

大深度円形立坑用 RC 連壁の設計・施工に関する合理化と品質向上に対する取り組み

山口 哲司¹・河村 彰男²・佐藤 嘉之³

¹正会員 株式会社熊谷組 土木事業本部土木設計部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1)
E-mail: teyamagu@ku.kumagaigumi.co.jp

²正会員 株式会社熊谷組 技術本部技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪 1043)
E-mail: akio.kawamura@ku.kumagaigumi.co.jp

³正会員 株式会社熊谷組 首都圏支店土木事業部土木部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1)
E-mail: yonakaga@ku.kumagaigumi.co.jp

RC 連壁は遮水性がよく、剛性が大きいことから、大深度のシールド工用立坑として利用されることが多いが、近年、建設コスト削減を目的とした薄肉化に伴い、高強度化される傾向にある。そのため、シールドマシンによる直接切削に関する懸念や、温度ひび割れに伴う漏水の懸念から、RC 連壁の設計や施工に関する合理化が求められている。そこで、本工事では設計手法の見直しや、スランブフロー管理の高流動化された普通コンクリートの採用、現場打設実験による水中気中強度比の見直し等、多数の設計・施工に関する合理化への取り組みを行ったので、それら結果について報告する。

Key Words: diaphragm wall, circular deep shaft, efforts to improve the quality, fluidized Concrete

1. はじめに

近年、リニア中央新幹線や東京外かく環状道路等の大深度トンネルプロジェクトが進行しており、シールド工用の立坑として大深度の立坑が多く計画されている。

また、構造物の大型化・大深度化に伴い、建設コスト削減を目的として、仮設物である RC 地下連続壁 (以下、RC 連壁) が薄肉化され、そのことによって、コンクリートが高強度化される傾向にある。本工事においても、壁厚 1.3m、呼び強度 70N/mm² の高強度コンクリートによる RC 連壁が計画された。

一方、大深度や高水圧下でのシールドの発進・到達においては、仮壁撤去作業の省略と安全性の向上を目的に、直接切削工法が採用されるケースが多くなっており、本工事では NOMST 工法による直接切削が採用された。

本工事で計画されたような高強度の RC 連壁では、シールドマシンによる直接切削の不可や、温度ひび割れに伴う漏水に対して懸念があることから、本工事では RC 連壁の設計および施工に関する合理化とコンクリートの品質向上を目的に、RC 連壁に関する多数の取り組みを行ったので、それら結果について報告する。

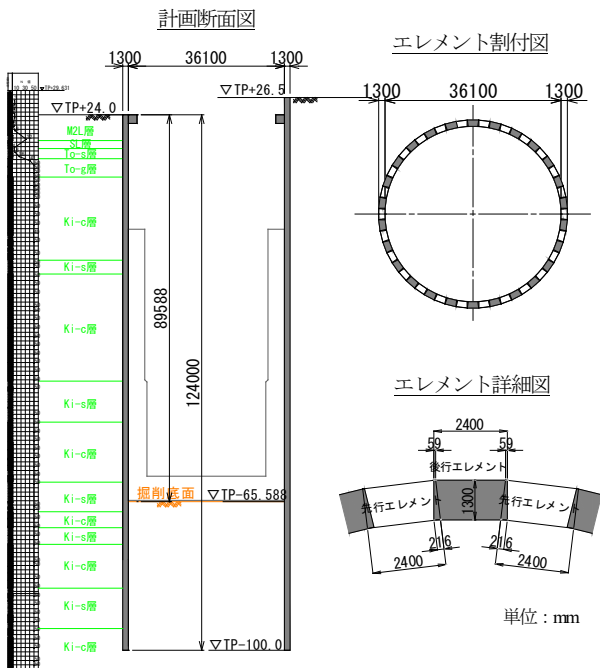
2. 工事概要

本工事は、東海旅客鉄道株式会社が建設を進めている中央新幹線における非常口の新設工事で、RC 連壁を仮設土留めとして、大規模かつ大深度の円形立坑を構築するものである。図-1 に立坑計画図を示す。

