

論文 粗骨材・モルタル粒子間相互作用を考慮した自己充填 コンクリートの配合設計法

枝松 良展^{*1}・安本 礼持^{*2}・西田 直樹^{*3}・大内 雅博^{*4}

要旨：模擬粗骨材を利用した簡易なモルタル漏斗試験を利用することにより、コンクリート中のモルタルのせん断変形抵抗性の評価が容易となった。本研究は、模擬粗骨材を用いた簡易なモルタル漏斗試験を利用して、モルタル構成粒子の物理的特性に対応した配合設計法を提案するものである。これにより、自己充填コンクリートの既存の配合設計法をより幅広い性状の細骨材や粉体に対応させることが可能となる。

キーワード：自己充填コンクリート、配合設計法、粒子間相互作用、漏斗試験

1. はじめに

フレッシュモルタルのフロー試験および漏斗試験を利用した自己充填コンクリートの配合設計法が提案されている^{1)・2)}。この配合設計法では、自己充填性を実現するためにフレッシュコンクリート中のモルタルに要求される変形性および粘性を、モルタル試験により評価し、適切な水粉体比および高性能 AE 減水剤添加量を決定するものである。コンクリートによる評価試験を最小限にすることのできる合理的な配合設計法である。

コンクリートによる評価試験を最小限に抑えられるのは、使用材料や配合条件において、適用範囲を限定しているためである。逆に、適用範囲を限定しなければ、現状では、このようなモルタル試験による評価では、フレッシュコンクリートの自己充填性に大きな影響を及ぼすコンクリート中のモルタルのせん断変形抵抗性、すなわち、粗骨材とモルタル構成粒子との相互作用を十分に評価できないからである。

一方、資源の有効利用の観点から、今後様々な品質の粉体材料、骨材の使用が予想される。

したがって、使用材料などの適用範囲を制限することなく、様々な材料にも適用できる配合設計法の構築が望まれる。そのためには、粗骨材とモルタル構成粒子との相互作用を適切に評価できる簡易な試験方法を開発する必要がある。

このような観点に鑑み、筆者らは粗骨材とモルタル構成粒子との相互作用を適切に評価できる簡易な試験方法を開発した³⁾。模擬粗骨材と従来のモルタル漏斗試験器¹⁾を利用した評価法である。

本研究は、模擬粗骨材を用いたモルタル漏斗試験を利用して粗骨材・モルタル粒子間相互作用を評価し、モルタル構成粒子の物理的特性に対応した細骨材量を決定する配合設計法を提案するとともに、粗骨材・モルタル粒子間相互作用に及ぼすモルタル構成粒子の影響を検討し、本配合設計法の適用範囲を明らかにするものである。

2. 粗骨材・モルタル粒子間相互作用の簡易評価法

2.1 粗骨材・モルタル粒子間相互作用

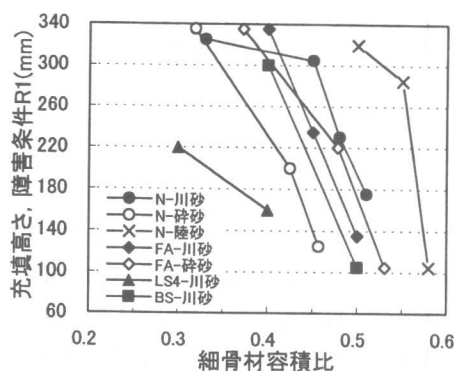
フレッシュコンクリートの自己充填性に大

*1 住友大阪セメント㈱ セメント・コンクリート研究所 研究員 博士(工学) (正会員)

*2 住友大阪セメント㈱ セメント・コンクリート研究所 研究員 工修 (正会員)

*3 住友大阪セメント㈱ セメント・コンクリート研究所

*4 高知工科大学専任講師 工学部 社会システム工学科 博士(工学) (正会員)

