

## 論文 鉄筋コンクリート造有孔はりのせん断挙動に関する実験的研究

山田 和夫\*<sup>1</sup>・山本 俊彦\*<sup>2</sup>

要旨：本研究では、RCはり通孔部のより効果的な補強金物の開発を目的として一連の実験的検討を行った。その結果、本研究で提案する長方形タイプの補強金物で補強されたRC造有孔はりのせん断耐力比は全平均で1.44であり、耐力的に問題がないこと、並びに本補強金物による開口部のせん断補強効果は、有孔はりのせん断終局強度設計式によって十分安全側に評価されることが明らかとなった。

キーワード：RC造有孔はり、せん断補強金物、せん断耐力、靱性、せん断実験

## 1. はじめに

近年、建築構造物においては、設備配管のためにはりに貫通孔が開けられることが多いが、鉄筋コンクリート（以下、RCと略記する）造では、はり貫通孔部は構造上の致命的な欠点となるため適切な補強が必要となる。はり貫通孔部の補強に関しては、従来斜め筋による補強が一般的であったが、最近、施工の合理化や省力化を目的として各種の補強金物製品が数多く開発されるようになってきている。

本研究では、RCはり貫通孔部のより効果的な補強金物の開発を目的として、各種形状の金物で補強されたRC造有孔はり試験体を用いたせん断実験を実施し、RC造有孔はりのせん断性能と補強金物の形状との関係について検討を行うとともに、本研究で提案する補強金物で補強されたRC造有孔はりのせん断性能とせん断補強筋量および開口数との関係について調査した。

## 2. 実験方法

## 2.1 試験体

本実験では、目的に応じて表-1に示す2シリーズの実験を実施した。

- (1) 実験-I：本実験は、補強金物の形状とRC造有孔はりのせん断性能との関係について調査することを目的としたものであり、表-1(a)に示すように、開口補強金物の形状（金物-I、II、III、IVおよびVの5種類）および開口補強筋比（補強金物の種類は金物-IIのみとし、 $wP_w = 0.77\%$ (D10の場合)および $1.37\%$ (D13の場合)の2種類)を実験要因として取り上げた。なお、主筋には4-D25 ( $P_t = 1.69\%$ )、一般部せん断補強あばら筋にはD13 ( $P_w = 0.844\%$ )、開口補強あばら筋にはD10 ( $wP_w = 0.476\%$ )を使用した。本実験で用いたRC造有孔はり試験体の形状・寸法を図-1に示す。試験体は全部で6体製作し、はり断面 $b \times D = 30 \times 45\text{cm}$  ( $d = 40\text{cm}$ )、長さ429cm、せん断スパン120cm、せん断スパン比 $M/Qd = 1.50$ 、孔径 $H_o = 15\text{cm}$  ( $H_o/D = 1/3$ )とした。
- (2) 実験-II：本実験は、実験-Iの結果を踏まえて提案した補強金物（金物-IV）の補強性能の詳細について調査することを目的としたものであり、表-1(b)に示すように、全開口補強量 ( $P_w = 1.04, 1.32, 1.85$ および $2.34\%$ の4種類)および開口数（無開口、1および2開口の3種類）

\*1 愛知工業大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）

\*2 大同工業大学教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

表-1 試験体一覧  
(a)実験-I

試験体記号	実験要因	補強金物	載荷方法	断面 D×B (cm)	開口 (mm)	曲げ主筋		一般部せん断補強筋		開口補強金物		開口補強筋		全開口補強 量 Pwo (%)
						配筋	Pt (%)	配筋	Pw (%)	配筋	wPwo (%)	配筋	sPwo (%)	
No. I-1	金物種類	金物-I	1方向	45x30	φ150	4-D25	1.69	2-D10-@100	0.48	2-D10	0.77	2-D10	0.27	1.04
No. I-2	金物種類	金物-II	1方向	45x30	φ150	4-D25	1.69	2-D10-@100	0.48	2-D10	0.77	2-D10	0.27	1.04
No. I-3	金物径	金物-II	1方向	45x30	φ150	4-D25	1.69	2-D10-@100	0.48	2-D13	1.37	2-D10	0.27	1.64
No. I-4	金物種類	金物-III	1方向	45x30	φ150	4-D25	1.69	2-D10-@100	0.48	2-D10	0.77	2-D10	0.27	1.04
No. I-5	金物種類	金物-IV	1方向	45x30	φ150	4-D25	1.69	2-D10-@100	0.48	2-D10	0.77	2-D10	0.27	1.04
No. I-6	金物種類	金物-V	1方向	45x30	φ150	4-D25	1.69	2-D10-@100	0.48	2-D10	0.77	2-D10	0.27	1.04

