

山陽本線加古川駅付近連続立体交差事業 尾上・小野線架道橋の設計・施工 —高性能軽量骨材を用いたPC下路鉄道橋—

近藤 政弘^{*1}・北後 征雄^{*2}・瀧本 昌一^{*3}・田中 康之^{*4}

1. はじめに

一般に鉄道の高架化工事では、高架構造全体を低く抑えることが全体の工事費を抑制に通じることから縦断上のクリティカルポイントには、PC下路橋が用いられることが多い。しかし、スパンが長いPC下路橋は桁高が高く主桁幅も大きいため、隣接する仮線への支障、架道橋前後の連続性（景観）が悪いという問題が生じる。これらの問題を解決するために、加古川駅付近高架化におけるPC下路橋には軽量コンクリートを用いることにした。従来軽量骨材の弱点とされてきた吸水性、低強度という点を改善した新しい軽量骨材¹⁾（=以下「今回用いた軽量骨材」という）を用いることとしたが、開発後間もないため使用実績^{2) 3)}は少ない。そこで、施工性、品質を確認するため実物大の打設試験を実施、試験結果をふまえてコンクリート配合、打設順序等を決定し本施工を行った。また、設計に先立って、主としてPC定着部への軽量コンクリートの適用性についてFEMによる解析を行った。本稿はこれらの設計・施工

について報告するものである。

2. 事業と工事の概要

加古川駅付近連続立体交差事業は、JR神戸線および加古川線の鉄道を高架化し、南北交通を阻害する踏切の除却（15箇所）と新設道路等との立体交差により、都市交通の円滑化を図るものである。平成2年に都市計画決定され、平成5年に事業認可、平成9年より工事が着手された。

尾上・小野線架道橋一般図を図-2に示す。

3. 設計検討

3.1 今回用いた軽量骨材について

従来の軽量骨材と使用を前提として今回検討の対象とした骨材との比較を表-1に示す。

3.2 比較検討

桁高を2パターン（3.7 m、2.8 m）設定し、普通コンクリート、軽量コンクリートそれぞれの場合について設計を行い、構造物の形状、経済性等を比較検討した。

1) 形状：普通コンクリートを用いた下路PC桁の桁高スパン比は1/10～1/12程度となる。したがって本橋の場合の桁高は $h=3.7$ m程度となる。これは、隣接する高架橋の高欄高さの1.5倍となりこのような大きな段差は都市景観上好ましくない。したがって高欄とほぼ近い高さである $h=2.8$ mとするために普通コンクリートと軽量コンクリートの断面検討をおこなった。その場合のそれぞれの断面を図-3に示す。

2) 経済性：今回用いた軽量骨材の使用により上部工が軽量化し、下部工がスリム化するため、今回用いた軽量骨材を使用してもコスト増とはならない。

以上のことから、今回用いた軽量骨材の採用が有効であると判断した。なお、採用する軽量骨材の密度については、打設試験から判断することとした。

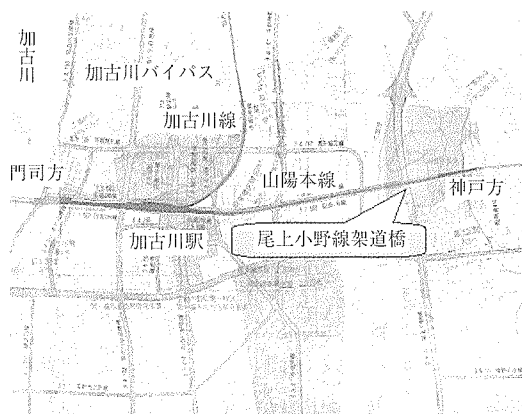


図-1 加古川駅付近連立事業略図



^{*1} Masahiro KONDOU

西日本旅客鉄道(株) 建設工事部
(前 姫路工事所 副所長)



