モデル粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度について*

小 阪 義 夫** 谷 川 恭 雄*** 太 田 福 男****

Compressive Strength of Concrete with Cubic Aggregate of Cement Mortar

by

Yoshio KOSAKA, Yasuo TANIGAWA

(Faculty of Engineering, Nagoya University, Nagoya)

and Fukuo OOTA

(Faculty of Engineering, Meijo University, Nagoya)

The purpose of this experimental study is to investigate the strength of concrete having the cubic aggregates of cement mortar under uniaxial compression. The cement mortar aggregate with and without thin coating of paraffin were provided respectively, to examine the effect of bond between aggregate and mortar matrix on the compressive strength of concrete. The cylindrical concrete specimens of $\phi 10 \times 20$ cm were made by mixing the above mentioned aggregate and the cement mortar, and were tested at the age of 28 days of concrete.

The test results are summarised as follows ;

- (1) The bond strength between the aggregate without paraffin coating and the mortar matrix was about $13-14 \text{ kg/cm}^2$.
- (2) The bond strength between the paraffin coated aggregate and the mortar matrix was almost zero.
- (3) The compressive strength of concrete decreased with increase of the volume fraction of aggregate in concrete, regardless of the surface condition of aggregate.
- (4) The compressive strength of concretes hardly increased in spite of increase of the compressive strength of aggregate, except the concrete having lower volume fraction of aggregate than 0.2.
- (5) The compressive strength of concrete having the aggregate with paraffin coating was only about 20-25 percent of the strength of concrete having the uncoated aggregate, under higher volume fraction of aggregate in concrete than 0.45.

(Received Sep. 22, 1970)

1 緒 言

最近、コンクリート用骨材の需要が急激に増加しているが、大都市周辺では川砂・川砂利の入手が次第に困難になってきている。そのため、碎石や各種の人工軽量骨材など、使用骨材の種類が多様化するとともに、これらの骨材の使用量がますます増加する傾向にある。このような傾向にそなえて、各種の骨材を用いたコンクリートの力学的諸性質を骨材性質などをパラメータとして、総括して説明しうるような一般的な強度理論ならびに変形理論を確立することもまた重要な研究課題の一つではないかと思われる。

その一つの試みとして、最近コンクリートを異種材料からなる混合複合材料とみなして、その力学性質を

解明しようとする研究が多くみられるようになってきた。筆者らもこのような観点から、コンクリートのヤング係数、ポアソン比および引張強度などにおよぼす骨材の影響について検討してきたが¹⁾、本論では、これら一連の基礎的研究の一つとして行なったモデル骨材を用いたコンクリートの圧縮強度に関する実験とその結果について報告する。

コンクリートの圧縮強度におよぼす骨材の影響に関する最近の研究としては、主として骨材粒径の影響について検討した Walker・Bloem,²⁾ Cordon・Gillespie,³⁾ Hughes・Chapman,⁴⁾ 高橋・中根,⁵⁾ 川上,⁶⁾ Johnston⁷⁾ などの研究、骨材量の影響について検討した Bache,⁸⁾ 大井,⁹⁾ 岡島,¹⁰⁾ 川上などの研究、骨材の表面状態の影響について検討した Kaplan,¹¹⁾ 米沢・河合,¹²⁾ Johnston¹³⁾ などの研究、骨材強度の影響について検討した Bache,¹⁴⁾ 爾見・島谷,¹⁵⁾ 村田などの研究、骨材の付着強度の影響に

