

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560703

研究課題名(和文) 粉粒体の粒度分布を合理的に考慮できるコンクリートの調合設計法の確立

研究課題名(英文) Establishment of mix design method of concrete considering reasonably grading of powder and granular material

研究代表者

寺西 浩司 (TERANISHI, Kohji)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：30340293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリートのワーカビリティを調整するための試し練りの省略を最終的な目的とし、セメント、細骨材および粗骨材の粒度分布を合理的に考慮できるコンクリートの調合設計法を確立するための検討を行った。その結果、セメントペースト、モルタルまたはコンクリートの流動性は、それらを構成する粉粒体(セメント、細骨材および粗骨材の混合物)粒子全体の粒度分布から求めた粒子分散距離によりある程度予測できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to skip ultimately a trial mixing to adjust workability of concrete, the investigation to establish mix design method of concrete considering reasonably the gradings of cement, fine aggregate and coarse aggregate was conducted. In consequence, it was clarified that the fluidity of cement paste, mortar or concrete can be predicted to some extent by the distance between particles calculated from the grading of overall particles of powder and granular material composing that, that is the mixture of cement, fine aggregate and coarse aggregate.

研究分野：工学

キーワード：コンクリート セメント 骨材 レオロジー ワーカビリティ 調合 粒度 実積率

1. 研究開始当初の背景

現在、調合の設定にあたっては、コンクリートのワーカビリティが適正になるように、試し練りにより試行錯誤的に細骨材率を調整している。これは、換言すれば、セメント粒子の粒度分布や水セメント比などによって決定されるセメントペースト成分の粘性等に対応するように、細粗混合骨材の粒度分布を適切に調整するという行為である。しかし、コンクリート中の粉粒体（セメント粒子+細骨材+粗骨材）の粒度分布とコンクリートのワーカビリティの関係は定量的に把握されておらず、そのことが調合設計の過程において経験と勘に頼る部分を残し、所定のワーカビリティを得るための試し練りを省略できない原因の一つとなっている。

また、骨材の粒度分布の設定の原則は、「コンクリートのワーカビリティを確保したうえで、骨材量を最大化する（または、ペースト量を最小化する）」ことであると考えられるが、上記の調合設計の手順において、このことは明確ではない。セメントの種類等を考慮したうえで、この原則に則した骨材の粒度分布を設定することは、乾燥収縮・自由収縮、クリープや水和熱の低減、あるいはヤング係数の増大などの観点から重要な課題であるといえる。

2. 研究の目的

- (1) 粉体（セメント粒子）の粒度分布とセメントペーストのワーカビリティの関係を把握する。
- (2) 粉粒体（セメント粒子+細骨材）の全体としての粒度分布とモルタルのワーカビリティの関係を把握する。
- (3) 粉粒体（セメント粒子+細骨材+粗骨材）の全体としての粒度分布とコンクリートのワーカビリティの関係を把握する。
- (4) コンクリートの流動性を最適化できるような粉粒体（セメント粒子+細骨材+粗骨材）の粒度分布を追求する。
- (5) コンクリートの各種材料分離現象のメカニズムの違いを明らかにし、それぞれの材料分離の程度を定量評価する手段を確立する。

3. 研究の方法

(1) セメント粒子の粒度分布とセメントペーストのワーカビリティの関係の検討： 研究の第1段階として、次の2つのシリーズの実験により、セメントペーストを対象とした検討を行った。

①粉体の粒度分布の影響を調べるための実験（実験1）： 市販されているセメントは、その種類によらず粒度の差が比較的小さいため、本実験では、より広範な粒度分布の粉体に対する実験を行うために、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを試料とした。

そして、表-1に示すような様々な粒度分布の粉体に対して、レーザー回折による粒度分布の測定、実積率試験を行った。次に、これらの粉体を用い、表-2に示す調合条件の模擬セ

メントペーストを練り混ぜて、ペーストフロー試験（JASS 15 M-103）および濾過型ブリーディング試験（本研究で新しく考案した試験）を行った。

表-1 試料とした粉体

| 粉体種別 | 種類 |
|----------|------------------------------------|
| 高炉スラグ微粉末 | 4000 (BS4), 6000 (BS6), 8000 (BS8) |
| フライアッシュ | I種 (FA1), II種 (FA2), IV種 (FA4) |

表-2 実験要因とその水準（実験1）

| 要因 | 水準 |
|---------------------|-----------------------------------|
| 水粉体体積比 | 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 |
| 高性能 AE 減水剤添加率 (P×%) | 0, 0.3, 0.6, 1.2 |

