論文　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

案浦　侑己[*1]・橋本　紳一郎[*2]・渡辺　健[*3]・橋本　親典[*4]

要旨：本研究は，室内の変形性評価試験と実機の試験圧送において，輸送管に加速度センサーを取り付けて，コンクリートの種類や配合条件，圧送条件ごとに管内で発生する振動特性を計測し，コンクリートの圧送性を簡易的に評価する手法を検討した。その結果，室内の変形性評価試験では，コンクリートの種類や圧送速度に関係なく，振幅のピーク値とポンプ主油圧の変動係数に相関性があることを示した。実機の試験圧送では，ポンプ車に近い位置のベント管部及びその先の水平管部で振動加速度計による計測を行うことにより，加速度の乱れや 2 点の振幅のピーク値の差から圧送性の違いを判定できることを示した。

キーワード：圧送性，閉塞，加速度，振幅，周波数，ポンプ主油圧の変動係数

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。

圧送性の評価手法については，油圧式による方法の他にも提案[2)]されているが，これらは試験圧送を対象としたものであり，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一般的には難しい。

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おり[3),4)]，加速度の値から圧送性の評価が可能であることも示している。しかし，計測結果に影響の大きい粗骨材の種類や圧送方法など，評価手法の確立には多くの課題が残る。また，これまでの検討内容は，全て室内での変形性評価試験装置を利用した模擬圧送による検討であり，実際の圧送を行うまでには至っていない。

そこで本研究では，再生骨材や人工軽量骨材などを使用した特殊コンクリートや配合条件，圧送速度による影響を室内試験で検討するとともに，実機での試験圧送での計測により振動加速度計による簡易的な計測・評価手法について検討した。

2. 実験概要

本研究は，室内において変形性評価試験装置を使用して圧送を行った＜シリーズ１＞，実機での試験圧送を行った＜シリーズ２＞で構成され，その際の圧送性を振動加速度計により計測・評価した。

2.1 使用材料及びコンクリートの配合条件

本研究で使用した使用材料及び配合表を**表-1**，**表-2** に示す。＜シリーズ１＞では配合名：No.1～No.5 を使用し，＜シリーズ２＞では配合名：No.5～No.8 を使用した。

＜シリーズ１＞では，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。配合名：No.4 は配合名：No.1 の粗骨材を LG に置換えたものである。配合名：No.5 は RG を使用したものである。以上，合計 5 水準で検討した。

＜シリーズ 2＞では＜シリーズ１＞と同様の材料を使用した。配合名：No.6 は配合名：No.5 の RG を G に置き換えたものである。また，配合名：No.6(試験開始時の目標スランプ：15.0±1.0cm)のスランプ低下させた配合を配合名：No.7(試験開始時の目標スランプ：8.0±1.0cm)，配合名：No.8(試験開始時の目標スランプ：3.0±1.0cm)とした。以上，合計 4 水準で検討した。

＜シリーズ１＞と＜シリーズ2＞の混和剤はリグニンス

*1 福岡大学大学院　工学研究科　博士前期課程　(学生会員)
*2 福岡大学　工学部社会デザイン工学科　助教　博（工）　(正会員)
*3 徳島大学大学院　ソシオテクノサイエンス研究部　准教授　博（工）　(正会員)
*4 徳島大学大学院　ソシオテクノサイエンス研究部　教授　工博　(正会員)

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，目標空気量は4.5±1.0%とした。

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。

コンクリートは，各配合の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。

2.3 圧送試験方法及び振動加速度計による計測方法

(1) コンクリートの変形性評価試験＜シリーズ１＞

図-1 に変形性試験装置と振動加速度計の加速度センサーの取付け位置を示す。

試験はフレッシュコンクリートの変形性試験方法(JSCE-F509-2010）に準拠して行った。テーパ管を有する小型圧送試験装置を用いて，仰角 9.9 度，ピストン速度 1.25cm/s で圧送し，圧送状態の目視確認，平均ポンプ油圧の測定およびポンプ主油圧の変動係数を算出した。また，圧送速度の検討として，ピストン速度 2.5cm/s でも行った。

