

150 N/mm² 級超高強度コンクリートのポンプ圧送

河野政典

近年、都心部の集合住宅では、高層化や大スパン化を実現するため、高層集合住宅に高強度コンクリートを適用する事例が増えつつあり、現在では、150 N/mm² 級超高強度コンクリートの研究開発が盛んに進められている。今回、150 N/mm² 級超高強度コンクリートのポンプ圧送性を検証するため、配管長75 mのポンプ圧送実験を行った。その結果、コンクリートの粘性が非常に大きいため、ポンプへの圧送負荷は大きかったものの、最大吐出圧が13.0 MPaのポンプ車および高圧配管（H管）を用いれば十分圧送が可能であることを確認した。また、ポンプ圧送によるフレッシュコンクリート性状および圧縮強度への影響はみられなかった。

キーワード：超高強度コンクリート、ポンプ圧送、圧力損失、フレッシュ性状、圧縮強度

1. はじめに

現在のコンクリート造構造物の施工において、ポンプ圧送は必要不可欠なものとなっている。わが国では、高度経済成長期にあたる昭和40年前後からポンプ圧送が取り入れられ始め、従来のタワーカート工法に比べ、大量打設、省力化を可能とすることから、急速に普及し、高度経済成長期の社会基盤整備に大きく貢献した。その後、建物の高層化や、短期施工による要望とともにコンクリートポンプの性能も向上し、現在では、全高828 mの世界一高い超高層建物「ブルジュ・ハリファ」の高さ600 mまでのコンクリートの圧送も実現¹⁾し、水平換算距離1,000 mを超える長距離圧送の施工実績も報告²⁾されている。

近年、わが国の都心部の集合住宅では、土地の高度利用から高層化、および、快適な平面空間を確保するための大スパン化が望まれ、それらを実現するため、高層の集合住宅に高強度コンクリートを適用する事例が増えつつある³⁾。現在では、150 N/mm² 級超高強度コンクリートの研究開発が盛んに進められ、バケット打設による施工事例⁴⁾や、ポンプ圧送実験の報告⁵⁾もされている。本報では、高強度コンクリートの特性、および、150 N/mm² 級超高強度コンクリートのポンプ圧送実験の結果について報告する。

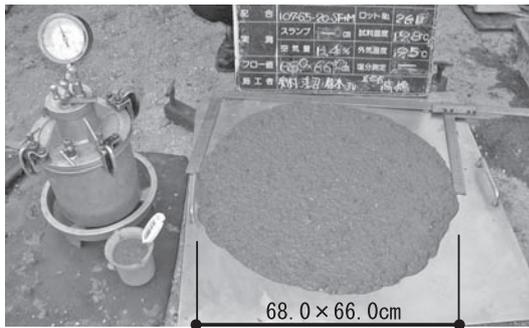
2. 高強度コンクリートの特性と打設方法

(1) 高強度コンクリートの特性

日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事では、設計基準強度が36 N/mm² を超える場合のコンクリートを高強度コンクリートと定義している。

コンクリートの圧縮強度は、水セメント比（水の単位量をセメントの単位量で除した値）と密接な関係があり、コンクリートの調合設計では、水セメント比と圧縮強度の関係に基づき、目標とする圧縮強度に対応する水セメント比を設定している。高強度コンクリートを得るには、水セメント比を小さくする、すなわち、セメント量を増やす必要がある。設計基準強度が30 N/mm² 程度のコンクリート調合のセメント量は1 m³ 当たり350～400 kgである。それに対して150 N/mm² 級コンクリートでは1,000 kg以上となる。セメントの量を増やすほど、練り混ぜたときのコンクリートの“粘り”が増し、コンクリートの練り混ぜに時間を要し、また、粘りが大きいため施工性も低下する。

セメントの種類によって粘性も異なり、一般的に使用されている普通ポルトランドセメントは、設計基準強度が60 N/mm² を超える調合では極めて粘性が大きくなり、コンクリートの練り混ぜが困難となる。また、セメント量の増加率に対する強度の伸び率が小さくなるため、設計基準強度60 N/mm² を超える調合では、



