

論文

[1100] 高強度鉄筋コンクリートのクリープおよび乾燥収縮特性

松浦恒久*1・角一行*2

1. はじめに

近年、高強度コンクリートを用いた超高層鉄筋コンクリート造の建築物が数多く建設されている。建築物の高層化に伴い下層部の柱には高軸力が作用するようになり、平面計画によっては柱に作用する軸力に2倍近い差が生じる可能性がある。このような場合、長期荷重下における柱の乾燥収縮、クリープに起因する変形により、建築物の安全性以外に床の湾曲、仕上げ材の破損等の使用性についても、いくつかの問題が懸念される。しかしながら、現状では高強度鉄筋コンクリートの乾燥収縮、クリープ性状に関する資料が不足しているため、前述の問題を明らかにするまでには至っていない。

鉄筋コンクリート部材の乾燥収縮およびクリープに関する既往の研究を見ると、ほとんどが普通強度コンクリートを対象としたもので [1] [2] [3]、高強度コンクリートを取り扱ったものは [4] [5]、その数が限られている。

また、長期軸力を受けた後の、力学特性に関する研究は、普通強度コンクリートや三軸拘束コンクリートについての報告が [5] [6]、わずかにあるのみで、ほとんど行われていないのが現状である。

そこで、本研究では柱の長期変形および、クリープ後の力学特性を検討するために、高強度鉄筋コンクリートを用いて乾燥収縮、クリープ試験および中心圧縮実験を行った。本論は実験データから得られた乾燥収縮、クリープ特性およびクリープ後の力学特性に関する知見を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1に試験体の一覧を示す。試験体は角柱(15×15×40cm、中心圧縮実験用:10×10×40cm)の2種類と円柱(10φ×20cm)の3種類である。実験のパラメータは軸筋量と横補強筋量である。試験体数は角柱試験体で乾燥収縮試験用6体、

表-1 試験体一覧

形状	試験体名称	軸鉄筋		横補強筋	
		軸筋	pg (%)	補強筋	pw (%)
角柱	CL8(1~2) SL8(1~2)	8-D10	2.52	2-4φ @40	0.41
	CL4(1~2) SL4(1~2)	4-D10	1.26		
	CL0(1~2) SL0(1~2)	0	0		
	USL0	0	0	0	0
	UCL4 USL4	4-D6	1.28		
円柱	CY4-20 SY4-20	4-D10	3.63	2-4φ @20	1.25
	CY4-40 SY4-40			2-4φ @40	0.63
	CY4-0 SY4-0			0	0
	CY2-20 SY2-20	2-D10	1.86	2-4φ @20	1.25
	CY0-20 SY0-20	0	0		
	CY0-01~3 SY0-01~2	0	0		

pg: 軸筋比
pw: 横補強筋比
試験体形状 (cm)
角柱: 15×15×40
中心圧縮: 10×10×40
円柱: 10φ×20
C Y 4 - 20
横補強筋間隔
軸筋本数
形状 (L:角柱, Y:円柱)
試験内容 (C:クリープ, S:乾燥収縮, U:中心圧縮)

*1 ハザマ 技術研究所 研究員 工修 (正会員)

*2 同 同 同 工博 (同)

クリープ試験用6体、中心圧縮実験用3体の計15体で、円柱は乾燥収縮試験用7体、クリープ試験用8体、の計15体である。

2.2 試験体の製作

試験体に使用したコンクリートの調合、および性能試験結果を表-2、3に、鉄筋の機械的性質を表-4に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は大井川産川砂、粗骨材は秩父産硬質砂岩の碎石（最大粒径13mm）を用いた。混和剤はポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を使用した。コンクリートの練り混ぜは2軸強制練りミキサー（容量100リットル）を用いて行い、練り混ぜ時間は約3分とした。

角柱試験体は、あらかじめ上下面に厚さ9mmの載荷板を取り付けた鋼製型枠を用いて、コンクリートを水平に打設した。円柱試験体は軽量モールドを用いてコンクリートを鉛直に打設し、上下載荷面は材令26日に研磨仕上げを行った。コンクリート打設後48時間で型枠を脱型し、材令26日まで20℃の水中養生を行い、それ以降、温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室に設置した。

