



不連続粒度の骨材を用いたコンクリートについて

徳 光 善 治*

1. 概 説

コンクリートは、骨材とセメントペースト、および空気より構成されている。コンクリートを経済的につくる方法は、セメント量をなるべく少なくして、所要の目的に合致したものを得ることである。

コンクリートに要求される性質は、まだ固まらないとき、硬化後の性質とに大別される。前者は主としてワーカビリティを、後者はほかの諸性質の判断の基礎ともあわせて、主として圧縮強度を問題とすることが多い。コンクリートのワーカビリティは、Constant Water Content Theory によると単位水量が問題となり、強度は Lyse の説によれば、セメント水比 (c/w) により、Feret の説によればセメント空げき比 ($c/w+V$) によって支配されるといわれている。セメントを減じて行った場合、この二つの性質は相反するもので、どこで両条件を満足する割合になるかを見い出さねばならない。両条件を満足する範囲内で、なお、セメント量を減じ得るいくつかの方法もある。それには諸種の混和剤があるが、プレーンコンクリートでは、絶対細骨材率とか骨材の粒度について調整するよりほかはない。骨材粒度では、粗骨材は一般に最大寸法が大きいくほど有利であるが、施工や取扱いの不便さから、均一なコンクリートが得がたくなる。よって、示方書で大体適当な最大寸法の値が定められている。最大寸法が与えられると、従来示方書に標準の範囲が与えられ、欧米各国でも同様に連続粒度の標準を与えている。この標準範囲の骨材を用い、適当な砂率をえらべば安全に良好なコンクリートが得られることは確かであるが、現実には天然骨材ではこれに合致するのはまれである。しかし、理想的に最大密度を与える骨材粒度を考えると、このような連続した粒度ではなく、不連続な粒度分布となる。たとえば、ある均一な粒径 d_1 からなる球を一定容積の中につめこみ、その空間にちょうど合致する粒径 d_2 で満たし、さらに残った空間をつぎの粒径 d_3 で満たす。このようにすると、

* 正会員 九州大学助教授 工学部土木工学科

必然的に不連続な粒度分布となることは容易に推察できる。コンクリート用骨材の主たる役割りはセメントペーストをなるべくうすく引きのばして用いようとするもので、そのためには、空げきの少ない骨材が良いことはよく知られているところである。ただ、連続粒度と不連続粒度といずれが果たしてコンクリートに適当であるかは問題であるが、フランスにおいては、ダム工事にわざわざ不連続粒度を採用している例も多い。これについては異論も少なくないが、これ以上セメントを節約する手段として、不連続粒度を用いるほかないと記している。

筆者は、不連続粒度の骨材を用いて若干実験を試みたので、ここにその大要をのべるが、何らかの参考になり得れば幸いである。

2. 骨材粒度と、実積率、比表面積について

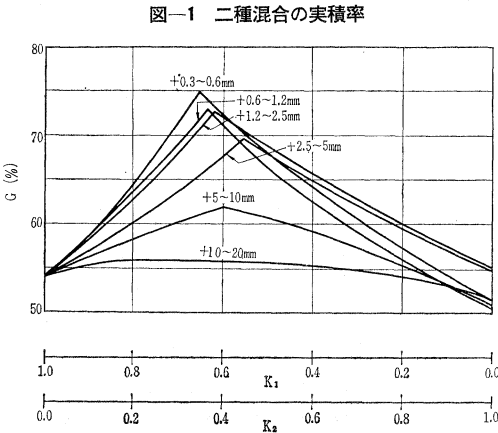
コンクリート用骨材として必要な性質は、材質、形状もあるが、ここでは粒度のみを取り上げて見ることにする。コンクリート用骨材として粒度が与える影響は、主としてその骨材のもつ実積率 ($1 - \text{空げき率}$) と、比表面積である。建築関係では実積率の定義があるが、土木では単位容積重量しかない。単位容積重量は骨材の比重に影響されるので、筆者は実積率で表現することにする。比表面積も同様普通は cm^2/g の単位であるが、 $1/\text{cm}$ とする。

コンクリート骨材粒度は、現在フルイわけの方法によって求めている。また、フルイ寸法も標準としては、一群を $5 \sim 10 \text{ mm}$ 、 $10 \sim 20 \text{ mm}$ のごとく、一群の最小径の2倍までを一つとして取り扱うのが一般である。骨材は、このようにして分類した各群の混合割合をもって粒度分布を表わしている。連続粒度の場合は、最大粒径以下の各群におのおのいくらかの量がふくまれているが、不連続粒度ではこの中間のいくらかの群を抜いた形をしている。

