

報告 超高橋脚の施工における高強度コンクリートのポンプ 圧送性

柳井 修司*1・服部 英樹*2・森 信幸*3・溝淵 利明*4

要旨：東海北陸自動車道・鷺見川橋梁では、最大高さ 118mの超高橋脚に設計基準強度 $50\text{N}/\text{mm}^2$ の高強度コンクリートが用いられている。コンクリートはポンプによって施工されるが、高所圧送に伴う圧送負荷や管内圧力の増大を軽減するために、高さに応じて流動性の異なる 3 種類のコンクリート（スランプ 12cm, 18cm, スランプフロー50cm）を使用することを計画・実施した。コンクリートの切替え高さは、実施工において数回のポンプ圧送試験を行い、その結果を基に決定した。本報告は、これまでの測定結果をとりまとめ、高強度コンクリートのポンプ圧送性について検討したものである。

キーワード：高強度コンクリート，ポンプ圧送性，高橋脚

1. はじめに

東海北陸自動車道で現在建設中である鷺見川橋梁は、橋脚高さが最大 118mの超高橋脚橋であり、設計基準強度が $50\text{N}/\text{mm}^2$ の高強度コンクリートが採用されている。また、コンクリートは全てポンプによって施工される計画である。

一般にコンクリートを高所に圧送する場合には、圧送中にコンクリートのワーカビリティが低下すること¹⁾や、特に高強度コンクリートの場合には管内圧力やポンプに作用する圧送負荷が増大することが知られている²⁾。しかしながら、高強度コンクリートの高所圧送に関する報告は少なく、特に圧送高さが 100mを超えるような施工例は極めて少ない。土木構造物では、青森ベイブリッジ主塔において、設計基準強度 $60\text{N}/\text{mm}^2$ の高強度コンクリートを高さ 80mまで施工した実績がある³⁾が、本工事ではそれよりも 40m以上高い位置まで圧送する必要がある。本橋脚の施工においては、高強度コンクリートの高所圧送による施工性の低下やそれに伴う構造体の品質低下が懸念されることから、

施工高さに応じて流動性が異なる 3 種類のコンクリート（スランプ 12cm, 18cm, スランプフロー50cm）を使い分けることを検討した。

本報文では、施工時に実施した高強度コンクリートのポンプ圧送試験における測定結果をとりまとめるとともに、高強度コンクリートの流動性や圧送高さがポンプ圧送性に及ぼす影響、圧送前後におけるコンクリートの性状変化について検討を行った。

2. 工事概要

2.1 構造物の概要

構造物の概要を図一に示す。本橋は橋長 436mのPC4径間連続ラーメン箱桁橋であり、P1橋脚(55m)、P2橋脚(118m)、P3橋脚(68m)の3基の高橋脚を有する長大橋である。特にP2橋脚は、完成すれば国内最高の橋脚となる。また、橋脚には設計基準強度 $50\text{N}/\text{mm}^2$ の高強度コンクリートとSD685相当の高強度鉄筋を使用し、かつ中空断面とすることで経済性・美観に加え、施工の合理化が図られている。

*1 鹿島建設(株)技術研究所第二研究部第2研究室研究員 工修(正会員)

*2 日本道路公団 名古屋建設局白鳥工事事務所

*3 鹿島建設(株)名古屋支店鷺見JV工事事務所所長

*4 鹿島建設(株)技術研究所第二研究部第2研究室主任研究員 工修(正会員)