加速度センサーは，テーパ管部に 3 箇所で計測した。テーパ管部では，直管の径と同じ大きさの位置でテーパ管の入り口に当たる測定点：1，テーパ管の径 155mm から 100mm になる中間位置である測定点：2，テーパ管の径が最も細くなる測定点：3 で測定した。

(2) 実機での試験圧送＜シリーズ 2＞

図-2に実機での試験圧送の配管図と振動加速度計の加速度センサーの取付け位置（青印）を示す。**写真-1**に加速度センサーの設置状況風景を示す。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。配合名：No.6に関しては，圧送速度15，30，50m^3/hの各圧送速度で圧送した。

圧力計は水平管とベント管部の計 8 箇所に設置した。加速度センサーは圧送条件からテーパ管に設置できなかったため，ベント管に 2 箇所（進行方向順にベント管 1, 2 と称す），水平管に 1 箇所設置した。＜シリーズ１＞と＜シリーズ 2＞ともに計測後，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. 変形性評価試験の結果及び考察＜シリーズ１＞

3.1 変形性評価試験の結果

表-3に変形性評価試験の測定結果と圧送状態の評価，スランプの実測値を示す。本研究で閉塞状態（閉塞）は，閉塞する直前までの状態を意味する。表より，順調圧送状態（順調）の結果に関しては，指針に示されている順調圧送状態[1]（平均ポンプ油圧：0.20MPa，ポンプ主油圧

表-1 使用材料

項目	記号	材料	摘要
セメント	C	高炉セメントB種	密度:3.04 g/cm^3
細骨材	S	福岡県玄界灘産海砂	表乾密度:2.58g/cm^3, 吸水率:0.96%
粗骨材	G	山口県下関産砕石	最大寸法:20mm, 表乾密度:2.68g/cm^3 吸水率:1.67%, 実積率59%
	LG	人工軽量粗骨材	最大寸法:15mm, 表乾密度 1.4g/cm^3 吸水率10.5%, 実積率64.2
	RG	再生骨材L	最大寸法:20mm, 表乾密度:2.47g/cm^3 吸水率:5.5%, 実積率61%
混和剤	Ad	AE減水剤	リグニンスルホン酸系
		AE剤	アルキルエーテル系

表-2 配合表

シリーズ	配合名	s/a (%)	w/c (%)	単位量(kg/m^3) W	C	S	G	RG	LG	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)
Ⅰ	No.1	45	50	175	350	777	979	－	－	15±1.0	4.5±1.5
	No.2									8±1.0	
	No.3									3±1.0	
	No.4					777	－	－	515	15±1.0	
Ⅰ・Ⅱ	No.5	48	56	166		851	－	929	－	15±1.0	
Ⅱ	No.6						929	－	－	15±1.0	
	No.7									8±1.0	
	No.8									3±1.0	

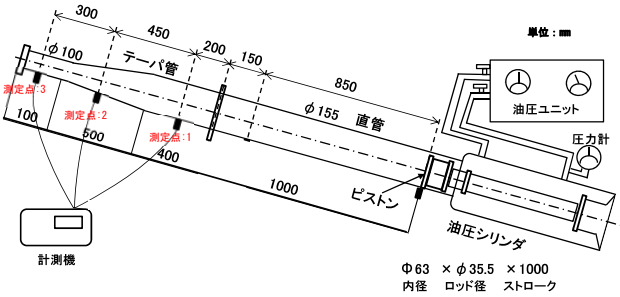

図-1 試験装置と加速度センサーの取付け位置

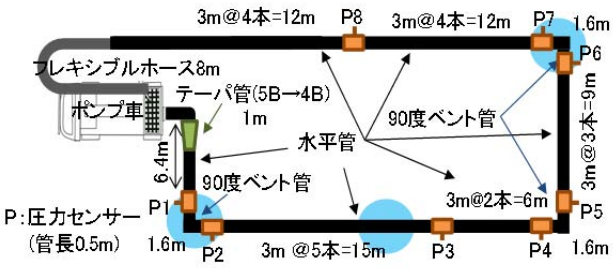

図-2 配管構成と加速度センサー及び圧力計の取付け位置

写真-1 加速度センサーの設置状況風景

の変動係数：25%）の範囲内であり，閉塞はその範囲から大きく外れる結果となった。また，圧送状態が順調のものに関しては，人工軽量骨材コンクリート（配合名：No.4）や再生骨材コンクリート（配合名：No.5）で，やや平均ポンプ油圧が高くなる傾向にあった。

