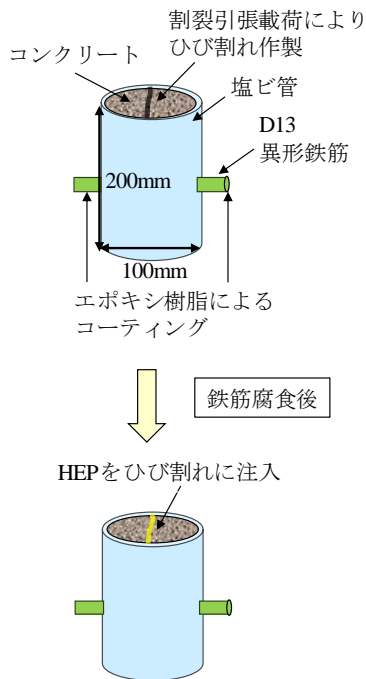


図-7 供試体作製概要図

(2) 暴露試験

暴露試験は、北海道増毛町にある暴露試験場にて実施した。暴露試験場は日本海に面し、常時塩分が飛来する環境にある。暴露試験場の位置及び状況を、図-8 に示す。



図-8 暴露試験場位置図

暴露試験場の飛来塩分量は、土研法により 2015 年 10 月から 1 年間調査した結果、12.0mg/dm²/day であった。また、コンクリート標準示方書に示される式を用いたコンクリート表面塩化物イオン濃度は 11.4kg/m³ であった。示方書に示される汀線付近 9.0 kg/m³ の値よりも高く、暴露試験場は厳しい塩害環境下にあることがわかる。

また、暴露試験場の気温を測定した結果、2016 年 1 月の日平均気温は-3.4℃、8 月は 22.5℃であった。

暴露を実施した供試体は、ひび割れに塩分を供給するため、ひび割れ面を海側に向けて設置した。

(3) 測定方法

自然電位は照合電極として飽和銀塩化銀電極を用い、分極抵抗は 10kHz~1mHz の範囲で設定した交流インピーダンス法によって測定した。

供試体の測定は、暴露試験前に 1 回実施し、暴露試験中は半年毎に実施した。

(4) 試験結果

図-9 に供試体 3 検体の飽和硫酸銅換算による自然電位の測定結果を示す。暴露前は、3 検体とも-100mv 程度の値を示していたが、暴露試験開始後は、自然電位は卑の傾向となり、暴露 6 ヶ月目では NO.1 と NO.2 は-300mv 程度の値を示した。また、NO.3 は鉄筋腐食の可能性のある-350mv より卑の-420mv の値を示した。NO.3 は、ひび割れ幅が 0.6mm と大きく、より多くの塩分が速く鉄筋に到達し、鉄筋が腐食したものと推察される。3 検体とも-350mv より卑の値を示した暴露 1 年目において、ひび割れに HEP を注入した。暴露試験場は厳しい塩害環境下であるため、ひび割れ幅が 0.2mm の比較的小さい場合においても鉄筋が腐食する結果となった。ひび割れ

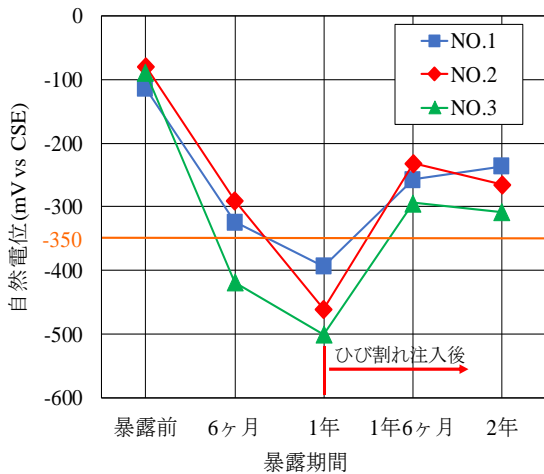


図-9 自然電位測定結果

注入後となる暴露1年6ヶ月目は、3検体とも自然電位は貴の値となり、鉄筋腐食の可能性がある-350mvより貴の値を示した。暴露2年目では、3検体とも自然電位は暴露1年6ヶ月目とほぼ同程度の値を示し、自然電位は維持されていた。

図-10に供試体3検体の分極抵抗の測定結果を示す。3検体の供試体は、暴露前は10000kΩ・cm²前後の値を示したが、暴露試験実施後は、分極抵抗が低下し、暴露6ヶ月目は200kΩ・cm²程度、暴露1年目は20kΩ・cm²前後の値を示した。これは、図-9の自然電位と同様の傾向となり、鉄筋の腐食によるものと推察される。

ひび割れ注入後となる暴露1年6ヶ月目は、3検体とも分極抵抗値は増加し、200kΩ・cm²程度の値を示した。また、暴露2年目は、暴露1年6ヶ月目の分極抵抗値と同程度の値となり、これらに関しても自然電位と同様の結果となった。これはHEPの塩分吸着効果によって、鉄筋の腐食が抑制されたと考えられる。

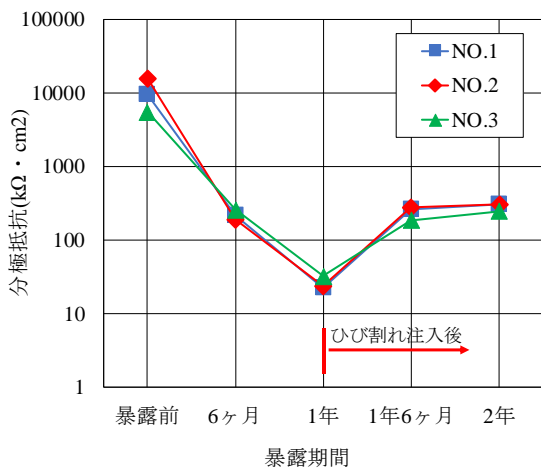


図-10 分極抵抗測定結果

5. プライマー及び鉄筋防錆材として適用した場合の鉄筋腐食抑制効果の検証

(1) 試験概要

塩分吸着型エポキシ樹脂を、断面修復工法のプライマー及び鉄筋防錆材として適用した試験施工を実施し、鉄筋腐食抑制効果を自然電位の測定によって検証した。

(2) コンクリート構造物

試験施工を行った鉄筋コンクリート構造物は、昭和60年代に竣工され、供用およそ30年が経過する、シールドセグメントによって施工された洞道である。シールド材の劣化によって、セグメントのピース間及びリング間の面、ならびに継手ボックスから海水が浸入し、塩害による劣化が生じていた。また、既に補修がされている箇所についても再劣化が生じていた。

(3) 試験箇所

試験箇所は3箇所とし、コンクリートの浮きが発生していた劣化部、ひび割れが発生していた再劣化部、また比較として健全部においても試験箇所として選定した。劣化部及び再劣化部の状況を写真-1及び写真-2に示す。



写真-1 劣化部の状況

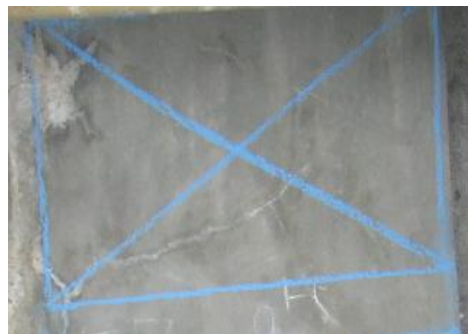


写真-2 再劣化部の状況

(4) 施工概要

断面修復工法は、縦250mm×横350mmの断面とし、コンクリートを鉄筋裏まではつき取った。劣化部におい

て、はつり取ったコンクリートの塩化物イオン量は、 5.7kg/m^3 であった。

コンクリートをはつり取った後の鉄筋については、劣化部は全面に錆が発生し、一部断面欠損が生じていた。また、再劣化部においても全面に錆が発生しており、健全部に関しては、部分的に錆が発生している状態であった。鉄筋はディスクサンダーとワイヤーブラシを併用した2種ケレンを施した。

ケレン後、測定に必要となるリード線を鉄筋に設置し、その後、はつり取ったコンクリート面及び鉄筋に HEP を 0.25kg/m^2 塗布した。HEP の塗布後の状況を写真-3 に示す。

HEP 塗布後、一般的な断面修復材であるポリマーセメントモルタルにて埋戻した。なお、HEP と断面修復材との接着性について、建研式による引張接着試験を実施した結果、 1.61N/mm^2 であった。

(5) 測定方法

測定は鉄筋の自然電位とし、照合電極としては飽和硫酸銅電極を用いた。また、劣化部、再劣化部及び健全部の各配筋にて 60mm または 40mm 間隔の 5 点を測定点とした。

鉄筋の測定は、断面修復後翌日に 1 回実施し、その後 4 週、6 週、2 ヶ月、4 ヶ月、8 ヶ月、1 年、1 年 3 ヶ月経過時に実施した。

(6) 試験結果

図-11 に 5 点平均による自然電位の測定結果を示す。劣化部では、施工直後は -450mv 程度の値を示したが、時間経過とともに自然電位は貴の傾向となり、施工後 2 ヶ月目では、鉄筋腐食の可能性がある -350mv より貴の値となった。施工後 4 ヶ月目には自然電位が -400mv 程度に低下したものの、施工後 8 ヶ月目から 1 年 3 ヶ月目においては、 -200mv 程度を示し、自然電位は高い値となった。これは、HEP の塩分吸着効果によって、鉄筋の腐食が抑制されたと考えられる。

再劣化部は、施工直後 -400mv 程度の値を示したが、劣化部と同様に、自然電位は貴の傾向となり、施工後 4 ヶ月目では -350mv を超える結果となった。さらに、施工後 1 年 3 ヶ月目においては、 -150mv 程度と、劣化部と同様に自然電位は高い値を示した。

健全部は、施工直後の -300mv からその後、時間経過による自然電位の変化はみられなかった。健全部であるため、鉄筋の HEP の塩分吸着は行われず、施工後の状態を維持したものと推察される。

これら 3 箇所と比較から、塩害で劣化した箇所の断面修復工法に、塩分吸着型エポキシ樹脂のプライマーおよび鉄筋防錆材を塗布することにより、補修後の鉄筋の腐食を抑制する効果があることが確認できた。

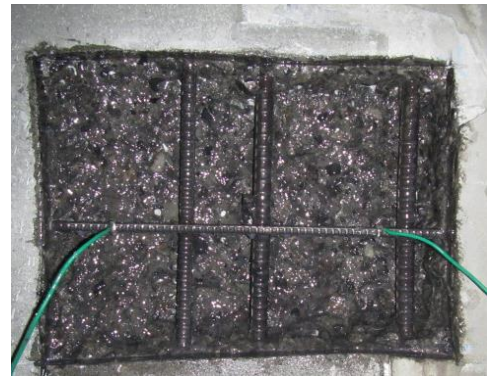


写真-3 HEP 塗布後の状況

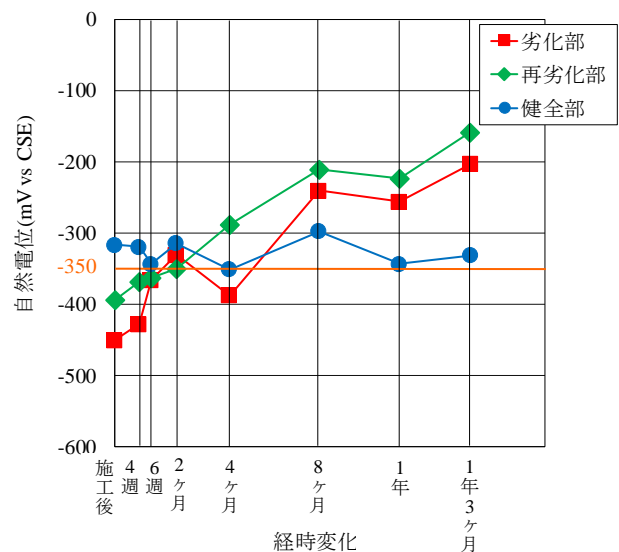


図-11 自然電位測定結果

6. おわりに

エポキシ樹脂に塩分吸着剤を添加した塩分吸着型エポキシ樹脂の塩分吸着効果、またひび割れ注入材や、プライマー及び鉄筋防錆材として適用した場合における、鉄筋腐食抑制効果について確認した。

なお、本稿の塩分吸着型エポキシ樹脂は、【ハイブリッドエポキシ樹脂】として、NETIS登録（HK-170005-A）されている材料である。

謝辞：本稿作成にあたり、写真などのデータの提供を頂きました。ご協力頂いた方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 千賀年浩, 山内匡, 横山大輝, 伊達重之: ひびわれ注入材として用いた塩分吸着剤混入エポキシ樹脂の鉄筋腐食抑制効果の検証, コンクリート工学年次論文集, vol.39, No.1, 2017

i-Constructionによる施工効率化について

土井貴昭¹・橋本直宏²

¹近畿地方整備局 国営明石海峡公園事務所 工務課 (〒650-0024 神戸市中央区海岸通29番地
神戸地方合同庁舎7階)

²入谷緑化土木株式会社 (〒656-0122 南あわじ市広田広田510-1)

i-Constructionを利用することによる造園業における施工の効率化等の実現を検討するために、2016年度と2017年度の国営明石海峡公園維持工事での作業により比較調査を行った。建設業におけるi-Constructionの活用は、多岐にわたり推進されているが、造園業においてはその事例がまだ少ないため、今回の調査によりその可能性について検討していくものとする。

キーワード i-Construction、UAV、クサカルゴン、ザウルスロボ

1. 国営明石海峡公園の概要

国営明石海峡公園は『自然と人との共生、人と人との交流』を基本理念とした国営公園で、神戸地区と淡路地区に分かれている。神戸地区は、神戸市北区山田町藍那に位置し、『あいな里山公園』として2016年度から公園の一部を開園し、誰もが気軽に里地里山の文化や暮らしを体験できる公園である。里地里山に因んだイベントや四季の風景を味わえる公園となっている。淡路地区は、兵庫県淡路市夢舞台に位置し、2001年度に開園して以来、『国際的リゾート感溢れる海辺の園遊空間の創造』を基本理念とし、「花」「海」「島」を活かした公園となっている。植物園や大型遊具や芝生広場などがあり子どもから大人までが楽しめ、また祭りやコンサートイベントなどが開催されるなど多くの人々に親しまれる公園である。



(淡路地区)



(神戸地区)

2. 比較調査

今回、i-Constructionによる比較調査を行ったのは、以下の項目である。

- (1) UAVによる施工管理
- (2) バックホウ用アタッチメント (クサカルゴン) による除草作業の効率化
- (3) バックホウ用アタッチメント (ザウルスロボ) による伐採・開墾作業の効率化

(1) UAVによる施工管理

今回、UAVの利用として考えたのが、除草作業における管理の効率化である。調査対象としたのは淡路地区での作業で、除草工淡路ロエリア：11,805.11m²及び海岸エリア：21,169.93m² (合計：32,975.04m²) と施工範囲の広いところである。淡路ロエリアは開園区域、海岸エリアは開園区域外であり、UAVの使用はどちらも来場者がいない開園前及び閉園後とした。

通常では、施工完了時に監督員と現場確認を行う形となっているが、監督員にとっては現地への移動に経費と時間がかかるものである。淡路地区での除草作業は範囲

が広いため、2016年度では8回の現場確認を行っていた。しかしUAVを使用することにより上空から施工範囲全体を撮影することができ、監督員は現場に出ることなく施工の完了の確認をすることができた。これにより約8回分の移動にかかる経費と時間を削減できたと考えられる。また施工業者としても施工完了後すぐの状況の写真を監督員へ提供するという形となり、現地確認の予定を合わすことを気にせず、施工業者のペースで施工ができるというメリットがあることがわかった。しかし、除草における刈高の検測等出来形の確認については上空からは不明瞭であるため、地上より検測の写真を撮影することが必要となってくるということがわかった。



↑地上より撮影（一枚ではわかりづらい）



↑UAVによる撮影（全体が見える）

(2) バックホウ用アタッチメント（クサカルゴン）による除草作業の効率化

次に行う比較調査は、除草作業における機械化施工についてである。造園業において除草作業は年中行う作業であり、基本的に人力で行う作業のため、その労力は大きいものである。特に夏場での作業は疲れがたまりやすく、熱中症の恐れもあることから、その作業は命への危険性もあり、労力の少ない機械化は望まれるものであると考えられる。そこで今回、バックホウに取り付けることにより除草ができる‘クサカルゴン’を使用して、その作業日数及びそれに伴いかかる作業経費、また作業員にとっての労力の差などを2016年度行った人力による除草作業との比較によりその効果について調査を行うこ

ととした。この調査は神戸地区畑の棚田跡エリア（4,565.18m²）での除草工で行うこととした。施工条件は、目視による確認ではあるが、昨年度と今年度では草の生え方には大きな違いがない、ほぼ同時期に行った。またこの作業については刈った草の集草は行わない作業であった。



↑クサカルゴン使用状況

またこの作業ではGPS機能により作業の軌跡を記録できる端末用アプリをバックホウのオペレーターが持つことによりバックホウがどのように移動しながら作業したのかをデータとして残す試みを同時に行った。このように資料化することにより、今後より効率的な施工方法を検討するための材料とすることを目的とした。

まず、2016年度に行った実績についてまとめる。作業日数は7/25から7/26の2日間（7/26は半日で作業が終わった）で人力作業（肩掛け）人員は7.5名であった。夏の暑い時期であり7/25は曇り、最高気温28度、最低気温25度、7/26は雨のち曇り、最高気温27度、最低気温24度であった。作業員は蒸し暑い中での作業で、時には雨具を着ての作業となった。作業員の声はやはり『暑い』や『疲れる』などの声が多く聞かれる結果となった。

次に2017年度における実績をまとめる。作業はバックホウ0.1m³級を使用し、アタッチメントに草刈作業ができるクサカルゴンを使用して行った。作業日数は8/3、8/4、8/8の3日間（8/5,6は土、日曜日で作業無し、8/7は雨のため作業中止）でオペレータ3名であった。この年もとても暑い日での作業となり、作業の3日間は晴れ時々曇り平均気温は34度、最低気温は27度という真夏日となった。しかし、そのような暑い中での作業においても作業を行った作業員の人はそれほど疲れた様子は見られず、『自分のペースで作業ができた』という意見が得られた。この結果から夏の暑い時期であるとともに、作業員の声から多人数での作業の場合、周りに作業のペースを合わせる意識が働くことによって早く仕事をしないといけないという意識から余計に疲れを感じるようになってしまっているところがあるのかもしれない。また出来上がりの結果はクサカルゴンを使用したほうがきれいに仕上げる事ができたと思われる。その理由は、この作業は集草がないため、人力での作業では、草丈の高い草が

そのまま倒されていくだけであるが、クサカルゴンでは、動力の回転により草が粉々に粉碎されチップ化されるためである。施工にかけた経費については、ほぼ同じくらいで済むことができた。これらのことから作業するにおいて人力よりも機械で作業するほうが効率的かつ安全に行えると考えられた。問題点として、バックホウが進むことが困難な地盤のゆるいところ、急な勾配のところや狭いところなどでは施工ができないということがわかった。また既設物や樹木の周りは施工が困難なため、その部分は人力での作業で行わなければならない。

GPS機能による軌跡の記録について今回タブレットを使用して行った。土木工事等で使用されるGPSによる装置は地上に専用の機械を設置することにより、より正確な位置情報を得ることができるが、それを使用することは相当な金額が発生してしまう。そのため、今回は無料でかつ簡易に使用できる携帯用アプリを使用して行った。採用したアプリは『登山・ハイキング用GPS地図アプリ ヤマコレMAP』である。

(↓結果資料：一部)



採取方法はアプリを起動させ、端末をバックホウのオペレーターが持った状態で作業を行った。実際に得たデータは、折れ線の連続により一目では理解するのが難しいものとなってしまった。その理由として、バックホウの動きがそれほど速い動きではないのが大きいのではないかと考えられる。アプリはある一定頻度で端末の大きな位置情報を記していくため、ある程度速い動きであり、大きな移動をする作業に適しているのではないかと今回の試みから考えられる。

またここでは、UAVの写真を使用しての施工範囲の測量ができるかを試みた。これを可能とすれば今まで人が入っていないところを施工前にその施工面積がわかり、工事経費との比較などが可能になると考えられる。今回行った方法は施工範囲の外周に目印となるもの（今回はカラーコーンを使用）を折れ点となるところ置き、上空から撮影をする。その一区間で実際に測量をし、データ

上でその区間に測量数値を打ち、その数値を基準に他の区間の距離を割だし、それらを結んだ三斜で測量を行う。



↑ UAV使用状況



↑ 1区間を測量



↑ 1区間を基準として測量

この方法で行った結果3,876.37m²という数値を得られた。事前に得ていた面積は4,565.18m²であり、この差は688.81m²であった。この差はUAVによる上空からの撮影での一つ問題が原因と思われる。それは法面部を平面と捕らえるため、上空からではその法面部は見えなくなってしまうということである。また今回のように施工範囲が樹木等に覆われている場合、樹木の葉によって不可視部が生じ、UAVでは確認できない部分ができる。このような場所の測量方法については新たに検討していかなければならない。現地の状況から、このような法面部や不可視部を考慮すると大方の数値は合ってくるのではないかと考えられるため、UAVを活用しての簡易な測量方法も可能であると考えられる。

(3) バックホウ用アタッチメント（ザウルス）による開墾作業の効率化

最後に行う比較調査は、伐採作業における機械化施工についてである。新たな場所を開墾していくには伐採は不可欠であるが、その作業における伐採及び伐採木の運搬は人力作業では過酷で、また危険が伴うものである。そのような場面で機械化を導入できれば、より安全に、また楽に作業を進められると考えられる。作業に求められる動作として、対象となる木に対して掴む、切る、運ぶが一度に行えることであり、それに適した動作を持つ‘フェラーバンチャザウルスロボ’（以下ザウルスロボという）という伐採作業用アタッチメントを今回の調査のために採用した。→

調査エリアは、クサカルゴンで除草をした先にある竹林で行った。つまり今回の調査では竹の伐採で検証した。作業期間は1/16から2/6までの内の16日間であった。



(↓作業状況)



左下の写真ではザウルスロボと2人の作業員による作業量の差を図により記した。この図以降の伐採作業は、ほぼすべてザウルスロボが行った。面積を算出した結果4,403.45m²だった。



実際の作業によりわかったことは、バックホウの運転手にとってザウルスロボの操作に慣れるまで時間がかかるが、慣れると少し足元の悪いところや急な法面箇所でもアームの届くところまでの伐採が可能となり、人力作業では危険が伴う箇所でも安全に作業することができるということである。また伐採と搬出する動作が同時可能であるため、一日の作業終わりに現場がある程度きれいに片付けられるということが分かった。一方、人力作業では、伐採を行うのみならばザウルスロボよりも速いが、重たい竹を引っ張り出すなどの運搬作業になると人力ではかなりの労力になることが、ザウルスロボと比較することにより改めて気づかされた。

3. まとめ

以上の比較調査をした結果、造園業におけるi-Constructionの可能性はあると感じられた。作業を行ううえでの機械化施工を取り入れたほうが、より容易かつ安全に施工できることとともに、かかった経費からもそれほど大差がないことから、可能な箇所は作業員にとって労力のかからない機械化施工で行っていくことは意味のあることと考えられる。一部、上にも記したように機械の入れない箇所は人力で行わなければならないことも考えておかなければならないため、これらのことを考慮し施工するにあたり、工事経費とかかる経費が合うかをある程度予想して行うことが必要になってくると思われる。

謝辞： i-Constructionの活用実現に向けての現場での試行を実施してもらい、また本論文の作成に関して多々協力いただき国営明石海峡公園事務所高見建設監督官様、入谷緑化土木株式会社三澤次郎様・橋本直宏様ありがとうございました。

アルミドームへのリニューアル（配水池） ～ 狭小地での組み立て施工 ～

才野 紅葉¹・石田 邦彦²

¹京都府 向日市 上下水道部 上水道課 (〒617-0006 京都府向日市上植野町久我田 17 番地の 1)

²京都府 向日市 上下水道部 浄水場 (〒617-0001 京都府向日市物集女町長野 1 番地)

本論文は、1965 年(昭和 40 年)に供用開始して以来、50 年が経過し、老朽化が進んでいた配水池の屋根を、RC ドームからアルミニウム合金製ドーム（アルミドーム）に更新した工事について記述したものです。本工事では、敷地内に工事のための作業スペースがほとんどない狭小地での施工となり、限られたスペースでの効率的・効果的な事例を紹介するものです。

キーワード アルミドーム、配水池、狭小地

1 はじめに

(1) 向日市の概要

向日市は、京都府の西南部に位置し、市域面積は 7.72km²と、西日本で一番面積の小さい市です。地形は西部一帯に標高 35～80m の丘陵が南北に細長く横たわり、丘陵の竹林からは良質のたけのこが産出され、乙訓のたけのことして全国にその名を知られています。市の中心部は住宅街を形成し、人口密度は全国的にも極めて高い数値となっています。東部は平たんで耕地が多く、交通機関も集中しており、東西約 1.2km の間に J R 東海道本線・J R 東海道新幹線・阪急電鉄京都線・名神高速道路・国道 171 号が通り、J R の駅が 1 つ、阪急電鉄の駅が 2 つあるなど、高い交通の利便性を有しています。



図 1
向日市の位置図

(2) 向日市水道事業の概要

本市の水道は、京阪神急行電鉄(株)（現阪急電鉄(株)）が 1929 年(昭和 4 年)に建設した住宅専用水道を譲り受け、1951 年(昭和 26 年)9 月に町営水道として発足し、西向日地域で給水を開始しました。

翌 1952 年(昭和 27 年)1 月には簡易水道としての認可を受け、京都府下 8 番目の公営水道として、正式に向日町水道事業が発足しました。創設当初の水道は、戦後復興のさなかで伝染病も流行していたことから、水道に対する関心が日に日に高まり、市民を守る衛生施設となりました。

1955 年(昭和 30 年)2 月に、第 2 次拡張事業認可を取得し、上水道事業として給水を開始しました。その後、人口の増加とともに取水井戸の増設や浄水場の建設など、拡張事業を積み重ねました。

給水を開始して以来、すべての水源を地下水（深井戸）に依存してきましたが、急激な人口の増加に伴い、給水量が増大し、地下水の過剰な汲み上げによる水位の低下や地盤の沈下が顕著となりました。そのため、地下水を補完する第 2 の水源として、2000 年(平成 12 年)10 月から日吉ダムを水源とした京都府営水道の受水を開始しました。

本市の水道の給水区域は、図2に示すとおり、JR東海道線から西の物集女給水区域と東の上植野給水区域の2つに分かれています。

主な浄水施設は、物集女西浄水場のほか、物集女配水池3池、上植野配水塔1塔です。

物集女西浄水場で取水した地下水を処理した浄水と京都府営水道からの受水とを第1配水池及び上植野浄水場で混合し、市内に給水しています。



図2 施設配置及び給水区域

2 事業の概要

(1) 事業の目的

近年、日本では、東日本大震災をはじめとする大きな地震が発生しており、改めて耐震の重要性が注目されています。

このような状況を受けて、2012年度(平成24年度)に、物集女西浄水場の10施設で耐震診断及び構造物劣化調査を実施したところ、第3配水池を含む5施設において、耐震性NGという結果でありました。

さらに、第3配水池は外観目視調査で、写真2に示すとおり、浄水の塩素濃度が比較的高いことに起因して、屋根部ではコンクリートの剥離や露筋が著しく、早急な改修が必要との結果に至りま

した。

しかしながら、周囲を竹林に囲まれており、配水池敷地内には他に第1配水池や第2配水池があることから、工事のためのスペースがほとんどない状況でした。

そこで、第3配水池の耐震化及び補修工事について、限られたスペースで実施できるよう、効率的・効果的な施工を行うこととしました。



写真1 第3配水池全景(施工前)

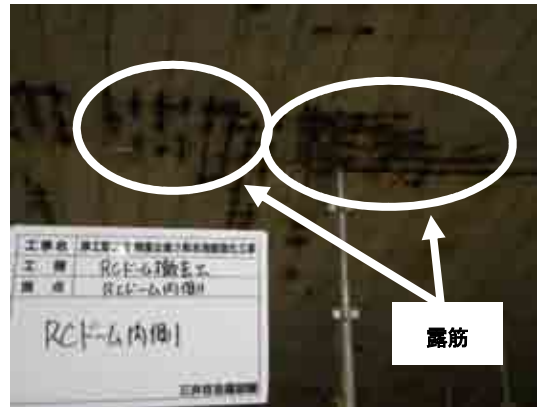


写真2 第3配水池屋根(内側)

(2) 施設の概要(施工前)

- 施設名：物集女第3配水池
- 施工年：1965年(昭和40年)
- 容量：3,000^m₃
(底面積500^m₂、HWL6.0m)
- 内径：25.25m
- 壁厚：0.15m
- 本体構造：PC造り(プレストレストコンクリート製)
- 屋根型式：RCドーム(鉄筋コンクリート製)
- 下端形式：自由支承

(3) 工事の概要

工 事 名：物集女第3配水池耐震化工事
 (京都府生活基盤施設(水道施設)
 耐震化等補助金事業)

場 所：向日市物集女町長野地内
 (配水池地内)

実施年度：2016年度(平成28年度)

工 事 費：約1億3,000万円

工事内容：

- ・コンクリート屋根撤去工 80 m³
- ・耐震補強工
 (側壁内側下端部コンクリート増打ち) 78 m
- ・アルミニウム合金製ドーム屋根設置工
 (開口径22.5 m)
- ・外壁塗装工 500 m²



写真3 第3配水池屋根(施工前)



写真4 第3配水池屋根(施工後)

3 施工条件について

(1) 現場の状況

写真5に示すとおり、第3配水池は周囲を竹林に囲まれているため、近隣地の使用ができず、配水池の敷地内での施工となりました。

さらに、他の配水池や設備が配置されていることから、工事における資材置場や大型重機などのヤードが確保できない状況でした。



写真5 配水池



写真6 第3配水池周囲

(2) 工法の検討

現場の状況や今後の維持管理も踏まえ、RCドーム工法、アルミドーム工法、ステンレスドーム工法の3つの工法で比較検討を行った結果、下記の項目について優れていたアルミドーム工法を採用しました。

- ①資材を分割して搬入することができるため、大型重機が不要。
- ②第3配水池内で組み立てが可能であることから、工期の短縮が図れる。

- ③耐腐食性に優れ、メンテナンスフリーであることから、維持管理が容易。
- ④比較的軽量であることから、躯体への負担が少ない。
- ⑤建設費や維持管理費などのコストが比較的安く、経済性に優れている。

なお、アルミニウム合金製ドーム屋根は光反射が懸念されるため、ふっ素樹脂塗装を行い、屋根の色を周囲と合わせることにより、景観に配慮しました。

4 施工方法

(1) 配水池内の浄水の放水

配水池には浄水が貯留されているため、配水池の中の浄水をため池へ放水する作業を行いました。

浄水には塩素が含まれており、そのまま放水すれば、環境に悪影響を与えることから、事前に塩素中和を行い、残留塩素がないことを確認した上で、放水しました（写真7～8）。



写真7 残留塩素の確認



写真8 放水の状況

(2) 既設RCドーム屋根の撤去

既設RCドーム屋根をクレーンで吊り上げられる程度の大きさに分割し、鉄筋を切断した後、クレーンで吊り降ろし、トラックに積み込み、搬出しました（写真9～12）。

一般的に建物等を切断する際は、切断面がきれいであり、施工音も静かであるウォールソー工法を採用するのですが、今回は、近隣地に住宅地がないことから、騒音の影響が少ないと判断し、工事費が安価な人力とりこわしと重機での吊り上げによる工法を採用しました。



写真9 RCドーム屋根とりこわし工



写真10 RCドーム屋根撤去工



写真 11 クレーン吊下ろし状況



写真 14 フレーム組立完了



写真 12 RCドーム屋根撤去完了



写真 15 パネル取付け

(3) アルミニウム合金製ドーム屋根の組立・設置

配水池内で組み立てを行うため、アルミニウム合金製ドーム屋根の材料を配水池内に搬入し、フレーム（約6kg/m）の組み立て、パネル（約25kg/枚）の取り付けを行いました（写真13～16）。

吊り上げは6箇所を固定し、それぞれのバランスを保つため、連携を取りながら、電動油圧（チルホール）を用いて、高さ約9mを2時間かけ、慎重に吊り上げました（写真17）。

所定の高さまで吊り上げた後、壁との固定、スカート取り付けを行い、アルミニウム合金製ドーム屋根の設置が完了しました（写真18～21）。



写真 16 パネル取付完了



写真 13 フレーム組立て



写真 17 屋根吊上げ



写真 18 壁との固定



写真 19 スカート取付け



写真 20 配水池内部の状況



写真 21 屋根の設置・架橋完了

5 工事を振り返って

第3配水池は、1965年(昭和40年)に供用開始して以来、早や50年が経過し、老朽化が進んでいる施設でした。

工事に際しては、配水池の水を抜き取る工程、配水池の停止・運用に伴う配水管ルートの変更による水流方向の変更、配水池周りに輻輳している水道管が台帳のとおり埋設されているかの確認(誤ルートの防止)、旧式仕切弁の慎重操作(濁水防止のため)、工事の事前・事後で濁水が発生していないかを確認するための夜間放水など、様々な事項に細心の注意を払わなくては市内の各家庭の蛇口から濁水の発生につながるようになります。

職員の急激な世代交代が進む中、このような配水管ルート切り替えなど、実務経験とノウハウを積んでいる職員も少なくなり、技術継承に遅れを取っているのが現状です。水道台帳など、机上の確認ではなく、実際に現場で操作し、経験することは、非常に大事なことだと感じました。

6 おわりに

今回、発表した第3配水池は、既存施設の再構築を目標に、施設の耐震化及び老朽化した屋根の更新による機能回復、景観に配慮し、周囲の竹林に合わせた外観にしたことにより、リニューアルが図れた水道施設の工事实績の一つです。

近年では、全国的に土木・水道などの技術職員が減少傾向にあり、ノウハウや技術を私たち若手職員等に伝えられるかが今後の課題ではありますが、このような機会を通して、技術や考え方・経験などを共有し、今後の業務で生かすことができればと思います。

最後に、本日発表の場を設けていただきました近畿地方整備局研究発表会事務局及び発表に伴いご尽力くださった方々へ感謝いたします。

川上ダム建設事業におけるICT技術を導入した 工事について

河野 将大¹・市川 滋己²

¹独立行政法人水資源機構川上ダム建設所 工事課 (〒518-0294三重県伊賀市阿保2 5 1 番地)

²独立行政法人水資源機構川上ダム建設所 工事課課長 (〒518-0294三重県伊賀市阿保2 5 1 番地)

水資源機構ではi-Construction & Management の一環として、建設生産プロセスの現場にて抜本的な生産性の向上、効率化及び高度化を図るため、ICTの全面的な活用を推進している。川上ダム建設事業においても、工事用道路工事や不安定化懸念斜面对策工事（押え盛土工事）にてUAVを用いた3次元起工測量、ICT建設機械を用いた施工等のICT技術を導入した施工を実施している。

本稿では、川上ダム建設事業にて実施したICT技術を導入した工事について、生産性向上への効果と今後の課題について報告する。

キーワード i-Construction、ICT土工、3次元測量、ICT建設機械

1. はじめに

川上ダムは淀川水系木津川の支川前深瀬川に建設中の重力式コンクリートダムで、洪水調節、新規利水、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。

当建設事業では、ダム本体工事の本格的な着手に向けて工事用道路工事や不安定化懸念斜面对策工事等を実施してきた。これらの工事のうちi-Construction & Management の一環として、ICT技術を導入した2件の工事について、生産性向上への効果について述べると共に、今後の課題について述べる。

2. 川上ダムにおけるICT技術を導入した工事

当ダムにおけるICT技術を導入した工事では、ICT土工における施工プロセス（①3次元起工測量、②3次元設計データ作成、③ICT建設機械による施工、④3次元出来形管理等の施工管理、⑤3次元データの納品）の各段階でICT技術を導入した。「場内工事用道路工事」においては4段階（①②④⑤）の施工プロセスで、「上川原地区斜面对策工事」においては1段階（③）の施工プロセスで、ICT技術を導入した施工を実施した。次章以降に、各工事におけるICT技術について述べる。

3. 場内工事用道路工事

(1)工事概要

場内工事用道路工事は、ダム本体工事にて使用する重機が通行するための道路建設及び建設発生土受入地の整備を実施する工事であり、約44,200㎡の盛土の施工が主たる内容である。なお、本工事は水資源機構における施工者希望I型ICT活用工事の第1号である。

(2)ICT技術を導入した施工の実施

場内工事用道路工事では2.で記述した①②④⑤の4段階の施工段階においてICT技術を導入した施工を実施した。

a) 3次元起工測量

3次元起工測量はUAVによる空中写真測量を行い、測量対象範囲約15,400㎡に対して、オーバーラップ率90%、サイドラップ率60%の条件で長さ271mの飛行コース3本、及び長さ231mの飛行コース3本で空中写真撮影を行い、計540枚程度の撮影写真から写真測量ソフトウェアを用いて点群データを作成した。

空中写真測量の精度を確かめるために、光波測距儀を用いた測量を併せて実施した結果、ほぼ同一の横断形状となり、空中写真測量による3次元起工測量の精度が確認された。

作業日数は空中写真撮影から測量データの解析、横断

図作成まで、精査を含むと1週間程度の日数を要した。
 なお、UAVの飛行に際しては猛禽類への影響についての配慮から、時期、時間及び場所等について制約が生じるため、余裕をもった工程計画が必要となった。

b) 3次元設計データ作成

3次元設計データ作成では、2次元の設計データ(設計図面)を3次元化するとともに、起工測量結果から作成した点群データを点群処理ソフトウェアにて読み込み、3次元化した設計データと比較できるようにした(図-1参照)。データ作成については、約20日間の作業日数を要した。なお、3次元化は基になる設計図面(平面図、縦横断面図)が多いほど、精度が向上し、時間短縮にも繋がるが、本工事では契約当初に大幅な形状変更となり、発注図の縦断面図が適用できなかつたことから平面図を用いて3次元化を行ったため、時間を要している。

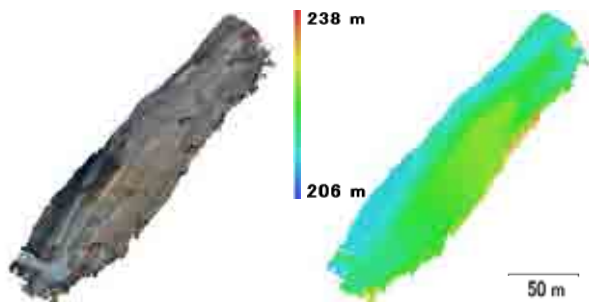


図-1 空中写真(左)から標高データを解析(右)

c) 3次元出来形管理

出来形管理は、UAVを用いた出来形測量を実施し、3次元設計データと出来形測量結果データから出来形合否判定総括表(出来形管理図)(図-2)を作成し、各ポイントとの離れにより出来形の良否判定を行うことで管理した。管理値外の数値が出た場合は合否判定総括表にて一目で把握できるようになっている。なお、一部出来形測量の結果から設計と多少の誤差は生じたが、盛土等構造物に影響がないことを現地で確認した。また、起工測量と出来形測量のデータを使用し、プリズモイダル法により体積計算を行うことで土量を算出した。

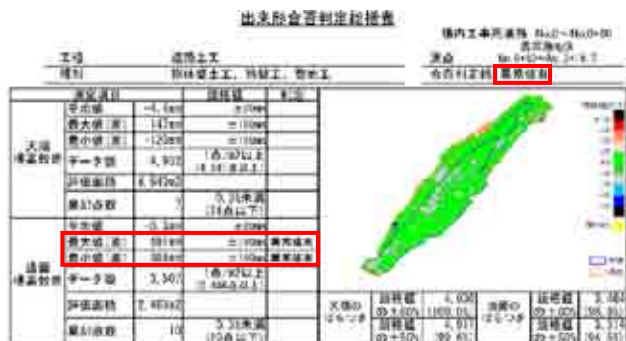


図-2 出来形範囲合否総括表(異常値有の判定事例)

4. 上川原地区斜面对策工事

(1) 工事概要

上川原地区斜面对策工事は湛水により不安定化が懸念される斜面に対し、斜面前面に約39,200³の押さえ盛土を行うことで、円弧すべりの発生を抑止する工事である。

本工事では、位置情報取得システムを搭載した振動ローラを用いて「TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領(以下管理要領という。)」に従い盛土の密度管理を実施するとともに、受注者の技術提案により敷均し作業にはMC(マシンコントロールシステム)を搭載したブルドーザ(写真-1)を、締固めに用いる振動ローラ(写真-2)には位置情報取得システムと併せて加速度応答システムを搭載し、盛土品質の確保を図った施工を実施した。なお、押さえ盛土全体層83層のうち59層目から83層目にかけて盛土材となる流用土の含水比が増加したため、生石灰による土質改良を実施した。



写真-1 MC搭載ブルドーザによる敷均し状況(左)

写真-2 振動ローラによる転圧状況(右)

(2) ICT技術を導入した施工の実施

上川原地区斜面对策工事では2.で記述した③の1段階の施工段階においてICT技術を導入した施工を実施した。

a) MC搭載ブルドーザによる施工

MCを搭載したブルドーザによる施工では、GNSSによりブルドーザの位置情報を計測し、施工箇所の設計データと現地盤データの差分に基づき、排土板の高さ・勾配を自動制御するシステムを搭載している。

従来はブルドーザのオペレーターは、丁張りや敷均し状況を目視確認しながら排土板を操作する必要があったが、MCを搭載することにより排土板高さが自動的に調整される。このことにより、オペレーターによる複雑な操作を行う必要がなくなり、熟練したオペレーターでなくても所定の敷き均し厚で確実に施工することが可能となり、盛土の品質確保に繋がる。

b) 位置情報取得システムと加速度応答システムを搭載した大型振動ローラによる施工

位置情報取得システムを搭載した振動ローラは、締固め転圧時の位置情報をGNSSにより取得し、施工時の移動軌跡及び転圧回数を運転席のディスプレイに表示することで、オペレーターがリアルタイムで転圧状況の確認を行うことが可能となっている。移動軌跡及び転圧回数

については、記録・印字を行うことも可能であり、別途監督員による転圧状況の確認も可能である。加えて、本工事に用いた振動ローラには、締固めによって地盤に与える振動を加速度計で計測し、その周波数を分析することで得られる地盤応答値について取得可能な加速度応答システムについても搭載している。

本工事では、位置情報取得システムを用いて、「管理要領」に基づいた盛土の品質管理を行うとともに、振動ローラに搭載された加速度応答システムを用いて締固め時の地盤応答値を計測し、盛土の締固め状況の指標として利用した。

(3) TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理

「管理要領」に基づいた盛土の品質管理とは、所定の締固め度を満足する締固め回数を予め設定し、設定した締固め回数を確認することで所定の締固め度が確保されていると見なす品質管理方法である。

実施手順は、①盛土材の材料試験、②試験施工、③所定の転圧仕様(回数)設定、④所定仕様に基づく施工、となる。

盛土の管理基準値は、本工事の設計条件である現場湿潤密度 1.82g/cm³ 以上という条件及び材料試験結果から、締固め度は 91.6%以上が必要となるため、施工時に確保すべき締固め度を 92.0%とした。

試験施工では、設定した管理基準値である締固め度 92.0%が得られる転圧回数を確認するために、1 ヤードを 6.5m×7.0m、管理ブロックの大きさを 50cm×50cm として転圧回数を 4・6・8・10・12 回の 5 水準で実施し、砂置換による現場密度試験結果から締固め度を確認した。

転圧回数と砂置換による現場密度試験結果の関係を試験施工の結果として表-1 に示す。

表-1 試験施工(流用土)結果(締固め度)

捲出厚	mm	330	目標値					
最大乾燥密度	g/cm ³	1.702	築堤部	締固度>92.0%(ρ _d >1.82g/cm ³)				
最適含水比	%	18.1						
転圧回数	回	4	6	8	10	12		
乾燥密度	g/cm ³	1.661	1.723	1.756	1.752	1.737		
締固度	%	97.6	101.2	103.2	102.9	102.1		
自然含水比	%	15.6	15.7	15.1	15.3	14.8		
湿潤密度	g/cm ³	1.919	1.994	2.021	2.02	1.994		
目標の達成	築堤部	○	○	○	○	○		

これによると 4 回転圧で締固め度は 97.6%となり、所要の締固め度 92.0%を十分満足することが確認された。そこで所定転圧回数を 4 回として施工を行うこととした。

また、土質条件が異なるため、土質改良を行う際に、当初の試験施工と同様の条件で、転圧回数 2・4・6・8・10 回の 5 水準で試験施工を実施した。なお、土質改良後は、材料試験の結果から締固め度を 90.0%としている。

転圧回数と砂置換による現場密度試験結果の関係を試験施工の結果として表-2 に示す。

表-2 試験施工(改良土)結果(締固め度)

捲出厚	mm	330	目標値					
最大乾燥密度	g/cm ³	1.846	築堤部	締固度>90.0%(ρ _d >1.82g/cm ³)				
最適含水比	%	11.5						
転圧回数	回	2	4	6	8	10		
乾燥密度	g/cm ³	1.668	1.708	1.731	1.746	1.69		
締固度	%	90.4	92.5	93.7	94.6	91.5		
自然含水比	%	13.5	13.9	14.4	15.2	17.5		
湿潤密度	g/cm ³	1.894	1.946	1.981	2.013	1.986		
目標の達成	築堤部	○	○	○	○	○		

