

論文

[2050] X形主筋比の異なる短スパン梁に関する実験的研究

正会員 ○ 仲地唯治 (間組技術研究所)

正会員 牧田敏郎 (間組技術研究所)

松浦恒久 (間組技術研究所)

正会員 戸田哲雄 (間組技術研究所)

1. はじめに

超高層RC造建物においては、これまでにラーメン構造が多く用いられているが、より自由な平面計画を可能とし、広い空間を確保する方法としてチューブ構造が考えられる。一般に、チューブ構造の場合、ラーメン構造に比較して短スパンの梁を有するが、短スパン梁は、付着割裂破壊やせん断破壊等のぜい性的な破壊を起こしやすい。したがって、チューブ構造による建物の耐震安全性を確保するためには、短スパン梁の靱性を十分なものとする必要がある。

RC部材の靱性向上にはX形配筋法が有効な方法の一つであるとされているが[1]、本研究では、X型配筋法を用いた短スパン梁について逆対称加力実験を行い、X形主筋比の異なる場合の耐力、変形性能、付着性能に関して、平行配筋の場合とあわせて比較検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体配筋図を図-1に、試験体一覧を表-1に示す。試験体はNo.1~No.8の8体で、30階建チューブ構造建物の試設計をもとに計画した実大の1/2モデルである。No.1~6はX形配筋、No.7,8は平行配筋である。X形配筋による試験体の内、No.1,2,4,5はX形2組で、No.3,6は施工性を考慮してX形1組としたものである。断面は  $b \times D = 30(27.5) \text{cm} \times 45(35) \text{cm}$ 、内法スパン

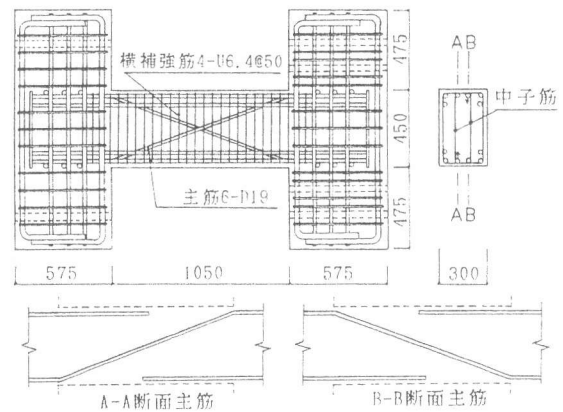


図-1 試験体配筋図(No.3)

表-1 試験体一覧

試験体	NO. 1	NO. 2	NO. 3	NO. 4	NO. 5	NO. 6	NO. 7	NO. 8	
断面									
$b \times D$ (cm)	300×450	300×450	300×450	275×350	275×350	275×350	300×450	300×450	
$F_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	480	480	480	360	360	360	480	480	
主筋	平行筋	4-D19	4-D19	5-D19	2-D19	2-D19	3-D19	6-D19	6-D19
	X形筋	2-D19	2-D19	1-D19	2-D19	2-D19	1-D19	—	—
	$P_t$ (%)	1.4	1.4	1.42	1.30	1.30	1.31	1.43	1.43
	X形主筋比	0.33	0.33	0.17	0.50	0.50	0.25	0	0
横補強筋	配筋	2-U6.4 @50	2-U5.1 @50	4-U6.4 @50	2-U6.4 @55	2-U5.1 @75	4-U6.4 @65	4-U6.4 @50	4-U5.1 @60
	$P_w$ (%)	0.40	0.27	0.80	0.40	0.19	0.67	0.80	0.44

は105cm、M/QD=1.17(1.5)である。但し、( )内はNo.4,5,6である。各試験体の特徴を以下に示す。

- No.1 下層階を想定、X形(2組)配筋、終局強度型設計法による
- No.2 No.1に対して付着耐力を低減(Pwを低減)
- No.3 下層階を想定、X形(1組)配筋
- No.4 上層階を想定、X型(2組)配筋、終局強度型設計法による
- No.5 No.4に対して付着耐力を低減(Pwを低減)
- No.6 上層階を想定、X形(1組)配筋
- No.7 下層階を想定、平行配筋、終局強度型設計法による(両端ヒンジ部材としての付着耐力は満足していない)
- No.8 No.7に対して付着耐力を低減(Pwを低減)