2.3 載荷方法および計測項目

クリープ試験は図-1に示す油圧式載荷装置を用いて、試験体を角柱では2体、円柱では3体を直列に重ねて行った。載荷は材令28日に行い、載荷荷重は重錘式の定油圧装置により、角柱で133 kgf/cm²、円柱で191 kgf/cm²に保持した。載荷応力は材令28日圧縮強度のそれぞれ、14.5%、21.5%である。

計測項目は載荷荷重、コンクリートひずみ、鉄筋ひずみの3項目である。載荷荷重の計測は油圧配管に取り付けた圧力ゲージによって行った。コンクリートの軸ひずみは、角柱では埋め込み型ひずみ計（検長100mm）、円柱ではモールドゲージ（検長60mm）で計測を行った。なお、中心圧縮実験を行う試験体の乾燥収縮およびクリープひずみの計測は、コンタクトゲージ（検長100mm、測定精度1/1000mm）で行った。鉄筋のひずみはワイヤーストレインゲージ（検長2mm）で計測を行い、ゲージの貼り付けには加熱硬化型フェノール系接着剤を用いて焼き付け接着とした。

中心圧縮実験は200tアムスラー型万能試験機で行った。計測項目は荷重とコンクリート軸ひず

表-2 調合表

W/C %	S/a %	W kg/m ³	C kg/m ³	S kg/m ³	G kg/m ³	混和剤 C×%
37.5	49.3	165	440	874	899	1.6

表-3 コンクリート性能試験結果

試験体	スランプ cm	空気量 %	圧縮強度 kgf/cm ²	弾性係数 10 ⁵ kgf/cm ²
角柱	20.5	1.7	916	3.88
円柱	21.6	1.6	886	3.66
中心圧縮用	21.5	1.1	862	3.83

表-4 鉄筋の機械的性質

鉄筋	降伏強度 kgf/cm ²	引張強度 kgf/cm ²	弾性係数 10 ⁶ kgf/cm ²	伸び率 %
D10	3685	5252	2.02	21.6
D6	3965	5556	1.83	22.3
φ4	15734	17933	2.08	7.5

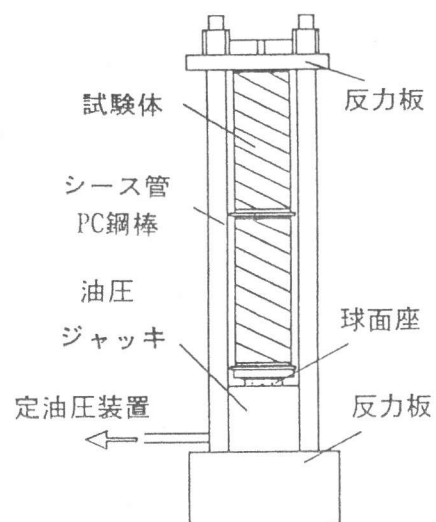


図-1 クリープ試験機

み、上下載荷板間の相対変位の3項目である。荷重の計測はアムスラーからの電圧を変換して行った。コンクリートの軸ひずみの計測はワイヤーストレインゲージ(検長60mm)、上下載荷板間の相対変位は高感度変位計により行った。

3. 乾燥収縮、クリープ試験結果

3.1 乾燥収縮ひずみ

図-2に軸筋により拘束された試験体のひずみ(ϵ_r)と無拘束の試験体のひずみ(自由収縮ひずみ: ϵ_f)の比の経時変化を示す。なお、乾燥収縮ひずみの基準は材令28日のひずみとした。

角柱試験体と円柱試験体を比較すると、円柱試験体の方が、軸筋によるコンクリートの拘束において、軸筋の影響が顕著に現れている。また、角柱試験体が乾燥材令50日程度で、ほぼ一定の値となっているが、円柱試験体では乾燥材令365日を経過してもひずみの比(ϵ_r/ϵ_f)が低下を続けている。

