

超高層建物におけるポンプ圧送性の調査

Study on Pumpability for Skyscrapers

高見 錦一* 立松 和彦*²

山崎 順二*² 中本 晃*³

澤田 洋児*³

要 旨

高さが150mを超える実建築物の施工にあたって、スランプで管理する低水セメント比のコンクリートをポンプ圧送した。その際、各施工段階でフレッシュコンクリートの品質変化と管内圧力を計測して、上階の圧送計画の検討資料とした。その結果、圧送前後のフレッシュコンクリート性状に大きな変化はなかったが、鉛直配管が100mを超えるポンプ圧送では、鉛直管の圧力損失増大量がコンクリート自重による圧力増大より4割程度大きくなることが分かった。

キーワード：高所／圧送／水平管圧力損失／鉛直管圧力損失

1. はじめに

近年、建物の高層化に伴い、強度の高いコンクリートを高所へ圧送する必要性が生じている。通常、ポンプ圧送の可否は、圧送負荷を算定して判断している。圧送負荷は、水平管1m当たりの管内圧力損失（K値）と配管の水平換算長の積である摩擦抵抗と鉛直管におけるコンクリート自重の和で与えられる（式(1)）。K値の標準値は輸送管径、コンクリート種別ごとに吐出量との関係で示されている。しかし、水セメント比が45%以下の高強度コンクリートや単位セメント量が400kg/m³を超えるコンクリートでは高い粘性のために、そのK値が標準値から外れることが多い。また、鉛直圧送の圧力損失は、コンクリートが完全な流体ではないため、コンクリート自重分が加算されるだけとなるかどうか不明な点が多い。過去の当社実測データにおいて、ある高さ以上ではコンクリート自重分の増加以上の圧力が観察された例もある。

この度、高さが150mを超えるCFT造の実建築物の施工にあたって、各施工段階で圧送前後のフレッシュコンクリート性状と管内圧力を計測して、上階の圧送可否を判断した。本報では、その中から、スランプで管理する低水セメント比のコンクリートを、各階スラブにポンプ圧送した際に行った計測結果について述べる。

2. 計測概要

2.1 建物概要

調査を実施した建物の概要を表-1に示す。建物はCFT造の超高層共同住宅で、地下1階、地上51階、建物高さは169.8mである。スラブコンクリートの設計基準強度は $F_c=30\text{N/mm}^2$ であり、普通ポルトランドセメントを用いた比較的低水セメント比（標準期：W/C=44%）のスランプ管理のコンクリートを採用した。地上階スラブのコンクリート打設期間は2002年11月～2003年7月である。計測を実施した階数における、使用コンクリートの種類を表-2に示す。プラントは3社で、プラントCの細骨材は川砂と砕砂の混合、それ以外は海砂と砕砂の混合である。圧送性をできるだけ均質にするために、化学混和剤は1種類とした。

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

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)

表-1 建物概要

住 所	大阪府大阪市
用 途	共同住宅
工 期	2001年3月～2003年12月
構 造	CFT造、地下1階、地上51階
面 積	建築面積1,486.8㎡、延べ床面積56,408.9㎡
高 さ	169.8m

表-2 使用したコンクリート

計測日	階数	鉛直高さ(m)	コンクリート	プラント
2002/11/28	15	51	W/C44%-18-20N	A
2003/2/24	28	92	W/C41%-21-20N	B
2003/5/13	42	137	W/C47%-21-20N	C
2003/6/27	51	166	W/C47%-21-20N	A

*東京分室 *²建築研究グループ *³大阪本店建築部

2.2 圧送負荷の算定

施工計画時に、当社の既往データに基づいて、以下の仮定条件のもと、圧送負荷の算定を行った。

- ・輸送管は、全て125Aを使用する。
- ・スラブコンクリート打設時の平均吐出量は、1日のコンクリート打設作業時間3.5～4.0時間、作業効率を0.65として約45m³/hとする。
- ・実打設量を45m³/hとしたときの水平配管圧力損失を単位セメント量および当社データから20kPa/mとする。
- ・鉛直配管高さ35mを超える範囲では高さによる圧送負荷増大分を加算する。

算定した圧送負荷から、地上階の配管経路を極力短くして、ポンプ車に12MPaの能力を有するものを採用することで、最上階までポンプ圧送が可能であると判断した。なお、輸送管は18階までは超高压用、39階までは高压用を使用することとした。

