

論文 ブーム圧送におけるコンクリートの圧送性評価手法に関する検討

宮澤 友基*1・三坂 岳広*2・南 浩輔*3・橋本 紳一郎*4

要旨: 既往の研究では、圧送性を施工現場で直接、簡易に評価・確認できる方法として振動加速度計を用いた手法が提案されている。この評価手法は輸送管による圧送を対象としており、ブーム配管を用いた圧送（ブーム圧送）での適用性は検討されていない。そこで本研究ではブーム圧送における簡易圧送性評価手法の確立を目的とし、ポンプ車および筒先近傍でブーム圧送の際の管内圧力と加速度を計測し、配合条件および配管・圧送条件が圧送性に与える影響を検討した。その結果、ブーム圧送においても配管圧送と同様に、配合条件および配管・圧送条件の違いを加速度波形の違いおよび加速度のピーク値で確認できることを示唆した。

キーワード: 圧送性, ブーム圧送, 加速度, 管内圧力, コンクリートポンプ車

1. はじめに

近年のコンクリート施工は、コンクリートポンプ車を用いた打込みが主流となっている。また、高所や長距離、煩雑な敷地等、様々な打設箇所が多く、ブーム式コンクリートポンプ車のブームによる圧送も増加している。一方で、圧送中のトラブルも数多く報告されており、ブームの折損による人身事故も発生している。圧送におけるトラブルは様々な要因が関係し、現状では施工中にコンクリートの圧送性を簡易に評価・確認する方法が無く、熟練技術者でないと閉塞の予兆に気づくことができない。今後、圧送の熟練技術者が減少すると、トラブルや事故の発生件数が増加する可能性がある。

これらに対し、筆者らはコンクリートの圧送状態を施工現場で確認する手法として、配管に振動加速度計を設置し、圧送中の配管内のコンクリートの挙動を評価する簡易な圧送性評価手法を提案している¹⁾²⁾。この手法は、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、加速度センサーを直接配管に取り付けて計測する手法である。さらに特殊な形状を持つ輸送管（検知管）をポンプ車近傍に配管することで、配管経路に依らず様々な配合のコンクリートの圧送性評価が可能となること示唆している³⁾⁴⁾。しかし、上述した圧送性評価手法は輸送管を用いた圧送（以下、配管圧送と記す）を適用対象としており、ブーム付きコンクリートポンプ車におけるブーム配管を用いた圧送（以下、ブーム圧送と記す）については検討されていない。

そこで本論文は、ブーム圧送における振動加速度計を用いた簡易圧送性評価手法の確立を目的とし、まず、一

般的に使用されているコンクリートポンプ車を用いて、検知管を配管し、圧力計および振動加速度計による計測により、配合条件および配管・圧送条件がそれら計測結果に与える影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合条件

表-1、表-2に本研究で使用した使用材料および配合を示す。コンクリートは、JIS 認証を持つレディーミクスドコンクリート工場で用いられる 21-12-20N を標準配合とし、標準配合から単位水量および水セメント比を一定として細骨材率を 5%減じた配合を s/a-5%配合とした 2 種類を用いた。コンクリートのフレッシュ性試験はスランプ試験、タンピング試験、加圧ブリーディング試験を荷卸し時と圧送後に実施した。タンピング試験は「土木学会 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針[2016 年版]」⁵⁾を参考とした。加圧ブリーディング試験は、JSCE-F 502「加圧ブリーディング試験方法(案)」に準拠した。試験は 7 月に実施し、降雨はなく日平均気温は 26℃であった。

2.2 配管条件および圧送方法

図-1 に圧送試験に用いたコンクリートポンプ車（最

表-1 使用材料

項目	記号	材料	密度 (g/cm ³)
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16
水	W	上水道水	1.00
砂	S	陸砂：茨城県潮来市島須産	2.58
		砕砂：栃木県栃木市鍋山町産	2.67
砕石2005	G	つくば市日影沢国有林産	2.67
混和剤	Ad	AE減水剤遅延形（I種）	1.30