(b)実験-II

試験体記号	実験要因	補強金物	載荷方法	断面 D×B (cm)	開口 (mm)	曲げ主筋		一般部せん断補強筋		開口補強金物		開口補強筋		全開口補強 量 Pwo (%)
						配筋	Pt (%)	配筋	Pw (%)	配筋	wPwo (%)	配筋	sPwo (%)	
No. II-1	補強筋比	金物-IV	1方向	45x30	φ150	4-D25	1.69	2-D10-@100	0.48	2-D10	0.77	2-D10	0.27	1.04
No. II-2	補強筋比	金物-IV	1方向	45x30	φ150	4-D25	1.69	2-D10-@100	0.48	2-D10	0.77	4-D10	0.54	1.32
No. II-3	補強筋比	金物-IV	1方向	45x30	φ150	4-D25	1.69	2-D13-@100	0.85	2-D13	1.37	2-D13	0.48	1.85
No. II-4	補強筋比	金物-IV	1方向	45x30	φ150	4-D25	1.69	2-D13-@90	0.94	2-D13	1.37	4-D13	0.97	2.34
No. II-5	2 開口	金物-IV	1方向	45x30	φ150	4-D25	1.69	2-D13-@100	0.85	2-D13	1.37	2-D13	0.48	1.85
No. II-6	無 開口	—	1方向	45x30	—	4-D25	1.69	2-D13-@100	0.85	—	—	—	—	—

を実験要因として取り上げた。本実験で用いたRC造有孔はり試験体の形状・寸法等は実験-Iと同様であり、試験体は全部で6体製作した。

## 2.2 開口補強金物

実験-Iで用いた5種類の開口補強金物には、原則としてD10異形鉄筋 (wPwo

=0.77%) を使用したが、金物-IIについてはD13異形鉄筋 (wPwo=1.37%) を用いたものも製作した。また、実験-IIでは、開口補強金物として金物-IV (D10およびD13異形鉄筋を使用) のみを使用した。本研究で用いた開口補強金物は、いずれも連続曲げ加工とし、図-2に示すように、金物-I~IIIは、一辺240mmの正方形とこれに外接する8角形を基本とした形状 (以下、正方形タイプと略記する) で、斜め筋が45度の角度となるように配置されており、鉄筋の曲げ順序のみが異なっている。すなわち、金物-Iは、最初に8角形部分を折り曲げた後に正方形部分を折り曲げたものであり、金物-IIは、最初に正方形部分の半分を折り曲げた後に8角形部分を折り曲げ、最後に残り半分の正方形部分を折り曲げたものである。また、金物IIIは、正方形部分の1辺と8角形部分の2辺相当長さ分を交互に順次折り曲げたものである。このように、金物-I~IIIは、鉄筋の折り曲げ順序を変えることによって斜め筋の定着長さを変化させたものである。一方、金物-IVおよびVは、長辺および短辺をそれぞれ316mmおよび250mmとする二組の長方形を基本とした形状 (以下、長方形タイプと略記する) で、長辺および短辺の傾斜角度が45度を中心として正負同角度だけ回転するように配置されており、金物-IVは長辺が45度以上、金物-Vは短辺が45度以上となるように設定されている。なお、各補強金物の下部には貫通スリーブを保持するための折り曲げ部を設けてある。

## 2.3 試験体の製作および養生方法

試験体の製作に際しては、普通セメント、猿投山の山砂 (最大寸法=5mm、表乾比重=2.56) ・山砂利 (最大寸法=25mm、表乾比重=2.61) 、AE減水剤を使用した。コンクリートの調合は、

