

骨材の粒度とコンクリートの力学的性質

藤 居 宏 一[※]

Koich FUJII[※]

Correlation between Aggregate Grading and Properties of Concrete

コンクリートの強度・弾性係数などその力学的性質は配合要素に大きく依存している。筆者はこれら要素のうち骨材の粒度をとりあげ、その粒度とコンクリートの力学的性質の関連を調査している。

配合設計における骨材粒度は標準粒度によって規制されている。また、粗骨材最寸法は施工上の関連において問題となるが、直接的に力学的性質との関係においての規制・指導は行なわれていない。配合設計に関係している細骨材の粗粒率は他の組成要素を補正する意義をもっているが、コンクリートの力学的性質に対して積極的に関与しているように思われない。ことに設計手法においてはそうである。

そこで筆者は他の組成要素の相対的な影響をなるべく除去して、コンクリートの力学的性質が粒度とどのようにかかわっているかを調べたので、その一部を報告する。

I 粒 度

1. 粒度分布曲線・粗粒率

骨材の粒度を示す指標には粒度率 ($F.M.$)、単位容積重量 (実積率、空隙率)、粒度曲線など種々あるが、本報告に直接関係する粒度曲線と粗粒率について述べる。

JIS A-1102 に規定する—80, 40, 20, 10, 5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3, 0.15mm—の標準ふるいを用いてふるい分け試験を行ない、各ふるいに留まる試料の重量百分率を求める。その残留率 (あるいは逆に通過率) を縦座標に、ふるい (間隔, mm) の対数を横座標によってプロットしたものが粒度曲線である。

粗粒率は残留率を累加して100で除した値である。 $F.M.$ は使用する試料の粒度の均等性を判定するのに便

利である。しかし $F.M.$ が同じであっても粒度そのものを完全に表わし得ないきらいがある。

2. 標準粒度

わが国における骨材の標準粒度の規定はアメリカやイギリスと同様に細骨材と粗骨材とに分け、それぞれについて粒度の規準を設けている (Fig. 1)。骨材を細、粗に分離せず骨材全体—混合骨材—について、粒度の直接的な規準は定められていない。その点ドイツ規格 (以下 DIN) では混合骨材の粒度を規準にしている (Fig. 2)。

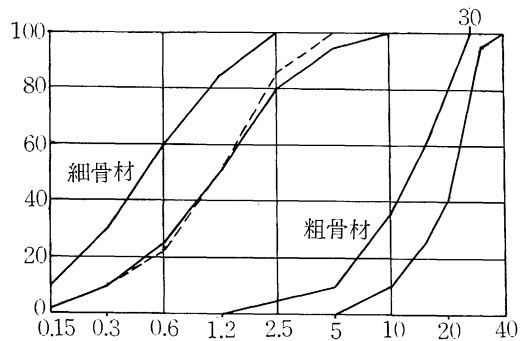


Fig. 1 標準粒度—土木学会規準

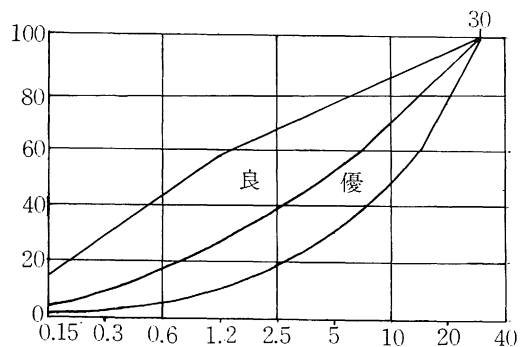


Fig. 2 標準粒度—DIN 1045

※ 農業施設工学研究室

II 基礎理論

1. 波動方程式

一般に動弾性係数の測定・解析には共振法と波速（透過）法とがある。本報告では共振法によって得られる動弾性係数 E_{DR} を考えるのでそれに関する基礎理論を略記する。

