

# 論文 高流動コンクリートのポンプ圧送性の改善に関する研究

谷口秀明\*1・増田和機\*2・牛島 栄\*3

要旨：フライアッシュを30%混入した2成分粉体系高流動コンクリートのポンプ圧送性を調べ、その改善方法について検討した。ポンプ圧送に伴うスランプフローの低下を抑えるためには、コンクリートの粘性を小さくすること、荷卸しのスランプフローを65~70cm程度に大きくすること及びポンプ圧送助剤を使用することが効果的であることが明らかになった。また、前述の改善方法は管内圧力や管内圧力損失を小さくする効果もあるが、ベント管部分で圧力の逆勾配が生じる可能性があることやその管内圧力損失が大きくなることがわかった。

キーワード：ポンパビリティ、高流動コンクリート、フライアッシュ

## 1. はじめに

高流動コンクリートは、自己充填性を得るために必要な粉体量が普通コンクリートよりも多いことから、コンクリートの粘性が高くなり、ポンプ圧送時の管内圧力損失が大きくなると言われている[1]。高流動コンクリートの配合は室内試験練り結果から良好な流動性状を得る配合を決めているが、施工の段階になって室内試験で決めたコンクリートがポンプ圧送によってスランプフローの低下などの問題を生じ、配合の修正を必要とする場合がある。

筆者らは、これまでにフライアッシュの利用拡大を目的にフライアッシュを多量に用いた高流動コンクリートの研究開発を行い、構造物への適用を検討してきた[2],[3]。土木学会コンクリートのポンプ施工指針(案)(以下、指針案とする。)では、フライアッシュをセメントの一部に置き換えたコンクリートは、そうでないものに比べてポンプ圧送性が良くなるとされる。しかし、フライアッシュを多量に混入した場合には、フライアッシュの比重が他の材料よりも小さいことから、ポンプ圧送に伴うフレッシュ性状の変化や発生する管内圧力損失などがこれまでのコンクリートと異なることが予想される。

本論文は、ポンプ圧送実験によってフライアッシュを30%混入した粉体系高流動コンクリートのポンプ圧送による品質変化を調べ、その改善方法を検討した内容である。

表-1 使用材料

材料名	種類	成分、産地、物性	記号
水	地下水		W
結合材	普通セメント	比重3.16、比表面積3320cm <sup>2</sup> /g	C
	フライアッシュ	常磐共同火力 なこそ7号産 夏期実験(配合1~4): 比重2.10、比表面積2710cm <sup>2</sup> /g 冬期実験(配合A): 比重2.05、比表面積2930cm <sup>2</sup> /g	F
細骨材	山砂	霞ヶ浦産、表乾比重2.57、吸水率2.06%、F.M 2.55	S
粗骨材	砕石 2005	筑波産、表乾比重2.70、実積率60.4%	G
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテルと架橋ポリマーの複合体	SP
	空気量調整剤	変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤	AE
	ポンプ圧送助剤	ポリアルキレングリコール系の複合体	PA

\*1 (株) 青木建設 研究所 材料研究室 副主任研究員 (正会員)

\*2 東京電力(株) 電力技術研究所 構造研究室 主任研究員 (正会員)

\*3 (株) 青木建設 研究所 材料研究室 室長、工博 (正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1 使用したコンクリートの条件

コンクリートの使用材料及び配合を、それぞれ、表-1、表-2に示

す。実験に使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメントとフライアッシュを粉体として用いた2成分粉体系高流動コンクリートである。フライアッシュの置換率は質量比で30%とし、モルタル中の細骨材の比率を40%、空気量を除いたコンクリート容積に対する粗骨材容積を実積率の50%とした。

表-2に示した配合Aのコンクリートは冬期に、それ以外のコンクリートは夏期にポ

ンプ圧送実験を行った。冬期と夏期でフライアッシュの比重に違いはあるが、表中の配合3以外の基本配合は同一である。配合2と配合3は、配合1に対してそれぞれ高性能AE減水剤の使用量、単位水量を増やし、目標とするスランプフローを大きくした。また、配合4には配合2に対してポンプ圧送性の改善を目的に開発された特殊混和剤[4]（以下、ポンプ圧送助剤と称す。）を添加した。

