

報告 高強度軽量コンクリートの橋梁への適用性

柳井 修司*1・坂田 昇*2・三田村 浩*3・池田 憲二*4

要旨: 高強度軽量コンクリートを橋梁へ適用する技術を開発するために、実規模大のPC橋梁プレキャストセグメントおよび鋼コンクリートサンドイッチ合成床版を有する単純桁橋を試験的に施工した。プレキャストセグメントおよび橋台には真珠岩を主原料とする独立空隙型人工軽量骨材を用いた設計基準強度 50N/mm^2 、単位容積質量 $1,850\text{kg/m}^3$ の高強度軽量コンクリートを、合成床版には頁岩を主原料とする人工軽量骨材を用いた自己充てん性を有する軽量コンクリートを適用した。その結果、これらの軽量コンクリートの施工性は良好であり、実構造物への適用が可能であることを明らかにした。

キーワード: 橋梁, 施工, 高強度軽量コンクリート, 自己充てん性

1. はじめに

近年の橋梁は長大化、大規模化の傾向にあり、特に、自重の影響が卓越するコンクリート橋の場合には、死荷重をいかにして軽減するかが課題となっている。このような場合には、高強度軽量コンクリートを適用することが有効である。コンクリートを軽量化することで、死荷重の軽減、スパンの増大、基礎構造の簡素化が図れるばかりでなく、地盤条件、支保工、建設機械など施工上の制約が緩和され、最終的には建設コストの削減が可能となる。また、上部工の軽量化に伴う地震時慣性力の軽減は、耐震設計上有利となる。著者らは、PC橋梁に高強度軽量コンクリートを適用した場合の試設計や工事費の算出を行い、そのコストメリットや耐震性の向上を明らかにしてきた¹⁾。

一方、人工軽量骨材の製造技術の向上により、骨材自身の高強度化、低吸水性化、高耐久化が図られ^{2), 3)}、構造物に要求される強度特性や凍結融解抵抗性などの耐久性ならびにポンプ圧送性などの施工性の面から軽量コンクリートの利用範囲が拡大しつつある。

今回、高強度軽量コンクリートを橋梁へ適用する技術を確認するために、実規模大のPC橋梁プレキャストセグメントおよび鋼コンクリートサンドイッチ合成床版を有する桁橋の試験施工を北海道江別市内で実施した。ここでは、これらの施工結果について報告する。

2. 構造物の形状

施工したPC橋梁プレキャストセグメントの形状を図-1に、桁橋の形状を図-2に示す。

プレキャストセグメントは幅10.6m、桁高2.0m、セグメント長1.5mの実規模大のものである。セグメントには、橋軸方向および床版横締め用のPC鋼材(図中A, B, C)ならびに内径 $\phi 70\text{mm}$ のスパイラルシースを適宜配置した。また、セグメントの片側には外ケーブルの偏向部を模した偏向ブロックと隔壁を設け、PC橋梁上部工を想定した施工性を検討した。

桁橋は橋長26m、幅員5mの単純桁橋であり、床版は鋼コンクリートサンドイッチ合成床版となっている。なお、床版厚162mm(コンクリート厚

*1 鹿島技術研究所 土木技術研究部 構造・海洋グループ 研究員 工修 (正会員)

*2 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・LCEグループ長 工博 (正会員)

*3 国土交通省 北海道開発局 札幌開発建設部 道路建設課 (正会員)

*4 北海道開発土木研究所 構造部 構造研究室長 (正会員)