共振法、波速法ともに波動方程式

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$$

の解を求めることによって弾性係数を定めるのであるが、適用する媒体の条件および応力状態の違いによって両者を分けて考える方が便利である。

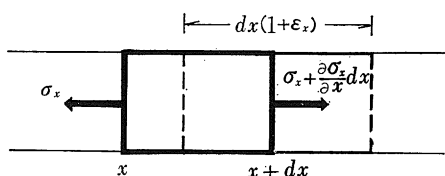


Fig. 3 軸方向に応力をうけている要素

いま、 x 方向に長さ dx 、断面積 A 、密度 ρ の要素を考える。その両側に Fig. 3 に示されているような応力が作用している。このとき、要素の x 方向の変位を u とする運動方程式は

$$\begin{aligned} \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= A(\sigma_x + d\sigma_x) - A\sigma_x \\ &= A\left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx\right) - A\sigma_x \\ &= A \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \end{aligned} \quad (2.1)$$

である。弾性係数を E 、ひずみを ε_x とすると、応力—ひずみ—変位の関係より

$$\sigma_x = E\varepsilon_x = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.2)$$

であるから、(2.2) を (2.1) に代入すると

$$\rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = A \frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial u}{\partial x} \right) dx$$

となり、 E が x によらないとすると上式は

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

あるいは

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

$$c^2 = E/\rho \quad \text{i.e.} \quad E = c^2 \rho \quad (2.4)$$

となる。(2.3) が縦振動の方程式である。なお、 c は弾性縦波の伝播速度である。

2. 方程式の解

いま求めるべき解（変位） u を

$$u = u(x, t) = u(x) \cdot u(t) \quad (2.5)$$

とおく、また

$$u(t) = e^{ipt} \quad (2.6)$$

i : 虚数単位, p : 振動数

とすると (2.5) は

$$u = u(x) e^{ipt}$$

となる。

(2.6) を (2.3) に代入して $u(x)$, u を求めると

$$u(x) = C_1 \sin \frac{px}{c} + C_2 \cos \frac{px}{c} \quad (2.7)$$

$$u = \left(C_1 \sin \frac{px}{c} + C_2 \cos \frac{px}{c} \right) e^{ipt} \quad (2.8)$$

となり、(2.8) は (2.3) の一般解である。

3. 縦振動の特解

共振法の解析法を考える場合、長さ l の棒の両端において応力、したがってひずみも生じないから境界条件として

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \\ \varepsilon_l &= \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

を用いる。(2.8) より

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{p}{c} \left(C_1 \cos \frac{px}{c} - C_2 \sin \frac{px}{c} \right) e^{ipt}$$

であり、この式を (2.9) に適用することにより

$$C_1 = 0, \quad C_2 \sin \frac{pl}{c} = 0$$

$$\text{i.e.} \quad p = n\pi \frac{c}{l} \quad (2.10)$$

となり、 p は固有円振動数といわれる。

これによって (2.8) は

$$u = C_2 e^{ipt} \cos \frac{n\pi}{l} x \quad (2.11)$$

となる。

共振を起したとき、 $x = l$ において変位 u は最大になり、そのときの波長は $2l$ であり、振動数を f とすれば、波速 c は

$$c = 2l \cdot f \tag{2.12}$$

で表わされる。

また一方振動数 f と円振動数 p との間には

$$f = 2\pi p \tag{2.13}$$

なる関係がある。

(2.12), (2.13) を (2.4) に代入すると

$$E = 4\rho f^2 l^2 \tag{2.14}$$

となる。このようにして求められた弾性係数を共振法による動弾性係数という。以下記号 E_{DR} でもって表現する。

いま、測定の対象とする材料供試体の諸元を下記のただし書きのように定めると (2.14) は

$$E_{DR} = 4 \frac{W}{g} \cdot \frac{l}{A} f^2 \tag{2.15}$$

となる。ただし E_{DR} : 動弾性係数 [kg/cm²]

l : 供試体の軸方向長さ [cm]

A : 供試体の断面積 [cm²]

W : 供試体の重量 [kg]

g : 重力の加速度 [cm/sec²]

f : 共振周波数 [Hz/sec]

である。また、 l/A を形状因子といい、これがわかかっておれば、重量および共振周波数を測定することによって (2.15) を用いてただちに動弾性係数が求められる。

4. ひずみ計の原理

電気抵抗線ひずみ計は Fig. 4 に示されているようなホイートストン電橋回路を基本にしている。材料に貼付されているゲージ抵抗 (たとえば R_1) をこの回路に組み込んでおく。

