

コンクリートの性能とポンプ圧送性に関する評価

その１ 管内圧力損失の測定

Evaluation of Pumpability and Performance of Concrete

Part.1 Measurement Result of Pumping Pressure Loss

高見 錦一* 山崎 順二*²

要 旨

呼び強度が30～60で、スランブ管理を行うコンクリートを用いてポンプ圧送実験を行った。その結果からフレッシュコンクリートの性状とポンプ圧送性の関連を検討し、吸込み効率推定式と圧力損失推定式を提案した。また実施工において、4工場から出荷された呼び強度36のコンクリートのポンプ圧送にあたり、ポンプ主油圧を計測して提案した圧力損失推定式の検証を行い、その精度を確認した。

キーワード：コンクリート性能／ポンプ圧送性／圧送負荷／圧力損失／吸込み効率

1. はじめに

近年、建物の高層化に伴い設計基準強度の高いコンクリートが使用されるようになってきている。強度の高いコンクリートは粘性が高いため、一般に、ポンプ圧送時の管内圧力損失が大きくなる傾向にある。

また、普通強度のコンクリートにおいても、骨材の枯渇化に対応するため、改良砕砂など様々な種類の骨材が使用されており、調合条件や使用材料によってはポンプ圧送性が大きく異なる場合がある。

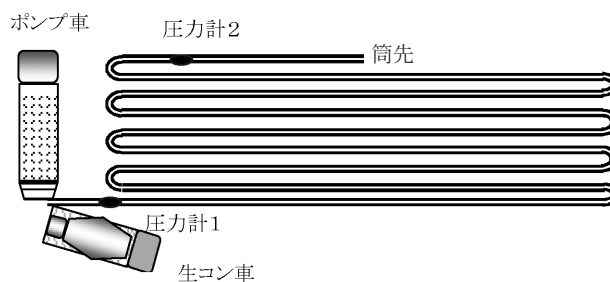
このような状況において、打込むコンクリートの圧送性を評価してポンプ車の機種を選定する必要があるが、管内圧力損失の設定や評価方法に関して不明点が多く、施工条件に対して必ずしも適切な圧送計画がなされていないのが現状である。

そこで、実大規模のポンプ圧送実験（フィールド実験）を行い、スランブ管理を行う比較的強度の高いコンクリートに関して、圧送前後のコンクリート品質の変化を調査するとともに、コンクリートの調合条件や使用骨材の違い、フレッシュコンクリートの性状が圧送時の水平管1m当たりの管内圧力損失（以下K値と記す）に及ぼす影響を調査し、調合条件やフレッシュコンクリートの性状に応じたK値の推定式を提案した。また、実施工時に圧送計測（実施工計測）を行ない、その提案式の確認を行った。ここでは、実験概要と圧力損失について述べる。

2. フィールド実験

2.1 実験概要

フィールド実験では、水平換算長が300mとなるように125Aの圧送管を配管して、水セメント比・単位水量・骨材種別などを変化させた14種類のコンクリートを圧送した。フィールド実験の配管状況を図－1に、ポンプ車の仕様を表－1に示す。また、実験に用いたコンクリートの調合を表－2に、荷卸時のフレッシュコンクリートの性状を表－3に示す。なお、単位水量は高周波加熱乾燥法で測定した。



図－1 フィールド実験配管状況

表－1 使用ポンプ車。配管の仕様

ポンプ車機種	PY80-26H
圧送仕様	標準
ピストン形状 (mm)	φ 165×1650
最大吐出圧力 (MPa)	8.3
ブーム使用の有無	なし
配管径	125A
圧送距離(水平換算長さ)(m)	300
圧送高さ (m)	0

