

報告 銅スラグ細骨材を用いた重量コンクリートの圧送性に関する実験的検討

黒岩 義仁^{*1}・長谷川 豊^{*2}・橋本 親典^{*3}

要旨： ブリーディング抑制のために粒度および微粒分の粒形を調整した銅スラグ細骨材を用いた重量コンクリートの圧送性試験を行い、圧送によるコンクリートの品質の変化および管内圧力損失を評価した。その結果、圧送前後におけるフレッシュ性状については、普通コンクリートの場合と同等の範囲であった。また、圧縮強度および静弾性係数については、圧送前後で大差なかった。さらに、水平管 1m 当りの管内圧力損失およびベント管、垂直管の水平換算長さは、普通コンクリートと同等であることが明らかになった。

キーワード： 銅スラグ細骨材、重量コンクリート、圧送性、管内圧力損失、水平換算長さ

1. はじめに

近年、地球温暖化、環境保全および資源の枯渇に対応するため、産業副産物をコンクリート用骨材として有効利用することが期待されている。これまで、著者らは、銅スラグ細骨材の普及拡大を目的に、銅スラグ細骨材の課題であるコンクリートのブリーディング抑制について検討を進めてきた。その結果、銅スラグ細骨材の粒度および微粒分の粒形を調整することで、これを細骨材として単独使用しても、ワーカブルなコンクリートが製造可能で、かつコンクリートのブリーディングを抑制できることを見出した^{1),2)}。

コンクリートの現場打設ではコンクリートポンプによる施工が主流である。しかし、これまで銅スラグ細骨材を大量使用した重量コンクリートの圧送性に関する報告事例は極めて少ない^{3),4)}。

そこで、この粒度および粒形を調整した銅スラグ細骨材を単独使用した重量コンクリートの圧送性の評価試験を行った。試験では、圧送前後のフレッシュ性状、強度性状、管内圧力損失および長距離圧送を想定し、コンクリートを配管内で循環した場合の性状を評価した。本報は、本検討において得られた結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材には粒度および粒形を調整し、JIS A 5011-3に規定される 2.5mm 銅スラグ細骨材に適合する小名浜製錬社製 CUS2.5 を、粗骨材には福島県いわき市大久町産山砂利 2505 を使用した。混和剤には、リグニンスルホン酸系 AE 減水剤を用いた。

コンクリートの配合は、防波堤築造における上部コンクリートの実工事に適用される配合とし、単位容積質量は 2500kg/m³ 以上、W/C は 47.7%、筒先での目標スランプは 12.0±2.5cm、目標空気量は 4.5±1.5% とした。なお、荷卸し時の目標は、圧送によるスランプおよび空気量の低下を考慮して、目標スランプは 13.0±2.5cm、目標空気量は 5.0±1.5% とした。

2.2 圧送方法

(1) 配管

配管と圧力計の位置を図-1に示す。圧送管は 5B(125A)を用い、配管実長は 79.2m で、ブームを併用して、ベント管 4 箇所、垂直管 1 箇所、傾斜管 1 箇所、水平換算距離は 127.0m の配管とした。なお、本実験では

表-1 使用材料

材料		記号	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16g/cm ³
細骨材	2.5mm 銅スラグ細骨材	CUS2.5	密度 3.50g/cm ³ , 吸水率 0.43%, F.M.2.44
粗骨材	山砂利	G	密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 0.87%, F.M.6.86
混和剤	AE 減水剤標準型	AD	リグニンスルホン酸系

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AD (C×%)	単位容積 質量(kg/m ³)
		W	C	CUS2.5	G		
47.7	43.0	167	350	1019	1004	1.0	2540

