

オープンケーソン工法による立坑築造時の躯体コンクリートの品質確保

－観音地区下水道築造 2－1号工事－

Quality Assurance of Structure Concrete Using Open Caisson Method in Constructing Shafts

吉岡圭介*1 木野村達哉*2 東海林瞬*3

概 要

本工事は広島市太田川近傍にて、雨水幹線シールド工事の発進立坑をオープンケーソン工法により構築するものである。立坑は河川の近傍に位置し、地下水位が高いことから、水密性が求められた。また、立坑は壁厚 1.8m、高さ 44.0m であり、新設リフト下端が既設リフトにより拘束される壁厚の大きな構造物であるため、温度応力によるひび割れが懸念され、温度応力解析を実施した。本解析ではオープンケーソン工法の特徴である沈設作業を再現することで解析精度の向上を図った。

本工事における 3 つの品質向上への取組みを以下に示す。①事前検討において、立坑躯体の最大ひび割れ幅を算出することで水密性の評価を行い、補強鉄筋の配置など特別なひび割れ防止対策が不要であることを確認した。②立坑躯体の温度の実測値と温度応力解析結果と比較し、ひび割れ発生確率が解析結果よりも大きくなる場合には、養生条件を適正化することでひび割れ発生確率を減少させた。③立坑打継面および外周面へのコンクリート改質剤の使用により、躯体表面を緻密化し水密性の向上を図った。

工程短縮を目的として、ノーセパ型枠を使用した。通常の型枠組立日数が 1 リフトあたり 10 日間であるのに対し、5 日間の工程短縮となった。これに加え、躯体にセパレータ孔がなくなることで水密性の向上にも寄与した。

key words : オープンケーソン工法、温度応力解析、コンクリート改質剤、ノーセパ型枠

1. はじめに

本工事は広島市太田川近傍にて、雨水幹線シールド工事の発進立坑をオープンケーソン工法により構築するものである。立坑の躯体寸法は、外径 16.6m、壁厚 1.8m、高さ 44.0m であり（図-1）、河川（太田川放水路）の近傍に位置し、地下水位が高いことから、立坑躯体には水密性が要求された。立坑は壁厚の大きな円環状構造物であり、工程短縮のために早強コンクリートが採用されている。立坑は、8 リフト（1 リフト：5.5m、340～460m³）に分割して施工を行った（写真-1）。壁厚が大きいこと、早強コンクリートを用いることにより初期材齢時の壁の内外温度差が大きくなり、躯体表面における内外の体積膨張率の違いによるひび割れ（内部拘束ひび割れ）、新設部の温度降下時に既設部が新設部を拘束することで生じる貫通ひび割れ（外部拘束ひび割れ）が懸念された。

