

論文 鉄骨鉄筋コンクリート有孔梁の終局せん断耐力の評価について

荒田辰次郎*1・佐藤立美*2

要旨: 本論は、鉄骨鉄筋コンクリート（以下 SRC と称す）有孔梁の実験結果に基づき、SRC 有孔梁の終局せん断耐力の評価方法について検討したものである。RC 部の開口部補強は、開口部両側の縦補強筋と開口部斜め補強筋の 2 種類とし、鉄骨部開口補強はウェブに溶接したスリーブ管およびリングプレートとし、その組合せにより試験体を計画した。

実験結果より、SRC 有孔梁のせん断耐力は、RC 部の開口部補強筋量と鉄骨スリーブ、リングプレートの累加強度で評価できること、また、終局せん断耐力は、RC 部は修正広沢式、鉄骨部には提案式を使用した累加強度式が実験値の評価に最も適切であることを確認した。

キーワード: 鉄骨鉄筋コンクリート、有孔梁、終局せん断耐力、累加強度式

1. はじめに

鉄筋コンクリート有孔梁の開口部終局せん断耐力は修正広沢式¹⁾により評価されており、多くの実用化されている簡易補強金物の開口部終局せん断耐力についても、修正広沢式に安全係数を乗じた式で評価することで、建築技術評価規定に基づく建設大臣評価を得ている。また、これらの補強金物の評価書にはいずれも、SRC 有孔梁の RC 部分にも適用可能とされている。

しかし、実際に SRC 有孔梁の終局せん断耐力の確認をした実験例は非常に少なく、SRC 有孔梁の RC 部のせん断補強効果については実験的検討が十分になされないまま、慣用的に修正広沢式による補強設計がされている。

また、SRC 構造計算規準では、SRC 有孔梁の RC 部のせん断耐力は、昭和 35 年の日本建築学会有孔梁研究委員会の提案式が採用されており、現行の SRC 構造設計規準との整合性に問題がある。さらに、鉄骨部に関しても鉄骨有孔梁の終局せん断耐力式が採用されていないため、有孔梁の終局せん断耐力の評価に問題を生じている。

そこで本研究は、補強方法の異なる SRC 有孔梁の終局せん断耐力と破壊性状を実験的に確認

し、現行の慣用的設計法（SRC 有孔梁の RC 部の負担せん断力のみを修正広沢式で評価する方法）の妥当性の検討をすることと、SRC 有孔梁の終局せん断耐力の合理的評価方法を提案することを目的に、以下に示す実験的検証を行った。

2. 試験体概要

試験体のせん断スパン比は $M/Qd=1.25$ とし、梁断面は $300\text{mm} \times 600\text{mm}$ 、開口径は 200mm とした。

試験体の計画時には、最初に鉄骨断面を決定し、RC 開口部の縦補強筋と斜め補強筋による開口部補強筋量 P_s を変化させ、梁端降伏時のせん断力以下で開口部のせん断破壊が先行するように主筋量を決定した。この時、RC 部開口部の終局せん断耐力は修正広沢式を使用している。

$$P_s = \sum A_{si}(\sin \theta_i + \cos \theta_i) / b \cdot C$$

C: 開口部補強筋の有効な範囲 $= (D - 2dt) / 2$

A_{si} : C 範囲内の縦補強筋と斜め補強筋の断面積

θ_i : 開口部補強筋が材軸となす角度

試験体は鉄骨断面積の異なるシリーズとし、計 7 体を作製した。シリーズ 1 は、RC 部の主筋量を変化させ、RC 部の負担曲げモーメントによるせん断力に対して開口部補強筋量を決定した

*1 広島工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 広島工業大学 工学部建設工学科 工博（正会員）

