

柱頭部のマスコンクリート対策 - 天満橋 -

九州支店 PC事業部 藤田知高

概要: 天満橋の柱頭部は、その形状・打設量からマスコンクリートに該当する。柱頭部施工における工程上の問題から、使用セメントの制限(普通セメント・早強セメントの併用)と、夏期(8月)のコンクリート打設は避けられず、セメントの水和発熱に起因する温度応力ひび割れの発生が懸念された。そこで事前に温度解析を行い、マスコンクリート対策として、断熱型枠の使用、パイプクーリングの実施、また解析により得られた温度ひび割れ指数の特に小さい部位への補強筋の追加を提案した。本報告は、温度解析結果と実施工結果を対比させ、マスコンクリート対策の有用性および今後の課題について述べたものである。

Key Words: マスコンクリート, 温度解析, 温度応力ひび割れ, パイプクーリング

1. 工事概要

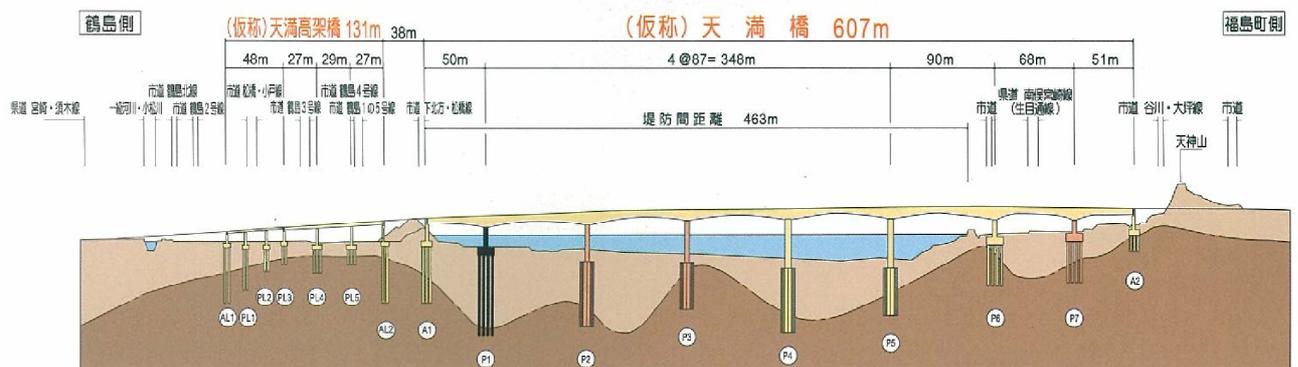


図-1 天満橋全体一般図

天満バイパスは、宮崎市中心部や清武・田野町方面の慢性的な交通渋滞の緩和を図るため、国道269号のバイパスとして平成7年度から着手されており、天満橋は、この天満バイパス区間内の大淀川に架かる橋梁である。図-1に天満橋全体一般図を、図-2に標準断面図を示す。天満橋の工事概要および橋梁諸元は以下のとおりである。

工事名：平成14年度国改築3-3-2-2号一般国道269号
道路改築事業(天満橋上部工)

施主：宮崎県 宮崎土木事務所

工事場所：宮崎市福島町(大淀川)

橋梁形式：8径間連続PC変断面2室箱桁橋

橋長：607.000m

支間割：50.0m+4@87.0m+90.0m+68.0m+51.0m

有効幅員：25.000m

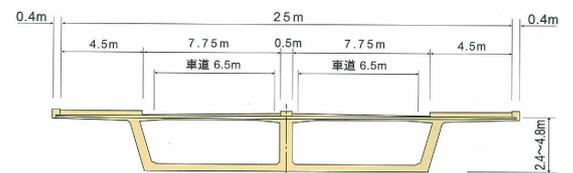


図-2 標準断面図



藤田知高

b) 材料条件

材料条件として必要となる条件は、コンクリートの物性データである。本解析で使用したコンクリートの物性データを表-2 に示す。主な物性データは、使用予定コンクリートの配合報告書を元に、「コンクリート標準示方書[施工編]2002年版」¹⁾に従って算出した。

表-2 コンクリートの物性データ

	単位	算出方法	1-LOT	2-LOT
セメントの種類	-	配合報告書より	普通(N)	早強(H)
単位セメント量	C kg/m ³	配合報告書より	388	395
熱伝導率	λ W/m	コンクリート標準示方書より	2.700	2.700
密度	ρ kg/m ³	配合報告書より	2348.91	2343.96
比熱	kJ/kg	コンクリート標準示方書より	1.155	1.155
断熱温度上昇特性		$Q(t)=Q \{1-\exp(-r \times t)\} \dots$ Q、r はセメント種類と打込温度により定まる係数	式	式
コンクリート打込温度	T	仮定値	30	30
弾性係数	Ee N/mm ²	$Ee(t)=\Phi(t) \times 4700 \times \{f_c(t)\} \dots$	式	式
圧縮強度	f _c N/mm ²	$f_c(t)=\{t/(a+b \times t)\} \times d(28) \times 40 \dots$ a、b、d(28) はセメント種類により定まる係数	式	式
引張強度	f _t N/mm ²	$0.44 \times \{f_c(t)\} \dots$	式	式
ポアソン比	-	コンクリート標準示方書より	0.180	0.180
線膨張係数	μ/	コンクリート標準示方書より	10.0	10.0
クリープ構成則	-	コンクリート標準示方書より	有効弾性係数法	有効弾性係数法
乾燥収縮ひずみ	-		考慮しない	考慮しない
自己収縮ひずみ	-		考慮しない	考慮しない
鉄筋	-		考慮しない	考慮しない

c) 施工条件

施工条件として必要となる条件は、打設工程、拘束条件、型枠および養生条件、パイプクーリング条件である。以下に、本解析で使用したそれぞれの条件を示す。

i) 打設工程

想定した打設工程を元に解析を行った。打設工程および解析時刻みを表-3 に示す。

ii) 拘束条件

対称面上の節点には、対称面に鉛直方向の自由度(変位成分)を拘束し、柱頭部下面の接点には、垂直方向の自由度を拘束し、解析を行った。図-6 に拘束条件図を示す。

表-3 打設工程および解析時刻み

通算時間 (day)	時刻み (hour)
1-LOT 打設(7月下旬)	
0 ~ 3	3.0
~ 7	12.0
~ 30	24.0
2-LOT 打設(8月下旬)	
~ 33	3.0
~ 37	12.0
~ 60	24.0
~ 90	48.0