まず出力電位差 e を零にするように調整しておく。

材料がひずんでゲージ抵抗が変化すると e が生じる。

したがって e あるいはその間の電流を測定すれば、ゲージ抵抗の変化量がわかる。これがひずみ計の原理である。

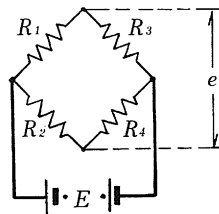


Fig. 4 ホイートストン電橋

III 材料・配合設計

1. 材料

供試体作成に使用した材料の種類・性質は下表に示されている。

Table 1 使用材料の性質

材 料	種 類	比重 [*]	粗粒率
セメント	普通ポルトランド	3.17	
細骨材	川 砂	2.54	3.38
粗骨材	砕 石	2.66	7.33

* 比重は表面乾燥飽水状態におけるものである。

2. 配合設計

骨材粒度の変化についての影響を調べるため、粒度の調査に焦点を絞り、他の組成割合を可能な限り一定に保つように配合設計した。

すべての配合を通じて、水セメント比は55%である。骨材の配合方針としては、下記のように大きく2つの群に分けた。

I 群：一定の粒度分布 (Fig. 1 における破線) をもつ細骨材 (S) および粗骨材 (G) を種々の割合 (細骨材率: $S/(S+G) = S/A$) で混合した骨材を使用した (Table 2, Fig. 5)

粗骨材最大寸法は 40mm である。

II 群：粗骨材についてはあらかじめ風乾試料 (吸水率 2.61%) で各粒径ごとにふるい分けしておき、DIN 1045 (Fig. 2) を参考にして種々の粒度分布を再合成した。細骨材については I 群の場合に準じた (Table 3, Fig. 6)。

粗骨材最大寸法は 30mm である。

Table 2 配合設計およびまだ固まらないコンクリートの性質——I 群

単位水量：166 kg, 単位セメント量：301.8 kg					
スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	細骨材量 (kg)	粗骨材量 (kg)	粗粒率
11.3	6.9	80	1484.0	371.0	4.21
0.1	4.0	70	1301.3	557.6	4.63
1.0	1.4	60	1119.3	745.6	5.03
2.8	1.0	50	933.5	933.5	5.46
7.2	0.5	40	748.7	1123.6	5.89
17.2	0.2	30	564.0	1313.9	6.30
18.7	0.2	20	375.9	1505.0	6.70
9.8	7.6	100	1846.1	0	3.38

粗骨材最大寸法：40mm

重量はすべて 1m³ 当りの示方配合で示されている。

最下行の種類はいわゆるモルタルである。

Table 3 配合設計およびまだ固まらない
コンクリートの性質——II群

単位水量：178 kg， 単位セメント量：323.6 kg					
スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	細骨材量 (kg)	粗骨材量 (kg)	粗粒率
11.1	7.2	70	1268.0	543.5	4.42
1.5	2.4	50	914.2	914.2	5.24
14.2	0.4	30	553.2	1291.2	5.96
0.4	3.1	60	1083.2	721.9	4.77
1.1	2.4	50	904.7	904.7	4.96
4.0	1.2	40	725.5	1088.9	5.45
0.3	7.2	75	1349.8	450.1	4.30
0.9	2.6	65	1173.0	631.6	4.63
6.4	—	47.5	861.2	937.6	5.09

