

論文 砕砂の粒形がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響

和田 努^{*1}・小島 明^{*2}・小嶋 利司^{*3}

要旨：砕砂（細骨材）の粒形改善がコンクリートやモルタルのフレッシュ性状に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、フレッシュ性状への影響の評価にペースト細骨材空隙比の考え方をを用いて、普通配合及び高強度配合で試験を行なった。その結果、砕砂の粒形判定実積率の向上で、同一フレッシュ性状を得るのに必要な単位水量を低減することができ、粒形改善によるフレッシュ性状の向上が明確になった。

キーワード：細骨材, 砕砂, 粒形判定実積率, ペースト細骨材空隙比, 単位水量低減

1. はじめに

生コンクリートの細骨材として用いられる砕砂は、コンクリート骨材として JIS に制定された昭和 55 年には、国内の細骨材のわずか 1/20 しか消費されていなかった。しかし、天然砂（海砂、山砂等）の採取規制強化や資源枯渇により、近年は砕砂の役割が重要視され、平成 15 年には細骨材の 1/4 を占めている¹⁾。

一方、破碎加工のみで作られた砕砂は、天然砂と比べて粒形に角張りが多く、実積率や粒形判定実積率が低い。そのため、砕砂を用いたコンクリートでは流動性が低下してしまい、砕砂の粒形改善が求められている。

そこで、砕砂の粒形改善がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響を明らかにすることを目的として試験を行なった。

2. 砕砂の調整

2.1 粒形

JIS A 1121 で使用するロサンゼルス試験機に絶乾状態の砕砂と鉄球を投入して回転させることにより、骨材を磨砕させ角張りを除去し粒形を調整した。これは、実機でのボールミルによる製造を想定したものである。粒形の程度は、試験機の回転数及び鉄球の質量により調整した。

2.2 微粒分

フレッシュ性状への粒形以外の影響を取り除くため、磨砕後の砕砂を 0.075mm ふるい上で水洗いし微粒分を除去した。

2.3 粒度

フレッシュ性状への粒形以外の影響を取り除くため、砕砂の粒度分布を一定とした。水洗い後の砕砂を、乾燥炉（105℃）を用いて絶乾状態にした後、表-1 に示す粒度分布に調整した。

表-1 砕砂の粒度分布

| 砕砂の粒度 | 混合割合 (%) |
|--------------|----------|
| 5.0~2.5mm | 10.0 |
| 2.5~1.2mm | 20.0 |
| 1.2~0.6mm | 25.0 |
| 0.6~0.3mm | 22.5 |
| 0.3~0.15mm | 14.0 |
| 0.15~0.075mm | 8.5 |
| 計 | 100.0 |

3. 砕砂の物性

3.1 試験方法

(1) 粒形判定実積率

砕砂の粒形を評価するために、JIS A 5005 に準拠し、2.5~1.2mm の粒度のみを容積 1l の容器を用い、試料の詰め方を棒突きにより測定した。

(2) 実積率

*1 奥多摩工業（株） 鉱業部業務課（正会員）

*2 太平洋セメント（株） 中央研究所研究開発部資源開発チーム（正会員）

*3 奥多摩工業（株） 鉱業部業務課マネージャー（非会員）

コンクリート及びモルタルの配合設計で用いるために、JIS A 1104 に準拠し、表-1 の粒度にした砕砂を容積 1l の容器を用い、試料の詰め方を棒突きにより測定した。

3.2 試験結果

表-2 に磨砕加工の条件及び磨砕加工後の砕砂の物性を示す。また、図-1 に加工後の砕砂の物性をグラフで示す。

磨砕加工の程度の増加に伴い、砕砂の粒形判定実積率や実積率は向上しており、磨砕加工によって粒形が改善されていることを確認した。

表-2 砕砂の粒度調整方法と物性

| | 磨砕加工の条件 | | 磨砕加工後の砕砂物性 | |
|--------|---------|--------------|------------|-------|
| | 試験機回転数 | 投入した鉄球の個数と質量 | 粒形判定実積率 | 実積率 |
| 未加工 | 0回 | 0個 | 55.1% | 64.3% |
| 1000回品 | 1000回 | 6個・2500g | 55.4% | 65.2% |
| 2000回品 | 2000回 | 6個・2500g | 56.3% | 65.8% |
| 3000回品 | 3000回 | 8個・3330g | 56.7% | 65.8% |
| 4000回品 | 4000回 | 15個・6240g | 56.9% | 65.7% |

