

埋設型枠を使用した鋼管・コンクリート合成構造橋脚の温度応力解析

Thermal stress analysis of steel pipe-concrete composite pier
where laying underground frame was used

中央コンサルタンツ (株) ○正 員 長太正人 (Masato Nagata)
中央コンサルタンツ (株) 正 員 野田勝哉 (Katsuya Noda)
北海道開発土木研究所 正 員 三田村浩 (Hiroshi Mitamura)
北海道開発土木研究所 正 員 今野久志 (Hisashi Konno)

1. はじめに

鋼管・コンクリート合成構造橋脚は、中空断面の鉄筋コンクリート橋脚に対して鋼管を主鉄筋代替および内型枠として使用することにより、施工の省力化・工期短縮を図る事を目的として開発された構造であり、その採用実績も増えつつある。一方この構造は、その断面構造の特徴からコンクリートの発熱に起因した温度応力の影響を受けやすいことが指摘されており、実際の施工においても特定の部位を中心に温度ひび割れの発生が確認されている。

解析の対象とした橋梁は海岸部に位置していることから、塩害対策として 1) 高炉セメント B 種の使用 (W/C=40%, c=399kg/m³)、2) 橋脚基部から標高 20m までの範囲の埋設型枠 (プレキャストコンクリート製, t=17mm) の設置、の以上 2 つが施されている。本橋のように単位セメント量が多く、かつ、耐久性の高い埋設型枠が設置された場合の温度応力に与える影響について検討した事例は少ないと思われる。

以上のような観点から、鋼管・コンクリート合成構造橋脚を対象とした、単位セメント量が多いことと埋設型枠を考慮することによる温度応力への影響について検証することとした。また、躯体の温度応力の影響を受ける埋設型枠の応力状態についてもあわせて検証する。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

解析対象は、橋脚高 31.6m、断面形状 7500×4500mm、φ1300mm の鋼管 6 本配置、フーチング天端から 5000mm までの範囲で鋼管内に中詰めコンクリートが施工される橋脚である。リフト高は実施工条件を考慮したものとされている。

解析モデルは図-1 に示すように対称性を考慮した 1/4 断面の 3 次元モデルとし、第 1 リフト～第 5 リフトまでの躯体表面に設置される埋設型枠については、図-2 示すような躯体を取り巻く既設コンクリートとして考慮する。このほか、ひび割れ対策工としての圧送空気による鋼管内クーリングをモデルに反映し、打込温度は実施工のもの、外気温は施工場所の日平均気温を使用する。

解析に使用した物性値データを表-1 に示す。

2.2 熱伝達境界条件

打設時は埋設型枠および合板型枠を使用することから、熱伝達境界条件ではこれらの熱伝達率を考慮する。なお、熱伝達率は他のものも含めコンクリート標準示方書¹⁾を参考とした。