図-3は、図-2で取り上げた試験体の、乾燥材令365日のひずみの比(ϵ_r/ϵ_f)と鉄筋比との関係を表したものである。両パラメータの関係式として、コンクリートと鉄筋の釣合条件から、以下の近似式が得られた。

$$\epsilon_r/\epsilon_f = 1/(1+12.1 p_g) \text{ (角柱)} \quad (1)$$

$$\epsilon_r/\epsilon_f = 1/(1+31.5 p_g) \text{ (円柱)} \quad (2)$$

$$\epsilon_r/\epsilon_f = 1/(1+21.8 p_g) \text{ (角柱+円柱)} \quad (3)$$

図-4、5にコンクリートひずみと鉄筋ひずみの経時変化を示す。角柱試験体ではコンクリートと鉄筋のひずみ量は同じである。しかし、円柱試験体では、乾燥材令50日程度でコンクリートと鉄筋のひずみに差が生じ始め、以降、両者の差は広がっていく。これは試験体の短い円柱試験体では、十分に鉄筋の定着が確保できないため、鉄筋にすべりが生じるためと考えられる。

3.2 クリープ

一般に、比較的低い応力レベルでのクリープ性状は式(4)のクリープ係数(C)で評価できる。

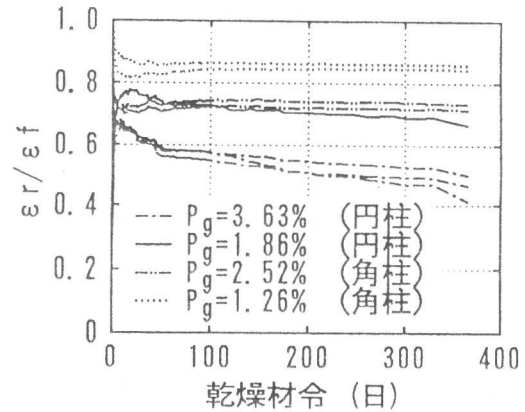


図-2 ϵ_r/ϵ_f の経時変化

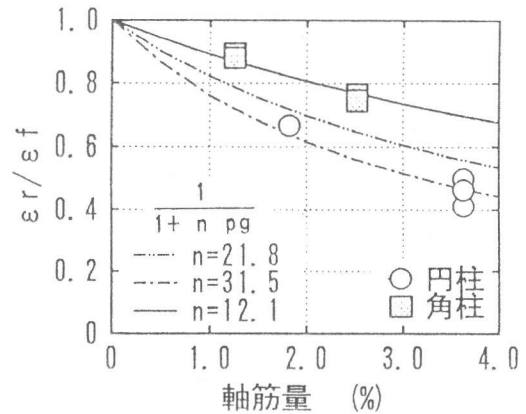


図-3 ϵ_r/ϵ_f と鉄筋量の関係

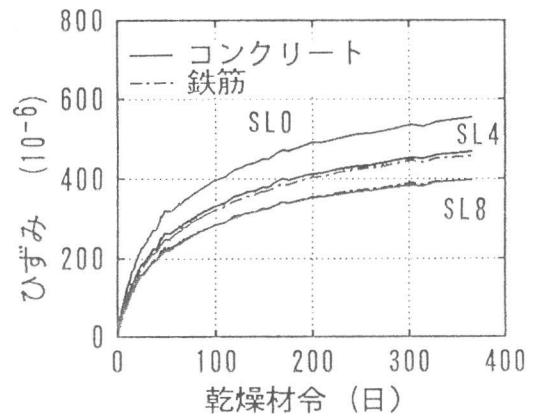


図-4 角柱のひずみの経時変化

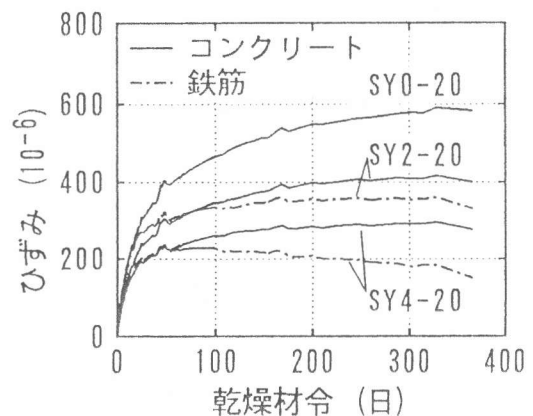


図-5 円柱のひずみの経時変化

$$C = (\varepsilon_c - \varepsilon_s) / \varepsilon_e \quad (4)$$

ε_c : クリープひずみ

ε_s : 乾燥収縮ひずみ

ε_e : 弾性ひずみ

本研究においても、クリープ試験体および、それに対応する乾燥収縮試験体の実験データを式(4)に代入して、載荷材令365日のクリープ係数を導いた。

クリープ係数と載荷材令の関係については文献[7]による式(5)を用いて、実験結果の回帰を行った。得られたクリープ係数(C)、および近似曲線式の定数a、bを表-5に示す。

