振動加速度を用いたコンクリートの圧送性評価指標と配合および圧送条件との関係

宮　澤　友　基*1　　南　　浩　輔*1
今　井　嵩　弓*2　　梶　田　秀　幸*1
橋　本　紳一郎*3

要　　旨

本報告では，配管表面で計測した振動加速度を用いた簡易圧送性評価について，これまでの実大実験データを整理し，配合の諸条件および圧送速度が評価指標に及ぼす影響を検討した．評価指標には，振動加速度の周波数分析により得られる振幅スペクトルのピーク値を用いた．重回帰分析の結果，0.3mm以下の細骨材を含むペースト量が評価指標と有意な関係を有する配合条件として抽出された．また，0.3mmを超える骨材量についても評価指標との明確な相関が確認された．さらに，圧送速度の増加に伴い評価指標は増加したが，ペースト量と評価指標との関係は各圧送速度において概ね共通して認められた．以上より，本手法による評価指標は，配合条件および圧送速度の違いに起因する圧送性の変化を把握できる可能性を有することが確認された．

キーワード　土木材料・施工／建築材料・施工／圧送性／コンクリートポンプ／閉塞／加速度

目　　次

1．はじめに
2．簡易圧送性評価手法の概要
3．実験データの概要
4．分析方法および評価指標の選定
5．圧送性に影響を及ぼす配合条件
6．圧送速度が圧送性評価指標に及ぼす影響
7．本手法の実適用に向けて
8．まとめ

EFFECTS OF CONCRETE MIX PROPORTIONING AND PUMPING CONDITIONS ON VIBRATION-ACCELERATION-BASED PUMPABILITY EVALUATION INDEX OF CONCRETE

Yuki　MIYAZAWA　　**Kosuke　MINAMI**
Takayumi　IMAI　　**Hideyuki　KAJITA**
Shinichiro　HASHIMOTO

Synopsis:

Previously obtained full-scale pumping test data were analyzed to investigate the effects of mix proportioning and pumping conditions on a concrete pumpability evaluation method using vibration acceleration measured on pipe surfaces. The evaluation index was defined as the peak value of the amplitude spectrum obtained by FFT analysis. Multiple regression analysis identified the volume of paste containing fine particles smaller than 0.3 mm as the mix parameter significantly associated with the evaluation index. A clear relationship was also observed with the amount of aggregate larger than 0.3 mm. Although the evaluation index increased with pumping rate, the relationship between paste volume and the evaluation index remained generally consistent. These results indicate that the proposed index can capture changes in concrete pumpability caused by variations in mix proportioning and pumping conditions.

＊1本店　ICI テクノロジーセンター 建設材料グループ　　＊2本店　ICI テクノロジーセンター 施工革新グループ
＊3千葉工業大学　創造工学部 都市環境工学科

1. はじめに

現在，建設工事におけるコンクリートポンプ工法は，高所や広範囲へのコンクリート打込みを効率的に行うことができる施工方法として広く用いられている[1]．一方で，圧送のトラブルが発生すると施工工程に大きな影響を及ぼすことになる．太田ら[2]による圧送のアンケート調査では，圧送のトラブルは圧送中の配管閉塞が 2／3 を占めていることが報告されている．配管閉塞が発生した場合には，圧送作業の中断に加え，輸送管の解体や閉塞部の除去作業が必要となるため，工程や品質に大きな影響を及ぼすだけでなく，作業員の安全確保の観点からも課題となる．このため，閉塞の発生を未然に防止すること（以下，閉塞回避と記す）は，安全性および生産性の両面から求められる重要な技術である．特に近年は，高強度コンクリートや流動性の高いコンクリートなど，多様なコンクリートの配合の利用が進んでいる．また，長距離圧送やブーム圧送など施工条件も多様化しており，圧送条件はより複雑になっている．このため，閉塞回避には，施工前に輸送管の種類，配管条件，圧送速度およびコンクリート配合などの条件を適切に把握するとともに，施工中の圧送状態を定量的に評価し，異常の兆候を早期に検知することが重要となる．

コンクリートの圧送を評価する指標として，管内圧力を測定する方法が用いられることがあるが，これらの方法は専用の計測機器や特殊な輸送管を必要とし，実施工への適用には制約がある．また，管内圧力は閉塞直前に急激な変化として現れることが多く，閉塞の予兆を早期に把握する指標としては必ずしも十分ではない．

そこで著者らは，輸送管表面に設置した加速度計により取得した振動加速度を利用し，配管内のコンクリートの骨材同士あるいは管壁との衝突などの挙動から圧送性を評価し，閉塞回避に活用するための手法（以下，本手法と記す）を提案している[3)~11)]．さらに，本手法に特殊形状を有する輸送管（以下，検知管と記す）を組み合わせることで，ブーム圧送や多様な配管条件に対し，加速度計の設置個所が同一条件下で，圧送性の評価が可能であることを示している[7)~11)]．また，本手法により，セメント量や細骨材率を変動させた配合の違いや圧送速度の増減に伴う圧送性の変化を定量的に把握できることを示している[8),10)]．しかし，これまでの研究では，配合条件や圧送条件が圧送性に及ぼす影響については，個別の実大圧送実験シリーズ（以下，実験シリーズと記す）ごとの検討が中心であり，複数の実験シリーズから得られたデータを横断的に整理した評価は十分に行われていない．

そこで本研究では，実験シリーズで取得した振動加速度データを横断的に整理し，配合条件および圧送条件が振動応答に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした．本報告では，配合条件と評価指標との関係を分析するとともに，圧送速度の影響について検討した結果を述べる．はじめに，検知管および直管における振動加速度の関係を比較し，分析に用いる評価指標を選定した．次に，水セメント比や細骨材率などの配合の諸条件により統一的に整理し，重回帰分析を行い，圧送性に影響を及ぼす主要な要因について検討した．さらに，圧送速度を変化させた場合における評価指標への影響を確認し，配合条件との関係を整理した．以上の結果を踏まえ，本手法の実適用に向けた考察を行った．

