

論文 大深度円形立坑における温度応力対策に関する一考察

岩波 基^{*1}・竹内 秀二^{*2}・櫛原 賢二^{*3}・江島 裕章^{*4}

要旨：大深度円形立坑において、逆巻工法により構築する本体コンクリートはマッシュプであり、かつ高次の外部拘束を受ける構造となる。そこで、温度応力によるひび割れ発生を抑制するため、施工初期に計測したデータをその後の施工に反映させることが有効である。本報告は、計測結果を次期の施工にフィードバックする際に使用する温度応力解析について、有限要素法による1次元、軸対称、3次元の各モデルの比較を行った。その結果、軸対称モデルが3次元モデルに対し同程度の精度を有することと、本体コンクリートの解析に適しているという結論が得られた。

キーワード：マスコンクリート、温度応力解析、円形立坑、大深度

1. はじめに

現在、建設省・首都圏外郭放水路建設事業の第1立坑が構築中である。この立坑において、本体コンクリートがマッシュプな構造となるため、施工時の温度応力によるひび割れ発生が懸念された。そこで、施工段階初期に計測したデータをその後の施工に反映させることが必要となった。しかし、連続地中壁および先行ロットとの2面の打ち継ぎ面を有するコンクリートの温度応力解析は一般的な指針が存在せず、数値解析によるモデル化が必要となった。

筆者らは、施工段階初期に1次元、軸対称、3次元の各比較を行い、軸対称モデルの解析値と計測値のフィッティングによってコンクリートおよび地盤の熱・力学物性を定めた。そして、その物性値を用い、厚さ6mの底版コンクリートの打設リフトを決定した。

本報告では、施工初期段階における3種類のモデルの解析結果を比較し、底版における解析値と計測値の差違について考察を行う。

いう大深度であるため立坑形状は力学的に有利な円形を、仮設山留め壁には連続地中壁（以後、連壁と称す）工法をそれぞれ採用した。

本体コンクリートは、立坑掘削時に逆巻き工法によって構築した。その構造は、上部側壁・かまち梁部・下部側壁部・底版部の4部位からなる。立坑の構造概要を図-1に示す。

また、本体コンクリート打設日と本体の材料諸元を次頁の表-1, 2に示す。

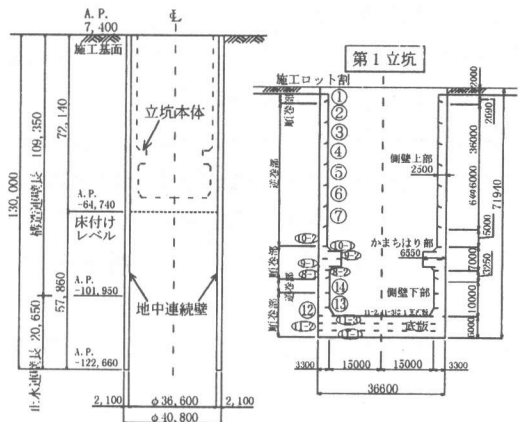


図-1 立坑の構造概要

2. 立坑の構造概要

外郭放水路第1立坑は、掘削深度が72.1mと

*1 榊熊谷組 土木本部土木技術部 工修（正会員）

*2 建設省関東地方建設局江戸川工事事務所江戸川上流出張所 出張所長

*3 建設省関東地方建設局江戸川工事事務所江戸川上流出張所 放水路係長

*4 榊熊谷組 土木本部土木技術部 工修

表-1 本体コンクリート打設日

施エロット	打設日	施エロット	打設日
①	96/07/25	⑧-2	97/06/23
②	96/09/19	⑨-1	97/07/07
③	96/10/31	⑨-2	97/07/21
④	96/12/06	⑩-1	97/07/30
⑤	97/01/16	⑩-2	97/08/07
⑥	97/02/13	⑪-1	97/11/18
⑦	97/03/18	⑪-2	97/12/10
⑧-1	97/06/23	⑪-3	97/12/10

表-2 材料諸元

コンクリート	SD 295A, SD345				
	セメント呼び強度 種類 (N/mm ²)	スランプ (cm)	G _{max} (mm)	水セメント比 (%)	水 (kg/m ³)
	低発熱 24	15	25	50.5	157
	セメント (kg/m ³)	細骨材(kg/m ³)		粗骨材 (kg/m ³)	
	311	337	516	985	

