

継手面状態に依存する高力ボルト引張接合・ 長締め形式の荷重伝達機構

西脇威夫*・黒田充紀**・増田陳紀***・
鈴木康弘****

高力ボルト引張接合・長締め形式の力学的挙動は継手面状態に著しい影響を受ける。本研究では、継手面の状態によって変化する接合部の荷重伝達機構を実験的に調べた。実験は、平坦度および表面あらかの異なる継手面をもつ試験体を用いて行われた。接合部構成要素の荷重の負担状況を詳細に調べ、継手面に切削加工を施した接合部は、ほぼ理想的な荷重伝達状況になることを示した。

Keywords: high-strength bolt, tension bolt, faying surface, flatness, static cyclic loading test

1. はじめに

高力ボルト接合の一形式である引張接合に対しては現行の道路橋示方書¹⁾には規定が設けられていないが、近年いくつかの学協会^{2),3)}、研究会^{4),5)}で調査・研究が行われており、設計基準等の整備が望まれている。

著者らは数年来、引張接合のひとつの形式である長締め形式について研究を行ってきた。引張接合における重要な力学的挙動のひとつは荷重荷重によってボルト軸力が変動することであり、それについては実験的検討⁶⁾および変動量を予測するためのモデル化に関する検討を行ってきた⁷⁾。

引張接合では、短締め形式、長締め形式のいずれにおいても継手面相互の継手面（エンドプレートなどの相互に相対する面）の接触状態は、継手の力学的挙動に関係する重要な因子であることが既往の研究^{6),8)-10)}によって示されている。本論は、長締め形式接合部の継手面の接触状態が異なる場合に生ずる力学的挙動の相違を実験的に検討したものである。また、従来の引張接合の研究では、引張荷重による挙動のみが主たる検討対象とされてきたが、実際の構造物に適用された場合には、接合部は圧縮荷重を受けることも有り得るので、本論では圧縮荷重に対する挙動も検討対象としている。

継手面状態、および接触部のディテールを変化させた試験体を用いて、第一に、ボルト軸力の変動量に及ぼす接触状態の影響について検討した。第二に、接合部の構成要素であるリブプレートおよび母材内の応力分布に継手面の接触状態がどのように関係するのかを調べ、さらに継手面の平面度が十分ではない場合の接合部内に生ず

る応力集中が接合部挙動に及ぼす影響について検討した。第三に、接合部構成要素のそれぞれが接触状態により荷重伝達にどのように寄与するかを調べた。

本論で対象としたような母材に対称にボルトが配置された長締め形式接合部では、母材およびリブプレートからなる被締め付け部にボルト初期軸力および荷重による応力が一様に分布する場合が最も理想的な荷重伝達様式と考えられる。この伝達様式に近くなるような接触様式、さらに継手面の接触状態が良好でない場合の荷重伝達様式の特徴などについても明らかにした。

2. 実験概要

(1) 試験体の形状・寸法

本論では次に示す4つの形式の試験体を用いた。

① 一体型試験体

継手面の接触状態による影響の含まれていない挙動、すなわち接触状態が理想的な場合の挙動を把握することを目的とした試験体。

② ダブルエンドプレート型試験体

継手部の両方にエンドプレートをもつ試験体。

③ シングルエンドプレート型試験体

継手部の一方にエンドプレートを設けた試験体。他方の継手面は母材およびリブプレートより形成されるH形である。

④ 無エンドプレート型試験体

エンドプレートを用いず継手部双方の母材およびリブプレートを突き合わせて応力を伝達させる試験体。

接合部の構造を Fig. 1 に、各型の形状と寸法および分類を Fig. 2 および Table 1 に示す。おのおのの型の試験体はリブプレート厚が異なる C 系と D 系に分類され、さらにそれらは継手面に切削加工を施したものと施していないものに分類される。試験体名称の付け方は次のとおりである。

* 工博 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科(〒158 世田谷区玉堤1-28-1)

** 工修 武蔵工業大学大学院博士後期課程

*** 工博 武蔵工業大学助教授 工学部土木工学科

**** 工博 株式会社サクラダ常務取締役

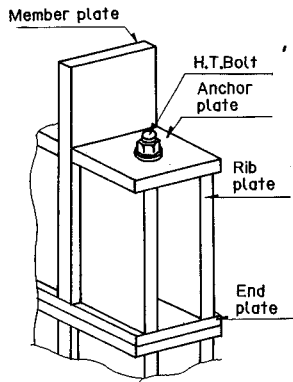


Fig. 1 Prototype connection.

