

検知管を用いたコンクリートの簡易圧送性評価に関する研究

太田 健司*1・南 浩輔*2・梶田 秀幸*3・佐藤 文則*1・橋本 紳一郎*4・吉田 兼治*5

A Study on simplified evaluating method for pumpability of fresh concrete by using detecting pipe

Kenji OHTA, Kosuke MINAMI, Hideyuki KAJITA, Fuminori SATO, Shinichirou HASHIMOTO, Kenji YOSHIDA

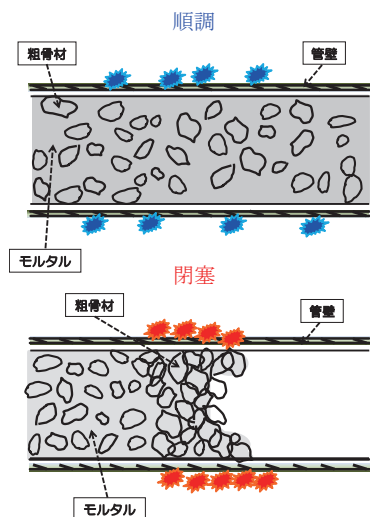


図-1 骨材の衝突イメージ



写真-1 検知管

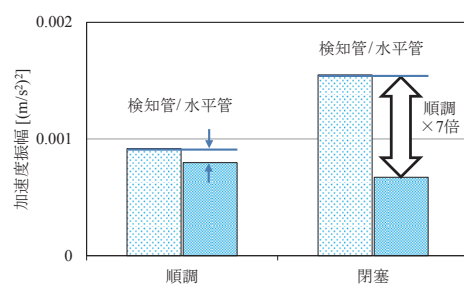


図-2 水平管と検知管のピーク加速度振幅の差

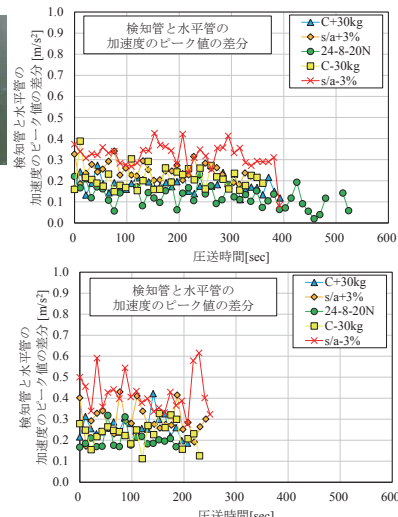


図-3 リアルタイムでの圧送性評価

研究の目的

コンクリートの配合や施工方法が多様化する中で、同じスランプを有する配合であっても圧送性などの施工性能は大きく異なる。また、フレッシュコンクリートの品質管理は、特殊な場合を除いて、スランプ試験や空気量試験などの受入検査でのみ管理、判断されている。しかし、受入検査で基準を満足したフレッシュコンクリートにおいても、圧送中に生じる不具合の影響により配管が閉塞するトラブルや、場合によっては配管破裂に至る事故も発生している。そこで、フレッシュコンクリートの圧送性を評価する手法について検討を行った。

技術の説明

フレッシュコンクリートを圧送する際に、フレッシュ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の衝突を繰り返す。粗骨材の衝突による振動は、配管内を順調に圧送されているフレッシュコンクリートと閉塞直前のフレッシュコンクリートとでは状態が異なり、この振動の違いを直接配管に取り付けた振動加速度計により計測する。この計測手法では、圧送負荷の小さい（圧送時のストレスが小さい）水平管と水平管より圧送負荷の大きい（圧送時のストレスが大きい）ベント管やテーパ管で、その違いがより明確に表れることを確認している。この計測手法をコンクリートポンプ近傍の配管に適用することで、閉塞の危険性をより早い段階で見つけることができるため、現場の安全管理や品質管理の向上につながる。しかし、配管経路は施工環境に左右され、必ずしもポンプ近傍にベント管が設置されているとは限らない。また、圧送されるフレッシュコンクリートの配合条件やフレッシュ性状も様々であるため、定量評価が可能となるように、特殊な形状を有する検知管を開発した。

主な結論

振動加速度計を用いた既往の簡易圧送性評価手法に今回新たに提案した検知管を組み合わせることで、配合条件の違いが圧送性に及ぼす影響を概ね捉えることが可能となる。また、リアルタイムかつ連続的に計測、分析を行うことで、施工中の圧送状況やコンクリートの品質の偏りなども現地で確認することができ、リアルタイム計測を行うことで、不具合の早期発見や高精度な品質管理を行うことも可能となる。

*1 本店 技術研究所
*3 本店 技術研究所 材料研究室
*5 (株)ヤマコン 事業開発室 室長

*2 本店 成長戦略室
*4 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教

検知管を用いたコンクリートの簡易圧送性評価に関する研究

太 田 健 司^{*1} 南 浩 輔^{*2}
 梶 田 秀 幸^{*3} 佐 藤 文 則^{*1}
 橋 本 紳一郎^{*4} 吉 田 兼 治^{*5}

要 旨

配合条件の異なるフレッシュコンクリートに対して、振動加速度計と検知管を組み合わせた簡易圧送性評価手法について、圧送性評価の適用性や閉塞に対する評価、リアルタイムでの圧送性評価について検討を行った。その結果、検知管で得られた振動加速度のピーク値を用いることで配合の違いや閉塞などの現象を管内圧力計測と同様に捉えることができ、管内圧力計測と同等の圧送性評価が可能であることを示した。また、粗骨材の配管内での停滞や粗骨材絶対容積などの影響を捉えられるため、単位粉体量が少なく、アーチングを生じ易い配合評価に有用であることを示した。本検討の結果から、検知管を用いた簡易圧送性評価手法を適用することで、平均管内圧力では捉えることが困難であった骨材の圧送への影響を捉えることができるなど、配管経路に依らず様々なフレッシュコンクリートの圧送性を評価できることを示した。

キーワード 圧送性／検知管／振動加速度計／管内圧力／加速度／閉塞

目 次

- | | |
|------------------------|------------------------|
| 1. はじめに | 4. 【シリーズⅡ】検知管を用いたフレッシュ |
| 2. 振動加速度計を用いたフレッシュ | コンクリートの簡易圧送性評価の精度向上 |
| コンクリートの簡易圧送性評価手法 | およびリアルタイムでの圧送性評価 |
| 3. 【シリーズⅠ】検知管を用いたフレッシュ | 5. まとめ |
| コンクリートの簡易圧送性評価 | |

A STUDY ON SIMPLIFIED EVALUATING METHOD FOR PUMPABILITY OF FRESH CONCRETE BY USING DETECTING PIPE

Kenji OHTA Kosuke MINAMI
 Hideyuki KAJITA Fuminori SATO
 Shinichirou HASHIMOTO Kenji YOSHIDA

Synopsis:

It was considered whether the applying of proposed simplified evaluating method, which is using vibration accelerometer and detecting pipe, is effective to evaluate concrete pumping and detect blockage in a conveying pipe immediately by using different mix proportions. It was found that it is possible to distinguish the difference of concrete mix proportions and to foresee the occurrence of blockage in a conveying pipe by measuring a peak value of vibrational acceleration in detecting pipe, as well as the method of measuring pressure in a pipe.

In this study, it was clarified that applying the simplified evaluating method using detecting pipe to a concrete pumping is possible to find the influence of coarse aggregates, which is difficult to find by using measuring pressure in a pipe. As the result, it is concluded that this evaluating method is applicable for evaluating concrete pumping of various fresh concrete in spite of difference of mix proportions and condition of route of conveying pipes.