粒度分布と実積率の関係について、連続粒度に対しては、最大密度になる分布の理論はあるが、一般の場合に対しては実験によるほかない。不連続粒度に対しては

二、三のものがあり、実験的に最大密度を求めたものとして P.M. Worthington¹⁾の方法、理論的に Caquot のもの²⁾がある。後者に関しては白山和久氏がセメントコンクリート³⁾にくわしく紹介している。筆者がさきに発

表した実験⁴⁾からこれを見ると、2種類のを混合した場合、20~40 mm の第1群に対し 10~20 mm, 5~10 mm, …… と順次小さな粒径をもつ第2群を混合割合を変えて加えてある容器の中につめて見ると、図-1のごとく最大実積率は粒径差が大になるほど大になり、その比率は 2:1 に近くなる。また、3種混合では第1要素(20~40 mm)、第2要素(5~10 mm)、第3要素(0.6~1.2 mm)をえらび、第1要素の実質容積混合率 K_1 、第2、第3のそれを K_2 、 K_3 とすると図-2のような実積率が得られる。図中の丸印は実験値、実線は筆者の提案した計算値であるが、このように粒径差が大なるにしたがいその増しかたは減ずるが、最大実積率は大となる。比表面積は、前述のように骨材実質全容積 V がもつ全表面積 A の比 A/V で示され、 α_{SV} を面積体積形状係数、 d_{SV} を面積体積平均径とすると、



$$\frac{A}{V} = \frac{\alpha_{SV}}{d_{SV}} = \frac{\alpha_{SV}}{\sum K_i / \sum \frac{K_i}{d_i}} \dots\dots\dots(1)$$

で示され、 $\sum K_i = 1$ とすると

$$\frac{A}{V} = \alpha_{SV} \sum \frac{K_i}{d_i} \dots\dots\dots(2)$$

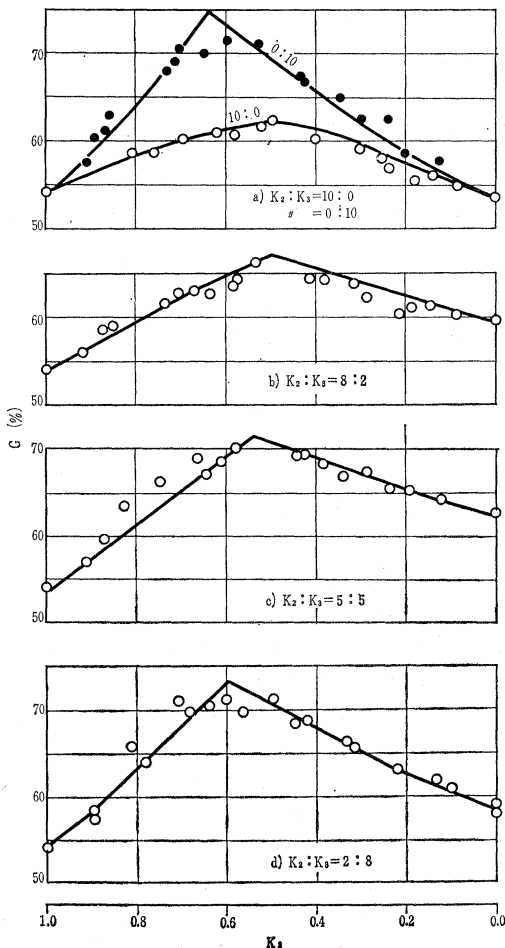
となる。 $d_1 = 2d_2 = 4d_3 \dots\dots$ とすれば、第2、第3と細粒が多くなるにつれ比表面積は増大し、一般に第 n 番のものは 2^{n-1} に比例する比表面積をもつことになる。この比表面積が骨材として重要な意味をもつことは Singh の諸論文⁵⁾に見られるとおりである。比表面積の大きな骨材は、一般に小さなものよりワーカブルでなく、コンクリート骨材として不利であるというのがその論旨であり、これから考えても実積率は高くても、比表面積のほうからあまり細粒と組み合わせることは有利でないことがわかる。したがって、不連続粒度も途中を大幅に抜くことには問題があり、適当な抜きかたがある。比表面積説そのものに関してはなお検討の余地はあるが、後述の例のごとくある条件下の範囲では考えてよいことである。