Table 1 Designation of test specimens.

Specimens		L _{END} (mm)	t _{RIB} (mm)	B ₀ (kN)	Faying Surface conditions			Loading scheme			
Type	Name				Rough. (R _{max} , μm)	Flat. (μm)	Finishing	Tension	Compression		
One body	C-NS-87	38	10	143	-	-	No-faying face	○	○		
	D-NS-87				-	-		○	○		
Double End-plates	C-20-85	19	10	143	22	33	Finished	○	○		
	C-45-85				46	87		○	○		
	C-60-87				59	64		○	○		
	C-NF-87				-	779		○	○		
	D-20-85				20	35		○	○		
	D-30-85	25	25		28	81	Finished	○	○		
	D-65-87				66	76		○	○		
	D-NF-87				-	549		○	○		
	Single End-plate	CE25-55-88	25		10	143	57	*	Finished	○	○
		CE25-NF-88					-	310		○	○
DE25-65-88		25	25	67	*		Finished	○	○		
DE25-NF-88				-	324			○	○		
No End-plate	CSE25-50-88	25	10	143	51	*	Finished	○	○		
	DSE25-55-88				-	53		○	○		
No End-plate	CNE-50-88	0	10		143	51	*	Finished	○	○	
	CNE-NF-88					-	443		○	○	
	DNE-50-88			25		25	51	*	Finished	○	○
	DNE-NF-88						-	748		○	○

Note: *Not-measured, B₀=Initial bolt axial force, Rough.=Roughness, Flat.=Flatness

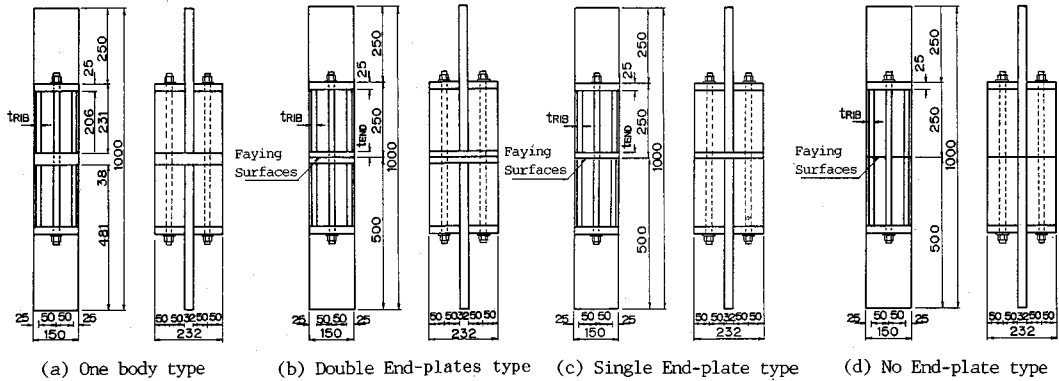


Fig. 2 Configuration of test specimens.

試験体名の一般形は、

[a] - [b] - [c]

であり、

[a] の部分は試験体の形状寸法の分類を示す。

[b] の部分は継手面の状態を示し、

20 - : $R_{max} = 20 \mu m$ (その他同様)

NF - : 切削加工を施していないことを示し、エンドプレート型の場合は溶接したままであり、無エンドプレート型の場合はスカット処理状態である。

[c] の部分は“西暦年—1900”で試験体製作年を示している。

試験体はすべて SM 41 材を用いて製作された。ボルト孔直径は 23 mm である。高力ボルトは F 10 T と同種材質で軸径が 20 mm の丸鋼の両端にネジ部を削成し、ナット座金は F 10 T, M 20 に対応するセット¹¹⁾を用いた。ボルト初期軸力 B_0 は F 10 T, M 20 の最小引張強さ¹¹⁾の約 60% にした。引張接合におけるボルト初期軸力の標準値については未だ議論のあるところであるが、本実験では、ボルト初期軸力によるアンカープレートの応力度が公称降伏応力度以下であるように、 B_0 値を上記