2.3 計測

計測は、15、28、42、51階スラブコンクリート打設時に行った。各階スラブへのコンクリート打設は、建物内の1階部分にポンプ車を配置し、125Aで配管を行い施工した。使用したポンプ車の仕様を表-3に示す。

図-1に配管概要を示す。1階の水平換算配管長は約43m、打設階の最大水平換算配管長は約45mである。

スチール製ダイヤフラム型圧力計を配管根元(P4)、鉛直配管3階部分(P3)、打設階水平配管部分(P2、P1)に取り付けて、スラブコンクリート打設中に管内圧力を動ひずみ計にて0.02秒毎に約10ストローク間測定した。また、荷卸時と打設階筒先で試料を採取して、スランプ、空気量等のフレッシュコンクリートの性状試験を行った。

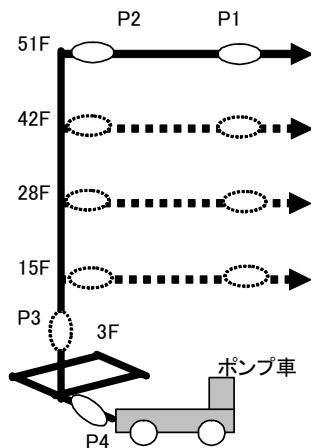


図-1 配管概要

3. 計測結果

3.1 フレッシュコンクリートの品質

表-4にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。水セメント比の推定は、高周波加熱乾燥法によって単位水量を測定して行った。

全体的な傾向として、圧送後のフレッシュコンクリート性状は圧送前に比べて、スランプが、0.5cm程度小さく、スランプフロー値が2cm小さく、空気量が1%弱大きく、コンクリート温度が約1℃大きくなった。それら圧送後の値も基準値以内であり、圧送後の筒先コンクリートのワーカビリティは良好であった。また、フレッシュコンクリート性状の圧送前後の変化量について、階数やプラント種別による差異は認められなかった。

3.2 圧送負荷

(1)管内圧力分布

図-2に平均的な吐出量時の各階での管内圧力分布を示す。配管距離は、ベント管を3倍、テーパ管・フレキシブルホースを2倍として換算した。さらに、管内圧力の読み値は計測用の配線が長いのでその補正を行った。配管根元の管内圧力は15、28、42、51階でそれぞれ3.1、5.5、8.2、10.1MPaであった。打設階数の増大に伴い、配管根元圧力は増大し、圧力分布勾配も若干急になった。

(2)圧力損失

図-3に15階でのP4～P2間から算出した圧力損失と吐出量の関係を各アジテータ車ごとに示す。吐出量は1ストローク時間より理論吐出量を算定して、ポンプの容積効率を0.9と仮定して算出した。

表-3 ポンプ車仕様

分類	ピストン式ブーム無し配管車	
形式	PT80-10(極東開発工業)	
シリンダ径×ストローク	165×1650mm	
ホッパ容量	0.5m ³	
最大吐出量 (最大吐出圧)	標準	80m ³ /h (52kgf/cm ²)
	高压	31m ³ /h (125kgf/cm ²)
輸送管径	125A	

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

		荷卸				筒先(打設階)			
		15F	28F	42F	51F	15F	28F	42F	51F
スランプ	cm	20.5	22.5	21.2	21.9	19.8	23.3	19.2	21.5
フロー	cm	36.0	40.8	37.3	40.0	34.3	41.5	30.5	40.3
空気量	%	4.4	4.6	4.7	4.9	5.4	5.0	5.7	4.9
コンクリート温度	℃	14.7	12.3	25.5	28.8	16.4	13.5	25.5	30.8
外気温	℃	8.3	7.0	22.3	25.8	9.2	7.3	20.5	26.0
推定W/C	%	42.2	41.1	44.1	46.0	-	41.3	44.1	45.8

荷卸時のフレッシュコンクリートの性状は、アジテータ車の1車目、9車目、17車目、その他でスランプ値や空気量の若干の変動はあったが、全て規格範囲内であった。

圧力損失は吐出量の増大に伴い直線的に増大し、アジテータ車間の差異は認められなかった。

図-4に15、28、42、51階のスラブコンクリート打設時のP4～P2で得られた圧力損失と吐出量の関係を示す。15階と28階の圧力損失は、28階の圧力損失が若干大きな値であるが、ほぼ同様の勾配であった。鉛直配管長の大きな42、51階の圧力損失は15、28階に比べて同一吐出量で15kPa/m程度大きな値であった。