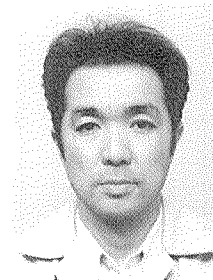
^{*2} Yukio KITAGO

ジェイアール西日本コンサル
タンツ(株) 執行役員 技師長



^{*3} Shoichi TAKIMOTO

ジェイアール西日本コンサル
タンツ(株) 土木設計部 課長



^{*4} Yasuyuki TANAKA

(株)新井組 加古川作業所 所長

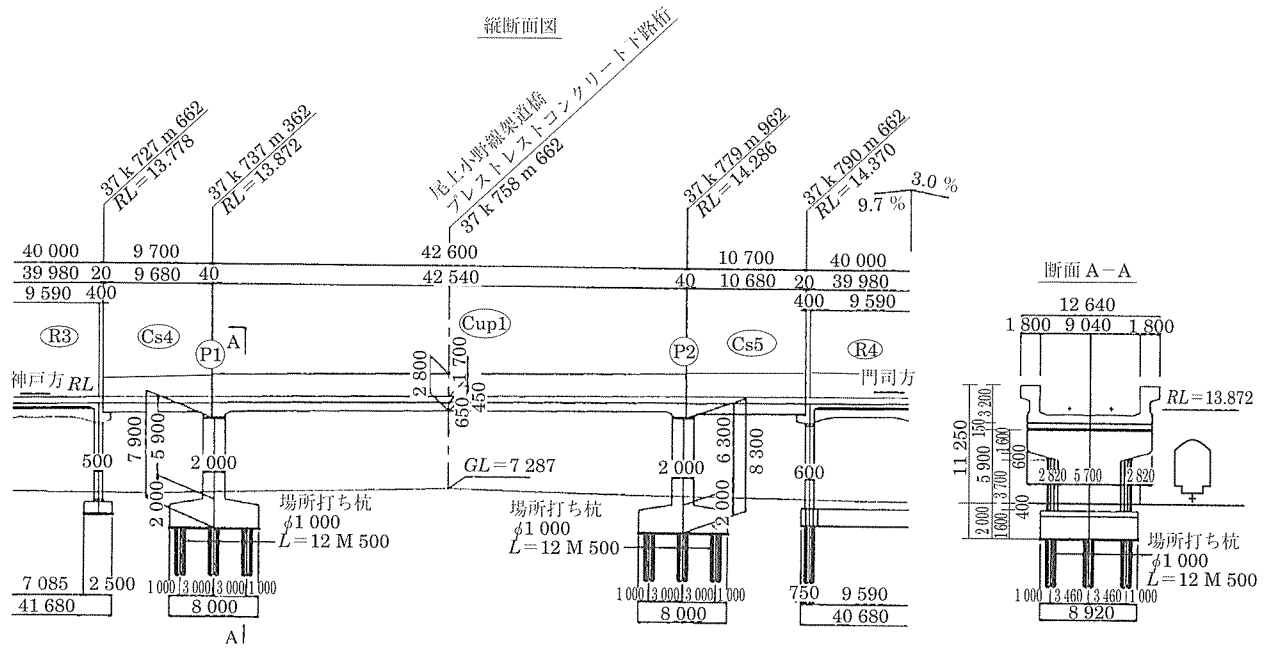


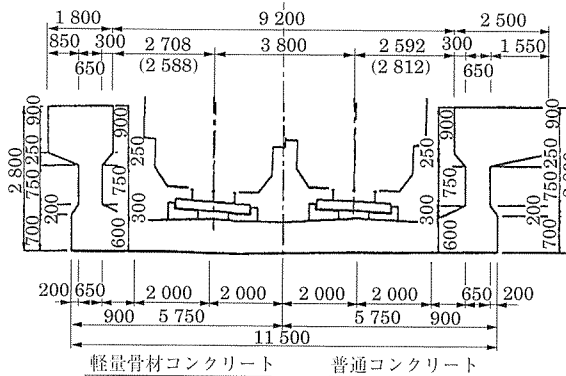
表 - 1 軽量骨材の特性比較

	今回用いた軽量骨材 (造粒系)	従来の軽量骨材 (非造粒系)
製造方法	真珠岩を微粉碎、混合・造粒・乾燥後焼成	膨張頁岩を破碎、焼成
構造特性	骨材内部が緻密なため吸水性が小さく、強度も大きい	多孔質なため吸水性が大きい
比重	0.8 ~ 1.2	1.2 ~ 1.3
特徴	吸水性が小さいため、従来の軽量骨材に比べ、ポンプ圧送性、耐久性 (凍結融解抵抗性) が非常に良い 圧壊強度が大きい	ポンプ圧送時の骨材の吸水により、スランプロスおよび圧送管内において閉塞を生じる 耐久性 (凍結融解抵抗性) が劣る