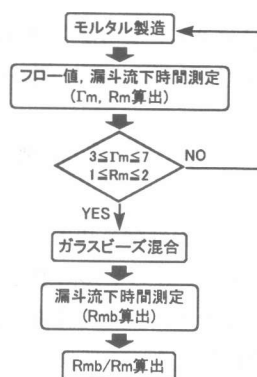


図一 細骨材容積比と充填高さの関係

きな影響を及ぼすモルタルのせん断変形抵抗性は、コンクリートの変形時に粗骨材同士が接近することによりモルタルに発生する直応力の影響を受ける。また、モルタルのせん断変形性は、モルタルに生じる直応力の増加とともに大きくなるが、その増加の程度は材料・配合によって異なることが知られている³⁾。

図一は、普通ポルトランドセメント、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末 (LS4) をそれぞれ単独で用い (これらの品質は表-2 参照)、川砂、砕砂または陸砂 (これらの品質は表-1 参照) を用いたコンクリートの充填高さ⁴⁾ (ボックス形充填試験器使用) を、これらのコンクリート中のモルタルの細骨材容積比で整理したものである。粗骨材量 (実積容積に対して 50%) および空気量 (1.5~2.5%) は一定量とした。なお、ここに示す充填高さとは、同一の材料、粗骨材量および細骨材容積比において、高性能 AE 減水剤添加量あるいは水粉体比を変化させ、最大となる充填高さをとったものである。

図一に示すコンクリート中のモルタルの品質試験結果はほぼ等しいものであった (相対漏斗速度比¹⁾ = 1~1.3, 相対フロー面積比¹⁾ = 5~7)。すなわち、図一は、コンクリート中の粗骨材の品質・量が同じでも、モルタル構成粒子の品質が異なると、モルタルとコンクリート試験の結果は必ずしも一対一に対応するとは限らないことを示している。これは、粗骨材とモ



図二 粗骨材・モルタル粒子間相互作用の簡易評価法

ルタル構成粒子間の相互作用によるものである。

2.2 簡易評価法³⁾

筆者らは、粗骨材・モルタル粒子間相互作用を簡易な試験により評価する方法 (以下、簡易評価法と呼ぶ) を開発した。

評価試験器には、岡村らが提唱した自己充填コンクリートの配合設計法において、高性能 AE 減水剤添加量および水粉体比を調整する際に用いられるモルタル用 V 漏斗試験器¹⁾を使用する。以下に簡易評価法の具体的手順 (図-2) を示す。

- ①任意の材料、配合のモルタルを製造する。
- ②モルタル漏斗流下時間、モルタルフローを測定し、相対漏斗速度比 Rm (式(1))、相対フロー面積比 Γm (式(3)) を計算する。
- ③相対漏斗速度比 Rm が $1 \leq Rm \leq 2$ 、かつ、相対フロー面積比 Γm が $3 \leq \Gamma m \leq 7$ の場合、このモルタルにガラスビーズ (直径 10mm) を混合する。ガラスビーズの量はモルタル容積の 20% とする。
- ④ガラスビーズを混合したモルタルの漏斗流下時間を測定し、相対漏斗速度比 Rmb (式(2)) を計算する。
- ⑤ガラスビーズを混合したモルタルの相対漏斗速度比 Rmb と、ガラスビーズを混合する前のモルタルの相対漏斗速度比 Rm の比 Rmb/Rm をとる。
- ⑥粗骨材・モルタル粒子間の相互作用の程度を Rmb/Rm で評価する。 Rmb/Rm が小さいほど、

