

ハイパー連壁を用いた下水幹線円形立坑

日比谷 穰¹・中村 泰介²・中丸 宗一郎³

¹正会員 工修 大成建設株式会社 東京支店（〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1）

²正会員 工修 大成建設株式会社 東京支店（〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1）

³正会員 工修 大成建設株式会社 土木設計第二部（〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1）

一般に、内径 15m 前後の下水幹線の円形立坑では、山留め壁として設計基準強度 $f_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 程度のコンクリートを用いた地下連続壁が使用される場合が多い。しかし円形立坑では、断面力は円周方向軸圧縮力が卓越するため、コンクリート強度を増加させ、壁厚を低減することが可能である。そこで、港区の下水幹線立坑に高強度・高流動コンクリートを用いた地下連続壁（以下ハイパー連壁）を採用した。ハイパー連壁の形状は内径 13.1m、壁厚 0.8m、深さ 78.5m の円筒形である。このハイパー連壁は、当社として 2 例目であり、下水幹線立坑へ初めて適用したものである。

本報告は、このハイパー連壁の工事概要を述べるものである。

キーワード：円形立坑、ハイパー連壁、ハイパーコンクリート、高強度コンクリート、高流動コンクリート

1. 土質概要

立坑部の土層図を図-1 に示す。地表面から約 14m 付近までは N 値 0～8 程度の埋立層および軟弱シルト層となっており、GL-14m～19m までは東京レキ層、GL-19m 以深は一般に土丹層と呼ばれる泥岩層から構成されている。なお、泥岩層には全体的に薄い砂層（5～10cm 程度）を挟んでおり、深さ約 45m、55m、60m の位置に厚さ約 50cm～200cm の砂層が介在している。介在砂層の被圧水位は GL-6m である。

なお、上部の軟弱地盤部は、溝壁が崩壊する可能性があったため、溝壁の内側および外側を GL-8m までソイルミキシングウォール（SMW）により地盤改良を行った。改良強度は溝壁安定計算に基づき $\sigma_{28}=3\text{N/mm}^2$ とした。

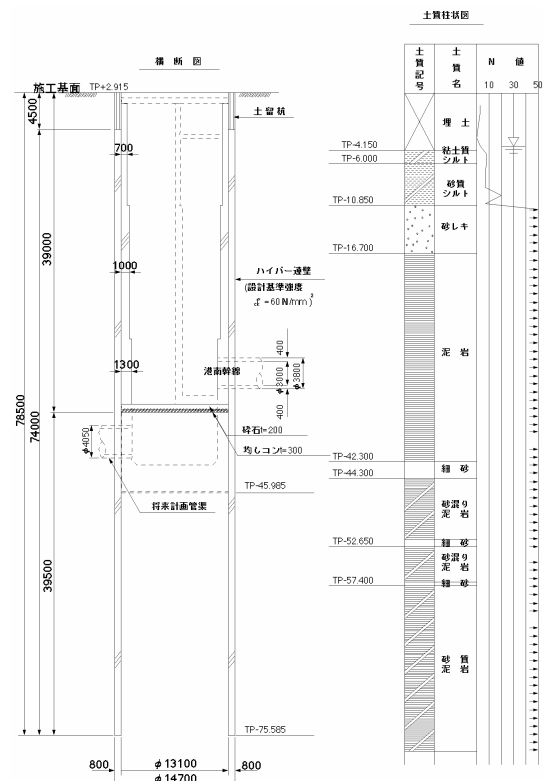


図-1 立坑断面図および土質柱状図

2. 立坑構造概要

立坑断面図を図-1に示す。立坑は最終的に集水人孔となり、人孔側壁は連壁との重ね壁構造であり、土圧に対し両者で抵抗する構造である。連壁はGL-4.5m～GL-78.5mまでの74mであり、上部4.5mについては親杭横矢板工法による土留め構造となっている。

連壁平面図を図-2に示す。連壁の平面形状は、内径13.1mの円形（正十六角形）であり、壁厚0.8m、設計基準強度 $f_{ck}=60\text{N/mm}^2$ である。

