

鋼・コンクリート複合構造部における 高流動コンクリートの冬期施工（北千曲川橋）

Installing Superplasticized Concrete on a Steel-Concrete Composite Structure in Winter (Kita-Chikuma-gawa Bridge)

桑 山 豊 六^{*1} 堀 大 佑^{*1} 佐 藤 正 勝^{*2}
Toyomu KUWAYAMA Daisuke HORI Masakatsu SATO

Summary

The Kita-Chikuma-gawa Bridge on the Joshinetsu expressway has a structure in which the steel box girder and the RC pier are rigidly joined. To ensure that the joint of the girder and the pier were filled with concrete, we used superplasticized concrete on the capital because this concrete is for void-filling. To ascertain the void-filling property and workability of the concrete, we tested the concrete with a scale model before it was applied. Moreover, since the mass-concrete was placed in winter, which can lead to cracks from thermal stresses, a curing method for this case was studied through thermal stress analysis, and the actual work was performed to reflect the result of the study.

キーワード：複合構造、高流動コンクリート、充てん性、温度応力解析、冬期施工

1. はじめに

上信越自動車道北千曲川橋は、長野県北部の一級河川千曲川を横過する橋長350.55mの鋼4径間連続非合成ラーメン箱桁橋である。平成9年に完成し既に供用中のⅠ期線と、現在建設中のⅡ期線は共に連続桁の中間支点部でRC橋脚と鋼箱桁を剛結する複合ラーメン構造が採用されている。この構造は、中間支点部の沓を省略できるため経済的となるとともに、維持管理の軽減、耐震性の向上が期待できる点が特長である。Ⅱ期線の全体一般図を図-1に示す。

剛結される柱頭部のコンクリート施工においては、複合構造として所要の性能を満足するためにコンクリートが十分に充てんされる必要がある。しかし、柱頭部は剛結部鋼箱桁内が密閉構造となり、コンクリートの打込みや締固め作業が困難で、かつ充てん状況を後から確認することが不可能である。そこで自己充てん性を有する高流動コンクリートを用いることとした。剛結部の断面図を図-2に示す。

