

論文 変形性評価試験による鉄鋼スラグ水和固化体の圧送性に関する基礎的研究

御領園 悠司*1・渡辺 健*2・橋本 親典*3・高橋 克則*4

要旨: 製鉄の際に生じる副産物である鉄鋼スラグを結合材および骨材の代替として用いた水和固化体の変形性評価試験を実施し、ウェットスクリーニングしたモルタルの見かけのレオロジー定数ならびに実ポンプ圧送試験による圧力損失と比較した。その結果、変形性評価試験で求められる平均ポンプ油圧とモルタルの降伏値には強い相関性があり、平均ポンプ油圧から換算した圧力損失と実際ポンプ圧送の圧力損失にも相関性があり、変形性評価試験の結果からポンプ圧送時の圧力損失を推定する可能性を見出すことができた。

キーワード: 鉄鋼スラグ, 変形性評価試験, ポンプ圧送, テーパ管, レオロジー定数, 圧力損失

1. はじめに

地球環境問題に関する関心の高まりを受け、より環境負荷の少ないリサイクル材料の有効活用が必要となっている。また、近年鉄鋼製造工程において生じる副産物である鉄鋼スラグは、道路用路盤材や、コンクリート用骨材への活用と、様々な分野で活用されているが、ゼロ・エミッションを推進するためにも、更なる有効活用方法の開発が必要である。

このような背景を受け開発されたのが、副産物である鉄鋼スラグと高炉スラグ微粉末に水を加えて練混ぜ、水和反応により硬化させた鉄鋼スラグ水和固化体である。

鉄鋼スラグ水和固化体はセメントをほとんど使わないにも関わらず普通コンクリートとほぼ同等な強度を発現する性質を持つ。このことからセメントの製造時に発生する二酸化炭素を削減することが出来る。さらに天然骨材を用いないことから天然骨材の掘削等の製造エネルギーを削減でき、省資源化、省エネルギー化にも寄与している。また単位質量が大きいという特徴からマスコンクリートへの利用に向いており、大量活用により一層の省エネルギーが図れるものと考えられる。

しかしながら、鉄鋼スラグ水和固化体に用いる鉄鋼スラグ骨材は、吸水率が大きく、施工段階においてバント管やテーパ管等の変形管での圧送負荷が大きい。より多彩な施工方法による用途の拡大といった観点からこのような管内での圧力挙動を把握しておくことは必要不可欠である。

また、実ポンプ圧送試験による施工性(配管径や圧送速度と管内圧力損失との関係)および品質変化を確認する研究が行われている。

本研究では鉄鋼スラグ水和固化体のポンプ打設にお

ける安定的な計画と操業を可能にすることを目的として、材料、施工条件、レオロジー特性との関係を変形性評価試験および塑性粘度試験と実施工試験によって調査し、各種特性との相関を調査した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) 高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末は、A社製(ブレン値 4470cm²/g、密度 2.90g/cm³)のものを使用した。

(2) 普通ポルトランドセメント

高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの硬化促進のため、アルカリ刺激材としてB社製普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)を使用した。

(3) フライアッシュ

フライアッシュはC社製フライアッシュ(密度 2.20g/cm³)を使用した。

(4) 消石灰

鉄鋼スラグ水和固化体の潜在水硬性を促すため、D社製の工業用消石灰(JIS R 9001)特号を用いた。(密度 2.20g/cm³)を使用した。

(5) スラグ骨材

スラグ骨材は SS-1(密度 3.18g/cm³, 吸水率 5.37%) SS-2(密度 3.02g/cm³, 吸水率 5.43%) SS-3(密度 3.60g/cm³, 吸水率 5.38%) SS-4(密度 3.60g/cm³, 吸水率 5.38%) SS-5(密度 2.90g/cm³, 吸水率 2.77%) SS-6(密度 2.90g/cm³, 吸水率 1.50%) SS-7(密度 2.92g/cm³, 吸水率 4.95%) SS-8(密度 3.00g/cm³, 吸水率 4.30%) を使用した。いずれにおいても密度、吸水率共に大きい骨材となっている。

