

[29] モルタル及びコンクリートの配合割合がコンシステンシーに及ぼす影響

正会員 ○沼 田 晉 一 (新日本製鐵スラグ事業開発部)

正会員 徳 光 善 治 (九州大学工学部)

1. まえがき

コンクリートは骨材とセメント・水とから構成される複合材料であり、その構成割合によって性質が変化する。現行の配合設計方法は、まず強度、耐久性などから水セメント比(ペーストのセメント濃度)を決定し、次いで使用する骨材の構成に応じて骨材の空隙空間を埋めかつコンクリートの作業性から最小限必要とみられるペースト量つまり単位水量を定めることと、最適な粒子構成、即ち、例えば細骨材率を決定することが併行して行われる。しかし、本来コンクリート構成材の望ましい粒子構成には、セメント粒子の影響が大きいので(例、富配合・貧配合)、ペーストマトリックスの濃度・量の決定と骨材の粒子構成の決定には相互関係があって別々に決定できるものでない。

最近、砕砂・水砕砂など多種多様の細骨材が使用されるようになり、コンクリートのワーカビリティに影響を及ぼす細骨材の要因が複雑となり、従来からの経験に頼り、例えば粗粒率だけを考慮することによって単位水量や細骨材率の概算値が決定できない事情にある。

コンクリートの配合設計に当って、コンクリートをペーストマトリックスと骨材からなると言う考え方のほかに、モルタルマトリックスと粗骨材からなると言う考え方、例えば単位粗骨材容積(b/b_o)設計方法がある。今、粗骨材の実積率を G_c とすると、 $w+c+s+g+A=1$ から次の関係が導かれる。

$$\frac{b}{b_o} = (1 - s/a)[1 - A - w(1 + c/w)] / G_c \quad \dots\dots (1)$$

$$w = \frac{1 - b/b_o \cdot G_c - A / (1 - b/b_o \cdot G_c)}{1 + c/w + s/w} \quad \dots\dots (2)$$

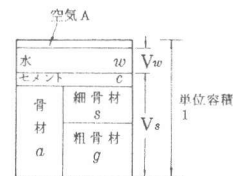


図-1

コンクリートのコンシステンシーは主として水量の多少によって決まることから、

式(2)はコンシステンシーの式とも言える。即ち b/b_o 設計方法(b/b_o 法則)を認め

ると式(2)の分子・分母が示すように、コンシステンシー K は粗骨材特性とモルタル特性に分けてまず考えることができ、両者の相互作用は2次のとみられる。従って細骨材の特性を考慮してコンクリートのコンシステンシーを論ずるときは、そのモルタル成分のレオロジー挙動を調べることが大切となる。なお、ビンガム流動体のペースト中に骨材粒子が懸濁分散したとみなして導かれたPowersのレオロジー方程式、 $K = K_o \exp k(V_s/V_w) = K_o \exp k(c/w + s/w) \cdot \exp k(g/w)$ は、式(2)に粘ダイラント抵抗の混合物としての解釈を与えている一例と言えよう。以下、細骨材の粒子性状を考慮したコンクリートの最適配合割合について、実験の結果にもとづき考察する。

2. 一定コンシステンシーのモルタルの細骨材濃度と配合特性

一定コンシステンシーのペーストに細骨材を加え、同一コンシステンシーを得る一連のモルタル実験を行った。コンシステンシーはJIS R 5201のフロー値 F によるものとし、ブリージングやJIS A 5308附属書3の方法で圧縮強度も求めた。フロー値は160, 190及び 220 ± 3 mmの3水準とした。表-1は用いた細骨材の材質である。モルタルの試し練りはASTM C 138のYield法で整理し、更にフロー値を ± 0.5 mmとなるよう按分法で配合を補正した。この結果は図-2の例のようにまとめた。モルタル中の細骨材濃度 $x = s/(s+c)$ が増加するに従い、モルタルは4段階の変化がみられる。

- ① 第1の状態では、 w 線が $x=1$ の定点 H' を目指して直線的に w が低下し、 s 線($=Gx$)は $x=1$ の細骨材単独の空隙率 $Hs(=1-Gs)$ を埋めるように直線的に低下するが、 c/w はニートペーストの場合と殆ど同じで変化がない。気泡はペースト中に包含されているとみられる。