これによると 2 回転圧で締固め度 90.4%となっており、所定の締固め度 90.0%を満足したが、材料の品質により、所定の締固め度を満足できない可能性があったため、安全側で施工を行えるように所定転圧回数を 4 回として施工を行うこととした。

(4)加速度応答システムを用いた盛土の締固め管理

締固め度によって振動ローラの振動挙動は変化する。この振動挙動を定量的に評価した値(地盤応答値)を締固め度の管理において補助的に用いている。振動挙動の定量的な評価とは、振動ローラの振動輪の加速度を計測し、周波数分析すると、振動ローラの振動数の他に高調波成分や分数調波成分が観測されることを利用したものである¹⁾。周波数特性における振動ローラの基本振動成分に対する高調波成分や 1/2 分数調波について加算あるいは除算を行ったものを評価値とするが、その式の構成から数種類の方式があり、本工事においては式(1)で表わされる CCV を評価値とした。式(1)の記号は図-3 中の記号による。

$$CCV = \frac{S_{1/2} + S_{3/2} + S_2 + S_{5/2} + S_3}{S_{1/2} + S_1} \dots \dots \text{式(1)}$$

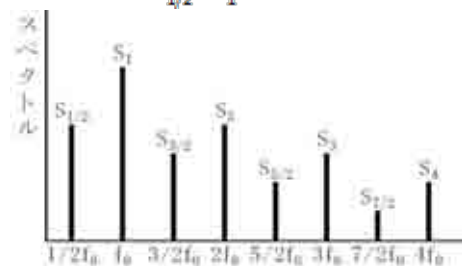


図-3 振動ローラの周波数特性

(3)にて示した当初及び土質改良前の試験施工において、CCV 値についても同時に計測を行い、その結果を基に適切な締固め状態における CCV 値を設定した。

試験施工における CCV 値の計測結果を表-3 及び図-4 に示す。

表-3 試験施工結果(CCV値抜粋)

	2回転圧	4回転圧	6回転圧	8回転圧	10回転圧	12回転圧
最大値(流用土)	8.2	14.0	12.6	9.6	8.5	
最大値(改良土)	9.8	8.4	11.8	9.7	7.6	
最小値(流用土)	2.1	5.2	3.9	3.4	2.5	
最小値(改良土)	2.7	2.0	2.1	2.1	2.1	
平均(流用土)	4.7	9.2	7.0	6.4	4.6	
平均(改良土)	6.5	6.3	6.1	6.1	5.4	

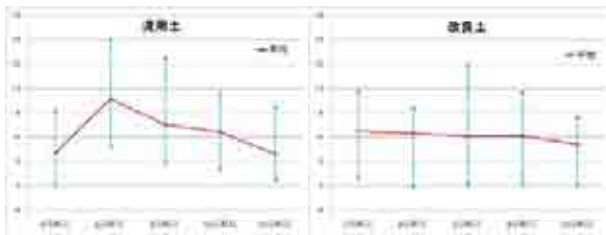


図-4 試験施工結果 (CCV 値抜粋)

流用土においては、所定の締固め度を満足している 4 回転圧時の CCV 値が 2.1~8.2 であることから、CCV 値の管理値を 2~8 を目安として管理していくこととした。改良土においては、(3) で定めた転圧回数 4 回より厳しい条件である転圧回数 2 回の現場密度試験にて、締固め度 90.0%以上となった CCV 値 3 以上を目安として管理を行っていくこととした。なお、盛土材料の品質のばらつきにより CCV 値の上限もばらつくことがそれまでの施工にて判断できたため、上限は設けないこととした。

(5)盛土の品質管理

盛土の品質管理の記録として、ある盛土層における転圧回数と CCV 値を図示したものを図-5 に示す。この図のように所定の締固めが行われていることを目視で確認することが可能である。

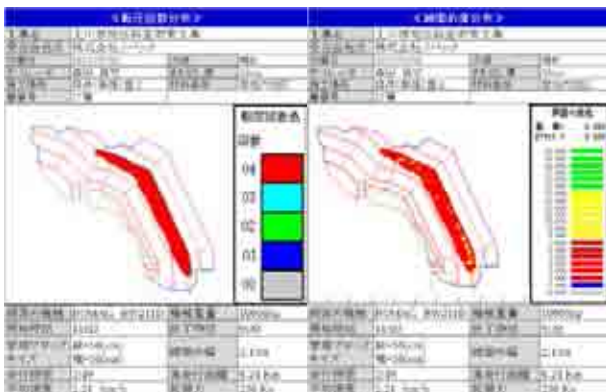


図-5 転圧回数 (左)、CCV 値 (右)

本工事における CCV 値について、盛土全体 (1 層目~83 層目) における各層の平均結果を図-6 に、受注者の提案により実施した現場密度試験 (砂置換法) から得られる乾燥密度と CCV 値の関係を図-7 に、盛土全体の CCV 値の度数分布を図-8 に示す。なお、現場密度試験を実施した箇所の座標を押えておくことで、50 cm×50 cm 角のピンポイントで CCV 値との比較が可能となっている。また、(1) にて示した通り 59 層目から生石灰による土質改良を実施している。

図-6 にて、改良土は流用土と対比すると CCV 値の増加傾向を確認することができる。また、図-7 からは、土質改良実施前の CCV 値と乾燥密度のトレンドは同傾向にあることが分かる。ただし、図-6、図-7 のどちらに

おいても、59 層目から 65 層目までの間における CCV 値についてはこれらの傾向が見られない。この理由としては、58 層目までの改良前の地盤の影響を受けているとともに、土質改良の反応がピークに達していなかったと推定できる。図-8 からは、改良土は流用土と比較すると CCV 値 5~6 以上の割合が多くなると共に、CCV 値 7~8 以上の高い値の割合では流用土より、約 13%多くなっている。

これらの結果から乾燥傾向での施工時には、CCV 値は増加傾向にあると推定できる。

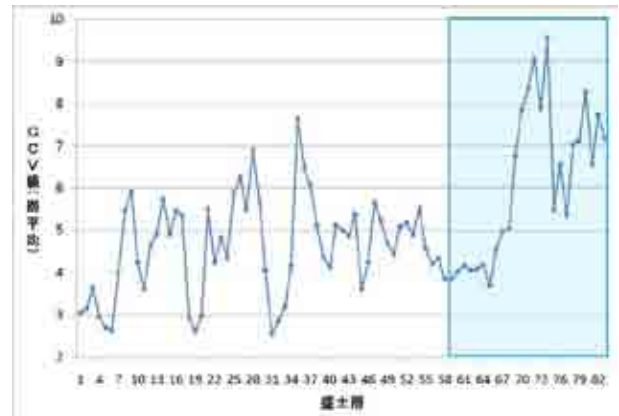


図-6 CCV 値 (各層平均)

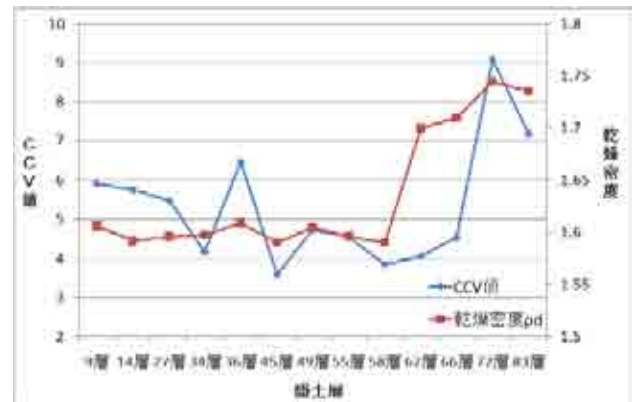


図-7 CCV 値と乾燥密度の比較

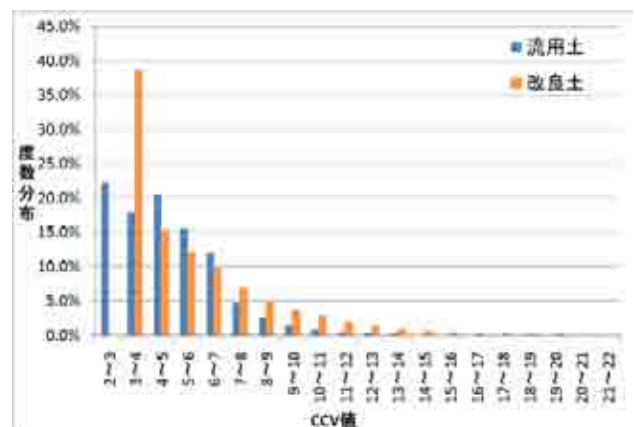


図-8 CCV 値の度数分布

また、現場密度試験（砂置換）にて得られた締固め度の結果を図-9に示す。改良前の結果は、転圧回数：4回、CCV値：2.3～8.4の管理基準において、現場密度試験による締固め度は93.1～95%となっており、盛土の所定締固め度92.0%を満たしていることを確認した。改良後の結果は、転圧回数：4回、CCV値：3以上の管理基準において、現場密度試験による締固め度は91.9～96.2%となっており、盛土の所定締固め度90.0%を満たしていることを確認した。

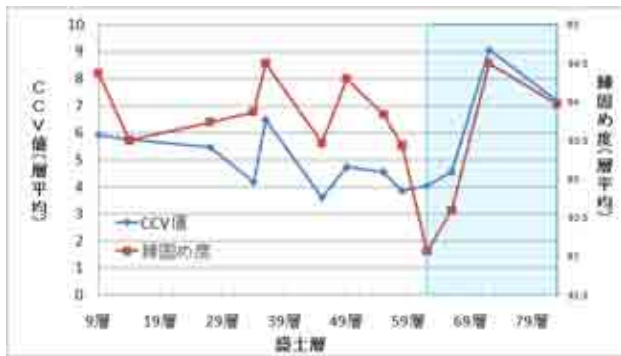


図-9 CCV値と締固め度

これらのことから、TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理と加速度応答システムを用いた盛土の締固め管理を併用した品質管理は有効であると言える。ただし、CCV値は、土の品質（粒度や含水比等）により値が大きく左右されるため、管理基準値の定め方をさらに検討していく必要がある。

5. ICT技術活用効果と今後の課題

(1) ICT技術活用効果

ICT技術を活用した工事の実績から以下の効果があると判断された。

○UAV測量を行うことで、法面での測量等危険な箇所での測量作業がなくなるため、作業の安全性向上等現地作業の負担を大幅に軽減できる。実働日数においても従来8日程度要するところを3日に短縮することができた。

○3次元設計データの作成により従来の平面図や縦断図等の2次元の図面に比べ、現地状況が理解しやすくなる。

○3次元出来形管理では、高精度の施工やデータ管理の簡略化、書類作成の負荷軽減ができる。また、発注者の出来形管理においても、従来現場にて出来形を確認していたものが施工管理データの数値チェック等で代替が可能となる。

○MC搭載ブルドーザを使用することで、従来実施していた丁張り設置・検測作業（本工事の施工規模であれば10日程度の実働日数）が不要となり、施工時間の短縮に繋がる。また、オペレーターによる丁張確認や状況の目視

確認が不要となり、施工時間がオペレーターの技能に左右されなくなる。さらに、均等な敷き均し厚さを確保できるため、締固め度のばらつきを防止し、盛土の高い品質確保が可能となる。

○位置情報取得システムと加速度応答システムを搭載した大型振動ローラを使用することで、オペレーターが車載モニターにて締固め回数分布図リアルタイムで確認することができ、踏み忘れ等のヒューマンエラーが少なくなると共に、過転圧（オーバーコンパクション）の防止等も可能となる。また、従来の盛土工事の品質管理では、施工後に現場密度試験を行うことが一般的であり、試験結果を迅速に施工に反映することが難しかったが、位置情報取得システムを用いた品質管理基準と併せて加速度応答システムを用いた品質管理を行うことで、施工を行いながら締固め状況を計測できるため、迅速に施工に反映させることが可能となる²⁾。

(2) 今後の課題

ICT技術を活用した工事の実施において、以下の課題が確認あるいは懸念された。

○3次元測量では、UAVは鉛直方向を撮影するため、立木や草、岩の陰になる箇所は精度が低く、従来の測量以上の伐採作業が必要となる。

○3次元設計データ作成では、2次元データの数が少ないと3次元化するための時間がかかるため、作業時間短縮のためには予め図面等を揃えておくことが必要である。

○ICT施工で用いるブルドーザ、及び振動ローラ等の建設機械の位置情報を常時取得するシステムについては、施工箇所が山間部等の場合には、衛星からの電波が遮られ、必要衛星数を補足できない可能性がある。同様に、近傍に建物や法面がある場合においても、衛星からの電波が多重反射し、測位値に誤差を生じる可能性がある。

○位置情報取得システムと加速度応答システムを搭載した大型振動ローラでは、材料（土）の状態によりCCV値に大きなばらつきが生じる。このため、CCV値の管理設定値を、単純に試験施工時に締固め度を満足した値で設定してしまうと、材料のばらつきによる影響を受ける都度対応が必要となる。特に上限値については、材料の状態が乾燥側にある場合はCCV値は高い傾向を示すことが推測されるため³⁾、試験施工時に含水比や粒度等のCCV値に影響を与える要因と組み合わせて管理値を設定することが重要となる。今後の展望としては、含水比や乾燥密度だけでなく粒度や透水係数等土の他の係数との比較を行い、管理値を設定することでさらに幅広い施工に適用していくことも可能であると考えられる。また、現在はリアルタイムで締固め状況を確認できるのはオペレーターのみとなっているが、今後転圧状況のデータをクラウドに転送し、監督員もリアルタイムで確認できるようなシステムを構築することでさらによりよい管理ができるものとする。

6. おわりに

今回報告した2件のICT技術を用いた工事についてはいずれの工事においても、受注者から従来の施工方法と比べ生産性が向上したと回答を得ており、発注者側からしても、確実な品質の確保、施工日数が短縮できるため工程管理のしやすさ等の観点から生産性が向上できている。課題についても、ICT技術のさらなる向上及び現場での対処等により改善していくことが出来るものと考え

る。
川上ダムにおいても生産性向上を図り、よりよい品質のダムをいち早く建設できるよう進めていきたい。

今回紹介したICT技術を用いた工事の成果と課題が今後実施されるICT活用工事を進める上での参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 高倉敏・北村佳則・大谷茂・黒台昌弘・西尾貴至,「盛土地盤における締固め品質管理手法の開発」,土木学会,土木建設技術シンポジウム論文集,2004,p183-188
- 2) 古屋弘「加速度応答法を用いた盛土のリアルタイム品質管理手法」,大林組研究所報 No.77 2013
- 3) 坂本博紀・坂井田輝・田中英晶・有馬慎一郎,「フィルダムコア盛立の新たな品質管理手法の検討」,平成29年度水資源機構技術研究発表会

長距離シールド工事における 直接吸泥排土の課題と対応

坂井 睦規¹

¹農林水産省 近畿農政局 東播用水二期農業水利事業所 調査設計課

(〒651-2304兵庫県神戸市西区神出町小東野30-19)

東播用水二期農業水利事業では、真空吸引を用いた直接吸泥を行う泥濃式シールド工法により、平成27年度からサイホンの建設を進めている。ところが、工事を実施していく中で排泥管内において礫の閉塞が多発し、工事の進捗が悪化、工期内に工事を完了できるかが不明となった。そこで閉塞発生に係るメカニズムについて調査し、実際の掘進データから閉塞に影響を及ぼす要因について考察を行うと共に、排泥吸引機器の変更や、吸引台車の利用の検証等、対応策を模索し、パターンごとの工期シナリオを作成した。本発表は、現場で問題があった際に事象を説明可能な段階まで定量化し、工程管理の対応へと繋げた事例を報告するものである。

キーワード 工程管理, シールド工法, 泥濃式, 直接吸泥排土

1. はじめに

東播用水二期地区は兵庫県南東部に位置し、神戸市外3市1町にまたがる7,313haの農業地帯である。本地区の基幹的な水利施設は淡河川・山田川疏水事業（M21～T8）、国営東播用水事業（S45～H4）において整備されてきたが、近年、施設の老朽化による補修・維持管理費用の増大や水利施設の機能低下、及び地域の営農形態の変化に伴う用水不足等の課題が生じてきた。そのため、平成25年度から東播用水二期農業水利事業として、水利施設の改修、及び用水系統の再編を行うことを目的として事業着手に至った。

地区内の既設水路のうち、淡河川・山田川疏水事業において築造された淡河幹線水路、山田幹線水路（以降、「淡山水路」と呼ぶ）は造成から100年以上が経過しており、老朽化の進行が著しい。特に三木市緑が丘団地に

おいては水路上部が宅地化されるなど、施設の老朽化による陥没事故等の社会的リスクが増大している。そこで、宅地下を通る淡山水路を閉塞し、新たな水路としてシールドトンネル工事により緑が丘サイホンを新設することとした。本工事は事業計画上の工期の観点から遅くとも平成31年7月までに完了しなければならない。緑が丘サイホンの建設予定路線を図-1に示す。

本報文では、長距離シールドトンネル工事の施工中に発生した、真空吸引を用いた直接吸泥排土における排泥管閉塞の要因分析と共に、工程管理に係る対応について報告する。

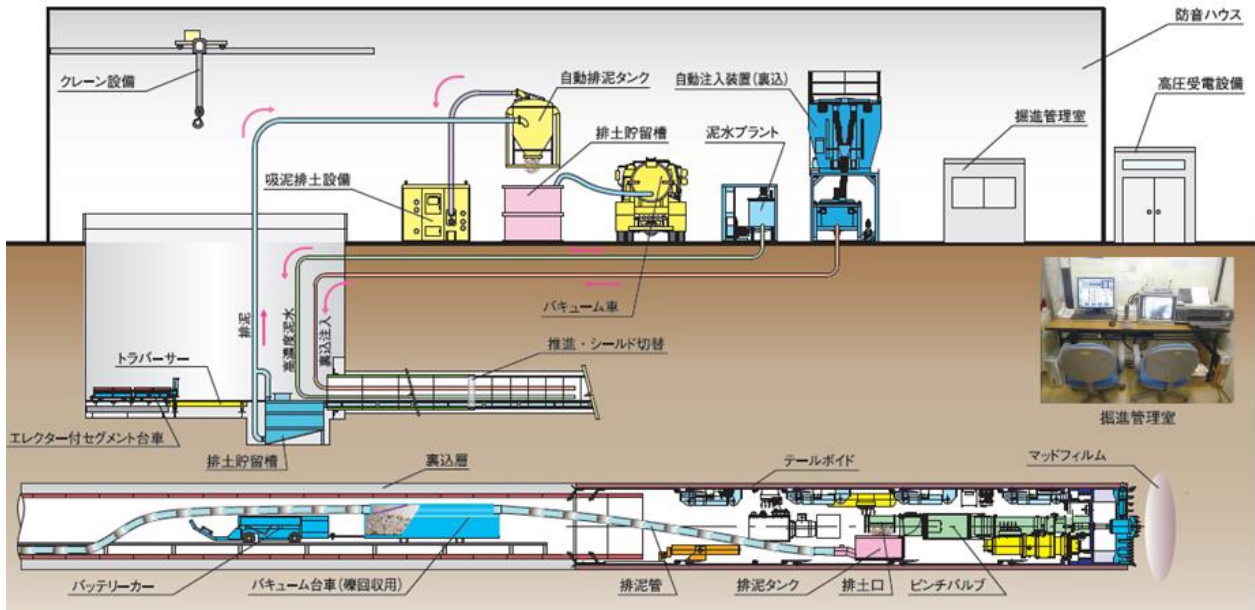
2. 緑が丘サイホンの新設について

緑が丘サイホンは三木市緑が丘団地下に建設中の2,447mのトンネルである。本施工における特徴としては、



図-1 緑が丘サイホン建設予定路線（兵庫県三木市）

◆ システム図



- 過密化した都市において生活環境に与える負荷を最小限にするコンパクトなシステムである。
- 推進工法で長距離・急曲線を得意とする泥濃式をシールド工法に応用した。
- 泥濃式新排泥システムにより、超長距離施工での排泥管閉塞トラブルを克服した。

図-2 ESS 工法の一般的なシステム¹⁾

道路に沿った施工となるために曲線半径が15mとなる急曲線区間があること、宅地の近傍や道路、ため池、鉄道の直下を通過するため、地盤へ与える影響を抑える必要があること、中間立坑を設置する適地が無く、長距離掘進となること等が挙げられる。これらに対応するため、本工事ではエコスピードシールド工法（以降、「ESS工法」と呼ぶ）を採用している。工法の概略図を図-2に示す。なお、本工事においてはシールドトンネルを構成する全2,654のリングを施工単位とし、リングの本数によって施工の進捗状況を確認している。リングの長さは300、750、1,000mmとあるが、急曲線区間等の一部区間を除くほとんどの場所（2,352リング）で1,000mmの長さのリングを使用している。

ESS工法では掘削対象地盤が崩壊しないようにシールドマシンを地山に押し付けて必要な土圧を保持しながら掘削を行うが、主な特徴として「バキュームにより坑内土砂を直接排出する」という点がある。掘削された土砂は排土口からマシン内に入り、地上部にある100kWと75kWの2つの吸泥排土設備による真空吸引により排泥管内を輸送するため、坑内土砂の排出にかかる作業・輸送時間の省略が可能となる。また、掘削時に注入する高濃度泥水によって土質条件によらず安定的な掘進が可能であり、掘削土砂は止水性の高いマッドフィルム層によってコーティングされることで管への粘着力が低下し、流動性が高くなることで閉塞の発生を低減させ、安定的な排土を可能としている^{2),3)}。



図-3 送泥管の閉塞状況

3. 閉塞の発生と傾向の分析

(1) 閉塞の発生とそのメカニズム

シールドの総リング数が600に到達し、掘削を開始して3ヶ月が経過した平成29年7月以降、排泥を輸送する排泥管内において礫が一部分に集中し、対応に排泥管の解体を必要とする突発的な閉塞が発生するようになった。その閉塞状況を図-3に示す。施工距離が延びるにしたがってこのような閉塞が頻発するようになり、作業に支障が生じるようになった。これを受けて受注者及びESS工法協会と打合せを行った結果、図-4のメカニズムにより閉塞が発生していることがわかった。また、真空状態にある排泥管内においては、乾燥により排泥と礫が分離しやすくなる、排泥管の延長に比例して閉塞が発生する可

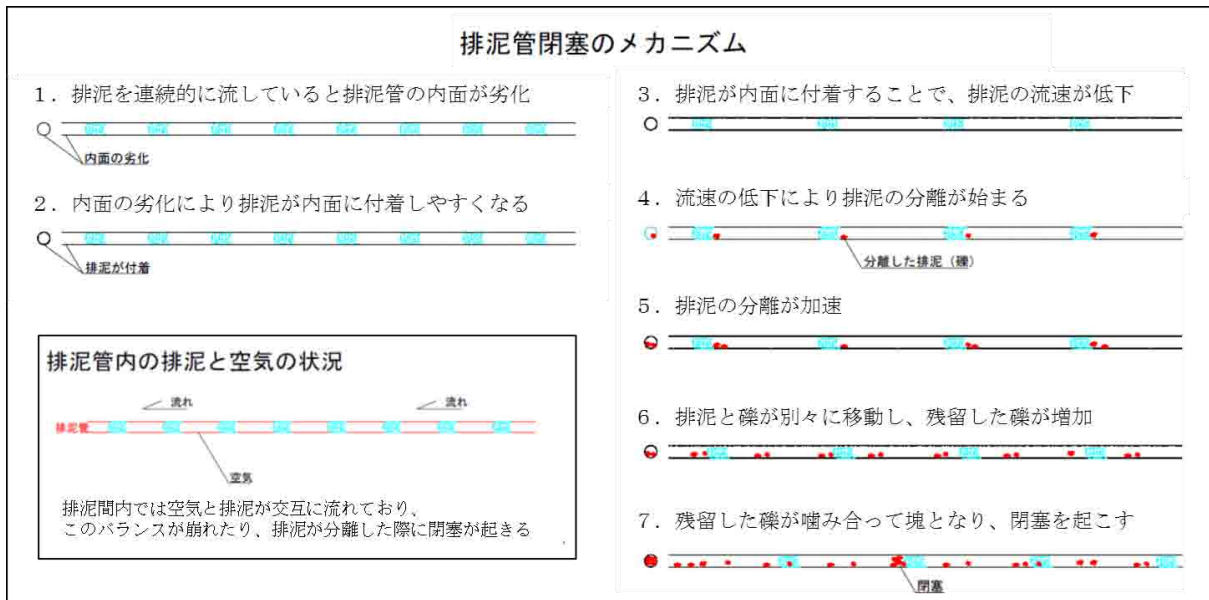


図4 排泥管閉塞のメカニズム (ESS工法協会より提供)

能性のある箇所が増える等の影響があるため、閉塞の発生自体を無くすことは原理的には難しいと判明した。

現場の作業員の実感として施工延長が長くなるにつれ、①礫が詰まる回数が増え、②礫を取り除く時間も増加しているという報告を受けていた。閉塞が多発すると、閉塞箇所の特定、排泥管の解体と内部の清掃、礫の除去にかかる時間が増大する。また、吸泥排土の効率が悪くなることで掘進が排泥速度の影響を受けるようになり、リングあたりの掘進時間が増加して工事の進捗に遅れが生じ始めていた。受注者やESS工法協会との打合せを通じて、今回の長距離の施工等の条件により閉塞の発生が多くなって顕在化した問題であると考えられることがわかったが、工程の管理をする上で、メカニズムを元にした論理式を作成して作業時間の推定を行うことは不可能であるとの結論に達した。

(2) 閉塞の発生傾向の把握

工程を管理する上では閉塞の影響も考慮に入れた掘進時間の推定が必要となる。しかし、閉塞の発生自体は現場で確認されているものの、比較可能なデータとして発生件数が正確に記録されていなかった。そこで、シールドマシンの稼働記録を用いて11月30日時点までの掘進時間と閉塞の関係性を調査した。

掘進作業に係る時間のうち、実際にシールドマシンが掘進を行っている時間を実掘進時間と定義する。また、休憩時間を除いた、掘進作業中にマシンを稼働させていない時間を停止時間と定義し、実掘進時間と停止時間の合計を総掘進時間と定義した。

施工延長に対する1リングあたりの各時間の推移を図5に示す。なお、初期掘進区間である施工延長22mまでのリングと、リング長が1000mm以外の区間においては、施工延長に対する各時間の推移を比較する上で障害とな

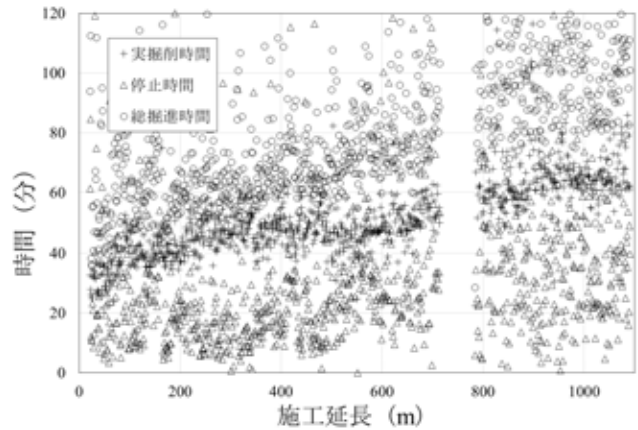


図5 施工延長に対する各時間の推移

るため、データより省いた。また、データが大きくばらついているため、掲載の都合上、縦軸の最大値を120としている。データのばらつきは非常に大きいものの、図5により、掘進を進めて施工延長が増加していく中で1リングあたりの実掘進時間、停止時間、総掘進時間が漸次的に増加しており、その結果、進捗の遅れが生じていることが確認できた。

次に、閉塞の増加を確認するため、実掘進時間においてマシンの推進力が0になった回数(=掘進を止めた回数)を停止回数と定義した。しかし、停止回数がそのまま閉塞の発生数となるとは言えない。そこで、停止時間を停止回数で割ることで、マシンが1度止まった際の停止時間の平均時間を算出した。閉塞が起きた場合、礫の撤去のために排泥管を外す等の対処をする必要がある。現場の実感として、1回の閉塞に対してこの作業は最低でも10分以上かかっていたことから、この値が10分を超えた場合は閉塞が起きていたとして整理した。最後に全987データを5区間に分け、停止時間/停止回数が10分/回を超えたリング数を比較した。表-1にその結果を示す。

表-1 より、施工始点より距離が離れた区間ほど、閉塞が発生したリング数が増加する傾向があることがわかり、掘進を進めるにつれて閉塞の発生数が増加するという現場の実感を、定量的に示すことが出来た。

(3) 各要因の整理と掘進時間の推定

作業時間を閉塞のメカニズムに基づいた論理式で示すことは出来なかったものの、施工距離が長くなるほど閉塞の発生が増加することが確認できたため、その要因を探るべく、前節までに確認した項目と共に、総掘進時間に影響する可能性がある礫率、N値の関係性を調査した。各項目の値はリング毎のばらつきが非常に大きいため、外れ値の影響を大きく出してしまう。外れ値の影響を抑えるために100リング毎に平均値を取り、全987データから各10区間における平均データを作成した。各データの施工延長に対するデータを図-6に示す。また、それぞれの関係性を確認するため、項目間の相関係数を調べた。結果を表-2に示す。

相関係数の捉え方には諸説あるが、本報文においては相関係数の絶対値が0.6以上となれば他の箇所比して強い相関があると捉え、当該箇所を網掛けで示した。

表-2にて網掛けされている箇所のうち、原理的に施工距離と実掘削時間、実掘削時間と停止時間は相互に影響すると考え難いため、それらの相関係数が高い理由は他の同一の項目との相関が高いためであると考えられる。また、前節において定義した停止時間/停止回数の増加は閉塞の発生回数の増加と関係があると考えられるが、その値は施工距離、実掘削時間、停止時間と強い相関を持っていることがわかった。

以上より、実掘削時間と停止時間の増加は停止時間/停止回数、すなわち閉塞の発生の増加に大きな相関があり、また、閉塞の増加要因として礫率やN値の値も相関が無いとは言えないものの、最も大きな要素は施工距離であると確認することが出来た。閉塞の発生が実掘削時間に影響を及ぼす理由としては、このデータを踏まえた

現場からの聞き取りにより、土砂の吸引力が下がった際にオペレーターが掘削速度を落とすなどの対応をするためであると判明した。

本節の結論として、掘進の時間を構成する要素を実掘削時間と掘削停止時間に分けた際、他の要因も関係はするものの、最も大きな影響を与える要素は閉塞であること、閉塞の発生は施工距離に応じて単調的に増加することがわかった。すなわち、総掘進時間の増加係数は施工延長との比で示すことができ、工程管理においては現況までのデータを元に一次的な直線を引くことで将来的な予測を立てることが可能となる。

4. 対応策の考案

前章において、真空吸引による直接吸泥排土では礫の集中による閉塞の発生は構造的に起こりうることであり、根本的な解決は難しいと判明した。そこで、今まで得られたデータを元に帰納的に今後の掘進時間を推定し、工程管理に用いた。

2018年1月より、現場においては閉塞の発生要因を可能な限り取り除くため、定期的に排泥管内に礫や土砂を

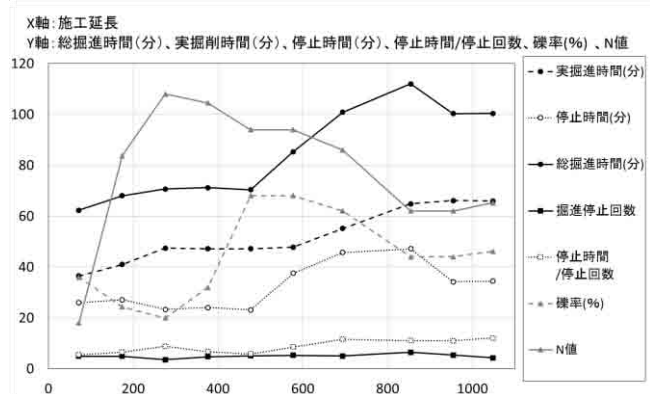


図-6 施工延長に対する各項目の推移

表-1 各区間において平均10分を超える掘進停止が起こったリング数

区間	22m～225m (データ数 200: No.1～200)	226m～426m (データ数 200: No.201～400)	427m～628m (データ数 200: No.401～600)	629m～904m (データ数 200: No.601～800)	905m～1091m (データ数 187: No.800～987)
リング数	26	57	54	80	77

表-2 各項目間の相関係数

	施工距離	実掘削時間(分)	停止時間	掘進停止回数	停止時間/停止回数	礫率(%)	N値
施工距離	1.00						
実掘削時間(分)	0.97	1.00					
停止時間	0.66	0.64	1.00				
掘進停止回数	0.32	0.29	0.66	1.00			
停止時間/停止回数	0.86	0.89	0.77	0.16	1.00		
礫率(%)	0.43	0.23	0.44	0.47	0.20	1.00	
N値	-0.04	-0.05	-0.18	-0.35	-0.02	0.05	1.00

巻き込みやすい新聞紙等を通し、排泥管内の残留礫や壁面土砂の清掃を実施した。また、バキュームユニットも出力の高い装置に変更することで吸引能力を上げ、かつ掘進速度を調整することで一度の送泥量を減らし、閉塞の発生を抑える為の対応を行っている。これらの対応を取ることで、従来よりも現場においては閉塞発生数を抑制することが出来ている。

一方で、閉塞の発生数が著しく増加する等の直接吸引に係る障害が発生しない保障は無く、他の障害が発生した際の対応も必要となる。そこで2017年12月に、坑内で排泥を積載して移動できる吸引台車(図-7に示す。)による土砂運搬のサイクルタイム実証試験を実施し、直接吸引の代替法としての利用を検証した。小口径シールドの中を通行するため、台車の大きさに制限がある点、排泥作業と平行して他の作業を行うことが出来ない点から、結果としては2.4km地点のリングの総掘進時間が460分と、直接吸引による施工の2倍以上がかかることがわかり、吸引台車を用いて施工効率を向上させることは難しいと確認できた。一方で直接吸引と比べて不確定な要素が少なく、どのような状態でも排泥作業を行うことが出来るという利点も把握できた。

本工事においては平成31年7月までに施工完了するか否かが他の関連工事に大きく影響を与えるため、不測の事態が起きた際の対応策、及びその対応策に間に合うかどうかを判定する必要がある。そこで、延長に応じた総掘進時間の低下を考慮した工程を基とし、シナリオ1:



図-7 坑内へ搬入する吸引台車

そのまま掘進を続けた工程、シナリオ2:バキュームユニットを変更し、排泥能力を上げた場合の工程、シナリオ3:シナリオ2の途中で吸引台車に切り替え、かつ平成31年7月までに施工完了が出来る工程の3つのシナリオを作成した。それぞれを図-8に示す。この結果、シナリオ1では当該時期までに施工を完了することが出来ないこと、特に問題が起らなかった場合はシナリオ2では当該時期までに施工を完了することが出来ることがわかった。また、万が一シナリオ2の途中で直接吸引を用いた施工が不可能になった場合、その発生が平成30年11月以降であれば、その時点で吸引台車に変更することで遅くとも平成31年7月までに施工が完了し、事業工期全体への影響が無いことを示すことが出来た。

5. あとがき

小口径シールドにおける真空吸引を用いた直接吸引排土はスペースと作業の省力化による低コスト化を実現した反面、本工事のような長距離の実績はなく、不測の事態が起きた際の対応を模索する必要があります。本報文ではデータ分析を通じた遅延要因の分析と進捗の推定、吸引台車によるサイクルタイム実証試験を活用した工程管理に係るシナリオ作成の結果を中心に掲載しました。発表内容をまとめる過程で、現場で起きている状況や作業員の実感を定量的なデータを用いた説明資料として整理する難しさを感じると共に、その重要性も学ぶことが出来ました。本報文では画期的な技術打開策の発案に至るまでは行きませんが、皆様の工法選定等の判断の一助となれば幸いです。

参考文献

- 1) 檜皮安弘:第41回「最新の推進工法施工技術」,日本プロジェクト・リサーチ,p.70-83,2016
- 2) ESS 工法協会:ESS 工法設計積算資料,2017
- 3) ESS 工法協会:ESS 工法カタログ 29年度,2017

工期シナリオ	H30												H31						
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月
工程① (以前からの掘進時間の推移より算出)																			
日掘進量	5.0R		4.5R					4.0R									3.5R		
シールド工	シールド工												到達後作業 (間に合わない)						
工程② (バキュームユニットの変更)																			
日掘進量	6.0R		5.5R			5R						4.5R							
シールド工	シールド工												到達後作業						
工程③ (バキュームユニット変更後、吸引台車を用いて7月中に完了する場合)																			
日掘進量	6.0R		5.5R			5R						4.5R	2R						
シールド工	シールド工												吸引台車		到達後作業				

図-8 工期シナリオの比較

超緻密高強度繊維補強コンクリートによる 床版補修工事について

常岡 信希¹

¹京都府 中丹東土木事務所 道路計画室 (〒623-0012 京都府綾部市川糸町丁島 10-2)

松島橋は供用後 55 年が経過し、床版に損傷が確認されたため、主な劣化因子の一つである表面水の遮断と床版強度の向上を目的とする超緻密高強度繊維補強コンクリートを使用した補修を行い、その効果を載荷試験及び FEM 解析により検証した結果について報告するものである。

キーワード コンクリート床版補修、合成桁、たわみ、FEM 解析

1 はじめに

主要地方道舞鶴野原高浜線は、京都府舞鶴市の東舞鶴中心街を起点とし、大浦半島を周回し、福井県大飯郡高浜町に至る全長 22.9km の路線である。図 1 に示すとおり周辺には海上自衛隊、火力発電所及び工業団地等があり通勤車両や大型車が多い状況である。(H27 センサス交通量 11,403 台/24hr)



図 1 位置図

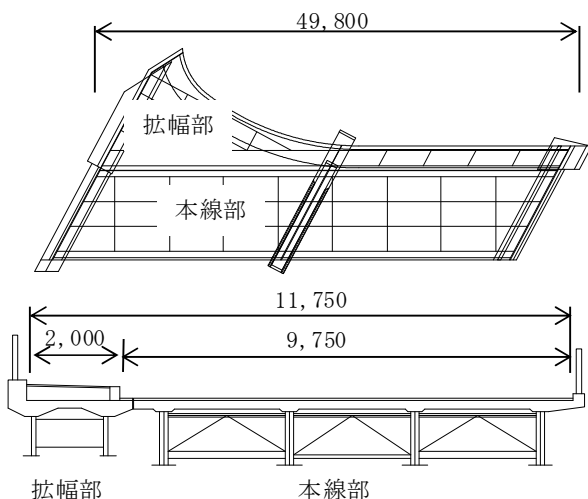


図 2 橋梁一般図

松島橋の橋梁一般図及び諸元は図 2 及び表 1 のとおりであり、本橋は左岸下流側バチ部及び歩道部を後付けて拡幅している。

表 1 橋梁諸元

橋長	49.8m (支間長 L=24.125m×2 連)
幅員構成	車道 9.75m + 片歩道 2.0m
竣工年	本線 1962 年 (建設後 55 年経過) 拡幅 1982 年 (建設後 35 年経過)
適用示方書	本線 鋼道路橋の合成桁設計施工指針 (昭和 34 年) 拡幅 道路橋示方書 (昭和 55 年)
活荷重	本線 不明 拡幅 TL-20 (1 等橋)
上部工形式	本線 単純合成鉄桁 拡幅 A1-P1 単純非合成箱桁 P1-A2 単純合成鉄桁
下部工形式	重力式橋台、パイルベント橋台・橋脚
斜角	62° 00' 00"

2 事業概要

(1) 現状

本橋の現状は、橋面には舗装のクラック及びポットホール等が確認され(写真 1)、その都度部分補修を繰り返しており、また床版下面には遊離石灰(錆び汁はなし、写真 2)が生じていることから床版の劣化が懸念され抜本的な補修を検討することとした。



写真 1 舗装損傷状況



写真 2 床版下面状況

(2) 健全性評価

補修前の床版の健全性を確認するため、コア採取によりコンクリートの各種試験を実施した結果を表2に示す。

表2 床版の現況調査結果

調査項目	調査結果
床版はつり	被り51mm、部分的な錆
圧縮強度	33N/mm ² (3箇所平均値)
中性化	24mm(被り以内)
塩分含有量	1.2kg/m ³ (主鉄筋位置)

この結果、いずれの試験結果からも緊急性を有する致命的な変状は認められなかった。

次に、床版及び主桁各部材について平成24年道路橋示方書に基づき設計荷重B活荷重として応力照査を実施した結果、コンクリート及び鉄筋双方、並びに桁各部材において耐力不足となった。

(3) 補修工法

対策工法の選定に当たり、本橋は、重要度が高い路線であり、重交通路線であることから、将来的に補修を繰り返す工法ではなく、恒久的な対策が必要と判断した。ここで恒久対策とは顕在化する変状箇所を補修するだけでなく、内在する劣化要因や外的要因の排除を図りおよそ10年以上にわたり補修効果を期待するレベルと位置付けられている¹⁾。

また、単なる補修のみに留まらず現状の大型車交通量に対応するため一定の補強が図られることを主な選定要素とした(表3)。

表3 対策工法比較表

工法	補修	補強		本工法
	切削OL	炭素繊維補強+切削OL	上面増厚+防水	
内容	橋面防水のみで床版未補修	橋面防水+床版下面に炭素繊維補強	床版を10cm増厚+鉄筋増量	特殊コンのみで防水層不要
経済性	安価	高価	最も高価	高価
課題	強度不足未解消	床版コンの強度不足	死荷重増に伴い主桁+基礎の補強必要	死荷重増なく床版強度向上

比較選定の結果、補強に伴う死荷重増加がなく、かつ確実な防水効果が得られ、早期に交通開放可能なことから本工法を採用することとなった。

なお、超緻密高強度繊維補強コンクリート(以下「特殊コン」)の材料特性は表4に示すとおりであり、特徴としては、早期に高強度が得られ、緻密構造であることにより劣化因子の侵入を抑制できることである。

表4 特殊コンクリート材料特性

圧縮強度	130N/mm ² ($\sigma_{24h}=100N/mm^2$)
ヤング係数	40kN/mm ²
透気係数	$0.001 \times 10^{-16}m^2$ 以下
水結合比	20%程度
構成材料	セメント、結合材(シカフーム等) 水、骨材(砂、鋼粉末)、鋼繊維

(4) 本工法の概要

本工法の作業フローを図3に示す。まず橋面舗装(t=5cm)を通常の切削機により切削し、床版表面2cmをウォータージェット工法(WJ)によりはつり取った後、特殊コンクリートを打設し、舗装を復旧するものである。なお床版はつりにWJを用いた理由は、アスファルト切削により床版表面に脆弱部が生じた場合、特殊コンクリート打設時に悪影響を及ぼすことを避けるためである。また特殊コンクリート厚の打設厚については、必要最小厚1cmを確保することから、施工時の不陸を考慮し、2cmとすることとし、施工後、その効果を検証することとした。本工法の施工断面図を図4に示す。

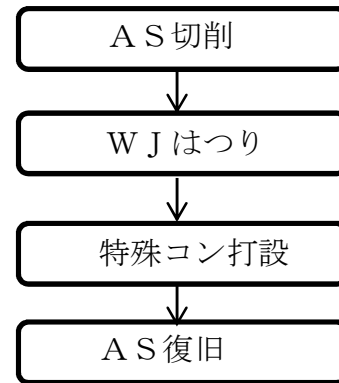


図3 補修作業フロー

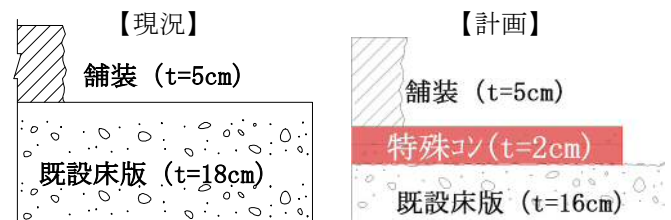


図4 補修前後の断面図

(5) 施工状況

a) AS切削

舗装切削後の床版表面の状況については、床版の抜け落ちを伴う損傷はなかったが、舗装修繕箇所等においては、床版表面のコンクリートが一部土砂化していることが確認された(写真3)。また、過去の切削等舗装補修時によるものと思われるアスファルト成分が広範囲に付着していた(写真4)。



写真3 床版土砂化状況



写真4 AS切削後の床版表面

b) WJはつり

WJ工法は、ブレーカー等による打撃工法とは異なり、高圧水によりコンクリート中のセメントモルタル分を破壊し、撤去することから作業時の振動が

少なく、床版への悪影響を軽減することが可能である²⁾(写真5)。

はつり後の床版表面の状況は写真6に示すとおりであり、ほぼ全橋面にわたって高圧水の噴射跡が残留することから、全体的にコンクリート強度が低く、劣化している状況が確認された。



写真5 WJはつり状況 写真6 はつり後の床版表面

c) 特殊コンクリート打設

特殊コンクリートの標準配合は表5に示すとおりであり、少ない水によりセメントとシリカフェーム等とを結合させ、これら結合材が反応後の容積比で90%以上を占めることにより強固で緻密な構造となるものである。

製造及び打設に当たっては、写真7～10に示すとおり近隣の作業ヤードにプラントを設営し、プレミックスセメント等の各材料を専用のミキサーにより練混ぜることとした。品質管理については、圧縮強度、スランプフロー及び空気量とし、試験練り結果等に基づき管理値を設定した。

