

論文

[1099] 軽量コンクリート1種の性能に関する研究

正会員○高羽 登 (日本セメント)

正会員 山下 時夫 (日本メサライト工業)

正会員 清水 泰 (東京工業大学附属工業高校)

1. まえがき

都市の土地高騰に伴う建築構造物の高層化や、建物に対する要求の多様化によるスパンの長大化等が増大するに従って、鉄筋コンクリート構造物の高強度化や軽量化の必要性が高まっている。近年、これらの要求に適合すべく高強度軽量コンクリートの性能に関する技術的な改良が各研究機関で精力的に行われている。これらの研究は、小さな水セメント比で圧縮強度が  $400\text{kgf/cm}^2$  を超える範囲のものが多く見られる。また、現在、日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準や JASS 5 などでは、軽量コンクリートは1種および2種のみ使用可能となっており、その設計基準強度は  $150\text{kgf/cm}^2$  から  $270\text{kgf/cm}^2$  の範囲で使用が認められている。これは普通コンクリートの使用が  $360\text{kgf/cm}^2$  まで認められていることに対して多少厳しい制限となっている。

本研究は、上記の現状を考慮して、軽量コンクリートの利用に関する基礎的な資料を得る事を主な目的として行った試験の結果をまとめたものである。特に、実用的な範囲で既往の研究例が少ない範囲を考え、水セメント比が比較的大きく、圧縮強度が  $300\text{kgf/cm}^2$  を多少超える所の実験を行った。使用したコンクリートは、普通コンクリートと軽量コンクリート1種で、材令4週での封かん養生の調合強度が  $240\text{kgf/cm}^2$  と  $360\text{kgf/cm}^2$  となるように調合設計した。

測定項目は、フレッシュコンクリートの品質、材令約200日迄の圧縮強度、引張強度、静弾性係数および圧縮強度時のひずみとして両コンクリートの比較を行った。

2. 試験概要

2.1 試験期間

普通コンクリートおよび軽量コンクリート1種の供試体を夫々平成元年2月10日と16日の2度に分けて製作し、その後、両コンクリートとも9月12日迄の間に各種材令で試験した。従って普通コンクリートで材令214日、軽量コンクリート1種で材令208日まで試験を実施した。

表1. 使用材料

種類	品名	品質
セメント	普通ポルトランドセメント	比重=3.16 プレーン値=3,250 $\text{cm}^2/\text{g}$
水	上水道水+上澄水	比重=1.0
細骨材	千葉県君津産山砂	表乾比重=2.61 吸水率=1.66% 単位容積質量=1,680 $\text{kg}/\text{m}^3$ F. M. =2.62
粗骨材	奥多摩産碎石	表乾比重=2.68 吸水率=0.65% 単位容積質量=1,610 $\text{kg}/\text{m}^3$ 実積率=60.5% F. M. =6.62
	人工軽量骨材	表乾比重=1.64 吸水率=27.5% 単位容積質量=795 $\text{kg}/\text{m}^3$ 実積率=61.6% F. M. =6.45
混和剤	AE減水剤(標準型)	リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体

## 2.2 使用材料

使用材料は表1の通りでセメントは普通ポルトランドセメント、細骨材として君津産の山砂、粗骨材として奥多摩碎石と人工軽量骨材を用いた。

## 2.3 調合

目標スランプ15cm、目標空気量が普通コンクリートで4%、軽量コンクリートで5%、調合強度Fを材令4週の封かん養生（ビニールで密封し、屋外で静置）で240kgf/cm<sup>2</sup>と360kgf/cm<sup>2</sup>とした。これらの調合を表2に示す。

表2. 調合

種 コ ン ク リ ー ト 類 の	調 合 強 度  (kgf/ cm <sup>2</sup> )	ス ラ ン プ  (cm)	空 気 量  (%)	水 セ メ ン ト 比  (%)	粗 骨 材 の 法  (mm)	細 骨 材 率  (%)	単 位 水 量  (kg/ m <sup>3</sup> )	絶 対 容 積  (l/m <sup>3</sup> )			重 量  (kg/m <sup>3</sup> )			混 和 剤   (kg/ m <sup>3</sup> )
								セ メ ン ト	細 骨 材	粗 骨 材	セ メ ン ト	(1) 細 骨 材	(2) 粗 骨 材	
普 通 コ ン ク リ ー ト	240	15±2.5	4±1.0	61.4	20	46.3	164	84	330	382	267	858	1028	0.668
	360	15±2.5	4±1.0	51.0	20	44.3	167	104	305	384	328	793	1033	0.820
軽 量 コ ン ク リ ー ト	240	15±2.5	5±1.5	57.5	15	47.5	168	93	327	362	293	851	467	0.733
	360	15±2.5	5±1.5	44.5	15	43.4	171	122	285	372	385	741	980	0.963

