

論文 鉄骨増設ブレース補強用の接着接合部および間接接合部の終局耐力

小宮敏明*¹, 益尾 潔*²

要旨: 本研究では, 新しい枠付き鉄骨ブレース補強工法の開発を目的とし, 要素実験を実施した。本工法の特徴は, 接合鋼板をアンカー筋と併用して既存 RC 躯体に接着接合し, 間接接合部に横拘束筋として割フープを用いる点である。本論文では, 本実験結果に基づき, ①アンカー筋併用接着接合部の終局強度は, 接着界面のせん断強度とアンカー筋のせん断強度を累加して評価できること, ②本工法による間接接合部の終局強度は, スタッド量と横拘束筋量を考慮して評価できることを明らかにした。

キーワード: 鉄骨ブレース, アンカー筋, 接着接合, 間接接合, 横拘束筋, 終局耐力

1. はじめに

在来工法¹⁾による鉄骨増設ブレースは, 施工時に騒音などの問題が生じる。

このため, 宮内ら²⁾は, 接着工法を開発した。しかし, 同工法によると, 鉄骨枠と既存躯体との隙間を小さくする必要があるのであるため, 鉄骨の寸法精度確保に係わる施工上の問題や構造耐力確保上の問題が存在する。

筆者らは, 上記問題の解決のために, アンカー筋併用接着接合部と間接接合部を介して枠付き鉄骨ブレースを既存 RC 躯体に接合する工法を開発することとし, 要素実験を実施した。本実験の目的は, 両接合部の終局耐力の評価方法を提示することである。本工法の特徴は, 接合鋼板をアンカー筋と併用して既存躯体に接着接合し, 間接接合部の横拘束筋に割フープ(図3

参照)を用いる点である。本接合部を用いた鉄骨ブレース架構の実験は, 別途, 行っている。

表-1 系列1の実験概要

試験体	実験因子						実験結果	
	接着接合	アンカー筋	pa (%)	paσay (MPa)	bτju (MPa)	δsm (mm)	破壊モード	
							接合面	アンカー筋
E-1	樹脂接着	0	0.00	0.00	0.28	0.15	コンクリート面破壊、一部、樹脂界面破壊、EB-2は、コンクリート側面にひび割れ発生	—
EB-1		1×4-M16	0.42	1.47	2.73	0.95		破断
EB-2		2×4-M16	0.84	2.93	3.79	0.90		
EB-3		1×2-M16	0.21	0.73	3.43	0.33		
EB-4		1×3-M16	0.31	1.10	3.41	0.45		
B-1	接着なし	1×4-M16	0.42	1.47	1.39	8.78	アンカー筋のめり込み	破断
B-2		2×4-M16	0.84	2.93	2.61	9.48		

- 1) $pa = \sum a_a / Ab$: アンカー筋比, $\sum a_a$: アンカー筋の全断面積, Ab : 接着面積
 σ_{ay} : アンカー筋の降伏強度 ($\sigma_{ay} = \sigma_{au} / 1.5 = 350 \text{MPa}$, σ_{au} : 実引張強度)
- 2) $b\tau_{ju} = Q_{max} / Ab$, Q_{max} : 最大せん断力, δ_{sm} : Q_{max} 時のずれ変形量

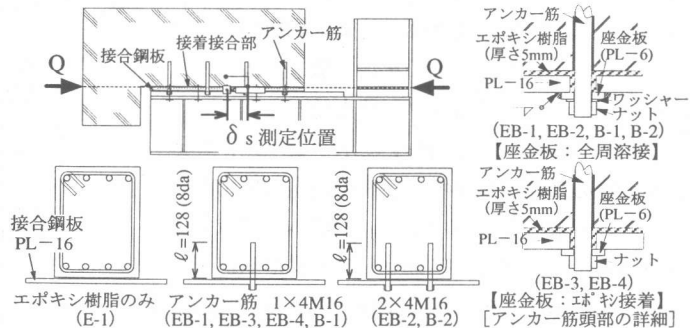


図-1 系列1の試験体

* 1 (財) 日本建築総合試験所 構造部 構造物試験室 研究員 工修 (正会員)