$$C(t) = t^{0.6} / (a + t^{0.6}) b \quad (5)$$

t: 載荷材令

a: 形状、寸法等により決まる定数

b: 最終クリープ係数

前述の図-3において、ひずみの比($\varepsilon_r / \varepsilon_f$)を鉄筋比(pg)の関数で表したが、この2つのパラメータとクリープ係数(C)および、弾性時のヤング係数比(n)との間には、コンクリートと鉄筋の釣合条件より式(6)が導かれる。

$$\varepsilon_r / \varepsilon_f = 1 / (1 + n(1 + C) pg) \quad (6)$$

n=5.2 (本実験の角柱試験体)

ここで、図-4より、鉄筋とコンクリートの間ですべりが生じてないと思われる角柱試験体に対し式(6)を適用したところ、乾燥材令365日に対して、C=1.3 が得られた。これは表-5の角柱試験体のクリープ係数(C)とよく一致している。

図-6に横補強筋量によるクリープ係数の比較を示す。縦軸は横補強筋により拘束した試験体のクリープ係数(Ccr)と、無拘束の試験体のクリープ係数(Ccf)の比で、横軸は横補強筋量である。横補強筋量の増加にともないクリープ係数も大きくなっている。本実験では横補強筋がクリープの促進に寄与する結果となったが、この点について

表-5 クリープ試験結果

形状	試験体名称	クリープ係数		定数	
		1	2	a	b
角柱	CL8	1.32	1.18	6.85	1.44
	CL4	1.24	1.26	7.15	1.42
	CL0	1.42	1.45	8.16	1.69
円柱	CY4-20	1.27		9.67	1.51
	CY4-40	1.17		24.55	1.89
	CY4-0	0.94		11.95	1.21
	CY2-20	1.32		10.16	1.66
	CY0-20	1.13		10.95	1.48
	CY0-0	1.09	0.91	25.11	1.70