また、敷き均しについては、コテ仕上げ・養生シート設置の一連の作業が効率的に実施できるよう専用の機械を用いた。

なお、本コンクリートは、材料分離抵抗性に優れるが、手で持ち運べるほどの高粘性であるため、練混ぜ及び敷き均しそれぞれで専用の機器が必要となる。

表5 特殊コンクリート標準配合表

設計強度 (N/mm ²)	水結合比 (%)	単位量(kg/m ³)				
		ミックスセメント	水	鋼繊維	銅ウール	混和剤
130	21	1750以上	250~300	150以上	150以上	40~50



写真7～10 特殊コンクリートの製造及び打設状況

また、特殊コンクリートは、 σ_{24h} 強度が100N/mm²以上となり、2車線確保しながら次段階の作業に移



写真11 特殊コンクリート打設完了状況

行する必要があることから打設日の翌日には交通開放することとした。打設完了後の交通開放状況を写真11に示す

d) 舗装

特殊コンクリート打設完了後、舗装界面における所要せん断強度(0.15N/mm²以上³⁾)を確保する必要があるため通常の乳剤ではなく専用の接着材を特殊コンクリート表面に塗布すると共に、舗装内に浸透した表面水を適切に排水させるため地覆付近に排水管($\phi 12$)を設置した(写真12)。なお、舗装材には、水による剥離抵抗性に優れた改質Ⅲ型-W相当品を使用した。



写真12 舗装接着材塗布状況

3 載荷試験

(1) 試験概要

本工法による特殊コンクリートの効果を検証するため補修前後に総重量25t程度の定荷重車両(トラックレーン)を走行させ、床版のたわみ、主桁のひずみ及び床版下面ひび割れ幅を計測する載荷試験を実施した。

(2) 試験方法

載荷試験による計測箇所及び内容は以下のとおりとした。

- ・床版
 - 補修前後の床版の剛性の変化を把握するため床版下面のたわみ量を計測。
- ・主桁
 - 補修前後の主桁の荷重配分状況を把握するため上下フランジ及びウエブのひずみを計測。
- ・床版下面
 - 車両走行時の床版下面ひび割れ幅等の挙動を確認することにより床版の劣化状況を把握するため床版下面にクラックゲージを設置。

なお、計測箇所及び計器設置状況を図5及び写真13に示す



写真13 計器設置状況

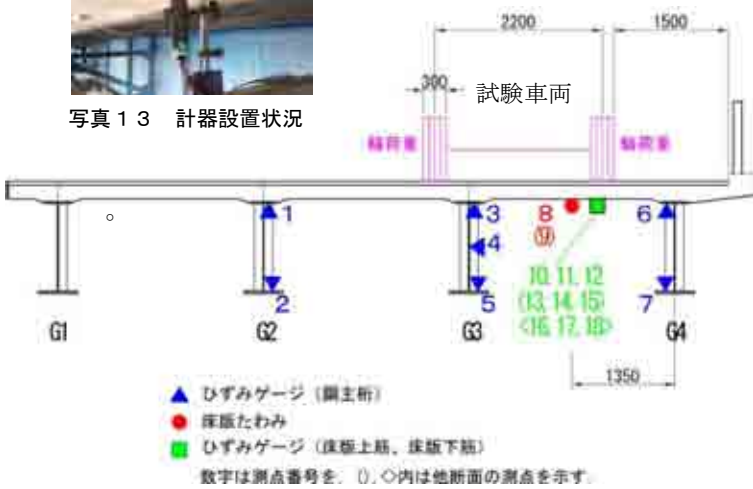


図5 計測機器設置位置

(3) 試験結果

a) 床版たわみ

補修前後の床版たわみの変化については図6に示すとおりであり、補修前のたわみが-1.37mmであったのに対し、補修後には-0.745mmとなり約46%低減された。

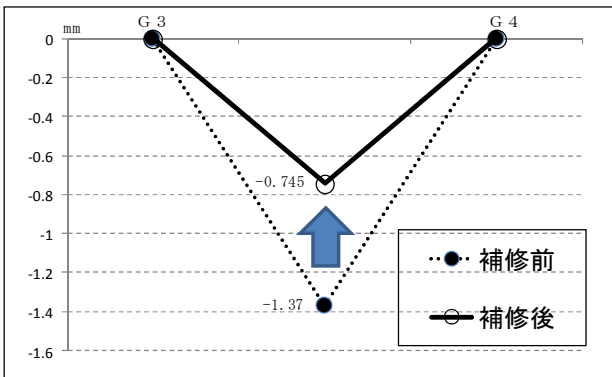


図6 補修前後の床版たわみ

b) 主桁のひずみ

同様にG3桁のひずみの変化について図7に示す。

下フランジに着目すると補修前後のひずみが 107μ から 94μ となり約10%程度軽減された。また中立軸においては、上フランジからの距離が補修前550mmに対し補修後は305mmになったことから245mm中立軸が上昇したことになる。これは、補修前に主桁に働いていた圧縮力が補修後の床版剛性が増加したことにより軽減されたことを意味しており、合成桁本来の機能を一部回復したものと判断される。

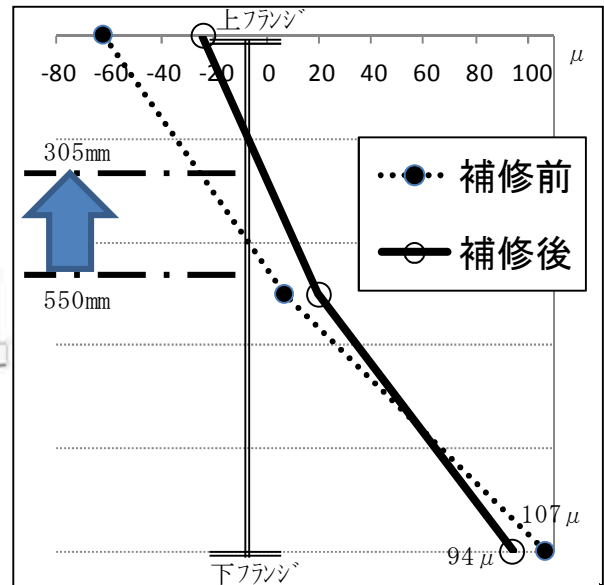


図7 補修前後のG3桁のひずみ

c) 床版下面のひび割れ

定荷重車両を走行させた時の補修前後の床版下面ひび割れ幅の変化について、図8に示す。図中の縦軸は、ひび割れはば(mm)、横軸は走行時間(秒)である。

図より補修前後のひび割れ開閉量(図の振幅高さ)が0.084mmから0.055mmとなり35%軽減された。

このことから、特殊コンクリートと既設床版が一体化されたことにより床版の上下動が抑制されたものと判断される。また補修前には0点へ戻り切らずに生じていた残留変位が改善されている。一般的に床版の劣化が進行するとひび割れ挙動が走行前の値に戻らず残留変位として表れることから、補修前の床版劣化状況がある程度改善されたものと推測される。

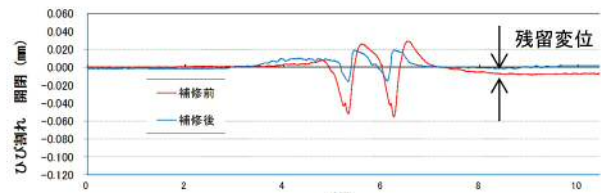


図8 補修前後の床版下面ひび割れ幅

4 FEM解析

(1) 解析概要

载荷試験の理論的検証を行うため、3次元立体FEMモデルによる静的線形解析を行った。本モデルの概念図は図9に示すとおりであり、床版をソリッド要素、主桁をシェル要素、対傾構をビーム要素とした。

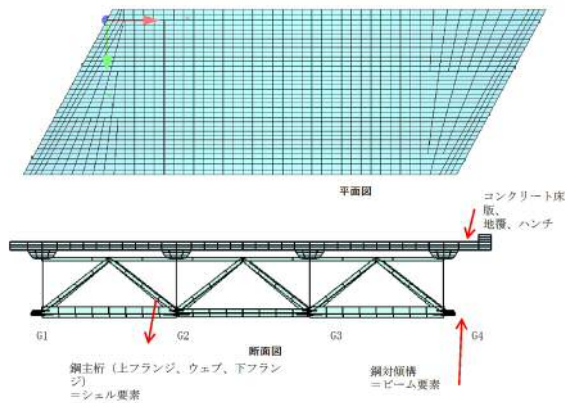


図9 FEM解析モデル概要図

解析に使用する外力は載荷試験の定荷重車両輪荷重とし、床版たわみと主桁ひずみを評価項目とした。

また、床版の劣化状況を検証するため以下の3つのケースを想定し、解析を行った⁴⁾。

①床版の全断面有効 (FEM解析1)

供用開始時の床版にひび割れの全く存在しない健全な状態を想定し、全断面が有効としてモデル化した (補修コンは考慮せず)。

②床版の引張側コンクリート無視 (FEM解析2)

活荷重によるたわみが引張側コンクリート無視となるまで劣化した状態 (劣化度 I と定義) を想定し、全断面有効とした①の状態から弾性係数を低減したモデルとした。

③床版のせん断抵抗低下 (FEM解析3)

本橋は補修前の床版たわみが大きく、また床版下面に格子状のひび割れが発生し、遊離石灰が認められており、載荷試験によるひび割れ幅の測定 (補修前) においても残留変位が生じていることから、曲げモーメントによる劣化に加え、せん断抵抗力が低下していることを想定したモデルとした (劣化度 II と定義)。

上記3ケースにおいて設定した各係数値を表6に示す。

表6 FEM解析設定値

		単位N/mm ²		
床版条件		FEM解析1 全断面有効 (健全)	FEM解析2 劣化度 I (引張側C ₀ 無視 →曲げによる劣化)	FEM解析3 劣化度 II (劣化度 I + せん断 による劣化)
弾性係数				
	鉄筋	205.000	205.000	205.000
	既設コン	20.000	9.000	9.000
	補修コン	-(補修なし)	40.000	40.000
せん断弾性係数				
	既設コン	8.696	3.913	783
	補修コン	-(補修なし)	16.667	16.667

(2) 解析結果

a) 補修前

補修前のたわみ実測値と解析値の比較を図10に示す。

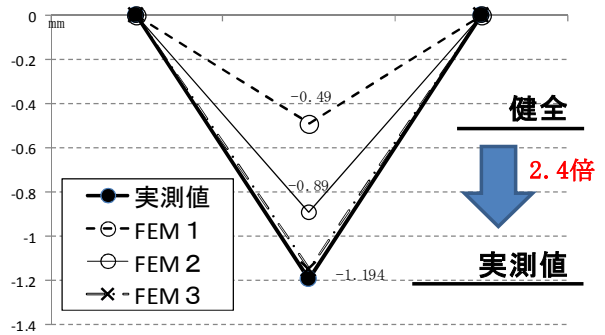


図10 補修前の床版たわみ (測点9)

実測値では、-1.194mmであったのに対し、FEM 1～3の解析値はそれぞれ-0.49、-0.89、-1.15mmとなり、FEM解析3の結果が最も実測に近い値となった。このことから、床版の全断面有効の健全状態に比べ実測値は2.4倍のたわみであり、補修前の床版は、曲げによる劣化状態よりも進行していたことが推測される。

b) 補修後

補修後のたわみ実測値と解析値の比較を図11に示す。

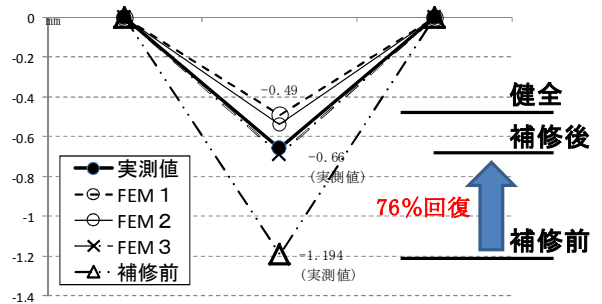


図11 補修後の床版たわみ (測点9)

実測値では、-0.66mmであったのに対し、FEM 2及び3の解析値はそれぞれ-0.54及び0.69mmとなり、補修後においてもFEM解析3の結果が最も実測に近い値となった。このことから、せん断抵抗が低下している劣化状況であっても本工法により改善が図られ、床版の全断面有効の健全状態 (FEM解析1) の76%程度まで回復したことが示された。

5 結論

本工法による効果について載荷試験及びFEM解析により実測及び理論的に検証した結果は以下のとおりである。

- 補修前のたわみは床版全断面が健全な状態に比べ2.4倍であり、劣化が進行していたが、補修後は76%まで回復した。
- 補修の前後で、主桁の中立軸が200m程度上昇し、既設床版と特殊コンクリートが一体化され劣化していた床版が合成床版としての本来の機能を一部回復できた。

- ・床版下面のひび割れ幅が改善され、補修前の残留変位が減少したことから、本工法により床版の劣化状況が改善された。
- ・FEM解析の結果より、補修前の床版の劣化は曲げによる劣化のみでなく、せん断による劣化状態まで進行していたが、補修後の解析値は実測値と整合し、本工法により床版の耐力が改善されたことが理論的に実証された。

6 考察

載荷試験及びFEM解析により検証した補修前の床版劣化状況について、既設床版表面の状態（WJはつり後）は写真4に示すとおりであり、アスファルトが広範囲に付着しており、これらは悪影響を及ぼすため特殊コンクリート打設前に写真14に示すとおり全て撤去した。

本工法の検証結果から付着アスファルト部分が床版コンクリートとしての機能を果たしていなかったこと、ほぼ全面にわたり床版表面が脆弱であったこと及び一部で土砂化するほど劣化していたこと等によりたわみが大きかったことが考えられる。

なお、この付着アスファルトについては、過年度に実施した切削等による舗装補修時のものと推定される。



写真14 付着 AS 撤去状況

以上のことより、特に特に維持管理の観点から今回工事で確認された知見は以下のとおりである。

- ・橋面舗装修繕が繰り返される場合、床版が土砂化している可能性がある。
- ・床版下面に遊離石灰を伴うクラックがある場合、表面の劣化が進行している可能性がある。
- ・橋面舗装修繕時には、特に AS 取壊し時に床版表面を損傷させないように留意する必要がある。
- ・床版の劣化は、水分により加速されることから、排水対策が重要。

謝辞：本工事及び検証を実施するに当たり、松井繁之大阪大学名誉教授に多大なるご助言を賜りましたことを深く感謝致します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 '17、2017.2
- 2) 日本ウォータージェット施工協会：ウォータージェット工法 計画・施工の手引き、2009.3
- 3) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、2007.3
- 4) 松井、前田：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案 土木学会論文報告集、第 374 号、1986

建設現場イノベーションプロジェクト in但馬について

権藤 拓洋¹・佐々木 隆行²

¹近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所 調査課 (〒668-0025 兵庫県豊岡市幸町10-3)

²近畿地方整備局 道路部 道路計画第一課 (〒540-8586 大阪府大阪市中央区大手前1-5-44) .

国土交通省では、ICT（情報通信技術）を建設現場に導入し、生産性向上と魅力ある建設現場を進めるため「i-Construction」を推進しており、豊岡河川国道事務所では11月18日の土木の日にちなみ、管内の建設現場を一部解放し、ドローン活用技術や最新技術による建設機械の自動化運転技術の実演、掘削中のトンネル工事現場の見学会、協力企業による技術紹介を関係機関や一般の方々を対象に行った。

本報告では「建設現場イノベーションプロジェクトin但馬」での取り組み内容について報告する。

キーワード i-Construction 建設現場開放 担い手確保

1. はじめに

現在、建設業では就業者の減少及び高齢化が大きな問題となっている。就業者の主な減少理由としては、「労働環境の厳しさ」が考えられる。担い手を確保する上で、従来からの建設業のイメージである「きつい、汚い、危険」の旧3Kを払拭し、新3Kである「希望、休暇、給与」を普及させ、魅力ある建設業界を構築しなければならない。(図-1-1)



図-1-1 新3Kの普及

そのためには、建設現場におけるICT技術を活用し、これからの担い手となる若者に魅力のある建設業を発信することは必要不可欠である。

建設現場では設計から施工、維持管理に至る分野で生産性革命が進んでいる。(図-1-2)

例えば、建設機械の無人化運転やドローン活用技術、衛星を利用した観測技術、さらにAI活用など、これまでの常識では考えられなかった分野の技術を建設現場に活用しようと、様々な挑戦が行われている。(図-1-3)



図-1-2 ICTの活用拡大



図-1-3 最新技術の導入

2017年11月18日(土)豊岡河川国道事務所では、最先端の土木技術であるICTを活用した設計・施工・維持管理の魅力や迫力などの一連の流れを体験していただき、次世代の担い手となる学生や建設現場で活躍している技術者達に触れて頂く場として、「建設現場イノベーションプロジェクトin但馬」を開催した。

なお、このようなイベントの開催は、初めての取り組みであるため、知見は十分では無く、手探り状態で企画、準備を実施した。

本論文では、次なるイベントの質的向上を計るため、本イベントの取り組みについて報告する。

2. 建設現場イノベーションプロジェクトin但馬の開催概要

イベントは、豊岡河川国道事務所が事業を進めている日高豊岡南道路の、施工中である水上トンネルを主会場とし3会場で実施した。イベント当日は、現場を一部開放し、トンネル坑内では、協力企業によるICT活用技術のプレゼンテーションを実施した。また、屋外実演会場では、ドローンによる測量実演、建設機械の自動運転技術の実演を実施した。

建設機械の自動運転では、現場での3Dマシンコントロールブルドーザーの説明・実演に加え、豊岡河川国道事務所が保有するKu-sat（衛星小型画像伝送装置）を使用し、円山川の施工現場である加陽湿地から中継を行い3Dマシンガイダンスバックホーの説明を実施した。

また、掘削中であつた柵布トンネルにおいては現場見学を行うなど、多彩な催しを実施した。

3) 柵布トンネル会場



柵布トンネル会場では、施工業者がDVDを使用しNATMトンネルの施工方法等の説明を実施した。

図-2-1 開催状況

内容（写真は代表的な催し）

1) 水上トンネル会場

- ・協力企業からの新技術の展示・説明



協力企業9社による技術紹介を実施した。トンネル壁面にプロジェクターの映像を映すなど工夫した説明をおこなった。

2) 屋外実演会場

- ・自動運転技術の実演



MCブルドーザーによる自動運転の実演を実施した。実際に機械を動かす事により参加者の興味を引く事ができた。

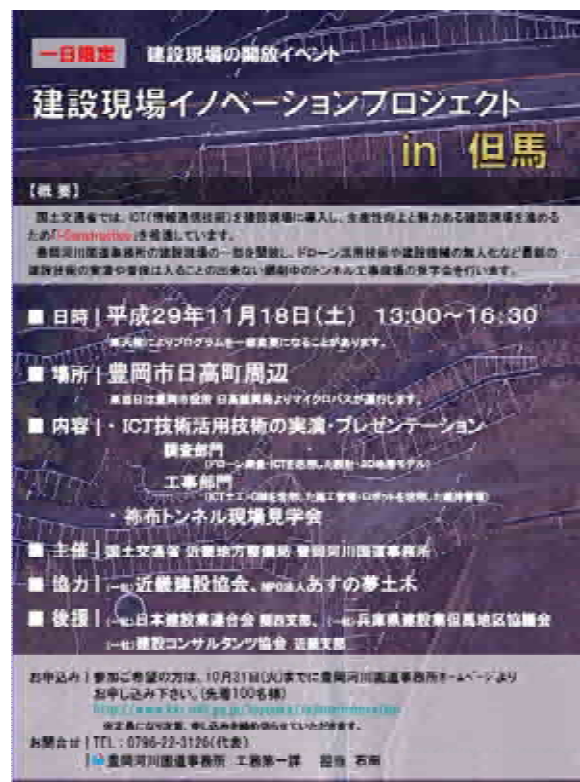


図-2-2 イベント案内チラシ

3. 若手職員主導によるイベント開催・運営

(1) イベントの開催

建設現場イノベーションプロジェクトin但馬を開催するにあたり、豊岡河川国道事務所の採用2年目~4年目の若手職員によるプロジェクトチームを立ち上げた。

イベントの開催場所や企画内容、広報手段、参加者の募集方法などの検討を行った。

開催場所については、複数候補地を挙げていき各箇所の現地調査を行い、イベント開催に適しているか調査を行った。開催場所が決まり、協力企業がどのような技術紹介が可能であるか調整をおこなった。

イベントの広報は、記者発表及び管内の道の駅や市町村の窓口で開催案内チラシの配布スペースを設置し参加者を募った。なお、イベント参加者の申込み窓口として、イベント専用のメールアドレスを作成した。

FAXでの募集に比べ、個人情報の取り扱いや応募者の整理漏れ防止等に優れており、今後のイベントもメールでの募集を採用したい。

(2) 当日の運営について

イベントは2部に分けて開催し、午前中は、地元高校生・官公庁職員を対象に行い、午後は、一般市民・大学生を対象に行った。各会場間の移動にはバスを用意し各会場を回った。各バスには若手職員が同行し、移動時間を活用して、本イベントの経緯や各会場の説明を行った。

(3) イベント運営企画による若手職員の成果

イベント等の経験が無い、若手職員が運営、企画を主導的に行う事により、従来のイベント形式にとらわれず、多くのアイデアが生まれ新しいイベントを開催することができた。

また、イベント内容を事務所長や副所長等に若手職員から説明を行う事で、プレゼンテーション能力の向上を図った。(写真-3) イベント当日は、職員自らが説明スタッフとなることでコミュニケーション能力向上にも繋がり、今後の業務を遂行するうえで大きな蓄えとなった。

また、参加者の意見や気持ちを直接聞くことで自らの仕事を見つめ直す機会となった。



写真-3 若手職員による説明

4. 「建設現場イノベーションプロジェクトin但馬」

の検証・課題の抽出

イベント開催後、参加者にはインタビューをおこない、協力企業・職員にはアンケートを実施した。

その結果を分析し、今後のイベント開催に向けた課題を抽出した。

(1) 参加者の声

① 水上トンネル会場

「技術発展に伴い、小型無人機械による3次元測量が可能になり、多少誤差は生じてしまうが、レーザー測量によ

る水深の計測までできる技術があることを初めて知った。これから活用していくべき。」

② 屋外実演会場

「GPS、ICT技術を併用した建設機械を操縦し施工している様子は大変驚きました。位置情報システム(GPS)の誤差(精度)はわずか500円玉一枚ということは知らなかった。」

③ 祢布トンネル会場

「実際にトンネル工事現場に立入り、掘削機械を見て、また施工方法の説明を聞き、トンネルがどのように造られていくか、イメージすることができた。機会があれば、シールド工法も見てみたい。」

④ 参加した大学生からの感想

「建設業の世界と新しい取り組みがされていることが理解できた。大変勉強になりました。卒論に使用したいのですべてのパンフレットを収集しました。」

(2) 協力企業アンケート

協力頂いた企業に「イベントに参加した感想、今後、このようなイベントがあれば参加したいか」の二点についてアンケートを取り、以下のような回答を得た。

1) イベントに参加した感想

・建設業のイメージアップとして、一般の方々にも魅力を伝える良い機会になったと思う。また、業者同士が互いに刺激し合うことで、但馬建設業全体のレベルアップに繋がったと思う。

2) 今後、このようなイベントがあれば参加したいか

・誰でも参加可能な一般の方へ向けたの建設業のPR、担い手確保のためのイベントがあれば参加したい。

(3) 職員アンケート

本イベントの企画・運営に参加した若手職員に得られた成果等についてアンケートを行った。

・開催場所や日時、企画内容、広報手段の決定などイベントを開催する大変さを学ぶ事ができた。準備期間における事前の準備や調整の重要性を実感することができた。

・イベントを通して、地域住民の方と会話をする機会があり、北近畿自動車道への思いを聞くことができ、自身の仕事のやりがいを感じた。

(3) 課題の抽出

参加者からの不満の声は無かったものの、イベント当日は、降雨の中行ったため、足下の悪い中の開催となった。協力業者からは、この時期の但馬地方は天候が不安定で屋外のイベントに適していないとの意見があった。

また、技術展示の会場がトンネル内だった為、来場者全員が各ブースを一巡する工夫を求める声もあった。今後は会場や季節等の検討が必要と考えられる。

また、家族や子どもが体験出来るブースなどを設置し幅広い年齢の方が楽しめるイベントを開催する必要性を感じた。

5. 課題の検討

本イベントの課題は、開催場所と開催時期である。11月18日の土木の日にちなみ開催したが、この時期の但馬地方は、天候が不安定で屋外での開催に適さない。屋内会場でおこなった場合は、会場にもよるが重機などの実演が不可能であると考えられる。イベントの趣旨にもよるが開催場所については、よく検討する必要がある。

展示内容については、ドローンやVRなど話題性に特化している内容もあるが、参加者の興味を得にくい専門性が高い内容などもありバランスの取れた出展内容を企画する必要がある。

また、休日に開催する場合は、但馬地域で他のイベントを開催していないかなどを調査し、多くの方が参加できる日時で開催することが望ましい。

6. 豊岡河川国道事務所の担い手確保に向けた取組

豊岡河川国道事務所でおこなっている、担い手確保に向けた取り組みを紹介する。

「建設現場イノベーションプロジェクトin但馬」も担い手確保に向けた取り組みの一つであるが、豊岡河川国道事務所では、若手人材を得るための取り組みの一環として、兵庫県立豊岡総合高校の環境建設工学科を対象とした業務説明会を、毎年実施している。

事務所の若手職員が、学校に赴き、学生の前で直接事業概要等の説明をおこなうものである。

これまでは、近畿地方整備局の単独の説明会であったが、今回は初めて豊岡河川国道事務所が主催となり、

(一財)日本建設業連合会 関西支部・(一社)建設コンサルタント協会 近畿支部・但馬地域建設産業振興会に参加して頂き、官民合同の業務説明会、意見交換会(以下、官民合同説明会という)を実施した。

官民合同説明会は、2018年1月26日(金)に、建設業の魅力・やりがいを知ってもらうため、但馬地域の建設業で活躍する官民の機関が合同で、今後の但馬地域を担う高校生に建設業の魅力を紹介するとともに、日ごろの疑問を解決する意見交換会を実施した。(写真-6)



写真-6 官民合同の業務説明会

今回の官民合同説明会の中で、高校生から「土木は疲れる仕事が多いイメージがある」などの、旧3Kの「きつーい」が根付いていると感じる意見もあった。

今後、学生を対象に現場見学会などを通し、「i-Construction・週休2日制・新3K」などの新たな取り組みを紹介し、近年、変わりつつある建設業について理解して頂く必要があると感じた。

7. おわりに

2018年度は、「建設現場イノベーションプロジェクトin但馬」の第二段の開催に向けて、現在、掘削中のトンネル内で地元高校生によるコンサートを検討中である。

産官学が協力することにより、普段、土木に馴染みがない高校生にも土木に触れてもらう機会を作り、建設業の魅力・やりがい・新3Kを知って頂き、将来の進路選択の一つに役立ててもらいたいと考えている。

また、今回のイベントでは参加者にはインタビューのみでアンケートを取っておらず、細かい分析ができなかった。次回は、簡単なアンケートを作成する予定である。引き続き、担い手確保に向けて来場者はもちろん、出展で協力頂く建設業関係者、そして、スタッフなど関わった全員が「参加してよかった」「取り組んでよかった」「記憶に残るイベントだ」と思えるよう、引き続きイベントの開催や次世代の担い手確保に向け事務所一丸となって行動していきたい。

謝辞：「建設現場イノベーションプロジェクトin但馬」にご協力いただきました協力企業の皆様には、この場をお借りしてお礼申し上げます。

堺泉北港航路浚渫工事における i-Constructionの取組みについて

平岩 準

近畿地方整備局 大阪港湾・空港整備事務所 保全課（〒552-0007大阪府大阪市港区弁天1丁目2番1-1500号）

我が国において生産年齢人口が減少されることが予想されている中、建設分野においても生産性向上は重要な課題である。国土交通省において、生産性の向上、魅力ある建設現場を目指すことを目的に「i-construction」に取り組み始めている。

堺泉北港では、物流の効率化に資する浚渫工事を実施している。事前測量、施工管理、事後測量に至るまで、現場の生産性向上に向けてICT技術を全面的に活用し実施した。今までは、経験に大きく左右される現場作業であったが、経験が少なくても正確な浚渫ができるという画期的な技術により人手不足に悩む建設業に明るい未来の一翼を担う。

キーワード i-Construction, 競争力強化, 施工管理

1. はじめに

堺泉北港は国際拠点港湾であり、背後には大規模な堺泉北臨海工業地帯を抱え、石油精製・石油化学・都市ガス製造工場等がコンビナートを形成している。原油・LNGの輸入、石油製品・化学薬品の出荷等の物流を支えているほか、西日本有数の中古自動車の輸出拠点でもある。一方で、広域かつ甚大な災害に対して、国と地方自治体が協力して応急復旧活動を展開するための基幹的広域防災拠点の機能を担うなど、工業港としての性格を超えて発展している。

2. 堺泉北港の整備

堺泉北港では、助松地区において平成18年4月から水深14mの耐震構造の岸壁（延長300m：1バース）が供用を開始しており、その後も岸壁の整備に引き続き、水深14mの航路の整備を進めている。なお、発生する浚渫土砂は、大阪湾内に点在し、貧酸素水塊の一因として懸念されている窪地を埋め戻す材料として活用し、大阪湾再生行動計画に基づき、美しく親しみやすい豊かな「魚庭（なにな）の海」の回復に寄与し、海域の環境改善の一助となるように事業を進めている。

3. 工事概要

本工事は、堺泉北港助松地区航路（-14m）の浚渫工及び土砂投入工の施工を行った。i-Constructionに基づき、ICTの全面的活用を図るために、3次元データを活用して施工するICT活用工事であった。今回の現場で活用したICTの中で、3次元出来形測量及び3D浚渫施工管理システムについて着目し報告する。

4. 3次元出来形測量

今回の工事では、マルチビーム深淺測量を活用した3次元出来形測量を行った。従来のシングルビーム深淺測量が、1本の音波を連続して送受信する「線的」な測量であるのに対し、マルチビーム深淺測量とは、細かい複数の音響ビームを海底に扇状に照射することで、短時間で広範囲の水深値を「面的」に測深可能な測量方法である。

① 測深計画

測深計画で重要なことは、測量区域の水深、海底地形、有効測深幅を考慮し、未測深箇所が生じないように測線を設定し、取得点密度（0.5m平面格子に3点以上）を満たすように計画を立てる必要がある。

今回の測深計画は、データの重複率が100%となるように、指向角を半減全角90°とし、測線間隔を10mに設定した。

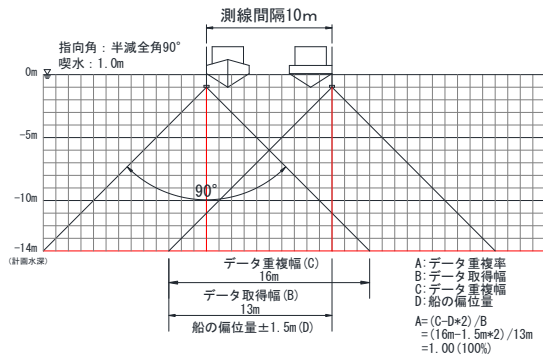


図-1 マルチビーム 指向角図

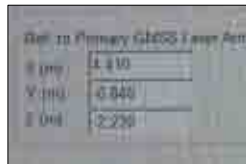
② システムの艤装

測量船に測深機械及び精度確認後のGNSS (RTK-GPS) の取り付けを行った。取り付け後に、船の微振動によって機器がずれてしまうと、正確なデータが取得できない恐れがある。そのため、角材、ベルトスリング等で補強して強固に取り付けた。

また、測深機器の位置関係をメジャー等で正しく測定し、そのオフセット値がシステムに正確に入力されているかを全ての測定値について発注者及び受注者で確認した。入力ミスがあると、測深している位置、深さが変わってしまうため、入力された値を全て確認する事が、システムの艤装の中で一番重要であった。



写真-1 オフセット値測定状況



システム入力画面

③ 喫水確認・パッチテスト

喫水確認は、水面を基準(0m)として反射板を吊り下げて、ソナーヘッドから反射板の距離をマルチビーム測深機で計測するバーチェックにより行った。喫水値は、3回実施した計測値の平均により確認した。喫水確認作業は、測深海域近傍の出来るだけ静穏な場所を選んで実施した。



写真-2 バーチェック状況

パッチテストは、マルチビーム測深機の送受波器の取り付け角度のずれと各機器の収録遅延を求めるために行った。パッチテストを実施する場所は、凸凹の激しい海域を避け、比較的海底の平な場所で行った。

④ 水深測量

今回の測量範囲は、浜寺航路と大津航路の交差点部であり、多くの大型船舶が航行する場所での測量であった。測量中に、大型船舶の航跡波の影響を受けるとその測線は再測深が必要となるため、大型船舶の航行状況を常に監視しながら測量作業を行った。

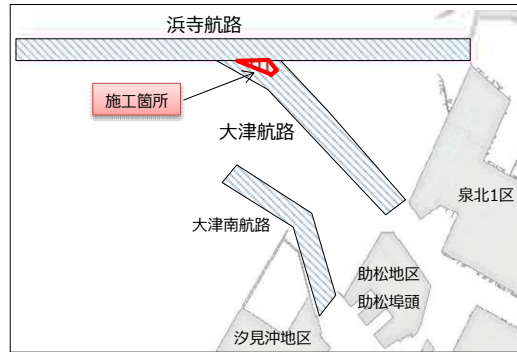


図-2 施工箇所図

測量船を急旋回、急加速させてしまうと、データ取得エラーの原因となるため、一定速度(船速5ノット以下)を維持して航走した。魚群などにより、海底面データを的確に取得できなかった場合や、3次元データの作成に必要な取得点密度(0.5m平面格子に3点以上)を得られないと判断された場合は、その測線について再測深を行った。

測量で取得した全データについては、水中音速度測定結果を解析ソフトに取り込みデータの補正をした。



写真-3 水深測量状況



写真-4 マルチビーム測量画面

⑤ 検測・精度管理

今回工事の3次元出来形測量は、水路測量を含む出来形測量であった。そのため、検測・精度管理を下記の3つの方法で実施する必要があった。

1) 井桁測深

測線を左右のビームが100%重複するように2本の平行な測深線及びそれに直交する2本の測深線を井桁のように設定する。4方向の交差するスワ位置の重複部の水深差（測深精度：±10cm以内）として精度管理をした。

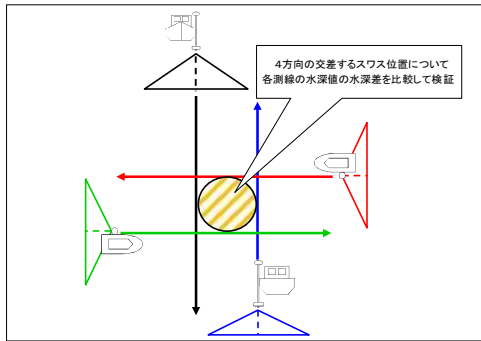


図-3 井桁測深図

2) 照査線

水深の測定結果を検証するために、各測線と交差する照査線を設定し、測線(a)と照査線(b)の交点における測定値の差を評価した。照査線の間隔は、測線間隔の15倍として検証を行った。

測深精度範囲（水深14mの場合：0.53m）は、下記の計算式により算出した。

測深精度範囲の計算式

$$\sqrt{(a^2 + (bd)^2)}m \quad d\text{は、水深(m)とする。}$$

a及びbは、下記の値とする。
 $a=0.5m$ 、 $b=0.013$

3) シングルビーム測深機による検証

水路測量を実施した堺泉北港は海上保安庁告示第102号別表第二によると、水域の区分として1a級以上の水域とされている。そのため、水路測量でマルチビーム測深機を使用する場合は、シングルビーム測深機を併用して測量を行う必要があり、その測定結果を比較して精度確認を行った。



写真-5 シングルビーム測深確認

⑥ 3次元データの作成

取得した点群データを使用して3次元データを作成する場合の留意点として、数量算出で使用する場合は、3次元点群データのうち、0.5m平面格子内の「中央値」を抽出してTinモデル（不規則三角形網モデル）を作成する。

出来形管理で使用する場合は、0.5m平面格子内の「最浅値」を抽出してTinモデルを作成する。数量算出と出来形測量で計測点群データの抽出方法が異なることを確認しておくことが重要である。

⑦ 出来形管理資料の作成

マルチビーム測量にて計測した水深データから、ICT浚渫工対応のソフトウェアを使用し、3次元の計測点群データを作成した。

3次元設計データと3次元の計測点群データ（約36万点）の水深差により出来形をヒートマップにより良否判定を行った。

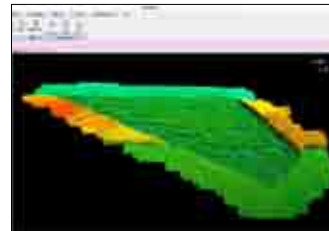
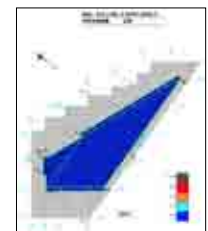


図-4 3次元出来形点群データ



ヒートマップ

5. 3D浚渫施工管理システム

浚渫作業では、ICT浚渫工に対応した3D浚渫施工管理システムをグラブ浚渫船（25m3級）のブリッジに設置して施工を行った。

主な機能としては、GNSSによる位置・方位情報をもった作業船舶を表示する機能に加えて、起工測量で測定した現況地盤を3次元鳥瞰図で表示できる「3次元鳥瞰図表示機能」、グラブバケットの深度、開閉状態をリアルタイムに監視できる「バケット状態監視機能」が搭載されている。

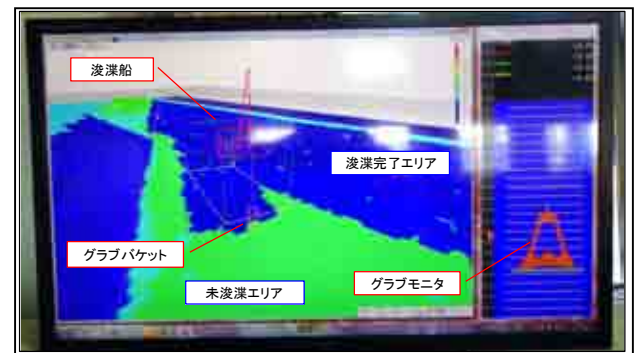


図-5 3D 浚渫施工管理システム画面①

下記のICTの効果については、今回の工事で3D浚渫施工管理システムを使用した受注者である若築建設株式会社からのヒアリング結果を整理したものである。

1) 施工面

施工前の現況地盤を3次元データでシステムに取り込み可視化することで、浚渫前後の地盤高を把握でき効率のよい施工ができた。

前回工事で既に施工を完了している箇所が近接しているため、施工完了箇所に浚渫船のスパッドを打ち込むと海底面の盛り上がりが発生する。

そのため、既施工済箇所にスパッドを打ち込まないように、浚渫船の掘進時は現況地盤を確認しながら移動をすることで、海底面の盛り上がりを防止することができた。

また、システム画面で日々の進捗状況が一目で分かるため進捗図を作成する場合にも役立った。

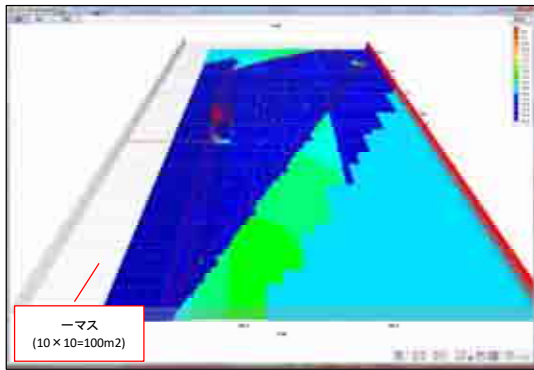
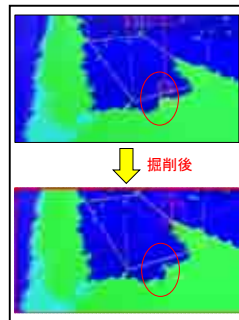


図-6 3D 浚渫施工管理システム画面②

2) 精度面

浚渫作業時の掘り跡とバケットの動きをリアルタイムに3次元で可視化することができる。そのため、未浚渫エリアと浚渫完了エリアを明確に表示され、掘り残しの有無を確認しながら精度のよい施工をすることができた。



掘り跡の可視化

3) 教育面

浚渫の進捗状況が3次元で確認できるため、若手職員でも施工の展開を計画しやすかった。ベテラン職員が、施工のポイントや注意点について説明する時に、浚渫作業は水中施工のため若手職員が水中の作業をイメージすることが難しかった。

しかし、3次元で表示された3D浚渫施工管理システムを使用して説明することで若手職員の理解度が向上し教育しやすかった。

4) 安全面

浚渫箇所が、浜寺航路と大津航路の交差点であった。そのため、大型船舶が航路を航行する場合は浚渫レーンを移動する必要があった。グラブ浚渫船の移動を行う時に、システム上に表示されたグラブ浚渫船の位置を確認することで大型船舶の航行を阻害することなくスムーズに移動することができた。

6. 今後の課題

i-Construction (アイ・コンストラクション) とは、建設生産システム全体の生産性向上を図り、魅力ある建設現場を目指す取り組みである。

今回の工事では、近畿地方整備局で初のICT浚渫工を活用する工事であり、受注者である若築建設株式会社はICT勉強会を開催するなどして職員や現場全体のICT活用技術力を向上させる試みを実施していた。



写真-6 ICT 勉強会

また、担い手確保の取り組みとしてICT浚渫工や土木業界の魅力を一般の方に広く発信するために、積極的に広報活動も行った。

今後は、建設業界の魅力を伝えること、担い手を確保すること、ICT技術を扱える人材を増やすことが建設業界の課題であると考えます。

謝辞: 本論文の執筆に当たっては、堺泉北港助松地区航路(-14m) 浚渫工事の受注者である若築株式会社大阪支店の皆様にはご多忙のところ、資料の提供や助言など様々な面でご協力をいただきました。心から感謝致します。

河川堤防の除草コスト削減を目指した長大な堤防植生試験について（報告）

藤井 彩加¹・本村 洋介²

¹ 福知山河川国道事務所 河川管理課 （〒620-0875 京都府福知山市字堀小字今岡 2459-14）

² 福知山河川国道事務所 綾部国道維持出張所 （〒623-0031 京都府綾部市味方町字中ノ坪 10-1）

由良川では、緊急的な治水対策事業の進展に伴い、新堤の築堤延長が増加し、堤防管理延長は年々増加している。また、高度経済成長期に全国的に整備された多くのインフラ施設が老朽化を迎え、限られた維持管理予算の中で、維持管理コストをいかに抑えるかが、由良川を含めた全国共通の課題となっている。

河川の現場においては、維持管理コスト削減策のひとつとして、従来の堤防植生種から新たな植生種に転換させ、どのような植生種、維持管理方法が最も維持管理コストを抑えられるのか、全国で検討されている。

今回は、この実証試験フィールドである由良川の堤防での植生転換試験の展開に関する現場施工時（播種時）におけるメリット・デメリット、施工後の植生生育状況について報告する。

キーワード コスト削減、維持管理、堤防植生、由良川

1. はじめに

(1) 由良川の概要

福知山河川国道事務所では、由良川水系の直轄管理区間の由良川 54.1km、土師川 2.3km を管理している。（図-1）



図-1 由良川流域図

由良川の上流部は河床勾配が約 1/200～1/300 と

急で流れが速いが、福知山市や綾部市の市街地を擁する中流部の福知山盆地では河床勾配が約 1/500～1/1,500 と緩くなり洪水が溜まりやすく、下流部では河床勾配が約 1/8,000 と更に緩やかになり、かつ兩岸に山が迫った狭長な谷底平野となっている。このような地形から、洪水時に中流部で溜まった洪水は、出口が狭まった下流部へ流れにくく、水害が発生しやすい地形となっている。また、直轄管理区間の堤防が必要な区間のうち、約 42.9%（平成 29 年 3 月時点）が無堤区間を占めており、全国的に見ても無堤区間が非常に多い河川となっている。

このことから、由良川では古くから多くの洪水被害を受け、近年においても、2004（平成 16）年台風 23 号や 2013（平成 25）年台風 18 号など多くの洪水被害を受けてきた。

由良川では、近年における度重なる洪水被害を受け、「由良川下流部緊急水防災対策事業」（2015（平

成27) 年度事業完了) や河川整備計画の対策の一部を大幅に前倒しして行う緊急的な治水対策事業で、連続堤・輪中堤による築堤や宅地嵩上げ等を実施してきており、この緊急的な治水対策事業の進展に伴い、由良川の新堤の築堤延長が増加し、堤防管理延長が年々増加している。

(2) インフラメンテナンスの課題

私たちが日常的に利用している道路や鉄道、河川堤防等のインフラ施設の多くは、1964年東京オリンピックや1970年大阪万博が開催された頃の高度経済成長期以降に、全国的に急速に建設され、それらのものが建設から50年が経ち、老朽化を迎えている。今後も、50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる見込みである。(図-2)



図-2 建設後50年以上経過する社会資本の割合¹⁾

このような状況から、インフラ施設の維持管理に必要な予算が増大しており、限られた維持管理予算の中で、維持管理コストをいかに抑えるかが、由良川を含めた全国共通の課題となっている。