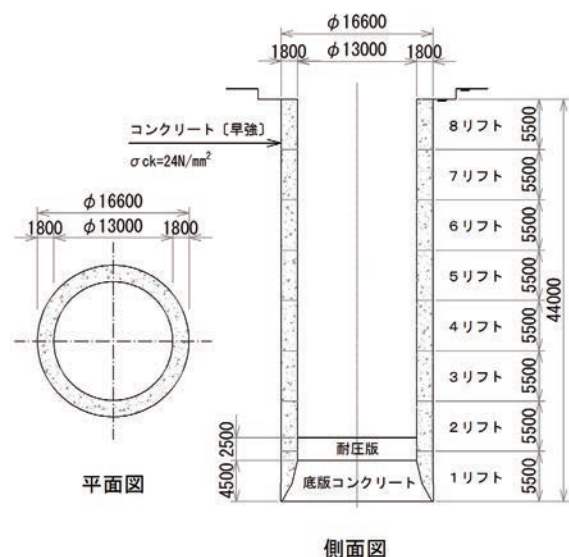


図-1 立坑の構造一般図

*1 Keisuke YOSHIOKA
*2 Tatsuya KINOMURA
*3 Shun SHOJI

広島支店工事部土木課 作業所長
広島支店工事部土木課
土木事業本部土木本部技術部



写真-1 構築後の立坑躯体

2. 温度応力解析によるひび割れ抑制対策

立坑躯体の水密性を確保するため、3次元FEMによる温度応力解析を実施した。温度応力解析において、解析条件で立坑躯体の沈設作業を反映する必要があった。

2.1 オープンケーソン工法の特徴

オープンケーソン工法は、地上部で構築（コンクリート打込み）した立坑躯体を構築したリフトごとに地中へ順次圧入し、所定の深度まで沈設していく工法である（図-2、写真-2～4）。このとき、地中（躯体の周辺地盤）の温度は深度とともに変化するため、沈設過程における立坑躯体周囲の環境条件も刻々と変化していく。

① 躯体構築完了

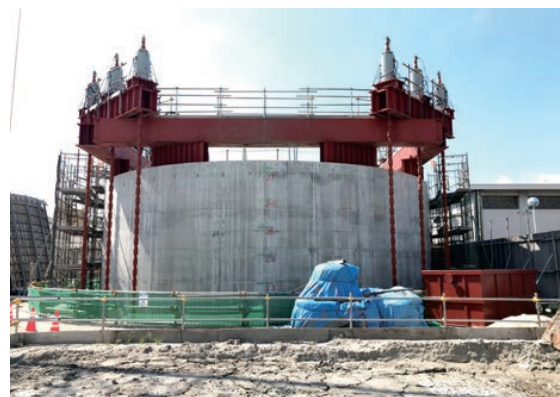
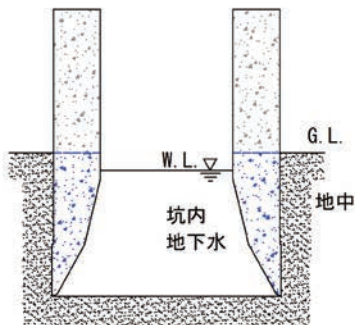


写真-2 立坑の沈設作業状況

② 圧入沈設作業

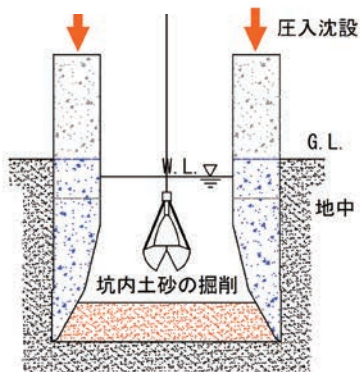


写真-3 坑内土砂の掘削状況

③ 圧入沈設完了

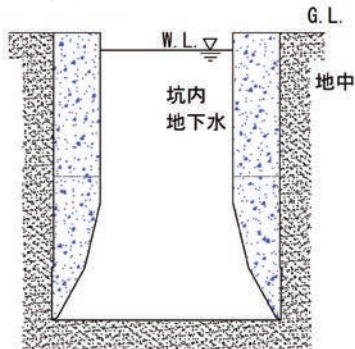


写真-4 立坑躯体の圧入沈設完了状況

図-2 立坑躯体の圧入沈設作業概略図

コンクリートの打込み後、立坑躯体内部の温度は水和反応により上昇し、地上部に残置した場合には外気温と同程度になるまでに20日間を要する。しかし、実際の施工では沈設作業はコンクリートの打込みから5日後に開始され、20~30日で当該リフトの沈設が完了する。このため、沈設作業開始時には、まだコンクリート内部の温度が高く、ひび割れ指数に対して、地盤や坑内水などのコンクリート周辺環境が及ぼす影響を考慮する必要がある。精度よく温度応力解析を行うために沈設過程の各リフトにおける地中の環境条件を適切に解析に反映することとした。本解析では、各リフトの深度の増加を考慮するために、深度に見合った温度の地盤要素を追加することにより、沈設過程を再現した(図-3)。

