

論文 長時間の循環圧送におけるコンクリートの簡易圧送性評価

平川 恭獎*1・橋本 紳一郎*2・南 浩輔*3・中島 良光*4

要旨: 本研究では、振動加速度を用いた簡易な圧送性評価において、実機での試験圧送で繰り返し圧送可能な循環圧送方式により長時間の圧送を行い、配合条件や配管条件に対して初期の圧送状態の評価、長時間の圧送による品質の変動・圧送性の判定、計測位置の影響を検討した。その結果、振動加速度を用いた計測手法は、配合条件による圧送性の違いや圧送の経過時間によるコンクリートの品質変動を、目視観察や管内圧力の結果と同様に十分評価できた。また、ポンプ車から 30m 以内のベント管や特殊な形状を持つ輸送管（検知管）での計測結果を評価指標に用いることにより、圧送性判定に有効であることを確認した。

キーワード: 圧送性, 加速度, 周波数, ベント管, 検知管, 水平管

1.はじめに

近年、コンクリートのポンプ施工は建築・土木分野を問わず多くの施工現場で用いられており、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。また、施工条件の多様化により、これまでの圧送とは異なる特殊な配管条件や圧送条件での圧送、特殊なコンクリートの圧送も多くなってきている。

その一方で、これらの圧送における配管条件や圧送条件など、様々な条件等の影響により、圧送中のトラブルや事故も多く報告されている。しかし、現状では施工現場でコンクリートの圧送性を評価・確認する手法がないため、圧送状態の変化に対応できていない。このことから圧送の条件や圧送の状態に対して施工現場で直接把握できる方法が求められている。

これらに対して、著者らはコンクリートの圧送状態を施工現場で簡易に直接確認する手法として、加速度計での計測による圧送性の評価手法を提案している^{2), 3)}。この計測手法は、これまでの試験圧送の計測結果から加速度の波形や解析後の加速度のピーク値及び周波数の値を用いて圧送性の違いを評価できること、圧送性判定の閾値の設定にまで至っている^{4), 5)}。しかし、今後、本計測手法を実際の施工現場に適応させ、コンクリートを圧送する際の安全性確保につなげるためには、圧送性判定を可能とする計測条件の検討や圧送状態の変動をより正確に評価できることが求められる。

そこで本研究では、振動加速度を用いた簡易な圧送性評価において、実機での試験圧送で繰り返し圧送可能な循環圧送方式により長時間の圧送を行い、長距離や長時間の圧送を想定し、コンクリートの品質変動の把握や測定方法による圧送性の評価を配管条件や配合条件に対し

て検討した。また、それらを計測する位置等も検討した。

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。配合は、3種類の配合で検討した。いずれも目標スランプ: 8.0±1.5cm, 目標空気量: 4.5±1.5%とした。

配管条件は2種類で検討しており、配管条件 A では配合名: No.1 を使用し、配管条件 B では配合名: No.2 と No.3 を使用した。配合名: No.2 に対してセメント量を一定とし, s/a を 5% 小さくした配合を配合名: No.3 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。各配合のコンクリートは、所定の目標スランプと目標空気量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、圧送開始前と圧送終了したコンクリートを筒先から採取してフレッシュ性状試験を実施した。

2.3 配管条件及び圧送方法

図-1, 図-2 に試験圧送の配管図を示す。配管条件 A は、主に配管径を 125mm(以降 5B 管と称す)の輸送管を使用し、90度ベント管を4箇所設置した水平換算距離 51.5m の配管とした。使用した配合は、配合名: No.1 である。配管条件 B は、配管径が 125mm(以降 5B 管と称す)と配管径が 100mm(以降 4B 管と称す)の水平管を使用し、配管の途中にテーパ管(5B 管→4B 管)を設置して、水平換算距離 75.5m の配管とした。使用した配合は、配合名: No.2 と配合名: No.3 を使用した。また、両配管条件には、検知管をポンプ車近傍に設置した(図-1, 図-2 の黒色)。検知管とは 5B 管の水平管 500mm の中心位置の径を小さ

*1 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (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 前田建設工業(株) 技術研究所生産性革新技術研究室 工修 (正会員)

*4 前田建設工業(株) 技術研究所社会基盤マネジメント研究室 博(工) (正会員)

