

報告 高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する検討

谷口 秀明^{*1}・渡辺 博志^{*2}・田中 良樹^{*3}・藤田 学^{*1}

要旨：本報は、設計基準強度 60N/mm² 以上を対象にした、水セメント比 25%の高強度コンクリートのポンプ圧送性を検討した内容である。ポンプ圧送実験によって、ポンプ圧送に伴うコンクリートの品質変化やポンプ車のピストン前面圧から、限界となる吐出量を確認した。また、ポンプ圧送に伴ってコンクリートの粘性が低下することや筒元近くの管内圧力損失が大きくなることが明らかになった。

キーワード：高強度コンクリート、ポンプ圧送性、流動性、圧縮強度、管内圧力損失

1. はじめに

高強度コンクリートは部材の縮小や軽量化が可能であり、設計基準強度 60N/mm² 以上の高強度コンクリートを用いた橋梁や建築物の工事が増えている¹⁾。道路橋示方書（平成 8 年度改訂）においても、設計基準強度 800kgf/cm²（現行通りの記載）のプレキャスト部材を用いた道路橋の設計が可能になっており、今後、現場打ち工法への展開が期待される。また、昨今はコンクリート構造物の長寿寿命化が重視されており²⁾、耐久性の向上も図れる高強度コンクリートの適用範囲は広がりつつある。

しかし、現状では、高強度コンクリートの施工に当たって重要なポンプ圧送性の評価が明確になっていない。学会の指針類^{3,4)}においても、管内抵抗の増大や流動性の低下などの傾向を記載した内容に留まっている。そこで、筆者らは、既存データの少ない設計基準強度 60N/mm² 以上を対象にした高強度コンクリートのポンプ圧送性を検討した。なお、本実験は、建設省土木研究所と(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会による共同研究「現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法の開発に関する研究」の一環である。

2. 実験内容

2.1 コンクリートの条件

コンクリートの使用材料と配合を、表-1、表-2に示す。粉体には普通ポルトランドセメントのみを使用し、材齢 28 日の圧縮強度が 80N/mm² 以上を確保できるように水セメント比を 25%にした。単位水量は、スランプフローが 45cm 程度であってもコンクリートの練り返しが可能な範囲で最小となる 160kg/m³ にした。

表 - 1 使用材料

材料名	種類、物性等	記号
水	水道水	W
セメント	普通ポルトランドセメント、密度3.16g/cm ³ 比表面積3270cm ² /g	C
細骨材	鬼怒川産川砂と栃木県葛生産砕砂の混合砂、混合比率1:1 表乾密度2.60g/cm ³ 、吸水率1.45%、粗粒率2.89	S
粗骨材	栃木県葛生産砕石2005、表乾密度2.64g/cm ³ 、吸水率0.5% 実積率60.1%、粗粒率6.63	G
混和剤	高性能AE減水剤、ポリカルボン酸系	SP

表 - 2 コンクリートの配合及びフレッシュ性状の目標値

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				SP (Cx%)
		W	C	S	G	
25.0	45.0	160	640	699	868	1.60

圧送前の目標値：スランプフロー57.5±2.5cm、
V65漏斗流下時間20±2.5秒、空気量4.0±0.5%

*1 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 工修（正会員）

*2 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室主任研究員 工修（正会員）

*3 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室研究員（正会員）

スランブフローの低下量が 10cm 以上になる事例³⁾もあることから、圧送前のスランブフローを 55 ～ 60cm にし、細骨材率は、この状態でも試料中央に粗骨材の山を生じない範囲で最小となる 45%に決めた。

コンクリートの製造には、容量 3m³ 強制 2 軸ミキサを使用し、材料一括練り方式で 150 秒間の練混ぜを行った。1 バッチ当たりの練混ぜ量を 1.5m³ とし、アジテータ車 1 台に 3 バッチ分 4.5m³ のコンクリートを積載した。また、コンクリートのフレッシュ性状は、高流動コンクリートの試験方法案⁶⁾に準じ、スランブフロー、V₆₅ 漏斗および空気量の各試験で評価した。その他、加圧脱水量、標準水中養生を施した材齢 28,91 日の圧縮強度とヤング係数を測定した。