*1 前田建設工業(株) I C I 総合センター 工修 (正会員)

*2 前田建設工業(株) I C I 総合センター 博士 (工学) (正会員)

*3 前田建設工業(株) 成長戦略室 工修 (正会員)

*4 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)

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					試験	スランプ (cm)	タンピング試験(cm)		加圧ブリーディング試験 最終脱水量 (ml)	コンクリート 温度(°C)	外気温 (°C)
			W	C	S	G	Ad			32回後	変化量			
標準	61.5	45.8	169	275	863	1012	2.75	荷卸し時	11.0	22.5	11.5	84.9	26.0	23.7
					圧送後	9.0		17.5	8.5	83.9	28.0	25.0		
s/a-5%	40.8	40.8	169	275	743	1105	2.75	荷卸し時	15.0	23.5	8.5	123.7	28.0	27.4
					圧送後	17.0		24.0	7.0	129.5	28.0	26.9		

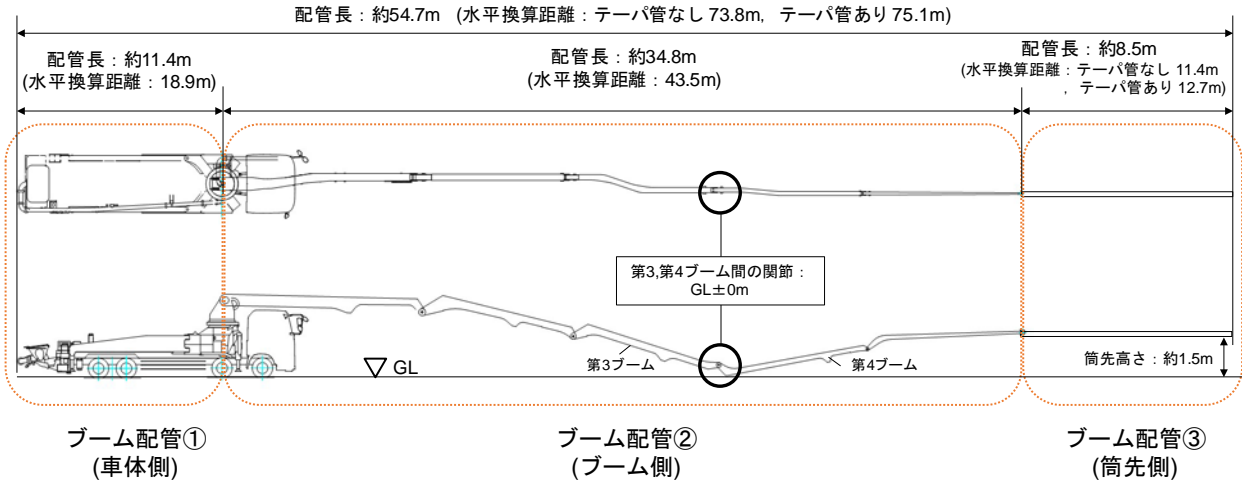


図-1 コンクリートポンプ車

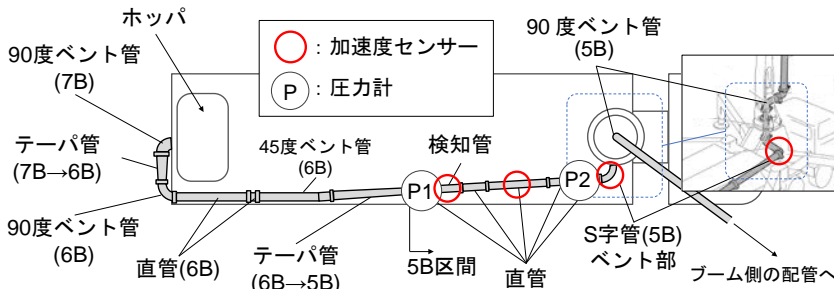


図-2 車体側配管図 (平面, ブーム配管①)