表-1 使用材料

配合	項目	材料	密度 (g/cm ³)
No. 1	水	上水道水	1.00
	セメント	普通ポルトランドセメント	3.16
	細骨材	砕砂(酒田市広岡神田産山砂)	2.59
		海砂(東根市観音寺岩下産砕砂)	2.58
	粗骨材	砕石2005(東根市観音寺岩下産砕石)	2.60
	混和剤	AE減水剤	1.07
No. 2 No. 3	水	上水道水	1.00
	セメント	普通ポルトランドセメント	3.16
	細骨材	砕砂(栃木県栃木市鍋山町産)	2.66
		山砂(千葉県成田市前林産)	2.59
	粗骨材	砕石2005(埼玉県秩父郡横瀬町産)	2.70
		砕石2005(栃木県栃木市鍋山町産)	2.70
混和剤	AE減水剤	1.07	

表-2 配合条件

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)
			W	C	S	G(砕石)			
No. 1	53.0	44.3	166	314	789	998	3.14	8.0±1.5	4.5±1.5
No. 2	55.0	47.4	162	295	617	259	497	3.688	
No. 3	55.0	42.4	162	295	533	231	544	2.950	

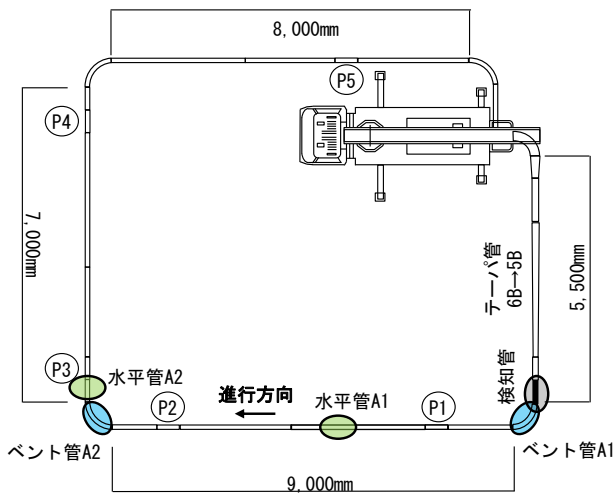


図-1 配管条件 A

くした輸送管(写真-1)で、コンクリートの圧送に軽度な抵抗を与えて圧送の状態を評価するための輸送管である。圧送方式は筒先をポンプ車に直接設置することにより、繰り返し圧送を行うことが可能な循環圧送方式とした。圧送速度は配管条件 A で 30m³/h、配管条件 B で 15m³/h とした。圧送時間については、配管条件 A の配合名:No.1 で 30m³/h を 60 分間圧送し、配管条件 B の配合名:No.2 で 15m³/h を 30 分間、配合名:No.3 で 75 分間圧送した。

2.4 計測方法

図-1、図-2 に振動加速度計の加速度センサーの取付け箇所(青丸)を示す。管内圧力は、配管条件 A で計 5 箇所 (P1 から P5)、配管条件 B で計 6 箇所 (P1 から P6) に圧力計を設置し、管内圧力の測定を行った。

(1) 振動加速度計の測定箇所

配管条件 A では、検知管 1 箇所、90 度ベント管 2 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: A1, A2 と称す)、水平管 2 箇所(ポンプ車から筒先に向かって進行方向順に水平管: A1, A2 と称す)に設置した。配管条件 B では、検知管 1 箇所、90 度ベント管 2 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: B1,

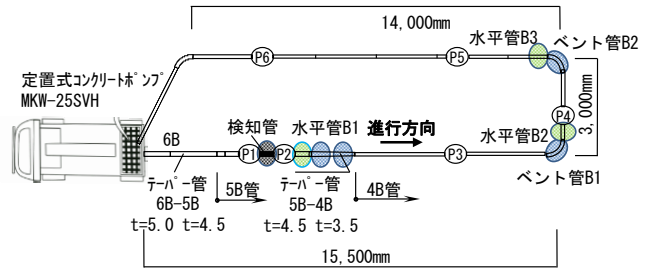


図-2 配管条件 B



写真-1 検知管の取り付け状況

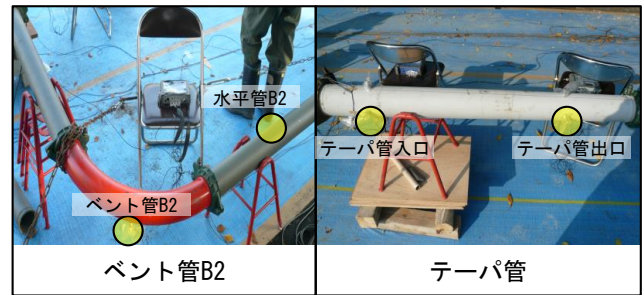


写真-2 加速度センサーの取り付け状況

表-3 フレッシュ性状試験の結果

配合名	SL (cm)		Air (%)	
	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後
No. 1	8.0	1.5	4.6	2.8
No. 2	10.0	1.0	3.9	1.2
No. 3	9.0	0.5	3.8	1.8