(6) 高性能 AE 減水剤

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻博士前期課程1年 (正会員)

*2 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助教 博(工) (正会員)

*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)

*4 JFEスチール(株) スチール研究所 博(工)

高性能 AE 減水剤は JIS A 6204 高性能減水剤 (I 種) に規定されているもの (密度 1.04g/cm³) を使用した。

2.2 コンクリートの配合

実験に使用した示方配合を表-1に示す。なお、表中に示された W, BP, CH, NP, FA はそれぞれ水, 高炉スラグ微粉末, 消石灰, 普通ポルトランドセメント, フライアッシュを SS-1, SS-2 は E 社製鉄鋼スラグ 0-5mm, 5-25mm, SS-3, SS-4 は E 社製鉄鋼スラグ 0-10mm, 0-25mm, SS-5, SS-6 は F 社製鉄鋼スラグ 0-5mm, 5-25mm (産地 1), SS-7, SS-8 F 社製鉄鋼スラグ 0-5mm, 5-25mm (産地 2) を意味している。また Ad は高性能 AE 減水剤を示している。この配合は一部を除きスランブ 18cm±2.5cm, 空気量 2%±1.5%となるように考慮した。

2.3 試験方法

表-1に示した内, A から K の配合は実験室にて以下の試験を行い, 各種特性を評価した。また A から F の配合においては製鉄場内のヤード内にて, 実機コンクリートポンプを用い, 実大規模の圧送試験を行った。

(1) フレッシュ性状に関する試験

フレッシュコンクリートのスランブと空気量を, スランブ試験 (JIS A 1101) および空気量試験 (JIS A 1128) に従い測定した。

(2) フレッシュコンクリートの変形性評価試験

i) 実験概要

土木学会の定める「フレッシュコンクリートの変形性評価試験方法(案)」(JSCE-F 509-2000)¹⁾(以下ポンプ施工指針)に規定されているテーパ管を有する小型圧送試験装置 (図-1) を用いて変形性評価試験を実施した。ピストンを引き込み, 水平面から 20 度の仰角に設置した後, シリンダ部とテーパ管にコンクリートを詰め, 締め固め棒を用いて, テーパ管の先端部分まで空隙がなくなるように締め固める。

ピストンを 1.25cm/s の速度で前進させ, コンクリートをテーパ管内で圧送する。圧送時におけるピストン油圧の経時変化 $P_1(t)$ (MPa) と圧送時間 T_1 (s) を圧送が終了するかあるいは閉塞するまで計測する。

続いてピストンを最も引き込んだ位置にセットし, テーパ管を接続していないシリンダ部だけの小型圧送試験装置を水平面から 8.5 度の仰角に設置した後, シリンダ内にコンクリートを詰め, 締め固め棒を用いて, シリンダの先端部分まで空隙がなくなるように詰める。

ポンプ施工指針¹⁾の試験方法では, 仰角は 20 度であるが, 設置環境条件から 8.5 度とした。ただし, 10 度強の仰角の差が試験結果に与える影響は小さく, 無視しても問題ないものと考えられる。また, 管出口までコンクリートを詰め, 試験が可能であることが確認されている。コンクリートを詰めた後, ピストンを 1.25cm/s の速度で前進させ, コンクリートを直管内で圧送する。圧送時に

