

論文 自己充填コンクリート用モルタルの配合設計法

大内 雅博^{*1}・日比野 誠^{*1}・小澤 一雅^{*2}・岡村 甫^{*3}

要旨：自己充填コンクリート用モルタルに適当な変形性と粘性を付与するための合理的な配合設計法を提案した。高性能減水剤添加量および水/粉体比がモルタルの性状に及ぼす影響を、それぞれ独立に定式化した。本定式化手法を用い、モルタルのフロー・ロート試験の結果から、高性能減水剤添加量および水/粉体比を独立に評価し、最適な性状を得るための高性能減水剤添加量および水/粉体比を推定する方法を提案した。

キーワード：自己充填コンクリート，配合設計法，フレッシュモルタル，高性能減水剤

1. はじめに

自己充填コンクリートの広範な普及が耐久的なコンクリート構造物および建設工事の合理化の実現に必要不可欠であるという立場から、自己充填コンクリートの合理的な配合設計法の確立が望まれている。

岡村らにより、既に自己充填コンクリートをモルタルと粗骨材の二相系として取り扱う配合設計法が提案されている[1]。すなわち、コンクリート中の粗骨材量は実積容積の50%程度とし、細骨容積比を40%程度に制限したモルタルが適度な変形性と粘性を有するように、水セメント比および高性能減水剤添加量を決定する。また、モルタルの変形性と粘性については、相対フロー面積比 Γ_m および相対ロート流下速度比 R_m が指標として提案されている。これらは、簡易なフロー・ロート実験によって求めることが出来るため、実用という観点から採用された指標である。

一方、小澤らは粗粒細骨材(粒径0.09mm以上)容積比40%の中庸熟セメントモルタルの (Γ_m, R_m) とコンクリートの自己充填性能との関係を実験的に求め、モルタル部分の配合が $(\Gamma_m, R_m) = (5, 1)$ である場合に最も高い自己充填性能が得られたと報告している[2]。

以上の自己充填コンクリートの配合設計では、予め設定された配合でコンクリートを練り混ぜ、スランプフロー、ロートおよびU型試験を行い、最適な性状を実現するために高性能減水剤添加量および水/粉体比を調整することとなる[1]。すなわち、物理的特性値により決定された粗・細骨材量の下で、ペースト部分が最適な変形性および粘性を有するように水/粉体比と高性能減水剤添加量を調整する必要がある。

しかしながら、ペーストの性状は、使用する粉体および高性能減水剤の種類に依存し、従ってコンクリートが最適な変形性と粘性を実現する水/粉体比および高性能減水剤添加量も異なる。粉体の特性の評価は容易ではなく、さらに高性能減水剤の効き目は粉体との化学的相互作用をも考慮する必要があるため、自己充填コンクリートとして最適な配合を簡易に決定する方法が確立されていない。このため、配合の決定には多くの試験練りを必要とする試行錯誤によっているのが現状であり、最適な高性能減水剤添加量と水/粉体比を決定するための手間を解消することが、自

^{*1} 東京大学大学院博士課程 工学系研究科 社会基盤工学専攻，工修（正会員）

^{*2} 東京大学大学院助教授 工学系研究科 社会基盤工学専攻，工博（正会員）

^{*3} 東京大学大学院教授 工学系研究科長，工博（正会員）

己充填コンクリート普及のための課題となっている。

本研究では、自己充填コンクリートを粗骨材とモルタルからなる二相系材料として取り扱い、モルタル部分に適当な変形性と粘性を付与するための、水/粉体比および高性能減水剤添加量を合理的に求める方法についての提案を行った。

2. 配合設計法構築の背景

(1) 試験練りの必要性

任意の材料を用いたモルタルの最適な配合を個々の材料定数のみから決定することは、現段階の技術レベルからは不可能である。モルタルの性状に及ぼす要因は様々であるが、特に最適な Sp/P が高性能減水剤の種類および粉体との組み合わせによって異なり、練混ぜ方法によってもモルタルの性状は変化する。また、最適な V_w/V_p も高性能減水剤の種類、および細骨材の種類によって変動する。従って、実験結果から配合を評価し、モルタルに最適な性状を付与する配合を推定する方法が必要となる。