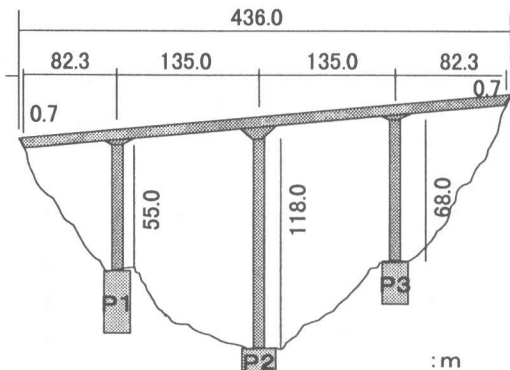


図-1 鷺見川橋梁の概要

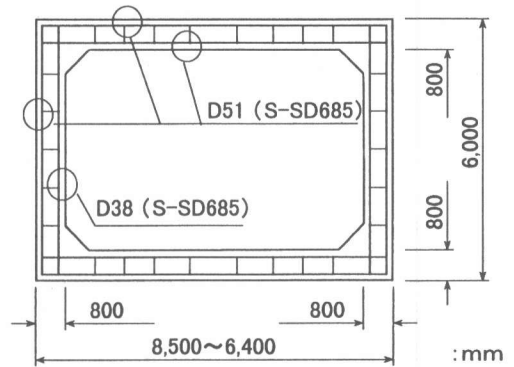


図-2 中空部の断面図

図-2に橋脚の中空部断面図を示す。なお、P1及びP3橋脚の高さ5mまでとP2橋脚の高さ6mまでは中実断面である。

2.2 施工概要

橋脚の施工は、1996年12月よりP3橋脚、P2橋脚、P1橋脚の順に並行して行われている。コンクリートは高さ方向に分割施工し、1リフトの打設高さを5m（P2橋脚中実部のみ6m）として、約2週間の打込み間隔で施工されている。また、第1、第2リフトについてはコンクリートポンプ車のブームを使用し、第3リフト以降、輸送管（5B管）を配置してポンプにより施工している。

高強度コンクリートを高所へ圧送する本橋脚の施工においては、管内圧力や圧送負荷の増大が予想されること、圧送後にコンクリートのワーカビリティが低下することが懸念されることから、圧送高さに応じてコンクリートの流動性を変更することを計画した。切替え高さについては、ポンプ圧送試験の結果から決定することとした。

2.3 コンクリートの仕様

コンクリートの使用材料及び配合を表-1に示す。高強度コンクリートをポンプ圧送する際には、シリカフェームや高炉スラグ微粉末などの混和材を用いることでコンクリートのワーカビリティが

改善されること⁴⁾が知られているが、当工事では一般のコンクリート材料のみを使用して、材料コストの低減を図った。各配合はコンクリートの運搬及び打込みに要する時間を考慮して、練上りから90分程度まで所要の流動性を保持することを事前の室内試験及び実機試験で確認した。高性能AE減水剤の添加量は、その温度依存性を室内試験により確認し、外気温に応じて適宜調整し、現地での流動化剤の添加は行わないこととした。なお、各配合とも温度ひび割れの抑制を考慮して、所要のワーカビリティを満足する範囲でセメント量が極力少なくなるようにした。

3. ポンプ圧送試験

3.1 試験方法

表-1 コンクリートの使用材料及び配合

使用材料	記号	銘柄	摘要
セメント	C	普通ポルトランドセメント	比重3.15, 比表面積3,400cm ² /g
細骨材	S	粗砂:長良川産川砂	比重2.58, 吸水率1.98%
		細砂:坂井産山砂	比重2.54, 吸水率1.70%
		混合比 粗砂:細砂=80:20	粗粒率2.79
粗骨材	G	Gmax15mm:長良川産川砂利	比重2.61, 吸水率2.04%
		Gmax25mm:長良川産川砂利	比重2.61, 吸水率2.00%
		混合比 15mm:25mm=30:70	粗粒率6.93
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

配合No.	Gmax (mm)	スラフ° (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				SP (kg)
						W	C	S	G	
1		12±2.5			42.0	134	374	759	1063	5.61
2	20	18±2.5	4.5±1.5	35.8	41.1	140	391	730	1063	5.87
3		50±5(7P)			42.0	151	422	723	1016	7.17