2. 簡易圧送性評価手法の概要

2.1 振動加速度を用いた圧送性評価

順調圧送時と閉塞直前のピストン式コンクリートポンプの加速度波形の例を**図-1** に示す．図の上段が順調圧送時，下段は不安定圧送から閉塞に至る圧送時の波形を示している．圧送速度はいずれも約 30m³/h であり，計測位置はベント管である．**図-1** より，3 回のピストン稼働に対応する波形が認められ，加速度が現れていない区間はピストンの切り替わりまたはアイドリングなどのコンクリートが圧送されていない状態を示している．順調圧送時と閉塞直前では，図中の破線で囲った部分に示すように，加速度の立上がりや振幅などの波形形状に違いが認められる．このことから，輸送管表面で計測される加速度波形には，配管内を流動するコンクリートの状態が反映されており，波形形状の違いから圧送性を判別できる可能性がある．このように，波形形状を用いた圧送性の評価方法として，画像解析等により波形の特徴を抽出し，圧送状態を判別する方法が考えられる．しかし，この方法を実施工へ適用するには，教師データとなる多数の加速度波形を蓄積するとともに，配合条件，圧送速度，配管条件およびポンプの運転条件などによる波形の違いを個別に整理する必要がある．また，時間領域の加速度波形には局所的な変動やノイズが含まれるため，波形形状を直接用いた評価には多くの課題が残る．

そこで本手法では，加速度波形に高速フーリエ変換（FFT）を適用し，時間領域の信号を周波数領域へ変換した振幅スペクトルを用いて評価することを提案している．振幅スペクトルとして整理することで，時間領域におけ

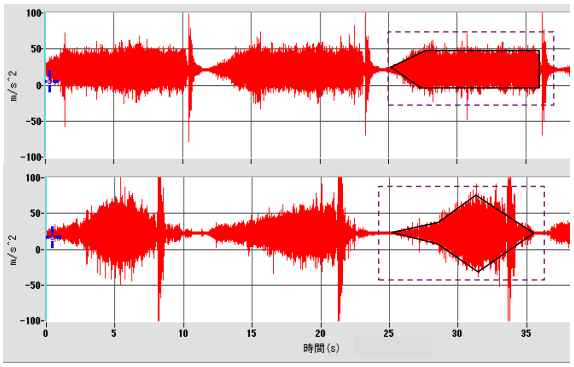


図-1 加速度波形の例
（上段：30m³/h 順調，下段：30m³/h 閉塞）

る局所的な変動の影響を低減しながら圧送状態の違いを定量的に比較できる．本報告では，FFT 解析によって得られた振幅スペクトルのピーク値を最大応答加速度 A_f と定義し，以降の検討に用いる．

2.2 ベント管および直管における振動応答

前節では，振動加速度から最大応答加速度 A_f を求める方法について示した．一方，最大応答加速度は加速度計を設置する配管の形状によって異なる値を示すことがわかっており，著者らは，ベント管やテーパ管などの圧送時に局所的な負荷が生じやすい配管（以下，圧送ストレス部と記す）と，負荷が小さい直管（以下，直管部と記す）との振動応答の違いに着目している [3),4),5)]．本手法は，圧送ストレス部および直管部で計測した振動加速度を用いて，コンクリートの圧送性を評価するものである．

図-2 に，圧送ストレス部および直管部で計測した最大応答加速度の例を示す．最大応答加速度は，圧送ストレス部の方が直管部よりも大きい値を示し，閉塞時にはその増加がより顕著となる傾向を示した．一方，順調圧送時には，圧送ストレス部および直管部ともに比較的小さい値を示した．これは，圧送性が良好なコンクリートでは，圧送ストレス部を通過する際の影響を受けにくいことを示している．また，呼び強度 18-8-20N と 27-8-20N を同じ条件で圧送した場合，18-8-20N の最大応答加速度は 27-8-20N に比較して大きな値を示し，配合の違いによって振動応答が異なることが確認できる．以上より，圧送ストレス部および直管部で計測される最大応答加速度には，圧送状態およびコンクリート配合の違いに応じた特徴が現れることが示されている．本手法では，**図-2** に示すような圧送ストレス部と直管部における振動応答の違いに着目し，これらの最大応答加速度を圧送性評価に活用している．なお，本報告で用いる評価指標の定義および考え方については 2.4 節で述べる．

2.3 検知管の概要

前節で示したように，ベント管などを圧送ストレス部として利用することで，コンクリートの圧送性に応じた振動応答を取得できる．一方，ベント管の位置，曲率および設置数は配管経路によって異なるため，実施工では圧送ストレス部の条件を統一することが難しい．また，ブーム圧送では，配管が車体上部やブームに配置されているため，同一の条件で加速度計を設置することが困難な場合がある．

そこで著者らは，配管経路にかかわらず一定の条件で振動応答を取得することを目的として，特殊形状を有する輸送管である検知管を本手法に組み合わせている [7)~11)]．検知管を**写真-1** に示す．検知管は，圧送中に配管内のコンクリートに閉塞が生じない程度の負荷が掛かるように，コンクリートの流入口から中央部に向かって絞りを持つ

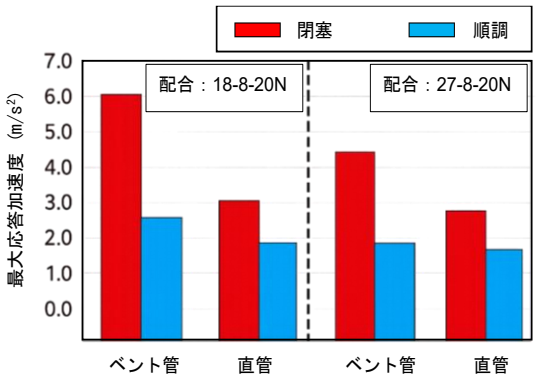


図-2 ベント管（圧送ストレス部）および直管部で計測した最大応答加速度



写真-1 検知管

形状を有している．既往の研究 [7)~11)]では，圧送ストレス部としてベント管および検知管を用いた場合に得られる振動情報を比較し，いずれの配管を用いた場合にも圧送状態に対応した振動応答が得られることを確認している．また，検知管を用いることで，地組の配管圧送だけでなくブーム圧送や多様なコンクリート配合に対しても，本手法を適用できることを示している．

