

(145) 早強性高流動コンクリートを用いたPC桁の製造と載荷試験

(株)富士ピー・エス 本店技術部 正会員 ○徳光 卓  
 同 上 正会員 篠原 貴  
 福岡大学 工学部 土木工学科 添田 政司  
 同 上 大和 竹史

1. はじめに

高流動コンクリートは構造物の品質の信頼性と、コンクリート打設工程の省力化・合理化・機械化が可能な工法として注目されている。1998年には土木学会より「高流動コンクリート施工指針」<sup>1)</sup>が発刊され、その性能の規定や照査、検査方法が示されるなど、今後、PC分野においても適用が広がるものと考えられる。筆者らはこれまでに、JIS A 5313 PC橋げた<sup>2)</sup>の製造への高流動コンクリートの適用を目指して、その配合や流動性、水和熱特性、クリープ特性や耐久性などの諸性状について研究を行い良好な成果を得た<sup>3)</sup>。

しかし、粉体系高流動コンクリートは少量の水の増減で流動性が大きく変化し、品質管理の良否によってはコンクリートの未充填や材料分離の発生も懸念される。品質のばらつきを最小限に抑えるには連続打設を行うのが好ましいが、実際には工場生産工程の都合上、高流動コンクリート以外の数種類の配合をランダムに打設する必要があり、ある程度の流動性のばらつきを生じるのは避けられないと考えられる。

そこで本研究では、最悪のケースを想定し、各バッチの流動性が大きくなばらつきを生じた場合の修正方法についての試験を行い、実際にPC桁を打設した。併せて、PC桁供試体のプレストレスの伝達長測定と静的載荷試験を実施し、JIS A 5313への適合性を調査した。

2. 実験の概要

2.1 配合

示方配合を表-1に示す。本コンクリートは粉体系の高流動コンクリートとした。結合材は早強セメントと高炉スラグ微粉末(4000ブレン)を重量比6:4の割合で混合使用した。細骨材は岩質の異なる砕砂を2種類混合して使用した。粉体系の高流動コンクリートとした理由は、他の配合と交互に打設が可能であることと、流動性が水量の変化に対して敏感であるため流動性から硬化後の品質を判断しやすいことである。また、結合材の選定と混合比率は工場生産工程の関係上、打設後、蒸気養生して材令1日(約15時間)でプレストレス導入時の圧縮強度35N/mm<sup>2</sup>が得られるよう、事前の試験練り結果から蒸気養生後の材令1日強度と水和熱特性を勘案して定めた。

2.2 供試体とその製造実験

供試体の形状寸法を図-1に示す。供試体は桁長13,640mm、支間13,140mm、桁高500mmの中空桁で、JIS A 5313 AS14規格に準拠しており、自己充填性のレベルはランク1である。コンクリートの混練数量は5.6m<sup>3</sup>であり、1バッチあたり0.7m<sup>3</sup>を8バッチに分けて練り混ぜた。各バッチのコンクリートは高性能AE減水剤の添加率を±1.0%程度増減することによって流動性を変化させた。流動性の調整は全バッチをアジテータ車に投入して高速攪拌して平均化する方法とした。打設はシュートによる無振動打設とし、ホロー枠

表-1 高流動コンクリートの示方配合

W/B(%)	結合材		W	S		G(2005)	SP (ポリカルボン酸系)
	HP	BS		S1(砕砂1)	S2(砕砂2)		
31.8	340	210	175	472	442	800	4.4