2. 河川堤防の維持管理コスト縮減のポイント

河川堤防は、流域の治水安全度を確保する上で重要な河川管理施設である。その堤防の維持管理は、堤防表面の変状等を把握するために、出水期前と台風期前の年2回を基本に、堤防点検のための堤防除

草を実施している。

施設延長も長大な河川堤防の除草は、維持管理予算の中でも大きなウェイトを占めており、維持管理コストを抑える大きなポイントとなる。(図-3)

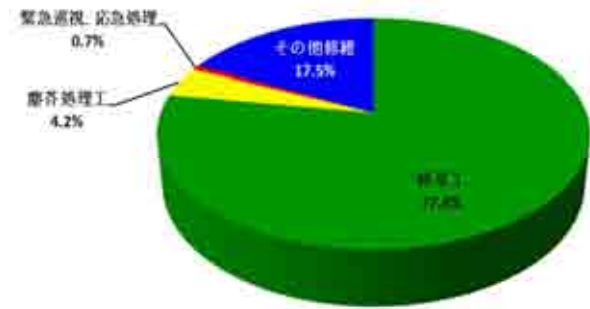


図-3 2017 (平成 29) 年度由良川維持作業 (維持修繕費) 費用内訳 (直接工事費ベース)

このポイントを踏まえ、由良川でもこれまでに、堤防の維持管理コスト縮減に関する取り組みとして、「刈草の無償配布」、「ヤギの放牧による除草」、「刈り放し」、「刈草の堆肥化」などを実施してきた。

3. 堤防植生転換試験

(1) 堤防植生の現状と課題

河川堤防の植生に求められる機能として、下記が上げられる。

- ① 「堤体を流水や雨水等による侵食から保護するための耐侵食性」
- ② 「堤防表面の変状等を把握しやすい草丈の維持」
- ③ 「良好な自然環境の維持」

これまでの河川堤防の植生には、これらの機能を確保するため、ノシバを被覆してきた。

しかし、ノシバの維持には、年4回以上の除草が必要であるが、近年は年2回に除草回数が減少し、雑草が優占し、ノシバの衰退が進行している。このノシバの衰退等により、草丈が高い雑草等が侵入・繁茂している現状が見られる。

草丈が高い植生種が堤防を覆うことで、堤防表面の変状等を容易に把握することが困難なり、さらに

は、従来のノシバが優占する場合と比較し刈草量や処分量が増え、維持管理コストにも影響を与えるなど、堤防の維持管理に支障を及ぼしている。

(2) 堤防植生転換の概要

前述の堤防植生の現状を踏まえ、堤防の維持管理コスト縮減に関する取り組みのひとつとして、「堤防植生の転換」を実施している。

「堤防植生の転換」とは、従来の堤防植生種から新たな植生種に転換させ、どのような植生種、維持管理方法が最も維持管理コストを抑えられるのか、実証試験を行いながら、より効率的・効果的かつ持続可能な堤防維持管理の実現を目指した取り組みである。

堤防植生の転換を行うにあたって、下記の点がポイントになると考える。

- ① 草丈が低い
- ② 根張りが良く堤防法面を密に被覆する
- ③ 年2回の除草でも雑草の侵入・生育を抑制できる

これらのポイントを押さえ、堤防植生に求められる機能を長期的に保持できることが重要であると考ええる。

(3) 由良川の堤防植生転換試験

由良川下流部は日本海側気候であり、寒冷地域における導入植生種の生育状況及び維持管理手法を検証することを目的に、下流部左岸7.2k付近～8.2k付近の舞鶴市八田地区にある実際の堤防法面を使い、延長約1.1km、面積約2.1万m²の長大な実証試験フィールドを完成させた。近畿地方整備局管内の堤防植生試験を統括している近畿地方整備局河川部や近畿技術事務所との連携や助言を受けながら、堤防の植生転換試験を実施している。

この由良川の堤防植生試験フィールドでは、従来の「ノシバ」の他に、「改良コウライシバ」、「改良ムカデシバ」、「イワダレソウ」を試験植生種に用い、植生種、除草回数等の維持管理方法毎にブロックを分け、2016（平成28）年6月から2017（平成29）年

3月にかけて播種施工し、植生転換試験を実施している。（図-4）

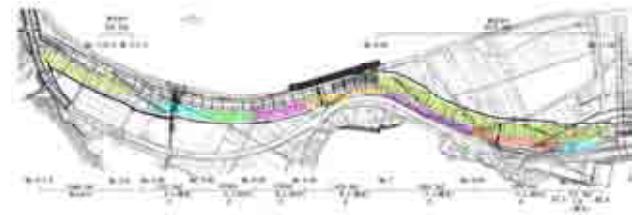


図-4 堤防植生試験フィールドのブロック図

現在、植生転換試験は初期段階であるため、本稿では、植生転換試験の展開に関する現場施工時（播種時）におけるメリット・デメリット、施工数ヶ月後の植生生育状況について、植生種毎に下記に述べる。

4. ノシバ（種子吹付）

(1) 概要

ノシバの特徴は、在来種で、古くから芝生に利用されている。匍匐茎により密に地表面を被覆し、肥料もあまり必要とせず、土地を選ばずに生育ができる。草丈は低いが、年2回の除草では雑草が繁茂している。

従来から由良川で適用してきた種子吹付により施工を行った。

(2) 現場施工時（播種時）におけるメリット・デメリット

ノシバ（種子吹付）のメリットは、現場施工が定着しており、種子や施工する吹付機械、現場技術者も安定した供給が可能であり、日施工量も約3,000m²と大きい。また、施工コストも、約600円/m²（材料費込・直接工事費）と一番安価であった。

デメリットは、当現場では車上プラントにより施工を行ったため、4t以上のトラックが必要となる。4t以上のトラックが入れない狭小な場所では、施工が困難となる。（図-5）



図-5 ノシバ種子吹付の施工状況

(3) 施工後の植生生育状況

ノシバの被覆割合が雑草より優占しているが、群生密度が上がるまでの間に、雑草の侵入が見られる。(図-6)

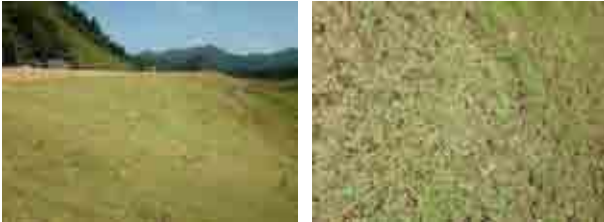


図-6 ノシバの生育状況 (左：遠景 右：近景)

5. 改良コウライシバ (張芝)

(1) 概要

改良コウライシバの特徴は、在来種 (コウライシバ) の改良品種で、ノシバに比べ、草丈が低く、匍匐茎により地表面を密に被覆する。

今回は、マット状の切芝を用いた張芝により施工を行った。

(2) 現場施工時 (播種時) におけるメリット・デメリット

改良コウライシバ (張芝) のメリットは、人力による施工であるため、特殊な機械が不要である。

デメリットは、切芝を生産しているメーカーが限られており、施工量が大きい場合は、納入にあたり、事前予約が必要で、切芝の供給量に懸念がある。ま

た、人力施工であるため、労力が大きく、日施工量も約50m²/人と小さくなる。また、施工コストも約2,300円/m² (材料費込・直接工事費) と一番高価であった。(図-7)



図-7 改良コウライシバの張芝状況

(3) 施工後の植生生育状況

張芝であるため、初期より群生密度が確保され、安定している。張芝の繋ぎ箇所の一部で、雑草の侵入は見られるものの、ノシバ (種子吹付) に比べると少ない。(図-8)



図-8 改良コウライシバの生育状況
(左：遠景 右：近景)

6. 改良ムカデシバ (種子吹付)

(1) 概要

改良ムカデシバの特徴は、別名：センチピードグラスと呼ばれ、東南アジアを原産とする外来種の改良品種である。草丈が低く、匍匐茎により地表面を密に被覆し、さらに、改良ムカデシバ自体が放出する化学物質により他の植物種に阻害的に働く効果 (以下、アレロパシー効果という) がある。

今回は、種子吹付により施工を行った。

(2) 現場施工時（播種時）におけるメリット・デメリット

改良ムカデシバ（種子吹付）のメリットは、ノシバ同様に、一般的な吹付機械で施工可能であり、日施工量も約3,000m²と大きい。また、他工事との調整により、急遽、施工時期の変更（7ヶ月以上）を行ったが、種子も概ね供給が安定しており、柔軟な対応が可能であった。また、施工コストも、約950円/m²（材料費込・直接工事費）と二番目に安価であった。

デメリットは、ノシバ同様に、車上プラントにより施工を行ったため、4t級以上のトラックが必要であり、狭小な場所では、施工が困難となる。（図-9）



図-9 改良ムカデシバの種子吹付状況

(3) 施工後の植生生育状況

初期の群生密度の上昇がよく、生育は概ね良好で、アレロパシー効果により、雑草の侵入がほとんど見られない。（図-10）

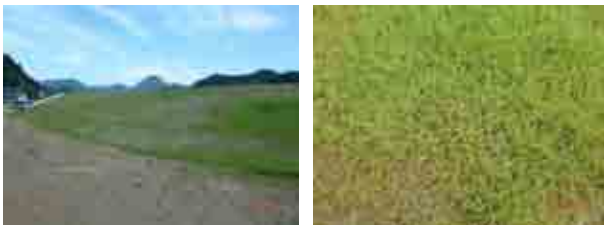


図-10 改良ムカデシバの生育状況
（左：遠景 右：近景）

7. イワダレソウ（細断茎散布）

(1) 概要

イワダレソウの特徴は、在来種で、草丈が低く、匍匐茎により地表面を密に被覆し、生育スピードが早い。また、初夏に白い花を咲かせる。

今回は、客土吹付機を使用し、細断茎散布により施工を行った。

(2) 現場施工時（播種時）におけるメリット・デメリット

イワダレソウ（細断茎散布）のメリットは、ノシバ同様に、一般的な吹付機械で施工可能であり、概ね供給が安定している。

デメリットは、ノシバ同様に、車上プラントにより施工を行ったため、4t級以上のトラックが必要であり、狭小な場所では、施工が困難となる。また、施工コストも、約1,300円/m²（材料費込・直接工事費）となり、ノシバや改良ムカデシバに比べ、高価であった。（図-11）



図-11 イワダレソウの細断茎散布状況

(3) 施工後の植生生育状況

初期の群生密度の上昇はよかったが、秋頃から群生密度の上昇ペースが伸び悩んだため、寒冷地域での適用には懸念があると考えられる。（図-12）



図-12 イワダレソウの生育状況
（左：遠景 右：近景）

8. まとめ

由良川での堤防植生転換試験は、まだ初期段階であり、本稿では現場施工時（播種時）に着目し、とりまとめを行った。

実際に現場施工（播種）を行い、機械施工が可能（日施工量が大い）で、植生種の種子や株などの材料供給が安定していることが導入植生種を検討する上でのポイントになることが確認できた。

現場施工（播種）時点においては、施工性、インシヤルコスト、施工数ヶ月後の植生生育状況から総合的に判断すると、改良ムカデシバが有利であると考える。

今後もさらに維持管理方法毎の生育状況のモニタリングを続け、今回確認できた現場施工時のポイントも踏まえ、施工性、経済性、維持管理方法毎の生育状況等を総合的に検証し、堤防植生に求められる機能を長期的に保持できる植生種を検討していく必要がある。

謝辞: 本稿のとりまとめにあたり、ご助言、ご指導、御協力頂いた全ての方々に深く御礼申し上げます。

参考文献・出典

- 1) 国土交通省ホームページ 社会資本の老朽化対策会議 2013（平成25）年1月21日 資料

河道掘削工事におけるALBの活用について

荻野 恭輔¹・田中 克己²

¹近畿地方整備局 和歌山河川国道事務所 河川管理課 (〒640-8227 和歌山市西汀丁16番)

²近畿地方整備局 奈良国道事務所 (〒630-8115 奈良市大宮町3-5-11)

ドローンによる写真測量技術の普及により、陸域の土工事においてはICTを活用した工事件数も急速に増加してきている。これに対し水域を含む河道掘削工事においては、浅域の河床を効率的に面的計測する技術がなく、従来法による工事測量が主流となっていた。これに対し、平成29年度から国内稼働をはじめた航空レーザ測深システム（ALB：Airborne Laser Bathymetry）により、浅域の河床を30cm前後の間隔で計測できるようになった。ここでは、比較的事業規模の大きい「紀の川岩出狭窄部の掘削工事」において、ALBを活用した3次元起工前測量をはじめ、ICT技術を積極的に取り入れた河道掘削工事で、一定の効果を確認できたため事例を報告をするものである。

キーワード i-Construction, 3次元起工前測量, ALB, ICT建設機械

1. はじめに

今回掘削工事の対象となった紀の川本川19k付近の岩出狭窄部（以下、狭窄部と称す）は、紀の川本川に貴志川が合流する地点であり、土砂が堆積しやすい状況にある。記憶に新しいところでは、平成29年10月に襲来した台風21号に伴う出水により、貴志川町丸栖地区で浸水被害が発生するなど治水対策が急がれる状況にある。狭窄部においては、平成28年度から概ね5年を目途に河道掘削や拡張水路が事業化されており、平成28年度の掘削工事においてもドローンによる3次元起工前測量、MC建機による施工¹⁾等が採用されるなど、河川事業においてi-Constructionの推進役を担う工事区となっている。

事業2年目となる今回の掘削工事が前年度と大きく異なる点として、水中掘削を伴う工事となることにある。河道掘削の対象となる箇所は基本的に浅域であることから、マルチビーム等による音響測深では効率的な面的計測が困難と判断し、ALBの適応性を検討のうえ採用に至っている。

本稿では、ALB技術の概要、測量精度を中心に説明するとともに、工事期間中に襲来した台風21号への対応、ICT施工他の工夫についてとりまとめた。

2. ALB技術の概要

ALBとは、従来の陸域を対象とした地形測量で広く利用されてきた航空レーザ計測システムと同様の原理であるが、従来が近赤外のレーザパルスを利用するのに対し、ALBでは緑色のレーザパルスを使用することで水陸一連の地形測量を可能としている(図-1)。

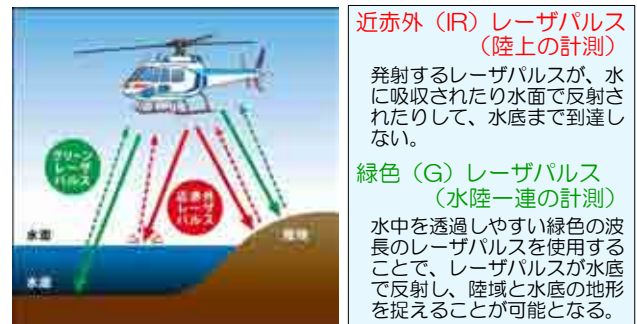


図-1 ALBの概念図

今回は、近赤外・緑色レーザの何れも高密度な照射が可能で、1億画素のデジタルカメラで地表の様子を高精細な画像として記録できるシステムを適用した(表-1)。

表-1 ALBシステムの性能

項目	性能	
搭載航空機	回転翼機 (AS350B)	
計測システム	SAKURA-GH (RIEGL社 VQ-880-GH)	
データ記録方式	波形記録方式	
測深性能	1.5セッキ※ (標準)	
レーザパルス 発射数	緑色	550,000Hz (最大)
	近赤外	550,000Hz (最大)
垂直カメラ	1億画素 (PhaseOne社 iXU-RS1000)	
付属カメラ	近赤外カメラ・4kビデオ	

※直径30cmの白色盤を沈め目視できる水深を1セッキと呼ぶ。

3. ALB適用に関する事前検討

ALBを河道掘削工事に適用した前例がないため、事前に想定される課題を抽出し、施工業者と協議のうえ実

施の可否を判断した。抽出した課題と対応を下記に示す。

(1)各工程における測量方法

工事測量は、起工前・竣工時の出来形の2種となる。掘削工事は締切りをしたうえで壺堀りとなり、掘削開始後は濁りが強いためALBの適用は起工前測量に限定し、出来形測量についてはRTK-GNSSにて対応とした（出来高については、7(3)を参照）。

(2)計測実施のタイミング

掘削工事は非出水期に行うため、岩出頭首工のゲート解放（10月上旬以降）を待っての着手となる。加えて、狭窄部全体の工事遅延リスクや、小規模な出水で河床形状が変化する懸念もあった。これら条件から、計測はゲートが解放された後、極力掘削開始日に近いタイミングに実施することとした。

(3)適用範囲

当初予定の単独工区（3ha）のみでは、ALBによるスケールメリットを得られないと判断し狭窄部全体（63ha）を対象とした測量を条件とした（図-2）。



図-2 岩出狭窄部の事業範囲

(4) 精度管理基準

i-Construction関連では、15の規程が公開されており工種に応じて適宜適用するが、水中の河道掘削を対象とした規程は未整備の状況であった。そのため、国土交通省港湾局が平成29年3月に施行した「マルチビームを用いた深浅測量マニュアル（浚渫工法編）（案）」（以下、港湾局マニュアル(案)と称す）の精度管理方法を一部踏襲することとした。

(5) 起工前測量手法の総合比較

上記の条件を踏まえ、各測量手法の特徴を表-2に整理した。従来の平均断面法を基準にメッシュ法に対応した手法と比較すると、ドローン（陸部）とマルチビーム（水部）を併用したものは、作業期間、費用の両側面でメリットはない。一方、ALBを利用した場合の水部測量精度は、従来法の管理基準とALB性能を加味して、±15cmに決定した。比較の結果より、従来法と同等の費用で、作業期間を大幅に短縮できることが確認できたため、ALBの採用を決定した。

表-2 起工前測量手法に関する比較

項目	従来法(平均断面法)		併用法(メッシュ法)		ALB(メッシュ法)
	陸部	水部	陸部	水部	水陸部
作業イメージ					
取得間隔	横断測量 40mピッチ※1)	横断測量 40mピッチ※1)	0.5m×0.5m に1点以上※2)	0.5m×0.5m に3点以上※3)	0.5m×0.5m に3点以上※3)
目標精度	±5cm※1)	±20cm※1)	±10cm※2)	±10cm※3)	陸±10cm 水±15cm
作業期間	約1.5ヶ月		約2.0ヶ月		約3週間
費用	約600万円		約1,500万円		約600万円

※1)【国】近畿 土木工事共通仕様書(施工管理編)
 ※2)【国】空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)
 ※3)【国】港湾局 3次元データを用いた出来形管理要領(浚渫工編)(案)

4. 3次元起工前測量

ALBによる3次元起工前測量は図-3に示す手順で作業を実施した。

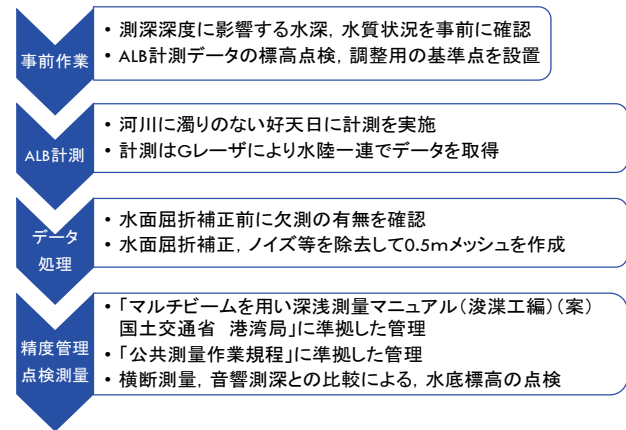


図-3 作業フロー

(1) 水質調査

計測当日朝の透明度調査では、水深4mまでセッキ盤が視認できたため、1.5セッキに相当する水深6.0mまでの測深が可能と推測した。参考として濁度計による調査も行い、濁度は1以下の値を示し濁りの影響は少ないと判断し計測実施を決定した（図-4）。



図-4 水質調査風景

(2) 調整用基準点の設置

取得する点群データの標高点検及び調整に必要な調整用基準点は、計測範囲四隅+工事で使用する距離標近傍に5点設置した(図-5)。

(3) ALB計測

計測作業は、回転翼機により表-3に示す諸元で、図-5

に示すコース（計測5本，検証用2本）を対象とし，10月11日に現地上空30分の飛行でデータ取得を完了した。

表-3 計測諸元

項目		諸元	備考
対地高度		700m	
対地速度		100km/h	
計測コース数		7本	検証用2本含む
コース間重複度		50%	
レーザパルス 発射数	緑色	550,000Hz	37点/m ² (単コース)
	近赤外	145,000Hz	4点/m ² (単コース)
垂直カメラ地上解像度		7cm/pixl	



図-5 コース計画図

(4) 欠測部の確認

計測後，速やかにデータの一次処理を行ない取得状況を確認した。その結果，工事対象エリアについては，十分な密度で水部も陸部も地形を捉えていることを確認した。なお，施工範囲外ではあるが支川合流部の深掘箇所では約4mまでの測深に止まり，セッキ盤による事前調査で推測した6mまでの測深ができていないこと，陸部については，つる草の繁茂した箇所の一部地表面にレーザの照射不足が確認された(図-6)。

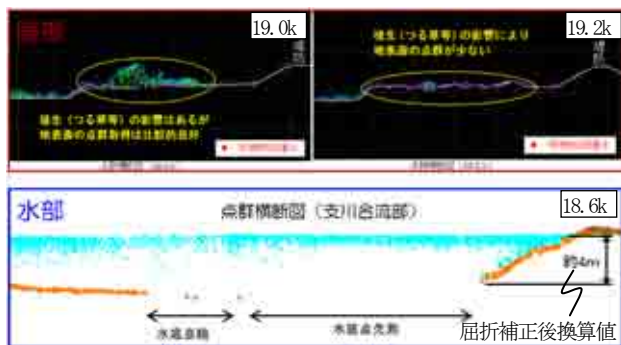


図-6 データの取得状況例

(5) 屈折補正・ノイズ除去

水面を通過して水中に照射したレーザ光は，水中で生じる光の減速に伴う屈折を処理をしなければ正しい位置を再現した点群データを得ることができない(図-7)。

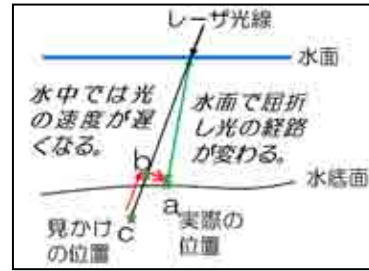


図-7 水面屈折補正の模式図

屈折補正処理には，水面に反射した近赤外レーザ点群から水面3次元モデルを生成し，そのモデルを基準に水中に照射した緑色レーザ点群を1点ずつ変換を実施した。この処理は，水面が常に動いていることから飛行コース毎に補正をすることで河床地形の測量精度を維持することになる。図-8には4コースが重複した箇所で，補正前にはばらついていて河床の点群が，処理により点群が正しい位置に補正された様子を示している。また，水面と水中に発生した無数のノイズ点群の除去も合わせて行い，水陸一連のグラウンドデータとして整理した。

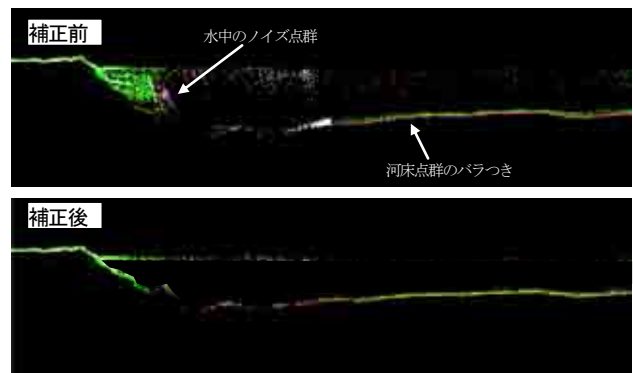


図-8 水面屈折補正前後の点群断面例

(6) メッシュデータの作成

グラウンドデータに基づき，TIN法*による補間処理から0.5mメッシュデータを作成した。メッシュにより河床の微小な凹凸を確認できる(図-9)。

※点群を頂点とした三角形の集合体で地形を表現する方法。



図-9 メッシュデータによる鳥瞰図

5. 精度管理・点検測量

(1)公共測量作業規程に準拠した標高管理

ALBのデータ処理は、水面補正の工程を除いて公共測量作業規程（以下、規程と称す）に示される手順に準じて実施している。規程に準じた精度管理を表-4にとりまとめた。なお規程では陸部のみを対象としており、水面下の規定値は記載されていない。

（精度管理に記載する較差は「平均±標準偏差」を示す）

表-4 精度管理総括表(10月11日計測)

項目		母数	実績値	規程値	備考
コース間 標高較差	陸部	8箇所	5cm	<25cm	相対値 較差管理
	水部	5箇所	2cm	基準なし	
調準点における 標高較差	陸部	5箇所	2cm	<25cm	絶対値 較差管理

(2)港湾局マニュアル(案)に準拠した管理

マルチビーム測深におけるデータの検証方法は井桁測線に沿った測深を実施した上で、井桁内の標高較差を管理することとしている（図-10）。ALBにおいても水面下に陸上同様の調整用基準点（明確に標高を確認できる点）を設置することが困難なため、本手法を適用した。

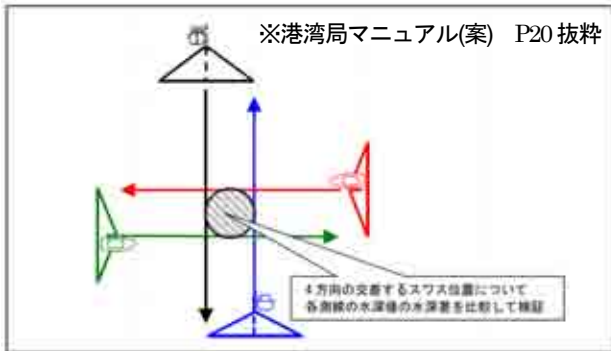


図-10 井桁測線のイメージ

検証エリアは、図-5に示すC2,C3,C6,C7に囲まれた矩形内(280m×260m)とした(図-11)。計算ではエリア内を0.5mメッシュ分割し、メッシュ内の全点群の標高平均値とコース毎の点群の標高平均値の較差を確認した。表-5に示す通り、検証結果では何れのコースも10万点以上の母数に基づき、統計的にも信頼性の高い結果が得られたと考える。表-4にもあるコース間標高較差を含め総合的に、今回の計測では相対的に5cm程度の誤差内で全体計測ができたと判断できる。



図-11 検証エリア

表-5 コース毎の標高較差

コース	母数(全体)	陸部	水部	全体
C2	258,352点	2.0cm	1.7cm	1.9cm
C3	213,555点	2.4cm	2.0cm	2.2cm
C6	156,612点	2.4cm	3.1cm	2.7cm
C7	129,813点	3.5cm	2.6cm	3.1cm

(3)点検測量

得られた結果に対し、従来法によるものとの差異を確認するため、TSによる横断測量と深淺測量(音響測深)を行い、標高較差を点検した(図-12)。横断測量(図-13)では、地形変化点及び概ね5m間隔の観測点に対し、ALBでは細密な点で横断形状を再現していることが確認できる。標高較差については、横断及び深淺測量の何れも、RMSE※は10cm以内となり、従来法と整合性の高い結果であることが確認された(表-6、表-7)。

※従来法観測値を真値とし、ALB観測値の標準偏差(ばらつき)を示す指標。



図-12 点検測量エリア

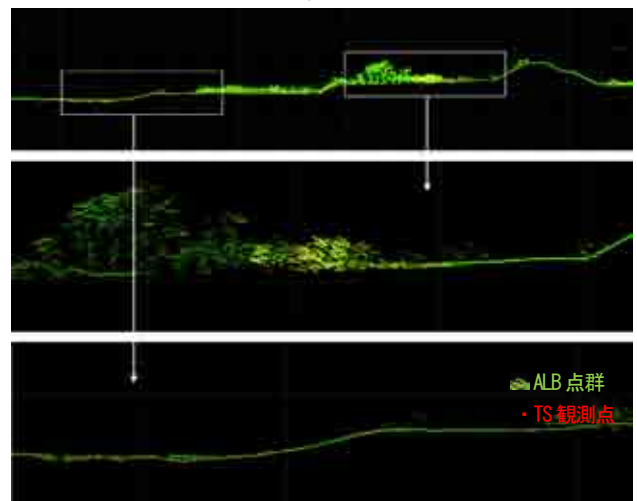


図-13 点検横断図

表-6 TS横断測量との標高較差集計

(実測点数)	平均	最大	最小	RMSE
202点	4.6cm	51.6cm	-21.3cm	6.6cm

表-7 深淺測量との標高較差集計

(実測点数)	平均	最大	最小	RMSE
6269点	2.4cm	61.3cm	-91.1cm	7.5cm

6. 台風21号に伴う再計測

前述の通り10月11日のALB計測後、掘削工事に直接関係する箇所0.5mメッシュデータが出来上がった段階で、台風21号（10月22日夜に近畿最接近）に伴う出水により河床形状は大きく変化することとなった（図-14）。掘削土量の正確な把握のため、起工前測量のやり直しを急ぎ決定し、水位の低下、濁りの収束を待って、11月16日にALB再計測を行い、その10日後には工事に必要な0.5mメッシュデータを作成した。



図-14 出水時の現場風景

再計測による測深においても水深約4mまでに対応し、精度管理結果は表-8に示す通り、当初計測（表-4）と同等の品質であることを確認した。

表-8 精度管理総括表(11月16日計測)

項目		母数	実績値	規程値	備考
コース間 標高較差	陸部	9箇所	4cm	<30cm	相対値
	水部	7箇所	3cm	基準なし	較差管理
調準点における 標高較差	陸部	5箇所	2cm	<25cm	絶対値 較差管理

7. ICT建機による施工等

本工事では、ALBの利用の他にもICT建機の利用をはじめ効率的な作業に努め工事を実施した。

(1) MC バックホウによる掘削

河道掘削工事においては、掘削後の降雨による流水や浮遊砂の沈降に伴い、30 cm～40 cm程度の堆積が生じる。水面下の掘削は、オペレータによる目視ができない環境において、計画河床高に加えて-500mmの余堀りも見込んで、MC バックホウのオフセット機能により、過不足のない掘削を実施した（図-15）。



図-15 バックホウモニター

(2) RTK-GNSSによる検測

起工前測量では、複数工事を対象に ALB によるス

ケールメリットを生かすことができたが、出来形測量では、工事区毎の実施が必要であること、仮締切りによる濁りが継続することから ALB の利用は困難となった。対応策として、締切り内の水深が 2m程度と比較的浅かったため、RTK-GNSS による単点計測（ポールで掘削底面を直接おさえる）を採用し、作業工数の軽減を図った（図-16）。

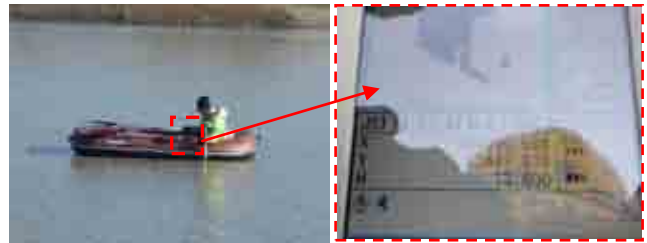


図-16 RTK-GNSSによる出来形測量

(3) 3次元的な出来高進捗管理

工事進捗は、MC バックホウの動作ログデータを 3次元管理システムに登録することで、状況を視覚的かつ詳細に把握し、進捗に応じ 3 次元設計データと起工前のメッシュデータの差分解析から出来高数量を日々管理した（図-17）。

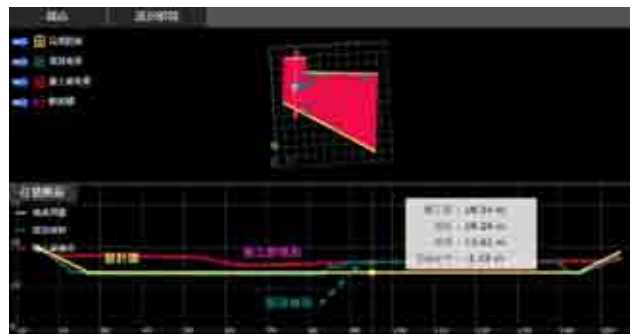


図-17 3次元出来高管理システムの画面

(4) 工事用車両の運行管理

現場から残土処分場までは 22km 程あり、1 日あたり最大で 40 台のダンプが搬土を行うことになった。ダンプに搭載した GNSS データをインターネット回線でシステムに転送し、車両位置、速度等をリアルタイムに監視、速度超過時の注意指示等で安全運行に努め、交通事故ゼロで工事を終えた（図-18）。



図-18 運航管理システム画面

8. ICT活用の効果

今年度は狭窄部全体で6件の工事のうち、4件の河道掘削工事についてALBデータを利用している。一例として「右岸中流地区河道掘削工事(その1)[掘削面積:34,515m²」におけるICT活用の効果を表-9に示すが、何れの作業も時間軽減できたことを確認できる。今回の工事では台風21号による工程遅延の要素もあったが、ICT施工により遅延回避にも寄与したと判断する。

表-9 工程毎の作業時間比較

項目	従来工事(想定)	ICT活用工事(今回)
起工測量	約136時間	約88時間 (約48時間[35%]の短縮)
現場施工	約448時間 (ハック材)	約320時間 (約128時間[28%]の短縮) (3次元MCハック材)
現場測量	丁張の設置数125本 約112時間 (2人×2時間×28日)	丁張の設置数0本 0時間 (約112時間[100%]の短縮)
出来形測量	約160時間	約120時間 (約40時間[25%]の短縮)
計	約856時間	約528時間 (約328時間[38%]の短縮)

9. ALBデータの他活用

今回取得したALBデータに基づき工事以外の活用例について参考として示す。

①台風前後のメッシュデータを取得したことで、出水に伴う河床変動状況を詳細に捉えた浸食・堆砂図を得ることができた(図-19)。

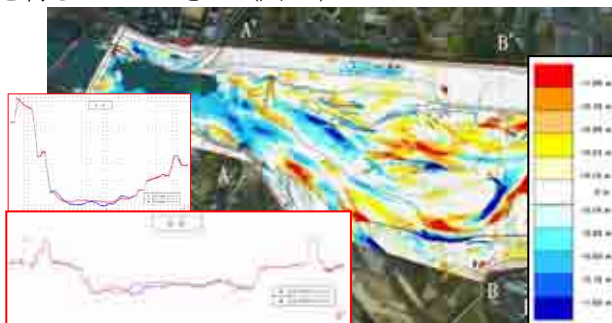


図-19 浸食・堆砂図

②今回は高密度タイプのALBを使用しておりメッシュ化前のオリジナル点群データを可視化することで、水面下の護床ブロックの状態把握ができた(図-20)。

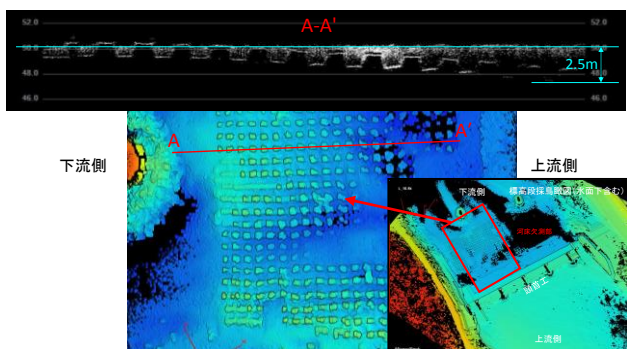


図-20 護床ブロックの可視化図

10. 課題と今後の展開

①現在国内で稼働するALBは機数が少なく、天候・出水等の影響も受け、工事進捗に合わせた調達が難しい場合がある。現在「革新的河川管理プロジェクト」²⁾においてドローン搭載型ALBの開発も進められており、小回りの効いたALB計測に期待したい。

②濁りの影響により、出来形測量でALBを利用することはできなかった。浅域の濁りにおいても、ラジコンボートにマルチビームを搭載した測深システムの運用も始まっている。これら技術を併用し一環した3次元工事用測量の仕組みを検討する必要がある。

③データ処理において、ALBは陸部のレーザ計測と違い膨大なノイズデータが水中に発生する。その処理に必要なPC、オペレータ人工が測量費増の要因となる。水面屈折補正やノイズ除去処理の高速化(自動化)を進め、効率的な内業ができるよう努める必要がある。

④本工事着手時点では、河川工事に関わるICT関連の要領等は未整備であったが、平成30年3月には「河川浚渫工事」に関して、音響測深システムや工事履歴データを活用する要領(案)が施行³⁾された。これらの要領(案)を参考に、ALBによる河川工事用の測量マニュアル等の整備も進める必要がある。

11. おわりに

陸上土工事を中心にICT施工の普及が進むなか、今回のALBを利用した河道掘削工事により、水中(浅域)工事においてもi-Constructionの普及の目途がたつた。小規模工事において、利用のメリットがない等の懸念もあるが、道路土工事においては工事発注前に複数工区の3次元起工前測量をまとめて行い、そのデータを施工業者に提供することをすでに試行している。河道掘削工事にも同様の仕組みを取り入れ、ALB起工前測量を事前に実施し、施工業者にデータを提供する等の発注方式も有効と考える。加えて、3次元計測技術の更なる高度化、活用に企業サイドも積極的に取り組むことで、i-Constructionの劇的な普及に期待したい。

謝辞: 本稿の作成に協力頂きました、木下建設株式会社(施工担当)、中日本航空株式会社(起工前測量担当)の各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 田中克己: ICT活用工事の事例紹介, 日本建設機械施工協会 関西支部広報誌, vol.111, summer2017, pp.4-8
- 2) http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo04_hh_000044.html
- 3) http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000031.html

築堤工事の基盤改良から発生する吹上り土の活用によるコスト縮減方策！

宮下 真輝¹

¹近畿地方整備局 福知山河川国道事務所 工務第一課(〒620-0875京都府福知山市字堀小字今岡2459-14)

由良川下流部の下東地区では緊急治水対策として築堤工事を進めているが、厚い軟弱地層が堆積しているため地盤改良（深層改良工）を行っている。本地区では、地盤改良に伴い副産物としてセメント系改良材を含んだ吹き上がり土が発生するが、発生直後は緩い泥土であり、そのまま処分を行うと建設汚泥として処理が必要となり、高コストである。他方、時間が経過すると含有するセメント系改良材が固化し、一定度の強度を有するようになる。

このような性状を利用し、同様に軟弱地盤対策で地盤改良が必要な三日市地区の改良体として流用し、下東地区の深層改良における吹き上がり土の処分費用のコスト縮減および三日市地区の地盤改良の施工費用のコスト縮減を行った方策について報告する。

キーワード コスト縮減, 地盤改良, 再生利用

1. はじめに

(1) 由良川の概要

由良川はその源を京都、滋賀、福井の府県境三国岳に発し、京都府南丹市美山町の山間部を西流しながら綾部市を経て、福知山市内において土師川を合わせて流れを北に転じ、宮津市及び舞鶴市を左右岸に望みながら日本海に注ぐ流域面積1,880km²、幹線流路延長約146kmの一級河川である。



図-1 由良川流域図

(2) 由良川の特徴

渓谷や河岸段丘が発達している由良川の上流部では、勾配が急で流れが速いが、福知山盆地を流れる中流部では、川幅が広く、勾配も緩くなるため、流れが遅くなっている。そのため、由良川では上流部から流下してきた洪水が中流部で溜まりやすい地形となっており、無堤区間が長く存在する中下流部では水害が頻発してきた。

(3) 由良川の治水事業

平成16年台風23号や平成25年台風18号において大きな洪水被害が発生したことをふまえ、平成16年の洪水と平成25年の洪水の2度浸水した区間を対象に、「由良川水系河川整備計画」の治水対策を大幅に前倒して、概ね10年以内で緊急治水対策を実施している。このうち、被害が甚大であった地区はさらに優先的に対応し、概ね5年間で整備を行うことを目標に治水対策を実施している。

緊急治水対策では、中流部は連続堤や河道掘削を実施し、特に由良川下流部は山間の狭い平地に集落が散在しているため、効率的な対策として、水防災対策（輪中堤、宅地嵩上げ）を実施している。

本稿の対象である下東地区においては、洪水から効率的に集落を守るため、約1,240mの輪中堤を整備することとしており、三日市地区においては、約1,140mの輪中堤の整備および、宅地嵩上げを実施する計画である。



図-2 由良川緊急治水対策(下流部)

(4) 由良川下流部の地質と利用状況

由良川下流部の下東地区や三日市地区の平地は、由良川の堆積作用によってできた沖積層から成る平地で、繰り返し洪水が起こって土砂などが積もってきた低平地で、軟弱な地盤が多い地層となっている。

また、由良川沿いは由良川自然堤防堆積物として砂がち堆積物、山側は由良川氾濫原堆積物として泥がち堆積物が堆積している状態であり、現状で上記自然堤防の区域は畑、由良川氾濫原の区域は水田として利用されている。



図-3 治水地形分類図(下東地区)



図-4 治水地形分類図(三日市地区)

2. 由良川における主な軟弱地盤対策

(1) 志高地区における地盤改良対策の事例

志高地区においては、「河川堤防構造検討手引き」に基づき、円弧すべりによる安定解析を行い、さらに築堤時の沈下量による周辺家屋への影響が懸念される箇所においては、FEMによる変形解析を行った結果、志高地区では堤体直下に浅層改良をほぼ全てで実施しており、民家が隣接している箇所ではさらに川裏の尻付近に深層改良を実施している。



図-5 志高地区における築堤断面

(2) 大川地区における堤防整備の事例

平成26年11月22日(土)の早朝に、由良川左岸7.4km付近において、築堤盛土を施工中の堤防が約80mにわたり沈下した。

沈下発生後、沈下した地形や盛土高に応じた詳細な土質調査を実施し、それをもとに、地盤の強度等、堤防の設計にかかる定数を見直し、設計の照査を実施したところ、当初想定していた地盤定数よりも部分的に値が低い箇所があり、国道側に比べ川側の軟弱粘土層の強度が低く、盛土のすべりに対する安全率が部分的に下回り、盛土の荷重が地盤の支持力を上回ることが判明。

対策工として、堤防が沈下した区間は沈下により地盤の構造が変化するため、深層改良を実施している。

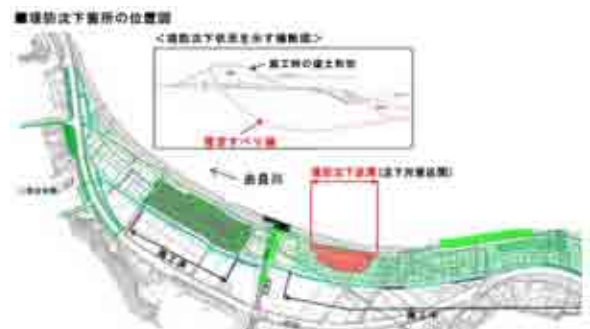


図-6 大川地区における堤防のすべり破壊

(3) 下東地区の軟弱地盤対策

下東地区における輪中堤の整備の検討にあたっては、「河川堤防構造検討の手引き」に基づき、堤防整備の検討を実施している。

検討の結果、当該地区における現況断面(完成断面)では、水位ピーク時の川裏側の円弧すべり計算および、水路近傍における盤膨れの照査に対して、所用の安全性を満足しない結果となった。

また、下東地区では、築堤における地盤変状に対して、圧密沈下検討を実施し、当該地区において縦断的な圧密沈下量および圧密完了時間を把握したところ、所定の数値を上回ったため、圧密沈下対策が必要となっている。

したがって、下東地区では粘性土層厚が概ね30m程度と厚く、沈下に対起因する周辺構造物への影響が懸念されることから、深層改良を実施している。

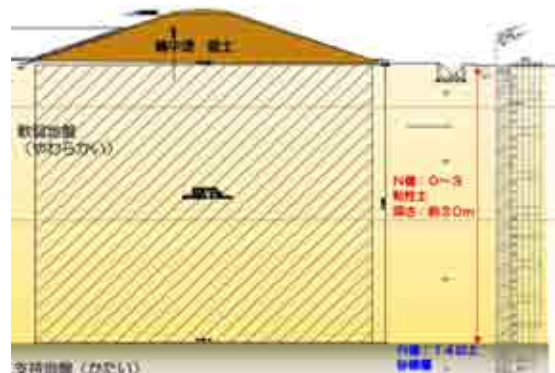


図-7 下東地区における地盤対策

3. 軟弱地盤対策工事

(1) 下東地区の地盤対策工

深層改良対策が必要とされている下東地区では、主に深層混合処理工法として、C I-CMC工法が用いられている。

C I-CMC工法とは、貫入時に攪拌翼に内蔵されている装置からセメントスラリーを霧状に高圧噴射しながら攪拌することにより、改良域を流動化させ固化剤を混合する工法である。この工法では、霧状スラリーが土をほぐし、土粒子の流動性を高め、エアリフト効果により排土を促すため、セメント量が改良体と同程度均一に混ざり合った吹き上がり土が発生する。

また、地盤改良工により発生する吹き上がり土は、投入するスラリー量と同量程度の発生が見込まれる。



図-8 深層混合処理工の一例

(2) 下東地区の吹き上がり土の性状

地盤改良に伴い発生する吹き上がり土は、発生直後に地上部に出てきた際は図-9の写真のとおり泥状の状態であり、ダンプトラックにて積込・運搬は可能であるが、人が上を歩けない状態であり、発生翌日のコーン指数が193kN/m²との結果も出ている。

