

論文 速硬性を有するコンクリートのポンプ圧送性に関する検討

高橋 直希*1・橋本 紳一郎*2・江原 季映*3・宮嶋 真澄*4

要旨: 高流動あるいは高強度コンクリートなどの粘性が大きいコンクリートでは、通常のコンクリートに比べて、コンクリートポンプの圧送負荷は大きくなる。一方、これらのコンクリートの圧送中断による圧送負荷の変化など、圧送性の評価については十分な検討が行われていない。本研究では、粉体量が多い、かつ速硬性を有する特殊コンクリートにおいて、圧送中断を伴う施工、および圧送速度の異なる施工条件下における、コンクリートのポンプ圧送性について検討を行った。その結果、再圧送を伴う施工および、圧送速度の異なる施工において、管内圧力および加速度を計測することで、圧送性を定量的に評価できることを示した。

キーワード: 特殊コンクリート, 圧送性, 管内圧力, 加速度, スランプフロー

1. はじめに

コンクリートの圧送および打込み作業において、コンクリートのポンプ施工は不可欠である。特に近年では、施工条件の多様化により、特殊な配管条件や圧送条件での圧送、高流動コンクリートあるいは高強度コンクリートのような、特殊コンクリートでの施工も増えている。

一般に、コンクリートの圧送は打込み開始から終了まで連続して行うことが原則であるが、アジテーター車の入れ替えや打込み箇所の移動などによる、圧送を一時中断しなければならない際には、閉塞などのトラブルが生じやすい。特に、低スランプのコンクリート、貧配合のコンクリート、および早強性セメントや促進形混和剤を使用したコンクリートなどに対し、圧送を一時中断した後の再圧送時には注意が必要となる。

また、高流動コンクリートや高強度コンクリートなどの粉体量、粘性が大きいコンクリートでは、通常のコンクリートに比べて、材料分離は生じにくいものの、コンクリートポンプの機種や輸送管の種類などを適切に選定しなければならない。これらに対して、「コンクリートのポンプ施工指針 (2012 年版)」では、粉体系および併用系高流動コンクリートの圧力損失は、スランプ 12cm の普通コンクリートに比べ、最大 4 倍程度大きくなる¹⁾。また、再圧送時の圧送負荷が著しく増加した場合には、配管の接続箇所にも急激に負荷が作用し、配管が破裂する恐れがある。しかし、これらのコンクリートの圧送中断による圧力損失の変化や圧送負荷などについては十分な検討が行われていない。そのため、特殊コンクリートの再圧送に伴うポンプ圧送性の把握が必要不可欠である。

本研究におけるポンプ圧送性については、再圧送時や、

異なる圧送速度における管内の圧力変動から評価する。さらに、圧送の際にはコンクリート中の粗骨材が粗骨材粒子群同士あるいは管壁と衝突を繰り返すことにより、微細な振動が生じることが明らかとなっている²⁾ことから、振動加速度計により、圧送時に生じる配管の振動について計測および評価を実施する。

本研究は、普通コンクリートに比べて、粉体量が多い、かつ速硬性を有する特殊コンクリートを対象とし、圧送中断を伴う施工および圧送速度の異なる条件下における、コンクリートのポンプ圧送性について検討を行った。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16 (g/cm ³)
細骨材	富津産・仁淀川町産・南伊勢町産 (混合砂) 表乾密度: 2.64 (g/cm ³)、粗粒率: 2.60
粗骨材	仁淀川町産 砕石 2005 (Gmax: 20mm) 表乾密度: 2.70 (g/cm ³)、実積率: 64.0 (%)
混和剤	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系)
速硬性混和材	速硬材 (密度: 2.93 (g/cm ³)) (セメント・アルミナ・セッコウ複合系) 調整剤 (クエン酸系)

