

論文

[1165] 高強度軽量鉄筋コンクリート柱のクリープおよび乾燥収縮特性

正会員 山本俊彦 (東急建設技術研究所)

1. はじめに

高強度軽量コンクリートを用いて超高層鉄筋コンクリート構造物を軽量化することは、耐震的にきわめて有利になると考えられる。しかし、超高層鉄筋コンクリート構造物では床の水平度や外装材の変形の点から、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による軸方向の長期変形が重要な問題となる。既に普通コンクリートに関しては高強度鉄筋コンクリート柱試験体を用いて長期変形特性を調べる実験[1]が行われている。しかし高強度軽量コンクリートに関してはクリープや乾燥収縮に関する資料は少なく、実験もほとんど無筋の小型試験体で行なわれており[2]、長期変形特性を解明するまでには至っていない。また、超高層鉄筋コンクリート構造物では柱の受ける軸力がかなり大きくなり、一旦地震により柱が大きな損傷を受けた場合、柱の軸方向剛性の低下やクリープ歪みにより構造物全体の長期的な変形が著しく大きくなる恐れがある。

このため、本実験では実際の柱に近い試験体を用いて高強度軽量コンクリートのクリープと乾燥収縮特性、および地震により大きな損傷を受けた後の柱のクリープ特性の把握を行なった。

2. 実験概要

2.1 試験体

実験に用いた試験体を図-1、表-1に示す。曲げせん断実験用試験体L1, L2は断面および長さが25×25×100cmで主筋比2.44%(12-D13)、横補強筋比0.50%(4-U4)である。横補強筋には十分なコンクリート拘束効果を得るため高強度鉄筋を用いた。クリープおよび乾燥収縮用の直方体試験体は、10×10×40cm、25×25×50cm、50×50×100cmの3種類である。試験体は、コンクリート打設後7日

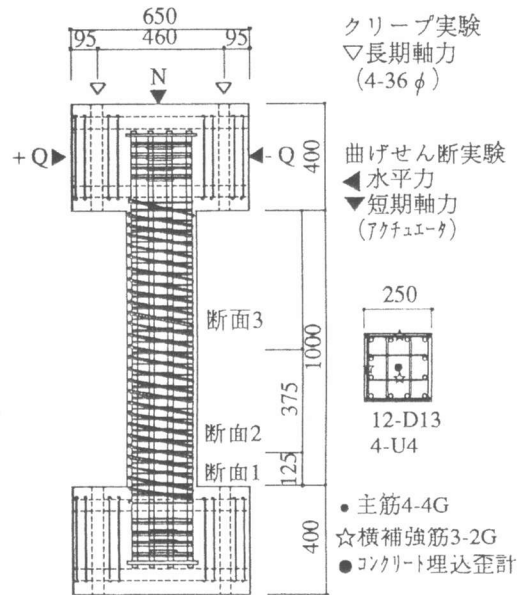


図-1 L-1, L-2試験体

表-1 試験体一覧表

実験項目	No.	試験体名称	形状(cm) (B×D×L)	軸方向鉄筋		横補強筋	
				軸筋	比(%)	スパン	
曲げ 剪断*	1	L-1	25×25×100	12-D13	2.44	4-U4@40	
	2	L-2	25×25×100	12-D13	2.44	4-U4@40	
	クリープ	3	LC-1	10×10×40	4-D10	2.86	2-U4@32
		4	LC-2	10×10×40	4-D10	2.86	2-U4@32
		5	LC-3	10×10×40	4-D6	1.28	2-U4@32
		6	LC-4	10×10×40	-	0	-
		7	LC-5	10×10×40	-	0	-
	8	LC-6	25×25×50	24-D13	4.88	4-U4@40	
	9	LC-7	25×25×50	12-D13	2.44	4-U4@40	
	10	LC-8	25×25×50	-	0	-	
	11	LC-9	50×50×100	24-D25	4.88	2-U6@80	
	12	LC-10	50×50×100	12-D25	2.44	2-U6@80	
	13	LC-11	50×50×100	-	0	-	
乾燥 収縮	14	LS-1	10×10×40	4-D10	2.86	2-U4@32	
	15	LS-2	10×10×40	4-D10	2.86	2-U4@32	
	16	LS-3	10×10×40	4-D6	1.28	2-U4@32	
	17	LS-4	10×10×40	-	0	-	
	18	LS-5	10×10×40	-	0	-	
	19	LS-6	25×25×50	24-D13	4.88	4-U4@40	
	20	LS-7	25×25×50	12-D13	2.44	4-U4@40	
	21	LS-8	25×25×50	-	0	-	
	22	LS-9	50×50×100	24-D25	4.88	2-U6@80	
	23	LS-10	50×50×100	12-D25	2.44	2-U6@80	
	24	LS-11	50×50×100	-	0	-	

