

砂の粒度および量とモルタルの諸性質の関係について*

THE EFFECT OF SAND GRADING AND ITS ABSOLUTE VOLUME
UPON THE CHARACTERS OF MORTAR

徳 光 善 治**
By Yoshiharu Tokumitsu

1. まえがき

コンクリートはセメント、水および骨材から構成され、骨材はさらに粗骨材、細骨材に分類されている。粗細骨材の分類は粒径という便宜的な手段によっているが、セメントペーストと混合されたとき、だいたい示方書の種類点に近いところで性格を異にするようである。したがってコンクリートは大きく考えるとモルタルと粗骨材からなると考えてもよい。もちろん、粗骨材周囲には余分なペーストを必要とするかもしれないが、これはコンクリートの場合に考慮することにする。すなわち、モルタルと粗骨材の性質がコンクリートの品質に影響をもつと考えたのである。特に強度の面からは強いモルタルで包まれたコンクリートが強いであろうことは容易に推定される。本文は粗骨材を考えぬモルタルの性質について考察したものである。

モルタルはセメント、水および砂から構成されている。すなわち、単位容積のモルタル中で占めるペーストおよび砂の容積をそれぞれ P, S として示すと、

$$P+S=1 \dots\dots\dots(1)$$

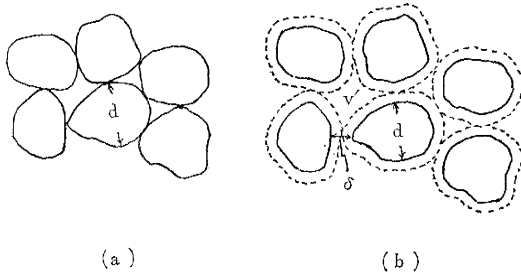
とならねばならない。しかし S はその砂単独で詰めこまれたときの実積率（これを固有実積率と呼ぶ） G_i よりは大になり得ないので

$$G_i > S = G_c \dots\dots\dots(2)$$

がモルタルとしての必要条件となる。ここで配合設計上得られる S を配合実積率 G_c と呼ぶことにする。

モルタル中の砂は周囲にペースト被膜を作り、この被膜によって相互に緊結されている。したがって G_i なる

図-1 骨材単独の詰めこみとモルタルの詰めこみ模型



状態では図-1 (a) のようになっているものが G_c では図-1 (b) のように被膜厚 δ だけ余分なすき間をもつことになる。このとき G_c と G_i の間にはつぎの関係が成り立つ。

$$\frac{G_i}{G_c} = \left(1 + \frac{\delta}{d}\right)^3 \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 d は砂粒子の平均粒径を表わす。この d については後述するとして、 δ がモルタルの重要な性質を表わす要素であると考えられる。一般に、砂量を増すということは δ を小にすることであり、 d が大であることは粗い砂を意味する。それゆえ、 δ が砂の表面に均等厚に作られるとするなら、粗砂のほうがセメントは少なくとも同じ δ をもちうることになる。一方 G_i が大なる砂は同様に有利と考えられる。これらのことに関し実験および考察を試みたのが本論文である。

2. 1種骨材の配合実積率とモルタルの諸性質

ペーストの品質 (w/c) を一定にして、一定粒径の骨材を使用し、配合実積率 G_c を変化させた場合について述べる。室見川砂をふるい分け、0.3~0.6 mm および 0.6~1.2 mm の粒径をえらび、それぞれに対し $w/c=65\%$ のペーストを混合、各種の G_c でモルタルを練った。その結果を図-2 にまとめている。

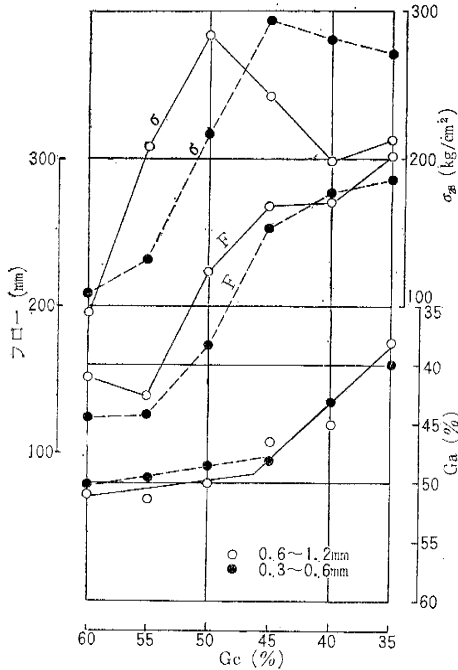
図中の G_a は、でき上りのモルタル中で、実際に骨材が占めていると推定される実積率で、つぎのような仮定にもとづいて計算したものである。いま配合設計どおりのモルタルができ上り、空げきがないとしたときの単位重量 r_c 、でき上りのモルタルの実際の単位重量 r_a とすると、実際には若干の空気泡をふくむために $r_c > r_a$ となるのが当然である。 r_a は練り上り直後のモルタルで測定すべきであるが、後述の傾向が後に判明したので、養生室で硬化したモルタルの重量から求めた。そのためキャッピング、養生中の収縮などの影響があって逆の結果も生じている。特にただ1種の骨材を用いた場合、ともすれば分離の傾向を生じ、ペースト部分があふれ、骨材が余分に入る傾向があった。また、逆に $r_c \gg r_a$ と極端に差のある場合もあった。これら2つの場合についてつぎのように考えた。