表 - 2 コンクリートの設計諸用値⁴⁾

	単位	普通コンクリート	軽量コンクリート	備考
単位容積質量	kN/m ³	24.5	20.0 ⁵⁾	鉄筋コンクリート
圧縮強度	N/mm ²	40	40	
曲げ強度	N/mm ²	4.9	3.4	
引張強度	N/mm ²	2.7	1.9	
付着強度	N/mm ²	3.3	2.3	
弾性強度	kN/mm ²	31.0	19.0	
乾燥収縮ひずみ		150 × 10 ⁻⁶	150 × 10 ⁻⁶	
クリープ係数		2.6	2.0	早強セメント使用 材齢 4 ~ 7 日

※ 1 今回用いた軽量 1 種における単位体積重量



軽量コンクリートを用いる場合の設計諸用値を表 - 2 に示す。普通コンクリートと比較して低減された値となっており、基準値の取り違い等に注意をはらった。

3.3 PC 定着部の安全性の検討

PC 桁の桁高さを抑えるためには、桁自重を軽減する以外に PC 鋼線の緊張力を大きくすることも有効である。

そこで 19 S 15.2 (SWPR 7 B) の大容量 PC 鋼線を使用し、モノグループシステムにより桁端に定着するものとした。

しかし、軽量コンクリートを用いた PC 桁に対して 12 S 15.2 以上の PC 鋼材が適用された事例はほとんど見あたらない。本橋では、19 S 15.2 という大容量の PC 鋼材を用い、かつ高性能軽量コンクリートの弾性係数が低く、せん断耐力も小さいため局部破壊の可能性が懸念される。そこで、以下の条件を用いて PC 鋼材定着部の安全性の検討を行った。

3.3.1 解析条件⁵⁾

(1) 使用材料および物理定数

・コンクリート

設計基準強度 : $\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$

比重 : $\gamma_c = 1.70$

載荷時 (解析時) コンクリート強度 : $\sigma_c = 35 \text{ N/mm}^2$

弾性係数 : $E_c = 16 \times 10^5 \text{ k N/mm}^2$

せん断弾性係数 : $G_c = 6.96 \times 10^4 \text{ k N/mm}^2$

- ポアソン比 $\mu = 0.20$
- ・定着板
- 弾性係数 $Et = 2.0 \times 10^6 \text{ k N/mm}^2$

(2) PC 鋼材の配置 (载荷条件)

19 S 15.2 を使用している定着部断面の鋼材配置の構造細目等を参考とし、床版部およびウエブ部の PC 鋼材配置を表 - 3 に示すようにモデル化して解析を行った。

表 - 3 PC 鋼材の定着条件

	部材厚さ	PC 鋼材本数	基準辺から鋼材中心までの距離	
			No. 1	No. 2
床版部	1 000 mm	1 本	350 mm	—
ウエブ部	950 mm	2 本	235 mm	715 mm

(3) 使用鋼材および緊張力 (载荷荷重)

载荷荷重には、PC 鋼材の緊張中の許容引張力 ($0.8 \sigma_{pu}$) とした ($P = 0.8 \times 505 = 404 \text{ tf}$)。

(4) 解析モデル

本検討では、床版およびウエブ部材を矩形断面にモデル化して 3 次元弾性 FEM 解析を行う。解析モデルの寸法として、床版の部材幅は厚さの 2 倍に、ウエブの高さは幅の 2 倍に設定した。解析では、コンクリートおよび PC 鋼材の定着板を 3 次元ソリッド要素にてモデル化し、シースによる空隙部のモデル化を行った。

3.3.2 解析結果および考察

ウエブ部の解析結果を図 - 4 (a) (b) に示す。定着板直下に作用する割裂応力度および支圧応力度 (圧縮応力度) を検討するために、ここでは x 方向 (σ_x) および z 方向 (σ_z) に作用する応力のコンター図を示している。また、表 - 4 に割裂応力度および支圧応力度の最大値を示す。