* 1 本店 技術研究所

* 2 本店 成長戦略室

* 3 本店 技術研究所 材料研究室

* 4 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教

* 5 (株)ヤマコン 事業開発室 室長

1. はじめに

建設現場のコンクリート工事においては、ポンプ圧送技術の向上や施工の省力化への要請からコンクリートポンプによる打込みが主流となっており、長距離の圧送や高所への圧送など、バケットによる打込みと比較して搬送効率は飛躍的に向上している。一方、コンクリートの製造については、天然骨材の枯渇や使用材料の多様化、混和剤の技術の発展に伴い、施工用途に合わせた多種多様なコンクリートが産み出されている。コンクリートが多様化する中で、同じスランプを有する配合であっても圧送性などの施工性能は大きく異なる。また、特殊な場合を除いて、フレッシュコンクリートの品質管理はスランプ試験や空気量試験などの受入検査で管理、判断されている。しかし、受入検査で基準を満足したフレッシュコンクリートにおいても、圧送中に生じる粗骨材粒子群同士のアーチングや材料分離の影響により配管が閉塞するトラブルや、場合によっては配管破裂に至る事故も発生している。

これらに対し、著者らは施工中のフレッシュコンクリートの圧送状態を現地で確認する手法として、振動加速度計を用いた簡易な圧送性評価手法を提案している^{1) 2)}。この計測手法は、圧送の際にフレッシュ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すことによる微細な振動を直接配管に取り付けた振動加速度計により計測する方法である。これまで、室内試験や実機ポンプを用いたフィールド計測の結果から、ポンプ近傍に設置されたベント管や水平管の計測結果を用いて、振動加速度計により取得した加速度の波形やFFT解析により、加速度ピーク値やピーク周波数の値から圧送性の評価が可能であることを示している^{3) 4) 5)}。

しかし、施工環境により配管経路は様々であり、これらの要因が計測結果に影響を及ぼす場合がある。また、本来必要な箇所に計測対象となるベント管や水平管が設置されているとも限らない。そこで、あらゆる配管経路やフレッシュコンクリートの配合の組合せに対し圧送性の定量評価が可能となるように、特殊な形状を有する輸送管を開発した（以下、検知管と記す）⁶⁾。

本研究では、単位セメント量や単位粗骨材量の異なる複数の配合のフレッシュコンクリートに対して、シリーズⅠ：振動加速度計と検知管を用いた簡易圧送性評価手法の適用性や閉塞の評価、シリーズⅡ：簡易圧送性評価の精度向上やリアルタイム評価を試みた結果について報告する。

2. 振動加速度計を用いたフレッシュ

コンクリートの簡易圧送性評価手法^{1), 5), 6)}

現在、フレッシュコンクリートの圧送性評価は、試験圧送を行い、圧送時の圧送距離と管内圧力の関係から圧力損失を算出し評価を行っている。しかし、この手法を

用いる場合、圧力計といった計測機器の他に、圧力計を取り付けるための特殊な形状を有する輸送管が必要になり、配管長や配管経路によっては計測点を多く設ける必要があるなど、多くの手間やコストを要する。

そこで橋本⁷⁾は、特殊な測定装置や測定用の配管を準備する必要がなく、フレッシュコンクリートの圧送性を簡易的に測定、評価できる手法として、配管の外側に振動加速度計を直接貼り付け計測する方法を提案している。

フレッシュコンクリートを圧送する際に、フレッシュ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の衝突を繰り返す。粗骨材の衝突による振動は、配管内を順調に圧送されているフレッシュコンクリートと閉塞直前のフレッシュコンクリートとでは状態が異なり（図-1 参照）、この振動の違いを直接配管に取り付けた振動加速度計により計測する（写真-1 参照）。この手法では、圧送負荷の小さい（圧送時のストレスが小さい）水平管と水平管より圧送負荷の大きい（圧送時のストレスが大きい）ベント管やテーパ管で、その違いがより明確に表れることを確認している⁷⁾。

既往の研究⁵⁾において、計測された加速度波形の一例

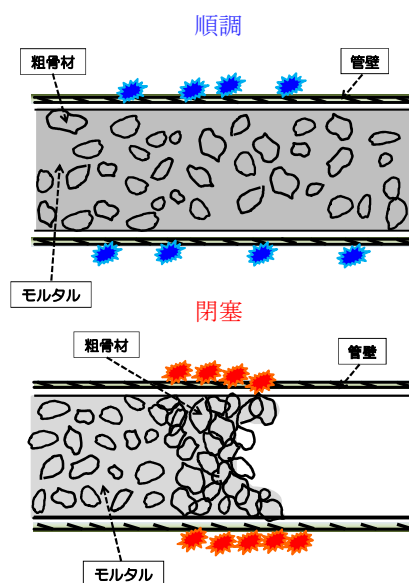


図-1 粗骨材粒子群同士あるいは管壁との衝突イメージ

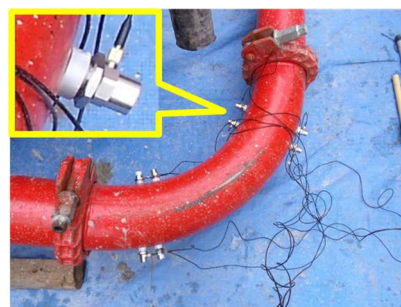


写真-1 ベント管における振動加速度の計測状況

を図-2 に示す。前述のように水平管とベント管では振動状態が大きく異なるが、同じベント管であっても順調圧送と閉塞直前で加速度波形の形状は大きく異なり、閉塞直前では、規則的に連続した形状の加速度波形から不規則な形状へと変化することや加速度振幅が大きくなるなど加速度波形に乱れが生じている。また、FFT 解析により図-3 に示す加速度と周波数の関係を求めることで、図-4 に示すように、各測定箇所にて計測した加速度振幅のピーク値の変化を求めることができる。図-4 より、閉塞直前においてベント管と水平管の間でピーク加速度振幅に大きな差が生じていることが判る。このように、ベント管と水平管のピーク加速度振幅の差分を算出し、図-5 に示すように閾値を適切に定めることで、振動加速度計を用いたフレッシュコンクリートの簡易的な圧送性評価が可能であることを示している。

この計測手法をコンクリートポンプ近傍の配管に適用することで、閉塞の危険性をより早い段階で見つけることができるため、現場の安全管理や品質管理の向上につながる。しかし、配管経路は施工環境に左右され、必ずしもポンプ近傍にベント管が設置されているとは限らない。また、圧送されるフレッシュコンクリートの配合条件やフレッシュ性状も様々であるため、定量評価が可能となるように、特殊な形状を有する検知管を開発した。検知管を写真-2 に示す。検知管は、圧送中に配管内のフレッシュ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、フレッシュコンクリートの流入口から中央部に向かって絞りを有する形状を有している。検知管を用いることで、ベント管やテーパー管を用いた場合と同等の圧送性評価ができ、配管経路に依らず様々な配合条件のフレッシュコンクリートの圧送性を評価することができる。なお、既往の研究⁹⁾では、順調圧送時には検知管とベント管で同様の加速度波形が取得できることや、閉塞直前の波形の乱れから、ベント管と同様に閉塞現象を捉えられること、すなわち、圧送性を評価可能であることが明らかになっている（図-6 参照）。

3. 【シリーズ I】検知管を用いたフレッシュコンクリートの簡易圧送性評価

3.1 実験目的

著者らは、検知管をポンプ近傍に設置しておき、水平管の箇所と併せて各々から加速度データを取得することで、圧送経路に依らず圧送性の評価が可能であることを示している⁹⁾。一方、既往の研究では、検知管の近傍あるいは配管経路にベント管が含まれている場合があり、連結された配管に生じた振動加速度がその影響を受けている可能性が払拭できない。そこで本実験では、不確実な要因を全て排除するため、ベント管を含まない直線配管での検知管の性能確認を実施した。また、圧送中に負荷が生じる機構である検知管とテーパー管において、両者

