

うめきた地区における大規模地下函体構造物の施工

Construction of Large-scale Cut and Cover Tunnel in the Umekita Area

松田 佳明*1 吉田 幸弘*1 為石 昌宏*2
Yoshiaki Matsuda Hiroyuki Yoshida Masahiro Tameishi
福田 尚弘*2 奥村 正孝*3
Naohiro Fukuda Masataka Okumura

要旨

東海道線支線北3地区T新設他工事は、JR東海道線支線地下化・新駅設置事業において、大阪駅北側に施工延長305mを開削工法（一部覆工）にて地下函体構造物を構築する工事である。この地域には梅田粘土層と呼ばれる海成粘土を中心とした軟弱地盤が分布する。この粘土層には自然由来による土壤汚染が確認されたため適切に対応する必要があった。開削工事においては、当初設計では切梁・中間杭が多数計画されていた。そこで、工期短縮と施工性の向上をはかるため、大規模地下函体構造物工事では国内初の採用となる高強度支保工を採用した。また、鉄筋コンクリート造の函体構築では温度ひび割れの恐れがあったため、温度応力解析によるひび割れ照査を実施し、低熱セメントを用いた配合と普通セメントを同一部材に上下に分割して適用するなどの対策を実施した。本報告では、うめきた地区での大規模地下函体構造物工事における技術検討や施工方法について報告する。

キーワード：開削工法、地下函体構造物、自然由来土壤汚染、高強度支保工、温度ひび割れ

1. はじめに

現在、JR大阪駅の北側エリアである通称「うめきた地区」では再開発が進んでおり、先行開発地区には複合施設・グランフロント大阪が開業し、中核をなす「ナレッジキャピタル」には多数の企業や大学、団体が入居しており、超高層ビルが建ち並んでいる。残るうめきた2期区域では、JR梅田貨物駅の移転が完了し、広大な駅跡地を利用した公民連携による魅力あるまちづくりが進められている。

この開発事業の一部であるJR東海道線支線地下化・新駅設置事業は、新大阪駅と大阪環状線福島駅を結ぶ東海道本線とは別ルートである東海道線支線のうめきた2期区域1.7kmを地下化する連続立体交差化事業と、うめきた地区の玄関口として新たに駅を新設する新駅事業からなる。本事業によって、東海道線支線により分断されていた「まち」を一体化し、踏切事故の解消や交通の円滑化、さらに、うめきた地区と関西国際空港間のアクセス向上を図り、国際競争力の強化が期待されている。

東海道線支線北3地区T新設他工事は、上記事業の一部で、大阪駅北側に施工延長305mを開削工法（一部覆工）にて地下函体構造物を構築する工事である。工事場所を図1に示す。

この地域は梅田粘土層と呼ばれる海成粘土層が堆積する軟弱地盤が分布しており、当初設計では切梁・中間杭が多数計画されていた。そこで、工期短縮と施工性向上を図

るため、大規模地下函体構造物工事では国内初の採用となる高強度支保工を採用した。また、鉄筋コンクリート造の函体構築では温度ひび割れの恐れがあったため、低熱セメントを用いた配合と普通セメントを用いた配合を同一部材の上下に分割して適用するなどの対策を実施した。さらに、掘削土に含まれていた自然由来の土壤汚染についても対応が求められた。本報告では、本工事における各種技術検討や施工方法について報告する。



