

論文 Fc100N/mm² 超高強度コンクリートのポンプ圧送性とCFT柱への圧入施工に関する実験的研究

小島 正朗*1・三井 健郎*2・森 堅太郎*3・和地 正浩*1

要旨：設計基準強度 100N/mm²の超高強度コンクリートの、ポンプ圧送性、CFT柱への圧入施工性および、CFT柱充填後の硬化過程および硬化後の品質を把握するため、実験的研究を行った。実大施工実験を行い得られた知見に基づき、CFT柱の圧入計画を立案し、所定の品質の設計基準強度 100N/mm² 超高強度コンクリートを地上 100m の高所まで圧入施工することができた。また、ポンプ圧送時の吐出量、コンクリートの粘性を表す指標であるLフロー初速度およびコンクリートの水セメント比から、ポンプ配管の圧力損失を推定できることを明らかにした。

キーワード：超高強度コンクリート、CFT柱、圧入施工、圧力損失、Lフロー初速度

1. はじめに

設計基準強度 100N/mm² クラスの超高強度コンクリートが、RC造超高層集合住宅に適用されている¹⁾。RC造では、柱部材へのバケット打設が多いのに対し、事務所建築で多いCFT造では、柱への圧入施工が多く、コンクリートには、RC造の場合より高い流動性が求められる。また、施工には、Fc100N/mm² クラスの超高強度コンクリートのポンプ圧送性、圧入施工性の把握が必要であるが、現状、十分な知見はない。

本研究では、設計基準強度 100N/mm² の超高強度コンクリートのCFT造への適用に向け、実大CFT柱の圧入施工実験を行い、圧入施工性、施工後の品質およびポンプ圧送性を把握した。実験の知見を活かし、実構造物で地上 100m までの圧入施工を行い、高所へのポンプ圧送性のデータを蓄積した。また、これらのデータを用い、高強度コンクリートの、ポンプ配管の圧力損失を推定する手法を検討した。

2. 実大施工実験

2. 1 実験概要

(1) 使用材料、調合およびコンクリートの製造

使用材料および調合を表-1、表-2に示す。設計基準強度は 100N/mm²、目標スランプフローは 65±5cm、目標空気量は 1.5±0.5%とした。事前に市中の生コン2社(U社、T社)で行った実機調合実験から、U社、T社のいずれも設計基準強度 100N/mm² を得るための水セメント比は、標準

表-1 使用材料(実大施工実験; U社)

セメント	シカフェム7 [®] ミックスセメント (密度3.08g/cm ³ 、比表面積6070cm ² /g)
細骨材	陸砂 (絶乾密度2.54g/cm ³ 、吸水率1.8%、粗粒率2.85)
	山砂 (絶乾密度2.51g/cm ³ 、吸水率1.8%、粗粒率2.80)
粗骨材	硬岩碎石2005 (絶乾密度2.63g/cm ³ 、吸水率0.7%、実積率60.6%)
高性能減水剤	ポリカルボン酸系

表-2 コンクリートの調合(実大施工実験; U社)

スランプフロー (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
				水	セメント	細骨材		粗骨材	高性能減水剤
						陸砂	山砂		
65±5	1.5±0.5	17.0	40.0	160	941	270	266	824	C×1.05%

表-3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	
フレッシュコンクリート	スランプフロー	JIS A 1150
	空気量	JIS A 1116
	コンクリート温度	棒状温度計による
	Lフロー試験	土木学会規準による
ブリーディング量	JIS A 1123	
圧入時および硬化過程	打上り速度	ストップウォッチ・巻尺による
	圧送管の圧力損失	圧力計による(図-1, 図-3参照)
	天端の沈降量	新都市ハウジング試験方法による(φ150×h300供試体使用)
硬化コンクリート	コンクリート内部温度	熱電対により約7日間
	圧縮強度(供試体)	標準養生: 7, 28, 56, 91日
	構造体強度(図-2参照)	CFT模擬柱コア: 28, 56日
	ダイヤフラム下面のコンクリート充填性	解体後に空隙をビニールシートに写しとり、画像解析により空隙率を測定

