

高性能軽量コンクリートを用いた シラリカ川橋の設計・施工

日本道路公団 北海道支社長万部工事事務所 柴田 泰行
 日本道路公団 北海道支社構造技術課 中村 元
 ドーピー建設工業(株) 北海道本店設計部 正会員 山崎 通人
 ドーピー建設工業(株) 北海道本店設計部 正会員 ○伊藤 拓

1. はじめに

本橋は、日本道路公団北海道支社発注、北海道縦貫自動車道「シラリカ川橋」として設計・施工を行った。

近年、従来の人工軽量骨材と比較して、強度が約2倍、吸水率が約1/3になった高性能軽量骨材が開発された。本橋は、この高性能軽量骨材を用いた高性能軽量コンクリート(以下、HLコンクリートと称す)PC橋として、平成12年7月に工事に着手、平成13年9月竣工を予定している。

HLコンクリートは普通コンクリートに比べ水セメント比が小さくセメント量が多いため、マッシブな部材のコンクリート温度が高くなると想定された。そのため、マスコンクリートとなる柱頭部の3次元熱応力解析と実物大供試体試験を実施し、コンクリート温度の把握と施工性の検討を行った。また、本橋は全外ケーブル構造を採用しており、定着部と偏向部に関して3次元応力解析を行った。本稿では、HLコンクリートの特性、柱頭部の3次元熱応力解析と実物大試験、および施工について報告する。

2. 工事概要

シラリカ川橋の側面図、断面図と設計概要を以下に示す。

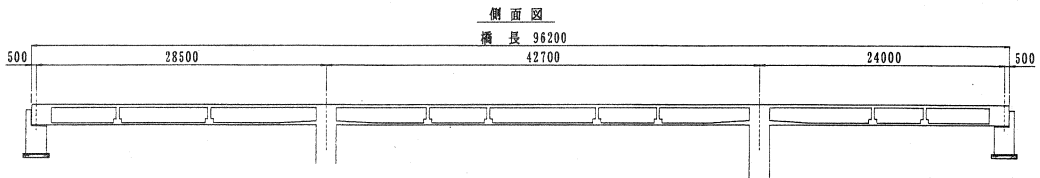


図-1 側面図

橋種：プレストレストコンクリート道路橋
 構造形式：PC3径間連続ラーメン箱桁橋 全外ケーブル構造
 橋長：96.200m
 支間：28.500m+42.700m+24.000m
 全幅：11.400m
 活荷重：B活荷重
 コンクリート：軽量1種
 粗骨材：高性能人工軽量骨材

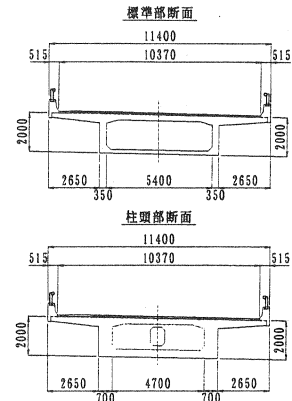


図-2 断面図

3. 高性能軽量コンクリートの特性

高性能人工軽量骨材とHLコンクリートを写真-1に示す。

H/Lコンクリートと普通コンクリートの配合、および目標物性を表-1、-2に、スランプフロー管理状況を写真-2に示す。

H/Lコンクリートの許容応力度は、コンクリート標準示方書(設計編²⁾)を準用し、普通コンクリートで同じ設計基準強度の70%とした。コンクリートの材料強度および許容応力度比較のため、場所打ち施工の道路橋に一般的に用いられている $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$ の値を表-3に示す。

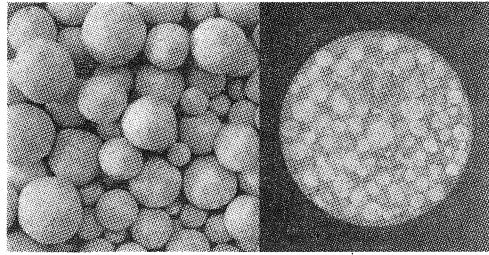


写真-1 高性能人工軽量骨材と高性能軽量コンクリート

表-1 コンクリート配合

呼び名	W/C	s/a	空気量	単位量(kg/m ³)						SP	AS	AE
	(%)	(%)	(%)	W	C	G	S1	S2	(C×%)	(C×%)	(C×%)	
高性能軽量 コンクリート	35.0	50.8	5.5±1.5	165	472	375	580	254	1.37	—	0.0004	
	現場配合			173.5	472	375	580	254	6.466	—	0.00189	
普通コンクリート	44.4	42.0	4.5±1.5	160	360	1063	518	227	—	0.25	0.001	

