

論文 現場循環圧送によるフレッシュコンクリートのポンプ圧送性能評価に関する基礎的研究

栗田 工^{*1}・橋本 親典^{*2}・渡辺 健^{*3}・石丸 啓輔^{*4}

要旨：脈動による分離抵抗性を含むコンクリートのポンプ圧送性能を事前に評価する試験方法の確立を目的として、普通コンクリートとフライアッシュ混入コンクリートを用いて、順調圧送から閉塞までの圧送状況を再現できる現場循環方式による圧送試験を行った。直管、ベント管およびテーパ管の前後の管内圧力差から圧力損失を求め、乱れ特性を統計的指標により評価した。その結果、循環式配管系で圧送されるコンクリートは、管内での衝突等により負の圧力損失が生じるような大きい圧力の変動を受けた。フライアッシュ混入コンクリートの水平管 1m 当りの圧力損失は、普通コンクリートの約 2 倍であることが明らかになった。

キーワード：ポンプ圧送性能，脈動，現場圧送実験，乱れ特性，圧力損失

1. はじめに

平成 12 年 1 月に改訂された土木学会の「コンクリートのポンプ施工指針（コンクリートライブラリー 100 号）」¹⁾では、圧送条件の検討として、コンクリートポンプにかかる圧送負荷ならびに管内閉塞に対する安全度の 2 つの条件を考慮する必要があると記述されている。

コンクリートポンプにかかる圧送負荷とは、コンクリートポンプにかかる最大圧送負荷を意味する。最大圧送負荷は、水平管 1m 当りの管内圧力損失と水平換算距離の積で求められ、照査および検査の方法が確立されている。

管内閉塞に対する安全度に関係するコンクリート自体が圧送に適しているための条件としては、(1)管壁でコンクリートが滑動するための流動性、(2)管内のコンクリートが形状変化できる変形性、(3)圧力の時間的、位置的変動に耐える分離抵抗性の 3 つの性能を保有する必要があるとしている。

(1)の流動性に関しては、管壁とコンクリート間に形成される潤滑層に起因するコンクリー

ト中の水分の移動のしやすさを定量的に把握し事前に圧送性能を評価する方法として、土木学会規準「加圧ブリーディング試験方法（JSCE-F 502-1999）」がある。(2)の変形性に関しては、大規模な現場圧送実験を行わないで、室内で比較的簡便に評価する方法として、「フレッシュコンクリートの変形性評価試験方法（案）（JSCE-F 509-2000）」がある。(3)の脈動による分離抵抗性に関する事前評価試験方法は未だに提案されていない²⁾。

したがって、3 つの性能をすべて考慮した管内閉塞に対する安全度は、原則として、実際の圧送するコンクリートを用いて、圧送現場を想定した試験圧送を実施し、閉塞発生の有無を確認することが最も信頼性が高い。先の 2 種類の室内規模の事前評価試験では限界がある。できるだけ実際のコンクリートポンプを用いた事前評価試験が望ましい。

本研究では、脈動に耐えうる分離抵抗性を含む管内閉塞に対する安全性を総合的に事前評価できる試験方法を確立することを目的として、

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 徳島大学 工学部建設工学科教授 工博 (正会員)

*3 徳島大学 工学部建設工学科助手 博(工) (正会員)

*4 徳島大学 工学部建設工学科技官 (正会員)

順調圧送から閉塞までの圧送状況を再現できる水平換算距離 59.5m 程度の小規模な循環圧送試験を行った。

生コンプラントで製造した練上り直後のスランプを 18cm 程度の普通コンクリートおよびフライアッシュを 30%細骨材代替した高粘性コンクリートを用いて、実機コンクリートポンプ車の周囲に直管 24.5m, テーパ管 1 本およびベント管 2 本, フレキシブルホース 8m からなる水平配管系を循環させる圧送試験を行い, 管内圧力の乱れ特性や水平管の圧力損失について検討した。