2.2 ポンプ圧送条件

管径 5B(125A) の圧送管を用い、図-1および表-3のように 2 通りの配管で実験を行った。配管 1 はポンプ車の吐出口付近を除いて水平圧送のみとし、配管 2 は実際の工事を想定して鉛直管やベント管を組み合わせたものである。実験では最大吐出量 100m³/h の大型ポンプ車を高圧設定にして使用した。この場合の吐出量は 68m³/h、ピストン前面圧は 8.1N/mm² まで許容する。吐出量は、設定下限 10m³/h での変動⁷⁾や水平管管内圧力損失の目安⁴⁾を加味し、15 (16.2), 30 (28.7), 45 (43.2) m³/h に設定した。() の値は高圧設定に伴う端数である。なお、配管 1 では吐出量 30m³/h のポンプ圧送を省略した。

管内圧力は、長さ 0.5m の計測管に取り付けたスチール製ダイヤフラム式圧力計測器⁴⁾によって測定した。ポンプ車のストローク数は圧力波形から、また、ピストン前面圧は、ポンプ車の主油圧、ならびに油圧シリンダーとピストンの断面積の比率を乗じて求めた。なお、圧力測定と試料採取は、管内の残留コンクリートを排出した後、管内圧力が安定した時点で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 吐出量の補正

使用したポンプ車では吐出量の設定が小さいほど、実吐出量が設定値を大きく上回る傾向を示した。すなわち、前述の設定吐出量に対し、実吐出量は、配管 1 が 29, 46m³/h に、配管 2 が 25, 33, 39m³/h となった。容積効率は、配管 1、実吐出量 29m³/h では約 90%であったが、配管 2、実吐出量 39m³/h に至っては約 75%まで低下した。これ以降、吐出量は実吐出量で表現する。

3.2 コンクリートのフレッシュ性状

ポンプ圧送後のスランブフローは、図-2に示す通り、配管 1 の吐出量 29m³/h および配管 2 の吐出量 25m³/h ではほとんど変化が見られなかったが、吐出量が 30m³/h を超える場合には 7cm 程度の低下が確認された。一方、V₆₅ 漏斗流下時間は、ポンプ圧送前が 20 秒前後であったのに対し、ポンプ圧送後には 7 ～ 10 秒と著しい変化が見られた。これまでのポンプ圧送結果³⁾、ならびに V₆₅ 漏斗流下時間がコンクリー

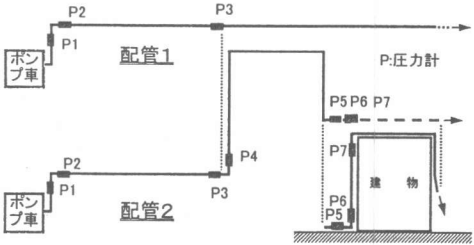


図 - 1 配管概略図

表 - 3 配管条件

	BTP	HP	FH		TP		BP		VPU	VPD
	m	m	本	m	本	m	本	m	m	m
配管1	0.6	51.8	1	3.0	2	1.2	1	1.6	0	0
配管2	0.6	68.5	0	0	2	1.2	8	12.0	7.0	5.6
配管1	Pump→ 0.6BTP+1.2TP+0.3HP+<P1>+1.6BP+1.5HP+<P2>+19HP+<P3>+31HP+3FH→									
配管2	Pump→ 0.6BTP+1.2TP+0.3HP+<P1>+1.6BP+1.5HP+<P2>+19HP+<P3>+1.6BP+0.5HP+<P4>+4.8BP+ 38.5HP+<P5>+0.2HP+1.6BP+0.3VPU+<P6>+6.5VPU+<P7>+0.2VPU+1.6BP+8.5HP+0.8BP+5.6VPD→									
	<記号, 数字> P: 圧力計(数字はNo, 計測管は水平管及び鉛直管の一部として計算), HP: 水平管, FH: フレキシブルホース, BTP: ポンプ車の接続管, TP: テーパー管(7B→6B, 6B→5B), BP: ベント管, VPU: 上向き鉛直管, VPD: 下向き鉛直管, 記号前数字: 管長(m)									

