

[145] 鉄筋コンクリート壁要素の圧縮変形に関する研究

正会員 ○池田尚治 (横浜国立大学工学部)
 大塚昭夫 (首都高速道路公団神奈川建設局)
 恵谷舜吾 (首都高速道路公団神奈川建設局)
 正会員 山口隆裕 (横浜国立大学工学部)

1. 緒言

鉄筋コンクリート構造物の力学的挙動を解明しようとする場合、実構造物にできるだけ相似で寸法の大きい供試体を用いて実験を行うのが望まれるが、実験の規模が大きくなって種々の困難を伴うことになる。そこで、実験を合理的に行う方策として実験を2段階に分け、第1段階では、構造物の一部をとり出して要素としての性能を把握し、第2段階で縮尺率の大きい全体モデルの挙動を実験的に把握して両者を複合させ、実構造物の性能の検討を行うことが考えられる。本研究は首都高速道路公団が横浜港横断橋の下部構造に採用した多柱基礎構造の設計検討のための基礎資料を得ることを目的とした一連の実験研究の一部をなすものである。この多柱基礎構造は、円環柱とフーチングとから成るが円環柱には地震時に大きな圧縮力と水平力が作用するのでこれに関する検討が重要である。検討の方法としては上述の方策により第1段階として円環柱の一部を想定した壁要素による供試体を用いて壁要素の一軸圧縮実験を行い、軸方向鉄筋、フープ筋、およびつなぎ筋の効果と圧縮破壊時の靱性との関係を求めた。本論文はこの実験結果を報告するとともに、この成果を踏まえて鉄筋コンクリートの圧縮変形特性の基本的事項について述べるものである。

2. 供試体の設計

実構造物の多柱ケーソンは外径10m、壁厚1.5m、長さ40m以上の円環断面を有するコンクリート構造物である。柱頭部の円環断面には軸方向鉄筋として、外面近くにD51が2層、内面近くにD32が1層配置されている。それぞれの鉄筋比は1.50%および0.15%である。フープ筋比は外側が0.57%(D29)、内側が0.17%(D22)であり、つなぎ筋比は0.19%(D16)である。圧縮試験機の容量が200tmであるので供試体の断面寸法は、厚さ15cm、幅24cmとし、壁厚を実構造物の1/10とした。配筋方法については、実験の容易さと精度を考慮して対称断面となるようにした。ただし、配筋量としては実構造物の値を参照して定めた。即ち、軸方向鉄筋は鉄筋比2.11%(6D13)、3.31%(6D16)の2種類の他、無筋に近い場合として鉄筋比0.35%(4D6)のものも含めた。横方向鉄筋にはD6を用い、片面分の鉄筋に対して横方向鉄筋比を0%、0.1%、0.26%、0.53%の4段階に変化させることとした。つなぎ筋はD6を用いて鉄筋比を0%~0.99%の6段階に変化させた。また、つなぎ筋については端部に直角フックのあるものとないものを用いて比較することとした。供試体の総数は23体である。図-1に供試体の形状と寸法を示す。載荷方法としては荷重を単調に増加させる方法を主としたが一部の供試体では繰返し圧縮力を作用させることとした。以上に述べた内容の供試体の一覧を表-1に示す。なお、表-1の中で示される計算耐力は供試体の寸法が小さいので通常用いられる低減係数0.85を用いずに次式によって最大耐力を計算した値である。

$$P_u = \sigma_c A_c + \sigma_{sy} A_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 σ_c : コンクリートの圧縮強度 (試験時), A_c : コンクリートの断面積

σ_{sy} : 軸方向鉄筋の降伏強度, A_s : 鉄筋断面積

3. 使用材料と供試体の製作

実験に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料特性は表-2、表-3に示す通りである。供試体のうちNo.1~No.20の20体は同一バッチのコンクリートであり、標準養生供試体の材令28日圧縮強度は287 kgf/cm^2 、供試体と同様に養生した場合の載

