

圧送負荷 20N/mm^2 の実大圧送実験による コンクリートの圧送性検討

太田 貴士^{*1}・中村俊之^{*2}・加藤 優志^{*1}・黒岩 秀介^{*1}

Keywords : high pressure, pumping experiment, fresh properties, in-pipe pressure loss, lightweight concrete, high strength concrete
高圧力, 圧送実験, フレッシュ性状, 管内圧力損失, 軽量コンクリート, 高強度コンクリート

1. はじめに

現在, 日本では高さ 300m 級の超高層ビルの施工実績が増えつつある^{例え ば 1), 2)}。今後も高さ 300m を超えるビルの建設が計画されており, 国内での経験が乏しい高さへのコンクリート圧送が必要となる。高所圧送や長距離圧送ではコンクリートの品質の変化が生じやすいことが経験的に知られており³⁾, 例えばスランブ 8~18cm のコンクリートで圧送距離 100m 当たり 2cm 程度, スランブ 18cm 以上の場合は 100m 当たり 0.5cm 程度スランブが低下する報告もある⁴⁾。また, 圧送距離の増加に伴い, コンクリートポンプの根本(筒元)に作用する圧力すなわち圧送負荷も大きくなる。海外の事例として, Yan らが行った水結合材比 29~31% の高強度コンクリートの高所圧送では, 高さ約 400m で 20N/mm^2 程度, 最高高さ 555m で最大 25N/mm^2 程度の圧送負荷が生じている⁵⁾。今後, 国内においても超高層ビルの建設で 20N/mm^2 程度の高い圧送負荷が生じる圧送を行うことが予想されるが, このような高圧圧送に関する国内の施工事例や研究事例は限られており, 圧送によるコンクリートの品質への影響や実現可能な吐出量などの知見が不十分と言える。

本研究では, 実施工におけるコンクリートの高圧圧送に資するデータ取得を目的として, 国内最大級となる 20N/mm^2 程度の圧送負荷が生じる実大圧送実験を実施し, 圧送配管内の圧力計測ならびに圧送前後におけるコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度の検討を行った。

2. 実験対象のコンクリート

本研究では, 高圧圧送において現時点で課題があると考えられる下記のコンクリートを実験対象とした。

(1) 軽量コンクリート 1 種および 2 種

当コンクリートは, 高圧時の材料分離や軽量骨材の圧力吸水に伴う流動性の低下および輸送管の閉塞が懸念される。

(2) 高強度コンクリート

当コンクリートは, 超高層ビルへの適用事例が多い鋼管充填コンクリートとして圧入に必要な高い流動性と流動保持性が要求される。粘性が高く圧送負荷が大きいため圧送・圧入条件が厳しい点が特徴である。本実験の主対象はシリカフュームを使用しない設計基準強度(以下, F_c) $70\sim 80\text{N/mm}^2$ のコンクリートとし, 比較用としてシリカフュームを使用したコンクリートも対象とした。

(3) 超高強度コンクリート

当コンクリートは, 鋼管充填コンクリートとして圧入に必要な高い流動性と流動保持性が要求される。シリカフュームを使用しても粘性が高く, 圧送負荷が大きくなり十分な吐出量が得られない懸念のある $F_c150\text{N/mm}^2$ 級を対象とした。

圧送実験に用いたコンクリートの使用材料および調合を表-1, 表-2 および表-3 に示す。調合 L1 は普通ポルトランドセメント, 陸砂, 砕砂, 人工軽量粗骨材および高性能 AE 減水剤を使用し, 調合 L2 は上記材料に加えて人工軽量細骨材を使用した。いずれも水セメント比 52%, 単位水量 185kg/m^3 とした。

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室

* 2 建築本部 技術部

調合 H および HW は中庸熱ポルトランドセメント、山砂、硬質砂岩碎石および高性能 AE 減水剤を使用し、水セメント比 24.9%，単位水量はそれぞれ 170kg/m³ および 185kg/m³ とした。調合 HS はシリカフェーム混入セメント、山砂、硬質砂岩碎石および高性能減水剤を使用し、水セメント比 22.2%，単位水量 151kg/m³ とした。

調合 UH は結合材として中庸熱ポルトランドセメントと、JASS 5 M-701 および JIS A 6207 にそれぞれ適合するスラグせっこう系混和材およびシリカフェームをプレミックスした高強度用混和材を使用し、安山岩砕砂、人工軽量細骨材、安山岩碎石および高性能減水剤を用いて、水結合材比 15%，単位水量 150kg/m³ とした。