B2 と称す)、水平管 3 箇所(ポンプ車から筒先に向かって進行方向順に水平管: B1, B2, B3 と称す)テーパー管 1 箇所(ポンプ車から筒先に向かって進行方向順にテーパー管: B1 と称す)に設置した。

(2) 振動加速度センサーの取り付け位置

検知管での加速度センサーの取り付け位置は、進行方向順に管径が小さくなり始めている箇所(検知管-1)、管径が最も小さい箇所(検知管-2)の計 2 点(以降それぞれの配管条件に対して検知管 A1, A2 及び検知管 B1, B2 と称す)に取り付け計測した。ベント管における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外側に 1 点とした。配管条件 B のテーパー管では、筒先に向かってテーパー管入口に 1 点と出口に 1 点と取り付け計測した。

3.結果及び考察

3.1 配管条件 A の結果及び考察

3.1.1 圧送の経過時間による管内圧力とフレッシュ性状

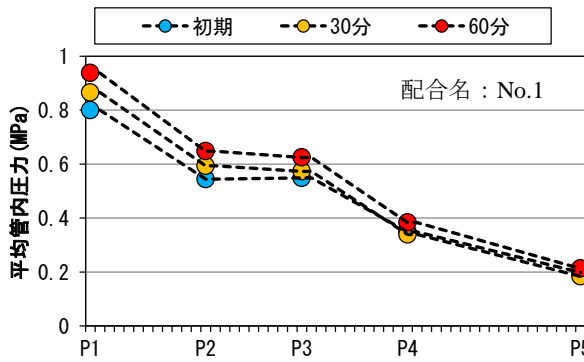


図-3 各圧力計の時間経過による管内圧力と取り付け位置の関係

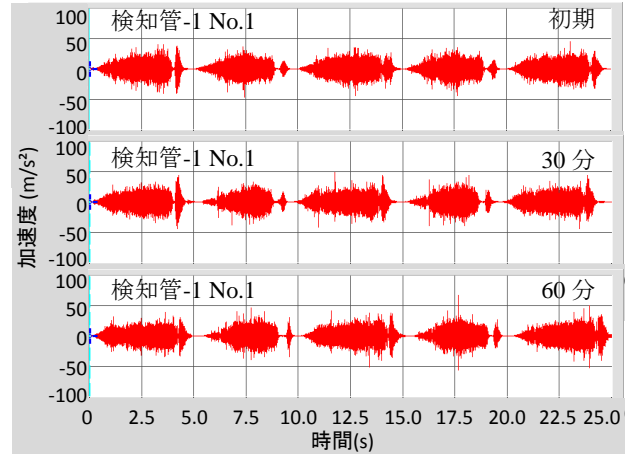


図-5 検知管の時間経過による計測時間と加速度の関係

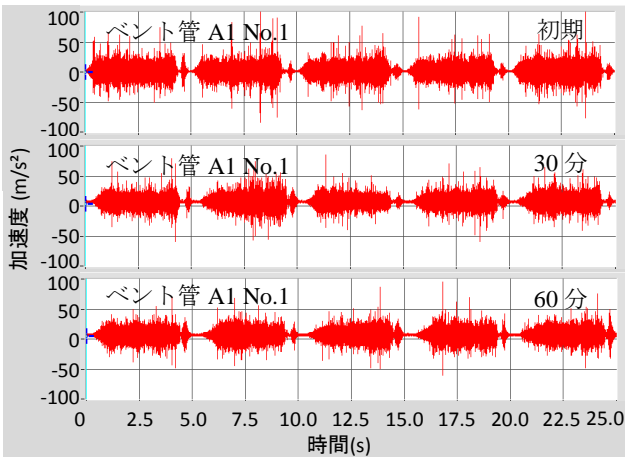


図-4 ベント管 A1 の時間経過による計測時間と加速度の関係

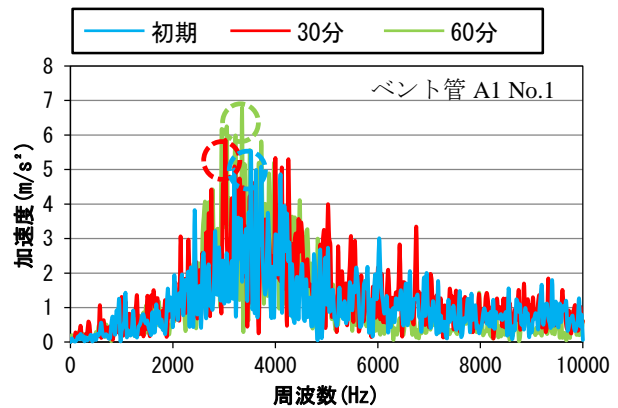


図-6 ベント管 A1 の加速度のピーク値に対する周波数の関係

表-3 に圧送前後のスランプと空気量の関係、図-3 に経過時間と各計測位置での管内圧力の関係を示す。配合名：No.1 では、60 分の圧送が水平換算距離約 2500m に該当し、循環圧送によりスランプ 1.5cm まで低下した。フレッシュ性状試験の目視観察では、スランプが低下したことにより表面に粗々しさを確認されたが形状は保持された状態であった。それらは、ポンプ車筒先で閉塞は起こさなかったが、不規則に排出される状況を確認した。