(3) 水平管圧力損失

コンクリート打設階の輸送管に取り付けた圧力計P2～P1から求めた水平管1m当たりの圧力損失(Kh)と吐出量の関係を図-5に示す。図中には、文献(1)に示されている通常のコンクリートを125A配管でポンプ圧送する際のKhと吐出量の関係も示す。

配管に取り付けた圧力計の間隔が短いこともあり、計測値にばらつきはあるが、吐出量の増大に伴って、圧力損失は直線的に増大した。また、通常のコンクリートと比較するとその勾配は急になっており、吐出量の大きなものほど圧力損失が増大した。これは、水セメント比が比較的小さく、コンクリートの粘性が通常のコンクリートより大きかったためと思われる。

吐出量45m³/hの時のKhは15、28、42階でそれぞれ約15、21、15kPa/mであった。15階と42階はほぼ同様の傾向を示したが、28階のKhが他と比べて大きな値であった。これは、コンクリートの水セメント比が小さく、また、打設時期が冬期であり、フレッシュコンクリートの粘性が大きかったことが原因と推察できる。

(4) 鉛直管圧力損失

P3～P2(15、28階)およびP4～P2(42、51階)での鉛直配管1m当たりの圧力損失(Kv)と吐出量の関係を図-6に示す。参考値として15階および28階での水平配管圧力損失の近似線も示す。

実吐出量45m³/hの鉛直管の圧力損失は、水平管の圧力損失と比較すると、15、28階では約8.5kPa/m、42階では約30kPa/m増大した。また、15、28階のKvとKhは同程度の傾きであった。

42、51階では、コンクリート自重の増加以上の圧力損失が生じたものと推察される。

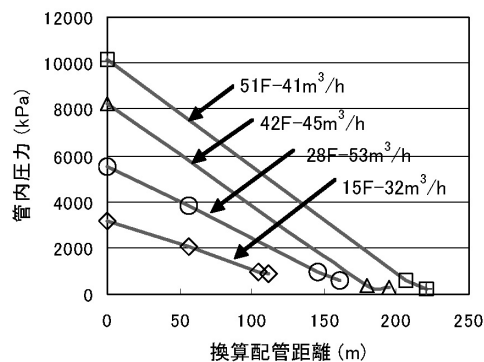


図-2 管内圧力分布

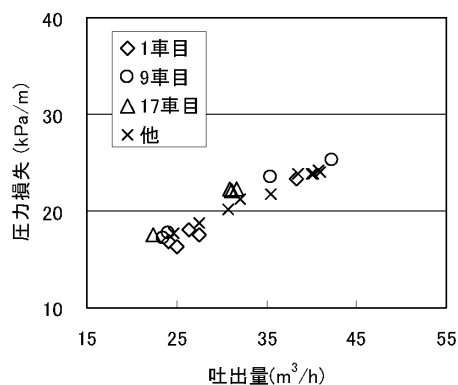


図-3 アジテータ車ごとの圧力損失

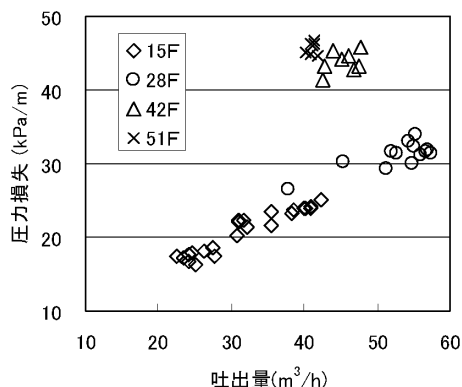


図-4 吐出量と圧力損失

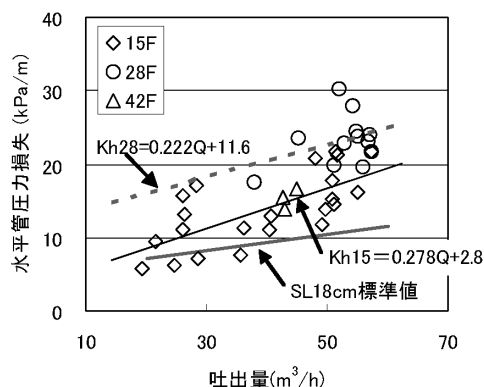


図-5 水平管圧力損失

(5) 静止時圧力

コンクリート打設途中で打設を中断した際に計測した配管根元の圧力（P4）と鉛直配管高さの関係を図-7に示す。鉛直配管高さ約150mでは、コンクリート自重による圧力より2500kPa大きな値であった。配管根元圧力は、鉛直配管高さが50mを超える辺りから、コンクリート自重のみによる圧力より大きな値を示し、高さが高くなるほどその増大量は大きくなった。コンクリート自重の圧力と計測された圧力の差は、式(2)の多項式で近似された。