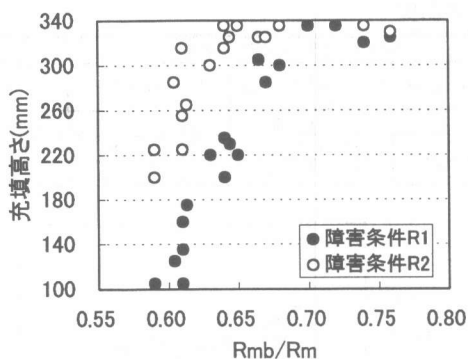


図-3 Rmb/Rm と充填高さの関係

粗骨材・モルタル粒子間相互作用が大きいと評価される。

$$Rm = 10/tm \quad (1)$$

$$Rmb = 10/tmb \quad (2)$$

$$\Gamma m = (Fm/100)^2 - 1 \quad (3)$$

ここに、 Rm はモルタルの相対漏斗速度比、 tm はモルタルの漏斗流下時間(秒)、 Rmb はガラスビーズを混合したモルタルの相対漏斗速度比、 tmb はガラスビーズを混合したモルタルの漏斗流下時間(秒)、 Γm はモルタルの相対フロー面積比、 Fm はモルタルフロー(mm)を示す。

3. 粗骨材・モルタル粒子間相互作用を考慮した自己充填コンクリートの配合設計法

3.1 コンクリートの自己充填性と粒子間相互作用

フレッシュコンクリートの自己充填性は、充填装置を用いた間げき通過性試験により評価することが推奨されている⁴⁾。しかし、配合設計時の手間の軽減の観点からは、なるべく簡易な評価方法が望ましい。そこで、簡易評価法を利用した自己充填コンクリートの配合設計法について検討した。

図-1に示したコンクリートの充填高さを、これらのコンクリート中のモルタルの Rmb/Rm との関係で整理したのが図-3である。なお、ここでは、障害条件 R1 と同時に測定した障害条件 R2 における充填高さも示している。 Rmb/Rm と充填高さとの関係には、極めて高い相関性が

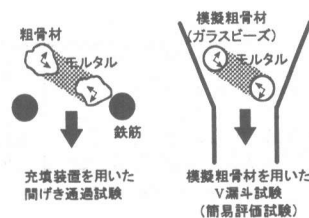


図-4 コンクリートが間げきを通過する際にモルタルに発生する直応力¹⁾

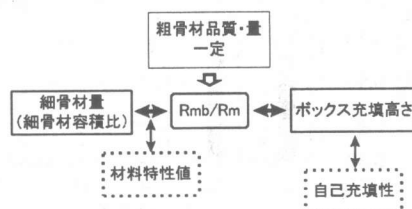


図-5 簡易評価法を利用した細骨材容積比の設定法

認められる。

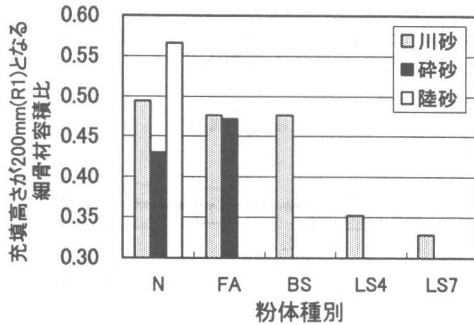
図-4に示すように、モルタル相の変形性と粘性が適切な場合、充填装置を用いた間げき通過性試験は、直応力発生下(鉄筋間通過時のコンクリート中)におけるモルタルのせん断変形抵抗性をコンクリートの充填高さで表現している。同様に、簡易評価法から得られる Rmb/Rm も、直応力発生下(主に、V漏斗の直管部通過時)におけるモルタルのせん断変形抵抗性を表現しているのである。充填高さと Rmb/Rm との関係に高い相関性が認められるのは、両者の試験方法が、共に直応力発生下におけるモルタルのせん断変形抵抗性の程度、すなわち、粗骨材・モルタル粒子間相互作用を評価しているためと考えられる。したがって、充填装置を用いた間げき通過性試験の代用として簡易評価法を利用することは可能であると考えられる。

3.2 粒子間相互作用を考慮した配合設計法

簡易評価法では、モルタルの変形性および粘性とは独立して、すなわち、水粉体比および高性能 AE 減水剤添加量とは独立して粗骨材・モルタル粒子間相互作用が評価される。したがって、簡易評価法を利用することにより、設定した細骨材容積比を簡単に評価できるのである。本研究で提案する配合設計法とは、図-5に示すよ

