

高張力ボルト引張接合に関する研究

仲		威	雄*
加	藤		勉**
田	中	淳	夫***
森	田	耕	次***

1. 序

高張力ボルトの引張型接合の応用として柱はり仕口の接合に用いる所謂 Split Tee がある。この形式は欧米では古くから用いられているものであるが、我国では漸く開発の途上にある。この接合法は柱はり部材の製作誤差をこの部分で比較的容易に吸収出来るという特徴をもち、構造物のプレファブ化に適している。欧米では剛接合骨組をあまり用いないせいにかこの接合法の歴史は古いにも拘らずその力学的挙動に関する理論又は設計公式はほとんど発表されていない。しかし我国では骨組を剛接合として設計する場合が多く且つ骨組には地震、台風といった大きな水平力が作用するため、この接合法を力学的検討なしに用いることは危険である。

本報告は Split Tee を用いて柱はり接合部を構成した時の力学的性質を実験的に研究したものである。実験の内容は次の三つに大別される。

I Split Tee (以下 S.T. と略す) そのものの引張実験

II 鉛直荷重時を想定した十字型試験体の実験

III 水平荷重時を想定した X 型試験体の実験

ファスナーの比較のため高張力ボルトの他に溶接及びリベットを使った試験体を計画したが、I の実験でリベットは剛性が著しく低くなったので II, III の実験では除いた。また、S.T. にリブのついた場合の影響を調べた。

2. 試験体及び測定装置

各実験に用いた試験体の形状、寸法を図 1 に示す。試験体の名称は前記 I の実験に用いたものを S、II を T、III を X で表わし、ファスナーとして高張力ボルトを用いたものを B、溶接によるものを W、リベットによるものを R とし、S.T. にリブのないものを 1、あるものを 2 としてこれらの記号の組合せで表示した。試験体に用いた鋼材の機械的性質を表 1 に示す。

試験体は各ファスナーの降伏耐力が大体同じになるように設計した。そのため溶接接合の試験体では断続溶接となったがビードが短く満足な溶接が出来ないので III の試験体では設計耐力に拘らず全周溶接とした。ボルトは全て摩擦接合に対する II 種の必要初張力を与えた。S 型試験体は正荷重のみの、T 型及び X 型試験体では正負繰返し荷重をかけた。

各試験体の全体変形及び T, X 型試験体の接合部パネルの変形をダイアルゲージ (D.G.) で、S 型試験体では S.T. フランジの歪を、T, X 型試験体では主として接合部周辺の歪をワイヤ・ストレイン・ゲージ (W.S.G.) で測定した。引張ボルトはその軸部を削って W.S.G. を貼布し伸びを測定した。X 型