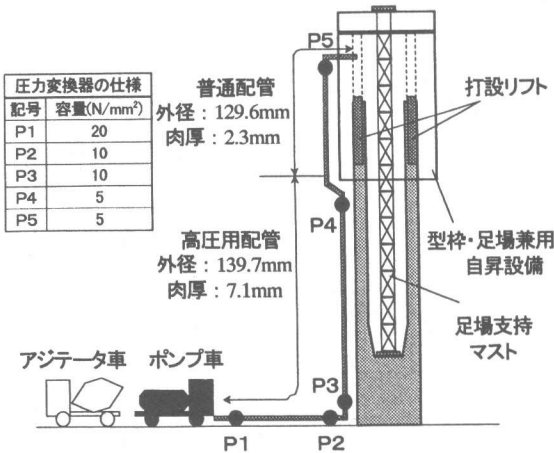


図-3 ポンプ圧送試験の概要

表-4 コンクリートポンプの仕様

ストローク長	1600mm	
シリンダ数	2	
ホップ容量	0.45m ³	
輸送シリンダ径	φ205	
	大容量時	高圧時
吐出量	10~100m ³ /h	10~68m ³ /h
ピストン前面圧	5.2 N/mm ²	8.1 N/mm ²
水平輸送距離	590m	920m
垂直輸送距離	125m	210m

図-3にポンプ圧送試験の概要、表-2に試験を行った打設部位、表-3に測定項目を示す。試験は、施工時に流動性の異なる各コンクリートを15~20m³ずつ圧送し、輸送管上に設置した圧力変換器で連続的に管内圧力を計測するとともに、ポンプ車の吐出圧及び吐出量を測定した。コンクリートポンプは表-4に示す仕様を有する油圧ピストン式のものである。また、圧送に伴うコンクリートの性状の変化を把握するために、表-3に示す試験を行った。

3.2 試験結果

(1) コンクリートの性状

図-4、5に圧送前後におけるスランプ及びスランプフローの関係、材齢28日圧縮強度の関係を示す。

コンクリートの流動性については、圧送高さによらず、スランプが2.5~7.0cm、スランプフローが6.5~18.0cmの範囲で低下しており、

表-2 ポンプ圧送試験対象部位

計測点	第1回	第2回	第3回	第4回
打設部位	P3-3LIFT	P3-3LIFT	P2-13LIFT	P3-20LIFT
天端高さ	15.0m	35.0m	66.0m	101.0m
P1~P2	15.0m	15.0m	13.8m	13.8m
P2~P3	2.8m	2.8m	2.8m	2.8m
P3~P4	-	19.7m	51.0m	86.0m
P4~P5	-	14.6m	14.6m	14.6m
(P3~P5)	13.8m	34.3m	65.6m	101.2m

表-3 測定項目

測定項目	備考
ポンプ主油圧	圧送が定常状態になったときに測定
ピストン前面圧	主油圧をピストン前面圧換算比で除して算出
設定吐出量	時間当たりのピストンのストローク回数を測定し、シリンダー行程容積から算出
実吐出量	アジテータ1車当たりの搬出時間(段取り替えを除く)を測定し、積載量を搬出時間で除して算出
管内圧力	輸送管上に設置した圧力変換器から測定
スラフ° (70-)	荷下し時及びポンプ筒先で測定
空気量	
圧縮強度 (7,28日)	

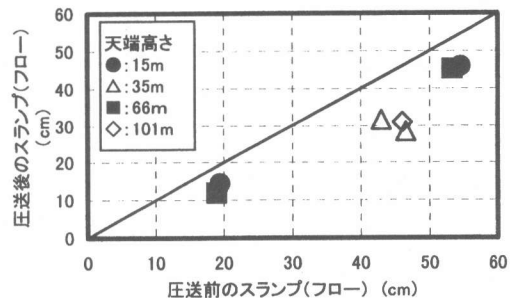


図-4 圧送前後のスランプ(フロー)の関係

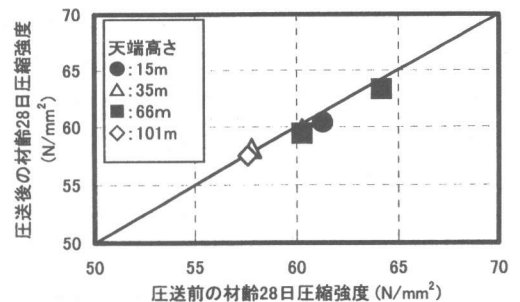


図-5 圧送前後の圧縮強度の関係

高強度コンクリートを高所圧送した既往の報告²⁾に比べて低下の割合が大きいものであった。また、圧送高さとの流動性の低下の関係は、明確には認められなかった。

圧縮強度は、圧送前後で有意な差は生じておらず、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。また、いずれの試験においても設計基準強度 50N/mm^2 を十分満足していた。なお、空気量はポンプ圧送によって若干減少する¹⁾といわれているが、今回の施工では $0.4\sim 1.5\%$ 増加する傾向にあった。