したがって，検知管は，実施工において配管経路に依存せず，圧送ストレス部に相当する計測箇所を設けるための輸送管として位置付けられる．本報告では，検知管およびその近傍の直管部で取得した振動加速度を用いて，配合の諸条件が圧送性に及ぼす影響を検討する．

2.4 本手法における評価指標

本報告では，検知管で計測した最大応答加速度を $A_{f,d}$，直管部で計測した最大応答加速度を $A_{f,s}$ とする．また，著者らは実施工における圧送性の評価指標として，圧送ストレス部および直管部で計測した最大応答加速度の差分値を用いる方法を提案している [4)]．ここでは，最大応答加速度の差分値を ΔA_f とする．

既往研究 [4)]では，ベント管およびその先の直管で計測した ΔA_f を用いて，順調，不安定および閉塞の圧送状態を整理している．その結果，異なる圧送速度を含む実験結果においても，両計測箇所の最大応答加速度の差により順調，不安定および閉塞の圧送状態を同様の閾値内で評価できる可能性が示されている．これは，圧送ストレス部および直管部の双方に作用する圧送速度などの影響を差分によって低減し，圧送ストレス部において局所的に生じる振動応答を抽出できるためと考えられる．

一方，本報告では，配合条件が振動応答に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている．ΔA_f を用いた場

表-1　実大圧送実験シリーズの圧送条件

実験シリーズ	関連文献番号	実験時平均気温(℃)	圧送方式	ポンプ諸元	概算の水平換算距離(m)	計測点までの水平換算距離(m)	その他
A	5), 6), 7), 8)	11	配管圧送	ポンプ車, 最大理論吐出量100m^3/h, 最大吐出圧力5.6MPa	125	9.0	–
B	9), 10)	19	配管圧送	定置式, 理論吐出量:約20m^3/h, ピストン前面圧力4.09MPa	30	10.5	計測点後は100A直管を使用した。
C	11)	13	配管圧送	ポンプ車, 最大理論吐出量100m^3/h, 最大吐出圧力5.6MPa	37	7.8	–
D	12)	24	ブーム圧送	ポンプ車, 最大理論吐出量165m^3/h, 最大吐出圧力8.5MPa	69	10.0	筒先のテーパ管(125A→100A)の有無の差で評価した。
E※	-	10	ブーム圧送		68	10.0	–
F※	-	10	ブーム圧送		74	10.0	実験シリーズEの配管条件に加え, 筒先に3mフレキシブルホースを配管した。

※実験シリーズEおよびF：本研究で追加実施した実験

合，検知管および直管部に共通して現れる振動成分が低減される一方，配合条件に起因して両計測箇所に共通して現れる振動成分についても差し引かれる可能性がある．そこで，配合条件と振動応答との関係を分析する際には，検知管および直管における応答を直接表すと考えられる$A_{f,d}$および$A_{f,s}$を分析指標の候補とし，第4章で選定する．

さらに，第6章では，検知管および直管部で取得した圧送速度の異なるデータを用い，$A_{f,d}$ と ΔA_f の圧送速度に対する感度を比較する．また，配合条件と ΔA_f との関係を圧送速度ごとに整理し，評価指標と比較して，差分値を用いることで圧送速度の影響を低減しながら，配合条件に起因する圧送性の傾向が同様であるかを確認する．

3. 実験データの概要

3.1 分析対象とした実験シリーズおよび圧送条件

分析対象とした実験シリーズの圧送条件を**表-1** に示す．実験シリーズ A, B, C, D は既往文献内で記載の実験を対象とした．実験シリーズ E および F は，ブーム圧送における本手法の精度向上を目的とした実験シリーズ D とほぼ同様の圧送条件で追加実施したものである．圧送方法は，実験シリーズ A, B, C は配管圧送，D, E, F はブーム圧送である．筒先までの水平換算距離は約 30～125m，計測点までの水平換算距離は 7.8～10.5m であり，水平換算距離の算出はテーパ管 150A→125A の上流側から算出した値である．配管は 125A を用い，実験シリーズ B は検知管から 125A 直管 1.0m を経て以降 100A であり，実験シリーズ D