3. 解析モデルの比較

本体コンクリートのうち図-1に示した上部側壁の第③ロットに着目し、1次元のSchmidt法・CL法解析と軸対称FEM温度応力解析、3次元FEM温度応力解析を比較し、合わせて計測値との比較を行った。

3.1 解析条件

本体コンクリートの第③ロットの温度計測とのフィッティングから、外気温と地盤の熱伝導率および初期温度を設定した。その他の解析に用いる物性値は、コンクリート標準示方書¹⁾および設計計算書の値に基づき定めた。

温度解析の熱物性を表-3~5に、打設温度により補正を行った断熱温度上昇特性を式(1)に示す。また、外気温の算定式を式(2)に示す。熱伝達率は、型枠部で10.5W/m²℃、露出部で14W/m²℃と設定した。

$$Q(t) = 44.0 \times (1 - e^{-0.353 \cdot t}) \quad \text{式(1)}$$

$$T(t) = 18.0 + 11.4 \times \sin\left(2\pi \frac{t - 117}{365}\right) \quad \text{式(2)}$$

$T(t)$: 外気温 (°C)

t : 1月1日を $t=0$ とした日数 (日)

表-3 熱物性値

項目	本体コンクリート	連壁コンクリート	基礎地盤
密度(kg/m ³)	2,306	2,500	1,900
比熱(kJ/kg°C)	1.15	1.15	0.96
熱伝導率(W/m°C)	2.70	2.70	1.63

表-4 コンクリート打設日, 温度(実績より)

打設位置	打設日	打設温度
3ロット	96/10/31	16°C
4ロット	96/12/06	16°C

表-5 連壁コンクリートの初期温度(計測結果より)

位置	地中側	中央部	本体側
初期温度	22°C	20°C	18°C

応力解析に用いた力学的性質を表-6, 7に示す。また、無応力計の計測結果から熱膨張係数を 3.8×10^{-6} (1/°C)に設定した。無応力計の計測結果を図-2に示す。

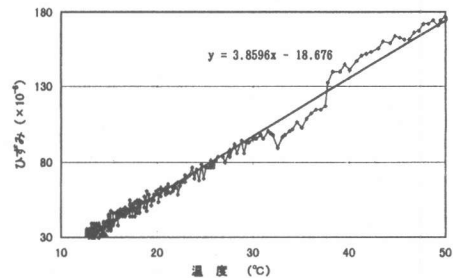


図-2 無応力計の計測結果

表-6 コンクリートの力学的性質

項目	コンクリートの力学的性質
圧縮強度 (N/mm ²)	試験りの圧縮強度試験より以下の関係式を設定した $f'_c(t) = 0.05664M$ ($M < 217.534$) $f'_c(t) = 28.371 \log 10M - 53.995$ ($M \geq 217.534$) ここに、 M : 積算温度 (°CD・D)
引張強度 (N/mm ²)	$f_t(t) = \alpha \sqrt{f'_c(t)}$ ここに、 α : コンクリート標準示方書による定数 (=0.35)
有効弾性係数 (N/mm ²)	$E_c(t) = \psi(t) 4.7 \times 10^4 \sqrt{f'_c(t)}$ ここに、 ψ : 温度上昇時の弾性係数の補正係数 $\psi = 0.73$ ($t \leq 3$ 日) $\psi = 0.73 + 0.135(t - 3)$ ($3 \text{日} < t \leq 5 \text{日}$) $\psi = 1.00$ ($t \geq 5 \text{日}$)
ポアソン比	$\nu = 0.2$

表-7 基礎地盤・連壁の力学的性質

項目	基礎地盤	連壁
弾性係数 (N/mm ²)	9.0	25000.0
ポアソン比	0.3	0.2
熱膨張係数 (1/°C)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}

3.2 解析モデル

1次元のSchmidt法による温度解析は、図-3のモデルで行った。CL法における応力解析では、外部拘束度をコンクリート標準示方書¹⁾に従い軸拘束係数 R_N を1.0、曲げ拘束係数 R_M (反転前)を1.1、 R_M (反転後)を1.05とした。

