

# [8] コンクリート橋脚の温度応力に関する研究

正会員 吉田 弥智 (名古屋工業大学工学部)  
 正会員 梅原 秀哲 (名古屋工業大学工学部)  
 田中 敏幸 (日本道路公団 大阪建設局)  
 正会員 岩山 孝夫 (矢作建設工業 土木部)

## 1. まえがき

コンクリート構造物の耐久性が、広く問題となっている現在において、コンクリートの初期欠陥であるひびわれに関する問題は、コンクリートに携わる者にとって重要な問題である。その中でコンクリートの温度応力によるひびわれに関する研究は、最近急速に進んでいる。また一般の構造物の施工にあたっては、鉄筋の継手、打設能力、型枠、支保工など施工上の問題より構造物をいくつかの打設リフトに分けて施工される場合が多い。このような中で、この度実際のコンクリート橋脚の温度応力を計測する機会を得た。そこで、最近公表された J C I マスコン委員会法<sup>1)2)</sup>を用いて温度応力の実測と打設リフトを考慮した温度応力解析との比較を行ったので、ここに報告する。

## 2. 構造物と計測の概要

本研究において対象となった橋脚と計測機器の配置を図-1、図-2に示す。本橋脚の施工は、フーチング部を2リフト、躯体部を5リフトとして計7リフトでコンクリートの打設を行った。図-2に示す様に、フーチングの側部は鋼管矢板で囲まれており、基礎杭などは用いられていない。また基礎地盤としては、ボーリング調査の結果、N値70相当の砂利の混ざった砂地盤であった。計測ブロックは、フーチングの下端から9.3mまでとし、躯体部第2リフトまでの4リフトとした。計測器としては、ひずみゲージ式温度計と有効応力計を用いており、温度計は4つのリフトに、応力計は躯体部第1リフトに設置した。計測期間は、フーチング部第1リフトのコンクリートの打設日を基準として30日間としている。

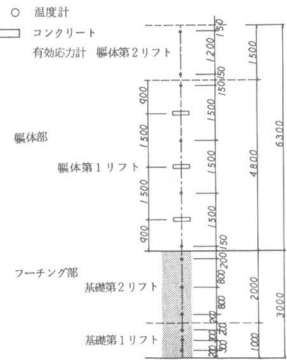


図-1 計測器埋設図

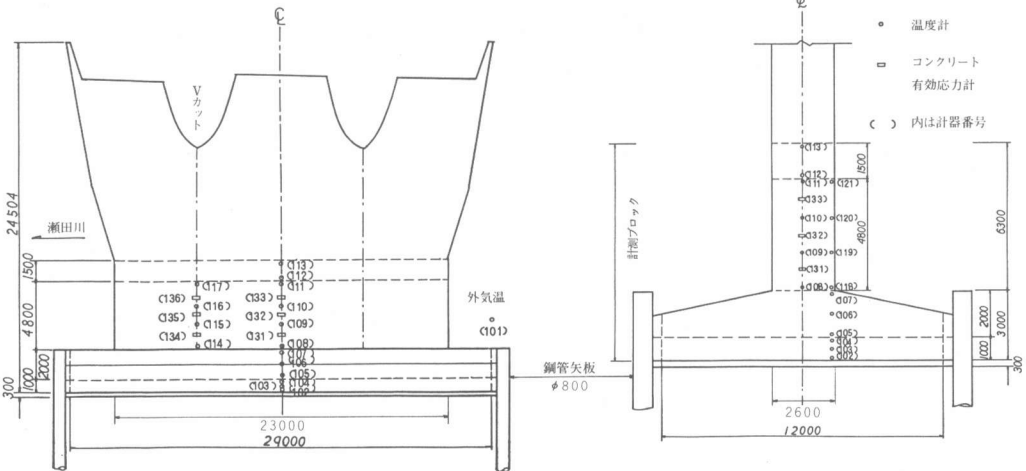


図-2 構造物の概要

表-1 コンクリートの配合とフレッシュ時の性質

配合 種別	セメント 種類	コンクリートの配合						フレッシュ時の性質			
		W/C (%)	s/a (%)	1 m <sup>3</sup> 当りの所用量 (kg)				ホゾリス No.5 L (Cx %)	スラン プ (cm)	空気 量 (%)	練上り 温度 (℃)
				C	W	S	G				
B1-1	N	51.3	40.5	300	154	749	1133	0.25	8.5	4.5	21.5
B2-1	BB	51.1	37.0	280	143	697	1225	0.25	8.5	4.5	21.0

