

論文

[2085] 三軸拘束コンクリートのクリープ特性とその後の力学的特性

佐藤孝典^{*1}・梶田佳寛^{*2}・川瀬清孝^{*3}・西田 朗^{*1}

1. はじめに

コンクリートの圧縮クリープに関する研究は、Woolsonが1905年にその現象を発見して以来、DavisとGlanvilleが1930年代にその性状を系統的な実験によってかなりのことを明らかにした。それに続くヨーロッパを中心とする一連の研究の対象は、プレストレストコンクリート構造や鉄筋コンクリート構造の梁のたわみ性状やひび割れ性状を把握するために、梁の曲げ圧縮部を模擬したものであった。

近年のコンクリート構造物の巨大化にともなって、コンファインド効果を積極的に利用したアンボンド型充填鋼管コンクリート構造の柱や、超高強度コンクリートの靱性確保のために多量の横拘束筋を配した柱が登場するようになった。三軸拘束コンクリートのクリープ特性に関する研究はわずかにあるが[1][2][3]、これらの研究における載荷応力比($\sigma_c/c\sigma_B$)はいずれも0.3未満であり、上記の構造ではその範囲をはるかに越えている。

そこで、本論文では、このような柱の安全性を検討するために、三軸拘束コンクリートのクリープ特性とその後の圧縮破壊特性に関する基礎データを提供するものである。とくに、その後の圧縮破壊特性とは、竣工後数年後もしくは数十年後にやって来る地震荷重に対する力学的特性を意識したものである。

2. 長期クリープ実験

2.1 実験概要

実験は1986年～1988年(前半)と、1989年～1991年(後半)の2回に分けて実施された。実験パラメータは、コンクリート強度、拘束剛性、載荷応力比、載荷開始材令、単位水量、骨材種である。多くの試験体は円形鋼管等で拘束されたものであるが、比較のためにスパイラル鉄筋による同等の拘束のものや、無拘束のものや、軸鉄筋入りのものも用意した。コンクリート打設、養生、長期載荷の全工程にわたって一定気温20度、一定湿度60%を保った。載荷応力が200kgf/cm²を越える大きなものとなるので、本実験では特別に開発された自動荷重保持システム(荷重が2%下がるとポンプが自動的に起動する)となっている。

2.2 試験体計画

試験体一覧を、表-1に示す。試験体の寸法は、1986年～1988年(前半)では $\phi 165 \times 500$ mmで鋼管で拘束し、1989年～1991年(後半)では約 $\phi 100 \times 300$ mmでアルミ管で拘束した。クリープ実験では拘束材は降伏応力に達しない程度なので、拘束条件としては拘束剛性に着目した。したがって、鋼管やアルミ管の板厚とスパイラル鉄筋のピッチを調節して

*1 清水建設株式会社 技術研究所 研究員 工修 (正会員)

*2 建設省建築研究所 第2研究部無機材料研究室 室長 工博 (正会員)

*3 新潟大学 建設学科 教授 工博 (正会員)

同一の拘束剛性とした。コンクリート強度に関しては、近年の高強度化を考慮して、 $338\text{kgf/cm}^2 \sim 1086\text{kgf/cm}^2$ とした。その調合を、表-2に示す。一説によるとクリープ現象が水分移動によるものと言われているので[4]、単位水量についても、同一調合強度に対して 155kg/m^3 、 175kg/m^3 、 195kg/m^3 の試験体を用意した。骨材の経年変化や含水性が影響する可能性を考慮して、粗骨材として青梅産砂岩碎石、栃木産石灰岩碎石、南米国産鉄鉱石碎石の三種類とした。それらの性質を、表-3に示す。載荷開始材令は、建築構造物の柱を対象としているので、6週、13週、26週(半年)とした。

2.3 試験体製作

コンクリートの練り混ぜは、定置底開き水平ドラム型強制練りミキサー(容量330リットル)を用い、練り混ぜ時間は約3分程度とした。試験体へのコンクリートの打設は、図-1に示すようにパイププレートで締め固めながら三層に分けて縦打ちした。粗骨材の性質は表-3に示し、細骨材は表-4に示すようにすべて鬼怒川産川砂を用いた。セメントは普通ポルトランドセメントで、その性質は表-5に示す。