*建築研究グループ

*²大阪本店建築部技術グループ

表－２ 使用したコンクリートの計画調合

記 号	呼び強度	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	かさ容積 (m ³ /m ³)	プラント	骨 材 種 別	
									細 骨 材	粗骨材
F-K30-180A	30	18.0	4.5	50.0	180	360	0.569	K	改良砕砂	改良碎石
F-K30-180B	30	18.0	4.5	50.0	180	360	0.569	K	改良砕砂 7 + 石灰砕砂 3	改良碎石
F-K36-185A	36	21.0	4.5	44.0	185	420	0.550	K	改良砕砂	改良碎石
F-K36-170A	36	21.0	4.5	44.0	170	386	0.580	K	改良砕砂	改良碎石
F-S30-180A	30	18.0	4.5	50.0	180	360	0.600	S	川砂 7 + 砕砂 3	碎石
F-S30-180B	30	18.0	4.5	50.0	180	360	0.600	S	砕砂 6 + 石灰砕砂 4	碎石
F-S30-180C	30	18.0	4.5	50.0	180	360	0.600	S	砕砂 6 + 石灰砕砂 4	石灰碎石
F-S36-185C	36	21.0	4.5	44.0	185	420	0.571	S	砕砂 6 + 石灰砕砂 4	石灰碎石
F-T24-180	24	18.0	4.5	57.0	180	316	0.593	T	山砂 7 + 砕砂 3	碎石
F-T30-180	30	18.0	4.5	50.0	180	360	0.600	T	山砂 7 + 砕砂 3	碎石
F-T36-185	36	21.0	4.5	44.0	185	420	0.571	T	山砂 7 + 砕砂 3	碎石
F-T36-170	36	21.0	4.5	44.0	170	386	0.595	T	山砂 7 + 砕砂 3	碎石
F-T45-185	45	21.0	4.5	36.0	185	514	0.579	T	山砂 7 + 砕砂 3	碎石
F-T60-175	60	23.0	3.0	28.0	175	625	0.555	T	山砂 7 + 砕砂 3	碎石

表－３ フレッシュコンクリートの試験結果

記 号	スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	単位容積 重量 (t/m ³)	CT (℃)	単位水量 (kg/m ³)
F-K30-180A	19.5	28.5	4.3	2.322	27.0	180.6
F-K30-180B	19.0	30.8	4.3	2.306	27.0	166.8
F-K36-185A	22.0	37.5	5.0	2.301	27.0	188.4
F-K36-170A	21.5	38.3	4.5	2.306	27.0	167.9
F-S30-180A	20.0	34.5	5.7	2.274	28.0	178.1
F-S30-180B	17.0	30.0	5.5	2.283	28.0	187.4
F-S30-180C	20.5	34.5	5.0	2.312	27.0	179.1
F-S36-185C	19.5	31.5	5.2	2.278	28.0	176.4
F-T24-180	18.0	29.3	4.4	2.293	25.0	175.6
F-T30-180	18.0	30.3	4.8	2.232	25.0	173.7
F-T36-185	20.5	34.5	5.1	2.314	25.0	179.1
F-T36-170	19.0	31.8	4.5	2.313	27.0	171.8
F-T45-185	20.0	34.5	3.9	2.322	27.0	186.6
F-T60-175	25.5	51.5	3.6	2.371	29.0	180.6

2.2 圧力測定概要

圧力測定の測定項目と測定方法を表－４に示す。計画吐出量を10、20、30、40m³/hの4水準とし、それぞれの水準で、管内圧力、ストローク時間を測定した。フラッシュダイアフラム型圧力計を配管根元と配管先端に取り付け、動ひずみ計を用いて0.2s間隔で管内圧力を計測した。なお、曲がり管を直管の3倍の長さとした圧力計間の換算長さは282mである。

生コン車1台の圧送に要した全ストローク回数を測定し、生コン車1台の積載量(4.5m³)をシリンダ容積に全ストローク回数を乗じた値で除することで吸込み効率(実吐出量/理論吐出量)を求めた。

また、ピストンの1ストローク時間から1時間当たりのストローク回数を算出し、シリンダの容積を乗じて理論吐出量を算出した後、その値に吸込み効率を乗じて実吐出量を算出した。

2.3 圧力測定結果

吸込み効率の測定結果を図－２に示す。呼び強度・単位水量などで異なるが、吸込み効率は概ね0.8～0.9であった。

生コンプラントごとに実吐出量と測定した圧力損失の関係を図－３に示す。測定結果の一次近似式の傾きとY切片の一覧を表－５に示す。これらの結果から、呼び強度が大きくなると勾配が大きくなり、切片も増大していることが分かる。