表-3 変形性評価試験の結果

＜シリーズ1＞				
配合名	スランプの実測値（cm）	平均ポンプ油圧(Mpa)	ポンプ主油圧の変動係数（%）	圧送状態
No.1	15.0	0.088	14.98	順調
No.2	8.0	0.084	14.23	順調
No.3	3.0	0.845	54.18	閉塞
No.4	13.0	0.101	11.79	順調
No.5	16.0	0.112	16.86	順調

3.2 振動加速度計による圧送性の評価

図-3 にコンクリートの種類別の計測時間と加速度の関係を示す。また，比較対象として閉塞の試験結果も示す。結果は測定点：1 で計測された値である。本研究では加速度の値が一定とは振幅が収束することを示している。閉塞した結果（配合名：No.3）では加速度の値が計測時間 30 秒まで小さな乱れを繰り返し閉塞直前の 60 秒から 80 秒にかけて大きな値・乱れを生じたのに対して，順調であった 3 配合は圧送が定常状態となった 30 秒以降で加速度の値が一定となった。また，加速度の値は，再生骨材コンクリート（配合名:No.5）が他の配合に比べて小さい値を示した。

図-4 にコンクリートの種類別の周波数と振幅の関係を示す。普通コンクリート（配合名：No.1）の場合，周波数 3000Hz 付近（マル印）に振幅のピーク値が示されたのに対して，人工軽量骨材コンクリート（配合名：No. 4）の場合は周波数 2500Hz 付近（マル印），再生骨材コンクリート（配合名：No.5）の場合は周波数 2000Hz 付近（マル印）に振幅のピーク値が示された。これらは骨材の形状による影響によるもので，特に砕石を使用した普通コンクリートよりも骨材の形状が安定し，粒径に近い人工軽量骨材の周波数が低くなったと考えられる。

図-5 はコンクリートの種類と加速度センサーの取付け位置での影響を振幅のピーク値とそれに対応する周波数の関係で示す。加速度センサーの取付け位置では，テーパ管の径が小さくなる測定点：1～3 の順に周波数は低くなり，振幅のピーク値は高くなる傾向を示した。これらはコンクリートの種類に関係なく同様の傾向を示した。テーパ管の径が最も小さい測定点：3 では，順調に圧送されている場合でも閉塞時に起こる骨材のアーチングのような骨材同士が密な状態となり，そのため管壁面周辺でコンクリートの動きの低下により周波数は

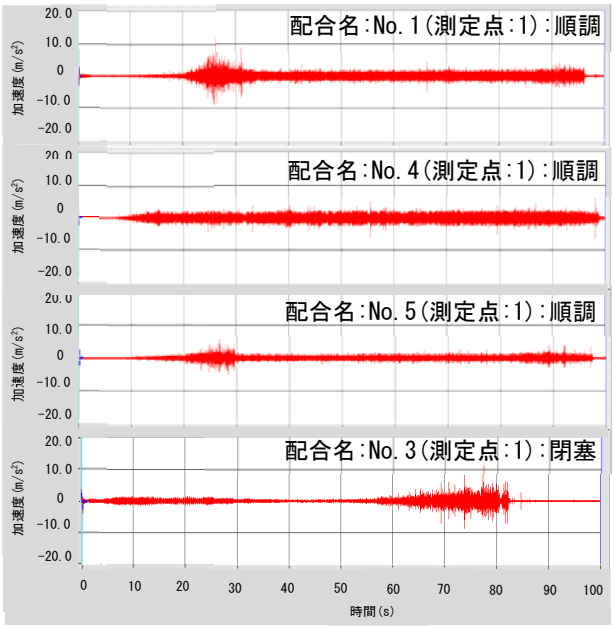

図-3 計測時間と加速度の関係(コンクリートの種類別)