3. 実験概要

3.1 圧送条件

本実験では全ての調合について圧送時の最大管内圧力が 20N/mm² に達することを目標とし、図-1 に示す輸送管の配管計画を定めた。図-1 には輸送管長さや輸送管の種類および使用長さを併記した。配管状況を写真-1 に示す。輸送管は全て水平管とし、実配管長さおよび水平換算長さは、軽量コンクリート 1 種および 2 種では 735m および 855m，高強度コンクリートでは 366m および 412m，超高強度コンクリートでは 249m および 277m とした。水平換算長さの算出には文献 6) を参照し、ベント管およびフレキシブルホースの水平換算係数をそれぞれ 3 および 2 とした。実配管長さが 735m となる軽量コンクリート 1 種および 2 種の圧送実験では、途中で輸送管の設置高さを 200mm 上げて、高さ方向に 2 段組とする平面計画とした。全ての鋼製輸送管およびフレキシブルホースは 125A を使用し、輸送管の管内圧力は図-1 に示す位置に設置したフラッシュダイアフラム型圧力計を用いて 0.1 秒間隔で計測した。コンクリートポンプはφ200×2100mm のコンクリートシリンダーを搭載した定置型のピストン式を使用した。各調合で目標の吐出量を 3～4 段階設定して圧送実験を行った。

3.2 試験項目

フレッシュコンクリートの試験は、荷卸しおよび筒先についてスランプ、スランプフロー、空気量、コンクリート温度を測定した。経時によるフレッシュ性状への影響を確認するために、荷卸しの際に採取した試料の一部を静置状態で保管し、筒先で採取した試料の試験と同時期に試験を実施した。また、V 漏斗流下時間⁷⁾の測定ならびにφ100×200mm 供試体による圧縮強

表-1 軽量コンクリート 1 種・2 種の使用材料および調合
Table 1 Materials and mix proportions of lightweight concrete

記号	スランプ ^{a)} (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W1	C1	S1	S2	S3	G1
L1	23 (±2)	5.0 (±1.5)	52	185	356	447	458	-	402
L2	23 (±2)	5.0 (±1.5)	52	185	356	159	163	365	402

W1：地下水
C1：普通ポルトランドセメント，密度 3.15g/cm³
S1：陸砂，表乾密度 2.60g/cm³，粗粒率 2.40
S2：石灰石砕砂，表乾密度 2.68g/cm³，粗粒率 3.20
S3：人工軽量細骨材，絶乾密度 1.65g/cm³，粗粒率 2.75，吸水率 15%
G1：人工軽量粗骨材，絶乾密度 1.30g/cm³，実積率 64.0%，吸水率 28%
※S3 および G1 の単位量は絶乾状態における値を示した。
※混和剤は高性能 AE 減水剤を使用し，使用量は単位セメント量に
対して L1 では 0.6%，L2 では 0.3% とした。

表-2 高強度コンクリートの使用材料および調合
Table 2 Materials and mix proportions of high strength concrete

記号	スランプ フロー ^{a)} (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W2	C2	C3	S4	G2	G3
H	65 (±10)	2.0 (±1.5)	24.9	170	683	-	671	905	-
HW	70 (±10)	2.0 (±1.5)	24.9	185	743	-	619	870	-
HS	70 (±10)	2.0 (±1.5)	22.2	151	-	681	673	-	921

W1：上水道水
C2：中庸熱ポルトランドセメント，密度 3.21g/cm³
C3：シリカフェーム混入セメント，密度 3.08g/cm³
S4：山砂，表乾密度 2.60g/cm³，粗粒率 2.65
G2：硬質砂岩碎石，表乾密度 2.67g/cm³，実積率 61.0%
G3：硬質砂岩碎石，表乾密度 2.64g/cm³，実積率 60.0%
※混和剤は H，HW に高性能 AE 減水剤，HS に高性能減水剤を使用し，使用量は単位セメント量に対して H では 1.56%，HW では 1.49%，HS では 1.35% とした。

表-3 超高強度コンクリートの使用材料および調合
Table 3 Materials and mix proportions of ultra high strength concrete

記号	スランプ フロー ^{a)} (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W3	B		S5	S6	G4
					C4	A			
UH	75 (+5,-10)	1.5 (±1.0)	15	150	800	200	254	160	818

W3：地下水
B：結合材
C4：中庸熱ポルトランドセメント，密度 3.21g/cm³
A：高強度用混和材，密度 2.44g/cm³
S5：安山岩砕砂，表乾密度 2.61g/cm³，粗粒率 2.83
S6：人工軽量細骨材，絶乾密度 1.65g/cm³，粗粒率 2.75，吸水率 15%
G4：安山岩碎石，表乾密度 2.62g/cm³，実積率 61.1%
※S6 の単位量は絶乾状態における値を示した。
※混和剤は高性能減水剤を使用し，使用量は単位結合材量の 1.45% とした。

度試験を実施した。供試体の養生方法および試験材齢は、軽量コンクリート 1 種および 2 種，高強度コンクリートでは標準養生 28 日，超高強度コンクリートでは 40℃温水養生 28 日とした。なお，フレッシュ性状試験時の外気温は 7～19℃の範囲であった。