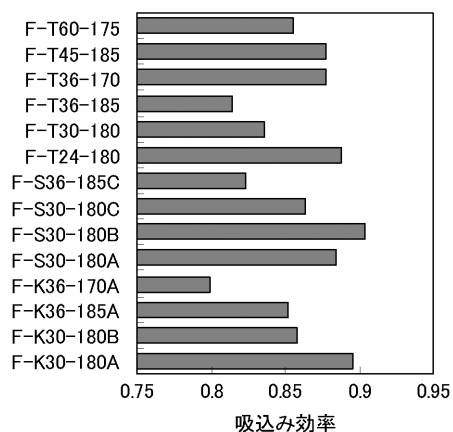
図－４に、同一呼び強度、同一単位水量における実吐出量と圧力損失の関係を示す。

表－４ 圧力測定に関する項目

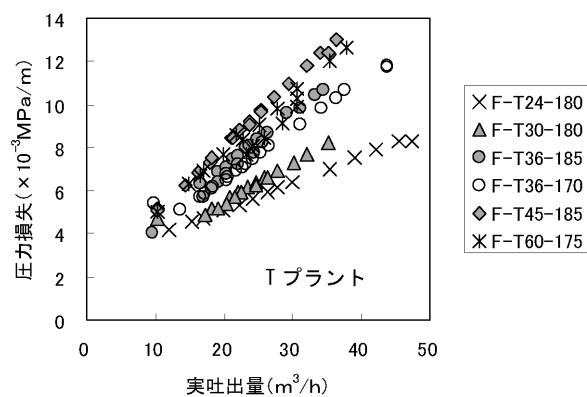
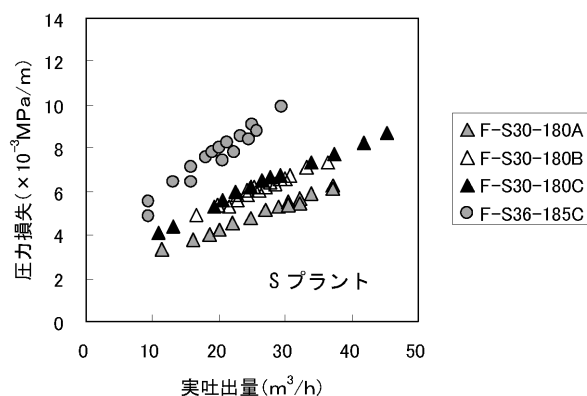
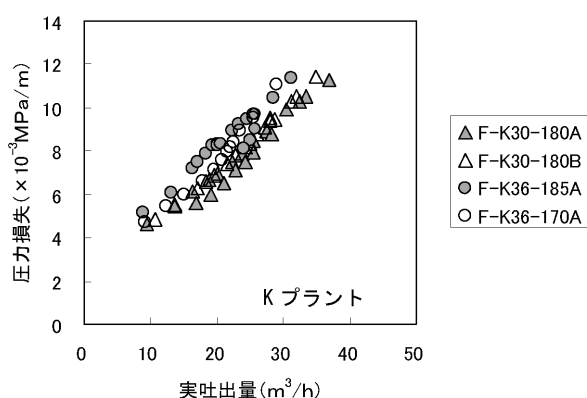
測 定 項 目		測 定 方 法
①	管内圧力	フラッシュダイアフラム型圧力計
②	ポンプ主油圧	ポンプ車の主油圧計を目視
③	ストローク時間	1ストロークに要する時間をストップウォッチで計測
④	生コン車1台の圧送に要した全ストローク数	カウンター

プラントによる差異は大きいですが、骨材種別による差は小さく、明確な差異は認められなかった。

図－５に、同一呼び強度で単位水量の異なる場合の実吐出量と圧力損失の関係を示す。同じ種類の骨材で同一プラントの場合、単位水量の大きなものの方が若干大きな圧力損失を示した。このことは、コンクリートの単位水量が大きくなると単位セメント量が多くなり、コンクリートの粘性が大きくなったためと思われる。