2. 実験概要

2.1 ポンプ圧送用コンクリート

(1) 使用材料

本実験で使用したセメントは高炉セメント B 種 (密度: 3.04g/cm^3) である。混和材は四国電力産のフライアッシュ IV 種 (密度: 2.20g/cm^3) を使用した。骨材には, 細骨材として徳島県阿南市下大野町那賀川産玉石砕砂 (最大寸法 5mm, 表乾密度: 2.62g/cm^3 , 吸水率: 1.29%) と愛媛県越智郡伯方町産砕砂 (最大寸法 2.5mm, 表乾密度: 2.57g/cm^3 , 吸水率: 1.94%) を用い, 粗骨材として徳島県阿南市下大野町那賀川産玉石 (最大寸法 25mm, 表乾密度: 2.63g/cm^3 , 吸水率: 0.90%) を用いた。混和剤にはリグニンスルホン酸系の AE 減水剤とロジン酸系の AE 剤を使用した。

(2) 配合

使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。なお, 表中に示された細骨材の S1 と S2 および混和剤の A1 と A2 は, 最大寸法 5mm の砕砂と

最大寸法 2.5mm の砕砂および AE 減水剤と AE 剤を示している。また, 以下の図表では, フライアッシュ IV 種を細骨材として混入したコンクリートと普通コンクリートのそれぞれを略号 F と N で表記する。

この配合は, 練上がり時の目標スランプが $18 \pm 2\text{cm}$ となるように考慮した。なお, 本実験では, 混和材のフライアッシュと最大寸法 2.5mm の砂を細骨材の全容積に対して 30%使用した。

(3) 製造

コンクリートの練混ぜは, 水平二軸強制練りミキサー (容量 2000 リットル) を用いて 120 秒間の練混ぜを行った。

2.2 ポンプ圧送方法

(1) 配管

図-1 にポンプ圧送の配管と圧力センサーの位置を示す。本実験では, 順調圧送から閉塞までのコンクリートの状況を再現できる現場循環式の配管構成にした。フレキシブルホースをポンプ車に設置することにより, ポンプ圧送されたコンクリートを繰り返し圧送することができるようにした。なお, 図は平面図であり, 配管は全て水平配置となっている。コンクリートは反時計回り流動し, その水平換算距離は, 59.5 m である。また, ポンプ圧送管の間に P1~P7 の計 7 点の圧力センサー (検査管) を設置した。図-2 に実際の P2~P3 間における 90 度ベント管前後に設置した圧力センサーを示す。

(2) 圧送方法

ポンプ圧送は, ピストン式のポンプにより, 圧送量を 5 分毎に $10\text{m}^3/\text{h}$, $30\text{m}^3/\text{h}$ および $50\text{m}^3/\text{h}$ と変化させた計 15 分を 1 セットとして, コンク

表-1 配合

種類	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)							
			水	セメント	フライアッシュ	細骨材		粗骨材	混和剤	
			W	C	FA	S1	S2	G	A1	A2
F	53	41	188	354	176	490	—	1010	5.27	8.85
N	53	49	173	327	—	608	255	905	3.48	1.30

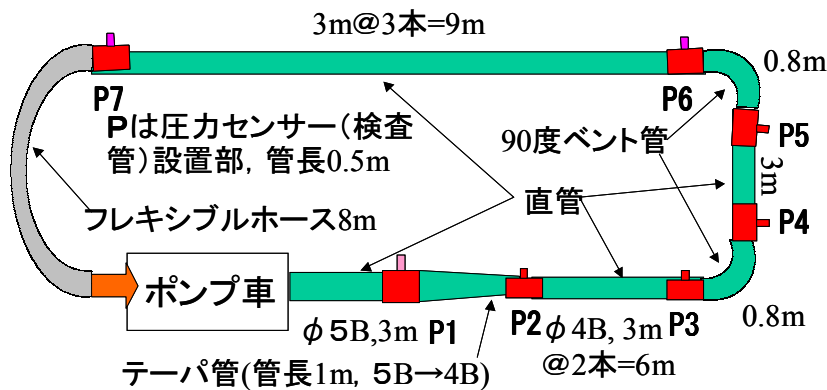


図-1 ポンプ圧送配管と圧力センサーの位置

リート製造後直ちに行った。なお、ポンプ圧送は圧送が困難になるまで、フライアッシュ混入コンクリートでは3セット、普通コンクリートでは4セット行った。また、圧送量はポンプ車により目標の圧送量になるように調整した。