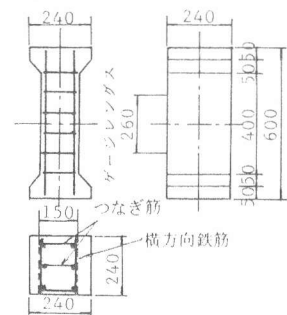


図-1 供試体の形状

表-1 供試体の一覧と実験結果

試供体 No.	軸筋比	軸筋	横筋比 (片側)	横筋 (片側)	つなぎ筋比	つなぎ筋	配筋形状	実験値 最大耐力 (Lon)	計算耐力 (Lon)	備考	配筋形状
1	0.0035	4×D6	0.001	160D6	----	----	(a)	93.8	116	○石ウレシカゴに行う	
2	0.0035	4×D6	0.053	40D6	0.0022	D6	(b)	96.8	116		
3	0.0035	4×D6	0.053	40D6	0.0033	D6	(c)	101	116		
4	0.0211	6×D13	0.001	160D6	----	----	(d)	111	140		
5	0.0211	6×D13	0.0026	80D6	0.0025	D6	(e)	114	140		
6	0.0211	6×D13	0.0026	80D6	0.0049	D6	(g)	126	140		
7	0.0211	6×D13	0.0026	80D6	0.0049	D6	(h)	128	140		
8	0.0211	6×D13	0.0026	80D6	0.0099	D6	(i)	125	140		
9	0.0211	6×D13	0.001	160D6	0.0016	D6	(e)	119	140	○実験計画と異なる 繰返し載荷	
10	0.0211	6×D13	0.0026	80D6	0.0049	D6	(g)	118	140		
11	0.0211	6×D13	0.0026	80D6	0.0099	D6	(i)	119	140		
12	0.0211	6×D13	0.0026	80D6	0.0025	D6	(e)	115	140	つなぎ筋 フックつき	
13	0.0211	6×D13	0.0026	80D6	0.0049	D6	(g)	121	140		
14	0.0211	6×D13	0.0026	80D6	0.0049	D6	(h)	116	140		
15	0.0331	6×D16	0.0026	80D6	0.0025	D6	(f)	136	157	つなぎ筋 フックつき	
16	0.0331	6×D16	0.0026	80D6	0.0049	D6	(g)	134	157		
17	0.0331	6×D16	0.0053	40D6	0.0099	D6	(i)	137	157		
18	0.0331	6×D16	0.0026	80D6	0.0025	D6	(f)	135	157	追加実験 最後に除荷した	
19	0.0331	6×D16	0.0026	80D6	0.0049	D6	(g)	122	157		
20	0.0331	6×D16	0.0053	40D6	0.0099	D6	(i)	127	157		
21	0.0035	4×D6	0.001	160D6	----	----	(a)	145	135		
22	0.0211	6×D13	0.001	160D6	----	----	(d)	136	159		
23	0.0211	6×D13	0.001	160D6	----	----	(d)	139	159		

荷時の圧縮強度は 309 kg/cm²であった。No. 21～No. 23 の 3 体は追加供試体であってコンクリートの強度が若干高くなっている。コンクリートの打込みは供試体の圧縮軸方向が鉛直になるようにして行った。供試体は材令 1 週まで湿潤養生した。図-2、図-3 にそれぞれコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみの関係を示す。

4. 実験方法

載荷は 200 ton 万能試験機を用いて供試体の中心に圧縮力を作用させた。供試体の上側には鋼厚板を配し、その上の球面支承を介して荷重を作用させた。軸方向変位の計測にはゲージ長を 260 mm とし、ひずみ計型の変位計を軸対称に配置し、多点ひずみ計測器およびマイクロコンピュータによってそれぞれ静的および動的変位を記録した。鉄筋およびコンクリートの表面にはひずみゲージを貼付して静的に計測した。破壊の状況はビデオカメラで記録した。なお、動的計測は 3 Hz で計測値を直接フロッピーディスクに記録した。

