

# 論文 人工軽量骨材コンクリートの骨材粒度のちがいによる乾燥収縮及びクリープ特性に関する研究

渡辺 誠一\*1・村上 心\*2・谷口 綾\*3

**要旨:** 人工軽量骨材コンクリートの骨材粒度の標準は JASS-5, JISA5002 に定められている。しかし、その粒度分布を変化させて用いた場合の基礎的な研究は少ない。

筆者らは骨材の粒度分布を変えた場合について、水及びセメント量を同一とした調合の3種類を想定し、練り上がり時のスランプ・コンクリート強度・弾性係数、及び約2年間にわたる乾燥収縮・圧縮クリープに関して実験的な研究を行った。また、標準粒度分布を用いたものに炭素繊維を混入した試料についてもあわせて比較を行った。以上について報告する。

**キーワード:** 人工軽量骨材コンクリート、骨材粒度分布、乾燥収縮、クリープ

## 1. はじめに

人工軽量骨材コンクリートは高層ビルなどを中心にプレキャストカーテンウォールなどに用いられ、その基礎的な研究による資料も整いつつあり、実務の用に供されている。しかし、普通コンクリートに比べその資料の蓄積は少なく、より多くのデータからのコンセンサスが必要である。

例えば、クリープに関する資料は研究者によりデータがかなりばらつきがある。一方、骨材の粒度分布を変化させた場合の基礎的な研究である物理的性状に関する資料は少ない。そこで筆者らは JASS5 などに規定された標準の粒度分布を基本とし、粗骨材の粒径を 10<sup>mm</sup> を超え 15<sup>mm</sup> 以下としたもの (5<sup>mm</sup> を超え 10<sup>mm</sup> 以下をカット) 及び全て細骨材を用いたもの (人工軽量骨材モルタル) の 3 パターンを想定した。

他にコンクリートの特性改善として用いられる炭素繊維を混入した場合を併せて行った。

以上のいずれも単位水量及びセメントを同一とした調合について、コンクリートの練り上がり時のスランプ、コンクリートの強度、弾性係数 (4 週時、125 週時)、並びに約 2 年に亘り乾燥収縮ひずみ及び圧縮クリープひずみを計測し、それぞれのクリープ係数などのデータを得た。また、クリープひずみ (クリープ係数) の経時進行予想式は各国のコードや設計基準に示されており、それらと今回の実測データとの比較検討も行った。

また、クリープひずみ (クリープ係数) の経時進行予想式は各国のコードや設計基準に示されており、それらと今回の実測データとの比較検討も行った。

また、クリープひずみ (クリープ係数) の経時進行予想式は各国のコードや設計基準に示されており、それらと今回の実測データとの比較検討も行った。

## 2. 実験の概要

ここに行った実験は、はじめに述べたように、3 種 4 パターンの 4case で測定した、人工軽量骨材コンクリートの物理的性質は、以下の項目についてである。尚、実験期間は平成 10 年 9 月～平成 12 年 9 月、載荷は PC 構造などのプレストレス導入材令にならない、コンクリート打設一週後とし、室内の自然環境に放置した。

- ・練り上がり時のスランプ
- ・1 週・4 週・125 週; 圧縮強度、割裂強度 (4 週のみ)
- ・1 週・4 週・125 週; 弾性係数
- ・経時圧縮ひずみ、経時乾燥収縮ひずみ

### 2.1 使用機材他

#### (1) 使用機材

- ・供試体成型用枠:  $\phi 100 \times 200$
- ・ミキサ: TURBO MIXER 0.1<sup>m3</sup> (TM-100)

\*1 椋山女学園大学 教授 生活科学部 生活環境学科 博士 (工学) (正会員)

\*2 椋山女学園大学 助教授 生活科学部 生活環境学科 工学修士 (正会員)

\*3 椋山女学園大学大学院 生活科学研究科 生活環境学専攻

・他;コンクリート埋込型ひずみ計(KM 埋込型, 温度変形補償型)

(2) 使用材料

- ・セメント:普通ポルトランドセメント(TIS R5210)
- ・細骨材:人工軽量細骨材
- ・粗骨材:人工軽量粗骨材

表-1 人工軽量骨材 (A社製) の性状

種類	絶乾比重	吸水率 (24時間吸水時, ()内 出荷時)	単位容 積質量	実績率 (%)
粗骨材	1.25	9.7 (28)	794	63.5
細骨材	1.68	9.8 (16)	1116	53.7