コンクリートの品質は表-3に示す試験を実施して確認した。スランプフローは表-2の2通り、 $V_{e.5}$ 漏斗（以下、V漏斗とする。）流下時間は5秒程度、また空気量は5%を目標値とした。

### 2.2 ポンプ圧送条件

配管は、図-1に示すように125A(5B)の水平管、フレキシブルホース、ベント管及び垂直管を組み合わせた。最大吐出量 $100\text{m}^3/\text{hr}$ の横形単動複列油圧ピストン式ポンプ車を使用し、ポンプ車の設定（目標）吐出量 $10\sim 30\text{m}^3/\text{hr}$ を中心に高圧で圧送を行った。

ストローク数は出力された圧力波形から計算した。ピストン前面圧はポンプ車の油圧計から主油圧を記録し、その値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。使用したポンプ車の油圧シリンダーは $\phi 105\text{mm} \times 1600\text{mm}$ で、ピストンは $\phi 205\text{mm} \times 1600\text{mm}$ である。また、事前に実施した実験結果から容積効率が約0.9程度になったことから、実吐出量は理論吐出量に0.9を乗じた値とした。

表-2 コンクリートの配合

配合名	実験期とコンクリート温度	スランプフローの目標値 (cm)	質量容積の表示区別	W/B w/b (%)	s/a (%)	単位量 (上段 $\text{kg}/\text{m}^3$ , 下段 $\text{g}/\text{m}^3$ )				混和剤の使用量 (BxWt%)					
						W	B		S	G	S	P	A	E	P
							C	F							
A	冬期 15℃	60~65	質量	27.3		163	419	179	712	783	1.45	0.003	0		
			容積	74.0	48.9	163	132	88	277	290					
			質量	27.0		163	423	181	712	783					
			容積	74.0	48.9	163	134	86	277	290					
2	夏期 30℃	65~70	配合1と同じ									1.75	0.015	0	
3			質量	28.4		168	413	177	712	783	1.70	0.015	0		
4			容積	78.1	48.9	168	131	84	277	290	1.40	0.015	0.5		
配合1と同じ															

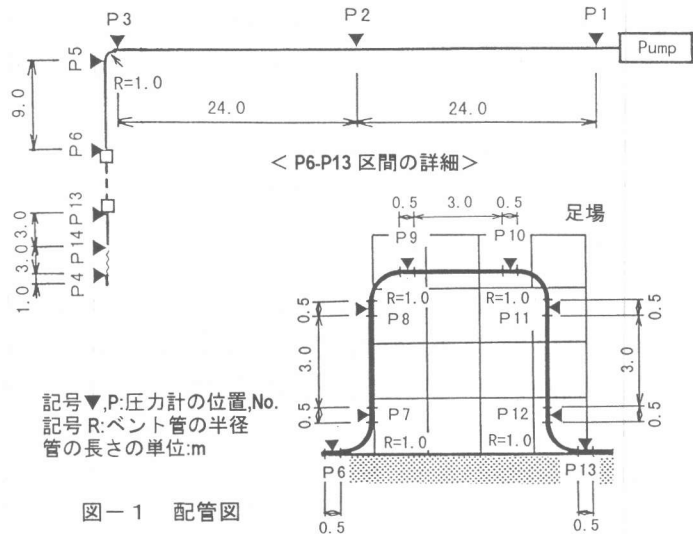


表-3 コンクリートの品質確認試験内容

試験項目	測定項目・準拠規準・試験条件
スランプフロー試験	スランプフロー[1]
$V_{e.5}$ 漏斗試験	流下時間[1]
空気量試験	空気量
加圧ブリーディング試験	脱水量、JSCE-F502-1990に準拠
圧縮強度試験	標準水中養生、材齢28日

### 3. 実験結果及び考察

#### 3. 1 ポンプ圧送によるコンクリートの品質変化

##### (1) フレッシュ性状

ポンプ圧送によるフレッシュ性状の変化を図-2に、実吐出量と圧送によるスランブフローの変化量の関係を図-3に示した。なお、ポンプ圧送は事前の経時変化試験の結果から最も安定した時間内に実施した。圧送後のスランブフローはすべて荷卸しの値よりも低下しており、特にスランブフローが約60cmの場合には配合Aが約20cm、配合1でも約15cmの低下が見られる。一方、スランブフローが70cm前後の配合2などの低下は5~10cmであった。既往文献[5]においても圧送前のスランブフローが大きいほど、その低下量が小さくなることを論じており、材料分離を生じない範囲でスランブフローの目標値を大きくすることはポンプ圧送性改善の有効な手段の一つと判断される。