主筋は6-D19(4-D19)(SD40)とし、スタラップには高強度鉄筋U6.4,U5.1( $\sigma_y=13000\text{kgf/cm}^2$ )を用いた。コンクリートは粗骨材に13mmの6号砕石を用い、調合強度を480(360) $\text{kgf/cm}^2$ とする。使用したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表-2、3に示す。

## 2.2 実験方法

加力装置の概要を図-2に示す。水平力は反力壁に取り付けた100tonfアクチュエータにより載荷した。試験体は、一端を反力床に固定し、他端の回転変位を2台の鉛直方向アクチュエータにより拘束した。さらに、L字型の加力治具を用いて加力高さを梁の内法の中央高さとする事により、試験体に逆対称モーメントを与えた。加力は変位制御とし、部材角2/1000(rad.) (1回)、5, 7.5, 10/1000 (各2回)、15/1000 (1回)、20, 30/1000 (各2回)、40/1000 (1回)、60/1000 (正側のみ)における正負交番繰り返し加力とした。

変位は、スタブの相対変位、梁の軸方向の伸縮量、長さ方向に分割した各区間の伸縮量、対角変形量を高感度変位

計を用いて計測した。鉄筋のひずみはストレーンゲージにより計測した。荷重はアクチュエータのロードセルにより検出した。

表-4 実験結果一覧

試験体	(単位: 荷重 tonf, 部材角 $\times 1/1000\text{rad.}$ )								
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	
曲げひび割れ	荷重	11.3	12.3	13.8	9.1	7.5	9.8	13.3	13.9
	部材角	0.5	0.6	0.8	1.1	1.0	1.3	0.6	0.6
曲げせん断ひび割れ	荷重	27.8	22.8	23.3	18.6	16.2	22.7	18.8	22.2
	部材角	2.3	1.5	1.7	3.3	2.9	4.8	1.1	1.5
せん断ひび割れ	荷重	34.2	29.9	44.0	25.6	22.3	29.7	33.5	41.0
	部材角	3.6	2.9	4.8	5.9	4.9	8.7	3.1	4.0
主筋降伏*1	荷重	54.5	54.9	55.3	25.6	26.1	27.6	57.4	58.2
	部材角 $R_y$	7.2	7.5	7.1	5.9	6.6	6.8	7.3	8.1
最大耐力	荷重	62.4	61.0	63.5	35.3	32.1	33.9	65.0	63.1
	部材角	30.0	30.1	30.0	60.4	30.0	30.1	30.0	29.8
限界部材角 $R_u/R_y$ *2		>60.0	40.0	>60.0	>60.0	40.0	>60.0	>60.0	29.8
限界塑性率 $(R_u/R_y)$		>8.3	5.3	>8.5	>10.2	6.0	>8.8	>8.2	3.7

\*1 2段目主筋降伏時 (No.4~6は1段目主筋降伏時)

\*2 最大荷重の80%以上の荷重を保持する最大部材角

表-2 コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	ヤング係数 ( $\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ )	割裂強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )
No.1	581	3.29	34.4
No.2	593	3.26	42.7
No.3	576	3.25	34.1
No.4	386	2.88	32.5
No.5	382	2.80	27.4
No.6	383	2.98	30.3
No.7	608	3.48	37.5
No.8	550	3.50	36.1

表-3 鉄筋の材料試験結果

呼び名	降伏強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	引張強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	ヤング係数 ( $\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ )	伸び (%)
D19	4729	6655	1.86	15.9
U6.4	13828	14867	2.08	10.1
U5.1	13533	14458	1.99	9.8