$$\Delta P = 0.21H^2 - 19H + 523 \quad (2)$$

(6) 圧送負荷算定

従来式による圧送負荷算定値（自重補正）および静止時圧力を式(1)のコンクリート自重による圧力（9.80665 WH）に置き換えて圧送負荷算定値（静止時補正）を求め、それらと今回計測された配管根元圧力の比を高さとともに図-8に示す。

鉛直配管高さが100m以下では、自重補正、静止時補正とも計測値と算定値の比率は1前後であり、両者に差異は認められなかった。鉛直配管高さ137mと166mと高いものは、従来の自重補正では算定値と計測値が大きく異なり、計測値は算定値の1.4倍程度の値を示した。静止時補正を行った場合、その比率はほぼ1程度であった。このことから、圧送負荷の算定に関して、鉛直配管高さが100mを超える場合は従来の式(1)に今回コンクリート静止時に計測された圧力とコンクリート自重の差（式(2)）を加算する式(3)を提案する。

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

ただし、 $\Delta P = 0.21H^2 - 19H + 523$

4. まとめ

今回、100mを超える超高所へ、スランプ管理のコンクリートを圧送して、その管内圧力、フレッシュコンクリート性状を測定したところ、以下のことが分かった。

- ・100mを超える超高所への圧送においても、圧送前後のフレッシュコンクリート性状に大きな変化はない。
- ・静止時の配管根元管内圧力は、鉛直配管高さが50mを超えるとコンクリート自重以上の圧力が加わり、高さが高くなるほどその増大量は大きくなる。
- ・高さが100mを超える圧送では、その圧送負荷は、従来のコンクリート自重による鉛直管の圧力増大を上回る圧力を示す。

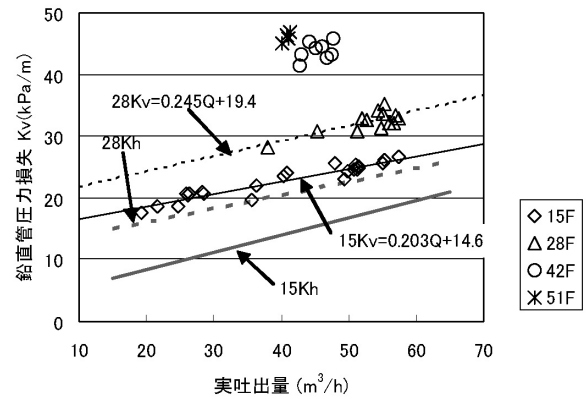


図-6 鉛直管圧力損失

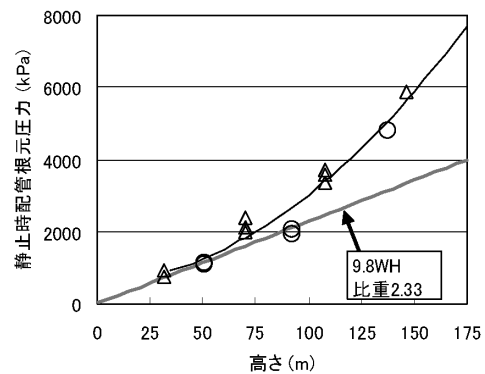


図-7 静止時圧力と鉛直高さ

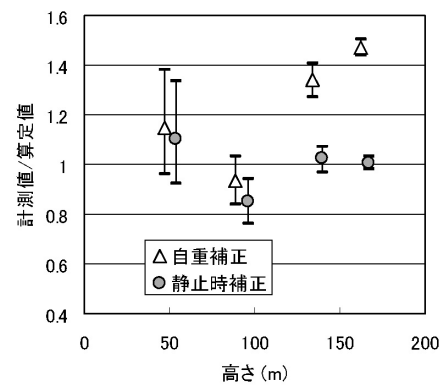


図-8 圧力比と鉛直高さ

[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
- 2) 高見他、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、浅沼組技術研究所報No.12、2000