* 原稿受理 昭和45年9月22日

** 正 会 員 名古屋大学工学部 名古屋市千種区不老町

*** 名古屋大学工学部 名古屋市千種区不老町

**** 名城大学理工学部 名古屋市昭和区天白町八事裏山

について検討した Shah, Nepper-Christensen・Nielsen¹⁵⁾などの研究がある。

一般に、コンクリートの圧縮強度は母材（セメントペーストまたはモルタル）の強度、骨材強度および母材と骨材間の付着強度などによって左右される。顕微鏡およびX線などによる観察に基づいた Cornell 大学¹⁷⁾における一連の研究によれば、骨材と母材との界面には、荷重を加える以前にかなりのひびわれが発生しており、コンクリートの強度上この部分が最も弱点となりやすいことを明らかにしている。したがって、母材と骨材間の付着特性の解明とその評価方法についての研究は、コンクリートの強度理論を確立するための最も重要な課題の一つといえる。しかし、上述のごとく主として骨材の付着強度がコンクリートの圧縮強度におよぼす影響について調べた研究はいまのところ Nepper-Christensen・Nielsen の研究など一、二を数えるにすぎない。

そのため、本報では主として母材と骨材間の付着特性がコンクリートの圧縮強度におよぼす影響について調べるために、モルタル製の立方形モデル骨材を使用したコンクリートを製作して、下記のような実験的研究を行なった。

2 実験方法

2・1 実験の概要

コンクリートの圧縮強度におよぼす骨材の付着特性、粗骨材容積比、骨材強度などの影響について調べるために、Table I に示すような各種のコンクリート試験体を用いて実験を行なった。すなわち、

- (1) 試験体の形状・寸法； $\phi 10 \times 20$ cm 円柱体、

Table I. Test program

Notation of concrete	W/C* of mortar matrix	W/C* of coarse aggregate	Texture of coarse aggregate	Volume fraction of coarse aggregate in concrete
35 HU 35 HC	35%	40%	Uncoated Coated	$\begin{matrix} 0, & 0.1, & 0.2, \\ 0.3, & 0.4, & 0.45 \end{matrix}$ "
35 LU 35 LC		50%	Uncoated Coated	" "
40 HU 40 HC	40%	40%	Uncoated Coated	" "
40 LU 40 LC		50%	Uncoated Coated	" "
50 HU 50 HC	50%	40%	Uncoated Coated	" "
50 LU 50 LC		50%	Uncoated Coated	" "

* Water-cement ratio

- (2) 母材モルタルの水セメント比；35, 40および50%の3種類、

- (3) モデル粗骨材の水セメント比；40および50%の2種類、

- (4) 母材と骨材との付着特性；粗骨材の表面にパラフィンを塗布したもの（以下、被覆骨材という）と塗布しないもの（以下、無処理骨材という）の2種類、

- (5) 粗骨材容積比；0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 および0.45の6種類、

とし、上記 (1)~(5) の各要因を組み合わせると合計 216 個の試験体を製作した。

2・2 使用材料

コンクリートおよびモデル骨材の製作には、普通ポルトランドセメント（4週圧縮強度=408 kg/cm², 4週曲げ強度=70.7 kg/cm²）および木曽川産の川砂（比重=2.48, 粗粒率=3.08, 吸水率=2.46%）を用いた。また、コンクリートの製作には、粗骨材としてモルタル製のモデル粗骨材を用いた。ここに、粗骨材としてモルタル製の骨材を使用したのは、骨材製作時にモデル骨材と同種モルタルを用いた標準試験体を製作しておくことにより、骨材の強度および変形性質が手軽に調べられるためである。なお、本報ではモデル骨材はすべて 2cm 角の立方体とした。モデル骨材の製作に用いたモルタルの水セメント比は40および50%の2種類とし、セメント-砂比はすべて 1.0（容積比）とした。これらのモデル骨材はいずれも打設後約24時間実験室内に放置し、その後材令27日目まで水温20°±1°Cの恒温水そう中で養生した。また、母材との付着特性の異なった骨材を得るために、モデル骨材をあらかじめ溶融パラフィン液に浸し、骨材表面にパラフィン被覆（厚さ約 0.4 mm）を施した骨材と、これらの処理を施さない無処理骨材とを作成した。モデル骨材のコンクリート製作時における材令は28日である。