連壁エレメントは、先行・後行エレメントそれぞれ8エレメントずつの計16エレメントから構成されている。先行エレメントは掘削幅3.2m、エレメント幅1.8mである。

図-3にエレメント間継手構造を示す。エレメント間の継手構造は仕切板方式によるフリー継手構造となっている。また、先行エレメント打設時の仕切板の変形防止および後行エレメント打設時の先行エレメントの滑動防止のために、掘削面と仕切板の隙間の下端から10mの区間に碎石を投入する計画となっている。

なお、本立坑はシールド発進立坑として利用され、また、将来計画として別の管渠がつながる計画があり、今回床付け位置GL-39mよりさらに約10m掘削することを前提として計画されている。

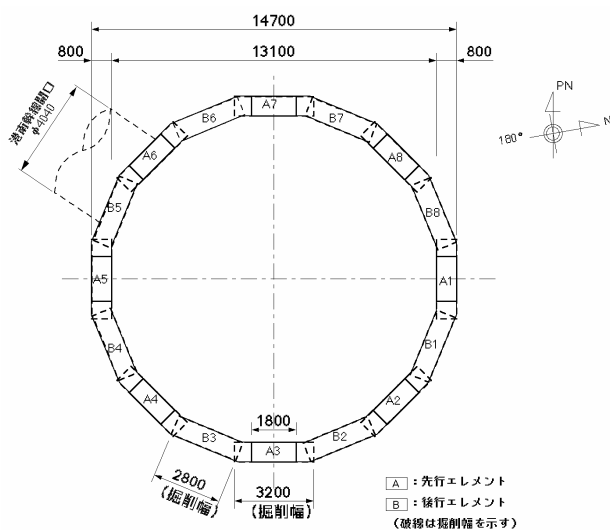


図-2 連壁割付図

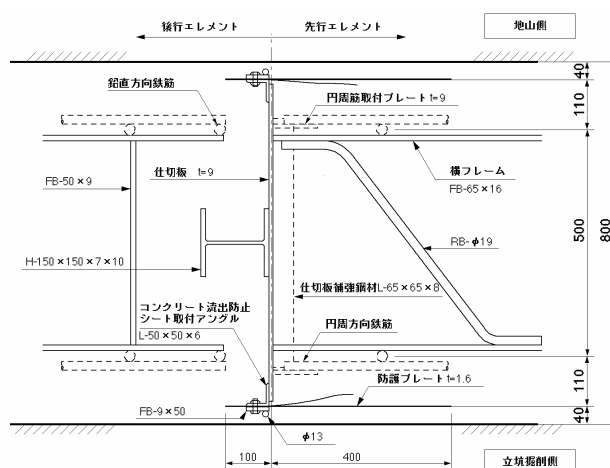


図-3 仕切板方式による継手構造

3. 連壁の構造検討

(1) ハイパー連壁の特徴

従来、本立坑規模の連壁には設計基準強度 $f_{ck}=24\text{N/mm}^2$ のコンクリートが使用されてきた。ハイパー連壁では、設計基準強度 60N/mm^2 とすることにより壁厚を減少させることを可能にした。その結果様々な利点が得られた。本工法の特徴を下記に示す。

① 壁厚の低減

一般に円形連壁は円周方向軸圧縮力が卓越するため、コンクリートの高強度化を図ることにより壁厚を薄くすることができる。従来、同規模程度の立坑であれば壁厚1.2mで連壁を施工してきたが、今回のハイパー連壁では壁厚0.8mとすることが可能となった。

② 発生土、泥土、泥水発生量の抑制

壁厚を薄くすることによるメリットの一つとして掘削土量の減少をあげることができる。これに伴い、発生土、産業廃棄物となる泥土および泥水の処分量を抑えることになり、環境の面からも有益である。今回のハイパー連壁では掘削土量は従来に比べ2/3となった。

③ 工費の縮減

壁厚が薄くなることによりさまざまな面から工費を縮減することができる。その主な要因として、掘削時間の減少、発生土、泥土、泥水処分量の減少、安定液量の減少、プラント設備の縮小、コンクリート量の減少等があげられる。一方、ハイパーコンクリートの使用に伴い、材