の値に選んだ。アンカープレートの応力値は、有限要素解析およびひずみゲージによる実測によって確認した⁷⁾。

(2) 継手面の状態および接触状態の測定

継手面の状態は JIS に定められる表面あらさ¹²⁾および平面度¹³⁾によって示した。

表面あらさは、表面あらさ専用測定器 (Surftest 201) を用いて約 40 点について 10 点平均あらさ (R_2) と最大あらさ (R_{max}) を測定し、それぞれの平均値を面の R_2 値, R_{max} 値として、Table 1 には R_{max} 値のみを示した。

平面度は、三次元座標測定機 (マイクロコード F-1006) によって、継手面内の 48 点の座標値を測定し、最小 2 乗法により求められた回帰平面に対する面外方向へのずれの最大値と最小値の差によって示した。

Table 1 に示される表面あらさと平面度の値は相対する継手面の平均値である。1988 年製作の試験体の切削加工は比較的あらく、表面あらさ値 R_{max} を $50 \mu m \sim 70 \mu m$ とした。これは、文献 6) において、切削加工を行った試験体の挙動の表面あらさの違いによる差異がほとんど見られなかったことによるものである。

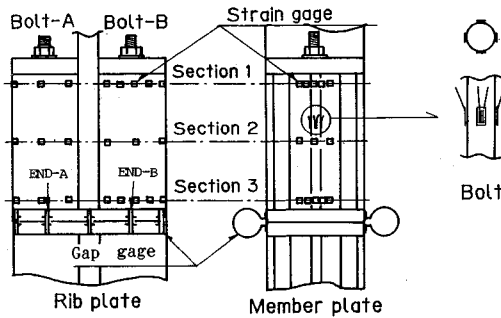
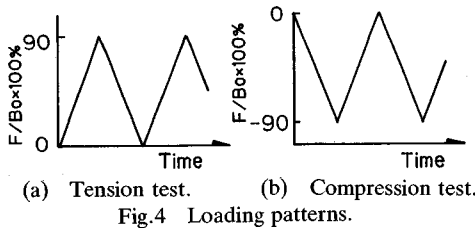
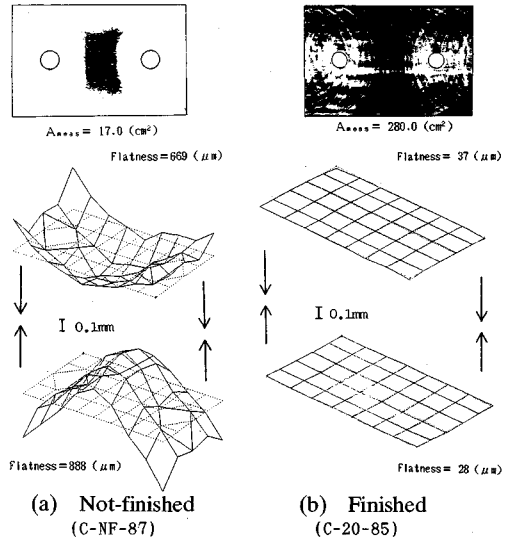


Fig.3 Arrangement of strain gages and gap gages.



(a) Tension test. (b) Compression test.
Fig.4 Loading patterns.



(a) Not-finished (C-NF-87) (b) Finished (C-20-85)
Fig.5 Faying surface flatness and contact area of Double end-plates type specimens.

接触領域と圧力分布は圧力測定用カーボン紙（以下、カーボン紙）を用いて測定した。

(3) 载荷実験時の測定項目

载荷実験において測定した項目（および器具）は、①作用荷重（ロードセル）、②ボルトの軸方向ひずみ（抵抗線式箔ひずみゲージ）、③母材およびリブプレートのボルト軸方向ひずみ（抵抗線式箔ひずみゲージ）、④継手面間の離間量（クリップ式ギャップゲージ）である。それぞれの貼付・設置位置を Fig. 3 に示す。

母材およびリブプレートには3本のひずみ測定線を設定し、アンカープレートに近いほうから順に、Section 1, Section 2, Section 3 とした。

(4) 载荷方法

使用した载荷装置は、武蔵工業大学構造実験棟に設置されているパルセータ式±50t 万能疲労試験機である。载荷パターンは Fig. 4 に示すような载荷上限をボルト初期軸力の90%とする静的引張荷重载荷と、上限を-90%とする静的圧縮荷重载荷の2種類である。Fはボルト1本あたりの荷重を表す同一試験体で引張試験と圧縮試験を実施したものについては、先に引張試験を行った後に圧縮試験を行った。