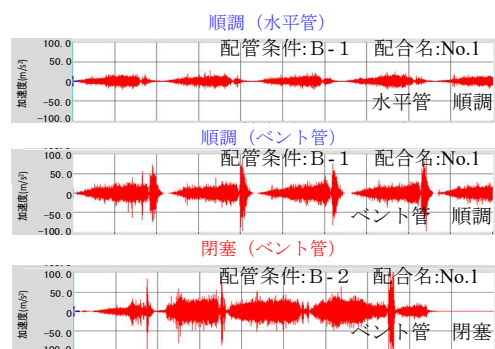


図-2 振動加速度波形の違い⁵⁾

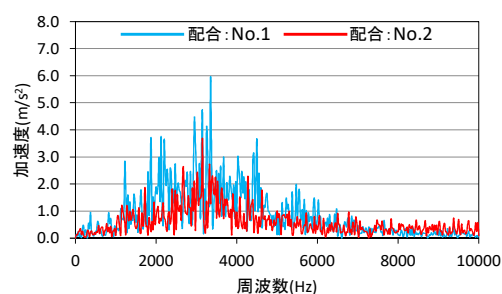


図-3 振動加速度のスペクトル特性 (ベント管)⁵⁾

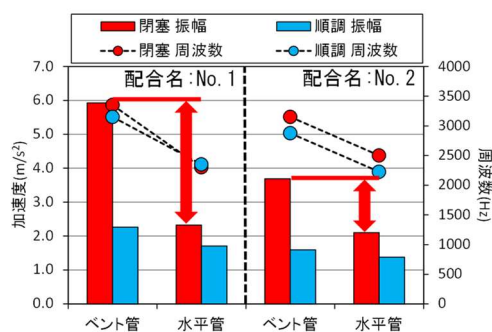


図-4 ピーク加速度振幅とピーク周波数の関係⁵⁾

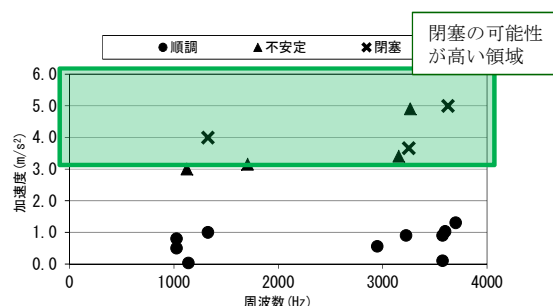


図-5 ピーク加速度振幅の差分と圧送性評価の関係⁵⁾

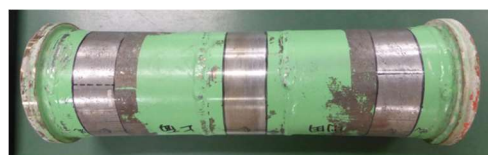


写真-2 検知管

での圧送性評価の適用性についても検討した。

3.2 使用材料および配合条件

表-1、表-2 に実験シリーズ I で使用した使用材料および配合条件を示す。本検討では、JIS 認証を持つレディーミクスト工場で用いられ、コンクリートポンプによる施工が多いと考えられる 27-8-20N を基準配合とし、基準配合に対して、単位水量および単位粗骨材量一定条件のもと単位セメント量を 50kg/m^3 増減させた配合、細骨材率を 5%増減させた配合の計 5 種類の配合を用いた。この 5 配合については、事前に室内配合試験を実施し、実機練りやアジテータ車による運搬時のスランプおよび空気量の低下を考慮し、荷卸し時のスランプが $8.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ となるように、練上がり時の目標スランプを $12.0 \pm 1.0\text{cm}$ 、空気量が $5.0 \pm 0.5\%$ として管理した。なお、荷卸し地点における品質管理は JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」に準拠した。

3.3 コンクリートのフレッシュ性状

表-3 に荷卸し時のフレッシュコンクリート試験結果を示す。試験は、JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」、JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法」に準拠した。荷卸し時に所要のフレッシュ性状を満たしていることを確認した後、圧送試験を行った。

なお、配合の確認のため事前に室内配合試験を実施している（写真-3 参照）。その際のフレッシュ性状の目視観察結果では、単位セメント量を増減させた C+50kg/m³ や C-50kg/m³ は、フレッシュコンクリート中のペースト濃度の濃淡から粘性に違いはあるものの概ね良好なフレッシュ性状を示した（写真-3 (b), (c) 参照）。一方、単位水量および単位セメント量一定条件のもと細骨材率を増加させた s/a+5%は塑性が高めであり、経時変化に伴う締りが大きい状態となった（写真-3 (d) 参照）。また、s/a-5%は、細骨材率の低下により自立した形状を保持できず崩れやすい状態となった（写真-3 (e) 参照）。実験シリーズ I で用いたフレッシュコンクリートは、初期のフレッシュ性状に対して、単位セメント量の影響は小さく、細骨材率の影響が大きい結果となった。

3.4 配管条件および圧送方法

図-7 に圧送試験に用いた配管図を示す。本検討では定置式のコンクリートポンプ（理論吐出量：14～26m³/h、コンクリートピストン前面圧力 4.09MPa）を用い、輸送管は外径が 150A（以下、6B と記す）、125A（以下、5B と記す）、100A（以下、4B と記す）の 3 種類の直管（以下、水平管と記す）を用いた。また、外径の異なる輸送管の接続部には、各々 6B→5B、5B→4B のテーパ管を用いた。配管は延長 33.5m（水平換算距離：39.5m）の直

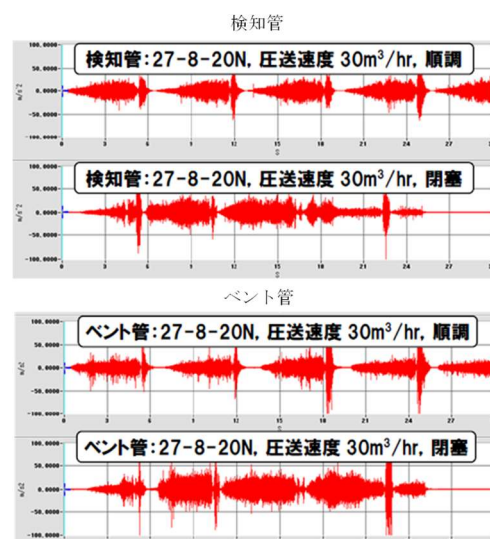


図-6 検知管およびベント管で計測した加速度波形⁶⁾

表-1 使用材料（シリーズ I）

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
砕砂	S1	栃木県栃木市鍋山町産	2.66
山砂	S2	千葉県成田市前林産	2.59
碎石2005	G1	埼玉県秩父郡横瀬町産	2.70
	G2	栃木県栃木市鍋山町産	2.70
混和剤	Ad	AE減水剤	1.07

表-2 配合表（シリーズ I）

配合名	W/C [%]	s/a [%]	単位量[kg/m ³]					
			W	C	S1	S2	G1	G2
基準	55.0	47.4	162	295	617	259		
C+50kg/m ³	47.0	46.2		345	588	246	497	497
C-50kg/m ³	66.0	48.5		245	646	269		
s/a+5%	55.0	52.4		295	684	285	450	450
s/a-5%	55.0	42.4			553	231	544	544

表-3 荷卸し時のフレッシュコンクリートの試験結果（シリーズ I）

配合名	W/C [%]	s/a [%]	スランプ [cm]	空気量 [%]	C.T [°C]
基準	55.0	47.4	10.0	3.9	24.7
C+50kg/m ³	47.0	46.2	8.5	3.3	23.8
C-50kg/m ³	66.0	48.5	7.0	5.4	23.2
s/a+5%	55.0	52.4	9.0	5.0	24.0
s/a-5%	55.0	42.4	9.0	3.8	23.7

線配置とした。配管の詳細は、ポンプ吐出口（6B）から 1.0m の直管（6B）を接続し、次に 1.5m のテーパ管（6B→5B）を設置、その後、計測対象部となる検知管を含め、2.5m 分の直管（5B）を接続し、1.5m のテーパ管（5B→4B）により 4B に絞った後、実配管長で 33.5m となるよう 4B の直管を延長した。圧送の際の配管内の未充填による管内圧力計測への影響を排除するため、筒先に対して上り勾配となるように配管を設けることで圧送時に常に満管状態を維持できるように配慮した。