2. 実験概要

2.1 検討方法

本実験では、実機における圧送試験および実施工において、速硬材を用いた特殊コンクリートの圧送を行い、その際、配管に生じる圧力や振動を圧力計および加速度計により計測・評価した。圧送試験においては、圧送の途中で約 6 分間の圧送停止後、再圧送時におけるポンプ圧送性について検討を行った。圧送速度は、ポンプ車に取り付けられている圧送速度計において、試験施工時で

*1 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 修士 (工学) (正会員)

*2 千葉工業大学 創造工学部 都市環境工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 (株)フジタ 交通事業部 土木工事事務 正会員

*4 (株)フジタ 交通事業部 土木工事事務

2.5 計測方法

図-1、図-2に、圧力計の測定箇所（四角枠）と加速度計の取り付け箇所（丸破線）を示す。写真-1に、試験施工における圧力計および加速度計の設置状況を示す。

(1) 管内の圧力測定

管内圧力は、写真-1に示すような、特殊な管を設置する必要がある。試験施工における配管条件では、進行方向に向かってNo.1～No.4の計4箇所に圧力計を取り付け計測した。実施工における配管条件では、施工条件により複数の設置が困難であったことから、ポンプ車に近い位置、1箇所にのみ圧力計を取り付け、計測した。

(2) 振動加速度計測

加速度計の測定位置に関しては、圧送試験、実施工ともに、ベント管とそのベント管から数m以内の水平管の計2箇所に設置した。加速度計の先端はマグネットになっており、輸送管へは直接固定が可能である。計測結果については、圧送性評価の有効性を示している既往の研究^{3~6)}同様、FFT解析により得られた、加速度が最も大きくなる値（以下、加速度のピーク値と称す）と周波数から、圧送性の違いについて評価を行うこととした。

3. 結果および考察

前章までに示したスランブフロー500mm前後の速硬性コンクリートに対し、順調に圧送されている場合の圧力および加速度計測結果について検討を行った。

3.1 管内圧力計測結果

(1) 圧送試験

図-3に、圧力計毎の測定結果を示す。管内圧力は、進行方向に向かって小さくなる傾向にあり、コンクリートの種類によらず、同じ傾向を示している。

本研究では、No.1からNo.4までの圧力に対する最小二乗法による直線の傾きを、水平管1m当りの管内圧力損失とした。その結果、ベースコンクリートおよび速硬性コンクリートの水平管1m当りの管内圧力損失は、それぞれ約 $1.4 \times 10^{-2} \text{N/mm}^2/\text{m}$ および約 $1.8 \times 10^{-2} \text{N/mm}^2/\text{m}$ となった。同一条件下におけるスランブ12cmの普通コンクリートの管内圧力損失は $1.0 \times 10^{-2} \text{N/mm}^2/\text{m}$ 程度であり、本研究における速硬性コンクリートは2倍近い値となっている。一般に、粉体系および併用系高流動コンクリートの圧力損失は、粉体量が多くなるほど大きくなる傾向を示す。本研究における速硬性コンクリートは、ベースコンクリートに比べて、粉体量が150kg多いことで、コンクリートの粘性が大きくなり、配管内の圧力損失が増大したと考えられる。