円形の鋼管またはアルミ管は、コンクリート打設前に、内面に約0.2mm厚のアスファルト

表-1 試験体一覧

名 称	試験体寸法 D × h × t (mm)	拘 束 条 件		コン ク リ ート			骨 材 種 類	軸 鉄 筋		載荷条件		載荷時弾性歪 解析値 ε el (μ)			
		降伏拘束力 fr (kgf/cm ²)	拘束剛性 Kr (10 ⁴ kgf/cm ²)	ヤング係数 Ec (10 ⁵ kgf/cm ²)	圧縮強度 cσ B (kgf/cm ²)	単位水量 W (kg/m ³)		鉄筋量 R (kg/cm ²)	降伏点強度 Rσy (kgf/cm ²)	材令 (週)	圧力比 σc/cσ B				
C1L05	φ 108×300×4.2	165.4	5.6	3.07	338	175	砂岩碎石	0	0	6	0.50	980			
C1L09	φ 108×300×4.2	165.4	5.6	3.07	338	175					0.90	1980			
C1L11	φ 165×500×2.2	70.7	5.6	2.32	365	195					1.07	3120			
C1L13	φ 108×300×4.2	165.4	5.6	3.07	338	175					1.30	2960			
C1M07	φ 165×500×2.2	70.7	5.6	2.87	448	175	石灰岩碎石				0.65	1060			
C1M08-1				3.40	549	175					0.76	1170			
C1M08-2				2.87	507	155	砂岩碎石				0.77	1970			
C1M09-1				2.87	448	175					0.87	2280			
C1M09-2											13	0.87	1770		
C1M09-3												0.87	2180		
C1M09-4	3.69	471	175				鉄鉱石碎石				6	0.85	2360		
C1M12	2.87	448	175	1.16	2490										
C1H05	φ 108×300×4.2	165.4	5.6	3.61	670	157	0.50			907					
C1H08	φ 165×500×2.2	70.7	5.6	3.25	655	175	0.76			1186					
C1H13	φ 108×300×4.2	165.4	5.6	3.61	670	157	1.30			2770					
C1S05				4.24	1086	150	0.50			580					
C1S09							0.90			1160					
C1S13							1.30			1670					
C2M09	φ 115×300×7.8	258.0	10.2	3.19	459	175	砂岩碎石			6		0.90	1990		
C3M09	φ 109×300×9.7	151.6	12.8									0.90	1960		
A0M03	φ 100×300	0	0	3.19	459	175						1-D10	4203	0.30	370
A1M03												2-D16	3708	0.30	420
A4M03											4-D16	0.30		480	
A8M03											2-D16	0.30		486	
A4S03											4.24	1086	150	0.30	745
S1M08	φ 161×500	101.9 λ ₁ /λ ₂ ≧K (φ 6@13)	5.6	2.87	448	175					0	0	0.77	1740	

表-2 コンクリートの調合

コンクリート 強度 $c\sigma_B$ (kg/cm ²)	W/C	S/A (%)	重量割合 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)
			水 C	セメント S	細骨材 G	粗骨材 H	水和剤 A		
338	60	43	291	784	1089	1.460	17	1.1	
365	45	46	395	433	771	900	0	17	1.4
448	45	40	375	388	702	1058	0.776	10	1.3
549	45	42	375	388	736	1067	0.776	13	1.5
507	45	37	355	344	680	1169	0.826	5	1.2
471	45	38	375	388	669	2039	0.970	12	1.3
670	33	40	357	483	697	1078	5.310	18	1.0
655	35	37	375	500	611	1058	1.000	10	1.5
1086	22	37	350	685	585	1027	15.700	24	0.6
459	45	40	375	388	704	1089	2.330	16	0.8

C 1 L 05
 載荷応力比 ($\sigma_c/c\sigma_B = 0.5$)
 コンクリート強度 (L: 338 ~ 365 kgf/cm^2 , M: 448 ~ 549 kgf/cm^2 ,
 H: 655 ~ 670 kgf/cm^2 , S: 1086 kgf/cm^2)
 拘束剛性 (1: $K_r = 5.6 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$, 2: $K_r = 10.2 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$,
 3: $K_r = 12.8 \text{ kgf/cm}^2$)
 拘束条件 (C: 鋼管またはアルミ管拘束、A: 無拘束のシール有、
 S: スパイラル鉄筋拘束のシール無)

表-3 粗骨材の性質

種 類	比 重		吸水率 (%)	実線率 (%)	ふるい通過率 (%)					粗粒率 (FM)
	絶乾	表乾			25	20	15	10	5	
青梅産砂岩碎石	2.59	2.62	0.96	61.0	100	97	75	25	0	7.03
栃木産石灰岩碎石	2.70	2.73	1.08	59.0	100	100	77	22	0	7.01
南米国産鉄鉱石碎石	4.84	4.87	0.71	60.2	100	97	76	25	0	7.02