配合Aは配合1及び配合2と配合条件がほぼ同一でありながら、スランブフローの低下が顕著である。双方の違いはV漏斗流下時間からコンクリートの粘性であると推測される。V漏斗流下時間としては数秒の違いであるが、フライアッシュを多量に使用したコンクリートではその影響が大きいようである。配合2と配合3にはほとんど差が見られず、今回の実験では目標スランブフローを5cm大きくした効果はその手段の違いよりも顕著である。さらにポンプ圧送助剤を用いた配合4は吐出量約30m<sup>3</sup>/hrで10cm近くの低下が見られるものの、配合2や配合3に比べれば明らかに圧送によるスランブフローの低下が抑制されている。

ところで、吐出量の影響は、その増加に伴ってスランブフローの変化が大きくなるものがあるが、15~20m<sup>3</sup>/hrでは両者の関係が不明確である。使用したポンプ車は100m<sup>3</sup>/hrまで圧送できるが、下限となる設定吐出量10m<sup>3</sup>/hrでの圧送は却ってスランブフローの低下を招くのではないかと考えられる。

V漏斗流下時間は配合Aにおいて若干大きくなっているが、夏期の4配合には圧送前後の変化が全く見られなかった。空気量についてはポンプ圧送によって0.5%前後の増加傾向が認められる。事前に行った室内配合選定試験では高性能AE減水剤使用量や単位水量を減じると、スランブフローは小さく、V漏斗流下時間は大きくなった。また、空気量調整剤によって空気量を3~7%の範囲で増

