

正 ○ 加賀谷 誠 (秋 田 大 学)
 " 徳 田 弘 (")
 " 川 上 洵 (")

1. まえがき

コンクリートの配合設計を行なうとき、細骨材の粒子性状の1つである粗粒率は、各単位量の増減やワーカビリチーの良否に大きな影響を及ぼすパラメータであり、広く一般に用いられている。しかし、近年、良質の川砂の枯渇による、海砂、山砂、砕砂および人工軽量砂など各種多様な細骨材の使用傾向に伴い、粗粒率だけでは評価できない細骨材の粒子性状、たとえば、粒形、表面積、表面性状などが配合やワーカビリチーに及ぼす影響が問題となっている。これらの性質についての研究は、粒子寸法が小さく観察が容易でないこと、また、従来の経験から粗粒率を考慮することによって単位水量がほぼ決定されることが認められていることなどの理由から行なわれた例が少ないと考えられるが、細骨材の種類の多様化への対応および骨材資源の有効利用の観点から上記粒子性状について研究することは重要であると思われる。本研究は、細骨材粒子の形状、比表面積を個々に評価した上で、粗粒率をも含めた細骨材の粒子性状を総合的に評価し、さらに、このようにして得られるパラメータとモルタルの組成および強度の関係について若干の考察を加えたものである。

2. 実験方法

(1) 使用材料および配合 実験に使用した細骨材の種類はガラスビーズG、川砂N、人工軽量砂し、および2種類の砕砂CA、CBである。これらの細骨材を単粒度と混合粒度に粒度調整した。すなわち、単粒度については0.15~0.3、0.3~0.6、0.6~1.2、および1.2~2.5mmの粒径ごとにふるい分け、これらをそれぞれS-1、S-2、S-3、およびS-4と呼び、混合粒度については、粗粒率が1.75、2.00、2.41、3.43および3.57となるように混合し、これらをそれぞれC-1、C-2、C-3、C-4およびC-5と呼ぶことにした。なお、単粒度の細骨材の粗粒率はそれぞれ1.00、2.00、3.00および4.00である。これら各種の細骨材と普通ポルトランドセメントを用いて作製したモルタルの水セメント比は0.35、0.4、0.5、0.6および0.7であって、そのフロー値は205±5である。セメントの強さ試験に準じて材令28日で強度試験を行なった。

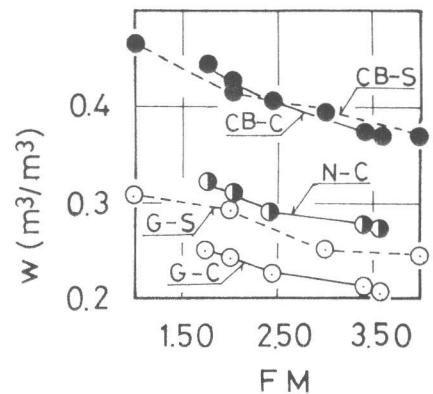


図1 Wと粗粒率の関係

(2) 細骨材粒子の比表面積の評価 比表面積 S_a の算定には $S_a = Y S_{ag}$ を用いた。この式中においてYは形状係数であって、ある寸法の骨材粒子の比表面積と、その骨材粒子と同じ寸法の球の比表面積の比で与えられる。また、 S_{ag} は比表面積を求めようとする細骨材と同じ粒度のガラスビーズの比表面積である。なお、ガラスビーズの比表面積は形状が球であると仮定して算定した。形状係数Yの決定においてはLoudonの実験から得られた実験式 $Y = 1 + 4.44(e - 0.42)$ を引用した。この中においてeは容器にゆるく詰められた状態の骨材の空隙率であって、本研究では、細骨材の単位容積重量試験で用いられる容器に水を満たした後この中に細骨材を注ぎ込み水中における実積率を測定し、この結果から空隙率eを求めた。なお、形状係数Yの測定はすべて単粒度の細骨材について行ない、混合粒度のそれについてはY =

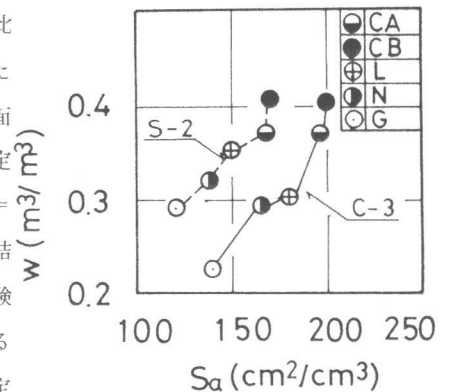


図2 Wと比表面積の関係

$\frac{1}{100} \sum p_i y_i$ から求めた。本式中で p_i は各ふるいに残る試料の重量百分率であり、 y_i は各粒径の細骨材の形状係数である。