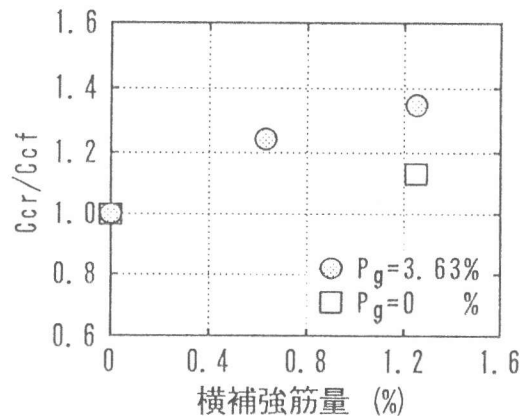


図-6 Ccr/Ccfと横補強筋量の関係

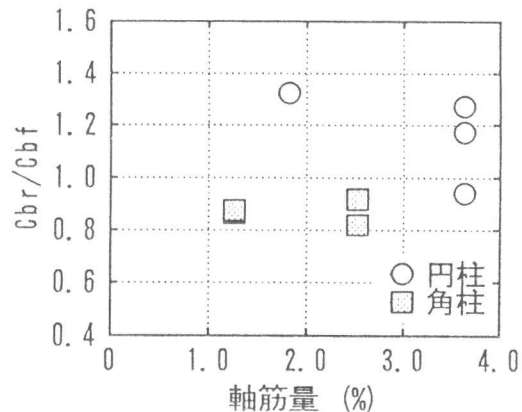


図-7 Cbr/Cbfと軸筋量の関係

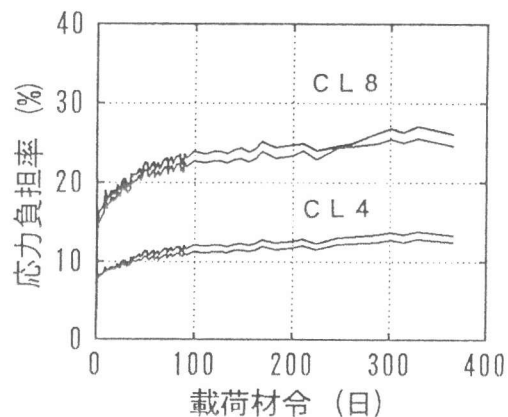


図-8 鉄筋の応力負担率の経時変化

はクリープとポアソン効果の関係等について明らかにする必要がある。

図-7に軸筋量によるクリープ係数の比較を示す。縦軸は同じ横補強筋量で、軸筋を有する試験体のクリープ係数(Cbr)と無筋の試験体のクリープ係数(Cbf)との比を表し、横軸に軸筋量を表す。図より、軸筋量に変化しても明確な傾向は見られず、鉄筋を考慮した弾性ひずみ(ϵ_e)を基準としてクリープ係数を求めれば、軸筋量によるクリープ係数への著しい影響は無いと考えられる。

図-8に乾燥収縮ひずみを除く、鉄筋の増加ひずみから求めた鉄筋の応力負担率を、図-9に乾燥収縮ひずみを除く、鉄筋ひずみの経時変化を示す。コンクリートのクリープにともない、コンクリートから鉄筋へ応力遷移が生じている。軸筋量の増加にともない鉄筋の応力負担率も増加している。しかしながら、鉄筋ひずみについてみると、軸筋量の違いによる、ひずみ量の相違は認められない。

4. クリープ後の中心圧縮実験結果

中心圧縮実験はコンクリート材令 238日に行った。実験に用いた試験体は、材令28日に圧縮強度の11.6%に当たる 100kg/cm^2 の軸力を導入し、導入後、209日(材令237日)に除荷を行ったクリープ後の試験体(UCL4)と、軸力の導入を行わなかった試験体(USL4、USL0)の3体である。除荷前の試験体(UCL4)のクリープ係数は1.12、クリープひずみは 280μ である。

表-6に中心圧縮実験結果を示す。なお、最大耐力には鉄筋負担分も含まれている。また、応力の計算は、鉄筋を考慮した等価断面積を用いて行った。

図-10に長期軸力を経験したコンクリートの、軸力導入前のひずみを基準とした、中心圧縮実験の応力-ひずみ関係を示す。また、図-11には中心圧縮実験のみの、応力-ひずみ関係を示す。