3. コンクリート熱物性値の検証

3.1 計測温度との比較

解析における外気温を実測温度に替えて解析を実施し、

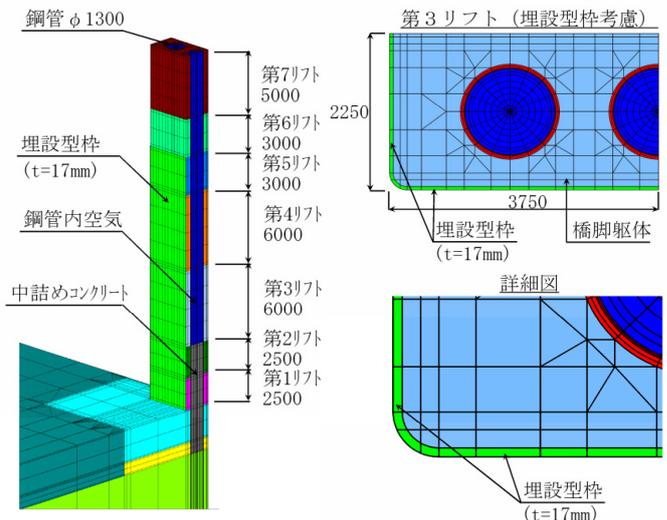


図-1 解析モデル

図-2 脚柱部断面図

表-1 温度応力解析に用いた物性値

区分	名称	物性値	
		躯体コンクリート 高炉セメントB種	
躯体コンクリート 中詰めコンクリート	使用コンクリート	高炉セメントB種	
	単位セメント量 [kg/m ³]	399	
	熱伝導率 [W/m°C]	2.7	
	密度 [kg/m ³]	2300	
	比熱 [kJ/kg°C]	1.16 ※1	
	断熱温度上昇特性	$Q_{in} \times (1 - e^{-t/\tau})$ ※2	
	ヤング率 [N/mm ²]	$\phi(t) \times 4700 \times \sqrt{f'_{cs}(t)}$ ※2	
圧縮強度 [N/mm ²]	$\{t/(a+bt)\} \times d \times f'_{cs}$ ※2		
引張強度 [N/mm ²]	$0.44 \times \sqrt{f_{cs}}$ ※2		
鋼管	熱伝導率 [W/m°C]	83.7	
	密度 [kg/m ³]	7850	
	比熱 [kJ/kg°C]	0.46	
	ヤング率 [N/mm ²]	2.0×10^5	
埋設型枠	熱伝導率 [W/m°C]	2.24	
	密度 [kg/m ³]	2400	
	ヤング率 [N/mm ²]	3.5×10^4	

※1 コンクリート標準示方書に示されている標準値の平均

※2 コンクリート標準示方書[2002年制定・施工編]による

コンクリート実測温度と温度解析結果との比較を行った。

一般的な単位セメント量 (c=280kg/m³程度) の場合、標準的な物性値を使用することで解析温度と実測温度は概ね近くなることがわかっている。²⁾ しかしながら、本解析の結果はピークの実測温度が解析温度を 10°C 程度上回り、また、温度がピークを迎えたあとの温度降下は実測温度の方が緩やかであった。これは、単位セメント量が多いため一般的な配合のコンクリートとは異なる傾向になったものと考えられる。そこで、コンクリート熱物性値の一つである比熱 (1g 当りの物質の温度を 1°C 上げるために必要な熱量) に着目して検証を行った。

3.2 比熱の検証

前述の温度比較は躯体コンクリートの比熱を 1.16kJ/kg°C (コンクリート標準示方書に示されている標準値の平均) とした結果であるが、このほかに 1) 2.5kJ/kg°C、2) 3.5kJ/kg°C、3) 4.5kJ/kg°C の 3 ケ

ースについて解析を行い、実測温度と温度解析結果との比較を行った。図-3 に内部温度時刻歴図を示す。

材令初期のピーク温度に着目した場合、比熱値が上がるにつれ解析温度が実測温度に近づくものとなった。また、ピーク後の温度降下は、比熱 1.16 kJ/kg・℃では全般的に解析結果と実測温度との差が大きいものとなる。特に材令初期の温度の降下速度が早く、温度差が顕著となる。一方、比熱 2.5 kJ/kg・℃では温度降下も含めて概ね一致する結果となった。また、更に比熱を大きくした 3.5 kJ/kg・℃、4.5 kJ/kg・℃では温度降下は更に緩くなり、材令後期においてもその差は大きい。以上から、コンクリートの温度上昇および降下については比熱が関係していることが言える。

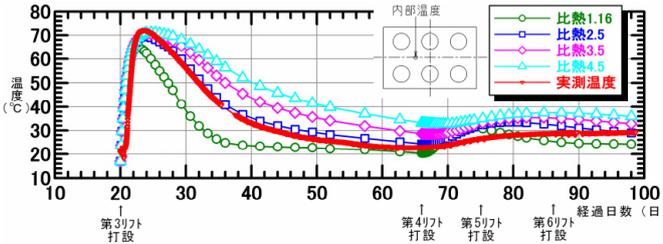


図-3 コンクリートの内部温度時刻歴図 (第3リフト)

4. 温度応力解析結果

4.1 埋設型枠を考慮した場合のひび割れ指数への影響

埋設型枠が設置されることによる温度応力への影響確認として、型枠を考慮しない場合について解析を行った。図-4 に躯体表面部における最小ひび割れ指数経験値図の比較を示す。この結果から、ひび割れ指数は、型枠を考慮した場合は考慮しない場合に比べて改善することが言える。

躯体コンクリートは凝固に伴って埋設型枠と一体化することとなるが、同時に躯体表面部では水和膨張に伴った内部拘束による引張応力が経時的に変化しながら生じている。ひび割れ指数が改善されたのは、材令初期の躯体に比べて剛性の高い型枠が設置されることによって躯体の膨張量が抑えられ、引張応力が軽減されたためと考える。このほか、型枠の剛度を上げるにつれ表面部の引張応力が減少し、ひび割れ指数が更に改善することをあわせて確認をしている。以上から、表面部の応力は躯体表面に設置される型枠の影響を受けることが言える。