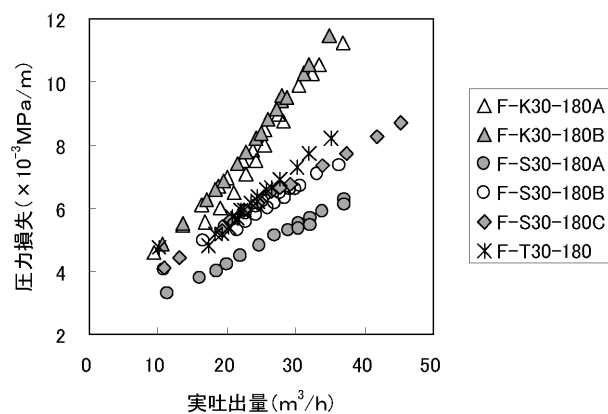
図－２ 吸込み効率測定結果



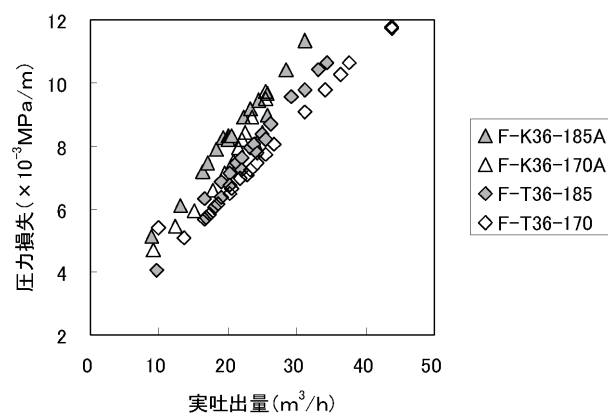
図－３ プラントごとの圧力損失

表－５ 実吐出量と圧力損失の近似式における傾きと切片

記 号	傾 き	Y切片
F-K30-180A	0.262	1.58
F-K30-180B	0.275	1.64
F-K36-185A	0.282	2.50
F-K36-170A	0.325	1.19
F-S30-180A	0.114	1.96
F-S30-180B	0.131	2.71
F-S30-180C	0.132	2.85
F-S36-185C	0.223	3.25
F-T24-180	0.123	2.67
F-T30-180	0.162	2.37
F-T36-185	0.271	1.47
F-T36-170	0.216	2.31
F-T45-185	0.302	2.02
F-T60-175	0.265	2.23



図－４ 使用骨材種別による圧力損失



図－５ 単位水量による圧力損失

2.4 吸込み効率の推定

吸込み効率の変化の要因としてコンクリートの調合条件から水セメント比と単位セメント量、フレッシュコンクリートの性状からスランプと単位容積質量が挙げられる。これらの要因と吸込み効率との関係について、重回帰分析を行った。求めた重回帰式を(1)式に示す。

$$\eta_v = 0.0105 (W/C) + 0.0009 (C) - 0.0089 (SL) + 0.4765(W_0) - 0.9167 \quad (1)$$

ここに η_v : 吸込み効率
 W/C : 水セメント比(%)
 C : 単位セメント量 (kg/m³)
 SL : スランプ(cm)
 W_0 : 単位容積質量 (kg/l)

図-6 に測定値と(1)式から求めた値との関係を示す。相関係数は0.740、その誤差の平均値は0.018であり、概ね正しく推定できている。

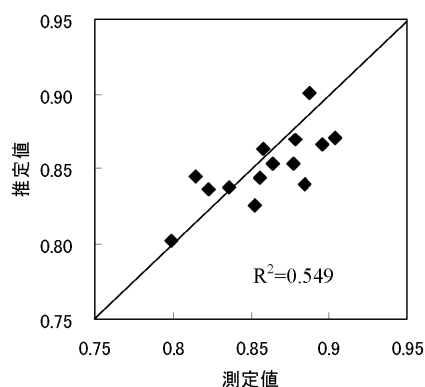


図-6 吸込み効率の測定値と推定値

2.5 圧力損失の推定

圧力損失は、(2)式に示すように、実吐出量による一次式で一般に示される。表-5 に示した傾き(a)およびY切片(b)とコンクリートの調合条件・フレッシュコンクリート性状との関係の一例を図-7 に示す。傾きは、 W/C ・粗骨材かさ容積・空気量の増大によって減少し、単位セメント量・スランプ・単位容積質量の増大によって増加する傾向が見られた。切片は、スランプ・単位容積質量の増大によって若干減少する傾向が見られたが、その他には、直線的な傾向は認められなかった。