*1 (株)竹中工務店技術研究所建設技術開発部 工修 (正会員)

*2 (株)竹中工務店技術研究所建設技術開発部 主席研究員 工修 (正会員)

*3 (株)竹中工務店名古屋支店生産統括部 課長代理 (非会員)

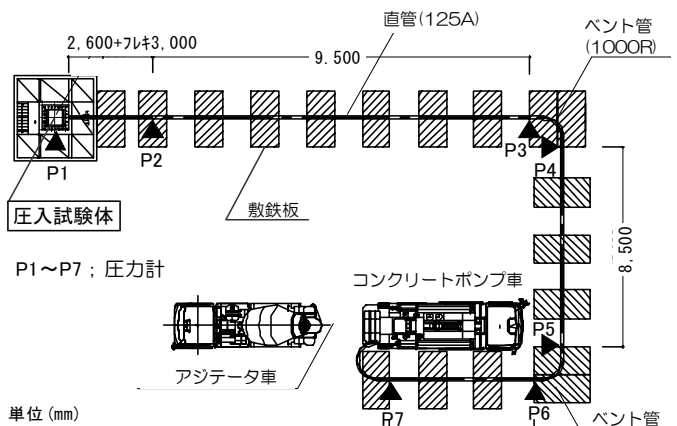


図-1 ポンプ配管（実大施工実験）

期が 20%，夏期および冬期が 18%であった．本実験は，冬期の実施であり水セメント比は 18% が想定されたが，より厳しい条件で施工性を確認するため，17%で実施した．コンクリートは U 社で，1 バッチ 1.5m³ を 150 秒間練り混ぜて製造した．コンクリートは合計 6m³ 製造し，2 台の運搬車に各 3m³ 積み込み実験場まで運搬した．

(2) CFT 模擬柱試験体およびポンプ配管

ポンプ配管を図-1に示す．CFT 模擬柱試験体を図-2に示す．コンクリートポンプは，理論最大吐出圧 22MPa，理論最大吐出量 47m³/h の移動式のものを使用した．

(3) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-3に示す．

2. 2 実大施工実験結果

(1) フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す．2車目で実施したスランプフローおよびLフロー初速度の経時変化を図-3に示す．到着後，荷卸しは60分以内に圧入を終了する計画であるが，荷卸し後90分まで所定のスランプフローが確保できた．コンクリートの粘性を表す指標であるLフロー初速度は，荷卸し後60分