トの粘性(材料分離抵抗性)を評価できること⁶⁾から、この現象がポンプ圧送に伴う管内でのせん断変形によるコンクリートの粘性の低下に起因するものと推測される。

なお、空気量については、時間経過に伴う増加の傾向があるが、ポンプ圧送後にはさらに1～2%増加し、吐出量の影響も見られる。

3.3 コンクリートの加圧脱水性状

図-3は、ポンプ圧送前後に採取したコンクリートの加圧脱水量を調べたものである。使用

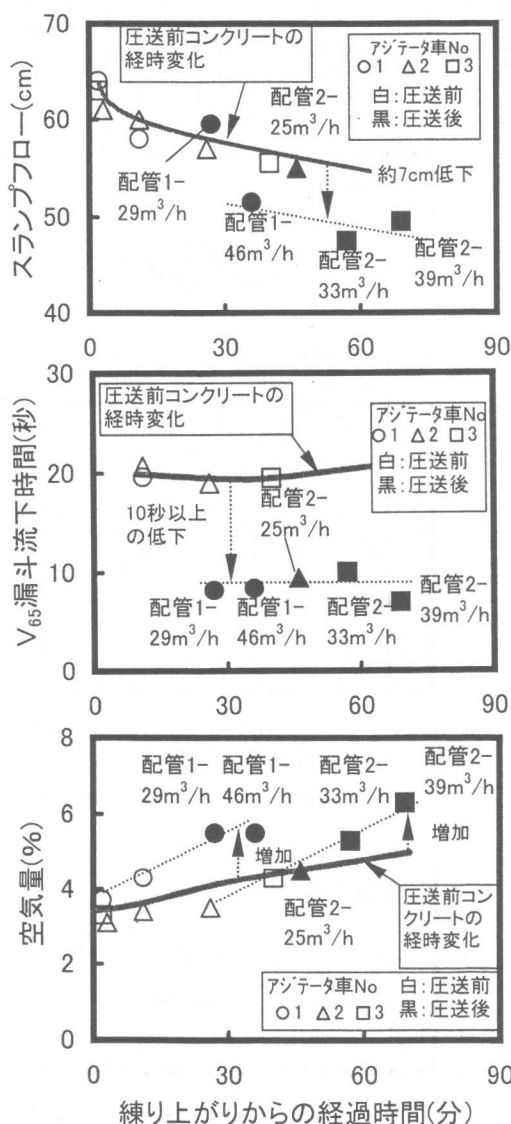


図-2 時間経過及びポンプ圧送に伴うコンクリートのフレッシュ性状の変化

したコンクリートは、一般にポンプ圧送性が良好と判断される標準曲線から大きく下方に外れ、粉体系高流動コンクリートの結果⁵⁾と比べても加圧脱水量が少なくなる傾向がある。また、骨材の表面水率の変動などによってスランプフローが50cmに低下したコンクリートでは、加圧脱水量が著しく低下しており、スランプフローの目標値を5cm下げた場合には、さらにポンプ圧送性の低下が予想される。

3.4 コンクリートの硬化性状

実吐出量とコンクリートの圧縮強度比の関係を、図-4に示す。ここで、圧縮強度比とは、ポンプ圧送後の圧縮強度をポンプ圧送前の圧縮強度で除した値である。材齢によって多少異なるが、コンクリートの圧縮強度比は、吐出量の

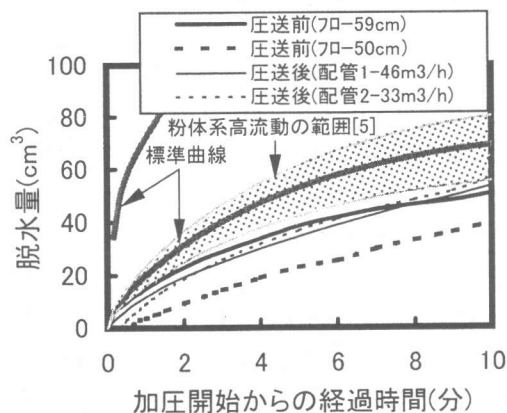


図-3 コンクリートの加圧脱水性状

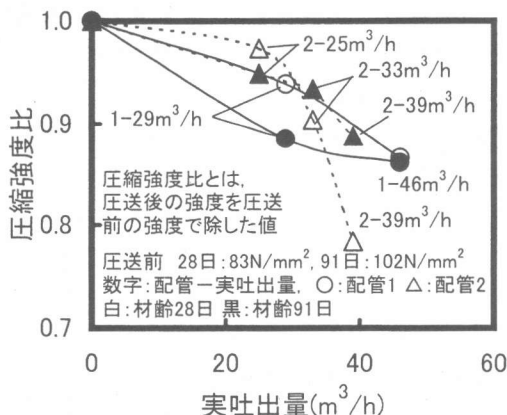


図-4 実吐出量と圧縮強度比の関係

増加に伴って低下する傾向がある。配管 2 の材齢 28 日の値には吐出量 $25\text{m}^3/\text{h}$ 以上での急激な低下も見られる。以上の結果から判断すれば、コンクリートの強度を確保するためには吐出量をなるべく小さくする方が良い。