②粉体実積率の測定値の影響を調べるための実験（実験2）： 余剰水膜理論に基づく粒子分散距離を指標としてペーストの流動性を評価するためには、粉体の実積率を正確に測定する必要があるが、現時点では、そのような測定方法は存在しない。そこで、本実験では、各種の新しい実積率の測定方法（吸引法、振動法ほか）を考案・試行し、その余剰水膜理論に対する適用性を検討した。さらに、粉体の実積率の測定値が得られない場合の粒子分散距離の計算方法についても検討した。

表-3に実験要因とその水準を示す。本実験では、実験1と同様の趣旨により、セメントの代わりに高炉スラグ微粉末を試料とし、それらを使用した模擬セメントペーストを練り混ぜて、フロー試験（JIS R 5201、ただし、落下運動なし）を行った。

表-3 実験要因とその水準（実験2）

| 要因 | 水準 |
|---------------------|-------------------------------|
| 粉体種類 | BS4, BS6, BS4+BS8 (BS48), BS8 |
| 水粉体体積比 | 0.6~1.8 |
| 高性能 AE 減水剤添加率 (P×%) | 0, 0.3, 0.5 |

(2) 粉粒体（セメント粒子+細骨材）の粒度分布とモルタルのワーカビリティの関係の検討： 研究の第2段階として、余剰水膜理論をモルタルに拡張して適用することを考えた。すなわち、モルタルを粉粒体（粉体+細骨材）と水で構成される固液2相材料と見なし、ペーストの場合と同様に、その流動性を粒子分散距離により評価できるかを検討した。

本実験では、表-4に示すような実験要因および水準を設定し、高炉スラグ微粉末を用いた模擬モルタルを練り混ぜて、フロー試験（JIS R 5201）および球引上げ試験を行った。また、模擬モルタルに使用した粉粒体（セメント粒子と細骨材の混合物、粒度分布を図-1に示す）に対して実積率試験を行った。

表-4 実験要因とその水準

| 要因 | 水準 |
|----------|-------------------------------|
| 粉体種類 | BS4, BS6, BS4+BS8 (BS48), BS8 |
| 細骨材の粒度分布 | JIS 規格値の上限, 下限 |
| 目標フロー値 | 125, 175, 225 |

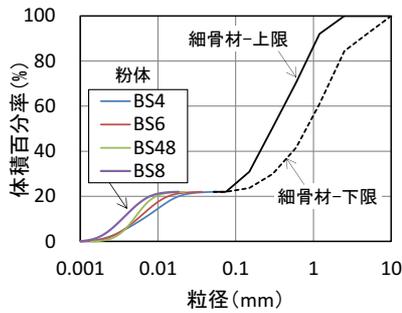


図-1 粉粒体の粒度分布

(3) 粉粒体(セメント粒子+細骨材+粗骨材)の粒度分布とコンクリートのワーカビリティの関係の検討： 研究の第3段階では、余剰水膜理論を、水と粉粒体(粉体+細骨材+粗骨材)から成る2相材料と見なしたコンクリートにまでさらに拡張して適用することを試みた。また、上記(2)に示した、研究の第2段階の検討において、コンクリートの分離抵抗性に対しては、マトリックスモルタルの流動性が支配的な影響を及ぼすとの知見を得た。そこで、ここでは、マトリックスモルタルの流動性を余剰水膜理論により予測し、その結果と対応させて、コンクリートの分離抵抗性を評価するという方法についても併せて検討した。

本実験では、表-5に示すような実験要因および水準を設定し、高炉スラグ微粉末を用いた模擬コンクリートを練り混ぜて、スランプ試験(JIS A 1101)、回転翼型粘度計試験、円筒貫入試験(材料分離の程度の評価を目的とした試験)、マトリックスモルタルに対するフロー試験を行った。また、模擬コンクリートに使用した粉粒体(セメント粒子、細骨材および粗骨材の混合物、粒度分布を図-2に示す)に対して実積率試験(吸引法、および本研究で新しく考案した水浸脱気法、図-3)を行った。

表-5 実験要因とその水準

| 実験要因 | 水準 | |
|---------------------------|---------------------|---------------------|
| 細骨材 | JIS規格値の上限(f), 下限(c) | |
| 粗骨材 | JIS規格値の上限(F), 下限(C) | |
| 粉体種類 | 高炉スラグ微粉末 6000 (BS6) | 高炉スラグ微粉末 8000 (BS8) |
| 単位水量 (kg/m ³) | 183 | 173, 183, 193 |