管内圧力については、筒先に向かって圧力は低くなる傾向を示しており、その傾向は経過時間においても変わらなかった。また、経過時間とともに圧力は高くなり、特にポンプ車付近の計測箇所での傾向は顕著であった。ポンプ主油圧の変動係数についても、60 分の圧送時が 8.0% と非常に高くなり、既往の研究結果⁴⁾からも不安定圧送状態（以降、不安定と称する）に該当し、管内圧力での測定結果が目視やフレッシュ性状の結果と一致していると言える。

3.1.2 圧送の経過時間と加速度での評価

図-4 と図-5 にベント管 A1 と検知管 A1 で圧送の経過時間に対する計測時間と加速度波形の関係を示す。加速度波形は、ベント管 A1 と検知管 A1 で一定の時間間隔で確認できその時間間隔はピストンの稼働時間と同様であった。しかし、循環圧送により加速度波形の形状や大

きさは管内圧力計測結果のような明確な違いは確認できなかった。

本研究の FFT 解析とは、計測結果から得られた加速度波形をフーリエ変換することで周波数、加速度、速度で表す解析方法である。これらを用いて、図-6 にベント管 A1 の FFT 解析を行った加速度と周波数の関係、図-7 にベント管 A1、A2 と水平管 A1、A2 の FFT 解析を行った加速度のピーク値とその周波数の関係を示す。加速度と周波数については、圧送の経過時間に伴って各周波数の加速度の値が大きくなり、また、加速度のピーク値 (○) も高くなる傾向を示した。加速度のピーク値を示す周波数は圧送の経過時間においても同程度であった。加速度のピーク値とその周波数について、ベント管 A1 と A2 の加速度のピーク値は、圧送の経過時間とともに高くなる傾向を示したが、全体的にベント管 A2 はベント管 A1 に比べて低く、また、周波数の値はベント管 A1 に比べてやや小さい値を示した。水平管 A1 と A2 の結果について、水平管 A2 が水平管 A1 に比べて加速度のピーク値と周波数が低くなる傾向はベント管と同様であったが、圧送の経過時間にもなう加速度のピーク値の変化は見られず、また、ベント管に比べて小さな値を示した。ベ