表-2　配合および最大応答加速度

配合名 「実験シリーズ名_呼び強度-目標スランプ_特殊条件」	配合の諸条件											最大応答加速度	
	水セメント比	細骨材率	単位粗骨材かさ容積	粗骨材実積率	単位量				0.3mm粒以下を含めたﾍﾟｰｽﾄ量	0.3mm粒以下を除いた骨材量	粗骨材に含まれる微粒分量	検知管	直管
					水	セメント	細骨材	粗骨材					
	W/C	s/a	$V_{b,g}$	G_b	W	C	S	G	$m_{p,0.3}$	$A_{>0.3}$	F_g	$A_{f,d}$	$A_{f,s}$
	(%)	(%)	(m^3/m^3)	(%)	(kg/m^3)				(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(m/s^2)	(m/s^2)
A_18-8	67.5	47.2	0.626	60.0	166	246	866	976	577	1677	35.2	0.49	0.45
A_27-8	53.0	44.3	0.640	60.0	166	314	789	998	630	1637	33.1	0.42	0.45
B_27-8	54.9	47.4	0.609	60.5	162	295	876	994	-	-	-	0.37	0.21
B_27-8_*C*+50kg	47.0	46.2	0.609	60.5	162	345	834	994	-	-	-	0.29	0.16
B_27-8_*C*-50kg	66.1	48.5	0.609	60.5	162	245	915	994	-	-	-	0.35	0.26
B_27-8_s/a+5%	54.9	52.4	0.551	60.5	162	295	969	900	-	-	-	0.19	0.15
B_27-8_s/a-5%	54.9	42.4	0.666	60.5	162	295	784	1088	-	-	-	0.33	0.21
C_24-8	53.0	45.9	0.633	60.5	162	274	842	1038	611	1705	31.6	0.36	0.21
C_24-8_*C*+30kg	48.3	45.1	0.633	60.5	162	304	818	1038	636	1686	31.3	0.40	0.21
C_24-8_*C*-30kg	58.7	46.6	0.633	60.5	162	244	868	1038	586	1726	31.9	0.47	0.23
C_24-8_s/a+3%	53.1	48.8	0.599	60.5	162	274	897	982	622	1693	31.2	0.46	0.24
C_24-8_s/a-3%	52.9	42.9	0.668	60.5	162	274	787	1095	599	1719	32.0	0.51	0.21
D_21-12_ﾃｰﾊﾟなし	61.5	45.8	0.632	60.0	169	275	834	1012	678	1612	17.7	0.25	0.14
D_21-12_ﾃｰﾊﾟあり	61.5	45.8	0.632	60.0	169	275	834	1012	678	1612	17.7	0.32	0.16
D_21-12_s/a-5%,ﾃｰﾊﾟあり	61.5	42.8	0.690	60.0	169	275	743	1105	653	1639	16.2	0.27	0.20
E_21-12_s/a-6%	63.5	40.8	0.685	61.2	165	260	750	1127	635	1667	16.5	0.45	0.21
E_21-18	63.5	48.2	0.578	61.2	179	282	863	951	703	1572	18.0	0.26	0.13
E_21-18_SLloss※1	63.5	48.2	0.578	61.2	179	282	863	951	703	1572	18.0	0.30	0.15
F_21-12	63.5	46.8	0.620	60.4	165	260	863	1007	658	1637	26.5	0.32	0.22
F_21-12_s/a-7%	63.5	39.8	0.705	60.4	165	260	737	1146	625	1683	24.2	0.31	0.23
F_21-18	63.5	48.2	0.585	60.4	179	282	863	951	694	1581	38.1	0.25	0.18

・粗骨材最大寸法は20mm　　・目標空気量は4.5%

※1：練り上がり後アジテータ内で120分経過したコンクリートを使用した。

は一部の実験水準で筒先にテーパ管 125A→100A を設置している．

新たに追加した実験シリーズ E および F について，配管径，計測箇所および使用材料は実験シリーズ D と同等の条件とした．実験シリーズ D からの変更点は，実験時の実施時期が実験シリーズ D は夏期なのに対し，実験シリーズ E, F は冬期であった点，使用配合にスランプ 18cm を加えた点である．実験シリーズ F のみ，筒先に追加で 3m フレキシブルホースを接続した．

3.2 実験シリーズの配合

実験シリーズ A～F で使用した配合を**表-2** に示す．分析は，実験データが不足していた実験シリーズ A の一部を除き，実験シリーズすべての配合を対象とした．配合の諸条件には，一般的に配合設計に使用される単位量や *W/C*，*s/a* などのほかに，圧送挙動に影響すると考えられる 3 つの条件（$m_{p,0.3}$, $A_{>0.3}$, F_g）を加えて評価した．田澤の研究 [12] によると，細骨材の 0.3mm 以下の微粒分量は，管壁の潤滑層の構成成分となっており，小さいと閉塞のリスクが高く，閉塞条件との相関が高いことがわかっている．よって，0.3mm を境とし，0.3mm ふるいを通過する細骨材を含めたセメントペースト量 $m_{p,0.3}$ および，0.3mm ふるいを通過する細骨材を除いた骨材量 $A_{>0.3}$ を加えた．F_g は，粗骨材に含まれる 75μm 以下の微粒分で，材料分離抵抗性やブリーディング等に影響し得るという既往の知見 [13] を踏まえ，圧送挙動に関わる要因と考えた．実験シリーズ B は，骨材の微粒分量のデータが欠損していたため $m_{p,0.3}$, $A_{>0.3}$ および F_g は記載していない．このため，これらの指標を用いる分析では実験シリーズ B を除外した．

4. 分析方法および評価指標の選定

4.1 分析方法

実験シリーズ A～F で取得した圧送速度 30m³/h における最大応答加速度を**表-2** に示す．分析の流れは，まず実験シリーズ A～F で取得した最大応答加速度 $A_{f,d}$ および $A_{f,s}$ を用いて，評価指標の比較を行った．次に，選定した評価指標を目的変数，各配合条件を説明変数として重回帰分析を実施し，評価指標に寄与する要因を抽出した．重回帰分析の結果は *t* 値および *p* 値により判定し，判定基準は *t* 値が絶対値で 2.0 より大きいかつ *p* 値が 5%未満の場合に目的変数に対して有意な説明変数であることとした．その後，抽出された主要因と評価指標との関係を整理するとともに，圧送速度を変化させた場合における関係性の変化を確認した．さらに，ΔA_f についても圧送速度ごとに整理し，最大応答加速度との比較により，圧送速度の影響および配合条件との関係について確認した．

4.2 評価指標の選定

直管部で計測した最大応答加速度 $A_{f,s}$ と検知管で計測した最大応答加速度 $A_{f,d}$ の関係を**図-3** に示す．また，**図-3** には切片を 0 とした近似直線および決定係数を示した．両者には強い正の相関が認められ，直管部の最大応答加速度が増加するほど，検知管の最大応答加速度も増加する傾向を示した．また，多くの配合で $A_{f,d}$ が $A_{f,s}$ より大きい傾向を示した．これらの結果より，重回帰分析の評価指標としては，$A_{f,d}$ および $A_{f,s}$ のいずれを用いても同様の結果が得られるものと考えられる．本報告では，以降の分析に検知管で計測した最大応答加速度 $A_{f,d}$ を目的変数として用いることとした．

