骨材の粒度がその単位容積重量とコンクリートの強度 およびウォーカビリティーに及ぼす影響について*

荒 木 謙 一** 福 井 英 吉**

Effects of the Grading of Aggregates on the Bulk Density, Strength and Workability of Concrete

by

Ken-ichi ARAKI and Eikichi FUKUI
(Tokushima University)

This paper presents the experimental investigation of the proper grading of aggregates for the proportioning of concrete which should be selected to produce economical concrete of the required strength and workability.

For this purpose, the authors examined the effects of various gradings, especially gap grading, of aggregates on the bulk density, compressive strength and workability of concrete. The aggregates used are river gravel and sand, and the particle shape may practically be considered as constant.

The experimental results are as follows;

(a) The proper gap grading of aggregate gives the weighty bulk density and the concentrated grading gives the minimum value.

(b) Two fineness modulus of aggregates having the same property give the same bulk density.

(c) Relationship between the thickness of cement paste film and consistency of concrete, is approximately linear. Consistency of concrete is decreased as the cement paste film is reduced, if other factors are equal.

(d) Compressive strength of concrete which is made of the proper gap grading of aggregate is higher than that of concrete made of the continuous grading of aggregate.

(e) When cement content and consistency of concrete are constant, the compressive strength of concrete is decreased, as the void ratio or specific surface of aggregates is increased.

Herewith, the authors propose to take the specific surface and the voids of aggregates as parameters for designing the proportion of concrete.

(Received May 7, 1957)

1. 概 要

コンクリートの配合にあたり、経済的で所要の強度およびウォーカビリティーを得るには、骨材の粒度はいかなるものが適当であるかを調べるために、種々の粒度(特に不連続粒度)について、その単位容積重量、空隙率および比表面積を調べ、これらがコンクリートの強度およびウォーカビリティーに及ぼす影響について実験した。骨材の粒度を重視した配合設計には、パラメーターとして骨材の空隙率および比表面積をも考慮することを提案した。

2. 緒 論

骨材の粒度が、コンクリートの品質に大きい影響を

与えることは古くより研究されているが、わが国や米国などでは、骨材の粒度の概略を示す指数として粗粒率が用いられている。適当な粒度については各国の示方書に示されている。著者は粒度の適否を示す適当な指数はないかと考え、先に、細骨材の空隙率(または単位容積重量)と、その比表面積をパラメーターとして、骨材を包むペーストの膜厚の大小とモルタルのウォーカビリティー、あるいは強度との関係を研究発表したが、¹⁾それに引き続いて粗骨材および粗細混合骨材を用いて、コンクリートについて同様の研究をした。なお、コンクリートには不連続粒度がよいともいわれるので、これについても調べてみた。

3. 実験材料および方法

i) 材 料

* 原稿受付 昭和32年5月7日

** 正員 徳島大学工学部

セメントは、アサノ普通ポルトランドセメントである。 比重: 3.15

	曲げ強度 (kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)
7 日	45.1	209
28 日	66.9	394

骨材は吉野川産で、砂は天然産そのままを用い、粒度は Fig. 1 に示す。 比重: 2.64

単位容積重量: 1 648 kg/m³

砂利は、大32~20mm, 中20~10mm, 小10~5mmの3種類にふるいわけた。 比重: 2.62

Fig. 1.

ii) 実験方法

粗骨材の大, 中, 小を種々の割合に混合して、違った粒度の骨材の単位容積重量を測定した。ウォーカビリーに及ぼす影響については、水セメント比を一定(60%)にして種々の配合のコンクリートを作り、それらのスランブを測定した。強度に対する影響については、単位セメント量およびスランブを一定にして、種々の配合のコンクリートの強度を測定した。

試験方法は、いずれも土木学会の規準によった。ただし、骨材の比重の測定では、単位容積重量との関連上気乾状態で測定した。

4. 実験結果とその考察

i) 粗骨材の単位容積重量について

粗骨材を、角ふるい 32~20mm, 20~10mm, 10~5mm の3種類にふるいわけ、これを混合して求めた単位容積重量を三角座標にて表わすと Fig. 2 のようになった。これによると、大砂利約 60%, 小砂利約 40% のところが最大単位容積重量を示している。中砂利が多くなるに従って次第に単位容積重量が小になり、また、最小重量は大砂利のみのときである。一般に単位容積重量の大なるものは中間部の欠けているか、あるいは少ないものであり、その小なるものは、粒径の集中したものである。

Fig. 2. Bulk density of coarse aggregate.