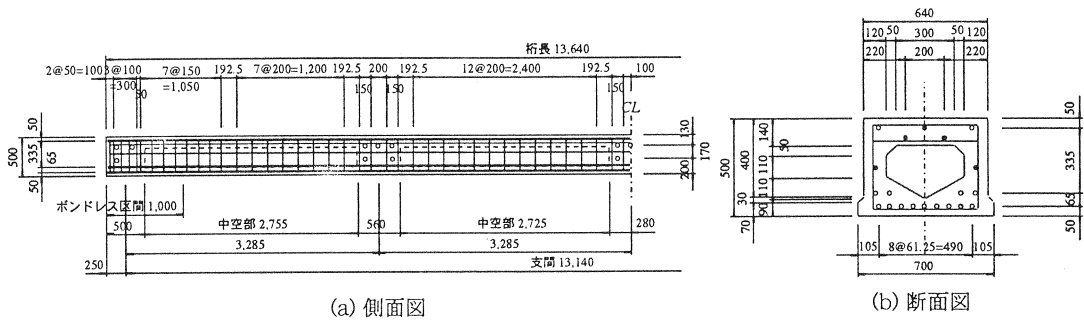


図-1 PC桁供試体の形状寸法

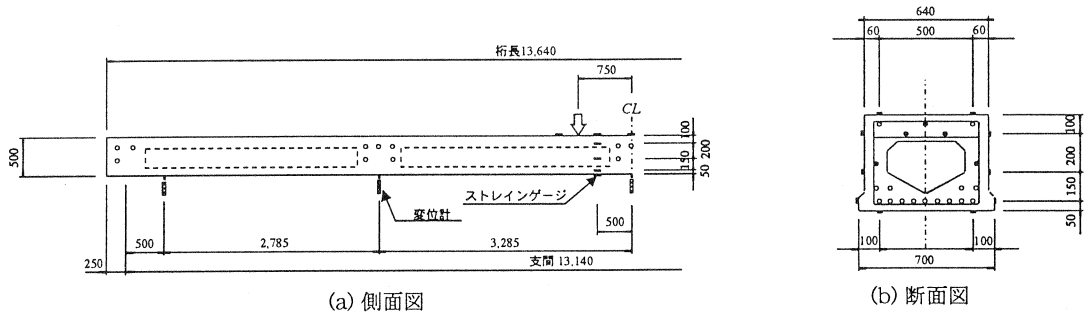


図-2 荷重位置ならびにひずみ・たわみ測定位置

下端、ホロー枠上端、桁天端面の三層に分けて打ち上げた。各層の打設完了後、コンクリート打設に伴う巻き込み空気を除去するため、PC桁の片面について、側枠面付近にスペーシングバイブレータ(100Vの棒状バイブレータの振動部が板状になったもの)を施工した。

フレッシュコンクリートはスランプフロー、Vロート流下時間、空気量、U型充填装置による間げき通過性(障害R1)、桁内部温度を測定した。供試体の養生は打設後1日でプレストレスを導入するため蒸気養生を行った。蒸気養生時の最高温度は水和熱による問題の有無を把握するため、社内規格における冬期の最高温度60℃より10℃高めの70℃に設定した。蒸気養生時の温度変化は、前置時間4時間、前置き後4時間で最高温度70℃まで昇温したのち、最高温度を6時間維持して、4時間で徐冷するものとした。

桁側面の表面気泡測定はスペーシングバイブレータを施工した面、施工しなかった面、各々について代表的な箇所を選び、19×48cmサイズの1cmメッシュの交点(940点)に重なった気泡の数を測定した。測定時期は脱枠直後および表面切削後(コンクリート表面を深さ1~2mm程度サンダーケレン)の二通りとした。

硬化コンクリートの試験はφ100×200mmの円柱供試体を用い、蒸気養生後現場に空中放置した場合の材令1日、7日、14日、28日、標準養生時の材令28日の圧縮強度と弾性係数、ならびに材令14日、材令28日の引張強度を求めた。

### 2.3 静的荷重試験

材令1日の圧縮強度を確認したのち、プレストレス導入実験を実施した。プレストレスの伝達長は桁底から二段目のPC鋼材の上に埋込んだD6鉄筋に貼付したストレインゲージのひずみから求めた。荷重試験方法を図-2に示す。荷重試験は材令14日目に実施した。荷重はJIS A 5313に示される方法に準じて、支間中央から750mmの位置に油圧ジャッキを用いて、変位制御により静的二点荷重した。荷重はひびわれ抵抗モーメント相当荷重、実ひびわれ発生荷重、30tf(ジャッキストローク限度)、破壊荷重の4サイクルで実施した。測定項目はたわみ、支間中央付近の断面ひずみ、桁上縁のひずみとした。

