

論文 しらすを使用したプレテンション橋桁の実用化に関する研究

奥地栄祐*1・武若耕司*2・山口明伸*3・馬庭秀士*4

要旨: 現在, コンクリート用細骨材の代替骨材としてのしらすの利用が期待されている。これまでに, このコンクリートの実験室レベルにおける強度, 施工性等については, すでにその有効性は確認されているものの, 実構造物規模での検討はこれまでに例がない。そこで, 本研究では実規模のしらすコンクリート製 PC 桁を製造し, その施工性を検討するとともに, プレストレス導入試験, 曲げ試験を実施して, 製品の性能を従来品と比較し, しらすコンクリートの適用性を確認した。

キーワード: しらす, PC, 低品質骨材

1. はじめに

川砂や陸砂の枯渇化に伴い, 特に九州ではコンクリート構造物に用いる骨材は海砂の使用が一般的になった。しかし, 海洋環境保護の観点から海砂の確保も年々困難になりつつあり, 海砂の盗掘が起こるなど, 骨材不足の問題が深刻化してきている。著者らは骨材不足の解消と未利用資源の有効活用の立場から, 南九州に広く多量に存在しているしらすのコンクリート用細骨材あるいは混和材としての適用性についての検討を進めている。

しらすは低品質細骨材に分類される性質を有するものであるが, これまでに実験室レベルにおいて, しらすを用いたコンクリート(以下しらすコンクリート)でも材齢3日で50MPa以上のコンクリートが製造可能であり, PC 構造物に適用できる可能性を確認している^{1), 2)}。

しかし, 実構造物への適用に関しては, 川床ブロックや護岸よう壁等の無筋コンクリートに試験的に使用されたものはあるものの, RC あるいは PC 部材への適用例は皆無である。

そこで, 本研究では実規模のプレキャスト PC 桁をしらすコンクリートを用いて製造し,

工場製品に対するしらすコンクリートの施工性を確認するとともに, プレストレス導入試験, 曲げ試験を実施し, 従来製品と比較することによって, 部材性能を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体の概要

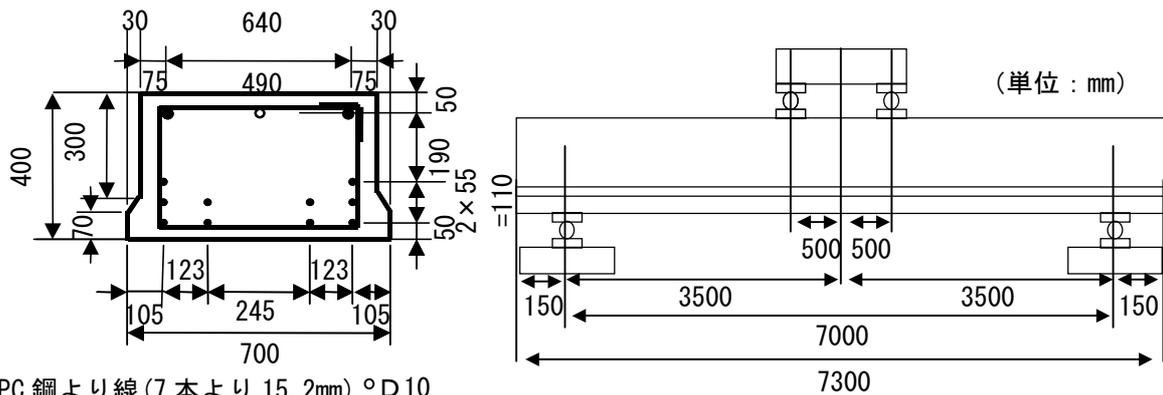
今回の実験では, しらすあるいは砕砂を細骨材とした普通コンクリートおよび高流動コンクリートを用いて PC 桁を作製した。