表-1 実験に供した鉄鋼スラグ水和固化体の示方配合表

配合	s/a (%)	W/P (%)	単位量(kg/m ³)								配合上の特徴
			水	高炉スラグ微粉末	消石灰	普通ポルトランドセメント	フライアッシュ	鉄鋼スラグ		高性能 AE 減水剤	
			W	BP	CH	NP	FA	SS-1	SS-2	Ad	
A	47.4	39.0	189	297	0	53	134	920	969	6.78	標準
B	42.7	44.0	205	446	0	65	88	759	969	8.99	ペースト率大
C	47.4	39.0	189	297	0	53	134	920	969	7.26	高スランブ
D	47.4	39.0	189	372	0	67	67	920	969	8.10	BP大, FA小, 強度指数大
E	47.4	39.0	205	297	0	53	99	920	969	5.39	W大, 強度指数小
F	47.4	39.0	189	297	0	53	134	920	931	6.78	スラグ変更1(SS-2→SS-6)
G	60.0	39.0	189	297	0	53	134	1164	737	7.74	s/a大
H	47.4	39.0	189	297	53	0	119	920	969	7.97	消石灰
I	47.4	39.0	189	297	0	53	134	838	931	5.81	スラグ変更2(SS-1→SS-5, SS-2→SS-6)
J	47.4	39.0	189	297	0	53	134	845	964	5.81	スラグ変更3(SS-1→SS-7, SS-2→SS-8)
K	60.0	39.0	189	297	0	53	134	1267	765	2.90	スラグ変更4(SS-1→SS-3, SS-2→SS-4)

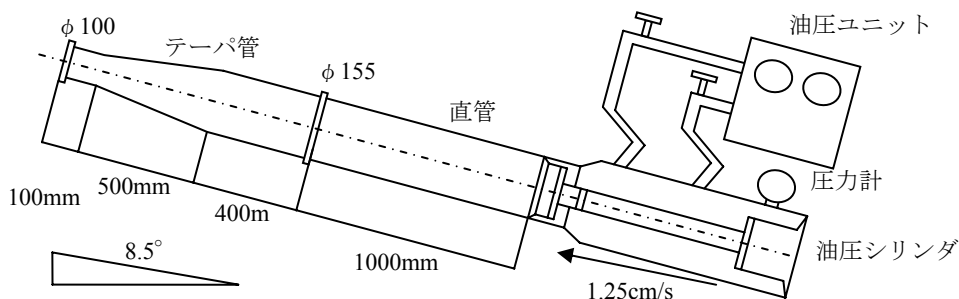


図-1 小型圧送試験装置

おけるピストン油圧の経時変化 $P_2(t)(\text{Mpa})$ と圧送時間 $T_2(\text{s})$ を、圧送が終了するまで計測する。

また、圧送後および終了前 10 秒間は、油圧が不安定なため削除する。なお、本試験では、練混ぜ直後にスランプと空気量試験を行った後、圧送試験および塑性粘度試験を実施した。

ii) 計算方法

試験終了後、以下の計算式によりそれぞれの値を求めた。

圧力経時変化: $P(t)(\text{Mpa}) = P_1(t) - P_2(t)$

$P_1(t)$: テーパ管ありの油圧

$P_2(t)$: テーパ管なしの油圧

平均ポンプ油圧: $P_{ave}(\text{Mpa}) = \frac{\sum P(t)}{n}$

油圧の変動係数: $P \text{ var}(\%) = \frac{\sigma_{P(t)}}{P_{ave}} \times 100$

n : 圧送時間 t の測定データ

$\sigma_{P(t)}$: 油圧の標準偏差

(3) 塑性粘度試験

ウェットスクリーニングによって得られたモルタルの粘度の測定には、比較的水セメント比が小さく、漏斗もしくは管方式では閉塞して測定できないようなモルタルにも適応可能で操作が簡便な羽根沈入型粘度計を用いて見かけの塑性粘度と降伏値を計測した。

練り上がったコンクリートからウェットスクリーニングによってモルタルを得る。本粘度計の概要を図-2示す。

1 試料につき数種類の錘の重量 W を用いて試験を行うことにより、せん断速度 L/T とせん断応力度 $\tau = W/A$ の関係が得られる。

流体の中で物体が重力の基に沈降する場合、物体の質量、重量、浮力、流体抵抗の関係から物体は一定速度の運動をする。よって羽根の沈入速度は L/T となり、せん断速度をモルタルのせん断領域の幅 h で除した値 $L/(T \cdot h)$ がせん断ひずみ速度 γ となる。しかし、このせん断領域の幅 h は塑性粘度の増大に伴い、増加する値で、計算に忠実に反映させるのは困難であり、経験的には誤差による影響は少ないことから $h = \text{一定} = 1.0$ とした。