以上は骨材を全体として見たのであるが、榎場・高桑両氏の実験⁶⁾、および筆者の実験からしても、粗骨材と細骨材では性質を異にし、同一には取り扱えぬようである。粗細骨材の分類点は一般に 5 mm とされているが、この付近にコンクリート骨材としての性格の相違点があるようであり、特に比表面積を考える場合には粗骨材のみに限るべきであると考えられる。

3. ワーカビリチー 一定としたコンクリートの性質

ワーカビリチーをスランプによって規定するため、比較的軟ねり(スランプ 8~10 cm)のコンクリートについて、粗骨材粒度を変えた実験の一例をのべる。粗骨材

図-2 三種混合の実積率



は筑後川砂利，細骨材は那珂川砂を用いた。骨材の最大寸法は 50 mm，単位セメント量は 300 kg/m³ とし，各粒度に対し上記の条件を満足するように水量を調節した。連続粒度としては，粗骨材の標準粒度に入る (25~50 mm) を 55%，(15~25 mm) を 25%，(5~15 mm) を 20% にとり，*s/a* を 25%(M)，30%(N) とした。不連続粒度は，筆者の，あるいは Vallette⁷⁾ のいう理想的粒度は実際問題としてとりにくく，中でも細骨材までそれを要求するのは困難であったので，なるべく近づけるという意味から (40~50 mm)，(5~10 mm) および細骨材を 2.5 mm 以下とすることにした。不連続粒度の骨材配合割合は 図-3 中の A~L の各点に相当するものをとった。図-3 は一定容積の中に種々の配合割合をもった骨材をバイブレーターによりつめこんで測定した実積率をコンターによって示したものである。この実積

率を固有実積率と呼び G_i で示している。 G_i と使用水量の関係を図示すると 図-4 のごとくで，*s/a* の異なる I, J, K, L をのぞいて一連の関係が見られる。

いわゆる比表面積の定義に相当するものであるが，細骨材をふくめた場合には，細骨材の量はその大半を支配し妥当でない。また，粗骨材のみの比表面積を考えるのも *s/a* によってワーカビリティーが変わらないという矛盾を生ずる。よって，筆者はコンクリート 1 cm³ 中に占める粗骨材の配合時の表面積を考え，各粒径の骨材の全コンクリート中での容積率 K_i' を用い

$$A_g = \alpha_{SV} \sum \frac{K_i'}{d_i} \dots\dots\dots (3)$$

をとって見た。 A_g と使用水量の関係は，仮に $\alpha_{SV}=10$ とすると 図-5 の関係が見られた。この場合も *s/a* が異なる I, J, K, L, N および極端な不連続となる A をのぞいて大略比例関係が見られた。この場合は G_i の最大値と A_g の最小値を示す点が比較的近くにあったため，このような結果となったと考えられるが，一定の条件，たとえば *c* 一定，*s/a* 一定といった条件の下では G_i , A_g は一つのワーカビリティーを支配する要素と考えられる。

つぎにこれらの配合によるコンクリートの圧縮強度を見ると，図-6 のごとくで，不連続粒度では C，および D が最大強度を示し，連続粒度よりも大である。また，砂率の変化によるものでは $K(s/a=20\%)$ が最大を示し，最大密度の点より若干 *s/a* は小となっている。それに対し連続粒度では *s/a=30%* のほうが 25% より大で，粗骨材が連続か，不連続かによって *s/a* も変える必要があることを示している。図-3 において，C，および D 点と砂=100% の点を結びこれを延長して砂=0% 線と交わる点を見るとわかるが，これは砂をのぞいた粗骨材のみの実積率の最大値に近い。ほかの二，三の実験からもこのことは大体正しいものと考えられ，不連続粗骨材粒度決定の指針となるものである。