*曲げせん断実験後クリープ実験

間湿潤養生を行ない、その後型枠を脱型し実験室内に自然放置した。

2.2 使用材料

表-2にコンクリートの配合、表-3に強度試験結果を示す。コンクリートは一種軽量とし、目標圧縮強度を4週で400kgf/cm²とした。細骨材は奥多摩および富津産で人工軽量骨材は非造粒型を用いた。混和材は、標準型AE減水剤を用いた。コンクリートの圧縮強度は試験体と同じ養生条件の10φ×20cm現場気中養生供試体で409kgf/cm²、弾性係数は1.63×10⁵kgf/cm²、比重1.86となった。表-4に鉄筋の機械的性質を示す。

2.3 実験方法

実験は①曲げせん断実験後クリープ実験、②クリープ実験、③乾燥収縮実験の3種類である。①の試験体L1、L2は材令24-28日に曲げせん断実験を行ない柱上下の相対変位を1/100まで変形させ、その後材令28日で140kgf/cm²(0.34σ_c)の長期軸力を導入した。曲げせん断実験では一定軸力の中柱と変動軸力を受ける外柱を想定し、L1では短期一定軸力140kgf/cm²(0.34σ_c)、L2では280kgf/cm²(0.68σ_c)を導入した。載荷は、アクチュエータ3台により柱に逆対称モーメントを加えた。載荷履歴は試験体の部材角Rで制御し、1/1000、1/400を各一回、1/200、1/100を各3回繰り返した。②クリープ実験ではPC鋼棒により材令28日で140kgf/cm²(0.34σ_c)の長期軸力を導入した。軸力は、荷重変動を3%以内になるよう調整した。③乾燥収縮実験ではそのまま実験室内に放置した。

2.4 測定方法

①試験体L1、L2のコンクリートと主筋の軸方向歪、および横補強筋の歪は、図-1に示すように試験体中央(断面3)、柱脚から12.5cm(断面2)、柱脚(断面1)で行なった。コンクリートの歪は各断面の中央一点で長さ10cmの埋め込み歪計により、また、主筋は各断面の四角で4Gageにより、横補強筋は3点を2Gageにより測定した。柱の全体の変形は、変位計により測定した。②クリープ実験および③乾燥収縮実験では歪は、長さ10cmの埋め込み歪計を10×10×40cmでは断面の中央に一個所、25×25×50cmおよび50×50×100cmでは二個所に配して測定した。測定歪の測定原点は型枠脱型直前の材令7日とした。

3. 実験結果

3.1 実験室温湿度および試験体温度

実験室の温度は、7.4℃～37.4℃の間で変化し材令276日までの平均は、21.4℃であった。相対湿度は、13%～90%の間で変化し平均63%であった。なお、各歪計の温度変化による影響は小さいので、温度による歪の補正は行なわなかった。

3.2 曲げせん断実験

表-5に実験結果の一覧を示す。曲げせん断実験終了後軸方向に残留変形が生じ、短期軸力が0.34σ_cのL1で0.66mm、同0.68σ_cのL2で9.99mmとなった。コンクリートの最大歪はL1で2,110μ、L2で29,000μ、主筋の最大歪はL1で24,500μ、L2で25,600μとなった。また、横補強筋の歪はL2で

表-2 コンクリートの配合

種類	セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	W/C (%)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	スラック (cm)	粗骨材径 (mm)
軽量	379	179	47	771	461	18	15

表-3 コンクリート強度

コンクリート	供試体	材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	比重
軽量	標準水中	28	377	1.75×10 ⁵	1.96
	現場気中	28	409	1.63×10 ⁵	1.86

表-4 鋼材の機械的性質

種類	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	伸び (%)
D6	4,100	4,960	2.05×10 ⁶	25.0
D10	4,000	5,790	1.97×10 ⁶	22.4
D13	3,450	5,100	1.91×10 ⁶	19.9
D25	3,830	5,430	1.94×10 ⁶	-
U4	18,000	19,800	2.11×10 ⁶	5.2
U6	13,800	14,600	2.25×10 ⁶	9.2

表-5 曲げせん断実験結果一覧表

**($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)

試験体	載荷時弾性係数**			除荷時弾性係数**			残留軸変形 (mm)	コンクリート最大歪(μ)			鋼材最大歪(μ)		
	断面1	断面2	断面3	断面1	断面2	断面3		断面1	断面2	断面3	主筋	スライム	中子
L1	2.83	2.04	2.08	1.65	1.12	2.11	0.63	1,480	2,110	859	24,500	1,010	716
L2	2.30	1.72	1.76	1.42	-	1.71	9.99	5,990	29,000	2,430	25,600	3,330	8,660