トがホットメルト型スプレーで塗布された。その機械的性質は、JIS規格に基づいて試験され、表-6に示すとおりである。鉄筋には、全長にわたる幅3mm×深さ2mmの軸方向溝の中央位置に焼き付け歪ゲージが貼付されている。そして、コンクリート打設時には、両端にナットが溶接された鉄筋は上下端から約20mmずつクリアランスをおいて配置した。その性質は表-6に示すとおりである。

コンクリート打設の翌日、試験体上面はキャッピングされた後、スパイラル鉄筋の試験体(S1M08)以外は、封かん養生とした。超高強度コンクリートの試験体だけは研磨仕上げとした。そして、コンクリート硬化後に、鋼管の0度位置と180度位置の中央高さ100mm検長点に合計4ヶ所に穴(約φ15mm)を設け、軸変形測定用のコンタクトポイントを設置した。鋼管の90度位置と270度位置のコンタクトポイントの高さとそれらの二等分レベルに、合計6枚の鋼管歪ゲージを貼付した。

2.4 載荷および測定方法

測定項目は、ポンプに内蔵された圧力ゲージによる載荷荷重、鋼管歪ゲージによる鋼管の軸方向歪と円周方向歪、コンタクトポイントによるコンクリートの軸変形、そして軸鉄筋入りの試験体では鉄筋歪ゲージによる軸歪である。

図-2に、長期クリープの載荷装置を示す。同一試験体を2ヶまたは3ヶ直列に重ねてセットした。拘束試験体の載荷部位はコンクリート断面のみで、無拘束試験体の載荷部位は全断面である。

3. 長期クリープ後の圧縮実験

3.1 実験概要

長期クリープに関する研究の歴史からも分かるように、長期クリープ後の力学的特性を扱ったものはほとんどない。実際のコンクリート構造物の地震荷重は、竣工後数年もしくは

表-4 細骨材の性質

比 重		吸水率 (%)	ふるい 通 過 率 (%)							粗粒率 (FM)
絶乾	表乾		10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
2.57	2.63	2.29	100	100	92	75	45	17	4	2.66

表-5 セメントの性質

比 重	比 表 面 積 (cm ² /g)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		
		3日	7日	28日
3.16	3270	149	250	417

表-6 鋼管、アルミ管、鉄筋の機械

鋼 材 寸 法 (mm)	降伏強度 $s\sigma_y$ (kgf/cm ²)	引張強度 $s\sigma_t$ (kgf/cm ²)	ヤング係数 $\times 10^6$ (kgf/cm ²)
φ165×2.2 (鋼管)	2650	3110	1.98
φ108×4.2 (7#)	2127	2303	0.72
φ115×7.8 (7#)	1902	2918	0.76
φ109×9.7 (7#)	852	2470	0.72
D10	4203	5881	2.00
D16	3708	5553	1.87

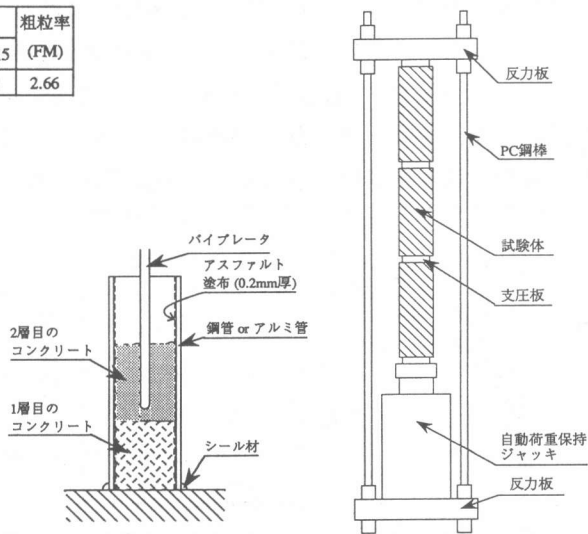


図-1 3層に分けて縦打ち

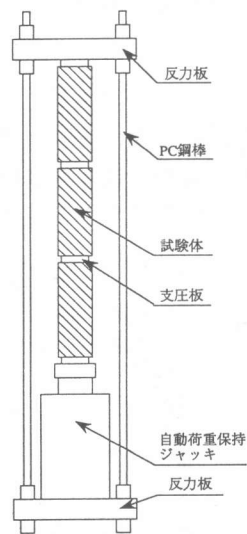


図-2 載荷装置図 (拘束試験体の場合)