5. 実験結果

(1) 耐力と破壊モード 実験結果の一覧を表-1 に示す。各供試体の最大耐力は(1)式で求めた計算値と比べて 10% 以上も低い値である。低減係数 0.85 を用いて計算してもほとんどの実験値はこの計算値よりやや低い値である。図-4 に動的計測による荷重と変位との関係の測定結果を示す。この図に示されるように軸鉄筋と横方向鉄筋が僅かで、つなぎ筋がない No. 1、No. 21 供試体は極めて脆性的に破壊し、ひずみ軟化域は全く認められない。この場合に計測された最大変位から求めたひずみは -0.23% ~ -0.27% 程度であった。軸方向鉄筋があるとその分だけ耐力が増えるとともに圧縮変形性能も若干向上する傾向が見られ、つなぎ筋および横方向鉄筋が入ると一層好ましい変形性能を示した。しかしながら、供試体の圧縮変形性能は必ずしもこれらの鉄筋の存在と十分に対応した実験結果とはなっていない。これは、最大耐力に近い

表-2 試験体と同様に養生した円柱供試体の実験時における圧縮強度、引張強度およびヤング係数

打設日	試験日	材令 (日)	圧縮強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (kg/cm ²)	備考	適用
3.7	4.13	37	306	23	2.2×10 ⁶	○値は 3 本の平均値 ○圧縮は φ10×20 ○引張は φ15×15 を使用	No. 1 ~ No. 20
	4.21	45	312	-----	-----		
5.26	8.5	71	363	-----	2.6×10 ⁶		No. 21 ~ No. 23

表-3 供試体で使用された鋼材の品質

名称	規格	寸法 (mm)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	曲げ	備考	適用
鉄筋	SD35	D6	37.5	54.2	26.3	Good	mill sheet	No. 1 ~ No. 20 No. 21 ~ No. 23
			36.1	51.7	20.0	test		
	SD30	D13	37.5	54.9	24.3	Good	mill sheet	
			39.0	57.9	28.4	test		
	SD30	D16	38.6	57.1	25.9	Good	mill sheet	
			38.9	59.0	24.3	test		
SD35	D6	32.6	46.3	18.0	test			
SD30	D13	37.6	55.9	23.5	test			

注 ○値は、2本～3本の平均値である。
○test は横浜国立大学構造実験棟で行った試験結果である。

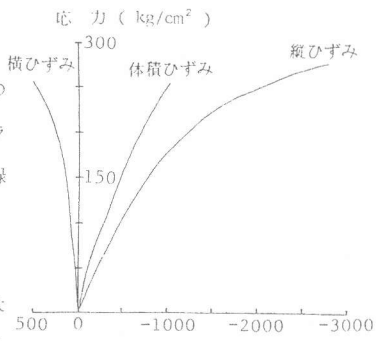


図-2 コンクリートの応力-ひずみ曲線

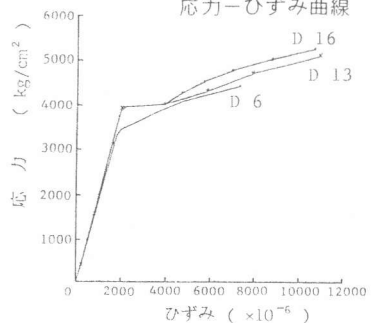


図-3 鉄筋の応力-ひずみ曲線

荷重に達すると供試体の変形が一樣でなくなり、これによって偏心の影響が急速に助長されて曲げの影響が加わるからである。最終状態に到るまで応力が均一に加わった場合のみが、No.12のような滑らかな下降域をもつ変形曲線を得ることができるのであるが、横方向鉄筋やつなぎ筋がなければ破壊は脆性的となる。最大耐力が(1)式で求めた計算値より小さいのはこのような偏心載荷の影響が大きいものと思われるが、供試体のたて横比、鉄筋の存在およびコンクリートの材料分離の影響もあると思われる。

繰返して載荷する場合には図-5に示すように塑性変形が累積するために変形能力は増大するが最大耐力は単調載荷の場合に比して5%程度減少した。横方向鉄筋やつなぎ筋が多い程コンクリートを拘束するために終局耐力にとって有利と考えられるが本実験の範囲では必ずしもそのようにはならなかった。これは、これらの鉄筋があまり多いとコンクリートの品質を低下させるためと思われる。