* 2 (財) 日本建築総合試験所 構造部長 工博 (正会員)

表-2 系列2の実験概要

試験体	実験因子						実験結果	
	アンカー筋	固定方法	pa (%)	pa σay (MPa)	b τ ju (MPa)	δ sm (mm)	破壊モード	
							接合面	アンカー筋
M16-W	M16	溶接	0.48	1.70	5.75	0.59	コンクリート面破壊	ねじ部破断
D16-W	D16	溶接	0.61	2.30	5.65	0.40	接着面破壊	ねじ部破断
D16-E		接着	0.61	2.30	6.24	0.66	確認できず	確認できず
D19-W	D19	溶接	0.89	3.31	6.09	0.72	接着面破壊	母材破断
D19-E		接着	0.89	3.31	5.52	0.69		

- 1) $pa = a_a / Ab$: アンカー筋比, a_a : アンカー筋の母材断面積
 Ab : 接着面積, σ_{ay} : アンカー筋の降伏強度
 (M16の場合: $\sigma_{ay} = \sigma_{au} / 1.5 = 350\text{MPa}$, σ_{au} : 実引張強度)
- 2) $b \tau ju = P_{max} / (2 Ab)$, P_{max} : 最大荷重, δsm : Q_{max} 時のずれ変形量
- 3) アンカー筋頭部の固定方法は図-2による。

2. 実験計画

2.1 アンカー筋併用接着接合部の実験

本実験は、下記の3系列よりなり、本接合部の主な仕様は、接合鋼板接着面：ショットブラスト処理，樹脂層厚：5mm，アンカー筋：無機系カプセルアンカーである。

(系列1) 実験因子は、表-1に示すように、アンカー筋本数と接着接合の有無であり、試験体数は7体である。試験体の形状寸法を図-1に示す。EB-3とEB-4は、E-1とEB-1の実験終了後、接合面を再施工した試験体である。

EB-1とEB-2は、固定用座金板を接合鋼板に全周溶接した後、既存躯体と接合鋼板間ならびに座金板とアンカー筋まわりにエポキシ樹脂を注入した。EB-3とEB-4は、座金板周囲を溶接せず、エポキシ樹脂により接着した。また、アンカー筋のみの試験体は、既存躯体と接合鋼板間にビニールシートを介してモルタルを敷き、接合面の不陸を除去し、接着面の付着を切った。

(系列2) 実験因子は、表-2に示すように、アンカー筋の種類、呼び径と頭部の固定方法であり、試験体数は計5体である。試験体の形状寸法を図-2(a)に示す。アンカー筋が異形鉄筋の場合、頭部のねじ部は接合鋼板の厚さ以内に収めた。

(系列3) 実験因子は、表-3に示すように、垂直応力度であり、試験体数は5体である。試験体の形状寸法を図-2(b)に示す。本実験では、一

表-3 系列3の実験概要

試験体	実験因子			実験結果
	σo (MPa)	$b \tau ju$ (MPa)	δsm (mm)	
N-0	0	3.02	0.59	接着界面破壊
N-0.25	0.25	4.08	0.40	
N-0.5	0.5	4.24	0.66	
N-1.0	1.0	3.39	0.72	
N-2.0	2.0	5.56	0.69	

- 1) σo : 垂直応力度
- 2) $b \tau ju = P_{max} / (2 Ab)$, P_{max} : 最大荷重
 Ab : 接着面積, δsm : Q_{max} 時のずれ変形量

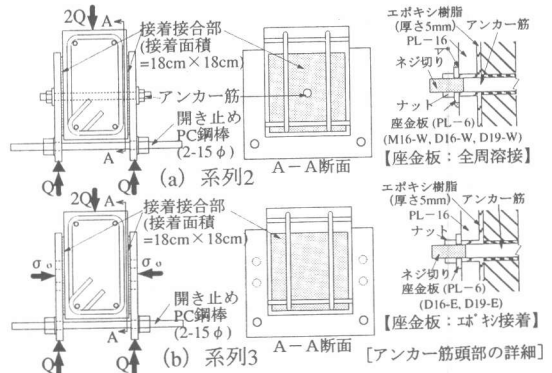


図-2 系列2と系列3の試験体

表-4 供試材料の強度試験結果

(a) コンクリートおよびグラウトモルタル

種別	実験種別	σ_B (MPa)	ϵ_{co} (%)	E_c (GPa)	σ_{ct} (MPa)
コンクリート	系列1, 間接接合部	23.6	0.178	23.9	2.35
	系列2, 系列3	26.1	0.174	25.2	2.51
モルタル	系列1, 間接接合部	53.7	0.355	26.5	5.20