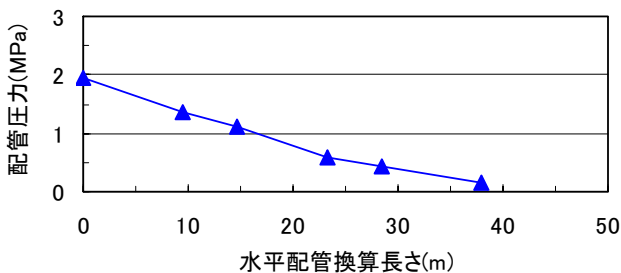


図-4 水平配管換算長ささと配管圧力の関係

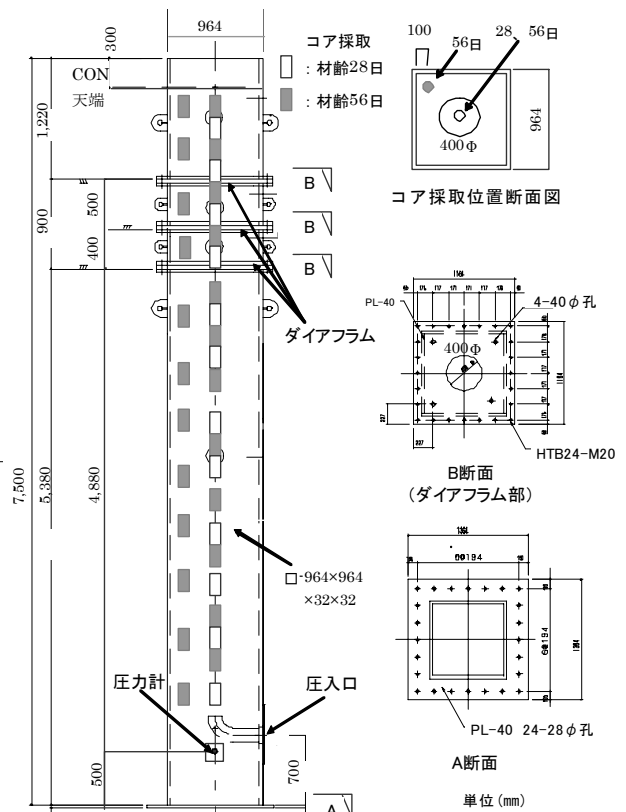


図-2 CFT 模擬柱試験体

表-4 フレッシュコンクリート試験結果

台	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)	Lフロー初速度 (cm/s)	ブリーディング量 (cc/cm ²)	塩化物量 (kg/m ³)
1	65.0×63.0	1.6	14.0	3.0	5.2	0.00	0.031
2	68.0×70.0	1.6	14.0	3.0	7.0	—	—

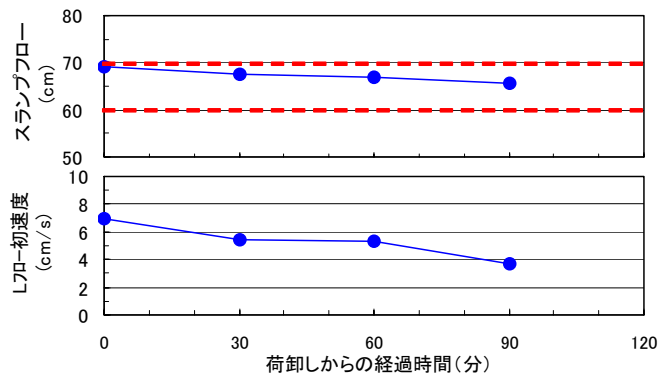


図-3 フレッシュコンクリートの経時変化

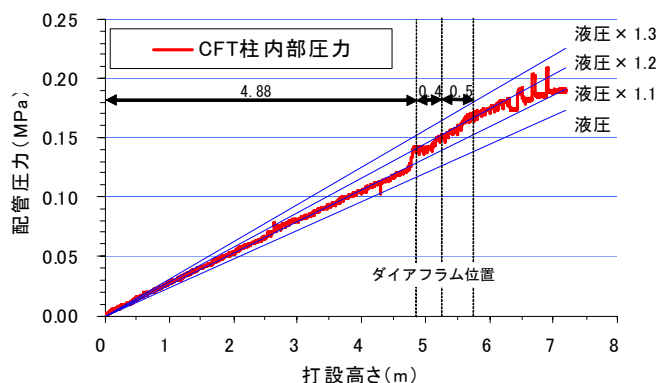


図-5 柱側面の圧力

まで5~7cm/s, 90分後で4cm/s程度であった。

(2) ポンプ圧送性状

図-4に水平配管換算長さとの配管圧力の関係を示す。26m³/h(打ち上がり速度0.62m/分)の条件で、圧力損失は0.05MPa/m程度であった。

(3) CFT柱圧入圧力

図-5にCFT柱側面の圧力測定結果を示す。圧入開始からダイアフラムまでは液圧の1.1倍程度、ダイアフラム通過後は液圧の1.2倍程度となった。圧力の増大率は、既往の設計基準強度80N/mm²までの結果^{2,3)}と同等であった。

(4) コンクリート天端の沈降およびダイアフラム下面の充填状況

コンクリート天端の沈降量および温度の経時変化を図-6に示す。φ15×30cm 供試体の沈降量は0.9mmであり、新都市ハウジング協会技術指針に示される規定値2mm以下を満足した。また、CFT柱のコンクリート天端の沈降量は、1.8mmであり、これまでの実験^{2,3)}と同程度の沈降量であった。過去の実績からダイアフラム部の初期欠陥が生じる可能性は低いと考えられた。解体時にダイアフラム下面の充填状況を確認した状況を写真-1に示す。3枚のダイアフラム下面の空隙率は、上から順に、5.9%, 3.2%, 1.9%であり、ダイアフラム下面とコンクリートの間に大きな空隙はなく、密実に充填できていた。