2・3 コンクリートの調合および試験体の製作方法

コンクリートの調合表を Table II に示す。なお、すべての調合において母材モルタルのセメント-砂比は 1.0（容積比）とした。

モデル骨材自体およびパラフィン被膜の破損を防ぎ、あわせて打設コンクリート中の骨材容積比を正確に保つために、つぎのような練りまぜ方法を用いた。すなわち、あらかじめ内部を水でしめらせた強制練りミキサー（容量 50 l）内に、細骨材（ほぼ表乾状態）、セメントの順に投入し、約5分間から練りしたのち、水を投入してまず母材モルタルを作成した。その後あらかじめ計量しておいた粗骨材を母材モルタル中に投入し、手練り法で混練した。なお、コンクリートの締め固めには外部振動機を使用した。

試験体はコンクリートの打設後約48時間は室温 20°

Table II. Mix proportions of concrete.

Notation of concrete	W/C* (%)	V_a/V_c^{**}	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Fine aggregate (kg/m ³)	Coarse aggregate (kg/m ³)
35 H U	35	0	351	1006	792	0
35 H C		0.1	309	884	696	220
35 L U		0.2	274	782	616	440
35 L C		0.3	238	680	536	660
35 L C		0.4	203	575	456	880
		0.45	185	528	416	990
40 H U	40	0	383	956	753	0
40 H C		0.1	336	841	662	220
40 L U		0.2	298	744	586	440
40 L C		0.3	259	647	510	660
40 L C		0.4	220	551	434	880
		0.45	201	502	396	990
50 H U	50	0	437	872	687	0
50 H C		0.1	383	767	604	220
50 L U		0.2	339	679	534	440
50 L C		0.3	295	590	465	660
50 L C		0.4	251	502	395	880
		0.45	229	458	361	990

* Water-cement ratio of mortar matrix

** Volume fraction of coarse aggregate in concrete

±3℃、相対湿度80%±5%の養生室内で空中養生を行ない、その後材令27日目までは標準水中養生を行なった。コンクリート試験体はすべて材令28日目（モデル骨材の試験時材令は56日）に実験に供した。

2・4 試験方法

コンクリート、母材モルタルおよびモデル骨材の圧縮強度は JIS A 1108 の規定（ $\phi 10 \times 20$ cm 円柱体使用）に準じて求めた。なお、母材モルタルおよびモデル骨材については、上記の試験方法のほかに、JIS R 5201の規定に準じた圧縮および曲げ試験法（ $4 \times 4 \times 16$ cm 角柱体使用）によってそれぞれの強度を求めた。

また、母材モルタルとモデル骨材間の付着特性を求めるために、本報では便宜上 Alexander¹⁸⁾ などによる曲げ試験法を用いた。なお、付着強度測定法の試験体の製作に際しては、あらかじめ製作しておいた骨材と新たに打設する母材との接着面が打設方向と平行になるようにした。

3 実験結果とその考察

本実験で得られた母材モルタルおよびモデル骨材の圧縮強度ならびに引張強度（ $\phi 10 \times 20$ cm 円柱形試験体による）、母材モルタルとモデル骨材との付着強度の一覧を Table III に示す。

3・1 母材モルタルとモデル骨材との付着強度

曲げ試験法によって求めた無処理骨材と母材モルタルとの付着強度（ F_b ）と母材の水セメント比（W/C）との関係を Fig. 1 に示す。なお、Fig. 1 には Alexander¹⁸⁾、Hsu¹⁹⁾、Slate²⁰⁾、福田²⁰⁾などの実験結果を併示してある。また、図中の●および○印はそれぞれ母材がモルタルおよびセメントペーストの場合の結果であること

Table III. Test results of mortar matrix and coarse aggregate.