圧送速度は、理論吐出量で 15m³/h と 20m³/h の 2 水準と



写真-3 室内配合試験時のフレッシュ性状

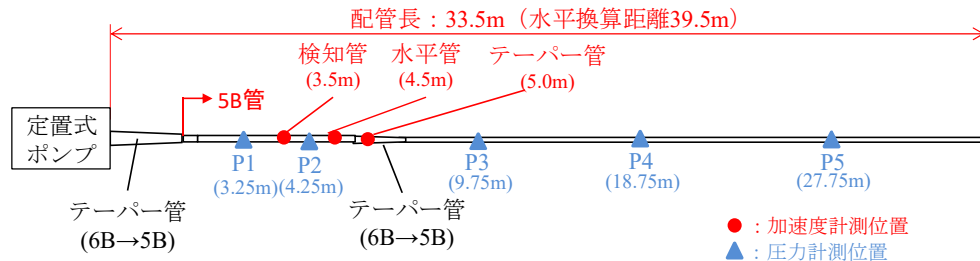


図-7 配管および計器配置図

した。吐出量の設定に際しては、使用したコンクリートポンプの理論吐出能力を考慮したうえで、フレッシュコンクリートの圧送が安定して行える範囲を選定した。

3.5 計測方法

計測は、振動加速度計（圧電式、最大測定加速度 2000m/s^2 ）および圧力計（フラッシュダイヤフラム型、計測容量 10MPa ）を使用し、振動加速度計は配管外周面に直接貼り付け、圧力計の設置には圧力計測用の輸送管を用いた。図-7 に振動加速度計および圧力計の取り付け位置を示す。振動加速度計の取り付け位置は、ポンプ吐出口から 3.5m （水平換算距離： 6.5m （検知管））、 4.5m （水平換算距離： 7.5m （水平管））、 5.0m （水平換算距離： 8.0m （テーパ管））とした。また、圧力計の取り付け位置は、ポンプ吐出口から 3.25m 、 4.25m 、 9.75m 、 18.75m 、 27.75m （水平換算距離： 6.25m 、 7.25m 、 15.75m 、 24.75m 、 33.75m ）の 5 箇所とした。なお、圧送計測では、筒先から排出されたフレッシュコンクリートをホップに戻し、圧送速度を変更後、同一材料に対して繰返し計測を行った。

3.6 実験結果

圧送開始直後においては、全ての配合で閉塞することなく順調に圧送された。しかし、 $s/a+5\%$ のみ圧送開始からおよそ 1 時間後に閉塞を生じる結果となった。以上のことを踏まえ、圧送性評価について検討した結果を示す。

3.6.1 順調圧送時の平均管内圧力と配合条件の関係

図-8 に平均管内圧力の計測結果を示す。平均管内圧力の算出に際して、圧送開始直後と圧送終了直前の数ピストン分の計測値を除き、圧力波形が安定した計測値を平均値として求めた。図-8 より、検知管前後において若干

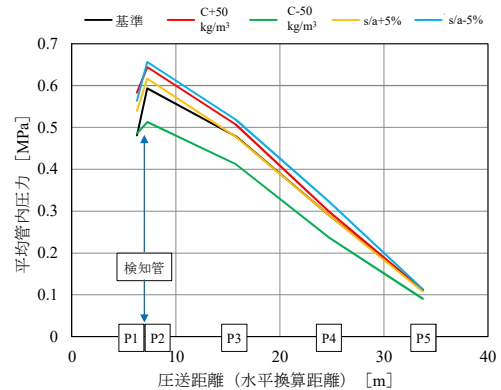


図-8 圧送距離と平均管内圧力の関係（順調圧送時）

管内圧力の変動がみられるが、圧送距離に対して平均管内圧力が線形的に低下していることから、本試験の範囲では、検知管によるコンクリートへの負荷が管内圧力計測に及ぼす影響は小さいと考えられる。

基準配合のケースと比較した場合、単位セメント量をパラメータとした $C+50\text{kg/m}^3$ および $C-50\text{kg/m}^3$ では、 $C+50\text{kg/m}^3$ の平均管内圧力は上昇し、 $C-50\text{kg/m}^3$ では低下する結果となった。これは、前者では単位セメント量の増加に伴い粘性が増し、材料分離抵抗性が高まったのに対し、後者は単位セメント量を減じたことで粘性が低下したことに起因するものと考えられる。また、細骨材率をパラメータとした $s/a+5\%$ および $s/a-5\%$ は、細骨材の減少に伴う材料バランスの影響から $s/a-5\%$ において最も平均管内圧力が高い結果となった。なお、細骨材率を高めた $s/a+5\%$ は塑性的な性状が強く表れる材料ではあったが、順調に圧送が行われている際の平均管内圧力で見ると、基準配合と同程度の値を示した。

3. 6. 2 順調圧送時の振動加速度と配合の関係

図-9～図-11 に $20\text{m}^3/\text{h}$ で圧送した際の配合と形状の異なる輸送管（水平管，検知管，テーパー管）で得られた順調圧送時の加速度波形を各配合条件毎に示す．また，図-12 および図-13 にピーク加速度振幅を示す．ピーク加速度振幅の算出に際して，パワースペクトルを用いて実施した．図-12 および図-13 は，荷卸し時のフレッシュコンクリートの目視観察の結果，圧送の抵抗性が小さい，すなわちピーク加速度振幅が小さくなると想定された配合条件について左から順番に示している．前述より，振動加速度計で得られた波形は，平均管内圧力と同様にフレッシュコンクリートの圧送状態を表しているものと考えられる．しかし，水平管のように圧送されるフレッシュコンクリートへの負荷が小さい輸送管の形状では，配合条件の違いが加速度振幅や波形に表れにくく，圧送中に負荷が生じ易い検知管やテーパー管において，加速度波形に配合の違いが色濃く表れる結果となった．また，図-10 と図-11，および図-12 と図-13 を各々比較した場合，圧送中に負荷が生じる機構は同様でも，形状が異なる検知管とテーパー管では，検知管において配合条件の違いを捉えやすい傾向にある．例えば図-10 と図-11 を比較すると，図-10 において配合条件の違いによる加速度振幅の最大値の違いがより顕著に表れていることや，図-12 と図-13 を比較すると，図-12 ではピーク加速度振幅と配合条件の関係がより明確に捉えられている．

図-10 および図-12 より，加速度波形ならびにピーク加速度振幅と配合条件の関係を検討してみる．基準配合に対し，材料分離抵抗性が劣り材料分離がみられた $s/a-5\%$ は， $s/a+5\%$ に比べてピーク加速度振幅が大きく，ピストンの駆動開始時から加速度振幅が大きく表れている． $s/a+5\%$ については，単位粗骨材量が最も少ない配合であり，荷卸し時の順調圧送時であったため加速度が小さく表れたと推察される．一方，材料分離抵抗性に優れた $C+50\text{kg}/\text{m}^3$ は，ピーク加速度振幅が小さく，加速度波形も安定している．目視観察では粘性の違いはあるものの材料分離抵抗性はほぼ同程度とみられた $C-50\text{kg}/\text{m}^3$ は，圧送に伴う外力が加えられた結果，明らかに加速度の最大値が大きくなっている．これは，単位セメント量の減少とともにペースト分が減り，圧送抵抗が増加した現象を捉えたものと推察される．また，本稿では紙面の関係で図は割愛するが，圧送速度が $15\text{m}^3/\text{h}$ の場合においても配合条件とピーク加速度振幅の関係は同じ傾向を示す結果となった．通常のスランプ試験ではフレッシュコンクリートのコンシステンシーを重力下で評価が，打込み・締固めなどに要求されるフレッシュコンクリートの性能は，外力が加わった場合の挙動を確認することが重要であり，フレッシュコンクリートの施工性能評価⁷⁾に示されるように，外力の与え方がフレッシュコンクリートの材料分離抵抗性や充填性，圧送性の評価に影響することを示し