*1 三菱マテリアル（株） セメント事業カンパニー生産部セメント研究所（正会員）

*2 小名浜製錬（株） 小名浜製錬所技術部技術課

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博（正会員）

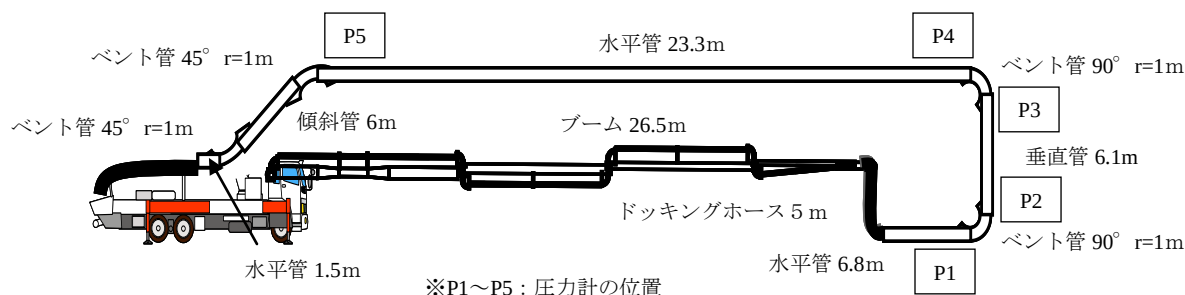


図-1 配管構成

表-3 コンクリートポンプの仕様

最大理論 吐出量 (m ³ /h)	最大理論 吐出圧力 (MPa)	コンクリートシリンダー				シリンダー 比	ブーム	
		数	直径 (mm)	長さ (mm)	容積 (m ³)		形式	長さ (m)
110	7.85	2	210	1600	0.0554	0.227	3 段 360° 全旋回油圧屈折式	26.5

ミキサー船による海上打設を想定し、垂直管を設置した。水平換算距離は、土木学会「コンクリートのポンプ施工指針[2012年版]」⁵⁾（以下、土木ポンプ指針とする）に記載されている普通コンクリートの水平換算長さで換算した。管内圧力は、P1～P5の5箇所に圧力計を設置して測定した。ブームの仰角は水平とし、循環させる圧送試験では筒先をポンプ車に設置し、所定の時間循環させて、圧送を継続した。

(2) コンクリートポンプ

コンクリートポンプの仕様を表-3に示す。ポンプ車は、N社製のピストン式ポンプ(McSWING11FB-303)を用いた。

(3) 圧送方法

コンクリートは、生コン工場で製造し、生コン工場構内の試験現場まで5分程度運搬しポンプ車に投入した。設定吐出量は、圧送条件が厳しい条件下での圧送性を評価するため、60m³/h、75m³/h、90m³/hの3水準に設定した。全ての水準において、表-4に示す2つのシリーズにより実施した。

2.3 試験項目

試験項目を表-5に示す。コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状の評価試験は、荷卸時(圧送前)、圧送後および15分間の循環圧送後で実施した。管内圧力は、長さ0.3mの圧送管にフラッシュダイヤフラム型圧力計を取り付け測定した。ポンプ主油圧は、ポンプ車の主油圧を油圧ゲージから読み取った。理論吐出量はシリンダー容積と時間当りのストロークタイムの実測値から、実吐出量は0.9m×0.9m×0.9mの容器に受けた所定の時間とコンクリートの容積から算出した。

3. 実験結果

3.1 機械効率(シリーズ1)

理論吐出量、実吐出量および機械効率の測定結果を表-6に示す。理論吐出量は65.5、83.1、93.2 m³/hであり、

表-4 圧送方法

圧送方法	記号	試験内容
シリーズ1	S1	設定吐出量毎に10ストローク分のコンクリートを圧送し、圧送前後のコンクリート性状、管内圧力、実吐出量等を測定
シリーズ2	S2	シリーズ1の試験終了後、配管内のコンクリートを15分間循環による圧送を行い、圧送後のコンクリート性状、管内圧力等を測定

表-5 試験項目

測定項目	内容	実施シリーズ
理論吐出量	シリンダー容積と時間当りのストロークから算出	シリーズ1
実吐出量	10ストローク分の排出時間および立方体容器に受けた容積から算出	シリーズ1
管内圧力	圧力計5箇所測定	シリーズ1、2
ポンプ主油圧	ピストン主油圧計で測定	シリーズ1、2
スランプ	荷卸し時、圧送後および15分間の循環圧送後で測定	シリーズ1、2
空気量		
単位容積質量		
ブリーディング		
圧縮強度		

