

コンクリートのポンプ圧送性に関する評価手法の開発

橋本紳一郎¹、江本幸雄²、添田政司³、櫛原弘貴⁴

福岡大学工学部^{1,2,3}、福岡大学大学院³

概要:本研究は、コンクリートの圧送性の簡易評価手法として圧送管に加速度センサーを取り付けて、直管やテーパ管の管内で骨材により発生する振動特性を計測し、コンクリートの圧送性を評価する手法の検討を行った。その結果、テーパ管の入り口下部付近で加速度を計測することにより、加速度の値の乱れや大きさから圧送性を正確に評価することが可能であることを示した。

1. はじめに

近年、コンクリート施工において、コンクリートポンプは施工現場での搬送効率を考えると必要不可欠となっている。コンクリートの圧送は、多くの施工現場で用いられているが、施工環境や圧送条件、コンクリートの配合条件により、圧送管内は常に一定の状態では圧送されているとは言えない。しかし、通常の施工現場では、圧送中のコンクリートの状態を確認する方法はないため、突然、閉塞のような搬送効率を下げるトラブルが発生する。コンクリートポンプ施工の実態調査結果¹⁾においても、閉塞がトラブル発生種類の中で大半を占めている。

閉塞に関しては、既往の研究により閉塞発生のメカニズムは明らかにされているが²⁾、通常の施工現場では圧送性を確認する方法がないため、筒先からコンクリートが排出されなくなって、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。そのため、通常の施工現場においても圧送性を把握することは非常に重要である。

これらに対して、土木学会「コンクリートのポンプ施工指針(平成12年度版)」では、閉塞に対する安全性評価試験として、加圧ブリーディング試験と変形性評価試験を挙げているが³⁾、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。

以上から、特殊な測定装置や測定用の配管の準備が必要なく、コンクリートポンプの圧送性を簡易に測定・評価することのできる計測システムが必要である。そこで、本研究では、容易に実施できる新しい圧送性評価手法について検討した。

2. 加速度センサーによる圧送性評価

コンクリートの圧送の際に、コンクリート中の粗骨材は粗骨材粒子群同士あるいは管壁と衝突を繰り返し生じながら圧送され、閉塞が発生する直前には、粗骨材粒子群とモルタル相の間に大きな乱れが発生することが明らかになっている^{2) 4)}。その際に、圧送管には粗骨材の衝突による微細な振動が発生しており、それらは管内で順調に圧送されているコンクリートと閉塞直前の状態では異なることが予測される。また、粗骨材の衝突による振動は、直管と閉塞を生じやすい箇所となるテーパ管やベント管では、その大きさに違いが表れることが予測される。そこで、本研究では、コンクリート圧送時に直管とテーパ管の管内で発生する振動の周波数特性を圧送管に取り付けた加速度センサーによって計測し、計測結果からコンクリートの圧送性評価を検討した。

3. 実験概要

本研究は、実験室内において変形性評価試験装置を使用し、〈シリーズ1〉ではフレッシュコンクリートの変形性試験(JSCE-F509-2010)に準拠した圧送方法、〈シリーズ2〉では脈動を発生させ実際の圧送性を再現した圧送方法でコンクリートを圧送し、その際の圧送性を加速度センサーにより計測・評価した。

3.1 使用材料

本実験では、〈シリーズ1〉と〈シリーズ2

>で同一の材料を使用した。使用した材料は、セメントに普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/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）、粗骨材は福岡県志摩町産砕石（最大寸法：20mm、表乾密度：2.66g/cm³、吸水率：1.11%、F.M.：6.60）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。

3.2 コンクリートの配合条件及び配合

本実験で使用したコンクリートの配合条件を表-1に示す。配合名は、「記号-目標スランブフローまたは目標スランブの値」を示す。Vg/Vmは、水、セメント、細骨材の容積に対する粗骨材の容積を表す値である。

