

論文 鋼球間隙充填試験によるセメント系充填材料の充填性能評価

松田敦夫^{*1}・山本和夫^{*2}・小西正郎^{*3}・岩本容昭^{*4}

要旨:新しく考案した鋼球間隙充填試験によりセメント系充填材料の充填性能の評価を試みた。この試験は多数の鋼球を円筒に詰めて連続空隙を形成し、その空隙を試料が充填する高さを指標として充填性能を評価するもので、使用する鋼球の直径により充填性の難易度が選択できる。高流動コンクリート配合のモルタル、低レベル放射性廃棄物ドラム缶充填モルタル、ロックボルト用注入ペーストという用途の異なる3種類の充填材料について、鋼球間隙充填試験と通常の管理試験の結果を比較した。その結果、管理試験より充填性の相違が明確になること、管理試験では現れなかった材料分離や経時変化による充填性の低下を評価できることがわかった。

キーワード:自己充填性能、充填材料、Pロート、コンシスティンシー、材料分離抵抗性

1. はじめに

構造形式の多様化により、自己充填性能を有する材料を用いて空隙を充填する工法が多くなっている。たとえば、高流動コンクリートはすでに100万m³を越える実績を有し、様々な構造物に施工されている。また、橋脚の耐震補強の一つである鋼板巻き立て工法の鋼板と柱の間の充填、プレストレストコンクリート構造物のシース内グラウト、プレキャスト部材の接合部等、数多くの工法に様々な材料が用いられている。

水粉体比が大きい、あるいは骨材を使用しないでセメントなどの微粉末だけの充填材は降伏値や塑性粘度が小さく、狭隘な空間への充填性能は非常に高い。しかし、強度、収縮量、ブリーディング量やコストの面から、より大きな降伏値や塑性粘度になる配合が必要になり、対象となる空隙への充填性の評価が不可欠である。

本論文では多数の鋼球を円筒に詰めて連続空隙を形成し、その空隙を試料が充填する高さを指標として、その試料の充填性能を評価することを試みた。使用する鋼球の直径により間隙の大きさ

が変化することを利用し、異なる材料や配合の充填材料の評価方法について検討した。

2. 充填用材料の性能評価試験

2.1 既往の試験方法

充填用材料の評価試験は大きく2つに分けられる。ひとつはモルタルやペーストの塑性粘度や降伏値を直接あるいは間接的に測るレオロジー試験、もう一つは施工条件を単純化したコンシスティンシー試験である。前者はB型粘度計や回転粘度計、球引き上げ粘度計、ツーポイント試験など、後者は対象とする構造物の空隙の大きさにより試験装置や方法を使い分け、JA・P・Vといったロート試験、スランプ・Lといったフロー試験などがある。しかし、これらの試験結果から狭い空隙への充填性能を判断することは難しく、管理範囲内の試料が実物あるいは実物に近いモデルに充填することを確認することが必要である。この確認を省略できる「充填性判定試験」方法は数少ないが、高流動コンクリートの配合設計では、U型あるいはポックス型充填試験器を用いる¹⁾。

*1 (株)奥村組技術研究所構造研究室主任研究員（正会員）

*2 (株)奥村組技術研究所副所長（正会員）

*3 (株)奥村組技術研究所土木研究室主任研究員 工修

*4 (株)奥村組技術研究所土木研究室研究員

2.2 鋼球間隙充填試験

ペーストやモルタルの狭隘な空間への充填性能を評価するために、土木学会「プレパックドコンクリートの圧縮強度試験方法」の供試体作製方法²⁾を参考とし図1に示すような「鋼球間隙充填試験装置」を考案した。この試験は、透明なアクリル製の円筒に鋼球を詰め、ロートを取り付けた内径25mmの塩ビ管から流下させた試料の鋼球間隙中を上昇する高さにより充填性能を判定する。必要な試料の量は約2.5リットルで、使用する鋼球の直径により試料の通過する間隙の大きさが変わり試験の難易度が調整できる。表1に使用する

鋼球と装置内の空隙の諸元を示す。試験はセットした円筒と塩ビパイプの間から鋼球をランダムに投入し、円筒上部から鋼球が数mmはみ出す状態で行う。

3. 試験

3.1 対象とした材料

鋼球間隙充填試験が可能な材料は「ロートを流下する」とこと「鋼球間隙と同程度の固形物がない」ことが前提である。したがって、コンクリートの場合は粗骨材を除いたモルタル配合とし、細骨材は2.5mmのふるいを通して使用した。

