

論文 長締めボルト引張接合形式による柱 RC・梁 S 混合接合部に関する実験的研究

福本 昇^{*1}・田渕基嗣^{*2}・田中 剛^{*3}・佐藤尚隆^{*4}

要旨：本論文は、H形鋼梁の端部を鉄筋コンクリート造柱の接合部に埋め込み、エンドプレートを介して長締め高力ボルトにより引張接合する場合の接合部の力学的性状を実験的に調べたものである。内部十字型柱・梁接合部を対象とした実験より、接合部詳細が接合部の弾塑性挙動に与える影響を明らかにし、この接合構法による接合部の耐力算定法を提案した。

キーワード：混合構造、ボルト引張接合、支圧耐力、ボルト耐力、柱・梁接合部

1. はじめに

筆者等は、鉄筋コンクリート造（以下RC造）柱とH形鋼梁で構成されるラーメン架構において、図-1に示すように、H形鋼梁の端部をRC造接合部に埋め込み、2本の梁を角形鋼管およびエンドプレートを介して長締めボルトにより引張接合する構法を考案した[1]。本構法の特徴は、柱・梁接合部において、(1)溶接施工が無い、(2)コンクリートの充填性が良い、(3)梁継手が不要である、(4)施工誤差を接合部内で吸収できる、ことにある。

本稿では、この接合方法の十字型水平加力実験の結果について報告するとともに、接合部の支圧耐力およびボルト引張接合の耐力を検討する。なお、本構法では鋼管部分をプレキャスト化することによりボルトに初期張力を導入することも可能であるが、今回は接合部の弾塑性挙動に関する基礎資料を得ることを目的としており、長締めボルトには初期張力を導入していない。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、エンドプレートを8本の長締めボルトにより接合した十字型試験体である。試験体の形状および諸元を図-2および表-1に示す。接合部の詳細の例を図-3に示す。いずれの試験

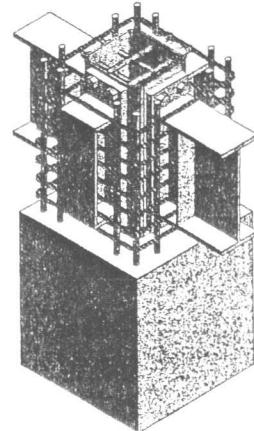


図-1 柱・梁接合部

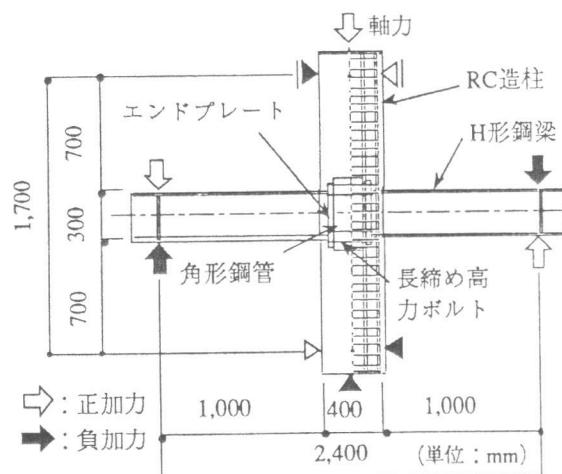


図-2 試験体形状

*1 (株) 浅沼組技術研究所建築構造研究室室長（正会員）

*2 神戸大学教授 工学部建設学科, 工博

*3 神戸大学助手 工学部建設学科, 工博（正会員）

*4 (株) 浅沼組技術研究所建築構造研究室研究員（正会員）

表 - 1 試験体の諸元

(単位:mm)

試験体名	B-1	B-2	B-3	S-1	S-2	S-3	S-4
断面 BxD		400x400			400x400		
RC 柱 主筋	12-D16	pg=1.49 %			12-D16	pg=1.49 %	
横補強筋	□-D6 @55	pw = 0.29 %			□-D6 @55	pw = 0.29 %	
軸力比	0.2 · Ncu ^{*1}				0.2 · Ncu ^{*1}		
S梁 断面	BH-300x150x9x12				BH-300x150x9x12		
高力ボルト	8-M12				8-M16		
接合部 エンドプレート	PL-19	PL-19	PL-12			PL-25	
角形鋼管	□-200 ² x4.5		無	□-200 ² x4.5	□-200 ² x4.5	□-200 ² x9.0	
横補強筋	□-D6 @55 pw = 0.29 %	□-D6 @30 ^{*2} pw = 0.53 %	□-D6 @55 pw = 0.29 %	□-D6 @55 pw = 0.29 %	□-D6 @30 ^{*3} pw = 0.53 %	□-D6 @55 pw = 0.29 %	

