

論文 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

太田 健司*1・南 浩輔*2・橋本 紳一郎*3・北野 潤一*4

要旨: 本研究では、配管に加速度センサーを取り付けて行うコンクリートの簡易圧送性評価において、特殊な形状を持つ輸送管（検知管）を組み合わせることで、圧送性評価の精度向上ならびに適用範囲の拡大について検討した。その結果、特殊な形状を持つ輸送管（検知管）をポンプ近傍に配置することで、配管経路に依らず様々な配合のコンクリートの圧送性を評価することができることを示した。また、管内圧力と同様に圧送中の配管から得た振動加速度を用いることで、配合条件の違いを評価できることを示した。

キーワード: 圧送性, 閉塞, 加速度, 管内圧力, 材料分離抵抗性, 検知管

1. はじめに

近年、コンクリート施工は土木・建築を問わずコンクリートポンプを用いた打込みが主流であり、搬送効率の飛躍的な向上が図られている。一方、使用材料の多様化や天然骨材の枯渇ならびに混和剤の普及に伴い、多様なコンクリート配合が産み出され、同じスランプを有する配合であっても、施工性能が大きく異なる状況となっている。更に、施工条件の多様化により長距離の圧送や100mを超える高所への搬送にもポンプが用いられ、配管の破裂による事故も重大化している。また、熟練労働者の減少に伴い、圧送中のトラブルが数多く報告される状況となっている。

これらに対し、著者らは施工中のコンクリートの圧送状態を現地で確認する手法として、加速度センサー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を直接配管に取り付けた加速度センサー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、加速度の波形やFFT解析により、加速度ピーク値や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)}。

しかし、施工環境により配管経路や用いられる配合は様々であり、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、必要な箇所に計測対象となる輸送管が設置されているとも限らない。そこで、全ての配管経路やコンクリートに対し定量評価が可能となるよう、特殊な形状を持つ輸送管を開発し（以下、検知管と記す）、加速度計測による圧送性評価の精度向上ならびに適用性の

拡大を図った。以下、得られた結果を報告する。

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。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る 27-8-20N を基準配合：No.1 とし、基準配合 No.1 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/m³ 増減させた配合をそれぞれ配合名：No.2, No.3 とし、基準配合 No.1 に対して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 5%増減させた配合を配合名：No.4 と No.5 とした 5 種類の配合を用いた。室内配合試験による品質管理は、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 ± 2.5cm, 空気量が 4.5 ± 1.5%となるよう、練上がりの目標スランプを 12.0 ± 1.0cm, 目標空気量を 5.0 ± 0.5%とし

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
砕砂	S1	栃木県栃木市鍋山町産	2.66
	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 配合条件と荷卸し時のフレッシュ試験結果

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						Ad	スランプ (cm)	空気量 (%)	CT (°C)
			W	C	S	G(碎石)						
No.1	54.9	47.4	162	295	617	259			3.688	10.0	3.9	24.7
No.2	47.0	46.2		345	588	246	497	497	4.140	8.5	3.3	23.8
No.3	66.1	48.5		245	646	269			3.553	7.0	5.4	23.2
No.4	54.9	52.4		295	684	285	450	450	3.688	9.0	5.0	24.0
No.5	54.9	42.4		553	231	544	544		2.950	9.0	3.8	23.7

*1 前田建設工業（株） 技術研究所 工修（正会員）

*2 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）

*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教 博（工）（正会員）

*4 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻

て管理した。なお、荷卸し地点における品質管理は JIS A 5308「レディミクストコンクリート」に準拠した。

2.2 室内配合試験によるフレッシュ性状の目視観察

表-3に室内配合試験時のフレッシュ試験結果を、写真-1 (a) から (e) にフレッシュ性状を示す。

室内配合試験時のフレッシュ性状は、単位水量および単位粗骨材量を一定条件のもと、単位セメント量を増減させた配合 No.2 (C+50kg/m³)、No.3 (C-50kg/m³) は、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-1 (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、配合 No.4 (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-1 (d) 参照)。また、配合 No.5 (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-1 (e) 参照)。本試験に用いたコンクリートは、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。なお、一部の配合で目標としたフレッシュ性状を満たしていないが、これらの配合については概ね目標としたフレッシュ性状が確認できたため、出荷時の混和剤量を微調整し、目標品質を満足するよう対応した。