(2) 配合とモルタル性状との関係

配合設計法を構築するためには、まず、モルタルの高性能減水剤添加量および水/粉体比の変化がモルタルの性状に及ぼす影響を定量的に把握することが必要である。高性能減水剤の添加量 Sp/P (粉体に対する重量比) および水/粉体(体積)比 V_w/V_p によって変化した、中庸熟セメントを用いたモルタル(細骨材

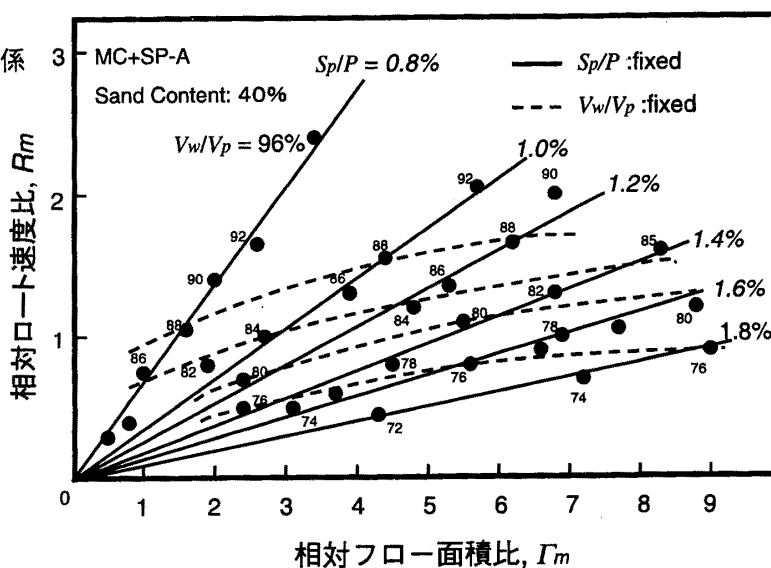


図-1 中庸熟セメントモルタルの配合と性状との関係

容積比 40%) の Γ_m と R_m の関係(以下、 Γ_m - R_m 線と呼称)を示す(図-1). 実線上では Sp/P が一定で V_w/V_p が変化し、点線上では V_w/V_p が一定で Sp/P が変化する。

Sp/P 一定の場合では、 Γ_m - R_m 線は直線として取り扱うことが出来る。その Γ_m - R_m 線は、 Sp/P が増加するに従い傾きが小さくなることから分かる。すなわち、高性能減水剤の添加は変形性と粘性のバランスを変化させると言える。また、 Sp/P の増加に伴い、取り得る V_w/V_p 値も小さくなっている。これは、高性能減水剤の添加による粒子の分散性の向上が、変形に必要な水の量を減少させるためと考えられる。

水の添加によるフロー面積の増加はロート速度の増加を伴うが、高性能減水剤の添加によるフロー面積の増加は、それほど大きなロート速度増加は伴わない(図-2)。両者の役割が違うことにより、適度

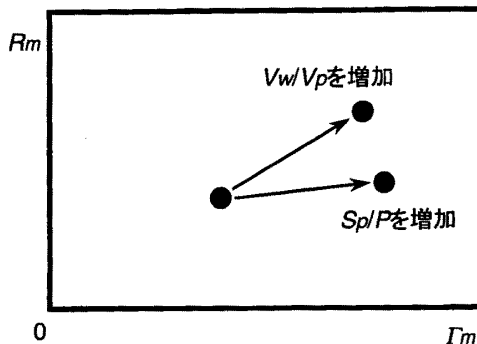


図-2 水と高性能減水剤の役割の違い

な変形性と粘性を両立させる事ができ、自己充填コンクリートが実現できる。言い換えれば、最適な変形性と粘性の組合わせを実現するためには、 S_p/P および V_w/V_p の両方を変化させる必要があり、一方を固定してモルタルに最適な性状を付与することは不可能である。