*1 : $N_{cu} = \sigma_B \cdot A_c + \sigma_y \cdot A_s$ (σ_B : コンクリート圧縮強度, A_c : コンクリート部分の断面積, σ_y : 鉄筋の降伏点
 A_s : 全主筋断面積), *2 : 接合部を含む 2H (H は梁せい) の範囲, *3 : 接合部内 H の範囲

体にも直交梁は付けていない。試験体数は 7 体であり、変化させた実験因子は、(1) ボルト径、(2) 角形鋼管の板厚、(3) 接合部の横補強筋量、(4) エンドプレートの板厚、である。試験体は実大の 1/2 模型であり、柱断面および梁断面は共通である。本実験では、接合部により最大耐力が決定されることを目的としているため、H 形鋼梁には十分な板厚を与えた。

これらの試験体の中で、M12 のボルト径を用いた試験体 (B シリーズ) では、長締めボルトの降伏、破断により最大耐力が決定するように、また、M16 のボルト径を用いた試験体 (S シリーズ) では、接合部の支圧破壊またはせん断破壊により最大耐力が決定するように試験体の設計を行った。試験体 B-1 および S-2 がそれぞれのシリーズの基本試験体である。

使用材の機械的性質を表 - 2 に示す。コンクリートの設計基準強度は $F_c = 26 \text{ MPa}$ ($= 270 \text{ kgf/cm}^2$) であり、柱主筋には D16 (SD345)、横補強筋には D6 (SD295) を用いている。梁およびエンドプレートの材質は、SS400 であり、鋼管の材質は STKR400 である。長締めボルトには、F11T の高力ボルトを使用した。

2.2 載荷方法・測定方法

載荷は、図 - 2 に示すように柱の反曲点位置をピン支持し、軸力比 = 0.2 に相当する一定軸力を柱に与えた後、梁両端に逆対称荷重を与える形式の変位制御に基づく正負交番漸増繰り返し載荷である。載荷履歴として、層間変形角 $R = 1/200 \text{ rad.}$ で 1 サイクル載荷した後、 $R = 1/100 \text{ rad.}, 2/100 \text{ rad.}, 3/100 \text{ rad.}, 4/100 \text{ rad.}$ で各 3 サイクル載荷することを計画した。

層間変形は、試験体の上下柱の反曲点位置に支持した計測フレームに取付けた変位計により計測し、接合部のせん断変形は、接合部コンクリートに埋め込んだ 4 本のネジ棒の対角方向変位

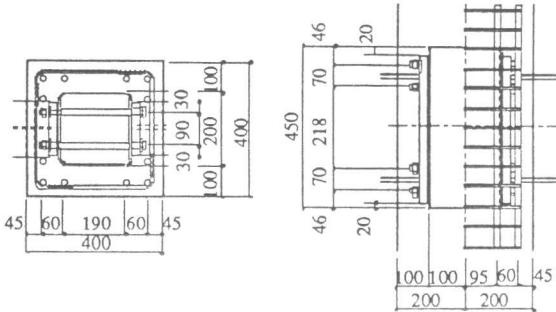


図 - 3 接合部詳細 (単位:mm)

表 - 2 素材の機械的性質

(1) 鋼材

部材	板厚・径 (mm)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
梁 フランジ	PL-12	295	455	40.5
	PL-9	304	443	40.6
柱 主筋	D16	414	604	21.3
	D6	410	533	28.1
接合部 エンドプレート	PL-12	282	438	44.6
	PL-19	267	454	45.4
	PL-25	274	444	30.8
高力ボルト	M12	1090	1206	11.0
	M16	1123	1194	14.1
角形鋼管	PL-4.5	406	466	39.6
	PL-9	362	441	38.8

(2) コンクリート

試験体名	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 ($\times 10^4 \text{ MPa}$)
B-1	35.0	2.74
B-2	34.1	2.65
B-3	34.6	2.67
S-1	32.3	2.61
S-2	31.9	2.53
S-3	33.5	2.61
S-4	33.9	2.67