2.3 荷卸し時のフレッシュ性状

表-2に荷卸し時のフレッシュコンクリートの試験結果を示す。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。各配合は、荷卸し時に所要の条件を満たしていることを確認した後、圧送試験に用いた。なお、荷卸し時の目視観察結果は後述する。

2.4 配管条件および圧送方法

図-1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

表-3 室内配合試験時のフレッシュ試験結果

配合名	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T (°C)
No.1	54.9	47.4	11.5	4.6	24.0
No.2	47.0	46.2	11.5	5.0	23.0
No.3	66.1	48.5	10.5	5.0	23.0
No.4	54.9	52.4	11.5	5.1	23.0
No.5	54.9	42.4	13.5	4.7	22.5



(a) 配合 No. 1 (基準配合)



(b) 配合 No. 2 (C+50kg/m³)



(c) 配合 No. 3 (C-50kg/m³)



(d) 配合 No. 4 (s/a+5%)



(e) 配合 No. 5 (s/a-5%)

写真-1 室内配合試験時のフレッシュ性状

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。

圧送速度は、理論吐出量で15m³/hと20m³/hの2水準とした。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、コンクリートの圧送が安定して行える範囲を選定した。

2.5 計測方法

計測は、加速度センサーおよび圧力計を使用し、加速度センサー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-1に加速度センサー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、ポンプ吐出口からの水平換算距離で6.5m（検知管）、7.5m（水平管）、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6.25m、7.25m、15.75m、24.75m、33.75mの5箇所とした。

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形状を有している。検知管は最適な形状を検証中であり、本検討では、負荷が異なる2種類の検知管（以下、検知管A、検知管Bと記す）を用いた。ここで検知管Bは検知管Aよりも中央部への絞りが厳しい（より負荷がかかる）形状となっている。検知管Aは全ての配合に適用し、検知管Bは配合No.1、No.4、No.5に適用した。写真-2に検知管A、検知管Bを示す。

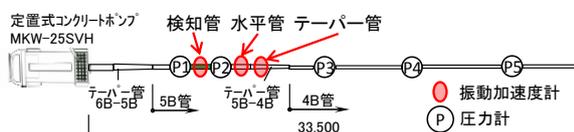


図-1 配管図



写真-2 検知管

3. 管内圧力および振動加速度と配合の関係

3.1 平均管内圧力と配合の関係

図-2に荷卸し時に実施したタンピング試験の結果を示す。図-3および図-4に配管経路に検知管Aおよび検知管Bを設置した際の管内圧力の計測結果を示す。なお、管内圧力は各計測点において左右と上側の3点ずつ圧力計を設置しているため、その平均値を平均管内圧力として算出した。

検知管前後において若干管内圧力の変動がみられるが、圧送距離の延長とともに平均管内圧力が低下しており、どちらの検知管を配した場合も同様の傾向を示した。このことから、本試験で用いた範囲では、検知管によるコンクリートへの負荷の差が管内圧力計測に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図-2より、図中の各凡例の（ ）内の数値はタンピング試験実施時に、フレッシュコンクリートに割れが発生したときのタンピング回数を示している。図-2および目視観察から荷卸し時のフレッシュ性状は、配合No.5