(3) 細骨材粒子の形状の評価 細骨材粒子は寸法が小さく肉眼による寸法の計測は作業が煩雑である。そこで、各粒径の細骨材の代表的な試料についてスライドプロジェクターを用いて平面および測面の投影像の輪郭線を描いた。この輪郭線を近似する数学的な曲線に置き換えて、投影像の近似面積と投影像の最小外接円の面積との比を平面の似円率 x および側面の似円率 x' とした⁽¹⁾。これらから $X = x \cdot \sqrt{x'}$ を算出して似球率とし、粒子の形状を評価した。また、混合粒度の細骨材の似球率は $X = \frac{1}{100} \sum p_i x_i$ から求めた。この式において p_i は前述のとおりであり、 x_i は各粒径の細骨材の似球率である。

3. 結果と考察

上述の粒子性状、すなわち、粗粒率、比表面積、および似球率がモルタルの単位水量に及ぼす影響を把握しようとした。図1～3は、一例として、 $W/C = 0.5$ のモルタルの単位水量の絶対容積 W と粗粒率 FM 、比表面積 S_a および似球率 X の関係を示したものである。細骨材の FM の増加に伴って単位水量が増加することは一般に認められているが本研究においてもその傾向が認められた。また、 FM が等しくても細骨材の種類が異なれば単位水量も異なるようである。この現象は図2および3に示すように、比表面積の増加および似球率の減少に伴って単位水量の絶対容積が増加する傾向が認められることから説明できる。なお、細骨材の粒子形状を評価した似球率の値はおおよそ次のとおりであった。川砂 0.5～0.6、人工軽量砂 0.45～0.5、砕砂 0.4～0.45、この結果から判断すれば、粒子の似球率が1に近いほど形状がよいこと、また、砕砂を用いると単位水量が大きくなることが認められる。このように、 FM 、比表面積および似球率などの粒子性状はモルタルの単位水量に影響を及ぼすことが確認された。これらの粒子性状を総合的なパラメータによって定量的に評価するため次のような方法を用いた。図4は、一例として、モルタルの単位水量の絶対容積 W と、細骨材のモルタル中の実積率 s_i と単位容積重量試験から求められる実積率 G_i の比 s_i/G_i の関係を示したものである。なお、モルタル中の実積率 s_i はフロー値が205程度のモルタルの単位細骨材量の絶対容積である。A点は $s_i/G_i = 0$ 、すなわち、フロー値が205程度のセメントペーストの単位水量の絶対容積を示すのであって本研究では $0.509 \text{ m}^3/\text{m}^3$ であった。これらの関係は、ワーカビリチーが一定のモルタルにおける細骨材量と単位水量の関係を示すと同時に、粒子性状の異なる細骨材を用いた時の単位水量の相対的な変化の程度を示しており、ほぼ直線関係にあることが認められる。この直線は一般に次式で示される。

