

論文

[2049] 高強度開孔補強筋を用いた RC 有孔梁のせん断破壊性状

中澤 淳<sup>\*1</sup>・三原重郎<sup>\*2</sup>・益尾 潔<sup>\*3</sup>・南 宏一<sup>\*4</sup>

1. はじめに

最近、中高層 RC 造建築物では高強度せん断補強筋として異形 PC 鋼棒を用いる場合が多くなってきている。これらの建物の梁には設備配管用の梁貫通孔を設けることが多く、開孔部周辺に開孔補強筋を配筋する必要がある。開孔補強方法として施工性の簡易さを備えた開孔補強用のパーツが数多く考案されているが、これらに使用される材料としては普通鋼のものが多く、高強度鋼によるものは少ない。そのため、高強度せん断補強筋を使用した梁の開孔補強筋には、高せん断力確保のため多量に普通鋼の開孔補強筋が必要となり、配筋施工性、過密配筋によりコンクリートの打設性が悪くなる。そこで、開孔補強筋に降伏応力度が $13000\text{kgf}/\text{cm}^2$ の異形 PC 鋼棒を用い、一筆書き状に曲げ加工したパーツにすることにより、軽量化、過密配筋防止、さらに、構造的信頼性が向上すると考え、新しいタイプの一筆書き高強度開孔補強筋を考案し試作した。

本報では、せん断破壊を生じる RC 有孔梁を対象とし、 $13000\text{kgf}/\text{cm}^2$ 級の高強度鉄筋を用いた開孔補強筋の補強効果を把握することを主目的として、開孔補強筋比、開孔部数およびあばら筋強度を実験変数とした実験を行い、破壊性状および終局せん断耐力について検討し、あわせて既往の有孔梁の終局耐力評価式 [1] との適合性について検討する。

2. 試験体

表 1 に実験計画を示す。計画した試験体は 17 体である。実験変数として開孔補強筋比、開孔部個数およびあばら筋強度の 3 種類とした。開孔補強筋比は、開孔補強筋径 ( $3.2\phi$ 、 $5\phi$ 、 $6.4\phi$ 、 $7.4\phi$ ) と開孔補強筋の組数 (2 枚、4 枚) により変化させ、あばら筋は 13000 キロ級の高強度鋼と 4000 キロ級の普通鋼の 2 種類とし、開孔部個数は無開孔、1 開孔および 2 開孔とした。ここで、2 開孔の孔中心間隔は孔径の 3 倍とした。図 1 に試験体の形状寸法および開孔補強筋の形状を示す。なお、各試験体ともに断面形状は  $b \times D = 27\text{cm} \times 40\text{cm}$ 、梁長さは  $L = 100\text{cm}$ 、孔径は  $H_e = 13.3\text{cm}$  とし

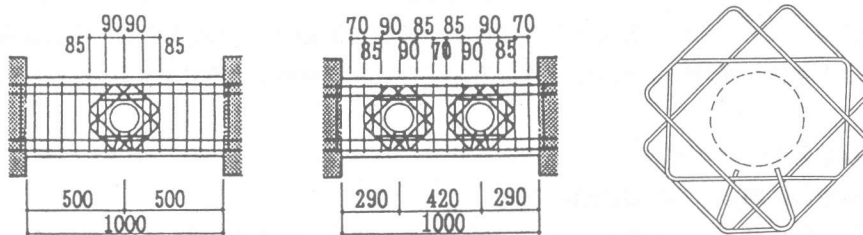


図 1. 試験体の形状寸法および開孔補強筋の形状

- \* 1 川鉄テクノワイヤ(株) 管理部管理課 (正会員)
- \* 2 川崎製鉄(株) 建材開発事業部部長補 (正会員)
- \* 3 (財) 日本建築総合試験所構造物試験室室長、工博 (正会員)
- \* 4 福山大学教授 建築学科、工博 (正会員)