表-2 コンクリート物性の現着目標値

項目	目標値	
	高性能軽量コンクリート	普通コンクリート
スランプフロー	550±50 mm	95±10 mm ^{*1}
空気量	5.5±1.5 %	4.5±1.5 %
単位容積質量	1.85±0.05 t/m ³	23.5 t/m ³
設計基準強度	50 N/mm ²	40 N/mm ²

*1:スランプ値

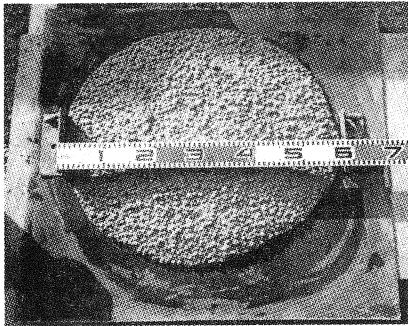


写真-2 スランプフロー

表-3 材料強度及び許容応力度

設計基準強度	高性能軽量コンクリート 普通コンクリート		単位	
	50	40		
許容曲げ圧縮応力度	導入直後	21.0	18.0	N/mm ²
	設計荷重時	17.0	14.0	
許容曲げ引張応力度	導入直後	-1.3	-1.5	
	死荷重時	0.0	0.0	
許容せん断応力度	設計荷重時	-1.3	-1.5	
	設計荷重時	0.46	0.55	
許容斜引張応力度	設計荷重時	4.2	5.3	
	設計荷重時	-0.8	1.0	
弾性係数	設計荷重時	2.40×10 ⁴	3.10×10 ⁴	
	導入時	2.15×10 ⁴	2.88×10 ⁴	
クリープ係数	主桁自重作用時	2.00	2.60	
	乾燥収縮度	ASTM減少量算出時	20.00×10 ⁻⁵	
不静定力算出時		15.00×10 ⁻⁵	15.00×10 ⁻⁵	
単位体積重量	20.0	24.5	kN/m ³	
線膨張係数	10.0×10 ⁻⁶	10.0×10 ⁻⁶		

4. 三次元熱応力解析

4.1 解析モデルおよび検討方法

解析モデルを図-3に示す。検討方法は、発熱を考慮した非定常熱伝導解析および熱応力解析を実施し、発熱による熱応力を求め、コンクリート標準示方書(施工編³⁾)におけるひび割れ指数を算出した。

解析ケースは、普通ポルトランドセメントを用いた設計基準強度 $\sigma_{ck}=45\text{N/mm}^2$ と早強ポルトランドセメントを用いた設計基準強度 $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$ の2ケースとした。

4.2 解析手法

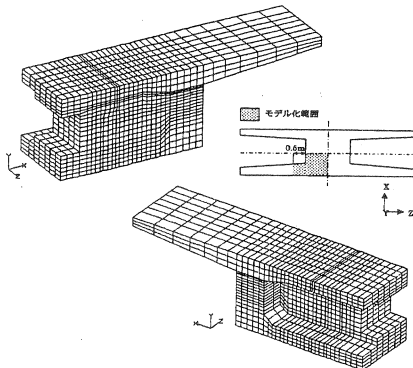


図-3 熱応力解析モデル

解析手法は、汎用構造解析システム FINAS を使用し、打設段階をシミュレートするため熱伝達境界の変更機能を使用した非定常熱伝導解析を行った。その後、応力解析の時点を決出し初期基準温度を考慮して温度データを作成した。断熱温度上昇式決定の条件を表-4 および図-4 に示す。発熱は、熱容量と温度上昇の関係式より発熱量を決定した。

$$Q = \rho C \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

ここに、 ρ : 単位体積重量 (kg/m³)
 C : 比熱 (J/kg°C)
 ΔT : 温度増分 (°C)
 Δt : 時間増分 (sec)
 Q : 発熱量 (J/m³・sec)

表-4 断熱温度上昇式 決定条件

	CASE-1	CASE-2
セメント種	普通ポルトランド	早強ポルトランド
水セメント比	38%	35%
打設温度(°C)	20°C	20°C
K	75.4	86.0
α	1.51	1.77
$T_{(t)} = K(1 - e^{-\alpha t})$		
ここに、 $T_{(t)}$: 断熱温度上昇 (°C)		