* 東大教授・工博

** 助教授・工博

*** 同大学院学生

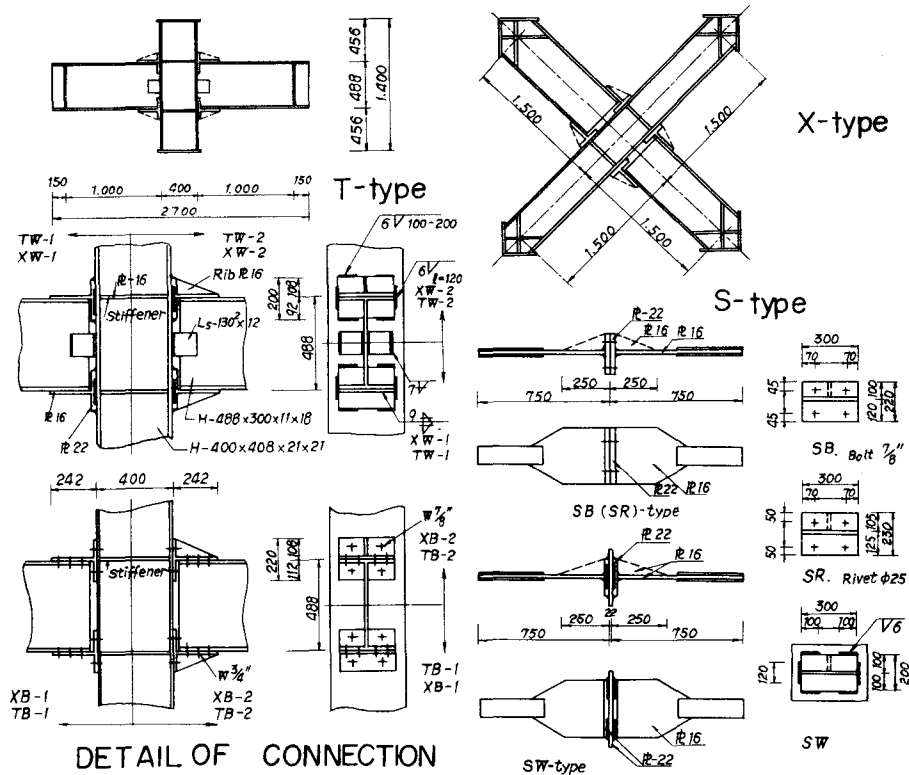


図 - 1

表 - 1

母 材 名	降伏応力 σ_y t/cm ²	引張強度 σ_B t/cm ²	伸 び 率 %
H-400×408×21×21	3.53	5.33	30
H-488×300×11×18	3.95	5.30	28
R-22	3.43	5.37	30
R-16	3.40	5.20	31
Ls-130×130×12	2.75	4.30	33
ボルト W 7/8"	7.86	9.80	31

試験体ではクリップゲージ (CL.G.) によってS.T. と柱フランジ間の相対変形を測定した。各試験体の加力方法及び測定装置を図2に示す。

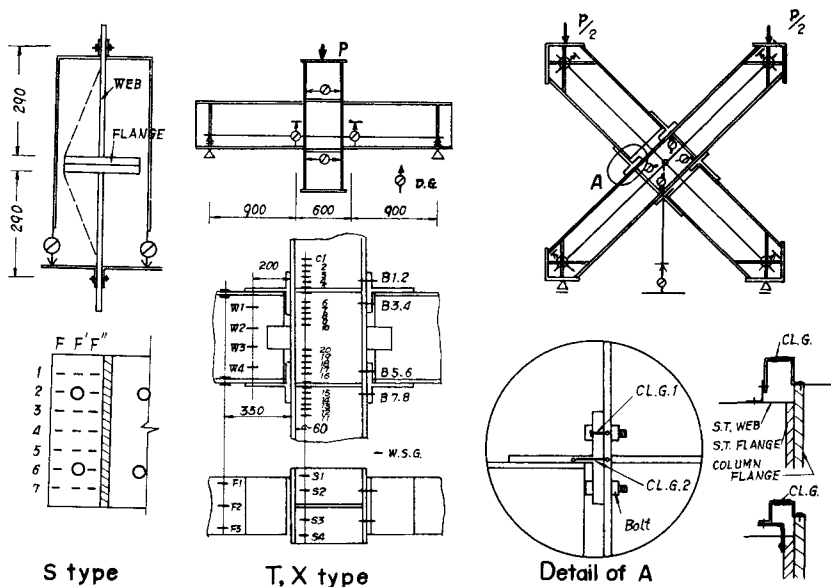


図 - 2

3. 実験結果

各試験体の耐力、剛性、靱性に関する実験結果を表2にまとめた。本報告では荷重としての記号Pは試験機から与えた荷重を、Tは引張側S.T.に作用する引張力を意味する。S型及びT型では $T = P$ だがX型試験体では $T = 0.736P$ である。表2に示した試験体の降伏荷重は全体変形荷重曲線から general yield point 法によって求めた値である。図3はS型試験体の変形測定結果からS.T.ウェブの変形量を引いて求めた1ヶのS.T.フランジとファスナーの変形と外力の関係を示す。SBの測定結果にはCL.G.によって測定したXB-1, 2のS.T.の変形量を併記した。図4はT型試験体の、図5はX型試験