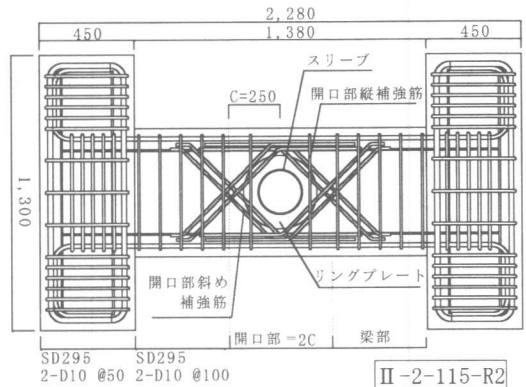
表一 試験体概要

試験体名		鉄筋コンクリート部					鉄骨部		Q _H Q _M			
		F _c (N/mm ²)	主筋	あばら筋	開口部補強			断面寸法		開口部補強		
					縦筋	斜め筋	Ps (%)					
シリーズ1	I-2-19	26.8	2-D19	2-D10@100	1-D10□	—	0.19	H-400×100 ×6×9	—	0.94		
	I-2-38		2-D22		2-D10□					0.38	0.84	
	I-2-68		4-D19		2-D13□					0.68	0.76	
	I-2-68-R1				—					—	0.68	R1*3
シリーズ2	II-0	26.0	2-D22	2-D10@100	—	—	—	H-400×100 ×6×12	—	0.95		
	II-2-115-R2				1-D10□					4-D13	1.15	0.85
	II-2-164-R2				2-D10@70						2-D13□	1.64

注) *3: スリーブ (t=6mm, l=100mm), *4: スリーブ (t=8mm, l=300mm), リングプレート (t=6mm, φ=345mm)
 Q_H: 開口部終局せん断耐力, Q_M: 梁端曲げ降伏時せん断耐力, 鉄骨の溶接は隅肉溶接で, サイズは6mmとした。

表二 使用鋼材の引張試験結果 (N/mm²)

使用鋼材	使用部位	降伏強度	引張強度	
		σ _y	σ _{max}	
鉄筋	D19 SD345	シリーズ1主筋	395	558
	D22 SD345		394	574
	D22 SD685	シリーズ2主筋	778	983
	D10 SD295A	あばら筋	356	512
	D13 SD295A	開口部縦補強筋 開口部斜め補強筋	372	540
鉄骨	t-6 SS400	ウェブ	301	432
	t-6 STK400	リングプレート	301	432
		スリーブ		
	t-8 STK400	フランジ	341	470
	t-9 SS400		323	463
t-12 SS400	315		441	



図一 SRC有孔梁試験体

試験体で, 1体はスリーブを溶接している。

シリーズ2は, RC部の開口部補強筋量の影響を無孔梁と比較する事を目的としたものである。

表一に試験体概要, 図一に試験体(II-2-115-R2)の鉄骨・配筋図, 表二に使用鋼材の引張試験結果を示す。

3. 実験概要

実験方法は2軸載荷装置を用い, 試験体両端の柱部の回転を拘束した状態で, 梁に逆対称曲げモーメントが生じるように載荷した。載荷は変位制御で部材角 R=0.25%, R=0.5%で正負2回の繰返し載荷を行った後, 以後 R=0.5%ずつの漸増部材角で R=3.0%まで正負各1回の繰返し載荷とした。ただし, シリーズ2については R=5.0%までの漸増繰返し載荷を行っている。

また, 鉄骨部フランジ・ウェブに計7~12点, 鉄筋に計8~18点の歪測定を行った。

4. 実験結果

実験結果の各種ひび割れ発生時耐力及び部材角を表三に示す。

表三 ひび割れ発生時耐力及び部材角

試験体名	ひび割れ発生時					
	剪断		開口部		付着	
	Q _{scr} kN	R (%)	斜め kN	接線 kN	Q _{cr} kN	R (%)
I-2-19	148.3	0.09	173.2	379.4	480	0.6
I-2-38	155.6	0.11	131.4	374.2	452.6	0.47
I-2-68	144.4	0.07	125	358.2	439.8	0.42
I-2-68-R1	150.9	0.11	142.2	327.6	499.8	0.44
II-0	367.8	0.15	—	—	761.6	1.97
II-2-115-R2	556.4	0.35	164.8	427.0	723.8	0.89
II-2-164-R2	448.0	0.24	144.2	351.6	757.2	0.83

SRC無孔梁のII-0を除く6体の有孔梁試験体では, 最大耐力時に開口部の斜めせん断ひび割れの拡大が見られた。またすべての試験体とも, 最大耐力以後に主筋に沿う付着ひび割れが生じ

ているが、すべての試験体とも主筋の降伏は見られず、また、有孔梁試験体はすべて開口部でせん断破壊しており、試験体のせん断耐力は実験値による直接的比較が可能であった。