図-3 固有実積率三座標

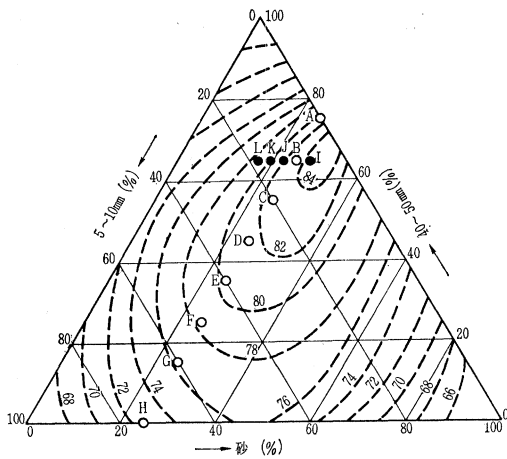


図-4 固有実積率と水量の関係

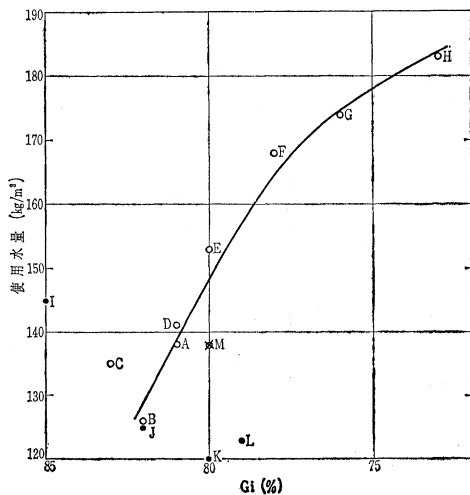
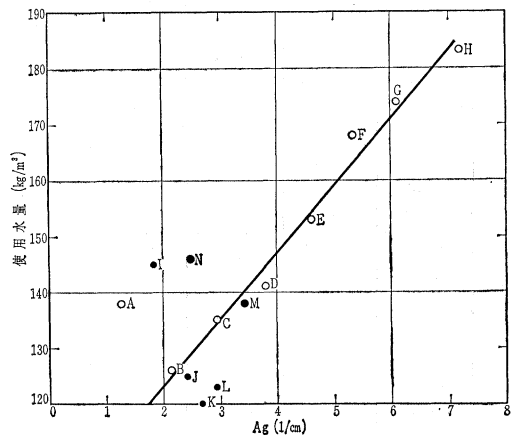
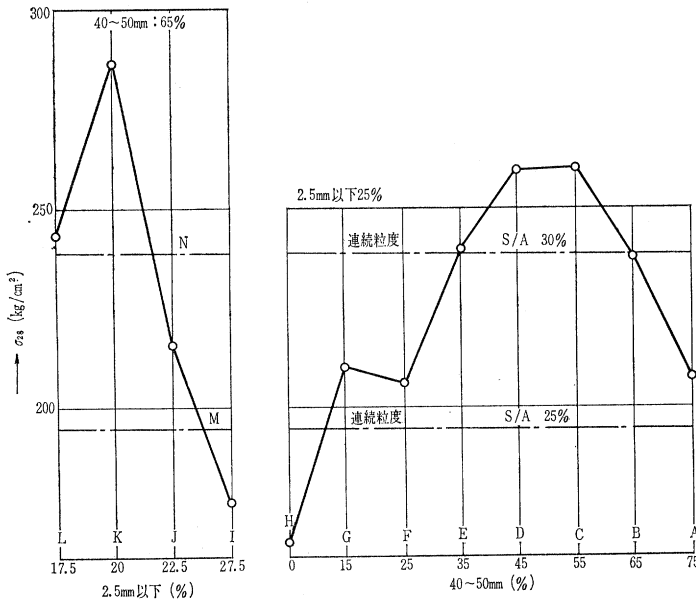


図-5 粗骨材比表面積と水量の関係



図一六 各配合の 28 日圧縮強度



4. 粒度と砂率の関係

強度面も考慮し、不連続粒度では粗骨材が最大実積率に近い配合となることから、 $d_1=40\sim30\text{ mm}$ 、 $d_2=20\sim10\text{ mm}$ 、砂は和自砂 (F.M.=1.97) を用いることとし、 $K_1:K_2=6:4$ とした。また、連続粒度は標準粒度の中央に存在する粗骨材と、標準粒度内で F.M.=2.60 となる室見、和自混合砂を用いた。セメント量 $c=280\text{ kg/m}^3$ 、水量 $w=140\text{ kg/m}^3$ 、すなわち $w/c=50\%$ とし、 s/a を変えて実験を試みた。なお、粗骨材は宇美碎石 (カコウ岩) と多良碎石 (安山岩) を使用した。