<シリーズ1>では、骨材の影響を検討するためコンクリートだけではなく、モルタルも使用して検討を行った。モルタル（Vg/Vm：0%）は、15打（JIS R 5201）の目標フロー：200mm、120mmの2配合で実施した。コンクリートは、水セメント比と単位水量を一定とし、細骨材率：45%（Vg/Vm：62%）、41%（Vg/Vm：70%）、37%（Vg/Vm：80%）の3水準、各水準に対して目標スランブ：21.0±1.0cm、15.0±1.0cm、8.0±1.0cm、3.0±1.0cmの4水準とした。ただし、細骨材率：37%（Vg/Vm：80%）は目標スランブ：8.0±1.0cm以下の圧送は困難であったため3水準とし、合計11配合で検討を行った。目標空気量は全て4.5±1.0%で一定とした。

<シリーズ2>では、<シリーズ1>の細骨材率：45%のコンクリートの配合を使用し、目標スランブ：8.0±1.0cm、3.0±1.0cmの2水準の合計2配合で検討した。目標空気量は全て4.5±1.0%で行った。

3.3 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、スランブ試験をJIS A1101、空気量試験をJIS A1128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ブ（：21.0±1.0cm、15.0±1.0cm、8.0±1.0cm、3.0±1.0cm）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。また、モルタルは、JIS R 5201に準拠して、15打の所定の目標フロー（：200mm、120mm）を確認した後、圧送試験を実施した。

3.4 コンクリートの圧送性評価試験

(1) コンクリートの変形性評価試験<シリーズ1>

<シリーズ1>では、変形性評価試験装置（図-1）を使用し、フレッシュコンクリートの変形

表-1 配合条件

配合	配合名	s/a (%)	w/c (%)	s/c (%)	Vg/Vm (%)	単位量	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)
						(kg/m ³)		
M	M-200	-	50	2.2	0	298	200±10*	-
	M-120						120±10*	
A	A-20	45	50	2.2	62	175	20.0±1.0	4.5±1.0
	A-15						15.0±1.0	
	A-8						8.0±1.0	
	A-3						3.0±1.0	
B	B-20	41	50	2.0	70	175	20.0±1.0	4.5±1.0
	B-15						15.0±1.0	
	B-8						8.0±1.0	
	B-3						3.0±1.0	
C	C-20	37	50	1.8	80	175	20.0±1.0	4.5±1.0
	C-15						15.0±1.0	
	C-8						8.0±1.0	

*モルタルフロー：単位(mm)

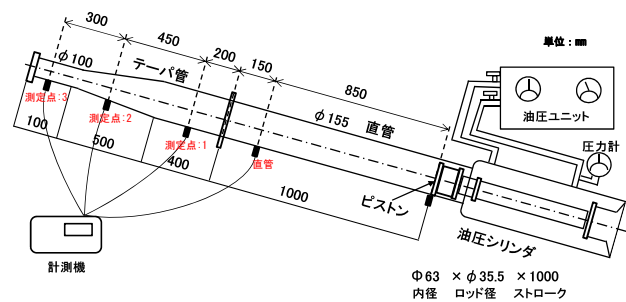


図-1 試験装置と加速度センサーの取付け

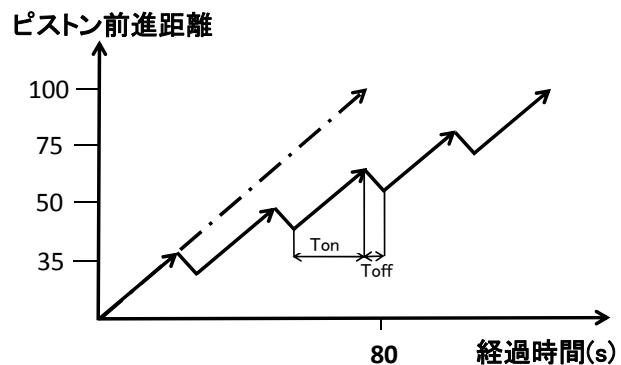


図-2 前進距離と経過時間の関係



写真-1 実際の計測の状況

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 で実施し、圧送状態の目視確認、平均ポンプ油圧およびポンプ主油圧の変動係数を測定した。直管とテーパ管を取り付けた場合の油圧 (P1) と直管のみの場合の油圧 (P2) を差し引いてテーパ管部の油圧 (P1-P2) とした。油圧は、動ひずみ計を用いて 0.1 秒間隔で測定した。