本論文で対象とした充填用の材料は次の3種類である。

a.高流動コンクリート配合のモルタル

b.低レベル廃棄物ドラム缶充填モルタル

c.山岳トンネルロックボルト用注入ペースト

これらの材料はどれも締固めされることなく目標空隙への高い自己充填性能が要求されるが、それぞれコンシスティンシーはかなり異なっている。

表1 鋼球の諸元

呼び径	8	13	16	19	25	38
直径 mm	7.98	12.73	15.84	18.93	25.27	38.01
容積 cm ³ /個	0.266	1.080	2.081	3.552	8.449	28.75
質量 g/個	2.04	8.34	16.32	28.23	66.79	225.4
充填数個	11760	2792	1407	792	315	85
空隙率%	38.2	40.4	42.1	44.4	47.4	51.7

表2 試験方法

試験名	仕様
スランプフロー	JSCE-F503-1990
ボックス型充填試験	参考文献1)
モルタルスランプフロー	JIS A 1173
Pロート	JSCE-F521-1994
振動式粘度計	太平洋セメント社製 CJV1000

表3 各試料の実用的と考えられる試験値の範囲

試料名	粘度 (mPa·s)	モルタルスランプ 70°(cm)	Pロート流下 時間(秒)
高流動配合モルタル	200~400	30~40	—
ドラム缶充填モルタル	100~200	40~50	16~50
ロックボルト注入ペースト	20~150	20~40	10~30
普通コンクリート配合モルタル	50~200	10~12	—

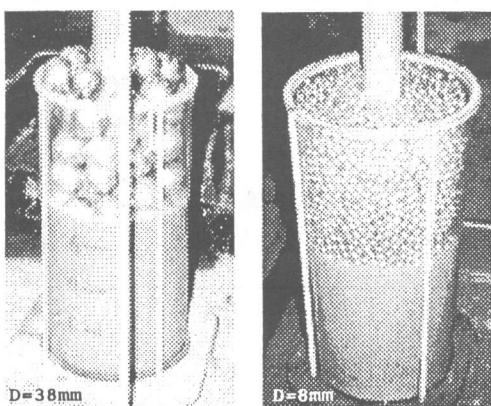


図1 鋼球間隙充填試験装置

試験方法の一覧を表2に、振動式粘度計で測定した粘度とモルタルスランプフローのフロー値、P ロート流下時間の各試料の実用的と考えられる測定値の範囲を表3に示す。

3.2 高流動コンクリート配合モルタル

高流動コンクリートの品質はスランプフロー値と変形速度を表す試験値（たとえば、フロー速度やロート流下時間）で示される。しかし、狭い空間への充填性能はこれらの値で表現することが難しいため、U型あるいは、ボックス型充填試験器の充填高さで評価される。この試験器は比較的大型で、容量が大きいことから配合検討時に頻繁に使用することは容易でなく、少量のモルタル試験によりコンクリートの充填性能を推定できることが望ましい。そこで、高流動コンクリートのボックス充填試験結果とそのコンクリートと同じ配合のモルタルの鋼球間隙充填試験結果を比較することにより配合選定への適用性を検討した。

高流動コンクリートの品質試験はスランプフローとボックス充填試験とし、ボックス充填試験は鉄筋障害3本と5本の場合を続けて行った。モルタル

はモルタルスランプフロー試験を行った。

表4に使用材料を、表5に実験に用いた高流動コンクリートの配合を示す。単位粗骨材容積は $0.32\text{m}^3/\text{m}^3$ 一定である。表5の記号欄の太字は実用的な配合で、斜体は砂セメント比の影響を検討するために粗骨材容積と水粉体比を一定として単位水量を変動させた配合である。太字の配合は施工実績のあるものに準じており、No.1,2が粉体系、No.3,4が併用系、No.5が増粘剤系に分類される。モルタルは表5の粗骨材を除いた重量で練り混ぜ、細骨材は 2.5mm のふるいを通過したものを使用した。試料は高性能AE減水剤の添加量により、コンクリートはスランプフローを $65 \pm 5\text{cm}$ に、モルタルはモルタルスランプフローを $35 \pm 2\text{cm}$ に調整して試験を行った。

図2にコンクリートのボックス充填高さとモルタルの鋼球間隙充填高さの結果を示す。コンクリートはスランプフローを良好な範囲に調整していることから鉄筋障害3本のボックス充填高さはN-53-50を除いて 30cm 以上になっている。障害条件が厳しいとされる鉄筋障害5本の場合は障害3本の場合よりそれぞれ充填高さが低くなっている。一方、鋼球間隙充填高さの結果は、コンクリートのボックス充填高さ障害5本の結果と同様な傾向を示し、より充填性能の違いがはっきり現れている。球径 25mm では充填条件がきびしそうであるが、 38mm の鋼球間隙充填高さが 20cm を越えていれば、その配合のコンクリートはボックス充填試験による充填高さが 30cm となり、充填性能が良好な配合であると判定できる。