(2) ポンプ圧送性

図-6～8に設定吐出量と単位長さ当たりの水平圧力損失、垂直圧力損失及び曲り圧力損失の関係を示す。

図-6及び図-7より、実施工における測定のため、ばらつきが大きいものの、設定吐出量と水平・垂直圧力損失の間には、弱い正の相関が認められ、吐出量が大きくなるに伴い、圧力損失が大きくなる傾向にあった。また、コンクリートの流動性の相違に着目すると、設定吐出量 $25\sim 40\text{m}^3/\text{h}$ の範囲では、流動性が高い配合ほど圧力損失が小さい結果となった。

曲り圧力損失については、図-8に示すようにコンクリートの配合及び圧送高さによって、 $-0.06\sim 0.14\text{N/mm}^2/\text{m}$ の範囲でばらついており、設定吐出量との相関は認められなかった。

図-9に設定吐出量とピストン前面圧の関係を示す。図-9より、設定吐出量が $25\sim 40\text{m}^3/\text{h}$ の範囲では圧送高さが等しい場合、コンクリートの流動性が高いほどピストン前面圧が小さくなる傾向にあった。また、設定吐出量と同じ場合には、圧送高さが高くなるに従ってピストン前面圧が大きくなり、天端高さが 100m を超えた第4回目の試験では、スラップフロー50cmのコンクリートでも 7N/mm^2 (ポンプ車の最大能力の85%) を超えるピストン前面圧が作用した。

図-10に設定吐出量と実吐出量の関係を示す。実吐出量は設定吐出量に対して全体的に小

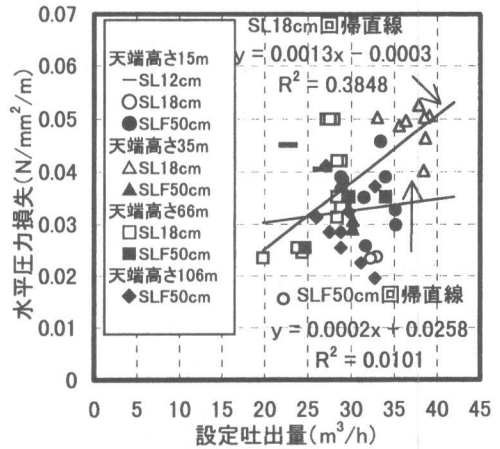


図-6 設定吐出量と水平圧力損失の関係

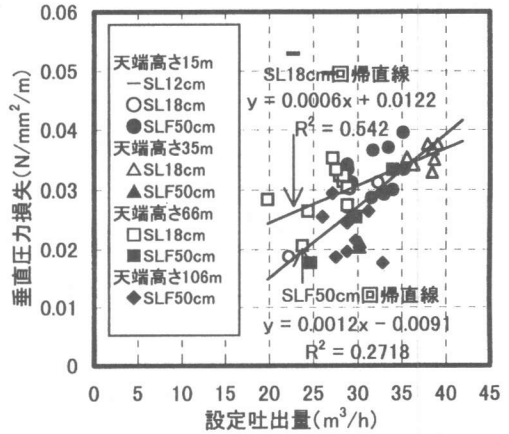


図-7 設定吐出量と垂直圧力損失の関係

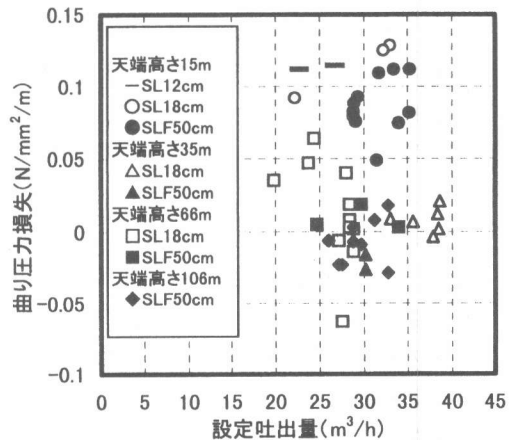


図-8 設定吐出量と曲り圧力損失の関係

さく、設定吐出量が大きくなるほどその低下の割合が大きくなる傾向にあった。このことは、吐出量の設定を大きくしても、所要の施工効率を得られない場合があることを示唆しており、ポンプに作用する圧送負荷を十分に考慮してコンクリートを圧送する必要があると考えられた。

