

## 論文 高性能軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する研究

竹市 八重子\*1・大庭 光尚\*2

**要旨**：長大 PC 橋梁に、吸水率の小さい高性能軽量粗骨材を用いたコンクリートを採用し、その軽量コンクリートを軽量粗骨材のプレウェッティングをせずにポンプ圧送施工を行った。本研究では、軽量コンクリートを長距離配管で圧送した場合の圧送前後におけるフレッシュコンクリートの性状および水平管、鉛直管、ベント管の各箇所における圧力損失等のポンプ圧送性状を把握することを目的に、実施工時に圧力計測等を行った。その結果、圧送後でも軽量粗骨材の吸水率は 1.2%以下と小さいため、スランプフローのロスはほとんどなく、実吐出量 20~35m<sup>3</sup>/h で水平換算長 170m 程度の長距離圧送が可能であることがわかった。

**キーワード**：高性能軽量コンクリート、高性能軽量粗骨材、ポンプ圧送性、長距離圧送

## 1. はじめに

長大スパン橋梁などのコンクリート構造物は、軽量コンクリートを適用することにより、上部工の自重の低減や地震の影響の軽減化、軟弱地盤における基礎工の縮小化、建設重機の省力化等を図ることができ、施工条件によってはコストダウンが図れる場合がある。また高強度な軽量コンクリートは、部材断面をスリムに設計することができ、景観や空間の有効利用といった面からも優れている。

従来の人工軽量骨材は、吸水率が大きく、ポンプ圧送により施工する場合は圧送時の圧力吸水によるポンプの閉塞が問題となり、プレウェッティングを欠かすことはできなかった。そのため寒冷地で施工する場合には、凍結融解抵抗性に劣り、実構造物への適用は限られたものであった。今回使用した高性能軽量粗骨材は、流紋岩系真珠岩を造粒・焼成したもので、吸水率が従来の軽量骨材と比較して大変小さい<sup>1)</sup>。そこで、プレウェッティングを行わずにポンプ圧送が可能となり、それに伴い凍結融解抵抗性が向上し、各種大型構造物への適用が期待されている。

筆者らは、橋長 256m (中央径間 120m) の 3 径間連続 PC ラーメン箱桁橋の上部工に、軽量コンクリートを適用するにあたり、施工性、構造性能などの検討を行ってきた<sup>2), 3)</sup>。この高性能軽量コンクリートのポンプ圧送性状については、これまで室内試験や水平配管を主体とした施工試験により検討が行われてきた<sup>2), 4)</sup>。

本研究では、長大 PC 橋梁の実施工時に行ったフレッシュ性状試験や圧力計測等に基づき、軽量コンクリートを長距離配管で圧送した場合の圧送前後の品質変化および水平管、鉛直管、ベント管の各箇所における圧力損失等のポンプ圧送性状について検討を行った。

## 2. 構造物概要

橋梁側面図および主桁断面図を図-1 に示す。上部工は、2 室箱桁構造で、大型 3 主構型 (175t・m×3 主構) の移動台車 (トラベラー) を使用した張出し施工である。1 ブロック当たりの長さは 3.0~5.0m、コンクリート数量は 70~80m<sup>3</sup> (総打設数量約 3,100m<sup>3</sup>) であり、P2 および P3 橋脚の柱頭部からそれぞれ 12 ブロック分割施工を行った (図-1 参照)。

\*1 東日本旅客鉄道 (株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 工修 (正会員)

\*2 東日本旅客鉄道 (株) 東北工事事務所 東北・南課 副課長 (正会員)