柱頭部のコンクリート施工は鋼桁の架設工程を温水期施工とする関係から最も気温の低い1月から2月に行わなければならないが、高流動コンクリートを冬期施工し

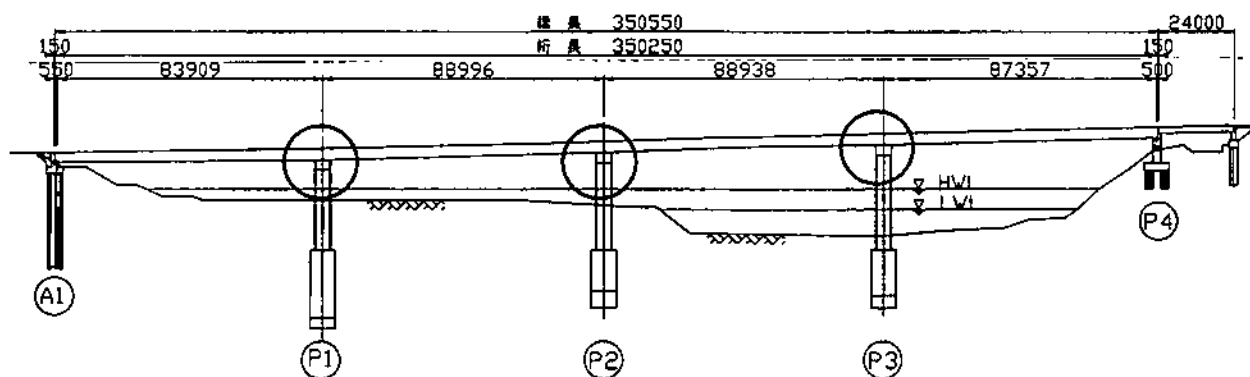


図-1 全体一般図

^{*1}技術本部設計部設計一課

^{*2}技術本部工事部

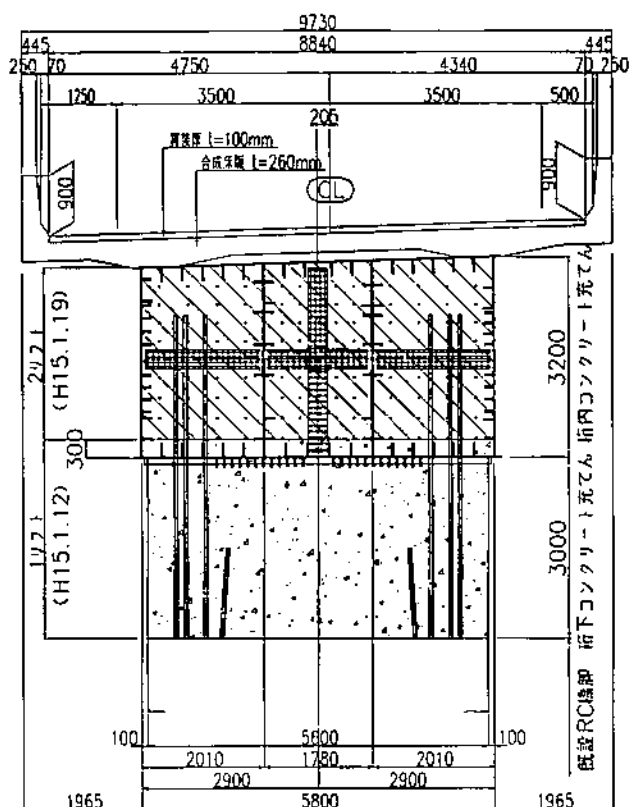


図-2 剛結部断面図

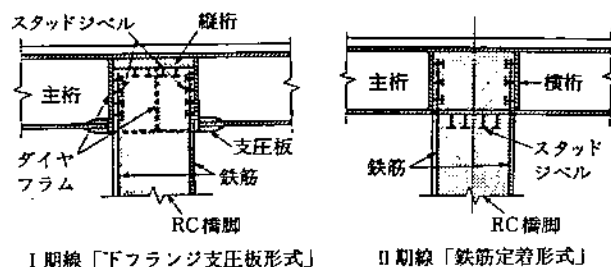


図-3 剛結部形式²⁾

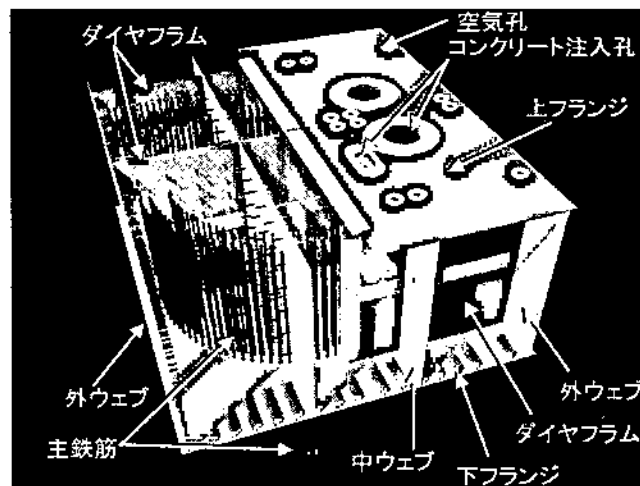


図-4 柱頭部構造概念図

た例は国内では報告されておらず、寒中コンクリートとしての施工対応について検討が必要となった。さらに柱頭部はコンクリートを連続して打込むためにマスコンクリートとして水和熱による温度ひび割れの抑制も同時に要求された。

そこで、これらの課題に対し、コンクリートの充てん性や施工方法を確認するための施工試験、養生方法を検討するための温度応力解析などを実施した。

本稿では施工試験や温度応力解析の結果と共に、これらを基にして行った実際の現場施工について報告する。

2. 工事概要および剛結構造の概要

北千曲川橋の橋梁諸元を以下に示す。

工 事 名：上信越自動車道 北千曲川橋（鋼上部工）工事

施工場所：長野県中野市牛出～下水内郡豊田村

橋梁形式：鋼4径間連続非合成ラーメン箱桁橋

支 間 長：83.909m + 88.996m + 88.938m + 87.357m

幅 員：（全幅員）9.730m、（有効幅員）8.840m

工 期：平成14年3月27日～平成17年3月10日

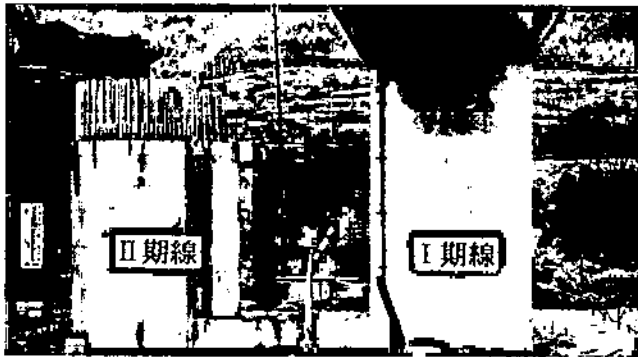
既に供用中である北千曲川橋Ⅰ期線の鋼桁とRC橋脚

との剛結部は、柱頭部の橋脚コンクリートを優先させ、主桁下フランジは連続させずに支圧板によって応力を伝達する「下フランジ支圧板形式」が採用されている³⁾。この接合部構造は、鉄筋組立て、コンクリート打込みなどの施工性に優れ、普通コンクリートを用いて十分な充てん性が保証されている。しかしながら、下フランジ支圧板形式は下フランジに引張応力が発生する場合には応力伝達機構が不明確となる。

これに対しⅡ期線は、平成14年の道路橋示方書改訂に伴い、大規模地震を想定した非線形動的解析を実施した結果、下フランジ側で引張応力が発生することが分かった。そこで耐震性の向上と引張応力の伝達のため、下フランジを連続させ鋼桁からRC橋脚へは隅角部内に定着した鉄筋が応力伝達経路となる「鉄筋定着形式」を採用することとした。

図-3にⅠ期線、Ⅱ期線それぞれの剛結部形式を示し、図-4にⅡ期線の柱頭部構造概念図を示す。

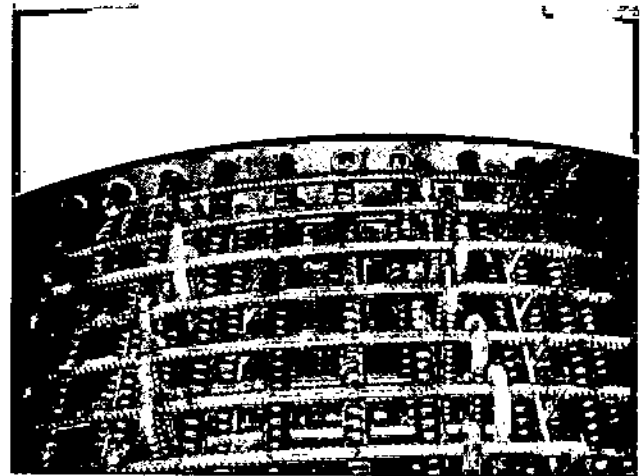
写真-1はⅡ期線の鋼桁架設および柱頭部コンクリートを施工前、写真-2は施工後の状況を示す。下部工工事では桁下3mまでのRC橋脚コンクリート施工が完了しており、橋脚主鉄筋が突出した状態となっている。主鉄