建設汚泥処理土利用技術基準【国土交通省】によると、建設汚泥の定義は「建設工事に係わる掘削工事から生じる泥状の掘削物及び汚水のうち、産業廃棄物処理法に規程する産業廃棄物として取り扱われるもの」とされており、泥状の状態とは、標準ダンプトラックに山積みできず、また、その上を人が歩けない状態をいい、コーン指数が概ね200kN/m²以下であることとなっていることから、下東地区で発生する吹き上がり土はそのままでは建設汚泥として取り扱う必要がある。



図-9 吹き上がり土の様子

(3) 吹き上がり土の資材としての価値

しかし、下東地区で発生する吹き上がり土はセメントが含まれているため、時間の経過とともに硬化反応によって性状が変化する。そのため、土質試験において経過日数に対するコーン指数および含水比の試験を行ったところ、結果は下記の表-1に示すとおり発生後2日目以降においては、第4種建設発生土以上の強度になることが確認されている。

土粒子の密度(g/cm ³)			
2.710			
コーン指数(kN/m ²)		含水比(w)	
発生後1日目	9月15日	193.2	73.8
発生後2日目	9月16日	913.0	54.0
発生後3日目	9月17日	1251.2	53.1

表-1 土質試験結果

また、土壤環境基準等を確認するために溶出試験（全26項目）及び含有量試験（9項目）を行ったところ、全ての項目について、基準超過するものはなく、土壤環境基準を満たしていることから、発生後2日以降の吹き上がり土については、建設資材として再利用することが可能であると考えられる。

(4) 吹き上がり土の発生状況

下東地区の地質は、主に泥がち堆積物で構成されており、軟弱な粘性土であるAC1～AC3がほぼ一様に分布している。計画されている地盤改良工は全線に渡って、深層混合処理・改良率（30%）・設計基準強度（600kN/m²）で一様である。このような条件下東地区においては、地盤改良工に使用する固化材および工法が同一であれば、固化材添加量についてもほぼ近い数値になり、発生する吹き上がり土についても、極端な空打ち長の違いが無い限り、ほぼ一様な性状の吹き上がり土が発生すると考えられる。

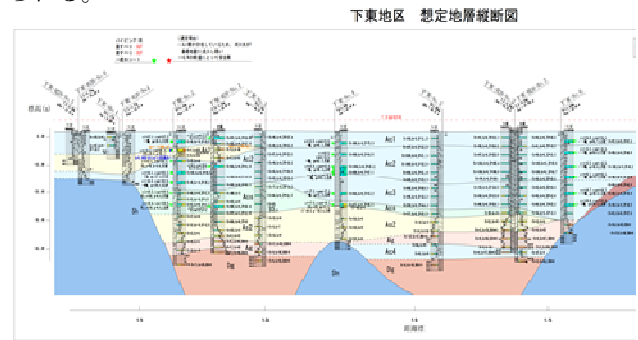


図-10 下東地区 想定地層縦断面図

(5) 三日市地区の対策

三日市地区においては、過年度の業務成果より、堤防の浸透に対する安全性照査結果より、当該地区における現況断面（完成断面）では、水位ピーク時の川裏側の円弧すべり計算の結果から、所用の安全性を満足しない結果となっている。

そのため、三日市地区では、1.4mの浅層改良（必要強度：140kN/m²）が必要となっている。

4. 吹き上がり土の活用検討

(1) 吹き上がり土の性状把握

下東地区の深層改良対策に伴い発生する吹き上がり土を三日市地区の築堤工事の基礎の改良部へ流用することの適用性について検討した。

既往試験では、吹き上がり土はセメントが含まれており、時間の経過とともに硬化反応によって、性状が変化するため、利用にあたっては発生時施工箇所付近にて集積し、所定の日数経過後、バックホウにてほぐし積込を行うことを想定し、A～Dの4種類の材料で試験を行っている。

この内、発生後日数の違いによる試験結果を比べるために、A～Dを抽出した結果を下記に示す。

種別	発生後日数	施工条件	転圧機械
吹き上がり土	A	2日	振動ローラ (12t級)
	B	3日	
	C	4日	
	D	7日	

表-2 発生後日数別試験材区分

種別	一軸圧縮強度 (qu)(kN/m ²)	
	σ7	σ28
A(2日目)	129.21	197.84
B(3日目)	144.10	232.99
C(4日目)	169.42	305.90
D(7日目)	145.72	164.76

表-3 一軸圧縮強度試験結果

上記一覧表から、発生後日数が2日以上経過すると、一軸圧縮強度がqu=164.76～305.90kN/m²となり、三日市地区の浅層混合層の設計基準強度140kN/m²を満足している。

しかし、発生直後の吹き上がり土については、表-4に示すとおり、コーン指数が200kN/m²以下となっており、「建設汚泥処理土利用技術基準 国土交通省」における建設汚泥再生利用における留意点として、「処理土の運搬を行う場合には、その性状を第4種処理土以上とし、周辺的生活環境に影響を及ぼさないように留意する。」との記載があり、吹き上がり土を運搬する条件(第4種処理土以上)を満足していない。

材料: 吹き上がり土		発生日: 9/14	
土質試験結果 (単位)			
試験項目			
コーン指数 (kN/m ²)	含水比 (%)	液性指数	塑性指数
発生後1日目	93.2	193.2	74.8
発生後2日目	93.2	193.2	74.8
発生後3日目	144.1	232.99	74.8
発生後4日目	169.42	305.90	74.8
発生後7日目	145.72	164.76	74.8

表-4 土質試験結果(コーン指数及び含水比)

区分	基準値	備考
	コーン指数*1,2 qc (kN/m ²)	
第1種処理土	-	固結強度が高く礫、砂状を呈するもの
第2種処理土	800以上	
第3種処理土	400以上	
第4種処理土	200以上	

*1) 所定の方法でモールドに締め固めた試料に対し、コーン penetrometer で測定したコーン指数 (参考表-1 参照)

*2) スラリー化安定処理土の指標は、7日後の一軸圧縮強度とする。

表-5 建設汚泥処理土の土質材料としての品質区分と品質基準

したがって、下東地区で発生する吹き上がり土については、発生後に一時的に仮置きした後に活用する必要があるものの、三日市地区における地盤改良強度を満たしていることから、浅層改良工ではなく置換工を実施することを検討する。

(2) 吹き上がり土の流用条件

地盤改良深度による影響については、吹き上がり土の発生時、つまり泥状の状態試料を採取しその強度を調査したところ、地盤改良の深度別の一軸圧縮強度については、施工深度10m(NO.1)、20m(NO.2)、30m(NO.3)付近の発生土を用いて試験がなされており、下記の表-5に示すとおり、σ28=914.53～2235.86kN/m²を示しており、施工深度による吹き上がり土の強度不足は問題ないと考えられる。

種別	一軸圧縮強度 (qu)(kN/m ²)	
	σ7	σ28
NO.1	1,132.93	2,235.86
NO.2	948.58	1,988.08
NO.3	463.01	914.53
平均	848.17	1,712.82

表-6 一軸圧縮試験結果

発生後日数の違いによる締固め度(空気間隙率)については、全てにおいて0～2回の転圧にて得られている。また、締固め度(空気間隙率)の数値の降下収束及び表面沈下量の収束を考慮した転圧回数は、表-7に示すように4回となっている。

種別	転圧回数(回)				判定・決定回数
	空気間隙率 (ix)		表面沈下量		
	降下量1%以下となる回数	降下量2%以下となる回数	降下量0.5mm以下の回数	降下量1mm以下の回数	
A(2日目)	0	2	4	0	4
B(3日目)	2	4	4	0	4
C(4日目)	2	4	4	0	4
D(7日目)	2	4	4	0	4

表-7 締固め試験施工結果

したがって、前述の検討の結果、項目別の吹き上がり土を流用するための条件一覧を下記の表-8に示す。

流用条件		
1	強度	発生後2日目以降7日以内の吹き上がり土
2	運搬	発生後2日目以降の吹き上がり土
3	転圧回数	転圧回数4回

表-8 項目別吹き上がり土の流用条件

5. コスト縮減効果

下東地区では深層混合処理により発生する吹き上がり土を三日市地区における置換工に流用することで、コスト縮減を図っている。

コスト縮減効果としては、①吹き上がり土の処分費用の縮減、②三日市地区における地盤改良費用削減の2つが考えられる。

①吹き上がり土の処分費用については、実際、吹き上がり土を処分する場合は、表-1より発生後1～3日間において、コーン指数が193.2～1251.1 kN/m²であることから土質材料としては、第2～4種処理土として扱われる。

したがって、吹き上がり土を流用することで、第2～4種処理土の処分費用を縮減することができる。

②三日市地区における改良費用削減については、吹き上がり土を用いた置換工を実施しない場合、バックホウやパワーブレンダーを用いた改良が必要となるため、今回の場合、その分の対策費用を縮減することができる。

また、今回の場合、三日市地区において置き換えを行う土については、土質試験の結果、粘性土であることが判明しており、礫質土と混合することで築堤材に再利用することが可能なため、築堤材として利用している。

6. 課題

- ・吹き上がり土の乾燥常状態における測定結果については、所定の基準を上回ることはできたが、降雨等により湿潤状態となった場合は、普通の土砂以上に軟弱化する傾向があるため、施工時期や工程等の調整が必要となる。
- ・吹き上がり土の発生時の試料の一軸圧縮強度試験の結果より、発生した吹き上がり土をそのまま放置しておく土砂として掘削できないほど硬化するため、注意が必要である。流用する場合は、発生後数日以内に流用や仮置き等で一旦掘削することによりほぐすことが必要である。
- ・発生後、運搬可能な強度が発現されるまでの間、一時的に場内にて仮置きする必要があるため、仮置きヤードの確保が必要になる。

7. 今後に向けて

今回のケースでは、吹き上がり土が発生する地盤改良工事と、ある程度強度発現した改良土が必要な工事が隣接していたためコスト縮減を図ることができたが、多くの場合、建設汚泥を再利用する際は、使用条件等が制約されることが多いため、工事の計画段階から、コスト縮減を図ることを念頭に発注スケジュール、工程等を調整しておくことが大切である。

謝辞

本稿をとりまとめるにあたり、ご助言・ご指導頂いた方に深く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 由良川水系河川整備計画：平成25年6月 近畿地方整備局
- (2) 河川堤防の構造検討の手引き：（財）国土技術研究センター（平成24年2月）
- (3) 建設汚泥処理土利用技術基準【国土交通省】
- (4) 近畿地方整備局直轄工事における建設汚泥再生利用手引 ～「建設汚泥の再生利用に関するガイドライン」に基づく建設汚泥の再生利用について～
平成19年9月 近畿地方整備局企画部技術調査課

関西国際空港における 護岸の嵩上・補強工事について

齋藤 祐樹¹・古城 鉄也²

関西エアポート株式会社 関西空港技術部 空港島保全グループ
(〒549-8501 泉佐野市泉州空港北1番地)

関西国際空港では、地盤沈下の影響により護岸が高潮・津波に対する必要高を下回ることのないよう、計画的に護岸の嵩上・補強工事を実施している。現在は、2期島の北西（淡路島側）に位置する延長約6kmの護岸を3m嵩上げする工事を実施しており、2018年6月現在、ほぼ全ての工種が完了し、竣工に向けたラストスパートを迎えている状態である。

本工事は、運用中の滑走路近傍かつ非常に狭隘な作業空間で掘削やコンクリート打設を実施する必要があった為、航空局を始めとした各関係機関との作業調整や、施工機械の選定に十分配慮しながら施工を進めた。

キーワード 津波・高潮対策、護岸、施工

1. 概要

関西国際空港では、地盤沈下の影響により、護岸の天端高が高潮・津波に対する必要高さを下回ることのないように、計画的に護岸の嵩上・補強工事を実施している。

2期島の北西側（淡路島側）に位置するA1～A4護岸は、航空機の離着陸に必要な滑走路や無線施設等を背後に擁し、それらを高潮・津波から防護するためにも特に重要な護岸である。

図-1は2期A1～A4護岸を示したものである。2期島は依然として地盤沈下量が大きく、その影響により当該護岸が高潮・津波に対する必要高を下回ることのないよう、嵩上げが必要な状態であった。そこで現在、2期島A1～A4護岸（総延長6,100m）を2014年秋から2018年にかけて、嵩上工事を行っている。

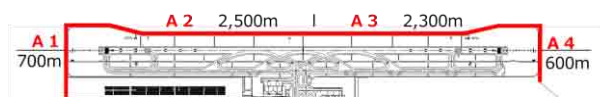


図-1 2期島A1～A4護岸配置

施工はA1護岸・A4護岸を優先的に嵩上げていき、次にA2・A3護岸を嵩上げた。2018年6月現在では、躯体の打設も終わり、ほぼ全ての工種が完了した状態である。

2. 関西国際空港における高潮・津波想定

関西国際空港は1994年に1期島が、2007年に2期島が供用開始された。関西国際空港の主要施設配置を図-2に示す。

1期島には、第1ターミナルや給油施設等があり、2期島には、LCC（ローコストキャリア：格安航空）専用の第2ターミナルがある。

このような施設配置の中で、各護岸に対して、高潮・津波に対する必要高さを設定している。

なお関西国際空港では、地盤高の管理や工事用基準面として、潮位表基準面（C.D.L.：Chart Datum Level）を使用している。

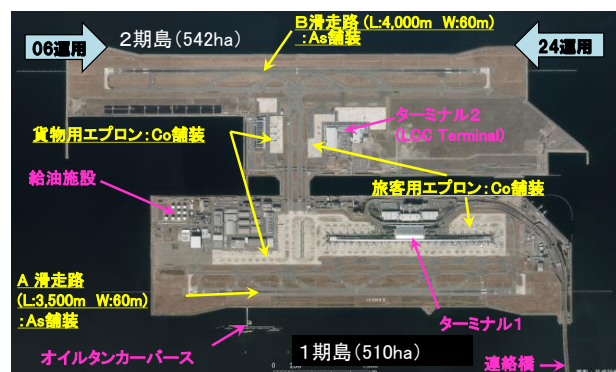


図-2 関西国際空港の主要施設配置

高潮に対する必要天端高とは、HHWL+3.2m において設計波が入射した際に許容越波流量を下回る高さであり、合田による越波流量推定図より設定した。

なお、『空港土木施設設計基準』によると、許容越波流量は $q_a=0.02 \text{ m}^3/\text{m/s}$ 程度とされており、『港湾の施設の技術上の基準・同解説』によると、背後地の重要度からみた許容越波流量は表-1のとおりである。

表-1 背後地の重要度からみた許容越波流量 (m³/m/s)

背後に人家、公共施設等が密集しており、特に越波、しぶき等の侵入により重大な被害が予想される地区	0.01程度
その他の重要な地区	0.02程度
その他の地区	0.02~0.06

当該護岸においては『港湾の施設の技術上の基準・同解説』におけるその他の重要な地区相当であると考え、かつ『空港土木施設設計基準』も満足するように、許容越波流量は $q_a=0.02 \text{ m}^3/\text{m/s}$ として設計を行った。

また、設計波の算定には、昭和30年~平成6年までの資料(台風、低気圧、冬型気圧配置等を対象とした推算波浪)を用い、2期空港島計画周辺5地点及びMT局(実測波との比較用)の計6点において、湾内発生波(確率波、浅水変形考慮)とうねり(確率波、浅水変形考慮)を求め、両者を合成して推算波浪を算定した。なお、MT局とは2期島の西の沖側500mの位置に設置された、気象・海象計測施設のことである。

また、津波に対する必要天端高は、内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」の津波断層モデルを用いて、大阪府が実施した津波シミュレーションで計算された関西国際空港での津波高に、地震による地殻沈降量及び地震動による鉛直変位量を足し合わせることで設定した。

これらより、2期島における高潮・津波に対する必要高さを整理したものが図-3である。



図-3 2期島における高潮・津波に対する必要高さ

表-2は2期島A1~A4護岸における高潮・津波に対する必要高さである。2期島A1~A4護岸では、津波に対する必要高さよりも、台風時の高潮に対する必要高さの方が高くなっているため、この高さを必要天端高として設計を実施した。

表-2 2期島A1~A4護岸の高潮・津波に対する必要高さ

区間	必要高さ (高潮)	必要高さ (津波)	護岸延長
A1護岸	C.D.L.+5.9m	C.D.L.+4.1m	719m
A2護岸	C.D.L.+5.5m	C.D.L.+4.0m	2,533m
A3護岸	C.D.L.+5.5m	C.D.L.+4.0m	2,266m
A4護岸	C.D.L.+5.1m	C.D.L.+3.8m	565m

施工高さに関しては、嵩上げ後の護岸が制限表面を突出しない範囲で、不同沈下の影響も考慮し対応年数を定め、高さを確定している。制限表面の説明に関しては、後述する。

今回は設計時より概ね20年対応の嵩上げを想定した。20年後に必要な天端高を下回る箇所がないようにするためには最大3.0mの嵩上げが必要であり、長大な施工区域での施工性を考慮して、今回は各躯体を一律3.0mずつ嵩上げすることとした。

3. 工事の制約

本工事では、運用中の滑走路の近傍での施工が大部分を占め、施工に際しては空港特有の様々な制約があった。ここでは、施工に際してのいくつかの制約を紹介する。

(1) 施工場所の制約

本工事は、写真-1のように施工場所が非常に狭隘である。特にA2・A3護岸では、施工可能範囲が5m程度の幅しかない状況である。そのため護岸側のみのスペースでは、十分な施工スペースが確保できず、著しく施工性が悪くなるため、一連の作業工程の中で撤去工、土工を除く作業を、制限区域内からクレーン、ポンプ車等を用い、制限フェンス越しの施工を行うこととした。制限区域内からの作業を実施することで、航空局を始めとした、各関係機関との作業調整を行う必要がある。



写真-1 2期島A3護岸施工前風景

(2) 制限表面

航空機が安全に離着陸するために、空港周辺の一定の空間は障害物が無い状態しておく必要がある。このため、航空法において、**図-4** のような制限表面が定められている。この制限表面は建造物だけでなく、**施工中の重機等も突出しないようにする必要がある。**

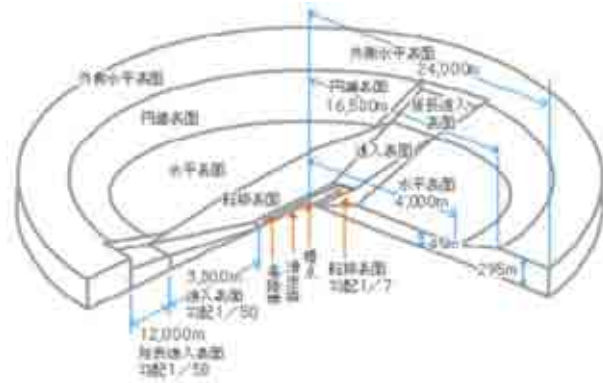


図-4 制限表面

本工事では、運用中の滑走路と施工エリアの関係上、特に**転移表面と進入表面**に留意して施工を行う必要があった。

転移表面とは航空機の進入方向に対して直角方向に勾配を持つ制限表面のことであり、本工事では**A2・A3護岸**のほぼ全域が転移表面下の作業となる。

進入表面とは航空機の進入方向に勾配を持つ制限表面のことであり、本工事では**A1護岸・A4護岸**全域と**A2・A3護岸**の一部が進入表面下の作業となる。

工事の実施に当たっては、航空機の運航の安全確保と工事の安全管理について常に留意するとともに、当該工事の実施に伴う航空機の運航制限を最小にとどめるように、**重機の選定等の工夫**を行う必要がある。

(3) ILS制限区域

天候不良等により視程が悪くなった場合には、着陸進入する航空機に対して、空港から **ILS (計器着陸装置)** と呼ばれる指向性誘導電波を放射し、安全に航空機が着陸できるように滑走路までの誘導を行っている。

ILS には滑走路との左右のズレを示すローライザー、上下のズレを示すグライドパス、滑走路との距離を示すマーカービーコン等がある。

ILS を使用した滑走路運用には、滑走路上の視距離や雲高に応じてカテゴリーが定められており、関西国際空港では**図-5** の CATI及び CATIIでの運用が可能である。それぞれのカテゴリーに **DH (決心高度：着陸に必要な視覚目標物が確認できる高さの最低値)** および **RVR (滑走路上の視距離)** のミニマム、すなわち最低値が定められている。例えば CATI運用時は、高度約 **70m** まで降下したところで視覚目標物が確認でき、かつ滑走路が **550m** 先まで見通せる状態であれば、航空機は着陸を実行することができ、逆にそのどちらかの条件が整っていなければさらに高カテゴリーでの運用に切り替える、若しくはそれが不可能な滑走路であれば、航空機は着陸を実行できないということになる。

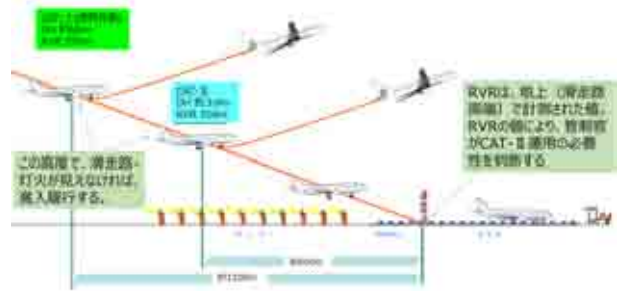


図-5 計器飛行方式の仕組み

ILS の電波の影響が及ぶ範囲を **ILS 制限区域** と呼び、**ILS 制限区域内**で作業を実施する際には、**ILS の電波への支障の有無を確認する必要がある。**当該工事の施工範囲では**A2・A3護岸の一部が ILS 制限区域**に含まれる。

また、それら計器を用いた航空機の離着陸（計器飛行方式）に影響を及ぼす高さについても留意する必要がある。各計器飛行方式に影響を及ぼさない高さ以下の作業実施、若しくはそれが困難な場合は計器飛行方式の一時変更の手続きが必要となる。

4. 工事に際しての調整・工夫

(1) 狭隘箇所での施工性の向上

A2・A3 護岸では車道幅が狭いため、土砂を運搬するダンプトラック等の方向転換が出来ない。また A2・A3 護岸延長がおよそ **4,800m** あり、適宜方向転換できる場所が必要であった。そのため、**写真-2** のような、通常トンネル工事等の現場で用いられるターンテーブルを設置することで、ダンプトラックの方向転回が可能になり、土工における土砂運搬作業の効率化を図ることができた。

ターンテーブルは **100m** ピッチで設置箇所を設け、工事の進捗状況に合わせて随時移動させながら施工した。



写真-2 ターンテーブル使用状況

(2) 施工高さ管理

a) A1・A4護岸の制限高さ

写真-3はA1・A4護岸での施工の様子である。本区間は進入表面下での作業となるため、進入表面を越えない作業制限高さを厳守した。作業制限高さはA1護岸では施工地盤面からおよそ4.5～6.0m、A4護岸では施工地盤面からおよそ7.7～9.5mである。



写真-3 A1護岸施工風景

b) A2・A3護岸の制限高さ

A2・A3護岸（延長4,800m）は施工箇所が非常に狭隘で、護岸側のみでは施工スペースが確保出来ず、また一旦掘削すると、工事車両が通行出来なくなることもあり、制限区域内からクレーンやバックホウ、ポンプ車等を用いた作業を実施する。写真-4はA2・A3護岸での施工の様子である。



写真-4 A2護岸施工風景

クレーン作業は作業制限高さと作業範囲を設け、制限表面（内側転移表面）高さを厳守した。A2・A3護岸では作業制限高さは施工地盤面から20mの高さである。

このような制限の中で、重機作業高さの管理方法として、事前に既設舗装面の測量を行い、制限高さまでの作業可能高さを確認した。

掘削・埋戻し・舗装の際、それぞれの区間の作業可能高さに合わせて、バックホウ・ダンプトラックの種類を変えて施工を行った。

バックホウの高さ管理では、図-6のように①ブームを

最大まで上げた状態の高さ、②アームをおりまげた状態でのオペレーターの最大可視高さ、③アームを伸長した状態でのオペレーターの可視高さの3種類を測定した。

②③が①より低い場合には、②③の高さを使用し、オペレーターはバケットの見える範囲での作業を遵守する。

②③が①より高い場合には①の高さを使用し、キャビネットの全面ガラスに高さ管理用テープを張り、バケットがテープを越えないように注意して施工を行う。



図-6 バックホウの作業高さ管理

また、図-7のように各バックホウの最大到達高さを事前に測定し、作業可能高さが低い範囲では小さい重機を使用し、作業可能高さが高い範囲では施工性を高めるためにも大きな重機を使用した。



図-7 バックホウの選定

資機材揚重の際のクレーン付きトラックも作業可能高さを確認して作業を行った。図-8はラフタークレーンの作業高さ管理を示したもので事前に角度と高さの関係を把握した。また、ラフタークレーンはブーム高さ制限装置付の機械を使用し、作業開始前に作業高さを確認し入力の際、作業を行った。

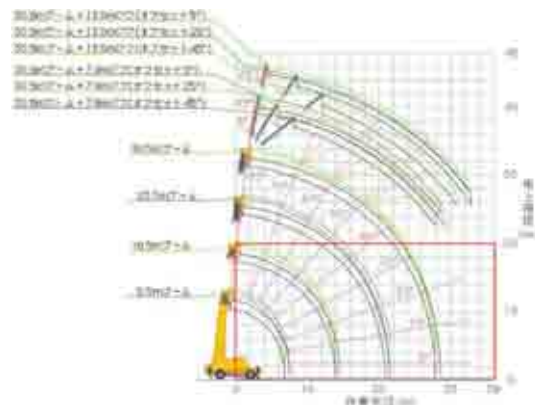


図-8 ラフタークレーンの作業高さ管理

コンクリート打設の際のポンプ車に関しても、バックホウ同様に図-9のように各ポンプ車の作業高さを確認し、作業可能高さに応じて適切なポンプ車の選定を行い施工を実施した。

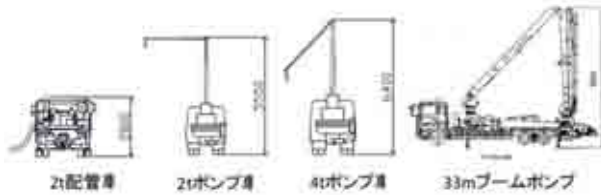


図-9 ポンプ車の選定

(3) フライトチェック

前述したように、本工事では多くの制約がある中で、様々な調整を行い、滑走路を運用したままの日中施工を行っている。

A2・A3護岸の施工においては、ILS制限区域内での作業が予定されていることから、当該作業に先立ち、ILSの電波への支障の有無を確認するため、航空局に飛行検査（フライトチェック）の実施を依頼した。

フライトチェックでは、南北の2箇所のILS影響区域の図-10及び写真-5・写真-6のように10tダンプを50mの間に5台配置し、そのうちGSアンテナに近いダンプトラックをダンプアップさせた状態とした。南北のそれぞれのILS制限区域において、最大3箇所で開催を実施した。

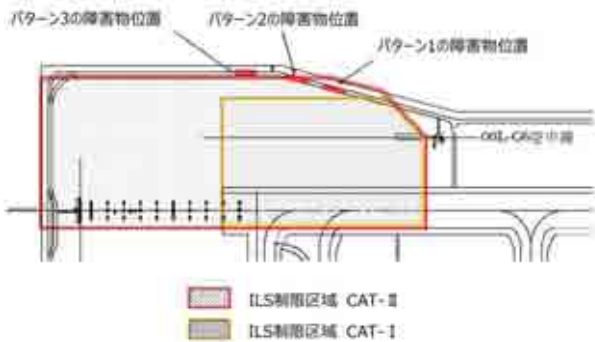


図-10 フライトチェック概要



写真-5 フライトチェックの様子



写真-6 フライトチェック時のダンプ配置の様子

フライトチェックを実施した結果、南北のILSともに2箇所の測定結果が良好であったため、ILSの電波に支障を与えることなく当該作業の実施が可能であることがわかった。

(4) ミニマム変更および作業中の気象管理

前項で述べた通り、当該作業がILSの電波に支障を与えないことを確認した。一方で、本工事におけるクレーン作業やコンクリート打設作業実施時の作業高さを検討した結果、計器飛行方式に影響を及ぼさない高さでの作業が困難であることが分かったため、航空局やエアライン等との調整を経て、以下の通り対応した。

CATI運用時については表-3の通り前述のミニマムを一時変更することで対応した。

CATII運用時のミニマムは現行通りとし、気象条件が悪化してCATII運用となる際には作業中断することとした。

表-3 計器飛行方式への対応

カテゴリー	CAT I		CAT II
	昼間 (7:00~18:00)	夜間	
最低気象条件	昼間 一時改訂 MNm	現行どおりのMNm	現行どおりのMNm
作業	継続	なし	中断
運用	改訂MNm適用	現行MNm適用	SSP体制による
備考	○MNm改訂値(予定) 06L運用 DH(m): 61~69 RVR(m): 550~600 24R運用 DH(m): 64~70 RVR(m): 550~600		○RVR<1800mで中断開始 (20~25分で撤収) ○作業は昼間(7:00~18:00)のみ

天候急転時には、運航に支障のないように、退避を含めた作業中断時間（最大 25 分）を厳守することとした。本工事ではコンクリートの打設が多く、コンクリート打設時は作業の中断に時間を要する。そのため、作業前・作業中の気象予報の確認には十分留意した。

作業前には、気象予報を確認の上、視程<2,000m が予想される場合には、作業の開始時刻の延期または休工とした。

作業中においては、視程の低下が見込まれる日は、現場責任者が滑走路上の気象情報（RVR等）を常時確認できる端末を保有することとし、RVR<1,800mとなった場合には、CATIIでの計器飛行方式に影響のある全作業の中断、ILS制限区域からの完全退去を厳守した。

以上の調整や周知には多大な時間を費やしたが、航空機の安全運航を絶対に侵すことのないよう、確実に施工調整を行うことを心掛けた。また、着工後も作業内容に応じて現場ルールや気象管理方法の見直しを適宜行った。

(5) 沈下への対応

関西国際空港では依然として地盤沈下が進行しており、2期島においては年間およそ30cmの沈下が発生している。本工事は4年半という長い工期であるため、品質管理、出来形管理、安全管理すべての面において地盤沈下の管理が重要である。ここでは施工の際に、留意した点をいくつか紹介する。

a) 沈下計測点の管理方法

関西国際空港では、毎年沈下状況を把握する為に地盤高測量を実施している。2期島A1～A4護岸の天端にもおよそ200m間隔で測量点がある。

そのため、今回の嵩上げで消失する護岸天端上の測量点を適宜盛替える必要があった。施工前に既設計測点の確認を行い、付近に仮計測点を設置した。施工期間中は前述の地盤高測量には仮計測点を用いることとし、当該箇所の上部工が完成後、計測点を復旧した。このような管理を行うことで工事の前後で、沈下計測が途切れないようにした。

さらに、嵩上げの影響により局所的に沈下が加速していないかもあわせて確認を行いながら施工を行った。

また嵩上げ前の護岸が不同沈下の影響により個々のブロックで天端高さが異なっている状態であった。本工事では、嵩上げ高さを一律3.0mとしているが、完成後の高さがあまりにもバラバラにならないように、出来形の許容範囲内で天端がなるだけ揃うようにブロックごとに嵩上高さを設定した。

b) 制限フェンスの移設

関西国際空港では、不同沈下の影響により護岸側より島内側の方が沈下が大きい傾向にある。そのため、年々護岸際では転移表面が相対的に近づいてきているような状態であり、制限フェンスも転移表面に抵触するおそれがあるため、本工事において制限フェンスの移設をあわせて実施した。

制限フェンスを護岸近くに移設する方法もあるが、護岸の上部工が3.0m嵩上げされるため、それ自身がフェンスの機能を兼ねられ（制限フェンスは3.0mの高さ+忍び返し部を有する必要がある）、フェンスの本体・基礎の新設費用がほとんど不要となることから護岸上部に忍び返しのみを設置することとした。

5. まとめ

以上のように、関西国際空港では、地盤沈下の影響により、護岸の天端高が高潮・津波に対する必要高さを下回ることのないように、計画的に護岸の嵩上・補強工事を実施している。本工事では延長およそ6kmの2期島A1～A4護岸を嵩上げを実施した。写真-7は嵩上げ後の2期島護岸の様子である。現在は竣工に向けたラストスパートを迎えている状態で、残りわずかの工種も安全に成し遂げられるよう工事を進めたい。



写真-7 嵩上げ後の2期島護岸（制限フェンス移設前）

また、今後も沈下の状況を適切に把握し、高潮・津波に対する護岸の必要高さを下回らないように計画的に嵩上げを実施していく必要がある。

参考文献

1) 合田良実, 岸良安治, 神山豊: 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp.3-44, 1975.

ICT浚渫工（河川）の出来形管理基準策定の検討

山口 敦久

姫路河川国道事務所 調査課（〒670-0947兵庫県姫路市北条1-250）

国土交通省は建設現場の生産性向上の施策としてi-Constructionを提唱し、そのトップランナー施策であるICTの全面的活用について、2016年度に開始したICT土工に続き、2017年度はICT舗装工並びにICT浚渫工（港湾）、2018年度は新たにICT浚渫工（河川）を開始した。ICT浚渫工（河川）の開始には、バックホウ浚渫船による面的な施工管理基準の適用を図る方法の一つに、MGバックホウによる施工履歴データの活用に着目した。実現場等での出来形により収集されたデータから現場実態を整理し、施工履歴データを用いた面的な出来形管理に対応した精度管理手法や規格値案を検討した。

キーワード i-Construction, バックホウ浚渫船, 施工履歴データ, MGバックホウ

1. はじめに

国土交通省が推進するi-Constructionのトップランナー施策である「ICTの全面的活用」については、3次元起工測量、3次元設計データ作成、ICT建設機械による施工、3次元出来形管理及び3次元データでの納品を行うものであり、2016年度よりICT土工として取組を開始し、2017年度にはICT舗装工及びICT浚渫工（港湾）が開始されている。2016年9月の政府の「未来投資会議（第1回）」では建設現場の生産性を2025年度までに2割向上させること等を打ち出している中、新たな生産性向上を図るため、対象工種の拡大が求められている。

このような状況のもと、河川の浚渫工事では、以前よりバックホウ浚渫船における情報化施工技術として、MGバックホウ（MGはMachine Guidanceの略）による河川浚渫での普及も進められており、3次元設計データを利用して行われるため、工程全体での効率化も期待できることから、2018年度より「ICT浚渫工（河川）」として取組を始めることとなった。

情報化施工技術のうち、MGバックホウ等のICT建設機械による施工では、丁張の削減や作業効率の向上等、様々な導入効果が得られるが、ICT建設機械の作業装置における施工中の軌跡（以下「施工履歴データ」とする。）を記録することが出来るものがあり、適切な精度管理を行ったうえでこの軌跡データを出来形管理に活用することにより、出来形管理作業の大幅な効率化・省力化が期待できる。特に施工中や施工後に降雨に伴う河川の水位増加等により、常にあるいは一時的に水面下に没する河床部分の掘削や、浚渫工における水底の掘削では、

レーザースキャナー（以下「TLS」とする。TLSはTerrestrial Laser Scanningの略）やUAV（UAVはUnmanned Aerial Vehicleの略）等の既存の出来形計測技術による出来形計測が困難であるが、代替として施工履歴データを活用した出来形管理手法を用いることにより、作業効率が飛躍的に向上する。

そこで、河川浚渫でのバックホウ浚渫船による施工履歴データでの出来形管理の適用を目指し、実現場等での出来形で収集されたデータから現場実態を整理し、施工履歴データを用いた面的な出来形管理に対応した精度管理手法や規格値案を検討した。

2. 施工履歴データの計測機器としての精度検証

図-1に施工履歴データの精度検証のイメージを示す。施工履歴データを出来形計測に使用するには、施工履歴の計測機器としての精度検証を実施する必要がある。これは過年度のバックホウ浚渫船現場における結果において、施工履歴データを用いた出来形管理結果が、トータルステーション（以下、TSとする。）やレッド測深による測定結果と比較して、40cm程度の差異が見られたためである。この要因の一つとして、実際の施工形状と施工履歴データによる出来形形状の違いが発生することが考えられ、これは連続的に取得される施工履歴データの取得間隔が疎であるため、実際の出来形と記録点間をつないだラインが適合しないことが原因であると考えられた。そのため、施工履歴データから求められる出来形

計測結果が実際の出来形形状に適合するために必要なデータ取得頻度や、計測前のICT建設機械の精度管理方法とその管理値について、真値（TSで計測された刃先の軌跡）と施工履歴データで比較検証を行うため、まず最初に施工履歴データの計測機器における精度検証を行った。

精度検証を行う項目は、MGバックホウによる静止状態での計測精度の検証（静的計測）、動作状態での計測精度の検証（動的計測）と実施工を想定した整形後の出来形と軌跡データの比較検証を行った。なお、実現場における精度検証は、現場条件の制約や時間的制約が大きく、誤差の原因が現場条件に起因するものか、ICT建機自体に起因する物かの切り分けが困難であるため、ICT建機の精度検証実験をテストヤードに於いて実施した。

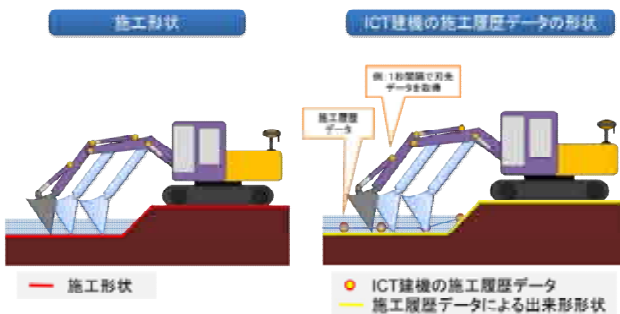


図-1 施工履歴データの精度検証イメージ

(1) 静止状態での計測精度の検証及び結果（静的計測）

a)検証内容

図-2に静止状態での計測精度検証内容を示す。MGバックホウのブーム・アームを最も開いた状態から、最も抱えた状態になるまで、10点の異なる位置でバケットの刃先を静止させ、各静止点で施工履歴データとTSで計測する刃先の三次元座標を記録し、両者の差を確認することにより施工履歴データの静止観測時の精度を評価した。

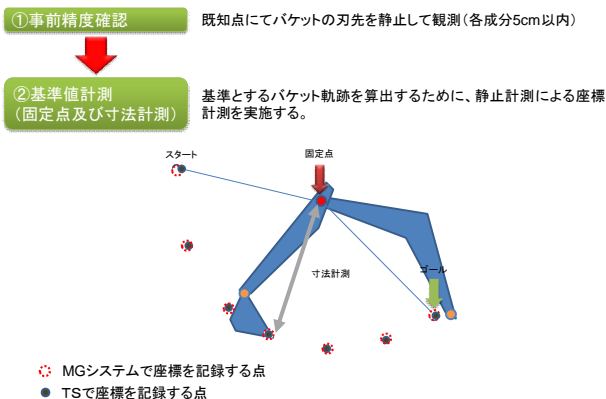


図-2 静止状態での計測精度検証内容

b)検証結果

図-3に静止状態での計測精度の検証結果を示す。静止状態で計測した施工履歴データとTSで計測した真値

との距離誤差は、最大で50mmであった。また、距離誤差の標準偏差は3σで33.6mmであり、ICT土工の出来形管理に適用できる精度の目安（3σ<50mm）¹⁾を満足する結果であるが、x、y座標のばらつきが大きい。

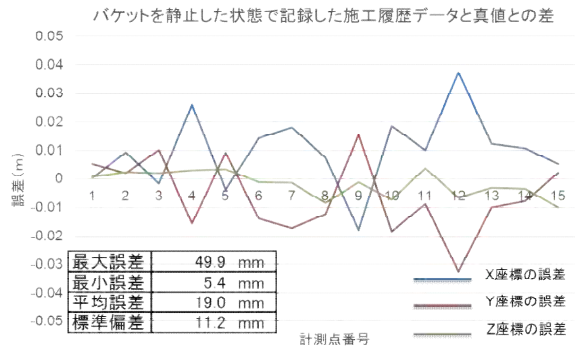


図-3 静止状態での計測精度の検証結果

この検証結果から、施工履歴データを用いた出来形管理に記載する精度管理方法として、以下の2点を記載する必要があると考えられた。

- ・河床掘削の施工を行う日の始業時に、ICTバックホウの刃先の位置をTSで計測し、計測される刃先の位置座標との差異から計測精度を確認することを施工者に課す必要がある。
- ・計測精度の管理値は、x、y、zの各成分について±50mmとする。

(2) 動作状態での計測精度の検証及び結果（動的計測）

a)検証内容

図-4に動作状態での計測精度検証内容を示す。バケット静止状態での精度確認により、3σで50mm程度以下の精度を有することが確認されたが、実現場において出来形管理に用いることを想定しているのは、施工中（バケット動作中）に記録される刃先の位置精度であるから、MGバックホウのバケット動作中の精度をTSの自動追尾計測（以下「自動追尾TS」とする。）との比較により検証した。

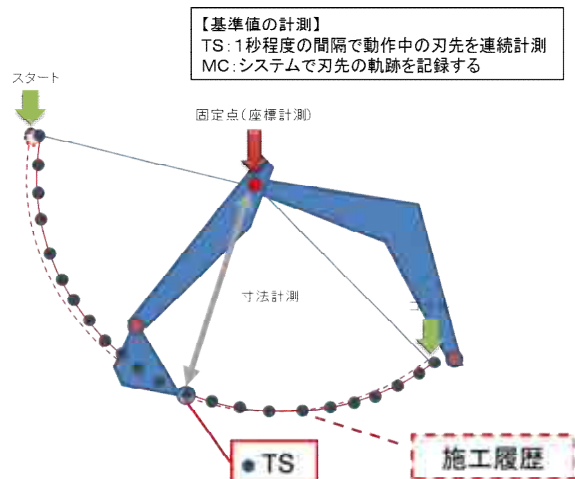


図-4 動作状態での計測精度検証内容

b) 実験手順

図-5に実験手順を示す。実験は既知点にてバケットの刃先を静止観測し、x, y, zの各成分の誤差が5cm以内であることを確認した後、掘削を模した動きでバケットを動作させ、施工履歴データと刃先の自動追尾TSを実施した。実験ケースでは、動作中の施工履歴データの記録頻度を1秒毎、2秒毎、10cm毎、50cm毎の4パターンに変化させると共に、各パターンについてバケット移動速度を高速と低速の2パターンを組み合わせた計8ケースで各ケース3回実施した。自動追尾TSによる刃先の位置計測の頻度は、全てのケースで1秒毎に設定した。なお、高速とはMGバックホウによる整形ではない掘削作業を想定したバケット動作速度で有り、低速とはバックホウによる河床の整形作業を想定したバケット動作速度である。実際の施工では、高速、低速の区別無く施工履歴データが記録されるので、高速でも所要の精度を満足する必要があるため、実験ケースに設定した。

図-6にパターン別の施工履歴データ結果と自動追尾TS結果によるデータ処理手順を示す。精度の評価は、自動追尾TSで計測した刃先の位置座標（1秒毎に計測）を直線で結び、このライン（基準線と呼ぶ）に対する施工履歴データの離れ距離を計測精度として評価した。

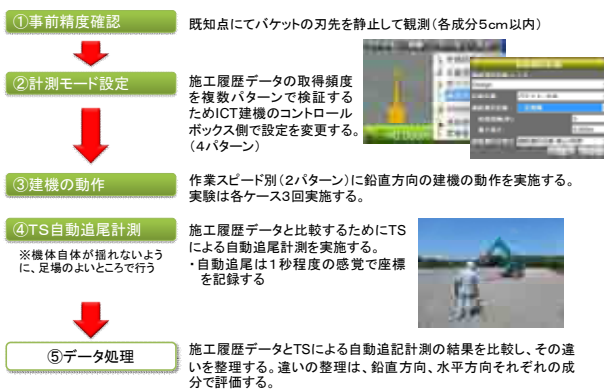


図-5 実験手順

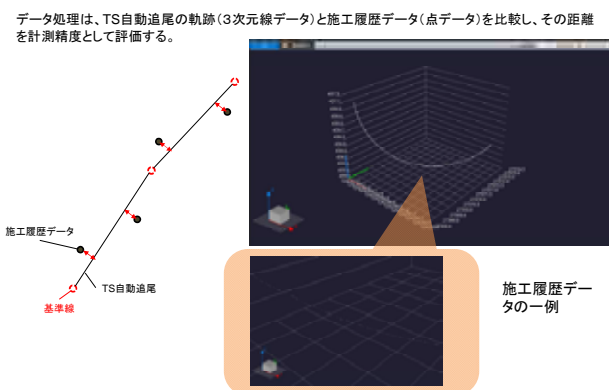


図-6 データ処理手順

c) 検証結果

図-7に動作状態での計測精度の検証結果を示す。MG

バックホウのバケットを動作させている途中の施工履歴データのx, y, z座標と、同時に自動追尾TSで計測した刃先の位置座標との比較を行い、x, y, zの各成分についての差を算出した結果、以下のことが分かった。

- ・施工履歴データの誤差はZ座標で最大でも約50mm程度の誤差で収まっている。
- ・出来形管理で最も重要視されるZ座標については、全体的な傾向としてはx, y成分と比較して誤差が小さい傾向があるため、施工前の精度確認試験により、x, y, z各成分の誤差が50mm以内であることを確認しておけば、Z成分の精度を十分担保出来ることがわかった。