(2) 脈動流の発生による試験<シリーズ 2>

本実験ではピストンの押し引きのスイッチングの ON、OFF を電氣的に制御することによって、ピストンを断続的に前進させることができる脈動流発生装置を油圧ユニットに取り付け実施した。<シリーズ 1>と脈動を発生させた<シリーズ 2>のピストンの前進距離と経過時間の違いを図-2 に示す。既往の研究⁴⁾では、ピストンの前進可動時間 (Ton) と後退可動時間 (Toff) の設定により、実際の圧送速度の脈動波や平均ポンプ油圧およびポンプ主油圧の変動係数を再現できることが報告されている。本研究では、既往の研究⁴⁾で確認されている圧送速度 10 (Ton : 10 秒、Toff : 1 秒)、30 (Ton : 4 秒、Toff : 0.5 秒)、50 (Ton : 3 秒、Toff : 0.5 秒) m³/h を模擬した 3 水準の圧送条件で圧送を行った。

3.5 加速度センサーの計測方法

変形性評価試験装置と加速度センサーの取り付け位置を図-1、実際の計測の状況を写真-1 に示す。

加速度センサーは、取り付け位置の影響を検討するため、直管部に 1 箇所、テーパ管部に 3 箇所の計 4 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 で検討を行った。また、加速度センサーは圧送管の底部に取り付けた場合に、測定データの再現性が確認できたことから、4 箇所全て圧送管の底部に取り付けて検討した。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から圧送性の違いを評価した。

4. 結果および考察

4.1 変形性評価試験の結果

表-2 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。図-3 と図-4 に変形性評価試験による<シリーズ 1>と脈動を発生させた<シリーズ 2>の平均ポンプ油圧とポンプ主油圧の変動係数の関係を示す。本研

表-2 変形性評価試験の結果

配合名	脈動発生による圧送速度条件 (m ³ /h)	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	
M-200	無	200*	0.021	44.47	順調	
M-120		120*	0.044	14.97	順調	
A-20		21.0	0.051	18.38	順調	
A-15		16.0	0.088	14.98	順調	
A-8		9.0	0.084	14.23	順調	
A-3		4.0	0.0845	54.18	閉塞	
B-20		20.0	0.048	24.46	順調	
B-15		16.0	0.124	12.33	順調	
B-8		7.5	0.504	91.67	不安定→閉塞	
B-3		4.0	0.654	63.83	閉塞	
C-20		21.5	0.046	40.03	順調→不安定	
C-15		15.0	0.527	87.08	閉塞	
C-8		9.0	0.583	80.52	閉塞	
A10-8		10	8.5	0.063	19.15	順調
A10-3			3.5	0.308	47.52	閉塞
A30-8	30	8.5	0.024	27.19	順調	
A30-3		4.0	0.319	62.53	閉塞	
A50-8	50	7.0	0.084	14.84	順調	
A50-3		3.5	0.319	81.62	閉塞	

*モタルフロー : 単位 (mm)

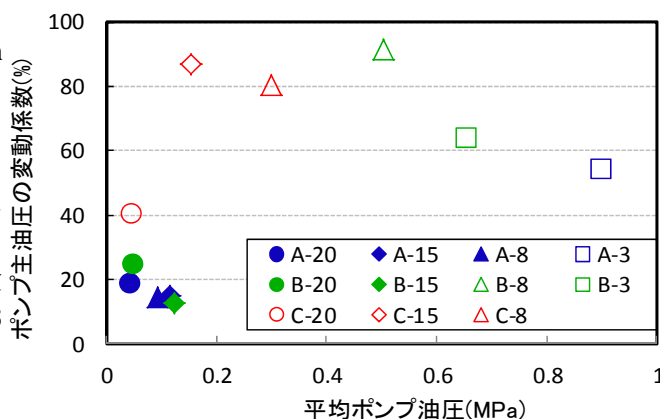


図-3 変形性評価試験の結果 (シリーズ 1)