写真-1 車体側配管

大理論吐出量：165m³/h，最大吐出圧力：8.5MPa，ブーム形状：全油圧5段屈折式，最大ブーム長さ：34.8m)を示す。ブームの姿勢は，水平状態から第3および第4ブーム間の関節を地面に接地し，配管内のコンクリートが筒先まで満たされるように筒先高さを1.5mで固定した。ブーム側の配管は実配管長で約34.8mであり，直管，ベント管およびテーパ管を用いている。

図-2および写真-1にブーム配管①の配管図を示す。輸送管の表記は，輸送管の内径175mmを7B，150mmを6B，125mmを5B，100mmを4Bとする。ブーム配管①の管径は，コンクリートホップの吐出口(7B)から順に，90度ベント管(7B)，テーパ管(7B→6B)，90度ベント管(6B)，直管(6B)，45度ベント管(6B)，テーパ管(6B→5B)で5Bまで小さくなる。その後，管径5Bの直管(途中，検知管を含む)，S字管，直管，90度ベント管の順に接続し，ブーム配管②に至る。ブーム配管②は，水平換算距離43.5mを管径5Bの直管およびベント管を組み合わせて

て配管した。図-3にブーム配管③の配管図を示す。筒先は管径5Bのまま吐出するテーパ管なしおよび5B→4Bのテーパ管を用いて管径4Bで吐出するテーパ管ありの2種類とした。また，2種類の配管長は等しくした。

本実験での圧送条件と配合の組合せを表-3に示す。本実験で行った実験水準は，9種類となる。圧送速度は，理論吐出量で20，30，40m³/hの3水準とした。吐出量の設定は，コンクリートポンプ車の理論吐出能力を考慮したうえで，コンクリートポンプの圧送が安定して行える範囲で選定した。また，既往の研究におけるモルタルの配管圧送との比較用に，標準配合から粗骨材を抜いたモルタル(以下，モルタルと記す)についても圧送および計測を実施した。

2.3 計測方法

計測は，圧力計および加速度センサーを用いた。

図-2および図-3に圧力計の取り付け位置を示す。圧力計の設置には，圧力計測用の配管を用いた。圧力計

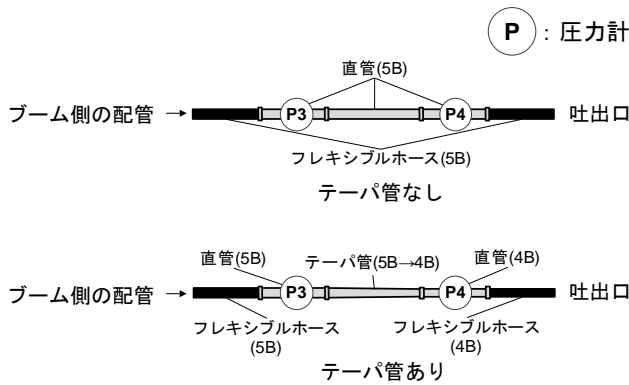


図-3 筒先側配管図 (ブーム配管③)



写真-2 配管への加速度センサー設置状況

の取り付け位置は、ポンプ車ホッパから筒先に向かってブーム配管①の 10.4m(P1), 13.6m(P2), ブーム配管③の 68.8m(P3), 70.5m(P4) (テーパ管なし) もしくは 71.6m(P4) (テーパ管あり) の 4 箇所とした。