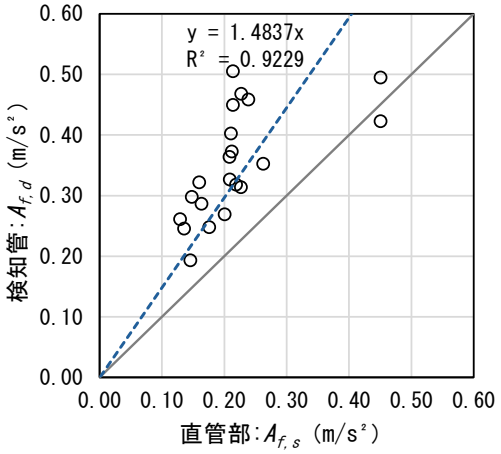


図-3 最大応答加速度 $A_{f,s}$ および $A_{f,d}$ の関係

5. 圧送性に影響を及ぼす配合条件

5.1 重回帰分析結果

表-2 に示す検知管の最大応答加速度 $A_{f,d}$ を目的変数，配合の諸条件から 9 条件（*W/C*, *s/a*, $V_{b,g}$, G_b, *C*, 総骨材量 *A*（*S*+*G*），$m_{p,0.3}$, $A_{>0.3}$, F_g）を説明変数として重回帰分析を行った．なお，本分析では実験シリーズ B はデータ欠損があったため分析から除外した．また，分析を進めていくうえで予測精度の低下を防止するため，多重共線性の高い条件は除外していき，最終的に 6 条件（*W/C*, $V_{b,g}$, G_b, *A*, $m_{p,0.3}$, F_g）で重回帰分析を行った．

重回帰分析結果を**表-3** に示す．*t* 値および *p* 値より，最大応答加速度への寄与が有意である条件は $m_{p,0.3}$ となった．これは，0.3mm 以下の細骨材を含むペースト量が，本研究で対象とした配合の諸条件の中で最も圧送性に影響を及ぼす要因であることを示している．また，$m_{p,0.3}$ と高い多重共線性を有する $A_{>0.3}$ についても，圧送性との関係を確認するため整理した．

5.2 主要な配合条件と最大応答加速度の関係

$m_{p,0.3}$ および $A_{>0.3}$ と最大応答加速度 $A_{f,d}$ の関係を**図-4** に示す．$m_{p,0.3}$ が増加するほど最大応答加速度は小さくなる傾向を示し，その相関の決定係数は 0.71 であった．この結果は，細骨材の 0.3mm 以下の微粒分量が管壁の潤滑層の構成成分となっており，小さいと閉塞のリスクが高く，

閉塞条件との相関が高いという既往の研究[12]の知見と一致している．これは，$m_{p,0.3}$ が大きいほど閉塞の危険性は小さく，$m_{p,0.3}$ が小さいほど閉塞の可能性が高くなるといったことを，本手法から得られる最大応答加速度が的確に表していることを示している．さらに，同研究では圧送可否または閉塞の有無と $m_{p,0.3}$ の関係を評価していたのに対し，本手法から得られる最大応答加速度は，圧送性と相関が高い $m_{p,0.3}$ の増減を連続的に定量評価できることが確認された．

$A_{>0.3}$ については，最大応答加速度との間に明確な正の傾向が認められた．既往研究[3]では，モルタルとコンクリートの最大応答加速度を比較し，順調圧送時にコンクリートがモルタルより約5倍大きいことを示しており，粗骨材を含むことにより生じる粒子同士あるいは管壁との衝突に起因する振動成分が最大応答加速度に寄与する可能性が示唆されている．ただし，同研究では，どの粒径範囲の骨材が指標の変化に強く影響するかは十分に整理されていなかった．これに対し，本報告では配合条件を横断的に整理したデータに基づき分析した結果，少なくとも 0.3mm を超える骨材量の増加が最大応答加速度の増大と対応する可能性があることを確認した．

なお，重回帰分析結果の判定基準は満たさなかったものの，$m_{p,0.3}$ に次いで t 値の大きかった粗骨材実積率 G_b に着目し，2 条件での重回帰分析も実施した．その結果，t 値・p 値は $m_{p,0.3}$ が-6.7・0.001%，G_b が 1.9・8.2%となり，説明変数としての判定結果は変わらなかったが，補正 R^2 が 0.742 となり，6 条件を用いたモデルより高い適合度を示した．よって，$m_{p,0.3}$ が突出して最大応答加速度に寄与する条件ではあるが，G_b も $m_{p,0.3}$ と複合的に圧送性の評価指標である最大応答加速度へ影響していると推察される．

説明変数とした9条件（W/C, s/a, $V_{b,g}$, G_b, C, A, $m_{p,0.3}$, $A_{>0.3}$, F_g）のうち，$m_{p,0.3}$ および $A_{>0.3}$ を除く 7 条件と最大応答加速度の関係を**図-5** に示す．ここで，一点鎖線は，最大応答加速度 $A_{f,d}$ の下限近傍を含む代表的な範囲を示す参照帯（以下，A_f 参照帯と記す）であり，s/a および $V_{b,g}$ では参照帯付近で散布の拡大が比較的明瞭であったため，その

表-3　重回帰分析結果

説明変数	標準化偏回帰係数	t 値	p 値 (%)
W/C	-0.0024	-1.0	34.7
$V_{b,g}$	-0.4412	-0.9	39.4
G_b	0.0561	1.7	13.3
A	-0.0006	-1.1	30.2
$m_{p.0.3}$	-0.0027	-4.4	0.2
F_g	-0.0017	-0.6	53.5
	決定係数 R^2		0.837
	補正$R^{2\,*1}$		0.728

