47. 振動加速度計の計測によるコンクリートの圧送性評価

システムの提案

福岡大学工学部	○ 橋本	紳一郎
福岡大学大学院	案浦	侑己
福岡大学工学部	江本	幸雄

1. はじめに

近年,コンクリートのポンプ施工は,多くの施 工現場で用いられようになり,一般的な圧送条件 での圧送の他,特殊な条件下の圧送も行われるよ うになった。また,特殊コンクリートの圧送も行 われるようになった。

その一方で, 圧送中のトラブルや事故も多く報 告されており, トラブルの中でもその多くが閉塞 である。閉塞の発生には様々な要因が関連するが, 現状ではコンクリートの圧送性を評価・確認する 方法がないため, ピストン稼働の異常時や筒先か らのコンクリート排出状況で,初めて閉塞に気付 く。閉塞が発生した際は,その対応作業だけでは なく,閉塞時またはその直前までコンクリートポ ンプや配管に大きな負荷がかかるため,他のトラ ブルにつながる可能性もある。実際に,輸送管の 破裂など非常に危険なトラブルに発展した事例も 報告されている¹⁾。以上から圧送性を把握するこ とは非常に重要である。

圧送の安全性の事前評価試験として、加圧ブリ ーディング試験と変形性評価試験¹⁾が提案されて いるが、実際の圧送条件や施工条件を再現してい るわけではないため、完全に施工現場の圧送状態 を検討することは難しい。

試験圧送は、実際の圧送条件や施工条件に近い 状態で行える試験であるが、特殊なコンクリート の圧送性やコンクリートの品質変化を把握するこ とが主であり、通常の施工現場での圧送に対して は実施しない。また、試験圧送の際の圧送性評価 に用いるコンクリートの管内圧力測定やその他に 提案²⁾されている測定方法を通常の施工現場で行 うには、計測器具を取り付けるための特殊な配管 や多くの測定機材、人員が必要となるため難しい。

これらに対して,著者らは振動加速度計により 計測する簡易な圧送性の評価手法を提案している ^{3),4)}。この測定方法は,圧送の際に,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 突を繰り返し生じる微細な振動を加速度計により 計測する方法である。これまでの室内試験におい て加速度の値の乱れや周波数と振幅の関係から, コンクリートの配合条件の違いや圧送性の違いを 評価可能であることを示しており,また,試験圧 送においても,圧送性の違いなどを評価可能であ ることを示唆した⁵⁾。しかし,振動加速度計の計 測位置などの計測方法や測定結果の定量的な判 定・評価方法については,十分な検討が行われて いない。

そこで本研究では,実機での試験圧送により振動加速度計での計測を配管位置ごとに行うなど計 測位置の影響や測定結果の定量的な判定・評価方法について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及びコンクリートの配合

使用した材料は、セメントに高炉セメント B 種 (密度:3.04g/cm³),細骨材は福岡県玄界灘産海 砂(表乾密度:2.58g/cm³,吸水率:0.96%,F.M.: 2.60),粗骨材は山口県下関産砕石(最大寸法: 20mm,表乾密度:2.68g/cm³,吸水率:1.67%)で ある。混和剤には、リグニンスルホン酸系の AE 減水剤及びアルキルエーテル系の AE 剤を使用し た。

本研究で使用したコンクリートの配合を表-1 に 示す。配合は,配合名:No.1(試験開始時の目標ス ランプ:15.0±1.0cm)のスランプを低下させた配合 を配合名:No.2(試験開始時の目標スランプ: 8.0±1.0cm),配合名:No.3(試験開始時の目標スラ ンプ:3.0±1.0cm)とした合計3水準で検討した。

2.2 フレッシュ性状試験

コンクリートのフレッシュ性状試験では、スラ ンプ試験をJIS A1101,空気量試験をJIS A 1128 に従い測定した。配合名:No.1のコンクリートは、 所定の目標スランプと目標空気量:4.5±1.0%を満 たしていることを確認した後、圧送試験を実施し た。配合名:No.2と配合名:No.3は,所定のスラ ンプを満たしていることを確認した後,圧送試験 を実施した。

2.3 圧送方法

図-1に試験圧送の配管図を示す。配管は,90度 ベント管を3箇所と8mのフレキシブルホースを配 置した水平換算距離86.9mとした。

圧送方法は、フレキシブルホースをポンプ車に 設置することで、繰り返し圧送可能な循環圧送方 式とした。圧送速度について、配合名:No.1は15, 30,50m³/h,配合名:No.2は15,30³/h,配合名: No.3は15m³/hで圧送した。