表1. 実験計画

(No.)試験体名	コンクリート 強度 F <sub>c</sub> kgf/cm <sup>2</sup>	実 験 変 数								
		開孔部数	補強方法	せん断補強筋量						
				あばら筋 pw(%) (p <sub>w</sub> ・σ <sub>wy</sub> )	開孔部の有孔範囲C内の補強筋量		pw <sub>0</sub> ・ σ <sub>wy</sub>			
			あばら筋 R p <sub>w0</sub> (%) (R p <sub>w0</sub> )	パーツ K p <sub>w0</sub> (%)	p <sub>w0</sub> (%)					
(6)B0		0	無開孔梁	-----	-----	-----	-----			
(7)B1-00-0			無補強	-----	-----	-----	-----			
(8)B1-52-2			1	2-5φ@70 0.212 (27.6)	2-5φ 0.090	2枚5.0φ 0.254	0.344	44.7		
(9)B1-54-4					4-5φ 0.180	4枚5.0φ 0.508	0.688	89.4		
(10)B1-72-2					2-5φ 0.090	2枚7.4φ 0.508	0.598	77.7		
(11)B1-64-4					4-5φ 0.180	4枚6.4φ 0.752	0.942	122.5		
(12)B1-52-2N					2-D6@70 0.339 (16.1)	2枚5.0φ 0.254	0.398	39.8		
(13)B1-54-2N					4-D6 (0.287)	4枚5.0φ 0.508	0.795	79.6		
(14)B2-00-0					無補強	-----	-----	-----	-----	
(15)B2-52-2					2	2-5φ@70 0.212 (27.6)	2-5φ 0.090	2枚5.0φ 0.254	0.344	44.7
(16)B2-54-4							4-5φ 0.180	4枚5.0φ 0.508	0.688	89.4
(17)C1-00-0					無補強	-----	-----	-----	-----	
(18)C1-00-2			あばら筋	2-5φ 0.090	-----	0.090	11.7			
(19)C1-52-0			パーツ	-----	2枚5.0φ 0.254	0.254	33.0			
(20)C1-32-2			1	2-5φ@70 0.212 (27.6)	2-5φ 0.090	2枚3.2φ 0.089	0.179	23.3		
(21)C1-52-2					2-5φ 0.090	2枚5.0φ 0.254	0.344	44.7		
(22)C1-72-2					2-5φ 0.090	2枚7.4φ 0.508	0.598	77.7		

表2. 鋼材の機械的性質

鉄筋名	降伏応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張り強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び (%)
RB3. 2 <sup>1)</sup>	13060 <sup>2)</sup>	16550	7.9
RB5. 0 <sup>1)</sup>	13570 <sup>2)</sup>	15380	9.7
RB6. 4 <sup>1)</sup>	14170 <sup>2)</sup>	15170	9.0
RB7. 4 <sup>1)</sup>	14980 <sup>2)</sup>	15250	9.9
D6	4740	5670	25.1
D19	4320	6460	20.9

- 1) P C 鋼棒
- 2) 降伏応力度は0.2%永久伸びに対する応力

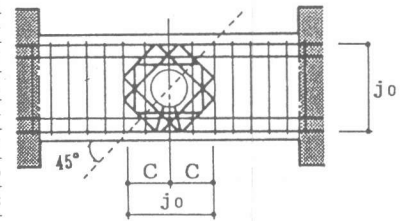


図2. 開孔補強筋の有効範囲C

実大の1/2スケールを想定した。表2に鋼材の機械的性質を示す。開孔補強筋には異形P C鋼棒3.2φ、5φ、6.4φ、7.4φを用い、あばら筋には異形P C鋼棒5φおよび普通鋼のD6を用いた。なお、No.6~No.16のコンクリートの設計規準強度は360kgf/cm<sup>2</sup>、No.17~No.22は295kgf/cm<sup>2</sup>であるが、使用コンクリートの実験時の圧縮強度はNo.6~No.11で449kgf/cm<sup>2</sup>、No.12~No.16で458kgf/cm<sup>2</sup>、No.17~No.22で295kgf/cm<sup>2</sup>である。ここで開孔補強筋比p<sub>w0</sub>は図2に示した開孔補強筋の有効範囲C (=j<sub>0</sub>/2 j<sub>0</sub>:外側主筋間距離)内のパーツ比k p<sub>w0</sub>およびあばら筋比R p<sub>w0</sub>、N p<sub>w0</sub>については文献[2]を参考に算定し、p<sub>w0</sub>は、p<sub>w0</sub>=k p<sub>w0</sub>+R p<sub>w0</sub>+N p<sub>w0</sub>とした。また、開孔補強筋量p<sub>w0</sub>・σ<sub>wy</sub>はp<sub>w0</sub>・σ<sub>wy</sub>=k p<sub>w0</sub>・k σ<sub>wy</sub>+R p<sub>w0</sub>・R σ<sub>wy</sub>+N p<sub>w0</sub>・N σ<sub>wy</sub>として算定した。ただし、異形P C鋼棒を用いたパーツおよびあばら筋の降伏点強度k σ<sub>wy</sub>およびR σ<sub>wy</sub>は公称降伏応力度13,000kgf/cm<sup>2</sup>を用い、普通鋼のあばら筋の降伏点強度N σ<sub>wy</sub>は表2の降伏応力度を用いた。加力は、試験体に逆対称変形が生じるよう水平力を単調漸増させることにより行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3-1. 荷重変形曲線およびひび割れ状況