$r_c > r_a$ の場合

これは $G_a < G_c$ なる場合で、 $G_c > G_i$ であればもちろ

* 昭和34年、土木学会 第14回年次学術講演会に一部発表
** 正員 工博 九州大学講師 工学部土木工学科

図-2 $w/c=65\%$ のモルタルの骨材量 (G_c) と諸性質



ん $G_c < G_i$ の場合にもおこり得るものであり、ペーストと骨材の配合割合は変わらないが、ペーストが骨材表面を被覆し、さらにペースト被膜間の空げきを満たすに足らない場合に生ずる。すなわち単位容積中で占めるべき r_c が空げき v をふくむため、見かけ上 r_a となっているのであるから、

$$r_a = \frac{r_c}{1+v}$$

となる。また、配合設計上の G_c が G_a となっているのであるから、

$$G_a = \frac{G_c}{1+v} = G_c \frac{r_a}{r_c}$$

で G_a を与えることができる。

$r_c < r_a$ の場合

キャッピング、養生初期の収縮などの影響は考えず、打ち込み時に骨材とペーストが若干分離し、ペーストが追い出され、骨材が余分につまったとする。すなわち、骨材がペーストの一部とおきかえられたと考える。いま、骨材の比重 ρ_a 、ペーストの比重 ρ_p とすると、

$$r_a - r_c = (G_a - G_c)(\rho_a - \rho_p)$$

となるから、 G_a は次式となる。

$$G_a = \frac{r_a - r_c}{\rho_a - \rho_p} + G_c$$

ここで ρ_p は、水セメント重量比を w/c とすれば次式で示される

$$\rho_p = \frac{1+w/c}{1/\rho_c + w/c}$$

ただし ρ_c : セメントの比重

a) G_c と G_a の関係 ここで使用した砂の固有実積率はいずれも $G_i=52\%$ であるが、図-2 のように G_a と G_c の関係は折れ線で示される。 G_a は前述の収縮、キャッピングなどの影響で3%ほど計算では大いに偏していると考え、 $G_c \leq 45\%$ では $G_c = G_a$ となるが $G_c > 45\%$ では骨材が思うようにつまらない。すなわち、 $G_i=52\%$ ではあるが、被膜の存在によって7%ほどペースト消費量を増加させねば完全なモルタルになり得ない。この増加量が被膜となるのであるが、屈折点より大なる G_c 部分では G_a の値は大した変化をしない。換言すると、ペースト量が変わっているにもかかわらず、骨材相互の関係はそれほど変わらず、被膜部分に費されるペースト量はほとんど変化しないと考えられる。これを図-1 (b) で説明すると、 θ なる被膜が破線のように作られる。 G_c が大なる場合、この被膜部分にまずペーストが消費され、内部空げき v' を満たすことはできない。しかし、 G_c が小になるにしたがい、内部空げきを漸次満たしてゆき、最後にこれを満たし終えたときから始めて G_c ぞおりのモルタルとなることができる。そして G_c がさらに小になると、ペーストは被膜厚さの増加のために費されるようになると考えることができる。

b) G_c とフローの関係 図-2 のように、フローは G_c が屈折点より大なる部分では、ペーストの増加とともに急激に増大するが、屈折点より小なる部分では、フローはペーストの増加によりいくぶんは増大するが、その増し方は少ない。

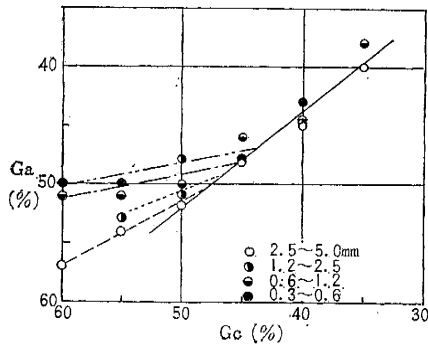
c) G_c と圧縮強度 各配合のモルタルで、径 5 cm、高さ 10 cm の供試体を作り 28 日の圧縮強度を求めた結果 図-2 に示している。ここで気づくのは、一定の G_c で最高強度を示し、 $G_c > G_a$ 部分では空げきのために強度が減ずると考えられるが、 $G_c = G_a$ 部ではペースト膜厚の増加により強度が減ずると考えられることである。もちろんペーストの品質によっても異なるであろうが、後述の実験にも見られるように、一般に使用される w/c の範囲では以上と同じような傾向が見られる。このことは標準供試体 (4×4×16 cm) の場合も同様である。