軸対称モデルと3次元モデルは、温度解析と応力解析ともそれぞれ同じモデルにより実行した。軸対称モデルを図-4に、3次元モデルを図-5に示す。

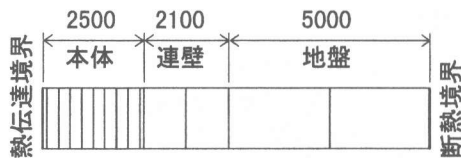


図-3 1次元解析モデル

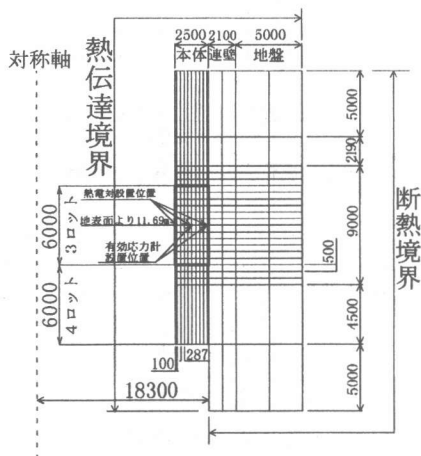


図-4 軸対称モデル

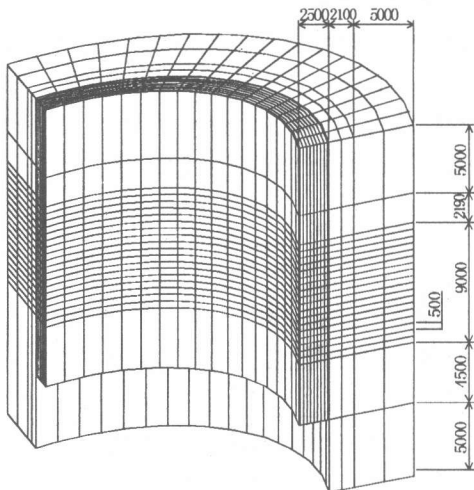


図-5 3次元モデル

3.3 温度解析結果

本体3ロット部の本体中心、掘削側、連壁側(図-4参照)の熱電対設置位置における温度の解析値と計測値の経時変化を図-6, 7, 8に示す。

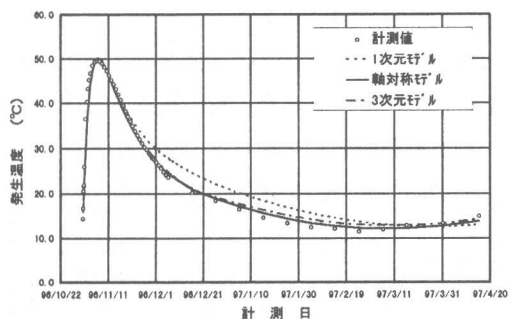


図-6 温度経時変化(本体中心)

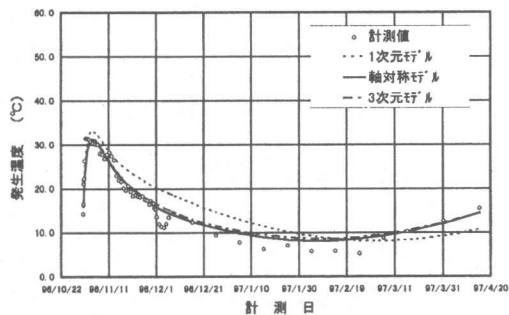


図-7 温度経時変化(掘削側)

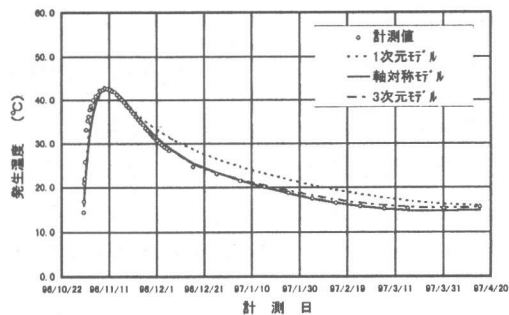


図-8 温度経時変化(連壁側)

