

12. 高強度コンクリートのポンパビリティに関する調査研究

Study on Pumpability for High Strength Concrete

高見 錦一*

山口 克彦*

要 旨

高強度コンクリートのポンパビリティについての基礎資料を得るため、ポンプ圧送時の輸送管内の圧力損失を実施工において計測した。その結果、高強度コンクリートをスランプで管理する場合は、単位セメント量の増加に伴い粘性が増大し圧力損失も増大すること、また、鉛直管が一定以上の高さになると、圧力損失は輸送管の摩擦抵抗にコンクリートの自重を足した値より大きくなることが分かった。しかし、スランプフローで管理する場合は、良好なコンシステンシーが得られ、圧力損失の増大を抑制できることが確認できた。

キーワード：ポンパビリティ／高所圧送／高強度コンクリート／圧力損失／単位セメント量

1. はじめに

建築物の高層化に伴い、使用するコンクリートはますます高強度化が図られ、その使用量は年々増加している。超高層RC造建物におけるコンクリートの打設方法についても、施工の効率化と省力化を図るため、従来のバケット打ちからポンプ圧送による打設へと移行してきている。

通常、高所へのポンプ圧送の可否は圧送負荷を算定して判断されている。圧送負荷は(1)式に示すように、輸送管の摩擦抵抗と鉛直管におけるコンクリートヘッド（自重）との和で定まり、摩擦抵抗は、水平管 1m当りの管内圧力損失（K 値）と輸送管水平換算長さとの積とされている。³⁾

$$P=K(L+3B+2T+2F)+9.80665WH \quad (1)$$

P：コンクリートポンプに加わる圧送負荷（kPa）

K：水平管の管内圧力損失（kPa/m）

L：直管の長さ（m）

B：ベンド管の長さ（m）

T：テーパ管の長さ（m）

F：フレキシブルホースの長さ（m）

W：フレッシュコンクリートの単位容積質量（t/m³）

H：圧送高さ（m）

水セメント比が45%を超えるコンクリートでは、そのスランプ値ごとにK値の標準値が示されているが、水セメント比が45%以下の高強度コンクリートでは、K値がその標準値から外れていることが多く、圧送試験を行い、K値を実験的に求めている場合が多い。しかし、実施工を模した圧送実験は大掛かりとなり、特に鉛直方向については、事前に十分な圧送実験を行うことは非常に困難

なため、これまで詳細なデータを蓄積するに至っていない。この度、数ヶ所の工事現場で高強度コンクリートを高所圧送する機会があったので、ポンプ圧送時の圧力損失の調査を行なった。

本報では、その概要と結果について述べる。

2. 調査概要

2.1 圧送方法

表-1に各工事現場におけるコンクリート圧送概要を示す。各工事とも建物は超高層RC造である。

A、B、C工事ではポンプ車の根元から直接輸送管を配管して、D工事ではブームの先端に輸送管を配管した。なお、ポンプ車は全てピストン式の機種であり、輸送管は全て125Aを使用した。

2.2 コンクリートの種類

表-2に計測を行ったコンクリートの調合と荷卸し時のフレッシュコンクリートの性状試験結果を示す。A、B工事のコンクリートは普通ポルトランドセメントを使用したスランプで管理する高強度コンクリートである。C工事のコンクリートは普通ポルトランドセメントを使用したスランプあるいはスランプフローで管理した高強度コンクリートである。D工事のコンクリートは低熱ポルトランドセメントを使用したスランプフローで管理した高強度コンクリートである。

2.3 計測概要

同一ミキサー車のコンクリートを3～4水準の打設速度で圧送し、それぞれについてポンプ車に加わる圧送負

*東京分室

荷と、管内圧力を測定した。圧送負荷の測定は、ポンプ車の主油圧、ポンプエンジン回転数、およびストローク時間について行った。管内圧力は、スチール製ダイヤフラム型圧力計を輸送管各所に取り付けて、動ひずみ計にて0.02秒毎に約10ストローク間測定した。