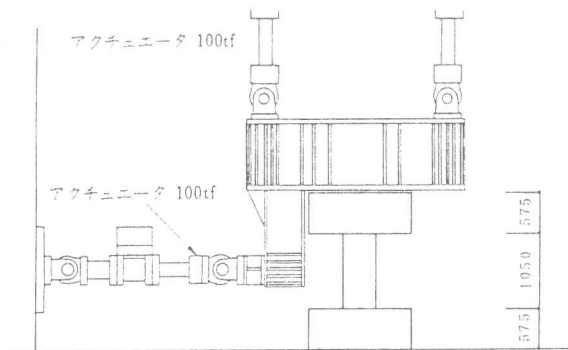


図-2 加力装置概要

### 3. 実験結果

#### 3. 1 破壊経過

表-4に実験結果一覧を、図-3に各試験体の最終ひび割れ状況を示す。各試験体とも2/1000のサイクルで曲げひび割れが生じた。曲げせん断ひび割れは下層階想定 No.1~3,7,8では2/1000のサイクルで、上層階想定 No.4~6では5/1000のサイクルでそれぞれ生じた。せん断ひび割れはNo.1~3,5,7,8では5/1000のサイクルで、No.4,6では7.5/1000のサイクルでそれぞれ生じた。

主筋はNo.8の2段目主筋を除いて、各試験体の1、2段目主筋とも7.5/1000のサイクルで降伏した（No.8の2段目主筋は10/1000のサイクル）。

付着割裂ひび割れは各試験体とも側面、上、下面に発生、進展した。No.1,4,7に対しそれぞれ付着耐力の低いNo.2,5,8ではひび割れの進展はより顕著で、30/1000以降の大きな耐力低下につながった。

側面における付着割裂ひび割れは、短い斜めひび割れがスパン中央の主筋沿いに、コンクリートを打設（横打ち）した上面側、下面側の順で発生した。ひび割れ発生部位はX形配筋のNo.1~6では約7.5/1000、平行配筋のNo.7,8では約5/1000であった。ひび割れ範囲は、いずれも変形が進むにつれスパン中央から両端へ広がり、各ひび割れの長さ、幅、本数とも増大した。各変形レベルでの進展は打設側が顕著で、また、X型配筋に比べ平行配筋の方が顕著であった。

上、下面における付着割裂ひび割れは、5~7.5/1000で材軸方向のひび割れがスパン中央付近に、上面、下面の順で発生し、その後、両端へと進展した。ひび割れは、X形筋2組のNo.1,2,4,5ではコーナー部分に集中し、平行配筋のNo.7,8では、全体に広がっており、前者はコーナー割裂、後者は全割裂を示していると考えられる。X形筋1組のNo.3,6では、X形筋を除く3本の1段目主筋沿いにひび割れが発生、進展し、コーナー割裂と全割裂の中間的なものとなった。

限界塑性率は付着割裂の顕著なNo.2,5,8で各々5.3,6.0,3.7、その他は約8~10以上であった。

#### 3. 2 荷重-変形関係

図-4に各試験体の荷重-変形関係を示す。終局強度型設計指針によって付着設計したX形筋2組のNo.1は、最大耐力以降の耐力低下が少なく、また、No.4は耐力低下しなかった。

X形筋1組のNo.3は、最終に至るまでほとんど耐力が低下せず、No.6は30/1000における繰り返しでの耐力低下以降、最終の60/1000に至るまで、最大耐力の80%以上の耐力を保持した。

一方、X形筋2組で、終局強度型設計指針において両端ヒンジ部材としての付着耐力を満足していないNo.2,5は30/1000における繰り返しで付着割裂が顕著となり、耐力が大きく低下し、60/1000に至るまでに、最大耐力の80%以下となった。

平行配筋のNo.7,8は、いずれも終局強度型設計指針において両端ヒンジ部材としての付着耐力を満足していないが、横補強筋比 $P_w$ の大きいNo.7（0.8%）は最大耐力時以降の耐力低下はほとんど