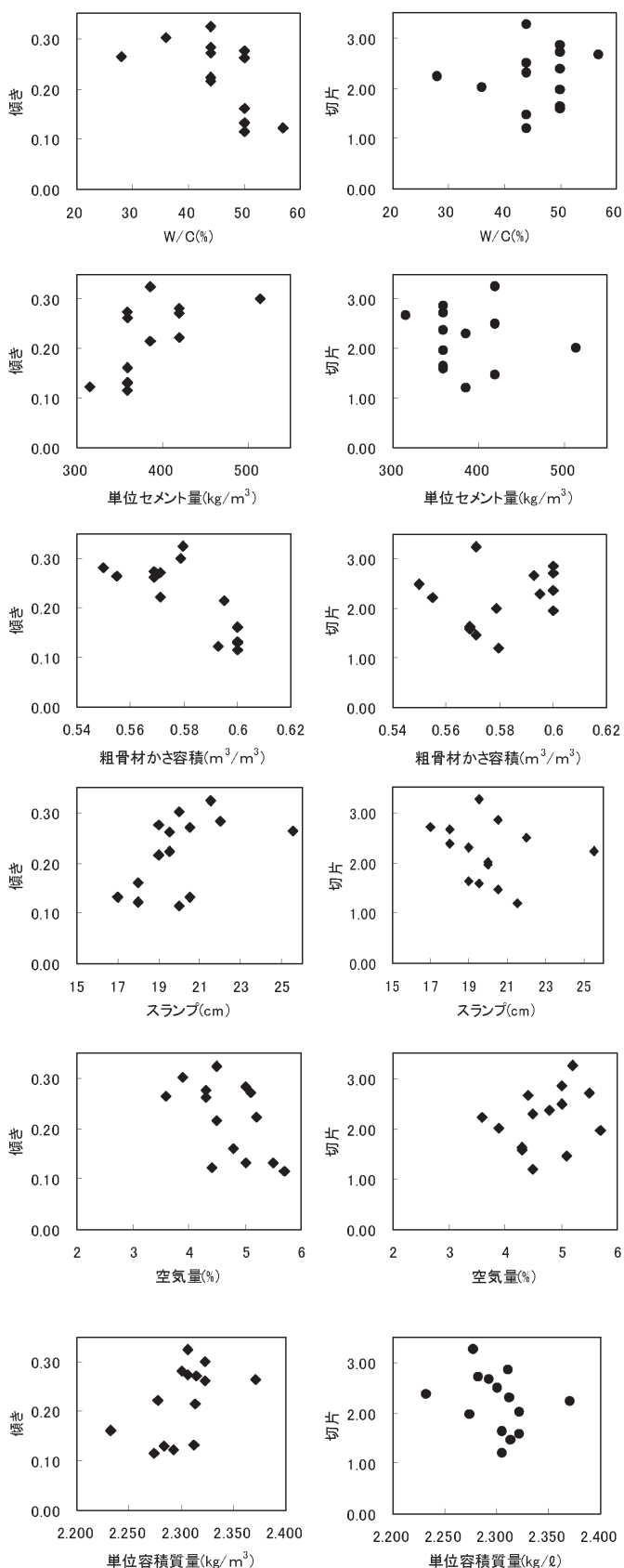


図-7 調合・性状と圧力損失の関係

圧力損失を決定する要因として、ある程度の推定精度を確保しつつ、簡易に推定する手法を提案することを主眼において、コンクリートの調合条件からは、水セメント比と単位セメント量を、フレッシュコンクリートの性状からはF/S（フロー値をスランプ値で除した値）と単位容積質量を代表要因として選択した。それらの要因と傾き(a)および切片(b)との関係について重回帰分析を行なった。求めた重回帰式を(3)式、(4)式に示す