(5) 圧縮強度

図-7(a)にCFT模擬柱から採取した材齢56日コア強度の高さ分布を、(b)に事前の実機調査試験の構造体強度(91日コア)の試験結果を示す。CFT模擬柱の56日平均コア強度は130N/mm²であり、設計基準強度100N/mm²を十分上回っていた。また、事前の実機調査実験の冬期構造体強度133N/mm²と同等であった。

3 実施工

3.1 実施工概要

(1) 使用材料および調査

使用材料および調査を表-5, 表-6示す。

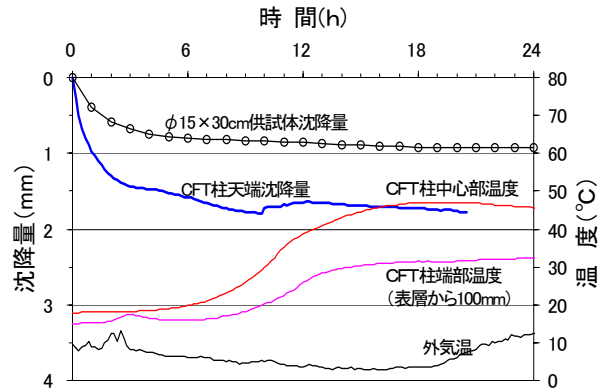
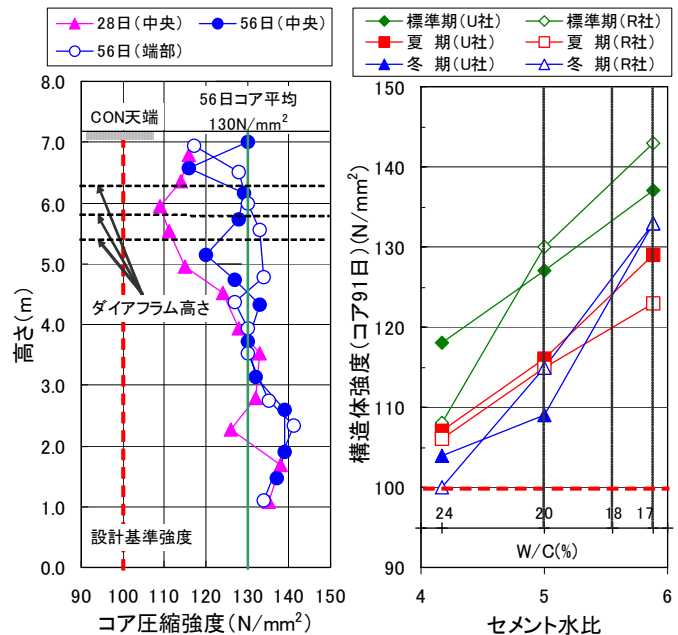


図-6 コンクリート天端の沈降と温度の経時変化



写真-1 最上段ダイアフラム下面の充填状況



(a) CFT模擬柱 (b) 実機調査試験構造体

図-7 コアの圧縮強度

表-5 使用材料(実施工; T社)

セメント	シカフェーム7レミクスセメント(密度3.08g/cm ³ 、比表面積6070cm ² /g)
細骨材	陸砂(絶乾密度2.55g/cm ³ 、吸水率2.1%、粗粒率2.75)
	山砂(絶乾密度2.51g/cm ³ 、吸水率2.1%、粗粒率2.75)
粗骨材	硬岩碎石2005(絶乾密度2.65g/cm ³ 、吸水率0.6%、実積率59.0%)
高性能減水剤	ポリカルボン酸系

表-6 コンクリートの調査(実施工; T社)

スランプリューロ(㎝)	空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)					
				水	セメント	細骨材		高性能減水剤	
						陸砂	山砂		
65±10	1.5±1.0	20.0	40.7	160	800	359	236	894	C×0.90%

標準期の施工であったため、水セメント比は20% (T社) とした。スランプフロー、空気量は、それぞれ $65 \pm 10 \text{cm}$ 、 $1.5 \pm 1.0\%$ で管理した。