は数十年経てやって来ると考えるのが妥当であるが、本実験はまさにこれに当たる。

本試験体のほとんどは載荷応力比($\sigma_c/c\sigma_B$)が1.00前後で、鋼管等で拘束されていない限りクリープ破壊するはずであり、たとえ拘束されていても内部にはマイクロクラックが多数発生していると予想される。

3.2 試験体製作、加力および測定方法

約2年間の長期クリープ後の試験体について、鋼管やアルミ管で拘束した同一試験体2体のうち、1体は冷間切断で慎重にそれを除去したプレーンコンクリートとし、もう1体はそのままで、ともに端面研磨した。そして、他のスパイラル鉄筋試験体や、無拘束試験体や、軸鉄筋入り試験体は、端面研磨のみした。加力および測定方法は、通常を中心圧縮実験と同じでその詳細は文献[5]と同様である。コンクリートの長期クリープによる圧密を予測して、圧縮実験終了後、水銀圧入法により空隙量を測定した。

4. 実験結果

4.1 三軸拘束コンクリートのクリープ性状

コンタクトポイントで測定された軸変形(δ)を検長100mmで除すると軸歪(ε_z)が得られる。載荷すると弾性歪(ε_{el})が生じ、その後長期クリープ歪(ε_{cr})が生じる。すると、クリープ係数(ϕ_{cr})は次式で定義される。

$$\phi_{cr} = \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{el}} \quad \text{①}$$

その際、弾性歪(ε_{el})は非常に小さくコンタクトポイントの測定値はばらつきが大きいので、ここでは文献[5]による解析値を採用する。その値は、表-1に追記する。

図-3～図-5に、載荷応力比($\sigma_c/c\sigma_B$)による比較、拘束剛性による比較、骨材による比較を示す。図-3によると、載荷応力比($\sigma_c/c\sigma_B$)が1.0を越えても、本試験体程度の拘束があれば、クリープ係数の収束値は2.0～2.3で日本建築学会PC規準の規定値とほぼ等しく、通常の載荷応力比($\sigma_c/c\sigma_B$)が0.3の場合とほぼ同じである。

図-4によると、載荷応力比($\sigma_c/c\sigma_B$)が0.9の場合、拘束剛性(Kr)が大きいほどクリープは大きい。さらに、拘束剛性(Kr)が大きい場合、現時点ではクリープ曲線の近似式は対数関数となり、クリープ係数は10年後で4.0～4.5、30年後で9.2～10.3となる。ちなみに、そのときの円周方向歪(ε_θ)は200～500 μ 程度であった。

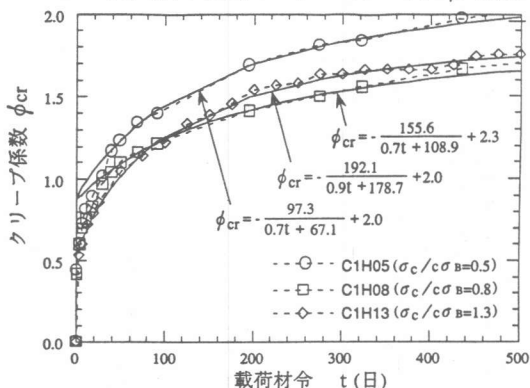


図-3 載荷応力比による比較 ($c\sigma_B=600\text{kg/cm}^2$ 級)

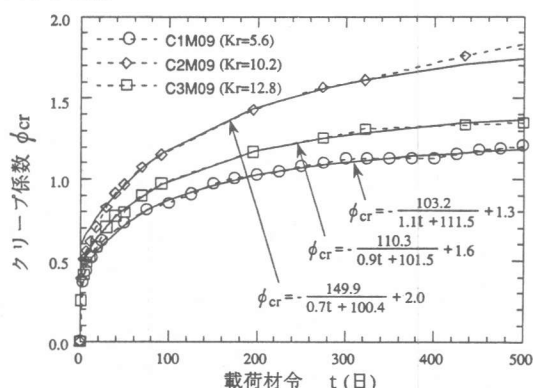


図-4 拘束剛性による比較 ($c\sigma_B=450\text{kg/cm}^2$ 級)