表4 使用材料(a)

材料名	特性
細骨材	鬼怒川産川砂 比重 2.58
粗骨材	新治産硬質砂岩碎石 比重 2.66
セメント	
普通ポルトランド	比重 3.15, 比表面積 3250
低熱ポルトランド	比重 3.20, 比表面積 4170
三成分	比重 2.80, 比表面積 4130
フライアッシュ	比重 2.20, 比表面積 3000 程度
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
増粘剤	水溶性セルロースエーテル

表5 高流動コンクリートの配合

No	記号	セメント種類	水粉体比	砂セメント容積比	単位量 kg/m^3					空気量 %	備考
					W	C	FA	S	G		
1	B-30-40	低熱ポ	0.30	0.40	178	592	---	702	851	4.5	
	B-30-45			0.45	160	533		795			
	B-30-50			0.50	145	483		877			
2	L-30-42	三成分	0.30	0.30	160	533	---	735	851	4.5	
3	L-35-43	三成分	0.35	0.35	170	486	---	751	851	4.5	増粘剤添加率 $0.1\%W$
4	F-40-45	普通ポ	0.40	0.45	175	307	131	788	851	4.5	増粘剤添加率 $0.2\%W$
5	N-53-40	普通ポ	0.53	0.40	227	428	---	707	851	4.5	増粘剤添加量 $350\text{ g}/\text{m}^3$
	N-53-45			0.45	206	389		795			
	N-53-50			0.50	185	352		874			

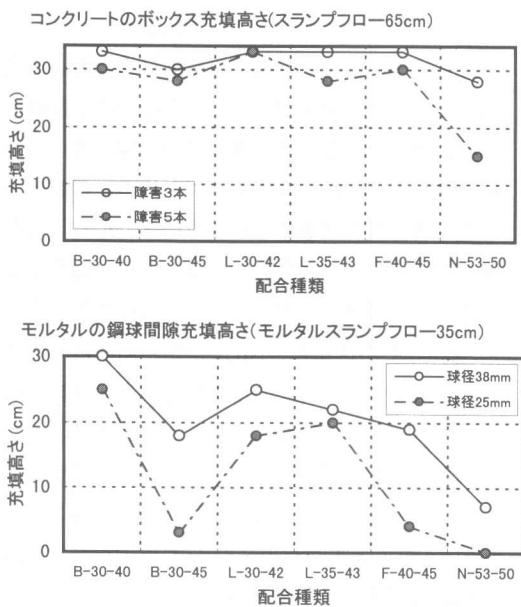


図2 ボックス充填高さと鋼球間隙充填高さの比較³⁾

表6 使用材料(b)

料名	特性
細骨材	鬼怒川産川砂 比重 2.58
セメント	普通ポルトランド 比重 3.15
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系

表7 モルタルの配合水準

項目	水準
水セメント比 W/C	0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55
砂セメント比 S/C	0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5
混和剤添加率 Sp/C(%)	0, 0.1, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0

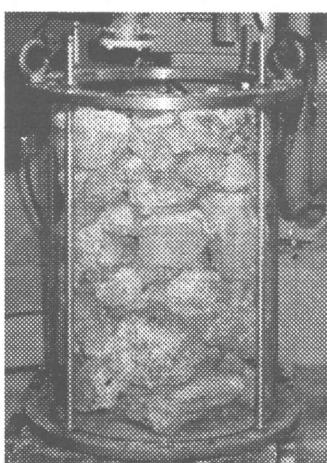


写真1 廃棄物ドラム缶の実大模型

3.3 低レベル廃棄物ドラム缶充填モルタル

原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物の雑固体用固化処理モルタルはドラム缶に詰められた被充填物の間隙を充填するするために使用される。したがって、このモルタルの充填性能はプレパックドコンクリートの注入モルタルの配合設計を参考にして、Pロートの流下時間（16～50秒）で規定する方法が検討されている⁴⁾。高い充填性を得るために水セメント比の大きい方が容易であるが、求められる圧縮強度とブリーディング率によっては化学混和剤を使用して、50%程度の水セメント比のモルタルを使用する。