(2) 圧入施工

Fc100N/mm²の超高強度コンクリートを、地下1階から20階(最高圧入高さGL+98.1m)まで、4回に分けて圧入施工した。表-7に示す5~8階および8~14階の7本の柱を対象に、圧入施工時の配管圧力を測定した。目標吐出量は、柱中間で圧入速度を切り替えたものを含め、10~40m³/hの範囲とした。配管圧力の測定位置を図-8に示す。圧入フロアでは、鉛直配管から水平配管に切り替わる前後2点と、柱圧入口までの区間で1~3点の配管圧力を計測した。コンクリートポンプは、理論最大吐出圧22MPa、理論最大吐出量76m³/hの固定式のものを使用した。配管はいずれも5インチ管とした。

(3) 試験項目および方法

試験項目および試験方法は、2章の表-3と同様とした。

3. 2 実施工結果

(1) フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状を図-9に示す。スランプフロー、空気量ともに管理幅の範囲内であった。スランプフローが57.0~71.5cm、

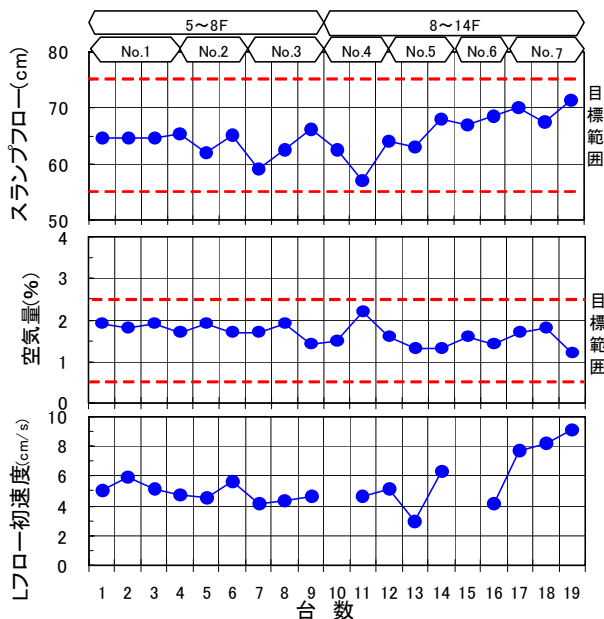


図-9 フレッシュコンクリートの性状

表-7 測定条件

柱No	階	圧入口高さ(m)	充填高さ(m)	打設量(m ³)	目標吐出量(m ³ /h)
No.1	5F~8F	5FL+1.5 (GL+24.5)	21.0 (GL+23.7~44.7)	13.9	20
No.2					15(2-1), 30(2-2)
No.3					10(3-1), 40(3-2)
No.4	8F~14F	8FL+1.5 (GL+45.5)	27.0 (GL+44.7~71.7)	10.9	15
No.5					15
No.6					20
No.7					25