Notation of concrete	F_{cm}^* (kg/cm ²)	F_{tm}^{**} (kg/cm ²)	F_{ca}^{***} (kg/cm ²)	F_b^{****} (kg/cm ²)	F_{ca}/F_{cm}
35 H	550	28.2	403	14.0	0.73
35 L	575	31.0	255	—	0.44
40 H	466	26.1	509	13.0	1.09
40 L	500	28.7	272	—	0.54
50 H	433	24.3	403	13.2	0.93
50 L	475	26.8	278	—	0.59

* Compressive strength of mortar matrix

** Splitting tensile strength of mortar matrix

*** Compressive strength of coarse aggregate

**** Bond strength between mortar matrix and coarse aggregate

Fig. 1. Relationship between F_b and W/C (Where, F_b ; bond strength between matrix and aggregate, W/C; water-cement ratio of matrix).

を示す。Fig. 1中に示した各研究者の結果は、骨材性質、母材の打設方向、試験体の養生方法、材令、試験方法などがそれぞれ相違するため、これらの値を直接比較するのは無意味であるが、Fig. 1によれば、Alexanderの結果を除けば、付着強度は母材の水セメント比によってあまり相違しないことがわかる。

なお、本報におけるような曲げ試験法あるいは他の研究にみられるような直接引張試験法などによって求めた母材と骨材間の付着強度と、コンクリート中に混入された骨材と母材間の実際の付着強度との関連については、いまのところ不明の点が多く、早急に解決すべき問題であると考えられる。

今回の実験によって得られた無処理骨材と母材モルタルとの曲げ付着強度は、母材モルタルの圧縮強度の約2.5～3.0%、引張強度の約40～60%であった。一方、被覆骨材の場合付着強度はすべて零であった。

3・2 試験体の破壊状況

コンクリート試験体の破壊状況は使用骨材の種類とその使用量によって若干相違した。すなわち、無処理

骨材を用いた試験体では、骨材容積比 (V_a/V_c) が小さい場合 ($V_a/V_c=0.1\sim0.2$) には試験体端部にすべり破壊面がみられたが、 V_a/V_c の値が大きい場合には荷重の増加とともに試験体中央部付近に縦ひびわれが発生し、その後やや荷重が増大してから破壊した。なお、 V_a/V_c 値の小さい試験体では骨材が破壊したものもかなりみられた。

一方、被覆骨材を用いた試験体では、骨材容積比の大きさにかかわらず、試験体端部でのすべり破壊面の形成がほとんどみられず、試験体側面に縦ひびわれが発生すると同時に破壊を生じた。この場合、モデル骨材の破壊はほとんど観察されなかった。

3.3 コンクリートの圧縮強度と骨材容積比との関係

コンクリートの圧縮強度 (F_{cc}) と骨材容積比 (V_a/V_c) との関係を Fig. 2 に示す。ただし、Fig. 2 の縦軸はコンクリートの圧縮強度と母材モルタルの圧縮強度との比 (F_{cc}/F_{cm}) を表わしている。Fig. 2 によれば、無処理骨材および被覆骨材コンクリートに対する F_{cc}/F_{cm} の値は V_a/V_c の増加に伴って減少し、とくに被覆骨材コンクリートの圧縮強度は V_a/V_c の値が約 0.4~0.45 程度になると、母材モルタルの圧縮強度の約 10% 程度にまで低下する。また、無処理骨材コンクリートの F_{cc}/F_{cm} の値は V_a/V_c の増加とともにほぼ直線的に減少するのに対して、被覆骨材コンクリートの F_{cc}/F_{cm} 値は V_a/V_c が 0.1 の場合にすでに約 0.5 にまで減少し、この値は無処理骨材コンクリートの $V_a/V_c=0.45$ の場合にほぼ相当する。また、図中の直線はコンクリート試験体の横断面における骨材切断面積比が各試験体の骨材容積比に等しく、かつ骨材の強度を零と仮定した場合の仮想的な圧縮強度を示すものであるが、今回の実験によって得られた圧縮強度はこの直線で表示される値を下廻っている。これは、コンクリートのような非均質なぜい性材料は一般に試験体中の最も弱い経路を通してひびわれが発生して破壊に

Fig. 2. Relationship between F_{cc}/F_{cm} and V_a/V_c , (Where, F_{cc} ; compressive strength of concrete, F_{cm} ; compressive strength of mortar matrix and V_a/V_c ; volume fraction of coarse aggregate).