コンクリートはトラックアジテータでコンクリートポンプまで運搬した。コンクリートの製造場所の違いにより，製造後から荷卸しまでに要した時間は，軽量コンクリート 1 種および 2 種が約 60 分，高強度コンクリートが約 90 分，超高強度コンクリートが約 20 分で

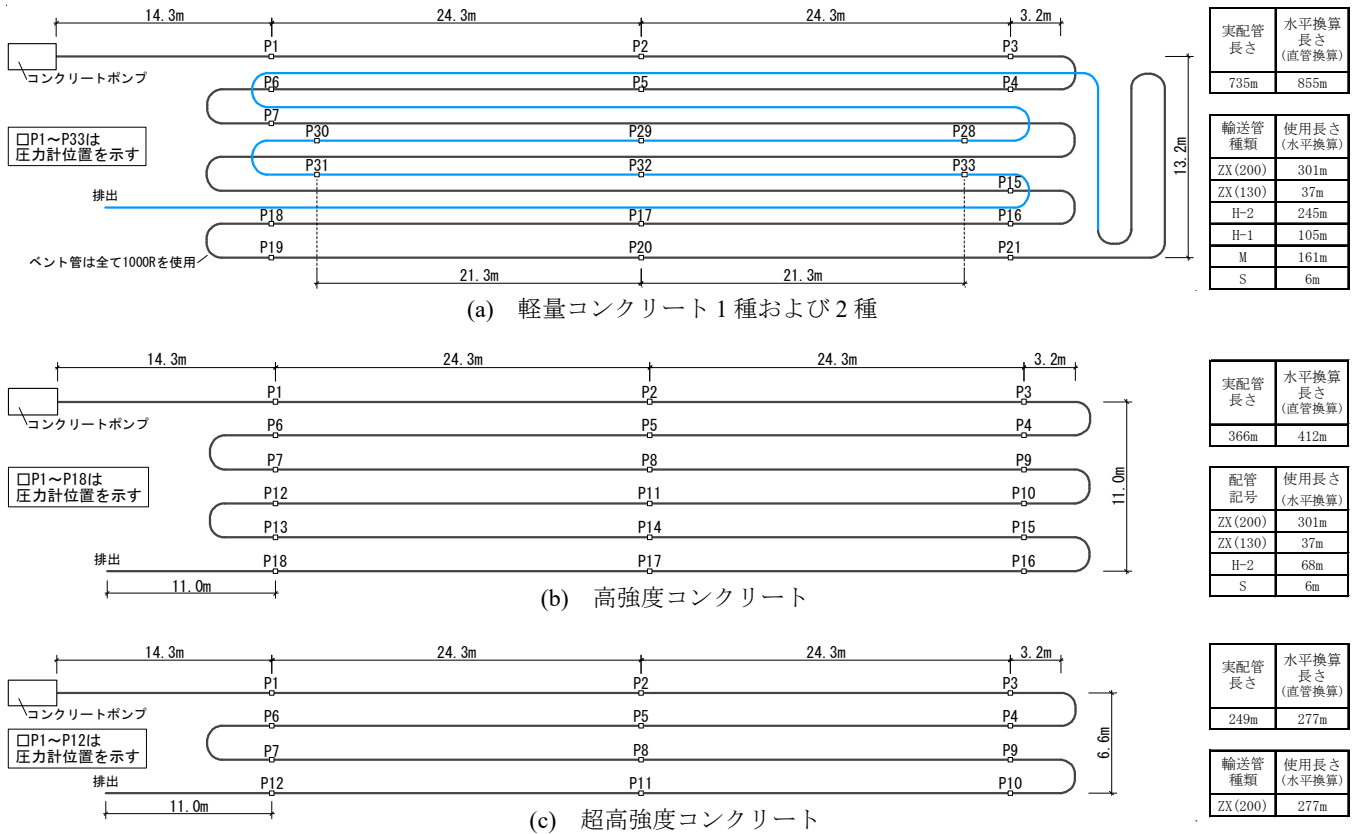


図-1 輸送管の配管概要

Fig.1 Piping overview



写真-1 配管状況

Photo.1 Piping situation

あった。圧送実験に用いたトラックアジテータ全車の荷卸しコンクリートが目標のフレッシュ性状を満足することを確認した。同一のトラックアジテータのコンクリートについて荷卸しと筒先のフレッシュ性状を比較するために、ポンプ筒元から筒先までの輸送管容積や圧送に要するピストン回数を事前に算出しておき、各トラックアジテータのコンクリートの圧送開始からのピストン回数によって筒先試料の採取時期を判断した。