② 第2の状態は $x \div 0.4$ から始まる。 w 線は①のときと同

じであるが、 s 線は単位細骨材量 G_s がより一層大きくなるよう変化し、あたかも $x = 1$ における細骨材の空隙 H_s が、セメント粒と細骨材粒が一体化し、見掛け上空けき率が H' と小さくなり、 s 線はこれを目指して w 線と H' 点で一致しようとする。エントラップトエアーも最小を記

録するが、骨材粒同士の粒の干渉が始まり、混合物が変形するには骨材粒がダイラタンシーを起さないと不可能な状態となり、空気が導入される。この空気を構造的エントラップトエアーと呼ぶ。骨材粒同士が粒の干渉を始める細骨材濃度の指標として、 c/w の2つ直線の交点 x_{CR} を定義し、これを限界細骨材濃度と呼ぶ。このときの単位細骨材量を限界実積率 G_{CR} と呼ぶ。これらは FM よりも G_s と密接な関係がある： $x_{CR} = 0.610G_s + 1.35$ 、 $G_{CR} = (-0.00071F + 0.758)G_s^{0.77}$ ；[F ：フロー値 mm] この状態の終点は固形物全体の間げき比が最小 e_{min} となる細骨材濃度 x_{min} 、又は w 線の直線変化の終点 x_w 付近である。両者は気泡構造の作用によって必ずしも一致しない。粒形の悪いものは $x_{min} < x_w$ となるが、一般の砂はコンシステンシーの大小によって変化する。 x_w は F には余り関係せず G_s と関係が深い。 $x_w/x_{CR} = 1.11 \sim 1.19$ の関係が認められる。なおこの区間の中から、 c/w は x の増分に応じて低下し始める。

③ 第3の状態は x の増分に比例して c/w が直線的に低下し、実用のモルタル又はコンクリートに利用される区間である。 w は殆ど変化せずLyseの一定水量則を示す区間である。従って c だけが w に対して減り、この減を A 又は s の増分で補う。構造的エントラップトエアーの発生が x_w 点から激しくなるのはこの理由による。実積率が小さい細骨材では気泡はペースト内部に存しペースト容積を膨大させ、実積率の大きいものでは細骨材の粒子間に干渉するように気泡粒が配され一種の骨材粒と同じ作用をしていると想像される。即ち、粒形の悪い場合は骨材粒子同士は接触しているほどとなっているため、ペーストの流動性を増すよう c/w が小さく気泡はペースト内にある。一方粒形の良い場合は骨材粒を適度に分散させるほどペーストは硬く、気泡粒も骨材を分散させるのに寄与していると考えられる。Powers が求めたコンシステンシー関係 $\log F/F_0 = \alpha M \frac{c}{w}$ は、 $\log \frac{F}{F_0} = \alpha' M \frac{1}{w/c + (w/c)_0}$ 又は $c/w = \eta \cdot (x - x_0)$ 、 $\eta = f(F, G_s)$ と修正した方が実験的に良好である。

④ 第4の状態は極端に貧

配合の場合で x の値がかなり大きいときである。この場合、混合物中の液相と気相の関係はファニキュラーからペンデュラー構造へとサクションが弱まり、見掛けの粘性は小さくなり $x = x_0 < 1$ で $c/w = 0$ とならず $x = 0$ で $c/w = 0$ となるように c/w の軌跡は変動して行くと考えられる。

いずれにせよ、①、②の状態で w 線が直線となるのは表面積配合設計理論が成立する区間とみられる。細骨

表 - 1

材質	粗粒率 FM	絶対比重	吸水率 $\%$	実積率 G_s ($=1-H_s$)
水砕砂 S_1	2.45	2.69	1.4	0.625
水砕砂 S_2	3.16	2.74	0.9	0.577
海岸砂 S_3	2.67	2.76	0.5	0.675
海岸砂 S_4	2.68	2.77	0.5	0.666