(2) 鉄筋およびコンクリートのひずみ

図-6、図-7、図-8にそれぞれ軸鉄筋、横方向鉄筋、つなぎ筋のひずみの測定結果を示す。軸鉄筋については破壊時の供試体の偏心載荷の有無にかかわらず圧縮ひずみが降伏点を越えていた。したがって鉄筋コンクリート要素の圧縮時の終局耐力算定には鉄筋の降伏応力を見込んでよいことが確かめられた。横方向鉄筋およびつなぎ筋のひずみは最大荷重近傍までは 500×10^{-6} 程度以内であるがそれ以降に急速に増大し、降伏点近くに達するものが多く見られた。このことはこれらの拘束鉄筋が十分に供試体の耐力に寄与しているものと判断できる。なお、つなぎ筋の端部に直角フックをつけたものは最大ひずみが若干増加し、破壊モードもやや改善されたがフックの全くない場合でもつなぎ筋として十分に役割をはたしていることから、鉄筋コンクリート構造物の配筋の合理化のために場合によってはフックを省略できることを示唆しているものと思われる。つなぎ筋の必要量を定めるのは容易でないが本実験の範囲では0.22%程度でも極めて有効であり、0.5%程度で十分な量であると思われる。対象としている実構造物の場合は0.19%であるからほぼ妥当な量と言えよう。横方向鉄筋については片側で0.26%程度で十分であると思われる。実構造物の場合は内側と外側のフープ筋の量を平均すればこの値を上回るのでこれも妥当な量と言えよう。

図-9、図-10に供試体表面に貼付したひずみゲージによる軸ひずみおよび横ひずみをそれぞれ示す。軸圧縮ひずみは鉄筋が僅かしか配置されていないNo.1、No.21では -2300×10^{-6} 程度が最大ひずみであるが、横方向の鉄筋がある程度配置されていると -3000×10^{-6} 以上のひずみに達するものも多く見られる。しかしながら、ひずみゲージの測定値からはひずみの軟化域の存在は認められない。横ひずみとしては伸びひずみであるにも拘らず

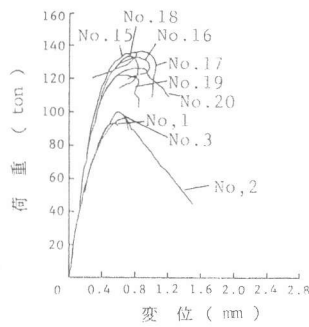


図-4.1 荷重-変位曲線(1)

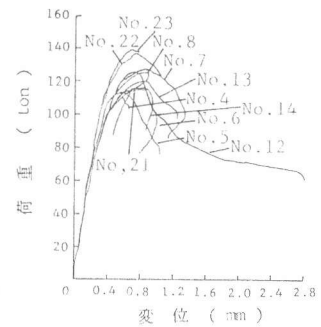


図-4.2 荷重-変位曲線(2)

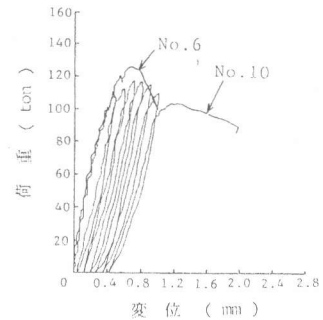


図-5 単調載荷と繰返し載荷の比較

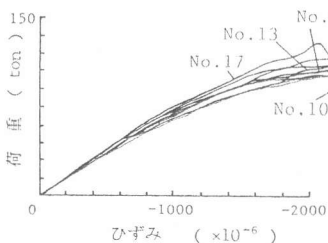


図-6 軸鉄筋のひずみ

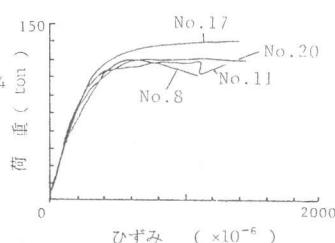


図-7 横方向鉄筋のひずみ

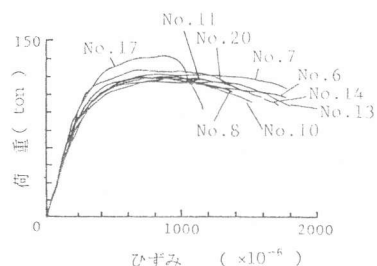


図-8 つなぎ筋のひずみ

2000×10⁻⁶以上のひずみも測定された。これはポアソン効果によってコンクリートが横方向に膨張することによるものであって一軸の引張ひずみの場合と異なり大きな伸びひずみが得られたものと思われる。