B2-1の粗骨材は、Gmax.25とGmax.40を6：4で混合して使用した。

表-2 温度解析における計算条件

	フーチング部	橋体部
打ち込み温度 (℃)	20	25および30
断熱温度上昇式		
T:コンクリート温度 (℃)	$T=48.5(1-\exp(-0.563t))$	$T=47.6(1-\exp(-0.784t))$
t:材令 (日)		
コンクリートの単位体積重量	2300	2300
$\rho c$ (kg/m <sup>3</sup> )		
コンクリートの比熱		
Cc (Kcal/kg℃)	0.31	0.31
コンクリートの熱伝導率		
$\lambda c$ (Kcal/mh℃)	2.50	2.50
砂地盤の単位体積重量		
$\rho c$ (kg/m <sup>3</sup> )	2000	2600
砂地盤の比熱		
Cg (Kcal/kg℃)	0.25	0.25
砂地盤の熱伝導率		
$\lambda g$ (Kcal/mh℃)	1.94	1.94
熱伝達率 (Kcal/m <sup>2</sup> h℃)	10	10

### 3. 温度の実測値と解析値との比較と考察

マスコンクリートの温度上昇を支配する最大の要因は、セメントの水和熱による温度上昇である。本研究では特に実際の構造物に用いられたコンクリートと配合、セメントの銘柄、製造工場、骨材、混和材を同一にして、断熱温度上昇試験を行った。その配合を表-1に示す。表の配合種別におけるB1-1は橋体部における配合であり、もう一方のB2-1は、フーチング部における配合を示し、セメント種類のNは普通セメント、BBは高炉B種セメントを表わしている。また粗骨材の最大寸法はB1-1が25mm、B2-1が40mmである。表-2に計算条件を示す。施工においては、橋体部に合板型枠を使用し、その脱型はコンクリート打設後約一週間であった。

本橋脚は橋体部が壁状構造物のため、解析では短辺方向の断面を用いて二次元熱伝導FEM解析により実際の構造物が施工されたのと同様に、打設リフトごとに熱対流境界を変化させて橋体部第5リフトまでの計7リフトでの解析を行った。そのときの解析モデルを図-3に示す。また、実測値の中より中央部のデータを選びグラフにしたものが図-4であり、同じ位置における解析値をグラフにしたものが図-5である。まず実測値を見ると、フーチング部第1リフトを打設した2日後に第2リフトを打設していることから、一度下り始めた温度が再び引き上げられているのがわかる。13日目において橋体部第1リフトを打設しているが、フーチングの温度がまだ十分冷えていないため、温度がフーチングでは60℃までしかあ