破砕強度:10%破砕値測定試験方法によると,骨材破砕値は平均約 33%で,10%破砕値は 118<sup>kN</sup>~127<sup>kN</sup>である。

- ・炭素繊維:長さ 3<sup>mm</sup>,直径 15<sup>μ</sup>,比重  $\gamma=1.63$
- ・混和剤:AE減水剤

(3) クリープ計測用装置他

クリープ計測は実荷重を載荷するものとし,その装置を考案した。クリープ載荷装置及び載荷実験中の状況を写真-1,写真-2に示す。

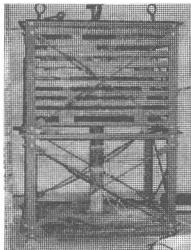


写真-1

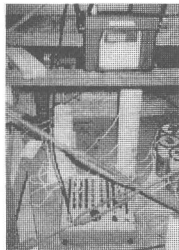


写真-2

実載荷荷重は鋼板を用い,35.7<sup>kN</sup> (コンクリートテストピース 100 $\phi$ ,  $\sigma_c=4.6\text{N/mm}^2$ ) 載荷するものとした。(約  $F_c/3$ )

・テストピースは次のひずみを計測するために3種とした。

(i) 自然放置用

→ (温度伸縮+乾燥収縮)ひずみ

(ii) 封かん用 → 温度伸縮ひずみ

(iii) 載荷用 → 弾性ひずみ + 温度伸縮 + (乾燥収縮+クリープ)ひずみ

即ち クリープひずみ = (iii) - (i)

- (載荷直後の弾性ひずみ)

乾燥収縮ひずみ = (i) - (ii)

で求められる。尚,封かんはブリキの型枠 (summit-CE46)とし,コンクリート打設直後表面にグリースを塗り,保護のためガムテープで覆う。

2.2 実験に用いた人工軽量骨材の粒度組成

この実験で想定した4caseを以下に述べる。

case1: JASS5に示す標準の粒度組成のもの

表-2,表-3に示す。

case2: 粗骨材を  $10\text{mm} < \phi \leq 15\text{mm}$  の粒度組成及び細骨材を標準の粒度組成としたもの

case3: 粗骨材は用いず,全て標準の粒度の細骨材としたもの

case4: 標準の粒度組成の粗骨材及び細骨材とするが  $25\text{N/m}^3$  の炭素繊維 (繊維長さ 3<sup>mm</sup>,直径 15<sup>μ</sup>) を混入したもの

いずれも,骨材は十分に吸水させ表乾状態にしたものを用いた。

表-2 粗骨材のふるいを通る質量百分率

骨材の大きさ	ふるいの呼び寸法 (mm)	25	20	15	10	5
	JISA5002及び JASS5	20~5	100	90~100	-	20~55
今回使用のもの	15~5	-	100	90~100	40~70	0~15
	15~5	-	100	98	66	11

表-3 細骨材のふるいを通る質量百分率

ふるいの呼び寸法 (mm)	ふるい							洗い試験により 失われる率
	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
JISA5002及びJASS5	100	90~100	75~100	50~90	25~65	15~40	5~20	0~10
今回使用したもの	100	100	98	67	44	28	14	3

表-4 調査表

	粗骨材の 最大寸法(mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kN/m <sup>3</sup> )	重量 (kN/m <sup>3</sup> )			減水剤 (N/m <sup>3</sup> )
							セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
標準	15	18	5	55.4	49.9	1.62	2.94	5.57	4.53	7.75
粗骨材10mmを 越えたもの	15	-	5	55.4	56.9	1.62	2.94	6.55	3.79	7.75
細骨材のみ	5	-	5	55.4	100	1.62	2.94	11.5	0	7.75
炭素繊維入り	15	-	5	55.4	49.9	1.62	2.94	5.57	4.53	7.75

(炭素繊維:25N/m<sup>3</sup>混入)