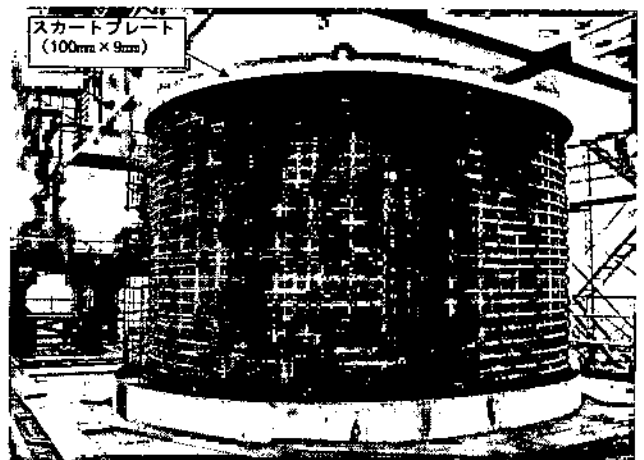
写真一 Ⅱ期線柱頭部施工前



写真二 Ⅱ期線柱頭部施工後



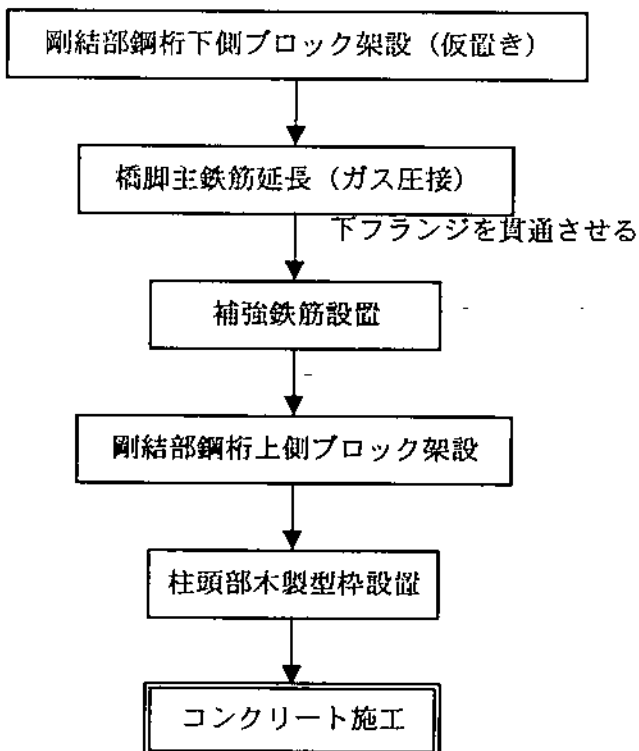
写真三 下フランジ鉄筋貫通部



写真四 柱頭部鉄筋組立後



写真五 木製型枠組立後



図一 柱頭部の施工手順

筋は剛結部鋼桁下側ブロックを架設後に上から落とし込み、下フランジを貫通させて桁下でガス圧接を行う。柱頭部の施工手順を図一5に示す。

また、下フランジ鉄筋貫通部、柱頭部鉄筋組立後、木製型枠組立後の状況をそれぞれ写真－3、写真－4および写真－5に示す。下フランジ下面にリング状に設置したスカートプレートは、木製型枠組立時の当て板となると共に、下フランジとコンクリートの境界面から水が侵入するのを防ぐ水切りの役割を担っている。

3. 柱頭部コンクリートの施工試験

3. 1 柱頭部コンクリートの仕様

鋼桁とRC橋脚との剛結部構造として「鉄筋定着形式」を採用する北千曲川橋のⅡ期線は、耐震性が向上し、主桁下フランジでの引張応力の伝達が可能となる一方で、柱頭部コンクリートの施工性および充てん性は不利なものとなる。したがって、確実な充てん施工を行うためには、自己充てん性を有する高流動コンクリートを用いることが不可欠であると考えた。

高流動コンクリートは、使用する材料の種類や量などの観点から一般に粉体系、増粘剤系、併用系の3種類に分類される³⁾。

粉体系は増粘剤を用いずに粉体量（混和材）の増加によって材料分離抵抗性を高めた高流動コンクリートであるが、混和材の使用量が多くなると、これに対応が可能なコンクリートプラントに限られる。さらに、結合材量が多いため、使用する結合材の種類によってはセメントの水和熱による温度ひび割れが問題となる場合がある。

これに対し増粘剤系は、増粘剤を使用し、その効果によって材料分離抵抗性を高めた高流動コンクリートであり、所要の流動性は高性能AE減水剤の添加によって得ている。プラントの対応も比較的容易であり、粉体量も低減できることから水和熱の抑制には効果的である。

併用系は増粘剤を用いるという点においては増粘剤系と同様であるが、その添加量は少なく基本的には粉体系と同様に材料分離抵抗性を単位粉体量の増加によってコンクリートに付与させ、高性能AE減水剤などによって流動性を高めている。増粘剤は材料の品質や状態の変動によるフレッシュコンクリートの性状のばらつきを小さくし、施工を容易にすることを目的として添加している。