3. 1 種骨材の粒径およびペーストの品質がモルタルの性質に与える影響

2. と同様に $w/c=65\%$ で、粒径 2.5~5 mm, 1.2~2.5 mm の骨材について G_c を変えて粒径の相違による影響を、1.2~2.5 mm と豊浦標準砂により w/c の影響を試験した。つぎにそれぞれの性質について述べてゆこう。

a) G_c と G_a の関係 G_c と G_a の関係を $w/c=65\%$ について描くと 図-3 のようになり、いずれも $G_c = 45\%$ 付近で前記の屈折点に達する。これより小さな G_c の場合に始めて完全なモルタルとなり、大きな G_c では

図-3 $w/c=65\%$ のモルタルの骨材粒径の相違による配合実積率 G_c と見かけ実積率 G_a の関係



不完全なモルタルとなるので、この屈折点に相当する G_c を限界実積率と呼ぶことにする。限界実積率 G_{cr} はわずかではあるが、細粒ほど小さくなっている。しかし、この限界実積率とそれぞれの固有実積率 G_i を比較して見ると、大体 $G_{cr} = G_i - 0.07$ となっており、必ずしも粒径によるちがいはいいがたい。

骨材表面にできるペースト膜厚について柳場、高桑両氏の興味ある実験¹⁾がある。これによると、粒径 10 mm 以上ではペーストの w/c が等しければ膜厚 δ はほぼ等しい。粒径 10 mm 以下では δ は減少する。また δ/d は 5 mm 以上では粒径が小になるにしたがって増すが、5 mm 付近から減少し、3 mm 以下では w/c によりほとんど一定となる、というのである。この研究は、鋼球によったものであり、一般のコンクリート骨材にそのまま適用されるとはいいい得ないにしても、ある程度、類似性はあるとってよかる。ここではモルタルで考えているので粒径は 5 mm 以下である。したがって安定な膜厚 δ は d に関係し、 δ/d が一定と考えてよい。いま両氏の実験結果より $w/c=65\%$ に対し $\delta/d=0.05$ と考え、式 (3) より G_c を求めると、2.5~5 mm, 1.2~2.5 mm, 0.6~1.2 mm および 0.3~0.6 mm のおのおのに対し G_c はそれぞれ 0.50, 0.48, 0.46 および 0.45 となる。これは 図-3 の G_{cr} にほぼ等しく、細骨材では以上の考え方が、数値的に若干の違いはあるが、適用できると考えられる。図-3 において $G_c > G_{cr}$ の範囲において、粒径が大になると G_a は G_c が大になるにしたがい大きくなっている。これは粒子間に生ずる単位空けきが大粒子ほど大で、被膜部分のペーストが締固めにより固有空けきに移行しやすという理由からであろう。

つぎに 図-4 にはペーストの $w/c=50\%$ および 40% に対し、 G_c を変化させたときの G_a を与えている。1.2~2.5 mm と標準砂の固有実積率はほぼ等しく、この点の誤差は少ないものと考えられる。 $w/c=50\%$ では若干ずれているが、 40% では $G_c=35\%$ で両者は一致し、 G_{cr} に達したものと見られる。前の $w/c=65\%$ と考えあわせ G_{cr} は w/c の減少とともに減少し、前述の柳