本立坑は、図-1 に示すように、連壁長 124.0m、内径 36.1m、連壁厚 1.3m、掘削深度 89.6m の円形立坑で、先行エレメント、後行エレメントともに 1 ガット 1 エレメント、合計 52 エレメントで構築され、エレメント間の継手はコンクリートカッティング工法が用いられた。

3. RC 連壁コンクリートの課題

当初計画における RC 連壁の設計基準強度および呼び強度、配合強度を表-1 に示す。『コンクリート標準示方書 施工編 (以下、コンクリート標準示方書) 』¹⁾ では、RC 連壁に用いる水中コンクリートは、過去の実績から安定液中での打設時の強度を気中打設時の強度の 0.7 倍程度としており、本工事においても設計基準強度 49.0N/mm² の連壁コンクリートは、水中気中強度比 (以

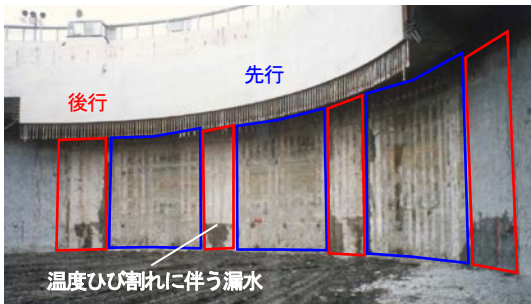


先行エレメント：1ガット1エレメント，計26エレメント
 後行エレメント：1ガット1エレメント，計26エレメント

図-1 立坑計画図

表-1 当初計画におけるコンクリート強度

設計基準強度 (N/mm ²)	49.0
呼び強度 (N/mm ²)	70.0
配合強度 (N/mm ²)	84.0
水中気中強度比	0.7



先行エレメント：3ガット1エレメント
 後行エレメント：1ガット1エレメント

写真-1 温度ひび割れに伴う漏水（事例）

下、気中強度比)を考慮して呼び強度 70.0N/mm²と計画され、その配合強度は 84.0N/mm²と非常に高強度となった。また、青木ら³⁾は、本工事のような大深度立坑においては、打設されたコンクリートは自重加圧によりさらに強度が増加すると報告しており、シールドマシンによる直接切削を行うトンネル開口部付近のコンクリート強度は 100N/mm²を超えるものと想定された。

そこで、施工に先立ち切削実験を実施したところ、圧縮強度が 70N/mm²のコンクリートは時間をかければ切

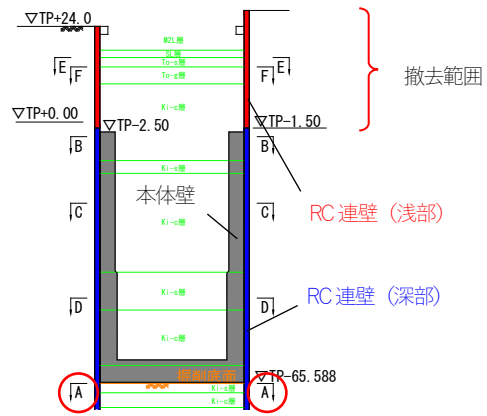


図-2 2次元モデルの設計断面位置 (A～F断面)

表-2 解析モデルおよび必要強度

	当初設計	変更
解析モデル	等圧 (土圧+水圧) 2次元モデル	 3次元モデル
設計基準強度	49N/mm ²	40N/mm ²

削可能であったが、100N/mm²を超えるコンクリートの直接切削は非常に困難であることが確認された。

また、一般的に RC連壁の後行エレメントは、先行エレメントに拘束されるため、写真-1に示すような水平方向の温度ひび割れに伴う漏水が発生しやすい。本工事においては、先行エレメント、後行エレメントともに1ガット1エレメントの合計52エレメントで構築されるため、後行エレメントとなる26エレメントで温度ひび割れの発生が懸念された。

4. 設計・施工に関する合理化への取組み

(1) 解析方法の見直し

図-2に当初設計における設計断面位置を示す。一般的な設計においては、2次元モデルで解析を行うため、主応力が発生する方向をモデル化することが多く、円形立坑においては、円形状によるリング効果から水平方向のリングモデルで解析が行われる。本工事の RC連壁においても同様に、水平方向のリングにモデル化され、側圧が最も大きくなる床付け位置 (A-A断面) でコンクリートの設計基準強度が決定された。