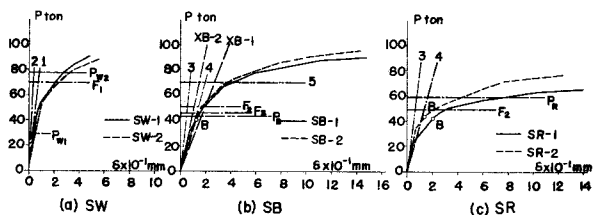


図 - 3

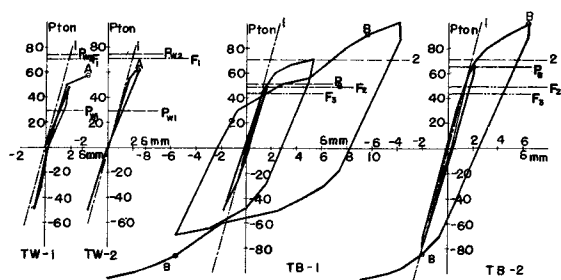


図 - 4

体の全体変形と荷重の関係を示す。図 5 の測定値上の P 点は接合部パネルのせん断変形測定値から求めた接合部パネルの降伏荷重に対応する点である。T 型試験体では接合部パネルは全荷重に亘って弾性的な挙動を示した。各試験体の最終時の引張側 S. T. の状況を図 6 に示す。SW-1, 2 は図 6 (a) に示す②の部分に隙間が生じ①の部分の溶接が破断した。SR-2 は TB-2、XB-2 と類似な変形を示した。図 3 ~ 5 の測定値上の点 A は破断の生じた点、B は図 6 に示すような変形が初めて認められた点を示す。XB-1 の S 点は S. T. ウェブとはりフランジ間の高張力ボルト摩擦接合に初めて辻りが生じた点をあらわす。

図 7 は SB-1 の S. T. フランジの F 、 F' 、 F'' 方向 (図 2 参照) の歪分布を示す。SR-1 のこの方向の歪分布も同じ傾向を示した。

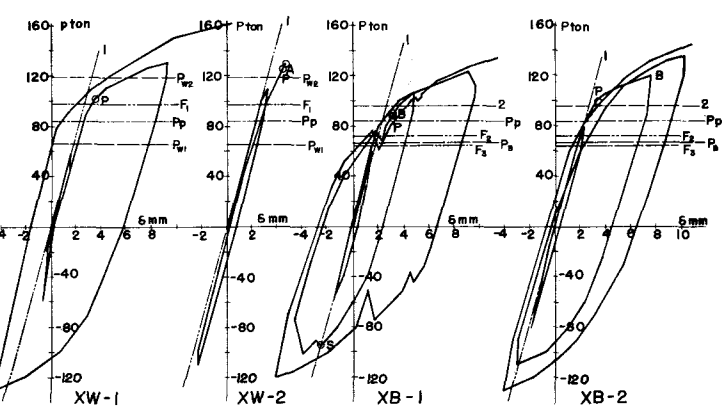


図 - 5

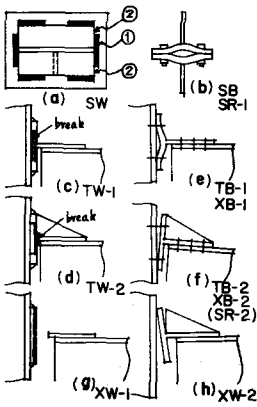


図 - 6

図 8 は各タイプのボルト接合試験体に用いた引張ボルトの歪と S. T. に作用する引張力の関係の代表的なものを示す。横軸には歪の他にボルト軸力 B に換算した値を記した。図中 B_0 はボルト初張力を意味する。ボルトに圧縮力が作用する時のボルトの歪の変化は少ないので図には引張力が作用した時だけを示した。多数のボルトについてこのような測定をしたのでその結果を図 9 及び表 3 にまとめた。図 9 は図 8 の S 点に相当するボルト離間荷重 T_s 及び Y 点に相当するボルト降伏時荷重 T_y を試験体別にプロットしたものであり、表 3 は弾性域及び塑性域での繰返し荷重によるボルト初張力の減少の割合及び前記 T_s の平均値 T_{sm} を示したものである。