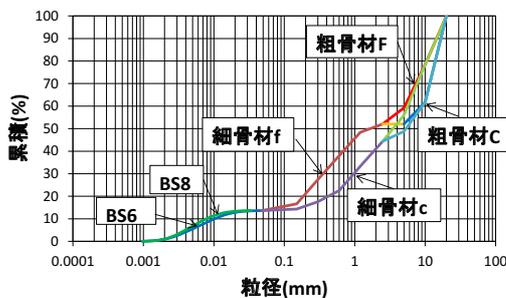


図-2 粉粒体の粒度分布

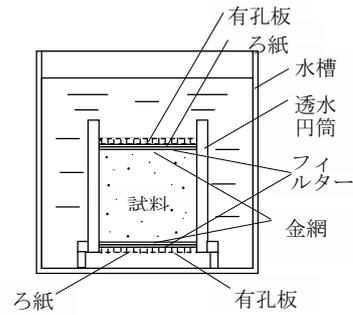


図-3 水浸脱気法の試験装置

(4) コンクリートの各種材料分離の定量評価： コンクリートの材料分離の程度が構成材料間の相対速度により表示されるとの立場から、モルタルと粗骨材間の分離を定量評価するための検討を行った。具体的には、鉄筋間通過時の粗骨材のブロッキングや振動締め時の粗骨材沈降などの各種材料分離現象に対するマトリックスモルタルの流動性・粘性や粗骨材量の影響を調べた。そして、それらの結果を踏まえ、上記のような各種材料分離現象が本質的に同一の現象であるかを検討した。

本実験では、コンクリートの細骨材体積比(マトリックスモルタル中の細骨材の体積比)および粗骨材体積比(コンクリート中の粗骨材の体積比)をそれぞれ変化させた。そして、材料分離の程度の評価を目的として、円筒貫入試験のほか、本研究で新しく考案した鉄筋間通過試験および模擬粗骨材沈降試験を行った。

4. 研究成果

(1) セメント粒子の粒度分布とセメントペーストのワーカビリティの関係の検討：

①粉体の粒度分布の影響を調べるための実験(実験1)： 3章(1)に示した実験1の結果から、(1)高性能 AE 減水剤の添加率が同一の場合、ペーストの流動性に対する粉体の粒度分布や水粉体比の影響は、式(1)により計算される粒子分散距離(図-4)により包括的に評価できる可能性が高い、(2)ブリーディング水がペーストの流動性に寄与する度合いは小さい、などの知見を得た。

$$D_{ew} = \left(\sqrt[3]{\frac{C_p}{V_p} - 1} \right) D_p \quad (1)$$

ここに、 D_{ew} ：粒子分散距離(μm)、 C_p ：粉体(または粉粒体)の実積率(%)、 V_p ：粉体(または粉粒体)体積比(%)、 D_p ：粉体(または粉粒体)粒子の平均粒径(μm)。

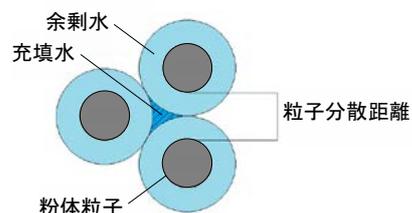


図-4 粒子分散距離(ペーストを対象とした場合)

②粉体実積率の測定値の影響を調べるための実験(実験2): 3章(1)に示した実験2の結果から、(1)水粉体比の低い領域では、粉体の粒度分布や水粉体体積比にかかわらず、ペーストの流動性を粒子分散距離より一義的に説明することができる。また、吸引法による粉体の実積率の測定値を用いると、ペーストの流動性を粒子分散距離により精度よく評価できる(図-5)、(2)粉体の実積率を直接的に測定しない場合には、ペーストの拘束水比(ペーストが流動を開始する時点の水粉体体積)に相当する粉体体積比を粉体の実積率と見なして粒子分散距離を計算することも可能である、などの知見を得た。

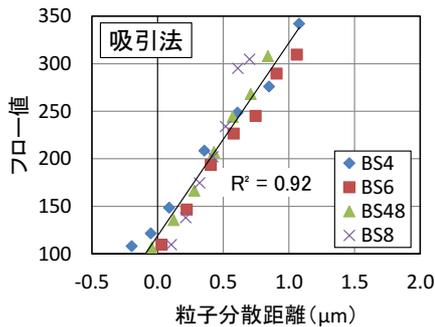


図-5 フロー値と粒子分散距離の関係

(2) 粉粒体(セメント粒子+細骨材)の粒度分布とモルタルのワーカビリティの関係の検討: 3章(2)に示した実験の結果から、(1)模擬モルタルの降伏値に対する粉体・細骨材の粒度分布や水粉粒体体積比の影響は、粉粒体の実積率が正しく測定されれば、粒子分散距離により包括的に評価できるものと期待される(図-6)、(2)粉体・細骨材の粒度分布や水粉粒体体積比にかかわらず、拘束水比から求めた粒子分散距離により、模擬モルタルのフロー値を予測できる、(3)今後、粒子分散距離の計算精度が改善されれば、ペースト、モルタルの区別にかかわらず、そのフロー値を、粒子分散距離という一つの指標により予測できる可能性がある(図-7)、などの知見を得た。