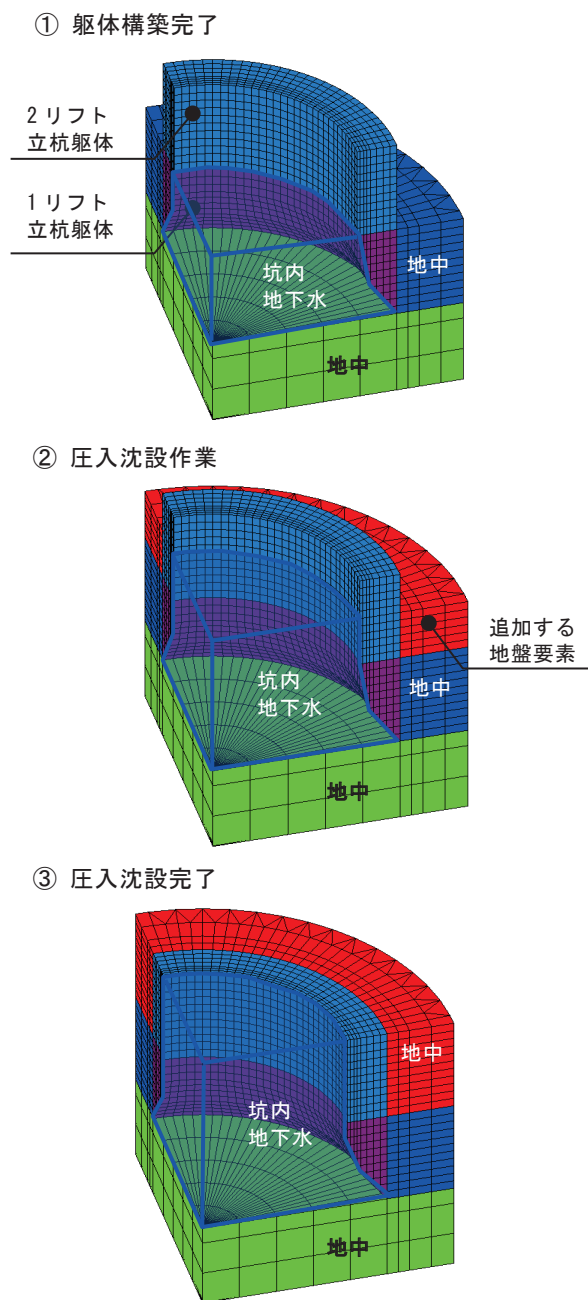


図-3 沈設過程のモデル化概念図 (1/4モデル)

2.2 躯体のモデル化

解析モデルは、立坑の形状や境界条件の対称性から円周方向の1/4モデルとした(図-4)。また、躯体と地盤の熱伝達を再現するために、十分な領域の地盤をモデル化した(鉛直方向に15.0m:1リフト高さの約3倍、水平方向に12.7m:壁厚の約7倍)。

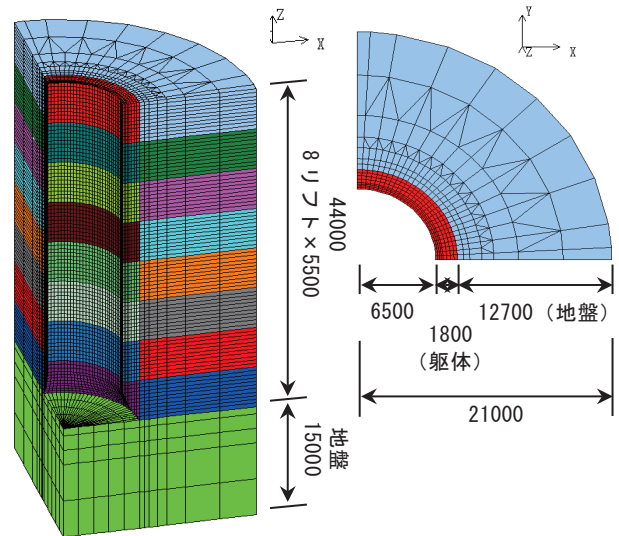


図-4 解析モデル図 (1/4モデル)