配合を選定する場合は実際の雑固体を詰めたドラム缶を用いた充填試験を行うことが望ましいが、試験が煩雑であり、被充填物の設置の再現に注意と労力が必要である。

そこで、このモルタルを対象として鋼球間隙充填試験の適用性を検討した。使用材料を表6に、試料の配合水準を表7に示す。

図3に水セメント比と砂セメント比一定で高性能AE減水剤添加率(Sp/C)を変えた場合の充填高さを示す。Sp/C=0では充填高さは0で、添加量を増やしていくと充填高さが大きくなり始め、Sp/C=0.5%で球径16mm, 19mmは充填高さが30cmとなっている。さらにSp/Cを大きくしていくと球径19mmでは充填高さ30cmを維持しているのに対し球径16mmではSp/C=1.0%で充填高さが0cmとなった。これは高性能AE減水剤が過添加になり、細骨材がペーストと分離しやすくなつたことが原因である。分離した細骨材が鋼球の間隙を閉塞し、ペースト分が通過できないことによる。材料分離の傾向が少ないSp/C=0.5%でも球径13mmでは充填高さが6cmであり、さらに高性能AE減水剤を増やし、わずかでも材料分離の傾向が増せば、閉塞して充填高さが0になる。この結果から充填用モルタルの充填性能を評価するためには球径16mmが最適であることがわかる。13mmでは間隙条件がきびしそう、19mm以上では材料分離が評価できない。

図4に球径16mmの場合のPロート流下時間

と充填高さの関係を示す。材料分離の傾向が少なく、P ロート流下時間が 90 秒以下の試料では、充填高さ 30cm を示すが、材料分離の傾向が大きい試料では P ロート流下時間が 40 秒程度であっても充填高さは 0 である。すなわち、充填モルタルの管理値である 16~50 秒以内でも材料分離の傾向がある試料の充填性能は低く、50 秒以上でも 90 秒程度以内であれば高い充填性能を示す試料の多いことがわかる。

3.4 ロックボルト用注入材

ロックボルト用の注入材は短時間でロックボルトと地山の付着力を得るために速硬性と低ブリーディング率および高い充填性能が要求される。したがって、早強性の材料を低水粉体比で使用し、収縮を低減する材料を加えてあるため、粘性が高く、また製造からの経過時間による性状の変化が大きい。試料の管理は P ロート流下時間、あるいはフローで行われているが、この注入材には細骨材を用いないことから充填性能の評価を直径 8 mm の鋼球間隙充填試験で試みた。

試験に用いた配合を表 9 に示す。材料は速硬性

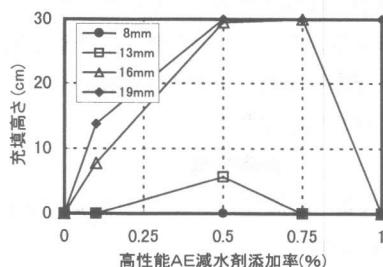


図 3 混和剤添加率による充填高さの変化(W/C=40,S/C=1)⁵⁾

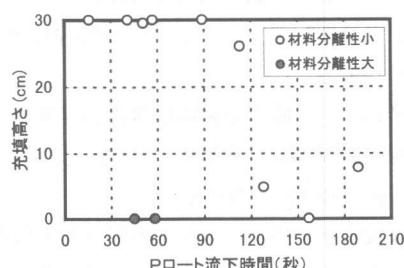


図 4 P ロート流下時間と充填高さの関係

セメントが主成分で、粉体に水を加えてモルタル用のホバートミキサーで 3 分間練り混ぜ、P ロート試験、モルタルスランプフロー試験と鋼球間隙充填試験を行った。その後、残りの試料は静置し、所定の時間経過後に同様の試験を行った。

図 5 に試料作製からの経過時間と各計測値の関係を示す。水粉体比 0.45 の試料は練り混ぜ直後に比べ 30 分経過後の方が P ロート流下時間は小さくなり、同様に充填高さも練り混ぜ直後より 30 分後の方が大きくなった。60 分後の充填高さは、

表 8 使用材料(C)