表-6 機械効率

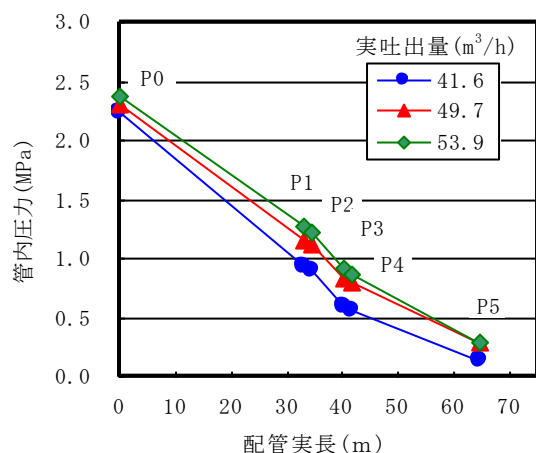
設定吐出量(m ³ /h)	60	75	90
理論吐出量(m ³ /h)	65.5	83.1	93.2
実吐出量(m ³ /h)	41.6	49.7	53.9
機械効率	0.64	0.60	0.58

それに対応する実吐出量は41.6、49.7、53.9 m³/hであった。機械効率は、0.58～0.64となり、圧送速度が大きくなると小さくなる傾向であった。土木ポンプ指針では、普通骨材を用いたスランプ12～17cmのピストン式のコンクリートポンプの機械効率の目安を0.70～0.90としているが、この値に比べて若干低い値となった。これは、理論吐出量が65.5～93.2 m³/hとかなり早い速度で圧送したため、吸引効率が低下したものと考えられる。

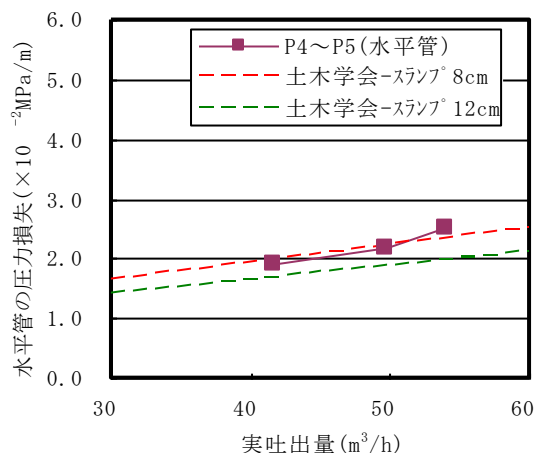
3.2 管内圧力

(1) シリーズ1

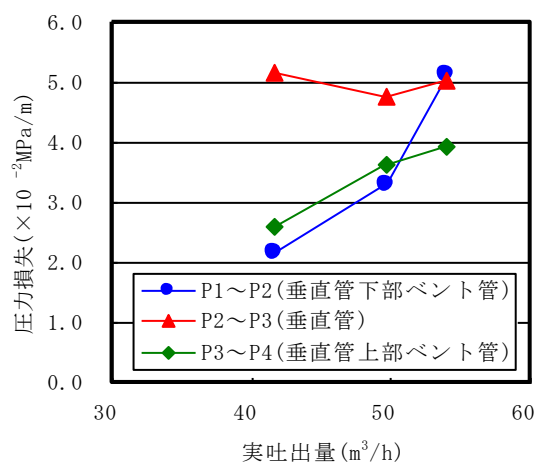
管内圧力の測定結果を図-2に示す。コンクリートシリンダーの前面圧(P0)は、ポンプ車の油圧ゲージから読み取った主油圧に、表-3に示したシリンダー比(0.227)



図－２ 管内圧力測定結果(シリーズ１)



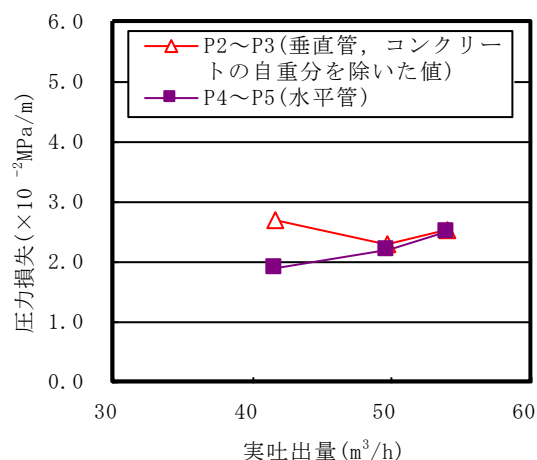
図－３ 水平管(P4~P5)の圧力損失(シリーズ１)