図1 工事場所（北3工区）

*1 大阪本店 土木部 *2 技術本部 土木技術部 *3 環境エンジニアリング本部 環境技術部

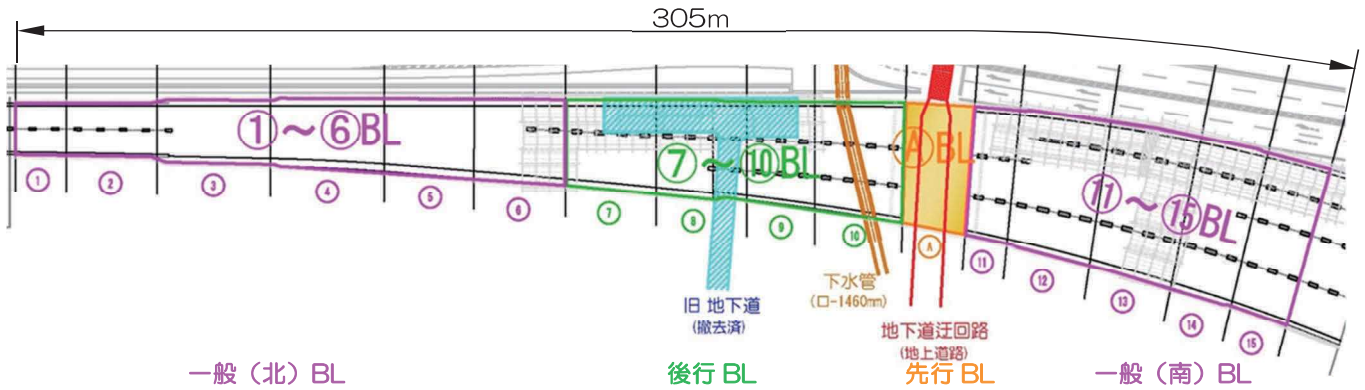


図2 施工平面図(北3工区)

2. 工事概要

東海道線支線北3地区T新設他工事の概要を表1に示す。
また、施工平面図を図2に示す。

表1 工事概要

工事名	東海道線支線北3地区T新設他工事	
工事場所	大阪市北区大深町2 付近	
工期	2016年8月22日～2021年6月30日	
発注者	西日本旅客鉄道株式会社	
施工者	鴻池組・前田建設工業共同企業体	
工事内容	仮土留工	<ul style="list-style-type: none"> ・連続壁(ECO-MW φ850) A=24,093m² ・高圧噴射攪拌(φ4.1m L=26.5m) N=8本 ・中間杭(H=300) L=26.0～34.5m N=144本 ・土工 掘削 V=108,000m³ 埋戻 V=43,000m³
	覆工板設置撤去	1式 (A=2,129m ²)
	構造物工	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート V=27,426m³ ・鉄筋 W=4,015t (D13～32) ・型枠 A=15,475m² 型枠支保工 V=12,163空m³ ・防水工 A=19,267m²
	下水管防護工	φ1,600mmFRPM管 L=33m

JR東海道線支線地下化・新駅設置事業は、約2.4kmの事業延長を6つの工区に分割されており、本工事は、駅部工区に隣接する北3工区を施工するものである。

本工事においては、工事範囲に梅北地下道(全長205m)があり、その代替歩道を地下構造物施工前に確保する必要があった。また、代替歩道直下に他事業者施工による下水管(φ2,000)を新設する必要があった。

そこで、先行BL(A)BL)を施工し他事業者者に引渡して下水管を新設した後に代替歩道を確保した。その後、地下道を撤去して後行BL(7～10)BL)を施工した。また、他事業者者施工中は一般部(一般(北):1～6)BL、一般(南)BL:11～15)BL)を併行して施工した。

2.1 施工順序

以下に本工事の施工順序の概要を示す。

① 土留工・中間杭施工

土留壁には剛性が高く止水性のよい柱列式連続土留め壁を採用した。ECO-MW工法¹⁾の採用により緻密な止水壁を構築するとともに、セメントミルクの使用量を大幅に低減し、産業廃棄物発生量を大幅に削減した。