σ_B : 圧縮強度, ϵ_{co} : σ_B 時ひずみ度
 E_c : ヤング係数, σ_{ct} : 割裂強度

(b) 鉄筋

実験種別	部位種別	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	伸び (%)	
系列1, 2	アンカー筋	M16	—	524	—
		D16	374	539	27
		D19	374	561	24
間接接合部	割アープ	D10	377	534	27
	スパイラル筋	D6	406	530	24
	軸筋	D13	397	577	26

σ_y : 降伏点, σ_u : 引張強度

(c) エポキシ樹脂

実験種別	σ_{tu} (MPa)	E_r (GPa)	養生期間中の気温(°C)
系列1	39.0	2.07	22~31
系列2, 3	29.0	1.69	25~31

σ_{tu} : 引張強度, E_r : 引張弾性率
 (試験方法はJIS K 7113による)

表-5 間接接合部の実験概要

試験体	実験因子					実験結果		
	Hj (mm)	スタッド		横拘束筋		s τ ju (MPa)	δ sm (mm)	
		間隔 (mm)	Ds (%)	形式	間隔 (mm)			pw (%)
20-S20-H5	200	200	1.42	割 フープ (D10)	50	1.42	5.45	12.6
20-S20-H10					100	0.71	4.97	8.7
20-S20-H20					200	0.36	4.47	5.4
20-S30-H7.5		300	0.95		75	0.95	3.36	11.9
20-S30-H15					150	0.47	3.15	7.2
20-S30-H30					300	0.24	2.84	6.4
15-S30-H15	150			150	0.47	2.43	4.4	
20-S30-S5	200			スパイ ラル (D6)	50	0.64	2.31	5.8
20-S30-S10					100	0.32	2.34	7.9

- 1) Hj: 間接接合部高さ, $p_s = \Sigma A_s / A_j$: スタッド比, ΣA_s : 全断面面積
 $p_w = a_w / (W_j s_w)$: 横拘束筋比, A_j, W_j : 間接接合部の横断面積と幅
 a_w, s_w : 1組の横拘束筋の横断面積と間隔
- 2) $s \tau ju = Q_{max} / A_j$, Q_{max} : 最大せん断力, δsm : Q_{max} 時のずれ変形量