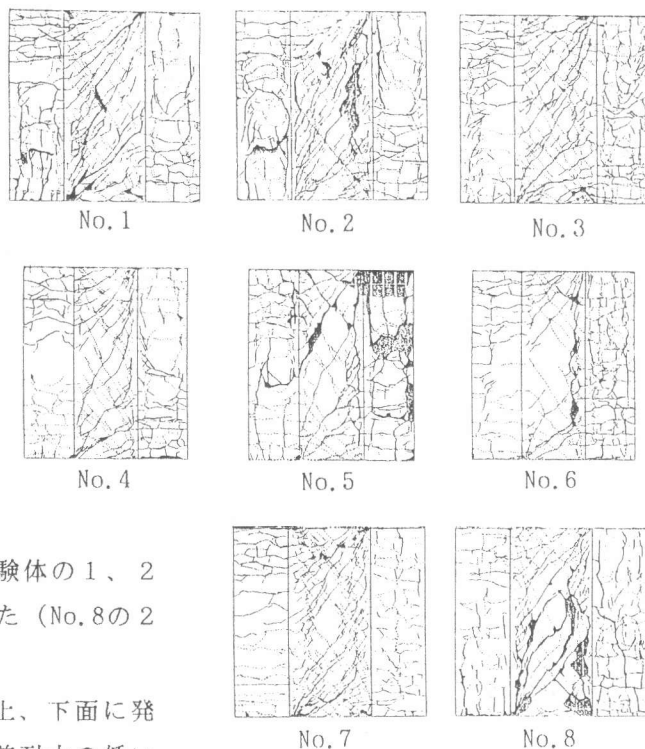


図-3 最終ひび割れ状況

どなく最終変形に至った。一方、 $P_w$ の小さいNo.8 (0.44%)は30/1000での繰り返して付着割裂が顕著になり、耐力が大きく低下し、最終の60/1000においては65%以下となった。履歴ループは、平行配筋のNo.7,8がスリップ性