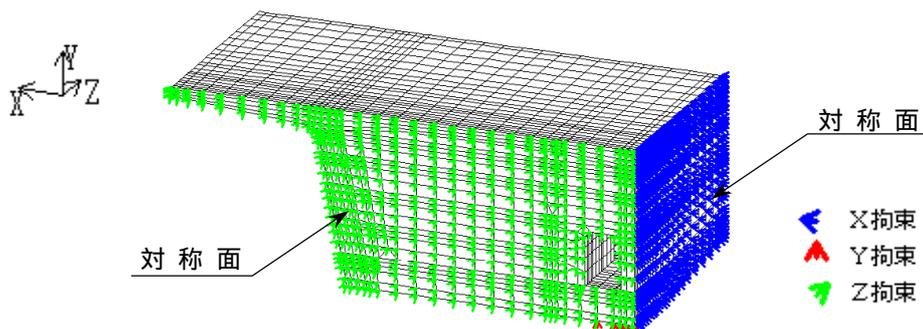


図-6 拘束条件図

iii) 型枠および養生条件

本橋梁では、マスコンクリート対策の1つとして、断熱型枠の設置を提案した。断熱型枠を設置すると、水和後期のコンクリート温度低下速度が緩和されることで、内部と表面との温度差が小さくなり、発生応力の低減が期待できる。マスコンクリート対策あり(以下「対策あり」)およびマスコンクリート対策なし(以下「対策なし」)それぞれについての型枠および養生条件をそれぞれ図-7、表-4 および図-8、表-5 に示す。

< 対策なし >

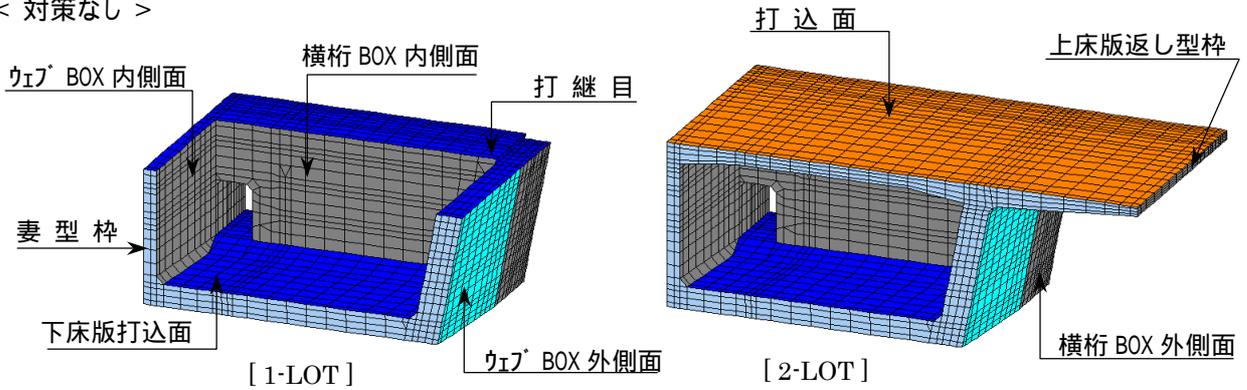


図-7 型枠および養生条件図(対策なし)

表-4 型枠および養生条件表(対策なし)

	養生方法	熱伝達率 $\lambda(W/m^2)$	養生期間 (day)							
			0	1	30	31	34	90		
上床版	打込面	養生マット+散水養生	5	12	[Orange bar]					
	返し型枠	木製型枠	8	12	[Grey bar]					
	BOX内底面	木製型枠	8	12	[Grey bar]					
	張出底面	鋼製型枠	14	12	[Cyan bar]					
打継目		養生マット+散水養生	5	12	[Blue bar]					
妻型枠		木製型枠	8	12	[Light blue bar]					
ウェブ	BOX内側面	木製型枠	8	12	[Grey bar]					
	BOX外側面	鋼製型枠	14	12	[Cyan bar]					
横桁	BOX内側面	木製型枠	8	12	[Grey bar]					
	BOX外側面	木製型枠	8	12	[Grey bar]					
	底面	木製型枠	8	12	[Grey bar]					
下床版	打込面	養生マット+散水養生	5	12	[Blue bar]					
	底面	鋼製型枠	14	12	[Cyan bar]					

< 対策あり >

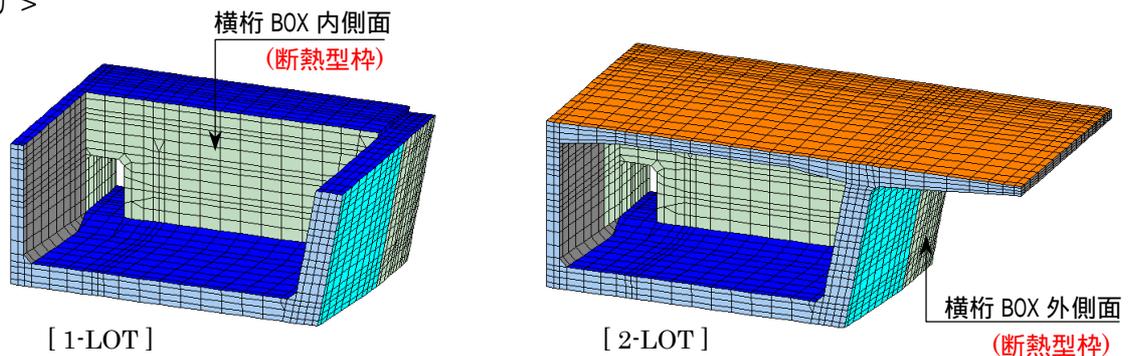


図-8 型枠および養生条件図(対策あり)