至ること、母材中に、母材とはヤング係数の異なる材料を混入すると、その境界面にかなり大きな局部的引張応力が生じる可能性があることなどが原因と思われる。

つぎに、無処理骨材コンクリートに関する本実験結果と下記の各研究者によって求められたコンクリートの圧縮強度と骨材容積比との関係を表わす式との比較を Fig. 3 に示す。

Fig. 3. Relationship between F_{cc}/F_{cm} and F_{ca}/F_{cm} , (Where, F_{cc} , F_{ca} and F_{cm} are compressive strengthes of concrete, coarse aggregate and mortar matrix, respectively).

$$\text{Bache 式; } \frac{F_{cc}}{F_{cm}} = \left(\frac{F_{ca}}{F_{cm}} \right) V_a/V_c \quad (1)$$

$$\text{村田 式; } \frac{F_{cc}}{F_{cm}} = \frac{F_{ca}}{F_{cm}} \left[\frac{V_a}{V_c} + m \left(1 - \frac{V_a}{V_c} \right) \right] \quad (2)$$

$$\text{Nepper-Christensen \cdot Nielsen 式; } \frac{F_{cc}}{F_{cm}} = \frac{F_{ca}}{F_{cm}} \left[1 + b \left(\frac{V_a}{V_c} \right) \right] \quad (3)$$

ここに、 F_{cc} ; コンクリートの圧縮強度

F_{cm} ; 母材の圧縮強度

F_{ca} ; 骨材の圧縮強度

cF_{cc} ; 被覆骨材コンクリートの圧縮強度

V_a/V_c ; 骨材容積比

m ; 母材と骨材のヤング係数の比

b ; 付着強度係数 (実験定数)

Fig. 3 によれば、本実験値は村田式および Bache 式による値よりもかなり小さい。これは両式が比較的球形に近い軽量骨材を使用したコンクリートについて求められた式であるのに対して、本実験では立方形骨材を用いたため、骨材の比表面積が球形骨材に比べて大きく、付着による破壊が生じやすいこと、骨材の隅角部に応力集中が起こり、早期の局部的破壊を起こしやすいことなどに起因するものと思われる。なお、Nepper-Christensen \cdot Nielsen 式は本実験結果とよく一致しているが、これは付着強度係数 b (実験定数) の値を本実験結果に基づいて決めたためである。

3.4 コンクリートの圧縮強度と骨材の圧縮強度との関係

コンクリートの圧縮強度 (F_{cc}) と骨材の圧縮強度 (F_{ca}) との関係を図. 4 に示す。ただし、図ではそれぞれの圧縮強度を母材モルタルの圧縮強度 (F_{cm}) で除して無次元表示してある。また、図中に示した F_{ca} の値は $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 試験体によって求めた見かけの骨材強度である。図. 4 にみられるように、測定結果はかなりばらついており、この結果に基づいて骨材強度とコンクリート強度間の相関関係の詳細を論じることは困難である。今回の実験の範囲内では、使用骨材の種類にかかわらず、骨材容積比 (V_a/V_c) が比較的小さい場合を除いては、骨材強度の増大によるコンクリート強度の明確な向上を認めることはできなかった。たとえば、パラフィン被覆骨材を用いたコンクリートの場合、 V_a/V_c の値が 0.1 および 0.2 のコンクリートの圧縮強度は、骨材強度とともにわずかに増大する傾向を示したが、 V_a/V_c の値が 0.3 よりも大きいコンクリートの圧縮強度は、骨材強度の大きさにかかわらず、ほぼ一定の値を示した。また、図中にも示したように、前述の Bache 式および村田式によれば、コンクリート強度は骨材強度とともに増大するが、今回の実験結果は、無処理骨材および被覆骨材のいずれの骨材を用いた場合も、これらの実験式の示す結果とは著しく相違した。その原因としては、使用骨材の形状、表面状態などの相違が考えられるが、この点に関してはさらに詳しい検討が必要である。

Fig. 4. Relationship between F_{cc}/F_{cm} and V_a/V_c (Comparison between test results by authors and those by other investigators).