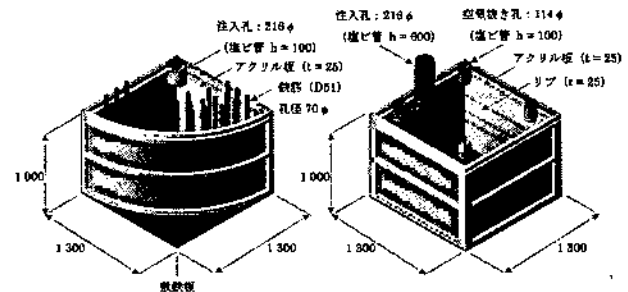
本工事の柱頭部コンクリート施工においては、マスコンクリートのセメント水和熱による温度ひび割れが問題となること、コンクリートプラントの対応が比較的容易であることなどを考慮し、増粘剤系高流動コンクリートを用いることとした。施工試験における基本配合条件と

表－1 基本配合条件

種別	設計基準強度 σ_{ck} (N/mm ²)	スランプフロー (cm)	目標空気量 (基準空気量) (%)	セメントの種別	最大塩化物含有量 (g/m ³)	単位水和剤量 (%)
高流動コンクリート	30	65.0±5.0	4.5±0.5 (4.5±1.5)	高炉セメントB種	300	C×2.0

表－2 基本配合

水セメント比	細骨材率	単位量(kg/m ³)					
W/C (%)	S/a (%)	W	C	S	G	AD	SFCA (g/m ³)
37.8	48.0	170	450	785	861	9.00	200



図－6 下フランジ側供試体 図－7 上フランジ側供試体

基本配合をそれぞれ表－1および表－2に示す。

3. 2 施工試験の目的

柱頭部の施工に高流動コンクリートを採用することとしたが、実施工においては施工後の充てん性の確認が非常に困難である。そこで実施工に先立ち柱頭部の約1/8の縮小模型を用いて、施工性と充てん性の確認を目的とした施工試験を実施した。

施工試験は箱桁下フランジ下面の充てん性に着目した「下フランジ側供試体（図－6）」と、箱桁上フランジ下面の充てん性に着目した「上フランジ側供試体（図－7）」の2供試体により行った。供試体のフランジには充てん性を目視確認できるように透明なアクリル板を使用し、フランジ部のコンクリート注入孔および空気孔には塩化ビニル管を設置して管の上部までコンクリートを打込み、そのヘッド圧によりコンクリートの圧入を行うとともに初期沈下の抑制を図った。

3. 3 施工試験結果

(1) 施工性

コンクリートの施工は、コンクリートプラント、コンクリートの配合、現地までの運搬経路およびポンプ車による打込み作業などの施工条件を実施工に合わせて行い、コンクリートの配合や施工性に問題がないことを確