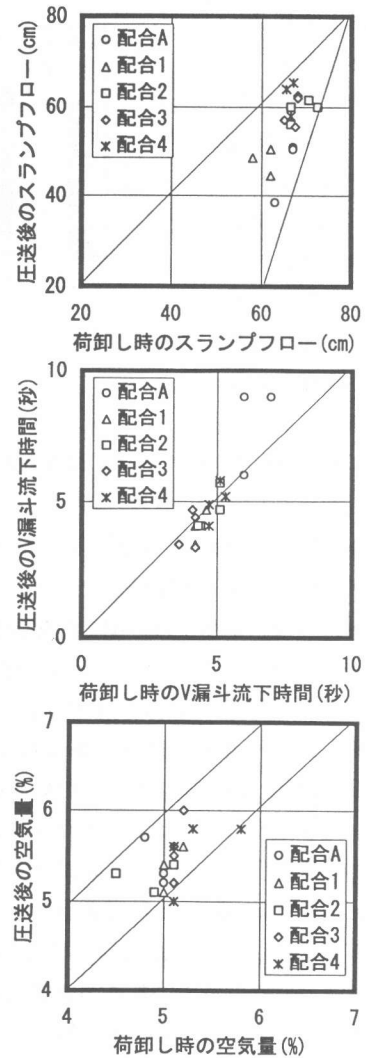


図-2 ポンプ圧送によるフレッシュ性状の変化

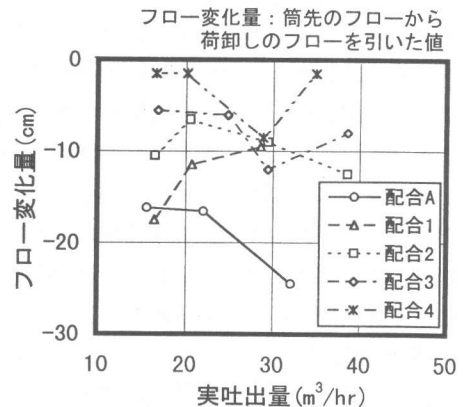


図-3 実吐出量とフロー変化量の関係

減した場合にスランブフローやV漏斗流下時間に顕著な違いは見られなかった。よって、今回の結果は、ポンプ圧送特有の現象と考えられる。

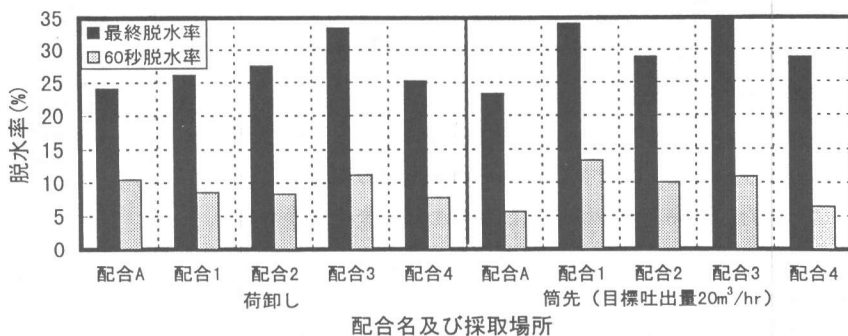


図-4 配合及び採取場所の違いと脱水率の関係

### (2) 加圧ブリーディング試験の脱水率

図-4及び図-5は、荷卸し並びに設定吐出量 $20\text{m}^3/\text{hr}$ 時の筒先で採取した試料の加圧ブリーディング試験結果である。荷卸しの各配合の最終脱水率は、配合A、配合4、配合1、配合2、配合3の順で大きくなっている。配合2と配合3の単位水量差はわずか $5\text{kg}/\text{m}^3$ であるが、最終脱水率は10%近く異なる。また、配合1と配合2の結果から、高性能AE減水剤の使用量を増やし、スランブフローを大きくした方が加圧脱水しやすいことがわかる。さらに、配合Aと配合1は高性能AE減水剤の使用量だけではなく、V漏斗流下時間に違いがあ

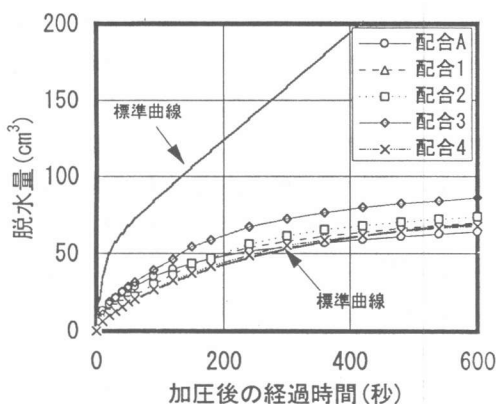


図-5 荷卸し時に採取したコンクリートの加圧時間と脱水量の関係

り、コンクリートの粘性の影響も示唆される。一方、ポンプ圧送助剤を使用した配合4は配合2よりも小さいことから、その添加によってコンクリートの保水性能を高められたことが推測される。

次に各配合の荷卸しと筒先の結果を比較すると、配合Aを除いて筒先の最終脱水率が荷卸しの値よりも大きいことがわかる。ポンプ圧送中に水の供給はなく、また、採取した配合1から配合4の試料においてモルタルあるいはペーストの比率がすべて大きくなる可能性も低い。よって、使用したコンクリートは、ポンプ圧送によって加圧脱水しやすい性状に変化したことになる。その性状の変化及び空気量の増加の原因を調べる目的で硬化コンクリート中の細孔径分布を測定したところ、いずれの配合においてもポンプ圧送後に細孔径 $0.36\sim 1.12\mu\text{m}$ の細孔容積が増加していることが確認された。このような性状変化が加圧脱水量の増える原因であると推察される。

図-5のように配合3以外のコンクリートは、一般にポンプ圧送性が良好と判断される領域を表す2本の標準曲線の下限にほぼ重なっている。圧送によるスランブフローの低下と合わせて考えれば、ポンプ圧送助剤を使用しない場合には下限の曲線よりも良好とされる領域側に加圧脱水される方が良いものと判断される。

### (3) 圧縮強度

表-4に圧縮強度試験結果を示す。ポンプ圧送によってコンクリートの空気量が1%以下の範囲で大きくなることから、筒先の圧縮強度は荷卸しよりも小さくなることが予想されたが、必ずし

もその傾向は見られない。フレッシュ性状の結果ではスランブフローが大きく、V漏斗流下時間の小さな配合がポンプ圧送性に優れるという結果を示した。しかし、圧縮強度の結果では最もスランブフローの低下の大きかった配合Aが荷卸しと筒先の強度差が小さい。よって、硬化後の品質確保の面から、フレッシュコンクリートの目標スランブフローを高く、またV漏斗流下時間を短くすることには限界があるものと考えられる。