写真一 高強度コンクリートのフレッシュ性状

中庸熱ポルトランドセメントや低熱ポルトランドセメントが使用されることが多い。しかし、中庸熱や低熱ポルトランドセメントも同様に、セメント量が増えると粘性が大きくなるため、設計基準強度 80 N/mm^2 を超える調合では、比表面積が $150,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 以上（セメントは $3,000 \sim 4,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）の超微粒子のシリカフューム等を混和材として用い、シリカフュームによるベアリング効果によって粘性を抑制し、練り混ぜ性能の向上を図っている。

(2) 高強度コンクリートの打設方法

現場での主なコンクリート打設方法は、ポンプ圧送とバケット打設の2種類である。ポンプ圧送においては粘性が大きいほど圧送抵抗も大きくなるため、ポンプへの負荷が大きくなる。粘性の大きいコンクリート、すなわち、強度が大きいコンクリートほど、低層階の柱部材に用いられるので、打設量が限られ、揚重時間も掛からないことから、バケット打設を採用する場合が多かった。

しかしながら、高い強度のコンクリートほど、打込み直後から表層部分が急激に乾燥するため、ポンプ圧送のように連続打設が望まれていた。また、 80 N/mm^2 以上のコンクリートでは火災時の爆裂抑制対策の一つとして、有機繊維を混入する場合がある。繊維混入した場合、さらにコンクリートの流動性が低下するため、アジテータ車からのバケットへの積み込み、サニーホースなどを用いたバケットからの排出（写真一2に示す）に時間を要する。このことから条件によっては 4 m^3 程度の 100 N/mm^2 級コンクリート柱部材の打設に約 20～30 分程度要することとなる。

昨今では、コンクリートの高強度化が進む一方で、ポンプ車の性能向上や、コンクリートの粘性を低下させる化学混和剤の開発が進み、 100 N/mm^2 級コンクリートのポンプ圧送の施工事例も報告⁶⁾ されてきている。

以降に、 150 N/mm^2 級超高強度コンクリートのポンプ圧送実験について報告する。



写真二 バケット打設状況

3. 150 N/mm^2 級超高強度コンクリートのポンプ圧送実験

(1) 実験概要

(a) 実験要因と水準

ポンプ圧送によるフレッシュコンクリートおよび圧縮強度への影響や、圧送速度（吐出量）による輸送管内圧力の変化を確認する目的で、ポンプ圧送実験を実施した。圧送速度を実験要因とし、水準は $10, 20 \text{ m}^3/\text{h}$ の2種類を設定した。生コンプラントにおいて 150 N/mm^2 級コンクリートをアジテータ車1台分（ $4 \sim 5 \text{ m}^3$ ）製造出荷（練混ぜ、繊維添加、出荷時のフレッシュコンクリート性状確認）するには 20～25 分要し、1時間あたりの出荷量は 15 m^3 程度に限られる。そのため、現場では $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度の速度で圧送できればアジテータ車の待ちがなく、スムーズに打設できることとなる。このことから、圧送速度の水準の上限を $20 \text{ m}^3/\text{h}$ とした。

(b) コンクリートの使用材料と調合

コンクリートに使用した材料を表一1に、その調合を表一2に示す。

使用したセメントは、低熱ポルトランドセメントにシリカフュームをセメント工場において 10%（内割

表一 使用材料

種別	記号	銘柄・産地等	物性値
セメント	C	シリカフュームプレミックス 低熱ポルトランドセメント (シリカフュームセメント)	密度: 3.08 g/cm^3 比表面積: $6,350 \text{ cm}^2/\text{g}$ シリカフューム内割り 10%
細骨材	S	桜川産 硬質砂岩砕砂	密度: 2.60 g/cm^3 F.M.2.85
粗骨材	G	桜川産 硬質砂岩砕石	密度: 2.64 g/cm^3 実積率: 60.0%
化学 混和剤	Add	高性能減水剤	ポリカルボン酸系 密度: 1.07 g/cm^3
添加材	PET	ポリエステル繊維	密度: 1.39 g/cm^3 径: 0.017 mm, 長さ: 10 mm

表一 2 調査

W/C (%)	S/A (%)	単位量 (kg/m ³)				Add Cx (%)	PET (vol%)
		W	C	S	G		
14.0	32.9	155	1108	398	824	2.25	0.2