材料名	特 性
ロックボルト定着材	比重 2.75

表 9 ペーストの配合水準

項 目	水 準
水粉体比 W/P	0.45, 0.60

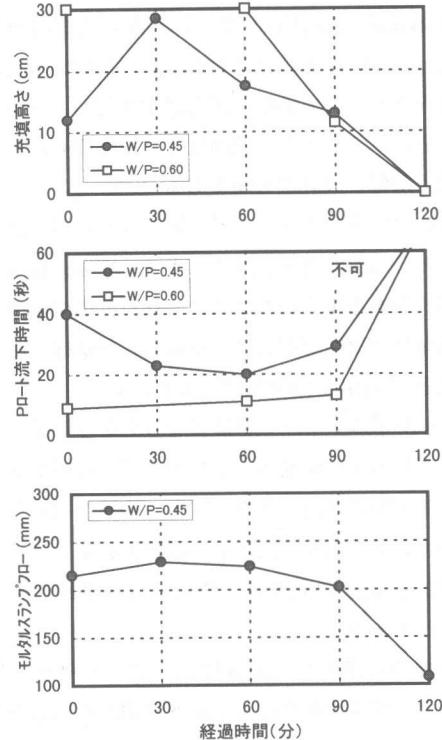


図 5 ロックボルト注入材の経時変化

18cmに低下したが、Pロート流下時間とモルタルスランプフローでは充填性能が低下するような測定値にはなっていない。また、水粉体比0.60の試料では粘性が低く、Pロート流下時間は水と同じレベルである。したがって、充填性も非常に高い。時間の経過により、徐々に粘性が大きくなっているが、90分後のPロート時間は13秒とまだ十分な流動性があると思われる値であるが、鋼球間隙充填試験の充填高さは11cmと大きく低下した。

このように充填高さで示される充填性能によれば、試料は製造後20~40分の間に使用することが望ましく、Pロート流下時間が大きくなり始める時点で充填性能はすでに低下している。

3.5 試験装置の評価

3種類の材料による鋼球間隙充填試験の結果をまとめると以下のようなになる。

高流動コンクリートの配合設計では、粗骨材を除いたモルタルについて38mmの鋼球で充填高さが20cm以上あれば、コンクリートのボックス型充填試験（鉄筋障害3本）で充填高さはほぼ30cm以上になることがわかった。したがって、モルタルにより充填性の配合選定を行い、コンクリートのボックス型充填高さで充填性の確認をするような配合設計が可能である。

低レベル廃棄物ドラム缶充填モルタルは、Pロート流下時間が管理範囲よりも大きても、充填性能が十分ある場合のあることや材料分離の傾向がある試料では閉塞がおこり充填高さがほぼ0になることが16mmの鋼球で判定できる。

ロックボルト用注入材は製造してからのフレッシュ特性の変化が速い。Pロート流下時間やフローの測定値の変化が小さくとも、鋼球を用いた充填高さの低下は非常に大きい場合がある。この注入材は8mmの充填高さにより可使時間の判定が可能である。

以上の結果から、図6に示すように材料の砂モルタル容積比とPロート流下時間あるいはモルタルスランプフローの値で使用する鋼球径を決めることにより、鋼球間隙充填高さという値で材料

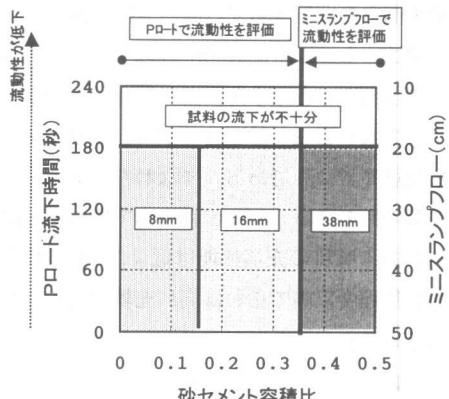


図6 充填材料による鋼球径の選定

の充填性が評価できる。本論文で対象とした他に、それぞれの材料特性にあった直径の鋼球を選定してその材料の充填性能を判定することが可能であると考えられる。

4.まとめ

鋼球間隙充填試験によりセメント系充填材料の充填性評価を行った。この試験の充填高さは通常の管理用試験に比べて充填性を敏感に表すことができ、「材料分離」、「経時変化」などの充填性能の低下が明確に評価できることがわかった。

材料のコンシスティンシーと充填する空隙の難易度から充填試験に使用する鋼球径を選定する方法の検討が今後の課題である。

参考文献

- 1) 土木学会編, 高流動コンクリート施工指針, pp.157-159, 1997
- 2) 土木学会編, コンクリート標準示方書[規準編], pp.381-382, 1996
- 3) 松田敦夫: 粉体種類の異なるモルタルの充填性能, 自己充填コンクリートセミナー論文報告集, pp.11-16, 1997.5
- 4) 松村勝秀ほか: 原子力発電所雑固体廃棄物の廃棄体製作技術と課題, 放射性廃棄物研究, Vol.2, No.1&2, pp.153-181, 1996.2
- 5) 松田敦夫ほか: 再生セメントを用いた固形化用充填材料の特性, 放射性廃棄物研究, Vol.3, No.3, pp.55-61, 1997.3