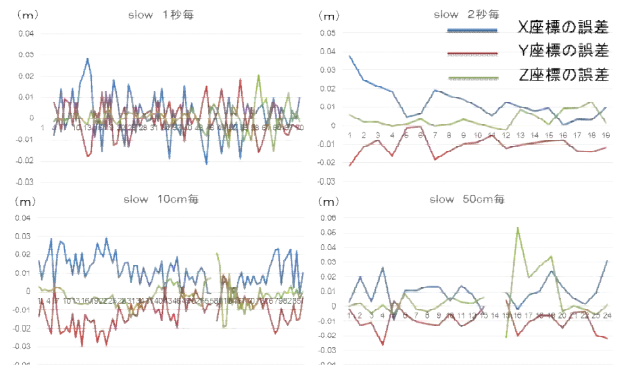


図-7 動作状態での計測精度の検証結果

図-8に高速及び低速でのバケット刃先位置の誤差結果を示す。バケット動作中の施工履歴データと自動追尾TSで計測した真値とを50点比較した結果、施工履歴データと自動追尾TSとの誤差（距離誤差）は施工履歴データの記録頻度やバケット動作の速度によらずほぼ一定で、15mm~20mmの程度である。よって、動的な計測精度はデータの取得頻度の影響を受けにくいと考えられたため、精度担保の観点からは、取得頻度についての規定は不要と考えられた。

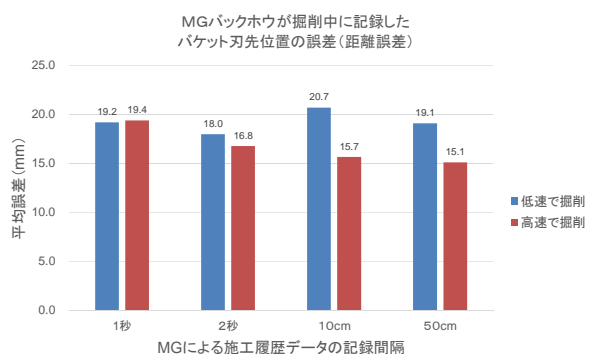


図-8 バケット刃先位置の誤差結果

(3) 整形後の出来形と軌跡データの比較

a) 検証内容

図-9にMGバックホウによる整形後の出来形と軌跡データの比較を示す。施工履歴データの取得間隔の違いによる計測精度の変化を確認するために、作業パターン別の比較検証を実施した。この検証は、施工履歴データと

実際に整形を行った地盤の出来形との比較である点で、前述した(2)の検証とは異なっており、実現場における施工履歴データを用いた出来形管理を想定した精度検証実験となっている。なお、実験手順は基本的に(2b)と同じ手順で行っているが、建機の動作は低速パターンのみで行った。



図-9 整形後出来形と軌跡データの比較イメージ

b) 計測密度についての検証結果

図-10に計測点群密度の検証結果を示す。施工履歴データは、TLS、UAV写真と比較して計測点数が大幅に少なく、出来形評価を行う1m×1mメッシュの個数に対して点が不足しやすい傾向が見られる。面的出来形管理には少なくとも1m²に1点以上の点群密度が必要であるが、10cm刃先が移動する度に1点の頻度で施工履歴データを記録する設定で整形作業を行った場合、施工範囲全面で1m²に1点以上の割合で点が記録されているものの(図-10の赤メッシュが該当)、50cm毎に施工履歴データを記録した場合、1点も記録されていないメッシュ(図-10の黄メッシュ)が見られた。以上の結果より、施工履歴データの記録頻度について、計測精度の観点からは規定を設ける必要は無いが、出来形評価に最低限必要となる点群密度を担保する観点からは、10cmに1点以上の計測頻度に設定するよう規定を設ける必要がある事がわかった。ただし現時点では、MGバックホウのICT建機メーカーによって計測頻度の設定方法が異なり、一定距離毎や一定時間毎、あるメッシュサイズ毎に1点代表点を記録する等、様々な方式があることから、計測頻度に関する管理値を一義的に要領に記載することが困難である。そこで、要領には「1m×1mメッシュに1点以上有効な施工履歴データを記録すること」という規定を設けることが適切であると考えられた。

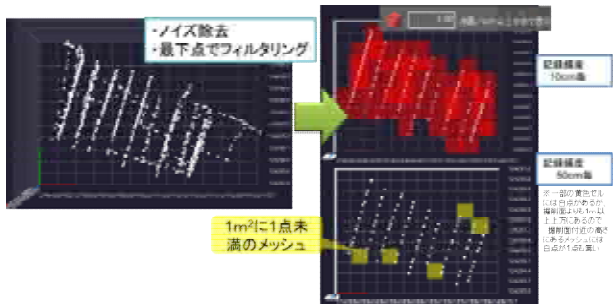


図-10 計測点群密度の検証結果

c) 計測精度についての検証結果

図-11及び表-1にMGバックホウで掘削中に記録した低速モードにおけるバケット刃先位置と出来形の差の平均及び偏差を示す。施工履歴データと出来形との平均誤差(距離誤差)は施工履歴データの記録頻度によらずほぼ一定であり、50~60mm程度であった。またデータのばらつきは、4ケースの平均で $\sigma=22.71\text{mm}$ $3\sigma=68.13=70\text{mm}$ であった。平均誤差(50~60mm程度)は、実験時刻での衛星配置等が原因の誤差であると考えられるため、GNSS衛星の配置などに偏りが無い条件における実際の平均誤差は、GNSSの公称精度 $\pm 30\text{mm}$ 程度になると考えられる。以上の誤差の傾向を踏まえた結果、計測精度全体としては、施工履歴データとTS計測との差が $\pm 100\text{mm}$ 程度になることがわかった。

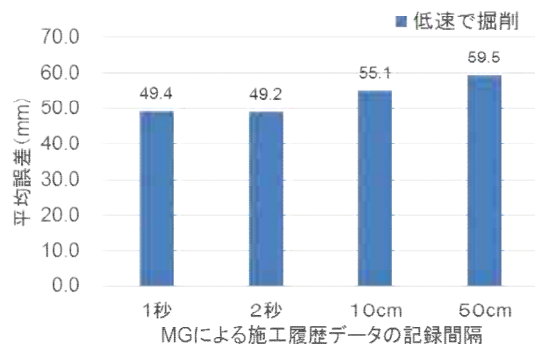


図-11 バケット刃先位置と出来形との差

表-1 バケット刃先位置と出来形との平均及び偏差

		施工履歴記録間隔			
		1秒	2秒	10cm	50cm
低速で掘削	平均(mm)	49.4	49.2	55.1	59.5
	偏差(mm)	19.2	26.5	18.3	26.9

3. バックホウ浚渫船による出来形実態の分析

ICT活用工事の浚渫工(河川)への適用に必要な出来形管理手法や管理基準の整備に向け、2.で実施した精度検証結果により施工履歴データが浚渫工(河川)の出来形値として利用できることが確認できた後、河川浚渫の現場で実際に取得されているレッド測深のTS計測出来形値を真値とし、施工時に取得されたMGバックホウによる施工履歴データとの同一平面上での標高較差を利用して精度検証を行い、出来形実態の分析を行った。

表-2に出来形実態調査を行った近畿地方整備局管内の対象工事を示す。

表-2 出来形実態調査対象工事

工事名	事務所名	年度
戸ノ内地区掘削工事	猪名川河川事務所	2016
熊野川筋筋・鮎田地区上流部河道浚渫工事	紀南河川国道事務所	2017

(1) 施工履歴データを用いた出来形管理の施工精度確認

図-12に出来形実態調査を行った現場での施工履歴データとレッド測深によるTS計測（真値）の標高差を示し、表-3に標高差の平均および標準偏差を示す。近畿管内での現場では、真値よりも施工履歴データの結果が深い（一方向）傾向にある。

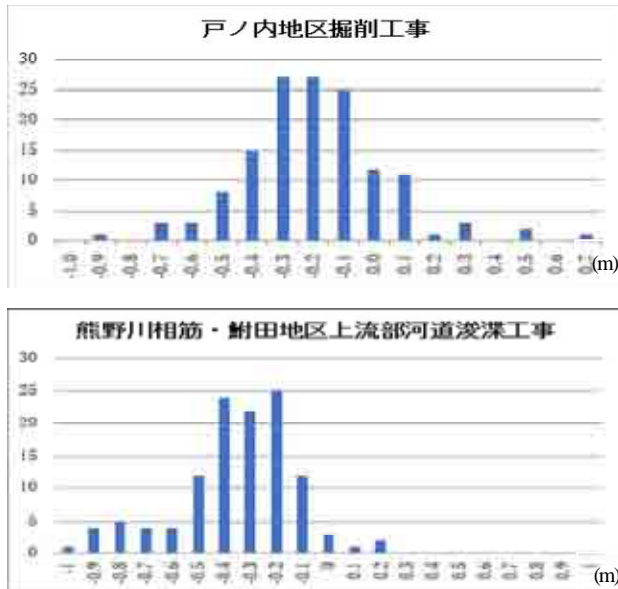


図-12 施工履歴データと真値との標高差

表-3 標高差の平均および標準偏差

工事名	差の平均値	標準偏差
戸ノ内地区掘削工事	-241mm	233mm
熊野川相筋・鮎田地区上流部河道浚渫工事	-296mm	224mm

(2) 施工履歴データと真値との標高差の要因

戸ノ内地区掘削工事及び熊野川相筋・鮎田地区上流部河道浚渫工事のように刃先が真値を下回る誤差の原因としては、以下の点が考えられる。

- ・施工者ヒアリングによるとバックホウのオペレータは、バケットで抱える土量を最大化し、掘削効率をあげるため、はじめの掘削は刃先を設計面より深めに入れて掘削するが、掘削がある程度進むと平たんに仕上げるために、刃先の位置を設計に沿うように動かす傾向がある。この場合、はじめに深く掘削した時点で記録された刃先の履歴データを用いて出来形計上を算出するため、最終仕上がり面よりも深めに出来形が記録されることになる。

- ・刃先と根本のどちらの座標を施工履歴データとして記録しているかにより、施工履歴と出来形との差異が生じる。本現場では、バケットの爪先の履歴を施工履歴データとして記録しているが、掘削の進展により刃先が摩耗するため、徐々に実際の刃先の位置よりも施工履歴データが深く記録される傾向が生じる。

- ・掘削直後に埋まるため、刃先データが深くなる傾向にある。

また近畿地方整備局管外の現場においては、施工履歴データの値が真値よりも浅い結果（+方向）となる現場もあった。その誤差の原因としては、提供データのフィルタリング方法が最下値ではなく平均値としていたため、実際の川底よりも高い位置の履歴データになったと考えられる。

以上の誤差要因を考慮して、施工履歴データを用いた出来形管理をする場合には、日々の刃先位置の精度確認を行うだけでは不十分であり、事前にテスト施工を実施し、施工履歴データから求まる出来形とTS等による出来形の実測値との比較を実施し、その差異を加味して施工を行うとともに、施工履歴データの算出時にテスト施工で確認した差異を反映する必要があると考えられる。

2. 及び 3. の結果により、施工履歴データを用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案）1-2-2 施工履歴データの計測性能及び精度管理及び、精度確認試験実施手順書及び試験結果報告書に反映されている。

4. 面的出来形管理基準の規格値案検討

従来管理と同等となる面的な出来形管理基準および規格値案を検討するため、該当工事の設計面とレッド測深の出来形値の同一平面上での標高較差を利用し出来形実態調査を行った。

(1) 出来形実態調査結果の整理

表-4に表-2の近畿地方整備局管内の工事を含め、浚渫工4現場のデータを合わせて、各現場で適用した出来形管理の規格値を基準とした場合の不良率（上側・下側）を算出した結果を示す。現場1、現場2は基準高の規格値が+200mm、現場3、現場4については規格値が0mmなので、従来規格値を参考に200mm下がり（仮に設計値とした場合の設計値からの離れを合わせて括弧書きで表記している。いずれの工事も、従来手法としては検査に合格している。

表-4 不良率一覧

現場	現場名	平均	標準偏差	最大値	最小値	母数	不良	不良	不良率 (%)	不良率	不良率
							個数 (上)	個数 (下)		(上) (%)	(下) (%)
1	戸ノ内地区	-0.294	0.233	0.265	-1.402	139	1	0	0.7	0.7	0.0
2	熊野川	-0.125	0.125	0.300	-0.390	140	3	0	2.1	2.1	0.0
3	現場3	-0.594 (-0.394)	0.189	0.662 (0.862)	-0.953	214	3	0	1.4	1.4	0.0
4	現場4	-0.421 (-0.221)	0.095	0.172 (0.372)	-0.642	278	2	0	0.7	0.7	0.0
	全データ	-0.385 (-0.265)	0.237	0.662 (0.862)	-1.402	771	9	0	1.2	1.2	0.0

(2) 調査結果の評価と方針と規格値（案）の検討

表-5及び図-13に不良率を許容した正規分布のパラメータと規格値（案）の検討結果を示す。表-4の結果から、上限規格値においては設計値もしくはバラツキ調査結果の平均値を中心として、現状のバラツキ調査から割り出した不良率を踏まえた正規分布について、ICT土工の規格値と同じ0.3%を棄却してよい上限値として設定した値に、計測精度を加えた値で規格値を検討した。なお、余掘りを前提としており、下限値は設けず、平均値規格は設計値である±0mm以下とした。

結果、全数の面的管理となる規格値の上限としては、+302mmとなった。施工履歴データを用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案）では、+302mmに加え、施工精度±100mmを加えた+400mmが個々の規格値として設定されている。

表-5 不良率を許容した規格値（案）

4現場	①規格値 (mm)	②平均値 (mm) 【現場実 態の値】	③規格値の範囲外 となる割合P% (上限/下限)別 【現場実態の値】	③ k _p	④標準偏 差 σ _p (mm) 【①- ②+σ _p 】	全数管理 の上限値案 ②+2.75σ _p (mm)
(案) 平均値を 現場実態 で設定	200	-265	1.2 (1.2/0)	2.257	206	302

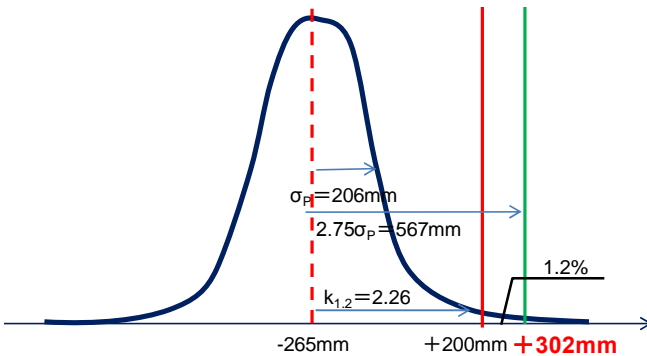


図-13 不良率を許容した正規分布のパラメータと規格値案

5. おわりに

ICT浚渫工（河川）適用にあたり、バックホウ浚渫船による面的な施工管理基準の適用を図る方法の一つに、MGバックホウによる施工履歴データの活用に着目した。結果、施工履歴データを用いた出来形管理要領（河川浚渫工事編）（案）において、施工履歴データの計測性能、精度管理、精度確認試験実施手順書及び試験結果報告書に反映され、出来形管理の規格値（案）においても提案することができた。現場数の少ない中で施工管理基準を検討していることから、今後はフォローアップを行った上で、逐次見直しを行い、カイゼンを行っていくことが必要と考える。

謝辞：猪名川河川事務所及び紀南河川国道事務所につきましては、貴重な現場及びデータ提供いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 近藤弘嗣，長山真一，藤島崇，石田大輔，服部達也，池田広貴：i-Construction で適用する土工出来形の面管理に関わる基準類の検討，第 16 回建設ロボットシンポジウム論文集，2016

ダム放流設備関連補修工事の 水中ROVによる無人化施工

小林 大輔¹

¹独立行政法人水資源機構 関西・吉野川支社淀川本部中津川管理室

(〒554-0001大阪府大阪市此花区高見1-10-46)

ダム放流設備には点検整備時に上流で止水するための予備ゲート（修理用ゲート）を備えており、貯水池に面する充水管から水を取り入れ水圧バランスにより開操作が行える仕組みとなっている。この充水管補修時には止水する設備は無く、専用の蓋を製作し潜水作業にて設置することが行われてきた。

このたび水資源機構と佐藤鉄工（株）は充水管補修時の止水工程を水中ROV（Remotely operated vehicle：遠隔操作無人機）を用いて無人化施工する工法の特許を得たことから、概要を説明するとともに、試験で確認された実用性、課題等について報告するものである。

キーワード 無人化施工，水中ROV，コスト縮減，安全性向上

1. はじめに

ダム放流設備の充水管は原則としてステンレス鋼管であるが、1980年代以前には配管用炭素鋼鋼管等が使用されていた。充水管は一般的にコンクリートに埋設され、充水操作を行うためのバルブ付近で露出配管となり、腐食による漏水等の補修が必要である。また、充水バルブはステンレス鋳鋼製であっても、バルブ本来の機能低下により定期的な交換が必要である。

配管やバルブの整備作業は対象箇所上流部で止水を行わなければ施工できない施設となっている。上流部が埋設配管である場合は、潜水士による充水管呑口への止水蓋設置が採用されている。設置位置が水深40mを超える場合は貯水池の水位低下や混合ガス潜水（作業状況によっては飽和潜水）を行うなど、小規模な整備内容に対して、貯水池管理への多大な影響や多くの費用が発生する。また、高水深の潜水作業に関しては非常に危険が伴うものであり、近年の担い手人口の減少により高水深潜水を行える作業者も少ない。このような背景から、水中ROVを利用した無人化施工を開発したものである。

2. 充水管の構造

(1) 呑口部

充水管の呑口部は通常ダム本体貯水池面の対象放流管

呑口付近に設置されており、ダム本体貯水池面に平行する面に設置されているものが多いが、予備ゲート戸当り重構造部を利用して直角面に設置されているものや、ダム本体面より張り出して設置されているものなど、ダムにより異なる。また、コンクリート表面の状況により凹凸が多いダムや充水管設置面の平面部が狭いダムなど、設置面形状・コンクリート形状・コンクリート状態がダムにより異なっている。

(2) 充水バルブ部

呑口部以降の充水配管はダム本体に埋設され、充水バルブ付近で監査廊内に露出する。露出部には主・副充水バルブ等があり、腐食等による漏水は露出部で顕著に現れる。また、漏水は無くても露出部を構成する機器類は交換等の整備が必要となる。

充水バルブ含む充水配管レイアウトを図-1に示す。

3. 充水管の整備

充水管の整備は必ず必要となり、その際にはダム運用に影響を与えない最適な工法を選択しなければならない。

(1) 呑口止水蓋設置

充水管呑口部には異物混入を避ける目的でスクリーンを設けるものとなっている。このため呑口部全体を覆う

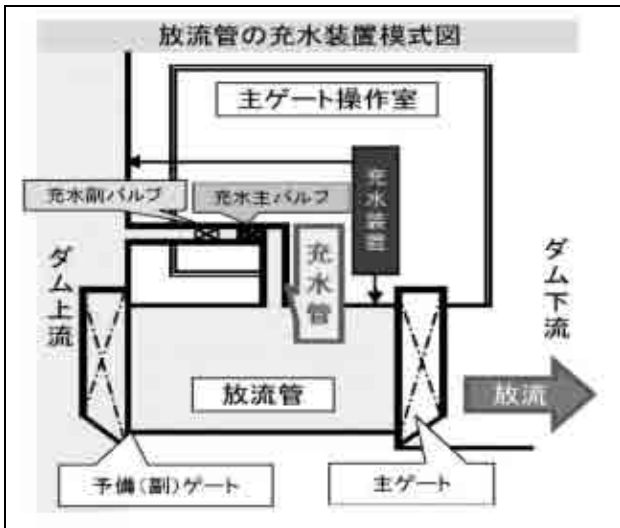


図-1 充水配管レイアウト

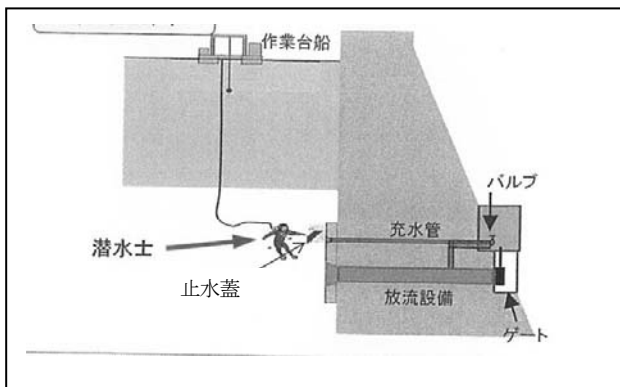


図-2 止水蓋設置イメージ

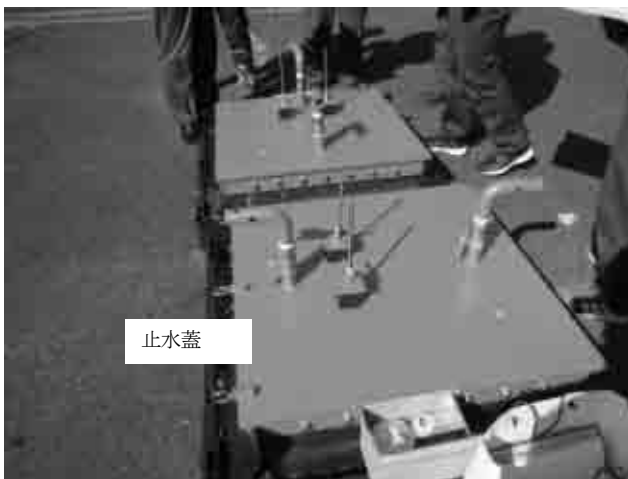


図-3 止水蓋の事例

形で止水蓋を設置する。止水蓋は各ダムの充水管呑口形

状に合わせて製作し、潜水士が設置・撤去を行う工法である。

潜水士による止水蓋設置イメージを図-2、止水蓋の事例を図-3に示す。

(2) 凍結工法

充水管整備対象部分の上流側において、液体窒素を用いて管内の水を凍結させ止水する工法である。配管の材質、被覆、塗装状況あるいは配管径により採用が出来ない場合がある。

(3) 水位低下

水位低下により充水管内を空虚にして施工する工法。最も安全かつ確実な工法であるが、ダム運用上最も困難な工法である。

4. 水中ROVに求められる機能

充水管止水工法の中でも、ダム運用に支障を与えず、配管形状・材質に左右されない呑口止水蓋設置に着目し、安全を考慮して、潜水士に依存しない無人化施工を実現するための工法である。実現にあたっては次の課題をクリアする必要がある。

- ・コンクリート凹凸面に対する止水機構
- ・水中ROVと止水蓋の着脱機構
- ・充水管への注水機構
- ・水中ROVの操作性

(1) 機器構成(日吉ダム試験時最終形)

メインとなる水中ROVは発電所の水路点検用に開発されたものを採用した。水深100m程度まで潜行可能。止水蓋は様々な充水管呑口に対応出来るように内径φ800mmのお椀形をしており、止水ゴムは柔軟性の高いものを採用。止水蓋設置後充水管内を排水することでダム貯水位による水圧を利用してコンクリート面に止水する。

水中ROVと止水蓋の着脱機構は電磁石を用い3点で接続している。

注水機構はニードル弁をパワーシリンダで操作し高圧下での確実な注水を可能としている。

水中ROVは横行、推進、垂直方向にスラスターを設置している。水中における姿勢制御については3方向のスラスターと本体付属の姿勢制御装置(錘駆動方式)のみで事足りるが、先端に止水蓋が設置されることによりバランスがとりづらくなるためフロートによる調整を施している。なお、止水蓋は水深により止水ゴム圧縮変形による体積変化が生じ浮力が変化する。

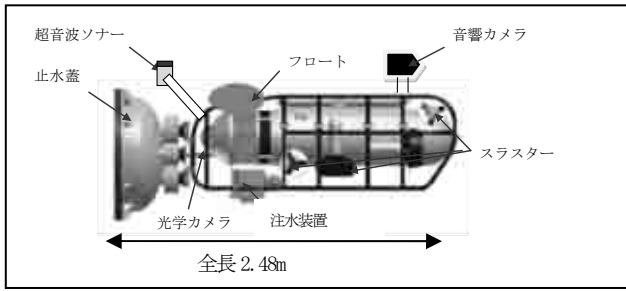


図-4 ROV機器構成図



図-5 陸上の機器構成図

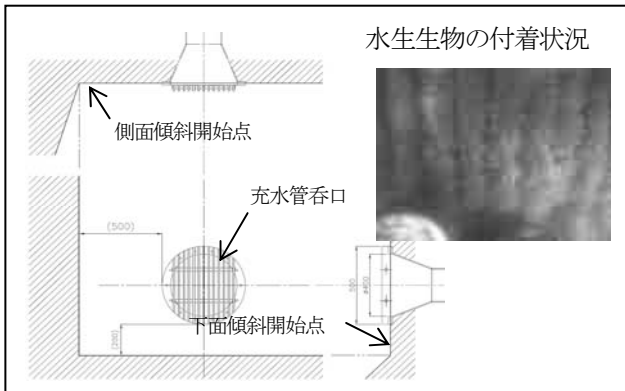


図-6 高山ダム充水管状況図

水中ROV操作に必要な視界は光学カメラを利用しているが、水深に応じて光が遮られ視界が悪くなることからライトは勿論のこと、超音波ソナー（位置把握）、音響カメラ（形状把握）を併用することにより、光学カメラの視界を補っている。

水中ROVの機器構成を図-4、陸上の機器構成を図-5に示す。

5. 実用化に向けた実証試験

(1) 高山ダムの試験

試験期間：平成28年8月8日～8月10日（全日晴天）

試験水深：9.5m

濁度：3.7～4.0（水深9.5m付近）

現地における最初の試験となるため潜水士によるROV監視を併用した。初日はROVの潜行・浮上のみ。翌日より充水管呑口へのアプローチ、止水蓋と呑口外周コンクリートへの接着まで行い、最終日に設置、抜水、切り離し、水密確認、撤去まで実施した。

初日の潜行で充水管呑口スクリーンに水生生物が多く付着していることが分かった。高山ダムの充水管呑口周辺はコンクリート構造が複雑なため、止水蓋の外径から中心を30cmずらして設置する必要があったが、水生生物により中心が判別しづらい状況であった。図-6参照。また、当日の濁度状況・水面の水草により水深6m付近より視界が0mとなり、ライト点灯で1mの視界が確保出来た。

2日目以降の試験ではライトを増設し視界の確保に努めた。また、水生生物等による止水蓋水密阻害状況を確認するために潜水士による確認を併用した。設置に関して潜水士による介助は無く止水出来ることが確認できた。

(2) 高山ダムの結果・考察

ROVに標準装備されているライトのみでは、止水蓋装着状態で前方が遮蔽されること及び止水蓋設置時にライト拡散の距離がとれず止水状況が判断出来ないことからライトの複数設置が望ましい事が分かった。

止水蓋の水密性能は傾斜面にかかっても十分止水でき、高山ダムでの水深9.5mと比較的浅い水深かつ、水生生物付着が確認されていても漏水が0.3ml/minとジェットフローゲート等設置時の施工管理基準を大きく下回る水密性能を確認できた。

止水蓋の着脱機能は問題無く機能したが、潜行中の接触により止水蓋がROV本体から離脱する不具合が発生した。これについては電磁石の強化により対応可能である。

止水蓋の比重は水深5m付近より沈む方向へ変化する。これによりROV本体の姿勢制御は深くなるにつれ難しくなるため、設置水深により浮力調整が必要なが分かった。

カメラは通常の光学カメラ1台で目標を捕捉出来るが、周辺状況を把握するためにも複数設置する方が、潜行中での接触回避、目標までのアクセス時間短縮につながることを実感した。

これらの問題点を踏まえて日吉ダム実証試験に望んだ。

(3) 日吉ダムの試験

試験期間：平成28年11月29日～12月2日（曇時々雨、晴）

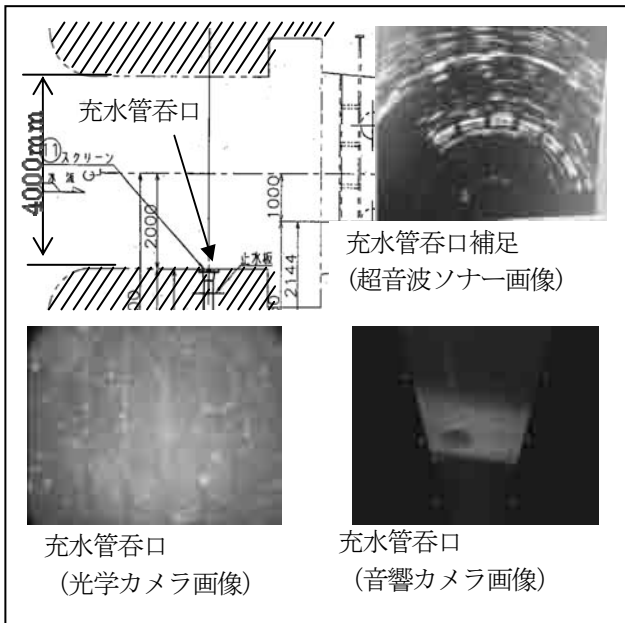


図-7 日吉ダム充水管状況図

試験水深：23.7m

濁度：3.8～4.6（水深23.7m付近）

日吉ダムの試験では音響カメラ、超音波ソナーを追加した。

日吉ダムの充水管呑口は常用洪水吐設備予備ゲートの戸当り重構造部上流面側部に設置されており、堤体に対して直角方向に面している。試験する水深が高山ダムと比較して深くなることから、充水管呑口へのアクセスは難しくなる。音響カメラを設置することにより、水中の濁度や明るさに関係無く周辺状況を可視化できるため、スムーズに呑口までROVを誘導することが出来た。

止水蓋の比重変化については、水上においてフロート調整することによりROV本来のトリム調整で姿勢制御が可能となり、予備ゲート前面4mの間でもROV本体

全長 2.48m が上手く入り込み姿勢を崩すことなく止水蓋設置に至った。止水直後の漏水は 220ml/min と高山ダム 0.3ml/min に比べて格段に増加したが、約 2 時間後には漏水が確認できない程度まで止水されていた。

(4) 日吉ダムの結果・考察

音響カメラと光学カメラの組み合わせは、視界が悪い状況でもROV操作が良好であることを確認した。周辺構造物との距離把握のため超音波ソナーを取り付けたが、音波の跳ね返り時間の関係から音響カメラ及び光学カメラと時間差が生じて操作に影響を与えることが判明した。音響カメラ画像が距離感を表現できることから、音響カメラと光学カメラの組み合わせで十分操作可能であることが分かった。なお、止水蓋離脱時に噴出する空気だま

りの影響を受け光学カメラでは視界0の状況でも音響カメラは周辺構造物を捉えることが出来たことから、音響カメラの有効性は高いと言える。

ROV本体の姿勢制御でフロート調整することにより、トリム調整機能で止水蓋浮力変化に対応することが出来た。

カメラ及びライトがROV本体に付属する機器により遮蔽される角度が存在するため、取り付け位置を考慮する必要があるとともに、接触による障害を軽減するためカバー等で補強するなどの工夫が必要である。

6. 実用にあたって

発電所の水路点検用ROVを利用した止水蓋設置・撤去の無人化施工は、実証試験において一連の作業を実施出来ることが確認出来た。ただし、若干の課題を残したことから、ROVの仕様は下記のように整理する改良を検討している。

- ・ROVの小型化（新規製作可能な場合）
- ・推進スラスタの強化（新規製作可能な場合）
- ・電磁石接続確認用カメラ増設
- ・止水蓋用ライト増設
- ・脱落防止兼用の個別電源コード付属
- ・音響カメラ標準装備
- ・電磁石強化（1000N→2000N）
- ・姿勢制御機能拡大（新規製作可能な場合）

(1) 採用の利点

水中ROVによる施工は安全性重視の工法であり、浅い水深では潜水士施工に比べ高く設定されている。費用の多くは水中ROVの損料となるが、稼働率により変動するため現状では仕方がないと言える。

実証試験の結果より、仮設規模が小さい、作業時間の短縮の利点が見られた。これらを工事全体で捉えた場合、仮設ヤードが確保出来ない工事や仮設輸送に関する申請期間が取れない状況などに採用することが考えられる。

7. おわりに

現状では水中ROVによる無人化施工の実績が無いので、実績づくりと設備の稼働率を上げることによるコスト低減が当面の課題である。まずは、水中ROVによる施工を重ねて、有用性を知らしめることが重要と考えている。今回は試験報告となったが、近い将来に施工実績の報告となるようこのような発表を重ねて周知して行きたい。

老朽化した道路照明柱の補強工法について

上野 祐生¹・加納 寛²

¹大阪府 八尾土木事務所 維持保全課 (〒581-0005大阪府八尾市荘内町2-1-36)

²株式会社 アーバンパイオニア設計 設計部 (〒530-0053大阪府大阪市北区末広町3-3) .

都市基盤施設に対して施設の長寿命化や更新時期の平準化等の要請がある中、老朽化した道路照明柱も同様の課題を有するとともに、場所によっては倒壊等による道路利用者への重大な被害に繋がる危険性の払拭等が喫緊の課題となっている。

大阪府八尾土木事務所では、管理する3000本近い道路照明柱の維持・更新に取り組むにあたり、損傷した柱の補強は長寿命化、更新時期の平準化にも繋がるとの観点から現場条件を考慮し、より実務的な補強方法として「内部充填工法」の実用化に努めており、「現場条件に合致した補強体構造の検討」「実証実験による有効性の確認」などの補強に係る取組み内容を報告する。

キーワード 維持管理、補修・補強、更新の平準化、実証実験、道路照明柱

1. 経緯

(1) 道路照明柱に係る障害の発生と対応

大阪府八尾土木事務所管内で発生した障害とその後の対応は以下の通りである。

- ◆2013年4月：一般国道170号の石切跨道橋及び志岐跨線橋の橋梁添架照明柱が倒壊。(写真-1、2)
- ◆2013年8月：道路照明柱の緊急点検を実施。
- ◆2013年～：腐食及び穴等が確認された道路照明柱を撤去、順次更新を実施。
- ◆2017年2月：他土木事務所管内で転倒事案発生。
- ◆2017年3月：一斉点検を実施。道路照明柱270本を更新予定。

(2) 道路照明柱の補強に係る取組みの概要

道路照明柱の補強については、2015年度～2017年度の3年間で「補強体構造の検討」「実証実験による有効性の確認」を行い、補強方法「内部充填工法」の実用化に向けて検討を行った。

- ◆2015年度：補強方法及び補強体構造について検討。
- ◆2016年度：2015年度検討の補強体について実証実験を実施し有効性を確認。
- ◆2017年度：施工が困難な事例にも対応する更に合理的な補強体構造を再検討し、実証実験で補強効果を確認。



写真-1 石切跨道橋



写真-2 志岐跨線橋

2. 補修・補強工法の検討

大阪府が管理する道路照明柱を対象に、外傷や風化、経年劣化等により発生したと見込まれる孔や錆によるポールの肉厚減少などが認められる柱の補強に関する最適な補修・補強工法について、以下の要領で検討を行っている。

- ◆既存の補修工法に加えて、NETIS に登録されている新工法や、国及び他の地方自治体、阪神高速やネクスコ等での補修工事例、工事会社及びメーカー等からのヒヤリング情報等の調査を通して、道路照明柱の破損状況と補修工事例に関する情報を収集する。
- ◆既存の補修工法から選定した4案に、独自案1案と建替え案を加えた計6案を比較検討することにより、独自案として提案した「内部充填工法（鉄筋+超高強度無収縮モルタル充填工法）」を最適な補修・補強工法として選定している。

表-1 補修・補強工法検討結果（まとめ）

工法名称	工法区分	総括	工事費+維持費
鉄筋+超高強度無収縮モルタル充填工法 (独自工法)	性能回復工法	・充填工法 ・補修工法としての実績は無いが、特殊な材料や工事機械を必要としない工法のため、緊急対応に優れている。	¥90千円 (0.23)
アラミド繊維ロッド補強工法		・充填工法 ・特殊な材料を使用するが、工事機械を必要としない工法である。	¥170千円 (0.43)
P I - A R工法			¥120千円 (0.30)
マスチックテープ工法	劣化抑制工法	・被覆工法 ・部材の補強効果は期待できないが、部材の外側に発生する錆の進行を止めることが可能であり、安価な工法である。	¥70千円 (0.18)
ウルトラパッチ工法			¥100千円 (0.25)
建替え	—	・工事を行う条件が整っている場合は、今後の維持管理費用を考慮すると有力な工法である。	¥400千円 (1.00)

ちなみに、最適案とした独自工法「内部充填工法（鉄筋+超高強度無収縮モルタル充填工法）」は損傷発生が多い「地際部」の補強に資するものであり、①一部事前に組み立てた鉄筋類を照明柱内部で挿入・組立て、②超高強度無収縮モルタルを注入・硬化で補強体が完成する。

また、この充填工法の特長は、「特殊な材料を使用しない」「特殊な工作機械を使用しない」「箇所当たり数量が極小のため現場での人力施工が可能である」といった点であり、建替え工事を行うための条件が整っていない場合の延命化補修・補強工法として位置づけている。

なお、補強鉄筋量に関しては、最大瞬間風速 60m/秒を受けた場合に地際に発生する曲げモーメントに対して許容応力度法により D22-4 本を決定した。

3. 2016年実証実験

(1) 2016 年度実験概要

2016 年度に実施した実証実験は、2015 年度に検討した「内部充填工法」に関して大学包括連携協定に基づく技術相談を行う中で実証実験の必要性が提起され取組むこととなったものである。

ちなみに、実証実験の意図は①モデル等での取扱い（解析等）が困難な特異な状況（一部が破断した鞘管構造）に関するものであること、②補強効果の経年変化に関する実証データの必要性が提起されたことである。

また、これらの課題に対応するため、学識者と連携して実験方法の立案、供試体の監修、実証実験及び実験結果の評価に取り組んだ。

(2) 主な供試体材料

a) 照明用テーパーポール

①対象とするポール形式

- ・土中式
- ・ベースプレート式

②使用するポールの仕様

照明用テーパーポール（平蓋タイプ）
（鋼製：裸仕様）JIL1001 規格品（8-18）

③ポールの長さ

- ・土中式 L=2.85m
- ・ベースプレート式 L=2.55m
（ベースプレート厚含む）

④切欠（腐食疑似）全供試体共通

位置：地際-40mm の箇所
規模：円周の 1/2、幅 1.3mm 程度

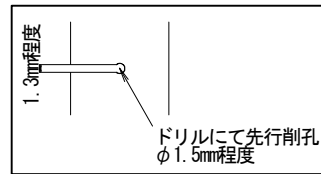


図-1 切断部概要図

b) 無収縮モルタル（超高強度型）

太平洋マテリアル プレューロックス UHS
設計基準強度 100N/mm2

c) 鉄筋

D22-4 本 (SD345)

(3) 実験ケース

実験ケースは補強体の経年劣化による補強効果の変化を確認する観点からの供試体を含め、7 供試体を準備し、2016 年度の実験では表-2 の 5 ケースを実施している。

表-2 実験ケース～2016年度～

供試体区分	No.	初回実験 2016 年度	経年劣化実験 1 (5 年後)	経年劣化実験 2 (10 年後)
1) 土中式 (充填補強有)	I	○		
	II	○	→ (初回実験を流用)	○ (5 年後を流用)
	III		○	→ (5 年後を流用)
2) ベースプレート式 (充填補強有)	IV	○		
	V	○	→ (初回実験を流用)	○ (5 年後を流用)
	VI		○	→ (5 年後を流用)
3) ベースプレート式 (充填補強無)	VII	○		

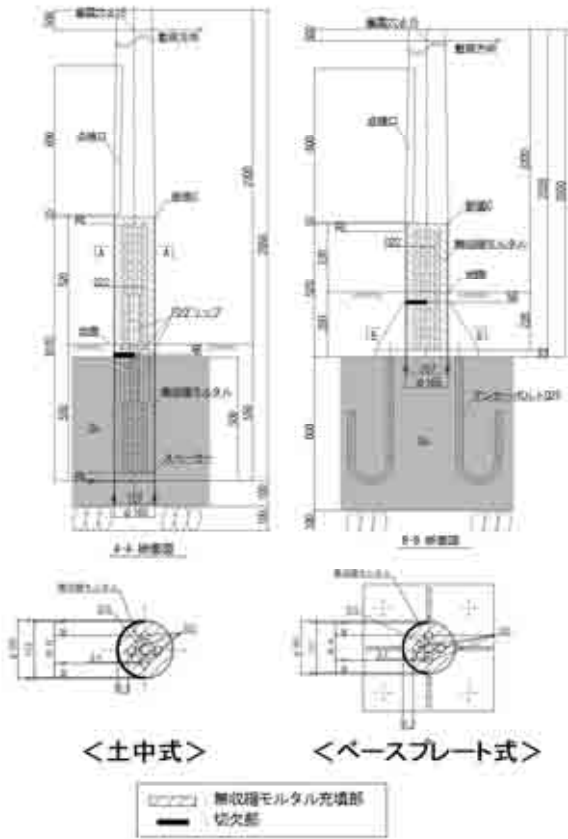


図-2 供試体補強部詳細図～2016年度～

(4) 実験方法

a) 載荷荷重

①設計荷重

照明柱側面部に風荷重 (最大瞬間風速 60m/秒) を受けた場合に地際部に発生する曲げモーメント 10.089kN と同等のモーメントを生起させる集中荷重 5.605kN を地際部から 1.8m の位置に載荷している。

②最大荷重

切欠部断面でも RC とポール (切欠) は抵抗し合っているが、RC とポールが一体化構造を持たない当該箇所のような場合の計算手法は確立されていない。そこで、補強部直上の無補強部が降伏に達する荷重 13.659kN を最大荷重とみなすこととした。

ちなみに、この荷重は切欠部の RC とポールそれぞれ個別に算出した降伏荷重及び終局荷重より大きな値である。また、本荷重を載荷した際、仮に切欠部が降伏しなければ無補強部が降伏することになる。

b) 実験設備

実験設備については、写真-3 のようにコンクリート基礎に反力を受ける支柱と供試体を固定し、載荷位置に載荷装置を取り付けている。



写真-3 実験風景～2016年度～

(5) 2016 年度実験結果

◆供試体別の変位及びひずみの様相は以下の通りである。

- ・ VII (BP-補強無-最大) の供試体は、載荷荷重が設計荷重 (風速 60m/s 相当) に達する前に鋼管のひずみが許容ひずみを超過し、その後降伏ひずみを超え変位も増大した。
- ・ 補強を実施した土中式の供試体 (I, II) は、設計荷重載荷過程にコンクリートの剥離によると思われる変位急増と剛性低下はみられたが、鋼管の降伏による変位の急増はなく大きな変形は発生していない。
- ・ ベースプレート式の供試体 (IV, V) の変位及びひずみは土中式に比べ増大している。これは土中式に比べ切欠部より上の補強長が短いことによる影響やベースプレートの変形により変位が増大したものと思われる。

◆安全性に関しては、補強を実施した供試体 (I, II, IV, V) においては GL+3.8m 位置 (建築限界) に換算した変位はベースプレート幅内に収まって

おり、照明柱が通行の障害になるような損傷は起きていない。

- ◆補強の耐久性に関しては、補強材料が鉄筋コンクリートであるため耐久性についての問題はないと思われるが、照明柱本体の劣化の進行により補強の耐久性能に影響が出ることも考えられるため、補強構造物の変状や柱の傾きの確認に加え、5年後、10年後の実験結果により耐久性の確認を行う必要がある。

表-3 実験結果一覧表～2016年度～

実験ケース	ケース1	ケース2	ケース3
	土中式 D22・4本	BP式 D22・4本	BP式 補強筋
平面図			
設計荷重(kN)	5.6	5.6	4.07
設計荷重時応力 (N/mm ²)	12.4	12.3	10.5
設計荷重時ひずみ (mm)	24.4	20.0	151.2
許容応力	規定	OK	OK
耐力	規定	OK	OK
実測荷重	3.5	3.6	2.4
実測ひずみ	2.2	2.2	0.3
安全率	OK	OK	OK
試験体番号	I	II	IV

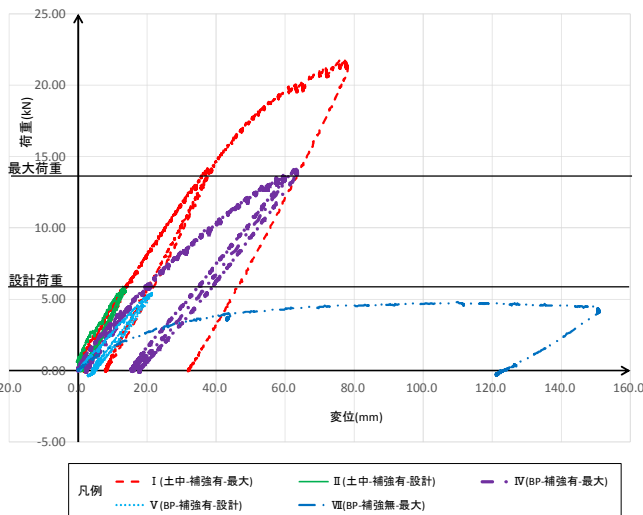


図-3 荷重変位図～2016年度～

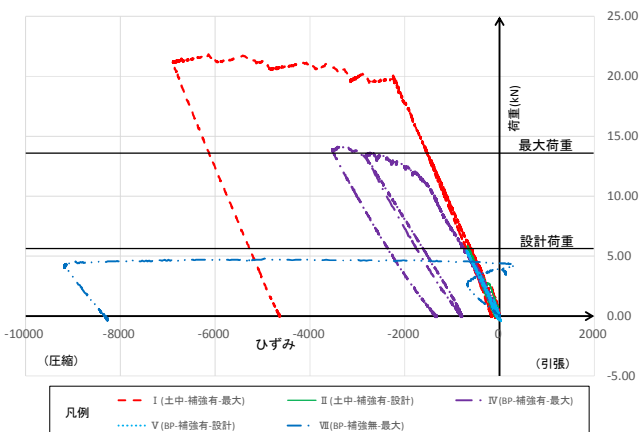


図-4 荷重ひずみ図～2016年度～

4. 2017年度実証実験

(1) 2017年度実験概要

2017年度の実証実験は、補修・補強対策に係る施工上の問題点及び想定する安全性能に対して大きな余裕を有していた2016年度の実験結果をふまえ、更なる現場条件に則した合理的な補強方法を検討するという課題への対応のもと、地下配線等の原因により補強鉄筋が挿入できないという所定の補強が困難な場合(写真-4)の施工を対象に、無収縮モルタル(超高強度型)を充填する補強工法に関してできるだけ有効な方法を見出すことを目的とした。