$$W = -K s_i/G_i + 0.509 \quad (1)$$

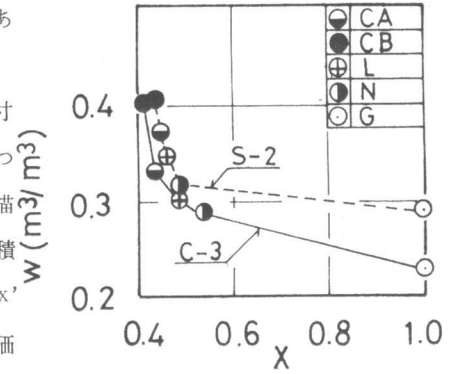


図3 Wと似球率の関係

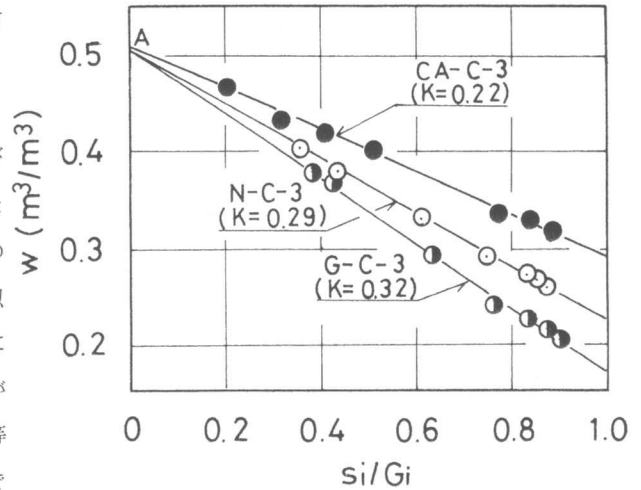


図4 Wと s_i/G_i の関係

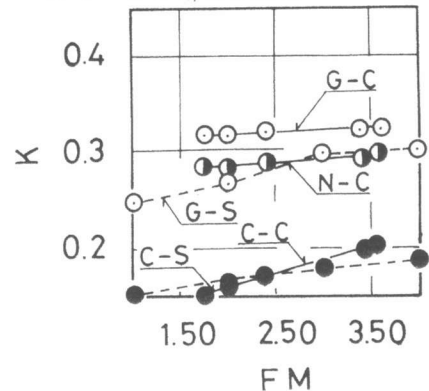


図5 Kと粗粒率の関係

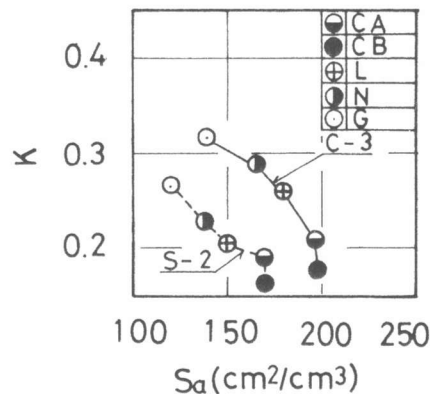


図6 Kと比表面積の関係

ここにKは直線の傾きの絶対値である。このことからKを細骨材のFM, 比表面積および似球率などの粒子性状を総括的に示すパラメータであると考え粒状係数とした。図5~7は、一例として、KとFM, 比表面積および似球率の関係を示したものである。粗粒率が増加するほどKは増加する傾向にあり、比表面積が増加するほどKは減少する傾向にある。また、似球率が1に近づくほどKは増加する傾向にある。次に、粒状係数KがFM, 比表面積Saおよび似球率Xなどの個々の粒子性状によって総括的に評価される程度を重相関分析によって検討した。基準変量をKとし、説明変量をFM, SaおよびXとすると、その結果は次式によって示される。

$$K = 0.0156FM + 0.1752X - 0.0001Sa + 0.1149 \quad (2)$$

ここに重相関係数 $R = 0.860$ であった。標準偏回帰係数の絶対値の比較は基準変量の推定に果す各説明変数の影響度合を示すことから3つの説明変数の標準偏回帰係数の絶対値の和に対する各標準偏回帰係数の割合をもとめこれを各説明変数の基準変量への寄与率としてもとめた。その値は、FM...22%, X...59%, Sa...19%である。したがって、粒状係数Kは似球率によって説明される割合が大きいと判断される。次に、粒状係数Kとモルタルの単位水量との関係を明らかにしようとした。図8は、一例として、 $W/C = 0.35$, 0.4および0.7のモルタルの単位水量の絶対容積Wと粒状係数Kの関係を示したものである。Kの増加とともにWの減少傾向が認められる。この傾向はW/Cが大きくなるほど顕著である。以上の結果

を用いて、粒状係数Kとモルタルの組成の関係について検討を加えた。 s_i/G_i , W/CおよびWの3つをモルタルの組成を決定する要因と考え、KとWおよび s_i/G_i の関係は前述の(1)式によって求められる。図9は、一例として $\log(W/C)$ と $K \cdot s_i/G_i / (1 - s_i/G_i)$ の関係を示したものである。各細骨材を用いて作製したモルタルごとに直線関係が認められる。これらの関係より、一般化したKとW/Cおよび s_i/G_i の関係が次式から求められる。