図－４ ベント管((P1~P2), (P3~P4)), 垂直管(P2~P3)の圧力損失(シリーズ１)

表－７ 各配管種別の実吐出量と水平換算長さ

配管種別 (測定箇所)	単位	呼び寸法	実吐出量 (m³/h)	水平換算長さ (m)
垂直管下部 ベント管 (P1~P2)	1本当り	5B(125A) 90° r=1.0m	41.6	1.1
			49.7	1.5
			53.9	2.1
垂直管 (P2~P3)	1m当り	5B(125A)	41.6	2.7
			49.7	2.2
			53.9	2.0
垂直管上部 ベント管 (P3~P4)	1本当り	5B(125A) 90° r=1.0m	41.6	1.4
			49.7	1.6
			53.9	1.7



図－５ コンクリートの自重分を差し引いた垂直管(P2~P3)の圧力損失

を乗じて算定した。実吐出量と水平管(P4~P5)の 1m 当りの圧力損失の関係を図－３に、実吐出量とベント管(P1~P2(垂直管下部), P3~P4(垂直管上部)) および垂直管(P2~P3)の 1m 当りの圧力損失の関係を図－４に示す。図－３には、土木ポンプ指針に記載されているスランブ 8, 12cm の普通コンクリートの圧送における水平管 1m 当りの管内圧力損失の標準値を併せて示す。

普通コンクリートの場合と同様に、実吐出量が多くなるほど管内圧力は高くなった。また、水平管の圧力損失は、実吐出量が多くなるに従って大きくなる傾向にあるものの、いずれの実吐出量においても土木ポンプ指針に記載されている普通コンクリートと同等の圧力損失の範囲内であった。垂直管下部および上部のベント管の圧力損失は、実吐出量が多くなるに従って大きくなったが、垂直管ではほぼ一定の値となった。

配管種別の実吐出量と水平換算長さを表－７に、フレッシュコンクリートの自重分を差し引いて求めた垂直管の管内圧力損失と水平管の管内圧力損失を比較したものを図－５に示す。ここで、水平換算長さは、水平管の 1m 当りの圧力損失(P4~P5)と各配管 1m 当り、または、1

本当りの圧力損失の比から算定した。

垂直管の水平換算長さは、実吐出量が多くなるに従って小さくなる傾向にあり、土木ポンプ指針と同様の傾向であった。また、フレッシュコンクリートの自重分を差し引いた垂直管の管内圧力損失は、水平管の圧力損失とほぼ同等であった。これより、普通コンクリートと同様に、垂直管の管内圧力損失は、水平管の圧力損失にコンクリートの単位容積質量による圧力差を加えたものと考えて問題ないと思われる。ベント管の水平換算長さは、垂直管下部で 1.1~2.1m、垂直管上部で 1.4~1.7m で、いずれも土木ポンプ指針においてポンプの圧送負荷を算出する

ために原則として規定されている普通コンクリートの水平換算長さの値(6m)より小さかった。よって、普通コンクリートと同様の水平換算長さで設定して問題ないと考えられる。