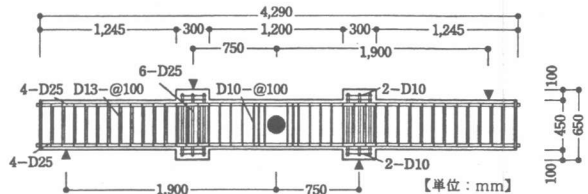


図-1 試験体の形状・寸法の例 (No. II-2試験体)

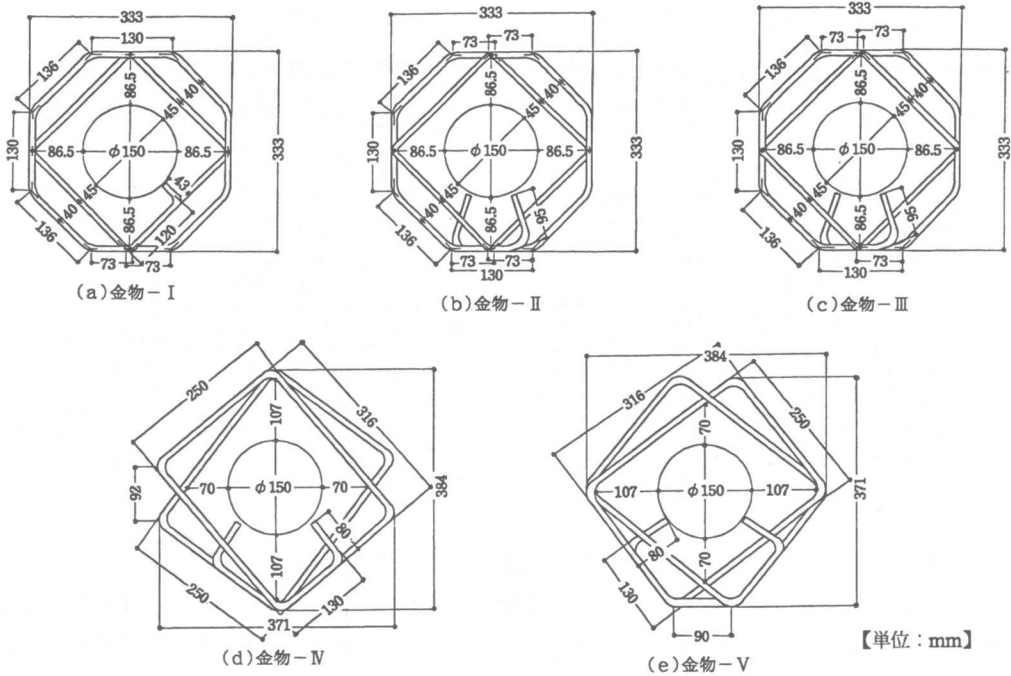


図-2 開口補強金物

設計基準強度を $240\text{kgf/cm}^2$ 、設計スランプを $18\text{cm}$ に設定した。調合表を表-2に示す。試験体は、コンクリート打設後試験体脱型までの1週間は日に2回の散水による湿布養生、試験体脱型後は試験直前まで実験室内でのシート養生とした。試験材齢は、実験-Iが6~7週、実験-IIが5~6週であった。

表-2 コンクリートの調合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量( $\text{kg/m}^3$ )				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤
55.5	46.4	306	170	817	963	0.612

### 2.4 加力および測定方法

本実験で用いた加力および測定方法の概要を図-3に示す。試験体の加力およびせん断スパン内の相対変位の測定には、それぞれ $300\text{tf}$ 長柱試験機および2個の電気式変位計を使用し、変形角が約 $1/30$ となるまで一方向単調荷重を行って荷重-変位関係を測定した。なお、荷重中 $5\text{tf}$ の荷重段階ごと（最大荷重後は相対変位 $2\text{mm}$ 毎）に、ひび割れ状況の観察を行うとともに、孔近傍の主筋とあばら筋、並びに開口補強金物のひずみ度の測定も行った。