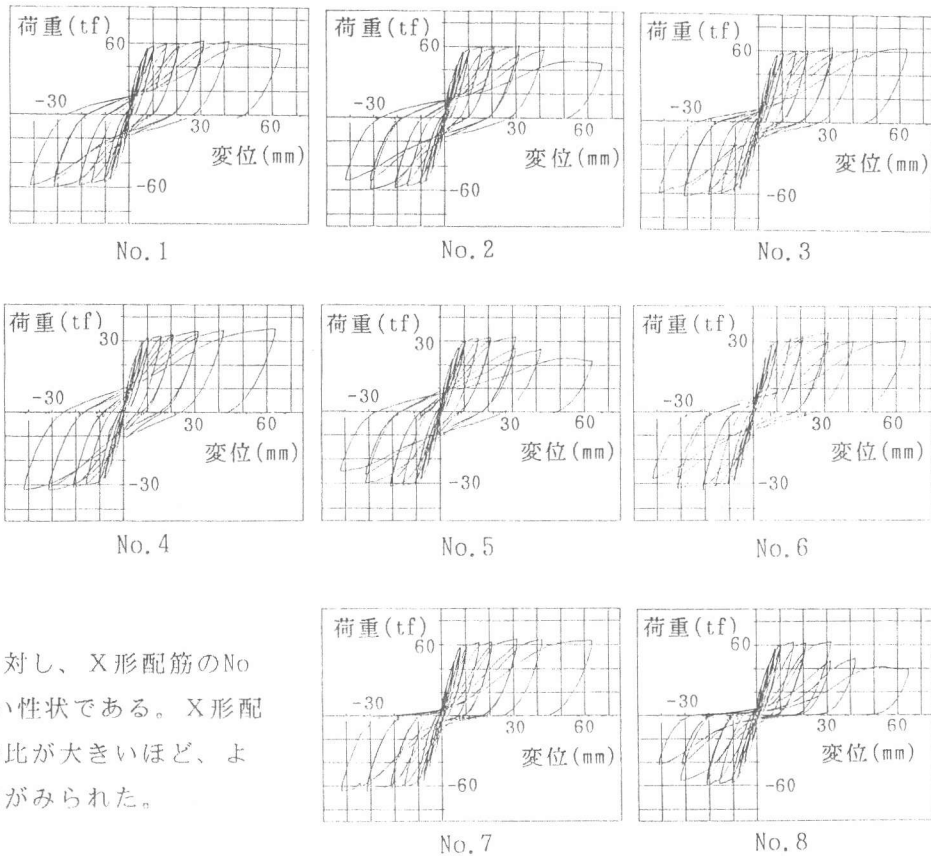


図-4 荷重-変形関係

状を示しているのに対し、X形配筋のNo.1~6は紡錘形に近い性状である。X形配筋の場合、X形主筋比が大きいほど、より紡錘形に近い傾向がみられた。

#### 4. 実験結果の検討

##### 4. 1 実験値と計算値の比較

表-5に各荷重に関する実験値と計算値の比較を示す。ひび割れ荷重は、No.2,3,7,8の曲げせん断ひび割れ荷重を除き、計算値が実験値を下回り、特に上層階想定No.4~6でその傾向が著しい。

降伏荷重、曲げ終局強度は略算式、切断法による解析値とも実験値とよく対応し、特に解析値はよく一致した。最大耐力は、X形配筋のNo.1~6では、荒川min式によるせん断耐力にX形筋の寄与分を付加した値に対して実験値が約1割下回ったが、平行配筋のNo.7,8では実験値の方が上回った。また、終局強度型耐震設計指針によるせん断耐力は実験値を約1~

表-5 実験値と計算値の比較

		(単位 tonf)							
試験体		NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6	NO.7	NO.8
曲げひび割れ荷重	実験値	11.3	12.3	13.8	9.1	7.5	9.8	13.3	13.9
	計算値*1	10.4	10.5	10.4	4.8	4.8	4.8	10.7	10.2
	実/計	1.08	1.17	1.33	1.90	1.57	2.05	1.25	1.37
曲げせん断ひび割れ荷重	実験値	27.8	22.8	23.3	18.6	16.2	22.7	18.8	22.2
	計算値*2	24.5	24.8	24.4	11.4	11.3	11.3	25.1	23.9
	実/計	1.13	0.92	0.95	1.64	1.43	2.01	0.75	0.93
せん断ひび割れ荷重	実験値	34.2	29.9	44.0	25.6	22.3	29.7	33.5	41.0
	計算値*3	23.1	23.3	23.0	12.4	12.3	12.3	23.6	22.4
	実/計	1.48	1.28	1.92	2.07	1.81	2.41	1.42	1.83
降伏荷重	実験値*4	54.5	54.9	55.3	25.6	26.1	27.6	57.4	58.2
	計算値*5	54.5	54.5	55.0	28.8	28.8	29.0	55.8	55.8
	実/計	1.00	1.01	1.00	0.89	0.91	0.95	1.03	1.04
最大耐力	計算値*6	54.8	54.8	55.4	28.3	28.3	28.6	56.1	55.9
	実/計	1.00	1.00	1.00	0.90	0.92	0.97	1.02	1.04
	実験値	62.4	61.0	63.5	35.3	32.1	33.9	65.0	63.1
降伏荷重	計算値*5	54.5	54.5	55.0	28.8	28.8	29.0	55.8	55.8
	実/計	1.14	1.12	1.15	1.23	1.11	1.17	1.16	1.13
	計算値*6	58.5	58.6	59.0	29.6	29.4	29.7	60.0	59.3
最大耐力	実/計	1.07	1.04	1.08	1.19	1.09	1.14	1.08	1.06
	計算値*7	69.6	66.4	69.3	41.3	36.6	39.1	62.2	52.2
	実/計	0.90	0.92	0.92	0.86	0.88	0.87	1.05	1.21
最大耐力	計算値*8	84.3	69.6	96.0	48.4	35.7	57.1	89.4	68.6
	実/計	0.74	0.88	0.66	0.73	0.90	0.59	0.73	0.92