しかし、図-5に示すように、材齢 91 日における硬化コンクリートの密度比と圧縮強度比およびヤング係数比は、極めて高い寄与率 R^2 で直線近似できる。材齢 28 日においても、圧縮強度比が 0.896、ヤング係数比が 0.996 の寄与率を得た。密度の代わりにフレッシュ時の空気量を指標とした場合でも 0.7 前後の寄与率で近似できることから、図-2に示したように空気量の増加が強度発現に影響したものと判断される。なお、各比はポンプ圧送前後の比を計算したもので、密度は圧縮強度用供試体の質量をその体積で除した値である。

3.5 ピストン前面圧と管内圧力

実吐出量とピストン前面圧の関係を、図-6に示す。配管 2 は配管 1 に比べて近似線の傾きが大きく、圧送性能限界線に達する限界吐出量が小さいことがわかる。限界吐出量は、配管 1 が $41.1\text{m}^3/\text{h}$ 、配管 2 が $32.9\text{m}^3/\text{h}$ と計算され、図-6に示すように既往データ⁷⁾の平均的な結果である。一方、吐出量 $25\text{m}^3/\text{h}$ 付近では既往の範囲⁷⁾での最小値や、本実験と同等の配管で圧送した高流動コンクリートの結果⁸⁾と同程度のピストン前面圧である。以上のことから、流動性を高めた高強度コンクリートでは、吐出量の増加に伴うピストン前面圧の急激な増加に配慮する必要がある。

管内圧力波形の一例を、図-7に示す。ピストン式ポンプ車を使用した場合、普通コンクリートでは最初に瞬間的なピークを発生し、全体として台形の波形となる³⁾。今回の結果は、波形の立ち上がりが緩やかな曲線であり、ポンプ指針⁴⁾の資料で紹介された塑性粘度が大きいコンクリートの波形と一致する。

