

ニューマチックケーソン立坑工事における特殊配合コンクリートの温度応力解析

東京都第二建設事務所 工事第二課 立澤 延泰
 大成・鹿島・大林・京急建設共同企業体 正会員 ○澤上 晋
 大成・鹿島・大林・京急建設共同企業体 正会員 小松 祥子

1. はじめに

東京都建設局発注の環状七号線地下広域調節池（石神井川区間）工事において、ニューマチックケーソン工法による立坑工事での品質管理の取り組みとして、ひび割れ防止対策に有効と考えられるコンクリート配合を取り入れた。配合として、低熱ポルトランドセメント、膨張材、高性能防水混和剤を使用し、粗骨材には熱膨張係数の小さい石灰石を使用した。特殊な配合であることから、硬化特性や発熱特性を適切に評価するために、実際に用いるコンクリートの性状確認試験を実施し、試験結果を反映した温度応力解析を実施した。また、検証のために躯体内に計測機器を埋設し、実計測値を用いた事後解析も実施した。本稿では、これらの実施内容と結果について報告する。

2. 工法の特徴

ニューマチックケーソンは、地上で鉄筋コンクリートの躯体を構築し、躯体下部（刃口部）の作業室にて地山を掘削することで、躯体を徐々に地中へ沈下させる工法である。最終的には地中構造物となるが、コンクリートは常に地上での打設となるため外気の影響を考慮する必要がある。また、沈設して躯体側壁の外面が地盤に触れるときにはコンクリートは十分に硬化した状態であるため、実質的に側壁は地盤の熱物性の影響を受けにくい。

以上の特徴を考慮し、解析においては、コンクリートの打込み時は側壁の外側は外気温と接する条件（側壁が地盤に触れない高層ビル状モデル）とした。

3. 解析の概要

立坑は図-1に示す通り、矩形で全10ロット、壁厚は最大2.0m、刃口面積189m²（15.6m×12.1m）、深度52.4mである。各ロットの打継箇所（新旧コンクリート間）における温度ひび割れの発生確率をひび割れ指数により評価するため、工事着手前に3次元FEM温度応力解析を実施した。モデル化は躯体全体（刃口部、底版部、壁部）に対して行い、構造物の対称性を考慮して1/2モデルとした。施工時期は、実施工における工程を考慮した。温度応力解析は、指針^{1),2)}をもとに実施した。

4. 解析ケース

解析に用いたモデルを図-2に示す。3次元FEM温度応力解析は、下記の3ケースを実施し、壁部（3ロット）を主な評価対象とした。

解析①：当初は、最大壁厚ロットのコンクリート打設時期を年平均気温の一番低い12月～2月と計画しており、指針²⁾に記載されている一般値を用いて事前解析した。その後、当該箇所の施工が夏季になったことを踏まえ、実際のコンクリート配合での事前検証、および実構造物での事後検証を行うために、次の追加解析を実施した。

解析②：現場で性状確認試験を行い、得られた温度上昇特性、自己収縮特性、熱膨張係数を用いて事前解析した（解析時期：8月）。

解析③：上記②の情報に加えて、実構造物の施工時の温度計測値、および立坑3ロット躯体内にひずみ計および応力計を埋設して得られた収縮ひずみとコンクリートのヤング係数の補正係数を反映して、検証のための事後解析を行った（実際の打設日：8月1日）。

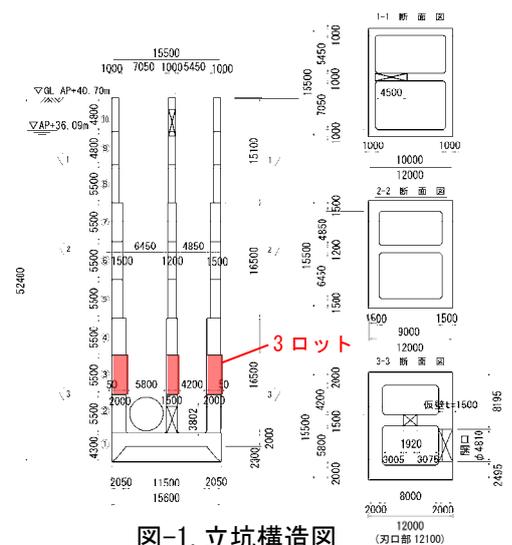


図-1. 立坑構造図

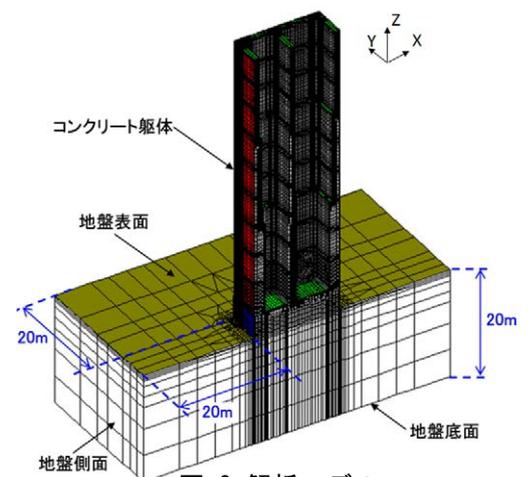


図-2. 解析モデル

キーワード：ニューマチックケーソン、立坑、特殊配合、コンクリート、温度応力解析、性状確認試験
 連絡先：〒176-0013 東京都練馬区豊玉中 3-9 環七地下調節池作業所 電話 03-6914-8375