表-5 実験結果

	スランブ (cm)	1週		4週		125週(クリープ実験体)	
		強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数	強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数	強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数
case1	21	20.6	26.7 (1.72)	1.28×10 <sup>4</sup>		32.5 (1.57)	1.33×10 <sup>4</sup>
case2	18.3	26.5	37.8 (1.73)	1.47×10 <sup>4</sup>		43.3 (1.63)	1.48×10 <sup>4</sup>
case3	23.2	13.6	18.3 (1.67)	1.18×10 <sup>4</sup>		23.0 (1.54)	1.20×10 <sup>4</sup>
case4	21.5	19.3	26.7 (1.70)	1.27×10 <sup>4</sup>		29.6 (1.52)	1.27×10 <sup>4</sup>

注1) 4週まで水中養生

注2) ( )内単位体積重量(比重)

### 2.3 人工軽量骨材コンクリートの調査

標準粒度組成の場合を基本として、設計強度(4週) 21N/mm<sup>2</sup>、スランブ 18cm とし、単位粗骨材容積、実績率: 63.5%、かさ容積: 0.56 とするが case2 では粒径を考慮して実績率 55%、かさ容積: 0.54 と仮定した。

調査では単位セメント量及び水量を一定とし、使用セメントはいずれも 2.94kN/m<sup>3</sup> とした。

本実験に先がけ予備実験でスランブ、強度ともに確認した。それによる調査を表-4 に示す。

## 3. 実験結果

### 3.1 スランブ及び強度について

実験結果を表-5 に示す。

#### (1) スランブについて

先に述べていたように単位セメント量及び水量を一定としたものであることからスランブに関しては、標準粒度による case1 と比較して粗骨材粒度の細粒度をカットした case2 が 13% 小さくなり、細骨材のみとした case3 がスランブが 10% 大きく、また、炭素繊維を混入した case4 はほぼ同じとなった。

#### (2) 強度及び弾性係数について

4週強度を標準粒度による case1 と比較する。粗骨材粒度を大きくした case2 が 1.42 大きく、細骨材のみとした case3 が 0.69 と小さく、炭素繊維混入の case4 が 1 となった。

弾性係数では、case1 を 1 とすると、case2 は

1.12, case3 は 0.92, case4 はほぼ同じとなった。

### 3.2 計測・収縮ひずみについて

乾燥収縮ひずみ及びクリープひずみを図-1.1~1.4、図-2.1~2.4 に示す。

この図には、84 週以後 7 週間の回復クリープひずみも示した。

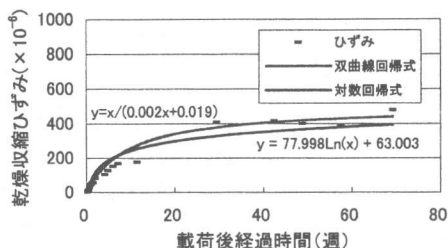


図-1.1 乾燥収縮ひずみ(case1)

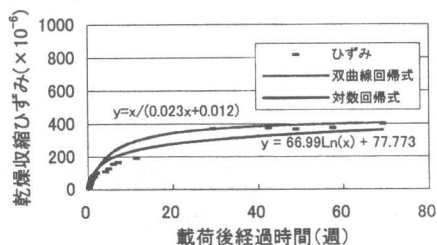


図-1.2 乾燥収縮ひずみ(case2)

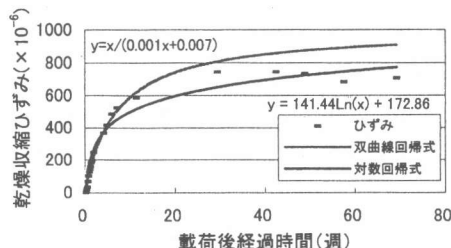


図-1.3 乾燥収縮ひずみ(case3)

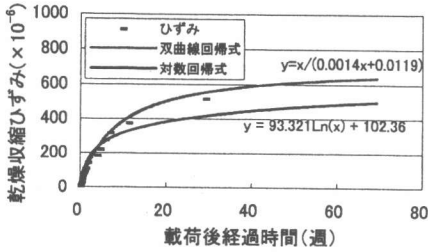


図-1.4 乾燥収縮ひずみ(case4)

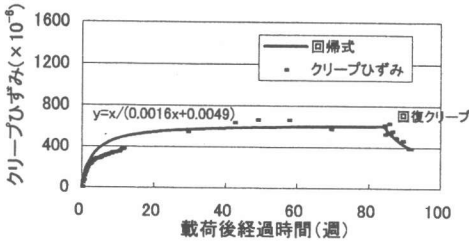


図-2.1 クリープひずみ(case1)