$$k = aQ_d + b \quad (2)$$

k：圧力損失（kPa/m）

Q_d：実吐出量（m³/h）

a、b：重回帰分析による実験定数

傾き：a

$$a = 2.604 - 0.0208W/C - 0.00095C - 0.317F/S - 0.221W_0 \quad (3)$$

切片：b

$$b = -5.870 + 0.112W/C + 0.00932C + 0.235F/S - 0.525W_0 \quad (4)$$

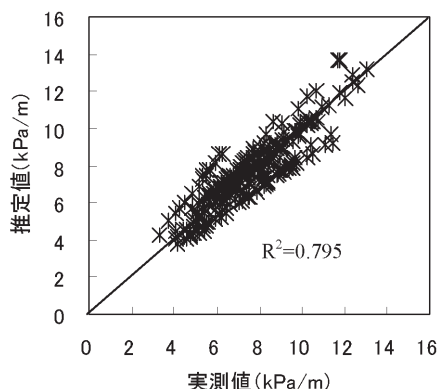
W/C：水セメント比（%）

C：単位セメント量（kg/m³）

F/S：フロー値をスランプ値で除した値

W₀：単位容積質量（kg/ℓ）

圧力損失の実測値と重回帰分析で求めた係数を用いて(2)式で算定した圧力損失推定値との関係を図－8に示す。相関係数は0.891、誤差の平均値は0.7kPa/mで、誤差の割合の平均値は約10%であり、概ね正しく推定できる。



図－8 圧力損失の推定値と実測値

3. 実施工計測

3.1 計測概要

実施工現場において簡易な計測を行い、圧力損失提案式から求めた値と実測値を比較検討した。計測は、地上躯体打設時に4回実施した。表－6にコンクリート打設概要を、表－7に使用したコンクリートの計画調合を示す（E1～E4）。全てブーム車を使用してコンクリート打設を行った。コンクリートの調合は、4回ともほぼ同様の調合であるが、製造プラントがそれぞれ異なるため、使用骨材種別や粗骨材かさ容積が異なっている。

計測は、荷卸時にフレッシュコンクリートの試験を実施した同一生コン車打設中に、3～4水準の打設速度でポンプ圧送してコンクリートポンプの主油圧などを測定した。計測項目は、コンクリートのフレッシュ試験の他に、ポンプ主油圧、1ストローク時間および生コン車1車の圧送に要した全ストローク回数とした。

圧力損失は、ポンプ車の主油圧からピストン前面圧を求め、ポンプ車の内部圧力損失と打設高さによるコンクリート自重による圧力を減じ、ブームと打設階水平配管の水平換算長さで除して算出した。また、実吐出量は、フィールド実験と同様にストローク時間とシリンダ容積より理論吐出量を求め、それに吸込み効率を乗じて算出した。

表－8に荷卸時に採取した試料について行ったフレッシュコンクリートの試験結果を示す。コンクリートは日内でフレッシュ性状に変動はあるが、規定値以内であり概ね良好なコンクリートであった。

表－6 実施工コンクリート打設概要

	実施工計測			
	E1	E2	E3	E4
ポンプ車機種	11FB303		PY120-33	
圧送仕様	標準圧送		標準圧送	
ピストン形状	φ210×1600mm		φ225×1650mm	
最大吐出圧力（MPa）	4.9		4.6	
ブーム使用の有無	有り			
配管径	ブーム＋配管100A			
圧送距離（m） （水平換算長さ）	75.9	75.9 ～ 93.9	99.3 ～ 112.8	99.3 ～ 112.8
圧送高さ（m）	15	21	21	25