表-5 型枠および養生条件表(対策あり) 「対策なし」からの変更分のみ示す。

		養生方法	熱伝達率 $\lambda(W/m^2)$	養生期間 (day)					
				0	1	30	31	34	90
横 桁	BOX内側面	発砲スチロール	2 12	[Green Bar]					
	BOX外側面	発砲スチロール	2 12	[Green Bar]					

写真-1 に、実施工時の型枠設置状況を示す。白色の資材は断熱型枠としての発砲スチロールである。型枠背面はサポートその他で必ずしも平面ではなく、発砲スチロールを隙間の形状に合わせて加工し、隙間無く設置する必要があるため、手間と時間が掛かる作業となる場合が多いようである。



写真-1 型枠設置状況

iv) パイプクーリング条件

マスコンクリート対策の1つとして、パイプクーリングの実施を提案した。パイプクーリングを実施すると、水和初期のコンクリート温度上昇時における部材内部の温度上昇が抑制される。断熱型枠と併用することで、部材表面温度は上昇し、結果として表面と内部との温度差が小さくなり、発生応力の低減が期待できる。通水条件は、「マスコンクリートのひびわれ制御指針(昭和61年版)」²⁾に示されている「パイプクーリング推奨値」を参考に決定した。解析に用いた通水条件を表-6に示す。また解析上のクーリングパイプ設置模式図を図-9に示す。

表-6 通水条件一覧

		単位	算出方法	1-LOT	2-LOT
パイプ径	ϕ	mm	JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針より	25	
パイプ断面積	A	m ²	$A = \phi^2 \times \pi / 4$	4.909×10^{-4}	
流水流量	Q	m ³ /sec	JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針より	2.667×10^{-4}	
流速	u	m/sec	$u = Q / A$	0.543	
熱伝達率	h	W/m ²	$h = 552 \times u + 50$	349.74	
流水温度	T		仮定値	25	20
通水期間	day		繰り返し計算により決定	4	2

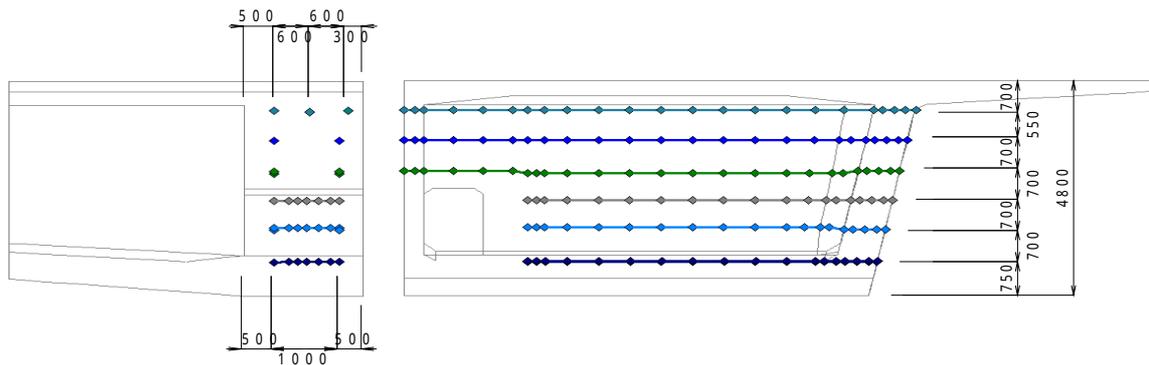


図-9 クーリングパイプ設置模式図

写真-2 に、クーリングパイプ設置状況写真を示す。パイプは、25mm 鋼製グラウトホースを使用した。なお実施工における総使用水量は、1-LOT目:約1350 m³、2-LOT目:約480 m³であった。



写真-2 クーリングパイプ設置状況

(3) 解析結果

a) 温度ひび割れ指数

コンクリートの引張強度と主引張応力の比より求まる温度ひび割れ指数に着目し、評価を行った。[対策なし]の最小温度ひび割れ指数経験図を示す図-10(a)~(c)より、特に温度応力ひび割れ発生確率が高いと予想される5点に着目した。図-10(d)には温度ひび割れ指数履歴図を示した。同様に[対策あり]について示した図-11(a)~(d)と対比することにより、マスコンクリート対策の有無による比較を行った。最小ひび割れ指数の比較結果を表-7に示す。