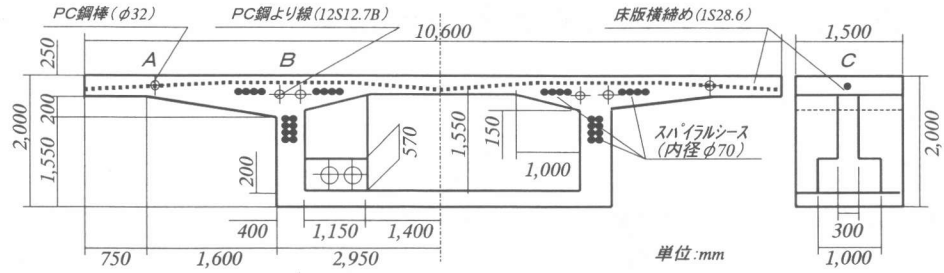


図-1 プレキャストセグメントの形状

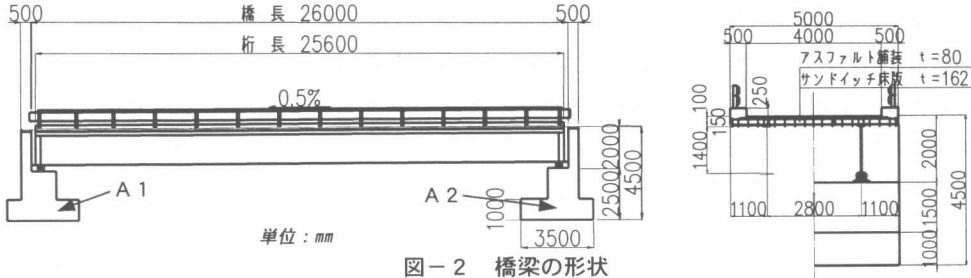


図-2 橋梁の形状

表-1 コンクリートの仕様

適用部位	プレキャストセグメント 及び橋台	合成床版
配合名	配合A	配合B
設計基準強度	50N/mm ²	30N/mm ²
スランプフロー	550±50mm	700±50mm
空気量	7±1.5%	6±1.5%
単位容積質量	1,850kg/m ³	1,900kg/m ³
軽量粗骨材	独立空隙型軽量骨材 (主原料:真珠岩)	非造粒型人工軽量骨材 (主原料:膨張頁岩)
備考	凍結融解抵抗性を考慮	自己充てんコンクリート

表-2 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度:3.14g/cm ³ , 比表面積:4.470cm ² /g
混和材	FA	フライアッシュ	密度:2.26g/cm ³ , 比表面積:4.920cm ² /g 強熱減量:0.45%
細骨材	S1 S2	幌延産川砂 由仁産陸砂 S1:S2=50:50	表乾密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:1.28% 表乾密度:2.61g/cm ³ , 吸水率:2.67% 粗粒率:2.71
粗骨材	Ga	独立空隙型人工軽量骨材 主原料:真珠岩	絶乾密度:1.19g/cm ³ , 24h吸水率:1.00%, 実積率:61.0%, 最大寸法:15mm
	Gb	非造粒型人工軽量骨材 主原料:膨張頁岩	絶乾密度:1.26g/cm ³ , 表乾密度:1.56g/cm ³ , 含水率:23.8%, 実積率64.8%, 最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系標準形
	VIS	増粘剤	ウエランガム

表-3 コンクリートの配合

配合	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(上段kg/m ³ , 下段kg/m ³)						SP (P×%)	VIS (W×%)	
				W	C	FA	S1	S2	Ga			Gb
A	7.0	33.0	51.3	160	485	—	417	412	357	—	1.20	(80g)
				160	154	—	158	158	300	—	(5.82kg)	
B	6.0	41.3	46.0	151	366	264	338	334	—	468	0.90	(76g)
				151	117	117	128	128	—	300	(5.63kg)	

さ150mm)は、従来にない薄肉断面である。

3. コンクリートの仕様

施工に供したコンクリートの仕様、使用材料および配合を表-1~3にそれぞれ示す。

プレキャストセグメントおよび橋台には、設計基準強度 50N/mm²、単位容積質量 1,850kg/m³ の高強度軽量コンクリート (配合A) を適用した。粗骨材には真珠岩を主原料とする独立空隙型人工軽量骨材²⁾を気乾状態で使用した。これは、曝される環境が凍結融解作用を受ける厳しい寒冷地であることを考慮したためである⁴⁾。コンクリートの目標スランプフローは、ポンプ圧送性を考慮して 550mm とした⁴⁾。水セメント比は室内試験により決定し、目標強度 60N/mm² を満足するように 33% とした。また、凍結融解抵抗性試験 (ASTM C 666 A 法) を実施して、十分な耐凍害性を有することを確認した(耐