粗骨材最大寸法：30mm

重量はすべて 1m³ 当りの示方配合で示されている。

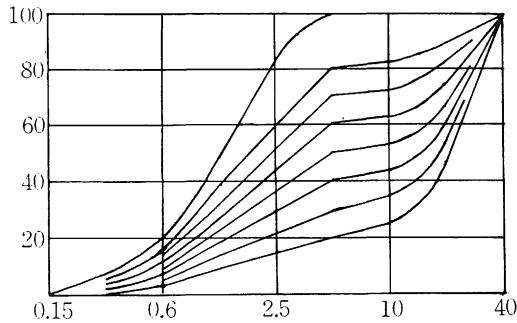


Fig. 5 I群の合成骨材粒度曲線

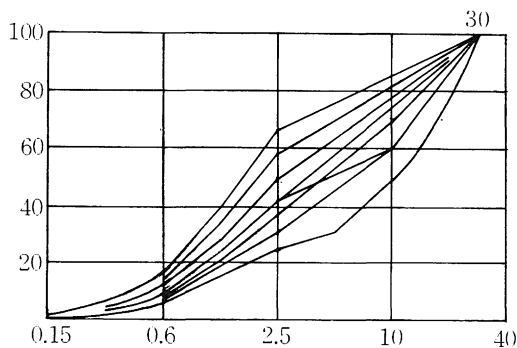


Fig. 6 II群の合成骨材粒度曲線

IV 試験方法

1. 強度試験

A) 圧縮強度試験

φ15×30cm および φ10×20cm の2種の供試体について **JIS A-1108** に従って、主として4週間強度 (σ_{28}) を調べた。

B) 引張強度係数試験

φ15×30cm の供試体について **JIS A-1113** による割裂試験によった。それと同時に引張静弾性係数試験も行なった(後述)。

C) 曲げ強度試験

15×15×53cm なる角柱供試体で、支点間距離 45cm について **JIS A-1106** による4点曲げの試験を行なった。

2. 静弾性係数試験

電気抵抗線ひずみ測定装置(以下、ひずみ計)による測定法は、次に述べる波速法と同様、現在まで **JIS** 化されていないが、以前から行なわれている試験法である。ダイヤルゲージ法 (**JIS A-1124**) による結果よりも精度がよく小さなひずみをも適確に測定しうる。

3. 動弾性係数試験

共振法は前章に述べた振動理論に基づいて開発されたものであり **JIS A-1127** におさめられている。**Fig. 7** にみられるように較正用の標準発振子(1000Hz音叉)を内蔵した発振器、それに従った振動を起こす駆動装置および材料の振動をとられる受振子から成っている。材料がある振動数 f で共振したとき受振子の感応が最大値を示す、そのとき振動数を読みとって共振周波数とする。**JIS** 試験法に加えてフリクエンシーカウンターを付加して振動数測定の正確を期した。加えた振動は2種類である。圧縮強度試験用の円柱供試体に縦振動を、曲げ強度試験用の角柱供試体には、たわみ振動をそれぞれ加えた。

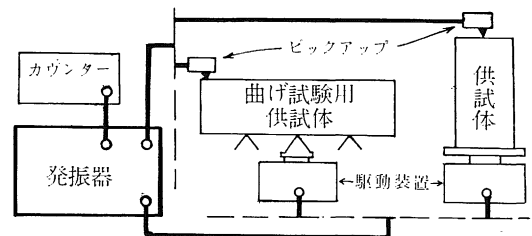


Fig. 7 動弾性係数測定(共振法)

V 結果・考察

まず全般についてそれぞれの試験結果をみてる。

Fig. 8~10 にみられるように圧縮強度 σ (Fig. 8), 静弾性係数 E_s (Fig. 9) および動弾性係数 E_{DR} (Fig. 10) とともに $F.M. = 5 \sim 6$ のときそれぞれ最大値を示している。

各群についてもう少し詳細にみる。

I 群

σ は $F.M.$ の増加とともに直線的に上昇し $F.M. = 5$ のあたりでピークになり, $F.M. > 5$ では上昇に比べゆるやかなこう配で減少している。 E_s についてもほぼ同じ傾向がみられるが, ピークの位置は $F.M. = 6$ の近傍にある。

E_{DR} は $F.M. < 5.5$ では $F.M.$ の増加とともに上昇し $F.M. > 5.5$ では, ある幅はあるがある値のまわりに前後してある。このようにはっきりした傾向がみられるのは I 群の骨材の粒度分布が細骨材率にほぼ対応していることによっている。

II 群

図にもみられるように, σ , E_s および E_{DR} とともに $F.M. < 5.5$ では I 群におけるほど顕著な変動を示さない。 σ , E_s は $F.M. < 5.5$ では大きな変化はみられず $F.M.$ の影響はあまりみられない。それにひきかえ E_{DR} においては $F.M. < 5.5$ でやや増加の傾向にある。

$F.M. > 5.5$ では三者とも急激に減少している。このことは Fig. 6 でみられる II 群の粒度曲線の右側の 1 曲線 ($F.M.$ 最大) を除いて, 粒度分布 (あるいは $F.M.$) のいかに問わず圧縮強度や静弾性係数はあまり差がないことを示している。