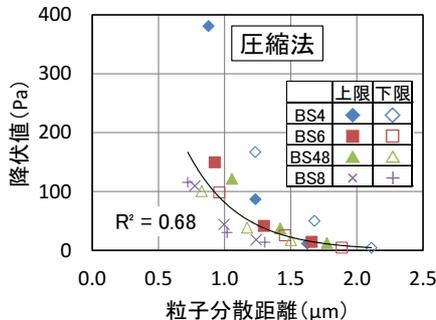


図-6 模擬モルタルの降伏値と粒子分散距離の関係

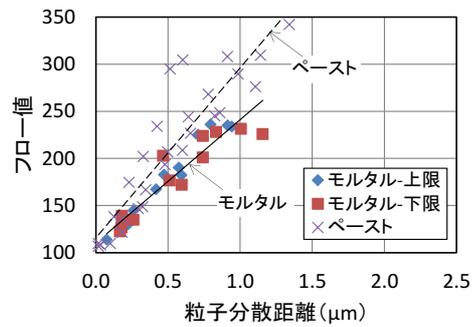
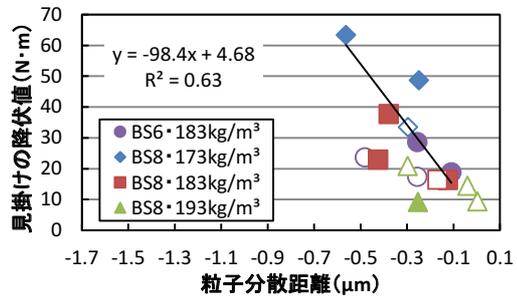


図-7 模擬モルタルとペーストの予測値の比較

(3) 粉粒体(セメント粒子+細骨材+粗骨材)の粒度分布とコンクリートのワーカビリティの関係の検討: 3章(3)に示した実験の結果から、(1)コンクリートのスランプや降伏値は、単位水量や細・粗骨材の粒度分布にかかわらず、粒子分散距離により包括的に評価できる可能性がある(図-8)。また、その評価精度を向上させるためには、今後、水中での粉粒体の実積率をより精密に測定できる試験方法の開発が重要と考えられる、(2)粉粒体の実積率の測定値を用いる代わりに、拘束水比に相当する粉粒体体積比を実積率と見なして粒子分散距離を計算しても、コンクリートの流動性をある程度評価できる、(3)コンクリートの分離抵抗性は、マトリックスモルタルの拘束水比に基づく粒子分散距離により予測することができる(図-9)、などの知見を得た。



*白抜きのプロットは流入モルタル値が40mm以上のデータを示す。

図-8 降伏値と粒子分散距離の関係(水浸脱気法)

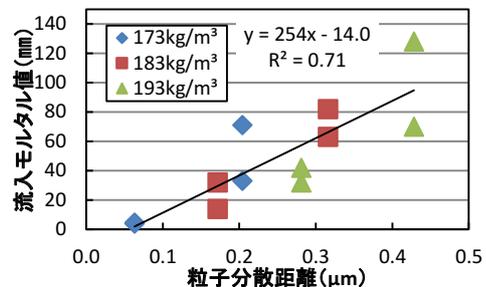


図-9 流入モルタル値とマトリックスモルタルの拘束水比に基づく粒子分散距離の関係(BS8)

(4) コンクリートの各種材料分離の定量評価: 3章(4)に示した実験の結果から、(1)鉄筋間通過時の粗骨材の分離は、マトリックスモルタルの流動性が高く粘性が低いほど、

また、粗骨材量が多いほど生じやすい(図-10)、(2)加振による粗骨材の沈降は、マトリックスモルタルの流動性が高く粘性が低いほど、また、粗骨材量が少ないほど生じやすい(図-11)、(3)鉄筋間通過時の粗骨材の分離と加振による粗骨材の沈降の2つの材料分離現象は同じ現象とはいえない、などの知見を得た。