を変位計により計測した。主筋、横補強筋、長締め高力ボルト、H形鋼梁および角形鋼管の歪は、歪ゲージにより測定した。

3. 実験結果

3.1 実験経過

図-4に実験最終時のひび割れ状況の例として試験体B-1、S-1およびS-3のものを示す。実線および破線はそれぞれ図-2に示す正加力時および負加力時に発生したひび割れを示す。

いずれの試験体においても梁フランジ上下端のコンクリートの圧壊、RC柱側面のひび割れおよび柱正面の主筋に沿った縦方向のひび割れが顕著に見られ、支圧破壊に伴う梁の剛体回転が認められた。試験体S-1では、上記の損傷以外に接合部に斜めせん断ひび割れが生じ、コンクリートの剥落に至った。なお、Bシリーズについては、試験体B-3で $R=2/100\text{rad}$ 時に、試験体B-1およびB-2で $R=3/100\text{rad}$ 時において、高力ボルトが破断した。

H形鋼梁については、歪が塑性域に入り梁フランジの局部座屈が僅かに認められた試験体もある。一方、RC柱の主筋の歪は弾性範囲内に留まった。

3.2 荷重-変形関係

柱せん断力 Q と層間変形角 R との関係を図-5に示す。図中的一点破線は、H形鋼梁の全塑性モーメントに対応する柱せん断力を示し、破線は、架構の弾性剛性の計算値を示す。弾性剛性は、柱および梁の曲げ変形およびせん断変形を考慮し、接合部は剛域と仮定し計算した。Bシリーズの試験体では層間変形角 $R=2/100\text{ rad}$ 時に最大耐力に達し、その後の履歴性状は著しい逆S字型を示した。Sシリーズの試験体では層間変形角 $R=2/100 \sim 3/100\text{rad}$ 時に最大耐力に達し、その後の履歴性状は逆S字型を示すが、Bシリーズに比べてその程度は緩やかである。以下に各実験因子が架構の弾塑性挙動に及ぼす影響を示す。

1) ボルト径の影響：M12のボルトを使用した試験体B-1とM16のボルトを使用したS-2を比較すると、 $R=1/100\text{rad}$ までは両者の挙動に差は見られない。しかし、S-2はB-1に比べて最大耐力が16%上昇し、 $R=2/100\text{rad}$ における履歴性状の逆S字型の程度も緩やかである。

2) 角形鋼管の板厚の影響：板厚=4.5mmの試験体S-2と板厚=9.0mmのS-4を比較すると、板厚を厚くすることにより最大耐力が9%上昇し、 $R=3/100\text{rad}$ における繰り返しによる荷重低下も少ない。また、試験体S-2と鋼管を設けなかったS-1を比べると最大耐力が15%上昇している。

3) 接合部横補強筋量の影響：Bシリーズにおいて、横補強筋量を増やした試験体B-2とB-1を比較すると、両者の最大耐力および復元力特性に差は見られない。Sシリーズにおいて、横補強筋を増やした試験体S-3はS-2に比べて、最大耐力には差がないが、 $R=3/100\text{rad}$ における繰り返しによる荷重低下は少ない。

4) エンドプレートの板厚の影響：エンドプレートの板厚を薄くした試験体B-3はB-1に比べて最大耐力で14%低下し、ボルトの破断も早期に生じている。

3.3 接合部のせん断変形

試験体B-1、S-1およびS-2について、柱せん断力 Q と接合部のせん断変形角 γ との関係を図-6に示す。試験体S-1を除く全ての試験体において、 $R=2/100\text{ rad}$ 時における $\gamma = 0.1/100 \sim$