砂率の変化にともなう、スランプ、および締め固め係数 C.F. は表一のごとくである。 s/a の減少によりス

表一 砂率の変化とワーカビリティおよび強度

種別	s/a (90)	スランプ (cm)	C.F.	Vébé (sec)	σ_{28} (kg/cm ²)
連続 P	35.0	0.5	0.861	9.4	336
	32.5	0.5	0.848	9.6	372
	30.0	1.0	0.836	10.1	317
	27.5	1.1	0.851	9.9	321
	25.0	6.9	0.863	11.5	278
不連続 Q	32.5	0.0	0.802	13.5	288
	30.0	0.2	0.847	16.2	345
	27.5	0.3	0.860	18.0	330
	25.0	1.7	0.921	11.9	400
	22.5	3.0	0.937	9.4	321
	20.0	4.0	0.970	6.0	217
	17.5	13.5	0.884	4.1	192

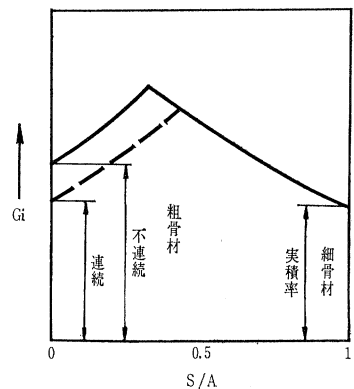
ランプは増大するが、C.F. は必ずしもこのような一方的関係にはない。スランプの増大が必ずしもワーカビリティの増大を意味しないことはよく知る所である。この場合、セメント量は一定であっても、砂量の減少により、モルタル中の水が過量となり、プラスティシティを失なうからである。C.F. は連続粒度ではあまり差がないが、不連続では大幅に変化する。そして、不連続は砂率が少ない部分で大、すなわちワーカブルであるといえる。プラスティシティの判定は非常に困難であるが、スランプの割合に Vébé Test における締め固め時間の長いものは、プラスティシティが少ないものと考えられることもできるので、筆者はつぎのような係数を考えて見た。すなわち

$$\sqrt{V.B.}/(30 - \text{Slump})$$

である。この値そのものがプラスティシティを示すものとはいえないにしても、これが 0.2~0.3 以上になると明らかにプラスチックでないといえるようである。たとえば連続では $s/a < 27.5\%$ で、不連続では $s/a < 20\%$ で 0.2 をこえている。また、逆に不連続では $s/a > 27.5\%$ でこのようなことがおこっている。以上の観点からして、大体のワーカブルな範囲から見ると、連続では C.F.、および V.B. は s/a が大なるほうが、不連続では小なるほうがワーカブルである。もちろん、最適な s/a は存在すると考えられるが、実験の範囲内である。

以上の諸配合によるコンクリートの 4 週圧縮強度は、表一のごとくである。これは同一コンクリートを $\phi 20 \times 40\text{ cm}$ と、 $\phi 15 \times 30\text{ cm}$ の供試体としたものの平均値である。これより連続不連続を問わず最強 s/a が存在することがわかる。また、連続と不連続では最適 s/a が異なり、不連続では連続より s/a を小にする必要があることを示している。これは、不連続粗骨材のみの固有実積率 65.1% に対し、連続のそれは 59.5% であり、これに細骨材を加えた場合の実積率を考

図一七 連続、不連続粒度と砂率



えると 図-7 のごとくなるはずで、連続破線との交点より、不連続実線の交点は s/a が小さいほうにあることは容易に想像される。

5. 大骨材を用いたコンクリートについて

理想的不連続粒度として Vallette はフルイの上限を D_i 、下限を d_i としたとき、

$$D_1/d_1=1.5, D_2/d_2=1.5\sim 2, D_3/d_3=2, \\ d_1/D_2=4\sim 5, d_2/D_3=3\sim 4$$

をあげている。したがって骨材最大寸法を 60 mm としても (60~40), (10~5), (1.2~0.6) となり、粗骨材としての分類はせいぜい 2 種、多くて 3 種程度と考えられる。また、理想に近づくためには、最大寸法を大にする以外にない。このような理由から、フランスでも主としてダム用として用いられている。大骨材を用いたコンクリートに対し、そのコンクリートの性質を知るために一般に行なわれている方法は、ウェットスクリーンにかけ、40 mm 以下の骨材で形成されるコンクリートで代表させることである。これは、コンクリートの性質をモルタルで判断するのと同様で、ある程度の良否の判断の基礎とはなるであろうが、除外される部分の粒度、配合が変化すれば役に立たない。特に不連続粒度を用いた場合、大粒径の占める割合が大となるので不適當である。