### 3. 実験結果とその考察

表-3および表-4に、本実験で用いたコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を示す。なお、RCはりのせん断実験結果を評価する際に必要なコンクリート特性値としては、実験の直前および直後に実施した材料試験結果の平均値を使用した。

#### 3.1 破壊状況

図-4は、せん断補強効果の優れている

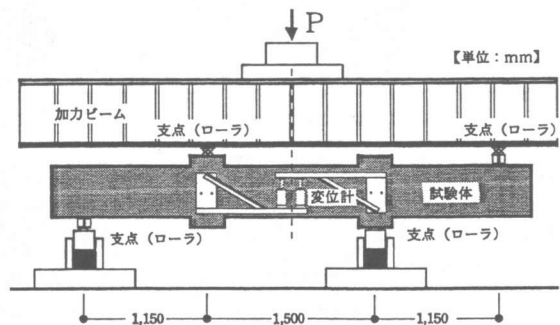


図-3 加力および測定方法

表-3 材料試験結果 (コンクリート)  
(a)実験-I

材 齢 (週)	養生 方法	引張強度試験		圧縮強度試験		ヤング 係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソ ン比
		比重	強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	比重	強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
1	水中	2.34	1 6.9	2.33	2 1.3	—	—
4	水中	2.35	3 1.1	2.35	2 6.8	—	—
6*	封緘	2.30	3 0.5	2.31	3 0.2	2.76x10 <sup>5</sup>	0.17
7*	封緘	2.30	3 2.5	2.30	3 1.5	2.71x10 <sup>5</sup>	0.18

[注] 6\*: 実験開始直前、7\*: 実験終了直後。

(b)実験-II

材 齢 (週)	養生 方法	引張強度試験		圧縮強度試験		ヤング 係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソ ン比
		比重	強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	比重	強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
1	水中	2.33	2 7.6	2.32	2 1.4	—	—
4	水中	2.36	3 1.0	2.32	2 8.4	—	—
5*	封緘	2.31	3 1.9	2.30	2 8.5	2.83x10 <sup>5</sup>	0.17
6*	封緘	2.31	3 0.9	2.29	2 8.3	2.84x10 <sup>5</sup>	0.18

[注] 5\*: 実験開始直前、6\*: 実験終了直後。

表-4 材料試験結果 (鉄筋)  
(a)実験-I

種 類	呼び名	伸び率 (%)	降 伏 点 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
主 筋	D 2 5	1 7.7	4 3 8 0	6 5 3 0	1.93x10 <sup>6</sup>
	D 1 3	2 3.3	3 6 4 0	5 1 7 0	2.04x10 <sup>6</sup>
あばら筋	D 1 0	2 8.4	3 5 9 0	4 9 1 0	2.03x10 <sup>6</sup>
	D 1 3	1 9.2	3 5 9 0	4 6 0 0	2.02x10 <sup>6</sup>
金 物	D 1 0	1 7.0	4 4 9 0*	5 6 0 0	2.16x10 <sup>6</sup>

[注]\*: 0.2%オフセットポイント。

(b)実験-II

種 類	呼び名	伸び率 (%)	降 伏 点 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
主 筋	D 2 5	2 3.1	4 0 5 0	6 1 5 0	2.17x10 <sup>6</sup>
	D 1 3	2 8.8	3 6 3 0	5 0 6 0	1.95x10 <sup>6</sup>
あばら筋	D 1 0	2 9.8	3 7 4 0	5 0 3 0	1.93x10 <sup>6</sup>
	D 1 3	1 9.3	4 0 1 0*	5 3 6 0	2.04x10 <sup>6</sup>
金 物	D 1 0	2 3.3	3 7 6 0*	5 6 8 0	2.07x10 <sup>6</sup>