(注) (1) 細骨材は表乾状態の重量で示した。

(2) 粗骨材は碎石を表乾状態の重量で人工軽量骨材を絶乾状態の重量で示した。

## 2.4 供試体の成形と養生方法および供試体本数

コンクリート供試体の本数は全数で312本、その内訳は、普通コンクリートで360kgf/cm<sup>2</sup>の調合強度のもの76本、240kgf/cm<sup>2</sup>のもの86本、軽量コンクリートで360kgf/cm<sup>2</sup>の調合強度のもの74本、240kgf/cm<sup>2</sup>のもの76本とした。これらの供試体はφ10×20cmの鋼製型枠を用いて製作し、コンクリートは各調合毎に、3m<sup>3</sup>/車の生コンクリートを購入して、冬季の屋内で成形した。また、圧縮試験用供試体はコンクリート打設の翌日セメントペーストでキャッピングし、その翌日引張試験用供試体とともに脱型した。その後、封かん養生供試体と気中養生供試体は屋外へシートがけして静置した。

コンクリート打設後の養生は標準養生、気中養生、封かん養生の3種類とし、封かん養生に重点を置いて試験を計画した。各養生別の供試体本数は普通コンクリートで封かん養生138本、気中養生12本、標準養生12本とし、軽量コンクリートで封かん養生126本、気中養生12本、標準養生12本とした。

試験は、圧縮試験198本（普通コンクリート102本、軽量コンクリート96本）と引張試験114本（普通コンクリート60本、軽量コンクリート54本）の両方を行った。試験時には重量の測定を行ったほか、圧縮試験ではコンプレッソメーターを用いて静弾性係数や破壊時ひずみを求めるようにした。また、試験は材令1週、2週、3週および4週で行ったほか、200日を超える比較的長期間の材令でも行った。

### 3. 試験結果と検討

#### 3.1 フレッシュコンクリートの性質

フレッシュコンクリートの試験結果は表3の通りで、スランプ、空気量は所定の範囲にあり、また、単位容積質量もほぼ一般的な値であった。

表3. フレッシュコンクリート試験結果

コンクリートの種類	F (kgf/cm <sup>2</sup> )	スランプ (cm)	フロー (cm)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
普通コンクリート	240	14.5	25×25	2281	5.0	16.5
	360	15.2	25×26	2283	4.8	17.0
軽量コンクリート	240	13.0	25×25	1911	6.4	18.5
	360	14.5	26×27	1908	6.2	19.5

#### 3.2 硬化コンクリートの性質

封かん養生、標準養生および気中養生の各種コンクリートの試験結果は表4.1および4.2の通りである。なお、供試体本数が材令によって異なるため各材令での供試体の平均値を示した。

##### 3.2.1 材令にともなう圧縮強度および引張強度の変化

表4.1に示すように、材令4週での圧縮強度の平均値(各20本)は、普通コンクリートのF=240 kgf/cm<sup>2</sup>で292 kgf/cm<sup>2</sup>となった以外は、F=360 kgf/cm<sup>2</sup>で335 kgf/cm<sup>2</sup>、軽量コンクリートF=240 kgf/cm<sup>2</sup>で243 kgf/cm<sup>2</sup>、F=360 kgf/cm<sup>2</sup>で326 kgf/cm<sup>2</sup>となっており、ほぼ初期の目標通りの値が得られている。

図1に上記の材令と強度の関係を(a)材令と圧縮強度、(b)材令と引張強度に分けて示す。(a)図によると圧縮強度は材令4週以後も順調に伸びており、200日を超えた時点で材令4週の圧縮

表4.1 普通コンクリート試験結果

材令	養生	普通コンクリート F=240 kgf/cm <sup>2</sup>				普通コンクリート F=360 kgf/cm <sup>2</sup>			
		単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
1週	封かん	2.315	202	—	—	2.302	247	—	—
2週		2.311	256	—	21.4	2.314	303	—	27.9
3週		2.302	274	—	—	2.301	310	—	—
4週	標準	2.328	301	2.90	26.6	2.326	356	2.96	31.4
	気中	2.308	269	2.76	21.4	2.300	323	2.77	24.4
	封かん	2.309	292	2.88	24.8	2.309	335	2.96	28.7
43日(凍融)	封かん	2.312	294	—	27.0	—	—	—	—
88日(凍融)		2.303	340	—	24.0	—	—	—	—
161日(23w)		2.297	358	2.99	25.2	2.300	417	3.16	29.4
182日		2.304	362	3.06	23.4	2.293	418	3.14	31.7
202日		—	—	—	—	2.309	424	3.24	—
214日		2.300	388	3.09	—	—	—	—	—