図3に各変数における部材角30×10<sup>-3</sup>rad.までの荷重変形曲線を示す。縦軸には作用せん断力Q(tf)を横軸には部材角R(×10<sup>-3</sup>rad.)を示す。また、最大耐力時のひび割れ状況の一例を図4に示す。有孔梁の場合、各試験体とも曲げひび割れが発生したのち開孔部に斜めひび割れが発生し、主筋に沿う付着ひび割れおよび開孔部接線ひび割れの進展に伴って最大耐力に達した。その後、開孔部周辺において開孔部接線ひび割れおよび主筋に沿う付着ひび割れの拡幅、さらに大変形において被りコンクリートの剥落に伴いあばら筋のフックが弾け、急激に耐力が低下した。また、コンクリート強度による大きな差は認められなかった。

### (a) 開孔補強筋比の影響

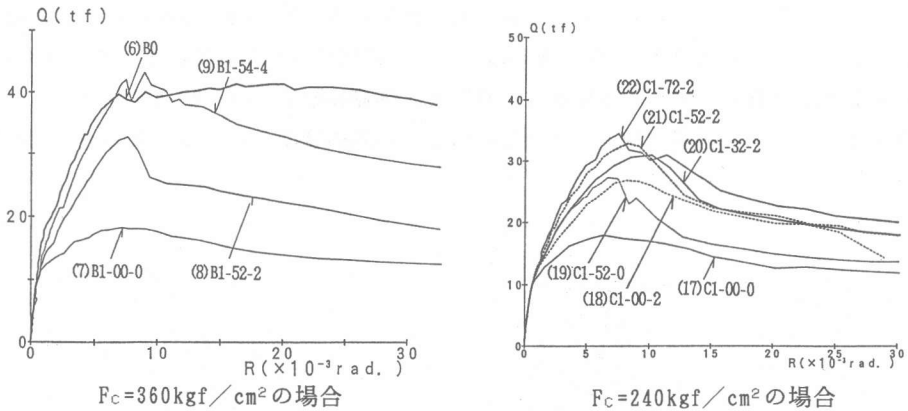
無補強試験体では開孔部に斜めひび割れが集中し、ひび割れが大きく開き、開孔部周辺に大きなずれを生じて破壊に至った。また、開孔補強筋量が比較的少ない試験体では、開孔部斜めひび割れが集中し、無補強試験体と同様に開孔部斜めひび割れの拡幅により破壊に至ったのに対し、開孔補強筋量が比較的多い試験体になると開孔部周辺部のひび割れは進展せず、開孔部周辺以外の一般部斜めひび割れの拡幅およびコンクリートの圧壊により破壊に至っている。このように、鉄筋径および開孔補強筋の枚数を増やして、開孔補強筋比が大きくなるほど開孔部周辺のひび割れを抑える効果があり、最大耐力実験値も増大している。さらに開孔補強筋を十分に配すると、無開孔梁のせん断耐力まで達し、開孔部以外の一般部で破壊に至っている。