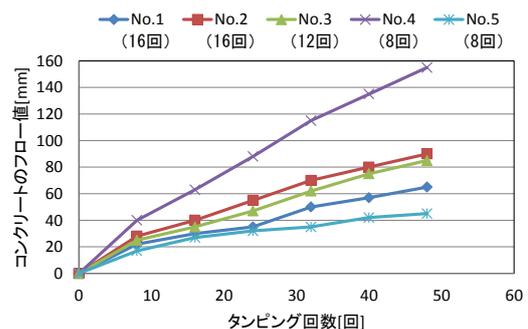


図-2 荷卸し時のタンピング試験結果

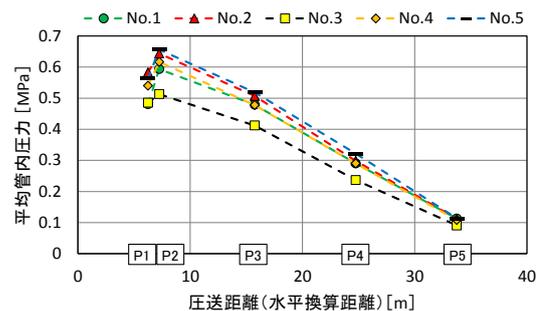


図-3 平均管内圧力と圧送距離および配合（検知管A）

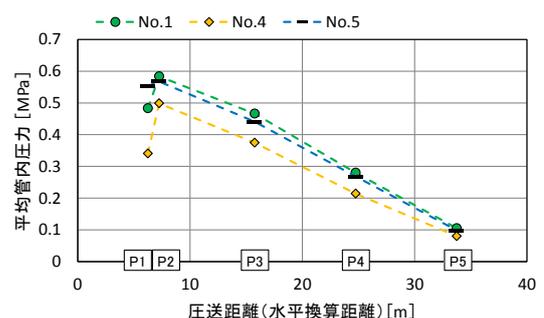


図-4 平均管内圧力と圧送距離および配合（検知管B）

(s/a-5%) は少ないタンピング回数で割れが発生するなど材料分離傾向にあり、配合 No.2 (C+50kg/m³) は材料分離抵抗性が高く、配合 No.1 (基準配合)、No.3 (C-50kg/m³) は割れが発生するタイミングやフローの値に多少の差はあるものの、目視観察の結果、ほぼ同程度の材料分離抵抗性を有していると判断された。また、No.4 (s/a+5%) では荷卸し直後は良好なフレッシュ性状を示したが、タンピング試験などのように外力が加わるとフレッシュコンクリートに割れが生じやすいことや、短い時間で締まりが生じるなど、変形性能が低下する傾向がみられた。平均管内圧力は、基準配合である No.1 を基準とした場合、単位セメント量をパラメータとした配合 No.2 (C+50kg/m³) および配合 No.3 (C-50kg/m³) 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配合 No.2 (C+50kg/m³) の平均管内圧力は上昇し、単位セメント量を減じたことで粘性が低下した配合 No.3 (C-50kg/m³) は、平均管内圧力が低下する結果となった。また、細骨材率をパラメータとした配合 No.4 (s/a+5%) および配合 No.5 (s/a-5%) は、細骨材の減少に伴う材料分離の影響から配合 No.5 (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、細骨材率を高めた配合 No.4 (s/a+5%) は塑性的な性状が強く表れる状態ではあったが、初期の順調に圧送が行われている際の平均管内圧力は、配合 No.1 (基準配合) と同程度の



(a) 荷卸し時



(b) 1時間経過後

写真-3 フレッシュ性状の経時変化(配合 No.4(s/a+5%))

値を示した。写真-3 (a), (b) に配合 No.4 (s/a+5%) の荷卸し時のフレッシュ性状と約1時間経過後のフレッシュ性状を示す。フレッシュ試験の結果は、荷卸し時のスランブが9.0cm、空気量が5.0%であったのに対し、経時後はスランブが4.5cm、空気量が4.4%と、スランブが荷卸し時より大きく低下する結果となった。

3.2 振動加速度と配合の関係

図-5から図-7に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示す。また、図-8および図-9に加速度振幅のピーク値とその時の周波数を示す。加速度振幅のピーク値とは、本計測で得られた計測結果をFFT解析し、その際の加速度振幅の最大値のことである^{1), 2)}。本手法は、前述した通り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て生じる微細な振動を直接配管に取り付けた加速度センサーにより計測する方法であるため、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抵抗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コンクリートへの負荷が小さい輸送管の形状では、配合の違いが加速度や波形に表れにくく、圧送中に負荷が生じやす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-6および図-7ならびに図-8および図-9を比較した場合、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、検知管においてより明瞭に配合の違いが表れている。例えば図-6と図-7を比較すると、図-6において配合の違いによる加速度の最大値がより顕著に表れていることや、図-8と図-9を比較すると、図-8において加速度振幅のピーク値から配合による圧送性の違いがより明確に表れている。この理由として、スランブ試験のようにコンクリートのコンシステンシーを重力下で評価する試験に対し、打込み・締固めなどに要求される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、コンクリートの施工性能評価⁹⁾に示されるように、外力の与え方が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た結果と考えられる。