3. 実験結果とその考察

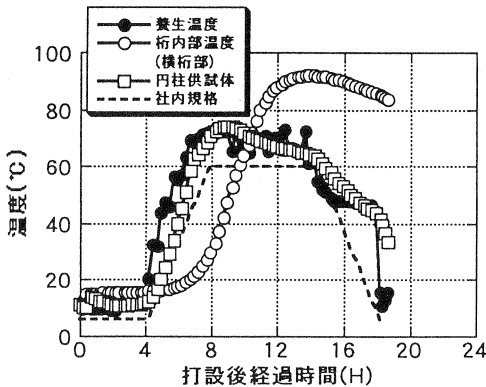
3. 1 流動性の評価

フレッシュコンクリートの試験結果を表-2に示す。表中、規格値とは高流動コンクリート施工指針に示される粉体系高流動コンクリートの評価試験値(ランク1)である。1~8バッチ目の各々の試験結果を見るとスランブフローは53.5cm~69.8cm、Vロート流下時間は17.8~22.3secの範囲のばらつきがあり、各バッチの試験結果は指針に示される評価試験値を満足していない。しかし、表中に打設時として示したアジテータ車内高速攪拌後の試験結果では、50cmフロー時間5.3sec、スランブフロー60cm、Vロート流下時間19.6sec、間げき通過性試験結果(A・B室の高低差)50mmとなり、いずれも評価試験値を満足した。これは流動性が異なる各バッチのコンクリートが、アジテータ車で高速攪拌することによりある程度均質化したことを示すものと考えられる。なお、現在、高流動コンクリートの試験生産を行っているが、再骨材表面水の連続測定結果とミキサーのアンメータの読みにより二次水を補正することによって、スランブフローは60~65cmの範囲で安定することが確認されている。

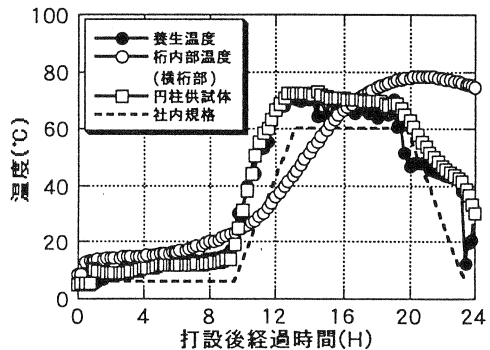
また、脱型後・載荷試験後の供試体を調査した結果、コンクリートの未充填箇所は認められず、さらに供試体の上縁・下縁の骨材分布を比較してもコンクリートの分離は見られなかったことから、本実験で使用したコンクリートは良好な自己充填性を有していたと考えられる。

表-2 フレッシュコンクリートの試験結果

バッチ	コンクリート温度(℃)	50cmフロー時間(秒)	フロー停止時間(秒)	スランブフロー(cm)	Vロート流下時間(秒)	空気量(%)	間げき通過性(A・B室の高低差, cm)
1	14.0	4.8	21.1	53.0 × 54.0 ( 53.5 )	19.7	-	-
2	14.0	5.1	17.7	58.0 × 58.0 ( 58.0 )	19.8	-	-
3	14.0	4.7	19.7	62.0 × 62.0 ( 62.0 )	16.8	-	-
4	14.0	5.6	23.4	65.0 × 65.0 ( 65.0 )	22.3	-	-
5	14.5	3.6	26.0	68.5 × 68.0 ( 68.3 )	21.1	-	-
6	14.0	4.4	28.0	69.5 × 70.0 ( 69.8 )	21.7	-	-
7	14.0	4.4	22.7	65.0 × 62.0 ( 63.5 )	19.9	-	-
8	14.0	3.2	19.9	67.0 × 65.0 ( 66.0 )	17.8	-	-
平均値	14.1	4.5	22.3	( 63.3 )	19.9	-	-
打設時	14.0	5.3	18.7	61.0 × 59.0 ( 60.0 )	19.6	0.8	50
規格値	-	5~20	-	60~70	9~20	-	80以下