なお本試験ではモルタル中を沈降する羽根の質量、浮力が沈降中、常に一定になるように、また、せん断面積が一定になるように、羽根がモルタルに完全に埋まった状態から沈降させた。羽根が取り付けられている軸の影響は非常に小さいと考えられるため無視した。

得られた値と既知の流体(シリコンオイル:塑性粘度 10 ~ 300 Pa · s)を用いた実験結果と比較する方法²⁾により塑性粘度を算出した。

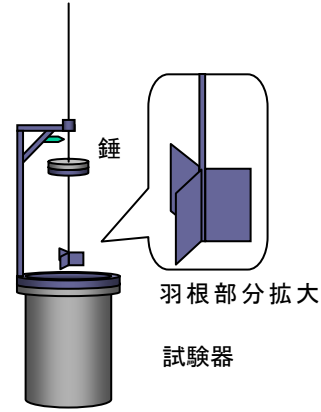


図-2 試験器の概要

(4) 現場圧送実験

本実験で行った変形性評価試験のうち、A~F の 6 配合については、テーパ管 (200A→175A, 長さ 0.45m), (175A→150A, 長さ 0.85m) および (150A→125A, 長さ 1.0m) を各 1 本ずつ、ベント管 (200A, R0.2m) 1 本, (125A, R1.0m) 3 本および (125A, R0.5m) 1 本, 鉛直管 (125A, 長さ 2.0m) を含む水平換算距離 100m 程度の一方方向の現場圧送実験を行った。使用材料は、高性能 AE 減水剤以外は、すべて変形性評価試験で用いた材料と同一である。

吐出量を 20, 40 および 60 m³/h とし圧送経過時間に伴う圧送管の管内圧力 13 点を動歪み計により計測し、圧力損失を求めた。また、上述した塑性粘度試験を用いて、圧送前後でのフレッシュ性状およびウェットスクリーニングしたモルタルの見かけの塑性粘度と降伏値 (以下単に塑性粘度, 降伏値) を計測した。

3. 実験結果および考察

各配合における変形性評価試験結果および塑性粘度試験結果を表-2 および表-3 に示す。また、変形性評価試験における平均ポンプ油圧と変動係数の関係および現場実験の結果を図-3 に示す。

表-2 変形性試験結果

配合	SL (cm)	平均ポンプ油圧 (MPa)	変動係数 (%)	塑性粘度 (Pa · s)	降伏値 (Pa)
A	20.0	0.087	26.3	25	378
B	16.0	0.099	16.5	40	364
C	23.0	0.045	10.2	26	177
D	17.0	0.097	23.2	40	856
E	18.0	0.067	25.6	25	329
F	20.0	0.064	23.6	32	264
G	16.0	0.090	15.1	51	630
H	20.0	0.081	13.8	44	361
I	20.0	0.048	16.9	26	141
J	20.0	0.068	13.2	49	134
K	16.0	0.073	25.8	51	630

表-3 現場実験結果

配合	SL (cm)	圧力損失 (MPa/m)	塑性粘度 (Pa·s)	降伏値 (Pa)
A	19.0	0.023	8	200
B	17.0	0.042	17	213
C	22.0	0.030	8	215
D	20.0	0.026	8	204
E	20.0	0.016	3	186
F	17.5	0.044	13	207