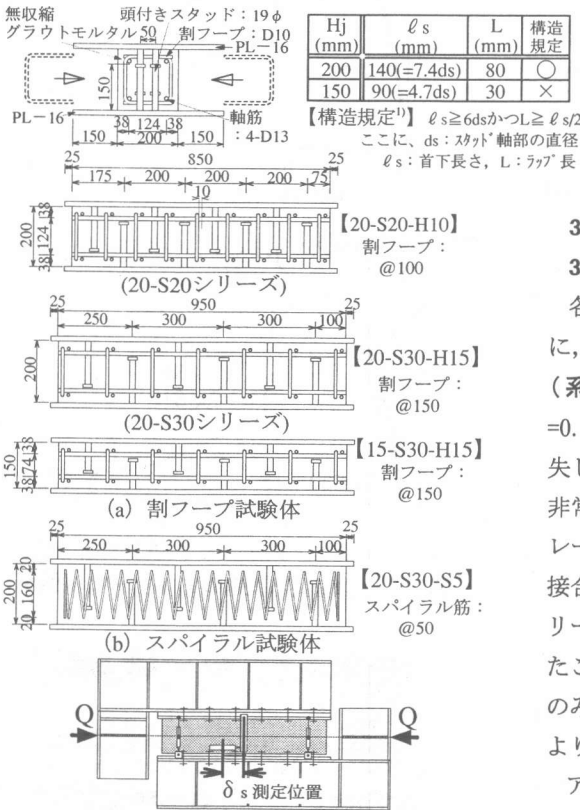


図-3 間接接合部の試験体

定垂直応力下でせん断力を加力した。

供試材料の強度試験結果を表-4に示す。

2.2 間接接合部の実験

実験因子は、表-5に示すように、本工法試験体では、スタッド間隔、割フープ間隔、間接接

合部高さHjであり、在来工法試験体では、スパイラル筋間隔とした。試験体数は計9体であり、試験体の形状寸法を図-3に示す。

スタッドの首下長さとラップ長ℓは、図-3に示すように、Hj=200mmの場合には耐震改修指針¹⁾の構造規定を満足し、Hj=150mmの場合には満足していない。なお、接合鋼板のグラウトモルタルとの接触面は、黒皮のままとした。ここでは、割フープとスパイラル筋を総称して横拘束筋と呼ぶ。

供試材料の強度試験結果を表-4に示す。実験方法は、各実験ともに、図-1~3中に示すように、接合面にせん断力を加えた。ただし、系列3は同時に一定垂直応力を加えた。

3. 実験結果および考察

3.1 アンカー筋併用接着接合部

各系列の $b \tau_j - \delta s$ 関係を図-4に示す。ここに、 $b \tau_j$: せん断応力度, δs : ずれ変形。

(系列1) 接着接合のみの試験体E-1は、 $\delta s = 0.2\text{mm}$ 程度で最大耐力に達し、瞬時に耐力を喪失した。本試験体の最大強度は0.3MPaであり、非常に低い。これは、本実験では、鉄骨増設ブレース架構に組み込んだ場合に想定される間接接合部の拘束力が作用していないため、コンクリート面の局所的な破壊が各個撃破的に進行したことによると考えられる。また、アンカー筋のみの試験体B-1, B-2は、アンカー筋の破断により、 $\delta s = 10\text{mm}$ 程度で最大耐力に達した。

アンカー筋併用の試験体EB-1~EB-4は、 $\delta s = 0.3 \sim 1\text{mm}$ 程度で最大耐力に達した。最大耐力は、接着接合のみの場合やアンカー筋のみの場合に比べて明らかに増大した。また、最大耐力後、いずれもある程度の耐力を維持し、その度合いは、アンカー筋本数が多いほど大きくなった。これらは、①アンカー筋自身のせん断抵抗効果、②コンクリートのひび割れ発生後、アン

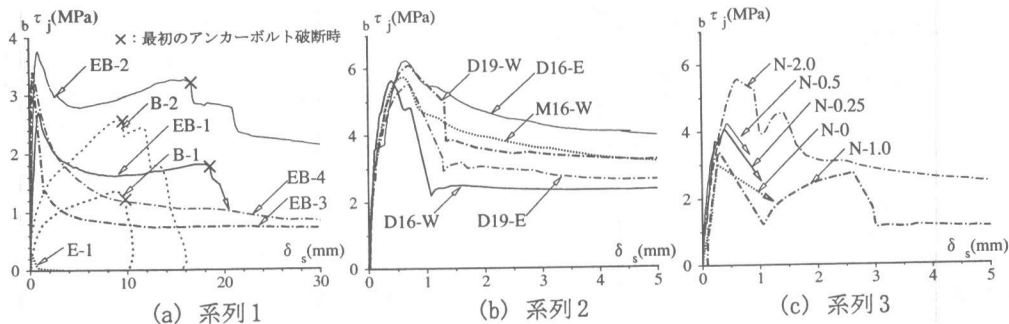


図-4 アンカー筋併用接着接合部の $b\tau_j - \delta_s$ 関係

カー筋の引張応力によって生じる接着接合部に対する垂直応力(拘束力)の効果³⁾に起因すると考えられる。

(系列2) 各試験体ともに、 $\delta_s = 0.4 \sim 0.6$ mm 程度で最大強度 $b\tau_{ju}$ (5.5MPa ~ 6.2MPa) に達し、M16-W, D16-W, D19-E の3体は、最終変形時にアンカー筋が破断した。