写真-4 施工困難事例

(2) 補強体構造設計の考え方と適用する安全係数

2016年度と2017年度では補強体の構造に関する設計方法の呼び方は異なっているが、考え方に変更はない。相違点は適用する安全係数の取扱いであり、対比したものが表-4である。

2017年度の設計方法とした「限界状態設計法」は「2017年(平成29年)道路橋示方書」においても取り入れられており、安全率を要因ごとに細分して設定することで状況に応じた運用が可能となる点に鑑みられたものである。またこれは、例えば更新までの一時的な対策を実施する場合にも採用が可能と位置づけた。

また、安全係数は「コンクリート標準示方書2012年制定」(設計編・解説 表4.5.1、表4.5.2)を参考に表-5のように設定している。すなわち、この設定は断面破壊に対して安全係数が最も小さい場合となり、恒久的というより一時的という印象となる設定である。

表-4 補強体構造に関する設計及び照査方法の比較
～年度別～

年度	2016年度	2017年度
設計方法	許容応力度設計法	限界状態設計法
設計方法に関する根拠示方書	H24 道路橋示方書	「コンクリート標準示方書 2012 年制定」
荷重に対する安全性等の照査方法	(外力) (抵抗力) $F < R \times (1/\text{安全率})$	
	安全率 (≥1.0) を一括して設定 (一意的) = 状況に応じた適用は不可	安全率を要因 (材料、部材、作用、構造解析、構造物) ごとに細分して設定 = 状況に対応した適用が可能
想定する設計条件	供用期間中の安全性等を考慮した状態への対応が基本	材料強度及び作用の特性値に対して材料、部材、作用、構造解析、構造物に係る安全係数を設定

表-5 補強体構造検討で使用する安全係数
～安全性 (断面破壊)～

安全係数	標準値	設定値	設定理由
材料係数・コンクリート	1.3	1.3	
材料係数・鋼材	1.0 または 1.05	1.0	使用鋼材が鉄筋の場合は 1.0
部材係数	1.1~1.3	1.1	補強体が限界状態に達した場合においても、照明柱 (鋼管) の効果も期待できるため
構造解析係数	1.0	1.0	
作用係数	1.0~1.2	1.0	作用荷重は照明柱の設計における風荷重として基準により規定されているため
構造物係数	1.0~1.2	1.0	照明柱の重要度、限界に達した時の社会的影響は小さいと考えられるため
<参考> 安全係数の総積	1.43~2.43	1.43	—

(3) 供試体材料及び実験方法

実験材料に関しては2016年度実験と同様の材料を使用している (挿入する鉄筋の径及び配置は変更)。また、補強方法及び実験方法についても2016年度を踏襲している。

(4) 実験ケース

実験ケースは表-6の通りであり、2本配置の供試体については切欠に対して鉄筋の配置方向を変えた2ケースを行っている。

表-6 実験ケース～2017年度～

ケース	使用鉄筋	形式	鉄筋配筋
ケース1	D38・1本	土中式	中心配置
ケース2	D25・2本	土中式	引張方向に対して鉄筋を平行配置
ケース3			引張方向に対して鉄筋を直交配置
ケース4		ベースプレート式	引張方向に対して鉄筋を平行配置
ケース5			引張方向に対して鉄筋を直交配置

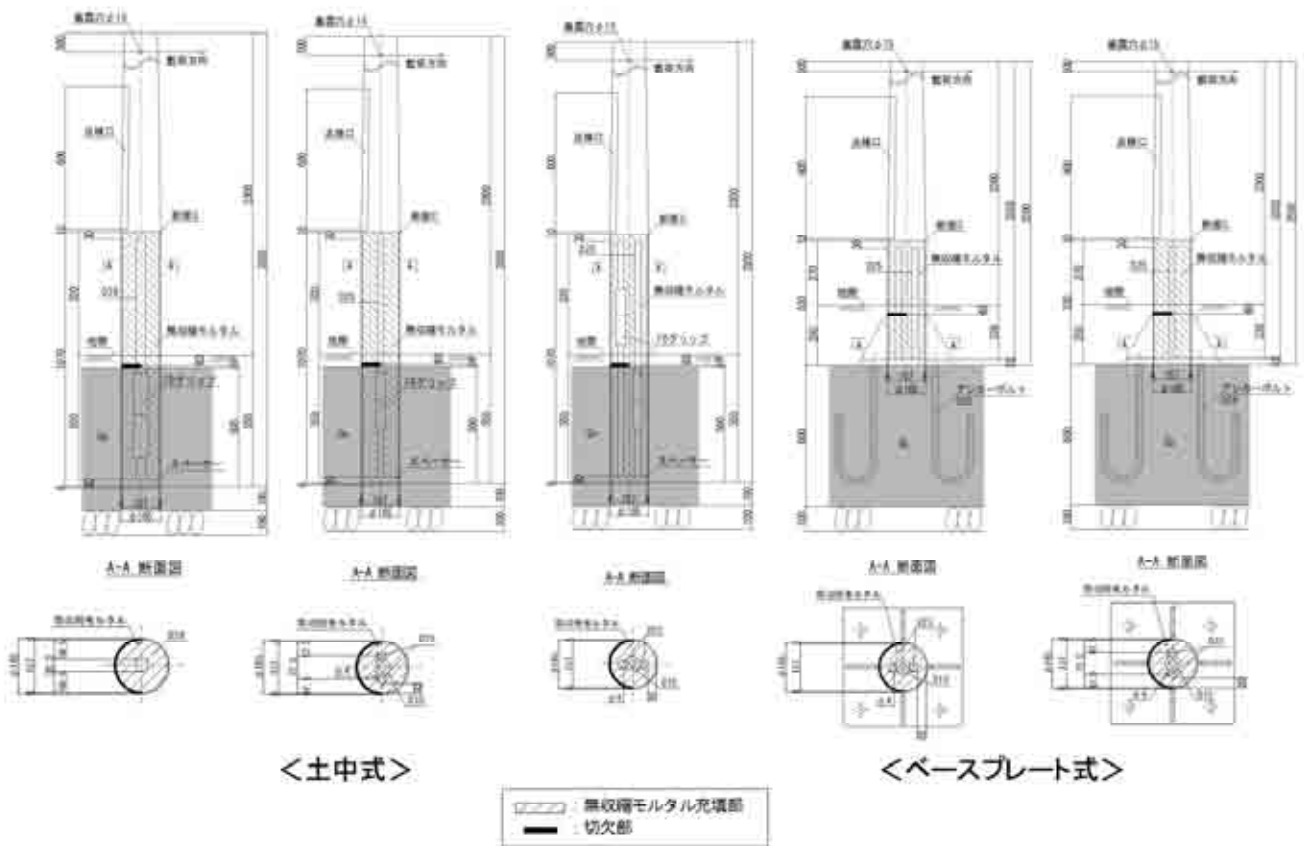


図-5 供試体補強部詳細図～2017年度～

(5) 2017 年度実験結果

a) 変形に対する安全性

本実験のすべての供試体において、設計荷重載荷時（風速 60m/s 相当）の GL+3.8m 位置（建築限界）に換算した変位はベースプレート幅内に収まる結果である。

b) 前年度実験結果との対比

2016 年度実験（D22-4 本の補強）と対比すると、今回実験における変位および鋼管のひずみ値は大きな値を示している。

c) 土中式とベースプレート式の比較

土中式とベースプレート式を比較すると、土中式の方が高い補強効果を示している。これはベースプレート式に比べ土中式の補強範囲が大きいためと考えられる。

d) まとめ

補強の効果は補強の範囲と補強体の耐力に左右されることが確認できる。

また安全性に関しては、限界状態設計法により設定した安全係数において設計した供試体においても建築限界である GL+3.8m 位置に換算した変位はベースプレート幅内に収まっており、補強した照明柱で通行の障害になるような損傷は起きないと考えられる。

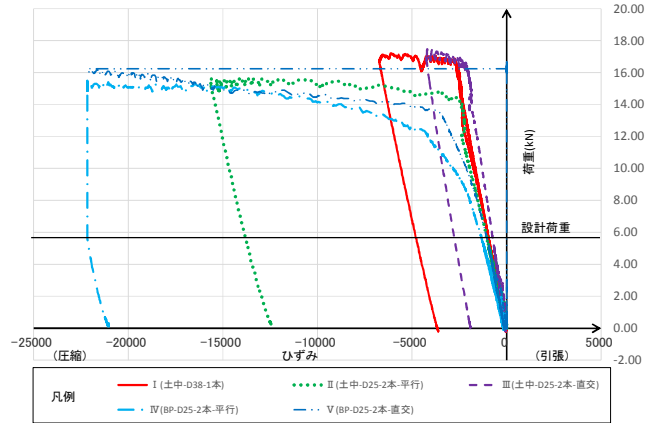


図-7 荷重ひずみ図～2017年度～

5. まとめ

実証実験を行った結果、設計荷重載荷時の変位はベースプレート幅内に収まっており、更新までの一時的な対策として有効であることが確認された。

内部充填工法を採用することにより、建物に近接している等、更新工事や従来の補強工法では施工困難な箇所についても、施設の長寿命化を図ることができ、府民の安全確保が期待できる。

また、更新と補強とを並行した事業計画を策定することが可能となり、予算の平準化を図ることができる。

なお、老朽化した道路照明柱の補修・補強工法として実用化に努めてきた「内部充填工法」の適用にあたっては、下記の点に留意が必要である。

- ・ 損傷程度の確認
- ・ 損傷部近傍（上下）の充填長の確保（特にベースプレート式）
- ・ 配筋位置等施工管理及びモルタル配合による品質管理
- ・ 補強した構造物の損傷部の変状や柱の傾きの定期的な確認（5年後、10年後）

今後、「内部充填工法」の有用性に鑑み、当該工法を用いた補修・補強の実施に向け、施工手順書を作成していく予定である。

表-7 実験結果一覧表～2017年度～

実験ケース	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
	土中、D22、1本 中心配置	土中、D25、2本 平行配置	土中、D22、2本 垂直配置	BP式、D22、2本 平行配置	BP式、D25、2本 垂直配置
断面図					
設計荷重(kN)	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
設計荷重時変位 (mm)	21.8	26.4	19.5	30.7	32.0
最終状態 照度値	41.5 OK	0.972 OK	0.994 OK	0.700 OK	0.994 OK
	41.6 OK	2.2	1.7	2.5	1.6
最終状態 照度に対する 安全率	OK	OK	OK	OK	OK

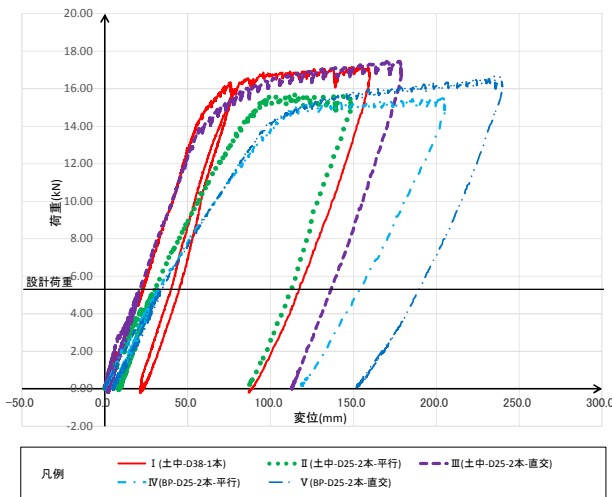


図-6 荷重変位図～2017年度～

導坑から地山改良を行い脆弱な盛土直下を掘削したトンネルの事例報告

加藤 翔¹・田中 富博²

¹近畿地方整備局 河川部 河川工事課 (〒540-8586大阪府大阪府中央区大手前1-5-44)

²近畿地方整備局 道路部 道路工事課 (〒540-8586大阪府大阪府中央区大手前1-5-44)

平成 29 年 8 月に開通した京奈和自動車道大和御所道路御所区間（御所南 IC～五條北 IC 区間）では、盛土部（厚さ約 40m）の直下を元地山の土被り 1D(D：本坑掘削幅)以下でトンネルが通過する低土被り区間(延長 144.0m)があったが、事前の地質調査が十分出来なかったこともあり、工事契約後に追加調査を行った結果、想定よりも地山の状態が悪いことが確認されたことから、上記区間において地山の変位を抑制(コントロール)しながら安全で確実な進捗が見込める施工を進める必要性があった。本稿は当区間に追加の事前調査を実施して地山の状態をより詳細に把握した結果をトンネル設計に反映し、同時に学識者の意見を聞きながら安全で確実な施工を実施してコスト削減を図った事例について報告するものである。

キーワード トンネル, 先進導坑, E 区間, 京奈和自動車道 安全対策

1. はじめに

京奈和自動車道は京都、奈良、和歌山を結ぶ約 120km の高規格幹線道路で、近畿圏の外郭環状を形成し、大阪を経由せずに行き来できる新たなルートとして、アクセス性の向上による経済・観光の活性化・広域ネットワークの形成等大きな整備効果が期待されている。大和御所道路は京奈和自動車道のうち



図-1 京奈和自動車道概要図

ち奈良県大和郡山市から五條市まで延長 27.2km の道路であり、そのうち平成 27 年度までに 15.6 km が既に供用している。南側の五條道路と接続する当該区間の御所南 IC～五條北 IC

についても早期の供用開始が望まれていた。



図-2 大和御所道路 御所南 IC～五條北 IC 間

新田東佐味トンネル（現：風の森トンネル）は奈良県五條市と御所市をつなぐ全長 1,831m のトンネルであり、当該箇所では北側 1,351m, 南側 480m を分割発注し、施工した。本施工箇所は設計当初から建設発生土の盛土直下を通過する区間であった。



写真-1 風の森トンネル（終点側）

なお、計画段階では盛土区間を除去し、明かり部を形成してトンネルを設ける計画も存在したが、コスト比較の結果、トンネル内に導坑を設け、地山改良を施した方が有利であることから先進導坑掘削による地山改良工法が採用された。本稿は盛土直下を改良し、トンネル掘削した事例を報告する。

2. 工事概要及び盛土直下区間について

大和御所道路新田東佐味トンネル南工区工事（受注者：前田建設工業(株)）は、延長 L=480m 区間のトンネル掘削・支保、覆工の施工を行うものである。本工区（測点 No. 122+60～No. 125+10）には、先述の通りトンネル直上に脆弱な盛土が存在する。この箇所の盛土は過去の地質調査結果より建設残土が締め固めも行われずに埋め立てられたものであり、N 値 5～10 程度の非常に脆弱な粘性土や砂質土、礫質土、碎石等で構成されていることが判明していた。



図-3 新田東佐味トンネル南工区工事 概要図

こうした状況から設計成果では地山分類表（出典：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説）に当てはまらない劣悪な分類として E 区間(L=144m)とし、対策工の検討を行い、盛土部分を取り払い明かり部を形成する案、地表面から地山を改良する案、坑内からのパイプルーフを施工する案等と比較検討した結果、施工性、安全性、改良の確実さ、コストを踏まえてトンネル内部から先進導孔により地山を改良する工法が選択された。

E 区間は、本トンネルのトンネル土被り 1.0D の範囲に盛土が存在している区間を指し、さらにトンネルから 0.5D の範囲に盛土が存在する場合は E' 区間、1.0D～0.5D の範囲については E'' 区間と区別し、それぞれの性状に応じた補助工法が検討されていた。

しかし、設計段階では、盛土区間トンネル直上の用地買収が未了で関係者の了解が得られなかったため、盛土範囲の状況をより詳細に得るためのボーリング調査が不足し、トンネル中心線直上での盛土と元地山との境界確認が不明であった。

この境界位置が想定と大きく異なっている場合、トンネル周辺地山に未改良域が生じる恐れがあり、本坑切り上げ時の地山の不安定化が懸念され、最悪の場合崩落の危険性があった。上記の理由及び先進導坑が通常の発破掘削に比べて工期が大幅に増えるため、施工業者から地上部からの地山改良の提案がなされた。

しかし、当初設計時に地上部からの地山改良案は一度廃案となっているため、それが可能なのかを確かめることが必要であった。

3. 盛土部ボーリングによる事前調査の実施

盛土、地山、トンネル本坑の境界位置をより正確に把握するため、主にトンネル直上で追加ボーリング調査(n=11本)を実施することとした。ボーリングの位置及び本数については受発注者及び設計者の3者間で協議を行い、最低限把握しなければならない断面を網羅出来る20mピッチにて調査を行うことと

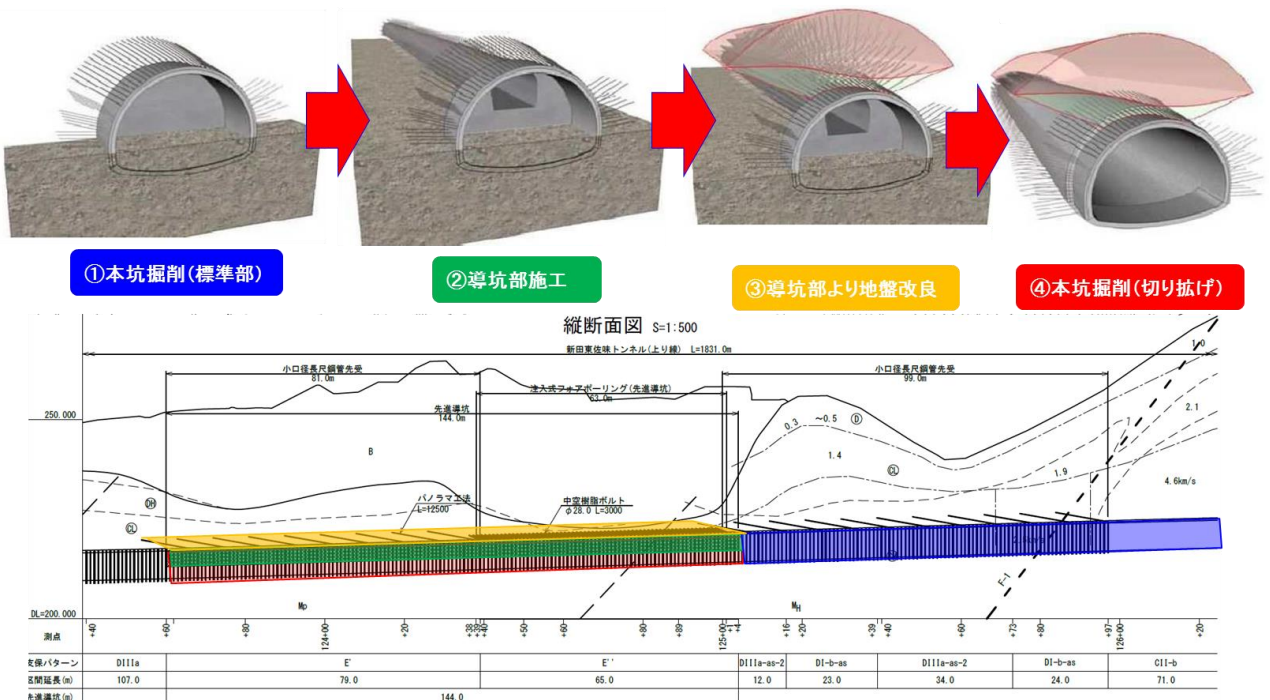


図-4 先進導坑施工ステップ図 (イメージ)



図-5 ボーリング調査模式図

した。また地山土被りとトンネル切羽に出現する地山状況を確実に確認するため、トンネル天端高から5m程度の余裕長さを掘進するものとした。調査の結果、深さ方向について一部盛土がトンネル断面内に出現することが判明し、さらに盛土内にコンクリート殻、煉瓦、木片等の産廃が含まれていることがわかった。そのため薬液が

行き渡らない可能性があるため施工業者から提案のあった地上部から地山を改良することが困難であることが判明した。

よって地山及び盛土の改良方法について再度精査する必要が生じた。一方で盛土分布と地山との面的な境界が事前の想定とは大きく異なることはなく、アーチ部側方の改良範囲の見直しは必要ないことが確認できた。

4. 調査の結果を踏まえた施工方法の変更

これらの調査結果から盛土及び地山の詳細な位置関係が判明したため、効果的な安全対策を検討することとなった。その際に学識者の意見を確認しながら確実に地山を改良し、掘削することとした。

当初設計では、先述の通り E 区間全線(L=144m)を先進導坑とする計画となっていたが、ボーリング調査によって地山、盛土、トンネル本坑の位置関係が推定できるようになり、改良区間の一部削減を図った。

具体例として、先述の E' 区間(土被り 1.0D~

0.5D)については当初設計時には調査箇所が少なかったことから、盛土がどのように出現するかが想定できなかったため、全体区間を先進導坑で施工することとしていたが、ボーリング調査によりトンネルから0.5D範囲に盛土が出現しないことがわかったため導坑の施工を削減した。

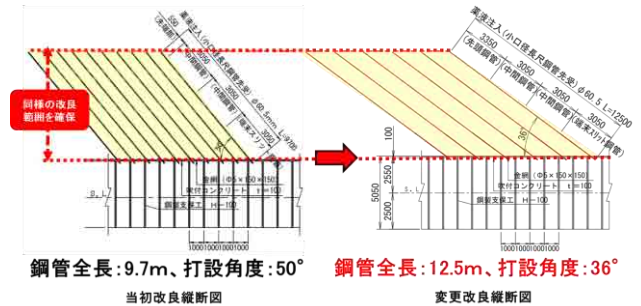


図-7 薬液注入打設角度の変更

さらに、補助工法による改良時に鋼管の打設角度を50°から36°に変更することで方が一の鋼管滑り落ちを回避でき、かつ薬液注入が手前の導坑から行える区間が形成され、導坑の削減対象となった。そのため、先進導坑区間の延長を当初計画していた144.0mから53.0mにまで削減することができた。

また、学識者より「盛土部分に滞水していることが考えられることから水位観測は必ず行いながら施工」との助言により、先述のボーリング調査時に掘削した調査孔を施工時の水位観測孔として利用し、施工時も水位を確かめながら施工を行った。

4. 設計変更に基づく先進導坑の実施

先述の施工方法の変更を踏まえた上で元地山の土被り厚0.5D未満のE'区間から、以下の手順で掘削

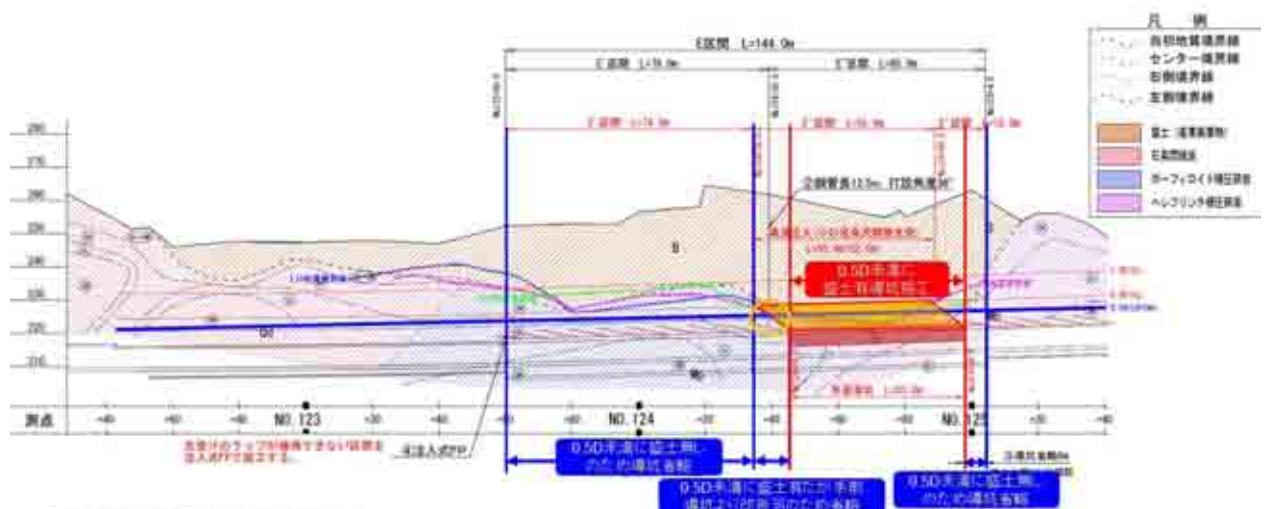


図-6 ボーリング調査結果に基づく先進導坑施工範囲の見直し

作業を行った。

- ① 先進導坑掘削
- ② 先進導坑からの薬液注入による
本坑外周 0.5D 範囲の改良
- ③ 本坑切り上げ

(1) 掘削方法

当初発注時は先進導坑の掘削はレール工法により計画されていた。しかし、軌条設備の設置・撤去や掘削機械(スキッド型ワンブームパーカッション)の搬出入等の段取り替え作業に時間を要し、計画時の施工サイクルの確保が困難であった。そこで、協議により導坑断面の高さを 0.5m 拡大し、施工方法をレール工法からタイヤ工法に変更した。



写真-2,3 2ブームドリルジャンボ及びタイヤショベル

これにより、2ブームドリルジャンボによる施工や本坑で使用したタイヤショベルでの作業が可能となり、導坑の掘削進捗は、昼夜作業で 3~5m/日となったため工程短縮に寄与した。設計では導坑掘削時の天端からの崩落対策として導坑の全線で 3.0m の中空樹脂ボルト(φ28.0mm)による注入式フォアボーリングが計画されていた。しかし、前述のボーリング調査により、上部の盛土が導坑の天端から露出する箇所があることが確認されていたことから、導坑掘削時における盛土地山の天端の抜け落ちを確実に防止するため、当該箇所については長さ 6.0m (継足し長)の注入式中空樹脂ボルトに変更し、先進導坑の掘削は発破掘削が主であったが、発破振動による抜け落ち防止のため、同箇所は機械掘削に変更して施工を行った。



写真-4 先進導坑内盛土露出状況

また、追加調査のボーリング孔を利用して E' 区間(土被り 5D 未満) 近傍の地下水位を観測していたが、地下水が本坑天端の 10m 以上上方まで滞水していた。先進導坑掘削後から徐々に地下水位が低下してきたものの、依然として地水位が導坑の天端よりも高く、天端の抜け落ちや掘削盤が泥濁化することによる鋼製支保工の支持力低下、ロックボルトのモルタル洗流が懸念された。

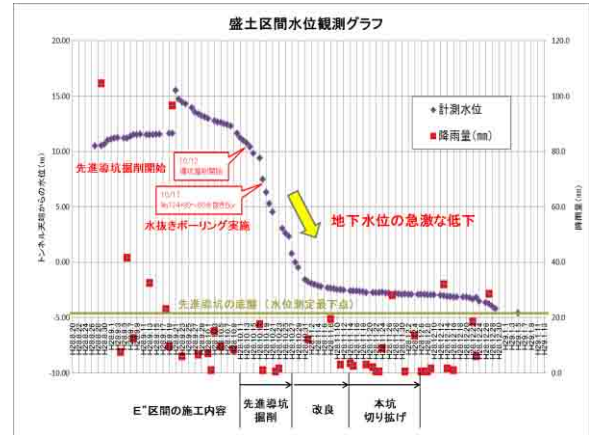


図-8 盛土区間水位観測状況

そこで、先進導坑掘削面に水抜きボーリング(L=20.0m、先進導坑の両土平付近に1本ずつ、計2本)を実施したところ、水抜きボーリング実施後から地下水位が先進導坑底盤まで低下した。(図-8) これにより、切羽からの湧水も減少し、以降安定して先進導坑の掘削を行うことができた。

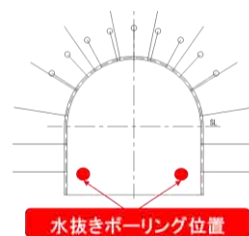


図-9 水抜ボーリング施工位置 写真-5 水抜実施状況

6. E区間本坑切り上げの施工

(1) 掘削及び先受け工

先進導坑からの改良により、本坑天端部に出現した盛土に注入材が脈状に分布していることが観察された。

また導坑掘削時に区間全域に渡って亀裂に富んだ圧砕岩が分布していることがわかり、ブレイカー等で容易に掘削できるほど柔らかいものだった。こうした状況から、当初設計で本坑天端部で、改良範囲から外れる図-10 の B 部分については、小口径長尺先受け(L=9.0m)を追加施工した。

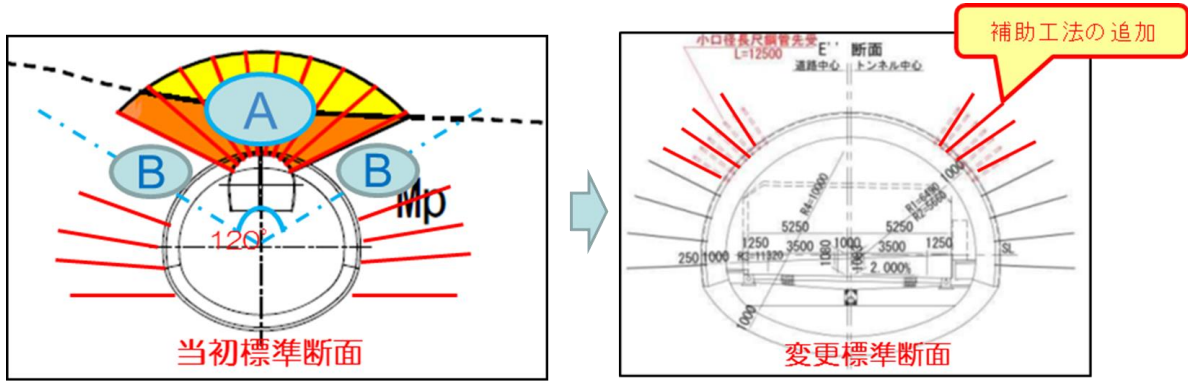


図-10 導坑改良範囲外の補助工法の追加

なお、切り上げは切羽の天端状況を観察しながら発破掘削を行い、先進導坑の鋼製支保工は発破に先立ち、ブレーカを使用して撤去した。切羽には亀裂が発達したポーフィロイド様圧砕岩が分布していたが、先受け工や導坑からの改良の効果もあり、安定した状態であった。

(2) 早期閉合の実施

E 区間は元の地山土被りが 1.0D 以下であるため、地山のグランドアーチが期待できない。そのため当初設計から二次覆工を RC 構造とし、将来荷重を受け持つ構造としていた。しかし、覆工及び仮インバートコンクリートの施工が完了し、構造体として機能するには掘削後に時間がかかるものとなっていた。この際に沈下が生じると盛土及び周辺地山に緩みが生じる恐れがある。そこで、一次支保の状態をトンネルを早期に閉合し、耐荷力を、向上させておくことが非常に重要であると判断し、当初計画されていなかった仮インバートを施工することとした。仮インバート吹付けの強度は 18N/mm²、厚さは t=25cm、スパン長は追加した小口径長尺先受けと同様に L=9.0m とし、吹付けによる閉合箇所との離隔距離は、切り上げ掘削の上半切羽から 16m、下半切羽から 11m とした。



図-11 仮インバート図面 (赤書き部分)

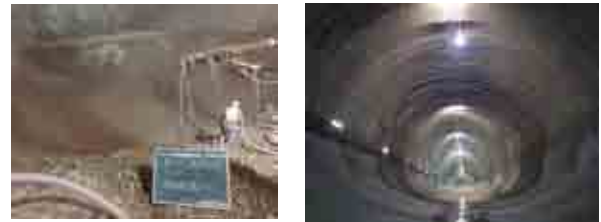


写真-6,7 仮インバート吹付状況及び施工完了写真

7. おわりに

本工事では、当初設計のみではわからなかった地山の性状把握についてボーリングの追加調査を行い、学識者の助言を頂きながら検討することにより対策工の見直しを図った。以上の結果をふまえて施工方法を検討・変更することで、切羽の抜け落ちや崩落、直上盛土部の沈下を防ぐことができた。

また、現場内の工夫や工法の変更等により極力工程に影響を与えない施工とすることもできた。

今後の教訓として設計段階から事前調査を効果的に行う事で、全体としての工期の削減及びコスト削減、ひいては施工時の安全確保に寄与することと考えられる。本トンネルは平成 29 年 3 月に無事貫通(到達)し、覆工コンクリート施工後、平成 29 年 6 月に後続の Co 舗装工事に引渡しを行い、平成 29 年 8 月 19 日には供用開始となった。今後は国道 24 号の渋滞解消及び緊急輸送路として地域に寄与することとなる。

最後に、本稿が、類似のトンネル工事の参考となれば、幸いである。

※本稿は著者が奈良国道事務所工務課所属時の担当内容である。

謝辞：本論文の執筆にあたってトンネル施工業者の前田建設工業(株)の関係者には資料提供等様々な面でご協力頂きました。また関係職員の皆様には多方面からご指導、ご助言を受け作成することができました。本紙面をお借りして、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) トンネル標準示方書 山岳工法 同解説
- 2) 道路トンネル技術基準 (構造編・同解説) H15.4 版

和歌山地方合同庁舎建築工事における『漏水ゼロの地下躯体構築』の取組

木村 春喜

東急建設株式会社 大阪支店 建築部 (〒531-8519大阪府大阪市北区豊崎3-19-3ピアスタワー)

当該建物は、地下1階地上10階である。工事場所は地下水位が高いことから建物機能を長期にわたり維持するために、漏水対策を含む地下階のコンクリート躯体の品質向上が施工の重大課題であった。対策として、ディープウェルによる地下躯体工事のドライワーク化、地下外壁コンクリート打設では、セパレータを用いず1日で打設を行い打ち継ぎを設けなかった。また、打設後も止水対策を施し、漏水をゼロを実現した。

キーワード 地下外壁，地下水，コンクリート打設

1. 概要

表-1 に建物概要を、写真-1 に建物外観を示す。

当該建物は、地下1階地上10階である。工事場所は、和歌山城の東に位置し、豊かな水を蓄える堀に隣接している。こうした地下水位が高い敷地内での建設という条件下において、建物機能を長期にわたり維持するために、漏水対策を含む地下階のコンクリート躯体の品質向上が施工の重大課題であった。

施工計画の当初より、地下躯体からの漏水を撲滅するために、地下外壁の構築において以下の項目を主に実践し、求められる品質を得るに至った。

- 1)地下工事においてドライワークを目指し、山留にシートパイル工法を採用、さらにディープウェルを採用した。
- 2)地下外壁の型枠工事では、漏水原因となりやすいセパレーターは用いず、コンクリート打設時に作用する側圧を押さえ込む工法を採用した。
- 3)地下外壁のコンクリート打設では、漏水の原因となりやすい打設工区による打ち継ぎを無くし、全て1日で施工した。
- 4)コンクリートの緻密化を図るため、スパイラルパイプレーターによる締め固めを行い、その効果を確認するため透明型枠を要所に設置し目視確認を行い、さらに目視できない部分については充填検知機を採用した。
- 5)打設後は、電磁波レーダや超音波を用い空洞部や脆弱部の有無を確認し、必要に応じて補修を行い品質の確保を図った。
- 6)定期的な漏水有無の検査を実施し、必要に応じて止水対策を行い品質の確保を図った。

表-1 建物概要

工事名称	和歌山地方合同庁舎建築工事
工事場所	和歌山県和歌山市二番町3
建物用途	庁舎 立体駐車場
構造	地上 鉄骨造 地下 鉄骨鉄筋コンクリート造
規模	地下1階 地上10階 塔屋1階
敷地面積	6,501.17 m ²
建築面積	3,606.57 m ²
延床面積	23,995.54 m ²
軒高さ/最深深さ	GL+42.49 m/GL-9.27 m
工期	2015年 9月 3日～2018年2月15日



写真-1 建物外観

2. 山留と揚水計画

試掘時に地下水位が2.0mであることを把握しており、ドライワークのために山留の工法と揚水計画の検討を重ねた。採用した工法は、山留にシートパイル工法を、揚水計画に地下水位低下工法（スーパーウェルポイント工法 以下SPWと呼ぶ）および復水工法（真空プレス型リチャージウェル工法 以下VPRWと呼ぶ）とした。

(1) シートパイル工法

図-1に、躯体の深さと水位を示す。

地下躯体において、B1FLはGL-4.9mに対し水位はGL-2mとなっていた。

追加ボーリング調査データから不透水層が確認され、これより以深にシートパイルを打ち込むこととし16.5m長とした。後述する揚水計画と併せドライワークを実現している。

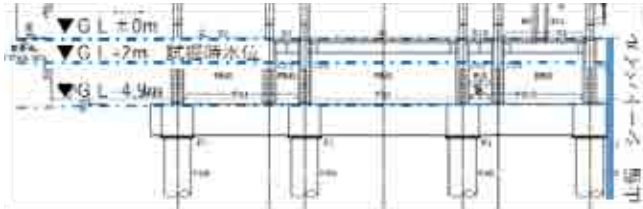


図-1 躯体の深さと水位

(2) 揚水計画

図-2に、揚水計画を示す。工事は、地下躯体本体を施工する1期工事と、地下にアクセスするスロープを施工する2期工事に分かれる。

揚水は、スーパーウェルポイント工法（SPW）を1期工事に2か所、2期工事に1か所配置し、いずれも揚水深さをGL-17mとした。

覆水は、真空プレス型リチャージウェル工法（VPRW）を1期工事2期工事それぞれ1か所ずつ設置し、リチャージ深さを不透水層以深のGL-56mとした。

VPRWは累計352,450m³のリチャージを行い、稼働時の水位はGL-6mであった。

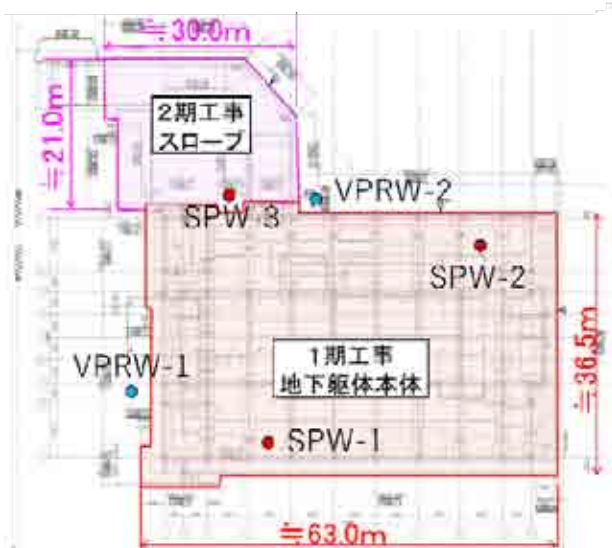


図-2 用水計画

3. 止水対策と型枠工事

(1) 止水対策

写真-2に水平打ち継ぎの止水対策を、写真-3にコンクリート水平打ち継ぎ面の止水対策を示す。

地下躯体構築では、水平打ち継ぎの止水対策計画を以下の2項目とした。

- ① 耐圧版と地中梁の水平打ち継ぎ部外周部、B1SLとB1立ち上がりの打ち継ぎ外周部（山留面）に、非加硫ブチルゴム系止水板（アクアシャット）を施した（写真-2）。水平打ち継ぎ面の躯体外側に止水板を設けることで、水上側で止水効果を図った。
- ② 外周部コンクリート打ち継ぎ面に、打ち継ぎ材（ジョイントテックス）を打設時に塗布した（写真-3）。打ち継ぎ材をコンクリート打設時に塗布することで、ブリージング水によるコンクリート打ち継ぎ面の付着性低下を防止し、止水性を高める効果を期待した。



写真-2 水平打ち継ぎの止水対策



写真-3 水平打ち継ぎの止水対策

(2) 型枠工事

写真-4に、セパレータを用いない型枠工法を示す。

B1立ち上がり外周部（外壁と柱）の型枠は、漏水の原因となるセパレータを用いず、鋼製支持材を用い施工した。

この工法は、在来型枠（コンパネ、栈木、角パイプ）と鋼製支持材を組み合わせ、コンクリート打設時の側圧

に対応する工法である。

B1階立ち上がりの躯体構築では、1階梁下までと1階梁とスラブの2回に分けてコンクリートを打設した（VH分離によるコンクリート打設）。竣工後の水位は、もともとの水位であるGL-2mであると考えられる。そこで、密実なコンクリートを打設し止水性を高める躯体とするため、施工性を考慮し今回のVH分離打設を採用している。



↑梁下で打ち継ぎ（VH分離打設）

写真-4 セパレータを用いない型枠工法

写真-5に、透明型枠を示す。

地下躯体は鉄骨鉄筋コンクリート造であることから、柱には鉄骨が配されている。そのため、コンクリート打設時の流動性が低下し充填不良を発生させるリスクが生じる。これに対し、十分に適切なバイブレータによる充填施工が必要となるが、その効果を管理する目的で、要所に透明型枠を配置した。



写真-5 透明型枠

4. コンクリート打設

(1) 打設工区

地下躯体のコンクリート打設は、漏水ゼロを実現するため、外周部と内部の躯体について打設工区を明確に分離した。外周部のコンクリート打設では、コンクリート

の打設数量が584m³であった。この打設量では、通常、工区を計画し数日にわたり施工を行う。しかし、本工事では、工区分けによる打ち継ぎからの漏水を撲滅するため、1日でコンクリート打設を行った。

図-3に、打設当日の計画図を示す。

打設は4班編成とし、各班に大型ポンプ車（計4台）と人員を配した。各班のコンクリート打設量は、118~162m³とした。各班は、打設手順、役割、他班との連携を十分に打ち合わせし、打設に臨んだ（写真-6参照）。

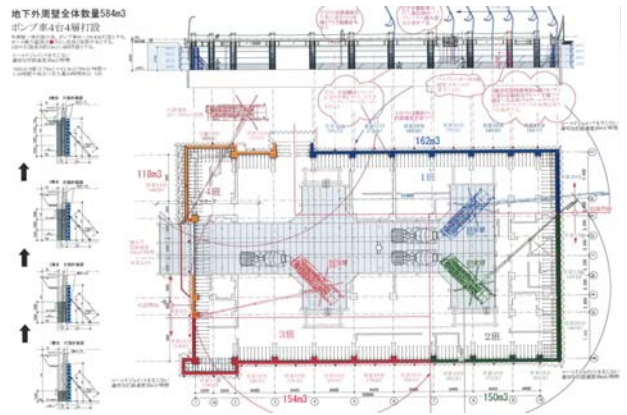


図-3 打設計画図



写真-6 打設前周知会の模様

(2) 打設時の各対応

① スパイラルバイブレータの活用

写真-7に、スパイラルバイブレータを示す。

先端形状が螺旋状の凹凸を有しており、振動伝播向上と振動の方向性を有し気泡抜けが促進され、コンクリートの充填性を高めることができるバイブレータである。

② コンクリートシューター

写真-8に、コンクリートシューターを示す。

打設高さが4m近いことから、打設初期段階で梁下端からコンクリートを落下させると分離が予想される。コンクリートの分離を防止する観点から、落下高さを低く抑える手法として、コンクリートシューターを採用した。



写真-7 スパイラルバイブレータ



写真-8 コンクリートシューター



写真-9 打設状況

コンクリートシューターは壁中段に接続し、分離のない密実なコンクリートの打設に効果を発揮した。

③ 打設時間と回し打ち

写真-9に、打設状況を示す。打設時には各班とも、コンクリートの練り混ぜから打設までの時間、打ち重ねまでの時間、および型枠の強度を考慮し打設高さを確認しながら回し打ちを行った。充填性は、透明型枠と目視できない部分には充填確認センサーを設置し確認を行った。