*1：自由度調整済決定係数
※判定基準：t 値が絶対値で2.0より大きいかつp 値が5%未満の場合に目的変数に対して有意な説明変数であることとした。

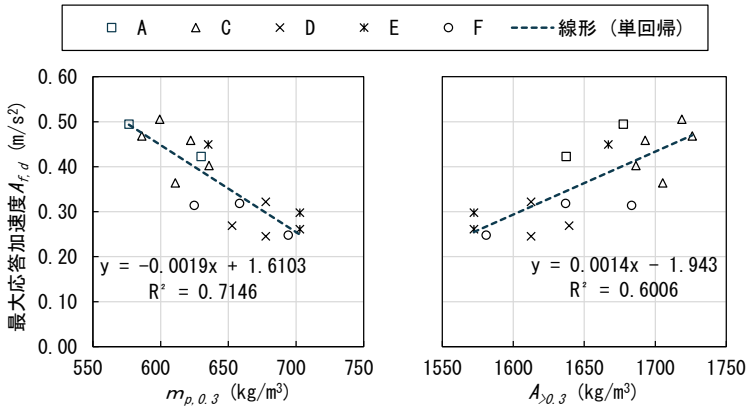


図-4　$m_{p,0.3}$ および $A_{>0.3}$ と最大応答加速度の関係

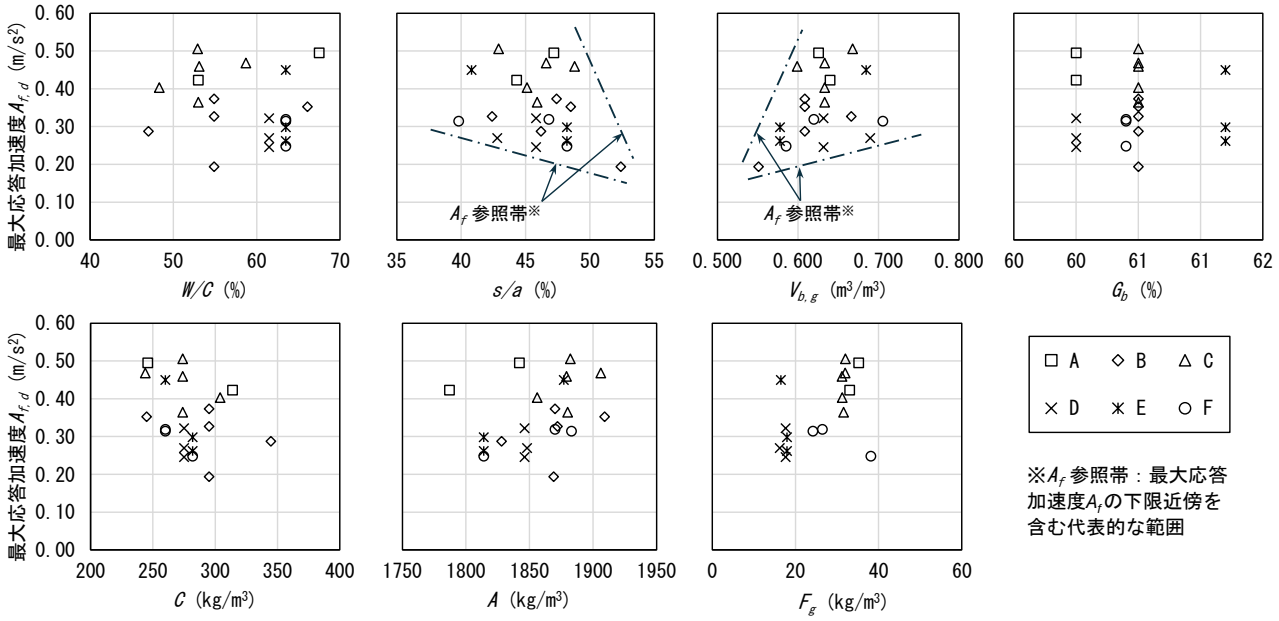
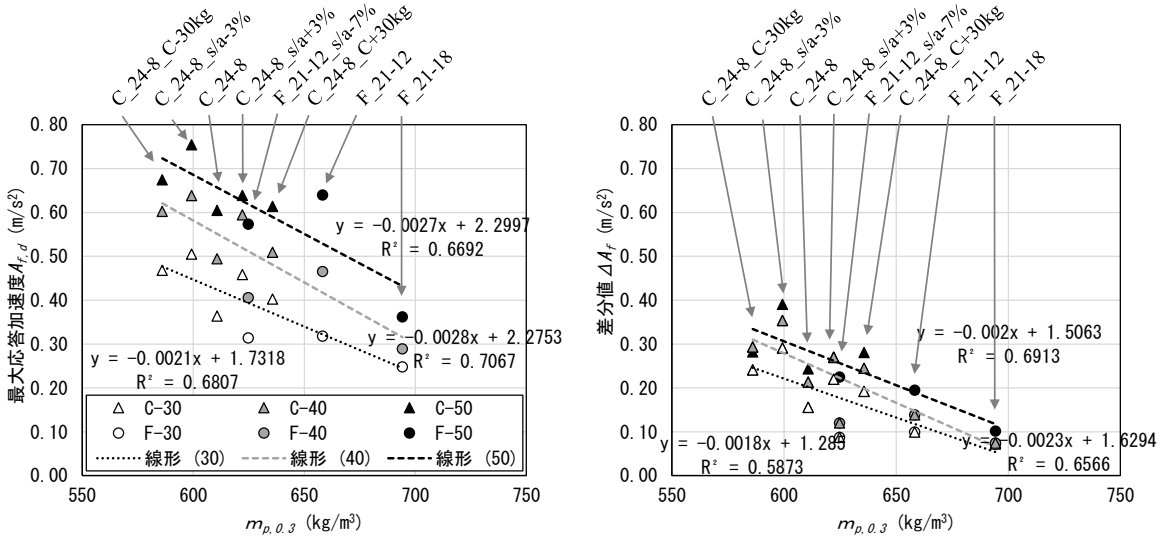


図-5　配合条件と最大応答加速度の関係



※凡例：実験シリーズ-圧送速度 V(m³/h)