図-2 に加速度センサーの取り付け位置を、写真-2 に配管への加速度センサーの取り付け状況を示す。加速度センサーは配管外周面に磁石を用いて直接取り付けた。加速度センサーの取り付け位置は、既往の研究^{3),4)}を参考とし、ポンプ車ホッパからの水平換算距離で、10.8m (検知管), 12.2m (直管) 14.0m (S 字管ベント部) の 3 箇所とした。また、検知管への取り付け位置は上流側である絞り区間前の部分とした。既往の研究^{3),4)}において振動加速度による圧送性評価は、変更管 (検知管, ベント管) とその先の直管で計測した加速度の差を用いていることから、ブームによる圧送でも同様に圧送性評価を行うことができる計測位置を検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状試験結果

表-2 にフレッシュ性状試験結果を示す。荷卸し時のコンクリートについては、タンピング試験結果の変化量 (タンピング 32 回時のスランプと初期スランプの差) が標準配合で 11.5cm, s/a-5% 配合で 8.5cm となり, s/a-5% 配合は標準配合に比べて変化量が小さく, また, タンピング試験後のコンクリート表面にひび割れや崩れが確認された。加圧ブリーディング試験結果についても, s/a-5%

表-3 圧送条件と組合せ

名称	条件		
	圧送速度 (m ³ /h)	筒先のテーパ管	配合名
20-無-標準	20	なし	標準
30-無-標準	30		
40-無-標準	40		
20-有-標準	20	あり	
30-有-標準	30		
40-有-標準	40		
20-有-s/a-5%	20		s/a-5%
30-有-s/a-5%	30		
40-有-s/a-5%	40		

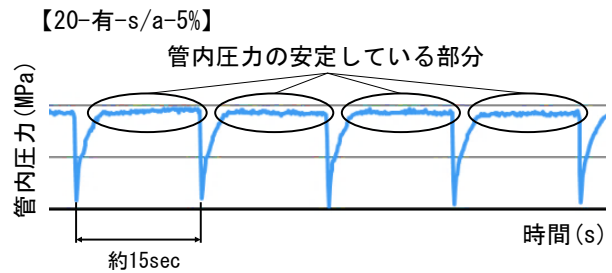


図-4 平均管内圧力の算出方法

配合の最終脱水量が多いことから、標準配合に比べて分離した配合と言える。しかし、圧送後のコンクリートについては、標準配合と s/a-5% 配合でタンピング試験結果の変化量も同程度 (標準配合で 8.5cm, s/a-5% 配合で 7.0cm) であり、荷卸し時からフレッシュ性状試験結果に急激な変化は見られなかったことから、圧送による過度な加圧脱水や材料分離などは生じていないと考えられる。

圧送状態については、筒先から排出されるコンクリートの性状を目視により複数人で確認した。各配合・圧送条件において、コンクリートの圧送状態は筒先から途切れることなく連続して排出されており、既往の研究^{1),2)}の順調圧送であった。以上より、荷卸し時のフレッシュ性状試験結果で s/a-5% 配合は標準配合と比較して分離した配合であったが、圧送前後でコンクリートのフレッシュ性状に急激な変化は見られず、圧送状態も順調圧送であったことから、本実験における配合条件が閉塞や不安定な圧送 (筒先から不連続にコンクリートが排出される状態) など圧送状態が急激に変化するような影響要因ではなかったと考えられる。

3.2 管内圧力の測定結果

図-4 に管内圧力の測定結果の一例を示す。管内圧力の計測は 0.1 秒間隔で行った。管内圧力は P1 から P4 の全ての計測点で既往の配管圧送の研究の結果^{1),2)}と同様にコンクリートポンプ車のピストンの切り替わり時に低下と上昇を繰り返した。管内圧力の測定結果の整理は、配管圧送の研究の結果^{1),2)}と同様に比較的定している部