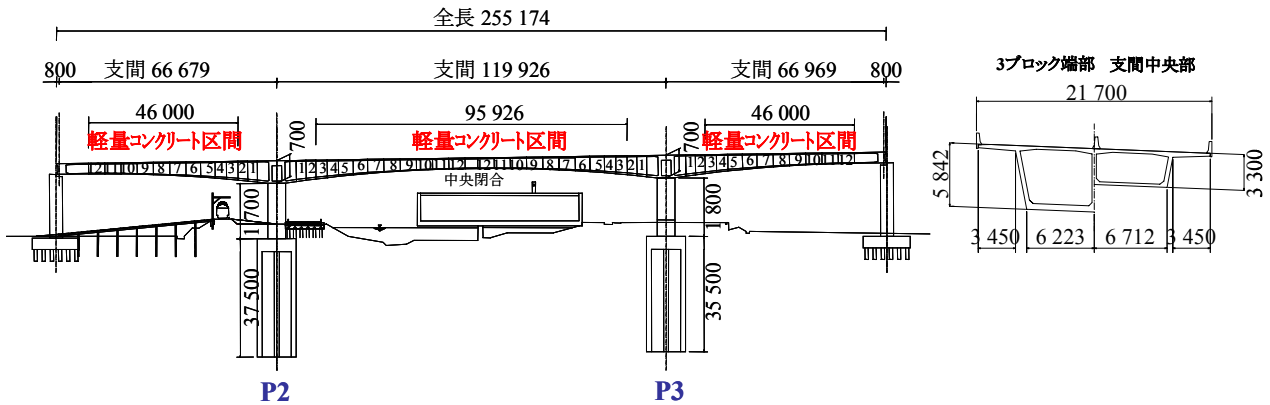


図-1 橋梁側面図および主桁断面図

### 3. 軽量コンクリート

#### 3.1 コンクリートの仕様

コンクリートの仕様、使用材料および配合を表-1、表-2、表-3に示す。

コンクリートの主な仕様は、設計基準強度  $40\text{N/mm}^2$ 、弾性係数  $21\text{kN/mm}^2$ 、単位容積質量  $1.81\text{ton/m}^3$  で、ポンプ圧送性を考えスランプフロー仕様とし、その管理値は  $550 \pm 50\text{ mm}$  とした。また空気量は、寒冷地の構造物であることから凍結融解抵抗性を考慮し、 $6.5 \pm 1.5\%$  とした。

使用した粗骨材は、真珠岩を主原料とした独立空隙型の骨材である。細骨材は、スランプフローのばらつきを抑制するなどの理由から二度洗いした砕砂を使用し、細骨材の表面水率を安定させることにした。

配合は、試し練りを行い、スランプフロー  $550\text{mm}$  程度を付与した場合でも、施工時のバイブレータの使用により軽量粗骨材が浮き上がり材料分離が生じないように、単位粉体量を  $527\text{kg/m}^3$  と決定した。

#### 3.2 凍結融解抵抗性

3.1に示した配合や空気量の基準値を決定するにあたり、凍結融解試験を ASTM C 666 (A法) により実施した。その評価基準は、土木学会「コンクリート標準示方書 [施工編] - 耐久性照査型 -」<sup>5)</sup>により、本橋梁の施工時および供用時の環境を考え、相対動弾性係数が 300 サイクル時において 60%以上とした。

試験結果を図-2に示す。300 サイクル終了時の相対動弾性係数は 95%程度であり、基準値

表-1 コンクリートの仕様

	項目	目標品質	試験方法
フレッシュ コンクリート	スランプフロー	$550 \pm 50(\text{mm})$	JSCE-F 503
	空気量	$6.5 \pm 1.5(\%)$	JSCE-F 513
	単位容積質量	$1.81 \pm 0.05 (\text{ton/m}^3)$	JIS A 1116
硬化 コンクリート	圧縮強度	$\sigma_{28} \geq 40(\text{N/mm}^2)$	JIS A 1108
	弾性係数	$E_{28} \geq 21(\text{kN/mm}^2)$	JSCE-G 502
	単位容積質量	$1.81 \pm 0.05 (\text{ton/m}^3)$	28 日 気中養生後
	凍結融解抵抗性	300 サイクル経過後、 60%以上	JSCE-G 501

表-2 使用材料

材料	記号	種類・産地	品質
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度 $3.14\text{g/cm}^3$
石灰石微粉末	LS	岩手県産	密度 $2.70\text{g/cm}^3$ 、 比表面積 $3800\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	福島県相馬産砕砂	表乾密度 $2.65\text{g/cm}^3$ 、 吸水率 1.63%、FM2.83
粗骨材	G	高性能軽量骨材	絶乾密度 $1.19\text{g/cm}^3$ 、 24hr 吸水率 1.4%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボキシル酸系
	AE	AE 助剤	変性アルキルカルボキシル酸化合物系 陰イオン界面活性剤