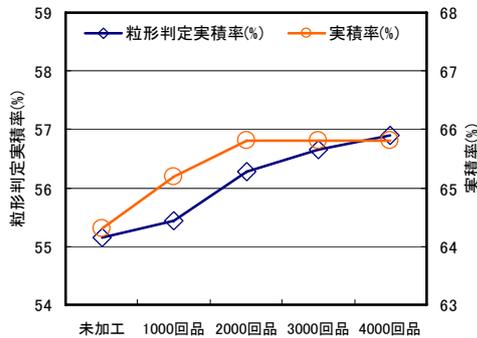


図-1 砕砂の物性

4. モルタル試験

粒形調整した砕砂を用いて、モルタルのフレッシュ性状への影響を、W/C50%の普通配合と

W/B (水結合材比) 16%の高強度配合で検討した。

4.1 試験の概要

(1) 使用材料

表-3 に使用材料を示す。セメントは普通配合では普通ポルトランドセメント、高強度配合では低熱ポルトランドセメントを用いた。また、フレッシュ性状への空気量の影響を排除するために、どちらの配合とも消泡剤を用い、高強度配合でのみシリカフューム及び高性能 AE 減水剤を用いた。

なお、砕砂やシリカフュームは高強度配合での試験実績のある材料である。

(2) 配合

モルタルの配合は「ペースト細骨材空隙比²⁾」(以下、Kp)の考え方を採用し、W/C を固定とした状態で、粒形調整した砕砂についてそれぞれ Kp を変化させたものとした。

Kp は、ペーストの容積と細骨材中の空隙容積の割合を示すものであり、細骨材の実積率が異なってもペースト膜厚が同一となることを示している。Kp の計算式を式(1)に示す。

$$Kp = \frac{\text{水} + \text{セメントの絶対容積}}{[\text{細骨材の絶対容積} \times \{1 / (\text{実積率} / 100) - 1\}]} \quad (1)$$

表-4 にモルタルの配合を示す。Kp は過去に同様の材料で実施したモルタル試験での結果を基に、普通配合では 1.25~2.00 の 4 水準、高強度配合では 4.00~4.50 の 3 水準とした。

また、Kp の考え方を配合設計に用いているため、同一の Kp でも砕砂の実積率が高くなると単

表-3 モルタル試験・使用材料

| 種類 | 種類 | 記号 | 物性値 | 備考 |
|------|-----------------------|-----|--|-----------|
| 水 | 水道水 | W | — | — |
| セメント | 普通ポルトランドセメント (T社製) | NC | 密度 : 3.16 g/cm ³ | 普通配合のみ使用 |
| | 低熱ポルトランドセメント (T社製) | LC | 密度 : 3.22 g/cm ³ | 高強度配合のみ使用 |
| 混和材 | シリカフューム | SF | 密度 : 2.21 g/cm ³ | 高強度配合のみ使用 |
| 混和剤 | 高性能AE減水剤 (ホリカルボン酸系) | SP | — | 高強度配合のみ使用 |
| | 消泡剤 (ホリアルキレングリコール誘導体) | 404 | — | — |
| 細骨材 | 砕砂 (硬砂岩・東京都青梅市産) | S | 表乾密度 : 2.62 g/cm ³ 絶乾密度 : 2.58 g/cm ³ 吸水率 : 1.52 % | — |