3.3 コンクリートの切替え高さの算出

コンクリートの切替え高さは、ポンプ圧送性試験の結果及び施工状況を参考にして決定した。

(1) スランプ18cmへの切替え

第1回のポンプ圧送試験時（天端高さ15m）の施工において、スランプ12cmのコンクリートを圧送した際、ポンプ筒先のスランプが5cm（目視）程度に低下していたため、締めめ作業の効率が大幅に低下した。したがって、施工性の観点からスランプ12cmのコンクリートは各橋脚第2リフトまでとした。

(2) スランプフロー50cmへ切替え

第3回のポンプ圧送性試験における計測点P1の管内圧力は、スランプ18cmの場合で2.0～3.5N/mm²の範囲であった。以後の施工において設定吐出量を30～35m³/hrと設定した場合、計測点P1の管内圧力は、約3.0N/mm²と推定された。スランプ18cmの水平圧力損失量、垂直圧力損失量は、図-6、7より各々0.042N/mm²/m、0.033N/mm²/m程度であると推定された。これらから、垂直圧送距離を次式により推定した。

$$\begin{aligned} (P1の管内圧力) &= (\text{水平圧力損失量}) \times (\text{水平配管長}) \\ &\quad + (\text{垂直圧力損失量}) \times (\text{圧送高さ}) \\ (\text{圧送高さ}) &= (3 - 0.042 \times 13.6) / 0.033 \\ &= 73.6\text{m} \quad (\text{曲り圧力損失量は考慮せず}) \end{aligned}$$

上記の式を用いて、P3橋脚（高さ68m）の施工はスランプ18cmのコンクリートで行い、P2橋脚（高さ118m）については、圧送高さが68mを超えるリフトからスランプフロー50cmの配合に切り替えることとした。

4. 施工結果

4.1 コンクリートの品質

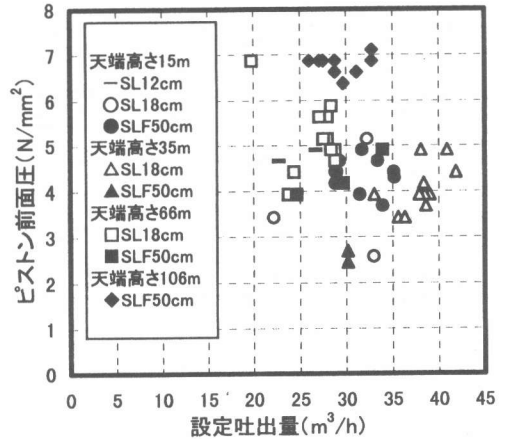


図-9 設定吐出量とピストン前面圧の関係

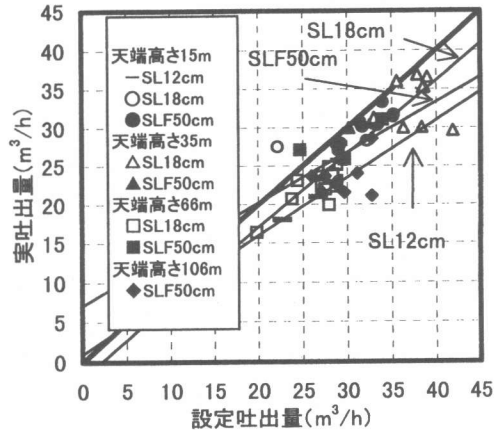


図-10 設定吐出量と実吐出量の関係

表-5にこれまでに施工したコンクリートの品質管理試験結果を示す。フレッシュコンクリートについては、当日の性状を把握するために、製造開始時に連続して5車目まで、以後50m³に1回の頻度で、圧縮強度については1車目及び50m³に1回の頻度で試験を実施した。施工期間中、外気温が0～29℃と変化した。高性能AE減水剤の添加量の調整により、フレッシュ時及び硬化後とも目標品質を全て満足するものであった。