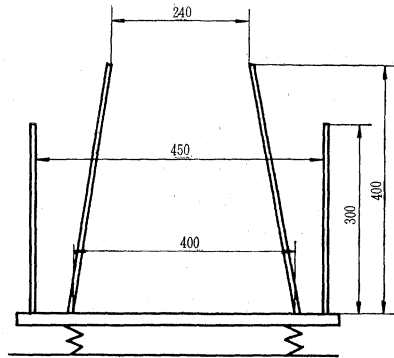
実験は骨材の最大寸法を 80 mm とし、粗骨材は日向神ダム用砕石 (安山岩)、および宇美砕石 (カコウ岩) を、細骨材は室見川、および和白砂である。セメント量は 280 kg/m^3 、水量 140 kg/m^3 とし、図-8 の粒度の組み合わせにより、表-2 の 9 種の配合により行なった。

全配合のコンシステンシー測定は、Vébé 試験に準じ 図-9 の寸法のものを用いた。また、スランブは 40 mm でウェットスクリーンしたものを用いて行なった。それ

表-2 配合とコンシステンシー

No.	粗骨材	細骨材	s/a	スランブ (cm)	Δ (cm)	Vébé (sec)
1	G 1	S 2	25.0	19.5	17.1	19.1
2	G 1	S 2	27.5	12.5	17.5	10.7
3	G 1	S 2	30.0	13.5	17.4	11.2
4	G 1	S 1	25.0	5.8	16.8	10.7
5	G 1	S 1	27.5	3.0	16.5	7.2
6	G 1	S 1	30.0	1.7	16.2	7.7
7	G 2	S 2	27.5	7.5	17.4	6.1
8	G 3	S 1	27.5	18.0	27.2	8.2
9	G 4	S 1	27.5	20.0	27.3	5.8

図-9 大骨材用 Vébé 試験機



らの結果は 表-2 に示すとおりである。図-8 細骨材部分の破線は、標準粒度の範囲を示しているが、不連続粒度 G1 に対しては細粒の S1 が振動締め固めに適していることがはっきりわかる。ところがウェットスクリーンしたスランブでは、全く逆の結果を得ている。もちろん、スランブと V.B. とは、コンクリートそのものが違っているのも当然ともいえるが、ウェットスクリーンによる判定のあいまいさを示すものといえよう。表-2 の 4 は全配合のコンクリートを 図-9 のコーンを用いて測定したスランブに相当するものであるが、G1 に対し S1, S2 の混合の違いはあまりなく、V.B. による違いのほうが大である。一般に不連続では V.B. による測定がコンシステンシーは良好にでてくる傾向があり、パイプレーターによる締め固めが有効であると考えられる。また、不連続では適当な不連続部をもつもの、たとえば G1 と S1 の組み合わせがよいし、さらに G4 と S1 もよい。G4 は完全な不連続粒度ではなく、若干隣接部要素をもっているが、全体の形として階段状になっている。すなわち、全体的にこのような形をもっていれば、不連続粒度と同様な性質となりうるものである。

図-8 粗径加積曲線

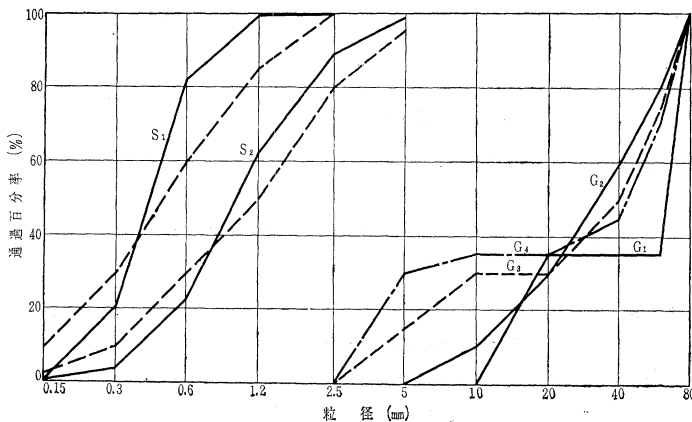


表-3 全配合とウェット スクリーンした
コンクリート強度

No.	$\phi 20$ (kg/cm ²)	$\phi 15$ (W.S.) (kg/cm ²)	$\phi 20/\phi 15$
1	225.2	316.9	0.805
2	273.9	366.7	0.747
3	287.9	358.2	0.804
4	285.6	397.3	0.719
5	251.1	366.7	0.684
6	249.9	324.1	0.771
7	247.3	266.8	0.927
8	272.1	382.6	0.711
9	275.3	405.5	0.679