② 掘削・路面覆工および土留支保工設置

土留支保工(1～5段)は高強度腹起および切梁を使用した(図3)。

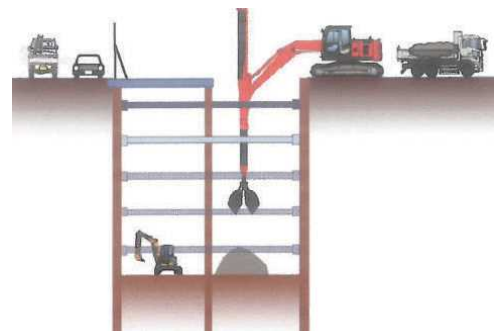


図3 土留支保工

③ 函体構築

均しコンクリート打設後、5段支保工を解体して底版コンクリートを打設した。その後、3・4段支保工を解体して側壁・柱・上床版を打設した(図4)。

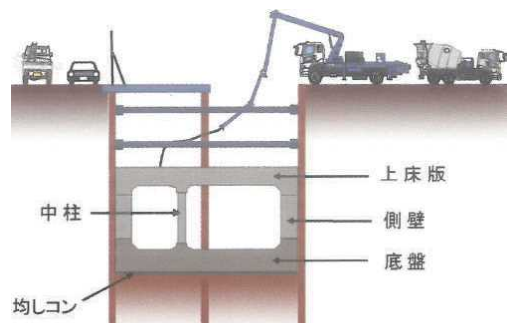


図4 函体構築

④ 埋戻しおよび仮設物撤去

1・2 段支保工を撤去し、ストックしていた掘削土砂（非汚染土壌）を流用して埋戻しを行った（図 5）。

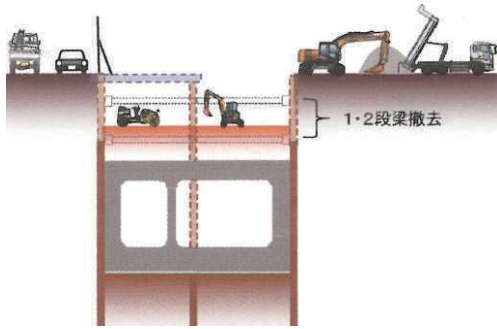


図 5 埋戻

3. 自然由来による基準不適合土壌への対応

掘削箇所の GL-5m 以深に分布する沖積粘土層（以下、Ma13 層と称す）には、土壌溶出量基準を超過する砒素、ふっ素および鉛による土壌汚染（基準不適合土壌）が存在していた。自然由来汚染土壌を含む Ma13 層の形成のメカニズム、土壌汚染の状況およびその対応について以下に示す。

3.1 大阪平野の堆積環境と自然由来による土壌汚染

一般的に、自然由来の土壌汚染の原因として主に以下の①～④が挙げられる。

- ① 鉱山近傍の土地など、岩盤そのものに含まれる重金属等
- ② 浚渫土壌を用いた埋立て由来によるふっ素・ほう素等
- ③ 岩盤中に黄鉄鉱が存在した場合に溶出する砒素等
- ④ 海水に含まれるふっ素・ほう素等

図 6 に Ma13 層の形成メカニズムを示す。本工事が位置する大阪平野周辺では、太古から数千年の単位で海水位の変動が繰り返されている²⁾。このことから、③と④が、工事箇所に自然由来の土壌汚染が存在する主原因と考えられる。

たとえば、約 12 万年前の温暖な時期には海水位が上昇してふっ素等を含む海水が陸地方向に流入し、海水中の細粒分である粘土・シルト分が堆積するため、ふっ素等を含む海成粘性土層が形成される。その後の約 2 万年前の寒冷期には海水位が低下していき、陸地の砒素を含む黄鉄鉱などの鉱石が川から海に注がれ、その際に砂や砂礫分とともに堆積し、砒素等を含む砂層・砂礫層が形成される。本工事の Ma13 層は、これらの海水位の変動の繰り返しにより、ふっ素や砒素等が含まれるようになったと考えられる。

図 7 に大阪平野における Ma13 層の推存在定範囲³⁾を示す。図に示すように広範囲に、自然由来による基準不適合土壌が存在する可能性が高く、存在推定範囲を掘削する場合には、自然由来の土壌汚染の存在に留意が必要である。