表 - 4 応力度の最大値

	割裂応力 (N/mm ²)	支圧応力 (N/mm ²)
床版部	3.36	28.19
ウエブ部	6.48	35.33

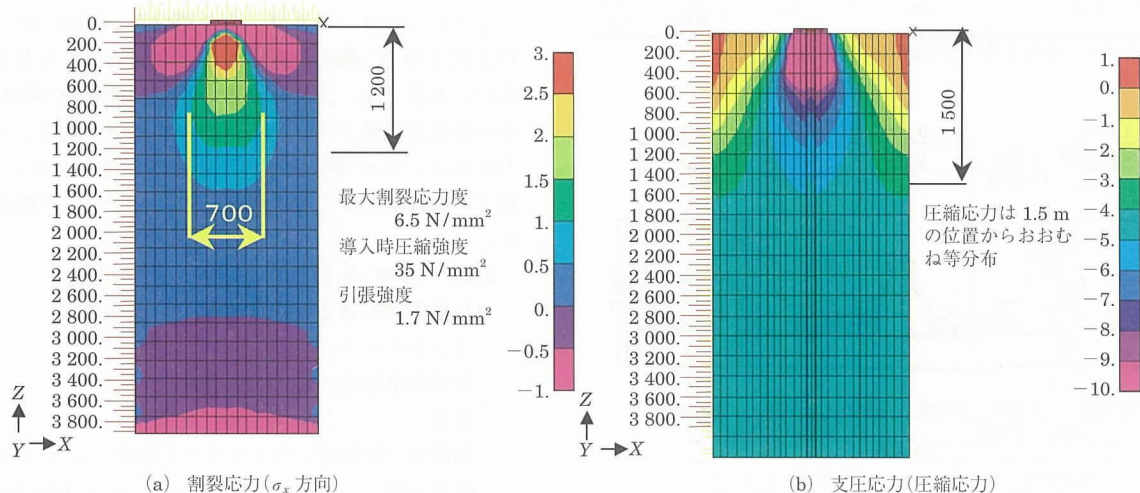


図 - 4 ウエブ部の解析結果

ウエブの割裂応力が大きな値を示しているが、これは、鋼材 2 本を並列して配置することから鋼材 1 本あたりの最大応力が重ね合わされた領域が発生することによる。ただし、この領域は鋼材間の限定された微細な領域であり、鋼材直下の最大引張応力は 3 N/mm^2 程度である。

図 - 4 (a) より、定着間隔は 0.7 m 以上必要である。

また、図 - 4 (b) より、定着部より 1.5 m 以上の位置からほぼ等分布に圧縮力が作用している。この結果、①定着部に補強筋を十分配置 (普通コンクリートの 3 倍程度) するか、②定着板を大きくして過密配筋を緩和し施工性を良くするか、③従来より実績のある普通コンクリートを影響範囲に用いるかが考えられた。今回は、補強鉄筋を算出する基準が明確に示されていないことを考慮し、定着部より 1.6 m まで 19 S 15.2 (SWPR 7 B) の実績のある普通コンクリートとすることとした。今回の解析結果は、大容量ケーブルを群定着した場合のひび割れ発生の可能性を示唆するものであるが、実構造物においては当該部分にひび割れは認められない。ただし、群定着に対してはさらに検討を進める必要があると考えている。

4. 配合と施工性の検討

材料選定から本施工までのフローを図 - 5 に示す。

4.1 試験練り

配合試験練りおよび実機試験練りを実施しコンクリートのフレッシュ性状、圧縮強度、弾性係数等の物性を確認した。コンクリート物性の目標値を表 - 5 に示す。配合試験

表 - 5 コンクリート物性の目標値

項目	目標値	
スランプ またはスランプフロー	$18 \pm 2.5 \text{ cm}$ $400 \pm 50 \text{ mm}$	
空気量	$5.5 \pm 1.5 \%$	
単位容積質量	$\rho = 0.85$	16.5 kN/m^3
	$\rho = 1.2$	18.5 kN/m^3
設計基準強度	40 N/mm^2	
静弾性係数	$\rho = 0.85$	18.3 kN/mm^2
	$\rho = 1.2$	20.5 kN/mm^2