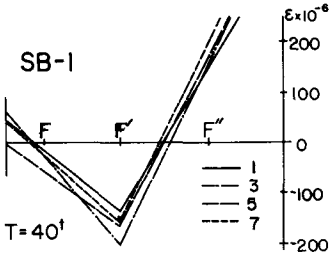
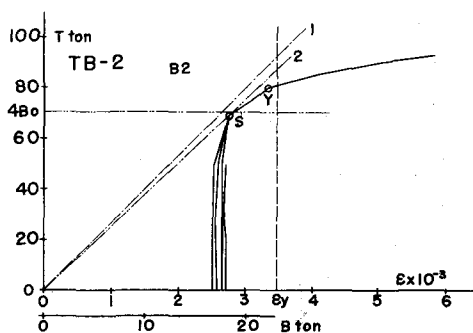
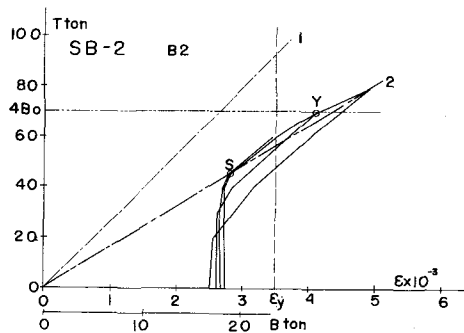
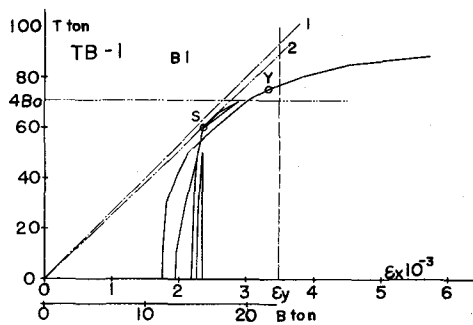
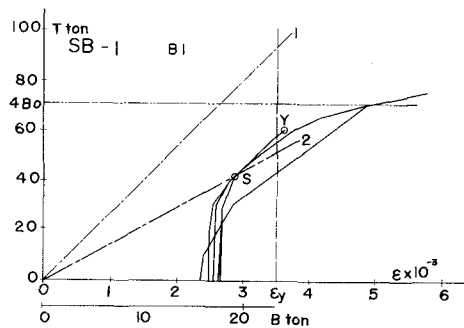
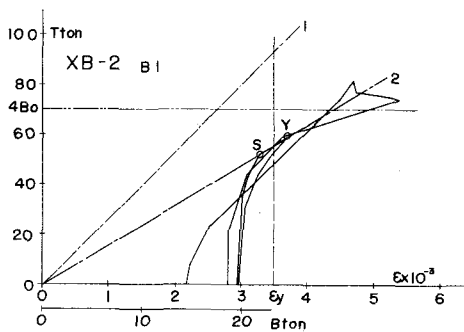
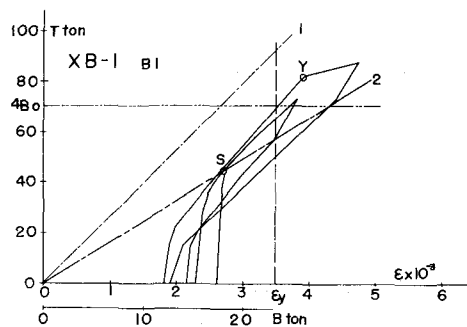


図 - 7

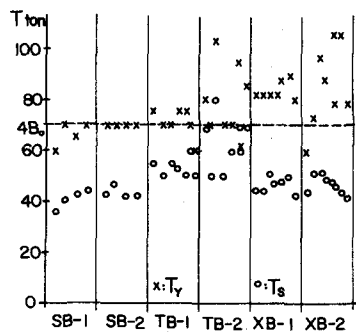


⊗ - 8 (a)

(b)