[注]\*: 0.2%オフセットポイント。

金物-IVを用いた実験-IIによって観察された試験体の最終破壊状況を示したものである。図から明らかなように、1開口のNo.Ⅱ-1~No.Ⅱ-4試験体の破壊状況は、全開口補強量 (Pwo) が多い試験体ほどひび割れ本数も多くなる傾向を示した。ただし、Pwo=2.34%のNo.Ⅱ-4試験体の場合は、開口部のせん断破壊よりもせん断スパン両端部の主筋の曲げ降伏が先行し、その後主筋がひずみ硬化域に達した時点で開口部がせん断破壊したため、他の試験体と比較して曲げひび割れの多い破壊状況を示した。これに対して、2開口のNo.Ⅱ-5試験体の場合、本実験では開口間隔を開口直径 (He) の2.67倍と3.0倍[1]以下に設定してあるため、最終的な破壊モードは開口間のせん断破壊であった。また、無開口のNo.Ⅱ-6試験体は、No.Ⅱ-4試験体と同様にせん断スパン内のせん断破壊よりもせん断スパン両端部の主筋の曲げ降伏が先行したが、最終的には主筋のひずみ硬化後にせん断スパン内でせん断破壊を生じた。

### 3.2 せん断耐力

本実験結果の一覧を表-5に示す。なお、有孔はりのせん断耐力の計算には、有孔はりのせん断終局設計式[1]を用いた。

(1)実験-I: 表-5(a)によれば、せん断耐力に関する実験値と計算値との比 (以下、せん断耐力比と略記する) は、1.18~1.35の範囲にあり、開口補強金物にD13異形鉄筋を使用したNo.

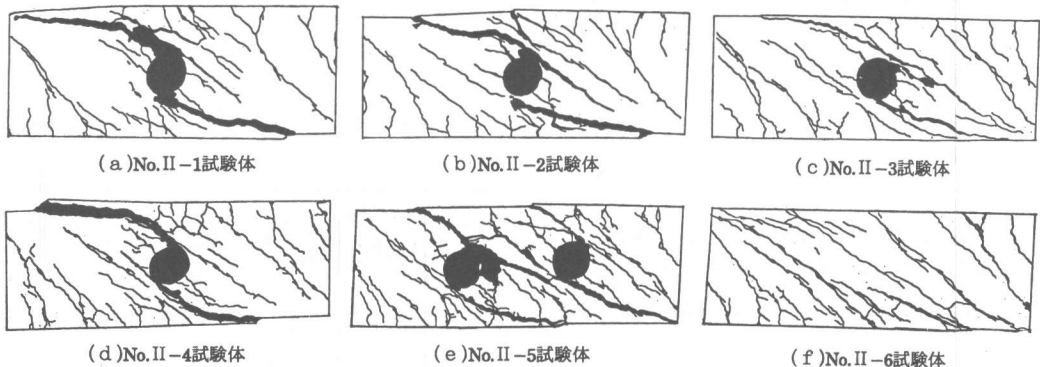


図-4 最終破壊状況 (実験-II)

I-3試験体（金物-II）の結果を除くと、せん断耐力比は、No.I-1（金物-I）、No.I-6（金物-V）、No.I-2（金物-II）、No.I-4（金物-III）およびNo.I-5（金物-IV）の順に増大しているのがわかる。したがって、開口補強金物としては、正方形タイプでは金物-IIIが、長方形タイプでは金物-IVが優れているといえる。なお、開口補強金物にD13異形鉄筋を使用したNo.I-3試験体のせん断耐力は、開口補強金物の形状が同じでD10異形鉄筋を使用したNo.I-2試験体よりも約13%の耐力向上が認められた。

## (2) 実験-II：全開口補強筋量

(Pwo) を1.04~2.34%に変化させたNo.II-1~No.II-4試験体の結果に注目してみると、表-5(b)から明らかなように、せん断耐力比は1.32~1.57の範囲（平均で1.44）にあり、破壊状況の異なったNo.II-4試験体の結果を除けば、せん断耐力比は、一般的に全開口補強筋量が増大するほど低下する傾向を示している。一方、開口部せん断補強量が同じで開口数のみが相違するNo.II-3試験体とNo.II-5試験体の結果を比較してみると、1開口試験体と2開口試験体のせん断耐力比は、それぞれ1.32および1.23となり、2開口試験体は1開口試験体よりも約7%の耐力低下を示している。また、最大耐力時の部材角も1開口試験体と2開口試験体が、それぞれ $7.83 \times 10^{-3}$  radおよび $6.19 \times 10^{-3}$  radとなっており、開口数の増加によって約16%の低下が認められる。