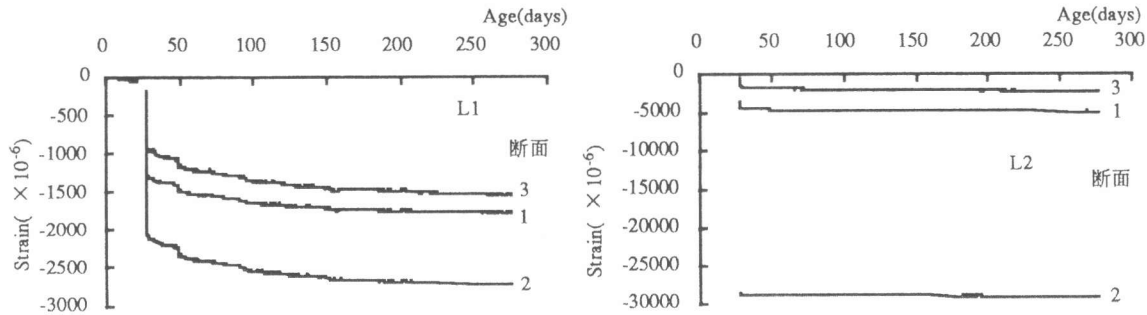


図-2 曲げせん断実験後のクリープ

増大したが降伏歪には至らなかった。

3.3 曲げせん断実験後のクリープ実験

実験結果を表-6に、各断面のコンクリート歪の変化を図-2に示す。曲げせん断実験により塑性ヒンジが生じた部分の剛性低下は大きいですが、長期的な歪の増大はそれほど大きくなかった。内側横補強筋の中子がほぼ降伏に達したL2でも700 μ 以下であった。L1の断面3を基準にした歪の増大率は、L2のヒンジ部を除いて1.0前後であった。

3.4 クリープ実験

表-7に実験結果を、図-3にコンクリート歪の変化を示す。長期軸力140kgf/cm²導入時のコンクリート弾性係数は、断面10cm \times 10cmでは鉄筋を考慮した断面剛性にはほぼ等しい値を示した。断面が25cm以上の場合は、軸力の導入に1時間以上を要したため、初期のクリープ歪が含まれ、鉄筋を考慮した断面剛性計算値を下回った。クリープ歪は、断面の大きさ、鉄筋の量によって異なった。載荷時間の影響を除いたクリープ係数3と鉄筋の影響を考慮したCEB-FIP [3] 式の計算値と比較すると、無筋の場合のクリープ係数は計算値に近いが、有筋の場合は

表-6 曲げせん断実験試験体のクリープ実験結果

**($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)

試験体	載荷時弾性係数**			載荷時弾性歪(μ)			増加歪(材令28-276日)			歪増大係数		
	断面1	断面2	断面3	断面1	断面2	断面3	断面1	断面2	断面3	断面1	断面2	断面3
L1	1.84	1.20	2.05	763	1164	682	537	756	666	0.70	0.65	0.98
L2	1.79	-	1.64	781	250	854	425	401	689	0.54	1.60	0.81