2.3 管内圧力の測定方法と各種試験方法

(1) 管内圧力の測定方法

設置された圧力センサーによる管内の圧力は、動ひずみ計により、計測時間間隔 0.1sec で測定した。

図-3は、管内圧力を測定した結果の一例である。圧送条件は、フライアッシュ混入コンクリートを圧送した1セット時におけるP6とP7の管内圧力と計測時間の関係である。

本実験では、まず圧送量毎(5分毎)に測定した管内圧力を分類した。各圧送管の計測時間間隔毎の圧力損失 ΔP を2つの圧力結果から式(1)により求めた。

$$\Delta P(n) = P(n) - P(n+1) \quad (n=1,2,\dots,6) \quad (1)$$

n: 検査管の設置位置

P(n): 各検査管の圧力

式(1)により導かれた圧力損失から各圧送管の1m当りの平均圧力損失 ΔP_{ave} 、標準偏差 σ を算出した。また、圧力損失の変動を検討するため、圧力損失中の最大圧力損失 ΔP_{max} と最小圧力損失 ΔP_{min} を抽出した。

(2) フレッシュ性状の各種試験方法

コンクリートをポンプ圧送する前後(各セッ



図-2 圧力センサー設置状況

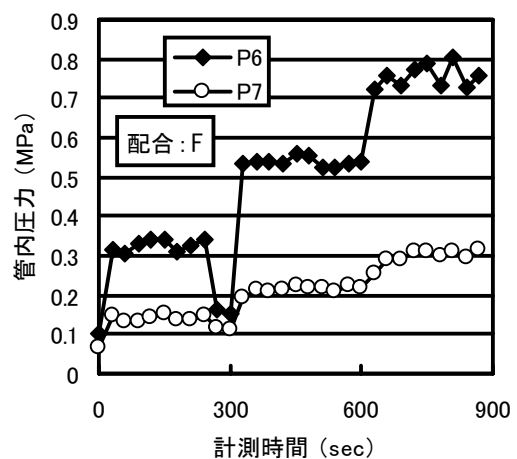


図-3 管内圧力と計測時間との関係(1)

ト前後) 15分間隔で、スランプ試験(JIS A 1101) 空気量試験(JIS A 1128) およびコンクリートの温度測定を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状

圧送開始前および各セット終了時のコンクリートのフレッシュ性状の変化を図-4～図-6に示す。なお、コンクリートは静置状態ではなく、圧送後のコンクリートである。

両コンクリートともポンプ圧送の時間が増加すると、スランプと空気量が低下し、コンクリート温度が高くなる。特に、フライアッシュ混入コンクリートは、普通コンクリートに比べて、スランプロストとコンクリート温度の上昇が大きい。コンクリート温度が上昇する原因は、圧送時の管とフレッシュコンクリートとの摩擦によるものと考えられる。フライアッシュ混入コンクリートは、フレッシュコンクリートの粘性が大きいため、管内の摩擦が大きくなり、普通コンクリートに比べて温度の上昇が大きい。

3.2 管内の圧力損失

図-7は、フライアッシュ混入コンクリートを圧送した1セット時における目標圧送量 $10\text{m}^3/\text{h}$ としたP2～P3間(直管)での管内圧力と計測時間の関係を示した測定結果の一例である。

通常、管内圧力は圧送の進行方向順に圧力が小さくなる。また、圧力損失は圧送距離が長くなるにつれ大きくなる³⁾。しかし、本実験の測定では、コンクリートの進行方向の圧力が逆転し、圧力損失が負になる結果がP6～P7間(直管)を除く全ての管で生じた。これは、圧送されるコンクリートが連続的な液体でなく、管壁や前後のコンクリート塊に衝突することで不連続的になり、衝突で発生した圧力を圧力センサーが計測したためと考えられる。実際、今回の実長さ30m程度の循環式配管系では、圧送速度が増加するに従い、配管系が大きく振動した。特に、2