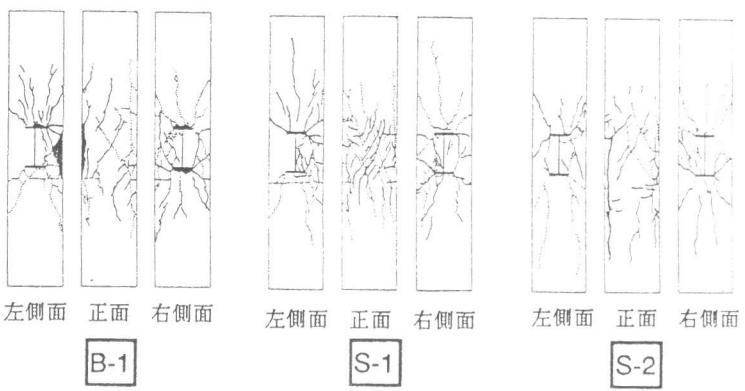


図-4 最終ひび割れ状況

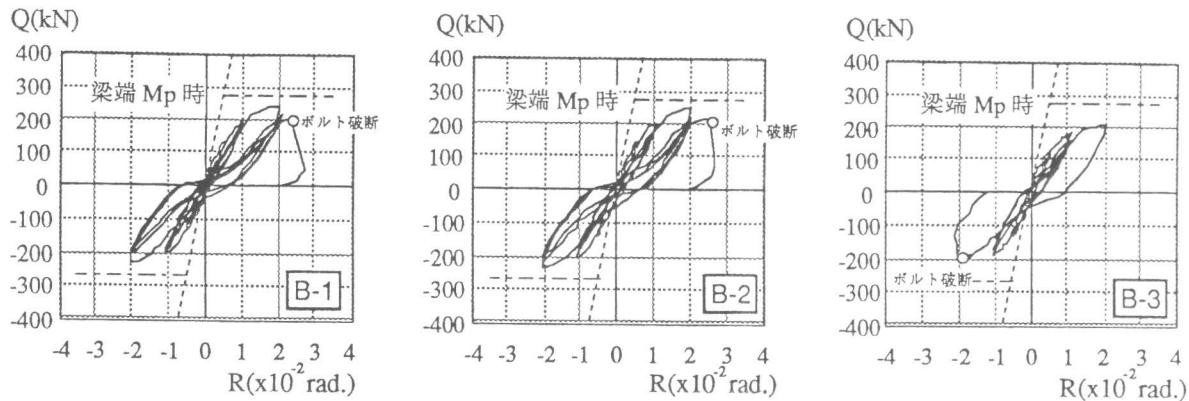


図-5 (1) 柱せん断力ー層間変形角関係 (B シリーズ)

0.3/100 rad. と小さい値に留まった。試験体 S-1 では、 $R=2/100$ rad. 時における $\gamma = 0.6/100$ rad. であった。

3.4 ボルトの歪性状

試験体 B-1 および S-2 について、片側フランジ位置の 4 本のボルトに生じる張力の合計 $4_b N$ と梁端曲げモーメントを上下フランジの重心位置で偶力置換した引張力 $b T$ との関係を図-7 に示す。B シリーズの試験体ではボルトの張力は降伏耐力に達しているが、S シリーズの試験体では降伏耐力に達していない。ボルトに伝達する引張力の割合 $4_b N / b T$ と層間変形角 R との関係を図-8 に示す。ただし、 $4_b N / b T$ は各層間変形角の正加力時 1 回目の値である。両シリーズとも層間変形角の増加に伴いボルトに伝達する引張力の割合は増加する。これは、図-9 に示す横補強筋のエンドプレートを拘束する圧縮力 $e C$ が層間変形角の増加に伴い限界に達するためと考えられる。 $R=2/100$ rad. におけるボルトに伝達する引張力の割合は、B シリーズで 60% 程度、S シリーズで 74% 程度である。