粗細混合骨材においても(細骨材はすべて一定粒度を用いた), 不連続粒度の粗骨材を使用したものが大なる重量を示している。このように、適当な不連続粒度が連続粒度のものより単位容積重量が大である。以前に実験した細骨材の場合も、このことが顕著に表われていた。

混合粒状体の空隙について、P.M. Worthington^{2,3)}などが述べているように、最小空隙率となるためには、まず、最大粒が全部つまり、次に、最大粒の数分の1の粒大が、その空隙をちょうど満たす量だけあり、さらに数分の1の粒大がその空隙を埋めるだけあり、各粒径とその量が、このような割合に最小粒までなっていることが必要である。連続した粒度では、不要の粒大のものが含まれるので、空隙率が大きくなる。

コンクリートに用いる骨材の粒度分布は広範囲にわたっているが、適当な粒径が欠けている、いわゆる、不連続粒度の方が、大なる重量を示す。

ii) 混合骨材の単位容積重量とその粗粒率について

混合骨材について、単位容積重量と粗粒率との関係

Fig. 3. (数字は配合の記号を表わす。cf. Table. 1)

Fig. 4.

は Fig. 3 のようになった。2 種類の粒度のものを混合した D.A. Stewart の実験では (Fig. 4) 最大単位容積重量付近は、混合比に影響が敏感であるが、多種類の粒度を混合したのでは、それほど敏感ではない。そして同一単位容積重量に対して、二つの粒度混合状態が認められることは、Stewart の場合と同様であった。すなわち、同じ単位容積重量に対して二つの粗粒率がある。なお、ここにおいても最大単位容積重量の付近に不連続粒度のものが多く見られる。

iii) ウォーカビリチー

C.T. Kennedy は、コンクリートのウォーカビリチーについて、セメントペーストの一部は骨材の空隙を埋め、残余は骨材の表面を包む膜を作り、この膜が厚いほどコンクリートのウォーカビリチーがよくなり、また w/c の小さいものは、大きいものより膜厚が大でなければウォーカビリチーが同じにならないと述べている。この考えに従えば著者の実験では、 w/c (60%) を一定としたので、ウォーカビリチーの等しいコンクリートの骨材を包む膜厚はほぼ等しいはずである。

いま、コンクリート中の各材料を骨材を包むペースト膜厚を考慮に入れて次式で仮定する。

$$\alpha \left(\frac{S+G}{w_{S+G}} - \frac{S+G}{g_{S+G}} \right) + (S+G) \cdot A \cdot t = \frac{C}{g_C} + W \quad (1)$$

ここに、 S : 砂の重量 (gr)

G : 砂利の重量 (gr)

w_{S+G} : 混合骨材の単位容積重量 (gr/cm³)

g_{S+G} : 混合骨材の比重

A : 混合骨材の比表面積 (cm²/gr)

t : 骨材を包むセメントペーストの膜厚 (cm)

C : セメントの重量 (gr)

W : 水の重量 (gr)

α : 膜厚 t および比表面積 A による定数

α は t , A により異なるが、ほぼ等しい値をとるので、これを省略して (1) 式について t を解けば、

$$t = \frac{1}{A} \left\{ \frac{1}{S/C(1+G/S)} \left(\frac{1}{g_C} + \frac{W}{C} \right) - \left(\frac{1}{w_{S+G}} - \frac{1}{g_{S+G}} \right) \right\} \quad (2)$$

となる。この式を使うには、骨材の比表面積が必要であるが、その相対値がわかればよいのであるから、比表面積の近似値として次の式を用いた。なお、各種の粒大では相似形であると仮定した。

$$A = 8/g_a \cdot d \quad (3)$$

ここに A : 骨材の比表面積 (cm²/gr)

d : 骨材の粒径 (cm) $(2d \cdot d_2)/(d_1 + d_2)$

g_a : 骨材の比重

各配合の骨材の空隙率、近似比表面積、およびペーストの膜厚を Table 1 に示す。

ペーストの膜厚とスランプの関係を図示すると Fig. 5 のようになり、この関係を 1 次であるとする、次式のようなになる。

$$S = 1.7t - 4.74 \quad (4)$$

ここに S : スランプ (cm)

t : 骨材を包むペーストの膜厚 (10⁻³mm)