久性指数:102.3)。

合成床版には、単位容積質量 1,900kg/m³ の自己

充てん性を有する軽量コンクリート（配合B）を適用し、合成床版の更なる軽量化を試みた。粗骨材には頁岩を主原料とする従来型の人工軽量骨材をプレウェットングして使用した。コンクリートの目標スランブフローは700mmとした。これは、限られた打設孔からの圧入施工となり振動締固めが不可能であることおよび床版厚が極めて薄いことを考慮したためである。また、材料分離抵抗性と自己充てん性を向上させるために混和材としてフライアッシュを使用した⁵⁾。

いずれの配合もフレッシュコンクリートの品質のばらつきや材料分離を抑制し、ポンプ圧送性を向上させる⁴⁾ために増粘剤ウェランガムを添加した。また、ウェランガムは高性能AE減水剤にプレミックスして使用し、混和剤として一液化したものを用了⁶⁾。

4 施工結果

4.1 プレキャストセグメントの施工

(1) コンクリートの性状

コンクリートの製造は、施工ヤードから約10km離れたレディーミクストコンクリート工場で行い、強制二軸式ミキサを使用して、2バッチ分(2.25m³ × 2 = 4.5m³)を1台のアジテータ車に積載した。練混ぜ時間はモルタル先練り30秒、粗骨材投入後150秒とした。

受入れ時のコンクリートの品質管理試験の結果を表-4に示す。コンクリートの性状は良好であり、いずれの試験においても目標値を満足する値を示した。

(2) 施工性

コンクリートの打込みは最大理論吐出圧力7N/mm²のポンプを用いて図-3に示す順序で行った。ブーム(26.5m)先端にはテーパ管を介して4インチのフレキシブルホース(7m)を取り付け、実吐出量約20m³/hの圧送速度で打ち込んだ。ピストン前面圧の最大値はポンプ理論吐出圧力の6割程度(4.63N/mm²)であり、過大な圧送負荷は生じなかった。また、圧送後のコンクリートの性状は良好であり、筒先のホース径を4インチに絞

表-4 コンクリートの試験結果

項目	試験結果
スランブフロー(mm)	550 × 545 (543)
空気量(%)	7.4
単位容積質量(kg/m ³)	1,800
28日圧縮強度(N/mm ²)	66.2

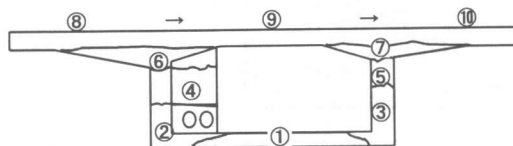


図-3 コンクリートの打込み順序

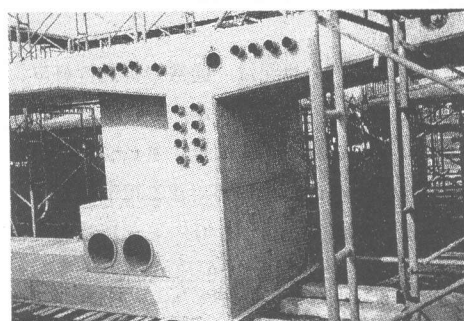


写真-1 脱枠後の状況

表-5 PC鋼材の諸元と緊張時最大荷重

部位	PC鋼材	降伏荷重Py (kN)	0.9Py (kN)	実際の緊張力 (kN)
C	1S28.6	807	726	692

(端部導入力)

っても、円滑なポンプ施工を行うことができた。

振動締固めは、棒状バイブレーターと型枠バイブレーターを併用して行った。偏向ブロック、ウェブ・隔壁の取合い部、シース間周り等の複雑な部位へコンクリートが十分に廻り込むように密実に締め固めた。その結果、写真-1に示すように、コンクリートの未充てん部は全く認められず、良好な仕上がりを得られた。

これらのことから、施工に供した高強度軽量コンクリートは、複雑な部位を有する橋梁上部工へ十分適用可能であると考えられた。

(3) プレストレスの導入

PC鋼材の緊張は、図-1中のC(床版横締め1S28.6;プレートタイプ)について、0.9Py(降伏荷重の0.9倍)を目標にプレストレスを導入した。表-5にPC鋼材の諸元と緊張時の最大荷重を示