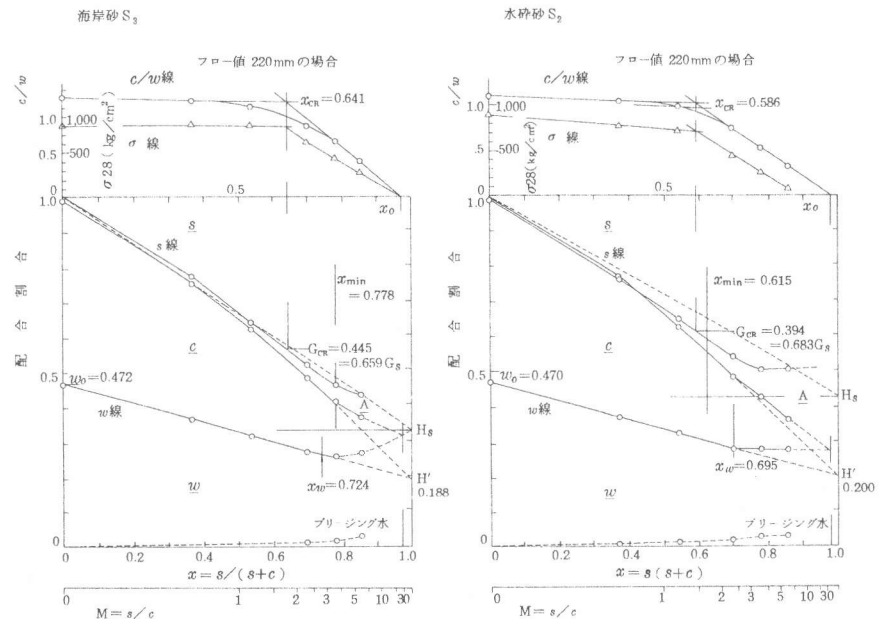


図 - 2 モルタル組成ダイアグラム

材濃度が薄く骨材粒子が独立して分散していると仮定できるときは、単位水量 w は砂の体積によるペースト置換効果と表面積効果によって決定できるとみられる。図-2の s 線の変化から、 $s(=Gx)=k \cdot x + \nu G_s \cdot x + 2/3 G_s \cdot x$ が成立するとみれば、ニートペーストにおける単位水量を w_0 、セメントの平均粒径を d_0 、砂の平均粒径を D_0 とし、 $\frac{1}{\psi_L}$ を角張り係数とすると、

$$w = w_0 \left[(1-x) + 3\beta \frac{1}{\psi_L} \cdot \frac{d_0}{D_0} kx \right] = w_0 \left[1 - (1 - 2\beta \frac{1}{\psi_L} G_s \frac{d_0}{D_0}) x \right], \quad \beta: \text{補正係数}$$

が成立する。この式から粗粒率 FM と共に実積率 G_s 及び角張り係数 $1/\psi_L$ が w の大きな決定要因である。とくに x が大きいときは、図-2の H_s 点の位置の影響を受けることも考え併わせると FM よりも G_s の方が重要である。就中、砕砂や水砕砂では、 FM の大きいものは G_s も大きいと言う天然砂の経験則が成立しないから、むしろ実積率 G_s に注視しなければならない。

図-3はモルタルのレオロジー特性上重要とみられる2つの指標であるセメント水比 c/w と砂水比 s/w の関係の一例である。同一砂セメント比 M の値に対し各フロー値を結ぶ線は一本の直線となり、この束は一点で交絡する。この縦距の値は、どんな細骨材の場合でも、 $(s/w)_0 = 4.75$ とほぼ一定値を示すレオロジー関係がある。

3. コンクリートの配合機構

ペースト濃度及びペースト量一定という条件 (w/c 一定, w 一定) とペースト濃度一定・コンシステンシー一定という条件 (w/c 一定, スランプ一定) によって、スランプ 8cm のプレーンコンクリートのワーカブルな最適配合を試し練りで求めた。水セメント比は 40, 55, 70 及び 100% と変え、数種類の細骨材について実験を行った (川砂利の最大寸法: 20mm)。図-4~5にその一例を示す。水セメント比が 5.0% 程度以上では、

このモルタル成分は $c/w = \eta(x-x_0)$

の式が成立するとみられ、 s/w の値は水セメント比が変ってもほぼ一定値を示す。この s/w の値は粒形の良い細骨材の場合は大きく、粒形の悪いものは小さな値を示す。

図-6は、 w/c 一定・スランプ一定の試し練りによる s/a と W の関係を示す。川砂の場合は RC 示

方書に示されるように、 s/a 1% の増(減)に対し W は 1.5 kg/m^3 の増(減)がほぼ成立するが、粒形の悪い水砕砂では W は $5.5 \sim 6 \text{ kg/m}^3$ の増(減)を示す。