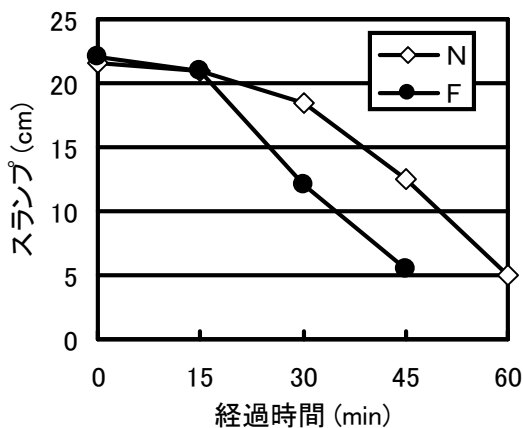


図-4 スランプの変化

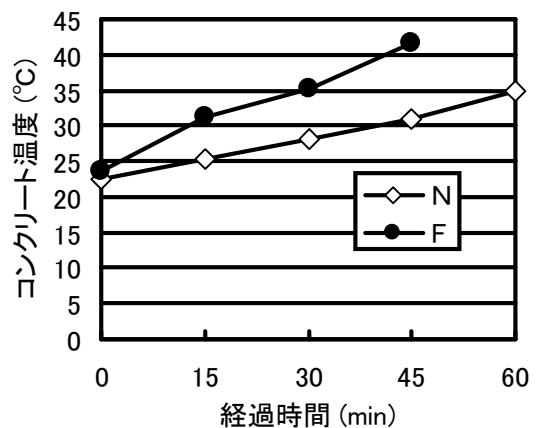


図-6 コンクリート温度の変化

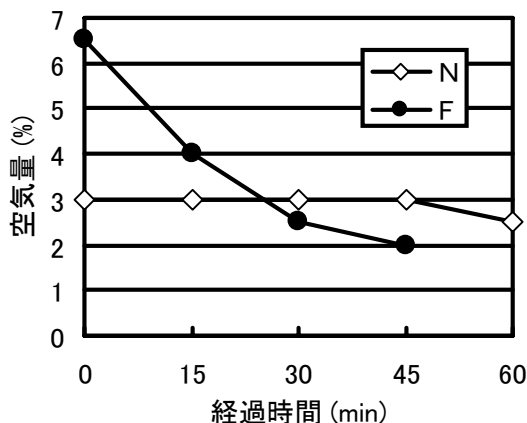


図-5 空気量の変化

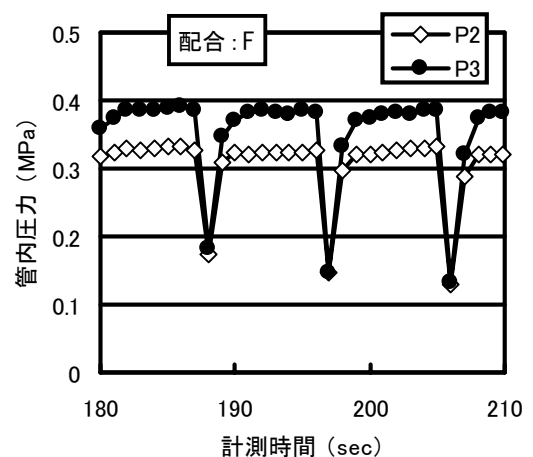


図-7 管内圧力と計測時間との関係 (2)

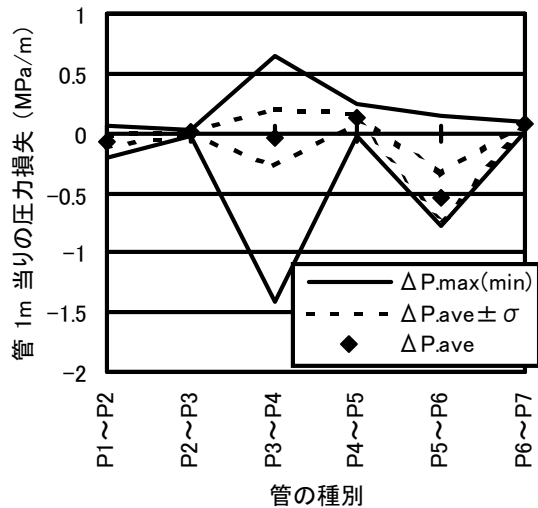


図-8 各管の圧力損失の変動

本のベント管の前後では顕著に観察された。したがって、正確に圧力損失を求めるためには、これらのコンクリートの衝突による圧力の影響を分離する必要がある。しかしながら、この分離は困難であり、今後の検討課題としたい。