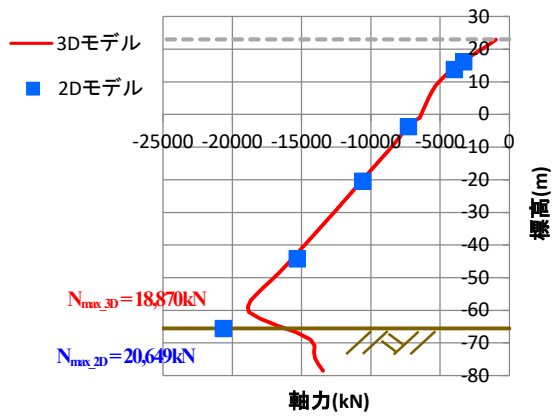


図-3 水平方向軸力の深度分布

表-3 深部と浅部のコンクリート強度

	深部 (配合①)	浅部 (配合②)
設計断面 (深度)	TP-59.0m	TP-1.5m
発生軸力	18,870 kN	6,681 kN
設計基準強度	40 N/mm ²	30 N/mm ²

しかし、円形立坑の実挙動として、床付け位置では地盤の受働抵抗によって軸力が低減されるため、最大軸力は床付け面より浅い位置で発生する。そこで、これら特徴を解析に取込み合理的な設計を行うため、本工事においては3次元 FEM モデルを用いて修正設計を行った。

2次元モデルおよび3次元モデルの解析モデル図と各解析モデルより算出されるコンクリートの設計基準強度を表-2に、2次元モデルと3次元モデルによる水平方向軸力の深度分布図を図-3に示す。

図-3および表-2に示すように、2次元モデルの最大軸力が20,649kNであるのに対し、3次元モデルの最大軸力18,870kNと約1,800kN低減され、また、偏側圧による曲げモーメントも根入れ地盤の拘束により小さくなることから、コンクリートの設計基準強度も49N/mm²から40N/mm²に低減された。

(2) 浅深度でのコンクリート強度の変更

a) 浅深度でのコンクリートの必要強度

図-3に示すように、RC連壁の水平方向軸力は深度に比例して大きくなり、それに伴ってコンクリートの必要強度も大きくなる。そのため、コンクリートの設計基準強度は深部の断面力が大きい断面で決定され、それが浅部まで適用される。しかし、本工事では次工事で立坑上部に建築物が構築され、その際に図-2に示す範囲のRC連壁が一部撤去されることや、経済性を考慮して、浅部の設計基準強度を低減する計画とした。表-3にRC連壁深部と浅部のコンクリート強度の比較を示す。

b) 遷移領域の設定

一般的にRC連壁のコンクリートは、トレミーを用いて打設され、打設途中でコンクリートを変更した場合、

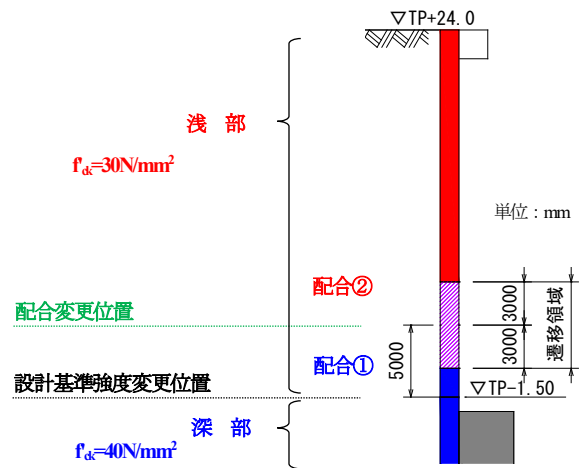


図-4 遷移領域

切替え位置において両者のコンクリートが混ざり合う遷移領域が生じると想定される。既往の報告⁴⁾によると遷移領域はトレミー下端から±3m程度とされており、また、「5.(3) 異なるコンクリートの混用に対する確認試験」で述べるように、生コンの品質管理が十分になされ、所要の強度を満足している2種類のコンクリートを混用した場合、混用後の圧縮強度は混用前の単独での圧縮強度の間にあることを確認している。