3. 継手面の接触状態

(1) 仕上げ状態の相違による接触状態

Fig. 5 はダブルエンドプレート型試験体の継手面の三次元座標の測定結果とボルト初期軸力導入時のカーボン紙による接触領域の測定結果の一例を示したものである。切削加工を施していない試験体の継手面には溶接変形が残留しており、その結果接触領域は非常に小さい。平面度と $A_{meas.}/A_{assum.}$ の関係を Fig. 6 に示す。 $A_{meas.}$

は接触面積であり、カーボン紙によって得られた接触領域の面積をプランメータで測定して求めた。 $A_{assum.}$ は Fig. 7(b) に示すような応力伝達の径路を仮定して得られる Fig. 7(a) の縦線部の面積である。

未加工試験体の継手面は溶接変形などから平面度が300~800 μm と大きく $A_{meas.}/A_{assum.}$ は0.1~0.2程度である。すなわち接触することが期待される面積の約1~2割程度が接触しているにすぎない。

切削加工した試験体の $A_{meas.}/A_{assum.}$ は表面あらさ値が50 μm 程度であっても0.9~1.2の範囲にあり、接触圧は Fig. 7(a) の縦線部で示す面積におおよそ分布しているとみなすことができる。

ここには示していないが、 $t_{END} = 25 \text{ mm}$ (CE 25-系あるいは DE 25-系) の試験体に切削加工を施した場合は、測定結果から面の全域を接触領域とみなすことができた。

無エンドプレート型の NF-試験体のリブプレートおよび母材端はガスカットしたままの状態でありカーボン紙による接触状態の測定結果は Fig. 8(a) に示すとおりである。切削加工後は (b) 図のようにリブプレートと母材の断面の全域を接触領域とみなすことができる。

シングルエンドプレート型試験体は、切削加工を施したもののみであるが、接触領域の広がりは無エンドプレート型の分布とほぼ等しかった。

(2) 切削加工を施した継手面をもつエンドプレートの浮き上がり現象

D-系列のうち切削加工を施した試験体 (D-20-85) のカーボン紙による接触圧分布を Fig. 9(b) に示す。この場合接触圧は、 Fig. 7(a) に示した仮定接触領域に一樣に分布せず、領域の外側に偏る傾向が見られた。弾性

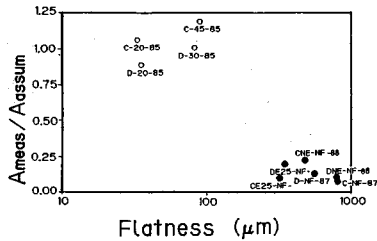


Fig. 6 Relationship between flatness and A_{meas}/A_{assum} .

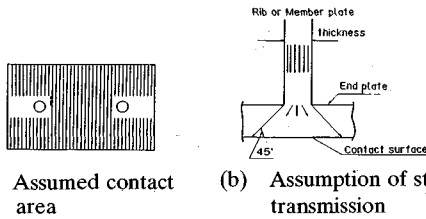


Fig. 7 Assumption of stress transmission and assumed contact area.

二次元有限要素解析（接触部の扱いは文献8）と同じによる結果も実測結果と併せて示す。この場合はアンカプレートの変形によって生ずるリブプレートの曲げ変形がエンドプレートに曲げ変形を生じさせ、エンドプレート中央は浮き上がる傾向となり、その結果接触圧は外側へ偏る。実測によればボルト初期軸力導入時のリブプレートの Section 3 の測定における曲げモーメントの最大値は、 $-340 \text{ kgf}\cdot\text{cm}/\text{cm}$ ($-3.3 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$) であった。リブプレート外側の曲げひずみが正となる場合曲げモーメントを正としている。C-20-85 の場合はこれに対する曲げモーメント値は $-30 \text{ kgf}\cdot\text{cm}/\text{cm}$ ($-0.29 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$) で、D-20-85 の場合の 1/10 以下である。切削加工を施し平面度をほぼ同じに仕上げても、リブプレート厚によって A_{meas}/A_{assum} の値はやや異なる傾向が Fig. 6 からも見られる。このようなリブプレート厚の違いによって生ずる接触圧の偏りは、C-20-85 の場合には Fig. 9(a) に示すように小さいが、5. でも述べるように、曲げモーメントが小さくても、それによるエンドプレートの変形は応力分布に影響している。