コンクリートの使用材料は, セメントに早強ポルトランドセメント, 細骨材に垂水産しらす(主な物性を表-1に示す), あるいは吹上産砕砂, 粗骨材に吹上産碎石を使用した。混和剤はしらすを使用した普通あるいは高流動コンクリートに低空気連行型ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を, 砕砂を使用した高流動コンクリートにはポリカルボン酸系高性能減水剤を, 砕砂を使用した普通コンクリートにはナフタリン系高性能減水剤を使用した。なおしらすを細骨

表-1 しらすの物性

	表乾密度	吸水率	F.M.	洗い試験
しらす	2220kg/m ³	4.64%	1.35	26%

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科物質生産工学専攻 工修 (正会員)
 *2 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科 工博 (正会員)
 *3 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科 工博 (正会員)
 *4 日研高圧コンクリート(株) 工博



•PC 鋼より線 (7 本より 15.2mm) °D 10

•PC 鋼より線 (7 本より 12.7mm)

図-1 試験桁形状

表-2 コンクリート配合

試験桁 No.	W/C	単位量 (kg/m ³)							混和剤 粉体比	空気量	スランプ (フロー)	充てん 高さ
		水	セメント	混和材	しらす	3~5 砕砂	砕砂	粗骨材				
1	42%	190	475	-	362	103	-	1149	1.3%	1.1%	6cm	-
2, 3	40%	198	467	-	508	265	-	795	4.0%	1.8%	(604mm)	299mm
4	36%	175	486	64	-	-	805	844	1.75%	1.0%	(638mm)	305mm
5	36%	165	458	-	-	-	734	1028	1.0%	2.9%	6cm	-

材として使用したコンクリートについては、粒径が 3~5mm の粒子の不足を補うため 3~5mm 砕砂を併せて使用した。また砕砂を使用した高流動コンクリートには、混和材として炭酸カルシウム微粉末を混入した。

試験桁は図-1 に示すように JIS 桁の AS07 (スパン 7000mm, 桁高 400mm) に準拠したプレキャスト PC 桁であるが、断面上部 2 本の PC 鋼より線については材料手配の都合上、本来の鋼材 (SWPR7BN 7 本より φ12.7mm) より径の大きい鋼材 (SWPR7BN 7 本より φ15.2mm) を用いて作製した。

コンクリートの配合を表-1 に示す。今回の実験で作製した試験桁は、細骨材にしらすを使用した普通コンクリートで通常の振動締固めを行うもの (No. 1)、細骨材にしらすを使用し高流動化させたコンクリートで若干の締固め (型枠バイブレータのみを使用) を行うもの (No. 2)、細骨材にしらすを使用し高流動化させたコンクリートで締固め作業をまったく行わないもの (No. 3)、細骨材に砕砂を使用し高流動化させたコンクリートで若干の締固め (型枠バイブレータのみを使用) を行うもの (No. 4)、および比較用として通常 JIS 桁の製作に使用されている普通コンクリートで通常の締固めを行うもの

(No.5) の 5 種類である。なお、表-1 中の高性能 AE 減水剤および高性能減水剤の添加量は、セメント量に炭酸カルシウム微粉末あるいはしらすの中の粒径 0.074mm 以下の微粒分量を加えたものを粉体量 (P) とみなし、この量に対して決定した。試験桁は、コンクリート打設の約 3 時間後から蒸気養生 (15°C/h で昇温し 50°C で 5 時間保持後徐冷) を行い、その後は気中養生とした。

これらのコンクリートの材齢 91 日までの圧縮強度および静弾性係数を図-2 に示す。これより、しらすコンクリートでも材齢 3 日で、JIS で規定されているプレストレス導入時における圧縮強度 34.3N/mm² を十分に満足するだけでなく、出荷時における圧縮強度 49.1N/mm² を満足していることを確認した。なお、プレストレス導入方法はプレテンション方式とし、プレストレス導入はいずれの桁においても材齢 3 日で実施した。その時、断面の下縁から 50mm の高さ、端部から 100, 300, 450, 700, 900, 1450, 2000, 2550, 3100, 3650mm の位置のコンクリート表面にコンクリートゲージを貼り付け、伝達長の測定を行った。