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	air (%)	$V_G$ (lit./m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤(C+LS)×%	
				W	C	LS	S	G	SP	AE
38.1	46.4	$6.5 \pm 1.5$	320	165	433	94	734	387	1.45% 程度	0.004% 程度

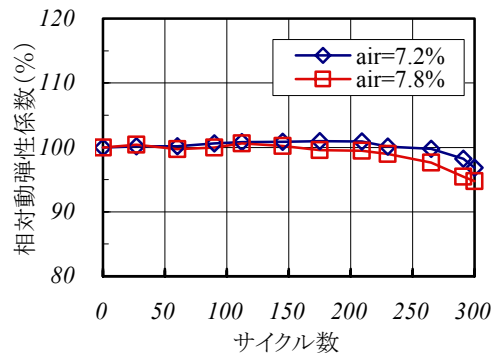


図-2 凍結融解試験結果

60%以上を満足する結果となった。また、300 サイクル終了時の供試体外観も良好な状態であり、全ての供試体において破断も生じないことを確認した。

### 3. 3 コンクリートの製造

コンクリートの製造は、水平二軸強制練り式ミキサ (2m<sup>3</sup>) を使用し、1.67m<sup>3</sup>/バッチを基本として行った。練り混ぜ手順は、まずセメント、石灰石微粉末、細骨材、水 (混和剤含む) を同時に投入して 180 秒間先練りし、その後粗骨材を投入し 60 秒間練り混ぜた。なお、軽量粗骨材は絶乾状態で使用し、骨材の 24 時間吸水率に応じた水量を単位水量に追加した。3 バッチ (5m<sup>3</sup>) を練り上げ、アジテータ車 (5m<sup>3</sup>) へ排出し、現場まで約 30 分間運搬を行った。

## 4. ポンプ圧送施工

### 4. 1 計測概要

軽量コンクリートの圧送性状を把握するとともに、圧送の可否を予測するため、ポンプ圧送時の圧力計測を実施した。表-4 にポンプ圧計測ブロックおよび表示記号の一覧、図-3 に配管計画とポンプ圧計測位置を示す。管内圧力の測定は、3, 7, 12 ブロックとし、水平管、鉛直管、ベント管の前後に管内圧力検出管を設置した (S1~S6)。実際の配管より算出した水平換算長さ<sup>6)</sup>は、P2 柱頭部からの張出し架設では、3, 7 ブロック施工時でそれぞれ 119m, 133m であった。また、P3 柱頭部からの張出し架設では、3, 7, 12 ブロック施工時において、それぞれ 128m, 150m, 174m であり、鉛直打上げ高さは実長で最大約 21m であった。

コンクリートポンプ車はピストン式を使用し、最大理論吐出圧力が 7.03MPa、コンクリートシリンダ口径が 220mm のものを用いた。ポンプの仕様を表-5 に示す。なお、輸送管は 5B を用いた。

### 4. 2 フレッシュコンクリートの性状

図-4 に練り上がり直後からの経過時間とスランプフローの関係を示す。試料は、アジテータ

表-4 ポンプ圧計測ブロックと表示記号

張出し位置	ブロック	表示記号
P3 柱頭部	3, 7, 12	P3_3BL, P3_7BL, P3_12BL
P2 柱頭部	3, 7	P2_3BL, P2_7BL

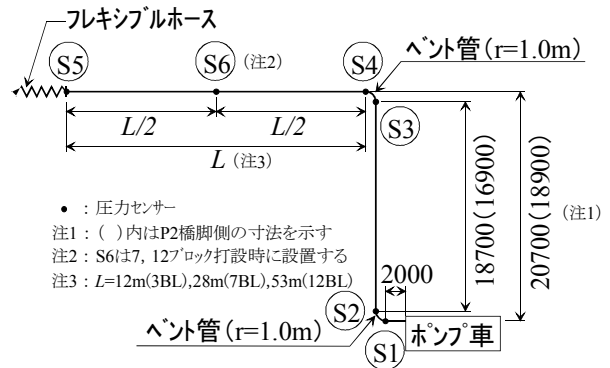


図-3 配管計画とポンプ圧計測位置

表-5 コンクリートポンプ仕様

項目	性能
最大吐出量 (m <sup>3</sup> /h) 注)	74
最大理論吐出圧力 (MPa) 注)	7.03
最大油圧 (MPa)	30.87
コンクリートシリンダ口径×ストローク (mm)	220×1600
ホッパー容量 (m <sup>3</sup> )	0.50