< 対策なし >

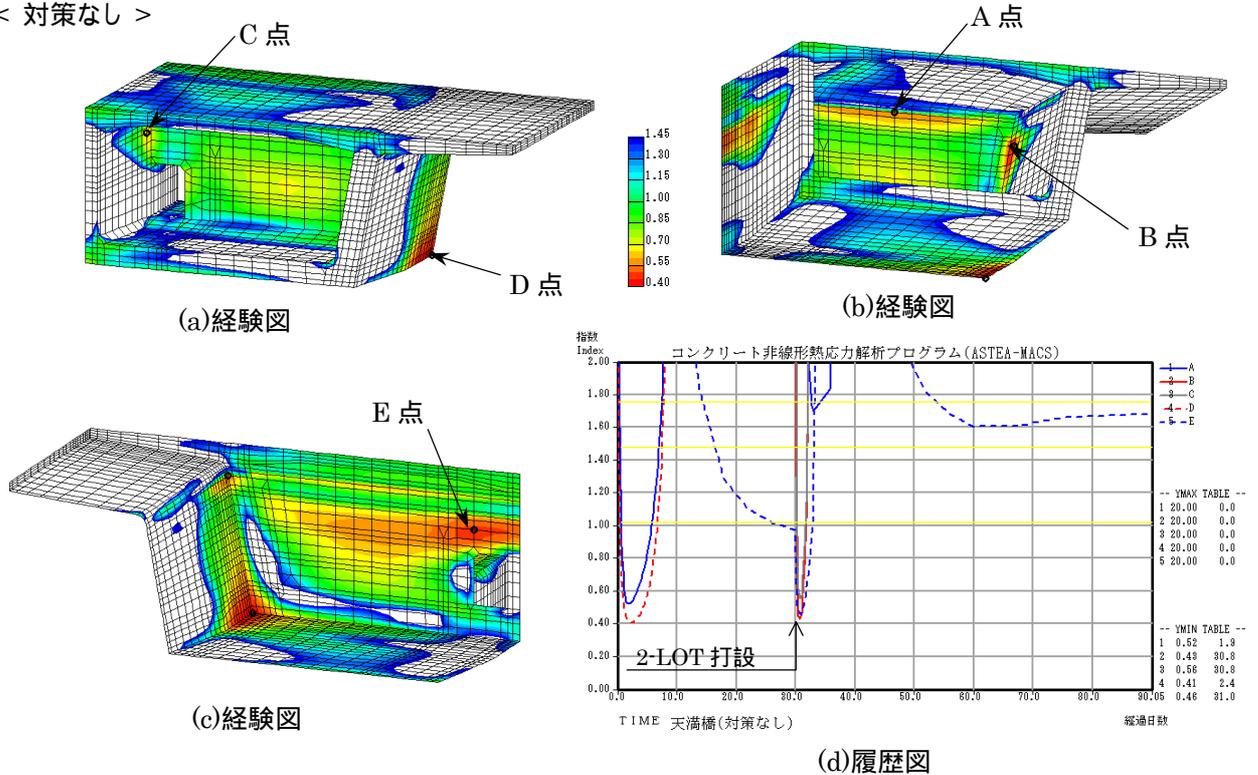


図-10 [対策なし]温度ひび割れ指数解析結果 (a~c:経験図, d:履歴図)

< 対策あり >

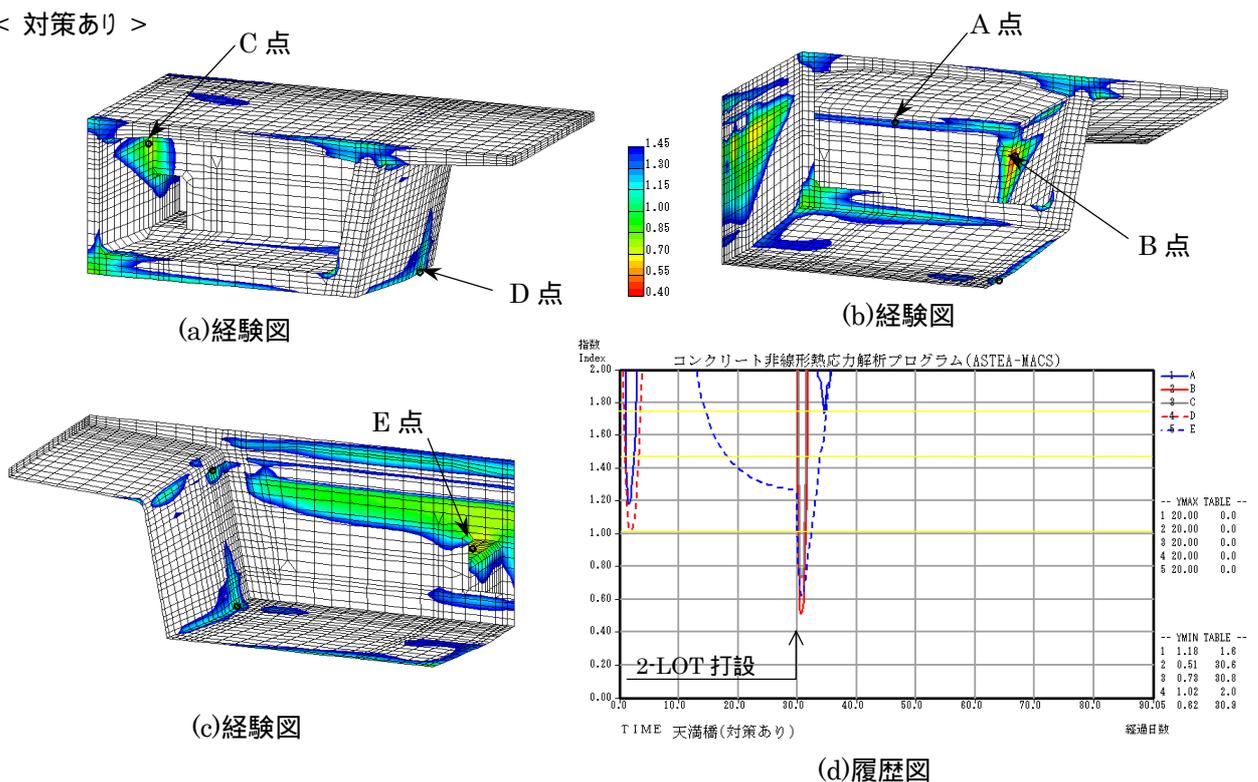


図-11 [対策あり]温度ひび割れ指数解析結果 (a~c:経験図, d:履歴図)