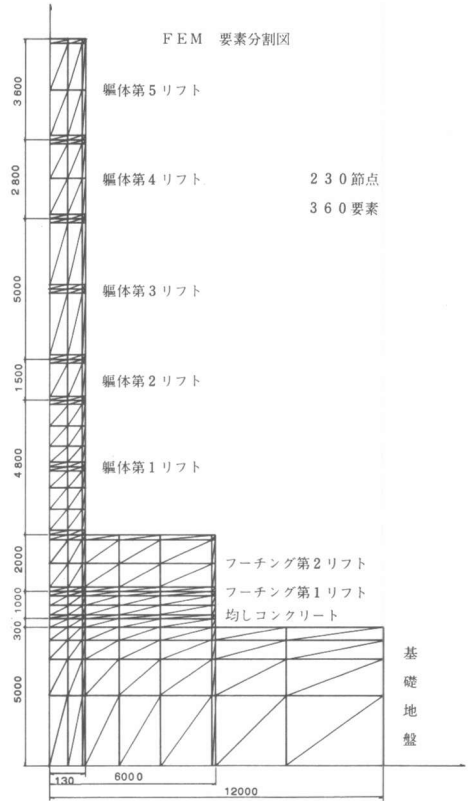


図-3 温度解析モデル

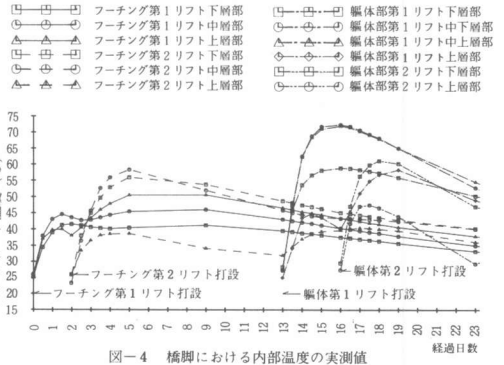


図-4 橋脚における内部温度の実測値

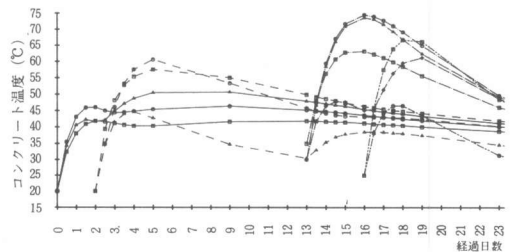


図-5 橋脚における内部温度の解析値

がっていないのに、7.5℃近くまで上昇している。また、躯体部第1リフトでも3日後に第2リフトを打設しているため、第1リフトの上部の温度が再び引き上げられている。フーチング部と躯体部を比べると、温度の下り方が躯体部の方が大きいことがわかる。次に解析値との比較を行う。図-5に示す様に解析値においても実測値の傾向が良く示されている。また温度の下り方については、解析値の方がやや少なく、この点については本解析が二次元解析であり、実際の構造物は三次元であるために、図-3における解析モデルの紙面垂直方向の冷えが考慮されていないためと思われる。しかし、全体的に解析結果は十分に実測値の傾向を表わしており、リフトを考慮した解析の必要性を示していると言えよう。

4. 応力の実測値と解析値との比較と考察

本研究では特に躯体第1リフトについて考察する。なお応力計算はマスコンクリートの温度応力研究委員会法(C.P.F.)<sup>1)2)</sup>を用いて行った。その計算条件を表-3に示す。コンクリートの各材令の弾性係数は、有効材令<sup>2)</sup>を用いてE<sub>c</sub>の推定を行い、応力の計算ステップにおける各リフトのE<sub>c</sub>を求めた。なおコンクリートの温度T<sub>i</sub>は、温度解析によって得られた各時間ステップにおける各リフトの平均温度を算出しT<sub>i</sub>としている。2、で述べたように本構造物の基礎地盤は砂地盤であることから、外部拘束係数を表より求める際に地盤の弾性係数E<sub>r</sub>が非常に低いことが予想される。そこで、表-4に示すように、E<sub>r</sub>を7500、10000、5500に変化させ、さらに水平長さLを3.0mと2.3mと段階的に変化させた場合とそうでない場合とにケースを分け、ケース1~7として解析を行った。次に若材令時のクリープを考慮するために表-5に基づき弾性係数を緩和させて、ケース8とした。また8つのケースは全て、温度解析と同様に7つのリフトを考慮した解析を行ったものである。引張強度の推定では、材料試験によって得られた圧縮強度より次の式によって引張強度を推定した。

$$F_t = 0.58 F'_c{}^{2/8} \quad (\text{kgf/cm}^2)^{3)}$$

ただしF<sub>t</sub>: 引張強度

F'<sub>c</sub>: 圧縮強度

なおこの式は、若材令時の引張強度に関しては、笠井による若材令時の引張強度式 (F<sub>t</sub> = 0.135 F'<sub>c</sub>, F<sub>c</sub> ≤ 100 kgf/cm<sup>2</sup>) とはほぼ同じ値を示すものである。以上の1~8のケースの解析結果の中で実測値に最も近い傾向を示したケース7とケース8について実測値と引張強度との比較のため下層、中層、上層に分けグラフに表わしたものが図-6、図-7、図-8である。なお横軸の材令(日)では、躯体第1リフトがフーチング