ワーカビリチー測定と同様、ダム コンクリートでは従来 40 mm でウェット スクリーンしたコンクリートで、標準供試体 ($\phi 15 \times 30$ cm) を作成し、その強度で全配合のコンクリート強度を代表させている。表-2 に示された配合のコンクリートについて、最大寸法 80 mm の骨材をふくむ全配合のコンクリートを $\phi 20 \times 40$ cm の型わくに打ち込んだ供試体と、前述のウェット スクリーンした標準供試体の 28 日圧縮強度を測定した結果、表-3 のごとく得られた。不連続粒度は、全配合で No. 1 をのぞいた全部が連続粒度 No. 7 より高い強度をもっている。また、ウェット スクリーンするとその差はさらにいちじるしくなる。ウェット スクリーンしたものに對する全配合の強度の比は表-3 の中に記しているが、この例では連続の場合に 0.9、不連続では 0.7~0.8 となっている。粗骨材粒度にもよるが、ウェット スクリーンしたものは実際の強度を示さず、これを直接全配合の強度と考えるのは危険である。特に不連続では、スクリーン寸法と粒度分布によって相当異なることが予想され、強度とともにコンシステンシー測定においても全配合のコンクリートで行なうべきである。

6. あとがき

Vallette の言をかりると、コンクリートはワーカビリチーから要求される ($W+V$) を最小にもって行くこと

が重要である。そのため、骨材はなるべく水を多く必要としないものがよい。水を多く必要とするのは砂であり、コンクリートは最小の s/a にすることが大事である。すなわち、これ以上砂を減ざると空げきが生ずる限界がそれであり、最小 s/a の要求にそいうるものは不連続粒度の骨材である。筆者の実験からも前述のことはいえる。不連続粒度骨材は、非常にバイブレーターにより締め固まりやすい。しかし、流動性が少なく、ダム コンクリートであっても、一般になされているようにコンクリートの山をバイブレーターで押しならすには不適である。元来バイブレーターは押しならしではなく、締め固めにあり、施工方法で改善できるものである。不連続粒度がよいといっても前述のごとくその抜き方、配合などに注意し、適切なものをえらぶ必要がある。Vallette のいう理想的なものでなくても以上の検討が十分であれば有利に使用できるものと信じている。

参考文献

- 1) Worthington, P.M.: "An Experiment on the Theory of Voids in Granular Materials", Magazine of Concrete Research, April (1953).
- 2) Caquot, A.: "Le rôle des matériaux inertes dans le béton", "Memoires de la Société des Ingénieurs Civils de France, juillet~aout (1937).
- 3) 白山和久: "フランスにおけるコンクリートの調査方法 (1)" セメント・コンクリート, 7月 (1960).
- 4) 水野高明・徳光善治: "粒体のつめこみに関する研究", 九大工学集報 30 卷 3 号, 第 31 卷 2 号および材料 Vol. 13, No. 132.
- 5) Singh, B.G.: "Effect of the Specific Surface of Aggregates on Consistency of Concrete", A.C.I. (1957). "Specific Surface of Aggregates Related to Compressive and Flexural Strength of Concrete", A.C.I. (1958). "Specific Surface of Aggregates Applied to Mix Proportioning", A.C.I. (1959).
- 6) 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).
- 7) Vallette, M.R.: "Composition des bétons mise au point de la question", Institute Technique du Bâtiment et des Travaux Publics; No. 6, Février, (1949).

(1964.11.7・東京文化会館にて講演)

コンクリート・ライブラリー第 10 号

構造用軽量骨材シンポジウム頒布中

本文は、最近特に注目を集めている軽量コンクリートについて各方面で行なわれている研究を集録した論文です。ぜひ一読下さるようおすすめ致します。

体 裁: B5 判 96 ページ 図・表・写真多数

定 価: 500 円 (〒 50 円)

会員特価: 400 円 (〒 50 円)

申込先: 土木学会 振替東京 16828 番 電話 351-5138