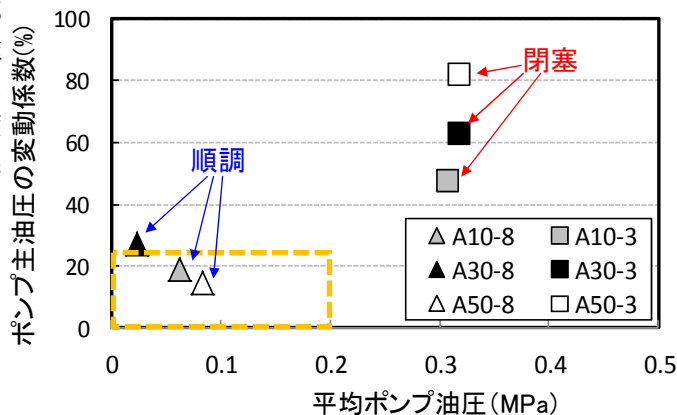


図-4 変形性評価試験の結果 (シリーズ 2)

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。図-3の記号は、順調を塗色、不安定を薄い塗色、閉塞を白抜きとした。図より、<シリーズ1>及び<シリーズ2>の順調圧送状態（順調）の結果に関しては、土木学会「コンクリートのポンプ施工指針（平成12年度版）」に示されている順調圧送状態³⁾（平均ポンプ油圧：0.20MPa、ポンプ主油圧の変動係数：25%、図中の黄色破線枠内）の範囲内であった。また、順調では、<シリーズ1>の細骨材率の影響や<シリーズ2>の圧送条件の影響は見られなかった。閉塞の結果に関しては、<シリーズ1>では細骨材率が低くなるにつれてポンプ主油圧の変動係数が高くなり、<シリーズ2>では圧送速度が速くなるにつれてポンプ主油圧の変動係数も高くなっており、細骨材率や圧送条件とポンプ主油圧の変動係数に相関性が見られた。

4.2 圧送性の評価<シリーズ1>

図-5 に各モルタルフローの計測時間と加速度の関係、図-6 に $s/a=41\%$ の各目標スランブ別の計測時間と加速度の関係を示す。テーパ管の測定位置は全て測定点：1 で計測した結果であり、図-6 には直管で計測した結果の一例も示す。事前に圧送管内に試料を詰めない状態（空の状態）で試験装置を稼働させ、加速度を測定した結果、加速度の値が示されなかったことから、試験自体の実施に伴う圧送管の振動については無視することとした。

図より、モルタルに関しては、モルタルフローの小さい 120mm の方が粘性の違いからやや加速度が大きくなっているように見られるが、粗骨材がないため、値の乱れなどは見られず、平均して加速度の値は小さかった。 $s/a=41\%$ の直管の計測結果に関しては、加速度の値は小さく、大きな乱れなども見られなかった。この傾向は同配合の他の目標スランブの結果も同様の傾向を示しており、テーパ管のような圧送の際の抵抗となるものが存在しない状態はこのような傾向になると言える。テーパ管の計測結果に関しては、順調（目標スランブ：20.0cm、16.0cm）については計測時間とともに加速度の値が乱れることなく一定であったのに対して、不安定圧送状態（不安定）から閉塞（目標スランブ：7.5cm）となった結果は、加速度の値が計測時間前半である 5 秒周辺から小さな乱れを繰り返しながら最後に計測時間 15 秒周辺から大きな値・乱れを示した（矢印）。また、閉塞（目標スランブ：4.0cm）の結果に関しては、計測時間 20 秒周辺から急激に加速度の値が同配合条件の中で最も高くなる傾向を示した（矢印）。これらの各圧