2.2 実験の概要

脱型後は、まず試験桁の外観状態を確認する

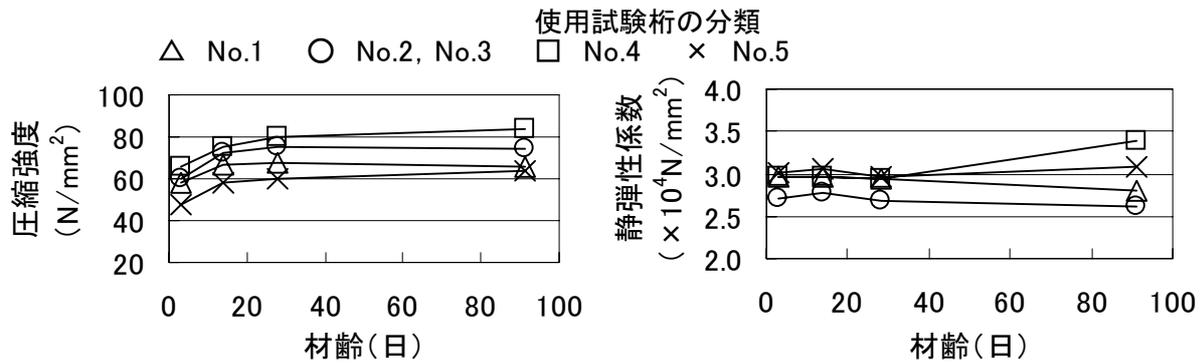


図-2 圧縮強度および静弾性係数

ことを目的に表面気泡の総面積の測定を行った。この測定にあたっては、試験桁側面の端部から中央部までを表面気泡が明瞭となるように油性の黒インクを塗布し、乾燥後表面気泡部に炭酸カルシウム微粉末を充てんした。その後評価対象面をデジタルカメラで撮影し、表面気泡面積を画像解析で数値化した³⁾。

今回の荷重試験は、試験桁 No.1, 2, および 5 について材齢 28 日目に実施した。No.3 および No.4 は有効プレストレス力の減少量の長期測定を行うため、今回は荷重試験を行っていない。荷重は図-1 に示すように、2 点荷重（荷重点間 1000mm）により行い、荷重にあたってはまずひび割れ発生荷重までを 3 回、その後 160kN までを 3 回、240kN までを 3 回繰返し荷重した後、破壊荷重まで荷重した。

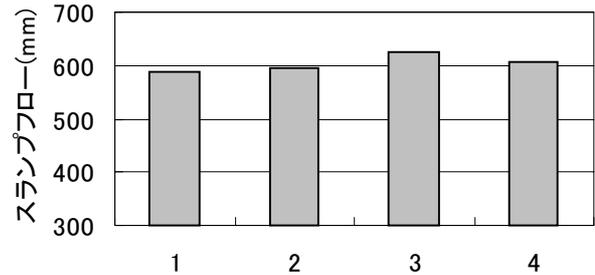


図-3 高流動しらすコンクリートの各バッチのスランプフローのバッチ間のばらつき

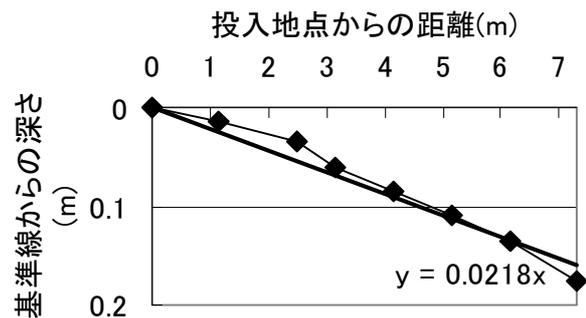


図-4 高流動しらすコンクリートの流動勾配

3. しらすコンクリートの施工性の確認

3.1 フレッシュ性状—特に高流動コンクリートについて—

図-3 に高流動しらすコンクリートのバッチごとのスランプフローを示す。今回の実験では、No.2 桁および No.3 桁を作製するために 4 バッチの高流動コンクリートを製造した。しらすは通常の細骨材に比べ、含水率が 15%~20%と極めて大きいため、表面水率の変動によるコンクリートの流動性のばらつきが砕砂などの通常の細骨材に比べて大きくなるのが懸念された。しかし、この図からも明らかなように、今回の実験ではバッチごとのスランプフローのばらつきは問題となるほどではなかった。このことから、