3. 配合設計法構築の基本コンセプト

(1) 配合設計法の概要

本研究で提案する配合設計法は、モルタル試験による配合の評価、およびその評価にもとづいて最適な配合を推定する、二部から構成される。モルタルのフローおよびロート試験により、配合値 (S_p/P および V_w/V_p) がモルタルの変形性と粘性に及ぼす影響を定量的に評価することによって最適値を予測するものである。

その際、必要な試験回数を極力少なくするため、 S_p/P および V_w/V_p の影響が独立に評価される必要がある。以下、その具体的な方法について述べる。

なお、本研究では、モルタルを練ることによって配合を評価し最適な配合を推定する方法を取り扱っている。しかし、実際に生コンクリート工場でコンクリートの配合を決定する際には、コンクリートの試験結果からモルタルの性状を推定し、最適な高性能減水剤添加量および水/粉体比を推定する方が合理的であると思われる。コンクリートの試験結果からモルタルの性状を推定する方法については別途報告する。

(2) 定式化可能な範囲：前提条件

中庸熟セメントペーストの S_p/P と Γ_m - R_m 線との関係を示す(図-3)。(S_p/P , V_w/V_p) および (Γ_m , R_m) の関係が定量的に記述できるのは、概ね (Γ_m , R_m) = (5, 1) を中心とした、 $R_m < 2$, かつ $R_m < 0.4\Gamma_m$ の範囲である。この傾向は他の粉体を用いたモルタルやペーストでも同様である。従って、モルタルの配合設計・修正法を考案する際には、その性状が図-3 に示す定式化可能な範囲内に入っていることが前提となる。なお、配合の初期設定方法については別途報告する。