3.5 コンクリートの圧縮強度と骨材の表面状態との関係

同一シリーズの被覆骨材コンクリートの圧縮強度と無処理骨材コンクリートの圧縮強度の比 (cF_{cc}/uF_{cc}) と骨材容積比 (V_a/V_c) との関係を Fig. 5 に示す。Fig. 5 によれば、被覆骨材コンクリートの圧縮強度 (cF_{cc}) は無処理骨材コンクリートの圧縮強度 (uF_{cc}) に比べて著しく小さく、その差は V_a/V_c が増大するにつれて大きくなる。ただし、 V_a/V_c が約 0.4 よりも大

Fig. 5. Relationship between cF_{cc}/uF_{cc} and V_a/V_c , (Where, cF_{cc} ; compressive strength of coated aggregate concrete, uF_{cc} ; compressive strength of uncoated aggregate concrete and V_a/V_c ; volume fraction of coarse aggregate).

きくなると、 cF_{cc}/uF_{cc} の値は約 0.2~0.25 程度の一定値に近づく傾向が見られる。図中には Nepper-Christensen・Nielsen¹⁶⁾ によるガラス玉を骨材として使用した場合の実験結果も併示してあるが、これらの実験値は今回の実験結果よりもかなり大きい。

なお、 cF_{cc}/uF_{cc} と V_a/V_c との関係には、母材の水セメント比、骨材強度などによる顕著な相違は見られなかった。

3.6 コンクリートの圧縮強度と水セメント比との関係

コンクリートの圧縮強度 (F_{cc}) と母材モルタルの水セメント比 (W/C) との関係を Fig. 6 に示す。図中の曲線は JASS 5 による水セメント比と圧縮強度との関係式 (普通セメント, $\beta=1.0$, $K=370 \text{ kg/cm}^2$ とし

Fig. 6. Relationship between F_{cc} and W/C, (Where, F_{cc} ; compressive strength of concrete and W/C; water-cement ratio of mortar matrix).

ンクリートの圧縮強度は水セメント比の増加とともにやや減少するが、その減少率は JASS 式によるそれよりも小さい。また、骨材容積比が零すなわち母材モルタルのみの圧縮強度は JASS 式による値よりやや大きい、 V_a/V_c が約 0.2 より大きい場合の圧縮強度は JASS 式による値よりもかなり小さい。これは本実験の場合、ほとんどすべての試験体においてモデル骨材の強度の方が母材モルタルの強度よりも小さかったことも一つの原因と思われる。(Table III 参照)

一方、パラフィン被覆骨材コンクリートの圧縮強度も、水セメント比 (W/C) の増加とともにやや減少する傾向がみられたが、その減少の割合はさほど著しくはない。とくに、 V_a/V_c の値が比較的大きい範囲 (約 0.3~0.45) では、W/C の値にかかわらず、コンクリート強度はほぼ一定値を示した。これはコンクリート試験体の破壊がほとんど母材と骨材間の付着特性のみに支配されたためであろう。

4 結 論

コンクリートの圧縮強度におよぼす骨材容積比、骨材強度、骨材の付着特性などの影響について調べるために、モルタル製のモデル骨材を用いて実験を行なった。その結果、およそつぎのようなことが明らかとなった。

(1) 曲げ試験法によって求めた母材モルタルと無処理骨材との付着強度は、今回の実験に関する限り、母材の水セメント比にかかわらず、ほぼ $13\sim 14\text{ kg/cm}^2$ の一定となった。

(2) コンクリートの圧縮強度と母材モルタルの圧縮強度との比は骨材容積比の増加とともに減少し、骨材容積比が約 0.4~0.45 の場合では、無処理骨材コンクリートで約 0.5、パラフィン被覆骨材コンクリートで約 0.1 となった。