2.3 地盤温度解析

地盤の温度は深度により異なるため¹⁾、地表面~地中深部における各リフトの沈設時期の温度分布を、地盤温度解析により求めた。この予備解析の結果、深度10mまでの地盤温度は外気温の影響を受けて変化するが、10m以深では年平均気温(17.0℃)とほぼ一定であることがわかった(図-5)。

立坑躯体の温度応力解析では、沈設されたリフトの外側(既設地盤の上層)に地盤要素を追加していくタイミングで、予備解析で得られた深度ごとの地盤温度を地盤要素に反映させた。

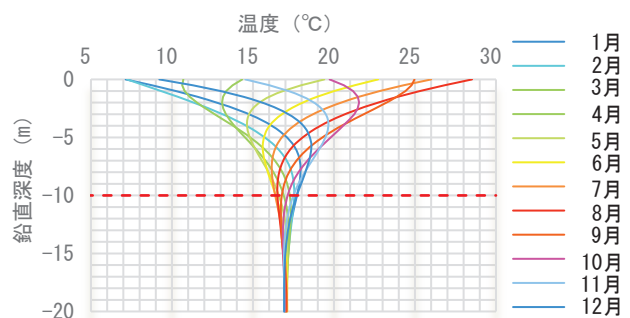


図-5 地盤温度 (予備解析結果)

2.4 コンクリート配合諸元、外気温および打込み温度

コンクリートの配合諸元を表-1、各リフトの構築時期と外気温および打込み温度を表-2に示す。なお、設計時点で、外部拘束ひび割れ抑制のため、コンクリート混和材として膨張材が採用されていた。

表-1 コンクリートの配合諸元

セメント種別	早強
呼び強度 (N/mm ²)	24
単位水量 (kg/m ³)	166
単位セメント量 (kg/m ³)	312
膨張材 (kg/m ³)	20

表-2 外気温と打込み温度

リフト	コンクリート打込み時期	外気温 (°C)	打込み温度 (°C)
8	2月上旬	6.5	11.5
7	11月中旬	13.5	18.5
6	9月上旬	26.4	31.4
5	6月下旬	25.2	30.2
4	4月下旬	17.1	22.1
3	2月中旬	8.0	13.0
2	12月下旬	7.2	12.2
1	11月中旬	14.6	19.6