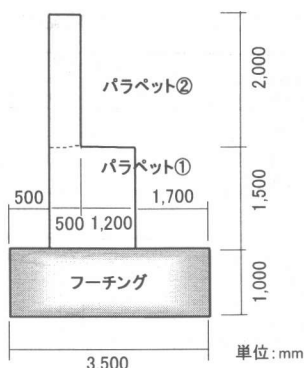


図-4 A1橋台の打設順序

す。定着システムの諸元は、通常の普通骨材コンクリートのものと同じくしたが、ひび割れの発生や定着プレートのめり込みは全く生じず、通常の定着システムをそのまま適用できる可能性が示された。なお、緊張時のコンクリートの圧縮強度は 59.3N/mm^2 、ヤング係数は $2.40 \times 10^4\text{N/mm}^2$ であった。

4.2 橋台の施工

橋台は、図-4に示すようにフーチングとパラベットの2回に分けてコンクリートを打ち込んだ。フーチングの施工では、高強度軽量コンクリートのポンプ圧送性を評価するために、セグメント施工時と同じポンプを用いて、図-5に示す配管条件でポンプ施工を行った。パラベットの施工は、ブームを用いたポンプ施工により実施した。なお、パラベット①、②は連続して打ち込み、コンクリートの吹上りが生じないように約1時間の打重ね間隔を設けた。

(1) コンクリートの性状

受入れ時のフレッシュコンクリートの品質管理試験は、総打設量 70m^3 に対して12回実施した。そのうち6回の品質管理試験において、圧縮強度試験用の供試体を採取した。コンクリートの品質管理試験の統計データを表-6に示す。いずれの試験値も目標値を満足する値を示した。また、フレッシュコンクリート、硬化コンクリートとも品質変動が非常に小さく、設計基準強度 50N/mm^2 の高強度軽量コンクリートを安定して製造・供給することが可能であった。

図-6にA1フーチング施工時におけるポンプ

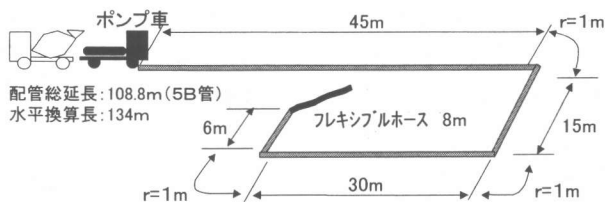


図-5 配管状況

表-6 コンクリートの試験結果

	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m^3)	28日圧縮強度 (N/mm^2)
最大値	595	8.4	1846	68.0
最小値	523	5.6	1750	59.3
平均値	567	6.6	1800	65.0
標準偏差	24.5	1.0	27	3.2
変動係数(%)	4.3	15.2	1.5	4.9

外気温: $13.5 \sim 19.0^\circ\text{C}$ 、コンクリート温度: $19.0 \sim 23.0^\circ\text{C}$

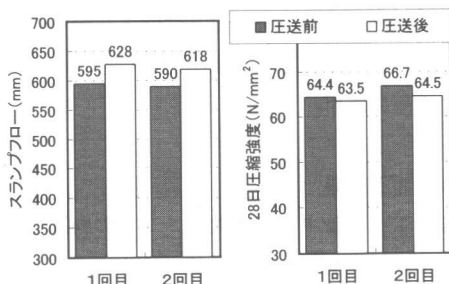


図-6 圧送前後の性状比較

圧送前後のスランプフローおよび材齢28日の圧縮強度の比較を示す。既往の文献⁴⁾では、ポンプ圧を受けて、軽量骨材の加圧吸水が生じ、コンクリートの流動性が低下することが報告されている。しかしながら、今回の施工では、圧送による流動性の低下は認められず、圧送後のコンクリートは良好な流動性を有していた。これは、使用した軽量骨材の24時間吸水率が1.00%と非常に小さかったこと、低水セメント比であるために、モルタルからの加圧脱水が生じにくかったことによるものと考えられた。なお、軽量骨材の含水率の増加は0.6%であり、既往の報告⁴⁾に比べて、含水率の増加は非常に小さいものであった。空気量および単位容積質量については、圧送による有意な変化は認められなかった。