5. 性状確認試験の実施

解析②におけるコンクリートの硬化物性や発熱特性を調査するために、簡易断熱試験、熱膨張係数試験を実施し、コンクリートの発熱特性、自己収縮特性の測定を行った。図-3のように、周囲をスタイロフォームと型枠で覆い、外気温を遮断したマスブロックにひずみ計と熱電対を配置したものを現場に設置し、躯体と同配合のコンクリート(450mm×450mm×450mm)を打設した。マスブロック内の温度履歴と自由収縮を材齢28日まで測定し、コンクリートの断熱温度上昇特性、および自己収縮ひずみ特性を算定式²⁾を用いて確認した。このとき、コンクリートの中心温度と表面温度には差がなく、簡易断熱状態であったことを確認した。算出された断熱温度上昇特性は、推奨式²⁾よりも発熱開始材齢が早く、温度上昇が早い結果となったため、温度応力解析では、推奨式²⁾の中で開始材齢 t_0 を0.80倍、断熱温度上昇速度に関する係数 α を1.1倍することとした。

また、コンクリートのテストピースを封緘養生し、温度上昇降下履歴(図-4)を与え、温度変化量とひずみの変化量から熱膨張係数を算出した。結果は、標準的な値($10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)よりは小さいものの、指針値²⁾($6.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)に対しては15%程度大きいものであった。

6. 躯体内への計測機器埋設による計測

解析③での使用データとして、図-5のように無応力計の計器内に設置したひずみ計の計測値から、実構造物における自己収縮ひずみを算出した。膨張材を使用しているため、収縮ひずみ量には膨張ひずみと自己収縮ひずみの両者が含まれており、算出結果は簡易断熱試験(マスブロック試験)における収縮ひずみ変化傾向と一致していた。

また、コンクリートのヤング係数の補正係数は温度上昇時と降下時において異なるため²⁾、本構造物においても両方の値について算出した。求められた補正係数は、指針²⁾等に示される変動範囲内(温度上昇時:0.357~0.500, 降下時:0.625~0.667)であったが、どちらも変動範囲の平均を下回る値であった。

7. 解析結果と考察

解析結果を表-1に示す。最小ひび割れ指数の大きい解析①は冬季打設の影響も考えられるが、解析③では収縮ひずみが膨張側になっている(解析①と比較しても収縮量が小さく、そこに膨張効果もあってプラスに転じた)ことが影響していると考えられる。

解析①のように指針²⁾に記載されている一般値をパラメータとして用いても、打設時期が異なっただけで結果は大きく変わるため、特に知見の少ない特殊配合のコンクリートを用いる場合などは、解析②③のように、より実測に近い状態で解析を行うことが望ましいと考えられる。解析③では、躯体に計測機器を埋設し、コンクリートの温度に係わる部分の比熱や熱伝導率を修正し、また、養生や実際に現場で使用した型枠に即したコンクリートの表面熱伝達率など、応力に係わる部分の収縮や有効ひずみを修正したため、より実際に近く十分に信頼のできる解析ができたと考えられる。なお、解析②の最小ひび割れ指数は解析③に近い値となっているため、マスブロックによる簡易断熱試験等による事前の性状確認試験結果を用いた解析は、信頼性の高い評価ができるものと考えられ、実際の躯体で埋設計測などができない場合における評価手段としても有効であると考えられる。

参考文献 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2017年制定/2012年制定

2) コンクリート工学会(工学協会)：マスコンクリートのひび割れ制御指針，2016/2008/1985

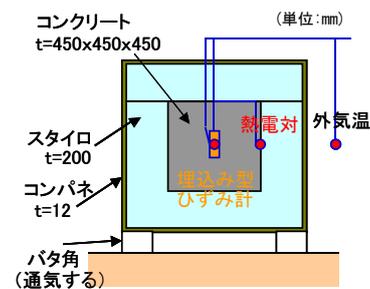


図-3. 簡易断熱試験概要図

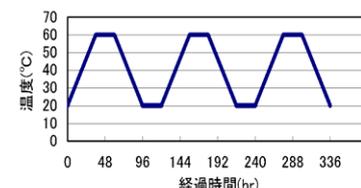


図-4. 熱膨張係数測定時の温度履歴

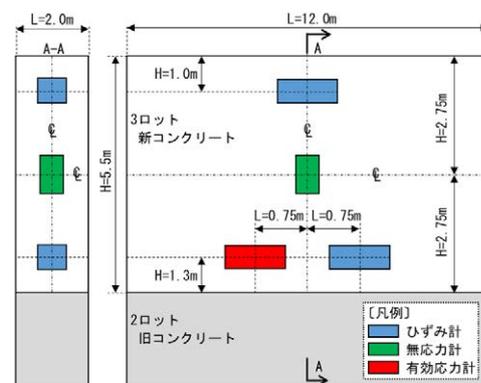


図-5. 躯体側壁内の計測器配置図

表-1. 温度応力解析結果(3ロット)

解析	部位	最高温度 [※]	最小
		[°C]	ひび割れ指数
① 事前解析 一般値使用 解析時期：2月	側壁(15.5m方向)	33.0	2.57
	中壁	29.9	2.49
② マスブロック 試験値使用 解析時期：8月	側壁(12.0m方向)	34.2	2.49
	側壁(15.5m方向)	59.1	2.16
③ マスブロック試験値 & 実計測値使用 打設日：8月1日	中壁	57.5	2.14
	側壁(12.0m方向)	61.6	1.86
	側壁(15.5m方向)	59.7	2.17
	側壁(12.0m方向)	62.8	2.00
	側壁(12.0m方向)	58.3	2.09

※コンクリートの最高温度は最小ひび割れ指数発生位置における温度