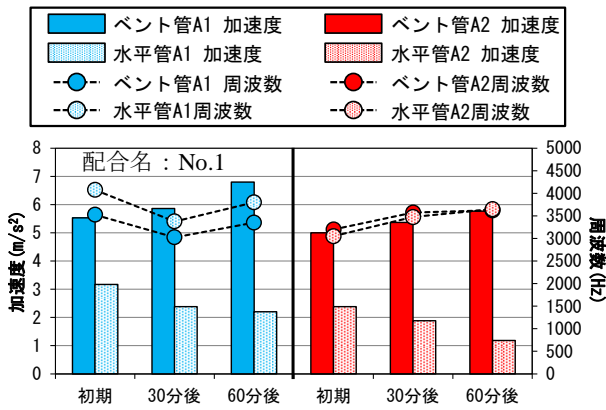


図-7 ベント管 A1 と水平管 A1 の加速度のピーク値に対する周波数の関係

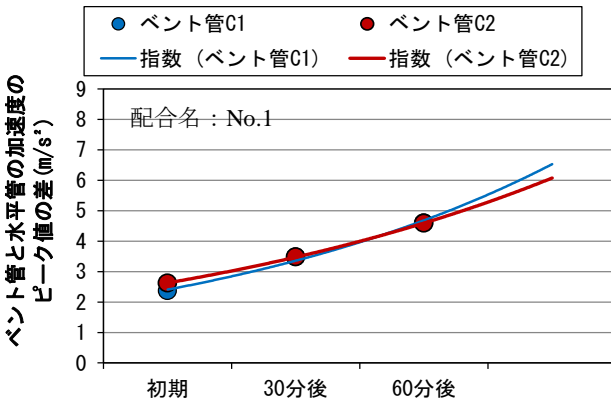


図-8 ベント管と水平管の加速度のピーク値の差による時間経過の評価

ント管と水平管の加速度のピーク値とその周波数については、ポンプ車から筒先に向かって圧力が小さくなる管内圧力の結果と同様に、加速度のピーク値も小さくなり、その周波数も小さくなったと考えられる。また、圧送への抵抗の少ない水平管では、ベント管のように圧送の経過時間に伴うコンクリートの品質変動の影響が表れなかったと考える。以上から、ベント管での圧送の経過時間の計測結果は管内圧力の結果を表していると言える。これらの圧送の経過時間の結果を既往の研究⁹⁾を参考にベント管と水平管の加速度のピーク値の差を算出したのが図-8である。既往の研究では、 3.0m/s^2 以上で不安定や閉塞直前の圧送状態になる閾値として定めている。今回の結果も、初期の値は低いですが、圧送から経過時間30分で 3.0m/s^2 まで上がり、圧送から経過時間45分では 4.0m/s^2 になり、圧送の経過時間に伴うコンクリートの品質変動を明確に示している。また、これまではポンプ車に近い位置のベント管での計測結果により圧送性の判定を行ってきたが、ベント管 A1 と A2 の結果は同様の傾向を示していたことから、ポンプ車から30m程度離れた計測位置での結果も十分に圧送状態を把握できる。

図-9に検知管 A1, A2 と水平管 A1 の加速度のピーク値とその周波数の関係、図-10に検知管 A1, A2 と水平管 A1 の加速度のピーク値の差を圧送の経過時間とともに

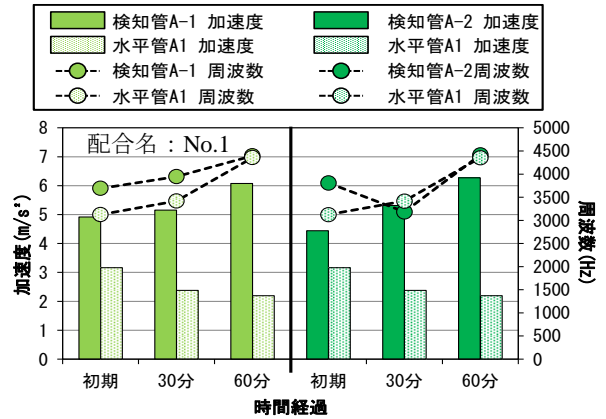


図-9 検知管-A1・A2 と水平管の加速度のピーク値に対する周波数の関係

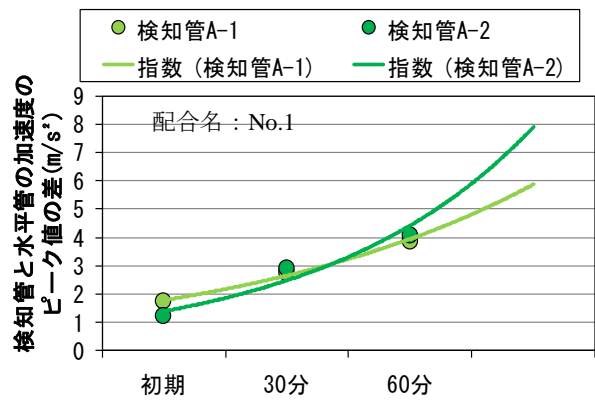


図-10 検知管と水平管の加速度のピーク値の差による時間経過の評価

に算出した結果を示す。検知管の加速度のピーク値の差については、ベント管 A1 に比べて小さくなるが、圧送の経過時間とともに大きくなる傾向は同様であった。また、周波数は、圧送の経過時間に伴って高くなる傾向を示した。検知管 A1 と A2 の計測位置の違いについては見られなかった。そのため、検知管 A1, A2 と水平管 A1 の加速度のピーク値の差については、圧送の経過時間に伴って同様の傾向を示した。検知管での結果は、ベント管での結果と類似しており、圧送の経過時間によるコンクリートの品質変動を検知管でも十分評価できる。