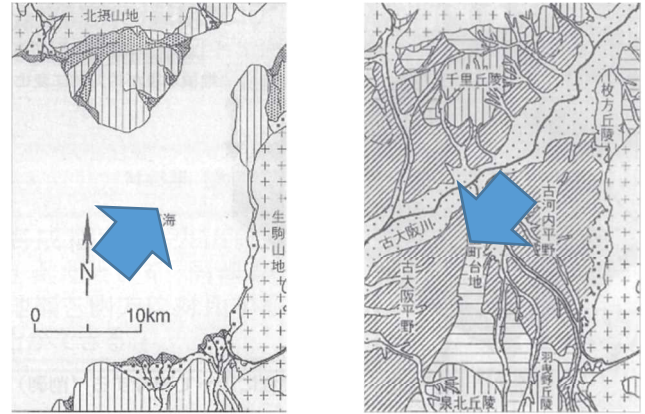


図 6 大阪平野における Ma13 層の形成²⁾



図 7 Ma13 層の存在推定範囲³⁾
(土壌汚染対策コンソーシアムの土壌汚染 GIS より)

3.2 自然由来による土壌汚染の状況と対応

うめきた地区では、自然由来の土壌汚染を含む Ma13 層が GL-5m 以下に存在する⁴⁾。それに対し、本工事で函体を構築する深度は約 GL-15m 付近であり、この Ma13 層を掘削することから、自然由来の基準不適合土壌が含まれている掘削土を適切に処分する必要があった。

土壌を事前に分析した結果、本工事における Ma13 層の汚染状態（土壌溶出量）は以下の通りであった。

- ・ 砒素：最大 0.067mg/L（基準：0.01 mg/L 以下）
- ・ ふっ素：最大 1.5mg/L（基準：0.8 mg/L 以下）
- ・ 鉛：最大 0.017 mg/L（基準：0.01 mg/L 以下）

そこで、掘削した自然由来の基準不適合土壌は市外の汚染土壌処理施設へ運搬し処理した。クラムシェルで掘削した基準不適合土壌はダンプトラックに直接積み込み、搬出前にダンプの荷台上部に運搬時の飛散・流出を防止するためのシート養生を実施した。シートを取付ける際は、安全にシートがけ作業をするための専用のシート掛け用架台（写真1）を設置し、荷台上面のシートを隙間がないよう取り付け、ロープで固定した。

また、ダンプトラックには、「汚染土壌運搬車」のステッカーを明示（写真2）し、搬出汚染土管理票により車両1台ずつ搬出管理を行った。その結果、人々が密集する都市部において、自然由来による基準不適合土壌を飛散させることなく安全に運搬・処分することができた。



写真1 シート掛け架台



写真2 汚染土壌運搬車のステッカーによる明示

4. 高強度支保工材の採用

本工事では、GL-5~20m程度にある沖積粘土層(Ma13層)に函体を構築する必要があった。この沖積粘土層はN値が0~5程度の軟弱地盤であることから、当初設計では土留支保工において切梁・中間杭が多数必要となる設計になっていた。これにより、土留支保工と中間杭の施工数量が多く、函体構築の施工方法が複雑化し、工程が長期化する問題が生じていたため、腹起・切梁材に高強度支保工材を採用することとした。大規模地下函体構造物工事での高強度支保

工材の採用は国内初の試みであったため、事前に施工手順や安全性の確認を入念に行った。また、土留支保工の設置期間中は、切梁軸力および変位、ボルト軸力、土留壁変位等を常時モニタリングして監視した。

4.1 高強度部材

腹起には、曲げ耐力の大きい高強度腹起材ヒロセメガビーム®(H-800×400×16×36)を採用した。図8に断面形状を、表2に断面性能比較を示す。この腹起材は、高強度材SM490を用い、断面係数はH-500腹起材の1.8倍と大きく、H-500腹起材を2段重ねたときと同等以上の耐力を有している。

切梁には、座屈性能の高い高強度切梁専用材ヒロセツインビーム®(2H-390×300×10×16)を採用した。図9に断面形状を、表3に許容応力度の比較を示す。切梁スパン12.5mのときの採用部材毎に圧縮応力度を算出すると、本切梁材はH-500切梁材に比べ、弱軸まわりの許容軸方向圧縮応力度で1.7倍、許容曲げ圧縮応力度1.4倍の耐力を有している。