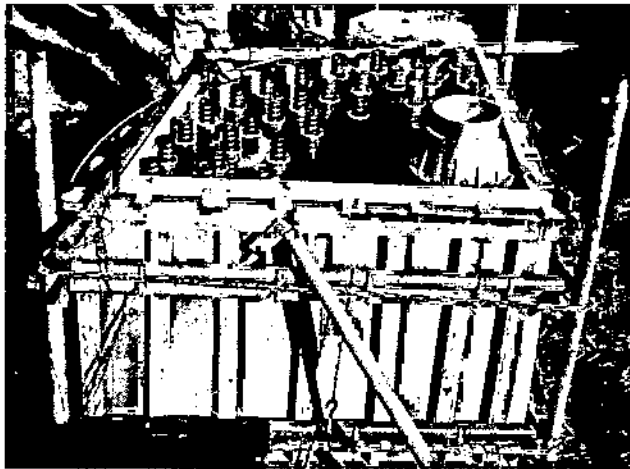


写真-6 下フランジ側供試体モデル

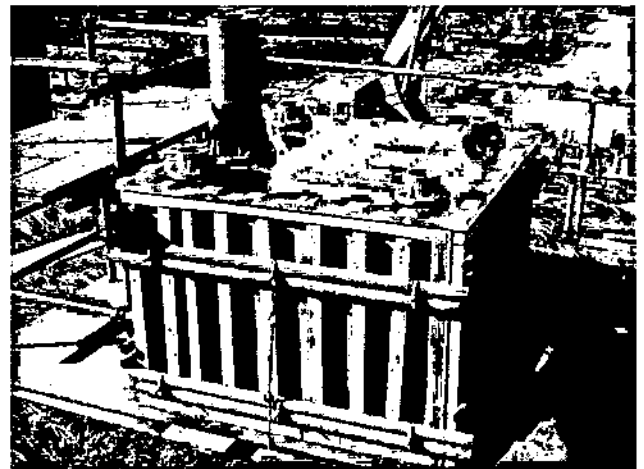


写真-9 上フランジ側供試体モデル

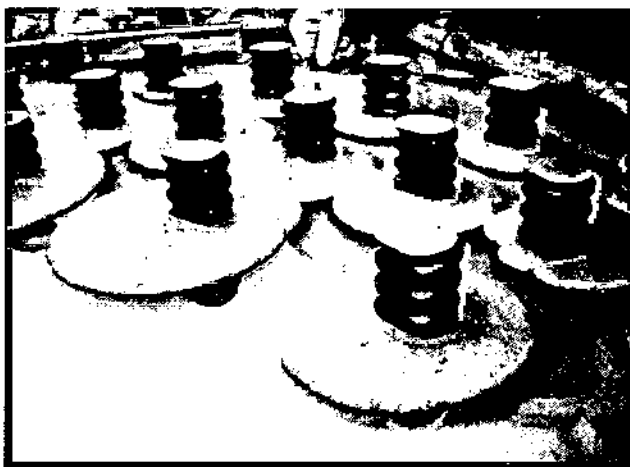


写真-7 下フランジ側供試体 コンクリートフロー状況



写真-10 上フランジ側供試体アクリル板撤去



写真-8 コア抜きした供試体

表-3 コア密度測定結果表

単位: g/cm ³						
供試体 番号 枝番	1	2	3	4	平均	
-1	2.318	2.350	2.228	2.222	2.280	供試体上側 ↑ ↓ 供試体下側
-2	2.387	2.328	2.260	2.240	2.304	
-3	2.344	2.340	2.271	2.270	2.306	
-4	2.360	2.365	2.270	2.292	2.322	
-5	2.354	2.332	2.288	2.311	2.321	
-6	2.368		2.304	2.313	2.328	
-7			2.328	2.300	2.314	
平均密度	2.355	2.343	2.278	2.278	2.311	

認した。この時、運搬時間によってスランブフローに多少のロスが確認されたため、実施工では高性能 AE 減水剤の量を増加した。

下フランジ側供試体モデルを写真-6 に示し、コンクリートが鉄筋貫通孔の隙間からフローする状況を写真-7 に示す。

養生終了後、供試体からコンクリートのコア抜きを行い、目視確認および密度測定により供試体上下で材料分離が生じていないことを確認した。コア抜きによる確認の状況を写真-8 に示し、密度測定結果を表-3 に示す。

(2) コンクリート充てん性の確認

コンクリートの充てん状況は、はじめに目視および打音検査により未充てん箇所のないことを確認した。上フランジ側供試体モデルおよびコンクリート硬化後にアクリル板を撤去した状況を写真-9, 10 に示す。また、定

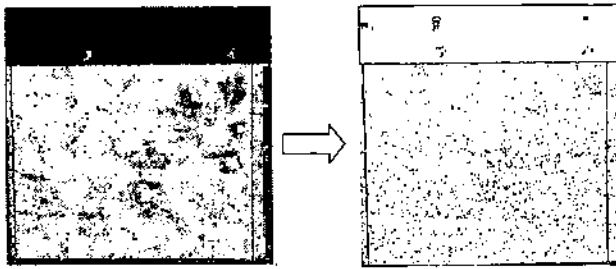


図-8 コンクリート表面の気泡および画像処理結果

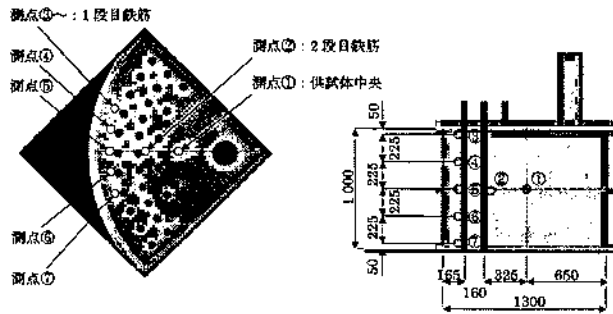


図-9 温度計測点

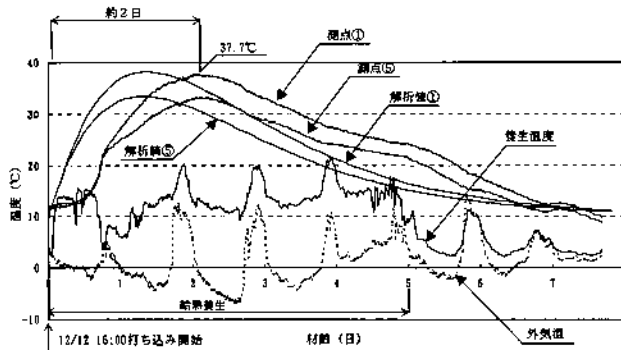


図-10 温度解析結果および実測結果

量的な充てん性の評価方法として、コンクリート表面に残った気泡の面積を計測し、全表面積に対する比率を計算した。図-8は、コンクリート表面の一部を写真撮影し、画像処理によって気泡の輪郭線を抽出したものである。その結果、気泡の面積率は約5%程度であったことから、フランジ下面とコンクリートが十分に密着していることが確認できた。

(3) 温度計測

コンクリートの温度上昇特性を把握するために、下フランジ側供試体の温度計測を行った。温度計測点を図-9に示す。また、計測結果の検証のために、供試体モデルの温度解析を行った。着目点は、供試体中心の①と、外側主鉄筋位置の⑤とした。温度解析結果および実測結

果を図-10に示す。

最高到達温度については、解析値と計測値はほぼ一致しているが、最高温度までの到達時間は、解析の方が早目となる傾向となった。これは、解析において断熱温度上昇特性の条件にコンクリート標準示方書の式を用いて計算していることにより、材齢初期段階において解析誤差が生じたものと考えられる。

4. 温度応力解析

4.1 解析の目的

柱頭部コンクリートは、高流動コンクリートを採用したことで普通コンクリートと比較してセメント量が多い富配合なコンクリートとなり、かつ柱頭部はその部材寸法よりマスコンクリートとなるため、水和反応による発熱量が大きくなることが予想された。さらに冬期施工を余儀なくされることから、コンクリート内外での温度差も非常に大きくなると考えられた。コンクリート内外の過大な温度差は表面応力の増加を招き、温度ひび割れを誘発するおそれがある。そこで温度応力解析を行ってコンクリートの温度と応力を把握し、適切なコンクリート温度管理のための施工方法と養生方法の検討を行った。