表-7 に示す最小温度ひび割れ指数の比較結果より、対策の実施により改善の程度にはばらつきはあるものの、全ての着目点について最小温度ひび割れ指数が増加しており、ひび割れ発生確率が減少したことが分かる。よって、マスコンクリート対策として提案した断熱型枠の使用およびパイプクーリングの実施は、有効な対策となり得ると判断し、実施工において採用することとした。しかしながら、対策を講じた場合でも、温度ひび割れ指数が 1.0 を下回る箇所もあることから、ひび割れの発生が懸念される箇所には、ひび割れ幅が過大とならないよう、補強筋の追加を提案した。以下、解析結果から追加筋の算定までを示す。

b) 主引張応力度

ひび割れの懸念される箇所への補強筋の追加には、その箇所が発生している引張応力の依存方向を策定した後、その方向に配置されている鉄筋量(鉄筋比)とその箇所における最小温度ひび割れ指数から、最大ひび割れ幅を予想し、予想されるひび割れ幅が許容ひび割れ幅(0.005c; c はかぶりであり、本橋では c=35mm)³⁾以上である場合には、許容ひび割れ幅以下となるよう補強筋を追加することとした。最大主引張応力度および依存成分を表-8 に、主引張応力履歴図を図-13 に示す。

表-7 最小温度ひび割れ指数の比較

	最小温度ひび割れ指数 ()内はその時点の材齢	
	対策なし	対策あり
A (上床版BOX内側打継目)	0.52 (t= 1.9)	1.18 (t= 1.6)
B (外ウェブ BOX内側支点)	0.43 (t=30.8)	0.51 (t=30.6)
C (中壁支点)	0.56 (t=30.8)	0.73 (t=30.8)
D (下床版下面)	0.41 (t= 2.4)	1.02 (t= 2.0)
E (横桁開口部下面)	0.46 (t=31.0)	0.62 (t=30.9)

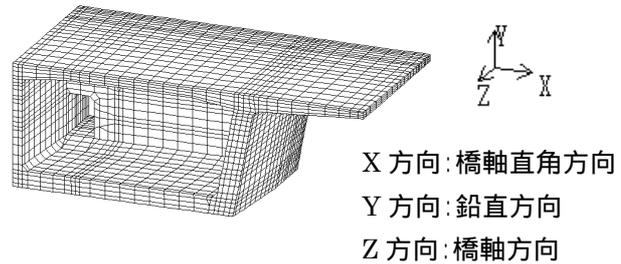


図-12 応力依存方向成分

表-8 最大主引張応力度一覧 (は、主引張応力の依存方向成分)

	記号	最大応力度(N/mm ²)				最大主引張応力度発生時期
		主引張 σ_1	X成分 σ_x	Y成分 σ_y	Z成分 σ_z	
上床版BOX内側打継目	A	1.46	1.32	1.30	0.09	第2リフト打設後 4.5 日後
外ウェブ BOX内側支点	B	5.78	0.67	0.41	5.40	第2リフト打設後 14 時間後
中壁支点	C	3.97	0.47	0.36	3.53	第2リフト打設後 19 時間後
下床版下面	D	1.66	0.07	0.05	1.66	第1リフト打設後 2.4 日後
横桁開口部下面	E	4.51	4.36	0.57	0.40	第2リフト打設後 22 時間後

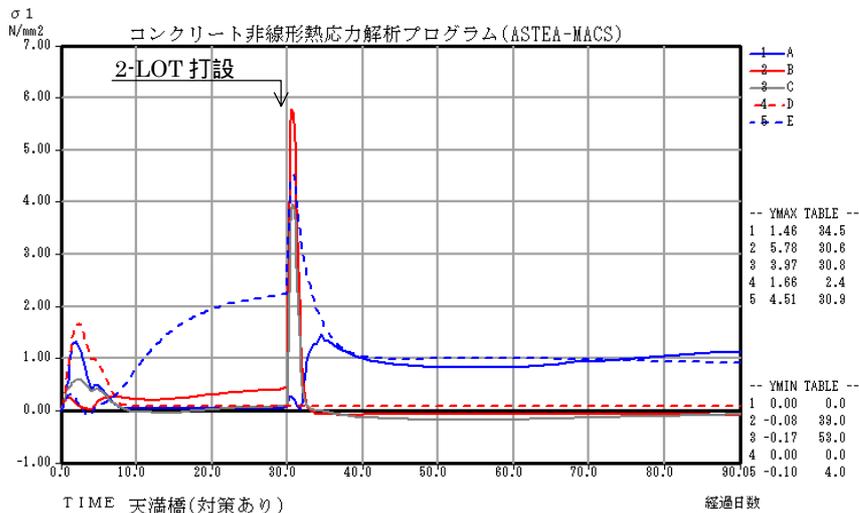


図-13 主引張応力履歴図

c) 最大ひび割れ幅

ひび割れ指数分布深さを示す図-14(a)~(f)より、着目点の部材における鉄筋比を算出した。算出された鉄筋比を表-9に、推定された最大ひび割れ幅を表-10に示す。なお最大ひび割れ幅の推定には「コンクリート標準示方書」に示されている最大ひび割れ幅と温度ひび割れ指数との関係図⁴⁾(次項図-15および16に示す)を用いた。