本実験では、 w/c が 60% で一定であるが、種々の w/c に対して同様な式がなりたつ。ここに、一般的に次式で表わす。

$$S = a \cdot t - b \quad (4')$$

コンクリートの場合モルタルに比して、ばらつきが大きいようであるが、これは、細骨材と粗骨材とを同じ式で比表面積を求めたためであろう。砂と砂利とでは、砂利の比表面積は砂に比していちじるしく小さく、また、粒形も異なっているので、同一式で扱うのに矛盾があるわけであるが、スランプの測定誤差も考慮に

Fig. 5. (数字は配合の記号を表す. cf. Table. 1)

Table 1.

No.	Coarse aggregate proportion (%)			Void ratio (%)	Cement content (kg/mm ³)	Water content (kg/mm ³)	(w/c) (%)	G/S	Specific surface of aggregate (cm ² /gr)	Thickness of paste film (mm)	Slump (cm)
	Large	Middle	Small								
1	0	0	100	27.8	380	228	60.0	0.93	34.31	16.7×10 ⁻³	19.8
2	0	0	100	28.2	320	192	60.0	0.90	34.71	2.9	8.0
3	0	0	100	28.2	350	210	60.0	0.90	34.71	9.2	14.0
4	0	60	40	26.7	320	192	60.0	0.90	34.02	5.9	10.0
5	0	60	40	26.7	350	210	60.0	0.90	34.02	12.3	18.0
6	0	60	40	26.7	340	204	60.0	0.90	34.02	10.1	14.0
7	0	50	50	25.3	320	192	60.0	1.10	31.24	9.5	14.7
8	0	50	50	25.3	320	192	60.0	1.10	31.24	9.5	14.4
9	50	0	50	24.4	310	186	60.0	1.10	30.94	9.2	13.6
10	50	0	50	24.4	313	188	60.0	1.10	30.94	9.9	14.0
11	50	0	50	24.4	313	188	60.0	1.10	30.94	9.9	15.0
12	30	40	30	24.9	313	188	60.0	1.10	30.81	9.0	12.3
13	30	40	30	24.9	320	192	60.0	1.10	30.81	10.6	14.2
14	30	40	30	24.9	323	194	60.0	1.10	30.81	11.3	15.4
15	30	40	30	24.9	322	193	60.0	1.10	30.81	10.9	15.8
16	50	50	0	24.6	287	172	60.0	1.10	30.31	3.9	9.8
17	50	50	0	24.6	293	176	60.0	1.10	30.31	5.3	10.3
18	50	50	0	24.6	302	181	60.0	1.10	30.31	7.1	11.3
19	50	50	0	24.6	313	188	60.0	1.10	30.31	8.7	14.2
20	0	10	0	25.1	328	197	60.0	1.10	30.61	12.0	18.1
21	0	10	0	25.1	325	195	60.0	1.10	30.61	11.2	15.1
22	0	10	0	25.1	323	194	60.0	1.10	30.61	10.8	14.2
23	30	40	30	25.0	318	191	60.0	1.53	25.91	11.7	14.9
24	0	50	50	25.4	318	191	60.0	1.53	26.42	10.6	9.0
25	0	60	40	24.9	350	210	60.0	0.90	35.04	15.2	16.4
26	0	70	30	24.1	307	184	60.0	1.40	28.31	10.1	11.5
27	0	60	40	24.5	307	184	60.0	1.40	28.45	10.4	10.2
28	50	50	0	24.0	302	181	60.0	1.50	26.50	10.0	10.2
29	50	0	50	24.1	302	181	60.0	1.50	27.20	9.4	12.2
30	50	0	50	23.8	296	177	60.0	1.70	25.47	9.5	14.9
31	50	0	50	24.1	288	173	60.0	1.40	28.26	6.0	5.7
32	0	50	50	24.0	300	187	62.4	1.40	28.59	10.8	14.0
33	30	40	30	24.5	300	168	56.1	1.50	27.07	5.1	7.5
34	50	0	50	24.4	300	179	59.8	1.60	26.32	8.7	10.6
35	30	40	30	24.7	300	171	57.1	1.70	25.30	5.5	7.4
36	50	50	0	24.9	300	168	56.0	1.40	27.56	4.2	5.2
37	50	0	50	24.1	300	172	57.2	1.40	28.26	6.8	5.1
38	0	50	50	24.0	300	186	62.1	1.40	28.60	10.4	11.0
39	50	50	0	24.0	300	181	60.3	1.50	26.50	9.8	11.5
40	30	40	30	24.5	300	173	57.5	1.50	27.07	6.2	8.5
41	50	0	50	24.1	300	178	59.4	1.50	27.20	8.4	9.3
42	30	40	30	24.5	326	196	60.0	1.50	27.07	14.4	22.1
43	50	0	50	24.1	308	185	60.0	1.50	27.20	10.6	18.0
44	30	40	30	24.1	320	192	60.0	1.60	26.16	14.4	20.7
45	50	0	50	24.4	309	185	60.0	1.60	26.31	10.6	18.2
46	30	40	30	24.7	316	190	60.0	1.70	25.30	14.4	18.9
47	50	50	0	24.0	335	201	60.0	1.50	26.50	18.2	22.0
48	30	40	30	24.1	334	200	60.0	1.60	26.16	18.2	21.0
49	0	70	30	24.1	300	181	60.2	1.40	28.31	8.7	5.7
50	0	60	40	24.1	300	184	61.1	1.40	28.45	9.7	9.5
51	50	0	50	24.1	300	177	58.8	1.50	27.20	7.9	8.0
52	50	50	0	25.5	300	173	57.7	1.60	25.57	6.7	12.5
53	30	40	30	24.4	300	180	59.9	1.60	26.16	9.6	10.5
54	50	50	0	24.8	300	168	55.9	1.70	24.71	4.6	10.3
55	30	40	30	24.7	300	175	58.3	1.70	25.30	6.5	10.3
56	50	0	50	23.8	300	170	56.8	1.70	25.47	8.6	9.7