4. ボルト軸力

(1) 引張荷重によるボルト軸力

a) エンドプレート厚を一定とし継手面の状態を変化させた場合

処女載荷時の荷重-ボルト軸力関係を Fig. 10 に示す。B はボルト軸力（2本の平均値）を表わす。縦横軸ともボルト初期軸力 B_0 で無次元化している。荷重載荷に伴ってボルト軸力はボルト初期軸力より大きくなる。このボルト軸力の増加量をボルト付加軸力と呼ぶ。接触状態が理想的な場合をモデル化した一体型試験体のボルト

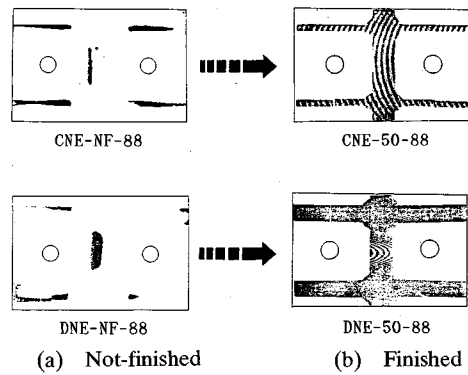


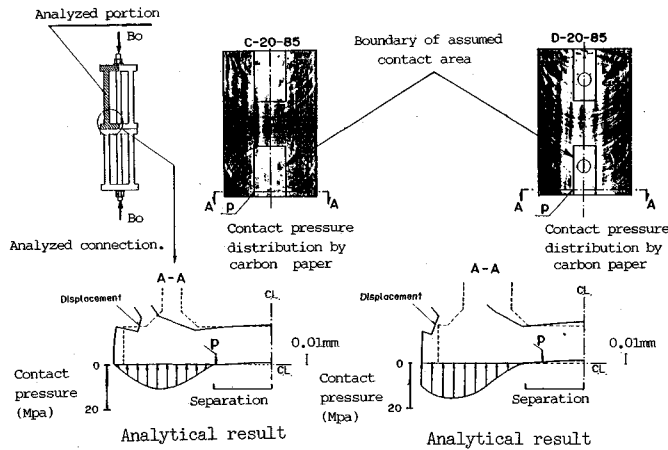
Fig. 8 Contact areas of No end-plate type specimens.

付加軸力は荷重増加に対して線形であり、ボルト付加軸力は最も小さい。各試験体のボルト付加軸力を一体型試験体のそれで無次元化した値を β とする。 β は継手面の接触状態によるボルト付加軸力の増大を示す指標である。Fig. 11 は、Fig. 10 より得られた荷重- β 関係である。切削加工を施していない (NF-) 試験体の β は 2.0 以上となっており、継手面の仕上げ状況がボルト付加軸力の増大に大きく影響していることを示している。また、表面あらかさが $20 \mu\text{m} \sim 65 \mu\text{m}$ の範囲では、その大小の影響はボルト付加軸力の大きさに対して有意であるとは認められない⁶⁾。