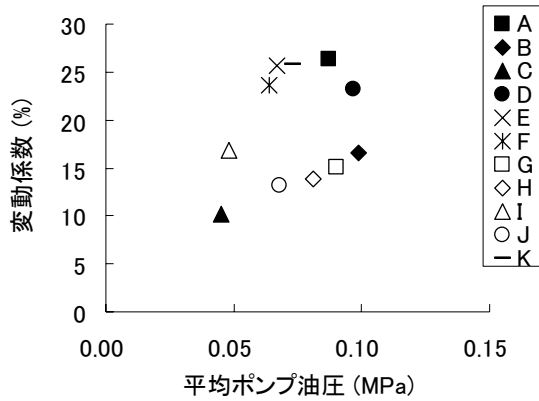


図-3 変形性試験と変動係数の関係

3.1 平均ポンプ油圧と変動係数との関係

本実験で行った 11 配合は、目視観察の範囲ではすべて順調圧送状態と判定できる。ポンプ施工指針¹⁾における判定基準によると平均ポンプ油圧 0.20MPa 以下、変動係数 15% 以下で順調圧送領域である。本実験で行った変形性評価試験では、平均ポンプ油圧は十分小さいものの変動係数は大きく一部を除き領域外である。これは、所定のスランブを得るために使用した混和剤の影響から、ポンプ油圧を低くするほどの粘性の低下を起し、平均ポンプ油圧が非常に小さくなったため変動係数が大きくなったためである。また、スラグ骨材の表面が非常に粗いことにより管内圧力に乱れが生じたこと、吸水率が高いため、圧送圧力により水分が骨材に吸収され変形性が低下したものと考えられる。

配合 C, J, I, G, B はそれぞれ変動係数が高いが比較的順調な圧送であると判断できる。配合 C は高スランブであり、塑性粘度および降伏値が低いため流動性が高く、配合 J は使用したスラグの形状が非常に丸みをおびており、また配合 I は使用したスラグの吸水率が低く、他の配合に比べ変形性の改善に寄与したものと考えられる。

配合 G, B は細骨材率およびペースト量が多いためスラグ骨材の噛み合わせが少なく圧送に乱れが少なかったため変動係数も比較的小さくなったものと考えられる。配合 H は消石灰を用いた配合であり、普通ポルトランドセメントに比べ、変動係数が低く、圧送する際有利であることがわかる。

鉄鋼スラグ水和固化体は、圧送性を確保するために、スランブを 18cm 前後と相当に大きくしている。しかし

ながら、今回の実験では 0.05~0.10MPa の範囲でばらついており、興味深い。同一スランブであっても、変形性が異なる原因としては、上述した通り、鉄鋼スラグ骨材の形状や吸水率が大きく影響しているものと思われる。

また、図-4 に示したのは今回の変形性評価試験の結果と、2003 年に渡辺ら³⁾によって行われた普通コンクリートおよびフライアッシュをコンクリートの変形性評価試験結果とを比較したものである。

今回の鉄鋼スラグ水和固化体は、スランブが 18cm 前後であるため、平均ポンプ油圧は小さい。過去の実験データにおいて順調圧送と判定された場合もポンプ施工指針の判定基準の領域外、すなわち変動係数 15% 以上の場合がある。しかし、既往の研究³⁾から、25% を超えない配合では順調圧送が可能であることが分かっている。したがって、今回の実験結果に関しても、変動係数が 25% を超えない 7 配合に関しては、閉塞の危険性はないものと判断できる。一方、25% 前後を越える 5 配合(A, D, E, F, K)に関しては変形性が良好とは言い難い。