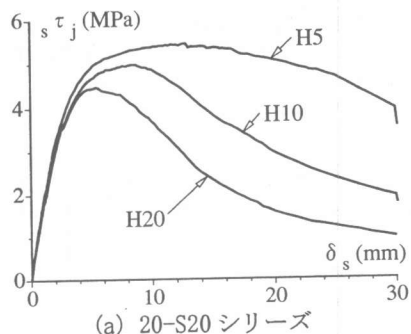
アンカー筋が異形鉄筋の場合、破断位置は母材またはねじ部である。ただし、M16-W と D16-W の最大強度はほぼ一致した。また、座金板を溶接した試験体と接着接合した試験体の最大強度に有意な差はみられなかった。

(系列3) 試験体 N-1.0 を除くと、垂直応力度 σ_o の増加に伴い、最大強度 $b\tau_{ju}$ は、3.0MPa ~ 5.6MPa に増大した。各試験体ともに、破壊面は接合鋼板界面であった。

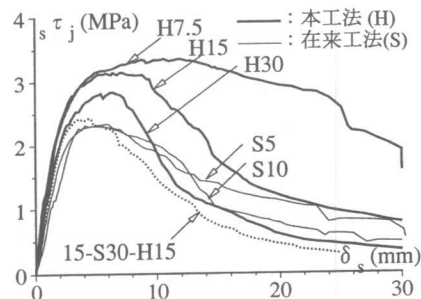
3.2 間接接合部

$s\tau_j - \delta_s$ 関係を図-5に示す。ここに、 $s\tau_j$:せん断応力度、 δ_s :ずれ変形量。これによると、20-S20, 20-S30 の本工法試験体は、割フープ間隔が小さいと、最大強度が増大し、その後の強度低下度合いが小さい。20-S30 の在来工法試験体は、スパイラル筋量に係わらず、最大強度および変形性状に有意な差は認められなかった。これらより、割フープは、グラウトモルタルとスタッドを外周部から拘束し、最大強度と変形性能を高める効果を有したといえる。

間接接合部高さ H_j が 150mm の 15-S30-H15 は、200mm の 20-S30-H15 に比べて、最大強度および変形性能が明らかに低下した。すなわち、間接



(a) 20-S20 シリーズ



(b) 20-S30 シリーズおよび 15-S30-H15

図-5 間接接合部の $s\tau_j - \delta_s$ 関係

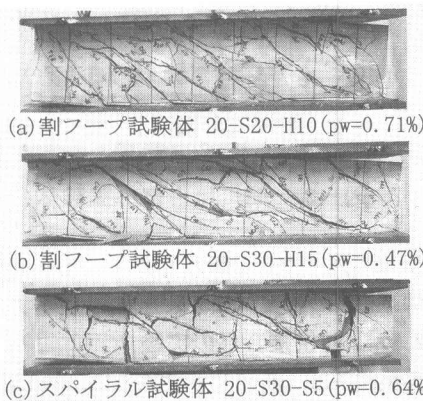


写真-1 間接接合部試験体の破壊状況

接合部高さが小さいと、スタッドの定着長とラップ長が不足し、グラウトモルタルを介したスタッド間のせん断力伝達能力が低下する。

本工法試験体は、写真-1に示すように、割フープ間隔が増えると、斜めひび割れの開口幅が大きくなり、スタッド量が少ないと、斜めひび割れが隣接するスタッド間をまたいで進展する傾向があった。H_j=150mmの場合、スタッド間をまたぐひび割れが最も著しかった。在来工法試験体では、上記のひび割れのほかにスタッド軸部に沿うひび割れが著しかった。

なお、スタッド間隔および横拘束筋間隔が増えるか、H_j=150mmになると、開き量δ_hが増加した。すなわち、横拘束力が減少し、せん断応力度の条件が厳しくなると、接合部の開き量が増加した。一方、H_j=200mmの各試験体は、グラウトモルタルに斜めひび割れ発生後、横拘束筋のひずみ度が増加し、最大強度到達までに、著しい塑性ひずみが発生した。