図-5によると、石灰岩が最も大きく、砂岩、鉄鉱石の順にクリープは小さい。これは骨材の含水性が関与している可能性がある。

柱部材を対象とする場合、設計上、クリープの収束値が重要である。図-6に、各種の実験条件の異なる拘束試験体のすべてについて、弾性歪をも含めた全クリープ歪の収束値($\varepsilon_{zal\infty}$)(収束しない場合は10年後の値を代用)と載荷応力比($\sigma_c/c\sigma_B$)の関係を示す。その関係は次のような簡単な式で表現できる。

$$\varepsilon_{zal\infty} = 6800(\sigma_c/c\sigma_B) - 1200(\mu) \text{ ----- (2)}$$

4.2 超高強度コンクリートのクリープ性状

図-7に、超高強度コンクリートと普通強度コンクリートの比較を示す。クリープ係数(ϕ_{cr})は超高強度のほうがはるかに小さいが、弾性歪をも含めた全クリープ歪(ε_{zal})は、図-6にも現われているとおりほとんど同じになる。

4.3 クリープ後のコンクリート強度

長期クリープ後のコンクリート強度は、もともとのコンクリート強度に依存して、通常言われている材令による増加率よりもはるかに大きな強度増加を示したものもある。図-8に鋼管やアルミ管を除去したプレーンコンクリートの強度増加率($m = \sigma_{af}/c\sigma_B$)を示す。鋼管やアルミ管が付いたままの三軸拘束コンクリート強度についても、図示していないが、同程度の傾向を示した。コンクリート強度($c\sigma_B$)が600kgf/cm²を境に、低いものほど増加率は大きく、高いものほど低下率は大きい。また、鋼管と同一の拘束条件としたスパイラル鉄筋による拘束試験体(S1M08)の場合は、ほとんど強度増加が見られなかった。ちなみにこの試験体は、シールしておらず乾燥収縮がある。以上より、コンクリート強度($c\sigma_B$)が600kgf/cm²より低いものに対する大幅な強度増加の原因として、「三軸拘束」と「シール」の二つの要因が考えられる。

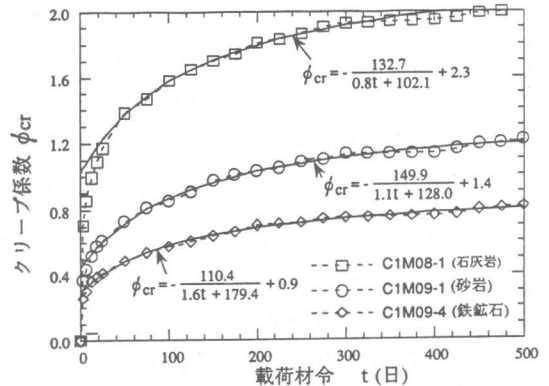


図-5 骨材種による比較 ($c\sigma_B=450\text{kg/cm}^2$ 級)

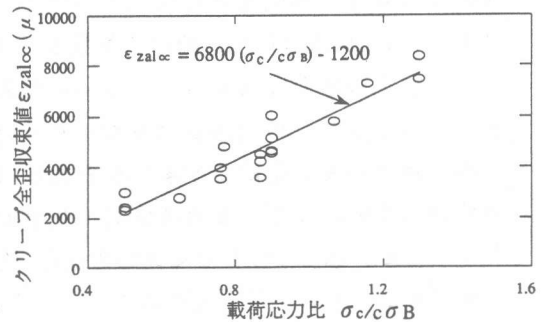


図-6 クリープ全歪収束値と載荷応力比

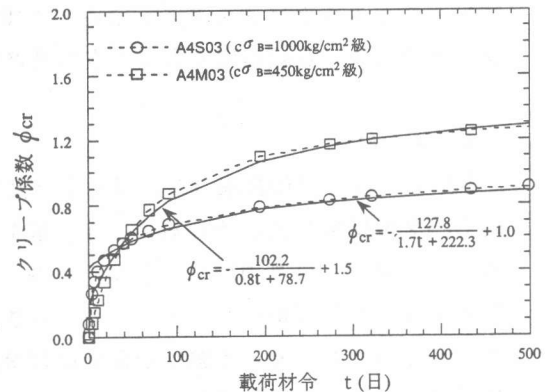


図-7 コンクリート強度による比較 (無拘束の鉄筋入り)