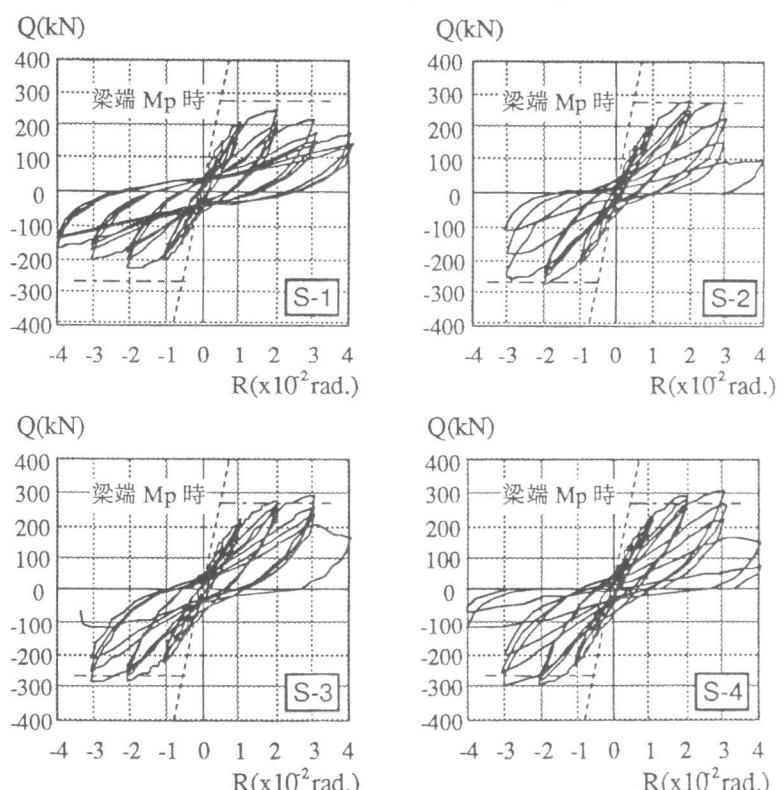


図-5 (2) 柱せん断力ー層間変形角関係 (S シリーズ)

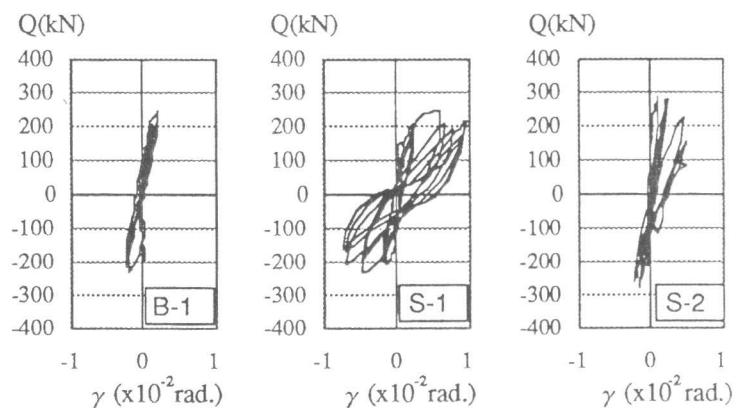


図-6 柱せん断力ー接合部せん断変形角関係

3.5 角形鋼管の歪性状

図-10に各試験体の正加力ピーク時における角形鋼管ウェブの最大主歪および最小主歪を示す。最大主歪の角度は、いずれの試験体でも柱材軸から $\phi = 30^\circ \sim 35^\circ$ 程度である。主歪の絶対値は層間変形角の増加に伴い比例的に増加しており、 $R = 2/100\text{rad}$ においてBシリーズでは0.07%～0.09%程度、Sシリーズでは0.11%～0.17%程度である。

3.6 横補強筋の歪性状

図-11に各試験体の正加力ピーク時の横補強筋の歪分布を示す。Sシリーズでは、 $R = 2/100\text{ rad}$ においてほとんどの横補強筋の歪は降伏歪を越えている。一方、Bシリーズでは、試験体B-3を除き $R = 2/100\text{ rad}$ において横補強筋の歪の最大値が降伏歪程度である。試験体B-3の歪はB-1およびB-2に比べて大きな値となっているが、これはエンドプレート厚が薄いためエンドプレートの曲げ変形が生じた結果と考えられる。

4. 耐力評価

4.1 ボルト引張接合の耐力

引張ボルトの最大耐力は、高力ボルト指針[5]に基づくスプリットティー形式接合部の最大引張耐力と図-9に示す範囲の横補強筋が有効に働くと考えた時の ϵ_{EC} の累加とする。