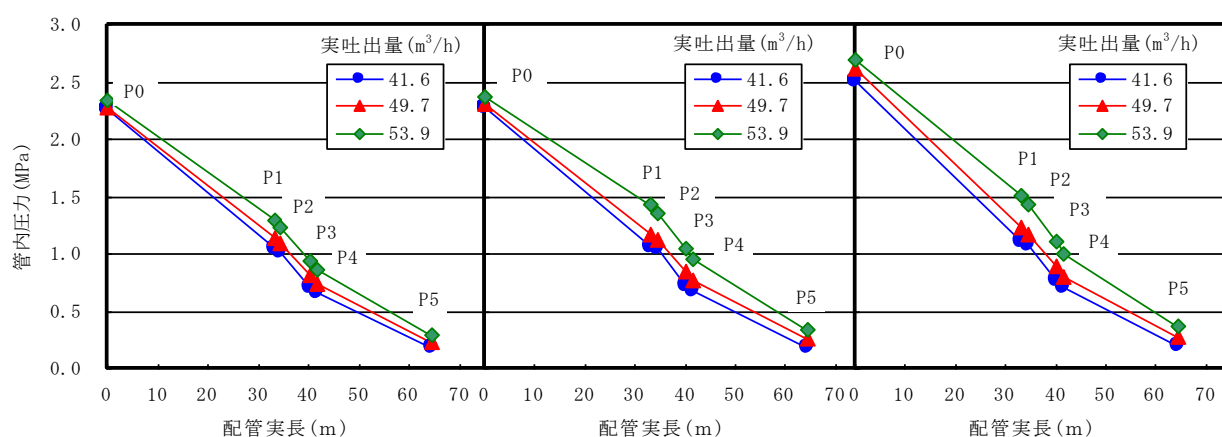
(2) シリーズ 2

シリーズ 2 では、15 分間の循環圧送によるコンクリートの品質変化が管内圧力損失に与える影響を検討した。シリーズ 2 における 15 分間の循環圧送によって配管内のコンクリートが圧送される距離は、実吐出量によって異なる。41.6 m^3/h の場合は 846m, 49.7 m^3/h の場合は 1013m, 53.9 m^3/h の場合は 1098m となる。実際の施工を考えた場合、圧送距離が 1km を超えるような圧送現場はない。つ

まり、シリーズ 2 は、相当に厳しい圧送条件でのコンクリートの品質変化と圧送性の関係を検討したものである。

圧送開始から終了までの 5 分毎の管内圧力の平均値を図-6 に、各実吐出量における圧力損失の推移を図-7 に示す。図-7 には、フレッシュコンクリートの自重分を差し引いた垂直管の管内圧力損失を併せて示す。

圧送開始から 5 分後の(a)は、ほぼシリーズ 1 と同様な管内圧力分布であるが、圧送開始 10 分後以降の(c)は、管内圧力分布が上昇した。特に、P0~P1 の P0 のコンクリートシリンダー前面圧からブーム 26.5m, ドッキングホース 5m, 水平管 6.8m の P1 間の管内圧力の損失の変化が著しかった。



(a) 圧送開始から 5 分後まで (b) 圧送開始 5 分後から 10 分後まで (c) 圧送開始 10 分後から圧送終了まで
図-6 圧送開始から終了までの 5 分毎の管内圧力の平均値