注) 高圧モード運転とした。

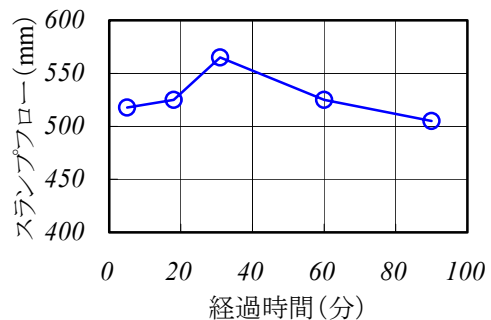
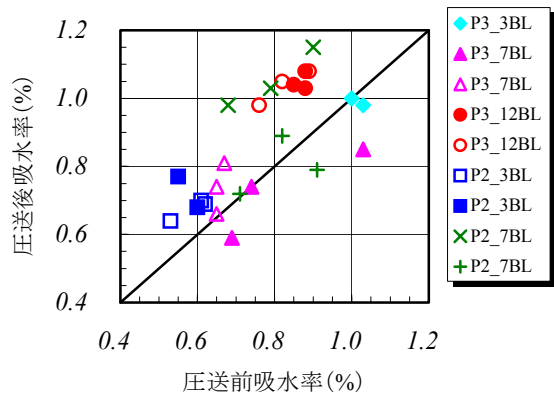


図-4 練り上がり直後からの経過時間とスランプフローの関係

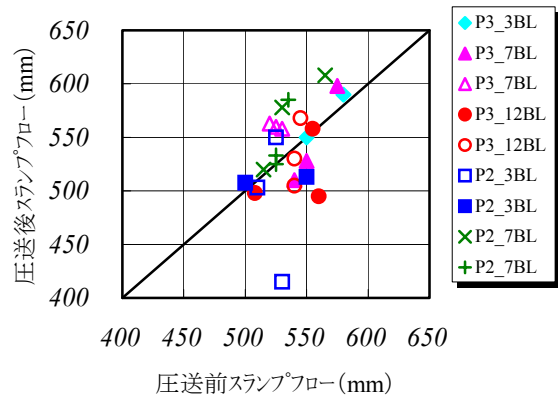
タ車に 2.5m<sup>3</sup> 積載した状態 (運搬時と同程度のドラム回転数) で随時排出し、測定を行った。このとき外気温は約 26.5 度、コンクリート温度は約 28 度であった。

測定の結果、練り上がり直後から約 30 分後まではスランプフローが大きくなるが、それ以降はわずかにスランプフローが小さくなる傾向を示した。ただし、約 90 分経過した時点でも、スランプフローは 500mm 以上を確保できることがわかった。気温条件等を考慮しても、スランプフローの保持性は良好であるといえる。

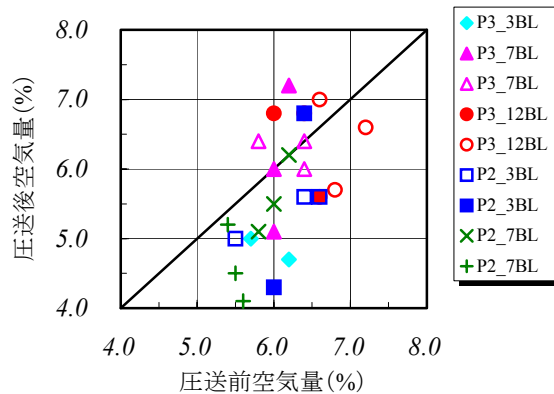
圧送前後におけるコンクリートのフレッシュ性状の試験結果を図-5 に示す。なお、測定を