(a) 高流動コンクリート使用



(b) 従来型コンクリート使用

図-3 蒸気養生時の桁内部温度変化

### 3.2 コンクリートの温度変化

本実験で使用した高流動コンクリートは粉体系であり、従来使用していたコンクリートに比べて結合材量が多いため水和熱量が大きくなる。そこで、同一ライン内で従来のコンクリートを用いた同一寸法のPC桁を打設して、コンクリート内部温度の変化を比較した。図-3に蒸気養生時の温度変化を示す。いずれも円柱供試体の温度は養生温度70℃とほぼ等しくなっているが、桁の内部温度の最高値は高流動コンクリートで約90℃、従来のコンクリートでも約80℃に達した。

従来のコンクリートは高流動コンクリートより5時間程度前に打設したため、図-3から水和熱発現特性を直接比較することは難しいが、過去の水和熱測定結果から高炉スラグ置換は総水和熱量の低減には効果が無いことものの、単位時間あたりの水和熱量を抑制することが確かめられている<sup>4)</sup>。養生温度に対する高流動コンクリートの温度の増分は20℃程度であるから、実際の製造においては桁の内部温度をモニターしながら蒸気養生温度を調整することで温度コントロールが可能と考えられる。

### 3.3 硬化コンクリートの試験結果

表-3に硬化コンクリートの試験結果を示す。標準養生での材令28日の圧縮強度は74.3N/mm<sup>2</sup>、蒸気養生後現場養生した場合の材令1日、材令28日の圧縮強度は各々50、65.1N/mm<sup>2</sup>であり、いずれも規格値35、50N/mm<sup>2</sup>を満足した。蒸気養生後現場放置を行った場合は標準養生の場合に比べて圧縮強度が15%程度、弾性係数が20%程度低下したが、これは蒸気養生後の水分の供給が不十分であったためと考えられる。

表-3 硬化コンクリートの試験結果

材令D(日)	養生方法	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )				引張強度(N/mm <sup>2</sup> )			弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )		
		①実測値	②規格値	比①/②	$\sigma_c/\sigma_{c0}$	①実測値	②規格値	比①/②	①実測値	②規格値	比①/②
1	蒸気養生	50.0	35	1.43	0.77	-	2.46	-	27,679	29,500	0.94
7	蒸気+現場	56.8	-	-	0.87	-	-	-	-	-	-
14	蒸気+現場	61.6	50	1.23	0.95	3.8	3.12	1.22	30,674	33,000	0.93
28	蒸気+現場	65.1	50	1.30	1.00	-	3.12	-	31,085	33,000	0.94
	標準養生	74.3	50	1.49	1.14	5.7	3.12	1.83	39,868	33,000	1.21

### 3.4 表面気泡の発生状況

表-4に表面気泡数測定結果を示す。スペーシングバイブレータにより脱泡した面は脱型直後・表面切削後共に気泡数が少なく、気泡径も5mm程度以下であり、美観上も良好であった。スペーシングバイブレータによる脱泡作業を

表-4 表面気泡測定結果

		スペーシングバイブレータ施工面	スペーシングバイブレータ非施工面	
			清掃等が適切な箇所	清掃等が不適切な箇所
脱枠直後	個数	5	27	3
	割合	0.53%	2.87%	0.32%
表面切削後	個数	10	30	21
	割合	1.06%	3.19%	2.23%

実施しなかった面の脱枠直後の表面気泡分布にはムラがあり、主として型枠の清掃が不十分な箇所や剥離剤の塗布量が適切で無い部分に多く気泡が発生していた。しかし、表面切削後の表面気泡分布状態にはあまり差が無く、気泡径も10~20mm程度と比較的大きなものであった。

静的載荷試験実施後の解体調査において、スペーシングバイブレータ施工面付近を調べたが、粗骨材の沈降やモルタルの浮上りなどの明らかな材料分離は見られなかったことから、耐久性と美観の向上のためにはスペーシングバイブレータによる脱泡作業を実施するのが好ましいと考えられる。

### 3.5 プレストレス導入時のひずみ

図-4に桁端部付近におけるプレストレス導入時のひずみ分布を示す。図中の計算値は製造便覧に示され

る伝達長65φ(65×15.2=988mm)間のひずみが放物線状に分布すると仮定して求めたものである<sup>9)</sup>。ひずみは桁端部から50cm付近で一旦450μ前後に落ち着いたのち、100cm付近から150cm付近にかけて550μ程度まで増加し、以後、ひずみは550μ程度で一定となった。このことから本供試体に使用した高流動コンクリートの定着長は65φより短く、また、桁端部付近にひびわれなどの異常も見られなかったことから、定着性能に関して特に問題は無かったものと考えられる。