表－1 細骨材の品質

種類	表乾比重	実積率 (%)	粒形判定実積率 (%)	粗粒率	吸水率 (%)	ふるいを通るものの百分率 (%)						
						≤0.075mm	≤0.15mm	≤0.3mm	≤0.6mm	≤1.2mm	≤2.5mm	≤5mm
川砂	2.56	66.9	60.0	3.03	1.17	1.7	5	16	35	60	81	100
陸砂	2.64	68.1	60.8	2.42	0.82	0.8	11	37	58	69	83	100
砕砂	2.67	59.1	54.9	2.45	1.04	5.9	12	28	46	71	98	100



図－6 同一自己充填性となる細骨材容積比

うに、粗骨材の品質および量を一定とした場合において、簡易評価法により得られる Rmb/Rm を指標として、所定の自己充填性を満足する最大の細骨材容積比を得るものである。

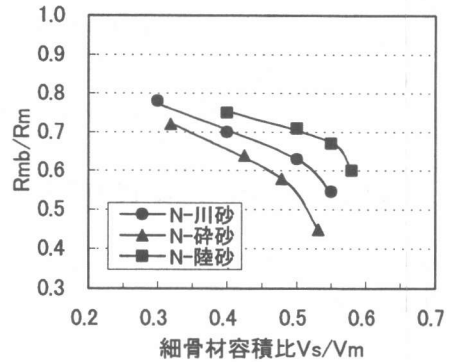
一方、簡易評価法による配合設計法を確立するためには、モルタル構成材料の特性と Rmb/Rm との関係を明らかにすることが重要となる。それは、図－1 および図－6 に示すように、同一の自己充填性、すなわち、同一の Rmb/Rm を得るための細骨材容積比が、使用材料の品質により異なるためである。そこで、細骨材および粉体の物理的品質が Rmb/Rm に及ぼす影響を以下に検討する。

4. 粒子間相互作用に及ぼす材料特性の影響

4.1 細骨材特性の影響

滋賀県野洲川産川砂、大阪府高槻産砕砂、茨城県鹿島産陸砂（表－1）を用いたモルタルの細骨材容積比と Rmb/Rm の関係を図－7 に示す。粉体は普通ポルトランドセメント（表－2）を用いた。

何れの細骨材でも、 Rmb/Rm は、ある細骨材容積比までは、細骨材容積比の増加とともにほぼ直線的に減少し、やがて急激に減少するのが認められる。



図－7 細骨材容積比 Vs/Vm と Rmb/Rm の関係に及ぼす細骨材の影響(N使用)

同一細骨材容積比における Rmb/Rm を比較すると、粒形判定実積率が大きく、粗粒率の小さい細骨材ほど Rmb/Rm は大きくなり、また、 Rmb/Rm が急激に減少し始める細骨材容積比が大きくなるのが認められる。これは、使用する粉体が同じ場合、粒子形状が良好で平均粒子径の小さい細骨材ほど、細骨材粒子同士の噛み合いによるせん断変形抵抗性が低くなることを示していると考えられる。

4.2 粉体特性の影響

普通ポルトランドセメント(N)、フライアッシュ(FA)、高炉スラグ微粉末(BS)、石灰石微粉末(LS4, LS7)（表－2、図－8）をそれぞれ単独で用いたモルタルの細骨材容積比と Rmb/Rm の関係を図－9 に示す。細骨材は川砂を用いた。

Nを用いた場合の「 Rmb/Rm は、ある範囲の細骨材容積比では、細骨材容積比の増加とともにほぼ直線的に減少し、やがて急激に減少する」という傾向は、使用する粉体を変えた場合でも確認できる。