そこで、本工事においては、図-4に示すように遷移領域を考慮して、設計基準強度の変更位置から上方5.0mまでトレミーが引き上げられたことを確認してからコンクリートの仕様を変更した。

(3) 水中気中強度比の見直し

a) 既往の指針による規定

RC連壁のコンクリートのように安定液中に打設されるコンクリートは、①自然地山を型枠とする、②締め固めができない、③水中あるいは安定液中で施工する、④目視検査による確認ができない等の理由で、気中で打設されるコンクリートと比べて品質が劣るとされていることから、気中強度に対して強度低減する必要がある、『鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物 (以下、基礎標準)』²⁾では、泥水 (安定液) 比重やコンクリートの種類、強度によっても気中強度比が規定されている。表-4に呼び強度が50N/mm²未満の普通コンクリートに対する気中強度比を、表-5に呼び強度が50N/mm²を超える高流動コンクリートの気中強度比を抜粋して示す。

b) 打設実験による水中気中強度比の確認

本工事では「5.(1) スランプフロー管理の普通コンクリートの採用」で述べるように、RC連壁コンクリートの品質向上を目的として、普通コンクリートにおいても、高流動化したスランプフロー55cmのコンクリートの採用を試みた。表-6に本工事で計画したRC連壁の設計基準強度と呼び強度、気中強度比の関係を示す。

安定液の比重を 1.10 以下で管理し、材料分離抵抗性が高く、水中における自己充填性も高い高流動コンクリートを用いた場合、気中強度比を 0.7 とすることは過大と考えられ、また、過度にセメント量を多くすることは、温度ひび割れ等の品質低下を招く恐れがあった。

そこで表-7 に示す呼び強度 38N/mm² および 50N/mm² の高流動コンクリートが、気中強度比 0.8 を満足することを確認するために実施工を想定した現場打設実験を行った。現場打設実験では、写真-2 および図-5 に示すような実寸大の型枠内に比重 1.10 の安定液を満たし、トレミーによりコンクリートを打設した。

表-4 呼び強度が 50N/mm² 未満の普通コンクリートに対する気中強度比²⁾を抜粋

施工条件		施工修正係数 (気中強度比)	
打込み時の状態	施工法、施工部位	打込み時の泥水比重に関する施工管理条件	圧縮強度 引張強度 曲げ強度 支圧強度
水中施工	・オールケーシング工法 ・自然泥水 ^{※1} またはCMC系安定液 ^{※2} を用いたリパース工法 およびアースドリル工法	泥水比重 1.04 以下	0.8
		なし	0.7

※1 補助的にベントナイトを使用する場合でもベントナイト濃度が3%未満で、あれば自然泥水としてよい

※2 CMC (Carboxy Methyl Cellulose, ポリマー) を主成分とする安定液で、新液の状態ベントナイトの配合率が3%未満のもの

表-5 呼び強度が 50N/mm² を超える高流動コンクリートに対する気中強度比²⁾を抜粋

(呼び強度: 50N/mm² を超え 60N/mm² 以下, スランブフロー: 50~60cm)

施工条件		施工修正係数 (気中強度比)	
打込み時の状態	施工法、施工部位	打込み時の泥水比重に関する施工管理条件	圧縮強度 引張強度 曲げ強度 支圧強度
水中施工	・オープンケーソンの底スラブ ・オールケーシング工法 ・リパース工法 ・アースドリル工法	泥水比重 1.10 以下	0.8
		なし	0.7

表-6 設計基準強度と呼び強度、気中強度比

		深部	浅部
安定液比重		1.10 以下	1.10 以下
設計基準強度		40 N/mm ²	30 N/mm ²
呼び強度	気中強度比 0.7	58 N/mm ²	45 N/mm ²
	気中強度比 0.8	50 N/mm ²	38 N/mm ²

表-7 コンクリートの配合表

呼び強度	コンクリートの種類	スランブフロー cm	粗骨材最大寸法 mm	セメントの種類	W/C %	空気量 %	細骨材率 %	単位重量 (kg/m ³)					
								水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
38	普通	55	20	M	45.4	4.5	51.8	168	370	912	868	5.37	(シーカメント1100NT V)
50	高強度	55	20	M	42.6	3.0	52.3	168	395	930	868	6.12	(シーカメント1100NT V)