(a) 最大応答加速度 $A_{f,d}$　　(b) $A_{f,d}$ および $A_{f,s}$ の差分値 ΔA_f

図-6　各圧送速度における $m_{p,0.3}$ との関係

特徴を示す目的で付記した．**図-5** に示した配合の諸条件において最大応答加速度と統計的に有意な相関は認められなかった．ただし傾向として，C および A と最大応答加速度の関係において，わずかではあるが C は負の傾向，A は正の傾向がみられた．これは，0.3mm 以下の微粒分量を考慮しない場合の $m_{p,0.3}$ が C，$A_{>0.3}$ が A に対応することから，潤滑層（管壁近傍に形成され，水，セメント粒子および微粒分から構成される[12]）に関与する 0.3mm 以下の微粒分を含めるか否かの違いが，最大応答加速度の増減の傾向に影響したと推察される．s/a および $V_{b,g}$ においては，多重共線性の関係にあることから同程度の傾向がみられる結果となった．A_f 参照帯に着目すると，s/a は値が小さくなるほど，$V_{b,g}$ は値が大きくなるほど最大応答加速度 $A_{f,d}$ の変動が急激に大きくなる傾向となり，コンクリート中の粗骨材量あるいは単位粗骨材かさ容積の増加によって，管内の骨材の挙動が大きく乱れることを示していると考えられる．また，最大応答加速度 $A_{f,d}$ の下限値は $V_{b,g}$ 増加に伴い大きくなる傾向があり，粗骨材に起因する振動を本手法により捉えていると解釈できる．

以上より，本報告の実験データの範囲では，$m_{p,0.3}$ および $A_{>0.3}$ が最大応答加速度に寄与する配合の条件であることが示され，圧送性を定量的に把握できることが確認された．その他の条件は $m_{p,0.3}$ と比較すると最大応答加速度への寄与は小さいが，G_b や $V_{b,g}$ などの配合の条件においても，最大応答加速度への影響は無視できず，圧送性は様々な配合の諸条件を複合的に評価するべきであることがわかった．

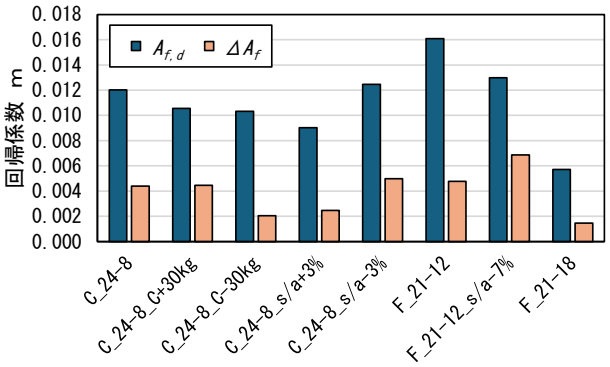
6. 圧送速度が圧送性評価指標に及ぼす影響

6.1 最大応答加速度 $A_{f,d}$ への影響

実験シリーズ C および F を代表として，圧送速度（V）30, 40, 50m³/h における最大応答加速度 $A_{f,d}$ および $A_{f,s}$ を**表-4** に示す．また，各圧送速度における $m_{p,0.3}$ と $A_{f,d}$ の関係を**図-6**(a)に示す．なお，**図-6** に示す回帰直線は圧送速度ごとに $m_{p,0.3}$ と最大応答加速度の関係から算出したものである．実験シリーズ C および F では，配合の条件が同一の場合，圧送速度の増加に伴い最大応答加速度が増大する傾向を示した．これは，圧送速度の増加に伴う管内のコンクリートの流動状態の変化が最大応答加速度に反映された結果だと推察される．また，各圧送速度における $m_{p,0.3}$ と最大応答加速度の関係に着目すると，図中に示し

表-4　各圧送速度における最大応答加速度

配合名	圧送速度V(m³/h)	V=30		V=40		V=50	
	最大応答加速度(m/s²)	$A_{f,d}$	$A_{f,s}$	$A_{f,d}$	$A_{f,s}$	$A_{f,d}$	$A_{f,s}$
C_24-8		0.36	0.21	0.49	0.28	0.60	0.36
C_24-8_C+30kg		0.40	0.21	0.51	0.26	0.61	0.33
C_24-8_C-30kg		0.47	0.23	0.60	0.31	0.67	0.39
C_24-8_s/a+3%		0.46	0.24	0.59	0.32	0.64	0.37
C_24-8_s/a-3%		0.51	0.21	0.64	0.29	0.75	0.36
F_21-12		0.32	0.22	0.47	0.33	0.64	0.45
F_21-12_s/a-7%		0.31	0.23	0.41	0.29	0.57	0.35
F_21-18		0.25	0.18	0.29	0.21	0.36	0.26



※凡例の数値：圧送速度 V(m³/h)

図-7　各配合における圧送速度ごとの最大応答加速度および回帰係数 m

た回帰直線はいずれも右下がりとなっており，5 章で確認したように，$m_{p,0.3}$ の増加に伴い最大応答加速度が低下する関係は，各圧送速度においても共通して認められた．

6.2 差分値 ΔA_f への影響

各圧送速度における $m_{p,0.3}$ と ΔA_f の関係を**図-6(b)**に示す．ΔA_f においても，$A_{f,d}$ と同様に圧送速度の増加に伴い増大する傾向を示したが，同一配合における増加量は $A_{f,d}$ と比較して小さくなった．また，各圧送速度における $m_{p,0.3}$ と ΔA_f の関係については，図中に示した回帰直線はいずれも右下がりとなっており，差分値を用いた場合においても，$m_{p,0.3}$ の増加に伴い評価値が低下する関係は概ね共通して認められた．**図-6(a)**および**(b)**に示した回帰直線を比較すると，$A_{f,d}$ では圧送速度の増加に伴い回帰直線全体が上方へ移動するのに対し，ΔA_f ではその移動量は比較的小さい．このことから，ΔA_f を用いることで圧送速度の影響を低減できる可能性が示唆された．