料単価および品質管理費等は増加する。しかし、従来工法とのコスト比較を行った結果、連壁全体工事費としては約 20%のコスト縮減となった。

④コンクリートが通常プラントで製造可能

通常、特殊コンクリートは一般の生コンクリート工場での製造が難しく専用プラント等が必要となる場合が多い。しかし、今回のハイパーコンクリートは特殊コンクリートの中でも管理が容易なコンクリートで、通常のプラントでの製造・管理が可能であった。

⑤止水性の向上

連壁の壁厚を薄くした場合、止水性が低下する恐れがある。特に今回採用した仕切板方式の場合、鋼材が過密となる仕切板周辺部にコンクリートの充填不良個所が発生しやすい。しかし、ハイパー連壁では流動性の高いハイパーコンクリートを用いるため、仕切板付近でも十分に充填されるため、通常の連壁に比べ止水性が向上し、漏水はなかった。

(2) 連壁の構造検討

連壁の構造検討は以下の状態について行った。なお、連壁は本体利用構造となっているため、仮設時だけでなく完成後の検討も行いその安全性を確認した。

①施工時の検討

- ・連壁仮設時
- ・シールド開口時

②躯体完成後の検討

③躯体完成後の地震時の検討

なお、連壁は施工時に最も応力が厳しくなるため、ここでは施工時の検討について記述する。

a) 施工時の検討（連壁仮設時）

連壁仮設時の検討では、連壁内部の床付け掘削までの構造検討を行った。検討方法は、将来計画の床付け位置まで順巻き工法により掘削した状態を想定し、図-4 に示す弾塑性法（山肩の拡張法）により行った。

検討の結果、リング効果が大きく、連壁鉛直方向鉄筋は最小鉄筋量により決定した。

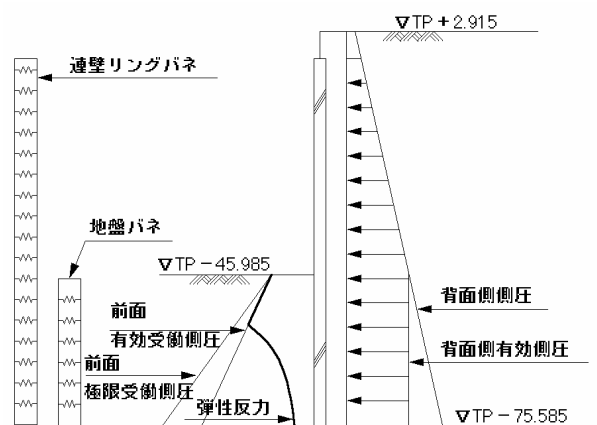


図-4 連壁仮設時の検討モデル

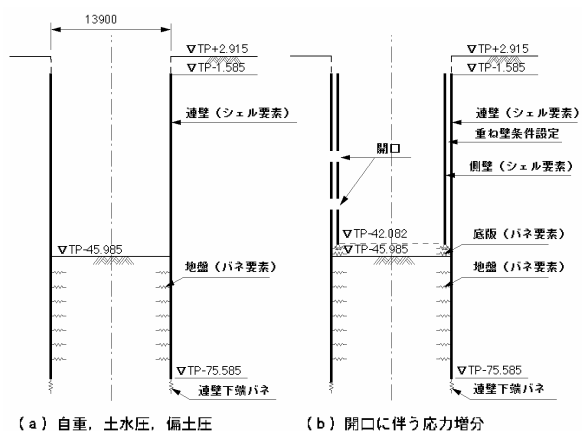


図-5 シールド開口モデル

b) 施工時の検討（シールド開口時）

シールド開口時の検討は、シールド発進のために鏡切りを行い連壁に開口ができた状態を想定した。開口時は側壁構築後となるが、開口前の状態で自重、土水圧、偏土圧に対し連壁のみで荷重を負担しており、開口に伴う増分応力に対し連壁及び側壁で抵抗する構造となる。なお、シールド開口は将来計画の管渠の開口が空いた状態が最も厳しくなるため、港南幹線開口と合わせて将来計画のシールド開口も考慮した。解析モデルは、開口時の応力変化を的確に表現できるように三次元円筒シェル FEM により行った。図-5 に示すように連壁および側壁は三次元シェル要素の重ね壁構造とし、地盤および将来の立坑底版をバネ要素でモデル化した。また、シェル要素の形状は多角形の影響を考慮するため、エレメント割付に合わせて正十六角形の 360° モデルにより検討を行った。解