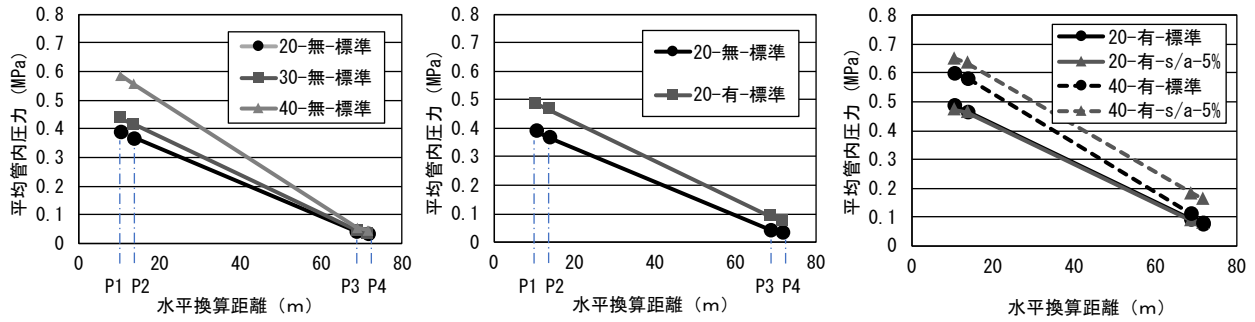


図-5 平均管内圧力と水平換算距離の関係
(左：圧送速度の比較，中：テーパ管の有無の比較，右：配合の比較)

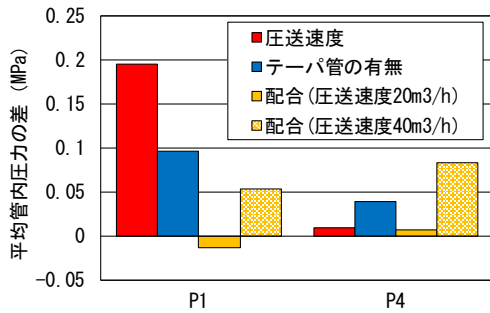


図-6 圧送条件における平均管内圧力の差

分からデータを採取し、平均管内圧力を算出した。

図-5に平均管内圧力と水平換算距離の関係を示す。圧送速度の比較より、ブーム配管①の計測点 P1 および P2 において、圧送速度が速いほど平均管内圧力も大きくなった。一方、ブーム配管③の計測点 P3 および P4 において、全体的に平均管内圧力は小さく、圧送速度による差異は認められなかった。このことから、ブーム圧送において、管内圧力への圧送速度の影響は筒先近傍では小さく、コンクリートポンプ車側で大きくなると考えられる。

テーパ管の有無による比較より、いずれの計測点においてもテーパ管ありは、テーパ管なしに比べて平均管内圧力が大きくなった。また、圧送速度の比較と異なり、計測点に依らず平均管内圧力の差が表れる結果となった。このことからブーム圧送において、筒先近傍にテーパ管を配管する配管計画は配管全体の管内圧力の大きさに影響を及ぼすと考えられる。

標準および s/a-5%配合の比較より、圧送速度 20m³/h の場合、平均管内圧力は標準と s/a-5%で同程度であり、各計測点で違いは見られなかったが、圧送速度 40m³/h の場合、各計測点において s/a-5%配合を圧送した際の平均管内圧力が大きくなった。このことから、圧送速度が速いほどコンクリートの配合条件の影響が圧送性に表れやすいと考えられる。

図-6に計測点 P1 および P4 の各圧送条件における平均管内圧力の差を示す。図中の凡例について、「圧送速度」は 40m³/h と 20m³/h の差、「テーパ管の有無」は筒先近傍

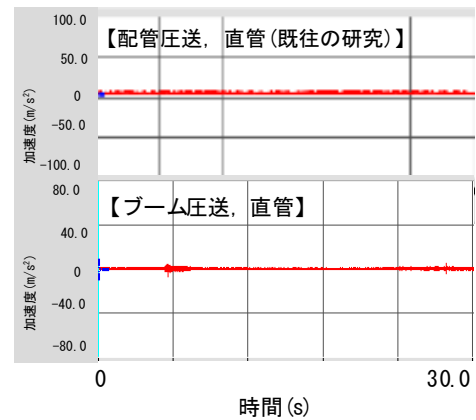


図-7 振動加速度波形(配管圧送とブーム圧送)