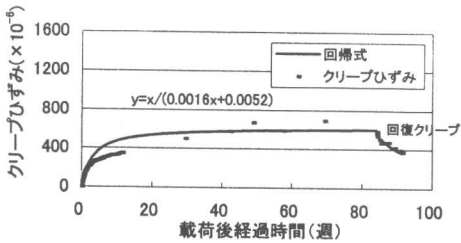


図-2.2 クリープひずみ(case2)

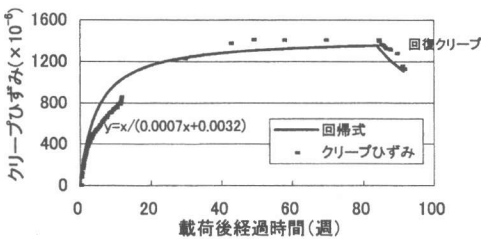


図-2.3 クリープひずみ(case3)

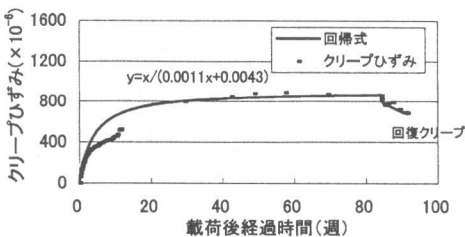


図-2.4 クリープひずみ(case4)

乾燥収縮ひずみの回帰式に関しては、一般に用いる曲線式の内、対数回帰式によるものが最もよい近似を示した。乾燥収縮の最終予想値は case1 で  $7.8 \times 10^{-4}$ , case2 で  $6.9 \times 10^{-4}$ , case3 で  $14.75 \times 10^{-4}$ , case4 で  $9.6 \times 10^{-4}$  となった。

クリープ係数の最終予想値  $\phi_n$  は標準粒度の case1 が  $\phi_n=2.9$ , 粗骨材を  $10^{\text{mm}} < \phi \leq 15^{\text{mm}}$  とした case2 が  $\phi_n=3.1$  と大差なく、強度の低い細骨材のみの case3 は  $\phi_n=7.8$ , 炭素繊維を混入した case4 が  $\phi_n=4.65$  となった。

また、ここに詳細なデータは示さないが標準 case1 と炭素繊維混入の case4 での割裂試験の結果から、圧縮強度と引張強度の比が case1 で 1/12.7, case4 で 1/10.8 となり、炭素繊維混入の方が、約 11.8% の強度上昇がみられたことを付記しておく。

## 4. 考察

### 4.1 スランプについて

本実験では、セメントペースト濃度を一定に設定したものであるが、細骨材のみのスランプは、既往の研究とは逆に、他のものより大きくなった。これは表-5 に示すように、case3 の試験体の単位体積が他に比べて小さくなっていることから、打設時における細骨材の表乾状態及び空気量などの影響と思われる。

### 4.2 強度、弾性係数について

標準粒度の case1 と比較して、4 週時において粗骨材を  $10^{\text{mm}} < \phi \leq 15^{\text{mm}}$  とした case2 は強度、弾性係数とも約 10% 程度の上昇があった。人工軽量骨材では、骨材がセメントペースト硬化体より強度が小さく粒内破壊となる。case1 と case2 を比較すると、単位体積重量がほとんど同じであるが、粒度分布が異なる。セメントペーストの専有度は同一粒度に揃えた場合は粒度に関わらず同じであるが、粒度分布を変えるとこれは変化し、強度に影響を与えるという結果が得られた。

次に、case3 は単位体積重量が他に比べて小さくなっており、単位水量、空気量の影響によるこ

と、並びに細骨材には破碎され、強度が確保されていないか、ず状のものも含まれており、強度低下が著しかったと考えられる。よって case3 は比較の対象としては不適という結果になった。

### 4.3 乾燥収縮及びクリープについて

#### (1) 乾燥収縮

第二種軽量コンクリートの乾燥収縮は水セメント比によって異なるが、45%のとき  $6 \times 10^{-4}$  程度<sup>1~3)</sup> といわれている。今回の実験結果では水セメント比 55%で乾燥収縮ひずみの最終予想値は  $7.8 \times 10^{-6}$  であるが、標準粒度による case1 に比して、粒度を  $10\text{mm} < \phi \leq 15\text{mm}$  とした case2 が 0.89 と小さく、繊維混入の case4 は 1.23 となった。