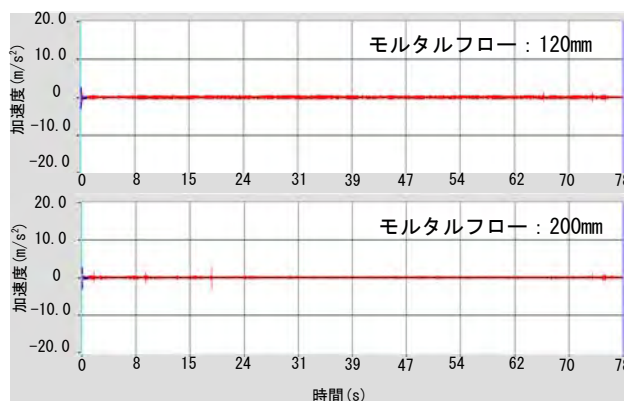


図-5 計測時間と加速度の関係（モルタル）

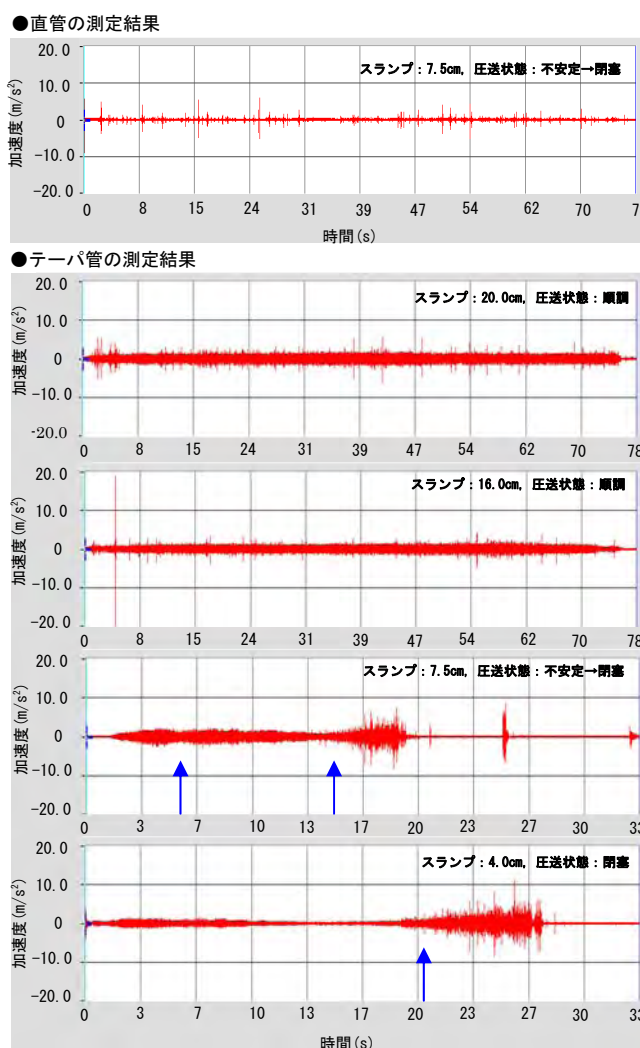


図-6 計測時間と加速度の関係 ($s/a=41\%$)

送状態の傾向は、計測時間や加速度の大きさに違いが見られるが、他の配合条件についても同様の傾向が見られており、テーパ管部で計測した加速度の乱れの大きさから比較的容易に圧送性を確認できることを示せた。

図-7 に $s/a=45\%$ 、スランブ：4.0cm、閉塞の測定点：1～3 の周波数と振幅の関係を示す。図よ

り、測定点:1では周波数3000Hz周辺、測定点:2、3では周波数2000Hz周辺に振幅のピーク値が示された(マル印)。また、測定点:2と3は、周波数4000Hzや6000Hzの周辺でも振幅のピーク値に近い値が示された(マル印)。これは、測定点:2と3はテーパ管部の中でも径が小さくなる箇所であり、骨材同士の衝突や骨材が管壁へ当たる回数が増え、管壁との摩擦が大きくなったためと考えられる。この傾向は順調時にも確認され、加速度の変動が順調時にも大きくなる傾向が見られていたことから、周波数による乱れの少ない測定点:1で計測を行うことが圧送状態を評価するのに有効であると言える。

図-8に各配合(各圧送状態)における振幅のピーク値、図-9に各配合(各圧送状態)における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。図-9の記号は、順調を塗色、不安定を薄い塗色、閉塞を白抜きとした。図より、順調の振幅のピーク値の場合、モルタルに対して約5倍程度大きくなるが、コンクリートだけで比較した場合にはスランプの大きさや細骨材率に関係なく振幅のピーク値は一定であった。今回、本実験で実施した配合条件のVg/Vmの範囲であれば、順調の振幅のピーク値に大きな差が表れないと考えられる。しかし、粗骨材の形状も影響することが考えられるため、今後、これらについても確認をする必要がある。不安定や閉塞の振幅のピーク値の場合、順調に対して不安定は約2倍程度、閉塞は約3倍~5倍程度大きくなる傾向を示した。閉塞の場合は、順調の結果とは異なり、細骨材率が小さくなるにつれて、振幅のピーク値も高くなる傾向を示した。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の関係についても、閉塞はポンプ主油圧の変動係数の値が大きい場合に振幅のピーク値が高くなる右上がりの関係となっており、ポンプ主油圧の変動係数と振幅のピーク値に相関性があることを示した。