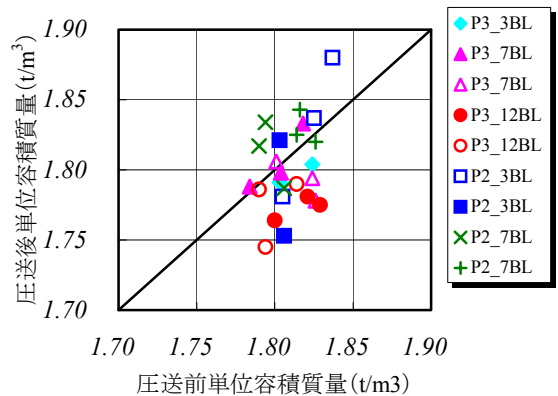
(a) 圧送前後の吸水率



(b) 圧送前後のスランプフロー



(c) 圧送前後の空気量



(d) 圧送前後の単位容積質量

図-5 圧送前後のフレッシュコンクリートの性状

行った時期は7月～11月で、その時のコンクリート温度は13～29℃の範囲であった。

粗骨材の吸水率は、圧送前ではほぼ1%以下であり、圧送後においても1.2%以下におさまる結果となった。スランプフローについては、ばらつきはあるものの、圧送距離が長い12ブロック（水平換算長さ174m）の場合においてもスランプフローのロスはほとんどなかった。これは、粗骨材の吸水率が圧送後にわずかに大きくなったが、いずれの場合も1.0%前後と大変に小さいためと考えられ、ポンプの閉塞などの問題も生じなかった。

空気量は、圧送後にやや小さくなる傾向がみられ最大で1.5%程度小さくなるものの、4.0%以上は確保できた。また単位容積質量は、圧送前後において顕著な違いはみられなかった。

#### 4.3 圧送性状

図-6に圧送効率と設定吐出量の関係を示す。打設ブロックによってばらつきが見られるものの、設定吐出量を大きくすると圧送効率が下が

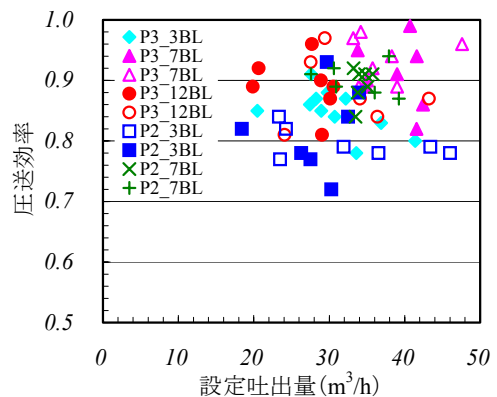


図-6 圧送効率と設定吐出量の関係

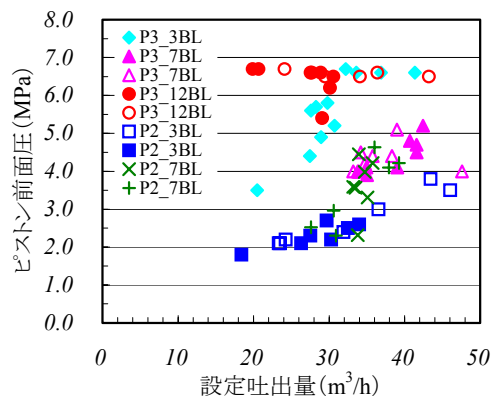


図-7 ピストン前面圧と設定吐出量の関係

る傾向を示し、設定吐出量 18~47m<sup>3</sup>/h において、圧送効率は約 0.72~0.99 であった。

図-7 にピストン前面圧と設定吐出量の関係を示す。設定吐出量が大きいとピストン前面圧は高くなる傾向が確認された。また、骨材の吸水率が今回の測定の中で、概ね最小・最大である骨材を用いた P2 系 3 ブロック (圧送前約 0.6%) と P3 系 3 ブロック (圧送前約 1.0%) (図-5 (a) 参照) を比較すると、同一設定吐出量において、吸水率が大きい場合ほどピストン前面圧が大きくなるのがわかる。

図-8 にピストン前面圧と水平換算長さの関係を示す。ただし、設定吐出量は 30~40m<sup>3</sup>/h と多少幅のあるデータとなっている。水平換算長さが長いほどピストン前面圧は比例的に増加し、水平換算長さとピストン前面圧の関係は相関性が高いことがわかる。また、水平換算長さが 174m と長距離圧送時にはピストン前面圧は 6.5MPa 程度であった。