3. 計測結果

A～D各工事ごとの圧力損失計測結果および計測結果から最小2乗法によって求めた実吐出量(Q)と圧力損失(K)の実験式を図-1～4に示す。実吐出量は、ストローク時間から理論吐出量を算出し、ポンプの容積効率を0.92と仮定して算出した。主油圧からの圧力損失(Ko)は、ポンプ内部の機械的損失とコンクリートのポンプ内流過損失を25%と仮定して算出した(2式)。主油圧からの水平管圧力損失(Koh)は、鉛直管におけるコンクリート自重による圧力増加分を考慮して算出した(3式)。管内圧力からの圧力損失は、その圧力差を輸送管長さで除して、水平(Kh)、鉛直(Kv)それぞれの圧力損失とした³⁾。

$$K_o = (P_c - P_m) / L \quad (2)$$

Ko：主油圧から求めた圧力損失

L：輸送管換算長さ

Pc：理論吐出圧

Pm：ポンプ内部の機械的損失と
コンクリートのポンプ内流過損失(25%と仮定)

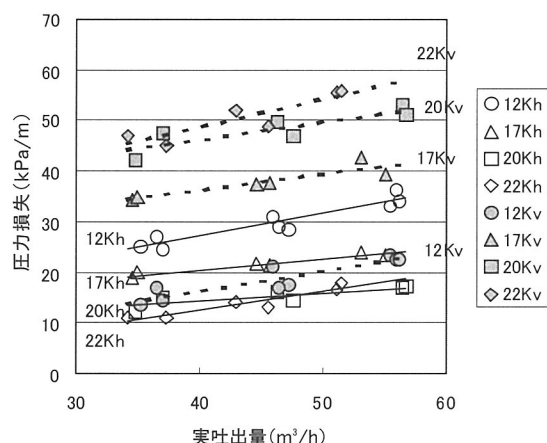
$P_c = \alpha P_h$

Ph：主油圧

α ：ピストン前面圧と主油圧の比率

$$K_{oh} = (P_c - P_m - 9.80665WH) / L \quad (3)$$

Koh：主油圧から求めた水平管圧力損失



sk 12	$K_h = 0.402Q + 0.2$	$K_v = 0.417Q + 10.4$
sk 17	$K_h = 0.212Q + 11.8$	$K_v = 0.321Q + 23.5$
sk 20	$K_h = 0.162Q + 6.9$	$K_v = 0.351Q + 31.4$
sk 22	$K_h = 0.383Q - 2.9$	$K_v = 0.563Q + 26.1$

図-1 A工事計測結果

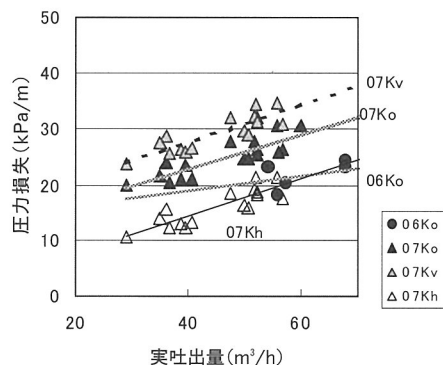
いずれの場合も実吐出量と圧力損失の間に良好な相関が認められた。図-1に代表されるように、水平配管の圧力損失は、単位セメント量の大きなコンクリートほど大きな圧力損失を示した。また鉛直管の圧力損失は、図-5に示すように圧送高さが高くなればなるほど、水平管の圧力損失にコンクリートの自重による圧力増加分を加えた値より大きな値を示した。なお、図表には示していないが、圧送前後のコンクリートの品質に大きな差は認められなかった。