4.2 支圧耐力

文献[4]を参考にして本構法における接合部の剛体回転に抵抗する支圧耐力 jM_R を

$$jM_R = f_C \cdot d_f + h_T \cdot d_h$$

で表す。ここで、 f_C および d_f は梁フランジに作用する支圧

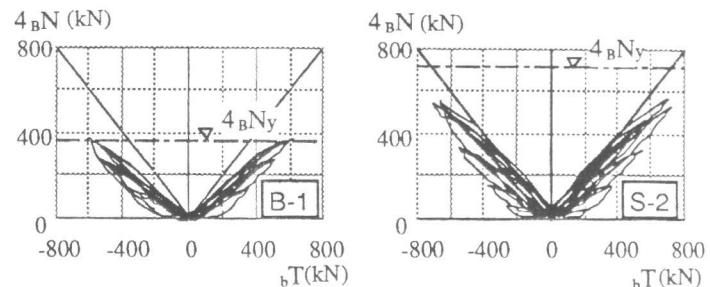


図-7 ボルト張力-引張力関係

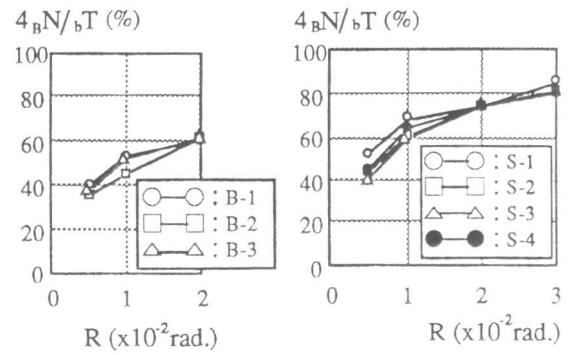


図-8 ボルトに伝達する引張力の割合

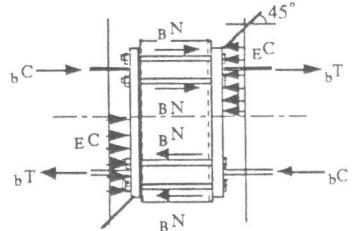


図-9 梁引張力の伝達

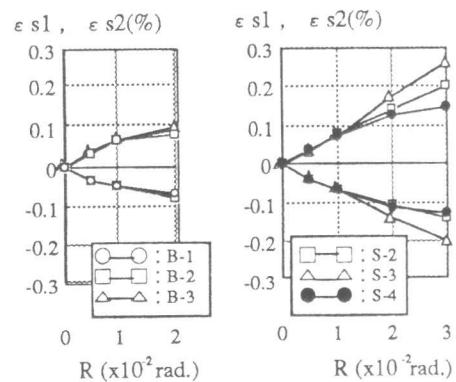


図-10 角形鋼管の主歪

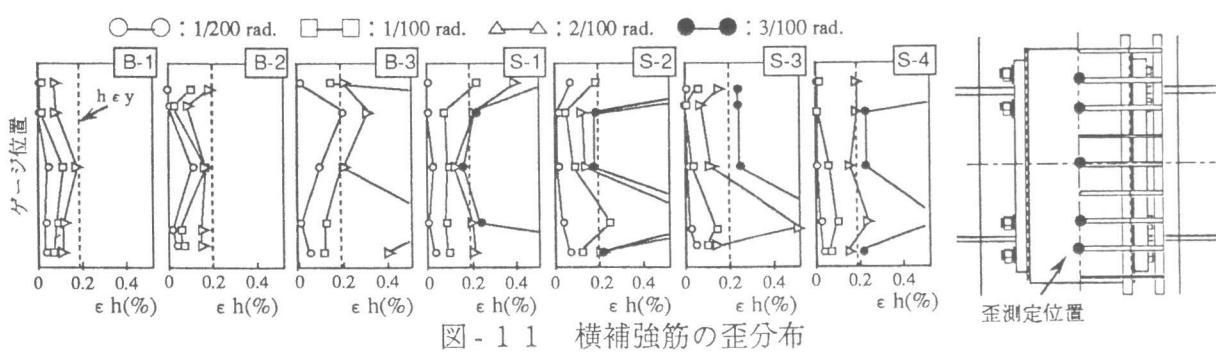


図-11 横補強筋の歪分布

力およびその応力中心間距離を示し、 b_T および d_h は横補強筋が鋼管の剛体回転に抵抗する力およびその応力中心間距離を示す。なお、 b_T は、図-12 に示す範囲の横補強筋が有効に働くと考える。

4.3 考察

表-3 に実験最大耐力と各部材の終局耐力計算値との比較を示す。計算値は全て柱せん断力に換算した値である。柱の曲げ終局耐力およびせん断終局耐力は RC 規準 [2] に、接合部せん断耐力は SRC 規準 [3] に基づいている。得られた各部材の終局耐力計算値の最小値を表-3 に下線で示す。