実吐出量と水平管、垂直管およびベント管の各箇所における圧力損失の関係を図-9~12 に示す。水平管圧力損失は、実吐出量が大きくなると圧力損失が大きくなる傾向を示している。また、普通コンクリートにおける水平管圧力損失の標準値 (5B 管, スランプ 12cm) <sup>6)</sup> と比較すると、今回の軽量コンクリートの方が圧力損失は大きく、最大で 8 倍程度となることがわかった。

垂直管の圧力損失は特にばらつきが大きい、実吐出量が大きくなると圧力損失は大きくなる傾向を示した (図-10)。上向き垂直管の圧力損失は、理論的には水平管の圧力損失にコンクリートの単位容積質量による圧力差を加えたものと考えられる。今回の結果では、垂直管の圧力損失は、水平管の圧力損失にコンクリートの自重分を足した値より大きくなる傾向があり、ばらつきがみられた。図-11 に垂直管と水平管の圧力損失比と実吐出量の関係を示す。垂直管の圧力損失は、同一吐出量における水平管の圧力損失と比べて最大で 3 倍程度であり、また普通

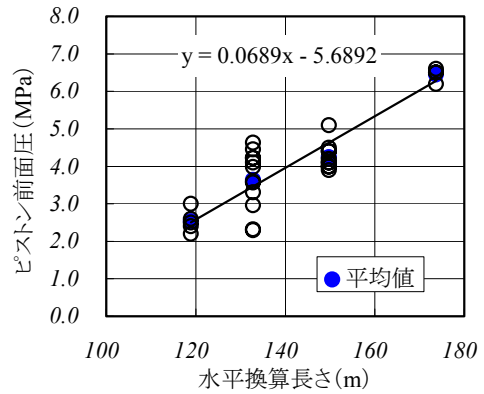


図-8 ピストン前面圧と水平換算長さの関係

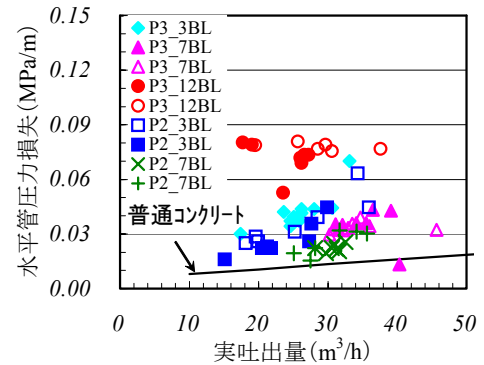


図-9 水平管圧力損失と実吐出量の関係

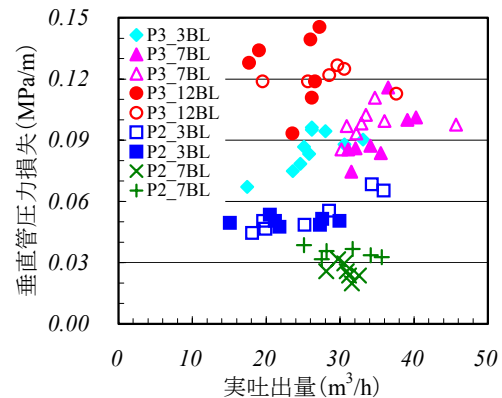


図-10 垂直管圧力損失と実吐出量の関係

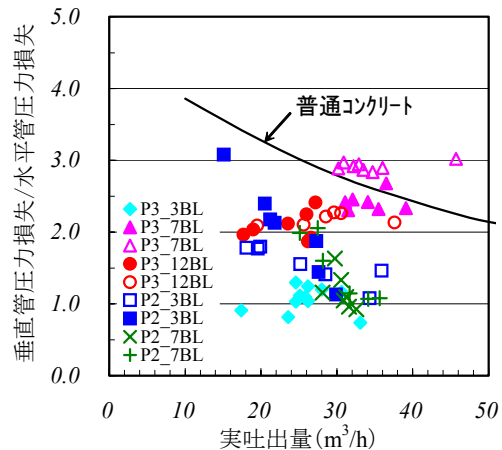


図-11 垂直管と水平管の圧力損失比と実吐出量の関係

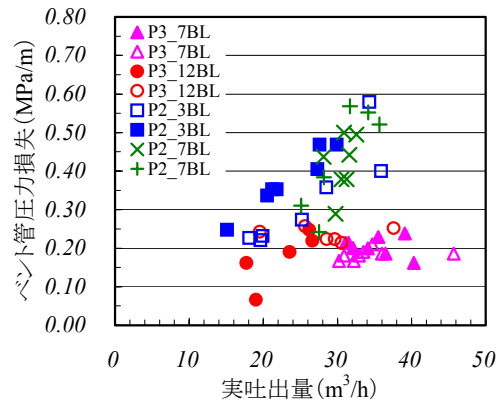
コンクリート（単位容積質量  $2.30\text{t/m}^3$ ，5B 管）の場合<sup>6)</sup>と比較すると軽量コンクリートの方が単位容積質量 ( $1.81\pm 0.05\text{t/m}^3$ ) が小さいため、圧力損失比は小さくなる傾向が確認された。

ベント管の圧力損失は、ポンプ車に近い箇所 (S1~S2) ほど大きくなり、実吐出量が大きいほど圧力損失は大きくなる傾向が確認できた (図-12)。

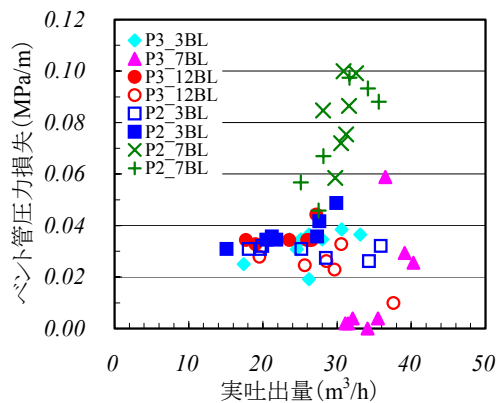
## 5. まとめ

高性能軽量コンクリートを適用した長大 PC 橋梁の施工において、軽量粗骨材をプレウエッティングせずに長距離ポンプ圧送を行い、フレッシュコンクリートの性状試験および管内圧力の計測等を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 今回使用した高性能軽量粗骨材は、吸水率が小さく圧送前で約 1% 以下、圧送後においても 1.2% 以下におさまることがわかった。これにより圧送前後におけるフレッシュ性状は、スランプフローのロスはほとんどなく、また単位容積質量にも顕著な違いはみられなかった。空気量については、圧送後にやや小さくなるものの 4.0% 以上は確保できた。