表－7 実施工コンクリート調査

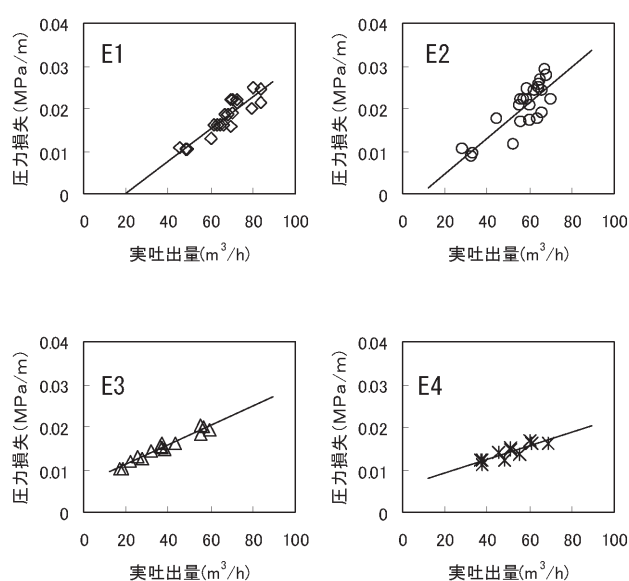
記号	呼び強度	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	かさ容積 (m ³ /m ³)	骨 材 種 別		プラント
								細 骨 材	粗 骨 材	
E1	36	21.0	4.5	44.0	185	420	0.571	山砂 7 + 砕砂 3	砕石	T
E2	36	21.0	4.5	44.0	185	420	0.561	山砂 6 + 改良砕砂 4	砕石	K
E3	36	21.0	4.5	44.0	185	420	0.565	山砂 5 + 砕砂 5	砕石	U
E4	36	21.0	4.5	44.0	185	420	0.561	中国川砂 5 + 砕砂 5	砕石 7 + 石灰砕石 3	F

3.2 計測結果

実打設したコンクリートごとの実吐出量と圧力損失の関係を図－9に示す。それぞれの線形近似式による傾きと切片を表－9に示す。E1、E2では吐出量1m³あたり0.4 kPa/m程度の大きな傾きであったが、E3、E4ではそれぞれ0.2、0.16kPa/m程度の傾きであった。また、E2では若干ばらつきが他と比べて大きかった。測定結果のバラツキは、測定による誤差の他に、フレッシュコンクリートの日内における性状変化による影響があると考えられる。

図－10に線形近似式での推定値と実測値との差（誤差）を推定値で除した割合（誤差の割合）を示し、表－10に測定コンクリートごとの平均誤差とその誤差の割合を示す。誤差の平均値は1.3kPa/m程度であり、誤差割合の平均値は7.5%であった。測定値の約7割は10%以下の誤差割合で納まっており、誤差割合が20%を超えるものは5%以下であった。

主油圧を測定するだけの簡易な計測を行うことで、比較的精度よく圧力損失を把握できることがわかった。



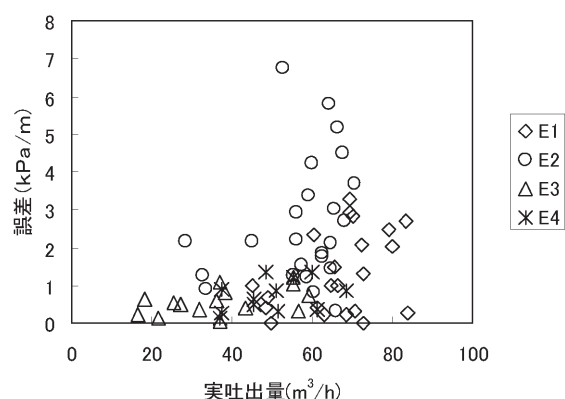
図－9 実吐出量と圧力損失

表－8 実施工コンクリートフレッシュ試験結果

記号	スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	単位 容積質量 (kg/ℓ)	F/S
E1	19.0	30.3	3.4	2.332	1.59
	21.0	38.5	4.0	2.328	1.83
	20.5	34.3	5.2	2.294	1.67
	21.5	39.5	4.5	2.295	1.84
	21.5	36.8	5.2	2.282	1.71
E2	21.0	38.5	4.8	2.291	1.83
	21.0	38.8	5.4	2.276	1.85
	20.5	34.5	3.8	2.272	1.68
	21.5	37.5	5.8	2.266	1.74
	22.0	39.5	4.8	2.306	1.80
E3	22.0	36.5	3.3	2.302	1.66
	23.5	41.0	3.1	2.310	1.74
	21.0	34.8	4.6	2.274	1.65
	20.0	30.8	4.5	2.290	1.54
	20.5	33.5	5.5	2.277	1.63
E4	21.0	33.8	5.5	2.306	1.61
	20.5	34.5	4.5	2.326	1.68
	20.5	33.5	4.2	2.330	1.63
	22.5	36.5	4.7	2.311	1.62

表－9 近似式における傾きと切片

	E1	E2	E3	E4
相関	0.913	0.836	0.978	0.978
傾き	0.375	0.419	0.227	0.157
切片	-7.206	-3.660	6.731	6.224