コア抜きによる供試体 (以下、コア供試体) 採取位置を図-5 に、材齢 91 日の圧縮試験結果を表-8 に示す。表-8 に示すように、コア供試体の強度は、設計基準強度だけでなく呼び強度も上回っていることが確認できる。また、最下段で採取した供試体は他に比べて強度低下が小さい傾向にあるが、これは自重により締めめられた影響と考えられる。反対に最上段では、トレミー先端をコンクリートに挿入できないことから、安定液を巻き込んでしまい、他に比べて強度低下が大きい箇所がある。ただ



写真-2 現場打設実験の状況

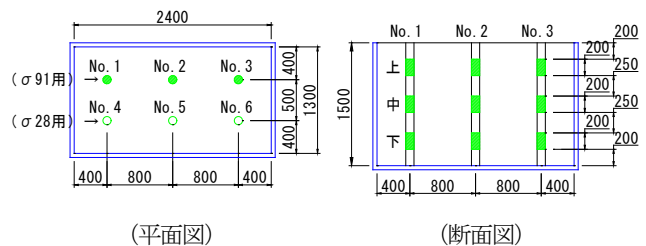


図-5 型枠寸法および供試体採取位置図

表-8 圧縮強度試験結果一覧 (材齢 91 日)

配合	50 55 20 M				38 55 20 M				
設計基準強度	40 N/mm ²				30 N/mm ²				
管理材齢	91 日				91 日				
供試体 (現場水中養生)	67.9 N/mm ²				58.3 N/mm ²				
コア供試体 (N/mm ²)		上	中	下	平均	上	中	下	平均
	No.1	61.6	55.7	65.8	61.0	41.8	51.4	57.1	50.1
	No.2	52.2	59.6	68.8	60.2	49.1	50.9	55.1	51.7
No.3	63.7	58.1	63.0	61.6	38.8	48.6	56.8	48.1	

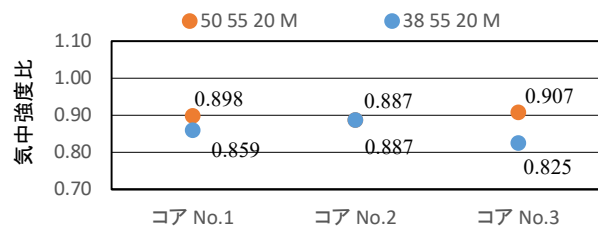


図-6 気中強度比 (材齢 91 日, 平均値)

し、実施工においては設計天端より600mm程度余盛りを行い、安定液混じりの脆弱なコンクリートをバキュームポンプで除去するため、上部の強度低下は発生しないものと考えられる。

次に、コア供試体と現場水中養生を行った供試体の強度比を図-6に示す。前述したように最上段の安定液を巻き込んだ供試体は、他と比べて強度低下しているが、それらを含んだ平均値であっても気中強度比は0.8を上回っており、表-5に示す基礎標準²⁾の適用範囲外においても、安定液比重を1.10以下で管理し、トレミーを用いて打設することによって、気中強度比を0.8とすることが可能であると考えられる。

5. コンクリートの品質向上に対する取組み

(1) スランプフロー管理の普通コンクリートの採用

前述したように本工事に於いては、浅部の呼び強度38N/mm²の連壁コンクリートに高流動化したスランプフロー55cmの普通コンクリートを採用した。気中強度比を過度に小さくしないことや、コンクリートの充填性確保、品質向上が主な目的であったが、背景として2019年JIS A 5308の改正に伴い、普通コンクリートにスラン