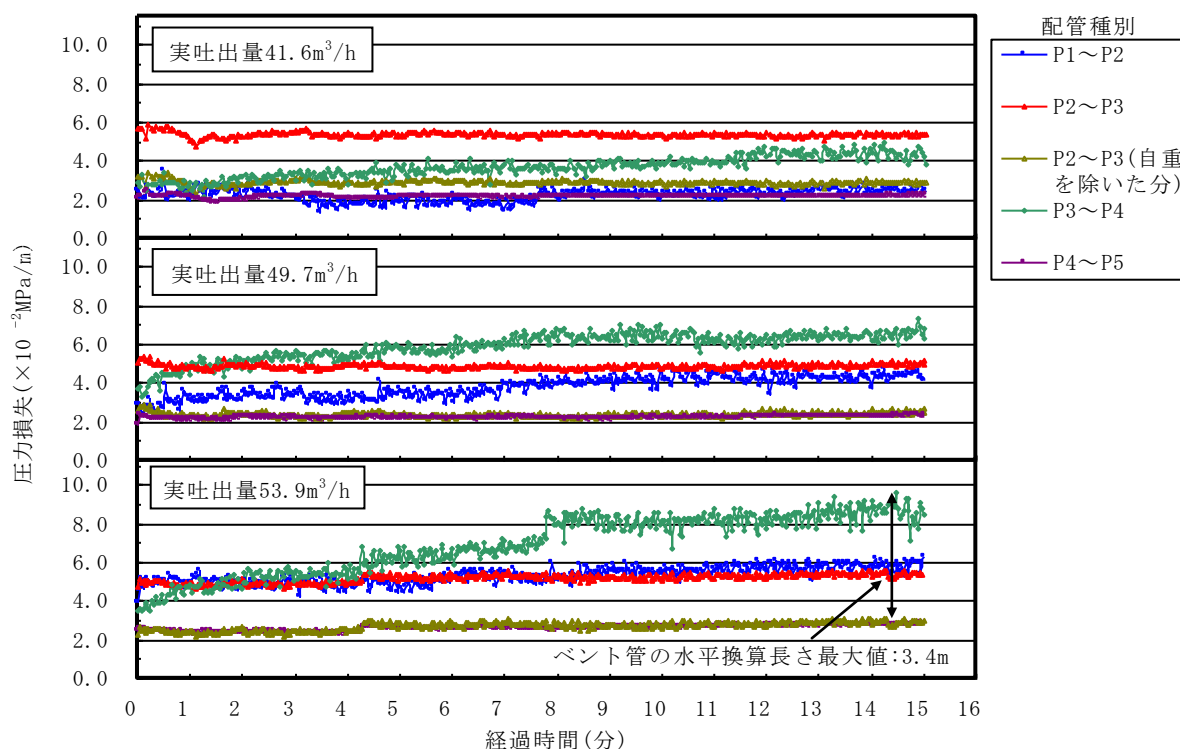
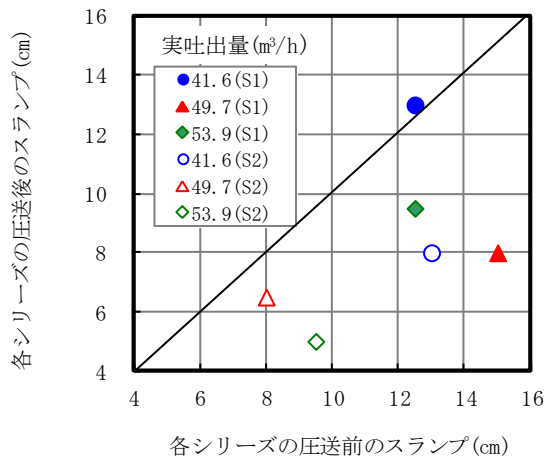


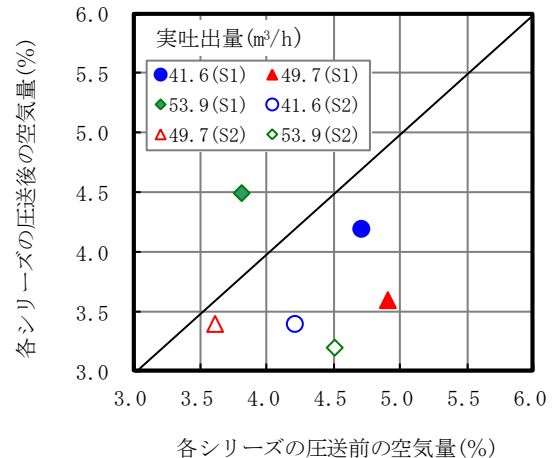
図-7 圧力損失の推移(シリーズ 2)

表－8 フレッシュ性状の試験結果

実吐出量 (m³/h)	採取条件	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量(kg/m³)	コンクリート 温度(℃)	ブリーディング	
						量(cm³/cm²)	率(%)
41.6	圧送前(荷卸時)	12.5	4.7	2518	21.0	—	—
	圧送後(循環圧送前)	13.0	4.2	2527	21.0	0.13	3.19
	循環圧送後	8.0	3.4	2544	23.0	0.03	0.74
49.7	圧送前(荷卸時)	15.0	4.9	2527	21.0	0.32	7.54
	圧送後(循環圧送前)	8.0	3.6	2541	23.0	0.03	0.78
	循環圧送後	6.5	3.4	2553	25.0	0.04	0.92
53.9	圧送前(荷卸時)	12.5	3.8	2551	21.0	—	—
	圧送後(循環圧送前)	9.5	4.5	2533	23.0	0.08	2.02
	循環圧送後	5.0	3.2	2564	24.4	0.02	0.37