写真-10 柱のRCレーダーによる3Dスキャンの状況

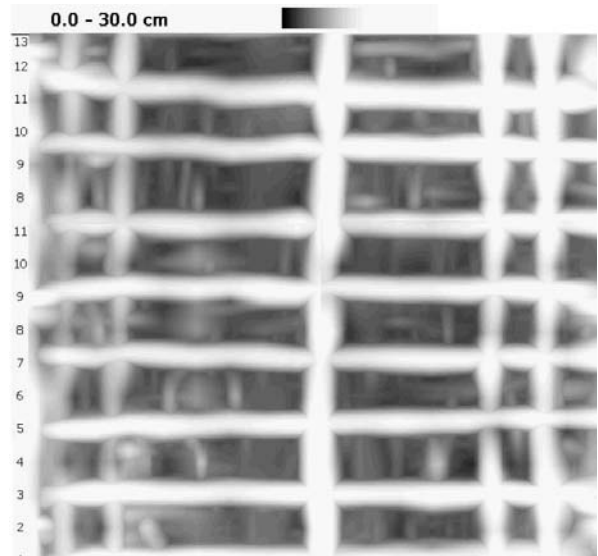


写真-11 柱のRCレーダーによる3Dスキャン結果

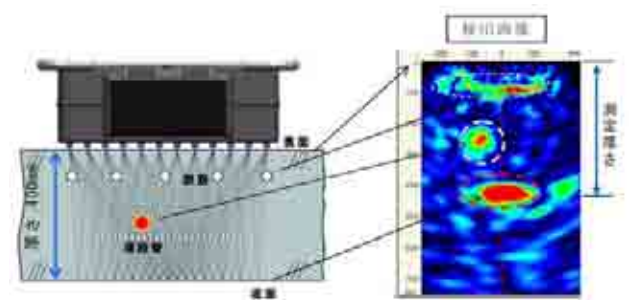


図-4 超音波による調査の原理

5. 打設後の対応

(1) 空洞部の有無の確認

コンクリート打設後に型枠の脱型が終了した時点で、出来形の自主検査を実施した。その結果、コールドジョイント等の不具合が懸念される部分について、躯体内部の非破壊検査を行った。方法は、柱にRCレーダーによる3Dスキャンを、外壁については超音波による検査を採用した。

① 柱のRCレーダーによる検査

写真-10および写真-11に、RCレーダーによる3Dスキヤンの状況と結果を示す。

目視検査において不具合が疑われる場所について検査をした結果、すべて健全であることが確認された。

② 外壁の超音波による検査

図-4に超音波探査の原理を示す。

コンクリート内を伝播する超音波は、空洞がある場合コンクリートとの境界において反射する性質がある。この性質を利用し、反射境界面を探することで空洞やコールドジョイントの有無を検査した。

写真-12に調査状況を、図-5に調査図を、図-6に調査結果を示す。

調査の結果、外壁内部に空洞がないことが確認できた。



写真-12 超音波探査の状況

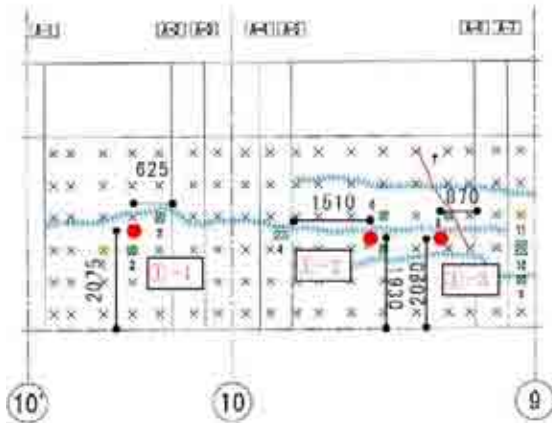


図-5 超音波による調査図

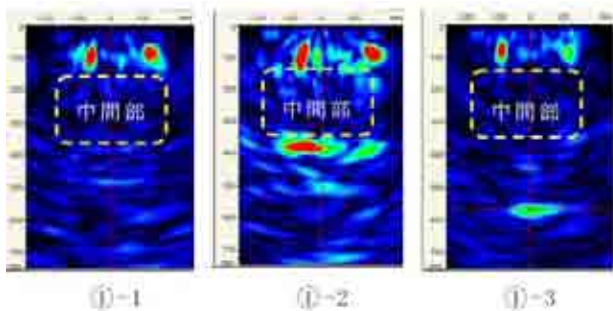


図-6 超音波による調査結果

(2) 漏水時の止水対策

地下躯体構築後、スーパーウェルポイント工法による揚水が役目を終えると、工事前の定常水位に戻ったことが確認された。その後も、地下躯体の観察を継続し、揚水停止前から数か所に微量な漏水を確認した。

図-7に漏水場所を、写真-13に、漏水箇所例を示す。

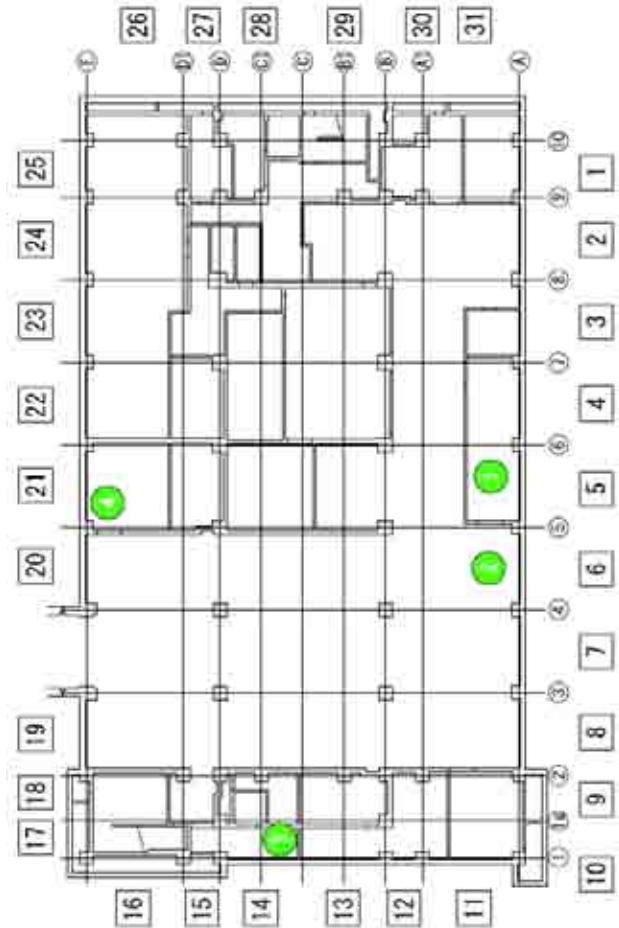


図-7 漏水場所



写真-13 漏水箇所例

止水工法は、止水性に富むグラウト材を高圧で注入するTAP工を採用した。図-8に、TAP工法の概要図を示す。本工法は、躯体内に生じた水路（漏水経路）に高圧で止水材を注入し止水を行う。

漏水した場所は、揚水停止前に1次止水を施し、揚水停止後に観察を継続した。写真-14に、止水後の状況を示す。本工法を用い止水を施した結果、現在に至るまで漏水は生じていない。

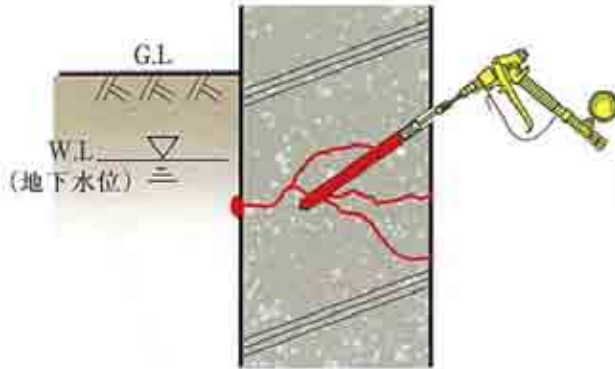


図-8 TAP工法概念図



写真-14 止水処理後の状況

6. まとめ

本報では、水位が高い条件下において、漏水ゼロの躯体構築を目指し取り組んだ結果を報告した。

取り組みのアプローチは以下の通り

- 揚水により地下躯体工事をドライワークで行う
- 地下外周部の躯体構築方法に工夫

- ・セパレータを用いない型枠工法の採用
- ・工区境の打ち継ぎを設けず1日で打設
- ・打ち重ね時間の管理
- ・スパイラルバイブレータの活用
- ・コンクリートシューターの活用
- ・打設状況確認→透明型枠と充填センサーの採用

- 躯体構築後の徹底した止水処理

これらの手法を実行し、作業所全員の熱意と実行力で、『漏水ゼロの地下躯体構築』を実現できた。

謝辞：本工事を完成させるにあたり、終始丁寧なご指導を賜りました近畿地方整備局の皆様に心より謝意を表します。

六甲山系における砂防ソイルセメントの活用について

長渡 祐樹¹

¹近畿地方整備局 六甲砂防事務所 調査課 (〒658-0052兵庫県神戸市東灘区住吉東町3-13-15)

六甲山系の砂防事業は、国立公園内であることや良好な自然環境の保全の観点から索道を主体とした施設整備が行われている箇所が多く、建設される砂防施設は調達の容易なコンクリートが主体である。一方、建設現場で発生する掘削残土は、リサイクル率が低く、その大半は残土処分している。このような事業実施の背景を踏まえ、残土のリサイクル・建設コスト縮減を図るため、六甲山系砂防事業における「ソイルセメントの活用方針」を工事条件と配合特性の両面から検討した。

キーワード 砂防ソイルセメント、流動タイプ、簡易配合試験

1. はじめに

六甲山系の砂防工事は、神戸市を主体とする市街地に面した斜面・渓流や国立公園内で実施する特性から、工事用道路の建設が困難であり、建設車両の運搬や施工開始後の現地発生土砂の移動手段には索道が用いられる場合が多い。したがって、砂防工事の実施にあたり、常に索道を主体とした大掛かりな仮設や建設発生土砂の処分が課題となっている。このような課題を解決するための一つの手法として砂防ソイルセメント工法「INSEM工法 (IN-situ Stabilized Excavation Materials)¹⁾」の有効性について検討を行った。「INSEM」とは現場発生土をその場に固化、定着させるという意味であり、平成10年に住吉川流域西滝ヶ谷で施工された実績を契機に現在、3基の実績がある。本報告では、砂防ソイルセメント工法の更なる活用を目指し、現地特性に応じた工法採用の使い分けや活用する土砂の大半を占める六甲花崗岩（強風化花崗岩）の強度特性について検討した結果を説明する。

各々のタイプに対する使い分けの面も含めて検討した。

INSEM-Cタイプは、混合槽内に材料を投入した後に、バックホウ・クローラ等により小運搬を行い、打設面で振動ローラを用いて締め固める工程となる。したがって、砂防堰堤の施工の場合、振動ローラを砂防堰堤の天端まで搬入・搬出する必要がある。INSEM-Cタイプの活用の課題として、打設面（基礎～袖天端）に振動ローラを搬入・搬出ができるクレーン設備が必要となること、ソイルセメント材の捲き出しのためのバックホウが必要となることが挙げられる。続いて、INSEM-FタイプはINSEM-Cタイプと同様の製造設備を用いて攪拌・混合を行うことができるが、生コンクリートと同様に有スランプの材料であることから、アジテータ車や移動式プラント等の生コンクリートと同様の混合設備を用いてソイルセメント材の製造を行うこともできる。製造後の打設は、生コンクリートと同様にバケット等で打設し、堤体を構築する。また、INSEM-Fタイプの特徴として、INSEM-Cタイプでは活用できない礫のサイズ（80mm以上）も使用でき、更なる残土処分が期待できる。

2. 砂防ソイルセメント工法の適用箇所の検討

(1) ソイルセメント材の使い分け

砂防ソイルセメント工法は、振動ローラ等の締め固めにより堤体を構築する方法である「転圧タイプ」と生コンクリートと同様にスランプを有する領域まで加水・セメントを追加し流動性を持たせた「流動タイプ」の2種類がある（以下「INSEM-Fタイプ」、転圧タイプ（以下「INSEM-Cタイプ」）と称す）。これらの2つの材料の製造方法は、手順・施工機械・仮設方法も異なることから、



写真 INSEM-Cタイプの施工状況



写真 INSEM-Fタイプの施工状況

(2) ソイルセメント材の施工条件

砂防ソイルセメント工法の施工で最も重要な事項は、掘削土砂のストックや日々の製造に必要な仮置き場所の確保である。土砂の仮置きは、工事中の一時的な借地等により対応する場合が多く、砂防堰堤の工事用道路沿いや堆砂敷へのストックヤードの一時利用の事例がある。また、起点側の索道基地に広いスペースが存在する場合は、このような場所の利用も可能である。六甲山系の砂防工事では、グリーンベルト整備事業によって取得済の公有地や市有地等、比較的土砂の仮置きが行いやすい場所も存在するため、こうした用地を拠点とすることにより砂防ソイルセメント工法の活用拡大が見込まれる。

ソイルセメント材の製造の面では、砂防工事実施箇所とソイルセメント材の製造場所が離れている場合、硬化が促進し品質低下を招くことから、製造場所の条件が確保できる場合でも、製造から運搬・打設までの時間を考慮する必要がある。ソイルセメント材のタイプと施工方法、更に現場条件を加味した結果、六甲山系の砂防工事では、表1に示す施工場所に応じた活用選定ができるものと考えた。

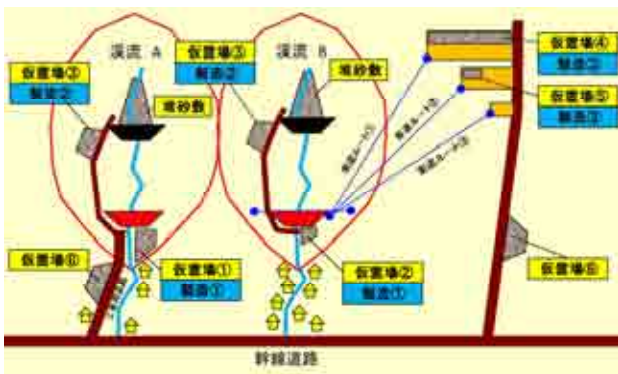


図-1 堰堤施工位置と想定仮置き場のイメージ図

表-1 ソイルセメント材の仮置き場所・製造場所の条件

仮置・製造条件	
仮置場①	砂防堰堤計画地点に掘削土砂を全量ストックできる。(広いストックヤードが堰堤計画地点付近に確保できる) 堤体打設量 2,000m ³ の場合、約800m ² 以上
仮置場②	砂防堰堤計画地点に2日分のソイルセメント材をストックできる。(60m ² /1日)の場合、120m ² 以上(フレコン170体 1日あたり1,000kg) 土層3段階程度の高積、約100m ²
仮置場③	砂防堰堤計画地点ではないが、堰堤地点まで建設車両で運搬ができる場所に土砂の仮置きが可能な場合 日打設量の2日分程度、約100m ²
仮置場④	索道基地に堰堤地点で掘削した土砂(もしくはソイルセメント材の製造土砂)を全量ストックできる。 堤体打設量 2,000m ³ の場合、約800m ² 以上
仮置場⑤	索道基地に堰堤地点で掘削した土砂(もしくはソイルセメント材の製造土砂)を2日分ストックできる。 日打設量の2日分程度、約100m ²
仮置場⑥	砂防堰堤の建設箇所から離れた場所に土砂のストックヤードが存在する場合 堰堤現場へ日々の製造量の土砂を供給できることが条件
製造(1)⑦	砂防堰堤計画地点でソイルセメント材を製造できる。 (混合コンテナ等)を常設設備を配置できる。約200m ² 以上

(3) 施工条件に応じた施工性の評価

仮置き場所や製造場所の条件によって、INSEM-CタイプやINSEM-Fタイプの施工性の評価を試みた。製造場所が広く、仮置き土砂が近傍である場合は施工性が最も良い評価「◎」と考えた。製造場所と仮置き場所が離れているが支障なく製造できる場合は「○」、施工可能であるが、品質・施工時の安全性で懸念がある場合は「△」とした。

表-2 ソイルセメント材の仮置き場所・製造場所の条件

施工パターン	製造場所	仮置き場所	INSEM-Cタイプ	INSEM-Fタイプ
	製造① (堰堤位置)	堆砂敷土砂活用	仮置場①	
仮置場②+③				○
製造② (堰堤施工流域内)	堆砂敷土砂活用	仮置場③		△
		仮置場④	△	○
製造③ (索道ルート1)	堆砂敷土砂活用	仮置場⑤+⑥	△	○
		仮置場⑥	△	○

表2に示す製造場所と仮置き場所の組み合わせによって、施工条件からみた砂防ソイルセメント工法の活用の適否を判断するものとした。その他の施工条件として重要な事項は、砂防工事現場で土砂の賦存量が確保できるか判断することである。砂防堰堤の掘削量のみでは堤体等での賦存量が確保できない場合、他現場からの土砂の流用、同流域や近傍流域の堆砂敷土砂の活用、購入骨材等を用いたブレンドによる配合などを考える必要があり、これらの選択肢として、ソイルセメント材の適否を選択する必要がある。なお、設計段階での賦存量の把握は、現地踏査の時点で地表面の状況しか確認できないことから、地中部の礫の堆積状況や岩盤線が推定できないため、歩留まりを考慮した評価としなければならない。地中部の土砂の堆積量や礫の混入率は、調査ボーリングのコア観察・柱状図などから推定することも可能である。これらの条件を勘案し、六甲山系砂防事業における砂防ソイルセメント工法の適否選定フローを作成した。(図-2)

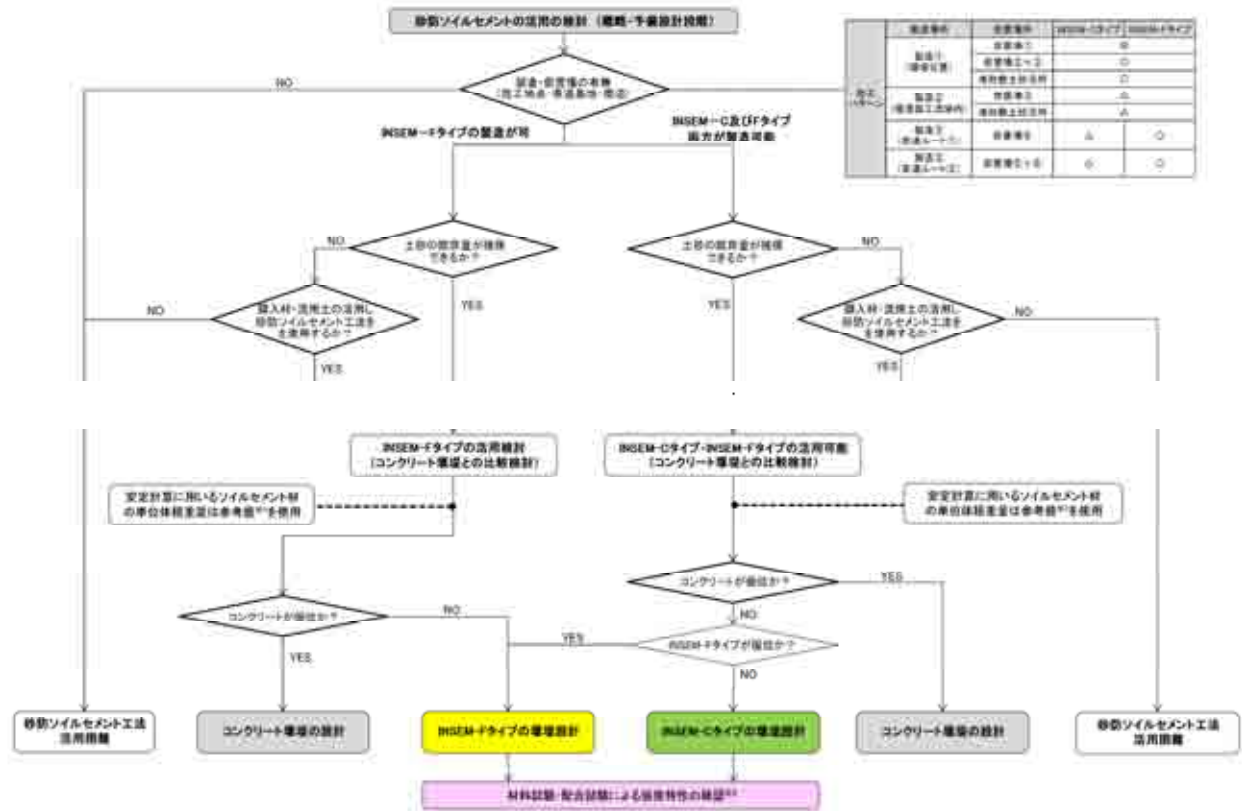


図2 砂防ソイルセメント工法の適用選定フロー

3. ソイルセメント材の強度特性

(1) 六甲山系の現地発生土砂の特徴

六甲山系は、表層はマサ化した風化花崗岩で構成されている溪流が多く、砂防工事で発生する掘削残土の多くはこの風化花崗岩である。六甲山系の山林の特徴は人工林がほとんどなく、アラカシなどの常緑広葉樹に覆われた極相林の溪流が多い。このため、林床は暗く土壌には草本が侵入しにくい条件であり、多くの溪流では表層の風化が発達している。一方、工事現場で実際に施工時に堤体材料として活用される土砂は、地表面から3m以深であり、表層土砂に比べると樹木や雨水等の浸透の影響を受けにくい条件である。これらの採取位置の違いは、土砂に含まれる有機成分の含有量にも影響しており表層土砂では多く、深部の土砂では有機成分が少ない結果が得られている。表層と深部の土砂の粒度については、ふるい分け試験の結果、採取場所7箇所のうち、0.075mm以下の細粒分含有量で見ると多いところで50%程度、少ないところで10%未満とややバラツキがあった。礫分は全体的に少なく、全体的に粒度に片寄りがあった。採取段階の自然含水比は、採取条件によりバラツキがあるが3%から30%程度の範囲であった。表層の含水比よりも深部の含水比の方が小さく、有機成分の含有量も深部の方が少ない傾向であることが確認された。

以下に六甲山系の稼働中の工事実施箇所から採取した

深部の土砂(概ね表層3m以深)と表層からの採取土砂(表層の有機物層を除く深度0.5m程度)のふるい分け試験結果を示す。(図-3)

現地発生土砂のほとんどは花崗岩質(マサ土)であるが、採取場所の条件によって粒度分布には違いがある。一般的に0.075mm以下の細粒分土砂が多い場合、強度低下を引き起こす可能性があると示されているが、本検討に用いた採取土砂についても細粒分の割合が多い土砂が存在する。よって、15kg程度の採取土砂で実施できる簡易配合試験により各タイプの強度特性を確認した。

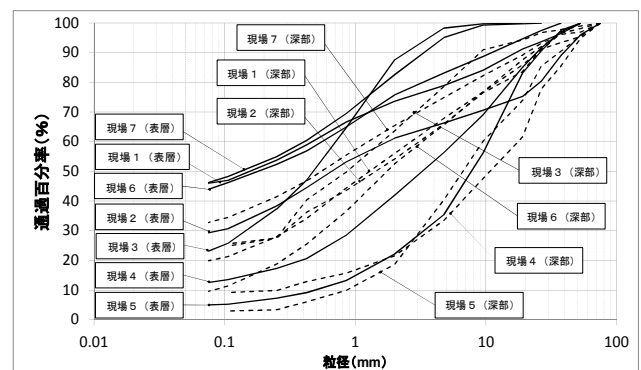


図3 ふるい分け試験結果

(2) 簡易配合試験

表層や深部から採取した土砂の物理特性を把握した後、直径5.0cm×高さ10.0cmの小径供試体(以下、「簡易配

合試験供試体」)を用いてINSEM-FタイプとINSEM-Cタイプの圧縮強度試験を実施した。表層は深部に比べて有機物が多い傾向があるため、一般的な高炉セメントB種に加えて有機物対応のセメント系固化材を使用し、発現強度の傾向を確認した。本検討では、管内の土石流危険渓流の土砂に対して、どの程度の強度発現が得られるか目安を確認するため、単位セメント量はINSEM-CタイプはC=150kg/m³、INSEM-FタイプはC=250kg/m³とした。図4にINSEM-Cタイプの圧縮強度試験結果を示す。

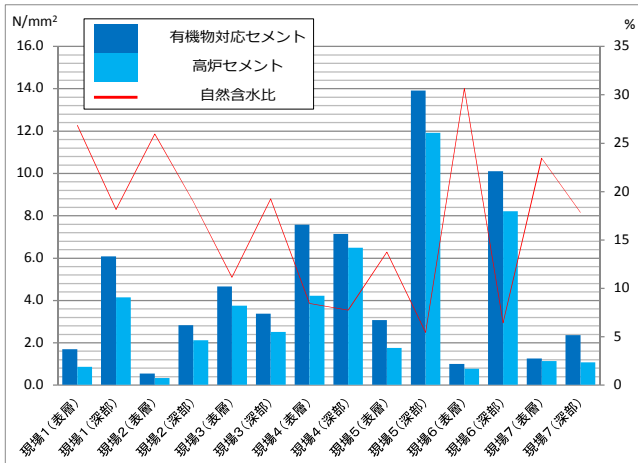


図4 圧縮強度と自然含水比の関係 (INSEM-Cタイプ)

INSEM-Cタイプの圧縮強度は、自然含水比が20%を超える高い土砂ほど水和反応が進行せず、圧縮強度が小さい傾向となり、また、同一箇所でも表層よりも深部の方が高い強度が得られる傾向となった。全箇所でも高炉B種よりも有機物対応セメントの方が圧縮強度は大きくなりセメント系固化材の有効性が示された。

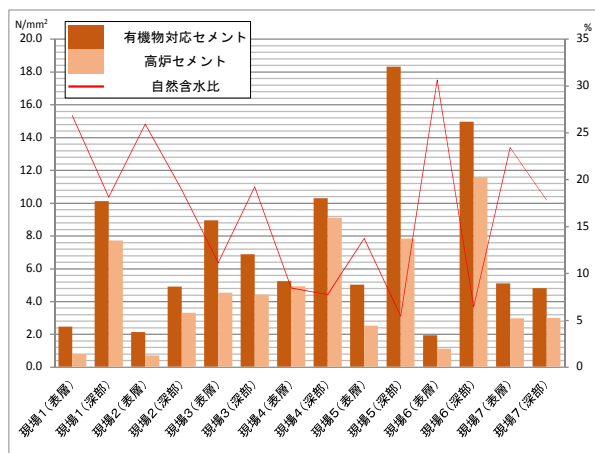


図5 圧縮強度と自然含水比の関係 (INSEM-Fタイプ)

続いて図5にINSEM-Fタイプの圧縮強度試験結果を示す。INSEM-Cタイプと同様に圧縮強度は表層よりも深部で採取した土砂の方が高く、また有機物対応セメントの方が高炉B種よりも高い発現強度が得られる結果となった。

製造方法の違いによる圧縮強度と湿潤密度の違いについて、図6に各タイプの圧縮強度試験結果、図7に湿潤密度の計測結果を示す。両工法はセメント量や製造方法に違いがあるが、同一現場の土砂を用いる場合、圧縮強度はINSEM-Fタイプの方が大きくなる。また、湿潤密度は六甲管内の風化花崗岩は礫分が少なく密度が小さい傾向から水分の多いINSEM-Fタイプの方が湿潤密度は小さくなる傾向が確認された。

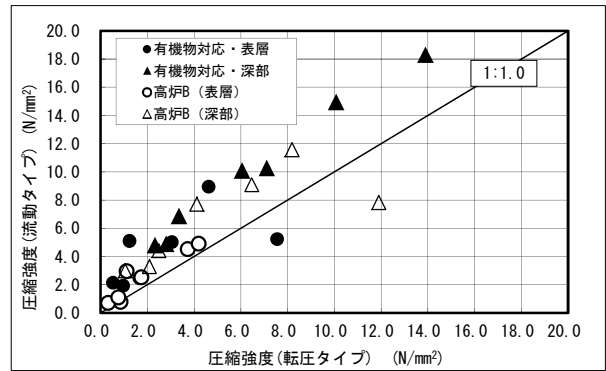


図6 INSEM-CタイプとFタイプの圧縮強度の比較

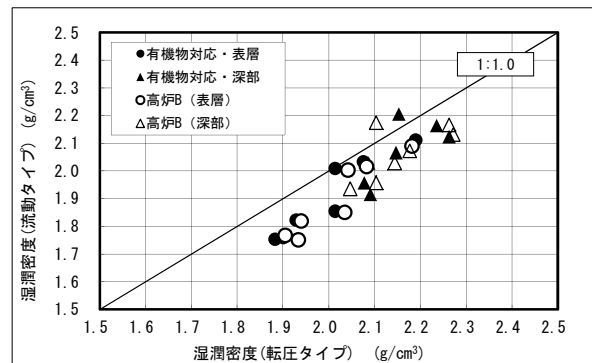


図7 INSEM-CタイプとFタイプの湿潤密度の比較

4. 砂防ソイルセメント工法の活用に関する課題

これまでに、砂防ソイルセメント工法の施工条件から見た適用選定フローや強度特性から一定の有効性を確認できた。

一方で、六甲山系の砂防工事は、密集した市街地に面する土砂災害危険箇所が大半であり、既に開発が進んでいる住宅地内を建設車両が通行することが多い。砂防ソイルセメント工法は、現地発生土砂とセメント粉体又はセメントミルクを攪拌し、堤体材料として使用することから、住宅地に近接する位置ではセメントの飛散や攪拌時の騒音等、環境に関する課題が生じる。また、砂防堰堤の建設箇所や施工箇所近傍に十分な施工ヤードが確保できない場合は、本工法の活用が困難である。このような砂防工事対象箇所の現地特性の把握が重要であるが、

近年、設計段階で砂防ソイルセメント工法を採用したものの、工事段階でソイルセメント材の「攪拌スペースが確保できない、仮置き土砂の場所がない、活土砂が不足する」などの課題も生じている。

5. 六甲砂防管内のソイルセメント材の活用の展望

本報告では、設計段階でソイルセメント材の強度のみならず現地条件を重視して活用の適否を選定するフローを作成した。また、六甲管内の大半を占めるマサ土の強度発現については、締固めによる施工のINSEM-Cタイプと有スランプ材としての活用を期待したINSEM-Fタイプの圧縮強度・湿潤密度の発現傾向や相違点を明らかにし

た。これらの2種類のソイルセメントは製造方法が異なっても概ね $2\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の圧縮強度が確認され、湿潤密度もコンクリートに比べると大きくはないものの一定の傾向が示された。六甲山系は住宅密集地での砂防工事が多く、堰堤計画位置付近にソイルセメント材の仮置場を計画することにより、掘削残土の有効活用に加えて、掘削残土の運搬が不要となることから運搬時に発生していた騒音・振動が低減される効果もある。

砂防ソイルセメント工法を活用するためには、ソイルセメント材の保管場所の確保が重要であるため、グリーンベルト整備事業によって取得済の公有地や市有地等も活用し、本工法のメリットが最大限に発揮できるように設計や施工計画を考えていく必要がある。

参考文献

1) 砂防ソイルセメント施工便覧 平成28年版

神戸地方合同庁舎耐震改修工事について ～既存建物地下空間からの地盤改良～

湯川 文哉

ケミカルグラウト株式会社 関西支店 技術営業部 (〒540-0001大阪府大阪市中央区城見2-2-22)

わが国では、近い将来に南海トラフ巨大地震の発生が予想されており、被害を最小限に抑える為にも建築物の地震対策が急務となっている。しかしながら、地震対策の目的で大規模な建て替え工事を行った場合、莫大な金額や工期が必要となる上に、一時的な拠点の移転によって業務に支障をきたすリスクがある。そこで神戸地方合同庁舎では、供用中の建物の機能を生かしつつ来庁者の動線及び執務空間を確保しながら免震化工事を実施し、建て替えに必要な費用や工期、移転等のコストを削減している。本論文では、免震化工事において【居ながら施工】を達成するために、既存建屋地下空間から高圧噴射攪拌工を実施した事例として報告する。

キーワード 既存建築物の免震化、居ながら施工、地下空間からの施工、JETCRETE工法

1. はじめに

国土交通省は1996年10月、阪神・淡路大震災による官公庁施設被害の分析をふまえて「官庁施設の総合耐震計画基準」を制定している。当工事は、神戸地方合同庁舎を災害時の防災対策指揮、支援活動及び情報伝達の拠点とするために、国交省基準を満たす官庁施設としての耐震性能確保を目的としたものである。

当工事の特徴として、次の2点が挙げられる。

- ① 建物の機能を生かしつつ、来庁者動線及び執務空間を確保しながらの施工。
- ② 建物の外観や内装を変更することなく、耐震安全性を向上させる。

外観や内装を変更しない免震レトロフィットを採用し【居ながら施工】を実現している。(写真-1)

2. 工事概要

工事名称：神戸地方合同庁舎耐震改修工事

工事場所：兵庫県神戸市中央区海岸通29番地

敷地面積： 6,756㎡

延床面積： 15,978㎡

構造種別：鉄骨鉄筋コンクリート造

階数：地下1階、地上9階、塔屋2階

軒高さ： 34.35m

基準階高さ： 3.55m

主用途：庁舎（事務所）

地盤改良工工期：2013年2月～2014年3月

地盤改良工数量：φ2.5m・218本 φ3.2m・28本

濃茶のタイルで全面を覆われており、地震時に剥落の危険性のある箇所は張替工事を行っている。(写真-2)



写真-1 神戸地方合同庁舎 工事状況



写真-2 神戸地方合同庁舎 外観

3. 工事内容

国土交通省の総合耐震計画基準により、構造体の耐震安全性をⅠ類とする必要がある。Ⅰ類では、大地震動後も構造体の補修を行うことなく建築物を使用でき、人命の安全確保に加えて十分な機能確保が図れることを目標としている。これらの条件を満たすために、庁舎の免震化工事を実施した。

(1) 免震化工事

庁舎の地下に免震ピットを構築し、免震装置を設置することで、地下駐車場を含む建物全体を基礎免震構造とした。(図-1)

免震化の利点としては、次の3点が挙げられる。

- ① 地震による激しい揺れをゆっくりした揺れに変えることで建物の変形を抑えることができる。
- ② ゆっくりと揺れることで、外壁や天井材など非構造物の脱落や破損を防ぐことができる。
- ③ 地震後も建物の継続使用が可能となる。

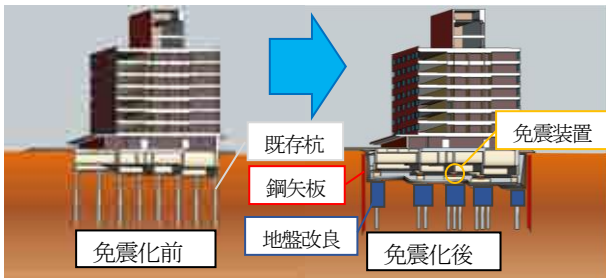


図-1 免震化イメージ図

(2) 免震化工事の手順

免震化工事について、次の①～⑨の手順で施工を行った。

- ① 庁舎外周を鋼矢板土留め壁で締切り、遮水を実施する。
- ② 庁舎と鋼矢板の間にディープウェルを設置し、締切り内部の地下水位を低下させる。
- ③ 鋼製切梁・火打ちを併用して、庁舎直下を掘削する。
- ④ 既存杭を診断・補強し、地下空間を確保する。
- ⑤ 地盤改良工事により、庁舎の直接基礎を築造する。
- ⑥ 新基礎耐圧版を築造する。
- ⑦ 油圧ジャッキにより、庁舎を仮受けする。
- ⑧ 既存杭を解体し、免震装置を設置する。
- ⑨ 免震装置設置後、仮受けを撤去する。

この中で③～⑦の期間では、既存杭のみで庁舎を支える状況となる。この期間中に地震が発生した場合、上部構造に支障をきたす恐れがあったため、既存杭の健全性を診断し、問題があった際には対策を取る必要があった。

(3) 既存杭の補強

庁舎直下掘削後に既存杭の診断を行ったところ、阪神淡路大震災の影響で一部が破損しており、支持杭としての機能を果たしていない状態であった。(写真-3)

そのため、破損箇所の補強を行い設計軸力の負担が可能な状態とした。

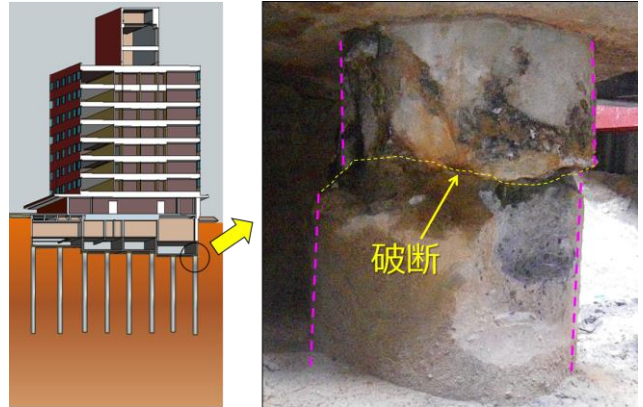


写真-3 破損した杭基礎

a) 高強度モルタル打設工

既存杭は、油圧ジャッキにより庁舎を仮受けした後に解体する手順となっていた。掘削時に露出する箇所については、破損状況を確認した上で短時間に施工可能かつ解体しやすい方法が必要であった。

そのため、破損箇所に高強度モルタルを打設して仮補強を行った。(写真-4)



写真-4 杭基礎仮補強

b) 高圧噴射攪拌工

免震ピット構築のために確保した庁舎直下の地下空間
以深の既存杭については、露出させて補強することが出来な
かったため、杭を残したまま周囲に高圧噴射攪拌工を実施して
巻き込み補強を行い、本設基礎とした。この時、既存杭は基礎部材
としては無視し、地盤改良の有効面積のみを直接基礎として設計
されている。(図-2)

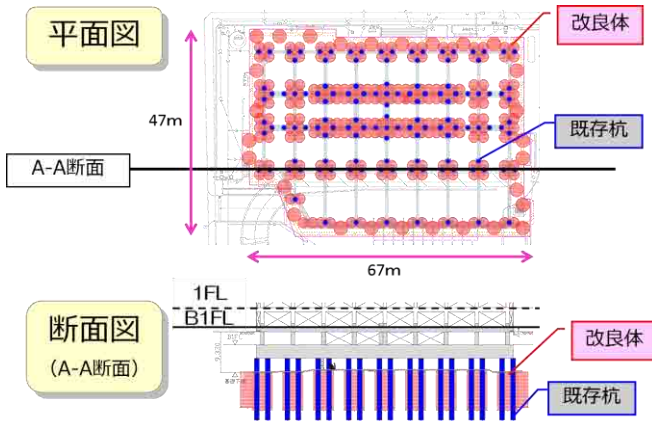
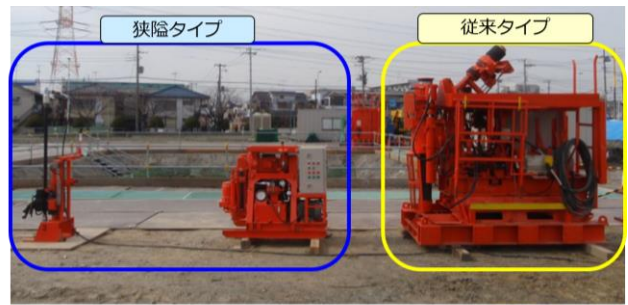


図-2 地盤改良工 平断面図



超小型機械	小型機械	標準機械
・本体重量 0.18 t	・本体重量 0.8 t	・本体重量 3.6 t
・本体L×W×H 500×550×1,200	・本体L×W×H 1,500×900×1,200	・本体L×W×H 2,500×1,700×1,600

写真-6 地盤改良施工機 比較

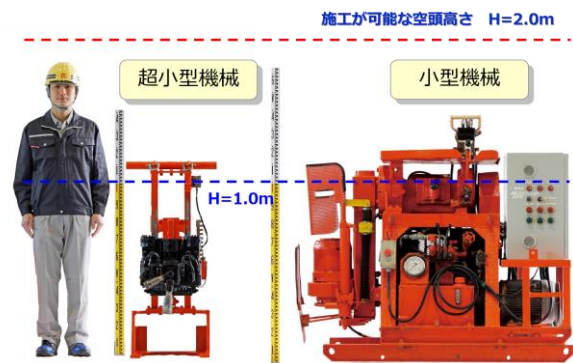


写真-7 小型施工機 大きさ比較

4. JETCRETE工法の採用

既設杭の補強工として高圧噴射攪拌工法を実施するにあたり、現場の特殊な条件によって在来工法では対応できない状況であった。そこで、様々な条件に対応可能なJETCRETE工法を採用した。

(1) 地下空間内での施工

地下空間内では空頭制限がありクレーンを使用できない為、従来の施工機では重量や大きさの関係で人力移動が出来ず、ロッドの接続も困難であった。(写真-5)

そこで、人力でも移動可能で、内空2m以下の条件でも施工可能な小型施工機を採用した。(写真-6・7)



写真-5 地下空間内 状況写真

(2) 品質の確保

当工事は仮設工事ではないため、高圧噴射攪拌工法の建築物本設仕様が適応される。改良対象範囲に粘性土が混じっていたものの、設計基準強度は $F_c=1900\text{kN/m}^2$ 以上必要であり、従来工法の配合では要求品質を満たせない状況であった。(図-3)

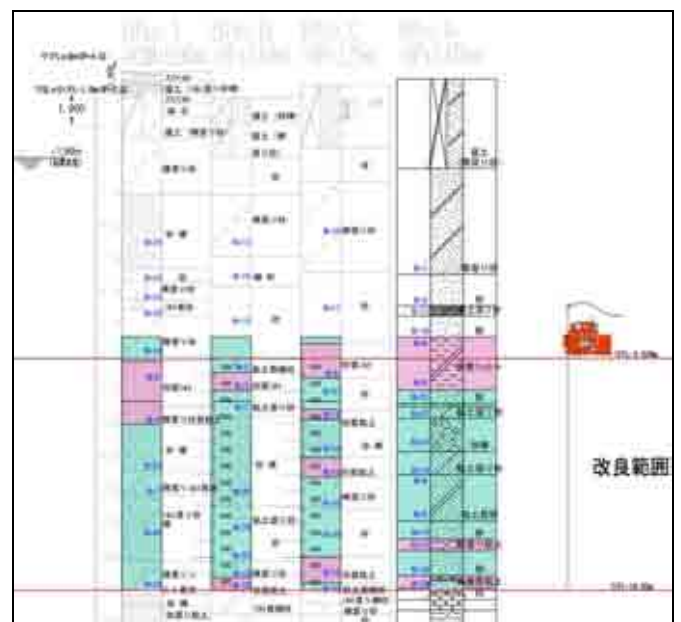


図-3 改良土質概要

そこで、要求品質を満たす為に、事前に配合試験や試験施工を実施し、施工仕様の決定を行った。(写真-8)



写真-8 試験施工実施状況

「建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針」(日本建築センター)によれば、建築物基礎としての地盤改良では、品質検査におけるボーリングコア採取率が全長に対して粘性土で90%、砂質土で95%、深さ1m毎に粘性土で85%、砂質土で90%以上必要とされている。2回にわたる試験施工の結果、上記のコア採取率を満足し、一軸圧縮試験において不良率10%強度が設計基準強度を上回る施工仕様を決定し、本施工に適応した。

(写真-9・10)



写真-9 ボーリングコア採取状況



写真-10 フェノールフタレイン液散布状況

5. 本施工での取り組み

本施工では、地下空間からの施工にて生じる様々な課題の解決に取り組んだ。

(1) プラントの配置

JETCRETE工法のプラントは機械が大型であり、地下に配置することが出来ない状態であった。そのため、地上にプラントを配置して地下まで配管を行い、施工の際は無線を使用して連絡を取り合った。また、一般歩道に隣接する箇所に配置したため、周囲の環境に配慮し防音・防塵対策を徹底した。(写真-11)



写真-11 プラント全景

(2) 排泥の処理

庁舎地下での施工において、地盤改良工後に耐圧版を築造する関係から、排泥ピットを掘って施工中の排泥を溜めることが出来ない状況であった。そのため、飛散防止箱や閉塞管にてクローズドシステムを組み、周囲に排泥が飛散しないようにした。(写真-12)



写真-12 排泥クローズドシステム

飛散防止箱に溜まった排泥については、スーパーバキューマーによって、地下から地上まで立ち上げた閉塞管を通して地上プラントの排泥貯蔵タンクまで送られ、最終的にはバキューム車で処理を行った。(写真-13)



写真-13 排泥処理状況

(3) 施工機械の移動

地下空間内でも特に狭い箇所においては、天井にケミカルアンカーを打設してウインチを設置し、施工機を吊り上げて移動を行った。(写真-14・15)



写真-14 施工機移動状況



写真-15 狭隘部施工状況

(4) ディープウェルへの対策

地下水水位低下用のディープウェルについて、JETCRETE工法の排泥で詰まり、揚水不能になる恐れがあった。そこで、改良体が干渉する深度のスリット部を鉄板で閉塞し、半径8m以内でJETCRETE工法を施工する際は揚水を停止するようにした。また、揚水停止中に施工基面が水没しないよう簡易ウェルを設置した。

(写真-16)

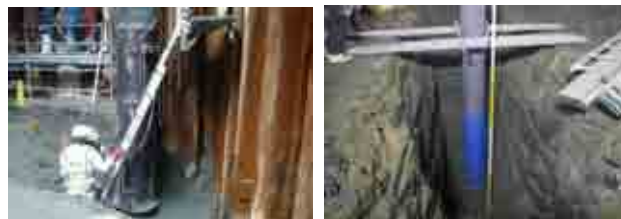


写真-16 ディープウェル対策状況

6. まとめ

既存建屋の免震化において、地下空間から既存杭を巻き込む形で高圧噴射攪拌工を実施し、本設の直接基礎として利用するという事例を紹介した。

近年、熊本地震や阪神淡路大震災、東日本大震災をはじめとする地震災害によって、貴重な人命と財産が失われていることに加え、インフラ・ライフラインの損傷や公共サービスの低下など、甚大な経済損失が発生している。さらに近い将来、東海地震や東南海・南海地震、これが連動した南海トラフ巨大地震や首都直下地震が発生するといわれており、建築物の地震対策がこれまでも増して重要になると考えられる。今回の事例は、建築物を建て替えることなく免震化工事を実施したものとして、今後の計画の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省：官庁施設の総合耐震計画基準(1996年10月)
- 2) 日本建築センター：建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針