連壁の照査は、断面力として面内せん断力を考慮し、連壁の施工誤差 50mm を考慮して有効断面とした場合 (Case a) と偏心による曲げモーメントを考慮した場合 (Case b) の 2 ケースについて行った。検討の結果、必要鉄筋量は最小鉄筋量以下となった。

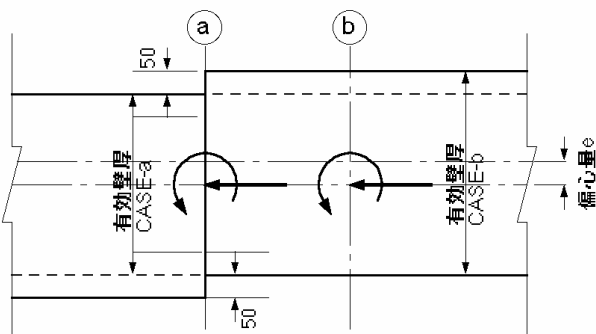


表-1 連壁施工手順

先行エレメント	先行エレメント掘削 ※先行エレメントは2ガット面	スライム処理	鉄筋電建込み	根固め	コンクリート打設
	後行エレメント掘削	壁面洗浄処理	スライム処理	鉄筋電建込み	コンクリート打設
後行エレメント					

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	掘削 5.1日						鉄筋建込 2.8日				打設 2.1日	
						万仏処理 0.5日		根固め 0.5日		打設準備 0.8日		

(a) 先行エレメント

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	掘削	2.1日				打設	1.8日					
	壁面洗浄					0.6日						
	刃付処理					0.6日						
	鉄筋籠建込					0.6日						
	打設準備					0.5日						

(b) 後行エレメント

図-7 施工サイクル実績

連壁の先行エレメントは掘削幅 3.2m であり、掘削機幅が 2.8m であるため 2 段階に分けて掘削を行った。まず、2.8m の掘削幅で連壁下端まで掘削し、2 回目の拡幅掘削には掘削機に張出材を設置して掘削を行った。なお、上部のレキ層部分では肌落ちが生じやすいため、上部については H 型鋼を溝壁に沿って建て込み、H 型鋼を反力に拡幅掘削を行った。

(2) 掘削機の概要

掘削機は以下の点を考慮して選定した.

- ① 今回の掘削土層はN値>50以上の泥岩層であり掘削トルクが大きいこと.
 - ② 深度78mにおいても掘削能率が低下しないこと.
 - ③ 掘削した泥岩がカッタートウスにへばりつかないようなトウス形状であること.
- これらの条件を満たすものとして、油圧駆動式の水平多軸掘削機を選定した.

その結果、実施工における機械のトラブルはほとんどなく、泥岩層に対し十分な能力を発揮し、溝壁の崩壊もなく掘削は完了した。

4. 連壁の施工および品質管理

(1) 施工概要

立坑の施工手順は次の通りである.

- ①溝壁防護工としてSMW工を行い、土留壁としてハイパー連壁を築造する。
- ②連壁先端に止水注入を行う。
- ③立坑内をGL-39mまで掘削。
- ④床付けコンクリート打設後、高さ34.5mの円形人孔側壁を構築する。

このうち、連壁の施工は表-1 に示すように行った。施工手順としては通常の連壁工法と大きく異なるものはないが、壁厚が薄くなるため、より慎重な施工および厳しい品質管理を行った。連壁の施工標準サイクルタイムを図-7 に示す。

(3) 精度管理

従来の連壁の鉛直精度は 1/500 以上かつ連壁中心線とエレメント中心線の最大離れは±100mm 以下となっていたが、今回のハイパー連壁では壁厚が薄くなるためより高い鉛直精度が要求された。そこで、±50mm（連壁下端において 1/1570）と設定し、出来形測定の頻度を高め施工精度の管理を行った。