図－8 各シリーズにおける
圧送前と圧送後のスランプの変化



図－9 各シリーズにおける
圧送前と圧送後の空気量の変化

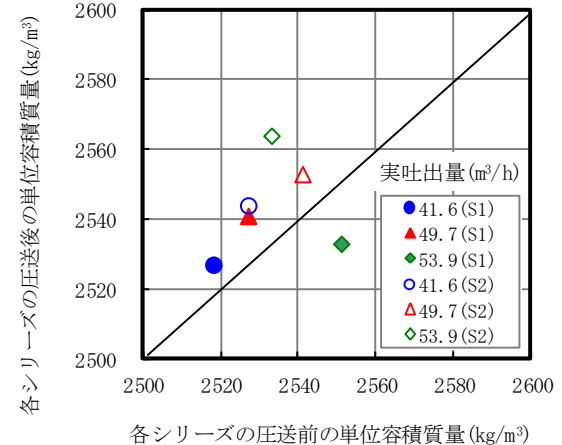
圧力損失の推移では、水平管(P4～P5)および垂直管(P2～P3)では大きな変化は認められなかったが、ベント管(P1～P2, P3～P4)、特に垂直管上部(P3～P4)において時間の経過とともに圧力損失が大きくなる傾向が認められた。また、フレッシュコンクリートの垂直自重分を差し引いた垂直管の管内圧力損失は、シリーズ1と同様に、水平管の圧力損失とほぼ同等であった。重量コンクリートの圧送では、過度のブリーディングによって十分な潤滑層が形成されず、水平管の圧力損失よりも垂直管の圧力損失が大きくなる可能性がある⁵⁾。しかしながら、本実験の範囲内では、全く問題ないことが明らかになった。

一方、ベント管の圧力損失が大きく変化した原因としては、後述の循環圧送によるスランプロスの影響が考えられる。ただし、ベント管の水平換算長さは最大で3.4mで、土木ポンプ指針に記載されている普通コンクリートの水平換算長さ(6m)より小さく、長距離圧送した場合でも普通コンクリートと同様の水平換算長さで設定して安全側であると考えられる。

3.3 フレッシュコンクリートの性状

圧送におけるフレッシュコンクリートの性状を表－8に、各シリーズにおける圧送前と圧送後のスランプ、空気量と単位容積質量の変化を図－8～10に示す。

シリーズ1での圧送後のスランプは、実吐出量が41.6m³/hの場合では変化はないが、実吐出量が49.7m³/h



図－10 各シリーズにおける
圧送前と圧送後の空気量の変化

の場合は7.0cm、実吐出量53.9m³/hの場合は3.0cm低下した。実吐出量が41.6m³/h、53.9m³/hの場合の圧送によるスランプの低下量は、土木ポンプ指針に示されている普通コンクリートの場合とほぼ同程度であるが、実吐出量が49.7m³/hの場合に低下が大きかった原因は不明である。圧送後の空気量は、実吐出量が41.6m³/hの場合は0.5%、実吐出量が49.7m³/hの場合は1.3%低下した。また、吐出量が53.9m³/hの場合は0.7%増加した。空気量の変動については増減があり、明確な傾向が認められなかった。圧送後の単位容積質量については、空気量の増