#### (2) クリープ係数

クリープ係数の経時変化を図-3.1~3.4 に示す。

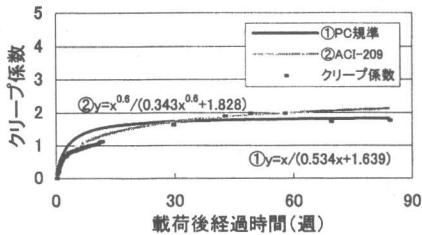


図-3.1 クリープ係数(case1)

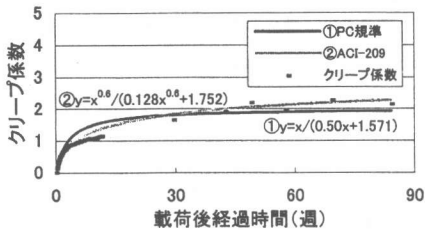


図-3.2 クリープ係数(case2)

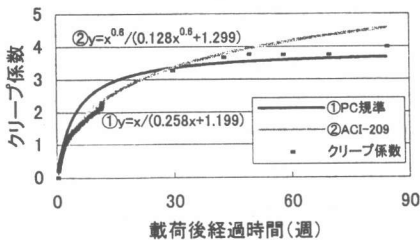


図-3.3 クリープ係数(case3)

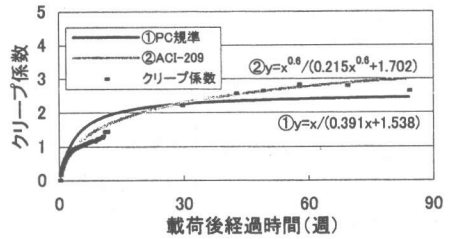


図-3.4 クリープ係数(case4)

この実験は室内放置の環境で9月から約2年で温度変動  $26^{\circ} \sim 5^{\circ} \sim 28^{\circ}$ 、湿度  $90\% \sim 54\% \sim 95\%$  の履歴を受けている。

人工軽量コンクリートのクリープについては弾性係数が小さいため弾性ひずみが大きくなり、普通コンクリートの場合よりかなり小さいといわれており、種々の試験結果が報告されている。<sup>1~3)</sup> しかし、一般には  $\phi_n = 1 \sim 2$  といわれている。

今回の結果では、2年時でクリープ係数は case1 が 1.7, case2 が 2.0, case3 が 3.6, case4 が 2.5 と大きい値となり、回帰式からの最終予想では case1, case2 共に  $\phi_n = 2.0$ 、case3 で  $\phi_n = 3.9$ , case4 で  $\phi_n = 2.6$  となった。

また、各規準に示された設計用  $\phi_n$  を本実験の標準粒度による場合について計算してみると、日本建築学会PC規準では  $\phi_n = 2.6$ , ACI-209 で  $\phi_n = 2.9$ , CIB-FIP'90 で 3.4 となり、今回の実験結果の  $\phi_n$  より大きい値を与えている。それらの予想クリープ経時曲線を図-4 に示す。

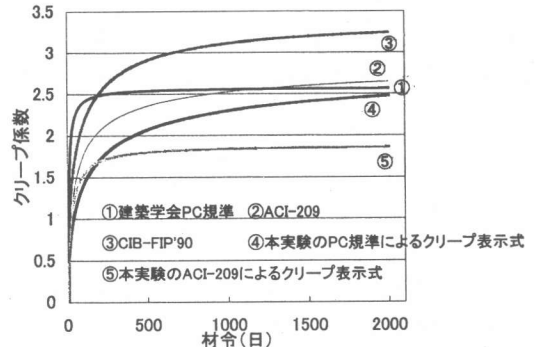


図-4 各国の予想式と本実験のクリープ予想式

#### (3) 経時進行曲線について

各国のコードにおけるクリープ経時進行式が与えられているが、今回の実験値の回帰式と比

較すると図—3.1—3.4 に示すように、30 週では ACI-209 の式がよく近似し、30 週以降では日本建築学会 PC 規準式がよく近似することとなり、一つの式では十分表現できない結果となった。また、各国のクリープ進行曲線を  $\phi_n=1$  として比較したものが図 5 であり、この図から建築学会 PC 規準式が早期に収斂することがわかる。尚、今回の実験値による case1 の回帰式 (ACI-209 タイプ) をあわせて示したが、本実験値式は最も進行速度は緩やかであることがわかる。