一方、同一細骨材容積比における Rmb/Rm は、粉体の品質により異なっているのが認められる。以下に、粉体の物理的品質が Rmb/Rm に及ぼす

表-2 粉体の品質

種類	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	平均粒子径 (μm)	直径90μm以上の粒子 (%)	形状係数 (凸凹係数 ⁵⁾)
普通ポルトランドセメント	N	3.13	3630	13.1	0	1.20
石灰石微粉末	LS4	2.71	4330	26.2	18.5	1.17
	LS7	2.71	7340	4.4	0	1.18
高炉スラグ微粉末	BS	2.89	4120	11.9	0	1.23
フライアッシュ	FA	2.34	4220	19.7	7.5	0.98

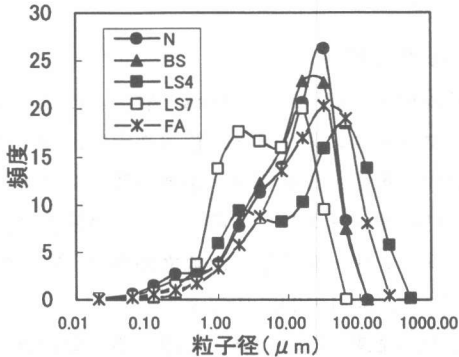


図-8 粉体の粒度分布

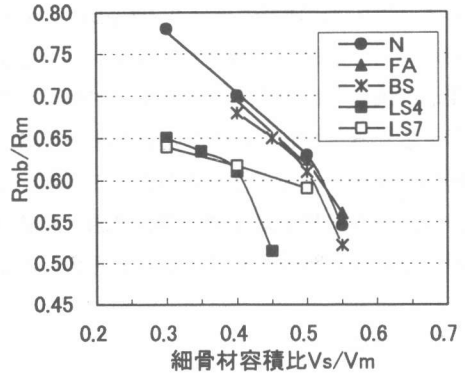


図-9 細骨材容積比 V_s/V_m と R_{mb}/R_m の関係に及ぼす粉体の影響(川砂使用)

影響を検討する。

(1) 粒度分布の影響

粒度分布の形(分布のピークが2つ)および粒子形状はほぼ等しいものの、平均粒子径の異なるLS4とLS7を比較する。比較的小さい細骨材容積比では平均粒子径の影響は認められない。しかし、細骨材容積比が大きくなると、LS4の R_{mb}/R_m は急激に減少する。これは、LS4に含まれる比較的大きい粉体粒子が、細骨材粒子と同様の働きをし、モルタルのせん断変形抵抗性を増大させているためと考えられる。

粒子形状および比表面積はほぼ等しいものの、粒度分布形の異なるLS4とBSを比較する。 R_{mb}/R_m はLS4の方がかなり小さく、この差は先に述べたLS4に含まれる粗大粒子の影響によるものだけとは考えにくい。そこで、粒度分布の形がモルタルの変形性・粘性に影響を及ぼすことに着目し、図-9に示すモルタルの水粉体容積比を比較した。

細骨材容積比0.4における各粉体の水粉体容積比は、N:0.80~0.84, BS:0.82~0.86, FA:0.60~0.62, LS4:0.53~0.57, LS7:0.60~0.65であった。粒度分布の幅広い粉体(LS4, LS7)の

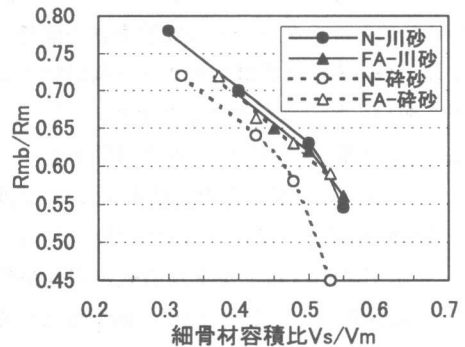


図-10 細骨材容積比 V_s/V_m と R_{mb}/R_m の関係に及ぼす粉体の粒子形状の影響

方が、所定の変形性および粘性を得るための水粉体容積比が小さくなるのである。したがって、LS4の R_{mb}/R_m がBSより小さいのは、粗大粉体粒子の影響に加え、粒度分布の形による水粉体容積比の低下が影響しているものと考えられる。