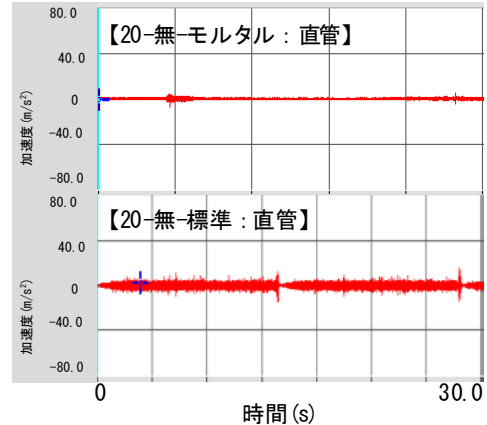


図-8 振動加速度波形(モルタルとコンクリート)

のテーパ管の有無の差、「配合(圧送速度 20m³/h, 圧送速度 40m³/h)」は標準および s/a-5%配合の差として平均管内圧力の差分を示している。計測点 P1 において、「圧送速度」が平均管内圧力の差に最も影響し、「配合」の影響が小さい結果となった。一方、計測点 P4 において、「配合」が最も大きく影響し、「圧送速度」の影響は小さい結果となった。「テーパ管の有無」については、圧送速度ほど顕著ではないが、計測点 P4 と比較して P1 の位置で平均管内圧力に与える影響が大きい結果となった。

3.3 振動加速度の計測結果

図-7に配管圧送とブーム圧送における直管でのモル

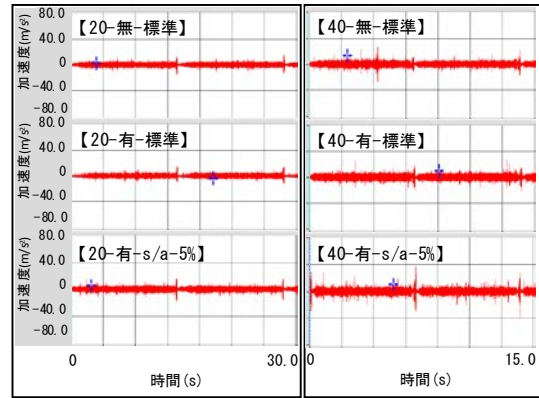
タル圧送時の加速度波形を示す。配管圧送における加速度波形は、既往の研究¹⁾の計測結果を用いた。モルタルの圧送において、配管圧送とブーム圧送に大きな差は確認されなかった。ブーム圧送の場合、ポンプ車に配管が直接固定されているため、ピストンの切替わりや車体自体の振動が計測結果に影響を及ぼし、計測が困難となることも考えられたが、それらの影響は見られなかった。これは、コンクリート中の粗骨材が粗骨材粒子群同士あるいは管壁と衝突を繰り返して生じる微細な振動は、その他の要因で生じる振動周波数とは異なるためと考えられる。

図-8にモルタルおよびコンクリートの加速度波形を示す。標準配合におけるコンクリートの加速度波形において、圧送による粗骨材の振動が波形として表れており、モルタルの加速度波形と比較してもその形状の違いが確認できた。以上から、ブーム圧送においても振動加速度計を用いてコンクリートの圧送性を加速度で計測することが可能であることを確認した。

図-9に各圧送条件と各計測箇所の加速度波形を示す。直管で計測した加速度波形は、既往の研究結果¹⁾と同様に圧送および配合条件の違い・影響を加速度波形の乱れや大きさの違いによって確認することはできなかった。検知管で計測した加速度波形は、直管の加速度波形と比較して、圧送速度の違いやテーパ管の有無が加速度の乱れや大きさとして表れた。また、その傾向は検知管およびS字管ベント部において特に圧送速度の違いで見られるが、同一圧送速度における配合条件の違いまでは見られなかった。これらの傾向は、「3.2 管内圧力の測定結果」で示した傾向と整合性が認められ、既往の研究³⁾とも同様の傾向が得られた。