図-4 骨材粒径および w/c の変化による配合実積率 G_c と見かけ実積率 G_a との関係

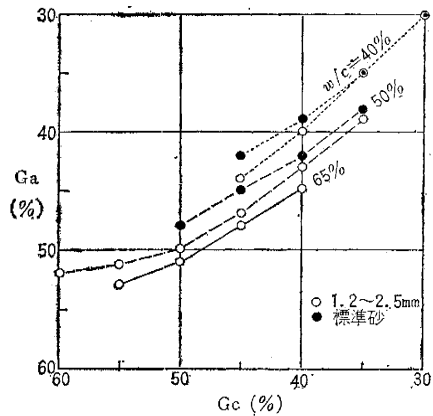


図-5 $w/c=65\%$ のモルタルの骨材粒径がフローにおよぼす影響

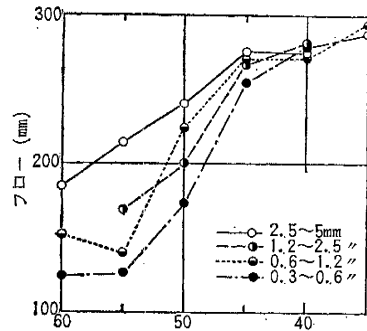
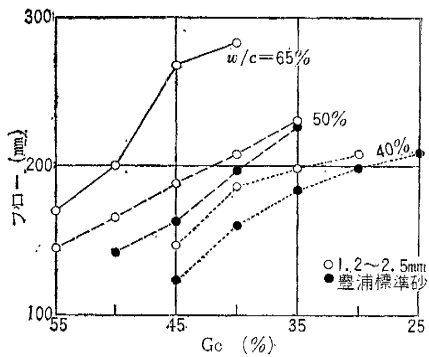


図-6 w/c による G_c とフローの関係

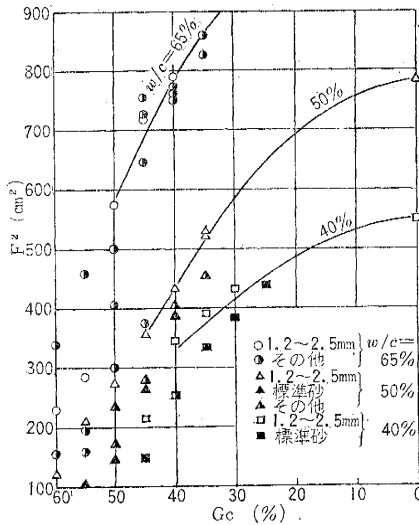


場、高桑両氏の実験と同じような結果を得ている。

b) G_c とフロー G_c とフローの関係は 図-5 および 図-6 に示しているが、 G_c と G_a の関係に似たものが見られる。すなわち、 $G_c > G_{cr}$ 部分と $G_c < G_{cr}$ 部分とでは性質を異にし、前者では粒径によってフロー値はそうとうに違っているのに対し、後者では大差ない。モルタルとして取り扱うのは $G_c < G_{cr}$ 部分であるべきであるが、いずれにしても G_c が減少すればフローは大になる。これは単位水量が増しているのであり当然といえる。

式(3)において、 d が一定であれば G_c が減るほど、 G_c が一定なら d が大なるほど δ は大となる。 G_c が減ることはセメントおよび水量が増加することを、 d が大なることは粒子が粗いことを意味する。一般に以上の事項は流動性を増す条件と考えられていることに共通し、 w/c が一定ならウォーカーピリチーはペースト膜厚 δ が支配するというKennedy氏の説など²⁾も生まれたと考えられる。いわゆる比表面積説もこれと同様である。しかし、例えば $G_c=0.5$ の骨材表面に $\delta=0.5$ mmの被膜ができる場合を考えると、 $d=5$ mmに対し $G_c=0.376$ 、 $d=1$ mmに対し $G_c=0.148$ とならねばならず、粒径のわずかな違いが非常に大きな影響をもつことになる。筆者の実験では図に示したように、多少 d の影響があるとは考えられても、このように δ が支配するのだと考えることは困難である。図-6においては $w/c=65\%$ の場合に比して粒径による差が大に表われているが、この例は砂としては最大および最小に類するものをとっており、フローを直径でなく拡がりの面積(F^2)を基準として考えると、図-7のようになり $G_c < G_{cr}$ では G_c 、すなわち δ/d によって大きく支配されると考えてよい。

図-7 w/c と F^2 の関係



e) 強度に与える影響 一般に、骨材粒径はコンクリートあるいはモルタルの強度に直接影響を与えるものではないと考えられている。また、粒径が一定な場合、 $G_c > G_{cr}$ なる不完全なコンクリートは強度が劣ることは当然であるにしても、空げきのないコンクリート、すなわち $G_c < G_{cr}$ なるものでは w/c が強度を支配すると考えられてきた。

1種骨材について実験した結果を図-8および図-9に示しているが、必ずしも上記の説は正しいとはいえないようである。 $G_c > G_{cr}$ 部分では G_c が大になるにしたがい、ペーストが空げきを満たさなくなる程度がいちじ

図-8 $w/c=65\%$ の骨材粒径と強度

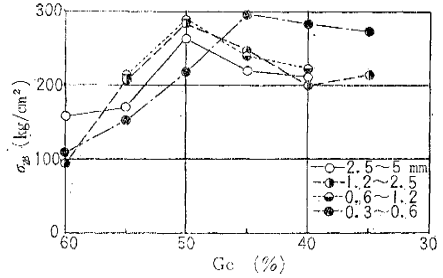
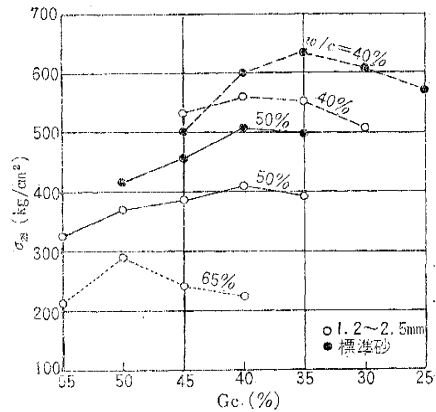