4.2 施工性

写真-1に橋脚の施工状況を示す。圧送高さに応じたコンクリートの配合を選定することで、

表-5 品質管理試験結果

	スラフ°(12cm)	スラフ°(18cm)	スラフ°70-	空気量	コンクリート温度	外気温	σ_7	σ_{28}
	(cm)			(%)	(°C)		(N/mm ²)	
サンプル数	18	46	18	82	82	82	246	246
最大	14.5	20.5	54.5	5.5	33	29	53.3	72.4
最小	9.5	16.5	46.0	3.3	12	0	39.4	57.0
平均	12.0	19.1	51.3	4.4	-	-	46.2	63.8
標準偏差	0.66	1.18	2.67	0.62	-	-	2.70	3.26
変動係数(%)	5.50	6.22	5.21	14.10	-	-	5.83	5.11

ポンプに作用する圧送負荷を軽減しつつ所要の圧送効率を確保することができ、コールドジョイントの発生を未然に防ぐことができた。また、セメント量を極力減じた配合としたことで、温度ひび割れの発生は現在まで確認されていない。

5. まとめ

橋脚高さが 100m を超える超高橋脚の施工において高強度コンクリートのポンプ圧送試験を実施した。これまでに得られている知見を以下に示す。

- (1) ポンプ圧送によるコンクリートの流動性の低下は、比較的大きいものであった。
- (2) 水平方向及び垂直方向の単位長さ当りの管内圧力損失と設定吐出量には弱い正の関係が認められた。また、流動性の高いコンクリートほど、圧力損失は小さくなった。
- (3) 設定吐出量に対して実吐出量が低下する傾向にあり、ポンプに生じる圧送負荷を充分に考慮して吐出量を設定する必要がある。
- (4) 流動性の異なる高強度コンクリートを圧送高さに応じて使用することで、円滑な施工を可能にした。

本橋脚は 1998 年 4 月現在も施工中であり、P2 橋脚については高さ 110m を超えて順調に施工が進んでいる。今後、最終リフト施工時にポンプ圧送試験を実施し、データを蓄積していく次第である。コンクリート構造物の多様化に伴い、今後、高強度コンクリートをさらに高所へ圧送する工事が多くなるものと思われる。その際、圧送高さに応じて、コンクリートの流動

性を変更することは、円滑な施工を行う上で非常に有効な手法であると考えられる。

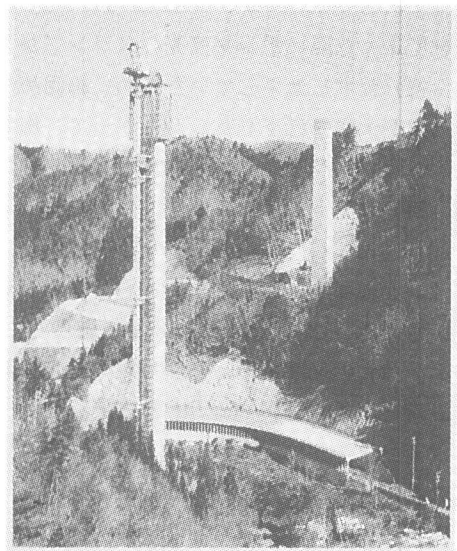


写真-1 施工状況

参考文献

- 1) コンクリートのポンプ施工指針(案), 土木学会コンクリートライブラリー第 57 号, 1985
- 2) 内田一善ほか: 高強度コンクリートの高所圧送施工実験, 長谷工技報 No.9, 1992, pp.143-147
- 3) 石橋忠良ほか: ポンプ圧送による高強度コンクリート ($\sigma_{ck}=600\text{kgf/cm}^2$) の施工-青森大橋(仮称)主塔-, コンクリート工学, Vol.28, No.5, pp.59-70, 1990.5
- 4) 例えば溝渕利明: 場所打ち高強度コンクリートの現状, コンクリート工学, Vol.30, No.6, pp.71-77, 1992.6