ポンプ指針⁴⁾によれば、コンクリートの変動やポンプ車の機械的損失などが不明瞭な場合に

は、算定開始位置の圧送負荷に 1.25 を乗じた値を理論吐出圧力としてポンプの機種を選定することになっている。しかし、ピストン前面圧

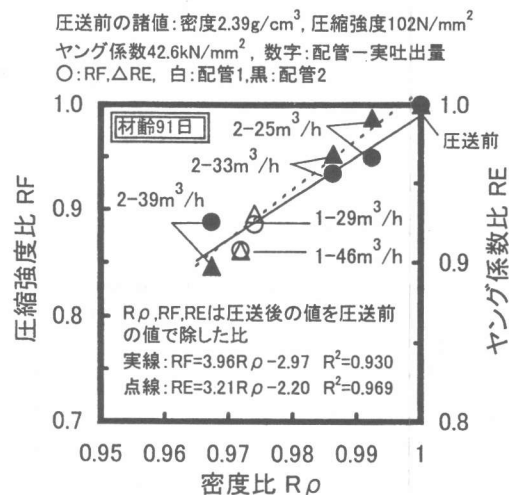


図-5 コンクリートの密度比と圧縮強度比及びヤング係数比の関係

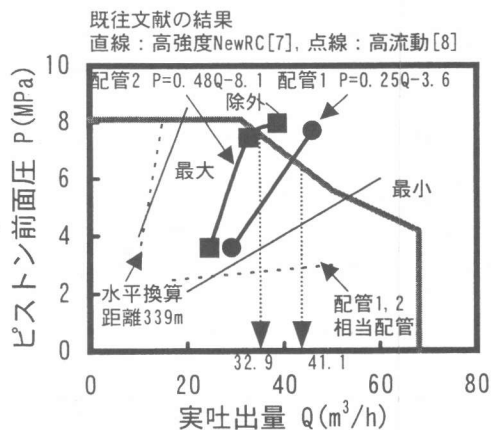


図-6 実吐出量とピストン前面圧の関係

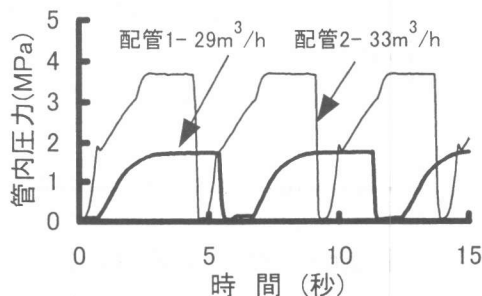


図-7 圧力波形の一例

と算定位置の圧力の関係から、その比率（以下、圧力比）を検討した研究はほとんど見られない。そこで、図-8に示すように、本実験で得られた圧力比以外に、既往文献^{7,9,10,11)}と筆者の一人が実施した実験⁸⁾の値から圧力比を計算し、吐出量との関係を調べた。圧力計 P1,P2 の圧力比は、吐出量 39m³/h までほぼ一定で、それぞれ、2.05, 2.20 であったが、吐出量 46m³/h では 0.5 程度の増加を示した。圧力算定位置までの配管が多少異なるが、概ね圧力計 P1,P2 間の値、すなわち、吐出量 39m³/h 以下では約 2.1 となる。高強度コンクリートの圧力比は、1.25 前後になる場合とそれよりもかなり大きくなる場合があり、コンクリートの流動特性、起点までの配管条件あるいはポンプ車の性能などの影響を受けるようである。

3.6 水平管の管内圧力損失

実吐出量と水平管の管内圧力損失の関係を、図-9に示す。管内圧力損失は、圧力計 P2-P3 間（上流側）と圧力計 P3-筒先間（下流側）で計算した値で、ピストン前面圧を圧送距離（実長）および土木学会の水平換算距離で除した概算値も併記した。フレキシブルホースは、これまでの研究⁸⁾から水平管と同等の管内圧力損失と見なして計算を行った。図-9に示す通り、実験結果は土木学会ポンプ指針案³⁾が示す一般コンクリートに比べてかなり大きく、配管 1 の上流側の値は建築学会ポンプ指針⁴⁾の超高強度コンクリートの 7K に相当する。また、同じ配管 1 であっても、下流側の値は上流側に比べて小さいものの、吐出量の影響は上流側や建築学会指針⁴⁾よりも大きいことがわかる。ピストン前面圧で求めた概算値は、配管 2 において水平換算距離で求めた概算 2 以外はすべて実測の管内圧力損失よりも大きくなった。

図-10は、圧送距離（実長）と管内圧力損失の関係を調べたものである。圧送距離の原点はポンプ車吐出口として前述の概算値を、配管 2 の下流側の値には圧力計 P4-P5 区間の概算値をプロットした。配管 2 の水平換算距離で求めた

概算値は、原点では極めて小さく、圧力計 P4-P5 間では負の値になることから除外した。図-10によれば、全体的に筒元の近いほど管内圧力損失が大きく、その傾向は吐出量が多いほど顕著である。ポンプ指針⁴⁾の資料では、コンクリートの粘性が高く、吐出量が多いほど、筒元近くの管内圧力が大きくなることを求めた解析結果を示している。解析結果は、e が底となる指数関数で管内圧力を表現しているが、管内圧力損失はその式を距離で微分したもので、