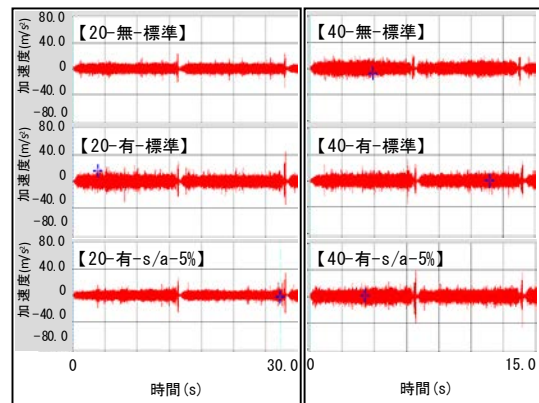
図-10は計測した加速度を既往の研究¹⁾と同様にFFT解析し、加速度のピーク値で示したものである。S字管ベント部、検知管、直管の加速度のピーク値およびS字管ベント部と直管の差、検知管と直管の差も示す。S字管ベント部および検知管の加速度のピーク値は全ての結果で直管の加速度のピーク値より大きくなった。加速度のピーク値の差において、S字管ベント部と直管のピーク値の差は、圧送速度が大きくなったのにも関わらず、圧送条件：テーパ管なし、標準配合の場合のみ減少し、s/a-5%配合を用いた圧送において差は若干増加しているがほぼ横ばいという結果となり、明確な傾向が見られなかった。しかし、検知管と直管のピーク値の差は、圧送速度が大きくなると、その他の圧送条件に係わらず増加した。この傾向については、圧送速度の増加が圧送負荷を大きくしていると捉えると、既往の研究⁴⁾において示されている配管圧送と同様であることを示している。

以上の結果より、ブーム圧送において計測した平均管内圧力と振動加速度の傾向が同様であることを、モルタル



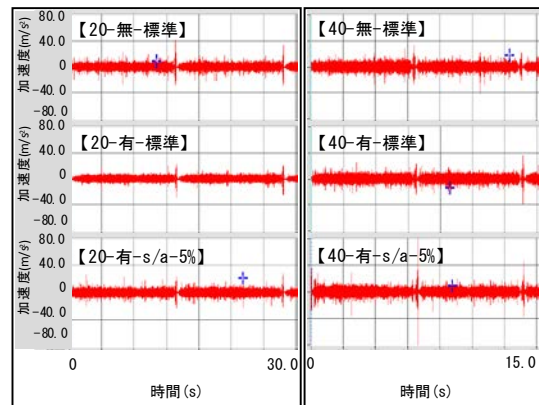
a) 直管(5B)

(左:圧送速度 20m³/h, 右:圧送速度 40m³/h)



b) S字管ベント部(5B)

(左:圧送速度 20m³/h, 右:圧送速度 40m³/h)



c) 検知管

(左:圧送速度 20m³/h, 右:圧送速度 40m³/h)

図-9 加速度波形

およびコンクリート圧送時の振動加速度波形の比較により骨材に起因する振動加速度が得られたこと、直管および検知管の振動加速度波形および加速度ピーク値の傾向が既往の研究と同様であることを示すことができた。したがって、簡易圧送性評価手法のブーム圧送への適用を目指すうえで、ブーム配管①に示す箇所に加速度センサーと検知管を設置することで、配合条件および配管・圧送条件が与える影響を把握できる可能性があることを確認した。