表-4 モルタルの配合

| | Kp | 砕砂・粒形 判定実積率(%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|--------------------|------|-------------------|--------------------------|------|-----|-----|------------|------------|------------|
| | | | W | NC | LC | SF | S | SP | 404 |
| 普通配合 W/C = 50% | 1.25 | 55.1 | 251 | 502 | | | 1523 | | C× 0.1% |
| | | 56.3 | 241 | 482 | | | 1564 | | |
| | | 56.9 | 242 | 484 | | | 1561 | | |
| | 1.50 | 55.1 | 278 | 557 | | | 1408 | | |
| | | 56.3 | 268 | 537 | | | 1450 | | |
| | | 56.9 | 269 | 538 | | | 1447 | | |
| | 1.75 | 55.1 | 302 | 604 | | | 1309 | | |
| | | 56.3 | 292 | 583 | | | 1351 | | |
| | | 56.9 | 292 | 585 | | | 1348 | | |
| | 2.00 | 55.1 | 322 | 644 | | | 1223 | | |
| | | 56.3 | 312 | 624 | | | 1265 | | |
| | | 56.9 | 313 | 626 | | | 1262 | | |
| 高強度配合 W/B = 16% | 4.00 | 55.1 | 228 | 1280 | 142 | 801 | C× 1.5% | C× 0.2% | |
| | | 55.4 | 225 | 1264 | 141 | 823 | | | |
| | | 56.7 | 223 | 1254 | 139 | 838 | | | |
| | 4.25 | 55.1 | 232 | 1304 | 145 | 768 | | | |
| | | 55.4 | 229 | 1289 | 143 | 789 | | | |
| | | 56.7 | 227 | 1278 | 142 | 804 | | | |
| | 4.50 | 55.1 | 236 | 1326 | 147 | 738 | | | |
| | | 55.4 | 233 | 1311 | 146 | 758 | | | |
| | | 56.7 | 231 | 1301 | 145 | 773 | | | |

位ペースト量が少なくなる。これに伴い、モルタルの単位水量はいずれの Kp においても普通配合で最大 10kg/m³、高強度配合で最大 5kg/m³の差がある。

(3) 練混ぜ

モルタルの練混ぜは、容量 2l のホバートミキサを用い、1 バッチの練り量は 1.5l とした。練混ぜ方法は、普通配合では JIS R 5201 に準拠し、高強度配合では図-2 に示す方法とした。

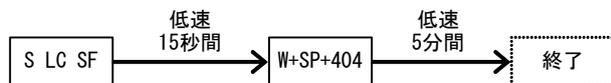


図-2 練混ぜ方法（高強度配合）

(4) 試験項目

表-5 にモルタル試験の項目を示す。

表-5 モルタル試験項目

| 試験項目 | 方法 |
|-------------------------|---|
| フロー値 | JIS R 5201準拠。高強度配合では、落下運動を行なわない0打フロー値とした。 |
| 降伏値、塑性粘度 | 回転粘度計により測定。 |
| J ₁₄ ロート流下時間 | JSCE F 541準拠。高強度配合でのみ実施。 |

4.2 試験結果

(1) 普通配合

図-3 に粒形判定実積率とフロー値の関係を示す。Kp の増加に伴いフロー値が大きくなることは余剰ペースト量が多くなることによるものである。また、Kp1.25~1.75 の配合では、粒形判定実積率の増加に伴いフロー値が大きくなったが、Kp2.00 の配合では、粒形判定実積率に関わらずフロー値は一定である。