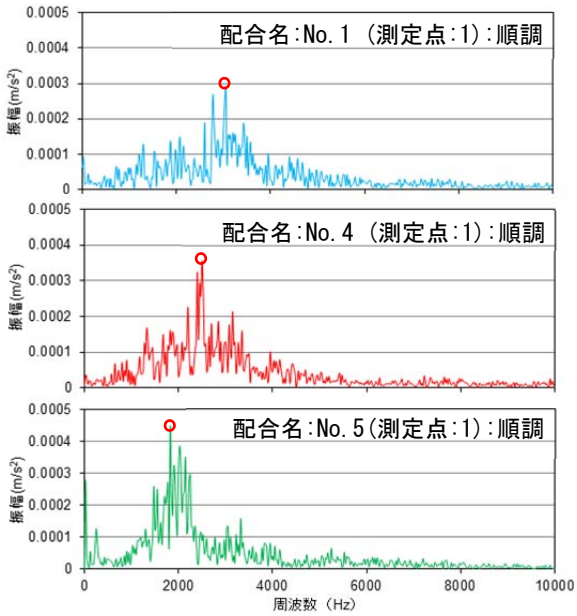

図-4 周波数と振幅の関係(コンクリートの種類別)

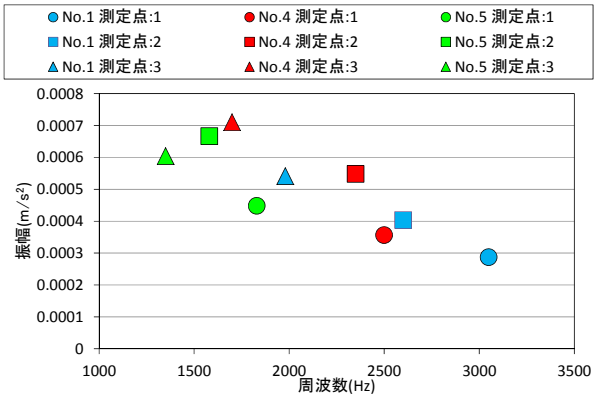

図-5 取付け位置での振幅のピーク値とそれに対応する周波数の関係

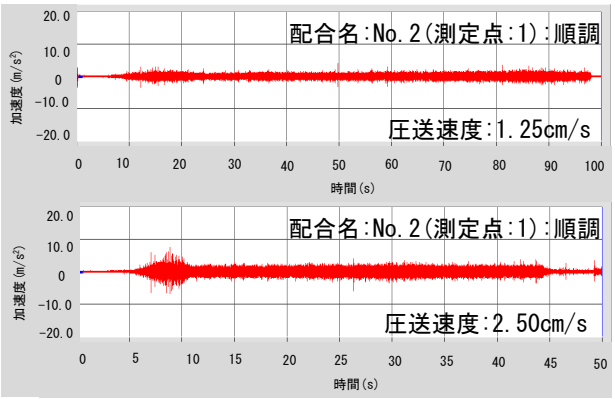

図-6 計測時間と加速度の関係(圧送速度)