### (b) あばら筋強度の影響

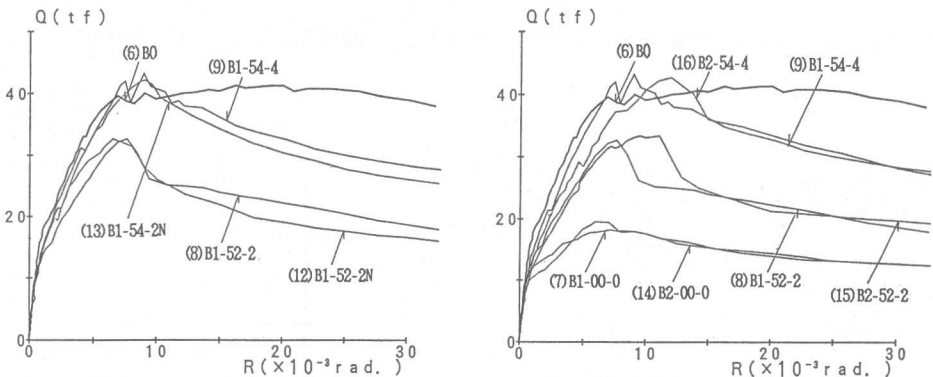
あばら筋材料強度が異なり、開孔補強筋量がほぼ同一の試験体No.8とNo.12およびNo.9とNo.13を比較すると、ひび割れの発生状況および荷重変形曲線はほぼ同様な傾向を示している。このことから、あばら筋強度が異なる場合でも有効範囲C内の開孔補強筋量 ( $p_{w0} \cdot \sigma_{wy}$ ) が同一になっていれば、パーツの補強効果はあばら筋の材料強度に影響を受けないと考えられる。

### (c) 開孔部数の影響

開孔部を2個とし開孔補強筋量が比較的少ない試験体No.14では片方の開孔部に破壊が集中している。この開孔部近傍の損傷は開孔部を1個にした場合と同様の傾向を示した。また、開孔補強



(a) 開孔補強筋比の影響



(b) あばら筋強度の影響 ( $F_c=360\text{kgf/cm}^2$ ) (c) 開孔部数の影響 ( $F_c=360\text{kgf/cm}^2$ )

図3. 荷重変形曲線による実験変数の比較

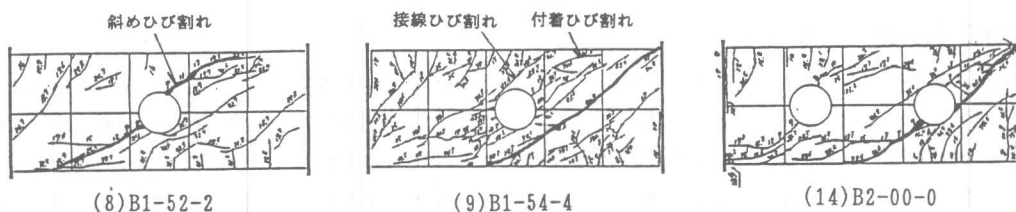


図4. 最大耐力時のひび割れ状況

筋量が比較的多い試験体No.16では、開孔部を1個にした場合と同様に開孔部からの斜めひび割れの幅が小さく開孔部間の試験体中央部を通る中央部斜めひび割れの幅によって破壊に至っている。このように、開孔部を連続に設けても開孔間隔を孔径の3倍とすれば1開孔と同等な性能を示すと考えられる。

### 3-2. 開孔補強筋およびあばら筋のひずみ状況

図5に最大耐力までの開孔補強筋各部のひずみ推移状況の一例を示す。図中よりC点のひずみが最も大きく最大耐力時で約 $4 \times 10^{-3}$  (応力度 $8000 \text{ kgf/cm}^2$ )程度であり次にd点が大きく、約 $2 \times 10^{-3}$  (応力度 $4000 \text{ kgf/cm}^2$ )程度になっている。これはC点およびd点を通る斜め部の開孔補強筋がせん断力に対して有効に抵抗していることを示している。逆にa、b、eおよびf点では開孔部接線ひび割れが発生するまで縮む傾向があり、その以降も同様、ひずみは小さくせん断力に対して有効に効いていない。このように開孔補強筋比の算定に用いる鉄筋の有効断面には、本補強法では2項で示したように $45^\circ$ 方向に直行した鉄筋のみが有効であると考えられる。また、開孔補強筋を4枚配している試験体では外側と、内側に配した開孔補強筋のひずみはほぼ等しい。さらに、図6に開孔補強用パーツと普通鋼および高強度鋼のあばら筋を併用した場合のバ