\*1  $M_c = 1.8 \sqrt{F_c} \cdot Z_e$

\*2  $Q_{bs} = 0.265 \cdot b \cdot d \sqrt{F_c + M_c / (M/Q - d/2)}$

\*3  $Q_{sc} = (0.085 K_c \cdot (500 + F_c) / (M/Q + 1.7)) b \cdot j$

\*4 2段目主筋降伏時 (No.4~6は1段目主筋降伏時)

\*5  $M_y (M_u) = 0.9 a l \cdot \sigma_y \cdot d$

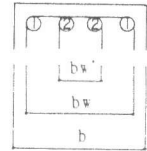
\*6 切断法による解析値 [2]

\*7 荒川min式 (X形筋の寄与分  $V_x$ を付加、 $V_x = A_x \cdot \sigma_{xy} \cdot \sin \theta_x$ ) [3] [4]

\*8 終局強度型耐震設計指針によるせん断強度式 [4]

表-6 付着強度一覧

試験体	NO. 1	NO. 2	NO. 3	NO. 4	NO. 5	NO. 6	NO. 7	NO. 8
$\tau_f$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	54.2	54.0	54.3	42.3	42.4	42.4	53.9	54.8
$\tau_{bus}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	62.9	45.6	62.7	47.3	27.0	26.8	33.2	21.6
$\tau_{bus}^*$ (kgf/cm <sup>2</sup> )			72.0			43.3	67.5	53.1
付着の判定( )内は $\tau_{bus}^*$ による	OK	不可(コナ割裂)	OK	OK	不可(コナ割裂)	不可[OK]	不可(OK) (全割裂)	不可 (全割裂)
付着の判定(実験結果)	OK	不可(コナ割裂)	OK	OK	不可(コナ割裂)	OK	OK	不可 (全割裂)



5割上回り、曲げ耐力に対する余裕度を示している。両せん断耐力式による値を比較すると、せん断補強筋比が増すほど、終局強度型による値の方がより大きくなる。

4. 2 付着強度

表-6に付着強度の一覧を示す。終局強度型耐震設計指針の付着強度式を用いた場合[4]、X形筋1組で上層階想定No.6および平行配筋No.7の付着強度が設計用付着応力度をかなり下回り、付着の判定が不可となり、実験結果と異なる。それに対し、角他提案の付着強度式(終局強度型耐震設計指針の式に比べ、中子筋の効果を大きく評価)によって[5]、中子筋の効果を取り入れて計算した場合、付着の判定は可となり、実験結果と一致する。

平行配筋でせん断補強筋量の少ないNo.8は、付着割裂により耐力が大きく低下し、角他提案の付着強度式による計算結果と一致したが、計算結果において設計用付着応力度と付着強度の差はわずかであった。No.8の破壊状況の観察によると、付着割裂破壊の範囲が1段目主筋沿いだけではなく2段目主筋沿いにも大きく広がっており、2段目主筋による付着割裂の影響も少なくないと考えられる。

4. 3 スタラップのひずみ分布

図-5に内法スパン内におけるスパン方向のスタラップひずみ分布を示す。スタラップのひずみ分布はいずれも、ある変形レベルまで梁端から約0.6~0.75D(D:梁せい)付近にピークをもち、それ以降は、より平均化した分布となっている。梁せいの小さいNo.4は他に比べ、ピークの位置が梁端に近くなっている。X形配筋と平行配筋を比較すると、平行配筋の方がより大きな変形レベルまでピークが顕著である。これはX形筋のせん断力負担と関連すると考えられる。No.1に対しPwが2/3のNo.2は全区間のひずみ大きい。