しらすコンクリートにおいてもしらすの表面水率の補正を適切に行い、通常より練混ぜ時間を長くすることで、バッチごとのばらつきはそれほど大きくないものとするは十分可能であると考えられる。

図-4 に高流動しらすコンクリートの無振動状態での流動勾配を示す。流動距離は 7m 以上あり、その勾配も平均で 2%程度であった。これより、しらすを細骨材として使用した場合でも高い流動性を持つコンクリートが実用レベルにおいても作製可能であることが確認できた。

3.2 表面気泡面積の比較

図-5 に試験桁 No.5（通常使用されるもの）の表面気泡面積を 1 とした場合の各試験桁の表

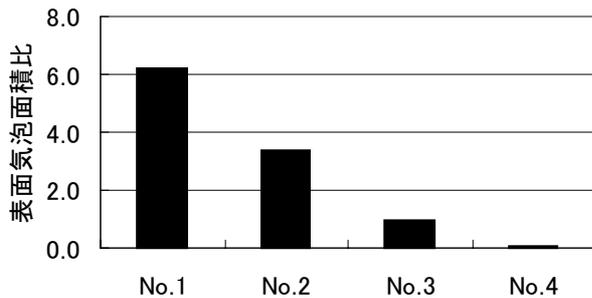


図-5 各試験桁の表面気泡面積の比較

面気泡面積比を示す。これより、しらすコンクリートは、細骨材に砕砂を使用したコンクリートに比べ、普通、高流動のいずれを問わず表面気泡が多くなる傾向が確認された。これは、しらすの中でも多くの微粒分を含むため、モルタルの粘性が増加して気泡がぬけきらず、表面気泡が増えたものと考えられる。さらに高流動しらすコンクリートについては、型枠バイブレータによる締固めを行ったものより、締固めを行わないもののほうがかえって表面気泡が少ない結果となった。これは型枠バイブレータによる締固めを行うことで、気泡が表面に集まってしまうことが原因ではないかと考えられる。いずれにしてもしらすコンクリートを使用する際には、表面気泡について多少の配慮が必要となるものと思われる。

4. しらすコンクリートを使用したPC桁の性状

4.1 伝達長

図-6 にプレストレス導入直後における桁端部から中央部までのコンクリート表面ひずみ分布を示す。これより、しらすコンクリートは砕砂を使用したコンクリートに比べるとひずみが一定となる距離が幾分長く、伝達長が長くなることが確認できる。

4.2 導入プレストレス力の経時変化

図-7 に試験桁の有効プレストレス力の経時変化を示す。プレストレス導入後23日目における有効プレストレス力は、No.1試験桁が1217kN、No.2、No.3試験桁が1202kN、No.4試験桁が1244kN、No.5試験桁が1227kNとなり、しらすコンクリートでは砕砂を使用した場合と比較して、有