図-6, 7, 8の結果から温度解析については、軸対称モデルと3次元解析結果の差はほとんど見られなかった。

1次元解析と軸対称モデルでは、最高温度については、ほぼ同じ値になったが、温度の低下量は軸対称モデルの方が大きい結果となった。また、軸対称モデルでは、12月6日の4ロット打設後は温度低下がにぶる傾向を示した。

計測値とのフィッティングについては、軸対称モデルでは熱物性を変化させることで、ほぼ一致させることができた。

3.4 応力解析結果

本体中央部および、本体連壁側での円周方向応力について、3種類の解析値と有効応力計の計測値の経時変化を図-9, 10に示す。

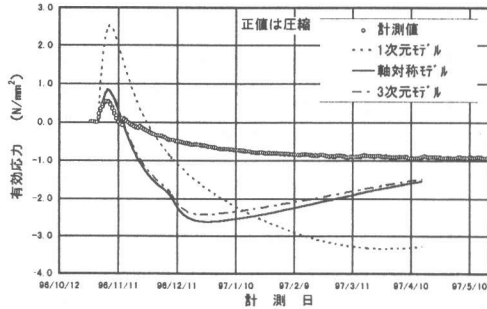


図-9 円周方向応力の経時変化（中央部）

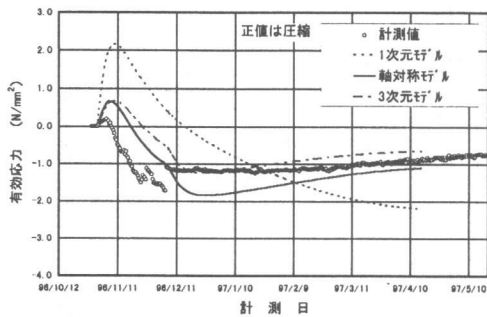


図-10 円周方向応力の経時変化（連壁側）

軸対称モデルと3次元モデルに着目すると、図-9から断面中央部においてはほぼ一致することがわかる。図-10から連壁側においては、挙動は同じ傾向を示したが、引張応力の大きさは違いを生じている。

CL法と軸対称モデルに着目すると、4ロット打設前までは、同じ傾向を示したが、全体的に圧縮側に大きな値となった。軸対称モデルにおいては4ロットを打設した影響で、引張応力が減少する挙動を示す。

計測値と解析値については、連壁側では軸対称、3次元モデルと計測値が同じ挙動を示したが、断面中央部では引張領域で差が大きい。

4. 底版コンクリート

4.1 解析条件および解析モデル

解析条件は、1リフトの計測値の2リフトへのフィードバックを行わず、本体3ロットのフ

ィッティング条件と同じものとする。（表-1～7参照）。また、コンクリートの打設温度は12.0℃とし、断熱温度上昇特性は補正により、式(3)のように仮定した。解析モデルは図-11の軸対称モデルにより行った。

$$Q(t) = 44.2 \times (1 - e^{-0.310 \cdot t}) \quad \text{式(3)}$$

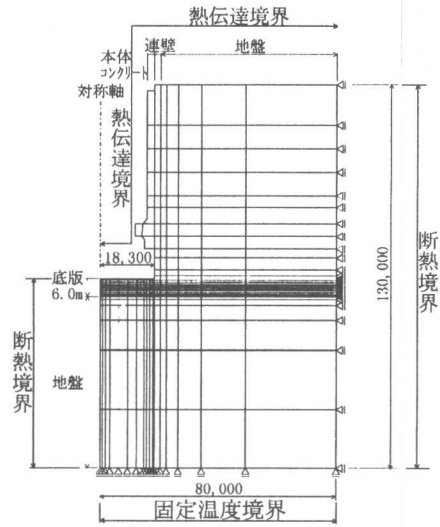


図-11 軸対称モデル

4.2 底版温度解析結果

図-12の計測位置における温度の経時変化を図-13～15に示す。計測値と解析値は、ほぼ一致したが、1リフトでは挙動が3～4日遅れ、2リフトでは約2℃最高温度に差を生じた。