り)プレミックスしたシリカフェュームセメントである。また、火災時のコンクリートの爆裂を防止するためにポリエステル繊維を 0.2 vol% 添加した。

水セメント比を 14% とし、繊維混入後のスランプフロー値 50 ± 7.5 cm、空気量 2.0% 以下をフレッシュコンクリートの目標値とした。

(c) 圧送および測定計画

ポンプ車には、最大理論吐出圧が 13.0 MPa のプッツマイスタージャパン社製 BSF28M.16H を用いた。ポンプの仕様を表一 3 に、圧送実験の配管概要を図一 1 に示す。

表一 3 ポンプ仕様

プッツマイスタージャパン社製 BSF28.16H	
最大理論吐出量 (m ³ /h)	108 (高圧) / 160 (低圧)
最大理論吐出圧 (MPa)	13.0 (高圧) / 8.5 (低圧)
コンクリートシリンダー径 (φ)	230
ストローク長 (mm)	2100

圧送距離は約 75 m、ポンプ車側 30 m の輸送管には呼び径 125A の H 管 (高圧配管 使用圧力 12.0 MPa) を、それ以降の吐出側には 125A の M 管 (中高圧配管 使用圧力 7.0 MPa) を用いた。

測定・試験項目を表一 4 に、輸送管内の圧力計測位置を図一 1 に示す。各圧送速度で圧送後のコンクリート試料を採取し、フレッシュコンクリート試験、圧縮強度試験を実施した。輸送管内の圧力は、図一 1 中の写真に示すように圧力変換器を輸送管に取付け、ポン

表一 4 測定・試験項目

	試験・測定項目	試験方法	備考
フレッシュ	スランプフロー	JIS A 1150	現場着荷卸、 圧送筒先試料 実験終了後荷卸
	空気量	JIS A 1128	
	コンクリート温度	JIS A 1156	
硬化	圧縮強度	JIS A 1108	現場着荷卸： 標準水中、簡易断熱* 材齢 28, 56, 91 日 圧送後、実験終了後荷卸 標準水中、材齢 56 日
圧送圧力	ピストン 前面圧力	車載メータ	目視
	管内圧力	圧力変換器	データロガー収録

*簡易断熱 (養生)：厚さ 20 cm 以上の断熱材 (発砲スチロール等) で 6 面覆った養生槽での養生方法。供試体を断熱材で覆うことにより供試体の温度が柱構造部材の内部温度履歴に近いものとなり、簡易断熱養生供試体で構造体コア強度と同等の結果が得られる。