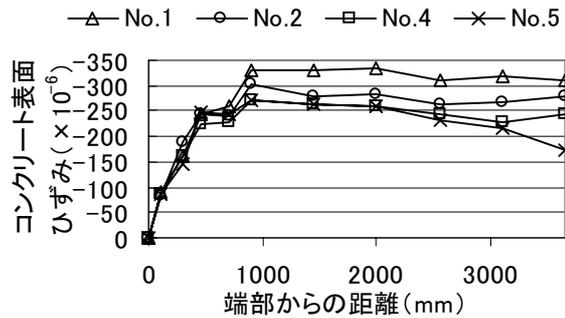


図-6 各配合におけるプレストレス伝達長

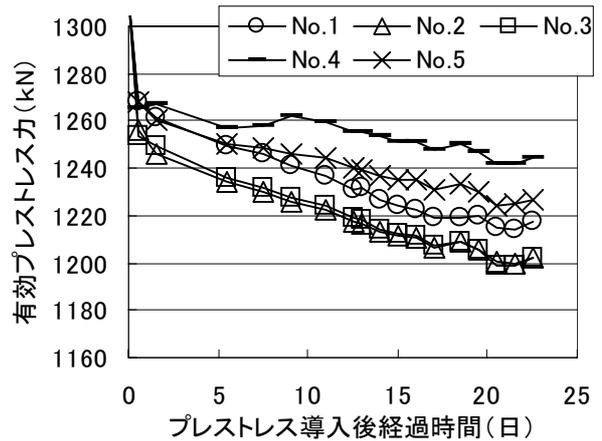


図-7 有効プレストレス力の経時変化

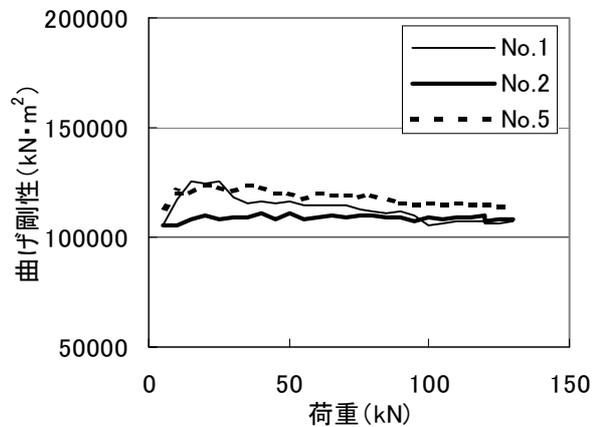


図-8 ひび割れ発生前までの曲げ剛性

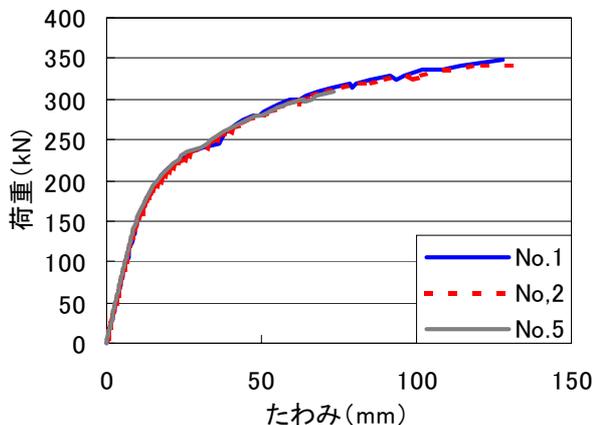


図-9 荷重とたわみの関係

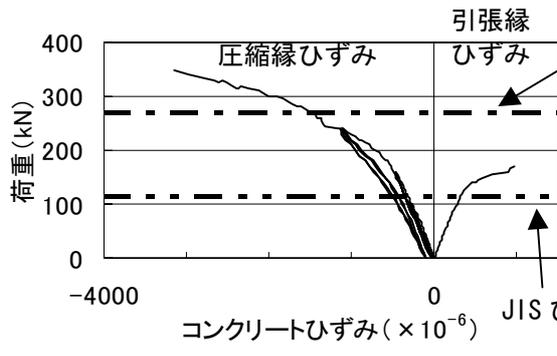


図-10 No.1 試験桁の荷重とひずみの関係

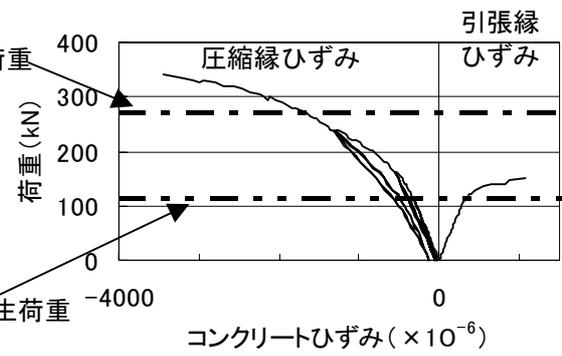


図-11 No.2 試験桁の荷重とひずみの関係

表-3 載荷試験結果概要

No.	ひび割れ発生荷重			終局荷重		
	理論値	推定	実/理	理論値	実測	実/理
1	116	132	1.14	298	347	1.17
2	118	130	1.10	303	354	1.17
5	113	135	1.19	291	328	1.12

表-4 ひび割れ本数および間隔

No.	ひび割れ本数(本)		ひび割れ間隔(mm)	
	支点間	載荷点間	支点間	載荷点間
1	21	8	143	103
2	15	5	201	175
5	27	11	132	63

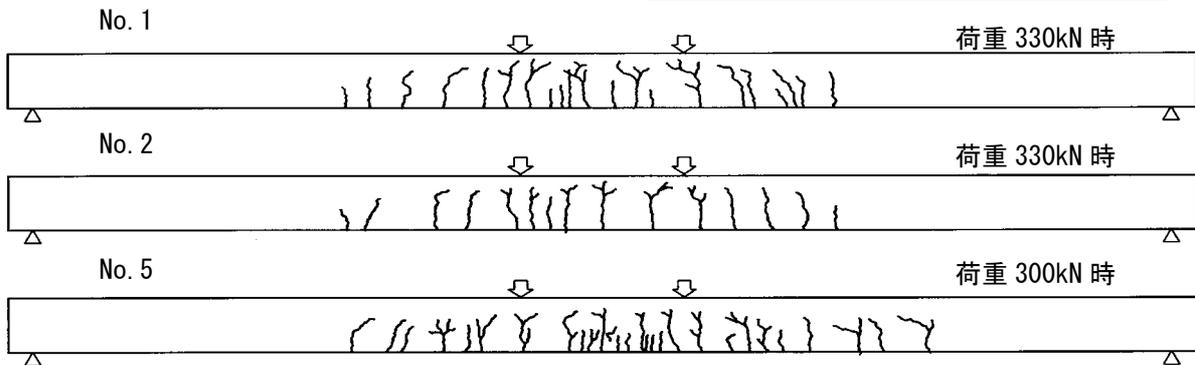


図-12 ひび割れ分布状況