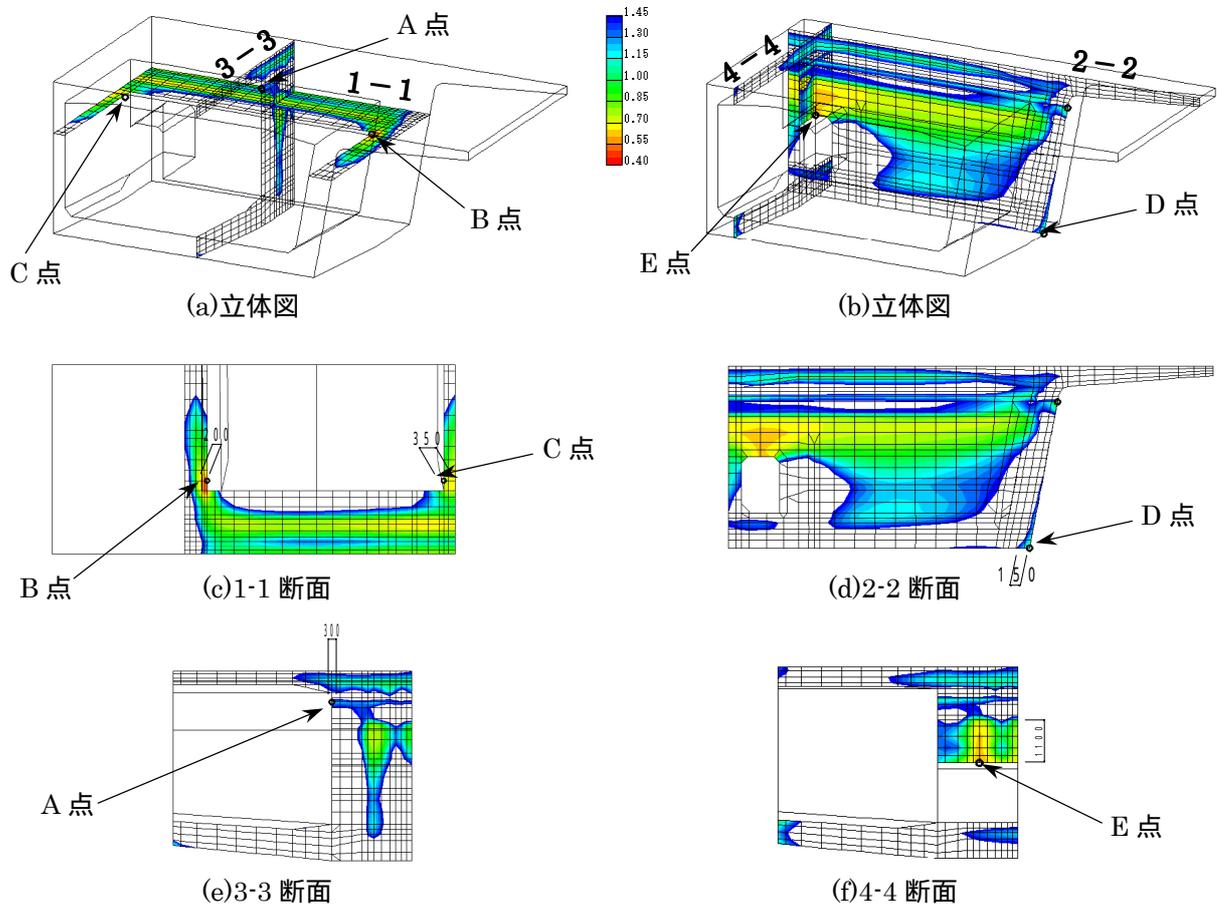


図-14 温度ひび割れ指数分布深さ (a,b:立体図, c~f:断面図)

表-9 着目点における部材の鉄筋比

	記号	主応力 最大成分	指数分布 幅W(mm)	実配置鉄筋			鉄筋比 (%)
				鉄筋径	ピッチs(mm)	配置本数N	
上床版BOX内側打継目	A	X	300	D16	250	3	0.79
外ウエブBOX内側支点	B	Z	200	D13	125	1	0.51
中壁支点	C	Z	350	D13	125	1	0.29
下床版下面	D	Z	150	D13	125	2	1.35
横桁開口部下面	E	X	1100	D16	125	5	0.72

表-10 推定最大ひび割れ幅(次項図-15より推定)

	記号	主応力 最大成分	ひび割れ 指数	最大ひび割れ 幅(mm)	許容ひび割れ 幅(mm)	
上床版BOX内側打継目	A	X	1.18	0.105	0.175	
外ウエブBOX内側支点	B	Z	0.51	0.315	0.175	配置鉄筋変更
中壁支点	C	Z	0.73	0.345	0.175	配置鉄筋変更
下床版下面	D	Z	1.02	-	0.175	
横桁開口部下面	E	X	0.62	0.180	0.175	配置鉄筋変更

表-10 において、最大ひび割れ幅が許容ひび割れ幅を越えた点については、配置鉄筋の変更(補強筋の追加)を提案した。必要な配筋量は、着目点におけるそれぞれの温度ひび割れ指数から、最大ひび割れ幅が許容ひび割れ幅以下となるための鉄筋比の範囲を読み取り、その範囲内あるいはそれ以上の鉄筋比となるように配筋量を決定した。決定した鉄筋比およびそこから推定される最大ひび割れ幅を表-11 に示す。

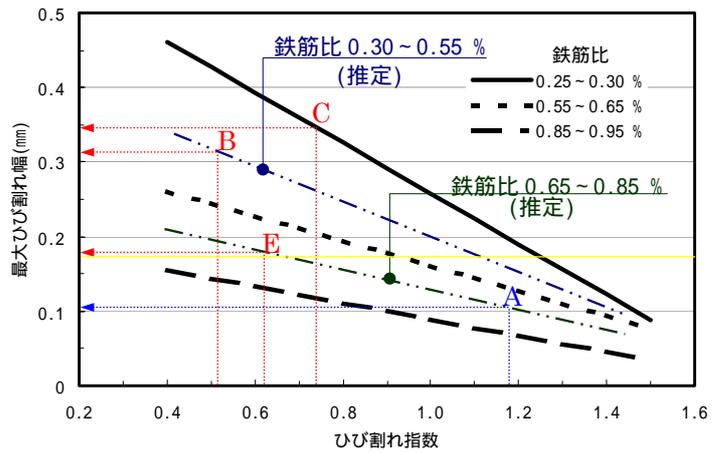


図-15 最大ひび割れ幅と温度ひび割れ指数との関係⁴⁾
(配置鉄筋変更前)

表-11 配置鉄筋変更後の鉄筋比および推定最大ひび割れ幅(図-16 より推定)