3.3 圧力損失の変動

本実験の圧送管内の圧力損失は、P6~P7間(直管)を除く全ての管で負の値が計測された。そのため、P1~P6間は、圧力損失の変動を最大圧力損失と最小圧力損失との差や標準偏差の範囲から検討した。

各圧送管の圧力損失の変動を図-8に示す。フライアッシュ混入コンクリートを圧送した3セット時における目標圧送量 50m³/hの各管での圧力損失を示している。

P3~P4間とP5~P6間のベント管は、他の圧送管に比べ最大圧力損失と最小圧力損失の幅が著しく大きい。そのため、ベント管は直管より圧力損失の変動が大きいと考えられる。また、ベント管を通過して直管にフレッシュコンクリートが圧送された場合、ベント管で示された大きな圧力損失は急激に直管で小さくなった。P1~P2間のテーパ管は、ベント管ほどの圧力損失の変動はみられないが、直管より変動が大きい。

図-9~図-11は、フライアッシュの有無、各セット時および各目標圧送量による圧力損失の変動を示す。なお、図中の種別F1-10は、フ

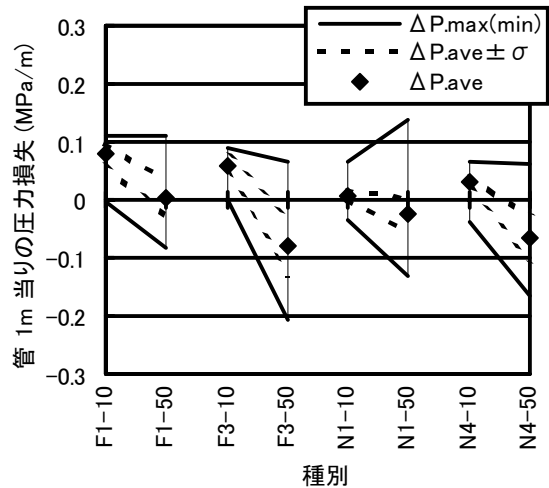


図-9 P1~P2間の圧力損失の変動

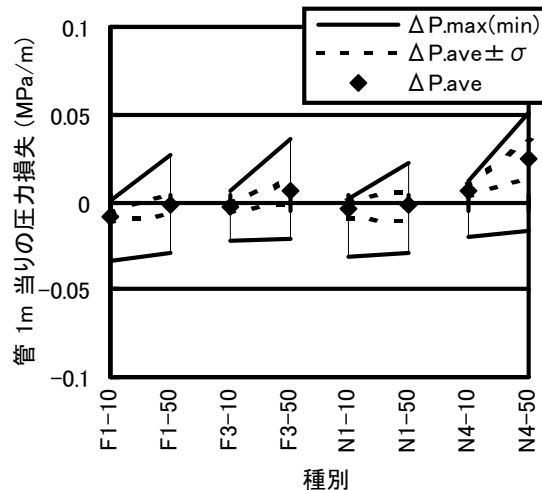


図-10 P2~P3間の圧力損失の変動

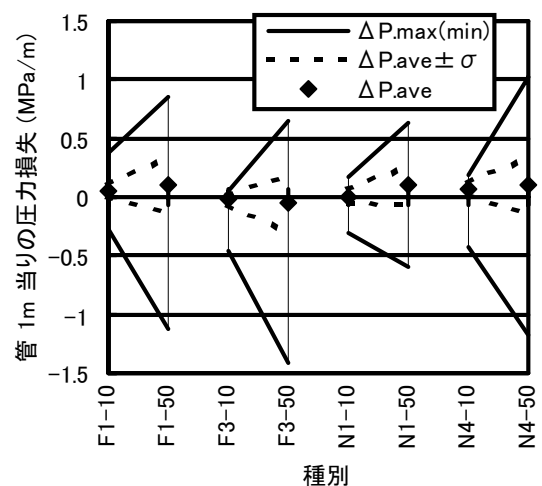


図-11 P3~P4間の圧力損失の変動

ライアッシュ混入コンクリート、1セットー目標圧送量 10m³/hを示す。

本実験で使用したテーパ管、ベント管および

直管は、目標圧送量が大きくなることによって、最大圧力損失と最小圧力損失との差や標準偏差の範囲が大きくなるため、圧力の変動が大きいと考えられる。また、この圧力変動の増加は、フライアッシュの有無や圧送時間の経過（セット数の増加）に関わらず、大きくなる。フライアッシュ有無や圧送時間の経過に着目すると、P1～P2 間のテーパ管や P2～P3 間の直管はその影響がみられない。

3.4 ポンプ圧送性能の評価

P6～P7 間（直管）の圧力損失は、反射波の影響が他の管より小さく、正の値が計測された。よって、この圧力損失は、コンクリートのポンプ施工指針と比較してポンプ圧送性能の評価を検討した¹⁾。

図-12 は P6～P7 間（直管）の圧送量と圧力損失との関係を示す。なお、図に示す圧力損失は、圧送後のスランプがともに 12cm となり、コンクリートのフレッシュ性状がほぼ等しい 2 セット時に圧送したフライアッシュ混入コンクリートと 3 セット時に圧送した無混入コンクリートの圧力損失である。