図-7は上述の水砕砂のコンクリートの実験結果を図-2と同じようなダイアグラムで示したものである。図中、 $(FM)_a$ は細、粗骨材を組合せた骨材全体の粗粒率、 $(FM)_o$ はセメントの粒子を含めた全固形物粒子の粗粒率を計算したものであって、セメントの粗粒率については $(FM)_c = 0.00$ という説と、 $(FM)_c = -2.5 \sim -3.5$ という説の両者について比較して示してある。 $(FM)_c = 0.00$ のときは $c/w = \eta(x-x_0)$ が成立する W/C の範囲内では、 $(FM)_o = \text{一定}$ となる。 $(FM)_o$ の値は、一定の粗骨材が与えられるとセメントや細骨材の種類あるいはスランプの値が多少変わってもほぼ一定の値を示すことから、これを固有粗粒率と呼ぶ。固有粗粒率の値はモルタル成分

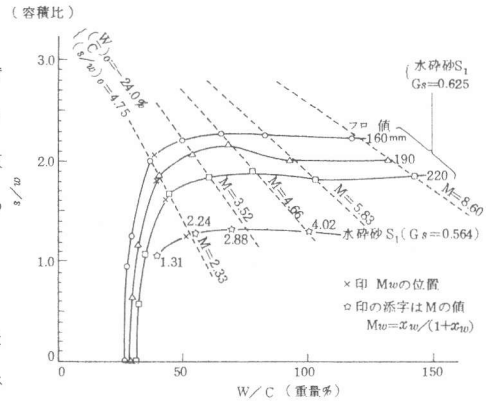


図-3 モルタルの W/C と M 及び s/w の関係

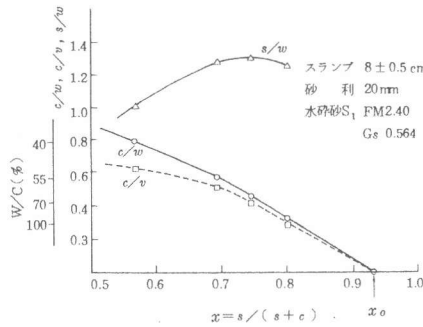


図-4 W/C の違う最適 s/a のコンクリートのモルタル成分の特性値 (水砕砂 S_1)

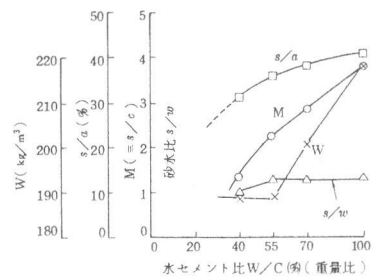


図-5 ワーカブルで単位水量を最小とするスランプ 8 cm のコンクリート (水砕砂 S_1)

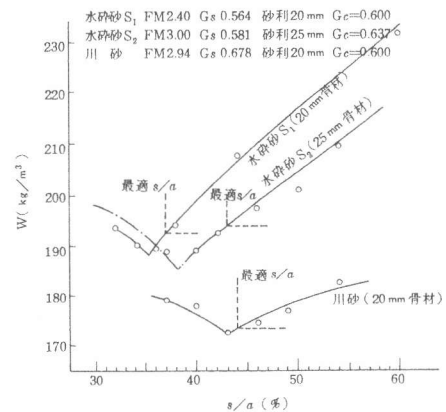


図-6 $s/a \sim W$ 関係 [$W/C = 55\%$ スランプ 8 cm のとき]

のダイラタンシー作用に対する抵抗性を示す指標とみられ、主として粗骨材の最大粒径によって支配されるものと考えられる。もしこの仮説を認め、固有粗粒率配合設計法を導入できるとすれば、単位水量を経験等で合理的に推定できれば、細骨材率は次のように決定できる。

$$s/a = \frac{(FM)a - FM}{f_m - FM}$$

ここに、

$$(FM)a : \text{骨材の粗粒率} \left[= \frac{(1+N')(FM)o - (FM)c}{N'} \right]$$

N' : 骨材セメント容積比 ($= a/c$)