### 3. 2 管内圧力及び管内圧力損失

#### (1) 管内圧力

図-6に示したグラフは、配合1と配合2のコンクリートを圧送した場合の各圧力計で測定した管内圧力を比較したものである。また、配合2以外の配合A、配合3及び配合4との近似式も図上に付記した。

配合1とその他の配合の管内圧力は極めて高い相関で直線関係を示している。配合1に対して高性能AE減水剤の使用量を増加させてスランブフローを大きくした配合2は0.9倍、単位水量を $5\text{kg}/\text{m}^3$ 増やして同様にスランブフローを大きくした配合3は0.8倍に相当し、管内圧力では配合2と配合3の違いが明らかである。また、荷卸しのV漏斗流下時間でわずか1~2秒の違いであっても配合Aは配合1の1.8倍も大きく、スランブフローの低下との関係が想像できる。圧送可能距離の延長や管の損傷防止を考えれば、管内圧力は小さい方が良い。つまり、配合1は配合Aに、配合2や配合3は配合1に対してポンプ圧送性の改善を図れることになる。ポンプ圧送助剤を使用した場合には、同じ目標スランブフローの配合2よりも大きく、その意味では効果的でない。

ところで、全体の管内圧力が小さいコンクリートが必ずしもポンプ圧送性に有利であると言いき難い面もある。図-7は圧力計P3からP7までの配管距離と管内圧力の関係を示したものであるが、配合3と配合4においてはP5-P6間に圧力の逆勾配が生じ、ベント管部分の圧力変化が顕著である。よって、コンクリートの配合は、フレッシュ性状のみならず、このような管内圧力にも配慮して選定する必要があるものと考えられる。

#### (2) 管内圧力損失

吐出量と管内圧力損失の関係を、図-8に示す。なお、管内圧力損失とは単位長さ当たりの管内圧力損失を指すことにする。配合1から配合3の水平管の管内圧力損失は、指針案に示されたスランブ $12\text{cm}$ の普通コンクリートと同程度である。ポンプ圧送助剤を使用した配合4は吐出量が

表-4 圧縮強度試験結果

配合	荷卸しの 圧縮強度 (MPa)	筒先		筒先と荷卸 しの強度 差 (MPa)
		吐出货量 ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	圧縮強度 (MPa)	
A	46.0	10	47.7	1.6
		20	45.1	-0.9
		30	45.3	-0.7
1	47.7	10	41.8	-5.9
		20	43.6	-4.1
		30	47.8	0.1
2	44.4	10	49.4	5.0
		20	49.7	5.3
		30	41.3	-3.1
		50	50.3	5.9
3	44.8	10	47.7	2.8
		20	39.6	-5.2
		30	39.3	-5.5
		40	42.4	-2.4
4	44.5	20	53.1	8.6

<近似式> 配合1: x, その他: y  
 配合A  $y=1.83x-0.08$   $R^2=0.968$   
 配合2  $y=0.91x+0.15$   $R^2=0.996$   
 配合3  $y=0.83x+0.02$   $R^2=0.989$   
 配合4  $y=0.99x-0.17$   $R^2=0.978$