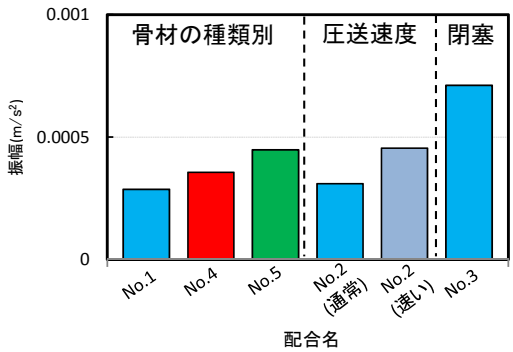

図-7 各配合(測定点:1)における振幅のピーク値

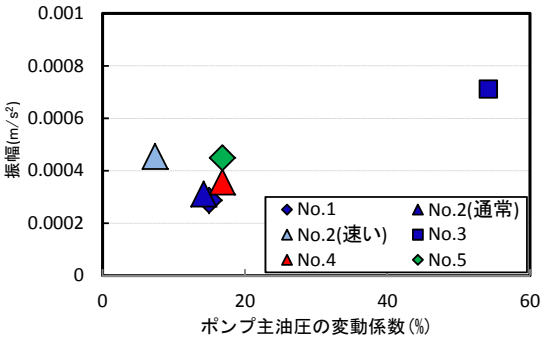

図-8 振幅のピーク値とポンプ主油圧変動係数との関係

下がったが，これら管内の状態に関係なくコンクリート全体が押し出されるため振幅のピーク値は高くなったと考えられる。

図-6 に圧送速度別の計測時間と加速度の関係を示す。これらは全て順調に圧送された結果であり，圧送速度は通常の変形性評価試験の圧送速度 1.25cm/s と圧送速度 2.50cm/s で検討した。圧送速度が速くなることにより，加速度の値は全体的に大きくなる傾向にあり，圧送状態が定常状態となった 10 秒以降では加速度の値に乱れなどはなく，ほぼ一定の値を示した。

図-7 に各配合の振幅のピーク値及び圧送速度別の振幅のピーク値の関係，**図-8** に各配合の振幅のピーク値及び圧送速度別の振幅のピーク値と変形性評価試験結果のポンプ主油圧の変動係数との関係を示す。結果は全て測定点：1 で計測された値である。図より，閉塞したもの（配合名：No.3）の振幅のピーク値に関しては，順調に圧送された他の試験結果と比較して，約 1.5～2 倍程度大きくなる傾向を示しており，コンクリートの種類や圧送速度の違いに関係なく，順調と閉塞の振幅のピーク値に大きな違いが表れることを明らかにした。また，ポンプ主油圧の変動係数について，順調に圧送された結果の中で振幅のピーク値の比較的大きい値であった人工軽量骨材コンクリート（配合名：No.4）や再生骨材コンクリート（配合名：No.5），圧送速度を速くしたもの（配合名：No.2（速い））のポンプ主油圧の変動係数は，20%以下であり，順調に圧送された場合のポンプ主油圧の変動係数はコンクリートの種類や圧送速度に関係なく低い値となることを示した。これらに対して，閉塞はポンプ主油圧の変動係数も高くなっていることから，コンクリートの種類や圧送速度に関係なく，振幅のピーク値とポンプ主油圧の変動係数に相関性がある。

4. 実機での試験圧送の結果及び考察＜シリーズ 2＞

4.1 加速度の値による圧送性評価

図-9 に水平管で計測した各配合の計測時間と加速度の関係及び普通コンクリート（配合名：No.5）の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を示す。コンクリートの圧送前に行った先送りモルタルの計測結果も示す。

先送りモルタルの計測結果に関しては，加速度の値は非常に小さく，値に変化は見られなかった。この結果は，既往の結果[4]と同様であり，試験圧送でも粗骨材のないモルタルでは加速度の値は小さくなることを示した。

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，＜シリーズ 1＞の結果の約 5 倍程度の大きさであった。これは，＜シリーズ 1＞の試験条件と異なり，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。コンクリートの種類や配合別では，＜シリーズ 1＞の結果と同様に普通コンクリート（配合名：No.5）に比べて再生骨材コンクリート（配合名：No.6）の加速度の値が小さく，スランプの小さい配合（配合名：No.7）の方が加速度の値が大きくなる傾向を示した。