材齢28日の圧縮強度は、圧送によりわずかに低下する傾向を示したが、ポンプ圧送が圧縮強度に及ぼす影響は非常に小さいものであった。

(2) 施工性

A1 フーチング施工時には、ピストン前面圧、吐出量を連続的に測定してポンプ圧送性を評価した。実吐出量とピストン前面圧の関係を図-7に示す。ポンプ圧送における設定吐出量は20～25m³/h程度としたが、吐出量が20m³/h程度であれば、ピストンに作用する圧送負荷が理論吐出圧力の5割程度であり、円滑な圧送を行うことができた。また、吐出量を30m³/hまで故意に増加させた場合でも、ピストン前面圧は理論吐出圧力の8割程度にとどまった。このことから、圧送管の水平換算長が130m程度の施工条件であれば、過大な圧送負荷を生じさせず、十分な圧送速度を確保できると判断された。なお、実吐出量とピストン前面圧は図-7に示すように、ほぼ線形の関係にあり、両者には高い相関が認められた。

ブームを用いたパラペットの施工においても、コンクリートの性状変化は認められず、円滑なポンプ施工が可能であった。

フーチングの施工状況を写真-2に示す。打込み区画が広い部位へ流動性の高い軽量コンクリートを打ち込む際には、流動や振動締固めに伴う軽量骨材の浮上りが懸念された。そこで、内部振動機を用いた締固め作業では、目視による確認を行いながら、締固め間隔を約50cm、一カ所の締固め時間を約5秒間とした。その結果、型枠の隅々までコンクリートが密実に充てんし、また、軽量骨材の浮上りはほとんど認められなかった。これは、締固め作業が適切であったことに加えて、施工したコンクリートが低水セメント比であり、さらに増粘剤ウェランガムの添加によって十分な材料分離抵抗性を有していたことによるものと考えられた。また、出来形も良好であったことから、施工に供した高強度軽量コンクリートは、良好な施工性を有していると判断された。

4.3 合成床版桁の施工

(1) コンクリートの性状

コンクリートの品質管理試験結果を表-7に示す。コンクリートの性状は、非常に安定してお

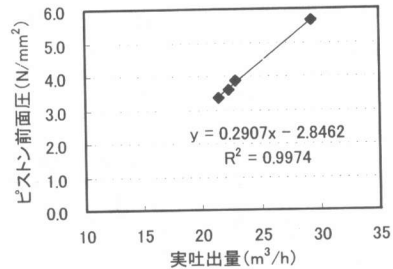


図-7 実吐出量とピストン前面圧の関係

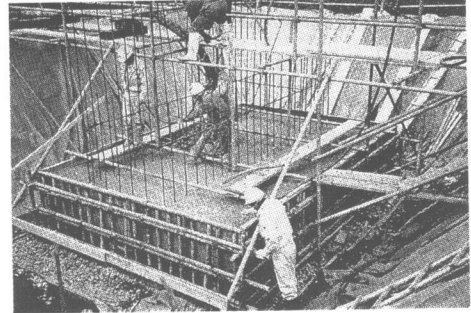


写真-2 フーチングの施工状況

表-7 コンクリートの試験結果

No.	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	500mm7ロー 到達時間(秒)	28日圧縮強度 (N/mm ²)
1	705	6.4	1927	6.9	-
2	730	7.4	1880	6.3	51.4
3	730	5.4	1936	4.4	-
平均	722	6.4	1914	5.9	51.4

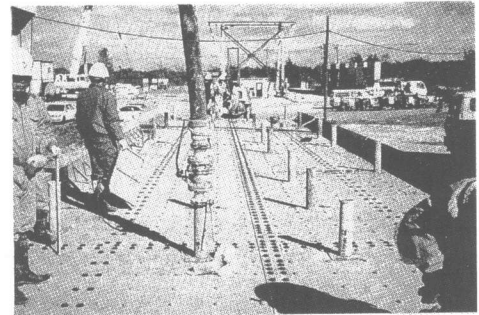


写真-3 合成床版への打設状況

り、実施した全ての試験において目標値を満足する結果が得られた。

(2) 施工性

コンクリートの打込み状況を写真-3に示す。コンクリートの打込みは、図-8に示すように床版内部のフランジで区切られた6ブロック(1ブロック:8.4×2.5m)の各ブロックに設けた2カ所の打設孔から圧入した。打込み際には、吹