2.5 解析結果

最高温度分布図、最小ひび割れ指数分布図を図-6に示す。ひび割れ指数とは、コンクリートの引張強度と温度応力の比で示され、温度応力が大きいほど、コンクリートの

引張強度が小さいほど、ひび割れ指数は小さくなり、ひび割れ発生確率が大きくなる。

$$I_{cr} = f_{tk} / \sigma_t$$

ここに、

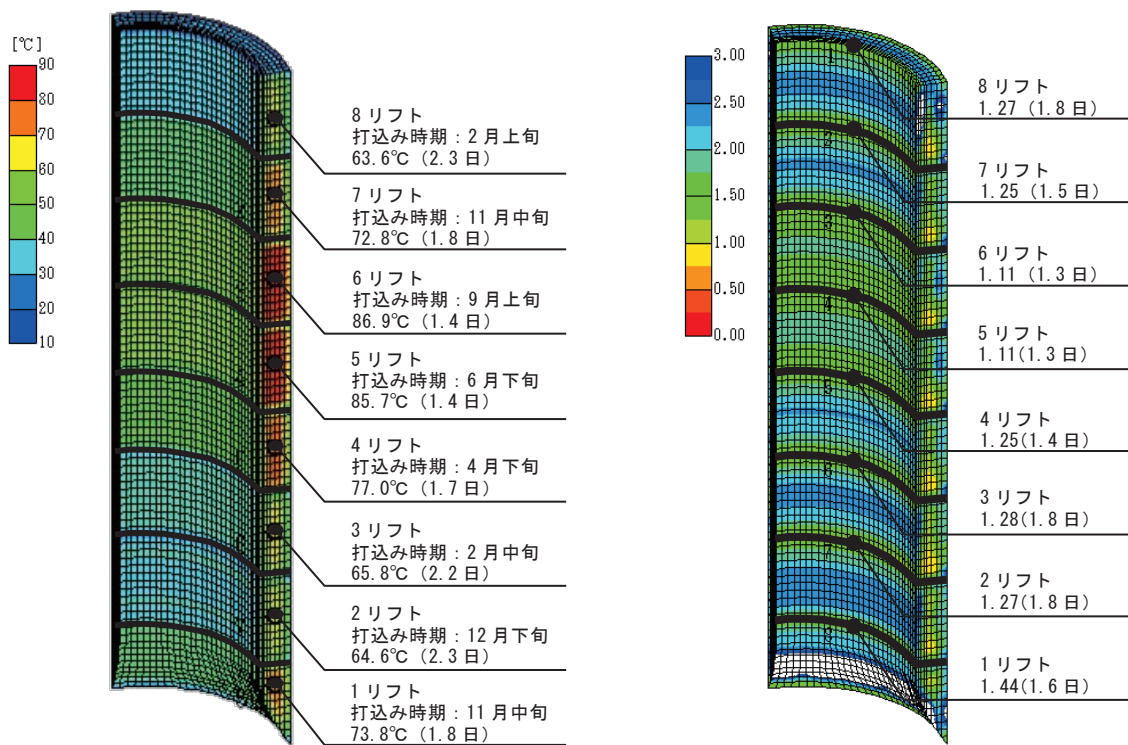
I_{cr} : ひび割れ指数

f_{tk} : 材齢 t 日におけるコンクリートの引張強度

σ_t : 材齢 t 日におけるコンクリートに生じる温度応力

ひび割れ指数が最小となるのは、外気温が最高となる9月上旬に構築した6リフトとなった。躯体表面でひび割れ指数が最小となっているのは、躯体内周の上端(1.11)であり、打込み後1.3日の材齢初期に生じていた。6リフトのコンクリートの温度履歴とひび割れ指数の履歴を図-7、8に、最小ひび割れ指数発生時刻(材齢1.3日)での温度と最小ひび割れ指数の分布を図-9に示す。

この解析結果から、内部拘束による立坑躯体天端内周のひび割れが懸念された。なお、この傾向は6リフトだけでなく、全てのリフトに共通しており、立坑躯体構築時にはコンクリート天端の内周に材齢初期のひび割れが生じないか目視で確認した。天端打継面に微細なひび割れは生じたものの、壁面を貫通して止水性に影響を与えるような問題となるひび割れは生じなかった。膨張材を使用したことで、温度ひび割れの抑制に効果があったものと考ええる。



最高温度の分布図 (発生材齢)

最小ひび割れ指数の分布図 (発生材齢)