以下に、試験体の荷重-変形関係と破壊進行状況の特徴を記す。

4.1 シリーズ1の試験体について

図-2に、各試験体の荷重-部材角関係の実験結果を示す。

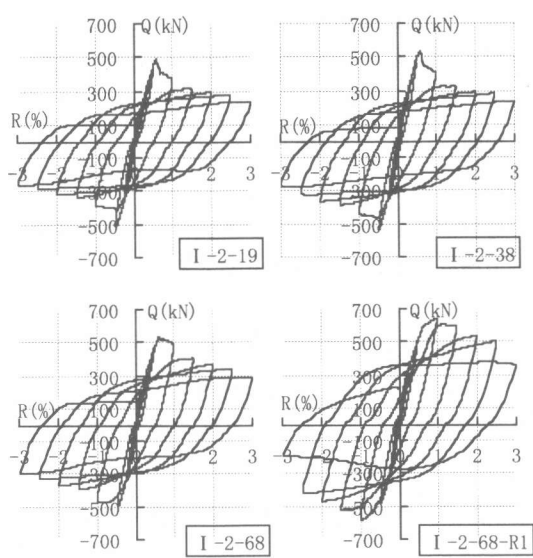


図-2 荷重-部材角関係 (シリーズ1)

各試験体とも、梁端の曲げひび割れは部材角 $R=0.05\%$ 付近で生じ、次いで開口縁から 45° 方向の斜めひび割れが $R=0.125\%$ 付近で生じる。本実験では開口部斜めひび割れは開口部補強筋ひの小さいものほどひび割れ発生荷重が大きくなっているが、部材角 $R=0.25\%$ までの初期剛性は、主筋および開口部補強筋の配筋の差異によらずさほど顕著な差異はない。

部材角 $R=0.5\%$ の繰返し載荷時に、すべての有孔梁試験体で、開口に接するひび割れ (接線ひび割れ) の発生がみられているが、スリーブ補強した I-2-68-R1 については $R=0.25\%$ 付近で、他の3体の試験体で $R=0.3\%$ 以後で生じており、

接線ひび割れ発生時変位・荷重とも小さいことが特徴である。また、開口接線ひび割れの発生時耐力は試験体の主筋量の少ないものほど大きくなる傾向が認められた。

スリーブのない3体の試験体では、 $R=1.0\%$ のループで $R=0.5\%$ をやや越えた付近で最大耐力に達し、直後に急激な耐力低下を示しているが、この耐力低下率は主筋量の小さいものほど大きくなっている。また、スリーブのある I-2-68-R1 の最大耐力に達する部材角は $R=1.0\%$ であった。

鉄骨開口部にスリーブのない3体の最大耐力実験値は、主筋量の少ない試験体ほど小さくなる傾向がみられるが、顕著な差異はない。

しかし、スリーブを溶接補強した I-2-68-R1 の最大耐力は、他の試験体より約 100kN 程度大きく、スリーブ補強が開口部せん断耐力に与える影響が顕著に現れている。

部材角 $R=2.5\%$ のループ時には、開口上下部のコンクリートはせん断ひび割れの拡大によりほぼ剥落しており、以後の載荷ループ時には、主として鉄骨部のみの耐力と思われる紡錘型の履歴特性を示している。

最終破壊状況を写真-1, 2に示す。

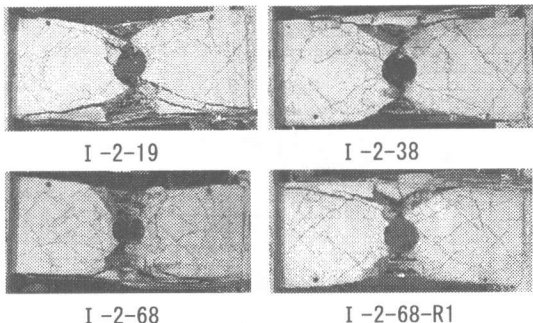


写真-1 最終破壊状況 (シリーズ1)

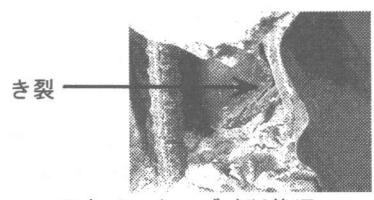


写真-2 ウェブ破断状況

部材角 $R=3.0\%$ の荷重終了時には、開口部付近の主筋はほぼ完全に露出するまでコンクリートは剥落しており、また開口付近の鉄骨ウェブにせん断座屈が生じ、それに伴い鉄骨フランジは外側に膨らんでいることが確認できた。なお、I-2-68-R1 では、 $R=3.0\%$ の負側荷重時に急速に耐力の低下がみられたが、実験終了時の観察によると、鉄骨開口部に溶接補強したスリーブの溶接部の破断と開口部付近のウェブに 45° 方向のき裂、またスリーブの曲げ座屈が確認できた。