3.2 配管条件 B の結果及び考察

3.2.1 経過時間による管内圧力とフレッシュ性状

表-3に圧送前後のスランプと空気量の関係、図-11に配合名: No.2 と No.3 の経過時間と各計測位置での管内圧力の関係を示す。配合名: No.2 では、30分の圧送が水平換算距離約900mに該当し、循環圧送によりスランプ1.0cmまで低下した。フレッシュ性状試験の目視観察では、表面の粗々しさはなく形状を保持していた状態であった。筒先からのコンクリートの吐出状況は、一定の間隔で順調に排出される状況を確認した。s/aを5%小さくした配合名: No.3では、75分の圧送が水平換算距離約2300mに該当し、圧送前後においても崩れやすい状態であったが、圧送後の方がコンクリート表面の脱水は顕著

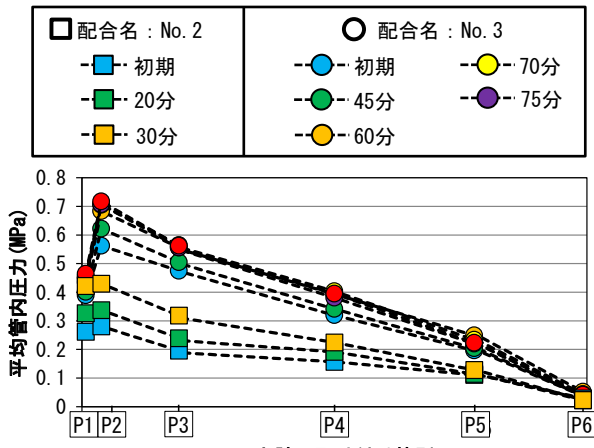


図-11 各圧力計の時間経過による管内圧力と取り付け位置の関係

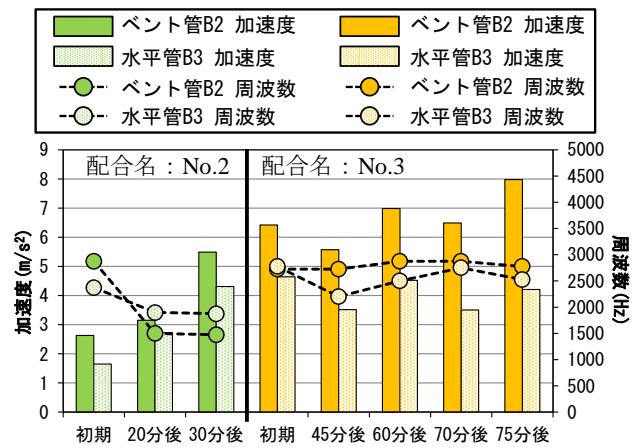


図-13 ベント管 B2 と水平管 B3 の加速度のピーク値に対する周波数の関係

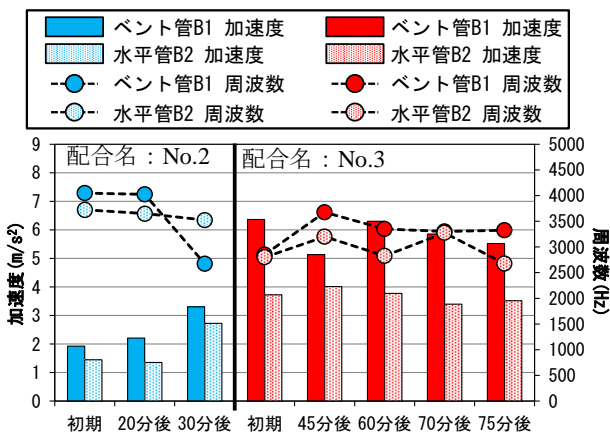


図-12 ベント管 B1 と水平管 B2 の加速度のピーク値に対する周波数の関係

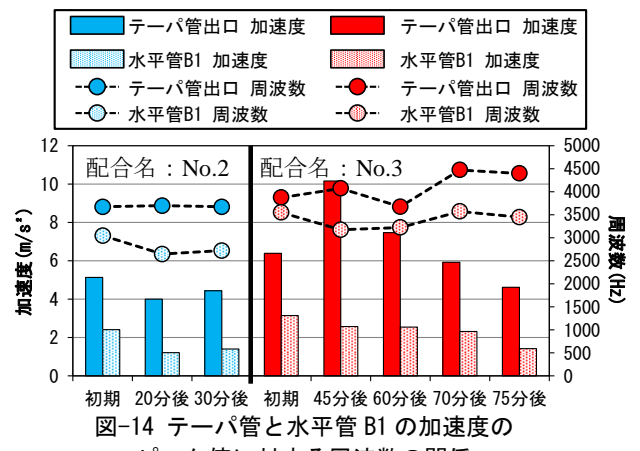


図-14 テーバ管と水平管 B1 の加速度のピーク値に対する周波数の関係

に見られた。また、筒先からのコンクリートの吐出状況は、圧送初期から閉塞は起こさなかったが、不規則に排出される状況を確認した。循環圧送によりスランブ 0.5cm までと低下した。

管内圧力については、筒先に向かって圧力は低くなるが、テーバ管手前の P2 の圧力が P1 より高くなり、その傾向は経過時間においても同様であった。配合別では配合名: No.2 より No.3 が圧送初期から s/a を 5% 減少に伴う材料分離により常に高い値を示し、また、圧送の経過時間とともに圧力は高くなった。