(3) 骨材強度とコンクリート強度との相関はあまり明りょうではなかった。ただし、骨材容積比が約 0.2 よりも小さい範囲では、使用骨材の種類にかかわらず、コンクリートの圧縮強度は骨材強度の増加とともにわずかに増加する傾向を示した。

(4) パラフィン被覆骨材コンクリートと無処理骨材コンクリートの圧縮強度の比は骨材容積比の増加とともに著しく減少し、骨材容積比が約 0.4~0.45 の場合では約 0.2~0.25 の程度となった。

(5) パラフィン被覆骨材コンクリートの圧縮強度は骨材容積比が比較的大きい範囲 (約 0.3~0.45) では、母材モルタルの水セメント比にかかわらず、各容積比ごとにほぼ一定値を示した。

今回の実験は立方形のモデル骨材を用いた模型実験であるため、上記の結果を通常の骨材を使用したコンクリートにそのまま適用することはできない。なお、

上記の実験結果に対する理論解析手法、コンクリート中に混入された骨材の強度および母材と骨材間の付着強度の測定方法などについては、今後さらに検討を行なう予定である。

参 考 文 献

- 1) 小阪義夫, 谷川恭雄, 太田福男, セメント技術年報, XXII, 260 (1968); セメントコンクリート, No. 284, 9 (1970).
- 2) Walker, S., and D.L. Bloem, J. of ACI, **57**, No.3, 283 (1960).
- 3) Cordon, W.A., and H.A. Gillespie, J. of ACI, **60**, No.8, 1029 (1963).
- 4) Hughes, B.P., and G.P. Chapman, Mag. of Conc. Res., **18**, No.54, 19 (1966).
- 5) 高橋久雄, 中根 淳, 材料, **18**, No.185, 79 (1969).
- 6) 川上英男, 日本建築学会論報, No.166, 19 (1969); No. 167, 7 (1970).
- 7) Johnston, C.D., Mag. of Conc. Res., **22**, No. 70, 5 (1970).
- 8) Bache, H. H., Proc. of RILEM Symp. of Testing and Design Methods of Lightweight Aggregate Concretes, 9 (1967).
- 9) 大井孝和, セメント技術年報, XXII, 371 (1968).
- 10) 岡島達雄, コンクリートジャーナル, **8**, No.1, 2 (1970).
- 11) Kaplan, M.F., J. of ACI, **55**, No.11, 1193 (1959).
- 12) 木沢久兵衛, 河合清一, セメント技術年報, XVIII, 448 (1964).
- 13) 爾見軍治, 嶋谷宏文, セメント技術年報, XXI, 321 (1967).
- 14) 村田二郎, 神山行男, セメント技術年報, XXII, 223 (1968).
- 15) Shah, S.P., and S. Chandra, J. of ACI, **65**, No.9, 770 (1968).
- 16) Nepper-Christensen, P., and T.P.H. Nielsen, J. of ACI, **66**, No.1, 69 (1969).
- 17) Hsu, T.T.C., F.O. Slate, G.M. Sturman, and G. Winter, J. of ACI, **60**, No.2, 209 (1963); Hsu, T. T.C., J. of ACI, **60**, No.3, 371 (1963); Slate, F.O., and S. Olsefski, J. of ACI, **60**, No.5, 575 (1963); Sturman, G.M., S.P. Shah, and G. Winter, J. of ACI, **62**, No. 7, 805 (1965), Shah, S. P., and G. Winter, J. of ACI, **63**, No.9, 925 (1966).
- 18) Alexander, K. M., Proc. of the First Tewksbury Symp., 141 (1963).
- 19) Hsu, T.T.C., and F.O. Slate, J. of ACI, **60**, No. 4, 465 (1963).
- 20) 福田礼一郎, 日本建築学会論報, No.140, 7 (1967).