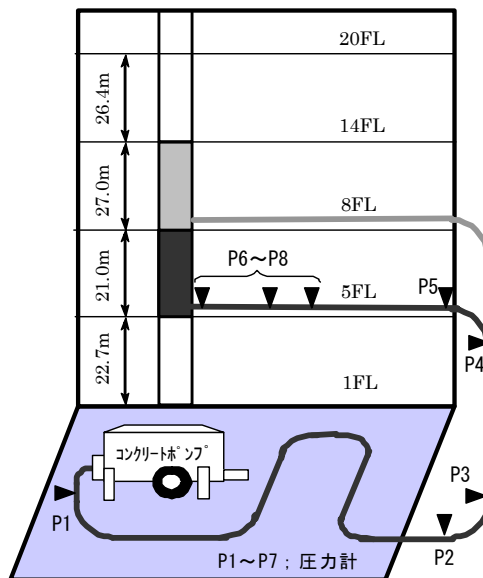


図-8 配管圧力測定位置

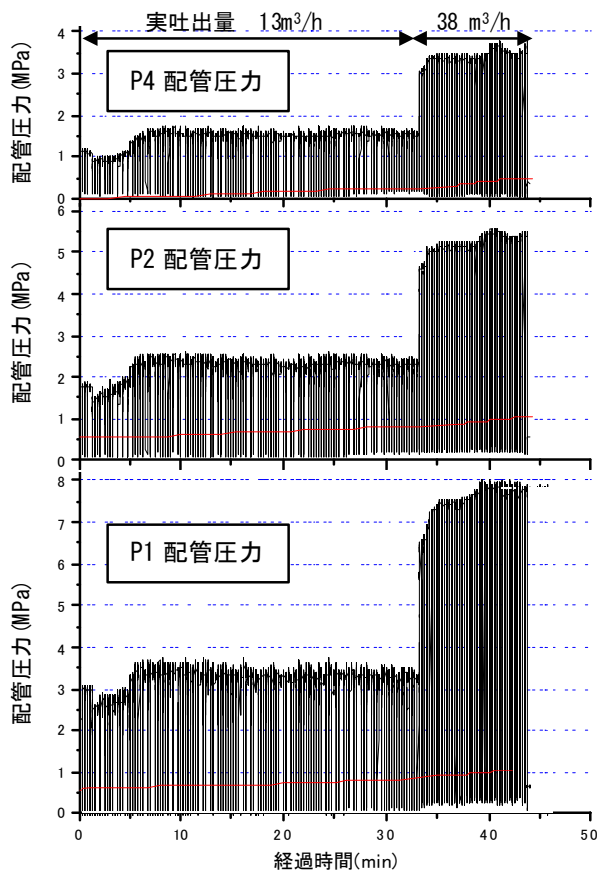


図-10 配管圧力の測定結果 (柱 No. 3)

Lフロー初速度が3.0～9.2cm/sの範囲であり、比較的幅広い性状であった。

(2) ポンプ圧送性状

配管圧力の測定結果の一例を図-10に示す。また、直管に換算した配管長さと配管圧力の関係を図-11に示す。水平配管部分の傾きの平均値から求めた圧力損失と、吐出量の関係を図-12に示す。吐出量が大きくなるほど圧力損失も大きくなる傾向が認められるが、ばらつきが大きい。圧力損失に、Lフロー初速度（コンクリートの粘性）やスランプフロー（降伏値）といったフレッシュコンクリートの性状の違いが影響しているためと考えられる。適切なポンプ圧送計画の立案のためには、フレッシュコンクリートの性状が圧力損失に及ぼす影響を把握しておくことが重要と考えられる。

(3) 圧縮強度

構造体コンクリート強度の管理供試体（標準養生28日）強度は、112～136N/mm²の範囲であった。管理用供試体と構造体の強度差₂₈S₉₁=1N/mm²をFcに加えた合格判定強度101N/mm²を上回っていることが確認できた。

4. 高強度コンクリートのポンプ圧送時圧力損失の検討

本研究の実測結果および既往⁴⁾の実験データ（水セメント比23～37%、スランプフロー55cm以上）を用い、高強度コンクリートのポンプ圧送時の圧力損失の推定式を検討した。

コンクリートをビンガム流体と仮定したときの管内流量を求める Buckingham-Reiner 式を、圧力勾配 $\Delta P/L$ すなわち圧力損失を求める形に変形すると(1)式が得られる。

$$\frac{\Delta P}{L} = Q_B \cdot \frac{8\eta}{\pi R^4} \left/ \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_0}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 \right\} \right. \dots (1) \text{式}$$

ΔP : 圧力差(Pa), L : 配管長さ(cm)

Q_B : コンクリート流量(cm³/s), η : 塑性粘度(Pa·s)

R : 配管半径(cm), τ_y : 降伏値(Pa)

r_0 : 栓流半径 $r_0 = 2\tau_y / \left(\frac{\Delta P}{L} \right)$ (cm)