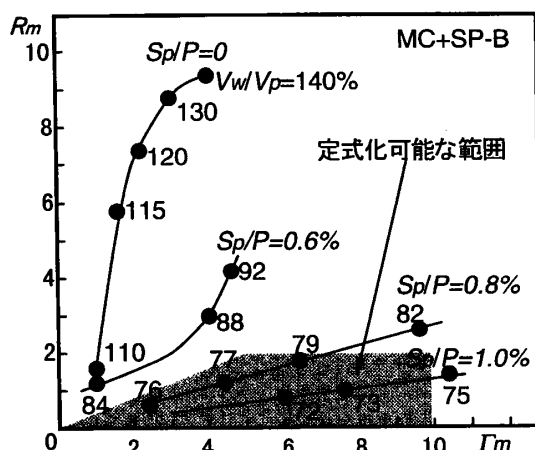


図-3 S_p/P とペースト性状との関係

4. モルタル配合の評価および修正法

(1) 水/粉体比の影響の評価方法

図-3 に示す定式化可能な範囲内では、 V_w/V_p 一定の場合の Γ_m と R_m の関係は曲線で近似できることが報告されている[3]。本研究では、

$$R_m = A \Gamma_m^{0.4} \quad (A \text{ は } V_w/V_p \text{ の関数})$$

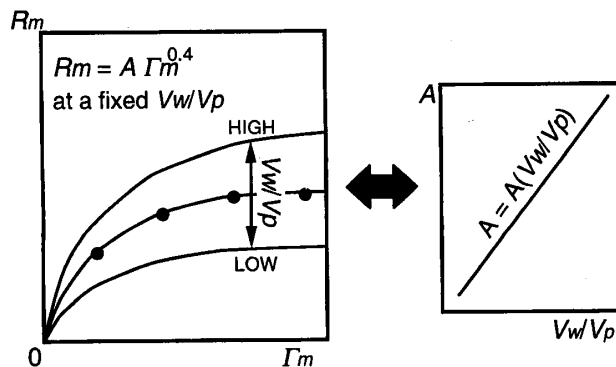


図-4 V_w/V_p とモルタル性状との関係の定式化

という式を提案する。同一の曲線上では S_p/P が変化することとなる(図-4)。なお、係数 A は V_w/V_p

の関数であり、線形関係(以下、 V_w/V_p -A 直線と呼称)にあることが報告されている[3]。

実験結果から最適な V_w/V_p を推定する際には、 V_w/V_p -A 直線の傾きが既知であることが望ましい。 V_w/V_p -A 直線の傾き、すなわち単位あたりの $V_w/V_p(\%)$ の変化に対する係数 A の変化量は、中庸熟セメント・高ビークライトセメント・高炉スラグ微粉末(ブレン値 4,000)を用いたモルタルのいずれについても約 0.04、フラ

イアッシュを用いたモルタルは約 0.06 であり、形状の良いフライアッシュを用いた場合の傾きが大きいことが確かめられた(図-5)。また、実験結果から、これらの V_w/V_p -A 直線の傾きが、使用する高性能減水剤の種類にそれほど依存していないことが認められ、モルタル中の固体粒子の性質のみでほぼ決定されるものと考えられる。これより、通常使用される粒度のセメントを用いたモルタルの場合、分離低減剤等を用いない限り、本実験で得られた中庸熟セメントや高ビークライトセメントモルタルの V_w/V_p -A 直線の傾き 0.04 を用いて差し支え無いものと思われる。

(2) 高性能減水剤添加量の評価方法

図-3 に示す定式化可能な範囲内では、 Γ_m - R_m 線が、点(Γ_m, R_m)=(0, 0)を通る直線として近似できることが実験結果より明らかとなった(図-6)[4]。すなわち、高性能減水剤の添加によるモルタル性状の変化は、原点(Γ_m, R_m)=(0, 0)を通る Γ_m - R_m 直線の傾きの変化によって表現される。これより、1組の実験データ(Γ_m, R_m)から Sp/P に対応する Γ_m - R_m 線を容易に求めることができる(図-7)。

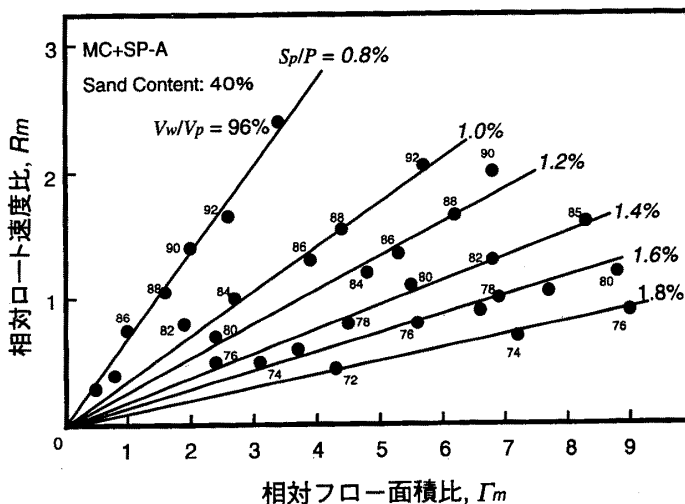


図-6 Sp/P 一定の直線はほぼ原点に収束する

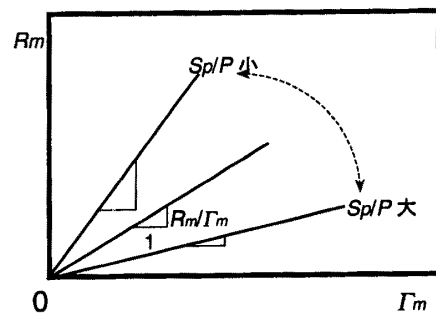


図-7 高性能減水剤の効果(定義)