表4.2 軽量コンクリート試験結果

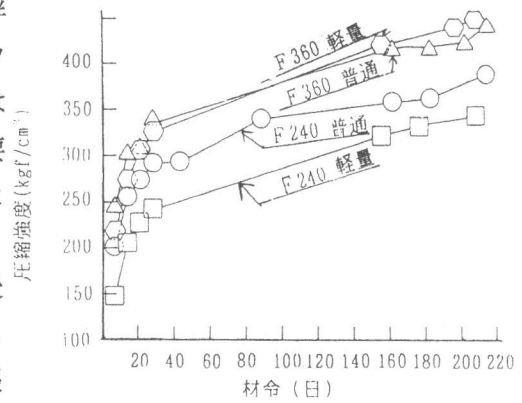
材令	養生	軽量コンクリート F=240 kgf/cm <sup>2</sup>				軽量コンクリート F=360 kgf/cm <sup>2</sup>			
		単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
1週	封かん	1.921	147	—	—	1.915	219	—	—
2週		1.928	206	—	19.8	1.919	274	—	22.6
3週		1.928	227	—	—	1.914	306	—	—
4週	標準	1.957	256	1.69	21.4	1.952	345	1.80	24.0
	気中	1.841	254	1.59	19.6	1.867	300	1.64	21.7
	封かん	1.930	243	1.65	22.4	1.921	326	1.68	26.5
155日	封かん	1.912	322	1.64	20.7	1.915	420	1.82	23.5
176日		1.913	332	1.72	21.5	—	—	—	—
196日		—	—	—	—	1.915	440	1.86	24.0
208日		1.920	344	1.74	—	—	—	—	—

強度から 100kgf/cm<sup>2</sup> 程度上昇している。なお、材令に伴う圧縮強度の伸びは、軽量コンクリートの方が普通コンクリートに比較して安定している傾向が認められた。これは骨材中に含まれる水分が養生水となって、水和反応に必要な水分が補給され、コンクリートの強度が増進するものと思われる。

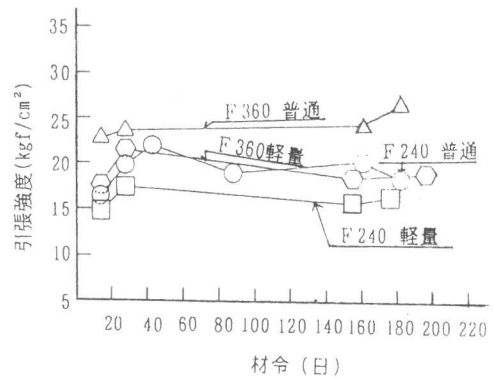
引張強度に関しては、(b)図に示すように材令4週以後は殆ど伸びはなくなっており、200日前後の値でも材令4週と同程度の値となっていて、脆度係数(圧縮強度/引張強度)は材令が伸びれば伸びるほど大きな値となっている。

次に、圧縮強度のばらつきについて図2(a)~(d)に示す。同図は縦軸に頻度を、横軸に材令4週での圧縮強度をとって示したもので、20本のデータに関して正規分布を仮定した際の確立密度関数を求め、調合強度の達成率や95%信頼強度を得るための安全率kを求めたものである。なお、横軸の圧縮強度は5 kgf/cm<sup>2</sup> きざみで示した。

図2に示すように、各グラフで求まっている変動係数 $\delta$ は1.7%から3%程度でありあまり大きなばらつきは見られず、普通コンクリートと軽量コンクリートとでそれほど大きな差はない結果となっている。また、コンクリート圧縮強度はF = 240 kgf/cm<sup>2</sup> に対しては高め、F = 360 kgf/cm<sup>2</sup>