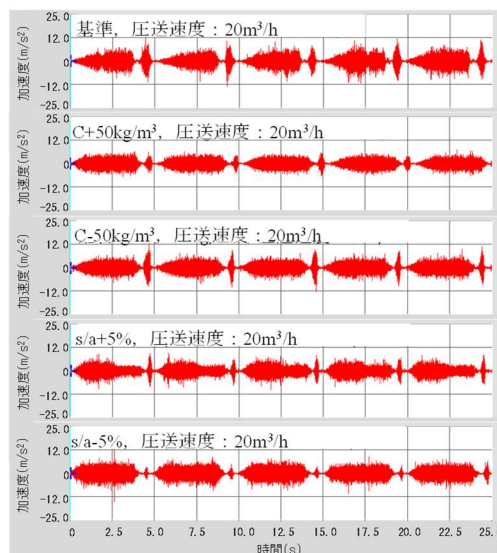


図-9 配合と加速度波形（水平管）

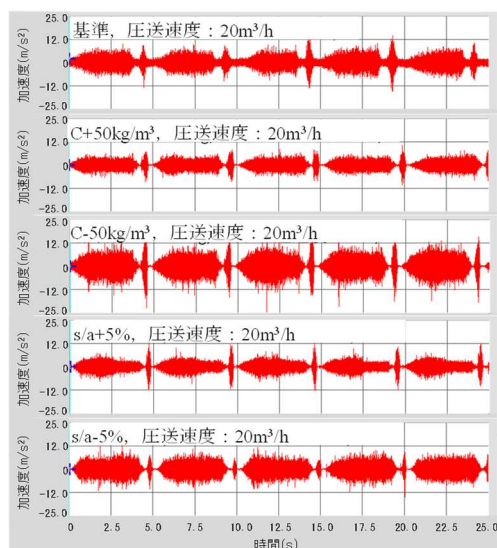


図-10 配合と加速度波形（検知管）

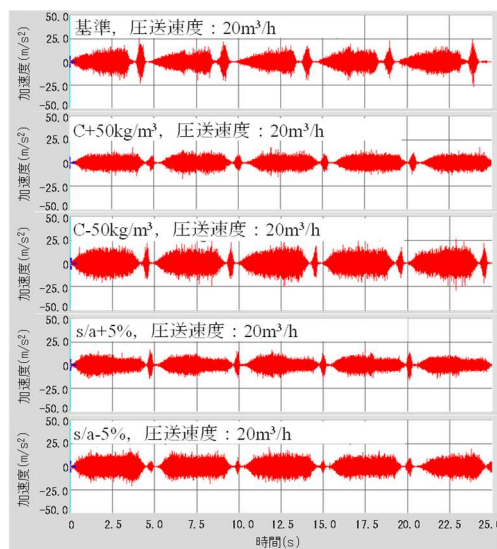


図-11 配合と加速度波形（テーパー管）

た結果と考えられる。

3.6.3 検知管を用いた閉塞性の評価

前項では、順調に圧送された場合の試験結果について報告した。次に、圧送中に閉塞を生じた $s/a+5\%$ に着目する。圧送性の評価に際しては、経時変化に伴いテーパー管（5B→4B）において閉塞が生じた $s/a+5\%$ 、圧送速度 $15\text{m}^3/\text{h}$ の計測結果を用いた。

図-14 に順調圧送ならびに閉塞時の検知管と水平管の加速度振幅の差による評価を、図-15 に平均管内圧力の計測結果を示す。図-14 に示す通り、順調に圧送が行われている場合は、検知管と水平管から得られる加速度振幅の差は小さいが、閉塞時には大きな差が生じていることが判る。この結果は既往の研究⁵⁾と同様であり、検知管がベント管の代替としてフレッシュコンクリートの圧送性評価に適用できることが判る。また、図-15 に示す通り、同時に計測された平均管内圧力においても、順調に圧送されている際は小さかったポンプ近傍の平均管内圧力が、閉塞時に急激に上昇する現象が確認された。このことから、振動加速度計と検知管を用いたフレッシュコンクリートの圧送性評価は、平均管内圧力と同様の現象を捉えることが可能と考えられる。

4. 【シリーズⅡ】検知管を用いたフレッシュコンクリートの簡易圧送性評価の精度向上およびリアルタイムでの圧送性評価

前章では、検知管を用いてフレッシュコンクリートの圧送性をベント管と同様に評価できること、平均管内圧力と同様に配合条件の違いの影響や閉塞時の挙動を捉えられることなどを示した。以下では、検知管と振動加速度計を組合せた簡易圧送性評価手法の精度向上やリアルタイムでの圧送性評価について検討した結果を報告する。

4.1 使用材料および配合条件

表-4、表-5 に実験シリーズⅡで使用した使用材料および配合条件を示す。実験シリーズⅡでは、実験シリーズⅠの検討結果をふまえて圧送性評価の適用性拡大や精度向上を目的として、レディーミクスト工場で JIS 認証されている配合の中でも圧送性が厳しいと考えられる 24-8-20N を基準配合とした。単位水量および単位粗骨材量一定のもと、施工性能指針⁹⁾を参考に、スランプ 8cm のフレッシュコンクリートにおける圧送性を確保するための単位セメント量の下限値の目安（図-16 参照）を下回る配合条件として、基準配合から単位セメント量を $30\text{kg}/\text{m}^3$ 低減した配合を設定した。また、基準配合と同等の粘性を有する配合条件として、単位水量および単位セメント量を一定条件として、粗骨材絶対容積が最大で $0.40\text{m}^3/\text{m}^3$ 程度となるように細骨材率を 3%低減させた配合とした。比較のために、単位セメント量を $30\text{kg}/\text{m}^3$ 増加した配合条件や細

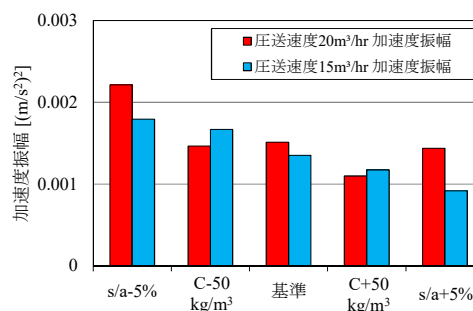


図-12 配合条件とピーク加速度振幅の関係（検知管）

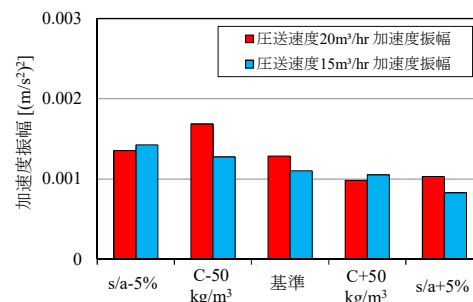


図-13 配合条件とピーク加速度振幅の関係（テーパー管）

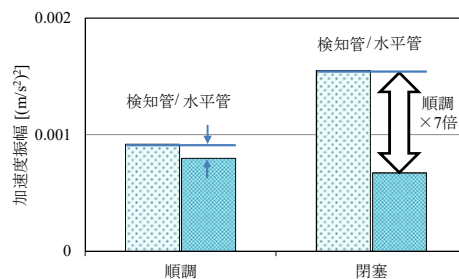


図-14 順調圧送時および閉塞時における検知管と水平管のピーク加速度振幅の差

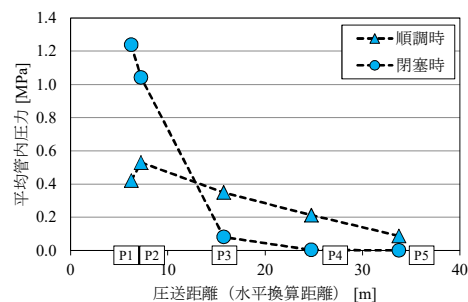


図-15 順調圧送時および閉塞時における平均管内圧力の関係

骨材率を 3%増加した配合条件も追加した。上記 5 配合については実験シリーズⅠと同様に、事前に室内配合試験を実施し、スランプおよび空気量において所要の品質を満足することを確認している。なお、室内配合試験時の品質管理基準は、実機ミキサによる練り混ぜ効率の変動

やアジテータ車による運搬等を考慮して、練上がり直後の目標スランブを $11.0 \pm 1.0 \text{ cm}$ 、目標空気量を $5.0 \pm 0.5\%$ として管理した。荷卸し地点における品質管理は、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」に準拠した。室内配合試験時に配合条件の異なるフレッシュコンクリートの変形性能を比較するため施工性能指針⁹⁾を参考にタンピング試験を実施した。タンピングの前後における目視観察では、C-30kg や s/a-3%の配合はフローの広がり小さく（写真-4）、材料分離傾向にあった。C+30kgの配合については粘性が高い配合であり、s/a+3%の配合についても良質なフレッシュ性状を示した。