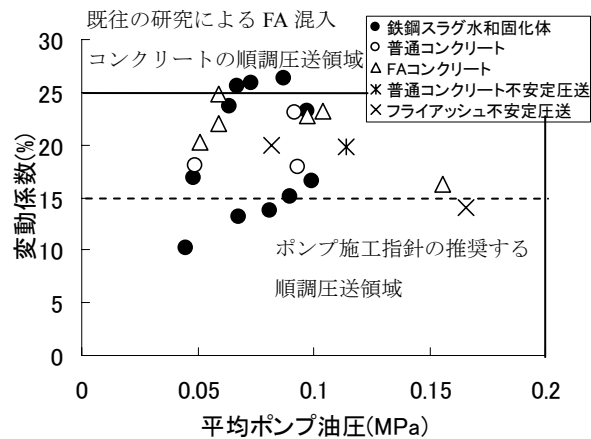


図-4 平均ポンプ油圧と変動係数の関係

3.2 塑性粘度試験結果

11 配合のスランブと塑性粘度および降伏値との関係を図-5、図-6 に示す。また、平均ポンプ油圧と塑性粘度および降伏値の関係を図-7、図-8 に示す。スランブおよび平均ポンプ油圧と降伏値との間には強い相関がある。また、塑性粘度との間にも降伏値との相関ほどではないが、相関がある。したがって、モルタルの塑性粘度試験を行い、降伏値から、コンクリートの変形性の平均ポンプ油圧を推定することが可能である。

また、著者らが普通コンクリートを用いて行った塑性粘度試験の結果⁴⁾と比較すると、塑性粘度は鉄鋼スラグ水和固化体の方が小さく、降伏値は鉄鋼スラグ水和固化体の方が大きくなった。これは、鉄鋼スラグ水和固化体が、高性能 AE 減水剤を多量に使用して塑性粘度が小さくなり、普通骨材と比較して鉄鋼スラグ骨材の吸水率が