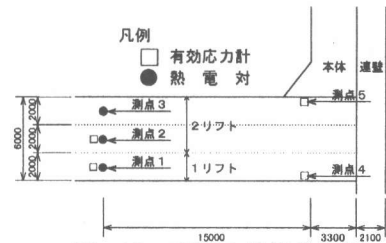


図-12 底版の計測位置図

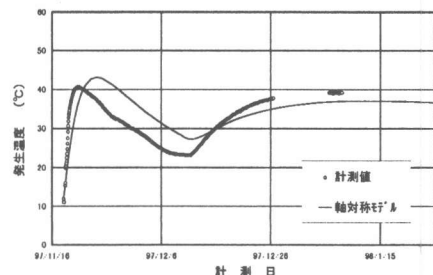


図-13 温度経時変化(測点1)

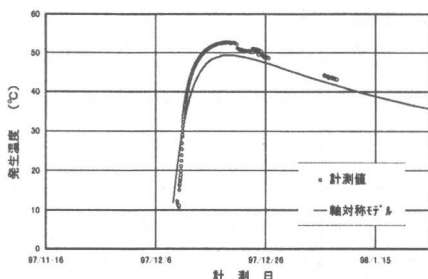


図-14 温度経時変化(測点2)

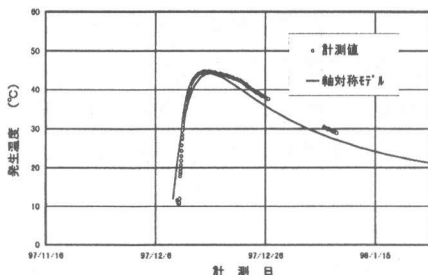


図-15 温度経時変化(測点3)

4.3 底版応力解析結果

図-12の有効応力計設置位置における応力解析結果と計測値を以下に示す。1リフトの中央部における水平方向の応力経時変化を図-16に、周辺部の円周方向応力を図-17に示す。2リフトについても同様に、中央部の結果を図-18に、周辺部の結果を図-19に示す。また、図-16～19に示した最大引張応力を表-8に示す。

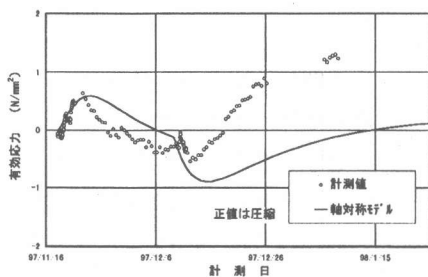


図-16 1リフト中心の応力経時変化(測点1)

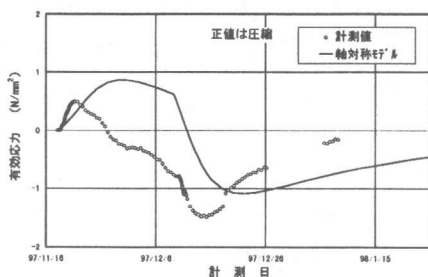


図-17 1リフト周辺の応力経時変化(測点4)

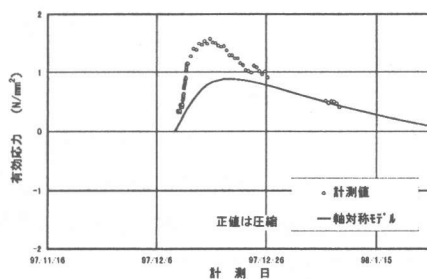


図-18 2リフト中心の応力経時変化(測点2)

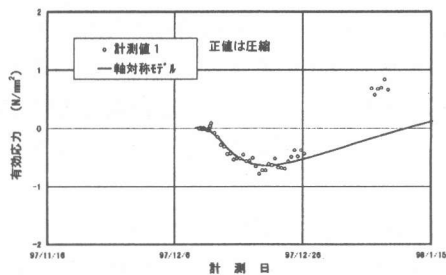


図-19 2リフト周辺の応力経時変化(測点5)

表-8 計測および解析値の最大応力

	中央部		周辺部	
	計測値 (N/mm²)	解析値 (N/mm²)	計測値 (N/mm²)	解析値 (N/mm²)
1リフト	-0.54	-0.90	-1.48	-1.09
2リフト	0.32	-0.67	-1.18	-0.64