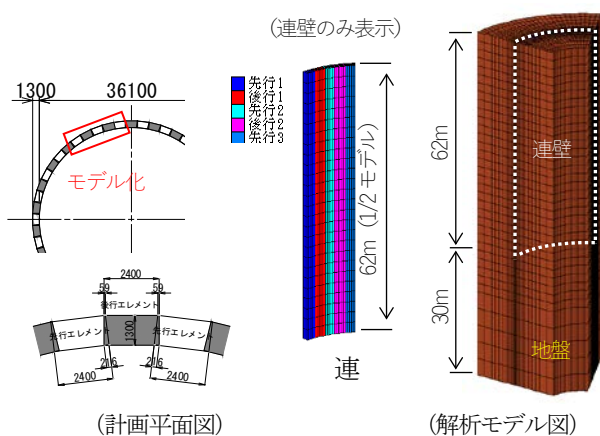


図-7 解析モデル図

表-9 本工事で採用した温度ひび割れ対策

	対策工	対策工の効果
対策1	設計基準強度，気中強度比の見直し	セメント量の低減
対策2	低発熱型セメントへの変更	水和熱の抑制
対策3	管理材齢（91日）の変更	セメント量の低減
対策4	補強鉄筋の追加	ひび割れ幅の抑制

プフローが追加されたことを受けて、JISプラントであれば対応可能であったことから採用に至った。

打設実験の結果、図-6に示すように呼び強度50N/mm²の高強度の高流動コンクリートと比べて若干の強度低下は見られるものの、安定液中においても高品質なコンクリートを打設することが可能であることが確認できた。

(2) 温度ひび割れ対策

a) RC連壁の温度ひび割れ

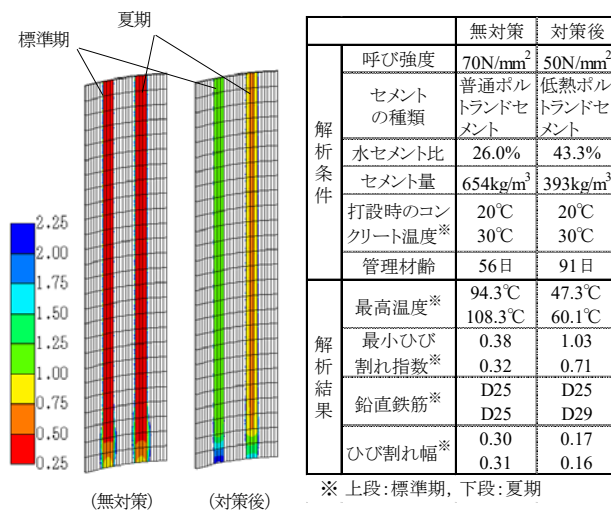
一般的にRC連壁は、後行エレメントの温度降下時の収縮変形が先行エレメントに拘束されるため、写真-1に示すような漏水を伴う水平方向の貫通ひび割れが後行エレメントに発生しやすい。

また、本工事に於いては、コンクリート打設時間の制約から、図-1に示すように先行、後行エレメントともに1ガット1エレメントで計画されたため、全52エレメントの半数の26エレメントが後行エレメントとなり、広範囲に及ぶ温度ひび割れの発生が懸念された。

b) 本工事に於ける対策

施工に先立ち温度応力解析を実施したところ、後行エレメントの最小ひび割れ指数は0.32となり、1.0を大きく下回る結果となった。

そこで、本工事では前述した設計基準強度や気中強度比の見直しに加えて、低発熱型セメントへの変更、その他に表-9に示す対策工を実施した。管理材齢の見直し



先行エレメントは非発熱体としてモデル化

図-8 温度応力解析結果（最小ひび割れ指数）

表-10 コンクリートの配合表

	呼び強度	コンクリートの種類	スランプフロー cm	粗骨材最大寸法 mm	セメントの種類	W/C %	空気量 %	細骨材率 %	単位重量 (kg/m ³)					
									水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
無対策	—	70	高強度	60	10	N	26.0	4.5	43.1	170	654	655	885	12.75
対策工	先行エレメント	50	高強度	55	20	M	42.6	3.0	52.3	168	395	930	868	6.12
	後行エレメント	50	高強度	55	20	L	37.6	3.0	51.6	165	439	904	868	6.80