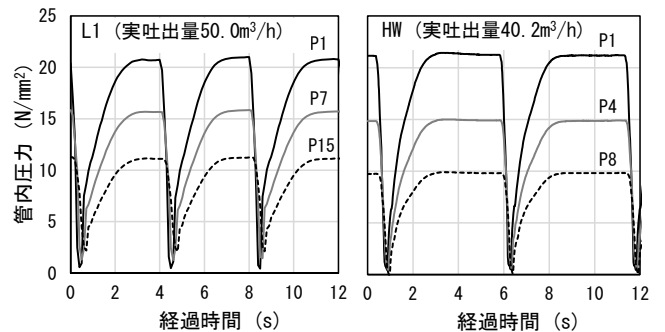


図-2 管内圧力波形の一例

Fig.2 An example of a pressure waveform inside a pipe

4. 実験結果

4.1 管内圧力計測結果

いずれの調合および吐出量の水準においても輸送管の閉塞を生じることなく筒先まで圧送できることが確認された。また、吐出量の大きい水準において、圧送時の最大管内圧力は目標とした 20N/mm^2 程度に達した。

管内圧力波形の一例を図-2 に、管内圧力分布を図-3 に示す。図-3 に示した管内圧力は 1 回のピストンにおける圧力波形のフラットな領域の値とした。実吐出量は圧力波形から求めた 1 ピストン当たりの時間により 1 時間当たりのピストン回数を算出し、その回数にコン

クリートシリンダー容量と機械効率を乗じて求めた。機械効率は式(1)に示すように、トラックアジテータ 1 台当たりにおける積載量および圧送に要した時間から算出した吐出量を、コンクリートシリンダー容積および圧送に要したピストン回数から算出した理論吐出量で除して求めた。なお、積載量については工場による容積保証の割り増しを考慮しない値を計算に用いた。

$$\eta_m = \left(\frac{V_a}{t} \right) \div \left(\frac{nV_c}{t} \right) \quad (1)$$

ここに、 η_m ：機械効率、 V_a ：トラックアジテータ 1 台当たりの積載量 (m³)、 t ：トラックアジテータ 1 台当たりの圧送に要した時間 (h)、 n ：トラックアジテータ 1 台当たりの圧送に要したピストン回数、 V_c ：コンクリートシリンダー容積 (0.066m³)

図-3 より、いずれの調査も管内圧力は筒元側で最も大きくなり、圧送距離に応じて減少した。また、実吐出量が大きいほど管内圧力は概ね大きくなった。いずれの調査も筒元から最初のベント管の通過直後までの P1-P4 間で大きな圧力差が生じ、P4 以降では P1-P4 間よりも圧力差が小さくなる傾向となった。有馬ら⁸⁾が行った Fc100N/mm² および Fc120N/mm² の高強度コンクリートの圧送実験では、管内圧力損失はコンクリートポンプに近いベント管で最も大きく、本研究においても同様の傾向が確認された。

実吐出量と管内圧力損失の関係を図-4 に示す。管内圧力損失は筒元近傍直線区間 (P1-P3) および筒先近傍直線区間 (軽量コンクリート 1 種および 2 種では P31-P33、高強度コンクリートでは P16-P18、超高強度コンクリートでは P10-P12) について、それぞれ管内圧力差