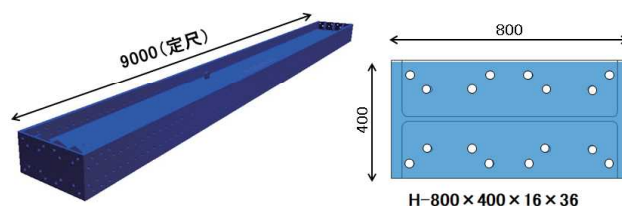


図8 高強度腹起材 (ヒロセメガビーム®)

表2 ヒロセメガビーム®の断面性能比較⁵⁾

山留材種別	断面積 A (cm ²)	断面二次モーメント I _x (cm ⁴)	断面係数 Z _x (cm ³)	材質
H-400	197.7	59,000	2,950	SS400
H-500	337.5	146,000	5,840	SS400
メガビーム	371.3	423,000	10,600	SM490

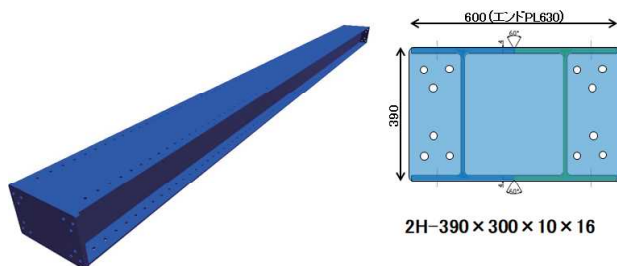


図9 高強度切梁専用材 (ヒロセツインビーム®)

表3 切梁の許容応力度の比較⁶⁾

山留材種別z	弱軸周りの許容軸方向圧縮応力度 σ_{caz} (N/mm ²)	許容曲げ圧縮応力度 σ_{bagy} (N/mm ²)
H-400	85.1	118.2
H-500	104.7	139.8
ツインビーム	175.1	201.2

(切梁スパン12.5mのとき、カタログ値より計算)

また、高強度腹起材の採用にあたっては、プレロードにおける切梁のたわみ量や継手部のボルト接合のゆるみの有無等について実際の施工条件に則した実験を事前に実施して結果の検証を行い、部材の適用に問題がないことを確認した。

4.2 高強度支保工材の効果

本工事において、土留支保工の当初設計と高強度支保工材を採用した変更設計の土留支保工平面図を図10に、架設状況を写真3に示す。

切梁スパンの最大長は、6.5m から 12.5m へと約2倍に、また、切梁の最大設置間隔も3m から5m へと広げることができた。それに伴い、切梁設置本数は全5段で計550本から325本に削減（約40%減、先行BLを除く）された。切梁の座屈スパン長が広がったことで、中間杭の本数が485本から144本と大幅に削減（約70%減）することができた。

これらの切梁や中間杭の数量の大幅な削減により、土留めの設置、撤去に要する期間を大幅に短縮することができた。また、切梁間隔が広がったことにより、函体構築において施工空間が大きくなり、より一層スピーディーでかつ安全な施工が可能となり、中間杭の打設および土留支保工の設置・撤去に掛かる工程を大幅に短縮することができた。

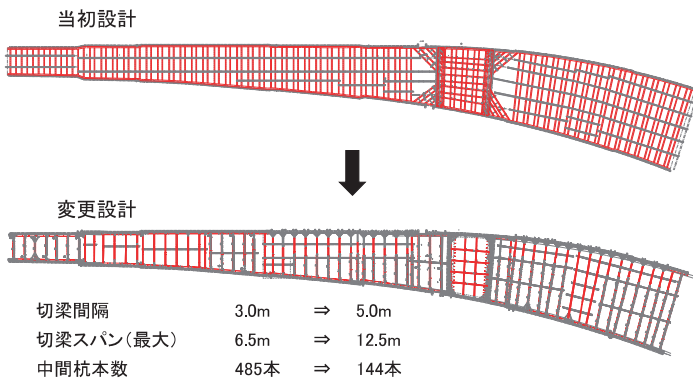


図10 土留支保工平面図（2段目）



写真3 高強度支保工材の架設状況

5. 函体の温度ひび割れ対策

本工事で構築する鉄筋コンクリート造の函体は総延長305mあり、計16ブロックに分割して施工を実施した。本工区における函体の形状は、駅部に向かって断面が拡大しており、床版厚は0.6m～2.0m、壁厚0.6m～1.7mである。