表-1 圧送概要

工事名	記号	換算配管長(m)	圧送高さ(m)	下部水平配管実長(m)	上部水平配管実長(m)	計測吐出量(m³/h)
A	sk12	107.3	33.5	32.5	23.8	35,45,55
	sk17	119.3	45.5	32.5	23.8	35,45,55
	sk20	128.3	54.5	32.5	23.8	35,45,55
	sk22	137.3	63.5	32.5	23.8	35,45,55
B	inE06	122.8	47.3	3.9	53.1	35,55,75
	inE07	139.0	59.0	3.9	53.1	30,40,55
C	kat06-19	122.8	39.3	35.1	20.8	30,40,55
	kat06-21	122.8	39.3	35.1	20.8	30,40,55
	kat701	124.2	42.8	35.1	23.0	30,40,50
	kat726	129.9	48.5	35.1	23.0	35,45,55
	kat10	147.0	65.6	35.1	23.0	40,45,50
	katT	48.5(計測誤)	0.0	—	—	20,30,40
D	inF54	139.0	ブーム			30,37,5,45
	inF60	156.0	ブーム			35,45,50

表-2 コンクリート概要

工事名	記号	呼び強度	水セメント比(%)	単位水量(kg/m³)	単位セメント量(kg/m³)	スランパ(cm)	フロー(cm)
A	sk12	37.5	45.3	170	375	18.8	32.5
	sk17	33	45.8	170	371	21.5	40.0
	sk20	31.5	46.9	170	362	20.0	33.5
	sk22	31.5	46.9	170	362	20.4	36.5
B	inE06	36	46.0	175	381	22.5	43.0
	inE07	36	46.0	175	381	22.0	37.0
C	kat06-19	42	37.7	165	438	19.0	31.0
	kat06-21	42	37.7	165	438	21.0	35.0
	kat701	42	36.5	165	452	21.5	35.0
	kat726	39	40.5	165	408	22.5	35.0
	kat10	33	47.0	165	352	21.5	32.5
	katT	51	33.5	165	486	—	60.0
D	inF54	57	35.0	168	480	—	50.0
	inF60	63	32.0	168	525	—	50.0



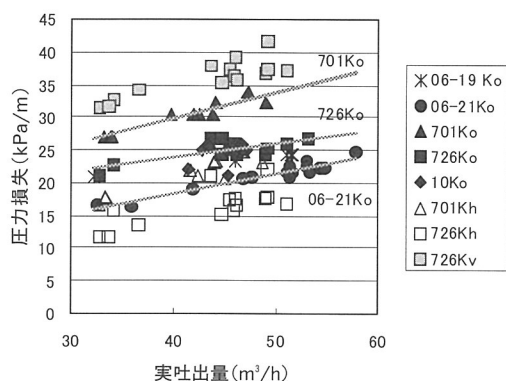
inE06	$K_o = 0.133Q + 13.6$	$K_{oh} = 0.133Q + 4.9$
inE07	$K_o = 0.308Q + 10.5$ $K_h = 0.334Q + 1.0$	$K_{oh} = 0.308Q + 0.9$ $K_v = 0.334Q + 14.3$

図-2 B工事計測結果

4. 考察

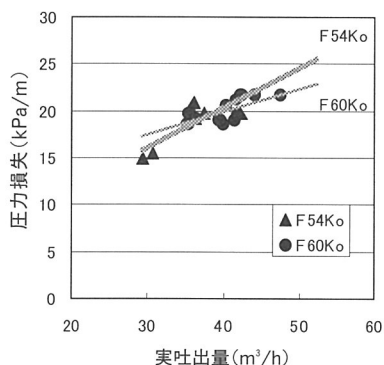
4.1 フレッシュ性状と圧力損失

図-6に、同一調査のコンクリートでスランプ値が異なる場合の圧力損失について測定した結果を示す。目標スランプ値21cmに対して19cmのスランプ値となったと



kat06-19	$Ko=0.180Q+15.0$	$Koh=0.180Q+7.0$
kat06-21	$Ko=0.319Q+5.8$	$Koh=0.313Q-2.2$
kat701	$Ko=0.401Q+13.8$	$Koh=0.401Q+5.3$ $Kh=0.442Q+2.8$
kat726	$Ko=0.240Q+14.0$ $Kh=0.271Q+3.5$	$Koh=0.240Q+5.6$ $Kv=0.319Q+22.9$
kat10	$Ko=0.526Q+1.7$	$Koh=0.526Q-9.8$
katT	$Kh=0.383Q-4.2$	