図-10より、クリープ後の試験体

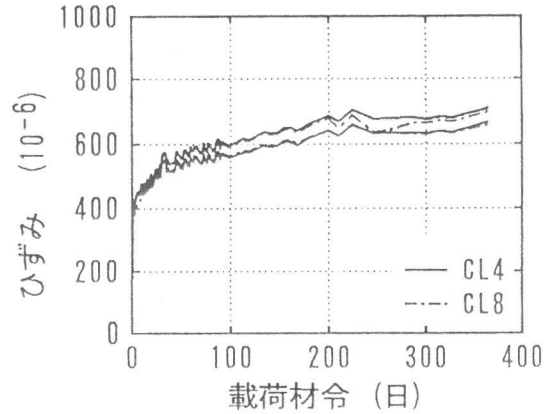


図-9 鉄筋ひずみの経時変化

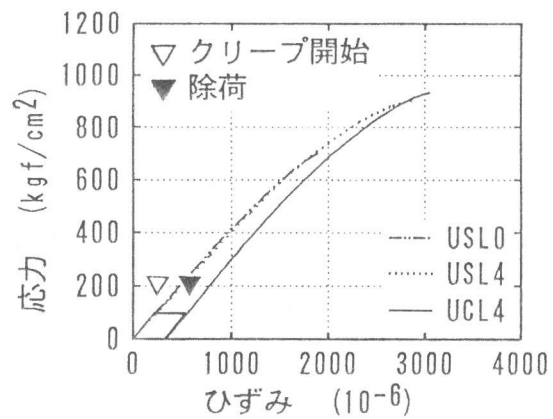


図-10 応力-ひずみ関係

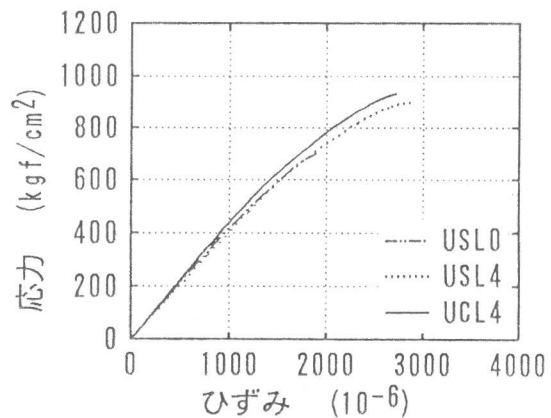


図-11 応力-ひずみ関係

表-6 中心圧縮実験結果

試験体	最大耐力 P_{max} (tf)	P_{max} 時 のひずみ (μ)	割線剛性(10^5kg/cm^2)	
			P_{max}	$1/3 P_{max}$
USL0	71.2	1874	3.80	4.27
USL4	94.6	2816	3.20	4.05
UCL4	98.5	2702	3.47	4.44

(UCL4)は、長期軸力を経験しない試験体(USL4)より若干の耐力上昇がみられる。見かけ上、最大耐力時のひずみも上昇している。しかしながら、図-11より、中心圧縮実験時のみの、応力-ひずみ関係を比較すると、長期軸力の経験に関わらず、最大耐力時のひずみはほぼ同じである。また、剛性についてみると最大耐力時の割線剛性、最大耐力の1/3時の割線剛性とも、クリープ後の試験体(UCL4)の方が10%程度高くなっている。

5. まとめ

高強度鉄筋コンクリートのクリープ、乾燥収縮実験、および中心圧縮実験で次のことが明らかになった。

- 1) 高強度コンクリートの乾燥材令1年における、自由乾燥収縮ひずみは円柱で 604μ 、角柱で 520μ となった。
- 2) クリープ係数は横補強筋量の影響を受け横補強筋量が多くなるほど大きくなるが、軸筋量の影響は見られない。クリープによるコンクリートから鉄筋への応力遷移は軸筋量により異なるが、鉄筋ひずみで比較すると軸筋量に関係なく、ひずみの増加量は同程度である。
- 3) クリープ後のコンクリートの圧縮強度は、長期軸力を経験しないコンクリートより、若干上昇が見られた。また、最大耐力時のコンクリートひずみは、長期軸力の経験に関係なく同程度であるが、最大耐力時の割線剛性、最大耐力の1/3時の割線剛性は、長期軸力を経験したコンクリートの方が、軸力を経験しないものより10%程度高くなっている。

今回、中心圧縮実験を行わなかったクリープ、乾燥収縮の試験体も、中心圧縮実験を行いクリープ後の力学特性について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 大島久次、池永博威：鉄筋により拘束されている場合のコンクリートの乾燥収縮、セメント・コンクリート、No.314、1973
- 2) 向井毅：鉄筋で拘束されたコンクリートの乾燥収縮およびき裂に関する検討、コンクリート・ジャーナル、Vol.8、No.11、1970
- 3) 牧角龍憲、徳光善治：コンクリートの乾燥収縮と収縮拘束に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.3、1981
- 4) 山本俊彦：150MPa超高強度コンクリートのクリープおよび乾燥収縮、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、1993
- 5) 佐藤孝典、榊田佳寛、川瀬清孝、西田朗：三軸拘束コンクリートのクリープ特性とその後の力学特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、1993
- 6) 坂静雄、中島泰一：持続荷重によるコンクリートの疲労強度、材料試験、Vol.5、No.31、1956
- 7) ACI Committee 209: Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures、ACI SP76-10、Designing for Creep and Shrinkage in Concrete Structures、American Concrete Institute、Detroit、Mich.、pp.193~301、1982
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局設計に関する資料、日本建築学会、1987
- 9) 松浦恒久、角一行：高強度鉄筋コンクリートの長期性状に関する研究(その1. 軸鉄筋がクリープ、乾燥収縮に及ぼす影響)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1993