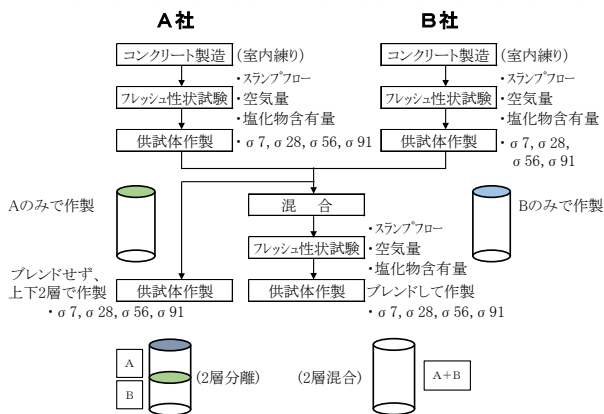


図-9 混用試験練りフロー図

表-11 混用試験練り組合せケース

プラント	混和剤メーカー	38 55 20M		50 55 20M	50 55 20L	
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
A社	f社	○	○			
B社	f社			○	○	
C社	t社					○
D社	b社	○			○	
E社	b社					○
F社	n社		○	○		

に関しては、最終エレメントのコンクリートの打設からRC連壁に側圧が作用する内部掘削開始まで、RC連壁構築設備撤去や頭部の補強リングの構築、掘削準備等で3ヶ月以上要することから、管理材齢を91日とすることでセメント量の低減を図った。また、低発熱型セメントに関しては、最初は先行エレメント、後行エレメントともに現場打設実験で用いた中庸熱ポルトランドセメントの適用を考えたが、温度応力解析結果を踏まえて、後行エレメントにはより水和熱の抑制効果が高い低熱ポルトランドセメントを用いた。温度応力解析モデルおよび温度応力解析結果を図-7、図-8に、配合表を表-10に示す。

図-8に示すように対策工によって、標準期においては、最小ひび割れ指数が0.38から1.03に改善され、夏期においても、鉛直方向の鉄筋をD25からD29に1ランクアップする程度でひび割れ幅を0.2mm以下に抑制することができた。また、実施工では、目立ったひび割れは発生しておらず、本工事の温度ひび割れ対策は有効であったと考えられる。

(3) 異なるコンクリートの混用に対する確認試験

a) 既往の指針および知見

『建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 (以下、JASS5) 』⁹⁾では、「同一打込み工区に2つ以上の工場のコンクリートが打ち込まれないように配慮する。」とあり、同一構造物での異なるプラント

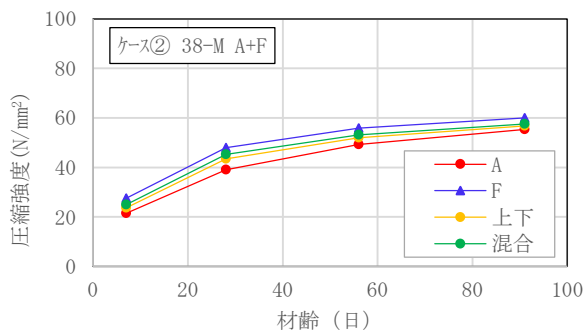


図-10 Case2 圧縮強度

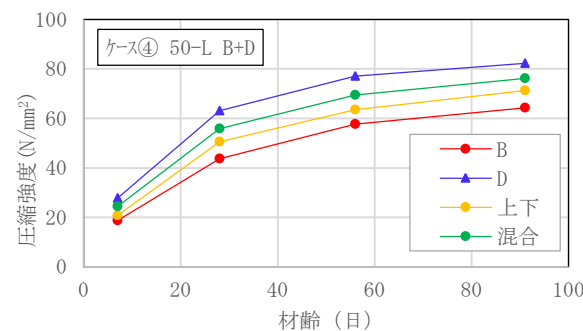


図-11 Case4 圧縮強度

のコンクリートの混用は避けることが望ましいとされている。

一方で、異なるコンクリートの混用に関する実験結果や研究結果⁹⁾は多数報告されており、異なるコンクリートを混用した硬化コンクリートの強度特性は、それぞれの生コンの品質管理が十分になされ、所要の強度を満足しているのであれば、混用されたコンクリートの強度は問題ないとされている。

b) 本工事における課題

RC連壁においては、1エレメント内で打ち継ぎを設けることができないことから、コンクリート打設途中で生コンプラントでトラブルが発生した場合、異なるプラントのコンクリートを混用して打設を続ける必要がある。