掘削中は、高精度位置管理装置を掘削機に設置した。掘削機に位置検出用のワイヤーを取付け、ワイヤーの変位量をレーザー変位計で測定し、掘削機の絶対位置、回転状態、傾斜を検出し、リアルタイムに運転室のモニター画面に表示させた。

また毎日、掘削終了後には超音波測定装置により溝壁測定を行い、高精度位置管理装置と照合し、正確な溝壁形状の把握に努めた。

1 エレメント分の掘削終了後には、安定液を良液置換し、超音波溝壁測定装置により溝壁の最終出来形測定を行った。また、良液置換後からコンクリート打設までの溝壁底部へのスライム沈降量についても計測を行った。

測定の結果、すべてのエレメントにおいて施工誤差±50mm 以内であり（精度 1/1500）、精度の高い連壁が構築できた。また、スライム沈降量も 1cm 以内であり、先端注入により十分な止水が可能であったものと考えられる。

(4) コンクリートの品質管理

ハイパーコンクリートの仕様および配合を表-2、3 に示す。

表-2 コンクリート仕様

項目	仕様
設計基準強度	60N/mm ²
スランプフロー	65±5cm
50cm フロー到達時間	3～10 秒
空気量	4.5±1.5%

表-3 コンクリート配合

W/C	s/a	単位重量 (kg/m ³)					
		W	C	S	G	Ad	増粘剤
30%	50%	165	550	819	837	11	0.5

セメント種類：低熱ポルトランドセメント

高性能 AE 減水剤：SP-8HR

増粘剤：ビオポリマー

このコンクリートは高強度で、流動性が高く、分離抵抗性（骨材とセメントペーストの分離抵抗性）、低発熱性に優れている。

現場での受入試験は、品質の安定しにくい 1～5 台目まではすべてアジテーター車から試料を採取し、以降は 5 台毎に採取して試験を行った。受入時に返却したアジテーター車は 1 台のみであり、平均 66.3cm、標準偏差 2.6cm とフレッシュ性状の安定したコンクリートが供給できた。

圧縮強度はすべての供試体で 80N/mm² を超えており、平均 90.9N/mm² と強度も十分確保されていることがわかる。

(5) 連壁止水対策

連壁は、山留めとしての機能とともに止水壁としての機能が要求される。過去の連壁では、施工不良により出水し、最悪の場合には立坑が水没することもあり、そのため、本工事では止水に対し以下のような配慮を行った。

a) ハイパーコンクリートの使用

仕切板方式の連壁では、仕切板周辺は鋼材量が多く、コンクリートの締め固めができないため、コンクリートが十分に回り込まず、欠陥部分ができってしまう場合が多い。ハイパーコンクリートはスランプフロー 65±5cm と流動性が高く、隅々までコンクリートが充填される。また、ハイパーコンクリートは、セメント量が増加するものの低発熱ポルトランドセメント（ビークライトセメント）を使用しており、通常の連壁と同程度の温度ひびわれに抑制することができる。

b) 連壁先端注入

連壁先端からの回り込みを防ぐために、立坑掘削前に連壁先端に止水注入を行った。連壁掘削終了後、連壁底部の沈降したスライムを吸い上げ、泥水を良液に置換するものの、鉄筋籠投入中およびコンクリート打設までの期間に底部にスライムが沈降していく。今回の計測では、後述するが約 1cm 程度沈降している。そこで、立坑掘削前に、このスライムへの水道を遮断するため、予め鉄筋籠に設置した SGP 管を利用して図-9 に示すように連壁先端部分の注入を行