(a) 材令と圧縮強度



(b) 材令と引張強度

図1. 材令とコンクリート強度

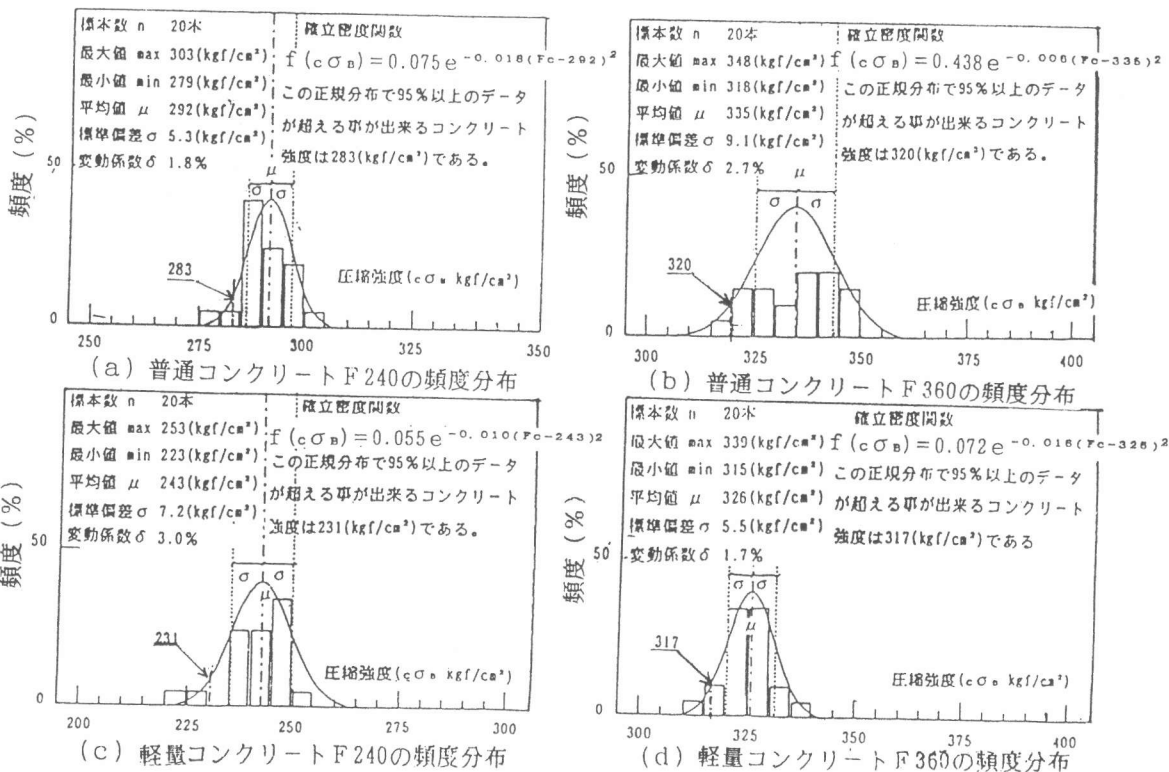


図2. コンクリート圧縮強度のばらつき

に対しては低めの値であったが、両者のばらつきに関しては際だった違いは無く、変動係数を比較するとそれ程大きな差は生じていない。

### 3.2.2 圧縮強度と引張強度の関係

図3(a)~(d)に圧縮強度 $c\sigma_B$ と引張強度 $c\sigma_T$ を比較して示す。縦軸には $c\sigma_T$ を、横軸には $c\sigma_B$ を採って、材令28日の結果を中心として、その他の材令の資料を参考値として、夫々の平均値、最大値、最小値および標準偏差の値で両者の関係を表した。また、本実験で得られた値と従来から指摘されている傾向とを比較し、より一般的な情報を得るために、図中に通常用いられている $c\sigma_B$ から $c\sigma_T$ を推定する値として $1.8\sqrt{c\sigma_B}$ 、 $1.2\sqrt{c\sigma_B}$ 、 $c\sigma_B/10$ の3種類の計算結果を示した。

同図から軽量コンクリートの方が普通コンクリートに比較して多少引張強度が低くなる傾向が見られる。特に、長期材令でこの傾向は強い。また、 $c\sigma_B$ から $c\sigma_T$ を推定する式としては、材令4週では $1.8\sqrt{c\sigma_B}$ と $1.2\sqrt{c\sigma_B}$ との中間的な所に来ている。