出孔やエア抜き孔から充てん状況を確認しながら筒先をA-1からA-2へ移動した。その結果、設置した全ての吹出孔から材料分離が生じていない均質なコンクリートが溢れ出した。また、全てのエア抜き孔からモルタルの流出が確認され、良好な充てん性が得られた。なお、1ブロック(3.2m³)の打込みに要したピストン稼働時間は平均15分であり、圧送速度は13m³/hであった。

施工後、打音検査やコア抜き調査を行って鋼板とコンクリートの一体性を検証した。その結果、未充てん部が皆無であること、鋼板とコンクリートが完全に一体化していること、コア供試体の表面に粗骨材が均一に分布していることが確認され、施工に供したコンクリートが優れた自己充てん性を有していたことが分かった。これらから、鋼コンクリートサンドイッチ床版に自己充てん性を有する軽量コンクリートを適用することが十分に可能であり、合成床版の更なる軽量化が図れることを明らかにした。

5. おわりに

高強度軽量コンクリートを橋梁へ適用する技術を確認するために、実規模試験施工を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 設計基準強度 50N/mm² の高強度軽量コンクリートは、安定した製造・供給が可能である。また、良好なポンプ圧送性、施工性および硬化物性を有しており、実構造物へ適用可能である。
- (2) 自己充てん性を有する軽量コンクリートは、鋼コンクリートサンドイッチ床版へ適用可能であり、合成床版の更なる軽量化が図れる。施工した構造物は、長期暴露する予定であり、今後、経年変化を調査していく計画である。

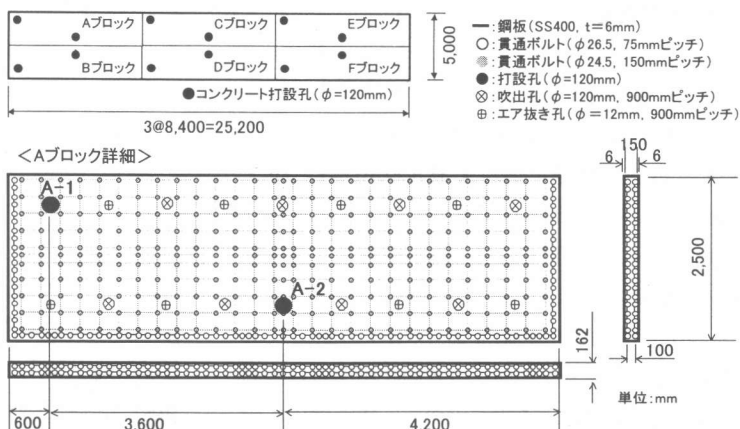


図-8 合成床版の打込み方法

参考文献

- 1) 三田村浩, 池田憲二, 坂田昇, 信田佳延: 軽量骨材コンクリートの適用を想定したプレストレスコンクリート橋の試設計, 日本コンクリート工学協会軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集, pp.149~152, 2000.8
- 2) 岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正: 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp48~52, 1998.1
- 3) 曾根徳明: 石炭灰を主原料とした高強度人工軽量骨材, コンクリート工学 Vol.36, No.12, pp.3~10, 1998.12
- 4) 平石剛紀, 坂田昇, 柳井修司, 石川雄康: 独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性, 日本コンクリート工学協会軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集, pp.71~78, 2000.8
- 5) 柳井修司, 坂田昇, 信田佳延, 岡本享久: 高性能軽量・高流動コンクリートに関する研究, 土木学会論文集, V-47, pp23~32, 2000.6
- 6) 坂田昇, 柳井修司, Henri Monty, 吉崎政人: 併用系高流動コンクリートの新しい増粘剤に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, 2001.7