2.4 振動加速度計による計測方法及び評価方法

図-1に振動加速度計の加速度センサーの取付け 位置(青印)と同時に計測した管内の圧力測定の 測定位置を示す。加速度計は、ベント管に3箇所(ポ ンプ車から筒先に向かって進行方向順にベント管 1,2,3と称す)、水平管に1箇所設置した。管内の圧力 測定は水平管とベント管部の計8箇所に設置し、測 定を行った。

振動加速度計は、小型4 チャンネル式のハンデ ィタイプのデータレコーダーに端子で取り外し可 能な直径 1.5cm の小型の加速度センサーを取り付 けて使用した。加速度センサーは、先端をマグネ ット式に加工されたもので、被測振動体(輸送管) にはマグネットで直接取り付け、固定ができるも のである。また、配管に取り付けた加速度センサ ーは、コンクリートの圧送による配管の振動では、 外れないことも確認している。

写真-1に加速度センサーの取り付け状況を示す。 ベント管での加速度センサーの取り付け位置は, 各ベント管に共通して筒先に向かってベント管入 口に1点(測定点:1),筒先に向かって内側と外 側に各1点(筒先に向かってベント管内側が測定 点:2,筒先に向かってベント管外側が測定点:3), 筒先に向かってベント管出口に1点(測定点:4) の計4点とした。水平管での加速度センサーの取 り付け位置は,筒先に向かって並列に3点(測定 点:1~3)で計測した。計測後,計測した加速度 の評価及びFFT 解析により周波数と振幅の関係で 評価した。

3. 結果及び考察

3.1 管内圧力定による圧送性評価

図-2 に各圧力計の管内圧力と測定位置の関係を 示す。表-2 に各配合の水平管における平均圧力損 失と油圧の変動係数の関係,圧送状態の評価,ス ランプの実測値を示す。

管内圧力については,各配合でポンプ車側から 筒先に向かって圧力は低くなる傾向を示した。ま た,配合間の関係では,スランプの大きさの順に

表-1 コンクリートの配合

副ムタ	s/a	w/c	単位量(kg/m)			n³)	目標スランプ	目標空気量
能口扣	(%)	(%)	W	С	S	G	(cm)	(%)
No.1							15±1.0	
No.2	48	56	166	296	851	929	8±1.0	4.5 ± 1.5
No.3							3±1.0	



図-1 配管図及び加速度センサーの取り付け位置(青印), 管内の圧力測定の測定位置



写真-1 水平管とベント管の加速度センサーの取り付け 状況(左:水平管3点,右:ベント管4点)



図-2 各圧力計の管内圧力と測定位置の関係

表-2 各配合の圧送状態の判定

配合名	スランプ (cm)	平均 ポンプ油圧 (Mpa)	変動係数 (%)	圧送状態	
No.1	15cm	0.618	1.719	Ⅲ五三田	
No.2	8cm	0.708	4.736	川只词	
No.3	3cm	1.074	41.38	不安定	

管内圧力の関係は示されており、スランプの最も 小さい配合名:No.3の圧力が常に高い値を示した。

また,各配合の圧送状態は,水平管の平均管内 圧力と油圧の変動係数の値,目視により筒先から のコンクリートの排出状態から判定した。その結 果,油圧の変動係数も低く,常に一定の状態で筒 先からコンクリートが排出されていた配合名:

No.1 と配合名: No.2 を順調圧送状態(以降,順 調と称す)とし,圧送は可能であったが,油圧の 変動係数が非常に高く,筒先からコンクリートが 不規則に排出されていた配合名: No.3 を不安定圧 送状態(以降,不安定と称す)とした。以降,こ れらの圧送状態と加速度計により計測した結果に ついて検討を行った。

3.2 水平管での振動加速度計の計測による圧送 性評価

図-3 にベント管1と水平管での測定点:1で計 測した先送りモルタルの計測時間と加速度の関係 を示す。加速度の値はベント管1と水平管で共に 非常に小さく,値に変化は見られなかった。この 結果は,既往の室内試験の結果⁴⁾と同様であり, 試験圧送においても粗骨材のないモルタルでは加 速度の値は小さく,値に変化が見られないことを 示した。

図-4 に水平管の測定点:1 で計測した各配合の 計測時間と加速度の関係を示す。各配合の加速度 の値に関しては、加速度の値自体も大きく、既往 の室内試験の結果⁴⁾の約5倍程度の大きさであっ た。これは、既往の室内試験とは試験条件が異な り、ピストン式のポンプ車を使用した試験圧送の 場合、圧送圧力が高いため加速度の値も大きくな ったと考えられる。また、加速度の値は一定時間 間隔で確認でき、これはピストン稼働時間と同様 であることから、ピストンの動きに合わせてコン クリートが輸送管内を移動していることを示して いる。コンクリートの配合別では, 順調の配合名: No.1 と配合名: No.2 では, スランプの小さい配合 名:No.2 の方が加速度の値が大きくなる傾向を示 した。また、不安定であった配合名: No.3 は、順 調の加速度の形状とは異なるが、その値は小さく、 水平管の計測のみで圧送状態を判定することは難 しい。