4.2 配管条件および圧送方法

図-17に配管図を示す。シリーズⅡでは、コンクリートポンプ車（理論吐出量： $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 、吐出圧力： 5.6 MPa ）を用い、輸送管は外径が 125A（以下、5B）の直管（以下、水平管）を用いた。また、流入側と流出側の外径が異なる輸送管の接続部には、各々 175A（以下、7B）→150A（以下、6B）、6B→5B のテーパ管を用いた。配管の経路は、コンクリートポンプ車の吐出口から、1.0m のテーパ管（7B→6B）、0.35m の T 字管および 1.5m のテーパ管（6B→5B）、0.25m の 15° ベント管と 0.30m のシャッターバルブを設置し、その後、テーパ管などの影響がないと考えられる位置に計測管である検知管を配置した上で、配管長が総延長で 35.9m（水平換算距離：40.9m）となるように 5B の水平管を配管した。また、シリーズⅠと同様に、圧送時の配管内の未充填が管内圧力計測へ及ぼす影響を排除するため、筒先に対して上り勾配を設けることで圧送時に満管状態を維持できるように配慮した。圧送速度は、理論吐出量で 30、40、 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ の 3 水準とした。なお、本稿においては、圧送速度 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ と $50 \text{ m}^3/\text{h}$ の結果を用いて説明する。

4.3 計測方法

シリーズⅠと同様に振動加速度計と圧力計を使用した。なお、計器の仕様はシリーズⅠと同様である。図-17に振動加速度計および圧力計の取り付け位置を示す。振動加速度計の取り付け位置は、ポンプ吐出口から 7.1m（水平換算距離：12.1m（検知管））、8.6m（水平換算距離：13.6m（水平管））とした。また、圧力計は、ポンプ吐出口から 5.7m、8.2m、10.7m、19.2m、27.7m（水平換算距離：10.7m、13.2m、15.7m、24.2m、32.7m）の 5 箇所とした。

4.4 圧送試験に用いたフレッシュコンクリートの性状

表-6に荷卸し時のフレッシュコンクリート試験結果を示す。シリーズⅡで使ったフレッシュコンクリートの配合条件においては、最小の単位セメント量が 244 kg/m^3

表-4 使用材料（実験シリーズⅡ）

項目	記号	種別	密度 [g/cm^3]	骨材の 微粒分量 [%]	骨材の 粗粒率 [FM]
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16	-	-
水	W	工業用水・上澄水	1.00	-	-
山砂	S1	千葉県君津市産	2.61	0.88	2.75
砕砂	S2	栃木県佐野市産	2.63 (2.61)	2.66	3.08
砕石2005	G1	北海道北斗市産	2.70 (2.71)	2.73	6.38
	G2	栃木県栃木市産	2.71	1.02	6.52
混和剤	Ad	AE減水剤(高性能タイプ)	1.04~ 1.10	-	-

() 内の数値は再試験の結果を示す。

表-5 配合表（実験シリーズⅡ）

配合名	W/C [%]	s/a [%]	単位量[kg/m^3]						
			W	C	S1	S2	G1	G2	Ad
基準	59.2	45.6	162	274	632	210			2.74
C+30kg/ m^3	53.2	44.9		304	613	205	518	520	3.34
C-30kg/ m^3	66.2	46.4		244	650	218			2.93
s/a+3%	59.2	48.6		274	673	224	491	491	3.56
s/a-3%	59.2	42.6			590	197	548	547	2.33

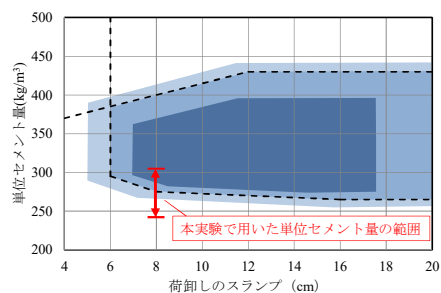


図-16 荷卸しのスランブと単位セメント量との関係⁹⁾

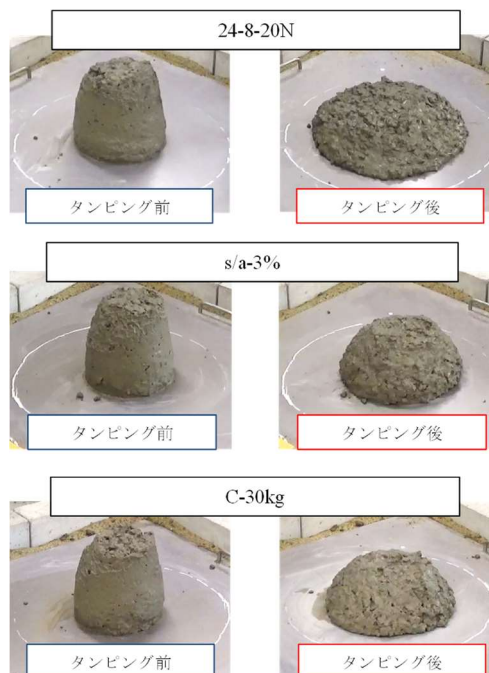


写真-4 異なる配合条件におけるタンピング前後でのフレッシュ性状の違い

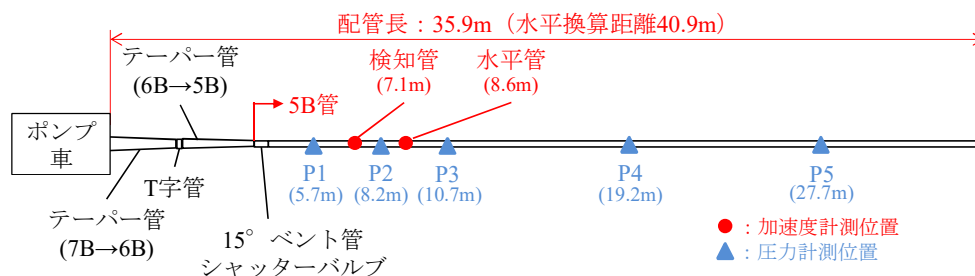


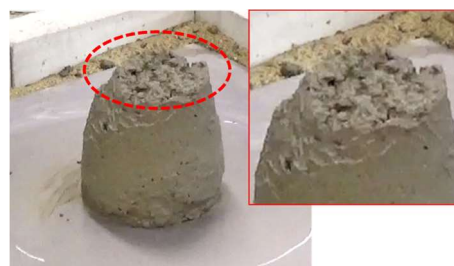
図-17 配管および計器配置図

(表-5 参照)であり、施工性能指針に基づいた検討では圧送が困難であると想定された。また、s/a-3%の配合についても、粗骨材絶対容積が $0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 以上であり同様に圧送が困難であると想定されたにも関わらず、いずれの配合条件でも順調に圧送できる結果となった。配管長が35.9m(水平換算距離で40.9m)と短く、筒先まで5B管を使用したことも要因と考えられるが、荷卸し時のフレッシュコンクリートを目視観察すると上記の想定に反して、事前の室内配合試験に比べ配合条件による明確な差を確認することができず、いずれも良好なフレッシュコンクリートであると判断された。圧送試験結果の報告に先立ち、使用材料の特性を明確にしておく目的で、この理由について若干の検討を加える。セメント量が少なく、ペースト量が少ないC-30kgの配合を例として、室内配合試験時と荷卸し時とのフレッシュ性状の違いを写真-6に示す。写真-6より、両者の配合条件は同一であるが状態は明らかに異なることが判る。本検討に用いた材料の再評価を目的として、圧送試験に使用した骨材と同ロットの骨材を貯蔵ビンの排出口から採取し、骨材試験を実施した。試験は、JIS A 1102「骨材のふるい分け試験方法」およびJIS A 1103「骨材の微粒分量試験方法」に準拠した。その結果、実験シリーズIIで使用した骨材は、 $75\mu\text{m}$ 以下の微粒分が0.9~2.7%と比較的多く含まれており(表-4参照)、骨材中に含まれる微粒分が $30\text{kg}/\text{m}^3$ 以上になることが確認された。この微粒分を粉体量とみなした場合、見掛けの単位粉体量は $275\sim 335\text{kg}/\text{m}^3$ と大幅に増加することになり、これが圧送が順調に行われた要因であると考えられた。一方、事前の室内配合試験で用いた骨材は、骨材準備における試料調整の過程で自然に微粒分がふるい落とされ、圧送試験で使用した骨材よりも微粒分量が少ない傾向にあったものと推察される。圧送試験で使用したフレッシュコンクリートは貯蔵ビンから直接排出された骨材を使用するため、室内配合試験で確認したフレッシュコンクリートよりも良好な性状を有していたと考えられる。また、図-18のふるい分け試験に示す通り、骨材粒径15mm以上のものが10%程度と骨材粒径が全体的に細かいことも順調に圧送された要因の1つとして考えられる。