I 群, II 群の両者を比べてみると以下のことがいえる。 Fig. 5, Fig. 6 を比較してみると I 群の粒度分布には不連続点 (5~10mm) がみられるのに対し II 群の粒度分布にはそのような不連続点はみられない。その違いの影響が, I 群では $F.M.$ の変化によって力学的性質がかなり変動するのに対し, II 群では一部を除いて大きな差異はみられない。すなわち II 群では粗粒率が多少異なっても粒度が連続しているため粒度組成が良好であるため力学的性質には安定性がある。このことは DIN 1045 の規格の合理性を裏付けていると考えられる。

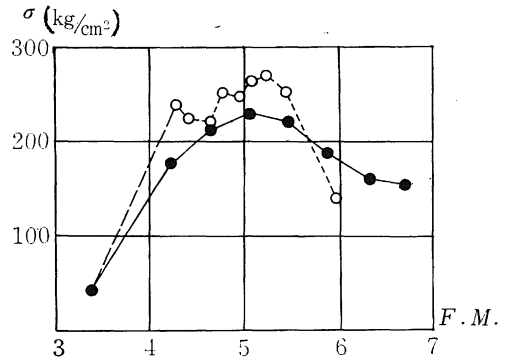


Fig. 8 粗粒率 $F.M.$ と圧縮強度 σ

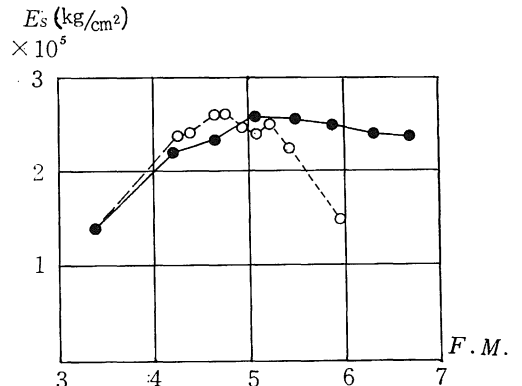


Fig. 9 粗粒率 $F.M.$ と静弾性係数 E_s

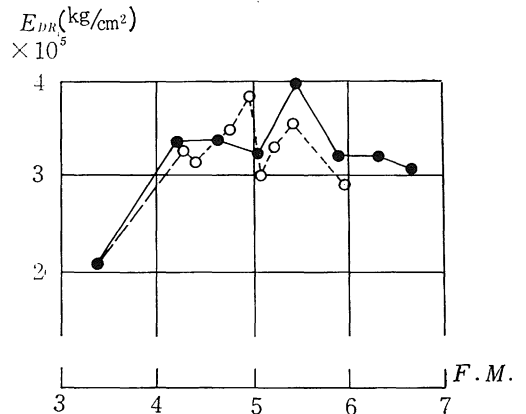


Fig. 10 粗粒率 $F.M.$ と動弾性係数 E_{DR}

む す び

細・粗両骨材がそれぞれ一定の粒度を有している場合には粗粒率による性質の変動がみられる。しかし任意に組合せた骨材粒度によるコンクリートについてみると、粗粒率のみでは云々できない。したがって混合骨材の粗粒率のみでコンクリートの力学的性質を推定することは困難であり、大きな危険を伴う。それに対して、混合骨材の粒度曲線とコンクリートの力学的性質との間には強い関係が存在するように思われる。粒度分布に不連続点がなく、各粒度の割合がほぼ一様な骨材が力学的にすぐれたコンクリートを作るに重要な因子であることがわかる。

参 考 文 献

1. 藤居宏一：農業土木学会講演会要旨：211-2, 1970
2. 藤居宏一：農業土木学会講演会要旨：127-8, 1971
3. KOLSKY, H. : Stress Wave in Solid, Dover, New York, p. 41-47, 136-141
4. 土木学会：コンクリート標準示方書，土木学会，東京，1966
5. BRUNARSKY, L. : Matériaux et Constructions, 2 (10) : 269-273, 1969

Summary

The quality of concrete is usually controlled by mix design. There are many factors in concrete. The influence of aggregate grading on concrete properties is analyzed in this report.

Strength, static and dynamic modulus of elasticity were taken up as concrete properties. The special discussion was focused on fineness modulus ($F.M.$) and distribution curves of aggregate grading by the sieve analysis.

Being judged from the results of these investigations, distribution curves, especially **DIN-1045**, is an index of aggregate grading superior to $F.M.$