本実験で得られたフライアッシュ無混入コンクリートの圧力損失は、図中のコンクリートのポンプ施工指針で示された標準値（4B 管スランプ 12cm）と大差ない値となった。しかし、フライアッシュ混入コンクリートは、目標圧送量が

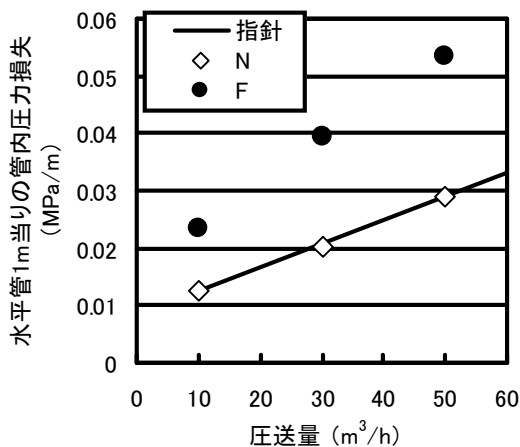


図-12 水平管 1m 当りの管内圧力損失と圧送量の関係

等しい場合、無混入コンクリートに比べ圧力損失が 2 倍近く大きくなった。これは、橋本ら³⁾の実験結果と一致する。

4. まとめ

本実験の範囲内で、得られた結果を以下にまとめる。

- (1) テーパ管、直管およびベント管から構成する循環圧送配管系でのポンプ圧送では、管内のコンクリートが不連続的に管壁や前後のコンクリート塊に衝突する衝撃（反射波）が発生し、圧力損失が負になる現象が生じることが考えられる。
- (2) 循環圧送されるコンクリートは、スランプと空気量が低下しコンクリート温度が上昇する。このスランプと空気量の低下や温度上昇は、フライアッシュ混入コンクリートの方が普通コンクリートより大きい。
- (3) 循環圧送による圧力損失の算定評価では、フライアッシュ混入コンクリートは、普通コンクリートの約 2 倍となる。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会平成 14 年度科学研究費補助金の基盤研究(C)(2)（課題番号：15560395、研究代表：橋本親典）に基づき実施されたものであることを付記致し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針（平成 12 年版），コンクリートライブラリー100，2000.2
- 2) 渡辺健，橋本親典，橋本紳一郎，山地功二，水口裕之，上田隆雄：ポンプ圧送の脈動時の変形性を評価できる定量的指標に関する実験的検討，コンクリート技術シリーズ 54，土木学会，pp. II 23-II 32，2003.7
- 3) 橋本紳一郎，橋本親典，渡辺 健，石丸啓輔：フライアッシュを細骨材を補充する混和材として用いたコンクリートのポンプ圧送性能に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.1073-1078，2003.7