	記号	着目部材幅W(mm)	変更後配置鉄筋			鉄筋比 (%)	最大ひび割れ幅(mm)	許容ひび割れ幅(mm)
			鉄筋径	ピッチs(mm)	配置本数N			
外ウエブBOX内側支点	C	200	D13	125	2	1.01	0.140	0.175
中壁支点	D	350	D19	125	1.5	0.98	0.120	0.175
横桁開口部下面	E	1100	D19	125	5	1.04	0.130	0.175

図-17 に、配置鉄筋変更概念図を示す。配筋の変更は、既設配筋を生かしつつ、補強筋として追加する方法とした方が、現場作業を考慮した場合には、鉄筋加工の変更等をする必要が無いため、効率的であると思われる。しかしながら、既設配筋が密で補強筋を単純に追加することが物理的に困難である場合も多いことが予想される。本橋梁においては、追加筋配置が可能であったことから、図-17 に示すような配筋を提案することができた。

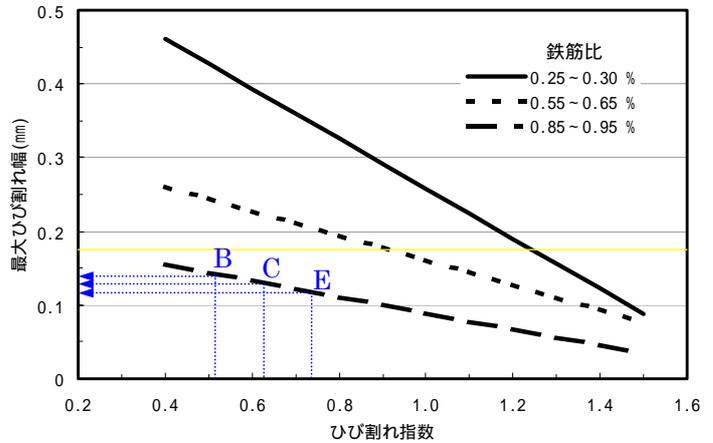


図-16 最大ひび割れ幅と温度ひび割れ指数との関係⁴⁾
(配置鉄筋変更後)

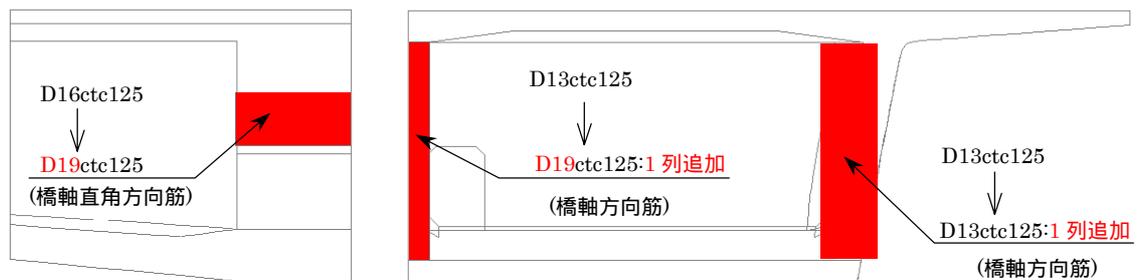


図-17 配置鉄筋変更概念図

3. 実施工と解析結果との比較

この章では、実施工と解析結果とを比較することで、解析の有効性を確認すると同時に、現状の解析技術の限界と、今後の課題を述べる。

(1) 条件の比較

解析条件と実施工条件の比較を表-12に示す。実施工では、打設量が多いことおよびコンクリート打込温度を極力下げるために、気温の低い早朝より打設を開始した。柱頭部のコンクリート打設に要した時間は約 8.0 時間であり、その間にコンクリート温度は約 5~20 上昇していた。パイプクーリングは、打設終了 3 時間後より開始した。クーリング水の温度は、躯体内を循環することで上昇するが、その上昇温度は水和初期においては約 3~6、材齢 3 日目あたりからは約 1~3 程度であった。実施工条件は、解析条件に比べて不利な条件となりがちであることから、解析においては与えられた条件に安全性を見越した上で、若干不利な条件での解析を行なっており、場合によっては対策を再検討する必要もあると思われる。

(2) コンクリート内部温度の比較

実施工でのコンクリートの温度管理は、コンクリート躯体内に熱電対を埋め込み、計測インターバルを 1 時間(材齢が進むに連れて 1 時間 4 時間 12 時間に変更)とした温度計測を行った。図-18 に、実施工における横桁中心部での温度履歴と、同点における解析上の温度履歴の比較図を示す。この図より、実施工でのコンクリート最高温度は約 85 程度と、解析[対策なし]と同程度まで上昇しており、その後は解析[対策あり]での下降勾配とほぼ同程度かやや緩やかな勾配で温度が下降していたことが分かる。コンクリート最高温度は、打込時のコンクリート温度に大きく影響されることから、打設時の気温が比較的高かったことおよび打設中のコンクリート温度上昇の影響が表れたのではないかと予想される。しかしながら、打設終了後にパイプクーリングを施したことおよびパイプクーリング実施期間を延長したことにより、温度下降勾配は解析値とほぼ同程度となった。この結果より、最高温度の低減効果は期待したほど得られなかったものの、温度下降勾配は対策を施した事による効果が現れており、コンクリート表面と中心温度での温度差低減効果が得られたものと判断できる。

表-12 実施工条件と解析条件との比較

		解析条件	実施工条件
環境条件	打設開始時 外気温	27.4	26.1
	打設終了時 外気温	27.4	31.4
コンクリート 打設条件	打設開始時 コンクリート温度	30	30~35
	打設終了時 コンクリート温度	30	35~55
	打設時間	考慮せず	約8.0時間
パイプクーリング 条件	入水温度	25	27~29
	排水温度	25	30~35
	クーリング期間	4日間	0~5日目:排水 6~12日目:循環