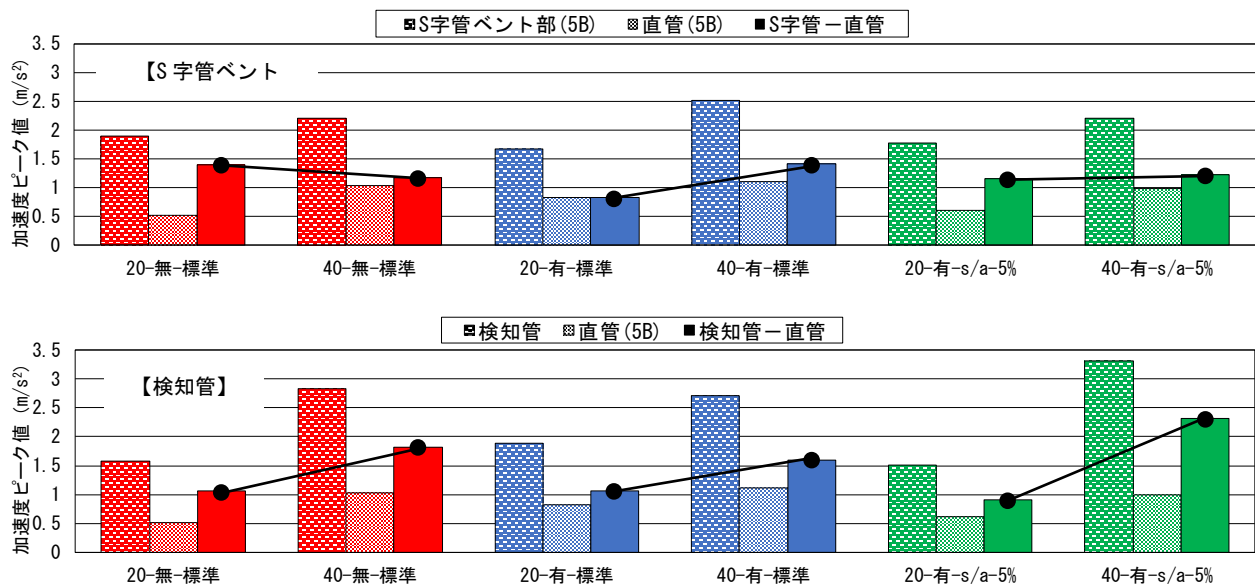


図-10 加速度ピーク値およびピーク値の差

4. まとめ

本研究では、ブーム圧送における振動加速度計を用いた簡易圧送性評価手法の確立を目的とし、圧力計および振動加速度計により計測した結果について検討した。以下、得られた結果を示す。

- (1) ブーム圧送の際の管内圧力をポンプ車及び筒先近傍で計測することにより、本実験の配合・圧送条件が管内圧力に与える影響を捉えることができる。
- (2) ブーム圧送の際のポンプ車側での加速度の計測は、ポンプ車に配管が直接固定されていることの影響や車体自体の振動の影響を受けることなく、加速度の計測を行うことができる。
- (3) S字管ベント部および検知管で計測した加速度波形の乱れや大きさから、圧送条件の違いを確認することができる。
- (4) 検知管と直管の加速度ピーク値およびその差を用いることにより、既往の研究と同様に、配合条件および配管・圧送条件の違いを定量的に示すことができる。

本実験結果から、今後も継続した計測結果の蓄積を行うことにより、ブーム圧送においても検知管および直管で計測した加速度の値を用いた圧送性評価手法が確立できる可能性を示唆した。

謝辞：

本研究は、千葉工業大学の島田氏、山田氏、極東開発工業(株)、つくばコンクリートサービス(株)に多大なご協力を頂き実施致しました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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評価手法における配管条件およ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
- 3) 太田健司, 南浩輔, 橋本紳一郎, 北野潤一: コンクリートの簡易圧送性評価の適用性向上に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1395-1400, 2016
- 4) 南浩輔, 太田健司, 橋本紳一郎, 吉田兼治: 検知管を用いたコンクリートの簡易圧送性評価手法の精度向上に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1201-1206, 2017
- 5) 土木学会: コンクリートライブラリー145, 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針 [2016年版], 2016.8