図－10 実吐出量と誤差

表－10 日内の誤差

	E1	E2	E3	E4	平均
誤差平均 (kPa/m)	1.444	2.626	0.574	0.731	1.344
誤差割合平均	7.9%	13.2%	3.7%	5.1%	7.5%

3.3 提案式の検証

フィールド実験によって導いた圧力損失推定式を用いて、実施工計測に用いたコンクリートの調査と荷卸時のフレッシュコンクリート試験結果から算出した圧力損失と実測値の圧力損失の関係を図-11に示す。実測値は推定値より全体的にバラツキが大きく1.7kPa/m程度大きめの値であるが、傾きはほぼ同様であった。

図-12に推定値における実測値との差（誤差）の割合を示す。E2での誤差が大きいが、表-11に示すように全体の誤差の平均値は2.6kPa/mで、その割合の平均値は18%であった。20%以下の誤差が全体の65%を占め、30%以下の誤差が全体の85%程度であった。

このことから、提案した調査やフレッシュコンクリートの性状から圧力損失を推定する式は、実施工において、十分な精度で活用できると考える。

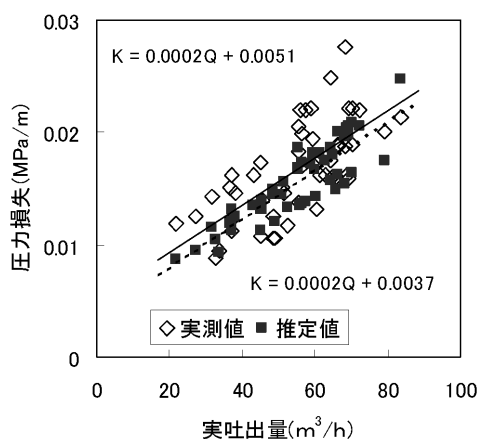


図-11 推定値と実測値

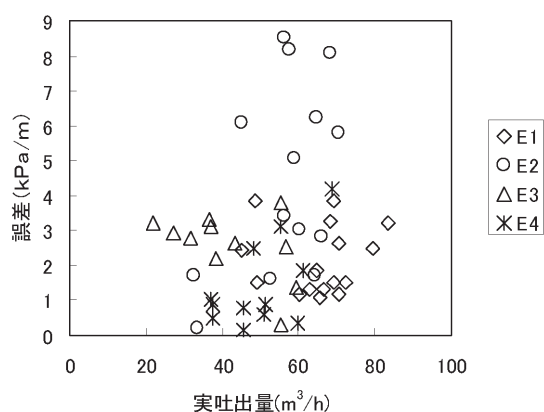


図-12 推定値の誤差

表-11 推定値の誤差

	E1	E2	E3	E4	平均
誤差平均 (kPa/m)	2.1	4.5	2.6	1.4	2.6
誤差割合平均	12.6%	30.0%	20.6%	8.8%	18.0%

4. おわりに

スランプ管理を行う比較的強度の高いコンクリートを中心に、14種類のコンクリートの長距離圧送実験を実施した。その結果、コンクリートの調査条件から、水セメント比と単位セメント量を、フレッシュコンクリートの性状からF/S（フロー値をスランプ値で除した値）と単位容積質量を用いた圧力損失係数を推定する式を提案した。提案した式を実施工において測定した結果と照査したところ、比較的精度よく推定できていたことがわかった。

今後、さらに広範囲のデータを蓄積して、推定精度の向上と適用範囲の拡大を行いたいと考える。

〔謝辞〕

本研究は、大阪生コンクリート圧送協同組合から日本建築学会近畿支部材料施工部会が委託を受け、同部会内にワーキンググループ（ポンプ圧送研究会）を設けて行ったものである。

実験に協力いただいたレディーミクストコンクリート工場、ワーキンググループメンバーの関係各位に感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) 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
- 2) 全国コンクリート圧送事業団連合会：コンクリートポンプ圧送マニュアル、2006.8
- 3) 建築学会近畿支部材料施工部会：第3回圧送技術研究会－生コンクリートの性能とポンプ圧送性について－、2005.7