これらの関係より、一般化したKとW/Cおよび s_i/G_i の関係が次式から求められる。

$$\log(W/C) = AaK \frac{s_i/G_i}{1 - s_i/G_i} + B \quad (3)$$

上式において $A = 0.943$, $B = -1.101$

$a = 47K^2 - 31K + 5$ で

あった。また、式(1)と(3)から一般化したKとW/CおよびWの関係が次式から求められる。

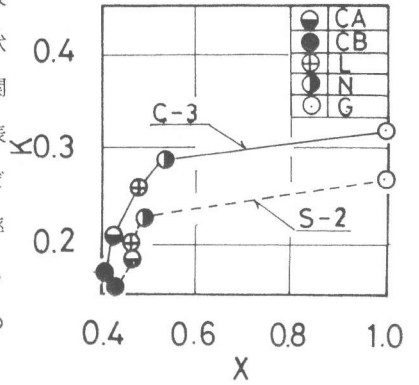


図7 Kと似球率の関係

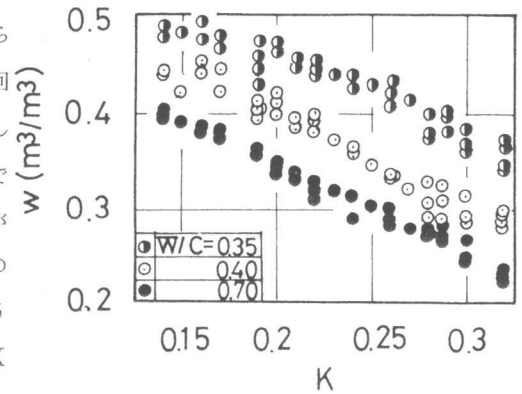


図8 KとWの関係

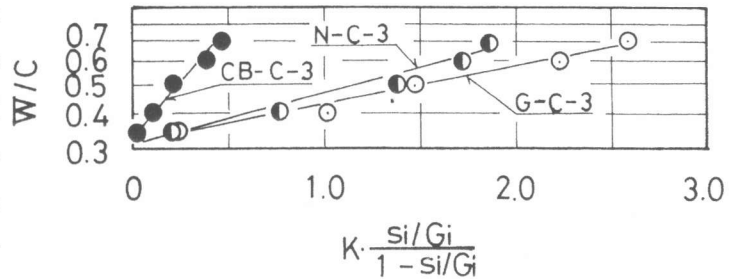


図9 W/Cと $K \cdot s_i/G_i / (1 - s_i/G_i)$ の関係

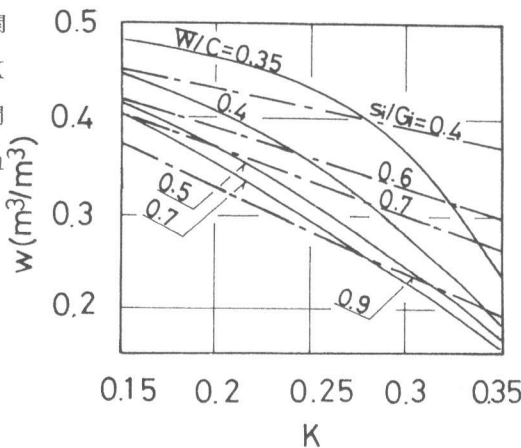


図10 WとKの関係

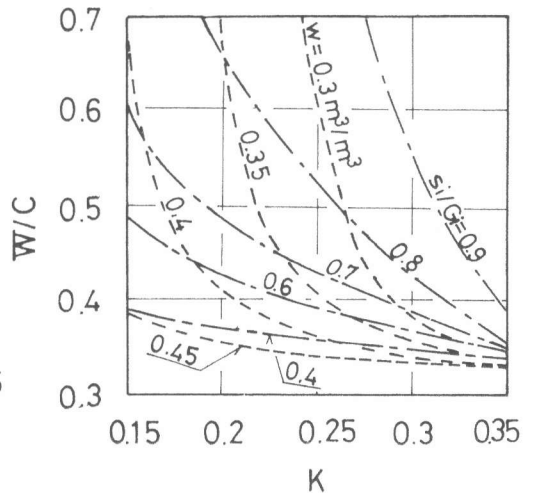


図11 W/CとKの関係

$$W = -\frac{KE}{AK+E} + 0.509 \quad (4)$$

ただし、 $E = \log(W/C) - B$ である。(1), (3), (4), の3式を用いてモルタルの組成に及ぼすKの影響を推定することが可能である。図10~12は、KとW, W/Cおよび s_i/G_i の関係を示したものである。たとえば、粒状係数 $K = 0.25$ および 0.15 の細骨材を使用した $W/C = 0.5$ のモルタルの組成を比較すると次のようになる。図10を用いて $W/C = 0.5$ における単位水量の絶対容積Wはそれぞれ 0.31 および $0.42 \text{ m}^3/\text{m}^3$ となる。また図12から、対応する s_i/G_i が 0.77 および 0.61 となる。上述のように粒状係数Kが変化することによってモルタルの組成も変化することが確認された。このことから粒状係数Kはモルタルの強度に影響を及ぼすことが考えられる。従来用いられてきたセメント水比と強度の直線関係は同一性状の骨材を使用した場合に成り立つものであり、これを考慮して、細骨材の粒状係数Kを加えたモルタルの強度式として次式を仮定した。

$$\sigma = AC/W + BK + C \quad (4)$$

本実験では、圧縮強度に対して $A = 265$, $B = -456$, $C = -32$ であり、また、曲げ強度に対して $A = 33$, $B = -76$, $C = 23$ であった。圧縮および曲げ強度式の重相関係数Rはそれぞれ 0.96 および 0.93 である。図13と14は、(5)式を用いてKとW/Cの関係を圧縮強度および曲げ強度を一定として示したものである。ワーカビリティおよび強度が一定のモルタルでは、粒状係数Kが小さい値の砂を用いれば水セメント比が大きくなり、その傾向は強度が低いほど著しくなることが認められる。図10~12および図13~14に示された関係を用いることによって、使用する細骨材の粒状係数が組成および強度に及ぼす影響を推定できると思われる。