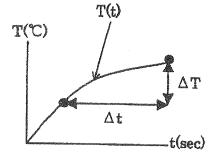


図-4 断熱温度上昇グラフ

引張強度は、次式により算出した。

$$f_c'(t) = \frac{t}{a+bt} \cdot d \cdot f_c'(28)$$

$$f_t(t) = c \sqrt{f_c'(t)}$$

ここに、 $f_c'(t)$: 材齢t日のコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)
 $f_c'(t)$: 材齢t日のコンクリートの引張強度 (N/mm²)
 $f_c'(28)$: 材齢28日のコンクリートの圧縮強度
CASE1 : 53.0N/mm², CASE2 : 60.8N/mm²
 a : CASE1 : 1.72, CASE2 : 1.018
 b : CASE1 : 1.09, CASE2 : 1.078
 c : 0.5
 d : 1.1

熱応力解析におけるヤング係数は材齢を考慮した有効ヤング係数を使用した。有効ヤング係数の算出式を以下に示す。

$$E_e(t) = \phi(t) \times 3.5 \times 10^3 \sqrt{f_c'(t)}$$

ここに、 $E_e(t)$: 材齢t日における有効ヤング係数 (N/mm²)
 $\phi(t)$: 温度上昇時におけるクリープの影響が大きいことによるヤング係数の補正
材齢3日まで $\phi=0.73$
材齢5日以降 $\phi=1.0$ (材齢3日から5日までは直線補間する)
 $f_c'(t)$: 引張強度の式による材齢t日の圧縮強度の推定値 (N/mm²)

これにより熱応力度を算出し、温度ひび割れ指数を算定した。材料定数を表-5 に示す。

表-5 材料定数

	項目	コンクリート
熱伝導	熱伝導係数 λ (W/m°C)	1.099
	比熱 C (J/kg°C)	975.0
	単位体積重量 ρ (kg/m ³)	1800
熱応力	ヤング係数 E (N/mm ²)	有効ヤング係数
	ポアソン比 ν	0.2
	線膨張係数 α (1/°C)	9.9×10^{-6}

4.3 解析結果

解析の結果、コンクリートの最高温度はCASE-1で打設時のコンクリート温度+約70°Cで88.7°C、CASE-2で打設時のコンクリート温度+約80°Cで99.8°Cとなった。この結果から横締めを使用するプレグラウト鋼材のタイプを選定した。また、算出された温度履歴は柱頭部実物大試験の温度計測間隔の参考とした。解析結果を図-5 に示す。

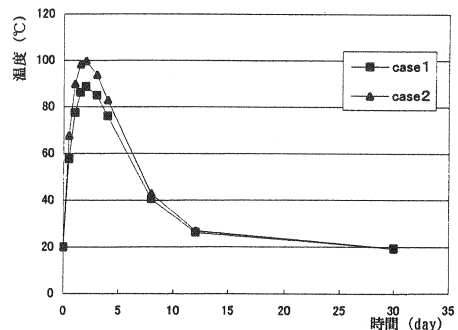


図-5 3次元熱応力解析 温度履歴

5. 柱頭部実物大試験

5.1 試験概要

本試験では、HLコンクリートの①初期ひび割れ発生の有無、②温度履歴と解析値との比較および確認、③温度硬化型プレグラウト鋼材の使用可能性の確認を行った。さらに、コンクリート打設時には、④ポンプ圧送性の確認も行った。また、前述の温度解析の結果より、温度の高くなる位置にパイプクーリングを施した。実物大供試体の寸法を図-6に示す。