図-6 立坑本体の温度応力解析結果

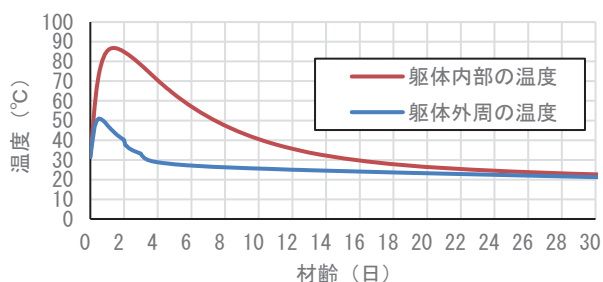


図-7 6リフトの躯体内部および外周の温度履歴

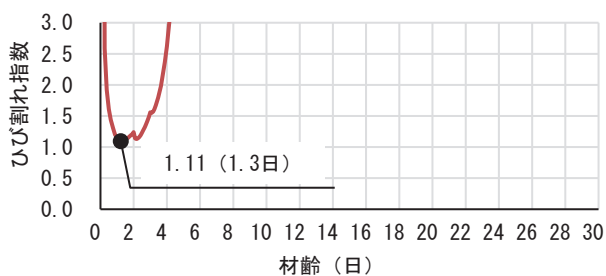


図-8 6リフトのひび割れ指数履歴

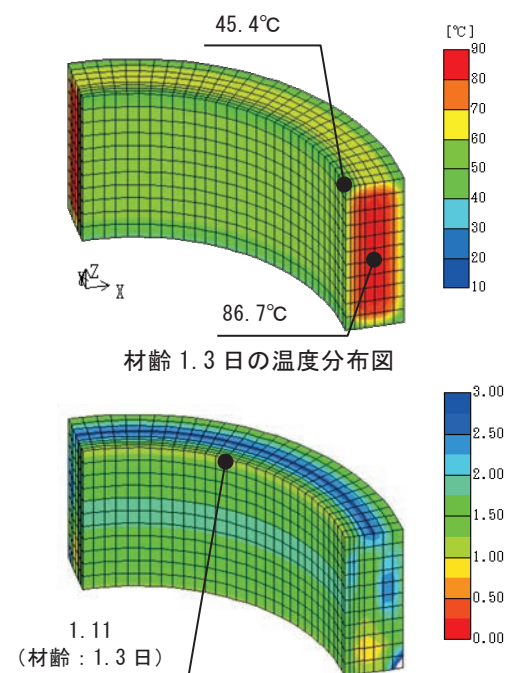


図-9 6リフトの解析結果

3. 温度計測の実施と品質管理への活用

本工事では、コンクリート打込み時に立坑躯体内部に温度計を設置し、温度計測結果と解析結果を品質管理に反映した(図-10、写真-5)。例えば、5リフトではひび割れが生じやすい材齢初期の内外温度差の実測値が解析結果よりも小さくなった(図-11)。この場合には、解析値よりも実構造物のひび割れ指数は大きくなり、ひび割れの発生確率は小さくなる。反対に8リフトでは内外温度差が大きくなり、ひび割れ発生確率が大きくなったため、保温養生を実施し内外温度差を小さくした。

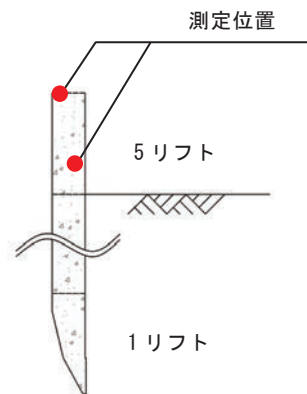


図-10 温度測定位置



写真-5 温度計の設置状況

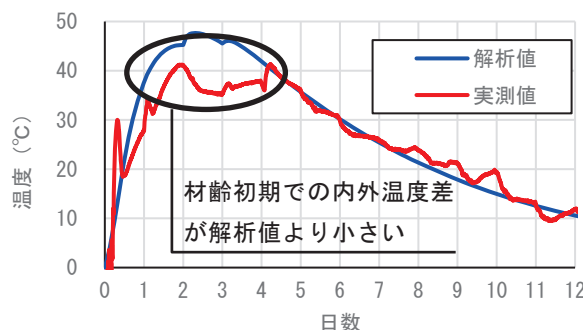


図-11 5リフトの内外温度差

4. 水密性の評価

先述したように、立坑躯体には水密性が要求されるため、ひび割れ指数と鉄筋比(検討対象とした領域のコンクリート面積と、その領域に配置されている鉄筋の断面積の比)から最大ひび割れ幅を推定し、水密性の評価を行った。