### 3.3 荷重-変位関係

(1) 実験-I：図-5(a)は、実験-Iによって得られた荷重-変位関係を試験体別に示したものである。図によれば、開口補強金にD13異形鉄筋を使用したNo.I-3試験体（中実線）の結果を除けば、正方形タイプのNo.I

表-5 実験結果一覧  
(a) 実験-I

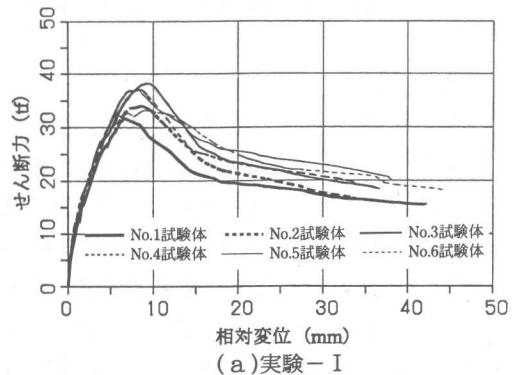
試験体	実験値		計算値 (tf)						耐力比 $\sigma_Q/\sigma_{Qh}$	
	耐力 $\sigma_Q$ (tf)	部材角* (rad)	曲げ耐力 $\sigma_{Qm}$	せん断耐力			開口部せん断耐力			
				$\sigma_{Qsc}$	$\sigma_{Qsr}$	$\sigma_{Qs}$	$\sigma_{Qhc}$	$\sigma_{Qhr}$	$\sigma_{Qh}$	
No.I-1	32.5	0.00552	51.8	19.4	11.7	31.1	8.8	18.8	27.6	1.18
No.I-2	33.9	0.00732	51.8	19.4	11.7	31.1	8.8	18.8	27.6	1.23
No.I-3	38.3	0.00772	51.8	19.4	11.7	31.1	8.8	21.7	30.5	1.26
No.I-4	37.1	0.00703	51.8	19.4	11.7	31.1	8.8	18.8	27.6	1.34
No.I-5	37.2	0.00677	51.8	19.4	11.7	31.1	8.8	18.8	27.6	1.35
No.I-6	33.2	0.00752	51.8	19.4	11.7	31.1	8.8	18.8	27.6	1.20

[注] \*: 最大耐力時の部材角

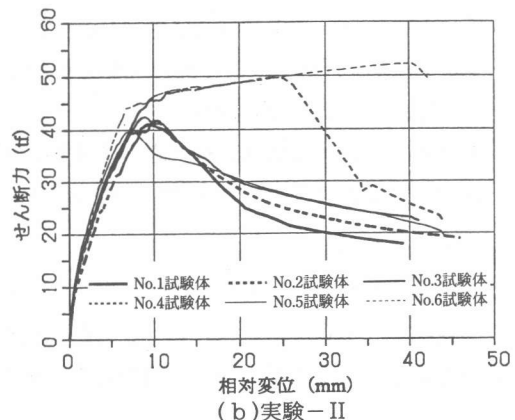
(b) 実験-II

試験体	実験値		計算値 (tf)						耐力比 $\sigma_Q/\sigma_{Qh}$	
	耐力 $\sigma_Q$ (tf)	部材角* (rad)	曲げ耐力 $\sigma_{Qm}$	せん断耐力			開口部せん断耐力			
				$\sigma_{Qsc}$	$\sigma_{Qsr}$	$\sigma_{Qs}$	$\sigma_{Qhc}$	$\sigma_{Qhr}$	$\sigma_{Qh}$	
No.II-1	40.9	0.00823	47.9	18.4	12.0	30.4	8.3	17.7	26.0	1.57
No.II-2	41.5	0.00883	47.9	18.4	12.0	30.4	8.3	19.9	28.2	1.47
No.II-3	42.7	0.00738	47.9	18.4	15.7	34.1	8.3	24.1	32.4	1.32
No.II-4	49.6	0.01978	47.9	18.4	16.5	35.0	8.3	26.9	35.2	1.41
No.II-5	39.9	0.00619	47.9	18.4	15.7	34.1	8.3	24.1	32.4	1.23
No.II-6	52.2	0.03361	47.9	18.4	15.7	34.1	—	—	—	1.53**