以下、 Sp/P に対応する Γ_m - R_m 線の傾きを、高性能減水剤がモルタル性状に及ぼす効果として定義する。図-8 に、高性能減水剤の種類、または、使用粉体の違いによる、 Sp/P とその効果の指標 R_m/Γ_m の関係の違いを示す。現時点では、 Sp/P および定義された効果 R_m/Γ_m との間に、種類の異なる高性能減水剤や粉体に共通する関係は見出せなかった。

(3) 配合の評価に基づく最適配合の推定

初期設定された配合のモルタルフロー・ロート試験により、高性能減水剤および水がモルタル性状に及ぼす影響が評価される(図-9)。 V_w/V_p については、 V_w/V_p - A 直線の傾きを0.04程度に設定しておき、目標とする (Γ_m, R_m) に対応する係数 A の V_w/V_p を求める(図-10)。一方、目標とする (Γ_m, R_m) に対応する R_m/Γ_m の Sp/P を求める(図-11)。そして、ここで推定された配合($V_w/V_p, Sp/P$)を用いたモルタルのフロー・ロート試験を行い、 (Γ_m, R_m) が目標の範囲内であれば終了となる。さもなければその試験結果を用いることにより、さらに配合推定を行うことになる。

現時点では Sp/P とその効果 R_m/Γ_m との関係の定式化は完成していない。しかし、モルタルの性状と V_w/V_p については定式化が完成しているため、適当な変形性と粘性を付与する V_w/V_p は合理的に求めることが出来る。 V_w/V_p と Sp/P の2つの未知数を求めるという状況と比較すれば、本研究で提案する手法を用いることで、配合の決定は簡易化できたと言える。