水密性の評価におけるひび割れ幅の指標として、コンクリート標準示方書³⁾に示される「水密性に対する設計限界値の目安」が挙げられる(表-3)。この表では構造物に求められる水密性の程度と、卓越する断面力の種類に基づく水密性に対するひび割れ幅の設計限界値の目安を示している。立坑躯体に求められる水密性の程度は「一般の

水密性を確保する場合」であり、卓越する断面力が「軸引張力」であるため、設計限界値の目安は「0.1mm」である。

表-3 水密性に対する設計限界値の目安

要求される水密性の程度		高い水密性を確保する場合	一般の水密性を確保する場合
卓越する断面力	軸引張力	-	0.1
	曲げモーメント	0.1	0.2

最大ひび割れ幅は図-12³⁾により算出される。各リフトの内面および外面におけるひび割れ指数、鉄筋比および最大ひび割れ幅を表-4に示す。ひび割れ幅は5・6・7リフトで0.06mmとなり、全リフトで水密性が確保されると判断した。

実際の立坑躯体内面の状態（ひび割れの有無）は、フロート足場を使用した立坑内水替えの際の壁面清掃時に確認した（写真-6）。目視確認の結果、0.10 mm以上のひび割れは無く、躯体からの漏水も確認されなかった。

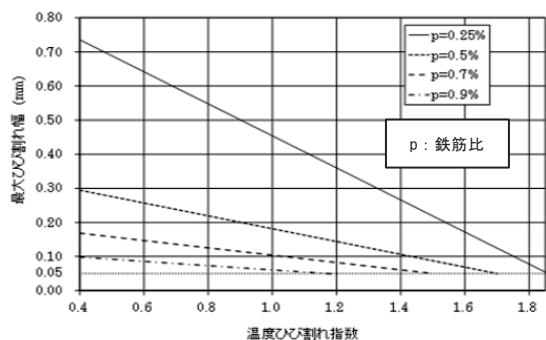


図-12 ひび割れ指数、鉄筋比、最大ひび割れ幅との関係図³⁾



写真-6 立坑内水替え状況

表-4 各リフト内面・外面の最大ひび割れ幅

	リフト	ひび割れ指数	鉄筋比 (%)	最大ひび割れ幅 (mm)
内面	8	1.85	0.47	0.02
	7	1.62	0.51	0.06
	6	1.40	0.68	0.06
	5	1.40	0.69	0.06
	4	1.53	0.68	0.05
	3	1.83	0.52	0.00
	2	1.98	0.47	0.00
外面	8	1.97	0.66	0.00
	7	1.77	0.64	0.02
	6	1.55	0.64	0.05
	5	1.60	0.64	0.05
	4	1.68	0.65	0.04
	3	1.86	1.18	0.00
	2	1.88	1.17	0.00

5. コンクリート改質剤による立坑躯体の品質向上

過去のケーソンの施工事例から、ケーソン立坑の構築リフト毎に発生する水平打継面と外周面のひび割れ箇所が完成後の漏水箇所として想定された。そのため、対策としてコンクリート改質剤を構築リフト毎の水平打継面と立坑外周面に塗布し、水密性の向上を図った（写真-7、8）。



写真-7 改質剤の塗布状況（水平打継面）



写真-8 改質剤の塗布状況（外周面）

コンクリート改質剤は、ケイ酸ナトリウムを主成分とするものを使用した。外観は無色透明な無機質水溶液であり、コンクリート表面に塗布することで表層部、ひび割れ部に浸透し、コンクリート中の未水和セメントやカルシウム成分と反応して CSH 系結晶を生成し微細な空隙を充填する。これにより立坑表面部が緻密化され、漏水対策と躯体の劣化保護の効果が期待できる。

6. 型枠材の工夫による工程短縮

通常の立坑躯体構築では鉄筋組立後に型枠を建込み、内型枠と外型枠間をセパレータで緊結する。この時、セパレータ配置位置と主鉄筋およびせん断補強筋が干渉する場合もあり、セパレータ位置の調整のため時間を要する。工程短縮のため、ノーセパ型枠を使用した(図-13)。