[注] \*: 最大耐力時の部材角、 \*\*:  $\sigma_Q/\sigma_{Qh}$



(a) 実験-I



(b) 実験-II

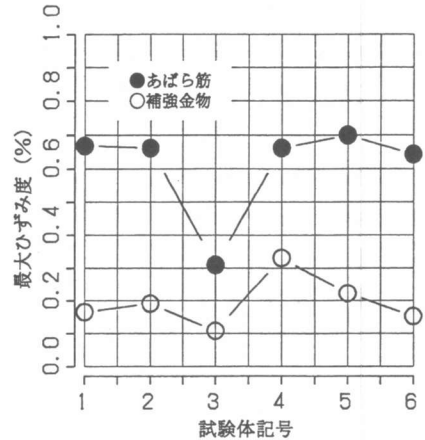
図-5 荷重-変位関係

－4（中波線）および長方形タイプのNo.I－5試験体（細実線）の変形特性が優れていることがわかる。

（2）実験－II：図－5（b）は、実験－IIによって得られた荷重－変位関係を試験体別に示したものである。図から明らかなように、最大せん断耐力および変形特性は、全開口補強筋量の増大に伴って次第に向上する傾向を示している（No.II－1試験体～No.II－4試験体）。また、2開口のNo.II－5試験体の結果（細実線）に注目してみると、最大せん断耐力到達直後の耐力低下が他の試験体に比べて若干顕著となっているのがわかる。

### 3.4 開口部補強筋のひずみ度

図－6は、実験－Iによって得られた最大耐力時までに測定された開口補強金物と開口補強あばら筋の最大ひずみ度を試験体別に示したものである。図によれば、No.4（金物－III）およびNo.5試験体（金物－IV）の開口補強金物の最大ひずみ度が他の補強金物と比べて大きくなっており、これらの開口補強金物の形状が開口部のせん断補強に有効であることを示唆している。これは、これらの開口補強金物の傾斜角度が最終的な巨視的せん断ひび割れに直交する方向に近かったこと、斜め筋の定着長さが他の補強金物に比べて長かったことなどによるものと思われる。



図－6 孔際あばら筋および開口補強金物の最大ひずみ度（実験－I）

## 4. 結論

本実験の結果、以下の点が明らかとなった。

- 1) 連続曲げ加工による開口補強金物のせん断補強効果は、補強金物の全体的な形状が同じであっても斜め鉄筋の定着長さによって相違するため、せん断補強効果の向上を図るには、斜め鉄筋の定着長さが最大となるような鉄筋の折り曲げ順序とする必要がある。
- 2) RC造有孔はりのせん断性能を効果的に改善できる開口補強金物は、正方形タイプでは金物－III、長方形タイプでは金物－IVであった。
- 3) 金物－IVで補強された1開口はりのせん断耐力と有孔はりのせん断終局強度設計式による計算値との比は、全開口補強筋量（ $P_{wo}$ ）が1.04～2.34%の範囲で、平均1.44であった。また、2開口試験体の場合には、開口間隔と開口直径との比が2.67倍程度以上であれば、耐力的には問題がないことがわかった。
- 4) 本研究で提案する補強金物－IVによる開口部のせん断補強効果は、有孔はりのせん断終局強度設計式によって十分安全側に評価される。

## 謝 辞

本実験に際してご助力を得た愛知工業大学4年生のあ木周作君（現：清水建設）、中島教雅君（現：東建コーポレーション）および真鍋正道君（現：豊田総建）、並びに山田研究室所属の大学院生および卒研生諸君に対して謝意を表します。

## 引用文献

- [1] 日本建築学会編：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、技報堂、645pp、1988