図-9 w/c と粒径が強度に与える影響



るしく、強度は減少する。 $G_c < G_{cr}$ 部分では逆に、 G_c が減少するにしたがい、わずかではあるが強度も減少している。また同一 G_c であれば粒径は小さいほうが強度は高い。これは骨材とペーストの弾性係数を考えるとき、ペーストのほうが小であるため、骨材と骨材との間の伝達応力が大きな骨材ほど大きく集約されるため、中間のペースト強度は一定であるから、全体的には早く破壊に達するものと考えられる。

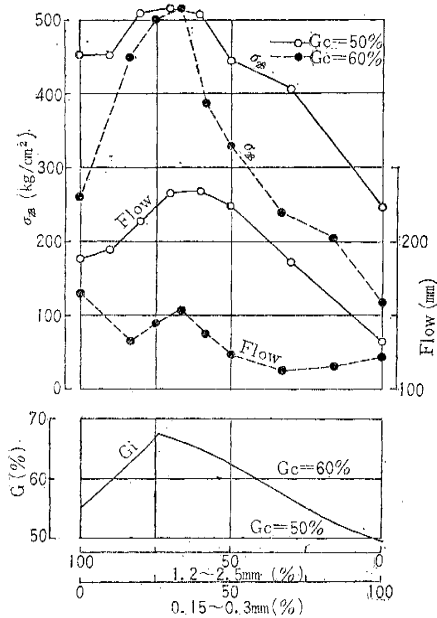
d) 結論 $G_c > G_{cr}$ なる場合は別として、 G_c が減少していくと、1種骨材のモルタルはフローを増大する。しかしフローの増加は $G_c > G_{cr}$ なる場合に比し、その伸びは少ないし、強度はむしろ減少する。粒径による影響は、フローに対し不完全モルタルでは大に差があるが、完全モルタルでは多少はあるにしても、ペーストの w/c に比して小さなものである。また、粒径は小さいほうが強度は大である。以上から考えて、モルタルにはその砂の粒径および固有実積率に対し、最適と考えられる砂量 G_{cr} が存在する。

4. 2種骨材を用いたモルタル

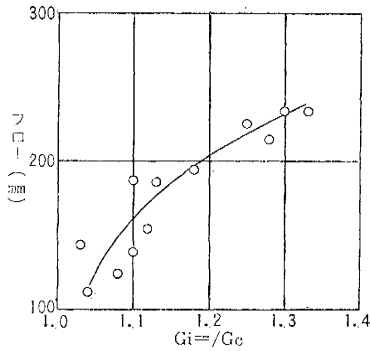
粒径の異なる2要素を混合したとき、その配合率によって実積率が変化することは明らかである³⁾。このような配合率の違いがモルタルに及ぼす影響を与えるかについて実験を試みた。