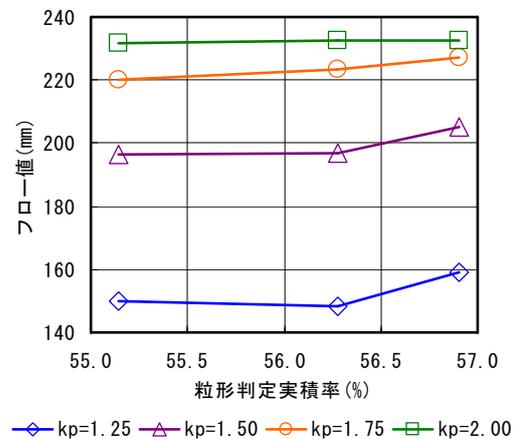


図-3 粒形判定実積率とフロー値

図-4 に粒形判定実積率と降伏値の関係を示す。Kp1.25 の配合では、粒形判定実積率の増加

に伴い降伏値が低下する傾向があるが、Kp1.50～2.00の配合では、粒形判定実積率の増加に伴う変化は認められなかった。

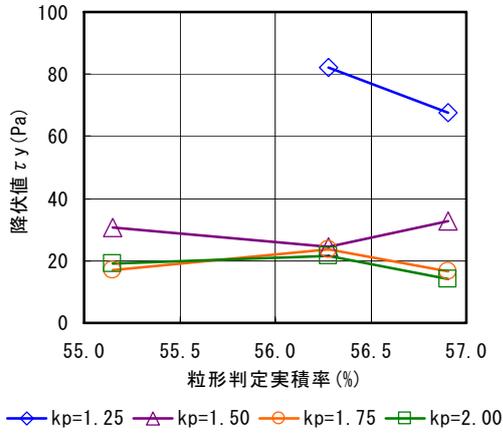


図-4 粒形判定実積率と降伏値

図-5に粒形判定実積率と塑性粘度の関係を示す。いずれのKpの配合でも、粒形判定実積率が大きくなるほど塑性粘度は小さくなっており、砕砂の粒形改善により、モルタルの粘性は低下していることがわかる。

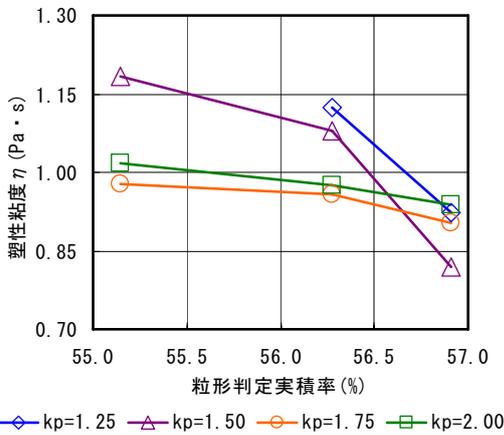


図-5 粒形判定実積率と塑性粘度

以上の結果より、普通配合の場合、砕砂の粒形改善によるフレッシュ性状への影響が若干ではあるがフローや塑性粘度に認められた。ただし、Kpの考え方をを用いて配合設計を行っていることを加味する必要がある。砕砂の粒形改善によって実積率が高くなり、モルタルの単位水量が最大10kg/m³少ないことを考慮すると、砕砂の粒形改善によるフレッシュ性状向上の効果はあ

るものと言える。

(2) 高強度配合

図-6に粒形判定実積率とフロー値の関係を示す。Kp4.25の配合では、フロー値にバラツキが認められるものの、Kp4.00及び4.50の配合では、粒形判定実積率の増加に伴いフロー値が若干ではあるが大きくなる傾向がある。

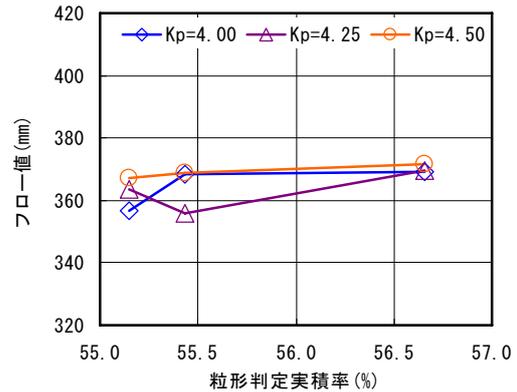


図-6 粒形判定実積率とフロー値

図-7に粒形判定実積率とJ₁₄ロート流下時間の関係を示す。Kp4.50の配合では粒形判定実積率の増加に伴い流下時間が若干低下する傾向が見られるものの、総じて粒形判定実積率の違いが流下時間に及ぼす影響は小さかった。

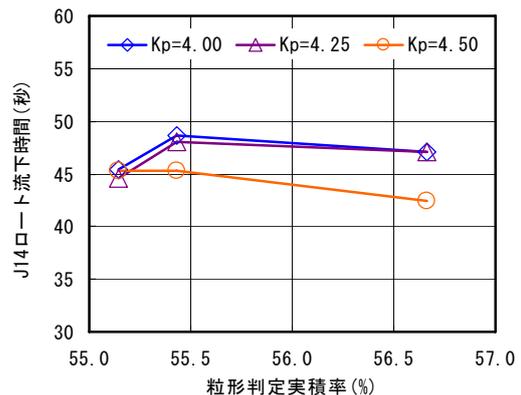


図-7 粒形判定実積率とJ₁₄ロート流下時間

図-8に粒形判定実積率と塑性粘度の関係を示す。粒形判定実積率が高くなっても、塑性粘度に目立った変化は認められず、粒形判定実積率の違いが塑性粘度に及ぼす影響は小さかった。なお、降伏値はいずれの配合においても測定ができなかった。