表-3 応力解析における計算条件

コンクリートの熱膨張係数 (/℃)	0.00001
コンクリートの弾性係数 推定式 E <sub>c</sub> : 有効材令における弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_c = \frac{t_e}{0.0761738 + 0.024121t_e} \times 10^4$
t <sub>e</sub> : 有効材令 (日) T <sub>i</sub> : コンクリートの温度 (℃) Δt <sub>i</sub> : 材令の増分 (日)	$t_e = 1/30 \sum (T_i + 10) \Delta t_i$

表-4 地盤の弾性係数を変えた場合の拘束係数

ケース	E <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	E <sub>r</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	E <sub>c</sub> /E <sub>r</sub>	L (m)	H (m)	L/H	R <sub>N</sub>	R <sub>M</sub>	R <sub>u</sub>
1							0.000	0.000	0.000
							0.000	0.000	0.000
							0.000	0.000	0.000
2	300,000	7,500	40.0	30.0	1.0	30.0	0.300	1.170	1.000
				30.0	3.0	10.0	0.085	1.050	1.250
				30.0	7.8	3.8	0.035	0.700	0.900
3	300,000	7,500	40.0	30.0	1.0	30.0	0.300	1.170	1.000
				30.0	3.0	10.0	0.085	1.050	1.250
				23.0	7.8	3.0	0.028	0.630	0.820
4	300,000	10,000	30.0	30.0	1.0	30.0	0.400	1.155	1.000
				30.0	3.0	10.0	0.120	1.170	1.320
				30.0	7.8	3.8	0.045	0.800	0.950
5	300,000	10,000	30.0	30.0	1.0	30.0	0.400	1.155	1.000
				30.0	3.0	10.0	0.120	1.170	1.320
				23.0	7.8	3.0	0.038	0.700	0.820
6	300,000	5,500	54.5	30.0	1.0	30.0	0.260	1.175	1.020
				30.0	3.0	10.0	0.070	0.800	1.150
				30.0	7.8	3.8	0.030	0.600	0.900
7	300,000	5,500	54.5	30.0	1.0	30.0	0.260	1.175	1.020
				30.0	3.0	10.0	0.070	0.800	1.150
				23.0	7.8	3.0	0.023	0.530	0.820
			23.0	9.3	2.5	0.020	0.500	0.750	

表-5 初期材令の弾性係数の緩和係数 (ケース8)

t <sub>e</sub> < 3日	0.75
3日 < t <sub>e</sub> < 4日	0.80
4日 < t <sub>e</sub> < 5日	0.85
5日 < t <sub>e</sub> < 6日	0.90
6日 < t <sub>e</sub> < 7日	0.95
t <sub>e</sub> > 7日	1.00

t<sub>e</sub>: 有効材令 (日)

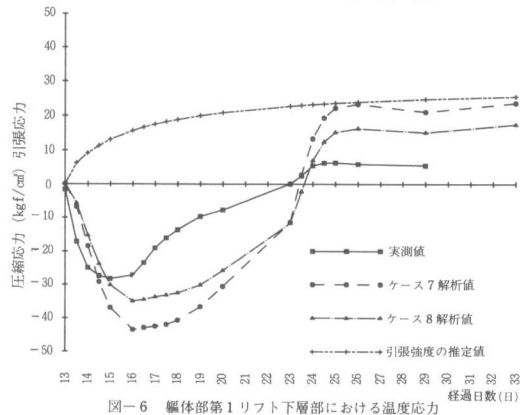


図-6 躯体部第1リフト下層部における温度応力

第1リフト打設13日後に打込まれたので、13日から始まっている。まず実測値について考える。図-6の下層において、15日目に圧縮応力のピークが表われ、16日で減少を始めている。また17日から20日にかけて応力度の曲線の凹凸が反転している。これは16日目に打設された躯体第2リフトの影響と思われる。次に図-7の中層を見ると、下層と非常に良く似た傾向を示している。さらに図-8の上層を見ると、躯体第2リフトの影響が著しく、圧縮応力のピーク値が2度現われているのがわかる。3つの層に共通して言えることは、24日目において急激に引張側に転じて、その後応力が非常に低い値を示していることで、ここで内部においてひびわれが生じたように思われる。次に解析値について考える。図-6の下層を見ると、実測値に比べケース7は圧縮応力のピーク値が大きい。またケース8ではその差が小さくなっている。しかし、実測値ほどは第2リフトの影響は見られていない。図-7の中層においても、やはり下層と同じ傾向を示している。図-8の上層では、ケース7もケース8も第2リフトの影響が非常に良く現われている。3つの層について、解析値は24日頃に急激に引張側に転じており、いずれも実測値の傾向を良く示している。これは、躯体