しかし、本工事で用いるような高流動コンクリートは、各生コンプラントで異なる成分・組成の混和剤を使用しており、それら混用に関する知見は少なく、また、2019年JIS A 5308の改正に伴い追加されたスランプフロー管理の高流動化された普通コンクリートの混用に至っては知見がなかった。

c) 混用試験練りによる強度確認

上記理由から本工事においては、試験練りを実施し、混用された高流動コンクリートの品質確認を行った。混用試験練りのフローを図-9に、混用試験練りの組合せケースを表-11に示す。

混用試験練りは各社の材料を持ち込み、室内にて実施した。生コンクリート製造後に混用前のフレッシュ性状

確認試験を行い、規格値内であることを確認した上で混合し、再度、フレッシュ性状確認試験および供試体作製を行った。圧縮強度試験供試体は、単独の供試体、2社のコンクリートを2層に打ち重ねた供試体（以下、2層供試体）、2社のコンクリートを完全に混合した供試体（以下、混合供試体）の3種類を作製し、試験材齢は、7日、28日、56日、91日とした。Case2およびCase4の圧縮強度試験結果を図-10、11に示す。

図-10、11に示すように2層供試体、混合供試体ともに呼び強度を満足しており、また、これら供試体は混用前の単独での圧縮強度の間にあるが、呼び強度が大きいコンクリートは、混用によって圧縮強度が小さくなり、呼び強度が小さいコンクリートは大きくなる事が確認できる。その他のCase1、Case3、Case5においても同様の結果となった。

以上の結果より、高流動コンクリート、特に高流動化したスランプフロー55cmの普通コンクリートにおいても、コンクリートプラントの相違（セメントメーカー、骨材産地、混和剤メーカーおよびその配合の相違）による強度低下などの不具合が生じないことが確認できる。

6. おわりに

本工事ではRC連壁の設計・施工に関する合理化とコンクリートの品質向上を目的に様々な取り組みを行った。本工事でも得られた知見を以下に示す。

- (1) 大深度円形立坑用RC連壁の設計においては、3次元モデルを用いることで、より合理的な設計を行うことができる。
- (2) 一般的にRC連壁の必要強度は、深部の側圧が大き

い断面で決定されるが、浅部と深部でコンクリート強度を変更することによって、より経済的な施工が可能となる。また、遷移領域を設けることによってコンクリートの切替えに対する品質上の問題はないものと考えられる。

- (3) 高流動化したスランプフロー管理の普通コンクリートに関し、本工事の配合においては、安定液比重を1.10以下で管理することによって、気中強度比を0.8とすることが可能である。
- (4) 高流動化したスランプフロー管理の普通コンクリートの混用に関し、異なるメーカーの混和剤が使用されていても一般的な普通コンクリートの混用と同様に、品質上の問題はないものと考えられる。
- (5) 温度ひび割れ対策として、低熱ポルトランドセメントの使用や管理材齢を91日に変更することは有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書【施工編】，2018。
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物，2012。
- 3) 青木茂，三浦律彦，三浦尚：高強度連壁コンクリートの非排水三軸加圧下における強度性状，土木学会論文集，No.571/V-36，pp.105-117，1997.8
- 4) 小林且典，深田敦宏，大隈充浩，柳井修司：大規模・大深度LNG地下タンクのコンクリートの施工，コンクリート工学，46巻3号，2008
- 5) 建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2018，2018改定
- 6) 岸谷孝一：異種生コン，異種混和剤の混用に関する問題点，セメント・コンクリート，No.399，1980.5

(2022. 8. 26 受付)

EFFORTS FOR RATIONALIZATION AND QUALITY IMPROVEMENT REGARDING THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF DIAPHRAGM WALLS FOR DEEP CIRCULAR SHAFTS

Tetsuji YAMAGUCHI, Akio KAWAMURA and Yoshiyuki SATO

Diaphragm walls are often used as shafts for shield construction at deep depths because of their good water impermeability and high rigidity. There is a tendency. Therefore, there is a need for rationalization regarding the design and construction of Diaphragm walls due to concerns about direct cutting by shield machines and water leakage due to temperature cracks. Therefore, in this work, we will make efforts for rationalization of many designs and constructions, such as reviewing the design method, adopting high-fluidity ordinary concrete for slump flow management, and reviewing the underwater strength ratio in the on-site placement experiment. Now that we have done so, we will report on those results.