この傾向を定量的に評価するため，各配合における圧送速度ごとの $A_{f,d}$ および ΔA_f の関係を単回帰分析した回帰係数（m）を**図-7** に示す．回帰係数 m は圧送速度の増加に対する $A_{f,d}$ および ΔA_f 感度を示す指標となる．**図-7** より，ΔA_f の回帰係数 m は全ての配合で $A_{f,d}$ より小さくなった．回帰係数 m の平均値は，$A_{f,d}$ が 0.0111，ΔA_f が 0.0039 であり，ΔA_f を用いた場合の圧送速度に対する感度は $A_{f,d}$ 単独の場合より約 65%小さいことがわかった．これは，圧送速度の増加に伴って圧送ストレス部および直管部の振動応答がともに増加し，両計測箇所に共通して現れる振動の一部が差分によって打ち消されたためと考えられる．

以上より，本報告の実験データの範囲では，ΔA_f を用いることで $A_{f,d}$ に表れる圧送速度の影響を低減しつつ，配合条件に起因する圧送性の傾向を保持できる可能性が示された．ただし，ΔA_f においても圧送速度による増加傾向は残っているため，圧送速度の影響を完全に除去できるものではないと考えられる．

7. 本手法の実適用に向けて

本報告では，配合条件が圧送性に及ぼす影響を分析するため，検知管で計測した最大応答加速度 $A_{f,d}$ を分析用の評価指標として用いた．実施工において，本手法を導入する場合，コンクリートの性状の変化をリアルタイムで捉えて作業員に通知する，もしくは，コンクリートポンプ車にフィードバックし，閉塞回避への対策を講じる必要がある．そのために，本手法で出力した評価指標に対して，閉塞予兆を検知するための評価基準を設定することが挙げられる．本報告で検討した最大応答加速度を用いる場合，圧送速度の影響を受けることから，打込み中に変化する圧送速度に応じて評価基準を補正しなければならない．一方，差分値を用いることで，圧送速度の影響が小さくなるため，圧送速度ごとの補正を小さくした共通性の高い評価基準を設定できる可能性がある．このため，実施工時の評価には差分値を用いることが適していると判断できる．

本報告では複数の実験シリーズを横断的に分析したが，ポンプ形式や配管条件，季節などの違いが評価指標に及ぼす影響については十分に整理できていない．今後は，適用可能な配合条件および施工条件の拡充を図るとともに，実施工データの蓄積によって ΔA_f を用いた評価手法の有効性を検証していきたい．

8. まとめ

本報告では，振動加速度を用いた簡易圧送性評価手法について，実験シリーズの結果を再整理し，配合条件および圧送条件が圧送性評価指標に及ぼす影響について検討した．その結果，以下の知見が得られた．

(1) 本研究の範囲では，配管条件の異なる実験シリーズを含めて分析した結果，0.3mm 以下の微粒分量を含むペースト量 $m_{p,0.3}$ が，評価指標とした検知管で計測した最大応答加速度 $A_{f,d}$ と有意な関係を有する配合条件として抽出された．また，$A_{>0.3}$ についても評価指標との明確な関係が認められた．

(2) $m_{p,0.3}$ および $A_{>0.3}$ と比較すると寄与は小さいものの，粗骨材実積率 G_b や単位粗骨材かさ容積 $V_{b,g}$ などの配合の条件においても，$A_{f,d}$ に一定の影響を及ぼすことが示唆された．このことから，圧送性は単一の配合条件ではなく，様々な配合条件が複合的に作用して決定されるものと推察される．

(3) 圧送速度の増加に伴い，$A_{f,d}$ および差分値 ΔA_f は増加する傾向を示した．一方，圧送速度に対する感度を示す回帰係数は，ΔA_f において $A_{f,d}$ より平均で約 65%小さく，圧送速度の影響が小さくなることが確認された．また，$m_{p,0.3}$ の増加に伴い $A_{f,d}$ が低下する関係は，各圧送速度において概ね共通して認められ，ΔA_f もその傾向は同様であった．

以上より，本手法によって得られる最大応答加速度は，コンクリートの圧送性に影響を及ぼす配合条件および圧送速度の違いを反映することが確認された．また，検知管および直管部の最大応答加速度の差分値 ΔA_f は，検知管の最大応答加速度 $A_{f,d}$ と比較して圧送速度による影響が小さいことから，圧送速度が変化する実施工時の圧送性評価に適用できる可能性が示された．ただし，ΔA_f にも圧送速度の影響が残るため，実施工における評価基準については，圧送速度範囲および配合条件を考慮して検証する必要がある．

謝辞：本研究は，極東開発工業株式会社，株式会社ヤマコン，千葉工業大学の学生の皆さまに多大なるご協力をいただきました．ここに感謝の意を示します．

参考文献

1) 日本コンクリート工学会：コンクリート圧送工法指針 2023, 2023.3
2) 太田達見，中田善久，近松竜一，大塚秀三：コンクリートポンプ工法における圧送の実状に関する調査，コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.259-264, 2008
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，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
5) 平川恭奨，橋本紳一郎，南浩輔，中島良光，江本幸雄，渡辺健：振動加速度の計測によるコンクリートの圧送性の評価～加速度の値を指標とした圧送性評価～，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.70，V-214，pp.427-428，2015.9
6) 橋本紳一郎，平川恭奨，南浩輔，中島良光，渡辺健，橋本親典：振動加速度の計測によるコンクリートの圧送性の評価～加速度のピーク値と周波数を指標とした圧送性評価～，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.70，V-215，pp.429-430，2015.9
7) 中島良光，南浩輔，橋本紳一郎，平川恭奨：振動加速度の計測によるコンクリートの圧送性の評価～振動加速度計と検知管を用いたコンクリートの圧送性評価～，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.70，V-216，pp.431-432，2015.9
8) 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
9) 平川恭奨，橋本紳一郎，南浩輔，中島良光：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，コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1401-1406, 2016
10) 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
11) 宮澤友基，三坂岳広，南浩輔，橋本紳一郎：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，コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.983-988, 2020
12) 田澤榮一：ポンプ圧送技術の現状と問題点，コンクリート工学, Vol.21, No.11, pp.13-22, 1983
13) 大西利勝，井上正一，黒田保：微粒分が多い石灰石骨材を用いたコンクリートの配合と物性，コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.143-148, 2011