(c)



⊗ - 9

表 - 2

試験体名	試験体最大荷重		試験体降伏荷重		接合部パネル降伏荷重	初期剛性 **		最大塑性率 *** μ
	P_{max} ton	T_{max} ton	P_{gy} ton	T_{gy} ton	P_{py} ton	全体変形* t/cm	接合部パネル t/rad	
SW-1	90.0	90.0	52	52	—	8.0×10^3	—	4.2
SW-2	85.0	85.0	56	56	—	8.0×10^3	—	3.4
SB-1	100.5	100.5	43	43	—	4.5×10^3	—	20.5
SB-2	100.6	100.6	50	50	—	4.3×10^3	—	12.5
SR-1	83.6	83.6	22	22	—	4.8×10^3	—	20.0
SR-2	86.0	86.0	36	36	—	9.9×10^3	—	13.0
TW-1	58.5	58.5	50	50	P_{max} 以上	$333 \times 10^2 (0.88)$	1.20×10^7	2.0
TW-2	62.5	62.5	58	58	"	$357 \times 10^2 (0.94)$	0.98×10^7	3.3
TB-1	122.5	122.5	61	61	"	$308 \times 10^2 (0.81)$	1.19×10^7	15.2
TB-2	108.0	108.0	73	73	"	$357 \times 10^2 (0.94)$	1.06×10^7	13.0
T型計算値	—	—	—	—	—	380×10^2	—	—
XW-1	162.5	129.5	104	77	102	$350 \times 10^2 (0.96)$	$400 \times 10^2 (1.20)$	6.9
XW-2	130.0	95.6	120	88	120	$358 \times 10^2 (0.98)$	$375 \times 10^2 (1.13)$	1.6
XB-1	153.0	112.5	92	67	94	$350 \times 10^2 (0.96)$	$357 \times 10^2 (1.08)$	17.8
XB-2	154.0	113.2	102	75	102	$382 \times 10^2 (1.05)$	$353 \times 10^2 (1.06)$	7.3
X型計算値	—	—	—	—	84	3.65×10^2	331×10^2	—

* S型はS.T. フランジ+ファスナーの変形

** ()内は各測定値の計算値に対する割合を示す。

*** 試験体の全体変形について

表 - 3

試験体名	SB-1	SB-2	TB-1	TB-2	XB-1	XB-2
弾性域内加力時 初張力減少 %	8	6	13	9	13	12
塑性域荷重をうけた時の 初張力減少 %	21	10	27	—	33	27
ボルト離間荷重 ton	41	44	53	64	47	48

4. 結果の考察

4.1 耐力

表2には各種試験体の降伏荷重として一応荷重変形曲線からgeneral yield point 法によって求めた値をあげたが、各試験体の降伏現象を考えると内容として次の三つが考えられる。

1) S.T. フランジと柱フランジ間の溶接部の降伏又はこの部分の高張力ボルトの離間又はリベットの降伏。

2) S.T. フランジの曲げによる降伏

3) 接合部パネルの降伏 (S型を除く)

これらの要素のうちどれが各試験体の降伏に支配的な影響を及ぼすかを調べる。実験結果から判るのはそれを取り、それ以外は考えられる両極端をおさえた計算によって求めた。

1-1) 溶接部の降伏耐力は I. I. W 提案の計算式¹⁾で求める。溶接部の降伏応力は母材のそれをとった。実験結果を考慮して次の二つのケースを計算した。

イ) S.T. フランジと柱フランジ間の溶接のうち図 6(a) の①の部分のみ有効とする。 (P_{w1})

ロ) 全ての溶接を有効とする。 (P_{w2})

1-2) 高張力ボルトの離間荷重は表 3 の T_{sm} を用いる。 (P_B)

1-3) リベットの降伏耐力は一応の目安として建築学会の鋼構造規準による引張短期許容力をとる。 (P_R)

2) は全て計算値となる。

2-1) 溶接接合の S.T. フランジに対しては線荷重をうける周辺固定板とする。 (F_1)