4. 終局耐力の評価

4.1 アンカー筋併用接着接合部

系列1～系列3について等価拘束応力度σ_σを式(1)で定義し、これと接合面のせん断強度bτ_{ju}との関係を図-6に示す。

$$\sigma_{\sigma} = p_a \sigma_{ay} + \sigma_o + \Delta \sigma_o \quad (1)$$

p_a: アンカー筋比

σ_{ay}: アンカー筋の降伏強度

σ_o: 系列3の実験で与えた垂直応力度

Δσ_o: 系列2と系列3の実験時の開き止めPC鋼棒による接着面圧縮縁の付加垂直応力度

アンカー筋が異形鉄筋の場合、アンカー筋比p_aは母材断面積を用いて算出した。すなわち、アンカー筋は、最終状態にねじ部が破断する恐れはあるが、せん断強度時には母材断面が有効に抵抗すると考えた。

図-6に示すように、系列2と系列3のせん断強度bτ_{ju}は、系列1よりも大きい。これは、系列2と系列3の試験体寸法が小さく、接着面の

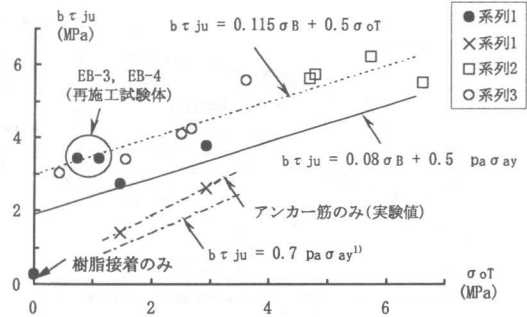


図-6 bτ_{ju} - σ_{oT} 関係

応力が一様化したことや試験方法の差異に起因すると考えられる。系列2と系列3の実験結果の直線回帰式を下式に示す。

$$b\tau_{ju} = 0.115\sigma_B + 0.5\sigma_{\sigma} \quad (2)$$

σ_B: コンクリートの圧縮強度

上式の第1項は接着界面のせん断強度、第2項はアンカー筋のせん断強度を表す。第2項の係数0.5は、系列1のアンカー筋併用の実験結果と大差なく、かつ、アンカー筋の実験結果よりも小さく、接着接合部とアンカー筋の変形性状の差異を勘案すると、概ね妥当な値である。

ここで、本接合部のせん断強度は、系列1のアンカー筋併用の実験結果に対してやや余裕をもたせ、下式により評価する。

$$b\tau_{ju} = 0.08\sigma_B + 0.5p_a\sigma_{ay} \quad (3)$$

本実験結果では、接着接合のみのせん断強度bτ_{ju}が非常に低い。しかし、実際の鉄骨ブレース架構では間接接合部からの拘束力がある程度期待できるため、接着接合のみの場合を含め、式(3)によってせん断強度bτ_{ju}を評価する。

4.2 間接接合部

間接接合部のせん断強度sτ_{ju}と横拘束筋量p_wσ_{wy}を図-7(a)に示す。ここに、p_w(=a_w/b_s): 横拘束筋比, a_w, s, σ_{wy}: 1組の割フープまたはスパイラル筋の断面積と間隔および降伏強度, b: 間接接合部の幅。これによると、本工法の20-S20と20-S30シリーズの横拘束筋量p_wσ_{wy}に対するせん断強度sτ_{ju}の増加割合は大凡等しい。両者の回帰式を下式に示す。