Fig. 6. (数字は配合の記号を表す. cf. Table. 1)

入れると實際上、同一式を用いてもよいであろう。

また、コンクリートのコンシステンシーは、単位水量の多少により決定されるといわれているので、単位水量とスランプの関係を図示すると Fig. 6 のようになる。これには粒度の関係が入っていないので、両者を比較するのは無理であるが、ペーストの膜厚を基準としてコンシステンシーを求める方がよりよいようである。しかし、Fig. 6 においても一定の粒度のみについて考えると、割合によく単位水量とコンシステンシーの関係が示されているが、これによれば、個々の粒度について、それぞれの関係を求めなければならない。膜厚を考慮すると、同一材質の骨材であれば、いかなる粒度についても、ただそれを計算することによりコンシステンシーを求めることができるので合理的である。

Table 2.

No.	Compressive strength at 7 days σ (kg/cm ²)	Relative compressive strength at 7 days σ' (kg/cm ²)	σ'/σ (%)
34	170	177	104
38	169	163	96
39	172	176	102
40	187	187	100
49	157	173	110
50	166	168	101
51	203	179	88
52	174	189	109
53	183	176	96
54	196	200	102
55	198	185	93
56	204	199	98

なお、実験した範囲が、スランプ 5～20 cm 位であるが、此の範囲をはずれるほど、コンクリートのウォーカビリティーを生ずる機構が上述のものとは変わってくると考えられる。

iv) 圧縮強度

セメント使用量 (300 kg/m³)、およびスランプ (約 10 cm) が一定の場合の配合および 7 日圧縮強度を Table 1 および Table 2 に示す。

コンクリートの 7 日圧縮強度 ($C=300$ kg/m³, スランプ=10 cm) を推定する実験式として、

$$\sigma_7 = \frac{192 \cdot 3c/w - 5 \cdot 6v - 5}{0 \cdot 754 + 0 \cdot 01A} \quad (5)$$

一般に、

$$\sigma = \frac{ac/w - bv - c}{d + 0 \cdot 01A} \quad (5')$$

ここに σ_7 : 材令 7 日圧縮強度 (kg/cm²)

v : 骨材の空隙率 (%)

A : 骨材の比表面積 (cm²/gr)

この式での推定値 σ' を Table 2 に示す。推定値と実測値との比は 0.88～1.1 でかなり一致している。そのうち 51, 56 は推定値より実測値がいずれも強く出ているが両者とも粗骨材は不連続粒度である。だから、(5)式は不連続粒度に対しては不十分のようである。