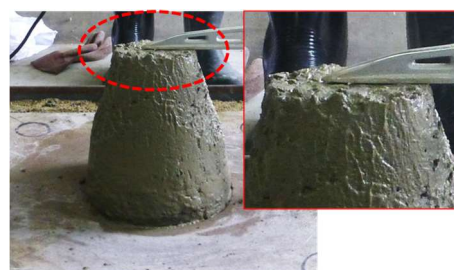
骨材試験の結果から、骨材に含まれる微粒分を粉体量

表-6 荷卸し時のフレッシュコンクリートの試験結果(シリーズII)

配合名	W/C [%]	s/a [%]	スランプ [cm]	空気量 [%]	C.T [°C]	圧送
基準	59.2	45.6	10.0	3.5	19.4	順調
C+30kg/m ³	53.2	44.9	10.0	3.5	21.2	順調
C-30kg/m ³	66.2	46.4	9.5	4.1	19.6	順調
s/a+3%	59.2	48.6	8.5	4.0	19.9	順調
s/a-3%	59.2	42.6	9.5	4.9	19.6	順調



室内配合試験時(配合選定時)



実機試験時(圧送実験時)

写真-6 室内試験時と実機試験時のフレッシュ性状の違い

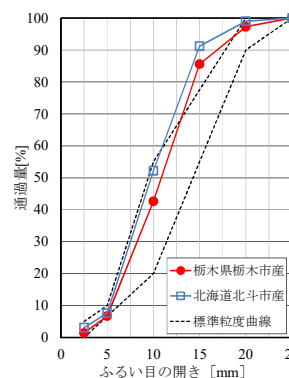


図-18 粗骨材の粒度分布

として考慮し修正した配合を表-7に示す。

4.5 実験結果

4.5.1 平均管内圧力と配合の関係

30m³/h および 50m³/h で圧送した際の平均管内圧力を図-19 および図-20 に示す。平均管内圧力の算出については、シリーズ I と同様である。図-19 より、圧送速度が 30m³/h の場合、平均管内圧力は単位セメント量が多くペースト部の粘性が高いと考えられる C+30kg で最も高い値を示しており、粘性の影響が明確に表れる結果となった。一方、図-20 より、圧送速度が 50m³/h と速くなった場合、平均管内圧力は s/a-3% が最大を示し、粘性以外にも単位粗骨材絶対容積の影響が表れているものと推察される。圧送速度と単位粗骨材絶対容積の関係が管内圧力に及ぼす影響については、今後の検討課題とする。

4.5.2 振動加速度と配合の関係

図-21 および図-22 に 30m³/h および 50m³/h で圧送した際の各配合条件のピーク加速度振幅および差分（平均値）を示す。加速度振幅はデータ処理に要する時間等を考慮し、シリーズ I とは異なり、リアスペクトルにより算出を行った。図-21 および図-22 は、室内配合試験の際の目視観察の結果や配合条件から、圧送の抵抗性が高くなる、すなわちピーク加速度振幅が大きくなると想定された配合条件について左から順番に示している。

なお、コンクリートポンプ近傍での加速度計測では、ポンプ由来のノイズが計測値に含まれる場合がある。そのため、ピーク加速度振幅の算出に際しては、FFT 解析を実施し、ポンプ由来のノイズがピーク周波数 0～1000Hz に表れ、ピーク加速度振幅に含まれる場合があるため、ピーク周波数を確認した上で求めた。なお、骨材由来以外のノイズについても配管内の水を圧送することで別途抽出し、その影響を取除いた。

図-21 および図-22 より、検知管および水平管で得られたピーク加速度振幅ならびに両者のピーク加速度振幅の差分は、圧送速度の増加に伴い若干増加するものの、配合条件の違いの影響については圧送速度に依らず同様の傾向を示し、粗骨材絶対容積が大きい s/a-3% が最も高い値を、基準配合（24-8-20N）が最も低い値を示した。

4.5.3 平均管内圧力と振動加速度の関係

図-19 と図-20 と、図-21 と図-22 を比較すると、配合条件の違いが平均管内圧力とピーク加速度振幅に及ぼす影響の仕方は両者で必ずしも一致していない。平均管内圧力は C+30kg で最も大きな値を、C-30kg で最も小さい値を示すなど、フレッシュコンクリートが有する粘性が支配的な要因となっており、単位粉体量の多い配合条件の場合に平均管内圧力を用いることは有用であると考えられる。一方、加速度計測は、粗骨材絶対容積が大きい

表-7 骨材に含まれる微粒分を考慮した修正配合表

配合名	W/C [%]	s/a [%]	単位量[kg/m ³]						
			W	C+P	S1	S2	G1	G2	Ad
基準	59.2	45.6	162	306	626	204			2.74
C+30kg/m ³	53.2	44.9		335	608	200	504	514	3.34
C-30kg/m ³	66.2	46.4		276	644	212			2.93
s/a+3%	59.2	48.6		305	667	218	478	485	3.56
s/a-3%	59.2	42.6		306	585	192	533	540	2.33

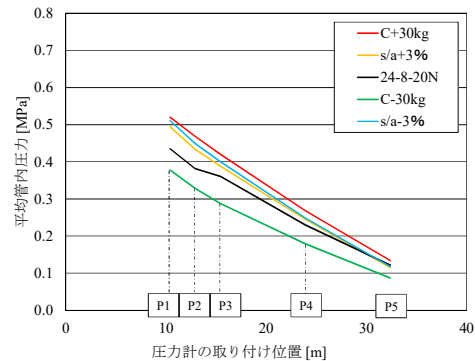


図-19 30m³/h 圧送時の平均管内圧力

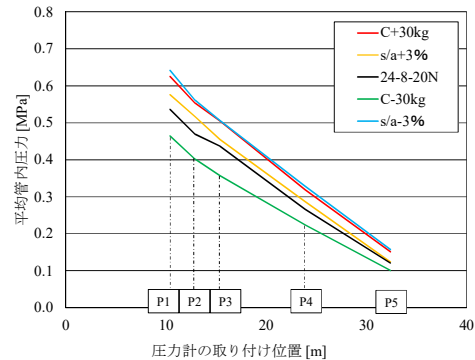


図-20 50m³/h 圧送時の平均管内圧力

s/a-3% が最大を示し、粗骨材の配管内での停滞や粗骨材絶対容積の影響を捉えていると考えられ、単位粉体量が少なくアーチングによる閉塞を生じ易い配合条件の場合に有用な手法であると考えられる。いずれの手法も圧送性の評価に有益な方法と考えられるため、配合条件に応じてそれぞれの手法を選択する、もしくは併用することで圧送性評価の精度向上につながると考えられる。

4.5.4 加速度計測によるリアルタイムな圧送性評価の試み

振動加速度計によって得られた加速度波形を計測と同時に解析、可視化し、リアルタイムに圧送性のモニタリングを行うシステムを開発し、圧送性の評価を試みた。今回開発した圧送性評価のモニタリングシステムは、検知管と水平管のピーク加速度振幅の差分を算出し、差分の大きさに応じて閉塞の危険性をリアルタイムで評価するシステムである。30m³/h および 50m³/h で圧送した際の加速度計測結果を用いてリアルタイムに圧送性の評価を