4.3 脈動発生させた場合の圧送性の評価<シリーズ2>

図-10に圧送速度30m³/hのスランプ:4.0cm、閉塞の直管とテーパ管の測定点:1~3の結果を示す。圧送速度30m³/hのスランプ:8.5cm、順調のテーパ管の測定点:1で計測した結果の一例を示す。また、同一配合条件の測定点:1で計測した<シリーズ1>の結果も示す。図より、<シリーズ1>の結果に比べて、順調のテーパ管では加速度の値が非常に小さくなり、閉塞のテーパ管では加速度の乱れが大きく、値も大き

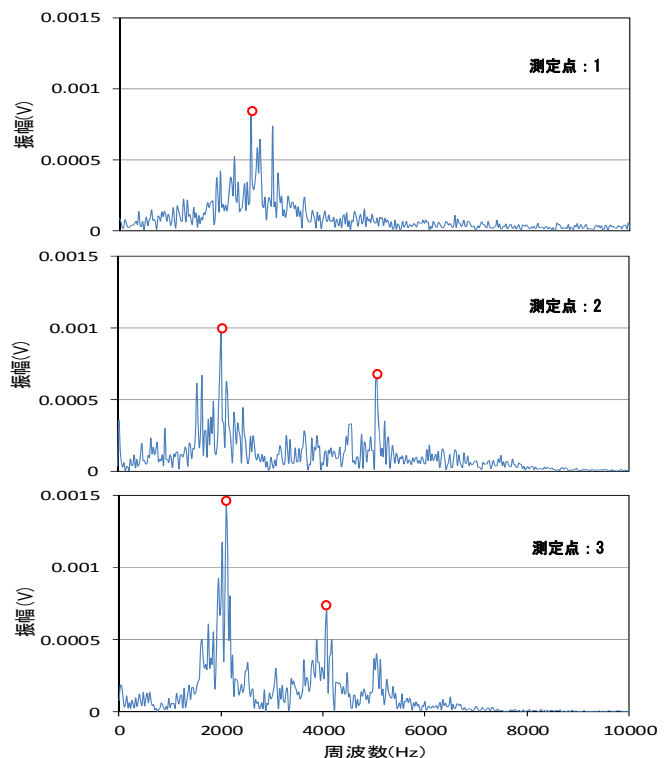


図-7 周波数と振幅の関係(測定点:1~3)