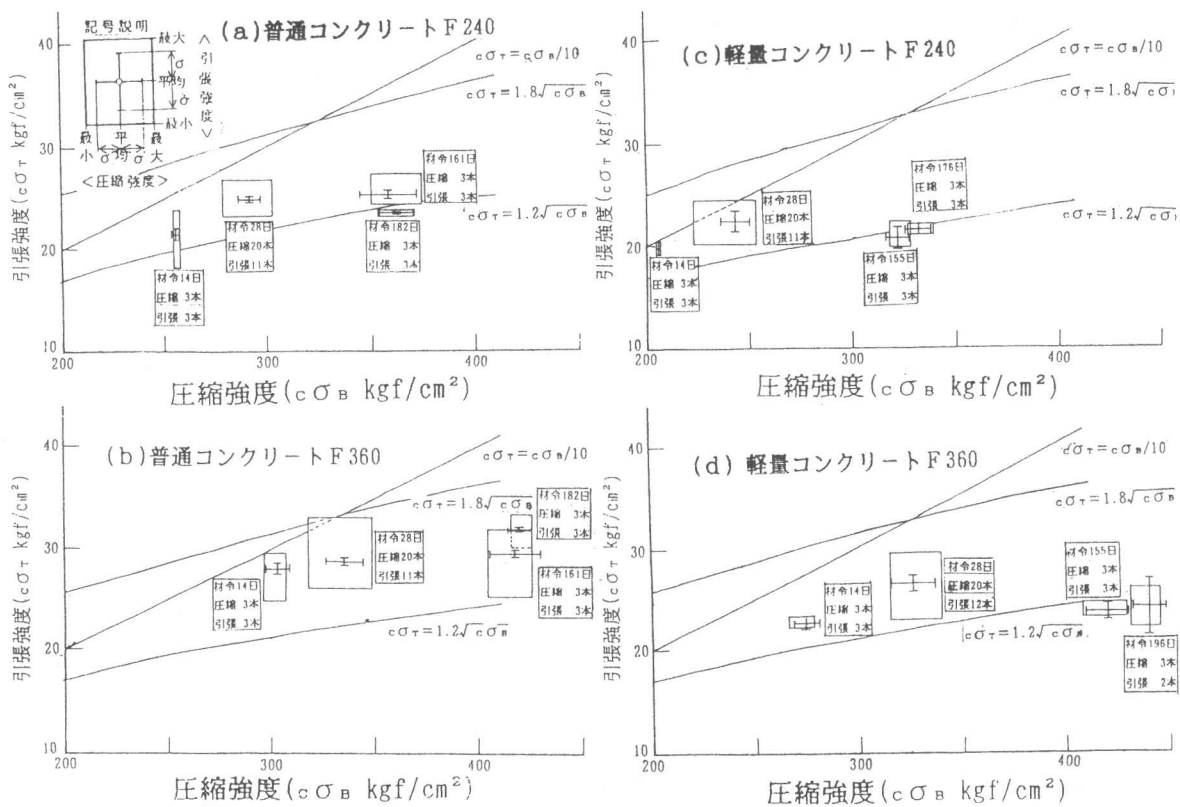


図3. 圧縮強度と引張強度の関係

### 3.2.3 圧縮強度と静弾性係数の関係

本試験では静弾性係数 $cE$ の実験値 $cE_T$ と計算値 $cE_C$ を下式により求めた。

$$cE_T = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_1 - 50 \times 10^{-6}) \quad \dots (1)^{[1]} \text{ 実験値}$$

$$cE_C = 2.1 \times 10^5 (\gamma / 2.3)^{1.5} \sqrt{c\sigma_B} / 200 \quad \dots (2)^{[1]} \text{ 計算値}$$

ここで、 $cE_T$ : 静弾性係数実験値 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $cE_C$ : 静弾性係数計算値 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\sigma_2$ :  $1/3c\sigma_B$ における圧縮応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\sigma_1$ : 縦方向ひずみが  $50 \times 10^{-6}$ に達した時のコンクリートの圧縮応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\epsilon_1$ :  $1/3c\sigma_B$ でコンクリートに生ずる縦ひずみ

図4に圧縮強度と $cE$ の関係を示す。同図は、縦軸に $cE$ を横軸に $c\sigma_B$ を採って示したもので、図中には $c\sigma_B$ と $cE$ の関係を現わす計算結果も書き加えた。なお、計算値を求める際に普通コンクリートおよび軽量コンクリートの単位容積質量 $\gamma$ は夫々 $2.3 \text{ t/m}^3$ と $1.9 \text{ t/m}^3$ とした。

これらの図を見ると、明らかに普通コンクリートと軽量コンクリートとで差を生じている。普通コンクリートでは単位容積質量 $\gamma$ を $2.3\text{t/m}^3$ として計算した値より大きな値が得られているが、軽量コンクリートでは逆に大多数のデータが単位容積質量 $\gamma$ を $1.9\text{t/m}^3$ とした計算値より低い値となっている。なお、静弾性係数のばらつきに付いては軽量コンクリートの方が小さな値が得られている。