また、再圧送時における速硬性コンクリートの圧力損失は、中断前と同程度の値となった。これは、フレッシュ性状試験の結果、再圧送後の速硬性コンクリートのス

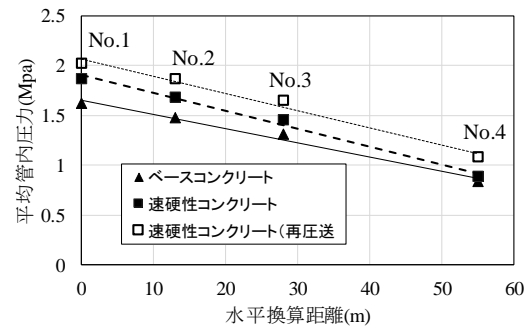
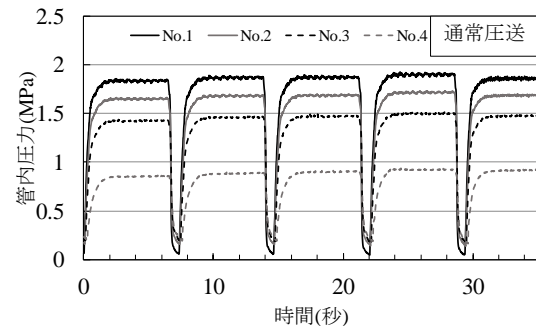
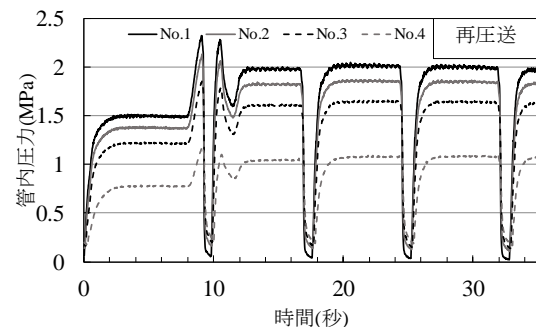


図-3 圧力計毎の計測結果と管内圧力損失



(a) 通常圧送時



(b) 再圧送時

図-4 管内圧力波形の一例（圧送試験）

表-4 管内圧力計測結果（圧送試験）

コンクリート種類	圧送速度 (m^3/h)	平均管内圧力 (MPa)	変動係数 (%)	圧送状態
ベースコンクリート	18	1.59	1.35	順調
速硬性コンクリート		1.87	1.22	順調
速硬性コンクリート (再圧送)		2.00	0.79	順調

ランブフローは545mm、充填高さは328mmであり、圧送および圧送中断による品質の変化は小さく、ポンプ圧送がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響が小さかったためであると考えられる。

図-4に、圧力計の管内圧力計測結果の一例を示す。また、表-4に、ポンプ車が一番近い位置で計測した、平均管内圧力、管内圧力の変動係数および筒先のコンクリートの吐出状況から判定した圧送状態を示す。

中断前の管内圧力については、圧力波形に乱れはなく、ストローク毎に同じ挙動を示している。一方、再圧送時の管内圧力については、圧送初期に波形の乱れが生じて

おり、圧力が一時的に大きくなっている。また、それ以降の管内圧力も圧送中断前と比較すると、わずかに大きくなっていることが確認できる。再圧送時における圧力の乱れや増加は、圧送の停止による配管内でのコンクリートの滞留により、セメント粒子が凝集したことでコンクリートが動きにくくなったためと考えられる。特に、粉体量が多いコンクリートにおいては、セメント粒子が多く存在するため、圧力変動が大きくなることが予想される。本実験においては、圧送中断の時間は短かったため、いずれの圧力の変動係数の値は小さく、筒先から常に一定の状態でコンクリートが連続的に吐出される順調圧送状態（以下、順調と称す）であった。

(2) 実施工

図-5に、圧力計の測定結果を示す。それぞれ、圧送速度 20m³/h および 30m³/h の場合における結果である。表-5に、圧送速度、平均管内圧力、管内圧力の変動係数および筒先からのコンクリートの吐出状態の結果を示す。

管内圧力の波形については、圧送速度が大きいほど、圧力が大きく、1 ストロークの時間間隔も短くなっている。一般に、同一スランブもしくはスランブフローでは、圧送速度が大きいほど、管内圧力も大きくなる傾向にあり、本研究においても同様の傾向が確認した。また、圧送速度によらず、管内圧力の変動係数は小さいこと、筒先から常に一定かつ連続的にコンクリートが排出されていたことから、圧送は順調であることが確認できる。