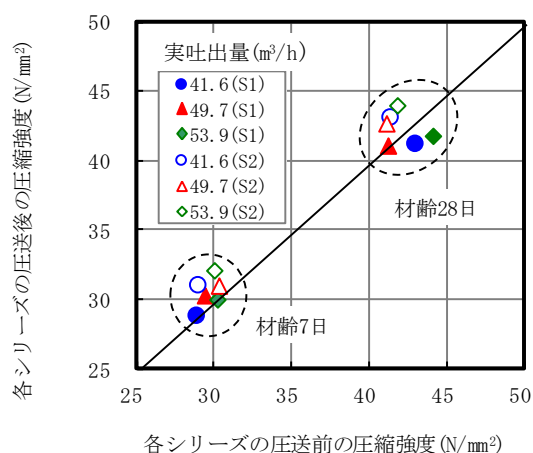


図-11 各シリーズにおける
圧送前と圧送後の圧縮強度の変化

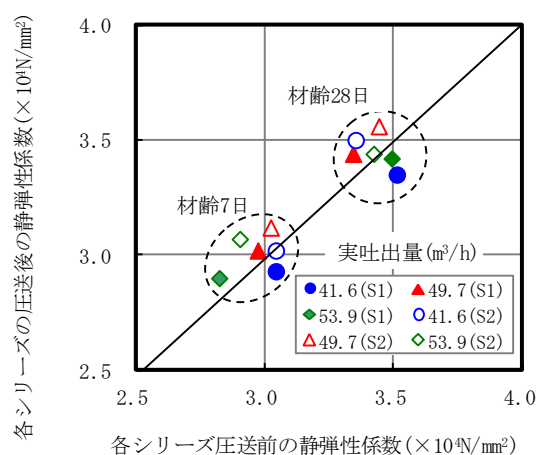


図-12 各シリーズにおける
圧送前と圧送後の 静弾性係数の変化

減に伴って変化した。また、圧送後のブリーディング量は、圧送前に比べて少なくなり、銅スラグ細骨材を使用したポンプ圧送に関する既往の研究^{3)・4)}と同様の傾向が認められた。原因については、脱水によるものと考えられるが、閉塞を生じるほどの顕著なものではないと考えられる。

シリーズ2における各実吐出量毎の循環による圧送後のフレッシュコンクリートの変化について、実吐出量41.6, 49.7, 53.9m³/hでスランブが5.0cm, 1.5cm, 4.5cm低下、空気量が0.8%, 0.2%, 1.3%低下したが、長距離圧送を想定した循環による圧送をしてもその低下量は小さかった。また、圧送後のコンクリートの単位容積質量は、循環による圧送後の空気量の減少により、いずれの実吐出量においても大きくなる傾向にあった。相当に厳しい圧送条件に関わらず、コンクリートの品質変化は小さいと判断できる。

3.4 圧縮強度

各シリーズにおける圧送前と圧送後の圧縮強度および静弾性係数の変化を図-11と図-12に示す。シリーズ

1では圧送前後で大差なく、前述の圧送によるブリーディング低減や空気量の減少の影響は認められなかった。一方、シリーズ2の循環による圧送後の圧縮強度および静弾性係数は、圧送前に比べて、いずれもやや大きくなる傾向にあり、空気量の減少およびそれに伴う単位容積質量の増加の影響が窺えた。

4. まとめ

粒度および粒形を調整した銅スラグ細骨材を単独使用した重量コンクリートの圧送性試験を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 実吐出量が41.6～53.9 m³/hの範囲で、閉塞や材料分離を起こすことなく圧送が可能であった。
- (2) 圧送前後のスランブや空気量の変化は普通コンクリートと同等であった。また、循環による長距離圧送を想定した試験での圧送前後のスランブおよび空気量の変化は小さかった。
- (3) 水平管、ベント管および垂直管の圧力損失はいずれも土木学会「コンクリートのポンプ施工指針[2012年版]」に示される普通コンクリートでの場合と大差なく、圧力損失の算定および水平換算係数の設定も普通コンクリートと同様で問題ないものと思われる。
- (4) 圧縮強度および静弾性係数は、圧送前後で大差なかった。

謝辞

本実験を行うことにあたり、新菱商事株式会社より多大なご協力を頂きました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 黒岩義仁, 高尾昇, 佐々木憲明: 銅スラグ細骨材の微粒分の量および実積率がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.43-48, 2013
- 2) 黒岩義仁, 高尾昇, 清谷謙二: 銅スラグ細骨材の微粒分量および混合率がコンクリートの諸特性に及ぼす影響, 土木学会第68回年次学術講演会, V-313, pp.625-626, 2013
- 3) 川端雄一郎, 岩波光保, 加藤絵万, 審良善和: 銅スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの施工性と品質変化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1541-1546, 2010
- 4) 土木学会: 銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針, コンクリートライブラリー92, 1998.1
- 5) 土木学会: コンクリートのポンプ施工指針[2012年版], コンクリートライブラリー135, 2012