ポンプ主油圧の変動係数についても、配合名: No.3 が圧送初期から非常に高くなり、配合名: No.1 での圧送状態と同様に不安定とし、一定で低い値の配合名: No.2 を順調圧送(順調)と判断した。4B 管を配管した配管条件 B での管内圧力での測定結果も目視観察やフレッシュ性状の結果と一致していると言える。

3.2.2 圧送の経過時間と加速度での評価

図-12 から図-15 に配合名: No.2 と No.3 のベント管 B1, B2, テーバ管, 検知管 B2 の FFT 解析を行った加速度のピーク値とその周波数の関係を示す。同時にそれぞれの計測位置に近い水平管 B1, B2, B3 の結果も示す。

図-16 から図-18 に図-12 から図-15 の結果をベント管と水平管の加速度のピーク値の差及びテーバ管と水平管の加速度のピーク値の差で算出した結果を示す。

全ての計測位置において、配合名: No.2 と No.3 では不安定の配合名: No.3 の加速度のピーク値が順調の配合名: No.2 に比べ初期から高い値を示しており、管内圧力の結果や目視観察、フレッシュ性状の結果と同様に s/a を 5% 減少に伴う材料分離の影響が表れた。ベント管 B1 と B2 では、ベント管 B1 よりポンプ車から離れたベント管 B2 の加速度のピーク値が高く、また、ベント管 B2 の加速度のピーク値は圧送の経過時間とともに高くなるのに対して、ベント管 B1 の加速度のピーク値に変化は見られなかった。これは、ベント管 B1 からベント管 B2 に向けて配管が下り勾配になっていたため、その影響により骨材の振動が少なく加速度のピーク値も低くなり、経過時間による変化も見られなかったと考えられる。ベント管と水平管の加速度のピーク値の差においても、この傾向は確認できたことから計測時の配管の条件も今後、考慮していく必要がある。勾配変化のないベント管 B2 では安定して計測できており、配合名: No.2 と No.3 の圧送性の違いを圧送初期から確認でき、加速度のピーク値の差も経過時間とともに高くなっている。圧送から経