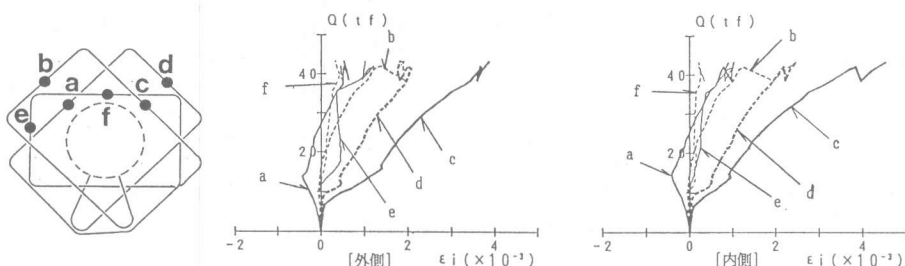


図5. (9)B1-54-4の試験体の最大耐力時までの開孔補強筋各部のひずみ推移状況

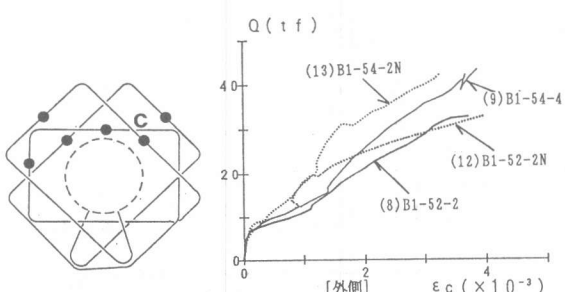


図6. あばら筋強度を変数とした場合の開孔補強筋C点のひずみ推移状況

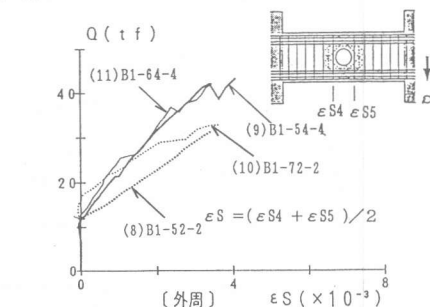


図7. 開孔補強筋比を変数とした場合の高強度あばら筋のひずみ推移状況

ーッC点のひずみ推移状況を示す。各試験体ともC点の最大耐力時の応力度が8000kgf/cm<sup>2</sup>であり、普通鋼のあばら筋と併用した場合でもパーツの補強効果があることが示された。図7に開孔補強筋比を変数とした場合のひずみ推移状況の一例を示す。各試験体とも最大耐力時で約4×10<sup>-3</sup>（応力度8000kgf/cm<sup>2</sup>）程度であり、開孔補強筋と同じ応力度になっている。

### 3-3. せん断終局耐力の検討

表3に各試験体の実験値および有孔梁の終局せん断耐力計算値を示す。表中には、広沢式 [1] [2] による計算値および広沢式に補強効果の低減係数Ωu (0.9) を乗じた(1)式の計算値をそれぞれ示している。なお、有孔範囲C内の異形PC鋼棒を用いたパーツおよびあばら筋の終局せん断耐力用材料強度は公称値13000kgf/cm<sup>2</sup>とし、開孔補強筋量p<sub>w0</sub>・σ<sub>wy</sub>は表1の値を用いた。

$$Q_{Hu} = \left\{ \frac{0.092 \kappa u \cdot \kappa p (\sigma_B + 180) (1 - 1.61 H_e / D)}{M / Qd + 0.12} + \Omega u \cdot 2.7 \sqrt{p_{w0} \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j \quad \text{----(1)}$$

図8にコンクリート強度が異なるF<sub>c</sub>=360kgf/cm<sup>2</sup>およびF<sub>c</sub>=240kgf/cm<sup>2</sup>のQ(tf)-p<sub>w0</sub>・σ<sub>wy</sub>の関係を示す。開孔補強筋量が増えるに従い最大耐力実験値も増大し、開孔補強筋を十分に配すると、無開孔梁のせん断耐力まで達することができる。