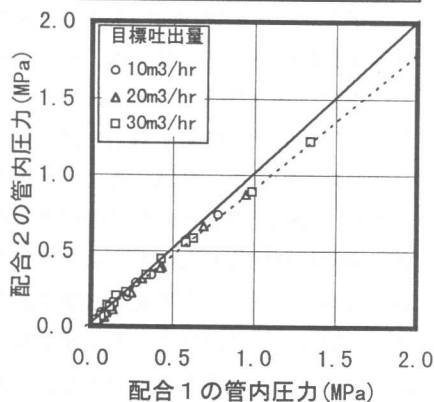


図-6 同一箇所における管内圧力の比較

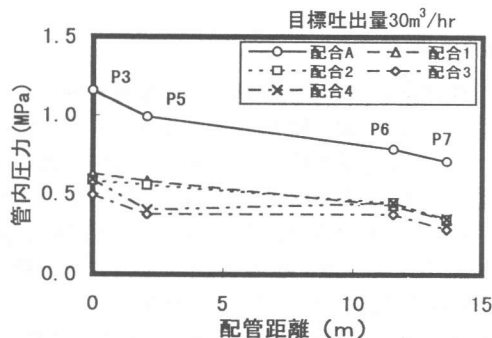


図-7 配管距離と管内圧力の関係

用した配合4は、吐出量が小さい場合には前述の配合と同程度であるものの、吐出量の影響が他の配合よりも大きいことがわかる。ところが、配合Aは吐出量が小さい場合でも他の配合の1.5倍、約30m<sup>3</sup>/hrでは配合1などの3倍程度に達している。これらの結果から、スランブフローの増加及びV漏斗流下時間の低下は管内圧力損失の面からもポンプ圧送性の改善に有効であると判断される。なお、ポンプ圧送助剤の使用に関しては、吐出量を大きくする場合に配管計画上の留意が必要と考えられる。

一方、図-8 (b)に示したベント管の管内圧力損失では、配合1及び配合2は水平管と同様に他の配合よりも小さいが、単位水量の多い配合3は両者よりも大きい。また、水平管では配合Aの管内圧力損失が他の配合よりも極めて大きかったが、ベント管ではポンプ圧送助剤を使用した配合4の方が顕著である。

4. まとめ

本実験によって得られた結論を、以下に示す。

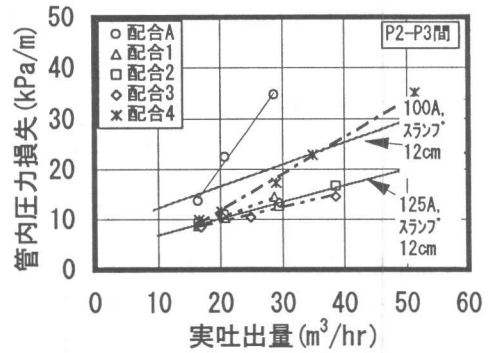
- (1) 材料分離を生じない範囲でコンクリートのスランブフローを65~70cmにすること及びV漏斗流下時間を小さくすることは、ポンプ圧送性を改善する有効な手段である。
- (2) ポンプ圧送助剤を使用することによってスランブフローの低下を抑制することができる。ただし、管内圧力損失は特に吐出量が大い場合にそれを使用しないものよりも大きくなるのでポンプ計画上の考慮が必要である。
- (3) ベント管の部分では圧力の逆勾配が生じることや管内圧力損失が大きくなることがある。

謝辞

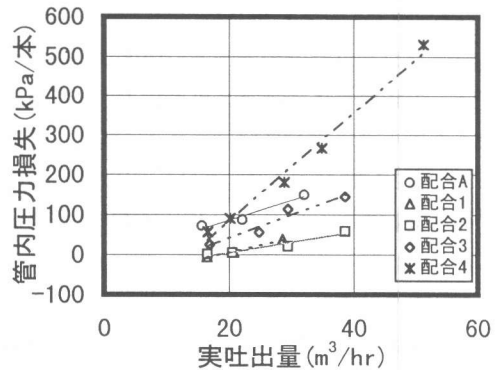
実験に際し、足利工業大学毛見虎雄教授にご指導、ご助言を、また、(株)ポゾリス物産の皆様には実験へのご協力を賜りました。ここに、深く感謝の意を称します。

参考文献

[1] 超流動コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ), 1994  
 [2] 谷口秀明, 増田和機, 原田和樹, 牛島 栄: フライアッシュと各種分離低減剤を用いた高流動コンクリートの基礎性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 209-214, 1995  
 [3] 谷口秀明, 増田和機, 酒井芳文, 牛島 栄: 高流動コンクリートのトンネル巻き立て施工実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 183-188, 1996  
 [4] 松尾茂美, 太田 晃, 植田 実: ポンプ施工用セメント添加剤の作用効果, 土木学会第50回年次学術講演会V部門, pp. 116-117, 1995  
 [5] 明石峰子, 毛見虎雄, 藤井和俊, 小長光公和: 高流動コンクリートの実大部材へのポンプ圧送に関する実験研究, 日本建築学会技術報告集, 第1号, pp. 75-81, 1995



(a) 水平管の場合



(b) 水平に置いたベント管の場合

図-8 実吐出量と管内圧力損失の関係