3.6 静的載荷試験結果

表-5に桁の抵抗モーメントおよび荷重の規格値と実験値の比較を示す。ひびわれ発生時の荷重は161.8kNであり、ひびわれ試験曲げモーメント相当荷重126.7kNの1.28倍であった。再ひびわれ発生荷重は137.3kNであり、ひびわれ試験曲げモーメント相当荷重の1.08倍であったことから、ほぼ所定のプレストレスが導入されたことがわかる。また、破壊荷重は378.5kNであり、抵抗曲げモーメント相当荷重333.3kNの1.14倍となったことから、PC桁は所定の耐荷性能を満足することが確認された。

図-5に荷重と支間中央部たわみの関係を示す。

荷重と支間中央部たわみの関係は0kN~200kN付近まで線形で増加し、ほぼ弾性計算値に一致した。200kN付近から荷重に対するたわみの増分が急激に増加しているが、ひびわれ荷重が161.8kNであったことからたわみ変化は妥当なものと考えられる。図-6に載荷試験後のひびわれ状況を示す。ひびわれ間隔は20cm程度でありひびわれ分散性は良好であった。破壊面は曲げせん断の形態を示しているが、内部の破壊面はホロー

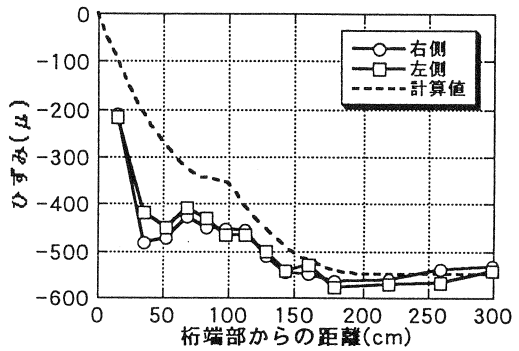


図-4 プレストレス導入時のひずみ分布 (P C鋼材図心位置)

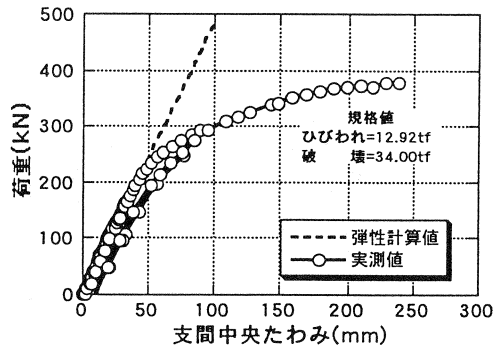


図-5 荷重と支間中央部たわみの関係

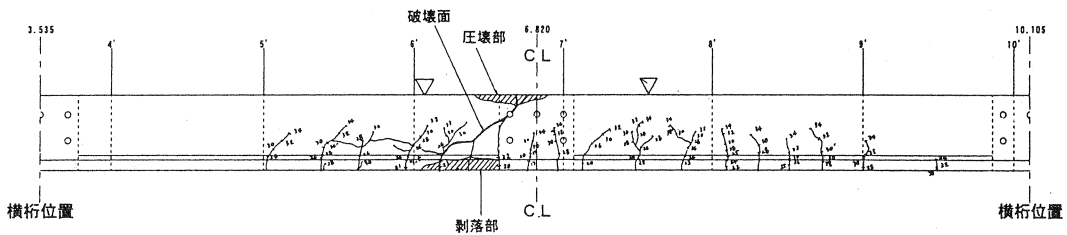


図-6 載荷試験後のひびわれ状況

表-5 桁の抵抗モーメントおよび荷重の規格値と実験値の比較

	①規格値		②実験値		比 ②/①
	モーメントkN・m	荷重kN	モーメントkN・m	荷重kN	
ひび割れ試験曲げモーメント	519	126.7	621.2	161.8	1.28
再ひびわれ発生モーメント	(519)	(126.7)	549.8	137.3	1.08
破壊抵抗曲げモーメント	1,120	333.3	1,251.8	378.5	1.14