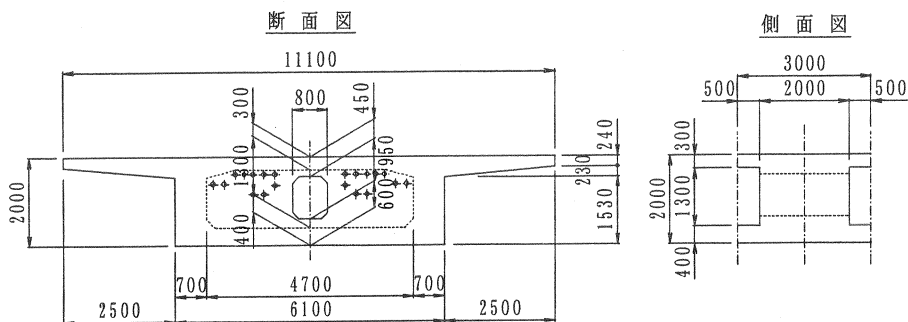


図-6 実物大供試体寸法

5.2 供試体温度の計測

パイプクーリングおよび温度計測位置を図-7に示す。

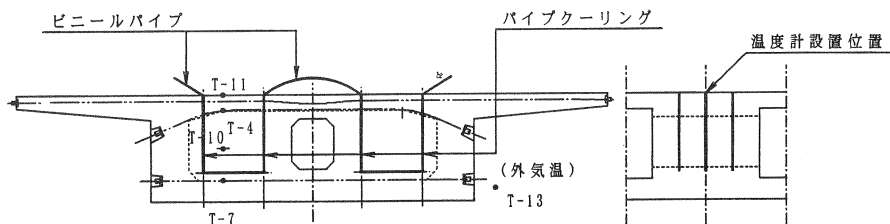


図-7 実物大供試体寸法

温度計の設置位置は、プレグラウト鋼材3本×3箇所、上床版×2箇所、高温予想位置×1箇所と外気温1箇所の計13箇所とした。温度の計測には熱電対を使用し、 $\sigma 28$ 日まで行った。計測間隔は、打設日から3日までは1時間間隔、3日から8日までは2時間間隔、8日から28日までは12時間間隔とした。

5.3 試験目的の確認

- ① ひび割れ発生の有無は、型枠脱型後の供試体状況を目視により確認したが、ひび割れは認められなかった。
- ② コンクリートの最高温度は104.2℃となり、打設時温度(平均25℃)+約80℃と解析値とほぼ等しくなった。実物大供試体の温度履歴を図-8に示す。

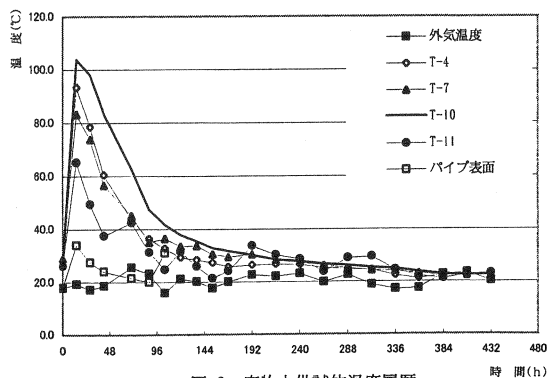


図-8 実物大供試体温度履歴

- ③ プレグラウト鋼材の使用可能性については、コンクリート打設1週間後・1ヶ月後・2ヶ月後に緊張したが、緊張可能であった。
- ④ ポンプ圧送性の確認は、ポンプ圧送速度を10~40m³/hに変化させて行った。圧送速度を早くした場合ポンプの閉塞状況が見られた。

5.4 試験の考察

- ① コンクリートの最高温度はコンクリートの打設時温度に影響される。試験では、コンクリート練混ぜ時の温度は平均21℃であったが、現着時の温度は平均25℃となっていた。この理由として、コンクリート運搬中のアジテータ車が太陽光の熱射により暖められたためと考えられる。この結果、最高温度は104.2℃に達した。そのため、実施工時には外気温の低い夜間に打設を行い、材料自体も冷やして練り混ぜることとした。
- ② パイプクーリングは最高温度の低下に効果があると判断できるが、パイプクーリングの効果範囲はパイプ周辺10cm以上には及ばなかった。このことから、実施工時には、設置するパイプの数を増加させることとした。
- ③ プレグラウト鋼材の使用可能性に関しては、緊張は可能であったがシース内の樹脂への影響を考慮し、実施工時にも温度管理を行うこととした。さらに緊張は、導入時強度の発現が認められてから直ちに行うこととした。
- ④ ポンプ圧送性に関しては、コンクリートの流動性・施工性から検討して圧送速度20m³/hが最適であると判断した。