X形筋1組で、スタラップ中子筋に主筋が掛かっている部分が生ずるNo.3,6において、外周筋と中子筋のひずみ分布を比較すると、

$\tau_f$ :終局強度型耐震設計指針による設計用付着応力度(精算)  
 $\tau_{bus}$ :同 付着強度(精算)  
 コナ割裂の場合  $\tau_{bus} = \{70\lambda_w b / (s d_b) + 0.4\} \sqrt{\sigma_p}$   
 全割裂の場合  $\tau_{bus} = \{60\rho_w' b (N_s + 2) / (N_t \sum d_b) + 0.4\} \sqrt{\sigma_p}$   
 $\lambda_w$ :隅角部主筋にかかる横補強筋断面積,  $s$ :横補強筋間隔,  $d_b$ :主筋径  
 $\sigma_p$ :コンクリートの圧縮強度,  $\rho_w'$ :断面外周に配筋されたせん断補強筋比  
 $b$ :梁幅,  $N_s$ :一列の主筋のうち直接横補強筋のかかっていないもの本数  
 $N_t$ :全主筋本数  
 $\tau_{bus}^*$ :角他提案の式による付着強度  
 $\tau_{bus}^* = \textcircled{1} \tau_{u, \text{on1}} \cdot 2 / N_t + \textcircled{2} \tau_{u, \text{on1}} \cdot (N_t - 2) / N_t$   
 $\textcircled{1} \tau_{u, \text{on1}}$ :(主筋①の付着強度) =  $\tau_{st} + \tau_{st}(bw) + \tau_{oo}$   
 $\textcircled{2} \tau_{u, \text{on1}}$ :(主筋②の付着強度) =  $\tau_{st} + \tau_{st}(bw) + \tau_{st}(bw) + \tau_{oo}$   
 $\tau_{st}$ :つり上げ効果作用分,  $\tau_{st}(bw)$ :外周部横補強筋の拘束効果作用分  
 $\tau_{st}(bw)$ :中子筋の拘束効果作用分,  $\tau_{oo}$ :かぶりコンクリートの効果作用分

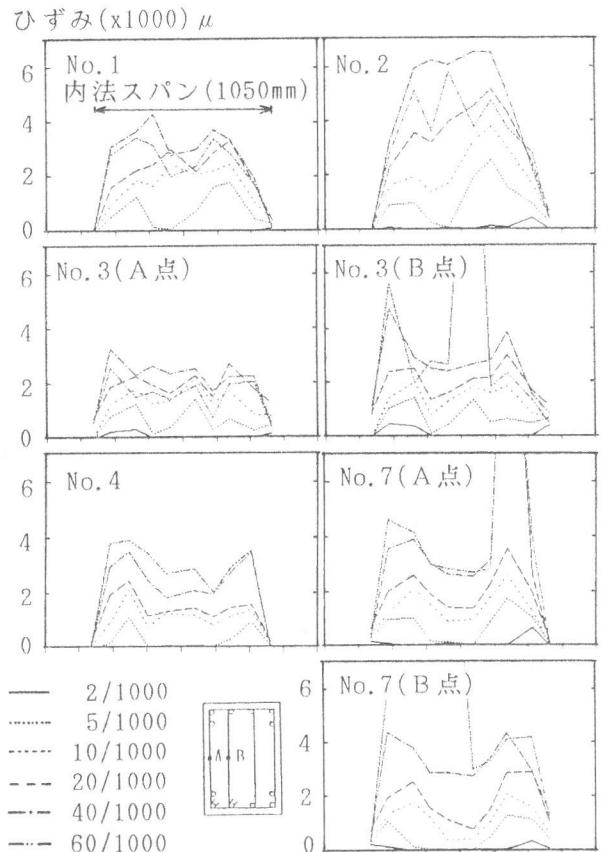


図-5 スタラップひずみ分布

全般的に中子筋は外周筋と同程度、あるいは同程度以上の値で、この配筋法においては、中子筋に直接主筋が掛かっている部分においてもせん断力は伝達されていると考えられる。平行配筋のNo.7では外周筋と中子筋のひずみはほぼ同程度であった。