セメントペーストの w/c を等しく50%とし、骨材

図一10 2種粒度の混合率を変えた骨材を用いたモルタルで、 $w/c=50\%$ 、セメント量および砂量を一定にした場合

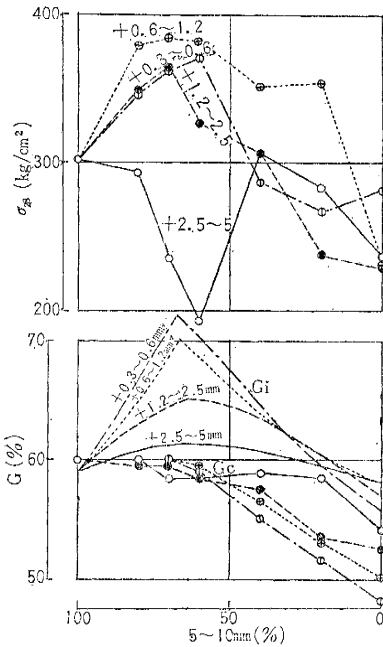


図一11 $w/c=50\%$ の G_i/G_c とフローの関係

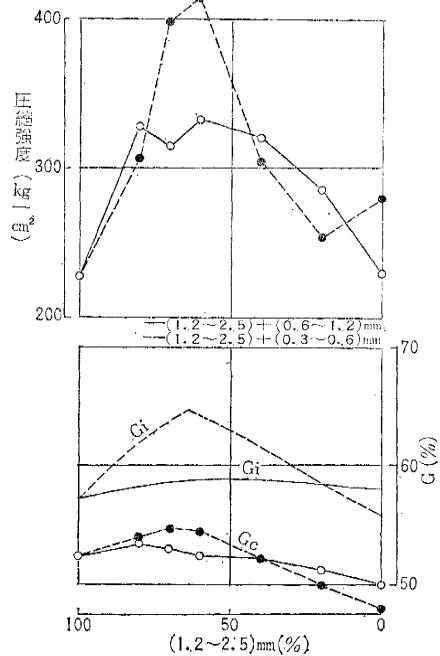


配合実績率 $G_c=50\%$ および 60% の場合について、骨材2要素 (1.2~2.5mm および 0.15~0.3mm) の配合率変化にもづくモルタルの性質の変化は 図一10 のようである。完全モルタルでは式 (2) の条件 $G_c < G_i$ を満たさねばならぬが、図に見るように $G_c=60\%$ では一部分しか条件を満たしていない。それに対し、 $G_c=50\%$ ではほとんど満足しており、ペースト不足による影響は 0.15~0.3mm 単独の場合を除いてないものと考えてよい。先に式 (3) において G_i/G_c 、すなわち δ/d がモルタルのフローに関係することを述べた。つぎに G_i/G_c とフローの関係を 図一11 に示すが、ある程度、関係あるものといつてよいようである。式 (3) における d は混合要素の場合、ある種の平均粒径で考えねばならない。しかし、 δ が d に対し一定のものであるならペースト混合により骨材粒子の相対的位置は変わらないから G_i/G_c

図一12 $C=520\text{ g/l}$ 、フロー 220mm で 2種混合骨材を用いたモルタル



図一13 $C=520\text{ g/l}$ 、フロー 220mm で 2種混合骨材を用いたモルタル



のみで考えてよいことになる。

強度について考えても、 G_i/G_c あるいは $G_i - G_c$ は大きな影響力のあることが 図一10 よりいえる。この実験では w/c が一定であるから、あとは骨材の影響である。 $G_c=50\%$ と 60% では、最大強度およびそれを与える

配合率はほぼ等しいが、 $G_c=60\%$ では配合率のわずかな変動が強度に大きく影響している。すなわち、セメント量が少ないと、骨材の粒度のわずかな変化がモルタルの性質に大きく影響し、安定性に乏しくなるといえる。逆にいえば、骨材粒度の良好なものを選べば、同一強度を得るのにセメント量を減じ得るといえる。また、このような理想的粒度とは、最大実積率を示す粒度に近いところにある。

つきに、セメント量 520 g/l で、フロー値 $F=220\text{ mm}$ とし、第1要素に $5\sim 10\text{ mm}$ 、第2要素に $2.5\sim 5\text{ mm}$ 、 $1.2\sim 2.5\text{ mm}$ 、 $0.6\sim 1.2\text{ mm}$ 、および $0.3\sim 0.6\text{ mm}$ の骨材を使用し、水量を加減してモルタルを作った。図-12はその結果を示している。また、第1要素に $1.2\sim 2.5\text{ mm}$ 、第2要素に $0.6\sim 1.2\text{ mm}$ 、および $0.3\sim 0.6\text{ mm}$ を使用し、上と同じ条件で配合したモルタルの試験結果を図-13にあげている。第1要素で $5\sim 10\text{ mm}$ が主体(主たる骨組を作っているのが第1要素の場合)のときには、分離性あるいは 3. で述べたペーストの δ/d から δ への移行段階にあるためか、 G_i-G_c は第2要素の増加とともに増す。しかし、 G_i の最大値をこえると、第2要素が主体となり G_i-G_c はほぼ一定となる。これら G_i-G_c の値は粒径によって若干の違いはあるが、ほとんど変わらず $6\sim 10\%$ の範囲にある。このことは 図-13 の場合にもいえる。ここで G_i-G_c について述べたが、近似的には G_i/G_c に代用できるものである。

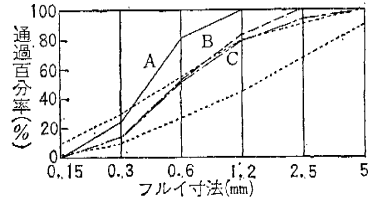
強度を比較すると、 G_i の最大値付近で最大強度を示すのは例外ない。ただ $5\sim 10\text{ mm}$ と $2.5\sim 5\text{ mm}$ の混合では定性的なものが見られないが、これは粒径がともに大でペーストのなじみの少ないこと、 G_i の変化がほとんどなく1種モルタルに近いことがあげられる。第1要素、第2要素の粒径 d_1, d_2 の比について考えると、 d_2/d_1 は 0.5 より 0.25 、それより 0.125 のほうが強度は増加する。しかし、 0.06 では若干減少し、 0.125 が最良となる。また配合率 $K_1:K_2=2:1$ がよいのは、つめこみの最大密度と同様である³⁾。

