

大深度円形立坑用 RC 連壁の設計・施工の合理化に対する取組み

首都圏支店 中央新幹線建設所 東雪谷工務所 副所長 里見 賢

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、シールド工事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、仮壁撤去作業の安全性向上を目的に、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を目的に、RC 連壁に関する多数の取組みを行ったので、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。

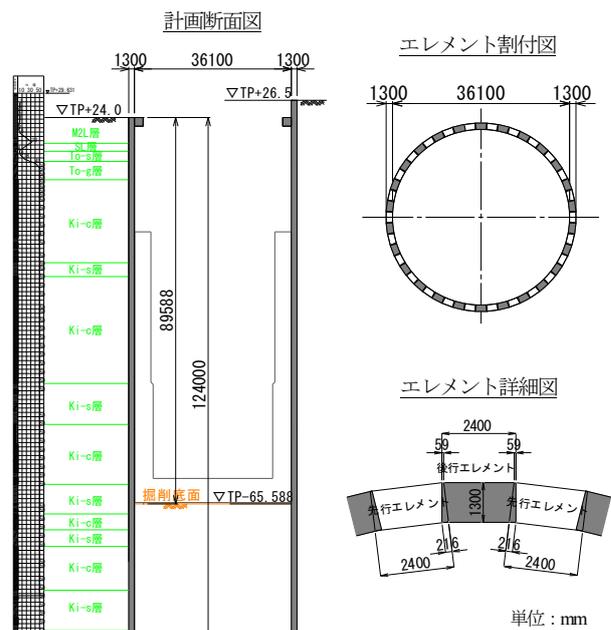
3. RC 連壁コンクリートの課題

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⁾ においては、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²⁾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、施工に先立ちシールドのカッタービットによる切削実験を実施したところ、圧縮強度が 70N/mm² のコンクリートは切削速度を 1mm/min 程度で切削可能であったが、100N/mm² を超えるコンクリートで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。



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

キーワード：RC 連壁、水中コンクリート、高流動コンクリート、水中気中強度比

連絡先：〒162-0821 東京都新宿区津久戸町 2-1 熊谷組首都圏支店土木事業部 TEL03-3260-341

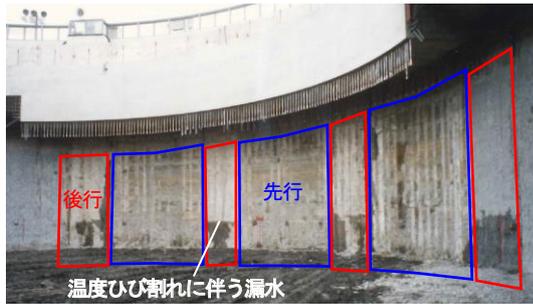


写真-1 ひび割れに伴う漏水の発生状況 (事例)

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。

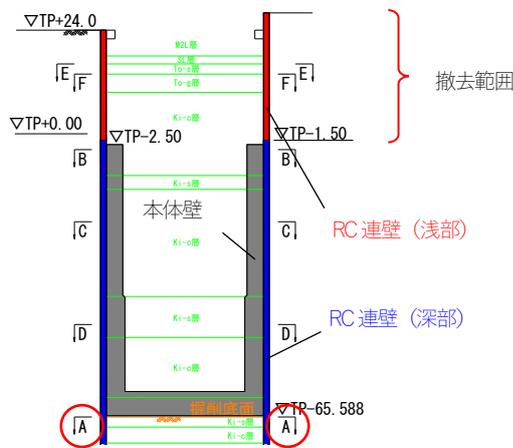


図-2 2次元モデルの設計断面位置 (A~F断面)

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が49N/mm²から40N/mm²に低減された。

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	<p>2次元モデル</p>	<p>3次元モデル</p>
設計基準強度	49 N/mm ²	40 N/mm ²

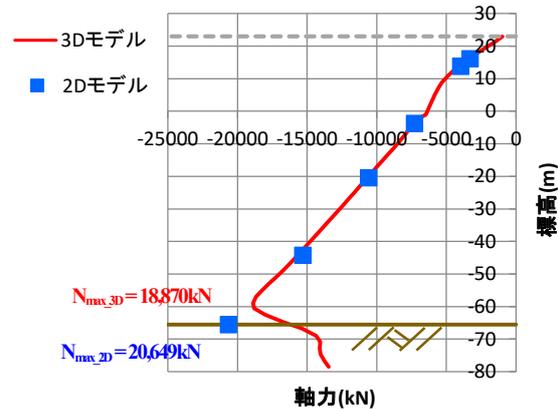


図-3 水平方向軸力の深度分布

(2) 浅深度でのコンクリート強度の変更

1) 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。

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

2) 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、切り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、別途実施した混用試験練りより、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も確認している。

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、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。

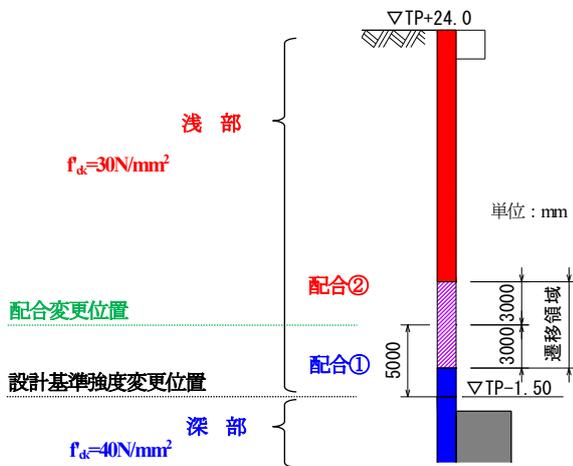


図-4 遷移領域

(3) 水中気中強度比の見直し

1) 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り、『鉄道構造物等設計標準・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一部抜粋して示す。

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	537	(シ-メント 1100NTV)
50	高強度	55	20	M	42.6	3.0	52.3	168	395	930	868	6.12	(シ-メント 1100NTV)

2) 打設実験による水中気中強度比の確認

本工事では、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ブフロー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、漏水の原因となる温度ひび割れ等の品質低下を招く恐れがあった。

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} を用いたリバ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 ・リバース工法 ・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	45 N/mm ²
	気中強度比 0.8	38 N/mm ²

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。



写真-2 現場打設実験の状況

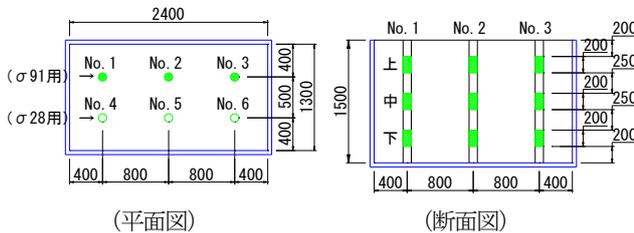


図-5 型枠寸法および供試体採取位置図

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固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。

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

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 とすることができる可能性があると考えられる。

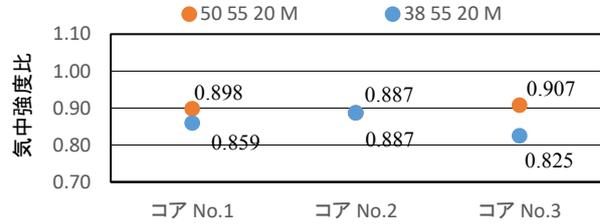


図-6 気中強度比（材齢 91 日、平均値）

5. 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は、表-4 (※2) に示すような一般的な安定液を用い、その比重を 1.10 以下で管理することによって、気中強度比を 0.8 とすることができる可能性があると考えられる。

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-36，105-117，1997.8
- 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