6. 施工概要

6.1 概要

本橋の施工手順を図-9に示す。

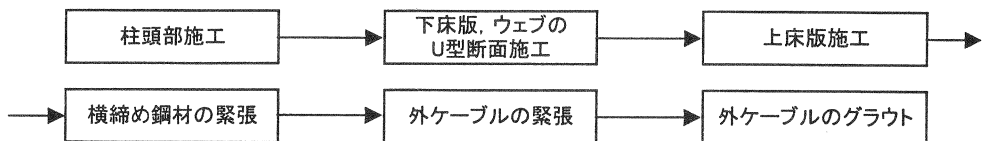


図-9 施工の流れ

6.2 柱頭部施工

柱頭部の施工は、3次元熱応力解析と柱頭部実物大試験の結果から、以下の方法によりコンクリートの打設温度を低下させた。

- ① コンクリート温度を下げる方法としてプレクーリングを行った。プレクーリングを行う場合大きな施設が必要となるが、今回は比較的経済的に行える方法として、水で冷却した水を用いてセメントと骨材を練り混ぜ、練り上がり温度を低下させた。
- ② コンクリートの現着時温度を下げるため、気温

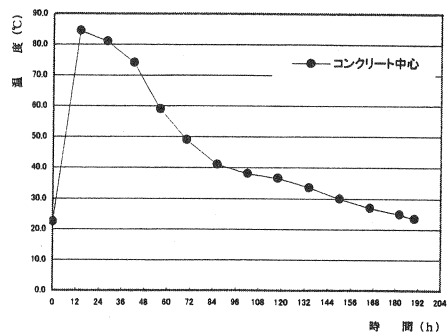


図-10 柱頭部コンクリート中心温度

の低くなる夜間(打設時10月の気温約7℃から10℃)に打設を行った。

- ③ パイプクーリングの配置は、実物大試験でパイプの設置位置から広範囲に効果が及ばない結果が得られたため設置箇所を増加した。

これらの施工方法より、コンクリートの打設温度は18~20℃になり、柱頭部のコンクリート最高温度は86.0℃に押さえることが出来た。柱頭部施工のコンクリート温度を図-10に示す。

6.3 コンクリート打設の結果

- ① HLコンクリートは、高流動コンクリートの様に粘性が高く攪拌しにくい⁴ため、試験練りを行いミキサーに作用する負荷値が安定する時間を測定した。その結果、練り混ぜ時間を普通コンクリートより長い2分30秒と設定した。また、下床版からウェブ打設への移動は、HLコンクリートの流動性が高いため、下床版コンクリートの流動性が落ち着いた約1時間後に行った。このため、1時間当たりのコンクリート打設量が普通コンクリートの約3割程度となった。
- ② 締め固めにはφ60 mmの高周波バイブレータを使用して行った。HLコンクリートは粘性が高いため、打継ぎ目や型枠の細部などは入念な締め固めが必要であったが、材料分離は見られなかった。
- ③ 表面仕上げは、打設後に軽量骨材が上面に浮き上がってくることや、ブリージング水が発生しないため打設直後には行えなかった。コテによる均しは、時間を置き軽量骨材が安定した後、表面仕上げ用のバイブレータを上から押し当て、軽量骨材を沈下させて行った。
- ④ 表面仕上げ用バイブレータ(ジッタバック)をかける目安は、コンクリートの表面に人が乗って沈まない状態になった時とした(写真-3)。



写真-3 表面仕上げ用バイブレータ使用状況

7. あとがき

HLコンクリートが初めて実橋に採用され、設計解析・施工における貴重な資料を得ることが出来た。今後はさらに以下の点の研究を進めていく必要がある。

- ① 設計基準強度に合わせた配合の違いから生じるコンクリートの温度応力の把握
- ② それに伴うコンクリートの乾燥収縮・自己収縮・クリープ等の物性値の把握
- ③ 構造系を考慮した適切なコンクリートの品質管理および施工方法の確立

PC橋の軽量化は今以上に計られていくと思われるが、本橋で得られた解析結果や施工方法などが、さらなる軽量化および発展に繋がれば幸である。

参考文献

- 1) 岡本享久：高性能軽量コンクリート，コンクリート工学，vol.37，No.4，pp.12~pp.18，1999.4
- 2) (社)土木学会：平成8年制定 コンクリート標準示方書(設計編)，pp.17~pp.40，1996.3
- 3) (社)土木学会：平成8年制定 コンクリート標準示方書(施工編)，pp.182~pp.192，1996.3
- 4) (社)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，pp.133~pp.135，1998.7.20