った．先端注入材料は，長期耐久性が要求されるため，セメント系の固化材を使用した．

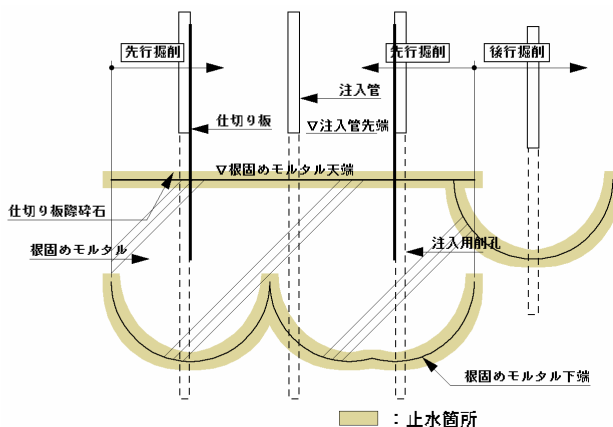
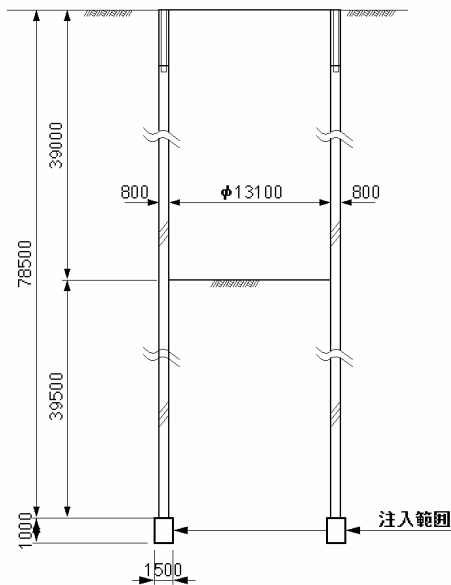


図-9 先端注入範囲

(6) 連壁止水状況

立坑掘削に先立ち，連壁の止水性を確認するため，連壁内部の地下水を $\phi 250\text{mm}$ ， $L=49\text{m}$ のディープウェルにより排水し，透水試験を行った．透水試験により，連壁の止水性が十分であることを確認し，立坑掘削に移行した．

掘削の結果，連壁の仕切板周辺からの漏水はほとんどなく，水平クラックも少なく，ドライな状態で掘削が可能となった．側壁構築中も，連壁からの漏水はほとんどなく，品質の高いハイパー連壁が施工できたものと考えている．

5. 計測管理

(1) 計測計画

ハイパー連壁の施工は過去の実績が少ないことから，施工を行うに当たり慎重を期するために各種計測を連壁施工時および連壁内部掘削時に行った．計測計器配置を図-10に示す．

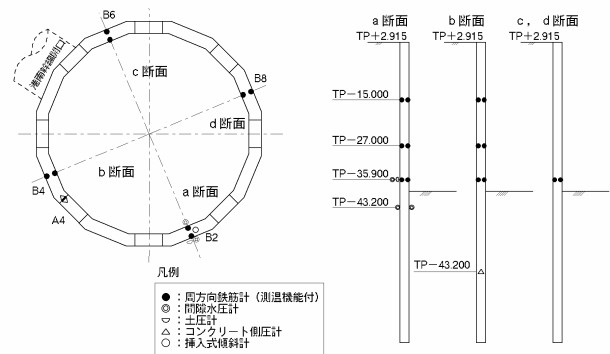


図-10 計測器配置

連壁施工時には，コンクリート打設側圧およびコンクリート温度の計測を行い施工時の安全性および温度ひびわれの管理を行った．

立坑内掘削に先立ちディープウェルにより立坑内の排水を行い，連壁内外の水圧計により連壁の止水性確認を行った．つぎに，立坑内部の掘削を行い，掘削時の安全性の管理を円周方向鉄筋計により行った．

計測管理は3段階（定常，注意，警戒）の管理体制とし，定常段階から注意段階への管理値を一次管理基準値，注意段階から警戒段階への管理値を二次管理基準値と設定した．

一次管理基準値は水圧計，円周方向鉄筋計に設定し，設計値の80%とした．また，二次管理基準値は円周方向鉄筋計に設定し，許容応力度値とした．

(2) 計測結果

a) 連壁施工時

打設時のコンクリート側圧結果を図-11に，また，温度計測結果を図-12に示す．

コンクリート側圧は練り上がりから約1.5～2.5時間で最大となり，その後減少した．コンクリート打設側圧測定結果は打設速度や気温等によるばらつきはあるものの0.06～0.13MPaとほぼ設計値（0.10MPa）通りであった．