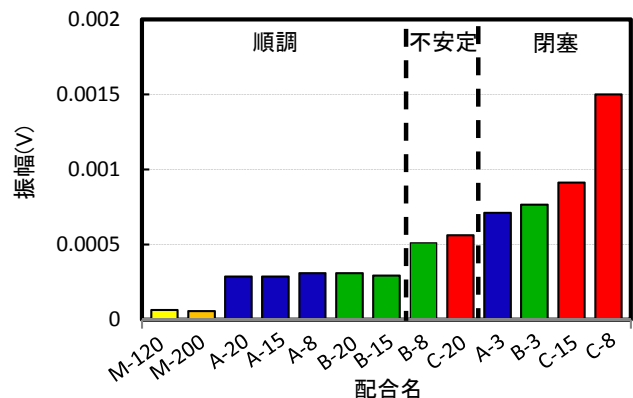


図-8 各配合(各圧送状態)の振幅のピーク値

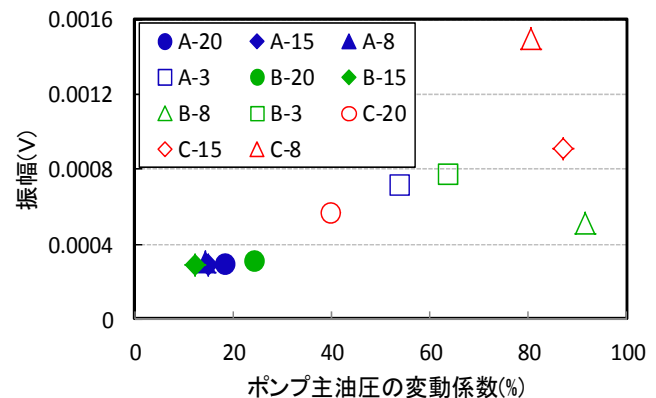
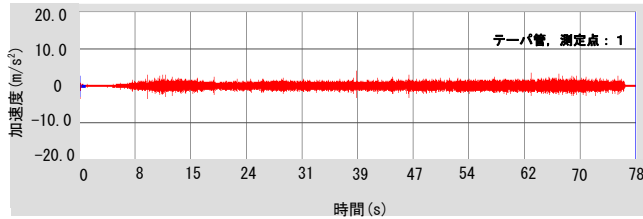
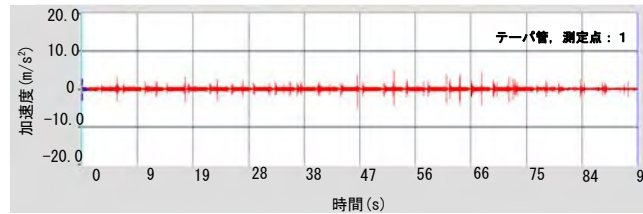


図-9 各配合の振幅のピーク値と変動係数の関係

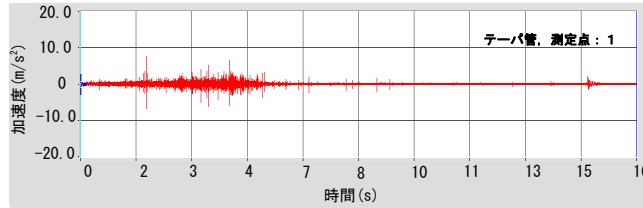
●<シリーズ1>テーパ管の測定結果（スランプ：9.0cm，圧送状態：順調）



●テーパ管の測定結果（スランプ：8.5cm，圧送状態：順調）



●<シリーズ1>テーパ管の測定結果（スランプ：4.0cm，圧送状態：閉塞）



●テーパ管の測定結果（スランプ：4.0cm，圧送状態：閉塞）

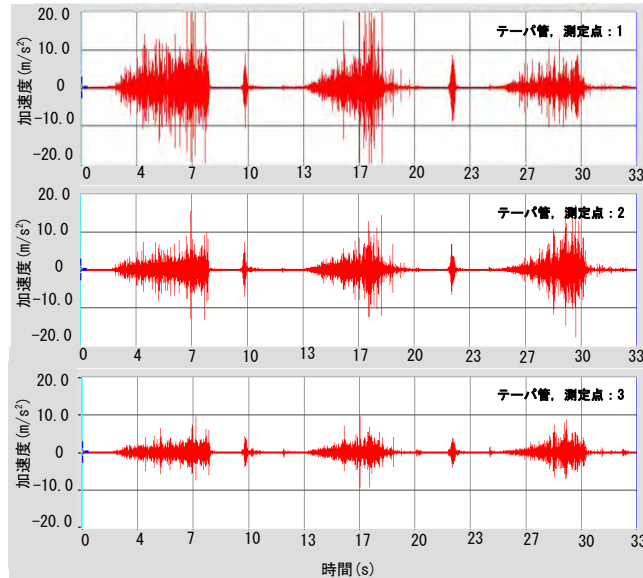


図-10 計測時間と加速度の関係（圧送速度 30m³/h）

くなる傾向を示した。これは、閉塞の場合、骨材のアーチング状態でピストンが後退、再び前進を繰り返す動きにより大きな衝撃となって伝わったと考えられる。以上から、実際の圧送状態を模擬した圧送条件でも、加速度の値の乱れや極端な値の大きさから圧送性を確認することは可能である。しかし、これらの結果は、順調と閉塞のみであり、その他の圧送性についての検討や試験圧送での加速度の値の確認が必要である。