図-5 に配合名: No.1 を水平管の測定点:1 で計 測した圧送速度別の計測時間と加速度の関係を示 す。圧送速度別の加速度の値に関しては,圧送速 度が速くなるに従い,加速度の値は大きくなり, 一定間隔で現れる加速度の時間が短くなった。こ れは,圧送速度が速くなることで,圧送圧力も高 くなるため加速度の値も大きくなり,ピストンの 稼働も速くなるため,一定間隔で現れる加速度の 時間が短くなったと考えられる。



図-3 先送りモルタルの計測時間と加速度の関係



図-4 水平管で計測した各配合の計測時間と加速度 の関係



図-5 水平管で計測した圧送速度別の計測時間と 加速度の関係



図-6 水平管で計測した周波数と振幅の関係



図-7 各配合及び圧送速度別の振幅のピーク値と それに対応する周波数の関係



国一の一般前の配合及び圧迭速度別の平均省内圧力で 振幅のピーク値の関係

図-6 に水平管の測定点:1 で計測した配合名: No.1 の周波数と振幅の関係を示す。図-7 に各配合 及び圧送速度別(配合名:No.1)の振幅のピーク 値とそれに対応する周波数の関係を示す。図-8 に 順調の配合及び圧送速度別(配合名: No.1)の平 均管内圧力と振幅のピーク値の関係を示す。配合 名: No.1 で振幅のピーク値(マル印)の示された 周波数は1000Hz付近であった。その他の配合に関 しても 1000~1500Hz 付近で確認でき, 圧送速度別 (配合名: No.1)に比較した場合にも、周波数は 1000Hz付近であった。既往の結果4)で、周波数は 2000Hz~3000Hz付近に確認できたのに対して,本 研究の試験圧送の結果は 1/2~1/3 の周波数であっ た。これは、既往の室内試験^{4),}や試験圧送の結果 ⁶⁾では輸送管を治具等で固定し,輸送管が地面から 浮いた状態で圧送するのに対して、本研究の試験 圧送では通常の施工現場と同様に直接地面に配管 していることや、管全体が連結していること、管 内部に長距離にわたってコンクリートが充填され ていること等の要因から輸送管からの振動が抑制 され周波数が小さくなったと考えられる。また, 振幅のピーク値と平均管内圧力については、平均 管内圧力が大きくなるに従い、振幅のピーク値も 大きくなる傾向を示した。特に、圧送速度が速く なるに従い、平均管内圧力と振幅のピーク値が大



図-9 ベント管:1 で計測した各配合の計測時間と 加速度の関係



図-10 ベント管:2 で計測した各配合の計測時間と 加速度の関係



図-11 ベント管:3 で計測した各配合の計測時間と 加速度の関係

きくなる傾向が顕著であった。また,順調の場合, 振幅のピーク値と平均管内圧力に相関関係がある ことを明らかにした。

3.2 ベント管での振動加速度計の計測による圧 送性評価

図-9~11 にベント管 1~3 の測定点:1 で計測した各配合の計測時間と加速度の関係を示す。

各配合のベント管の加速度の値は,管内圧力の 結果と同様にポンプ車側から筒先に向かって配管 位置が遠くなるにつれて,加速度の値は小さくな り,加速度の値が示される間隔も短くなる傾向に あった。

また, 圧送状態別では, 順調の配合(配合名: No.1 と No.2)では,水平管の加速度の結果と同様にスランプの小さい配合名: No.2 が全体的に加速度の値が大きくなり,その傾向はポンプ車に一番近いベント管1で明確に確認できた。不安定の配合名: No.3 では,ベント管1の加速度の値が順調に比べて非常に大きく,大きな乱れが見られたことから,順調と不安定では全く異なる加速度の測定結果を示した。ベント管2とベント管3においても,順調と比較して加速度の値や形状に違いが見られたが,ベント管1が顕著であった。

以上から,ポンプ車に一番近いベント管の加速 度の値の大きさや形状から圧送性の違いを判定で きる。

3.3 各測定点での振動加速度計の計測による圧 送性評価

図-12 にベント管 1 の各測定点で計測した各配 合の振幅のピーク値とそれに対応する周波数の関 係,図-13 に水平管の各測定点で計測した各配合の 振幅のピーク値とそれに対応する周波数の関係を 示す。