4.2 シリーズ2の試験体について

図-3 に、各試験体の荷重-部材角関係の実験結果を示す。

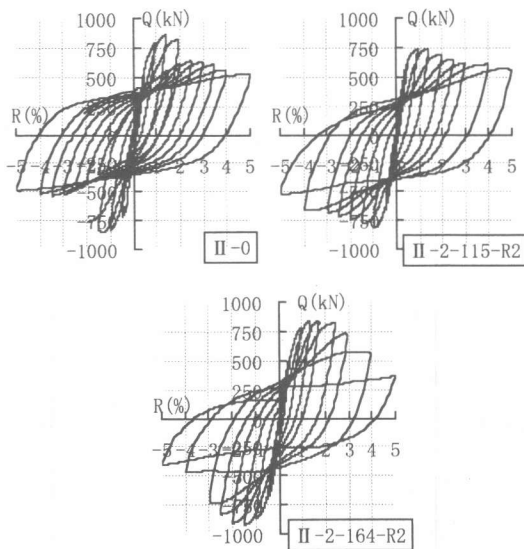


図-3 荷重-部材角関係 (シリーズ2)

開口部補強筋の配置や補強筋量にさほど関係なく、梁端の曲げひび割れは部材角 $R=0.05\%$ 付近で、開口部の斜めひび割れは $R=0.125\%$ 付近で生じ、 $R=0.5\%$ の繰返し荷重時に、開口接線ひび割れの発生がみられた。ここまでの破壊進行状況はシリーズ1 とほぼ同様な傾向であるが、シリーズ2 では $R=1.0\sim 1.5\%$ で最大耐力に達し耐力は低下するが、開口部補強筋量の大きい方が

最大耐力以後の耐力低下は急激になる傾向が認められ、これはシリーズ1 と異なる傾向である。

部材角 $R=2.0\%$ 以後では、コンクリートの剥落が顕著になり、最終的には開口上下部のコンクリートはほぼ完全に剥落している。また、実験終了後の観察では鉄骨開口部のリングプレートは 45° 方向にき裂が入り、さらにリングプレートとスリーブおよびウェブとの溶接部に破断が生じていることを確認した。

なお、無孔梁の II-0 では、梁端の曲げひび割れ発生は有孔梁の場合とさほど顕著な差異はないが、部材角の進展とともに梁全面にせん断ひび割れが発生し、最大耐力以後には主筋・フランジに沿う付着割裂ひび割れが支配的になる。

実験終了時にはほぼ梁全面のコンクリートの剥落がみられた。

なお、SRC 無孔梁の II-0 は実験中に、実験装置の変位制御用の変位計が落下する事故が発生し部材角 $R=2.0\%$ 以後の荷重-変形関係については他の試験体と直接比較することには問題がある。しかし、この試験体も $R=1.0\%$ ですすでに最大耐力に達しており、せん断耐力実験値の比較については問題ないといえる。

実験終了時の破壊状況を写真-3, 4 に示す。

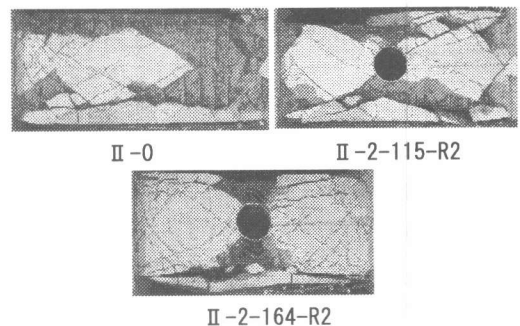


写真-3 最終破壊状況 (シリーズ2)

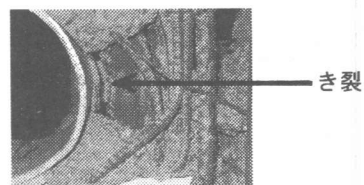


写真-4 ウェブ破断状況

5. SRC 有孔梁のせん断耐力の評価

5.1 降伏せん断耐力について

実験結果の荷重-歪関係の検討から、梁端の主筋・フランジは降伏歪に達していないが、ウェブ・開口部補強筋等は降伏歪に達していた。これら開口部補強筋やウェブの降伏時の耐力を降伏せん断耐力実験値とした。