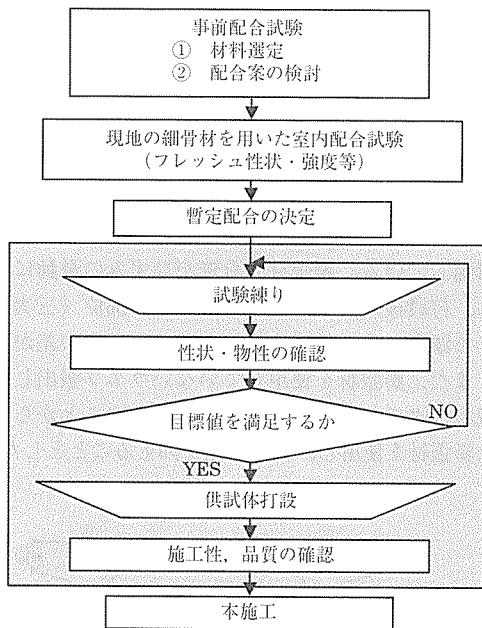


図 - 5 フローチャート

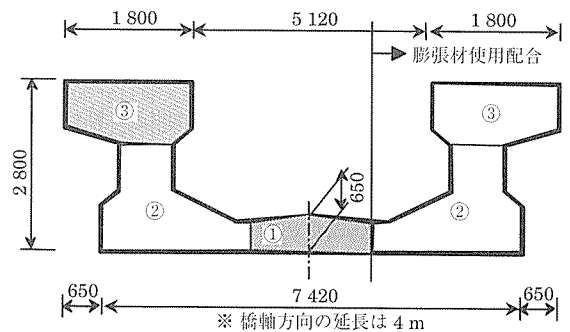


図 - 6 供試体断面形状

已収縮ひずみが大きい。ウェブの一方(図 - 6 の左側)は No.1 の配合, 他方(図 - 6 の右側)には膨張材を使用した No.2 の配合とし, 自己収縮に対する膨張材の有効性を検証することとした。コンクリートの打設は, 本施工の予定打設量 495 m³ に対しプラントの供給能力が 200 m³/日であるため, 図 - 6 に示すように, 1次打設: 下床版, 2次打設: フランジ下部, 3次打設: フランジ上部の順に, 3回に分割して打設した。

4.3 試験結果

(1) フレッシュ性状

試験練りにおいて配合されたコンクリートの物性値は, いずれも目標管理値内にあった。

(2) ポンプ圧送性

スランプフローを 40 cm 程度でピストン前面圧を測定したところ, 1.61 ~ 1.75 Mpa で従来の実績範囲内であったためスランプフロー 400 ± 50 mm で問題がないと考えた。

(3) 骨材の浮き上がり

試験体を断面方向に切断した状態を写真 - 1 に示す。また, トレッシングペーパーに骨材の分布状況を写し取り, 骨材分布状況の定量化を試みた。図化は骨材が集中してい

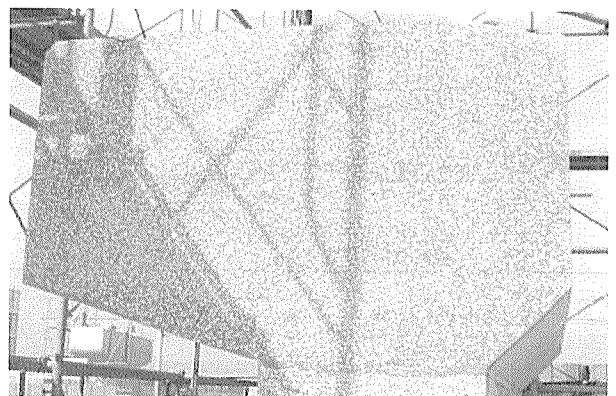


写真 - 1 骨材分布状況

により決定した案を表 - 6, 表 - 7 に示す。

4.2 施工性試験概要

使用する軽量骨材を決定するため物性, 施工性, 品質等の確認を目的として打設試験を行った。作業のフローチャートを図 - 5 に示す。配合試験は絶乾密度 0.85 g/cm³, 1.2 g/cm³ の両者で行ったが, 供試体は今後の展開を考え, あえて施工条件の厳しい絶乾密度 0.85 g/cm³ の粗骨材を用い, 実際の施工を模擬した。スランプフローは, 分離抵抗性, 施工性に大きく影響する要因である。このため, 骨材の浮き上がりを防ぎ, かつポンプ圧送可能な最小値をめざした。配合は表 - 6, 7 に示したものをを用いた。打設試験で作成した供試体を図 - 6 に示す。供試体の延長は 4 m とし, 骨材の充填性, 分離性を本施工時と同条件で観察できるように, シースおよび鉄筋は設計どおりの配置とした。また, 軽量コンクリートはセメント量が多いため, コンクリートの自

表 - 6 使用材料

種類	記号	材料名
セメント	C	普通ポルトランドセメント
粗骨材	G	アサノスーパーライト 0.85 アサノライト 1.20
細骨材	S1	砕石 (姫路市飾東)
	S2	海砂 (細砂)
膨張剤	EX	エクспан
高性能 AE 減水剤	SP	レオビルド SP-8SBS
AE 剤	AE	マイクロエア 202

表 - 7 コンクリート配合

No	粗骨材	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤	
					W	C	G	S1	S2	EX	SP (C×%)	AE (C×%)
1	ρ = 0.85	34	44.1	5.5 ± 1.5	165	486	287	503	211	—	1.15	0.0025
2	ρ = 0.85	34	43.2	5.5 ± 1.5	165	486	278	491	206	20	1.15	0.0025
3	ρ = 1.20	38	49.7	5.5 ± 1.5	165	453	378	575	242	20	1.10	0.003