函体コンクリートの施工は、底版を打設した後、側壁、上床版の順で打設を行うため、先行リフトに拘束される側壁および上床版にひび割れが発生する可能性があった。以下に、打設ブロックのうち部材厚の大きな5BLを例に、温度応力解析によるひび割れ照査とその対策について述べる。

5.1 解析モデルおよび条件

5.1.1 照査方法

ひび割れの照査は、2012年制定コンクリート標準示方書【設計編】に記載の方法により、式(1)を満足するか否かの照査を行った。

$$I_{cr}(t) \geq \gamma_{cr} \quad (1)$$

ここに、 $I_{cr}(t)$ ：ひび割れ指数

γ_{cr} ：ひび割れ発生確率に関する安全係数

検討では、温度ひび割れの制御水準を「ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合」とし、目標とするひび割れ指数を1.0以上に設定した。また、ひび割れ指数が1.0以上であっても、ひび割れ指数と鉄筋比の関係から算出されるひび割れ幅が0.2mm未満となるように、ひび割れ幅制御鉄筋を配置することとした。

5.1.2 解析手法および解析モデル

コンクリートの温度は非定常熱伝導解析を、応力はコンクリートの温度およびヤング係数の変化を考慮した応力解析を、いずれも三次元有限要素法を用いて実施した。

5BLの断面を図11に、解析モデルを図12に示す。構造物の対称性から1/4対称モデルとした。1リフト部の底版は既設コンクリート（非発熱体）として、また、ひび割れ誘発目地を当初設計の5m間隔としてモデル化した。