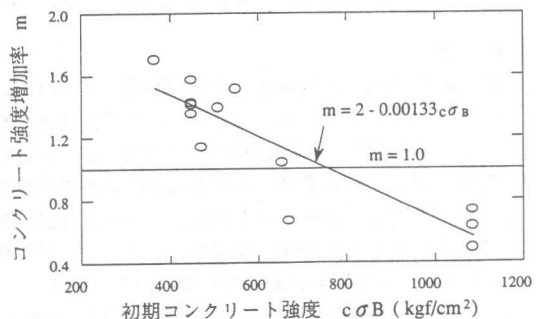


図-8 クリープ前後コンクリート強度増加率

図-9に、載荷前から長期クリープを経て中心圧縮実験をした試験体について、応力-歪関係としての全履歴の一例(C1M09-1)を示す。これは構造物が長期クリープ後に地震荷重が作用する時の挙動に対応する。長期クリープ後については、鋼管を除去したプレーンコンクリートと、鋼管が付いたままの三軸拘束コンクリートの両者を示す。

4.4 長期クリープ後のポロシチー

文献[6]によると、空隙径 $50\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ の範囲の空隙量は圧縮強度と相関性が高いといわれている。図-10にこの範囲の空隙量と長期クリープ前後の強度増加率($\sigma_{af}/c\sigma_B$)の関係を示す。ちなみにこの空隙量は長期クリープ後の測定値である。空隙量が多いほど強度の増加率が大きい。大きいものは60%も強度が上がっている。図-8と合わせて推察すると、空

隙量のもとと多い低強度のコンクリートではクリープの影響で緻密化され増加率が大きく、もとと緻密な高強度のコンクリートではこうした現象が見られず強度が停滞もしくは低下するものと考えられる。なお、本実験では、載荷前の空隙量の測定値がないため、クリープによる圧縮強度の増加を空隙量だけでは十分に説明することができなかった。

5. まとめ

本論文では、三軸拘束コンクリートと超高強度コンクリートのクリープ特性に関する基礎データを提供した。その結果、弾性歪をも含めた全クリープ歪を簡単な数式で表現できることを示し、超高強度コンクリートのクリープは絶対量では通常のコンクリートと同程度であることが分かった。また、シールされた三軸拘束クリープ後のコンクリート強度は、もととのコンクリート強度が低いほど増加率が大きいことを見いだした。実際の構造物は長期クリープ後に地震荷重が作用すると考えるのが妥当であるので、「長期クリープを経た応力-歪関係の全履歴を捕える研究」を今後行う必要があることを示唆する。

参考文献

- [1] J.M.Illston, I.J.Jordan: Creep Prediction for Concrete under Multiaxial Stress, ACI Journal, 1972.3
- [2] 岡島達雄、大岩健次、辻野真一、長谷田直之、岡田謙二、山根昭：複合応力を受けるコンクリートのクリープ、日本建築学会論文報告集、第242号、昭和51年4月
- [3] 松下博通、高垣泰雄、石川達夫：多軸応力下のモルタルのクリープ、セメント技術年XXIX、昭和50年
- [4] 岩崎訓明：コンクリートの特性、pp117~122、共立出版株式会社、昭和50年12月1日
- [5] 佐藤孝典、下戸芳寛、渡辺泰志：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造の中心圧縮性状とその定式化、コンクリート工学年次論文報告集、10-3、1988
- [6] 内川浩：組成と構造の観点から見た硬化セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの類似点と相違点、セメントコンクリート、NO.507、1989.5

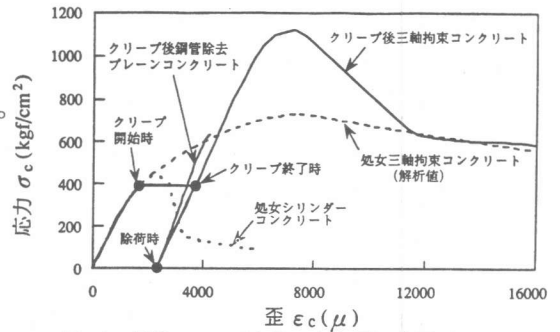


図-9 長期クリープを経た応力-歪の全履歴 (C1M09-1)

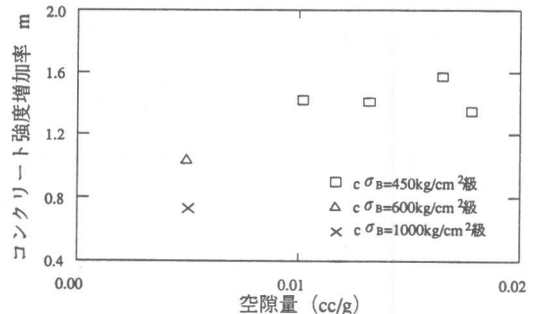


図-10 クリープ前後コンクリート強度増加率と空隙量