以上の実験に使用したセメントはアサノセメント(香春工場製、比重 3.16)、砂は室見川砂をふるい分けたものである。

5. 連続粒度の砂を用いたモルタル

以上述べたものは単一粒度および特異な不連続粒度に対するものであったが、ここでは福岡市周辺で市販されている普通の砂について同様な考察を試みた。なお、この一連の実験には麻生セメント(比重 3.15)を用いた。また、砂は海の中道(A種)、海の中道と室見川(2.5 mm 以下)の $1:1$ 混合(B種)、海の中道と室見川(5 mm 以下) $1:1$ 混合(C種)の3種とした。それぞれの粒度曲線は 図-14 のようで、固有実積率は A, B, C

図-14 使用した連続粒度骨材

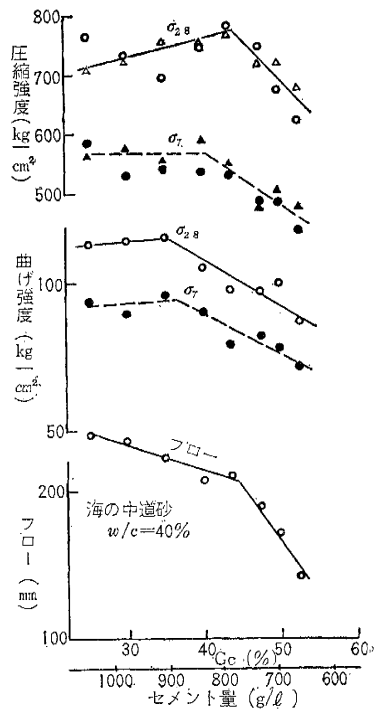


それぞれ $0.60, 0.63, 0.65$ であった。

a) 配合実積率 G_c とモルタルの一般的性質 A種に対し、1種骨材の場合と同様に G_c を変化させ、 $w/c=40\%$ 、 50% および 60% で一定にし、モルタルの性質を試験した結果、それぞれ 図-15, 16 および 17 のように得られた。すなわち、 G_c の減少とともに圧縮、曲げの強度はある点まで増大するが、それ以上は減少あるいは大した伸びを示さず、限界実積率と考えられる点が存在する。ただし、曲げは圧縮のように明確な山は作らない。また、フローも G_c の減少とともに増加するが、増加割合の異なる点が存在する。これらの観点から、簡単に直線関係で示されるものとし図に示しているが、限界実積率 G_{cr} は若干の差異はあるが大体において一致している。図中、圧縮強度の○印は $\phi 5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ の円柱形供試体、△印はセメント試験用の標準供試体の強度を示している。

b) フローに与える影響 フローについて先に G_i/G_c

図-15 海の中道砂、 $w/c=40\%$ 時の G_c とモルタルの諸性質



が大きな意味をもつことを述べたが、図-15~17 の関係から見てむしろ G_c/G_i でまとめるほうがよいと考え

図-16 海の中道砂, $w/c=50\%$ 時の G_c とモルタルの諸性質

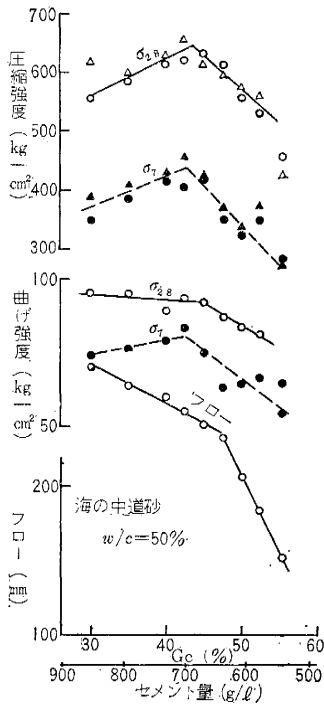
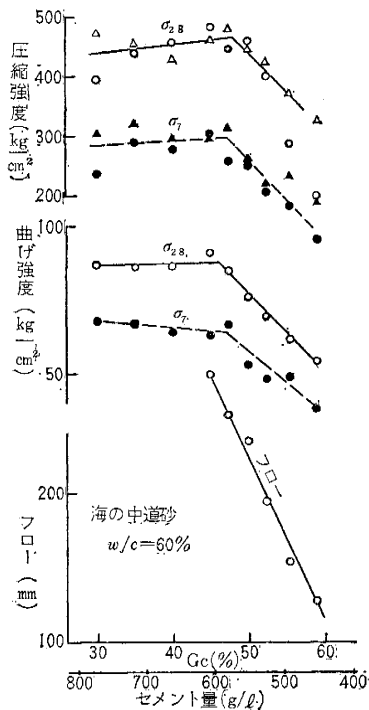