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

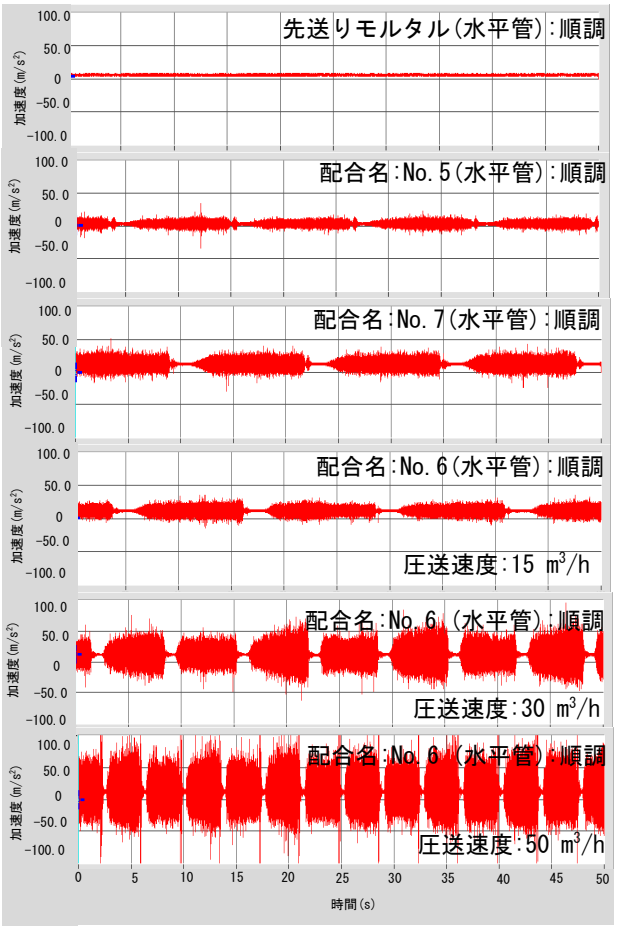

図-9 水平管計測時での計測時間と加速度の関係

れる加速度の時間が短くなったと考えられる。

4.2 周波数特性による圧送性評価

図-10 に普通コンクリート（配合名：No.6）の周波数と振幅の関係を示す。**図-11** に各配合及び圧送速度別（配合名：No.6）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-12** に各配合及び圧送速度別（配合名：No.6）の平均管内圧力と振幅のピーク値の関係を示す。これら全て水平管で計測した結果である。

普通コンクリート（配合名：No.5）の振幅のピーク値（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 1000Hz 付近で確認でき，圧送速度別（配合名：No. 5）に比較した場合にも，周波数は 1000Hz 付近であった。＜シリーズ 1＞の結果では，周波数は 2000Hz～3000Hz 付近に確認できたのに対して，実機の試験圧送の結果は 1/2～1/3 の周波数であった。これは，＜シリーズ 1＞では変形性評価試験で使用する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，実機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。

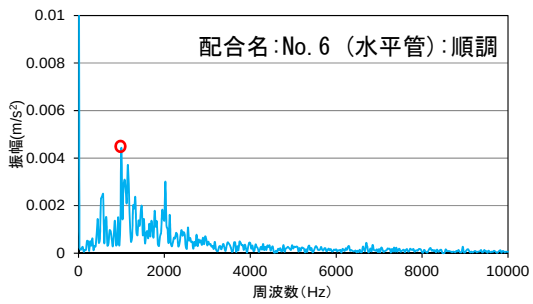

図-10 水平管計測時の周波数特性

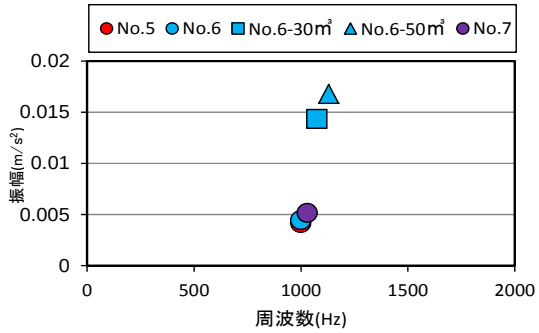

図-11 各配合における振幅のピーク値とそれに対応する周波数の関係

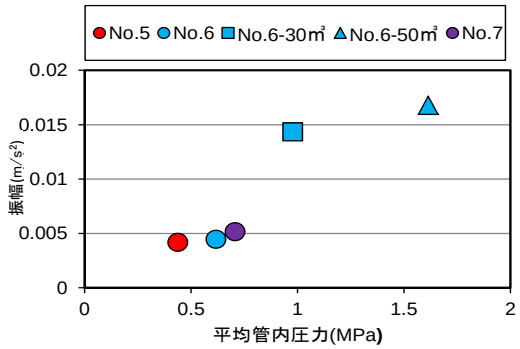

図-12 各配合における振幅と圧力の関係

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。＜シリーズ 1＞の順調時の振幅のピーク値の平均値：0.0004 に比べて，約 10～20 倍程度大きくなる。

4.3 異なる圧送性の評価

図-13 に順調であった配合名：No.7（スランプ：8.0cm，以降順調と称す）と不安定であった配合名：No.8（スランプ：3.0cm，以降不安定と称す）の水平管部とベント管部で計測した計測時間と加速度の関係，**図-14** に順調と不安定の水平管部 1 箇所とベント管部 2 箇所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を示す。順調と不安定を比較すると，加速度の値に関しては，順