図-3 C工事計測結果



inF54	$Ko=0.430Q+3.2$
inF60	$Ko=0.248Q+10.0$

図-4 D工事計測結果

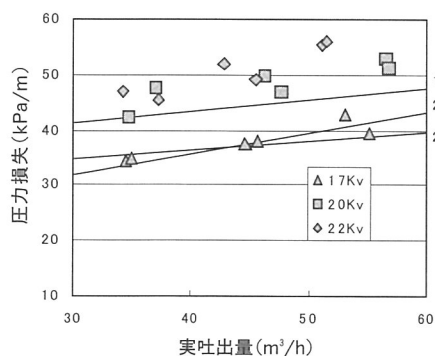


図-5 鉛直管の圧力損失

き、実吐出量40m³/hにおいて、4kPa程度圧力損失が増大した。また、増大の程度は実吐出量が小さいほど大きい傾向を示した。

C、D工事において、スランプフローで管理した高強度コンクリートと、W/C=37%前後のスランプで管理した高強度コンクリートの圧力損失を図-7に示す。スランプで管理した高強度コンクリートの圧力損失は、K値の標準値の約2倍であった。しかし、スランプフローで管理した高強度コンクリートは、W/C=35%以下の低水セメント比であったにもかかわらず、その圧力損失はスランプフロー値50cmのコンクリートでK値の標準値の約2.5倍となったが、スランプフロー値が60cmの場合は標準値と同程度であった。このことからコンシステンシーを改善することによって、圧力損失を小さく出来ることが分かった。

4.2 単位セメント量と圧力損失

普通セメントを使用し、スランプで管理したコンクリートの水平管圧力損失（Koh、Kh）と実吐出量の関係を単位セメント量ごとに図-8に示す。コンクリートの骨材状況や調合、さらに圧送高さも異なるためばらつきはあるが、全体的な傾向としては、単位セメント量の増加に伴い圧力損失も増大している。単位セメント量380kg/m³では通常のK値の2倍程度の値を示し、単位セメント量

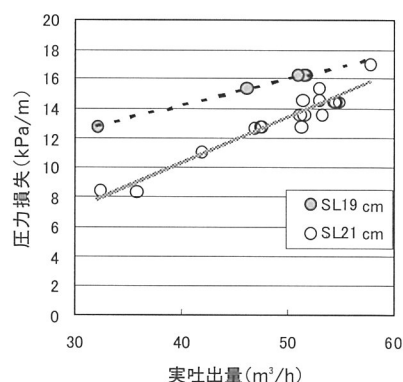


図-6 スランプ値の異なる圧力損失

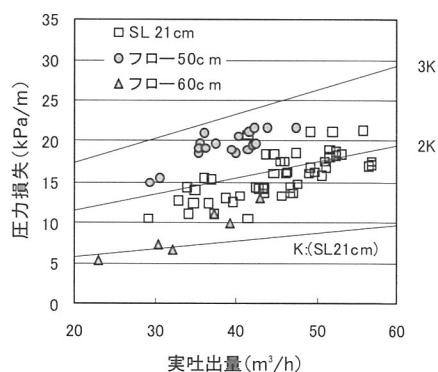


図-7 スランプフロー管理の圧力損失

452kg/m³では3倍程度の値を示した。

これらは、単位セメント量の増加に伴ってコンクリートの粘性が増したために、管内摩擦抵抗が上昇したことを示していると考えられる。

図-9に、実吐出量45m³/hにおける単位セメント量と圧力損失の関係を示す。今回の計測範囲では、単位セメント量10kg/m³の増加に対して約1kPa/mの圧力損失の増大が認められた。

4.3 圧送高さとの圧力損失

普通セメントを使用し、スランプで管理したコンクリートにおける単位セメント量10kg当りの鉛直管圧力損失と実吐出量の関係を圧送高さごとに図-10に示す。

理想的な流体の圧送であれば、配管が水平から鉛直に変化しても、流動による圧力損失はまったく変わらないはずであるが、スランプで管理する高強度コンクリートの場合、圧送高さが高くなるほど単位セメント量当りの圧力損失は増大した。これは、圧送高さの延長により管内壁面の滑り抵抗が増大したために管内圧力が増大したものとする。図-11に、実吐出量45m³/hにおける圧送高さと単位セメント量10kg/m³当りの鉛直管圧力損失の関係を示す。両者にはほぼ良好な相関があり、高さ10mで圧力損失が約0.2kPa/m/10kg増大した。