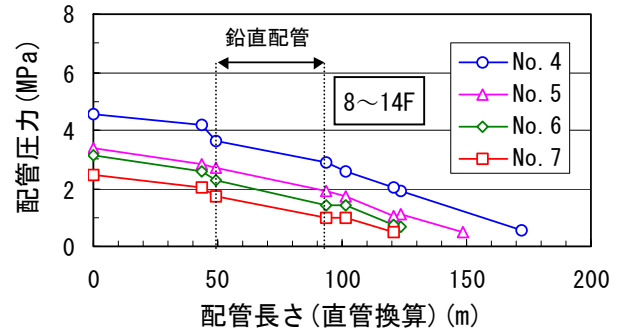
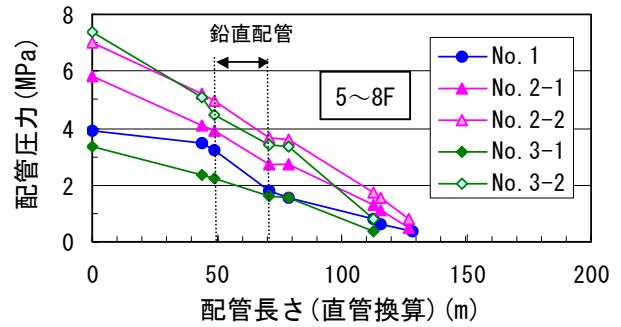


図-11 配管長さと管圧力の関係

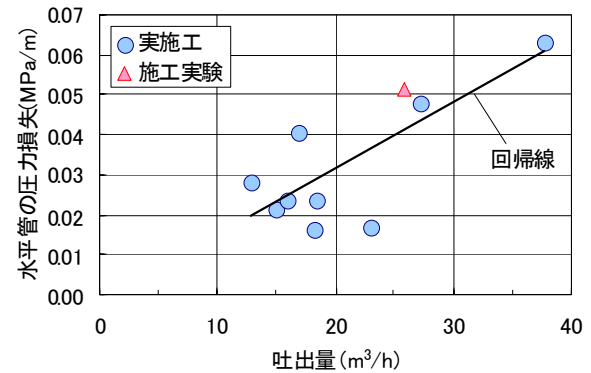


図-12 吐出量と圧力損失の関係

コンクリートの塑性粘度 η と、Lフロー試験における流出口5～10cm間の移動に要する時間 T_{5-10} は、 $T_{5-10} = a \cdot \eta$ （ a は密度、降伏値で変化する係数）で近似でき⁵⁾、距離5cmを移動時間 T_{5-10} で除したLフロー初速度 L_v を用いると塑性粘度 η は、 $\eta = 5 / (a \cdot L_v)$ と表せる。

一方、対象とするスランプフロー55～70cmのコンクリートの降伏値 τ_y の推定値⁶⁾は、25～80Pa程度となる。従って、(1)式右辺の分母は、 $\Delta P/L$ が実測値の0.01～0.08Pa/mの範囲では0.83～0.99であり、圧力損失が0.01MPa/mと小さい場合に2割小さく評価する程度である。

以上のことから、(1)式右辺の分母を1とし、塑性粘度 η をLフロー初速度 L_v で表すと、圧力損失 $\Delta P/L$ は、流量 Q_B に比例し、 L_v に反比例す

る形で推定できると考えられる。

既往の実験結果から、Lフロー初速度 $Lv(\text{cm/s})$ と全流量（吐出量） $Qv(\text{m}^3/\text{h})$ を用いた高強度コンクリートの圧力損失 $\Delta P/L(\text{MPa/m})$ の推定式は、(2)式のように表される⁴⁾。

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{0.0149Qv + 0.0825}{Lv^{1.2}} \dots (2) \text{ 式}$$

本研究の実測データと既往の実験データの、実測値と推定値の対応を図-13(a)に示す。既往の実験データは、(2)式で圧力損失を精度良く推定できているが、本研究の水セメント比が17%、20%の場合は、推定値が大きくなっている。これは、コンクリートの全流量 Qv は、(1)式のビンガム流量 Q_B と管壁をすべる流量 Q_s の合計⁷⁾ であるとされているが、水セメント比が極めて小さいと、配管中で加圧されても管壁に水膜が生じにくく、全流量 Qv に対するビンガム流量 Q_B の割合が既往の実験より高くなっていると推測される。このため、全流量 Qv が同じでも、(2)式による推定値が大きくなったと考えられる。