3.2 振動加速度計測結果

(1) 圧送試験

図-6に、ベント管およびその先の水平管で計測した、計測時間と加速度の関係を示す。図-6(a)(b)は通常圧送時、図-6(c)(d)は圧送中断後の再圧送時における加速度の波形である。通常圧送時において、ベント管、水平管ともに、既往の研究^{例えば、7)}と同様、一定の時間間隔で加速度の波形が確認できる。さらに、一定間隔で現れる加速度波形は、ピストンの稼働の1ストロークに要する時間間隔と同程度であったことから、ピストン式ポンプ車のピストン稼働により、管内での骨材同士の衝突や配管への衝突が生じ、配管の振動として計測されたものと考えられる。また、図-6の四角い実線で囲まれた領域において、加速度波形に乱れが生じている。これは、前節で述べたように、圧送中断による配管内での滞留により、コンクリートが動きにくい状態となり、再圧送時に粗骨材の運搬が一定の状態では圧送されておらず、配管に生じる振動が不規則であったと推察される。また、水平管に比べ、ベント管での加速度の値の方が大きくなることは、既往の研究^{例えば、7)}と同様の傾向を示しており、この2か所の加速度の値から、圧送性を評価することとした。

図-6の四角い点線で囲まれた領域において、FFT 解析

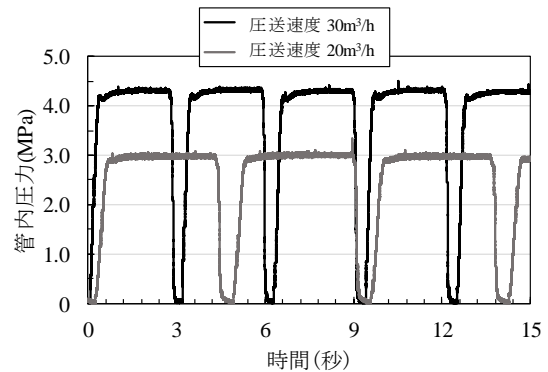
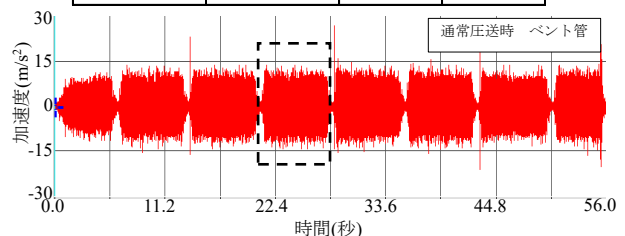


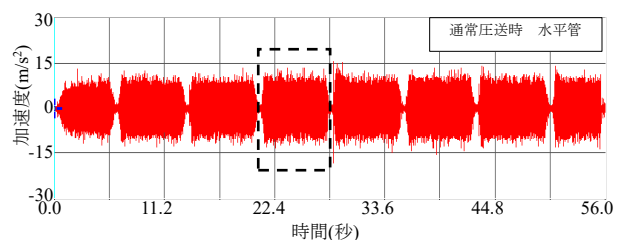
図-5 管内圧力波形の一例（実施工）

表-5 管内圧力計測結果（実施工）

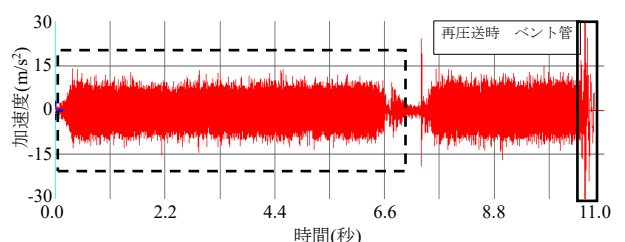
圧送速度 (m ³ /h)	平均管内圧力 (MPa)	変動係数 (%)	圧送状態
20	2.98	0.30	順調
30	4.30	0.18	順調