水平管に関しては,順調の配合(配合名:No.1 とNo.2)に比べ,不安定の配合(配合名:No.3) の周波数と振幅が大きくなるが,各測定点での値 に大きな違いは見られなかった。

ベント管1に関しては、筒先に向かってベント 管入り口の測定点:1で計測した各配合の周波数と 振幅が大きくなり、その後、筒先に向かってベン ト管出口に向けて各配合の周波数と振幅が小さく なる傾向にあった。特にその傾向は、不安定の配 合名:No.3の振幅の値に現れており、順調の配合 (配合名:No.1とNo.2)や同配合の水平管の結 果とも大きな違いを確認することが出来た。これ は、圧送の抵抗が最も大きいベント管の曲り部は コンクリートの圧送の動きが急激に低下するため、 その直前のベント管入り口で骨材同士の衝突や骨 材が管壁へ当る回数が増え、管壁との摩擦が大き くなったと考えられる。その傾向が圧送に乱れの 多い配合名:No.3で顕著であったと考えられる。







図-13 水平管の各測定点で計測した振幅のピーク 値とそれに対応する周波数の関係



図-14 ベント管:1 で計測した各配合の周波数と振幅の関係

以上から,水平管では測定位置の影響は受けな いが,ベント管では測定位置の影響から筒先に向 かってベント管入口で計測を行うことが圧送性の 違いの判定に有効である。

3.4 振動加速度計の計測による圧送性の判定・評価方法

これまでの結果から圧送性の判定・評価方法と して,図-14 にベント管1の測定点:1で計測した 各配合の振幅と周波数の関係,図-15 に水平管とベ ント管1の測定点:1で計測した振幅のピーク値 を示す。



図-15 水平管とベント管:1で計測した振幅のピーク値

順調の配合名:No.1と不安定の配合名:No.3 の振幅と周波数の関係について,順調と不安定で は振幅と周波数の関係図が大きく異なるため,圧 送性の違いが最も表れやすい周波数領域:500~ 4000Hzの振幅の値を合計して評価を行った。その 結果,順調の場合 0.25m/s²に対して,不安定は 0.40m/s²となり,圧送性の違いを定量的に示すこ とができた。

順調の配合名: No.1 と不安定の配合名: No.3 の振幅のピーク値について,圧送性によらず水平 管では同程度の値を示したが,ベント管1では圧 送性の違いが顕著に表れた。これらの圧送性をベ ント管1だけで評価する場合,順調と不安定の振 幅のピーク値から約0.004m/s²の値の違いが確認 でき,また,圧送性を不安定の配合名: No.3 だけ で評価行う場合,ベント管1と水平管の振幅のピ ーク値から約0.003m/s²の値の違いが確認でき, いずれも圧送性の違いを定量的に示すことができ た。

以上から、ポンプ車に近い位置のベント管で計 測した基準(順調に圧送できたデータ)となる振 幅の値や振幅と周波数の値,または、その先の水 平管で計測した振幅の値を比較することにより、 圧送性の違いを判定・評価できる。

しかし, 圧送性の判定・評価を行うには, 判定・ 評価の基準となる閾値を設定できていない。その ため, 今後, 様々な配合条件や圧送条件での計測 データの集計から判定・評価の基準を設定すると 同時に, 計測時に閉塞危険性を未然に防ぐための 対応・管理方法についても検討する必要がある。

4. まとめ

- (1) コンクリートの圧送性や圧送条件によって加 速度の値の大きさや加速度が表れる時間間隔 が異なる。
- (2) 配管の設置条件により周波数の結果は異なる。

また,順調の場合,振幅のピーク値と平均管 内圧力に相関性がある。

- (3) ベント管は、ポンプ車に一番近いベント管の 加速度の値の大きさや形状から圧送性の違い を判定でき、また、測定位置の影響から筒先 に向かってベント管入口で計測を行うが圧送 性の違いの判定に有効である。
- (4) ポンプ車に近い位置のベント管で計測した基準(順調に圧送できたデータ)となる振幅の 値や振幅と周波数の値,または、その先の水 平管で計測した振幅の値を比較することにより、圧送性の違いを判定・評価できる。

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
- (初辺健,他: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研究、フレッシュコンクリー トのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題 (II) 一般論文、コンクリート技術シリーズNo.54、 pp.23-32,2003.7
- 4)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
- 5) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1201-1206, 2013
- 6)日本建築学会近畿支部材料・施工部会:第9回圧送技術 研究会報告書,2013