大きく表面形状がよくないことから降伏値が大きくなったものと考えられる。

また変動係数と塑性粘度および降伏値の関係には、相関が見られなかったため、今回は掲載していない。

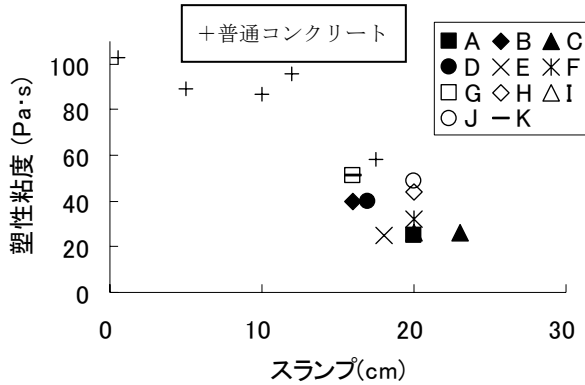


図-5 スランプと塑性粘度の関係

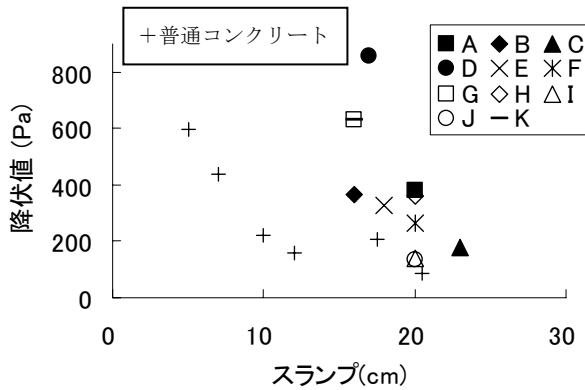


図-6 スランプと降伏値の関係

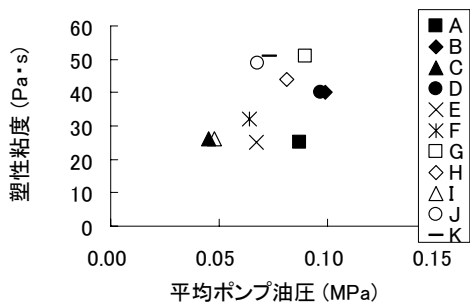


図-7 変形性試験結果と塑性粘度の関係

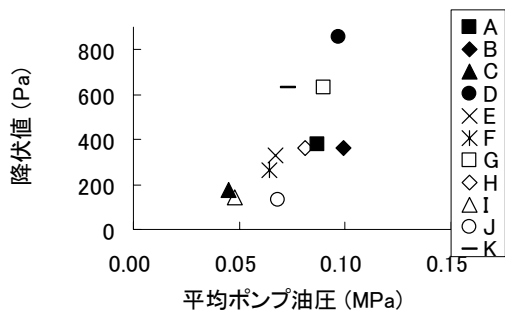


図-8 変形性試験結果と降伏値の関係

3.3 塑性粘度試験と現場実験の相関性

現場圧送実験結果と塑性粘度試験の結果の関係を図-9および図-10に示す。

ここで実ポンプ圧力損失は、現場圧送の直管部で圧送されているコンクリートの管内圧力を測定し、単位長さあたりの圧力損失を算出した値である。

降伏値および塑性粘度の値が、ともに先の変形性評価試験時の値と比較して小さい値になる理由は、変形性評価試験時と現場実験時で使用した混和剤の違いにより、現場実験では変形性評価試験時と同等のスランプを得るために使用した混和剤量がほぼ2倍となった為である。この影響により、セメント粒子の分散状態に違いができレオロジー特性に影響を与えたものと考えられる。特に現場実験では、降伏値の値がほぼ一定となっている。これは混和剤による流動性の改善効果が限界になっているものと考えられる。

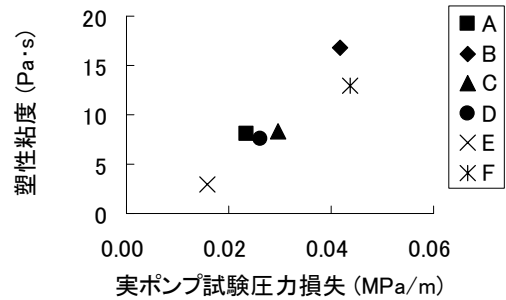


図-9 現場実験結果と塑性粘度の関係

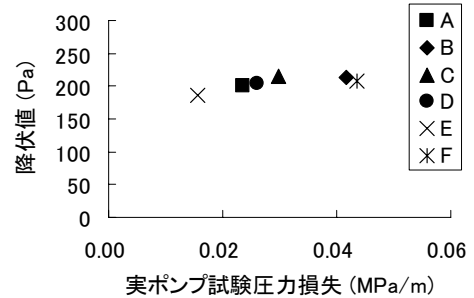


図-10 現場実験結果と降伏値の関係

実ポンプ圧送実験から得られた圧力損失と塑性粘度の関係には強い正の相関があり、塑性粘度を求めることによって、圧力損失を推定することができる。これは、管内流動状態の潤滑層の滑り抵抗とモルタルの塑性粘度に正の相関があるためと考えられる。一方、降伏値と実ポンプ圧力損失の関係には相関性がない。降伏値はスランプに依存するため、対象とする鉄鋼スラグ水和固化体のスランプが18cm前後であるため、圧力損失に関係なく一定になったと考えられる。

通常のコンクリートでは、圧力損失は、スランプと吐出量に依存する。鉄鋼スラグ水和固化体の場合、同一スランプでも圧力損失が変化する。これは、高性能 AE 減

水剤を用いて、相当に流動性を高めたモルタルを用いており、モルタルの粘性の影響が強いためと考えられる。

3.4 変形性評価試験と現場実験の相関性

変形性評価試験結果と現場圧送実験結果の関係を図-11に示す。ここで、現場圧送実験では使用した圧送

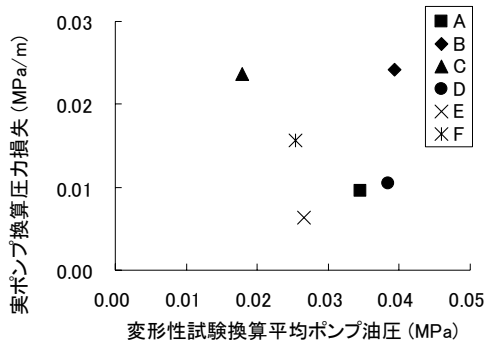


図-11 変形性評価試験結果と現場実験結果の比較

管の管壁の圧力を計測しているのに対し、変形性評価試験で計測している圧力はピストンシリンダー部の油圧であるためピストンシリンダー部のポンプ油圧を、テーパ管吐出部の油圧に換算する必要がある。変形性評価試験のテーパ管吐出側の直径が100mm、ピストンシリンダー直径が63mmであるため、変形性評価試験のテーパ管吐出位置での圧送管の圧力損失の概略は、ピストンシリンダー部の油圧に $0.397(=(63/100)^2)$ を乗じれば良い。また、現場圧送実験での吐出量と変形性評価試験での吐出量が異なるため吐出量の換算を行う必要がある。現場圧送実験で行った複数のデータから得られた近似式より同一吐出量である $0.85\text{m}^3/\text{h}$ における圧力損失を用いた。