#### 4. 4 軸変形

図-6に水平変形-軸伸び関係を示す。軸伸びは15/1000まで各試験体ともほぼ同じで、それ以降は、付着割裂が顕著で耐力の低下したNo.2,8の伸びの割合が低下した。最終に至るまで耐力低下の少ないNo.1,3,7は15/1000以降もほぼ同程度の伸びであった。また、No.4~6においても同様に、耐力低下の大きいNo.5の軸伸びの割合が低下し、No.4,5は同程度であった。

#### 4. 5 変形成分

全体変形を曲げ変形とせん断変形に分離したときの、全体変形に対する曲げ変

形の割合を図-7に示す。曲げ変形は試験体の両側近くで計測した軸方向変位から区間の平均曲率を求め、それを積分して求めた。曲げ変形の割合は各試験体とも、主筋が降伏する約7.5/1000まで低下し、その後やや上昇し、再び低下して最終に至る。値は約0.4~0.6で、X形筋2組の場合と平行配筋の場合各々では $P_w$ の大きい方がやや大きい。配筋法による差は明確ではなかった。

#### 5. まとめ

X型配筋法を用いた短スパン梁について加力実験を行い、以下の事項が明らかになった。

- 1) 短スパン梁にX形配筋法を用いた場合、X形筋が1組で、比較的X形主筋比の小さい場合においても良好な履歴性状、変形性能が得られた。
- 2) 付着強度に関しては、中子筋の効果を終局強度型耐震設計指針の強度式よりも大きく評価した既往の提案式により求めた場合、実験結果とよく一致した。中子筋の効果を考慮し、平行配筋による設計も可能と考えられる。
- 3) X形主筋比の異なる短スパン梁の降伏荷重、曲げ耐力は既往の略算法や切断法による解析で求めることができる。

#### 参考文献

- 1) 南宏一：X形配筋柱の弾塑性性状に関する基礎的研究、京都大学学位請求論文、1984.12
- 2) 藤井俊二、青山博之、梅村魁：材料特性より求めた鉄筋コンクリート断面の曲率関係、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1261~1262、1973
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造、計算規準・同解説、p183、1971
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990.11
- 5) 角徹三、山田守、合楽将三：鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度算定式の提案、日本建築学会構造系論文報告集 第414号、1990.8

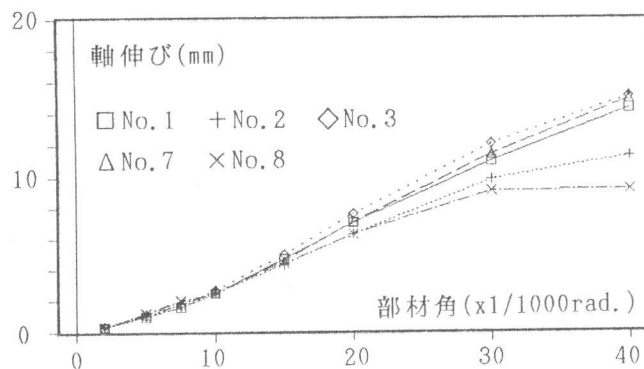


図-6 水平変形-軸伸び関係

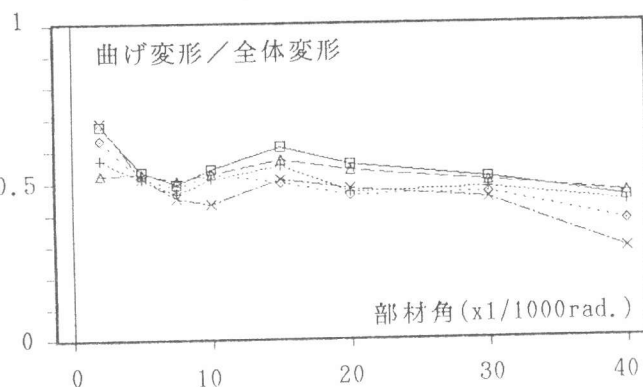


図-7 全体変形に対する曲げ変形の割合