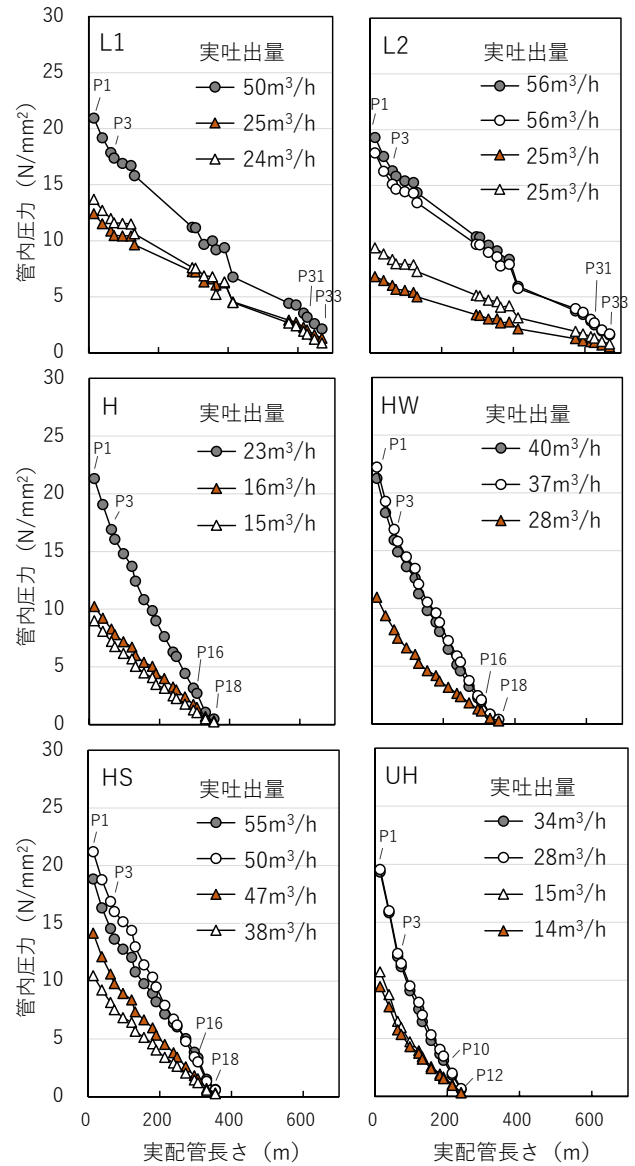


図-3 管内圧力分布

Fig.3 Pressure distribution inside the pipe

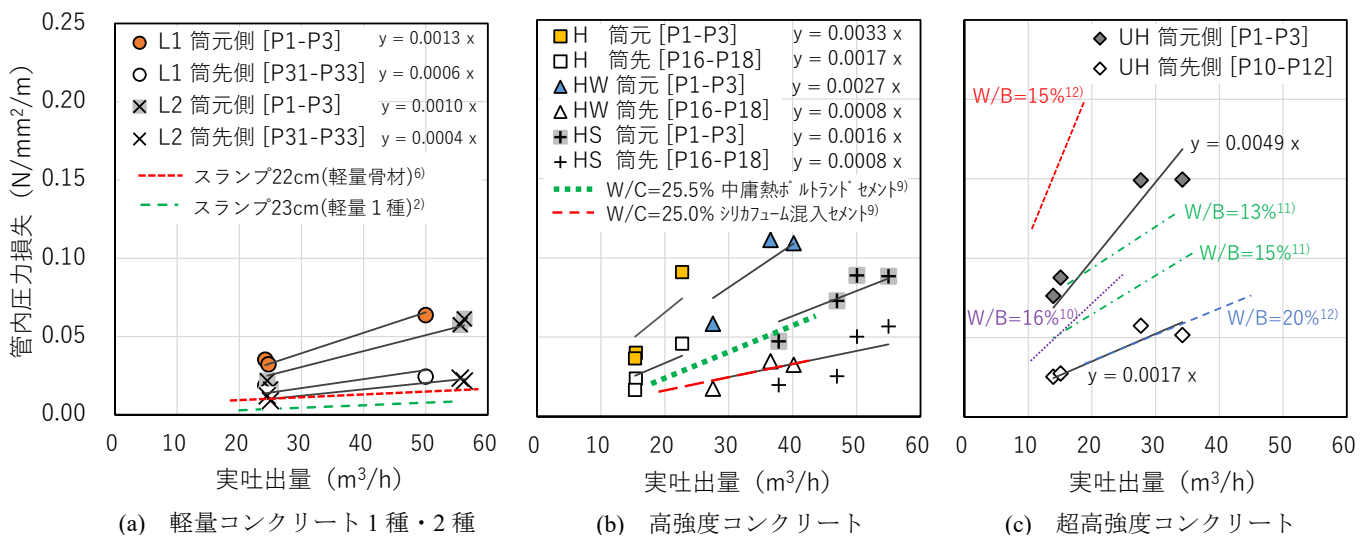


図-4 実吐出量と管内圧力損失の関係

Fig.4 Relationship between actual discharge rate and pressure loss in pipe

を区間内距離で除して求めた。いずれも管内圧力損失は実吐出量の増加に伴って増大する傾向であり、筒先側よりも筒元側の方が大きくなった。

図-4 (a)には軽量骨材を使用したスランプ 22cm コンクリートの圧力損失 (125A 管) の標準値⁶⁾や、既往²⁾のスランプ 23cm 軽量コンクリート 1 種の結果を併記した。これらの結果と比べて本実験の調合 L1 および L2 の管内圧力損失は、筒元側では 2~4 倍程度に大きく、筒先側では 1~2 倍程度に大きくなった。いずれも調合 L1 の方が調合 L2 よりも大きかった。

図-4 (b)には、既往⁹⁾の配管長 110m、実吐出量 18~45m³/h、最大管内圧力約 2.5~9N/mm²の実験結果を併記した。本実験の筒先側の管内圧力損失は、既往⁹⁾の中庸熟ポルトランドセメント調合と比べて調合 H は同程度、調合 HW は小さくなった。また既往⁹⁾のシリカフューム混入セメント調合と比べて調合 HS は同程度であった。一方、筒元側の管内圧力損失はいずれも既往⁹⁾より大きくなった。