る部分と比較的少ない部分を含めて6段面（1断面30cm×30cm）について行った。骨材占有面積率を図-7に示す。

スランプフローを40cm程度と低めに抑え、粘性を高くしたことにより、骨材がおおむね均等に分布していることが確認できた。しかし、骨材の浮き上がりについては、図-7に見られるように狭隘な部分で占有面積率が低くなり、その上部で骨材が集中した。これはアジテータ車の到着が遅れたために打設間隔が開き、パイプレータを長時間かけたため、骨材が浮き上がったものと考えられる。この結果から本施工では、パイプレータの使用を1個所5秒以内に定めることとした。打設試験ではミキサの練混ぜを2分、アジテータ車の高速攪拌を30秒とし、十分な練混ぜ・攪拌を行ったため、骨材の分離は認められなかった。

(4) 表面仕上げ性

表面仕上げについてはスラブ天端を4区画に分け4パターンの仕上げを試した。パターンごとの結果を表-8に示す。

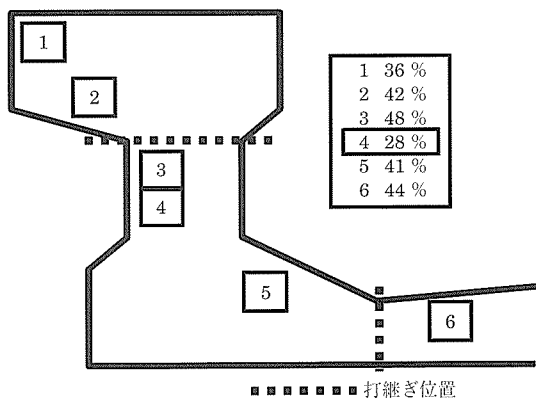


図-7 軽量骨材占有面積率

表-8 パターン別表面仕上げ性

①	方法	通常の金ゴテ仕上げ
	結果	浮き水がほとんどなく表面の骨材を押さえられない
②	方法	表面養生剤+金ゴテ仕上げ
	結果	通常のコンクリートと同等の仕上げ
③	方法	水+金ゴテ仕上げ
	結果	骨材とモルタル分が分離
④	方法	モルタル+金ゴテ仕上げ
	結果	施工に手間を要する

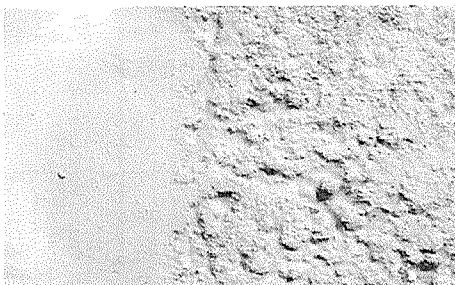
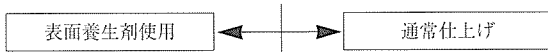


写真-2 表面仕上げ状況

この結果から、本施工では表面養生剤を使用することとした。表面養生剤を使用した場合を写真-2の左側に、使用しない場合を写真-2の右側に示す。

(5) ひび割れ

図-8にコンクリート打設後のひずみ位置と測定結果を示す。材齢初期の12時間程度までは、いずれの部位においてもコンクリートの温度上昇による膨張を示しており、その後収縮している。膨張材の有無がひずみの挙動に及ぼす影響は、打設後の拘束がもっとも小さい部位（三次打設の⑬⑮）で顕著にみられ、ひずみで400μ程度の差が生じている。また、膨張材を使用していないウェブ張出し部下側に、脱型後クラックが生じていた。以上のことから、本施工では膨張材を使用し、自己収縮を抑えることとした。

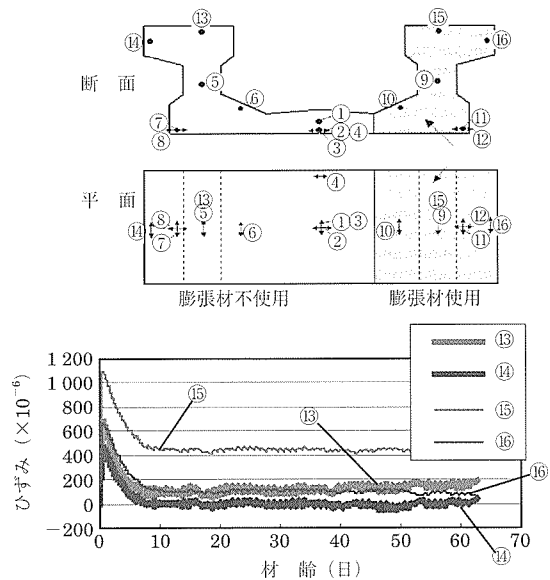


図-8 ひずみ測定結果

(6) 打設順序

試験施工ではウェブ中間部に打継ぎを設けていた。しかし、ウェブ中間部における表面仕上げが難しかったことから、本施工では①下床版、②左ウェブ、③右ウェブの順で施工を行い、ウェブを下から1回で立ち上げることにした。