効プレストレス力の減少が若干大きくなる傾向が認められた。

既往の研究によるしらすコンクリートの乾燥収縮やクリープ性状は、単位水量等の諸条件が同一であれば、川砂を使用した場合と同程度であることが確認されている⁴⁾。このことから、今回の実験でしらすコンクリートの有効プレストレス力の減少が若干大きくなったのは、単位水量が砕砂を使用した場合に比べ、大きくなっていることが原因と考えられ、しらすを使用したことが直接的に影響したものではないと思われる。

4.3 曲げ特性

図-8 に PC 桁にひび割れが発生するまでの、いわゆる桁の使用状態における曲げ剛性を示す。図-2 に示されているように No.2 桁用のコンクリートの弾性係数は他のものに比べて 1 割ほど

小さいものの、ひび割れ発生前の桁の曲げ変形挙動という観点からは、いずれの桁においても大きな差は認められなかった。

図-9 に各試験桁の荷重とたわみの関係を示す。これより、300kN 程度の荷重までは、使用したコンクリートの種類によるたわみの差異はまったく認められなかった。ただし、破壊直前のたわみに関しては、No.1 桁が 114mm、No.2 桁が 134mm、No.5 桁が 73.3mm となり、砕砂を使用した場合と比較して、普通および高流動しらすコンクリートを使用した試験桁の終局的な変形量が大きくなっていた。このことから、終局状態の桁の挙動には、図-2 に示されているように、砕砂を使用したコンクリートに比べると、しらすコンクリートの強度は大きく、逆に弾性係数は小さいというコンクリートの特徴が明確に表れたものと思われる。