圧力損失の予測式に、 W/C の影響を加味するため、全流量 Qv のうちすべり流量 Q_s は、圧送時に管壁に生じる膜の粘性に反比例し、膜厚に比例する⁷⁾とされており、これを考慮して、 $Qv(W/C)/Lv$ 、 Qv/Lv 、 $(W/C)/Lv$ 、 $(W/C)/Sf^5$ 、 $1/Sf^5$ ($Sf(\text{m})$) など説明変数に加え、水セメント比の違いの影響を考慮できる圧力損失の推定式を重回帰分析により求めた(3)式。

$$\frac{\Delta P}{L} = 0.012 \frac{Qv}{Lv} - 0.274 \frac{W/C}{Sf^5} \dots (3) \text{ 式}$$

(3)式による実験値と推定値の関係を図-13(b)に示す。(2)式に比べて、水セメント比17%~20%の超高強度域でも実測値と推定値に乖離がなく、幅広い高強度コンクリートの圧力損失の

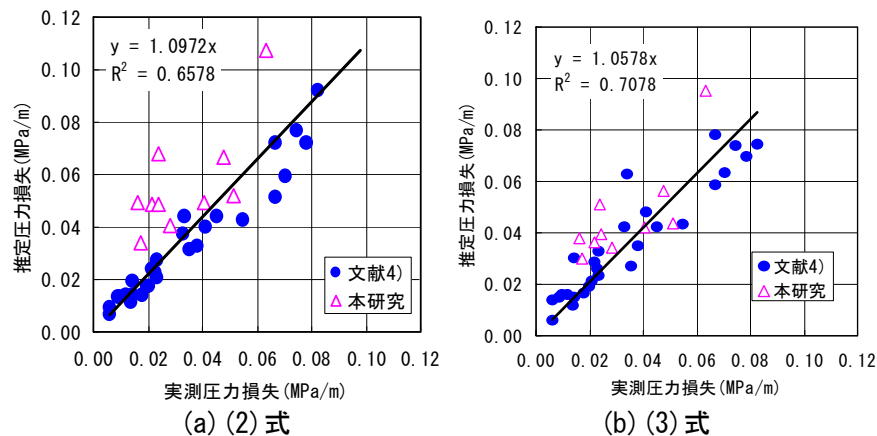


図-13 実測値と推定値の関係

推定に適用可能と考えられる。

5. まとめ

設計基準強度 100N/mm^2 超高強度コンクリートのポンプ圧送性およびCFT柱への圧入施工性について検討し、以下の知見が得られた。

- (1)水セメント比 17~20%の超高強度コンクリートを、CFT柱に密実に圧入施工することができる。CFT柱圧入口での圧力増大係数は、1.1~1.2倍程度で、従来と同程度である。
- (2)水セメント比 17%~37%の高強度コンクリートのポンプ圧送時の圧力損失は、吐出量、Lフロー初速度、水セメント比を用いて推定することができる。

参考文献

- 1)三井健郎ほか:Fc100N/mm²超高強度高耐火コンクリートの超高層RC造建物への大量施工,日本建築学会技術報告集,第20号,pp47-52,2004年12月
- 2)岩清水隆ほか:Fc=800kgf/cm²の超高強度コンクリートを用いた鋼管コンクリートの施工(仮称)阪神西梅田C街区ビル,コンクリート工学,Vol.35,No.5,pp.19-24,1997
- 3)米澤敏男ほか:シリカフェームを用いた超高強度コンクリートの鋼管圧入施工,コンクリート工学,Vol.31,No.12,pp.22-33,1993.12
- 4)岩清水隆:コンクリートの圧送に対する建築工事におけるゼネコンの対応,第1回圧送技術研究会-コンクリート圧送技術の現状と課題-,2004.7
- 5)西之園一樹ほか:Lフロー試験時の粘塑性体の流動シミュレーション,日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道),材料施工A,pp.465-466,1995.8
- 6)小門武ほか:スランプフロー試験によるフレッシュコンクリートの降伏値評価法の研究,土木学会論文集, No.578/V-37,19-29,1997.117)
- 7)鈴木一雄ほか:コンクリートの管内流動に関する研究,コンクリート工学論文集,第15巻第2号,pp.47-57,2004年5月