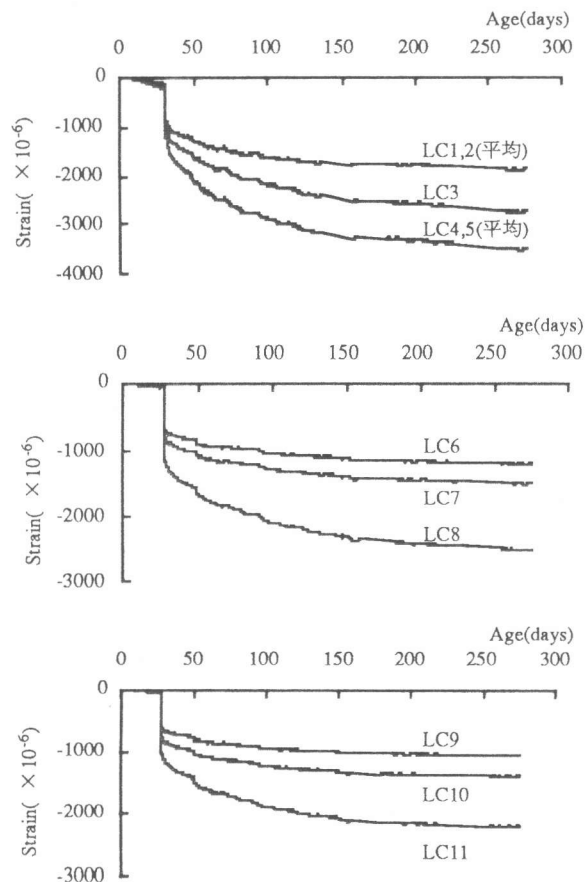


図-3 クリープ歪の変化

表-7 クリープ実験結果

**($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)

試験体	断面 (cm)	主筋比 (%)	載荷時** 弾性係数	載荷時 歪(μ)	増加歪 (μ)	全歪 (μ)	クリープ 係数1	クリープ 係数2	クリープ 係数3	クリープ* 係数比	クリープ係数 (CEB-FIP)	クリープ低 減係数	係数比* 低減係数
LC-1,2	10	2.86	2.04	686	1,045	1,731	1.52	1.37	1.51	0.68	1.11	0.52	1.33
LC-3	10	1.28	1.76	797	1,790	2,587	2.25	1.84	2.02	0.91	1.49	0.69	1.32
LC-4,5	10	0.00	1.57	894	2,372	3,266	2.65	2.01	2.21	1.00	2.15	1.00	1.00
LC-6	25	4.88	2.23	627	533	1,160	0.85	0.77	0.97	0.57	0.76	0.40	1.42
LC-7	25	2.44	1.94	723	724	1,447	1.00	0.83	0.98	0.58	1.02	0.57	1.01
LC-8	25	0.00	1.40	1,000	1,460	2,460	1.46	1.26	1.70	1.00	1.89	1.00	1.00
LC-9	50	4.88	2.43	576	457	1,033	0.79	0.73	0.78	0.51	0.65	0.42	1.23
LC-10	50	2.44	1.96	713	649	1,362	0.91	0.84	0.93	0.63	0.91	0.59	1.07
LC-11	50	0.00	1.52	924	1,251	2,175	1.35	1.28	1.52	1.00	1.55	1.00	1.00

クリープ係数1=増加歪/載荷時歪

クリープ係数2=(増加歪-乾燥収縮歪)/載荷時歪

クリープ係数3=(全歪-乾燥収縮歪)/弾性計算歪-1

クリープ係数比=クリープ係数3/無筋試験体クリープ係数

クリープ低減係数=1/(1+ $\rho \eta (1+\chi \phi)$) $\rho = A_s/A_c$, $\eta = E_s/E_c 28$, $\chi = \text{aging coefficient}$, $\phi = \text{クリープ係数3}$

鉄筋量が大きくなるほど、また断面が小さくなるほどこれより大きくなる傾向を示した。

3.5 乾燥収縮実験

表-8に実験結果を示す。乾燥収縮は断面の大きさ、鉄筋量によって大きく異なった。実験値はCEB-FEP式による計算値とかなり異なった値を示した。断面10cmのものはかなり大きく、一方、断面が大きくなるに従って乾燥収縮の値は小さくなった。

表-8 乾燥収縮実験結果

試験体	断面 (cm)	主筋比 (%)	増加歪(μ) (材令7-276)	増加歪(μ) (材令28-276)	CEB-FIP(μ) (材令7-276)
LS-1,2	10	2.86	228	106	-
LS-3	10	1.28	471	326	-
LS-4,5	10	0.00	766	575	431
LS-6	25	4.88	67	48	-
LS-7	25	2.44	178	125	-
LS-8	25	0.00	271	200	293
LS-9	50	4.88	46	36	-
LS-10	50	2.44	68	50	-
LS-11	50	0.00	97	64	140

4 まとめ

高強度軽量コンクリート柱のクリープおよび乾燥収縮実験で以下のことが明らかになった。

- 1) 高強度軽量鉄筋コンクリート柱試験体の長期的な変形は、載荷後材令276日までの歪増大率は、載荷時歪に対して1.0程度以下であった。大地震による被害を想定し柱層間変位1/100により短期的にかなりの損傷を受けた場合でも、横補強筋が降伏しない範囲では著しい変形の増大はなかった。
- 2) 高強度軽量コンクリートのクリープ係数は材令276日で2.21[10cm],1.70[25cm],1.52[50cm]で、CEB-FIP式による終局時のクリープ係数は2.9~2.4程度と予測される。
- 3) 高強度軽量コンクリートの乾燥収縮は、766 μ (10cm),271 μ (25cm),97 μ (50cm)と断面の大きさにより著しく異なり、断面が大きくなるに従ってかなり小さくなった。断面が大きくなると乾燥速度が遅いことの影響も考えられ、さらに長期の測定が必要と考えられる。

参考文献

- [1] 山本俊彦：高強度鉄筋コンクリート柱のクリープおよび乾燥収縮特性、コンクリート工学年次大会、1990
- [2] 友沢史紀：高強度軽量コンクリートの基礎的性質(その1-4)、日本建築学会大会、1986-1987
- [3] CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, 3rd Edition, 1978