b) 継手面の状態を一定としエンドプレート厚を変化させた場合

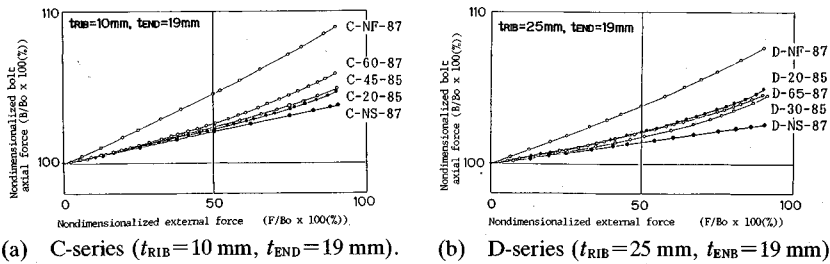
Fig. 12 は、切削加工を施した試験体のうちエンドプレート厚が異なるものの荷重-ボルト軸力関係から得られた荷重- β 関係である。C 系列では β は F/B_0 が 0.7 を越える付近から非線形に増加しているが、それよりも小さい荷重領域では何れの試験体も 1.0 に近く、理想的接触状態をモデル化した一体型試験体の挙動にかなり近いことがわかる。一方、D 系列においてはダブルエンドプレート型の DE 25-65-88 ($t_{END}=25 \text{ mm}$)、シングルエンドプレート型 ($t_{END}=25 \text{ mm}$) の DSE 25-55-88 および無エンドプレート型の DNE-50-88 の β は $t_{END}=19 \text{ mm}$ である D-20-85 のそれに比べて小さい。これは、D-20-85 の場合は 3.(2) で述べたようにボルト初期軸力導入時に接触圧の偏りが生じており、これによって接触面積が期待される値よりやや小さくなった ($A_{meas}/A_{assum}=0.9$) ことに起因していると考えられる。これらより、およそ F/B_0 が 0.7 を越えない領域では、切削加工が施してある試験体のボルト付加軸力の大きさは、D 系で $t_{END}=19 \text{ mm}$ の試験体以外では理想的接触状態のボルト付加軸力値に近い。

以上の検討からボルト軸力の観点からはエンドプレートはなくてもよいし、また片側のみには設けるだけでもよいといえる。D-20-85 に見られた上記の現象によるボ



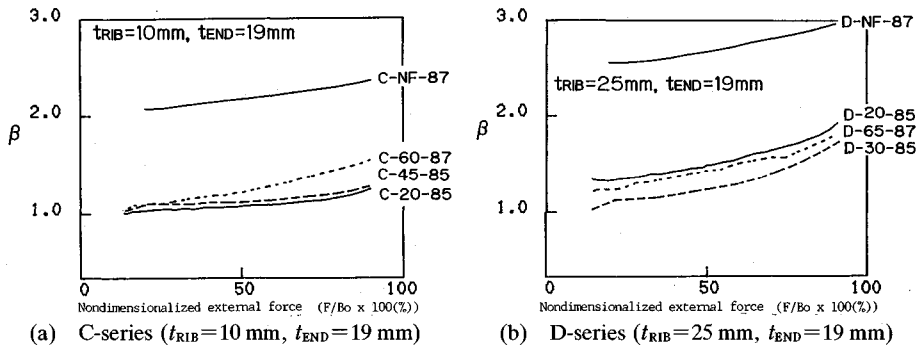
(a) C-20-85 ($t_{RIB}=10$ mm, $t_{END}=19$ mm) (b) D-20-85 ($t_{RIB}=25$ mm, $t_{END}=19$ mm)

Fig.9 Contact pressure distribution by measurements and FEM.



(a) C-series ($t_{RIB}=10$ mm, $t_{END}=19$ mm). (b) D-series ($t_{RIB}=25$ mm, $t_{END}=19$ mm)

Fig.10 Relationships between external force and bolt axial force in the specimens with various faying surface conditions (tension tests).



(a) C-series ($t_{RIB}=10$ mm, $t_{END}=19$ mm) (b) D-series ($t_{RIB}=25$ mm, $t_{END}=19$ mm)

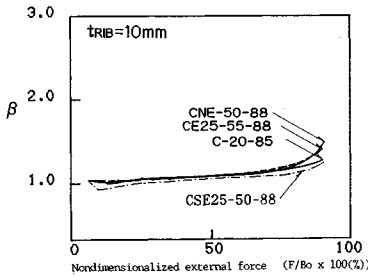
Fig.11 Relationships between external force and ratio β in the specimens with various faying surface conditions (tension tests).

ルト付加軸力の増大は現場における施工精度¹⁴⁾を考え合わせると実際には問題にならない量であると考えられるが、本実験の場合にはエンドプレートに設けた場合はその板厚をリブプレート厚以上とすればエンドプレートの浮き上がりから生ずる挙動は無視できる程度になった。