また、SRC 構造計算標準の設計用せん断耐力式²⁾(以下 SRC 規準式)に材料の降伏強度を代入して求めた値と降伏せん断耐力実験値との比較を表-4に示す。表-4に示すとおり SRC 規準式に材料強度を代入して SRC 有孔梁の開口部降伏せん断耐力を評価すると、若干危険側ではあるもののほぼ適合することがわかる。

表-4 SRC 規準計算値と降伏せん断耐力の比較

試験体名	降伏せん断耐力 Q_y (kN)	$Q_{us} + Q_{us}$ (kN)	$\frac{\exp Q_y}{Q_{us} + Q_{us}}$
I-2-19	413.90	416.64	0.99
I-2-38	435.85	457.77	0.95
I-2-68	456.50	511.90	0.89
I-2-68-R1	511.94	547.34	0.94
II-0	725.67	802.74	0.90
II-2-115-R2	693.87	707.64	0.98
II-2-164-R2	752.63	818.32	0.92

5.2 終局せん断耐力について

SRC 有孔梁の RC 部の終局せん断耐力評価式として修正広沢式の場合と、SRC 規準式に鋼材の降伏強度およびコンクリートの短期許容せん断応力度を代入し求めた 2 通りを計算した。

開口部補強筋量の小さい場合、修正広沢式の値が SRC 規準式に準じた値を上回るが、開口部補強筋量が大きくなると逆転する。これは、開口部補強筋量の終局せん断耐力に与える影響が、SRC 規準式では一次関数となっているのに対し、修正広沢式では 1/2 乗の関数となっているためである。したがって、SRC 規準式では開口部補強筋量を多くした場合には、終局せん断耐力を過大評価する可能性があるといえる。

また、SRC 有孔梁の S 部の終局せん断耐力の算定に関してはウェブ、スリーブ、リングプレートをそれぞれ以下の式(1)~(3)としている。

開口のあるウェブの終局せん断耐力

$$Q_w = \gamma \cdot A_w \cdot \sigma_y / \sqrt{3} \quad (1)$$

スリーブの終局せん断耐力

$$Q_s = 4M_{psc} / (R + 0.5t_s) \quad (2)$$

M_{psc} : スリーブの全塑性モーメント = $b_s \cdot t_s^2 / 4 \cdot \sigma_y$

補強リングプレートの終局せん断耐力

$$Q_p = \alpha \cdot A_p \cdot \sigma_y / \sqrt{3} \quad (3)$$

ここに、

t_s : スリーブ厚さ b_s : スリーブ長さ R : 開口半径

A_w : 鉄骨ウェブ断面積, A_p : リングプレート断面積

σ_y : 鉄骨ウェブ降伏強度, σ_y : スリーブ降伏強度

σ_y : リングプレート降伏強度

SRC 規準式の S 部の評価は、式(1)のみであり、さらに低減係数 γ を開口縁にスリーブがない場合は $\gamma = 0.85$ 、スリーブのある場合には $\gamma = 1.0$ としている。福知式³⁾⁴⁾は式(1)と式(2)の累加強度であり、 $\gamma = 0.88$ としている。したがって、有孔梁の S 部の終局せん断耐力は福知式の値が、常に SRC 規準式により求めた値を上まわる結果となる。また、SRC 規準式・福知式とも S 部開口部の補強リングプレートのせん断耐力については明記していない。

そこで本論では、S 部の終局せん断耐力として式(4)で評価することとした。

$$Q_{UT} = Q_w + Q_s + Q_p \quad (4)$$

但し、本論では、単純にリングプレートの断面積がすべてせん断耐力に寄与するとして、 $\alpha = 1$ としているが、終局時には溶接部の破断が生じていることから低減係数 α についてはさらに検討する必要があると考えている。

表-5 終局せん断耐力計算値

試験体名	RC部		S部	
	SRC規準式 Q_{us} (kN)	修正広沢式 Q_{ult} (kN)	SRC規準式 Q_{us} (kN)	式(4) Q_{UT} (kN)
I-2-19	215.80	233.78	200.84	207.93
I-2-38	256.93	272.32	200.84	207.93
I-2-68	311.06	320.14	200.84	207.93
I-2-68-R1	311.06	320.14	236.28	241.11
II-0	410.70	366.95	392.05	392.05
II-2-115-R2	389.62	347.67	318.02	364.29
II-2-164-R2	500.30	397.29	318.02	364.29