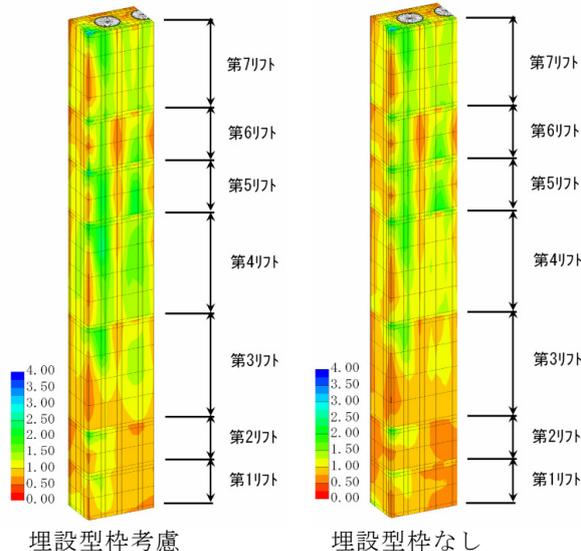


図-4 最小ひび割れ指数経験値図 (脚柱部表面)

4.2 埋設型枠の温度応力検証

埋設型枠には躯体の温度応力の影響を受け応力が作用することから、埋設型枠を対象とした温度応力の検証を行った。図-5 に埋設型枠における最大引張応力分布図、図-6 に最大引張ひずみ分布図を示す。

今回使用した型枠は、引張応力 $\sigma = 15 \text{ N/mm}^2$ 、ひずみ $\epsilon = 340 \mu$ までは弾性体として挙動し、ひび割れは発生しないことが引張試験によりわかっている。型枠に作用する引張応力は躯体短辺部や応力が集中しやすい隅角部の一部で $10 \sim 11 \text{ N/mm}^2$ となっているものの、全般的に $\sigma = 15 \text{ N/mm}^2$ を下回る結果となった。本橋は単位セメント量が多く水和膨張量が大きいため作用する応力も大きめとなるが、このような状況下においても埋設型枠は躯体の温度応力の影響によってひび割れが発生する応力状態には至らないことがわかった。

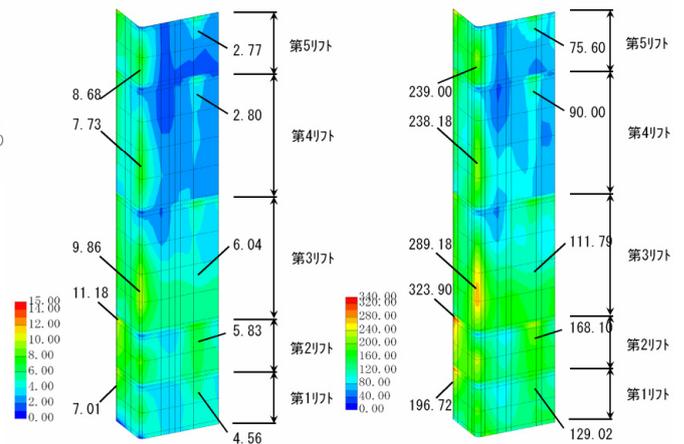


図-5 埋設型枠における最大引張応力分布図

図-6 埋設型枠における最大引張ひずみ分布図

5. まとめ

今回の温度応力解析結果をまとめると、以下のことが言える。

- 1) 単位セメント量が多い場合、材令初期のピーク温度やその後の温度降下など温度に与える影響が大きく、温度応力解析に使用する熟物性値の設定で注意が必要となる。特に比熱が大きく関係しており、本解析ではコンクリート標準示方書に示されている比熱の標準値 (1.05~1.26 kJ/kg・℃) よりも大きい 2.5 kJ/kg・℃とした。
- 2) 躯体表面部に埋設型枠を設置した場合、表面部の応力は設置される型枠により作用する引張応力が軽減され、ひび割れに対して有効となる。
- 3) 埋設型枠には躯体の温度応力の影響を受け応力が作用する。その大きさは今回のように単位セメント量が多いため一般的なコンクリートに比べ水和膨張量が大きい場合についても、型枠にひび割れが発生するまでには至らない。

参考文献

- 1) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書 施工編
- 2) 長太・野田・赤代・三田村：冬期施工時における鋼管・コンクリート合成構造橋脚の温度ひび割れ対策、平成 17 年度 第 60 回年次学術講演会講演論文集