5. まとめ

今回行った調査により、以下のことがわかった。

- (1) スランプで管理する高強度コンクリートでは、単位セメント量の増加に伴い、圧力損失が増大する。その増加は、単位セメント量10kg/m³に対し約1kPa/mである。
- (2) スランプで管理する高強度コンクリートでは、圧送高さが高くなると、その鉛直管圧力損失は水平管圧力損失にコンクリート自重を加えた値より大きくなる。その増加は、高さ10mで約0.2kPa/m/10kgの増加である。
- (3) コンシステンシーを改善することによって、圧力損失を小さく抑えることができる。

[参考文献]

- 1) 渡辺他：フレッシュコンクリートの分離抵抗性・流動性の測定方法に関する一考察、フレッシュコンクリートの流動性と施工性に関するシボ・ジウム論文集、pp37-42、1996.4.
- 2) 高見他：超高層建物における高強度コンクリートの圧送性と品質に関する調査研究、浅沼組技術研究所報No.7、1995.11.
- 3) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針、1994.1.

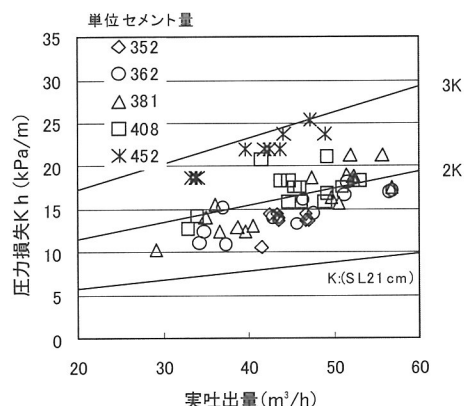


図-8 単位セメント量ごとの圧力損失

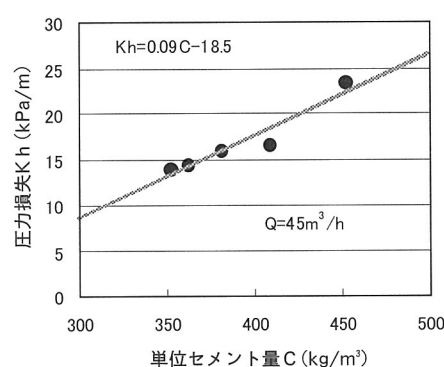


図-9 単位セメント量と圧力損失の関係

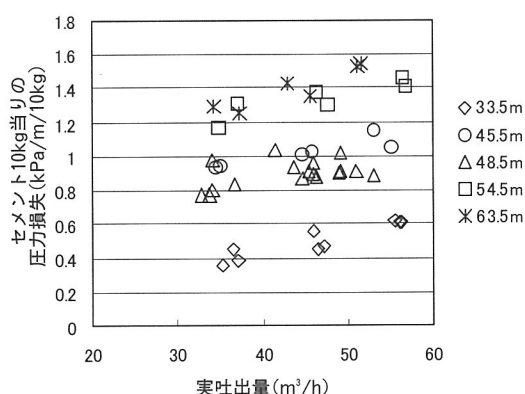


図-10 圧送高さごとの圧力損失

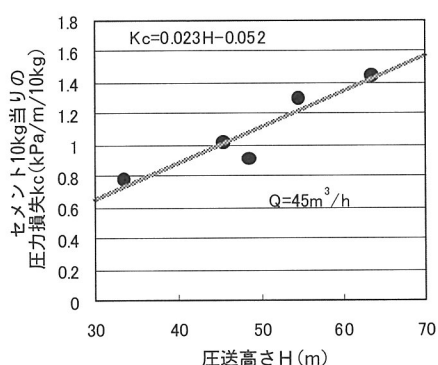


図-11 圧送高さと圧力損失の関係