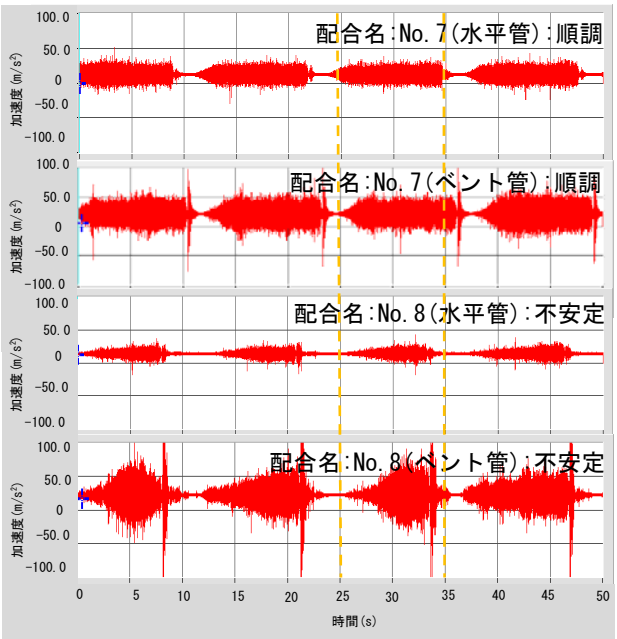

図-13 異なる圧送性での計測時間と加速度の関係

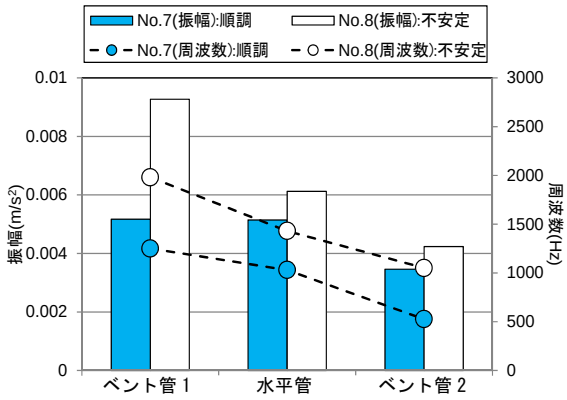

図-14 異なる圧送性での振幅のピーク値とそれに対応する周波数の関係

調の場合，水平管部に対してベント管部の加速度の値が大きくなった。これに対して，不安定の場合，水平管部の加速度の値は小さく，加速度の値が示される間隔が短くなった。ベント管部では加速度の値は非常に大きく，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。

周波数については，順調に比べて不安定の周波数が測定位置に関係なく大きく，特にベント管 1 の周波数が大きくなった。また，ポンプ車からの測定距離が離れる従い，周波数は低くなる傾向を示した。

振幅のピーク値については，圧送性によらず水平管とベント管 2 では，同程度の値を示したが，ベント管 1 において圧送性の違いが顕著に表れた。また，不安定ではベント管 1 とその先の水平管を比較すると約 0.003m/s^2 と明確な差として示された。

以上から，ポンプ車に近い位置のベント管部及びその先の水平管部で振動加速度計による計測を行うことにより，加速度の乱れや 2 点の振幅のピーク値の差から圧送性の違いを判定できる。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 室内試験において，コンクリートの種類や圧送速度に関係なく，振幅のピーク値とポンプ主油圧の変動係数に相関性がある。

(2) 実機の試験圧送において，コンクリートの種類や配合条件，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が異なる

(3) 実機の試験圧送において，配管の設置条件により周波数は室内試験の結果に比べて低くなる。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。

(4) 実機の試験圧送において，ポンプ車に近い位置のベント管部及びその先の水平管部で振動加速度計による計測を行うことにより，加速度の乱れや 2 点の振幅のピーク値の差から圧送性の違いを判定できる。

謝辞：本研究は，社団法人九州建設弘済会の研究助成にて実施されたものである。ここに付記し，深く感謝の意を示す。

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) 渡辺健，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