本工事の立坑躯体は、1リフトから8リフトまで断面の変化のない円形構造物である。そのため、型枠の転用が可能であり、型枠にセパレータ孔を開ける必要のないノーセパ型枠は、通常の型枠に比べ施工性に優れる。

ノーセパ型枠の適用にあたって、一般的な型枠の検討項目に加え、型枠下端のアンカー検討および上端の留め材の検討が必要となる。また、セパレータがないことから鉛直方向のたわみ量が大きくなることが懸念されたが、コンクリート打込み時に最もたわみが大きくなる鉛直方向に配置された支柱たわみ量の計算値が 6.4mm となり、管理値 13.7mm を満足した。なお、管理値は L=5.9m を支間長として、建築工事標準仕様書・同解説 (JASS5)⁴⁾ のコンクリート仕上面の標準値である L/430 を基準として設定している。

また本工事では、内型枠(8分割)と外型枠(10分割)をあらかじめ地上でユニット化しておき(写真-9)、クレーンを使用して組立て作業を行った(写真-10)。セパレータが不要になることに加え、ユニット化したことで、通常の型枠組立て作業が1リフトあたり10日間であるのに対し、ノーセパ型枠を使用した場合には5日間の工程短縮を図ることができた。

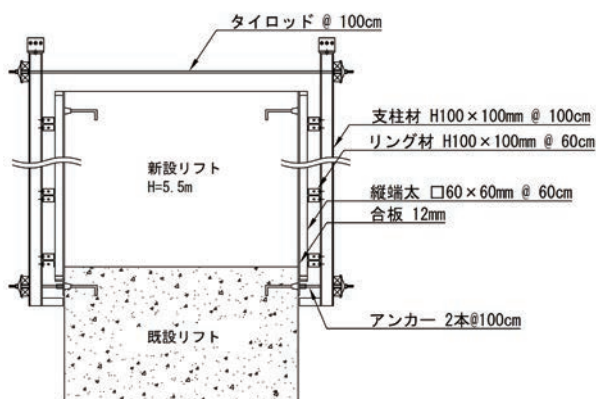


図-13 ノーセパ型枠概要図



写真-9 型枠のユニット化状況



写真-10 ユニット化した型枠の組立状況

7. まとめ

立坑躯体構築時に温度応力によるひび割れが懸念され、温度応力解析を実施した。本解析ではオープンケーソン工法の特徴である沈設作業を再現することで解析精度の向上を図った。

本工事における品質向上への取組みを以下に示す。

- 1) 事前検討において、立坑躯体の最大ひび割れ幅を算出することで水密性の評価を行い、補強鉄筋の配置など特別なひび割れ抑制対策が不要であることを確認した。また、立坑内水替え時にコンクリート壁面の目視点検を行ったが、ひび割れは確認できなかった。
- 2) 立坑躯体の温度の実測値と温度応力解析結果と比較し、ひび割れ発生確率が解析結果よりも大きくなる場合には、養生条件を適正化することでひび割れ発生確率を減少させた。
- 3) 立坑打継面および外周面へのコンクリート改質剤の使用により、躯体表面を緻密化し水密性の向上を図った。

上述の品質向上への取組みに加え、工程短縮を目的としてノーセパ型枠を適用した。セパレータ配置作業の省略と型枠のユニット化により、通常の型枠組立日数が1リフトあたり10日間であるのに対し、5日間の工程短縮となった。また、ノーセパ型枠の採用は、躯体にセパレータ孔がなくなるため、水密性の向上にも効果があったものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 日良篤志、田中岳：地中温度分布の季節変化と感度分析、平成27年度土木学会北海道支部論文報告集第72号 B-26
- 2) 東海林瞬、木野村達哉：オープンケーソン工法における沈設過程を再現した躯体の温度応力解析、令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会、令和4年9月
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】、2017.3
- 4) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事、2022.11