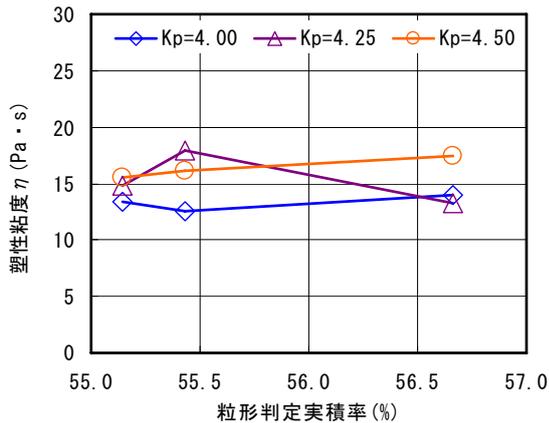


図-8 粒形判定実積率と塑性粘度

以上の結果より、高強度配合の場合、 K_p が大きくペーストが多いため、砕砂の粒形の及ぼす影響が小さいという結果である。ただし、普通配合の場合と同様に K_p の考え方をを用いて配合設計を行っていることを加味する必要がある。砕砂の粒形改善に伴い、単位水量が最大 5kg/m^3 少ないことを考慮すると、砕砂の粒形改善によるフレッシュ性状向上の効果はあると考えられる。

5. コンクリート試験

5.1 試験の概要

(1) 使用材料

使用材料を表-6に示す。粗骨材を除きモルタル試験の使用材料と同一である。また、粗骨材は高強度配合での試験実績のある材料である。

(2) 配合

コンクリートの配合を表-7に示す。コンクリートの配合は、モルタル試験での配合に粗骨材を同量加える配合とした。ただし、砕砂は粒形判定実積率が最も違いがある2種類とし、 K_p は普通配合では1.75、高強度配合では4.00の1水準ずつとした。

(3) 練混ぜ

普通配合の練混ぜは、容量50lの強制練りパン型ミキサーを用い、1バッチあたりの練り量は25lとした。図-9に練混ぜ方法を示す。

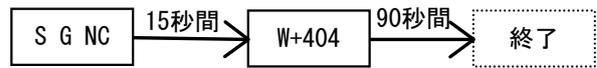


図-9 練混ぜ方法（普通配合）

表-6 コンクリート試験・使用材料

| 種類 | 種類 | 記号 | 物性値 | 備考 |
|------|------------------------|-----|--|-----------|
| 水 | 水道水 | W | — | — |
| セメント | 普通ポルトランドセメント (T社製) | NC | 密度: 3.16 g/cm^3 | 普通配合のみ使用 |
| | 低熱ポルトランドセメント (T社製) | LC | 密度: 3.22 g/cm^3 | 高強度配合のみ使用 |
| 混和材 | シリカフェーム | SF | 密度: 2.21 g/cm^3 | 高強度配合のみ使用 |
| 混和剤 | 高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系) | SP | — | 高強度配合のみ使用 |
| | 消泡剤 (ポリリアルキレングリコール誘導体) | 404 | — | — |
| 細骨材 | 砕砂 (硬砂岩・東京都青梅市産) | S | 表乾密度: 2.62 g/cm^3 絶乾密度: 2.58 g/cm^3 吸水率: 1.52% | — |
| 粗骨材 | 砕石 (硬砂岩・茨城県岩瀬町産) | G | 表乾密度: 2.64 g/cm^3 絶乾密度: 2.62 g/cm^3 吸水率: 0.75% | — |