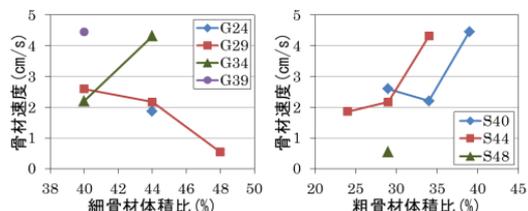


図-10 骨材速度と細・粗骨材体積比の関係

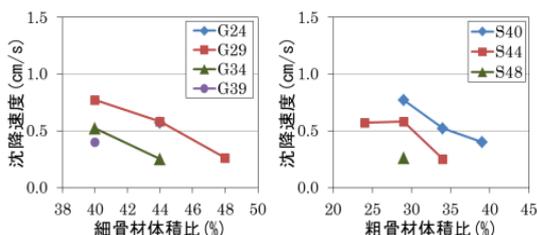


図-11 沈降速度と細・粗骨材体積比の関係

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

- ① 丹羽大地, 寺西浩司: 余剰水膜理論による模擬コンクリートのワーカビリティの評価, 日本建築学会東海支部研究報告集, No. 54, pp. 29-32, 2016. 2, 査読無
- ② 丹羽大地, 寺西浩司: コンクリートの各種材料分離の定量評価, 日本建築学会東海支部研究報告集, No. 54, pp. 93-96, 2016. 2, 査読無
- ③ 林孝将, 寺西浩司: コンクリートの各種材料分離の定量評価に関する研究(その3. 水セメント比および細骨材の粒度分布の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 9-10, 2015. 9, 査読無
- ④ 川井崇義, 寺西浩司, 丹羽大地: 余剰水膜理論による固液 2 相材料の流動性の評価(その3. 模擬コンクリートを対象とした実験の概要および結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 21-22, 2015. 9, 査読無
- ⑤ 丹羽大地, 寺西浩司, 川井崇義: 余剰水膜理論による固液 2 相材料の流動性の評価(その4. 模擬コンクリートの流動性および分離抵抗性の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 23-24, 2015. 9, 査読無
- ⑥ 寺西浩司: 余剰水膜理論による模擬セメントペーストおよび模擬モルタルの流動性の予測, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 1063-1068, 2015. 7, 査読有
- ⑦ 寺西浩司, 梶田佳寛, 陣内浩, 鹿毛忠継, 伊藤智章: 細骨材および調合がコンクリー

トのワーカビリティに及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 80, No. 707, pp. 9-18, 2015. 1, 査読有

- ⑧ 松本康太, 寺西浩司, 古田修平, 今井悠介: コンクリートの各種材料分離の定量評価に関する研究(その1. 実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 497-498, 2014. 9, 査読無
- ⑨ 林孝将, 寺西浩司, 古田修平, 松本康太, 今井悠介: コンクリートの各種材料分離の定量評価に関する研究(その2. 実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 499-500, 2014. 9, 査読無
- ⑩ 丹羽大地, 寺西浩司, 今井悠介, 渡邊彩人: 余剰水膜理論による固液 2 相材料の流動性の評価(その1. 模擬セメントペーストの流動性の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 503-504, 2014. 9, 査読無
- ⑪ 今井悠介, 寺西浩司, 渡邊彩人: 余剰水膜理論による固液 2 相材料の流動性の評価(その2. 模擬モルタルの流動性の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 505-506, 2014. 9, 査読無
- ⑫ 今井悠介, 寺西浩司: ペーストの流動性に対する粉体の粒度分布の影響の評価, 名城大学総合研究所紀要, No. 19, pp. 139-142, 2014. 3, 査読無
- ⑬ 古田修平, 寺西浩司, 今井悠介, 酒井正樹, 渡邊悟士, 佐藤幸恵, 道正泰弘, 太田達見: 細骨材の粒度と細骨材率がコンクリートの物性に与える影響 その5 円筒貫入試験およびスクリーニング試験の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 275-276, 2013. 8, 査読無し
- ⑭ 今井悠介, 寺西浩司: 粉体の粒度分布が模擬セメントペーストの流動性に及ぼす影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, No. 51, pp. 45-48, 2013. 2, 査読無
- ⑮ 今井悠介, 寺西浩司: 模擬セメントペーストの流動性に対する粉体の粒度分布の影響(その1. 粉体に対する試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 225-226, 2012. 9, 査読無し
- ⑯ 寺西浩司, 今井悠介: 模擬セメントペーストの流動性に対する粉体の粒度分布の影響(その2. 模擬セメントペーストに対する試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 227-228, 2012. 9, 査読無

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
寺西 浩司 (TERANISHI KOHJI)
名城大学・理工学部・教授
研究者番号: 30340293