枠に沿うものであり、断面の急変に伴う応力集中が影響したものと考えられる。

図-7に円柱供試体の圧縮応力とひずみの関係を示す。円柱供試体における終局ひずみは $2,400\mu \sim 2,800\mu$ であり、コンクリート標準示方書に示される $f_{ck}=60\text{N/mm}^2$ 以上の終局ひずみ $2,500\mu$ とほぼ等しくなった。図-8にPC桁の載荷荷重と支間中央部上縁ひずみの関係を示す。荷重とひずみの関係はたわみの挙動に近似しており、ひずみは $200\text{kN}$ まで約 $700\mu$ まで線形に増加したのち、荷重に対するひずみの増分が急増し約 $3,000\mu$ で破壊した。破壊時の圧縮ひずみは図-7で示した終局ひずみ $2,500\mu$ より大きく、一般に円柱供試体の終局ひずみが桁の場合より小さめに出ることを考慮しても、桁は終局ひずみまで耐荷力を保持していたものと考えられる。このことから桁の破壊はせん断が先行したのではなく、圧縮縁が圧壊したのちに破壊したものと考えられる。

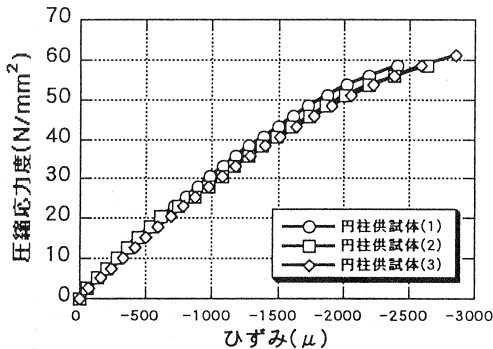


図-7 円柱供試体の圧縮応力とひずみの関係

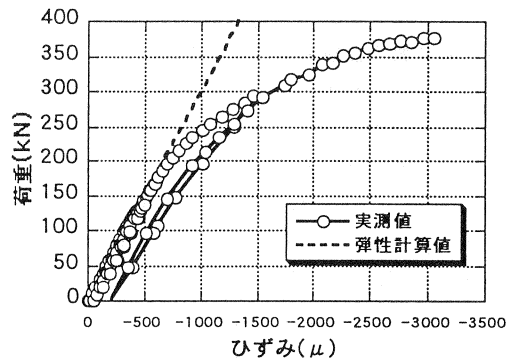


図-8 PC桁の載荷荷重と桁上縁ひずみの関係

#### 4. まとめ

本実験の結果をまとめると以下の通りである。

- ①高流動コンクリートによるJIS A 5313 PC橋げたの無振動打設が可能である。
- ②各パッチの流動性のばらつきはアジータ車内でコンクリートを高速攪拌することにより平均化でき、打設時の流動性能は高流動コンクリート施工指針に示される粉体系高流動コンクリートの評価試験値を満足した。
- ③コンクリートの強度特性および高流動コンクリートにより製造されたPC桁の耐荷性能はいずれもJIS A 5313の規定を満足した。

今後、プレストレストコンクリート橋が他の材料を用いた橋梁に対する市場競争力を維持してゆくためには、品質と耐久性の向上、コスト低減を両立させることが不可欠であり、高流動コンクリートは有力な手段の一つと考えられる。今後、さらに蒸気養生管理方法と品質安定方法、製造省力化の研究を進め品質・耐久性・価格共に優れたPC桁を供給してゆく予定である。

#### [参考文献]

- 1) 土木学会：高流動コンクリート施工指針 コンクリートライブラリ93、1998.7
- 2) 日本工業規格：道路橋用プレストレストコンクリート橋げた A 5313 - 1995
- 3) たとえば、添田政司、江本幸雄、徳光卓：各種粉体を用いた早強型高流動コンクリートの諸特性について、セメントコンクリート論文集 No.51、1997.5
- 4) 左東有次、添田政司、大和竹史、徳光卓：早強性高流動コンクリートの発熱特性、PC技術協会、第6回シンポジウム論文集、1996.10
- 5) プレストレスト・コンクリート建設業協会：JIS橋げたによるPC道路橋設計・製造便覧 JIS A 5313 - 1995、1995.4