$$S20 : s\tau_{ju} = 4.2 + 0.23 p_w \sigma_{wy}$$

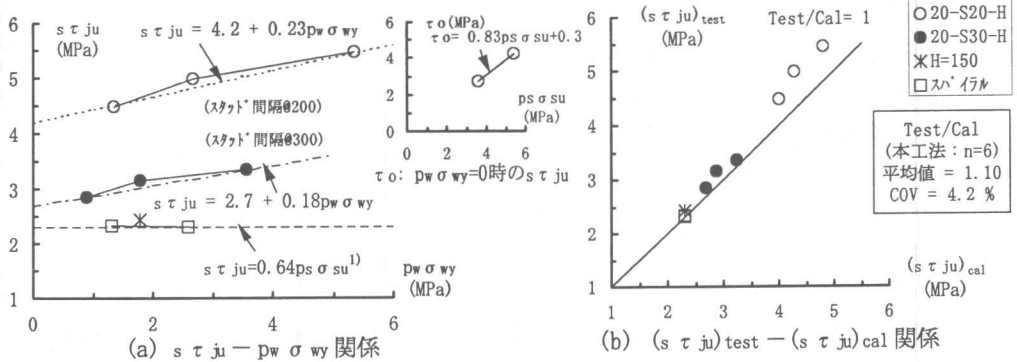


図-7 間接接合部の検討結果

$$S30: s \tau_{ju} = 2.7 + 0.18 p_w \sigma_{wy} \quad (4)$$

なお、図-7(a)に示すように、改修指針式¹⁾によるスパイラル筋の $s \tau_{ju}$ は、式(4)の第2式よりも低く評価される。また、式(4)は、割フープ筋量が本実験範囲よりも少ない場合には適用できないことを付記する。

式(4)の第1項(τ_o)は、図-7(a)に示すように、スタッド量 $p_s \sigma_{su}$ に比例するが、定数項は無視できる。すなわち、 $s \tau_{ju}$ は $p_s \sigma_{su}$ と $p_w \sigma_{wy}$ によって決まり、せん断強度 $s \tau_{ju}$ は式(5)で評価する。なお、両シリーズのスタッド量 $p_s \sigma_{su}$ は5.4MPaおよび3.6MPaとした。ただし、 σ_{su} はスタッドの規格引張強度400MPaに等しいとした。

$$s \tau_{ju} = 0.7 p_s \sigma_{su} + 0.2 p_w \sigma_{wy} \quad (5)$$

$p_s = \sum a_s / (W_j l_o)$: スタッド比

$\sum a_s, \sigma_{su}$: スタッドの全断面積と引張強度
 W_j, l_o : 間接接合部の幅および長さ

なお、本工法による割フープ組み立て用軸筋の最大耐力時のひずみ度測定値は、いずれの場合も、0.10~0.19%であり、せん断ひび割れの抑制効果は小さかった。

式(5)による計算値と実験値との関係を図-7(b)に示す。ただし、 H_j が150mmの本工法試験体と在来工法試験体の計3体は、改修指針式により計算した。これによると、20-S20, 20-S30の本工法試験体は、実験値/計算値の平均値および変動係数は1.10および4.2%であり、安全側に評価される。これは、改修指針式による在来工法試験体の実験値/計算値の値と遜色がない。

5. まとめ

- 1) アンカー筋併用接着接合部は、アンカー筋量の増加に伴い、最大耐力およびその後の耐力維持率が增大した。終局強度 $b \tau_{ju}$ は、接着接合部とアンカー筋との変形状の差異を勘案し、接着界面のせん断強度とアンカー筋のせん断強度を累加した式(3)によって評価できる。
- 2) 割フープを用いた間接接合部は、スパイラル筋を用いた場合に比べて、終局耐力と変形性能の確保の点で優れた。終局強度 $s \tau_{ju}$ は、スタッド量 $p_s \sigma_{su}$ と横拘束筋量 $p_w \sigma_{wy}$ を考慮した式(5)によって評価できる。ただし、本式は、高強度グラウトモルタルを介したせん断力の伝達機構の成立が前提となる。

謝辞

本研究は、(株)ケー・エフ・シーと(株)関西リペア工業の協力のもとに実施したものであり、ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説, 1990
- 2) 宮内靖晶, 東端泰夫, 毛井崇博, 太田義弘: 鉄骨プレースの接着接合により耐震補強されたRC架構の力学性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 1153-1158, 1998
- 3) J. A. Hofbeck, I. O. Ibrahim, A. H. Mattock: Shear Transfer in Reinforced Concrete, ACI Journal, Vol. 66, No. 2, pp. 119-128, Feb. 1969