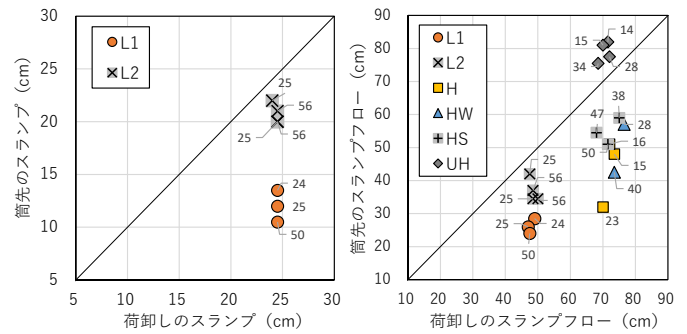
図-4 (c)には、既往^{10), 11), 12)}の水結合材比 13~16%の調合における結果を併記した。調合 UH の管内圧力損失は、筒元側では既往^{10), 11), 12)}の結果の範囲内にあり、筒先側では既往¹²⁾の水結合材比 20%の結果と同等となった。本実験の調合は、筆者らの既往研究¹²⁾における水結合材比 15%の調合をもとに圧送性の改善を図った調合である。具体的には結合材中の普通ポルトランドセメントを中庸熟ポルトランドセメントに変更し、結合材中のシリカフュームの割合を増やし、高性能減水剤の銘柄を変更している。これらの調合変更によりコンクリートの粘性が低減され、管内圧力損失が低減することが確認された。

4.2 コンクリートの試験結果

圧送前後のスランプおよびスランプフローを図-5 に示す。荷卸しの試験から筒先の試験までの経過時間は、L1 が 55~66 分、L2 が 41~68 分、H が 53~65 分、HW が 40~45 分、HS が 38~48 分、UH が 81~92 分であった。荷卸しに対する静置試料のスランプは、L1 が -2~-1cm、L2 が -1.5~0cm となり、荷卸しに対する静置試料のスランプフローは、H が -2.5~-0.5cm、HW が +1.5~+2.5cm、HS が -3.5~-2.5cm、UH が +1~+5cm となった。経時によるスランプおよびスランプフローの変化は、後述する圧送による変化と比べて小さかった。

(1) 軽量コンクリート 1 種および 2 種

荷卸し時に対する圧送後のスランプ低下量は、L1 が 11.0~14.0cm、L2 が 2.0~4.5cm となり、L2 よりも L1



※ 図中の数値は実吐出量(m³/h)を示す。

図-5 圧送前後のスランプおよびスランプフロー

Fig.5 Slump and slump flow before and after pumping

の方が大きかった。圧送による軽量コンクリートのスランプ低下量については、一般的な傾向は 1~4cm 程度⁶⁾、高さ 300m の超高層ビルの施工報告²⁾では 0~5cm であり、これらと比較して L1 ではスランプ低下量が 10cm 程度大きく、L2 は同様な傾向となった。コンクリートが降伏値を有するビンガム流体であると仮定すると、管内を流動するコンクリートに生じるせん断応力は管径や管内圧力損失に比例する¹³⁾。また、高橋ら¹⁴⁾は、攪拌や圧送の外力による過剰なせん断によって、セメント粒子表面に析出した水和物の剥離による新しいセメント粒子表面の生成と、流動化剤の吸着が繰り返され、溶液中にある活性状態の流動化剤が減少し不足することで流動性が変化すると報告している。これらを踏まえると、管内圧力損失の増大により管内のコンクリートに生じたせん断応力が大きくなったことが、L1 のスランプ低下量の増大に影響したと考えられる。

また上述した施工報告²⁾では、軽量粗骨材の含水率の平均値が 30.5%と非常に高い値であり、その標準偏差も 0.79%と安定していたことが、圧送前後のスランプに大きな変化が認められなかった要因として挙げられている。なお、上記の施工報告²⁾においては圧力波形のフラットな領域で最大 10N/mm²程度の管内圧力が生じている。本実験の L1 および L2 の一部のコンクリートについて、圧送前後の軽量粗骨材の含水率を測定した結果、L1 で圧送前 26.9%、圧送後 27.5%、L2 で圧送前 28.3%、圧送後 29.0%であった。圧送前と比べて圧送後の含水率が L1 で 0.6%、L2 で 0.7%高くなったことから、圧送による圧力吸水が生じたと考えられる。

軽量骨材への圧力吸水を考慮すると、軽量粗骨材に加えて軽量細骨材を使用する L2 の方が、L1 よりも圧送によるスランプ低下量が大きくなると予想されるが、本実験では L2 の方がスランプ低下量は小さくなる結果となった。L1 および L2 における調合の違いは、L2 は

山砂および石灰石砕砂の一部を軽量細骨材に置換している点と、所定のスランプを得るための高性能 AE 減水剤の使用量が L2 は L1 の半分と少ない点が挙げられる。なお本実験では、コンクリート製造前の材料の貯蔵時において軽量骨材の乾燥抑制に配慮しており、十分な含水状態の軽量細骨材を使用していた。これらの相違点が、L1 よりも L2 の管内圧力損失および圧送によるスランプ低下量が小さくなったことに影響した可能性が示唆された。