6. 考察と結論

コンクリートの圧縮変形挙動については既に極めて多くの研究報告が

あり、^{1)~4)}ひずみ軟化域まで含めた図-11の点線のような曲線がコンクリートの材料としてのひずみ特性として広く知られている。しかしながら、このような曲線は変形の計測値から求めた平均的なひずみであって材料そのもののひずみとは考えられない。局所的なひずみの計測値は図-11の実線で示されるように破壊時にひずみの値が急激に逆方向に進むことがしばしば見られる。これは、ひずみゲージ位置以外の所でコンクリートが破壊してゲージ部分のコンクリートの応力が解放され、かつ、荷重は供試体の中心部に負担されている場合に生じるのである。コンクリート中に鉄筋が含まれていたり、コンクリートに大きな偏心を持つ圧縮力が作用する場合には多軸応力状態となってコンクリートを横方向に拘束するため材料としてのコンクリートの圧縮性能が向上する。終局限界状態を検討する場合、コンクリートの圧縮応力分布の形状が問題となるが、正負繰返し荷重を受けてコンクリートにひびわれが入ることをも考えると、鉄筋による拘束が大きい場合でもコンクリートに過大な圧縮変形性能を期待することは好ましくないと思われる。本実験のデータから判断してコンクリートの最大圧縮ひずみは0.4%を越えないとして考えるのがよいと思われる。

鉄筋コンクリート柱の中心軸圧縮荷重に対する耐力は、破壊時の偏心の影響その他によって必ずしも計算耐力に容易に達する訳ではないことが本実験で示された。このことは圧縮支配型の鉄筋コンクリート部材の耐荷力を検討する場合に極めて重要であると思われる。

謝 辞

本研究は横浜港横断橋下部構造の設計検討の一環として首都高速道路公団が横浜国立大学に委託した研究の一部である。本研究の実施に当たり公団神奈川建設局の石井英雄特殊設計課長はじめ公団と大学の関係各位に多大の御支援を賜った。供試体の製作にはオリエンタルコンクリート株式会社の協力を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 池田尚治, 材料の力学的特性(その3) -コンクリート-, コンクリートライブラリー第41号, 1975年11月, 土木学会
- 2) Rüsck, H., Researches toward a general flexural theory for structural concrete, Journal of ACI, p.6, July, 1960
- 3) 小柳 治, 六郷恵哲, 内田裕市, コンクリートの圧縮靱性, セメント技術年報第37巻, セメント協会, 1983年, pp.268~271.
- 4) Sheikh, Shamin A., S.M.Uzumeri, Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Column, ST12, ASCE, Dec, 1982, pp.2703~2722.

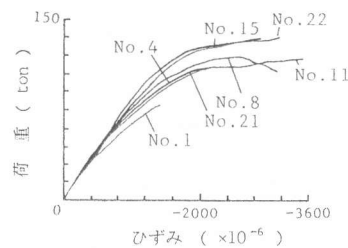


図-9 コンクリートの軸ひずみ

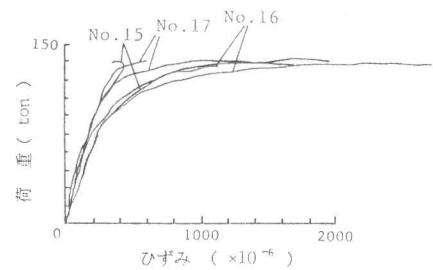


図-10 コンクリートの横ひずみ

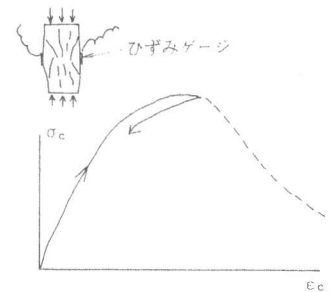


図-11 ひずみ測定値の模式図