図9に実験値と広沢式計算値の関係を示す。なお、比較のために無開孔梁No.6の実験値と荒川min式計算値 [3] の比(1.22)を△印で示している。無補強有孔梁を除いた13体の実験値は広沢式計算値に対して安全側の値を示し、終局せん断耐力に対する安全率(実験値と広沢式計算値との比)の平均値は1.40、標準偏差は0.17となっている。また、無開孔梁No.6の安全率と比較してもほぼ同等以上になっている。しかし、本実験では無開孔梁の実験値は1体であるため、高強度せん断補強筋を用いた無開孔梁安全率を参考文献 [4] の既往の実験結果を用いて確認した。参考文献 [4] の中であばら筋強度が12,000kgf/cm<sup>2</sup>以上で、かつ、一方向単調載荷でせん断破壊をした16体の実験結果を図10に示す。実験値と荒川min式計算値との比の平均は1.52、標準偏差は0.22となっており、本実験で行なった無開孔梁No.6と比べ高い安全率を示している。そこで、有孔梁の終局耐力に対する安全率を参考文献 [4] の無開孔梁と同等にするために広沢式の第2項2.7√p<sub>w0</sub>・σ<sub>wy</sub>に補強効果の低減係数Ωuを乗じることとした。本報では補強効果の低減係数Ωuとして0.9を用い、実験値と(1)式の計算値との関係を図11に示す。無開孔梁を除いた13体の実験値に対する安全率の平均値は1.49、標準偏差は0.17となっており、この値は前述した無開孔梁の安全率に対して同等な値になっている。この結果から、広沢式の第2項に補強効果の低減係数Ωuを乗じた(1)式は、有孔梁終局せん断耐力評価式として高強度せん断補強筋を用いた無開孔梁と同等な安全率を持つことが示される。

表3. 実験値および有孔梁計算値

(No.)試験体名	実験値 Q exp (tf)	有孔梁計算値		Q exp Q su0	Q exp Q Hu
		広沢式 Q su0	(1)式 Q Hu		
(6)B0	41.4	33.9 <sup>1</sup>	----	1.22 <sup>1</sup>	----
(7)B1-00-0	18.3	10.3	10.3	1.78	1.78
(8)B1-52-2	32.7	24.7	23.3	1.32	1.40
(9)B1-54-4	43.3	30.7	28.7	1.41	1.51
(10)B1-72-2	32.9	29.4	27.4	1.12	1.20
(11)B1-64-4	42.2	34.2	31.8	1.23	1.33
(12)B1-52-2N	32.7	24.1	22.9	1.36	1.43
(13)B1-54-2N	42.3	29.7	27.8	1.42	1.52
(14)B2-00-0	19.6	10.4	10.4	1.88	1.91
(15)B2-52-2	33.4	24.9	23.4	1.34	1.42
(16)B2-54-4	42.8	30.9	28.8	1.39	1.48
(17)C1-00-0	18.0	7.8	7.8	2.32	2.32
(18)C1-00-2	26.8	15.2	14.4	1.77	1.86
(19)C1-52-0	27.3	20.2	18.9	1.35	1.44
(20)C1-32-2	31.0	18.5	17.4	1.68	1.78
(21)C1-52-2	32.9	22.2	20.8	1.48	1.58
(22)C1-72-2	34.5	26.8	24.9	1.29	1.38
*1: 荒川min式による 計算値を用いた。		試験体数 <sup>2</sup>	16	16	
		(13)	(13)	(13)	
		平均値 <sup>2</sup>	1.51	1.59	
		(1.40)	(1.40)	(1.49)	
*2: ( )内は無開孔梁 3体を除いた値		標準偏差 <sup>2</sup>	0.30	0.27	
		(0.17)	(0.17)	(0.17)	