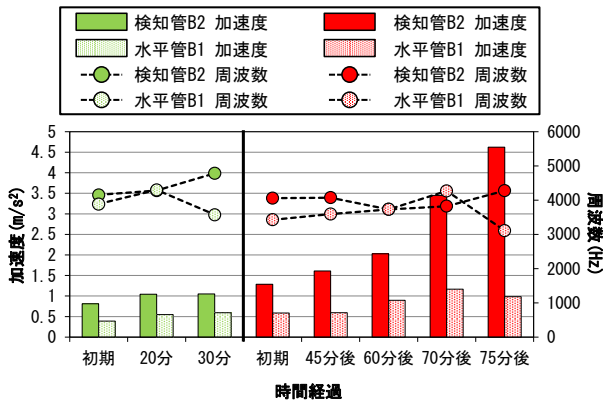


図-15 検知管 B2 と水平管 B1 の加速度のピーク値に対する周波数の関係

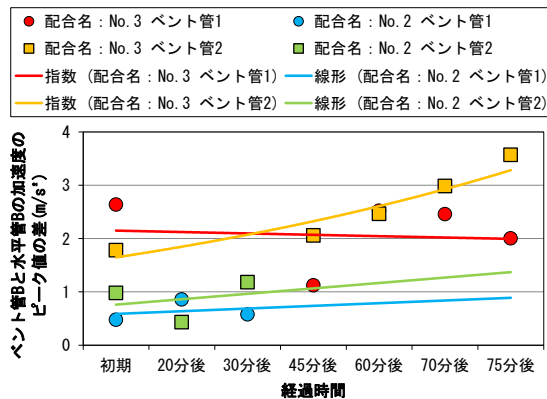


図-16 ベント管 B1 と水平管 B1 の加速度のピーク値の差による時間経過の評価

過時間 70 分で 3.0m/s^2 以上にまで上がっており、圧送の経過時間に伴うコンクリートの品質変動を明確に示している。この傾向は、検知管 B2 でも加速度のピーク値がベント管 B2 より小さいが s/a を 5% 減少に伴う材料分離の影響を同様に示しており、4B 管を使用した配管条件 B においてもベント管と検知管で、配合条件による圧送性の違いや圧送の経過時間によるコンクリートの品質変動を十分評価できる。テーパ管については、他の計測位置に比べて加速度のピーク値が非常に高く、また、圧送の経過時間にもなう加速度のピーク値の変動も多く、正確な評価が難しいと言える。

3.3 計測結果の適用

振動加速度を用いた簡易な圧送性評価は、目視観察や管内圧力の結果と同様に配合条件による圧送性の違いや圧送の経過時間によるコンクリートの品質変動を示しており、今後、これらを簡易に把握する手段として期待できる。また、初期の圧送状態や長時間の圧送、長距離の圧送における品質の変動や性状の把握に有効であり、検知管やベント管で計測した結果を用いた評価指標が変動や閾値を超える場合に、圧送を中断し確認行為を行うなど、閉塞を未然に防止することへつなげることができる。

4. まとめ

(1) 振動加速度を用いた簡易な圧送性評価は、配合条件

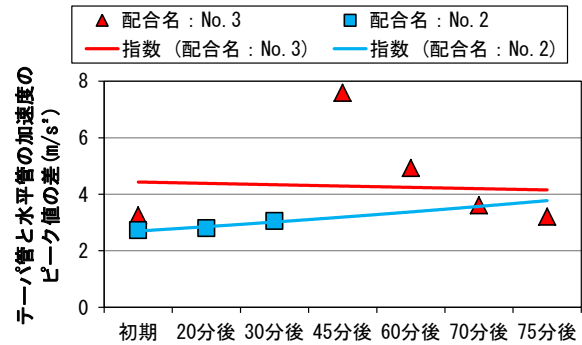


図-17 テーパ管と水平管の加速度のピーク値の差による時間経過の評価

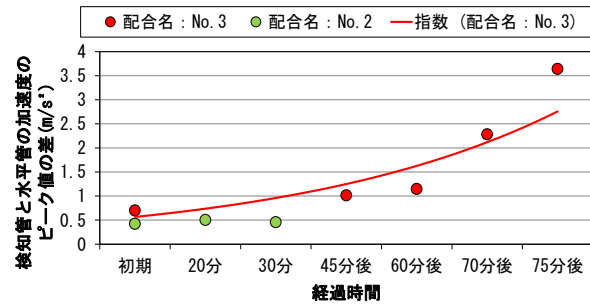


図-18 検知管 B2 と水平管 B1 の加速度のピーク値の差による時間経過の評価

による圧送性の違いや圧送の経過時間によるコンクリートの品質変動を、目視観察や管内圧力の結果と同様に十分評価できる。

(2) ポンプ車から 30m 以内のベント管や検知管での振動加速度計の計測結果は圧送性判定に有効であり、それらの結果を評価指標に用いることにより、初期の圧送状態や圧送の経過時間によるコンクリートの品質変動を十分評価できる。

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) 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
- 3) 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
- 4) 橋本紳一郎，平川恭奨，南浩輔：振動加速度の計測によるコンクリートの圧送性評価～加速度のピーク値と周波数を指標とした圧送性評価～，第70回年次学術講演会，V-215, 2015
- 5) 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