図-10, 11にはそれぞれ, No.1 桁および No.2 桁の荷重とコンクリートひずみの関係を示す。また, 表-3 には, コンクリート下縁のひずみより推定した各桁のひび割れ発生荷重を理論計算値と併せて示す。この結果, いずれの試験桁においても JIS で規定されているひび割れ発生モーメントから計算されたひび割れ発生荷重 113kN は十分に満足していた。また, 同表には破壊荷重の実測値についても終局荷重の計算値と共に示している。破壊は, いずれの試験桁とも曲げ破壊を起こし, その破壊荷重も JIS に参考値として記載されている終局モーメントから計算された値である 271kN を満足し, また実測値と計算値の比も 1.1 以上であることから, 少なくともしらすコンクリートの使用が桁の力学的挙動へ及ぼす影響はほとんどないと考えてよいものと思われた。

4.4 ひび割れ特性

図-12 に各試験桁の破壊直前のひび割れ発生状況を, また表-4 にスパン全長および等曲げモーメント区間のひび割れ本数とひび割れ間隔の測定結果を示す。しらすコンクリートを使用した試験桁 (No. 1, No. 2) では, 普通コンクリート使用の場合 (No.5) に比べてひび割れ本数が少なく, その間隔が大きくなる結果となった。さらに普通しらすコンクリートを使用した No. 1 桁に比べ, 高流動しらすコンクリートを使用した No. 2 桁の方が, ひび割れ本数が少なく, ひび割れ間隔が大きくなる結果となった。このことからしらすを使用した場合には鋼材とコンクリートの付着性に若干の低下が懸念された。これは伝達長で確認できた付着性の低下が, 破壊直前という極限状態でより明確に表れたものと思われる。

5. まとめ

今回の検討によって, しらすコンクリートを使用したプレキャスト PC 部材の性能に関して以下のことが明らかとなった。

1) 実用レベルにおいても, しらすコンクリー

トのバッチごとのフレッシュコンクリート性状のばらつきは問題のない程度である。

- 2) しらすコンクリートを使用したプレキャスト部材表面の気泡は砕砂を使用した場合に比べると多くなる傾向がある。
- 3) しらすコンクリートの使用が PC 桁の力学的挙動へ及ぼす影響はほとんどないと考えてよい。
- 4) しらすコンクリートの曲げひび割れ性状は, 砕砂と比べると, ひび割れ本数が少なく, ひび割れ間隔が大きくなる傾向があった。このことから, しらすを細骨材として使用した場合, 鋼材とコンクリートの付着性に若干の低下が懸念された。

以上のことから, しらすコンクリートをプレテンション PC 橋桁へ適用することは十分に可能であることが確認できた。

謝辞

本実験を遂行するにあたり, 試験桁の作製や載荷実験等において多大なるご協力を頂いた日研高圧コンクリート(株)の関係者各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 奥地栄祐, 武若耕司, 山口明伸, 竹内一真: しらすを使用した高流動コンクリートの配合設計に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.985-990, 2001
- 2) 吉國美涼, 山口明伸, 馬庭秀士, 松本進: しらすおよび人口軽量粗骨材を用いた高流動コンクリートの配合検討, 土木学会第 56 回年次学術講演会, V-163, pp.326-327, 2001
- 3) 一宮一夫, 出光隆, 山崎竹博, 渡辺明: 前養生を省略した蒸気養生下における高流動コンクリートの表面気泡の変化, 土木学会第 56 回年次学術講演会, V-149, pp.298-299, 2001
- 4) 武若耕司, 松本進, 川俣孝治: しらすのコンクリート用骨材への有効利用に関する研究, 土木構造・材料論文集, 第 4 号, pp.103-116, 1989.1