表-7 コンクリートの配合

| | K_p | V_g^{*1} (L/m^3) | 砕砂・粒形 判定実積率 | 単位量 (kg/m^3) | | | | | | | |
|--------------------|-------|----------------------------------|----------------|-------------------------|-----|-----|----|-----|------|------------|------------|
| | | | | W | NC | LC | SF | S | G | SP | 404 |
| 普通配合 W/C = 50% | 1.75 | 385 | 55.1% | 186 | 371 | / | / | 805 | 1016 | / | C× 0.1% |
| | | | 56.9% | 180 | 360 | | | 829 | | | |
| 高強度配合 W/B = 16% | 4.00 | 330 | 55.1% | 152 | / | 858 | 95 | 537 | 870 | C× 1.2% | C× 0.2% |
| | | | 56.9% | 150 | | 841 | 94 | 560 | | | |

※1: 単位粗骨材絶対容積

また、高強度配合の練混ぜは、容量 55 l の強制二軸ミキサーを用い、1 バッチあたりの練り量は 25 l とした。図-10 に練混ぜ方法を示す。

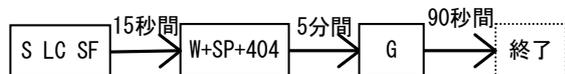


図-10 練混ぜ方法（高強度配合）

(4) 試験項目

試験項目を表-8に示す。

表-8 コンクリート試験項目

| 試験項目 | 方法 |
|----------|---------------------------------------|
| スランブ | JIS R 1101準拠。なお、高強度配合では、50cmフロー時間も測定。 |
| Vロート流下時間 | 高強度配合でのみ実施。 |
| 空気量 | JIS A 1128準拠。 |

5.2 試験結果

(1) 普通配合

表-9に試験結果を示す。粒形改善した方が単位水量を 6kg/m^3 少なく配合しているものの、スランブは同等であり、コンクリートのフレッシュ性状に対する砕砂の粒形改善効果が認められた。

表-9 コンクリート試験結果（普通配合）

| 砕砂の粒形判定実積率 (%) | スランブ (cm) | 空気量 (%) |
|----------------|-----------|---------|
| 55.1 | 8.5 | 1.6 |
| 56.9 | 9.2 | 1.0 |

(2) 高強度配合

表-10に試験結果を示す。モルタル試験の結果と異なり、粒形改善した方が、スランブフローは若干小さくなった。Vロート流下時間及び50cmフロー時間についても若干長くなり、フレッシュ性状が低下する結果となった。

しかし、スランブフローがとても大きな領域であることを考慮すると、コンクリートのフレッシュ性状は同等であると考えられる。粒形改善した方が単位水量を 2kg/m^3 少なく配合してい

ることを考慮すると、砕砂の粒形改善効果はあったと考えられる。

表-10 コンクリート試験結果（高強度配合）

| 砕砂の粒形判定実積率 (%) | スランブフロー (mm) | 50cmフロー時間 (秒) | Vロート流下時間 (秒) | 空気量 (%) |
|----------------|--------------|---------------|--------------|---------|
| 55.1 | 820 | 12.21 | 47.63 | 0.7 |
| 56.9 | 793 | 15.98 | 48.88 | 0.4 |

6. まとめ

砕砂の粒形が、コンクリートやモルタルのフレッシュ性状に及ぼす影響について、Kpの考え方をういて試験を行なった。

その結果、砕砂の磨砕加工による粒形判定実積率2%の向上により、同一フレッシュ性状を得るのに必要な単位水量が減らすことができた。W/C50%の普通配合ではモルタルで 10kg/m^3 、コンクリートで 6kg/m^3 減らすことができ、W/B16%の高強度配合ではモルタルで 5kg/m^3 、コンクリートで 2kg/m^3 減らすことができた。

つまり、砕砂の粒形改善によるモルタルやコンクリートのフレッシュ性状の向上が明確になった。

ただし、磨砕加工に必要なエネルギーや、副産物としての砕石微粉末を考慮した場合、経済性に見合うのかという問題があり、今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 吉田幸稔:骨材事情コンクリート用骨材の動向について、JCI2004 高知大会・第11回生コンセミナー講演要旨, pp.8-13, 2004.7
- 2) 下山善秀ほか:即脱製品に用いるコンクリートの配合設定方法の検討, 土木コンクリートブロック, ISSN.0389-0155, Vol.34, No.4, pp.16-20, 1998.10