5.3 累加強度による検討

上記の各種耐力式によるSRC有孔梁のRC部、S部の終局せん断耐力の計算結果を表-5に示す。また、表-5に示したRC部、S部それぞれ2種類の計算値を組み合わせ、SRC有孔梁の終局せん断耐力を求めると4通りの結果を得る。表-6に最大耐力実験値と各評価式との関係、また、すべての試験体の平均値と標準偏差も同時に示す。

表-6 最大耐力と累加強度の比較

試験体名	最大耐力 Q_{max} (kN)	Q_{max}	Q_{max}	Q_{max}	Q_{max}
		$r_{fQ_{US}+sQ_{US}}$	$r_{fQ_{UH}+sQ_{UH}}$	$r_{fQ_{US}+sQ_{UH}}$	$r_{fQ_{UH}+sQ_{US}}$
I-2-19	517.0	1.24	1.17	1.22	1.19
I-2-38	534.2	1.17	1.11	1.15	1.13
I-2-68	533.8	1.04	1.01	1.03	1.02
I-2-68-R1	636.8	1.16	1.13	1.15	1.14
II-0	854.8	1.06	1.13	1.06	1.13
II-2-115-R2	774.2	1.09	1.09	1.03	1.16
II-2-164-R2	839.8	1.03	1.10	0.97	1.17
平均		1.11	1.11	1.09	1.13
標準偏差		0.073	0.046	0.081	0.052

表-6より、いずれの累加強度式の場合も最大耐力実験値に対して安全側の評価を得られることがわかるが、SRC規準式を含む累加強度に比べ、RC部を修正広沢式、S部を提案式により求めた累加強度は実験値に対する計算値のばらつきが少なく、終局せん断耐力実験値を精度よく評価しているといえる。

また、シリーズ2のように開口部補強筋比が大きくなると、RC部はSRC規準式、S部は提案式(式(4))を用いた累加強度がもっとも実験値に近い値となるが、これはSRC規準式ではRC部の開口補強筋比の影響が一次関数になっていること、S部の終局せん断耐力にスリーブ管の耐力を加算したことによるものであり、RC部の開口部補強筋量が多くなると過大評価となる可能性がある。

したがって、RC部の開口部補強筋量が多い場合にも、修正広沢式と提案式の累加強度式が最も適切であると考えている。また、式(4)のリングプレートの評価に関しても実用的に使用できるものと考えている。

7. 結論

- 1) SRC有孔梁の開口部降伏せん断耐力は、SRC規準式に鋼材の降伏強度およびコンクリートの短期許容せん断応力度を代入することでほぼ評価できる。
- 2) スリーブのない鉄骨ウェブを用いたSRC有孔梁の場合、RC部の開口部補強筋比が増大してもさほど終局せん断耐力は増大しない。また、開口部にスリーブを溶接することは、SRC有孔梁の終局せん断耐力を著しく上昇させる効果がある。
- 3) 開口部せん断補強筋比の大きい場合、RC部の終局せん断耐力は、SRC規準式では過大評価する可能性がある。
- 4) SRC有孔梁の終局せん断耐力についても累加強度は成立する。このとき、RC部は修正広沢式を、鉄骨部の評価には提案式を用いることにより実験値とよく適合する。
- 5) 鉄骨開口部の溶接補強プレートについては、形状・溶接方法等を考慮し、破断の生じない方法とせん断耐力の評価法等、さらに検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会：筋コンクリート構造計算規準・同解説、日本建築学会、1996
- 2) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、日本建築学会、1998
- 3) 福知保長ほか：円形孔を有するはりの耐力と設計法1. 無補強の場合の耐力、日本建築学会論文報告集、第296号、pp.27-36、1980.10
- 4) 福知保長ほか：円形孔を有するはりの耐力と設計法2. スリーブ管補強付きの場合の耐力、日本建築学会論文報告集、第301号、pp.43-51、1981.3
- 5) 荒田辰次郎、佐藤立美：鉄骨鉄筋コンクリート有孔梁のせん断耐力に関する基礎的研究、広島工業大学研究紀要、第34号、pp.75-82、2000.2

謝辞

本実験は、文部省ハイテクリサーチセンター整備事業により導入された試験装置を使用して行ったものである。

ここに記し謝意を表します。