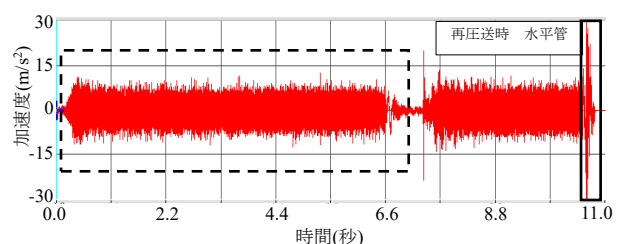
(a) 通常圧送時（ベント管）



(b) 通常圧送時（水平管）



(c) 再圧送時（ベント管）



(d) 再圧送時（水平管）

図-6 計測時間と加速度の関係（圧送試験）

を行った結果を、図-7に示す。また、通常圧送時、再圧送(初期)および再圧送時における、加速度のピーク値を、

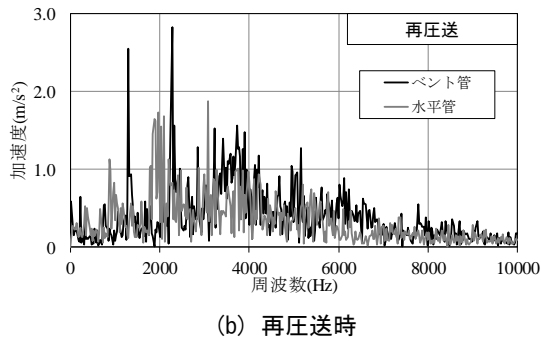
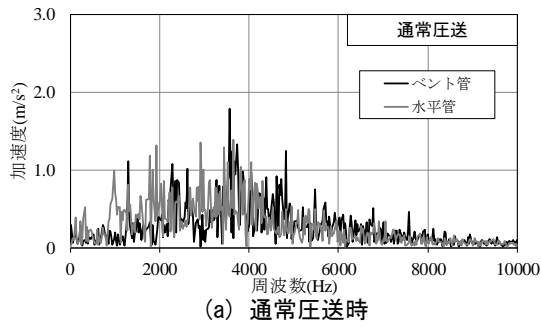


図-7 周波数と加速度振幅の関係（圧送試験）

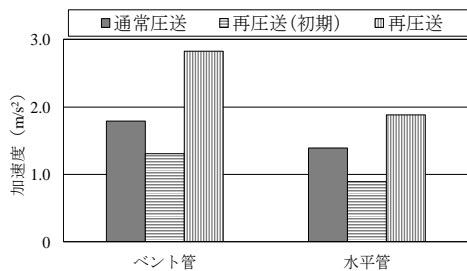


図-8 異なる圧送状態での加速度のピーク値

図-8に示す。加速度のピーク値については、ベント管の方が大きい値を示した。また、再圧送時の加速度のピーク値は、加速度の波形に大きな乱れが生じていた傾向と同様に、大きくなっている。これは、コンクリートの動きが悪く、骨材と管壁の衝突や摩擦が大きくなることにより、加速度のピーク値も大きくなったと考えられる⁹⁾。また、時間経過によるスランプフローの変化や粘性の増大による影響も考えられるため、これらの複合的な要因を含んだ検討が今後必要となる。

(2) 実施工

図-9に、ベント管およびその先の水平管で計測した、計測時間と加速度の関係を示す。図-9(a)(b)は圧送速度 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 、図-9(c)(d)は圧送速度 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 時における計測結果である。いずれの配管および圧送速度においても、加速度の波形が一定の間隔で確認できる。こちらも圧送試験同様に、ピストン式のポンプ車が一定の稼働間隔で圧送していることを示しており、波形の乱れがないことから、順調に圧送されていることが加速度の波形から確認できる。また、圧力波形同様、圧送速度が大きいほうが、加速度が大きく、1ストロークの時間間隔も短くなってい