図-17 海の中道砂, $w/c=60\%$ 時の G_c とモルタルの諸性質



られる。よって、図-18 には A, B, C 3 種について G_c/G_i とフローの関係性を w/c 別にプロットしている。これにもほぼ定量的な関係が見られ、図のような折線で描くことができる。また、折点すなわち限界実積率 G_{cr} に対応する G_c/G_i を見ると、 $w/c=40, 50$ および 60% のそれぞれに対し G_{cr}/G_i は $0.76, 0.78$ および 0.81 と得られる。海の中道と室見川では石質も異なり、形状も大きな要素となることも考えられ、この点、なお研究を必要とするが、結論として、モルタル中の骨材がフローに与える影響は、連続不連続を問わず、骨材の表面積よりむしろ、その骨材の固有実積率が大きなる影響力をもつと考えられる。

③ 強度に与える影響 A, C 2 種について G_c と $\phi 5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 供試体とセメント試験用供試体の 28 日強度の平均値との関係を図-19 に示している。限界実積率 G_{cr} と考えられる点は A, C 種で異なるが、強度は G_c が G_{cr} より大なる範囲では両者は大差なく、むしろ C 種が大なるものもある。しかし G_c が G_{cr} より小になると A 種のほうが大なる強度をもっている。A 種は C 種に比し、いわゆる細砂と呼ばれるもので、この傾向は 1 種骨

図-18 連続粒度における G_c/G_i とフローの関係

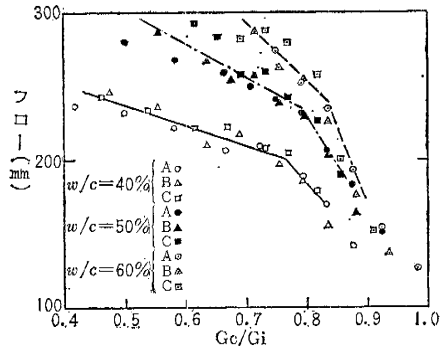
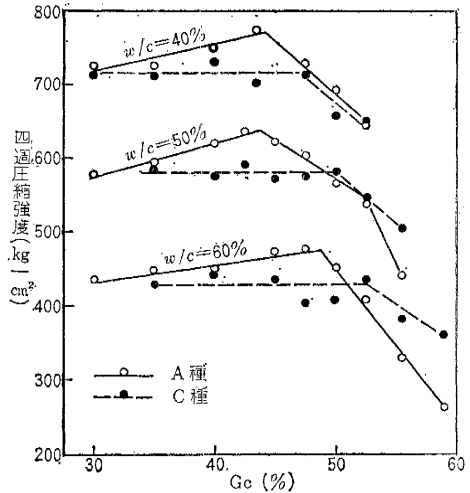


図-19 連続粒度骨材の G_c と 28 日圧縮強度の関係



材にも見られたものである。強度面から考えられる G_{cr} は、前述のフローで得られた数値より若干小で、平均すると $w/c=40, 50$ および 60% に対し、 G_{cr}/G_c は $0.70, 0.75, 0.78$ 程度になるが、実験的誤差を考えるとほぼ同じといってもよい。

6. あとがき

以上の実験の結果、つぎの結論がえられる。すなわち、モルタル用細骨材として最も重要なことは、その固有実積率 G_i であり、ペーストの w/c に応じ最適な砂量（限界実積率 G_{cr} ）が存在する。 G_{cr} と G_i の比、 G_{cr}/G_i は w/c によって定まり、 w/c が大であると G_{cr}/G_i も大となる。また、 w/c 一定なら同じフローを得るのに G_i の大なるほうがセメント量は少なくてすむ。強度面から考えると適当に細砂が混じているものが強く、フローのみから粗い砂を用いるのは適当でないといえる。

また限界実積率に相当するモルタルと良い粒度の粗骨材を混合することにより最良のコンクリートが得られるものとする。これに関してはつぎの機会に述べる予定である。

本研究は、水野高明教授のご指導によるもので、実験に際しては土木実験室の職員諸氏および学生諸君の大きな協力をいただいたことを記して感謝の意を表す。なお、この研究は文部省科学研究費による一部である。

参考文献

- 1) 柳場重正・高桑重三：鋼球を骨材とみなした場合のセメントペーストの挙動，セメントコンクリート，3月，1961.
- 2) Kennedy, C.T.: Design of Concrete Mixes, Jour. of A.C.I., Feb. 1940.
- 3) 水野高明・徳光善治：粒体のつめこみに関する研究（第1報），九大工学集報30巻3号（第2報），31巻2号。

（原稿受付：1962. 10. 4）