4. 結論

細骨材の粒度、比表面積および粒形などの粒子性状は、ワーカビリティが一定のモルタル中の細骨材の実積率と単位容積重量試験から得られる実積率の比 s_i/G_i と単位水量の絶対容積Wの関係が直線関係になることを用いてその傾きの絶対値Kによって総括して評価することが可能である。粒状係数Kとモルタルの組成の関係は次の3式によって一般的に示される。

$$W = -K s_i/G_i + 0.509$$

$$\log W/C = A a K \frac{s_i/G_i}{1 - s_i/G_i} + B$$

$$W = -\frac{KE}{AK+E} + 0.509$$

細骨材の粒子性状を考慮したモルタルの圧縮および曲げ強度式は次式で示される。

$$\sigma = AC/W + BK + C$$

参考文献(1)中野, 遠藤: 輪郭法による粒子の形状係数について, 材料第24巻 262号 PP11~15, 1975. 7

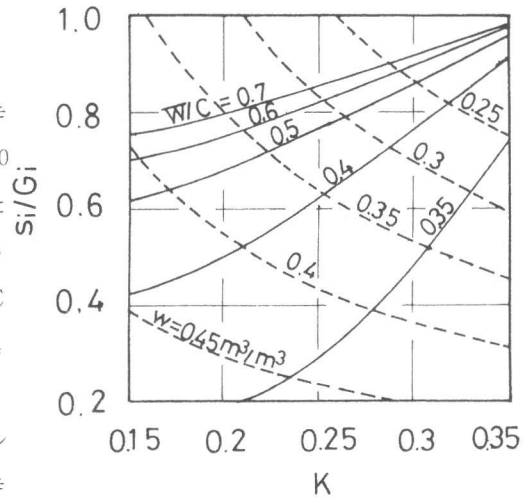


図12 s_i/G_i とKの関係

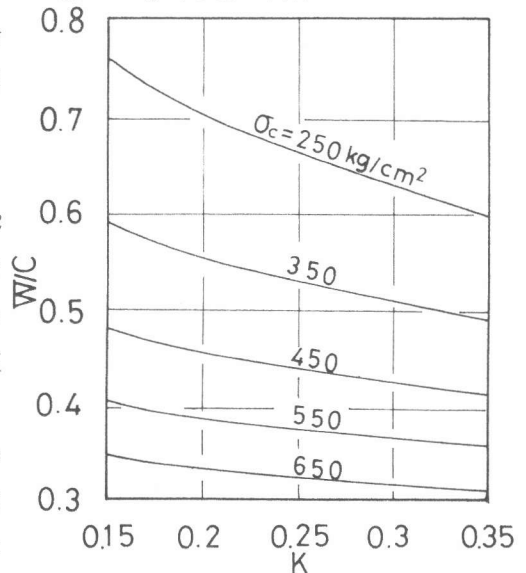


図13 圧縮強度が一定のW/CとKの関係

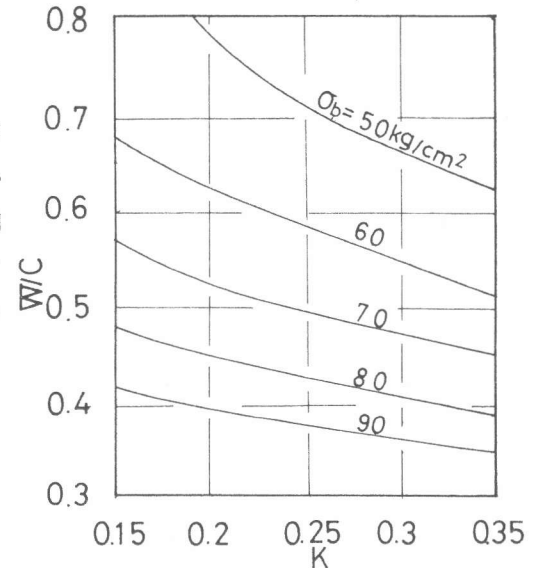


図14 曲げ強度が一定のW/CとKの関係