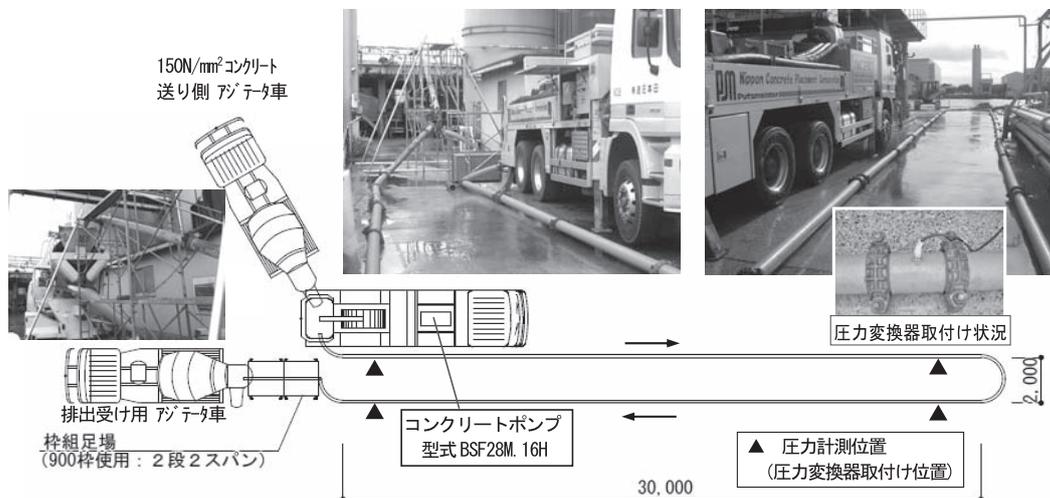
プ車から 5.5, 30, 41, 65 m の位置で計 4 箇所測定した。

なお、圧送実験は都内生コンプラント敷地内で標準期 (11 月) に行った。

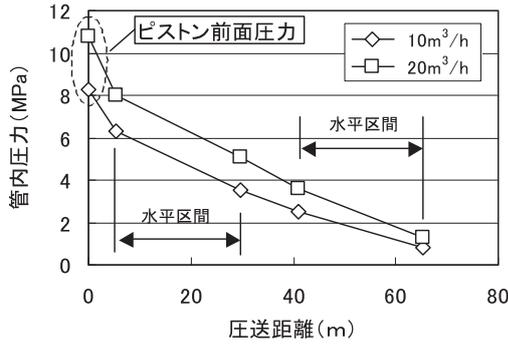
(2) 実験結果

(a) 圧送圧力

圧送距離と管内圧力との関係を図一 2 に示す。圧送速度 (吐出量) 20 m³/h でのピストン前面圧力は約 11 MPa で、一般強度のコンクリートの場合 (同一圧送条件で 1 MPa 程度) に比べて非常に大きい値を示した。また、30 m 以降の筒先側での最大圧力値は 4 ~ 5 MPa 程度であった。H 管と M 管の使用圧力の許容値はそれぞれ 12.0 MPa、7.0 MPa であり、使用範囲の上限に近い輸送管の選定であった。実際の施工に際しては、以降に示す水平管内圧力損失のデータを参考に管内圧力を算出して輸送管のグレードを決定するこ



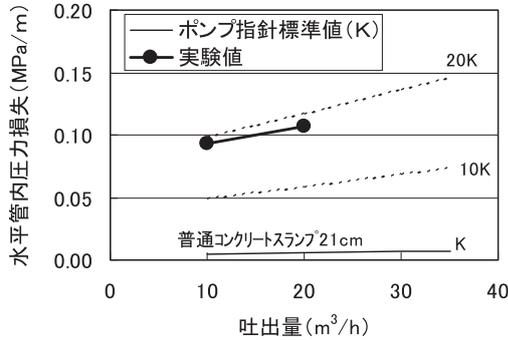
図一 1 ポンプ圧送実験の概要



図一 2 圧送距離と管内圧力の関係

ととなるが、今回の圧送条件で 150 N/mm² 級コンクリートの圧送が可能であることを確認した。

圧送速度（吐出量）と水平管内圧力損失との関係を 図一 3 に示す。同図には、日本建築学会「コンクリートポンプ工法施工指針・同解説」⁷⁾（以下、ポンプ施工指針）において普通コンクリートのスランブ 21 cm の圧力損失である標準圧力損失値 (K) を併せて示す。実験の圧力損失は水平 2 区間の平均値とした。圧送速度（吐出量）が大きいほど圧力損失が大きくなり、150 N/mm² 級コンクリートでは標準圧力損失の約 18.5 倍となることが確認された。



図一 3 吐出量と水平管圧力損失の関係

ここで、圧力損失を標準値の 20 倍とし、ポンプ施工指針の算出式を用いて圧送速度（吐出量）15 m³/h の場合における圧送負荷を求めた。鉛直方向 10 m + 水平方向 50 m の配管条件での圧送負荷（必要理論吐出圧）は、本ポンプ車の最大理論吐出圧より小さくなり、本条件での圧送が可能であることが確認された。150 N/mm² 級コンクリートの打設は低層階部分に限られるため、実施工でのポンプ圧送は十分可能と考えられる。

(b) フレッシュコンクリートの性状

圧送前後のフレッシュコンクリートの性状を表一 5 に示す。スランブフロー、空気量は圧送前（荷卸）とほぼ同じで、圧送による影響はみられなかった。

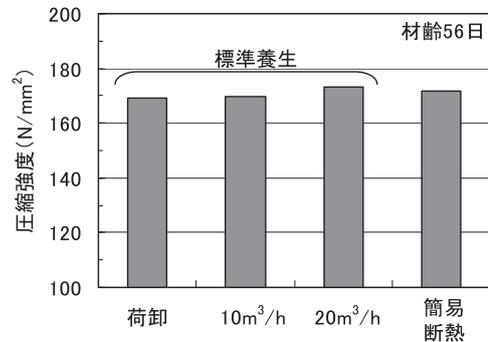
表一 5 フレッシュコンクリート性状の比較

	出荷後 経過時間	フレッシュ	
		スランブフロー (cm)	空気量 (%)
現着荷卸	30 分	55.0 × 54.0	1.9
圧送後	10 m ³ /h	57.0 × 56.0	2.0
	20 m ³ /h	55.5 × 54.0	2.0
経時（荷卸）試験*	90 分	54.5 × 53.0	1.8