4.2 解析手法

解析はコンクリートの非線形温度応力解析プログラム「ASTEA-MACS」を用いて行った。モデル化においては①柱頭部鋼桁（内部コンクリート含む）、②柱頭部RC橋脚、③既設RC橋脚を3次元ソリッド要素にてモデル化した。また、構造物の対称性から、作成モデルは1/4モデルとした。図-11に全体解析モデル図、表-4に解析条件を示す。また、解析用配合条件は、施工試験の配合に準じて設定した。

解析は給熱養生温度、給熱養生期間、型枠存置期間お

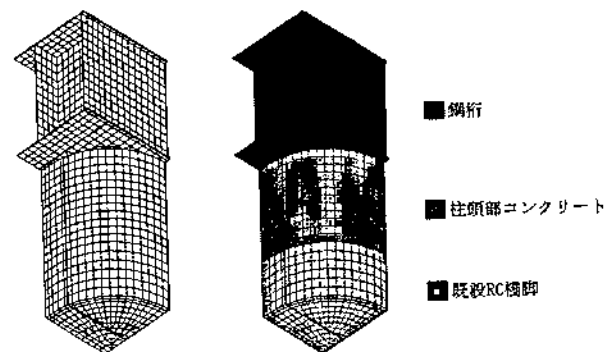


図-11 全体解析モデル図

表-4 温度応力解析条件

部材	物性値項目	記号	単位	物性値	備考
新設コンクリート	熱伝導率	λ_c	W/m°C	2.7	コ示[施工編]4.2.3より(デフォルト値を使用)
	密度	ρ_c	kg/m ³	2350	
	比熱	C_c	kJ/kg°C	1.15	コ示[施工編]4.2.3より(デフォルト値を使用)
	断熱温度上昇量	Q_{∞}	°C	63.5	コ示[施工編]より $Q(t) \cdot Q_{\infty} (1 - e^{-t/\tau})$
		τ	—	0.70	ただし、高炉セメントB種を使用、打込み温度は10°Cとする。
	初期温度(コンクリート打込み温度)	T_{c0}	°C	15	設計温度より
	圧縮強度	$f'_{cs}(t)$	N/mm ²	算出式	コ示[施工編]4.2.5より(設計基準強度を60N/mm ² として算出)
	引張強度	$f_{ts}(t)$	N/mm ²	算出式	コ示[施工編]4.2.5より
	ヤング率	$E_c(t)$	N/mm ²	算出式	コ示[施工編]4.2.5より
	ポアソン比	ν	—	0.18	デフォルト値を使用
	線膨張係数	—	/°C	10×10^{-6}	コ示[施工編]3.2.7より
	乾燥収縮	$\epsilon'_{cs}(t, t_p)$	—	算出式	コ示[構造性能照査編]3.2.8より
	自己収縮	$\epsilon_{cs}(t, t_p)$	—	算出式	コ示[構造性能照査編]3.2.8より ($W:170\text{kg/m}^3$, $C:450\text{kg/m}^3$)
既設コンクリート	熱伝導率	λ_c	W/m°C	2.7	コ示[施工編]4.2.3より(デフォルト値を使用)
	密度	ρ_c	kg/m ³	2350	
	比熱	C_c	kJ/kg°C	1.15	コ示[施工編]4.2.3より(デフォルト値を使用)
	断熱温度上昇量	Q_{∞}	°C	—	考慮しない
		τ	—	—	
	初期温度	T_{c0}	°C	0	養生は行わないため、外気温とする
	圧縮強度	$f'_{cs}(t)$	N/mm ²	30	設計基準強度を使用
	引張強度	$f_{ts}(t)$	N/mm ²	2.43	コ示[施工編]4.2.5より
	ヤング率	$E_c(t)$	N/mm ²	25743	コ示[施工編]4.2.5より
	ポアソン比	ν	—	0.18	デフォルト値を使用
	線膨張係数	—	/°C	10×10^{-6}	コ示[施工編]3.2.7より
	乾燥収縮	$\epsilon'_{cs}(t, t_p)$	—	—	考慮しない
	自己収縮	$\epsilon_{cs}(t, t_p)$	—	—	考慮しない
鋼筋	熱伝導率	λ_s	W/m°C	25	
	密度	ρ_s	kg/m ³	7850	
	比熱	C_s	kJ/kg°C	0.435	
	圧縮強度	$f'_{cs}(t)$	N/mm ²	570	
	引張強度	$f_{ts}(t)$	N/mm ²	570	
	ヤング率	$E_s(t)$	N/mm ²	200000	
	ポアソン比	ν	—	0.3	
熱伝達境界	側指(メタルフォーム)	η	W/m ² °C	14	コ示[施工編]4.2.2より(養生温度は15°C一定とする)
	新設構脚(木製型枠)	η	W/m ² °C	8	コ示[施工編]4.2.2より推定(養生温度は15°C一定とする)
	既設構脚(コンクリート)	η	W/m ² °C	12	コ示[施工編]4.2.2より推定(外気温は0°C一定とする)
養生	養生温度	—	°C	15	温度計測結果より
	湿度	—	%	70	既設施工時計測値より