図-11 に圧送速度 30m³/h のスランプ：4.0cm、

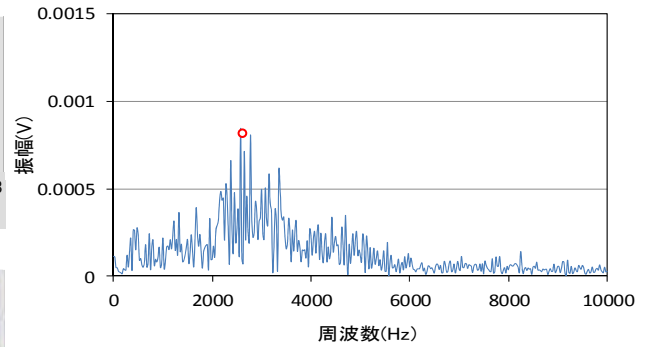


図-11 周波数と振幅の関係（圧送速度 30m³/h）

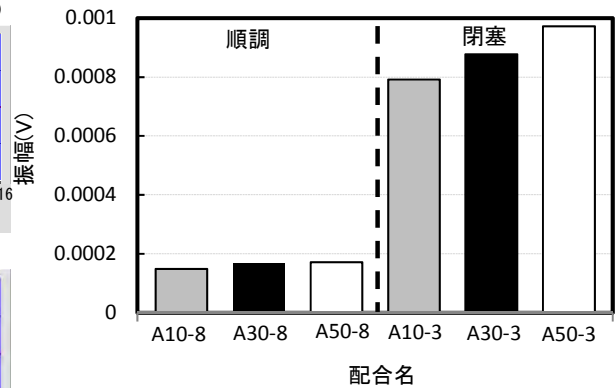


図-12 各圧送条件の振幅のピーク値

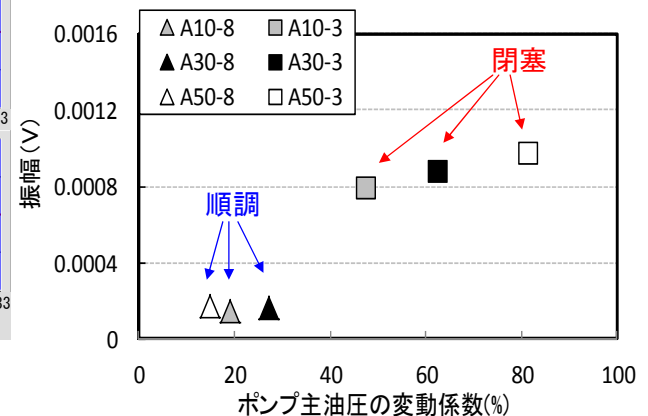


図-13 各圧送条件の振幅のピーク値と変動係数の関係

閉塞の測定点：1の周波数と振幅の関係を示す。図-12 に各圧送条件での振幅のピーク値、図-13 に各圧送条件で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。図より、加速度は乱れが大きく、値も大きくなる傾向を示したが<シリーズ1>と同様に周波数 3000Hz 周辺に振幅のピーク値が示された（マル印）。また、<シリーズ1>の順調に比べ、加速度の結果で示されたように振幅のピ

ーク値も小さくなる傾向を示した。順調では各圧送条件の違いはほとんど見られなかったが、閉塞の場合には圧送速度が速くなると振幅のピーク値が高くなる傾向を示した。また、＜シリーズ1＞と同様に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に相関性があることが確認できた。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) テーパ管の入り口下部付近（測定点：1）で加速度を計測することにより、加速度の値の乱れや大きさから圧送性を正確に評価することが可能である。
- (2) 測定点：1の周波数と振幅の関係から、加速度センサーで計測したコンクリートの圧送に伴う振幅のピーク値は3000Hz周辺に示される。
- (3) 順調と閉塞を比較した場合、閉塞の振幅に細骨材率や圧送条件の違いの影響が表れ、それらは変形性評価試験結果のポンプ主油圧の変動係数と相関性がある。

6. 本報告書の他学会等への投稿

本報告書内容の一部は、公益社団法人土木学会西部支部研究発表会で既に発表済みである。また、公益社団法人日本コンクリート工学会年次大会2012でも発表予定である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：コンクリートポンプ施工技術調査委員会報告書、2007.9
- 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) 土木学会編：コンクリートライブラリー100、コンクリートのポンプ施工指針 [平成12年度版]、2000.2
- 4) 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