FM : 粗骨材の粗粒率

f_m : 細骨材の粗粒率

最大粒径の骨材がモルタル成分のダイラタンシーによる構造的エントラップドエアーの発生を抑える査証の一つとして図-8が提示される。実積率が小さく粒形の良くない水砕砂のコンクリートはエントラップドエアーの発生が多いと一般に言われているが、 s/a を適切に選ぶことが特に大切である。むやみに s/a を大きくするとコンクリートの空気量の管理が困難になる。天然の川砂の場合は安定した空気量を得る s/a の範囲が水砕砂の場合よりも相当に広いが、 s/a がかなり大きくなるとモルタルミキサによるパッチの場合と同じ程度まで空気量は増加する。

最適 s/a は最高密度のコンクリートを得る s/a よりも若干大きいものであるが、図-7の $x' \sim s/a$ 関係に次の仮説を設けるとテストパッチの検証に便利である。

- ① s/a は $x=1$ においてペーストを含まない細、粗骨材の組合せの最大密度の s/a の値をとる。〔図-7の場合 $s/a=42\%$ 〕
- ② $x=0$ においては、ペースト中の骨材濃度は希薄であるので、骨材の寸法効果は無視し体積効果だけ考慮するものとする。従って $s/a=0$ とする。
- ③ よって、 $x=0$ から骨材濃度 x を増加させて行くと、当初は粗骨材の実積率 Gc を目指すが、 x の増加と共に s/a が大きくなり、細、粗骨材を混合した骨材の最高実積率 G_{max} を目指すようになる。
- ④ よって、実用範囲のコンクリートは、 $x=0$ にて $s/a=0$ 、 $x=1$ にて $s/a=(s/a)G_{max}$ を結ぶ直線上にある。

図-3の☆印のプロットは同一スランプの最適配合のコンクリートのモルタル成分の s/w の挙動である。この傾向から、モルタル成分も W/C の変化に対し一定のフロー値を示すとみられる。即ち、最適配合のコンクリートはそのモルタル成分も最適状態となっていて、 s/w の値は細骨材の粒子性状(例えば G_s)に応じて一定値となる。

4. むすび

粗骨材の粒子性状を導入した配合設計には b/b_o 方法が開発されているが、細骨材については天然砂についての経験則しかない。細骨材の粒子性状を考慮した混合物のレオロジー挙動は s/w が c/w と共に重要である。とり得る s/w の値は、細骨材に応じて実用範囲の c/w に対しほぼ一定値をとるものであるが、具体的に配合設計を導入するには、多くの試験により経験を積む必要がある。砕砂、水砕砂等は s/a を大きくすると単位水量が極端に多くなるので s/a の選定は慎重でなければならない。具体的に s/w 設計法が整備されていない現在、固有粗粒率一定の半経験則を導入すれば、とり敢えず大きな過誤もなく配合設計が可能である。

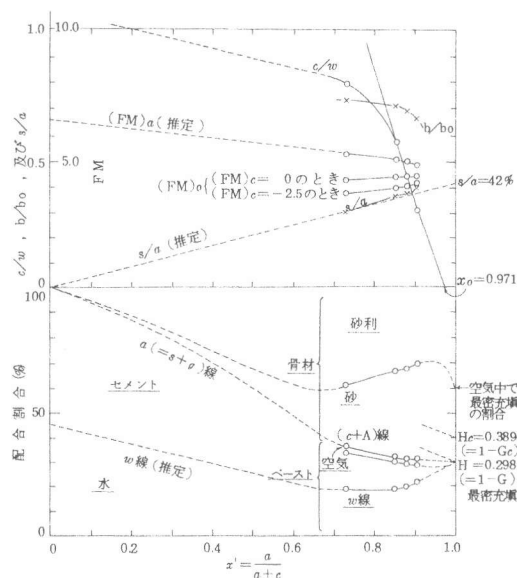


図-7 水砕砂 S_1 コンクリート(最大寸法20mm、スランプ8cm)の組成ダイヤグラム〔各 s/a は最適割合〕

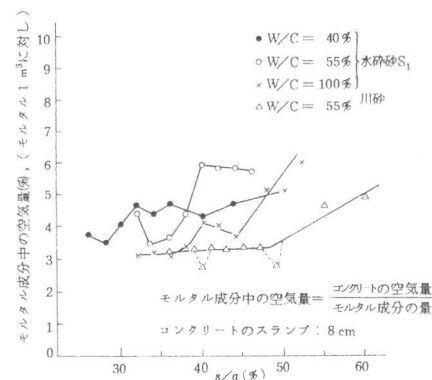


図-8 s/a とモルタル成分の空気量