(5), (4), (2) 式より実験に用いた同種の骨材で、コンクリートを配合設計する場合には、その骨材の粒度と単位容積重量を測定することにより、骨材の空隙率と比表面積を算出して (5) 式より水セメント比、(4) 式より骨材を包む膜厚、さらに (2) 式より砂セメント比を求めて配合を決定することができる。

すべての条件を満たして圧縮強度を推定することは至難であるが、(5) 式を充分検討して、より正確に強度を推定しうる方法を見出し、また (4) 式でも、本実験については、 w/c を一定としたのであるが、さらに進んで w/c も一つの係数とした式にまとめたならば、簡単に配合を決定することができる。

5. 結 語

以上の結果を要約すると、

a) 粗骨材の単位容積重量も細骨材の場合と同じく不連続粒度のものが最大で、集中粒度のものが最小である。

b) 同一材質の骨材を用いて任意の単位容積重量のものを作るには、二つの異なった粗粒率を選ぶことができる。

c) 混合骨材においても粗骨材の不連続粒度のものが大きい重量を示す。

d) 骨材を包むセメントペーストの膜厚とコンシ

テンシ-の間には、ほぼ直線関係がある。

e) コンクリートの強度に対しても適当な不連続の骨材を用いたものが大なる値を示す。

f) セメント量およびコンシステンシーが同一のコンクリートでは、骨材の空隙率が增大するほど、比表面積が大になるほど圧縮強度は減少する。

g) 以上の関係より経済的なコンクリートを作る場合には、適当な不連続粒度の骨材を使用するのがよいようである。

h) 配合設計にあたり骨材の粒度を重視する場合には、その空隙率と比表面積をパラメーターとして考慮

することを提案する。

さらに今後、(5'), (4')式を充分検討して配合設計にあたり、簡単に利用できるよう研究するつもりである。

注:—

1) 荒木謙一, 土木学会誌, 40巻, 4号, p. 35~40 (昭30)

2) P.M. Worthington, Magaz. of Concrete Research, No. 12, p. 121~126 (1953-4)

3) 堀武雄, 土木学会誌, 31巻, 2号, p. 9~14 (昭21)

4) D.A. Stewart, Reinforced Concrete Review, p. 189 (1954)

5) C.T. Kennedy, A.C.I. Journ. Proc., V. 36, p. 373~400 (1940-2)

熱処理によるビッカース圧こんの変化について*

(押込硬度の圧こんについて 第2報)

財 満 鎮 雄** 左 沢 国 士***

On the Change of the Vickers Depression Caused by the Heat-treatment.
(On the Depression of Brinel, Vickers and Knoop Indentator. 2nd Report.)

by

Shigeo ZAIMA and Kunito SAZAWA

(Yamanashi University) (Tōkyō Shibaura Electric Co., Ltd.)

The authors previously noticed on the depression in case of measuring hardness, that the Vickers depression had some piling-up even in diagonal direction, which is believed to have little piling-up. The Vickers hardness is measured by the surface area of depression calculated from the diagonal length of square depression, so if the degree of piling-up differs, the influence of measuring error in the hardness number will be different.

In this paper, the change of the piling-up caused by the heat-treatment of materials are examined as a help for obtaining the inquiring data of the measuring error of Vickers hardness.

Five sorts of the carbon steel and two sorts of the brass are heat-treated and depressed by Vickers indentator, and the surface of depression are traced by the Ōgoshi Surface Roughness Tester (contact needle type). Some of the results are summarized as follows: (1) The degree of piling-up is much affected by the heat-treatment in both materials. (2) The change of the degree agrees with the change of Vickers hardness in case of carbon steels, but does not always agree with the hardness in that of brass. (3) The degree of piling-up varies by 200%, in case of carbon steel, and by 100%, in that of brass according to the rise of tempering temperature, if the quenching value is taken as standard. These degrees have a great influence on the hardness number. (4) As the ratio of the major diagonal of Knoop depression to the minor diagonal is in the lever relation to the degree of piling-up. One rising, the other falling, so we may easily obtain the general trend of the piling-up.

(Received May 17, 1957)

* 原稿受付 昭和32年5月17日, 昭和32年5月10日第6期総会講演会で講演

** 正員 山梨大学工学部

*** 正員 東京芝浦電気株式会社

1. 緒 言

前報で押込硬度の圧こんの形状、とくに周辺の盛り上りについて検討を加えて、圧子によるくぼみとほぼ