以上のように、粉体の粒度分布の形および粗大粒子の存在が、 R_{mb}/R_m に影響を及ぼすことが明らかとなった。

(2) 粒子形状の影響

図-10は、粒度分布の形(分布のピークが1つ)および平均粒子径のほぼ等しいNとFAをそ

れぞれ単独で用い、川砂または砕砂を用いたモルタルの細骨材容積比と Rmb/Rm の関係を示したものである。

砕砂を用いた場合、同一細骨材容積比における Rmb/Rm は、FAの方が大きくなっている。この傾向は、細骨材容積比が大きい場合に顕著である。これは、球形に近いFA粒子が、細骨材容積比の増加に伴って増加するモルタルのせん断変形抵抗性を抑制することを示しているものと考えられる。なお、川砂を用いた場合には、両粉体の Rmb/Rm に大きな差が認められないことから、この抑制効果は粒子形状の悪い細骨材を用いた場合に顕著に表れるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、粗骨材・モルタル粒子間相互作用を考慮した自己充填コンクリートの配合設計法を提案するために、簡易評価法より得られる Rmb/Rm とコンクリートの充填高さの関係、および、 Rmb/Rm に及ぼすモルタル構成粒子の影響を検討した。以下に結論を示す。

- (1) 充填装置を用いた間げき通過性試験から得られるコンクリートの充填高さ、および簡易評価法から得られる Rmb/Rm は、共に直応力発生下におけるモルタルのせん断変形抵抗性を評価していることから、両指標には極めて高い相関性が認められた。このことから、 Rmb/Rm による自己充填コンクリートの配合設計が可能なが示唆された。
- (2) 細骨材や粉体の品質により、同一細骨材容積比における Rmb/Rm は異なるが、「 Rmb/Rm は、ある範囲の細骨材容積比では、細骨材容積比の増加とともにほぼ直線的に減少し、やがて急激に減少する」という傾向は変わらないことが明らかとなった。
- (3) 同一細骨材容積比における Rmb/Rm に影響を及ぼす以下に示す材料特性が明らかとなった。使用する粉体が同じ場合では、細骨材の粒子形状および平均粒子径である。一方、使用する細骨材が同じ場合では、粉体の粒度

分布の形、粒子形状および粉体中の粗大粒子である。本配合設計法を確立するためには、今後、これらの材料特性値を用いて Rmb/Rm と細骨材容積比との関係を定式化し、他の細骨材・粉体の組み合わせにおいて、その適用性を確認することが重要である。

参考文献

- 1) 岡村甫・前川宏一・小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート，技報堂出版，1993.9
- 2) 大内雅博・日比野誠・小澤一雅・岡村甫：自己充填コンクリート用モルタルの配合設計法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.19-24，1997.6
- 3) 大内雅博・枝松良展・小澤一雅・岡村甫：自己充填コンクリート中の粗骨材・モルタル粒子間相互作用の簡易評価法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，1999（投稿中）
- 4) 土木学会コンクリート委員会：高流動コンクリート施工指針，土木学会，1997.7
- 5) 緑川猛彦・丸山久一：保水能力に関する各種粉体の粒子形状や粒度分布の評価，土木学会論文集，No.544/V-32，pp.121-130，1996.8

【練混ぜ方法】

モルタル（ミキサ：JIS R 5201）



一回の練混ぜ量：1.5ℓ

コンクリート（強制2軸ミキサ，容量55ℓ）



一回の練混ぜ量：35ℓ

(一次水)=(単位水量)×0.85-(細骨材の表面水)

【使用材料】

粗骨材：大阪府高槻産砕石

表乾比重 2.70，実積率 58.6%，粗粒率 6.87

高性能 AE 減水剤：ポリエーテル系

ガラスビーズ：比重 2.54，粒径 10mm