5. 本施工

5.1 打設計画

軽量コンクリート打設試験の結果、およびこれまでの実績等から、より信頼性の高い $\rho = 1.2$ を採用することとした。表-7に本施工で採用した配合を示す(No.3)。また、3.3で述べたように、桁両端部1.6mにおいては普通コンクリートを使用した。

図-9に打設順序を示す。下路橋全体を4回に分けて打設し、打継目については全面ラス型枠（＝金網を使用した捨型枠）を用いた。

(1) スラブ部

（打設数量 約183m³ アジテータ車41台）

ポンプ車（8t, 29mビーム, 筒径125mm）1台を使用

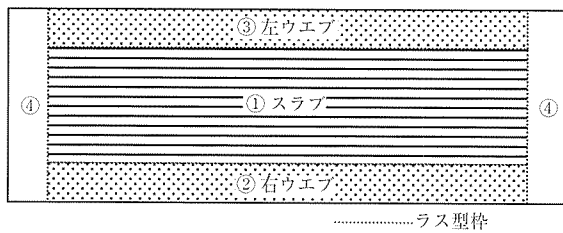


図 - 9 打設順序

し、勾配の低い起点方より1層での打上げを行った。

人員はポンプ工2名、コンクリート工8名（高周波バイブレータ3台）、左官工5名である。

(2) ウェブ部

(打設数量 約 153 m³/桁 アジテータ車 34 台)

ウェブ部の打設は軽量コンクリートの硬化速度が速いため、ポンプ車を2台使用する。ウェブの起点から中央を1台目、中央から終点を2台目が担当し、中央付近で1台目から2台目に引継ぎ、1台目が次の層の打設を行うことで、打継目のないコンクリートが打設できた。

5.2 品質管理

軽量コンクリートは、スランプフローが増加すると骨材とモルタルが分離しやすくなり、施工性が悪くなる。また本施工ではコンクリート打設が1日におよび、時間によって打設条件が異なることが考えられる。そのため表 - 9 に示す品質検査を行い品質管理に努めることとした。また、表 - 10 に示すような圧縮強度特性の確認を150 m³に1回の頻度で行った。

5.3 施工結果および考察

(1) スランプフロー

コンクリートのフレッシュ性は、全体的に、出荷時よ

表 - 9 品質検査一覧

(出荷時検査)	試験頻度	目標値
スランプフロー	1.2 台目および 10 台ごと	40 ± 5 cm
空気量	1.2 台目および 10 台ごと	5.5 ± 1.5 %
単位容積質量	1.2 台目および 10 台ごと	1.80 ± 0.05 t/m ³
コンクリート温度	1.2 台目および 10 台ごと	CT 35 °C 以下
(荷卸し時検査)	試験頻度	目標値
スランプフロー	1.2 台目および 10 台ごと	40 ± 5 cm
空気量	1.2 台目および 10 台ごと	5.5 ± 1.5 %
単位容積質量	AM, PM 各 1 回	1.80 ± 0.05 t/m ³
コンクリート温度	1.2 台目および 10 台ごと	CT 35 °C 以下
単位水量測定	AM, PM 各 1 回	165 kg/m ³ 以下
塩化物物質	AM, PM 各 1 回	0.03 kg/m ³ 以下
テストピース採取	AM, PM 各 1 回	

表 - 10 コンクリートの強度性状

打設回数 (日付)	材齢 7 日		材齢 28 日	
	圧縮強度 (N/mm ²)	単位容積 質量 t/m ³	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
1 (11/29) - 1 台目	43.6	1.83	51.3	24.3
1 (11/29) - 40 台目	45.5	1.82	53.1	24.0
2 (12/18)	47.2	1.82	55.8	24.2
3 (12/19)	46.7	1.83	55.2	24.5