また、打設時の最高温度は 52.7℃と低く抑えることができた。

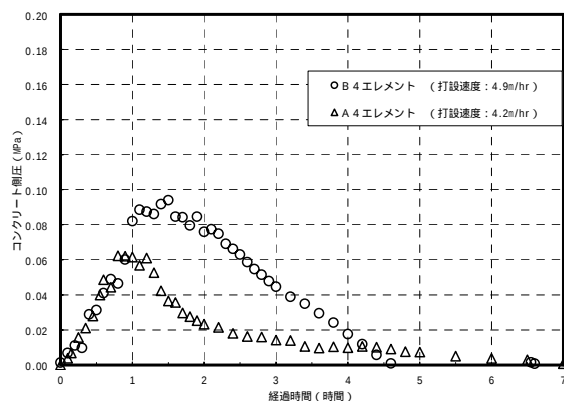


図-11 コンクリート打設側圧結果

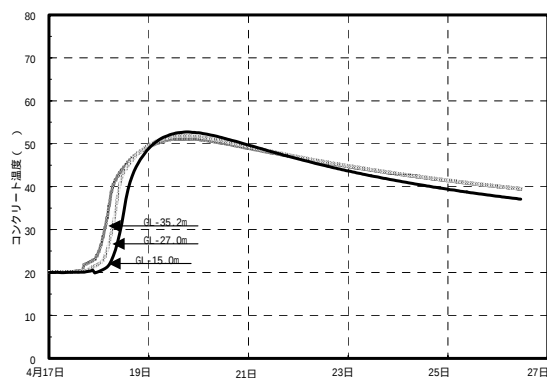


図-12 コンクリート温度測定結果 (B4元素)

b) 立坑掘削時

図-13 に水圧計計測結果を、図-14 に円周方向鉄筋計計測結果を示す。

図-13 より、連壁内外水圧差は計画通りであり、十分な止水性が得られていることがわかる。ディープウェル揚水量も最終的に 2m³/日程度であることから、施工誤差が小さく、ハイパーコンクリートを用いたことにより隅々までコンクリートが充填され、高い止水性が得られたものと考えられる。

図-14 より円周方向鉄筋応力度はすべて一次管理基準値以下とである。最大発生応力度は設

計値の約 65%程度であり、これは実測地下水位が設計水位よりも低かったことおよび土圧が設計値ほど作用しなかったためと考えられる。発生応力度から推定すると、作用側圧は水压および設計土圧の 10%程度と考えられる。

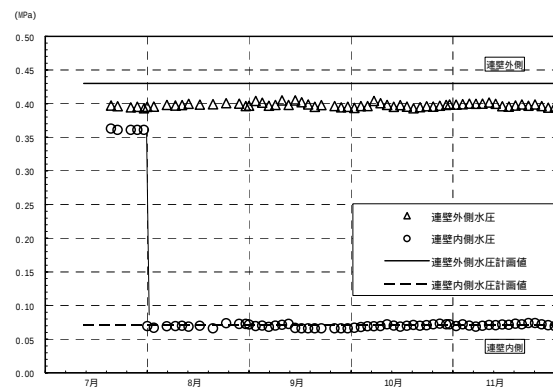


図-13 間隙水圧計計測結果 (TP-43.2m)

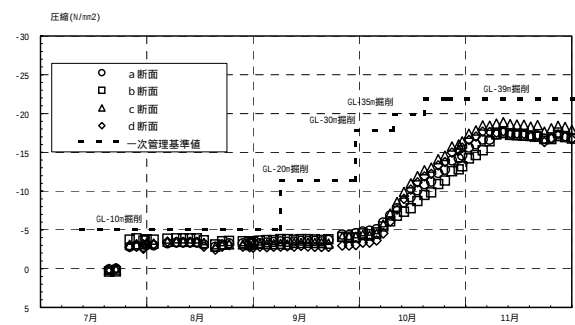


図-14 円周方向鉄筋計計測結果 (TP-35.9m)

6. おわりに

下水幹線円形立坑の土留壁にハイパー連壁を使用し、立坑内掘削を平成 11 年 8 月に開始し、平成 11 年 10 月に完了した。漏水もなく十分な安全性を確保できたことから、今後、深い立坑のコストダウン工法として有用であることが確認された。特に連壁築造費は約 20%と大幅な縮減が可能となった。本報が今後の参考になれば幸いである。