2-2) ボルト、リベット接合に対して S.T. フランジをボルト又はリベット位置での固定梁とする。 (F_2)

2-3) ボルト、リベット接合に対して S.T. フランジを図 10 の如き単純梁と考えて板の曲げ剛性による所謂テコ作用による反力を考慮する。²⁾ (F_3)

3) については接合部パネルの D.G. による変形測定値から求めた実測値を用いる。(表 2 及び図 5 の P 点)

参考のため計算値も求めた。 (P_P)

以上の測定値及び計算値を図 3~5 に記した。これと実験結果を考えるとどの要素が試験体の降伏に支配的であったかが判る。

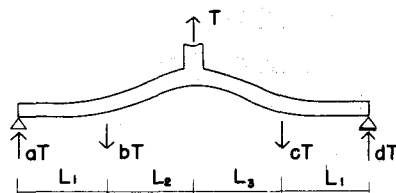


図 - 10

SW, TW は溶接部の降伏が、SB, TB はボルト

の離間荷重が試験体の降伏を支配していると考えられる。SR は短期許容力時に相当な大変形が生じていることは注意を要する。X 型試験体では全て接合部パネルの降伏が支配的でこれより低荷重で生じたと考えられる 1) や 2) の要素は試験体の耐力に大きな影響を与えなかったといえる。SW, TW で実際の降伏荷重が計算値 P_{w1} と P_{w2} の中間にあるがこれは図 6(a) に示した①の部分への応力集中のため、全部の溶接が有効に働かなかったことを示すと考えられる。またボルト接合の試験体でボルトの離間荷重と S.T. フランジの曲げ降伏荷重が近い値となっている。従って本報告に述べるボルトの離間荷重が S.T. フランジの降伏に影響されたかも知れないということは考慮に入れておかなければならない。

4.2 変形

まず図 3 の S.T. の変形についてみる。SW ではこの変形がすみ肉溶接部のせん断変形のみによって起

ると考えて計算すると図に示す直線 1, 2 となる。耐力と同様二つのケースを計算した。Pw₁ に対応するのが直線 1、Pw₂ に対応するのが直線 2 である。前項で述べた仮定 2-1) に対応する変形を計算すると実測値の 10 倍以上となる。上記の溶接部のみの変形と考え合わせると、溶接接合の S.T. フランジではその曲げ変形はほとんど問題とならない。S B でも S.T. フランジでの曲げによる耐力の計算と同様二つのケースを計算した。F₂ に相当するのが図の直線 3、F₃ に相当するのが直線 4 である。X B の CL.G. による S.T. の変形測定結果は S B の値よりやや大きいが妥当な値を示している。S R についてもボルトと同じ意味の計算値 3, 4 を示した。S R の初期剛性は S B と大差ないが、これはリベットの熱収縮による初張力が接合される板間に締付力を生じ高張力ボルトと同じ機構となっていたことによると考えられるがリベットの初張力は一般に小さく且つ不安定であるのでこのような初期剛性の大きさに期待出来ない。

T 型、X 型試験体では表 2 の初期剛性に見る通り溶接接合とボルト接合の間にほとんど差はない。全体変形を各部材の曲げ変形、せん断変形、接合部パネルの変形によるものの和として計算すると³⁾ 図 4, 5 の直線 1 となる。これと測定値との差が S.T. による変形で、その影響による全体変形の剛性低下率を表 2 に示す。X B の CL.G. による S.T. の変形測定値から、S.T. の変形による全体変形への影響を計算すると X B-1 で 11%, X B-2 で 9.6% となり、上記の結果と矛盾しない。いずれにしても S.T. を用いた接合部において、S.T. の変形による全体変形への影響は小さい。

4.3 高張力ボルト引張接合の離間荷重

本項では特に S.T. を介して高張力ボルトを引張接合で使った時の挙動に関して述べる。

高張力ボルト引張接合でボルトに加わる外力によって接合されている板間の圧縮力が解除される時期即ち離間荷重は次式で表わされる。⁴⁾

$$F_s = \left(1 + \frac{A_B}{A_P} \right) B_0 \quad (1)$$

ここで、F_s = 離間時におけるボルトに加わる引張外力 (離間荷重)