(2) 高強度コンクリート

圧送後のスランプフローの低下量は、H で最大 38.0cm, HW で最大 31.0cm, HS で最大 20.5cm であった。既往⁹⁾の圧送実験におけるスランプフロー低下量は、中庸熟ポルトランドセメント調合で最大 20.0cm, シリカフューム混入セメント調合で最大 2.0cm であり、これら既往の結果よりも H で 18.0cm, HW で 11.0cm, HS で 18.5cm, スランプフローの低下量が大きかった。前述した軽量コンクリートと同様に、管内圧力損失の増大により管内のコンクリートに生じたせん断応力が大きくなったことが、スランプフロー低下量の増大に影響したと考えられる。また、単位水量の増大やシリカフュームの混入により、圧送後のスランプフロー低下量が低減される効果を確認した。これはコンクリートの粘性低減によって管内圧力損失が低減されたためと考えられる。

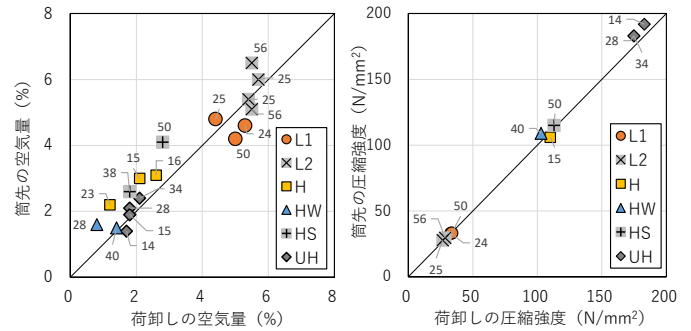
(3) 超高強度コンクリート

UH では圧送後のスランプフローが荷卸し時から 5.5～11.0cm 大きくなった。この理由について、低水結合材比である UH に対して今回の圧送で生じたせん断力は過剰なものではなく、スランプフローの増大に寄与する範疇であったと推察した。すなわち圧送によるせん断力によって、凝集したセメント粒子やシリカフュームに拘束された水が解放されたことや、凝集したシリカフュームの解砕によりボールベアリング効果が発現したことが、流動性の増大に寄与したと考えられる。

圧送前後の空気量および圧送前後に採取した供試体の材齢 28 日の圧縮強度を図-6 に示す。高強度コンクリート (H, HW, HS) では圧送後の空気量が 0.1～1.3% 大きくなる傾向となったが、圧送前後の圧縮強度は同程度であり、圧送後の空気量増大の影響は見られなかった。軽量コンクリートおよび超高強度コンクリートでは、いずれも圧送前後における空気量や圧縮強度は同程度であった。

4.3 コンクリートの塑性粘度と管内圧力損失の関係

既往の研究^{例えば 15)-16)}ではコンクリートの塑性粘度と



※ 図中の数値は実吐出量(m³/h)を示す。

図-6 圧送前後の空気量および圧縮強度
Fig.6 Air volume and compressive strength before and after pumping

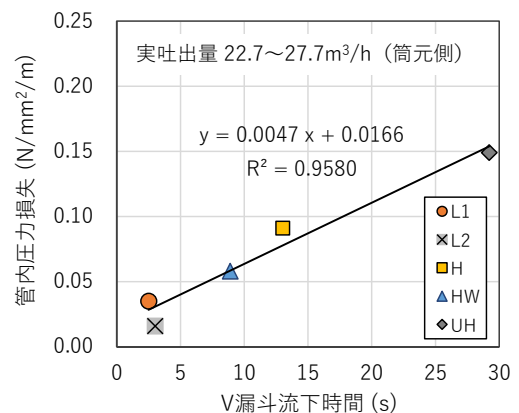


図-7 V 漏斗流下時間と管内圧力損失の関係
Fig.7 Relationship between V-funnel flow time and pressure loss in pipe

管内圧力損失との間には相関があることが報告されている。コンクリートの塑性粘度に関する特性値の一例として、スランプフロー試験時に測定可能な 50cm フロー到達時間や各種漏斗試験による流下時間等が挙げられる。本研究ではスランプフローが 50cm 未満となる軽量コンクリートも実験対象としているため、本研究のいずれの調合についても測定が可能な V 漏斗流下時間に着目し、管内圧力損失との関係を検討した。

V 漏斗流下時間と管内圧力損失の関係を図-7 に示す。本実験では各調合について全く同一の実吐出量における管内圧力損失の計測データは得られていないため、同程度の実吐出量として 22.7～27.7m³/h の範囲となった 5つの実験ケースを抽出して図-7 に示した。調合によらず V 漏斗流下時間と管内圧力損失には正の相関が見られ、回帰式の決定係数 R^2 は 0.958 であった。軽量コンクリート、高強度コンクリートおよび超高強度コンクリートに対して V 漏斗流下時間を測定することにより、管内圧力損失を推定できることが分かった。