表-5 解析ケース

	給熱養生温度			給熱養生期間		型枠存置期間			膨張材	
	5°C	10°C	15°C	3日	7日	7日	14日	21日	なし	あり
Case1		○		○		○			○	
Case2		○			○		○		○	
Case3		○			○			○	○	
Case4	○				○			○	○	
Case5			○		○			○	○	
Case6			○		○			○		○

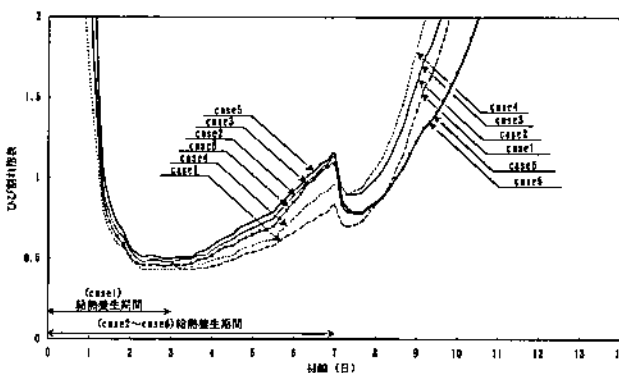


図-12 ひび割れ指数解析結果

よび膨張材の有無をパラメータとして行った。表-5に解析ケースを示す。

4.3 検討結果

解析結果から、各ケースの材齢とひび割れ指数(引張強度/引張応力度)の関係を図-12に示す。ひび割れ指数は、養生温度15°C(Case5)で最大となり、5°C(Case4)で最小となる。また、3日間で給熱養生を終了したCase1ではさらにひび割れ指数が低下する結果となった。このことから、最適養生方法をCase5と考え、15°Cで7日間の給熱養生を行うこととした。型枠存置期間については、冬期施工では特に長くとる方が有効であることから、現地の架設工程を考慮して、ひび割れ指数が十分に大きな値となる14日間を設定することとした。

ここで、材齢3日前後のひび割れ指数を見ると0.5近くまで低下していることから、高い確率で初期ひび割れが発生することが考えられる。そこで、収縮補償として膨張材を添加することとし、Case6の解析を行った。しかし、解析結果では、膨張材を添加していないCase5よ

りもひび割れ指数が低下しており、収縮補償としての効果を確認することはできなかった。これは、解析モデルでは型枠や鉄筋などによる拘束条件を適切に反映させることが困難であるためと考えられる。

5. 柱頭部コンクリートの施工

5.1 施工状況

コンクリートの打込み量は1脚あたり167m³である。高流動コンクリートの側圧と圧送時のエアークロスミスを考慮して、打込み速度は20m³/hとし、橋脚部と桁内の2リフトに分けて打込んだ。また、打継目は柱部に設けることは構造上望ましくないことから、下フランジから上へ約300mmの高さに設定した。(図-2)