#### (4) 回復クリープについて

本実験において、84 週より 7 週及び 41 週の除荷後の回復クリープひずみを計測したが、7 週では case1, case2 はクリープひずみの約 36%, case3 で約 20%, case4 で約 16% の値を示し、41 週では case1 が約 46%, case2 が約 38%, case3 が約 37%, case4 が約 44% となり、CEB-FIP'78 に示されたものに比べて極めて大きくなった。これについては更なる研究が必要と思われる。

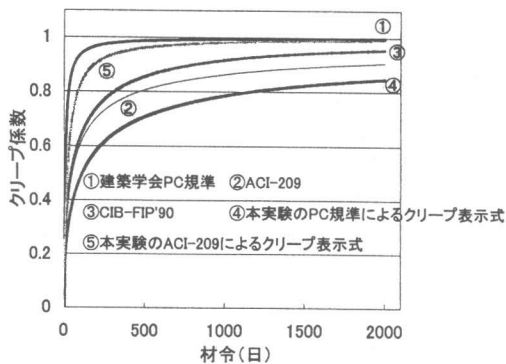


図-5 各国と本実験のクリープ進行速度曲線

### 5. 結論

第二種軽量コンクリートの粒度分布の違いによるコンクリートの物性の一例を述べたが、以下の知見が得られた。

1) スランブは単位セメント及び水量を同じとした場合、標準粒度によるものに比し、粗骨材の粒度を  $10^{\text{mm}} < \phi \leq 15^{\text{mm}}$  ( $5^{\text{mm}}$  を超え  $10^{\text{mm}}$  以下をカットしたもの) では、その分細骨材が増えるので小さくなる。標準粒度のものに炭素繊維(繊維長さ  $3^{\text{mm}}$ , 直径  $15^{\mu}$ ) を  $25\text{N/m}^3$  程度混入したもの

のスランブは、標準程度と大差はない。

- 2) 圧縮強度、弾性係数については標準粒度によるものに比して、粗骨材の粒度を  $10^{\text{mm}} < \phi \leq 15^{\text{mm}}$  にしたものがかなりの上昇がある。
- 3) 乾燥収縮ひずみは粗骨材の粒度を  $10^{\text{mm}} < \phi \leq 15^{\text{mm}}$  にしたものが標準に比してやや小さく、炭素繊維混入のものは約 2 倍となった。
- 4) クリープひずみについても乾燥収縮ひずみと同じ傾向を示した。また、炭素繊維混入のものは標準粒度に比して 1.6 倍の値となった。
- 5) 今回の実験ではいずれもクリープ係数は一般的にいわれているもの ( $\phi_n=1\sim 2$ ) より大きい値 (case1:2.共,  $\phi_n=2.0$ ) を示し、炭素繊維混入で  $\phi_n=2.6$  となった。
- 6) クリープ経時進行は、各国の予想式よりも緩やかな進行となった。
- 7) 以上の結果からは粗骨材の粒度を  $10^{\text{mm}}$  以上  $\sim 15^{\text{mm}}$  以下としたものが工学上やや有利ということができよう。

### 謝辞

本研究は相山女学園大学研究助成(c)によったものであり、卒業生山中聖子、丹菊園枝さんらの協力を得たものである。あわせて謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会：「高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工」, 1992.12, pp30-33
- 2) 人工軽量骨材協会：「ALC concrete 力学的特性」NO.4, 1987.4, pp6-7
- 3) 日本セメント(株)：「ASANO LITE 技術資料」, pp21-22
- 4) 日本メサライト工業(株)：「メサライト」, 1998.5, pp4-5
- 5) 日本建築学会：「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説」, 1998.11, pp114-118
- 6) ACI 209R-92 Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures
- 7) CEB-FIP : Mode code 1990
- 8) 鶴田浩章・松下博通・藤本良雄：高強度コンクリートのクリープ性状に及ぼす粗骨材の破砕値の影響, コンクリート工学, Vol.21, NO.2, pp697-702, 1999