### 3.2.4 圧縮強度時のひずみ

図5に圧縮強度と圧縮強度時のひずみ $c\varepsilon_B$ との関係を示す。同図中には湿潤状態と乾燥状態の両方に付いて圧縮強度と圧縮強度時のひずみとの関係を現わす下式で求めた値を記入した。

$$c\varepsilon_B = 4.9 \times 10^{-4} c\sigma_B \text{ (湿潤状態) } \quad (3) \quad [1]$$

$$c\varepsilon_B = 5.6 \times 10^{-4} c\sigma_B \text{ (乾燥状態) } \quad (4) \quad [1]$$

同図を見ると軽量コンクリートの圧縮強度時のひずみは、普通コンクリートに比べてかなり大きな値が得られていることがわかる。またこれらのデータは普通、軽量とも高強度の方がばらつきが大きくなる傾向が見られた。

## 4. 結論

調合強度  $240\text{ kgf/cm}^2$  と  $360\text{ kgf/cm}^2$  の普通コンクリートと軽量コンクリートについて比較検討実験を行った結果以下の事項が認められた。

a) 材令による圧縮強度の発現は、本実験に用いたコンクリートでは軽量コンクリート、普通コンクリートとも一定の伸びを示したが、引張強度に関しては材令4週以降殆ど上昇しなかった。圧縮強度に対する引張強度の比は、普通コンクリートに比べて軽量コンクリートの方が多少小さな値となった。また、圧縮強度から引張強度を推定する算定式としては、多少の安全を見込んで  $c\sigma_T = 1.2\sqrt{c\sigma_B}$  程度とすることが望ましいように思われる。

b) 圧縮強度のばらつきに関しては、普通コンクリートと軽量コンクリートとでは大きな差は見られず、両者とも変動係数3%以下の小さな値であった。

c) 軽量コンクリートの静弾性係数は建築学会RC規準の算定式による計算値より多少低い値となった。計算値と実験値の比の値を見ても、普通コンクリートと比較して低い値が得られた。

d) 圧縮強度時のひずみに関しては、普通コンクリートに比べて軽量コンクリートの方が大きな値が得られた。推定式による計算値と比較しても軽量コンクリートは大きな値となっている。

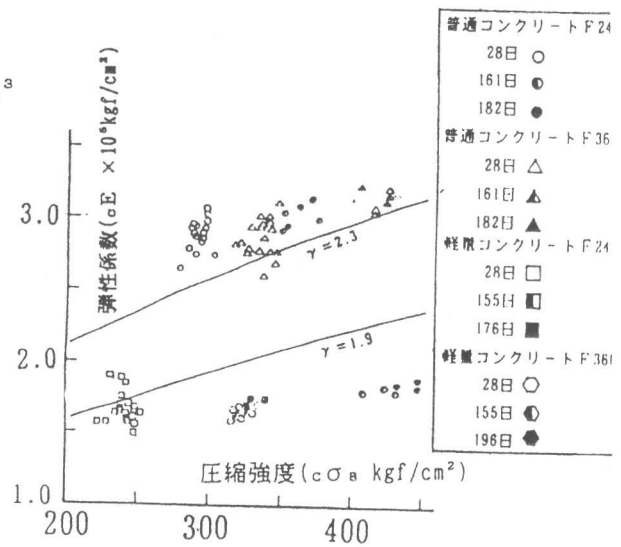


図4. 圧縮強度と静弾性係数の関係

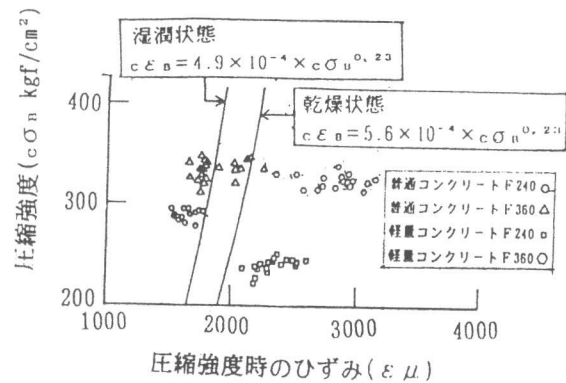


図5. 圧縮強度と圧縮強度時ひずみの関係

- [参考文献] 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1988年