5. まとめ

本研究では、実施工におけるコンクリートの高圧圧送に資するデータ取得を目的として、国内最大級となる 20N/mm^2 程度の圧送負荷が生じる実大圧送実験を実施し、圧送配管内の圧力計測ならびに圧送前後におけるコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度の検討を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 全ての調査において輸送管の閉塞を生じることなく筒先まで圧送できることが確認された。
- (2) 軽量コンクリート 1 種および 2 種の管内圧力損失は、標準値⁶⁾や既往²⁾の結果よりも大きくなった。
- (3) 軽量コンクリート 1 種では、圧送後のスランプ低下量は標準値⁶⁾や既往²⁾の結果よりも 10cm 程度大きくなった。
- (4) 軽量コンクリート 2 種では、1 種よりも圧送後のスランプ低下量は小さくなった。普通骨材の使用量や軽量細骨材の有無、高性能 AE 減水剤の使用量などの調合の違いが、スランプ低下を抑制する一要因となった可能性が示唆された。
- (5) 高強度コンクリートでは、最大管内圧力約 $2.5 \sim 9\text{N/mm}^2$ の既往⁹⁾の圧送実験結果よりも圧送後のスランプフロー低下量が大きくなった。管内圧力損失の違いが影響したと考えられる。また、単位水量の増大やシリカフュームの混入により、圧送後のスランプフロー低下量が低減された。
- (6) 水結合材比 15% の超高強度コンクリートについて、管内圧力損失は筒元側では既報^{10), 11), 12)}の水結合材比 13~16% における結果の範囲内にあり、筒先側は既報¹²⁾の水結合材比 20% の結果と同等となった。結合材等の調合変更により管内圧力損失が低減することが確認された。また、圧送後のスランプフローは $5.5 \sim 11\text{cm}$ 大きくなった。
- (7) 高強度コンクリートでは圧送後の空気量は大きな傾向となったが、圧送前後の圧縮強度は同程度であり、圧送後の空気量増大の影響は見られなかった。また、軽量コンクリートおよび超高強度コンクリートでは、いずれも圧送前後における空気量や圧縮強度は同程度であった。
- (8) 軽量コンクリート、高強度コンクリートおよび超高強度コンクリートに対して、V 漏斗流下時間を測定することにより管内圧力損失を推定できることが分かった。

参考文献

- 1) 青木義彦，岩清水隆，山田佳博，永野浩一： $F_c=150\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリート CFT 柱の施工—高さ 300m 超高層複合ビル「あべのハルカス」—，コンクリート工学，Vol.50，No.8，pp.683-688，2012。
- 2) 岩清水隆，青木義彦，九嶋壮一郎，永野浩一：軽量コンクリートの高さ 300m への超高所圧送—高さ 300m 超高層複合ビル「あべのハルカス」—，コンクリート工学，Vol.51，No.8，pp.648-655，2013。
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート圧送工法ガイドライン 2009 および解説，2009。
- 4) 土木学会編：コンクリートライブラリー145 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針，pp.24-27，2016。
- 5) Yan, P., Han, J., Li, M., Liu, Y.: Pumping Process of High Strength Self-consolidating Concrete in the Construction of Skyscraper, Rheology and Processing of Construction Materials, RheoCon 2019, SCC 2019, RILEM Bookseries 23, pp. 346-352, 2020。
- 6) 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。
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書〔規準編〕（土木学会規準 JSCE-F 512-2018（高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法（案））），2018。
- 8) 有馬義人，佐々木仁，塩田博之：高強度コンクリートのポンプ圧送実験，フジタ技術研究所報，第 47 号，pp.45-50，2011。
- 9) 神代泰道，一瀬賢一，都築正則：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1217-1222，2006。
- 10) 寺内利恵子，早川光敬，陣内浩，黒岩秀介：超高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第 622 号，pp.25-31，2007。
- 11) 鳴瀬浩康，石中正人，藤井和俊，中瀬博一：設計基準強度 150N/mm^2 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。
- 12) 後藤和正，黒岩秀介，寺内利恵子，並木哲，松本修一，陣内浩，荒川友宏： F_c150 及び F_c100 を用いた CFT の実大施工実験（その 1：ポンプ圧送性），日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.805-806，2010。
- 13) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，pp.222-225，1994。
- 14) 高橋恵輔，Thomas A Bier，平野義信，戸田靖彦：攪拌や圧送などの外力がセメント系モルタルの流動性および水和特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.52-57，2012。
- 15) 岩清水隆，木村芳幹，山崎順二，岩竹秀昭：フレッシュコンクリートの性能とポンプ圧送性の評価に関する研究 その 8 高強度コンクリートの管内圧力損失の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.551-552，2007。
- 16) 依田和久，全振煥，浅岡茂，戸田猛：中庸熱セメントを用いた高強度 CFT 充填コンクリート工事 —新宿六丁目 N 街区計画「イーストサイドスクエア」新築工事—，コンクリート工学，50 巻，11 号，pp.1022-1028，2012。