図-6および図-8より、加速度波形ならびに加速度振幅のピーク値から配合を評価した場合、基準配合 No.1 に対し、材料分離抵抗性が劣り材料分離がみられた配合 No.5 (s/a-5%) は、加速度振幅のピーク値が大きく、ピストンの駆動開始時から加速度が大きく表れている。一方、材料分離抵抗性に優れた配合 No.2 (C+50kg/m³) は、加速度振幅のピーク値が小さく、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配合 No.3 は、圧送に伴う外

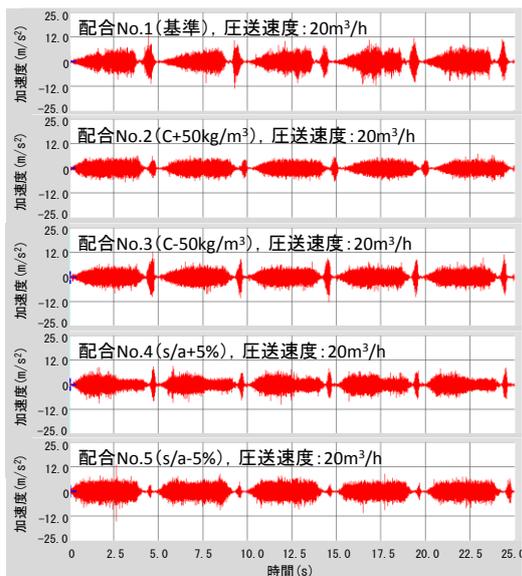


図-5 配合と加速度（水平管）

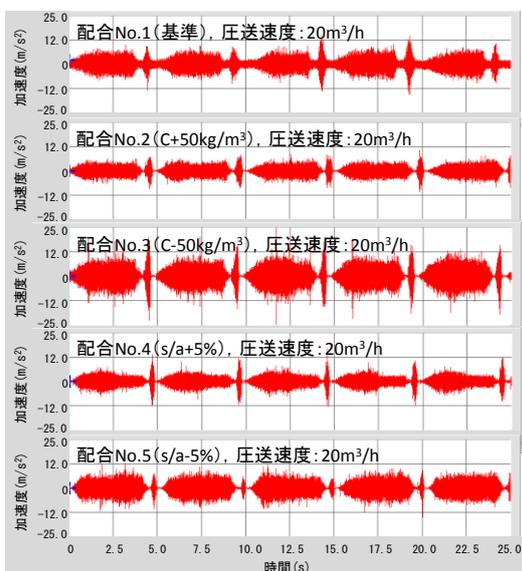


図-6 配合と加速度（検知管）

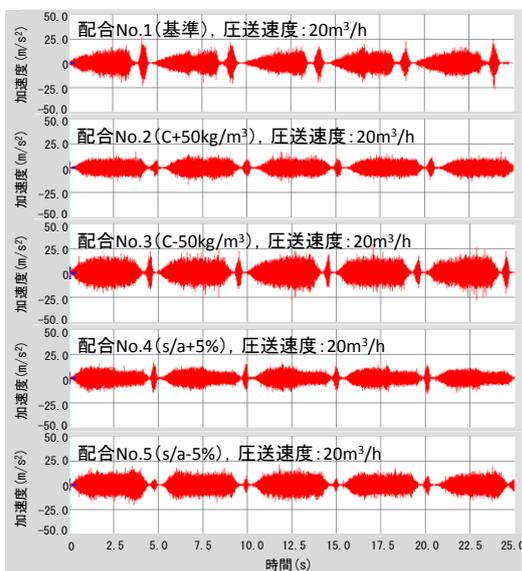


図-7 配合と加速度（テーパー管）

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、圧送速度が異なっても配合と加速度振幅のピーク値の関係は同じ傾向を示す結果となった。なお、配合 No.4 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ものと推察される。

4. 検知管を用いた圧送時の閉塞性の評価

著者らは既往の研究において、検知管をポンプ近傍に設置し、水平管とともにそれぞれから得られた加速度を用いることで、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⁵⁾。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を検知管において取得している可能性がゼロではないと考え、本試験では、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のみによる検知管の性能確認を実施した。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、配合 No.4 (s/a+5%)、圧送速度 15m³/h の計測結果を用いた。