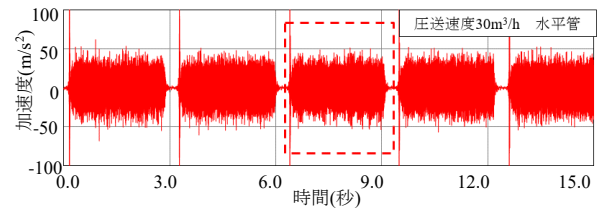
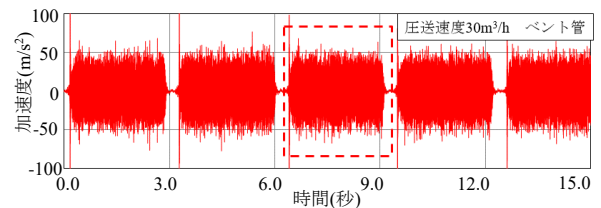
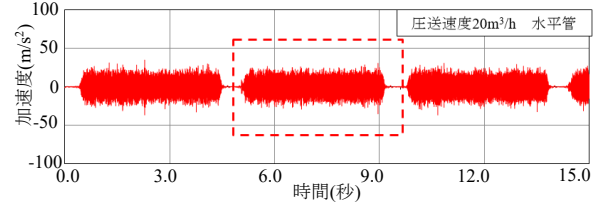
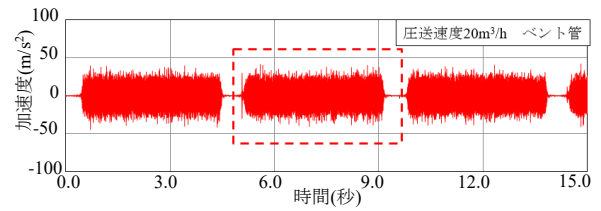


図-9 計測時間と加速度の関係（実施工）

る。これは、普通コンクリート同様、速硬性コンクリートにおいても、圧送速度が大きいほど、骨材と管壁の衝突や摩擦も大きくなることで、加速度の値が大きくなったと考えられる。さらに、加速度の値は、水平管に比べ、ベント管の加速度の方が大きくなっていることから、この2点の加速度のピーク値の差から、圧送性を評価することとした。

図-9の四角枠線で囲まれた領域において、FFT解析を行った結果を、図-10に示す。圧送試験同様、加速度のピーク値はベント管のほうが大きな値を示した。また、圧送速度が大きい方が、加速度のピーク値は大きくなっている。ピーク周波数については、いずれも 2300 Hz 付近であるが、圧送試験時とは異なる値となっている。これは、コンクリートの配合および配管条件が同一かつ圧送が順調であれば、異なる圧送速度においても、同程度の周波数で加速度のピーク値が示されるものと考えられる。しかし、今回のように配管条件が異なる場合には、施工現場における配管の設置箇所や、治具による固定状況、管内部のコンクリートの充填状況などにより、周波数も変化していると考えられる。

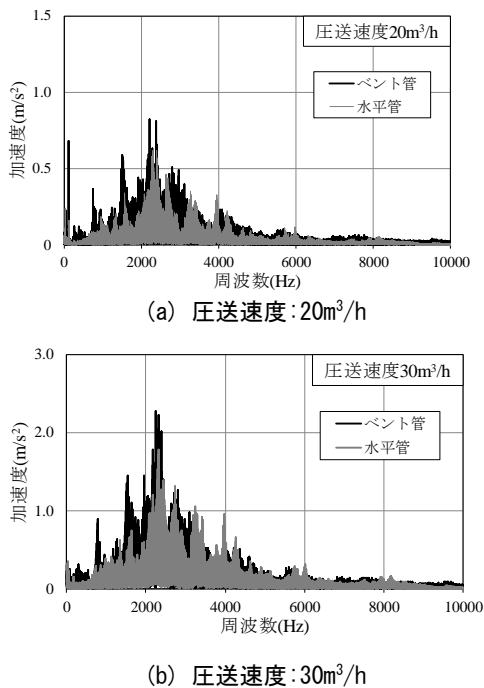


図-10 周波数と加速度振幅の関係 (実施工)