配合A～Fの6配合すべての実験データでは、変形性評価試験の平均ポンプ油圧から換算した圧力損失と現場圧送実験での実ポンプ圧力損失との間には相関関係が認められない。これは、変形性評価試験はあくまでテーパ管という変形管を流動するときの骨材のかみ合わせやアーチングを回避する能力あるいは可能性を評価する試験であり、潤滑層のすべり抵抗に依存する水平管1mあたりの圧力損失とは評価する性能の本質が異なるためである。さらに今回の実験では、現場実験と変形性評価試験で用いた高性能減水剤の種類が異なっており、モルタルの粘性によって材料分離抵抗性を相当に大きくしている固化体では、この影響は無視することはできないと思われる。

しかしながら、配合Cを除く5配合に着目すれば、ある程度の相関性がある。配合Cは、高性能AE減水剤の添加量を多くし、高スランプにし、塑性粘度および降伏値が小さく流動性を最大にしたものである。そのため、材料分離抵抗性が小さく、実際の圧送実験では、潤滑層の形成が不十分で滑り抵抗が増大し、圧力損失が大きくなったと考えられる。配合Cを除く5配合では、平均ポ

ンプ油圧の換算圧力損失と実ポンプ圧力損失との間には正の相関関係が認められる。また、換算圧力損失の方が実ポンプ圧力損失よりも大きい値であることは、安全側の数値として実際の圧送計画に用いることが可能である。ただし、圧力損失と吐出量に関しては、変形性評価試験の小型圧送試験装置の油圧ユニットの能力に限界があるため、実際のコンクリートポンプの吐出量レベルにすることはできない。この点に関しては、今後の検討課題の1つである。

しかしながら、現場圧送実験を実施する経費と時間的問題を考慮すると、変形性評価試験によって対象とする鉄鋼スラグ水和固化体の圧力損失を推定できるということは、実用化の観点から評価できる知見である。

4. まとめ

本実験の範囲内で、得られた結果を以下にまとめる。

- ・ 鉄鋼スラグ水和固化体の変形性評価試験で求められる平均ポンプ油圧と、モルタルの見かけの降伏値の関係には強い相関がある。
- ・ 鉄鋼スラグ水和固化体の変形性評価試験の平均ポンプ油圧から換算した圧力損失から実ポンプ圧力損失を推定することが可能である。

謝辞

本研究は、(社)日本鉄鋼連盟が経済産業省補助事業として実施した「スラグ利用に係る研究開発」に基づく受託研究として実施したものであることを付記し、感謝の意を表します。変形性評価試験に関する実験遂行にあつては、日本興業㈱開発部土木開発設計室の山地功二氏のご協力を頂きました。ここに付記し、感謝の意を表します。

また、本研究の一部は、日本学術振興会平成19年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2)(課題番号17360205、研究代表者：橋本親典)に基づき実施されたものであることを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針(平成12年度版)、コンクリートライブラリー第100号、2000.
- 2) 室賀陽一郎ほか：モルタルの粘性試験装置の開発、土木学会年次学術講演概要集、Vol.55、部門5、V-406、2000.
- 3) 渡辺健ほか：ポンプ圧送の脈動時の変形性を評価できる定量的指標に関する実験的研究、フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題(II)、II-23、2003.
- 4) 伊達重之ほか：コンクリートの振動充てん性能に及ぼすフレッシュ性状の影響コンクリート工学年次論文集、Vol.29、2008