- ② ポンプ圧送性状は、設定吐出量が大きくなると圧送効率は低くなる傾向がみられたが、設定吐出量  $18\sim 47\text{m}^3/\text{h}$  において圧送効率は約 0.72~0.99 であった。
- ③ 水平管、垂直管、ベント管の圧力損失は、実吐出量が大きくなると増加する傾向が確認でき、水平管の圧力損失は、普通コンクリートと比較して最大で 8 倍程度大きくなった。また垂直管の圧力損失は、同一吐出量における水平管の圧力損失と比べて最大 3 倍程度大きくなる結果が得られた。
- ④ 水平換算長さとしピストン前面圧の関係は相関性が高く、圧送距離が長いほどピストン前面圧は大きくなり、水平換算長さ約 170m の長距離圧送時には  $6.5\text{MPa}$  程度であった。
- ⑤ 今回の配合では、軽量粗骨材をプレウエッ



(a) 計測位置 S1~S2



(b) 計測位置 S3~S4

図-12 ベント管圧力損失と実吐出量の関係

ティングせずに、実吐出量が約  $20\sim 35\text{m}^3/\text{h}$  で、水平換算長さ 170m 程度のポンプ圧送を行うことが実施工においても十分に可能である。

## 参考文献

- 1) 岡本，早野，柴田：超軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol.36，No.1，pp.48-52，1998.1
- 2) 堀口，阿部，鈴木，榎本：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に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.1249-1254，2001
- 3) 田中，田附，竹市，榎本：独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートの構造特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.3，pp.541-546，2001
- 4) 坂田，柳井，石川，榎木：高性能軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.355-360，1999
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]—耐久性照査型— [平成 11 年度版]，pp.62-63
- 6) 土木学会：コンクリートライブラリー100 コンクリートのポンプ施工指針[平成 12 年度版]