3.3 ポンプ圧送性評価

図-11に、各種条件下における平均管内圧力と加速度のピーク差を示す。これらの結果から、加速度のピーク値は、平均管内圧力が大きくなる場合においては、例えば、再圧送を伴う施工や圧送速度が大きくなる施工では、大きな値を示す傾向にある。特に、再圧送時における加速度のピーク値は大きくなっていることから、再圧送に伴って生じる振動が、ベント管と水平管で異なりやすく、圧送性に変化が生じていると考えられる。

本実験における順調状態での、ベント管と水平管の加速度のピーク値の差は、いずれも 1.0m/s^2 以下である。これは、普通コンクリートが順調圧送されていると判定される閾値 η と同程度であり、今回のコンクリートに対しても、加速度のピーク値の差から、コンクリートの圧送性を定量的に評価することができることを示唆している。以上より、圧送中断を伴う施工および圧送速度の異なる条件下における、特殊コンクリートのポンプ圧送性においては、管内圧力の変動および加速度のピーク値を評価することで、定量的に圧送性の判定を行うことができる。

4. まとめ

粉体量が多い、かつ速硬性を有する特殊コンクリートを対象とし、圧送中断を伴う施工、および圧送速度の異なる施工条件下における、コンクリートのポンプ圧送性について検討を行った。本研究で得られた知見を示す。

- (1) 圧力計の計測結果から、再圧送を伴う施工や圧送速度が大きくなる施工では、平均管内圧力が大きくなる。特に、再圧送時においては、コンクリートの動

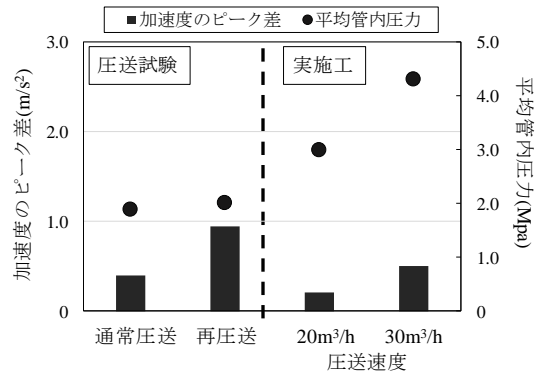


図-11 加速度のピーク差と平均管内圧力の関係

きが悪くなることで圧力波形に乱れが発生する。

- (2) 加速度計の計測結果から、再圧送を伴う施工の場合、粗骨材の配管への衝突が不規則になり、加速度波形に乱れが生じる。
- (3) 圧力波形と加速度波形に乱れが生じる時期は、同時期であり、それぞれの波形を計測・評価することで、コンクリートの圧送性を確認することができる。
- (4) 加速度のピーク値の差はいずれも小さく、 1.0m/s^2 以下であれば順調圧送であることが確認されたことから、圧送性判定の閾値を粉体量の多いコンクリートにも適用できる可能性が示された。

参考文献

- 1) 土木学会編：コンクリートライブラリー135, コンクリートのポンプ施工指針 [2012年版], 2012.6
- 2) 辻村直哉, 橋本親典, 丸山久一, 清水敬二：管内を流れるコンクリートの閉塞感知システムの開発に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.73-78, 1988
- 3) 案浦侑己, 橋本紳一郎, 渡辺健, 橋本親典：振動加速度計を用いたコンクリートの圧送性簡易評価手法の検討, Vol.35, No.1, pp.1201-1206, 2013
- 4) 日本建築学会近畿支部材料・施工部会：第11回圧送技術研究会報告書, 2015.2
- 5) 橋本紳一郎, 江本幸雄, 伊達重之, 橋本親典：コンクリートのポンプ圧送性簡易評価手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1186-1191, 2012
- 6) 橋本紳一郎, 江本幸雄, 渡辺健, 橋本親典：配管及び計測条件がコンクリートの簡易圧送性評価に与える影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, No.1, pp.268-275, 2014
- 7) 橋本紳一郎, 平川恭奨, 南浩輔, 中島良光：コンクリートの簡易圧送性計測手法における配管条件及び圧送性判定の検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, No.1, pp.272-278, 2015