図-10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-11に平均管内圧力の計測結果を示す。図-10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^{4),7)}と同様であり、検知管がベント管の代替として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-11に示す通り、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、加速度センサーと検知管を用いた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であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、配管に加速度センサーを取り付けて行うコンクリートの簡易圧送性評価において、特殊な形状を持つ輸送管（検知管）を組み合わせることで、圧送性評価の精度向上ならびに適用範囲の拡大について検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 管内圧力と同様に、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の違いや圧送性を確認できる。
- (2) 閉塞などの現象を管内圧力計測と同様に、加速度センサーを用いることで捉えることができる。

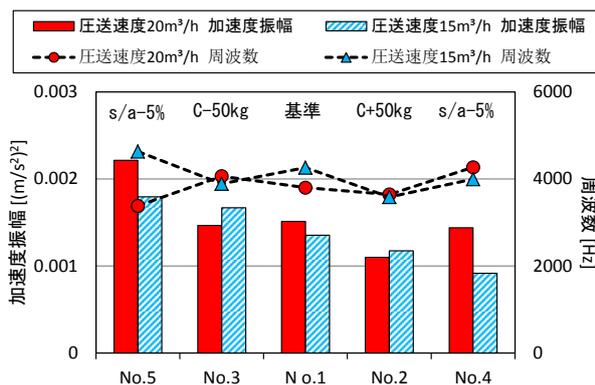


図-8 配合と加速度振幅のピーク値（検知管）

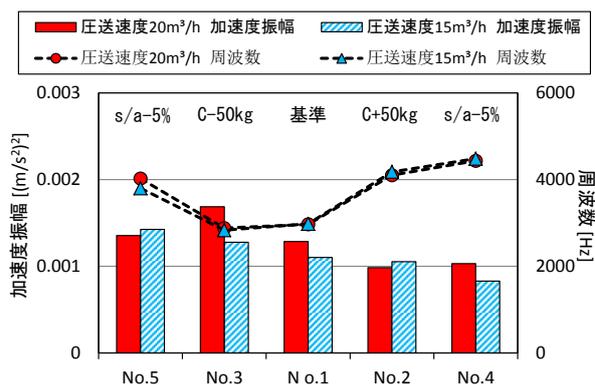


図-9 配合と加速度振幅のピーク値（テーパ管）

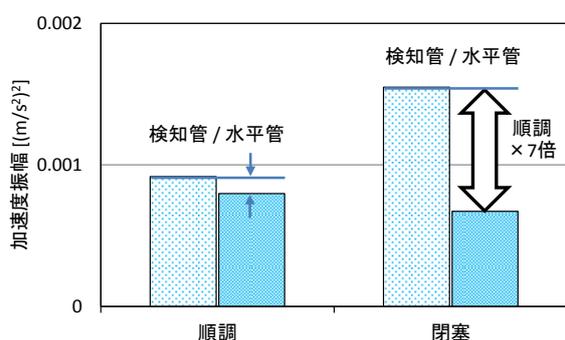


図-10 検知管と水平管の加速度振幅の差による評価

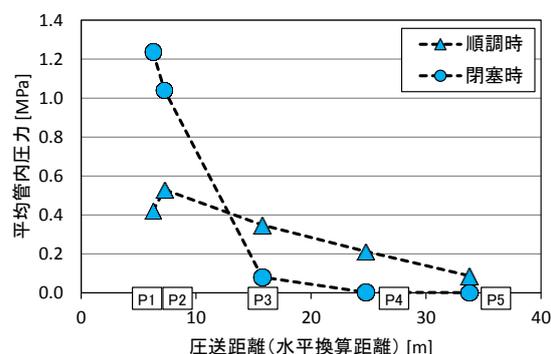


図-11 平均管内圧力と圧送距離

- (3) 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、異なる圧送速度においても配合の違いを確認することができる。
- (4) 検知管と水平管の振動加速度の差を用いることで、ベント管と水平管を用いた従来の手法と同等のコンクリートの圧送性評価を行うことができる。
- (5) 検知管をポンプ近傍に配置することで、配管経路に依らず様々な配合のコンクリートの圧送性を評価することができる。

今回得られた結果から、コンクリートの簡易圧送性評価に検知管を組み合わせることで、配合条件の違いを明確に捉えることが可能となり、圧送性評価の精度向上が図れると考えられる。また、配管を適用範囲としていた本手法をコンクリートポンプ車に展開することも可能となるため、土木・建築を問わずコンクリートポンプを用いた工事の安全性向上、不具合防止に貢献できると考える。今後、システム化を行い実施工への適用を進めていく。

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) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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