* 圧送を行っていない試料

(c) 圧縮強度

材齢 56 日の圧縮強度試験結果を図一 4 に示す。圧送後の圧縮強度は圧送前（荷卸）とほぼ同じであった。また、構造物を模擬した簡易断熱養生供試体の圧縮強度は 172 N/mm² であり、150 N/mm² を満足することを確認した。



図一 4 材齢 56 日の圧縮強度試験結果

(3) まとめ

150 N/mm² 級超高強度コンクリートのポンプ圧送実験で得られた知見を以下に示す。

- ① 150 N/mm² 級超高強度コンクリートの実施工でのポンプ圧送は十分可能である
- ② 圧送速度 20 m³/h までの範囲ではフレッシュコンクリートの性状および圧縮強度に影響はみられない

4. おわりに

今回のポンプ圧送実験結果から 150 N/mm² 級超高強度コンクリートの実施工での圧送は十分可能であることが確認できた。本実験データが 150 N/mm² 級超高強度コンクリートのポンプ圧送資料として活用頂ければ幸いである。

ポンプ圧送実験に当たり、関東宇部コンクリート工業(株)大井工場、同豊洲工場、日本圧送(株)、並びに、(株)フローリックの関係各位の協力を得た。ここに付記して感謝の意を表します。

《参考文献》

- 1) プッツマイスタージャパン(株)技術資料
- 2) 中野文彦・岩嶋寛男・淵野満徳・浦野真次, 山頂まで高低差 220 m・配管延長 760 m の長距離圧送により構造物を構築 - NTT DoCoMo 権兵衛峠無線中継所新築工事 -, コンクリート工学, Vol.39, No.3, pp.52-57, 2001.3
- 3) 例えば 黒岩秀介・河合邦彦・小田切智明・嵐山正樹, Fc130 N/mm² の高強度コンクリートを用いた超高層集合住宅の施工, コンクリート工学, Vol.42, No.10, pp.44-49, 2004.10
- 4) 三井健郎・小島正朗・鴉越元紀・和地正浩・佐藤敏之・高尾全, Fc150 N/mm² 超高強度コンクリートの超高層集合住宅への適用 その 3 地上 59 階超集合住宅への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), A-1 材料施工, pp.45-46, 2007.8
- 5) 鳴瀬浩康・石中正人・中瀬博一・藤井和俊, 設計基準強度 150 N/mm² 級超高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究, 日本建築学会技術報告集, 第 15 巻, 第 30 号, pp.359-362, 2009.6
- 6) 河野政典・起橋孝徳・吉本竜也・飯塚宏行, Fc100 N/mm² 高強度コンクリートの超高層集合住宅への適用, 奥村組技術研究年報, Vol.35, pp.125-130, 2009.7
- 7) 日本建築学会, コンクリートポンプ工法施工指針・同解説, 2009.11



【筆者紹介】

河野 政典 (こうの まさのり)
 株式会社 奥村組 技術研究所
 建築研究課
 主任研究員

橋梁架設工事の積算

——平成 22 年度版——

■改訂内容

1. 積算の体系
 - ・大都市補正地区の拡大
 - ・施工箇所が点在する工事の積算方法
2. 橋種別
 - 1) 鋼橋編
 - ・損料改定による複合損料全面改訂
 - ・FRP検査路歩掛, 鋼製排水溝設置新規掲載ほか
 - 2) PC橋編
 - ・トラス梁特殊支保工 歩掛の追加 ほか
 - 3) 橋梁架設用仮設備機械等損料算定表
 - ・損料全面改訂

■ B5 判 / 本編約 1,100 頁 (カラー写真入り)
 別冊約 120 頁 セット

■定価

非会員 : 8,400 円 (本体 8,000 円)
 会 員 : 7,140 円 (本体 6,800 円)

※別冊のみの販売はありません。
 ※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも
 沖縄県以外 600 円
 沖縄県 450 円 (但し県内に限る)

■発行 平成22年5月

社団法人 日本建設機械化協会

〒 105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>