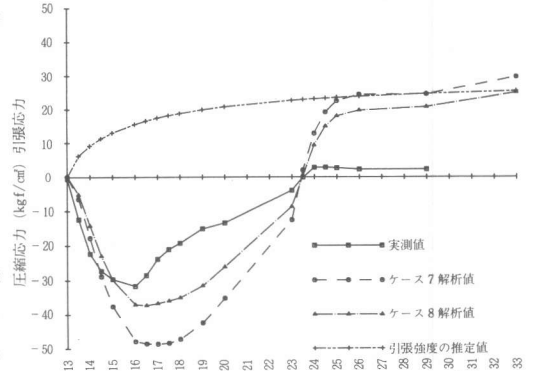


図-7 躯体部第1リフト中層部における温度応力経過日数(日)

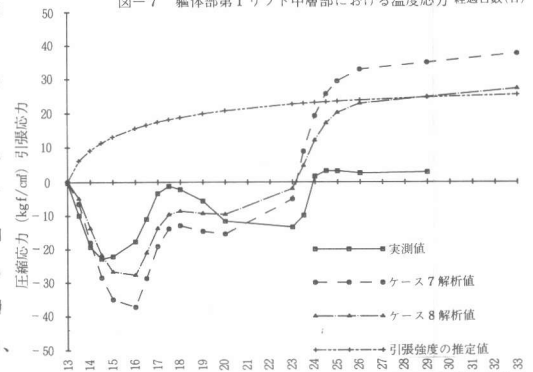


図-8 躯体部第1リフト上層部における温度応力経過日数(日)

第2リフトが3日後に打設されなければ、下層から上層にかけてもっと早い材令において急激に圧縮応力から引張応力に転じ、躯体第1リフトにおいてもっと若い材令においてひびわれ発生の可能性があったものと考えられる。これらより応力解析においてもやはり、打設リフトを考慮した解析が必要と思われる。

### 5. 結論

- (1) 温度解析においては、一番下のリフトから計算を始めて最終リフトまでの温度の影響を考慮した解析を行う必要がある。たとえば、先に打設されたリフトの影響により6.0℃程度しかあがらないはずのリフトが、7.5℃近くにもなる可能性があり、このことからリフトを考慮した温度解析が必要であることを示している。
- (2) 応力解析においてもリフトの影響があり、特に打継目近くで顕著となり、ここでもリフトを考慮する必要性を示している。
- (3) 応力解析においては、従来から言われているように若材令時の弾性係数の影響が非常に大きい。弾性係数の発現においては、温度履歴の影響と若材令時のクリープの影響が考えられるため、解析に用いる弾性係数の算定では、施工の実情に良くあった有効材令などを求めてから弾性係数を決定する必要がある。

最後に本研究にあたり多大な御協力をいただいた、日本道路公団大阪建設局の方々、矢作・林建設共同企業体の方々、三菱鉱業セメント中央研究所の仁木 伯氏、藤本泰久氏、原田克己氏、名古屋工業大学社会開発工学科コンクリート研究室の赤井登助手、川瀬康彰技官、佐竹君、田中君、白浜君に紙面を借りて感謝します。

<p>参考文献</p> <p>1) マスコンクリートの温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム</p> <p>2) マスコンクリートの温度応力研究委員会 報告書</p> <p>3) 岡村 甫 著、コンクリート構造の限界状態設計法</p> <p>4) 笠井芳夫、コンクリートの初期引張強度に関する研究、コンクリートジャーナル</p>	<p>1985年11月 日本コンクリート工学協会</p> <p>1985年11月 日本コンクリート工学協会</p> <p>1984年 5月</p> <p>1968年 7月</p>
--	---