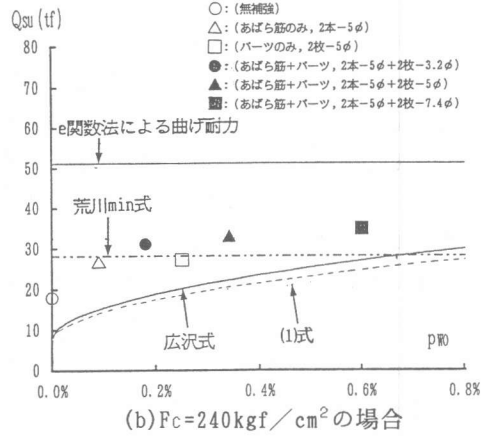
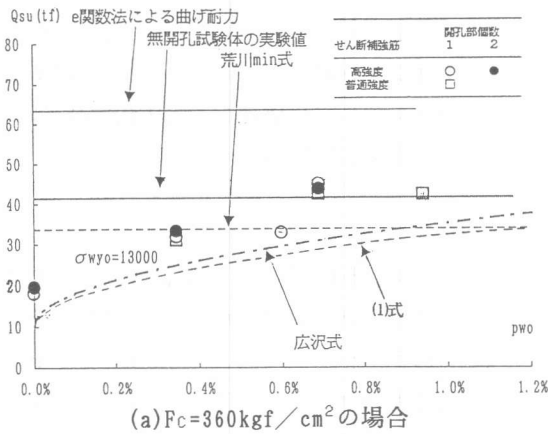


図8.  $Q (tf) - p_{w0} \cdot \sigma_{wy}$  の関係

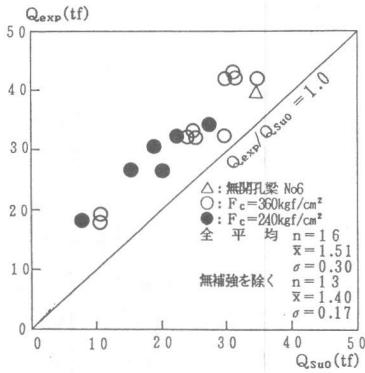


図9. 本実験値と広沢式計算値の関係

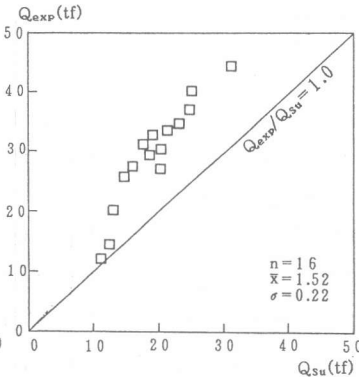


図10 文献4の無開孔梁実験値と荒川min式計算値の関係

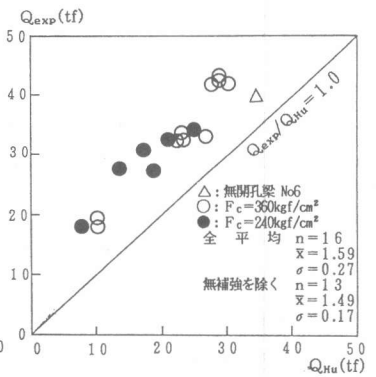


図11 本実験値と(1)式計算値の関係

#### 4. まとめ

- 1) 異形P C鋼棒により一筆書き加工された開孔補強筋パーツは、開孔部周辺のひび割れを抑える効果があり、かつ、その量を増やせば有孔梁の終局せん断耐力は増大する。
- 2) 開孔部の補強筋として開孔補強筋パーツと高強度あるいは普通鋼あばら筋を併用しても、その補強効果は開孔補強筋量  $p_{w0} \cdot \sigma_{wy}$  で評価できる。
- 3) 開孔部の間隔は開孔径の3倍以上であれば、1開孔の梁と同等の耐力を有する。
- 4) 開孔補強筋パーツと高強度鋼および普通鋼のあばら筋で併用した有孔梁のせん断耐力は(1)式で評価でき、その評価式が持つ安全率は高強度せん断補強筋を用いた無開孔梁と同等である。

#### 【参考文献】

- [1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1990年、pp273~276。
- [2] 広沢雅也、清水泰：鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断強度とじん性（その1）有孔梁について、既往の研究成果、建築技術、1979, 3, No.331, pp93~101。
- [3] 荒川卓：鉄筋コンクリートばりの許容せん断応力度とせん断補強について（実験結果による再検討）、コンクリートジャーナル、Vol.8, No.7, July, 1970, pp11-20。
- [4] 福原 正志、黒正 清治：鉄筋コンクリート部材における高強度せん断補強筋の補強効果に関する実験研究、日本建築学会論文報告集第320号、昭和57年10月、pp12-20。