* 正值は圧縮

1リフトの結果では、解析結果と計測値の両方とも、温度上昇過程で圧縮応力が発生して最大値を示した後、温度が低下するのに従い、減少傾向に転じている。そして、2リフト打設の温度上昇になった時点で、急激に引張応力が増加し、今度は温度上昇の途中から引張応力が低下する結果となった。従って、解析値と計測値を比較すると挙動の傾向は似ているが、圧縮側も引張側でも、絶対値には差が生じた。

2リフトの結果についても、解析値と計測値は、挙動の傾向は似ているものの、値に差が生じた。引張応力の値については、中央部において、解析値より計測値が圧縮側にシフトした結果となった。周辺部においては、計測値が解析値より1.5倍程度大きな値となった。

5. 考察

5.1 解析モデル相互の差について

軸対称モデルと3次元モデルについては、応力解析の断面中央部において引張応力に若干差

を生じたが、そのほかは、温度解析・応力解析の両方の結果が一致している。この結果は、円形立坑のようにほぼ軸対称と見なせる構造では共通のものであろう。従って、円形立坑の本体コンクリートの温度応力解析においては、計算に要する時間が大幅に少ない軸対称モデル解析が実用上適当であると判断できる。

1次元のSchmidt法とCL法を組合わせた温度応力解析は、外的拘束係数の設定が困難であることと次ロットの影響を考慮できないことから、円形立坑本体構造における温度応力の挙動を再現することは困難であると考えられる。

5.2 計測値と解析値の比較について

本体側壁コンクリートの温度解析では、計測値を解析条件に反映した軸対称FEM解析により、実際の発熱挙動を高い精度で表現することができた。しかし、応力解析では解析値と計測値の絶対値に差が生じた。これは、断面中央部の計測結果において、温度上昇から降下に転じる時点で、コンクリートの有効応力が変動せずひずみのみ大きく変動する領域があったためと考える。ただし、設計の観点からは安全側の評価になると判断している。

底版コンクリートの温度解析では、断熱温度上昇式と地盤の熱伝導率について、初期施工でのフィッティング結果と実際の値に差があったと推測される。

断熱温度上昇式については図-13~15に示すように、実測値の温度上昇の方が解析値より大きくなっている。これは、打設温度が変化した時の断熱温度上昇式の補正で、温度上昇速度に関する定数を小さく評価した結果と考える。この値の精度は実際に使用するコンクリート断熱温度上昇試験を行うことで向上できると考える。

地盤の熱伝導率については、図-13に示すように地盤に近い測点1において、計測値が解析値より早い温度低下を示すことから、解析で熱伝導率を小さく評価していると考ええる。今回は本体側壁のモデルにおいて、地盤の熱伝導率は

解析上の影響度が小さいため、高い精度の評価値を得られなかったが、地盤内の計測を複数箇所で行うことで地盤の温度分布が把握でき、熱伝導率の精度が向上すると考える。

底版の温度応力解析では1リフトの温度変化において、計測値と解析値の差が影響していると推測される。従って、図-16, 17のように応力も計測値の方が早く変化している。2リフトでも、1リフトとの温度差が大きいことによる影響が計測値に現れている。したがって、温度解析の精度を上げることで温度応力解析の精度も実用レベルまで向上すると考える。

6. 結 論

- ①円形立坑について温度応力に関する詳細検討を行う場合、軸対称モデルによる解析が実用上、適当である。
- ②初期段階の計測データをフィードバックすることで、円形立坑本体壁のように複雑な構造でも次期施工の状況を十分な精度で推定することが可能となる。しかし、計測については、地盤と連壁、本体の温度分布が確認できる計測器配置と、実際に使用するコンクリートの熱物性値を測定する必要がある。

おわりに

今後は、応力解析に関する力学物性の逆解析を実施し、高い精度の応力解析を目差す予定である。また、連壁の計測データも本体データとあわせて検討し、連壁と本体壁の相互作用についても研究を進める予定である。

また、今回の検討では、コンクリートの計測データにのみ着目したが、今後は、鉄筋の計測データについても検討し、今回の結論の確認を別の面からも実施することを考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：[平成8年制定]コンクリート標準示方書 施工編，土木学会，pp. 173-193, 1996. 3