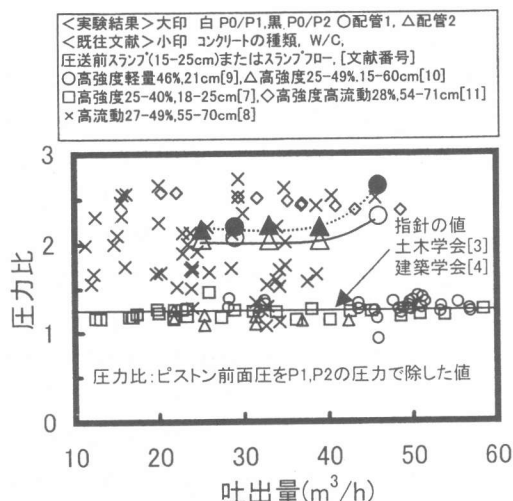


図-8 実吐出量と圧力比の関係

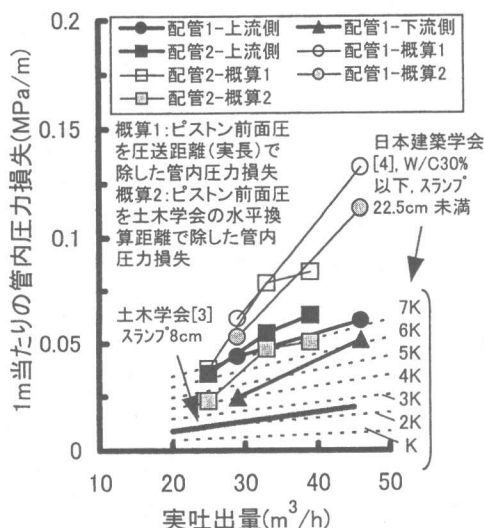


図-9 水平管における実吐出量と1m当たりの管内圧力損失の関係

図-10に示すように同様の関数で表される。測点が少ないので、近似式の精度は不十分ではあるが、曲線は実験結果を比較的表现している。筆者の一人は、高流動コンクリートの圧力測定位置に着目した換算係数の検討において、最も筒元近くの管内圧力損失が他の測定区間よりも大きくなる場合があることを把握している⁸⁾。今回の実験では、ポンプ圧送に伴うコンクリートの粘性の低下が顕著であるので、図-10に示した現象は、双方から検討する必要がある。

4. まとめ

圧送前のスランブフロー 55 ～ 60cm、水セメント比 25%の高強度コンクリートのポンプ圧送実験によって、以下のことが明らかになった。

- (1) 吐出量が 30m³/h を超えるポンプ圧送では、スランブフローが低下する傾向がある。
- (2) 配管、吐出量の条件に関わらず、ポンプ圧送によって V_{65} 漏斗流下時間が 10 秒程度小さくなる。すなわち、ポンプ圧送に伴って高強度コンクリートの粘性が低下する。
- (3) 空気量はポンプ圧送および吐出量の増加に伴って増える傾向があり、硬化コンクリートの圧縮強度およびヤング係数に大きく影響する。
- (4) 高強度コンクリートの水平管管内圧力損失は、通常のコンクリートよりも大きく、また、吐出量の影響も顕著である。
- (5) 高強度コンクリートは筒元近くの管内圧力および管内圧力損失が大きくなる傾向がある。特にポンプ車の選定に必要な圧力比（算定開始位置の圧送負荷に乗じる係数）は、通常のコンクリートよりもかなり大きくなる。

参考文献

- 1) 例えば、小松秀樹ほか：木曽川橋、揖斐川橋の設計施工、複合エクストラードズド橋、プレストレストコンクリート、Vol.41, No.2, pp.63-70, 1999
- 2) 例えば、西川和廣：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案、橋梁と基礎、Vol.31, No.8, pp. 64-72, 1997

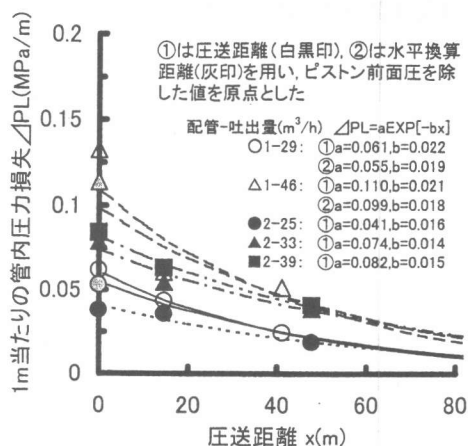


図-10 水平管における圧送距離と1m当たりの管内圧力損失の関係

- 3) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針（案）, 1985.11
- 4) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説, 1994.1
- 5) 谷口秀明ほか：高流動コンクリートのポンプ圧送による品質変化に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.9, No.1, pp.71-85, 1998
- 6) 土木学会：高流動コンクリート施工指針, 1998.7
- 7) 大村高慶ほか：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究, その3 ポンプ圧送による管内抵抗, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1283-1284, 1990
- 8) 谷口秀明ほか：高流動コンクリートの管内抵抗に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.1, pp.25-39, 1999
- 9) 和美広喜ほか：高強度軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, pp.225-230, 1988
- 10) 和美広喜ほか：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第466号, 11-20, pp.11-20, 1994
- 11) 樋口正典ほか：高強度・高流動コンクリートのポンプ圧送性, 土木学会高流動コンクリートシンポジウム論文報告集, pp.97-102, 1996