り荷卸し時の方がスランプフロー値が大きかった。この原因は、本施工が冬季に行われたためスランプフローロスがほとんどなく、低温による高性能 AE 減水剤の効果遅延により増大したものと考えられる。スランプフローの管理が材料の分離抵抗性、仕上げに大きく影響することから、今回、品質検査をプラントと現場で行い、お互いの情報をフィードバックしながらフロー値を安定させたことがスムーズなコンクリート打設につながった。

(2) ポンプ圧送性

当現場では圧送距離が短い（ポンプ車を桁のすぐ傍に横付けでき、ブームを回転させるだけで桁のどの位置にもコンクリートの打設が可能）こともあり、ポンプ圧送性については、まったく問題は生じなかった。

ラス型枠を全面に使用したため、レイタンス処理が不要であった。しかしコンクリートの流動性が高いのでラスおよび隙間からコンクリートが噴出し、打設終了後の型枠内の清掃に労力を要した。対策として、ラス型枠設置時には隙間を作らないよう入念に施工し、打設後の清掃を確実に容易に行えるように妻型枠を設置しないか、大きな清掃用の開口を設けておく必要がある。

(5) ハンチ部

ハンチ部のジャンカ対策として、ハンチ型枠に空気穴を開けたほか、3箇所透明板を使用し、型枠バイブレーターのかけ具合等を確認できるようにしていた。しかし、ハンチの一部に気泡が溜まり、あばたが発生した。ハンチ部はダクトコンクリートで覆うためとくに美観上の問題は生じないが、ハンチ部の施工については注意が必要である。

6. 完成後のたわみ測定

たわみ量の測定は、レーザー式変位計を用いダイナミック測定を行った。想定たわみ量 $\delta = 8.8 \text{ mm}$ に対して実測値は、 $\delta' = 6.5 \text{ mm}$ となった。誤差の原因として、①軌道等の非構造部分の寄与、②衝撃係数の実際との乖離等が考えられるが、結果としてはほぼ想定とおりであり、軽量コンクリートのヤング係数等設計用値の設定は妥当であるとされる。なお、列車の走行性と乗り心地の両面から定まるたわみの制限値 ($L/800$) は 52 mm であり、十分満足する結果であった。

7. あとがき

今回は、軽量コンクリートを PC 下路橋に採用したわけ

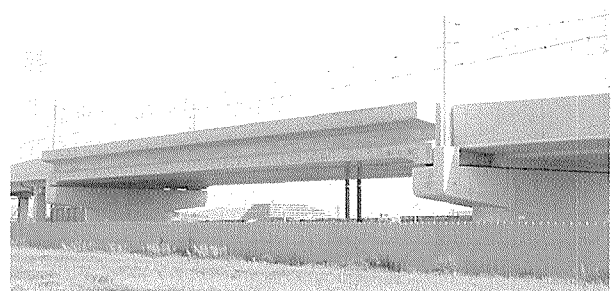


写真 - 3 PC 下路橋完成全景写真

であるが、これ以外にも軽量のメリットを活して、合成桁、仮設桁、異径間ラーメン等への活用が考えられる。さらに、軽量化による上部工+下部工のスリム化に利用すれば、軟弱地盤や用地不足による施工難といった問題にも対応できると考えられる。完成後の全景を写真-3に示す。

最後に本工事の関係者各位に心からのお礼を申し上げたい。

参考文献

1) 岡本亨久, 石川雄康, 榎本 隆, 笹嶋昌男: 高性能軽量コンクリー

ト, コンクリート工学, Vol. 37, No.4, pp12-18. 1994

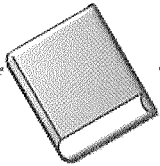
2) 影本多加夫, 高木芳光, 大庭光尚, 海原卓也: 超軽量コンクリートを用いたコンクリートスラブ桁の計画と施工, SED No.12 JR 東日本 1999.5

3) 田附伸一, 大郷貴之他: 東北新幹線第一愛宕下 BL・沼宮内 Bi の設計, SED No.15 JR 東日本 2000.11

4) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物

5) 田村 聖, 濱田 譲, 前堀伸平, 二羽淳一郎: 高性能軽量コンクリートを用いた PC 定着部の耐荷特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22 No.3, pp.871-876, 2000

【2003年12月24日受付】



●関連書籍のご案内

●初期応力を考慮した
RC 構造物の非線形解析法とプログラム

平成16年3月発行

田辺忠顕編著／技報堂出版刊

B5判・358頁 (本体価格 6,000円+税5%)

技報堂出版

〒102-0075 東京都千代田区三番町 8-7 第25興和ビル

TEL03(5215)3165 FAX 03(5215)3233