B₀ = ボルトに与えた初張力

A_B = ボルト有効断面積

A_P = 板間有効圧縮面積

本実験で用いた S.T. では板の有効剛性の影響で 1 本のボルトにかかる引張外力 F と S.T. ウェブに作用する引張外力 T の間に次の関係がある。

$$F = \kappa \frac{T}{4} \quad (2)$$

ここで、κ = 板 (S.T. フランジ) の有効剛性による係数

従って S.T. に作用する引張力としての離間荷重 T_s は

$$\kappa T_s = 4 \left(1 + \frac{A_B}{A_P} \right) B_0 \quad (3)$$

ボルト位置に離間が生じたあとではボルト軸力 B はボルトに作用する外力に等しくなるから離間直線は次式で表わされる。

$$4 B = \kappa T \quad (4)$$

ここに示した κ, A_P を理論的に決定することは難しい。まず実験値から推定する。図 8 に於て離間

荷重に相当する点Sと原点を結び(直線2)これをボルトの離間直線と考えれば(4)式から κ の値が得られる。次にボルト離間荷重としてS点の荷重 T_s を用い、上の κ の値を使って(3)式から A_p を計算できる。各ボルトの測定値について、この操作を行って得られた κ と A_p の値の平均値を表4に示す。一方 κ の物理的意味は次のように考えることができる。即ち図10に示すようにS.T.フランジを単純梁と考え、板の曲げ剛性を考慮してテコ作用による反力 aT 、 dT が両端部に働くことと仮定すれば、²⁾ ボルトに作用する軸方向外力 bT 、 cT の係数 b 、 c として κ の値を得る。この考え方では κ は A_p の函数となるが κ と A_p の関係を調べると $A_p > 3A_B$ では κ の A_p による変動は非常に小さい。本実験の試験体について先に得られた結果を考えて $A_p = 6A_B$ として計算すると $\kappa = 1.58$ となり、先に得られた κ の値に近い値が得られる。事実図7に示すS.T.フランジの歪分布からもS.T.フランジがはり的な変形をしたことは考えられ、上記の考え方によって一応の目安は得られる。

表 - 4

試験体名	SB-1	SB-2	TB-1	TB-2	XB-1	XB-2
離間直線の勾配 κ	1.71	1.76	1.44	1.44	1.57	1.61
有効圧縮面積 (A_p)	20.0	8.3	7.2	4.0	14.2	8.3
ボルト有効断面積 (A_B)						

板の有効剛性を考えないとボルトの離間荷重はボルト初張力に等しくなる。各試験体についてこの場合に相当する離間荷重を示すと図3の荷重5、図4,5の荷重2となり実際の離間荷重 P_B より大分大きい。この場合の離間直線は $T = 4B_0$ となり、図8に直線1として示した。

5. 結 び

主要な結果は次のように要約される。

1) S.T.を高張力ボルト引張接合で用いた柱はり接合部は耐力、剛性、靱性とも実用的に十分なものといえる。

2) 一般にS.T.を用いた高張力ボルト引張接合ではフランジの曲げ剛性の影響でボルトの離間荷重はボルト初張力より小さくなる(本実験ではフランジ厚はボルト径と等しい)。

なお本実験は建設用鋼材研究会の39年度研究費によるものである。

<参考文献>

- 1) 加藤勉 “すみ肉溶接設計計算法”。溶接技術 1963年7月号
- 2) R.T. Dooty 他 “High Strength Bolted Connection with Application to Plastic Design.” IABSE 1964 Conference II e.
- 3) 仲威雄他 “水平荷重をうける鋼構造柱はり及びその接合部の挙動について”(報告その1、2、3) 日本建築学会論文報告集 101, 102, 104号
- 4) 仲威雄、吉本昌一 “高張力ボルト接合に関する研究—引張接合(1)—。日本建築学会関東支部第28回学術研究発表会 1960年6月