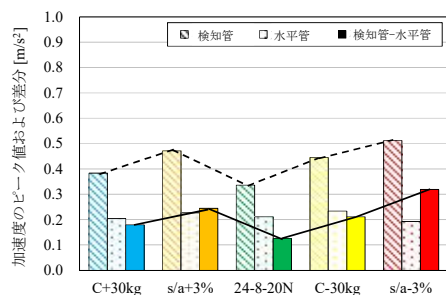


図-21 30m³/h 時のピーク加速度振幅および差分（平均値）

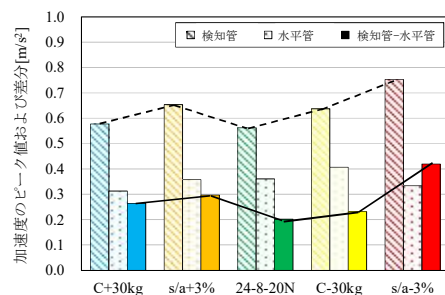


図-22 50m³/h 時のピーク加速度振幅および差分（平均値）

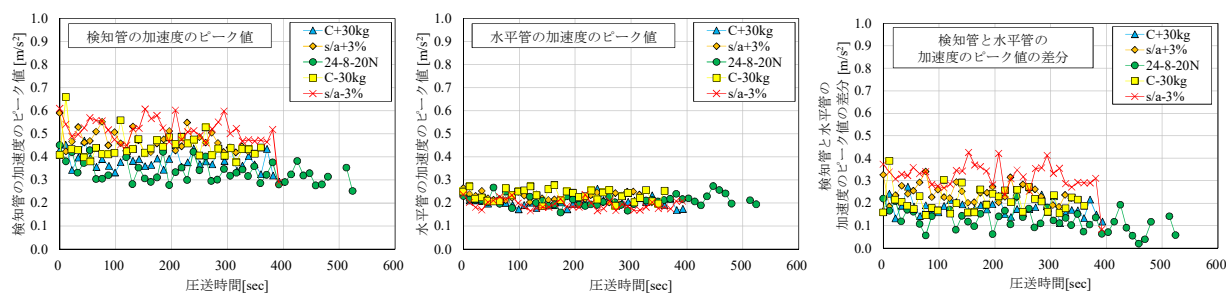


図-23 加速度計測によるリアルタイムな圧送性評価例（圧送速度 30m³/h）

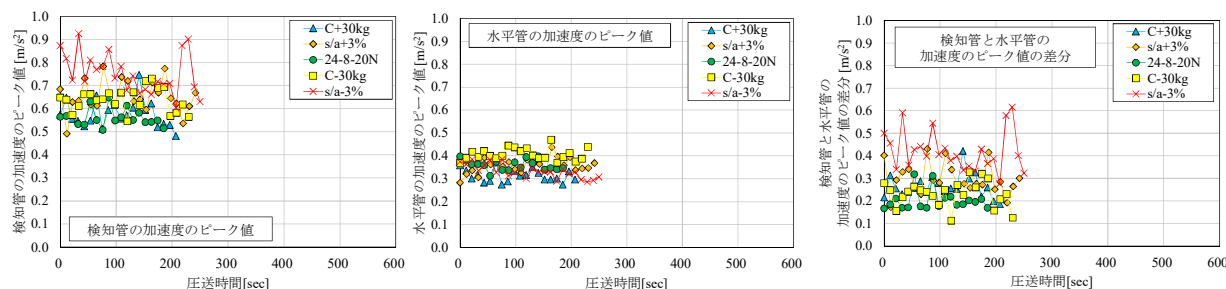


図-24 加速度計測によるリアルタイムな圧送性評価例（圧送速度 50m³/h）

行った例を図-23 および図-24 に示す。水平管から得られるピーク加速度振幅は、いずれの配合条件でも圧送中に大きな変動は認められない。一方、検知管により得られるピーク加速度振幅は水平管と比較して変動が大きく、圧送負荷が顕著に表れる結果となっている。また、圧送速度が速くなると、検知管と水平管のピーク加速度振幅の差分が大きくなる傾向が認められた。今回の実験では、いずれの配合条件でも順調な圧送が行われたため、配合条件の違いの影響はさほど顕著ではないが、特に粗骨材絶対容積が大きい s/a-3% のケースでは、他の配合条件と比較してピーク加速度振幅の差分が大きく、圧送速度が速い場合、時系列の変動も大きく生じていることが判る。また、他の配合条件と比較して粘性が低い C-30kg のケースでは、圧送速度に依らず水平管においてもピーク加速度振幅が上位に位置する傾向を示している。これは、他の配合条件に比べペースト量が少ないため、これに伴う圧送負荷の変化が計測結果に表れたものと推察される。加速度計測においては、瞬間的な衝撃や配管の左右での衝撃の違いなどから計測結果にばらつきが生じることは避けたいが、本検討で示したように、リアルタイムかつ

連続的に評価を行うことで、フレッシュコンクリートの配合条件の違いや圧送速度の影響を概ね確認することができる。

5. まとめ

本研究では、単位セメント量や単位粗骨材量等、配合条件の異なるフレッシュコンクリートに対し、シリーズⅠでは振動加速度計と検知管を組み合わせることで、簡易圧送性評価手法の適用性や閉塞の評価を、またシリーズⅡでは簡易圧送性評価の精度向上やリアルタイムでの評価を試みた。以下、得られた知見を示す。

- (1) 管内圧力計測と同様に、検知管で得られた加速度波形および振動加速度を用いることで、配合条件の違いやこれに起因する圧送性の変化を確認できる。
- (2) 閉塞現象についても管内圧力計測と同様に、振動加速度計を用いることで概ね捉えることができる。
- (3) 検知管で得られたピーク加速度振幅を用いることで、圧送速度が変化した場合でも圧送性の評価を行うことが可能である。
- (4) 検知管と水平管のピーク加速度振幅の差分を用いる

ことで、ベント管と水平管を用いた従来の手法と同等の圧送性評価を行うことができる。

- (5) 加速度計測は粗骨材の配管内での停滞や粗骨材絶対容積などの影響を捉えられるため、単位粉体量が少なく、アーチングを生じ易い配合条件での圧送性評価に有用である。
- (6) 検知管を用いた簡易圧送性評価手法をポンプ近傍に用いることで、配管経路に依らず、平均管内圧力計測では捉えることが困難であった粗骨材の圧送、停滞、閉塞時の状況を捉えることができるため、より高精度な圧送性評価が可能となる。

以上より、振動加速度計を用いた既往の簡易圧送性評価手法に今回新たに提案した検知管を組み合わせることで、配合条件の違いが圧送性に及ぼす影響を概ね捉えることが可能となる。また、リアルタイムかつ連続的に計測、分析を行うことで、施工中の圧送状況やコンクリートの品質の偏りなども現地で確認することができ、リアルタイム計測を行うことで、不具合の早期発見や高精度な品質管理を行うことも可能となる。

著者らは現在、フレッシュコンクリートの各種フレッシュ特性と圧送性との関係について別途検討を進めており^{10), 11)}、今後はフレッシュ試験により得られる情報と今回提案した簡易圧送性評価手法を組み合わせ、より早期に圧送時の不具合を検知できるよう評価手法の更なる高度化を図っていく所存である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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計測手法における配管条件及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
- 4) 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の評価～, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.70, V-214, pp.427-428, 2015
- 5) 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-214, pp.429-430, 2015
- 6) 中島良光, 南浩輔, 橋本紳一郎, 平川恭奨: 振動加速度計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
- 7) コンクリート技術シリーズ コンクリートの施工性能照査・検査システム研究小委員会 (341 委員会) 第2期委員会報告書, 土木学会, 2013.11
- 8) 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, 報告6, 2015
- 9) 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], 土木学会, 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
- 11) 太田健司, 南浩輔, 橋本紳一郎, 北野潤一: フレッシュコンクリート試験と平均管内圧力による圧送性評価の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1219-1224, 2017