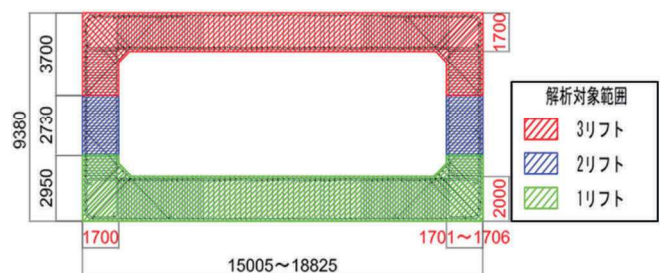


図11 5BL断面

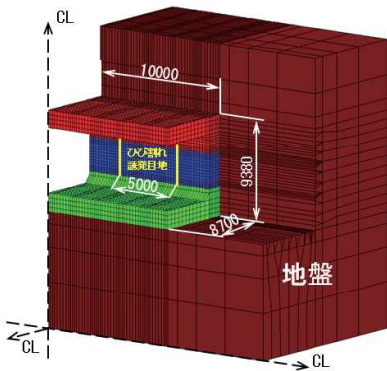


図 12 解析モデル

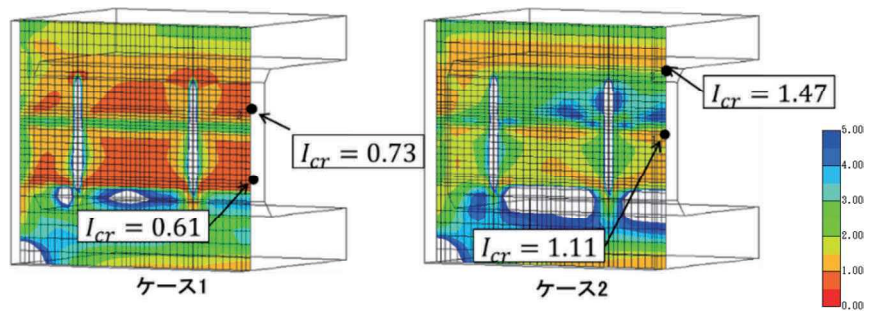


図 14 解析結果（最小ひび割れ指数の分布）

5.1.3 解析ケース

解析ケースを図 13 に示す。ケース 1 は当初設計、ケース 2 は対策案である。ひび割れ指数 1.0 未満となった場合の対策とし、当初配合の普通ポルトランドセメント（以下、普通 C と称す）を低熱ポルトランドセメント（以下、低熱 C と称す）に変更することとした。なお、対策案は、経済性を考慮し、低熱 C の使用範囲が必要最小限となるように、低熱 C の適用範囲を変化させ、その範囲を解析によって求めた。その結果、対策案であるケース 2 では、2 リフト部および 3 リフト部の打継位置より 2,000mm まで（上床版下面まで）を低熱 C とした。

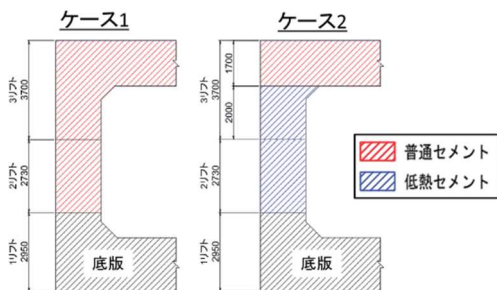


図 13 解析ケース

5.1.4 解析結果

図 14 に最小ひび割れ指数の分布を示す。当初設計であるケース 1 では、最小ひび割れ指数は 2 リフト部が 0.61、3 リフト部（側壁部）が 0.73 となり、1.0 を大幅に下回る結果となった。対策案であるケース 2 では、最小ひび割れ指数は 2 リフト部が 1.11、3 リフト部が 1.47 となり、当初設計に比べ大幅に改善する結果となった。

なお、対策案の 2 リフト部および 3 リフト部のひび割れ幅について、鉄筋比とひび割れ指数から照査すると、2 リフト部では 0.24mm (NG)、3 リフト部では 0.17mm (OK) となった。2 リフト部についてはひび割れ幅制御鉄筋として D13 を 250mm ピッチで追加配置し、想定されるひび割れ幅

を 0.2mm 未満となるようにした。

5.1.5 3 リフトの打ち重ね部の検討

3 リフト部では、上床版のハンチ部までを低熱 C の配合で打設した後、ハンチ部より上は普通 C の配合を打ち重ねて打設することとした。そのため、ハンチ部の打ち重ね部において、両配合がまだ固まらない間に混合する箇所が発生する。そこで、両配合が混合した場合でも、硬化性状に問題が生じないことを確認するために、試験練り時および実施工において両配合を混合した試料で圧縮試験用の供試体を作製し、品質を確認した。

6. まとめ

本工事は、高層ビルが多数隣接し、人々が集中する大都市部において、自然由来の土壤汚染を含む軟弱地盤を開削し大規模地下構造物を構築するという高難度なものであった。様々な課題に対し、発注者と検討を重ねることにより無事工事を終えることができた。本報告が今後の同種工事の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) ECO-MW 工法協会ホームページ、<http://www.eco-mw.jp/> (2021 年 4 月閲覧)
- 2) 伊藤浩子：大阪平野の成り立ちと浅層地盤の特徴、第 60 回土壤汚染対策普及啓発セミナー資料、2019. 8
- 3) 大図啓史、平田健正ほか：利用用途に応じた土壤汚染 GIS の基礎データの検討、第 22 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究会講演集、pp. 83-87、2016. 6
- 4) 伊藤浩子、勝見武：土壤汚染対策法に基づく調査結果からみた西大阪地域における自然由来重金属等の土壤溶出量の特徴、地盤工学ジャーナル、Vol. 15、No. 1、pp. 119-130、2020
- 5) ヒロセメガビーム®カタログ
- 6) ヒロセツインビーム®カタログ