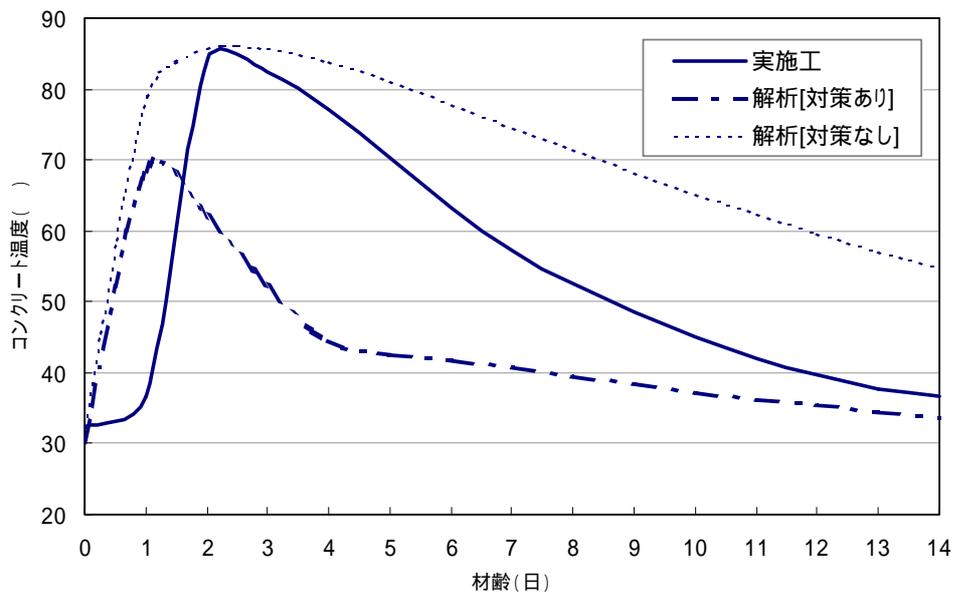


図-18 コンクリート温度履歴図(横桁中心部)

(3) コンクリート強度発現の比較

図-19 に、解析上の強度発現と、実施工での圧縮強度試験より得られた強度発現の比較図を示す。この図より、実施工では比較的初期に強度が発現していたことが分かり、材齢初期での温度応力ひび割れ発生確率は、解析結果に比べても更に低かったものと判断できる。

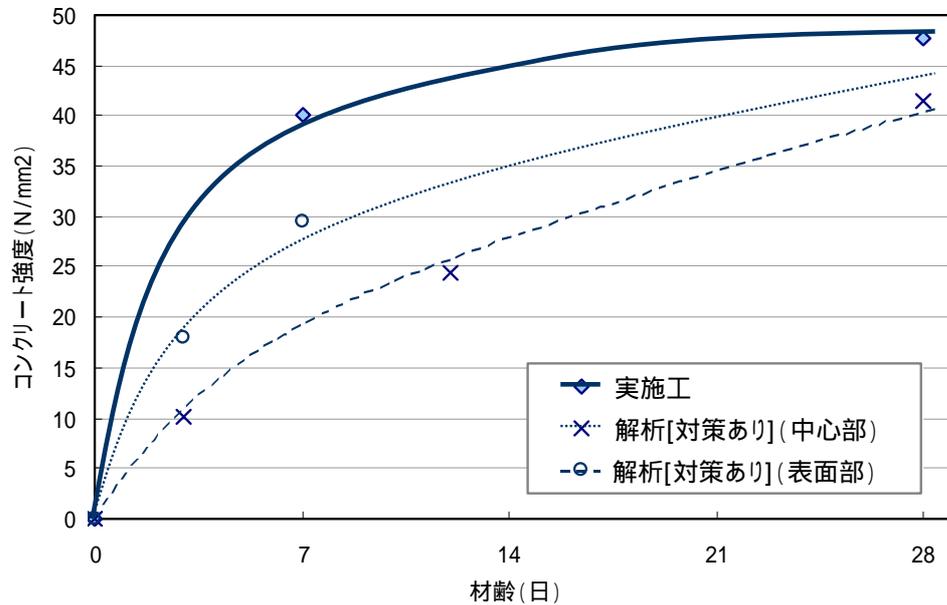


図-19 コンクリート強度発現図

4. まとめ

写真-3 は本橋梁柱頭部施工完了時の写真である。実施工の結果、柱頭部全体にわたり、温度応力に起因するひび割れの発生を防止することが出来た。これは、今回採用した断熱型枠の使用およびパイプクーリングの実施に加え、温度解析段階において特に温度ひび割れ指数が小さく、ひび割れの発生を避けることができないと判断された部分に補強筋を追加したこと、および実施工において、熱電対による温度管理を行いつつ、パイプクーリング実施期間を適切に延長したことが功を奏したものである。さらに、予防的処置として、適切な間隔で膨張コンクリートを添加したことも、良い結果を生み出した一要因であると思われる。



写真-3 柱頭部完成写真

温度解析を行う段階では、現場施工条件には不確定要素が多く、条件を仮定した上での解析となることから、解析結果と実施工結果とに差異が生じることも予想される。温度解析上考えられ得る万全の対策を講じた場合でも、予期せぬ部分への温度応力ひび割れの発生や、乾燥に伴うひび割れが発生する可能性は否めない。水和発熱あるいは乾燥収縮に起因するひび割れは進行性のものではなく、長期的には問題にならないものの、美観を損ねる恐れがある等の問題もあることから、適切な部位への膨張コンクリートの採用も有効であると考えられる。膨張コンクリートの最適な使用量や、有効な使用部位等に関しては、今後さらに検討を重ねる必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書〔施工編〕, pp.41-54,2002
- 2) 日本コンクリート工学協会:マスコンクリートのひびわれ制御指針, p.245,1986
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕, p.97,2002
- 4) 土木学会:コンクリート標準示方書〔施工編〕, p.44,2002