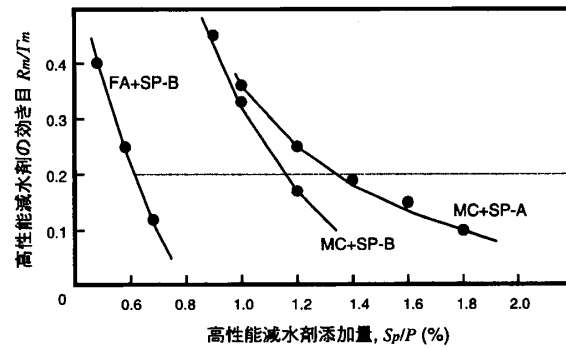


図-8 Sp/P とその効果 R_m/Γ_m との関係

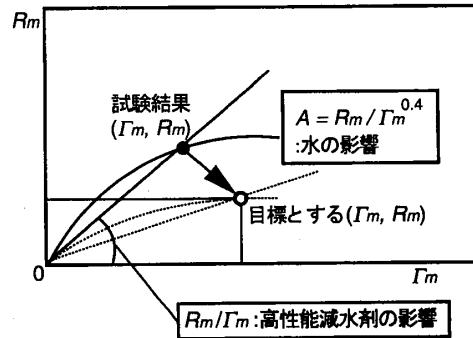


図-9 モルタル試験結果から配合を評価する方法

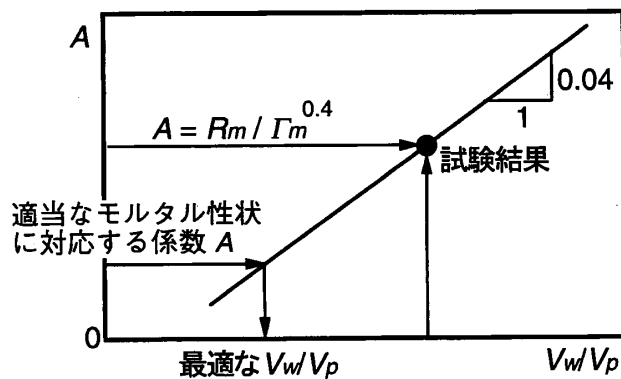


図-10 最適な V_w/V_p の推定法

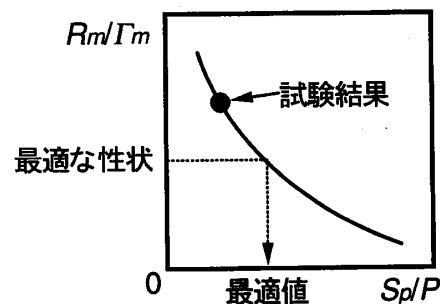


図-11 最適な Sp/P の推定法

5. 結論

(1) 高性能減水剤添加量に対応する、相対フロー面積比とロート速度比との関係を示す直線(線上では水/粉体比が変化する)がほぼ原点を通過することが実験結果より明らかとなった。この性質を利用し、直線の傾きを高性能減水剤添加量に対応する効き目と定義した。本定義による効き目は、

1 組のモルタル試験結果から最適な高性能減水剤添加量との大小関係を判断できる利点を有しているため、少ない数の試験結果から最適な配合を推定する際に役立つものと思われる。

(2) 水/粉体比一定の条件下での相対フロー面積比とロータ速度比の関係を示す曲線(線上では高性能減水剤添加量が増加する)の近似式中の係数 A と水/粉体比 V_w/V_p とは直線関係と見なすことを示した。今回、中庸熟セメントと似た粒度や粒子形状を有する粉体を用いたモルタルにおける、 V_w/V_p - A 直線の傾きがほぼ同じであることが実験により確認された。さらに、この傾きは使用する高性能減水剤の種類の影響を大きく受けない結果となった。従って、通常のセメントを使用する場合には、本研究で得られた中庸熟セメントや高ビーライトセメントを用いたモルタルの直線の傾きを使用することが可能であると思われる。

(3) 以上述べた方法を用いることにより、モルタルのフローおよびロータ試験結果から、自己充填コンクリート用のモルタルに適当な変形性と粘性を付与する高性能減水剤添加量および水/粉体比を合理的に求める方法を提案した。なお、本方法では水/粉体比とモルタル性状との関係の定式化が完成していることから、実際には、最適な水/粉体比を推定した上で高性能減水剤添加量を推定することとなる。

【粉体】

- ・ MC(中庸熟セメント)：住友大阪社製，比重 3.21，ブレン値 3,370cm²/g
- ・ BRC(高ビーライトセメント)：住友大阪社製，比重 3.24，ブレン値 3,410cm²/g
- ・ FA(フライアッシュ)：電発コールテック社製，比重 2.27，ブレン値 3,120cm²/g
- ・ BS4000(高炉スラグ微粉末)：新日鐵化学社製，比重 2.89，ブレン値 4,000cm²/g

【高性能減水剤】

- ・ SP-A：ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体(ポリカルボン酸系)
- ・ SP-B：ポリカルボン酸エーテル系の複合体

【細骨材】 富士川産細骨材，表乾比重 2.56，吸水率 2.77%，粗粒率 2.91

【謝辞】

本研究を行うに当たり、(株)エヌエムビー中央研究所 菅俣 匠氏(東京大学受託研究員)、住友大阪セメント(株)中央研究所セメント・コンクリート研究所 枝松良展氏、東京大学工学部土木工学科 大隈充浩氏および福島謙一氏のご協力を頂きました。心より御礼申し上げます。

【参考文献】

- [1] 岡村 甫，前川宏一，小澤一雅：ハイパフォーマンコンクリート，技報堂出版，1993 年 9 月
- [2] 小澤一雅，永元直樹：モルタル特性とコンクリートの自己充填性，セメント・コンクリート論文集，セメント協会，No.49，1995 年 4 月
- [3] 竹内博幸 他：モルタル試験による自己充填コンクリートに用いる粉体の評価，第 48 回セメント技術大会講演集，1994 年 4 月
- [4] Ouchi, M., Hibino, M. and Okamura, H. : Effect of Superplasticizer on Self-Compactability of Fresh Concrete, 76th Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting, No. 970284, Washington, D.C., January 1997.