コンクリートの施工状況を写真-11、12に示し、下フランジ鉄筋貫通孔からコンクリートがフローしている状況を写真-13に示す。また、スランプフロー試験の

状況を写真-14、15に示す。

5.2 温度計測結果

コンクリート打込み後、柱中心部の温度を計測し、解

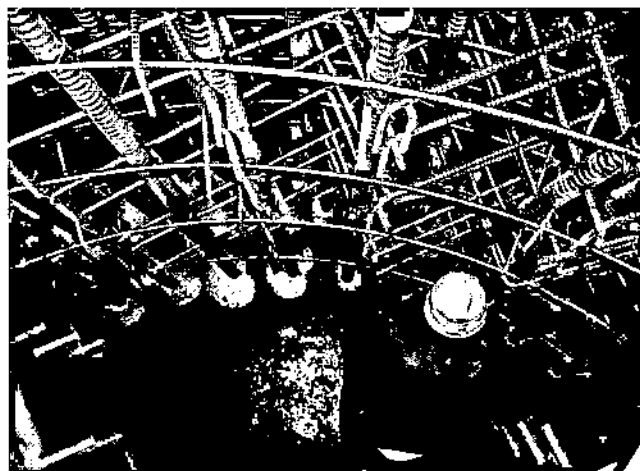


写真-13 下フランジ鉄筋貫通孔からのフロー状況

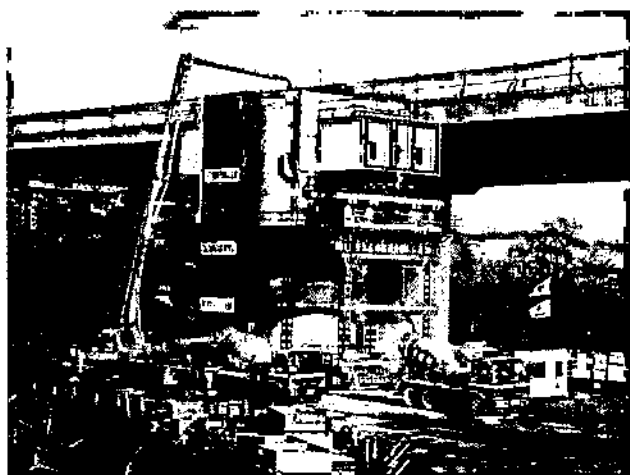


写真-11 柱頭部コンクリート打ち込み状況



写真-14 スランプフロー試験



写真-12 柱頭部コンクリート打ち込み状況

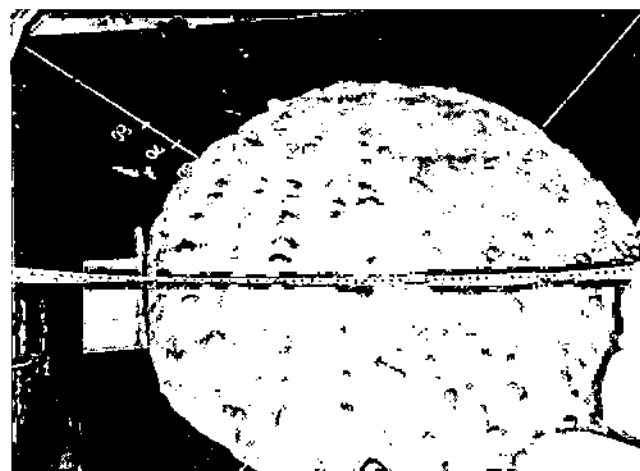


写真-15 スランプフロー試験

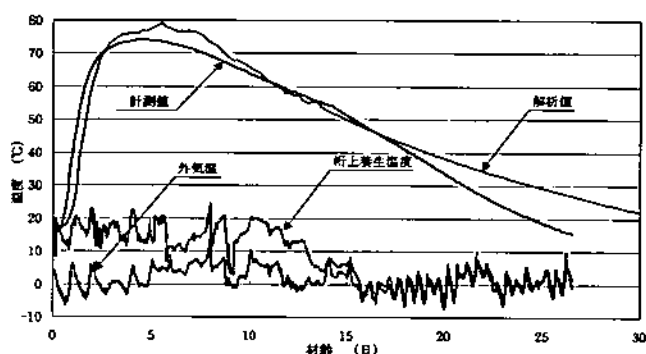


図-13 柱頭部コンクリート柱中心部温度の解析値と計測値

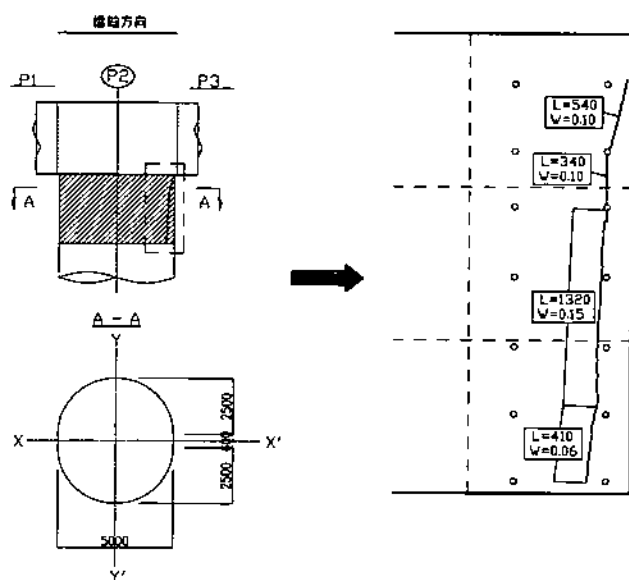


図-14 ひび割れ実測結果

析値との比較を行った。(図-13)

施工試験における温度応力解析では解析値と実測値で最高温度到達までの時間に誤差が生じたため、実施工では断熱温度上昇試験を実施して解析条件を検討した。その結果、計測値と解析値はほぼ一致し、検討段階で行ったひび割れ指数の傾向が計画通り推移していると予測できた。

5.3 コンクリート表面のひび割れ観察

材齢15日目に型枠を撤去し、柱部コンクリート表面のひび割れ状況を目視により観察した。観察結果を図-14に示し、その内容を以下にまとめる。

- ・最大幅0.15mm程度のひび割れが鉛直方向に約1320mm発生していた。(許容ひび割れ幅 $W_a =$

$0.005 \times c = 0.55\text{mm}$)

- ・その他のひび割れ幅は0.10mm以下の微細なものであった。
- ・打込み後、約1ヶ月経過してから再度観察を行ったが、ひび割れの進展は確認されなかった。
- ・発生したひび割れは柱断面の直線区間に見られた。これは円弧部分では型枠固定により拘束されるのに対し、直線区間では拘束力が分散することによるものと考えられる。

以上より、発生したひび割れは軽微なもので、かつ進展性がないことから構造上問題ない程度であると判断し、ひび割れ補修材を用いて塗布工法にて補修を行った。

6. まとめ

北千曲川橋Ⅱ期線の剛結構造で採用した「鉄筋定着形式」は、柱頭部に高流動コンクリートを使用することにより、施工性や下フランジ下面へのコンクリート充てん性などの課題を克服することができた。また、冬期施工、マスコンクリートなどの条件による温度応力に起因するひび割れに対しては、温度応力解析による発生方法の検討を反映させることにより、所定の品質を満足する柱頭部施工を完了することができた。

最後に、本工事のコンクリート充てん施工試験および柱頭部の実施工にあたり、長岡技術科学大学の丸山久一教授、日本道路公団信越工事事務所の坂本所長、笹井工事長には多大なご指導を賜りました。ここに記して深謝いたします。

<参考文献>

- 1) 角昌隆ほか：千曲川橋の複合剛結部の設計について、土木学会第51回年次技術講演会概要集，T-A451，平成8年9月
- 2) 日本道路公団 設計要領第二集：9章 複合構造，平成10年7月
- 3) 土木学会 コンクリートライブラリー93：高流動コンクリート施工指針，平成10年7月
- 4) 土木学会 コンクリート標準示方書〔施工編〕：4章 施工段階におけるひび割れ照査，平成15年1月

2004.1.13 受付