B シリーズでは、いずれの試験体ともボルト耐力の計算値が最小である。一方、S シリーズでは、試験体 S-1 では接合部せん断耐力が最小で、試験体 S-2, S-3 および S-4 では支圧耐力が最小となっている。これらの結果は実験で観察された破壊状況と良く対応している。

B シリーズの試験体では、実験値と計算値の比は、1.02 ~ 1.36 であり、本稿で用いたボルト引張接合の耐力算定方法による計算値は実験値を安全側に評価している。試験体 S-2, S-3 および S-4 では、実験値と計算値の比は、1.15 ~ 1.19 であり、支圧耐力の計算値は実験値を精度良く推定している。なお、接合部のせん断耐力については、対象となる試験体が 1 体のみであるので明確ではないが、少なくとも試験体 S-1 については、実験値と計算値の比は 1.63 であり、SRC 規準による計算値は実験値をかなり過小評価する。接合部せん断耐力の定量的評価は今後の検討課題である。

5.まとめ

- 1) 長締めボルトの降伏が生じる場合、ボルト降伏後の履歴性状は著しい逆 S 字型を示す。
- 2) 層間変形角の増加に伴い梁から入力する曲げモーメントがボルトに伝達する割合は増加し、 $R=2/100\text{rad}$ においてボルトに伝達する引張力の割合は 60 ~ 75% 程度である。
- 3) 角形鋼管の板厚を厚くすることにより、接合部耐力を上昇させることができる。
- 4) 接合部の支圧耐力は梁フランジに作用する支圧力と柱の横補強筋による負担力を累加することより評価できる。
- 5) ボルト引張接合の耐力は、スプリットティー形式接合の引張耐力と接合部内の横補強筋による負担力を累加することにより評価できる。

【謝辞】 本論文の作成について、神戸大学の大野哲君の多大な協力を得た。ここに深謝します。
【参考文献】

- [1] 田中剛, 田渕基嗣, 福本昇, 石原誠一郎: 長締めボルトを用いた柱 RC・梁 S 混合構造接合部に関する研究—その 1 バイロット実験, 建築学会大会 C, pp.935-936, 1995.8
- [2] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1991
- [3] 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, 1987
- [4] 渡辺朋之: 柱 RC 梁 S 構造の柱梁接合部に関する研究・耐力評価式の提案, 柱梁 S とする混合構造の柱梁接合部の力学的挙動に関するシンポジウム, pp.25-30, 1994.12
- [5] 日本建築学会: 高力ボルト接合設計施工指針, 1993

表-3 実験値と計算値の比較 単位(kN)

試験体名	B-1	B-2	B-3	S-1	S-2	S-3	S-4
Qmax	241.6	248.5	208.6	243.9	279.7	289.6	303.7
柱 cQmu	321.9	317.5	319.9	308.2	306.3	314.6	316.5
cQsu	299.4	296.3	298.0	289.9	288.5	294.2	295.6
梁 bQmp	268.7	268.7	268.7	268.7	268.7	268.7	268.7
接合部 jQsu	261.6	275.0	260.9	149.4	256.6	274.0	349.4
jQr	260.4	279.1	258.3	246.0	243.8	252.6	254.5
部 bQu	203.3	244.2	153.0	258.2	258.2	278.6	258.2

Qmax : 最大耐力実験値, cQmu : 柱終局曲げ耐力 (ACI仮定)
cQsu : 荒川mean式, bQmp : 梁全塑性モーメント時
jQr : 接合部支圧耐力。ただし, $f_C=0.3 \cdot \sigma_B \cdot B \cdot D_c$, $d_f=0.7 D_c$
(σ_B : コンクリート圧縮強度, B: 梁フランジ幅, Dc: 柱せい)
bQu : ボルト接合部の引張耐力, jQsu : 接合部せん断耐力 (SRC規準)

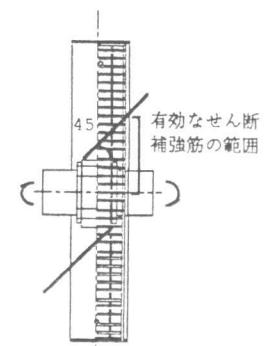


図-13 横補強筋による回転抵抗