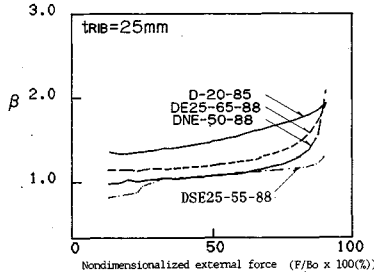
c) 荷重に対するボルト付加軸力の非線形性

荷重が増大するにつれてボルト付加軸力は非線形に増加し、それにつれて β の増大が生じている。Fig.13は

荷重とボルト伸び量およびボルト軸上のエンドプレート離間量の関係の例を示したものである。図中の END-A, END-B は BOLT-A と BOLT-B 軸線上に配置されたそれぞれ2つのギャップゲージ (Fig.3 参照) の測定値の平均値である。END-A と END-B (離間量), BOLT-A と BOLT-B (ひずみから換算したボルトの伸び) はそれぞれほぼ等しい値を示し、図上では重なって見える。ボルト付加軸力の増大は継手面間の局所的な離



(a) C series ($t_{RIB} = 10\text{ mm}$)



(b) D series ($t_{RIB} = 25\text{ mm}$)

Fig.12 Relationships between external force and ratio β in Finished specimens with various end-plate thickness (tension tests).

間の進展とともに生じており、 β が非線形に増大していく原因の大部分は継手面の局部的な離間にある。

d) 切削加工を施していない場合

Fig.14は切削加工を施していない試験体の荷重-ボルト軸力関係から得られた荷重- β 関係である。継手面の形式が異なっても、ボルト付加軸力の大きさはほぼ等しいとみなすことができる。また、リブプレートの断面積の大きいD系列試験体のほうがリブプレートが薄いC系列に比べて β の値は大きい。

(2) 圧縮荷重によるボルト軸力

a) 切削加工を施した場合

圧縮荷重によって得られた荷重-ボルト軸力関係をFig.15に示す。切削加工を施した試験体のボルト付加軸力はエンドプレート厚によらず一体型試験体のそれに非常に近く、荷重に対して線形である。これは、圧縮荷重によっては局部的な離間が進展しないためであり、接合部は継手面の接触状態が理想的な場合とほぼ等しく挙動すると考えて大過はない。

b) 切削加工を施していない場合

Fig.15より、切削加工を施していない試験体では負のボルト付加軸力が大きく増大している(ボルト軸力は減少している)。

Fig.16はCE25-NF-88の繰返し荷重(繰返し数は6回)によるボルト軸力の変動である。一回目載荷後に約3%のボルト初期軸力の減少が見られる(引張の繰返し荷重を載荷した場合の減少量は1%であった)。二回

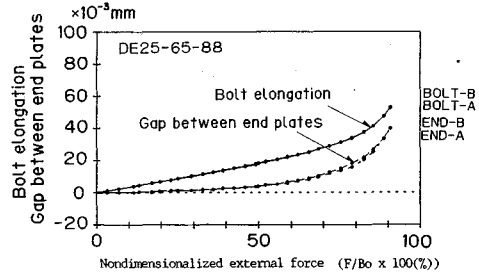


Fig.13 External force versus gap between end-plates and bolt elongation.

目載荷以降はほぼ弾性的挙動を示している。これは、ボルト初期軸力導入時の母材およびリブプレートの有効圧縮断面積が小さく、荷重増加とともに継手面かあるいは他の部分の局部的な材料の塑性化に伴う挙動と密接に関係している。これについては次章において考察する。

5. リブプレートと母材の応力・ひずみ

(1) ボルト初期軸力および引張荷重によるリブプレートと母材内の単位幅当りの軸力分布

a) エンドプレート厚を一定として継手面の状態を変化させた場合

リブプレートと母材内に生じた単位幅当りの軸力分布をC-系列についてFig.17に示す。軸力値は、板の表裏で一軸ひずみゲージによって測定されたひずみ値に、一軸応力状態を仮定しヤング係数(206 GPa)を乗じ応力値に換算した後、板厚内応力線形分布の仮定を用いて求めた。

(a) 図は、ボルト初期軸導入によって生じた軸力を示している。縦軸中の矢印記号はボルト初期軸力導入による応力がリブプレートと母材の全断面に一樣分布した場合の板の単位幅当りの軸力値 $N_{ave,Bo}$ を表わしている。 $2B_0$ と各断面に作用した軸力のリブプレート・母材の全断面にわたる積分値は等しくならなければならないが、これについては、Section3で軸力分布がほぼ一樣になっているNS-系の試験体を用いて、積分値と $2B_0$ が数%以内の誤差で一致することを確認し、測定値の精度を確かめた。Section1では、継手面状態の相違による分布状態の差異は特に顕著には認められない。Section3では継手面状態による差異が認められる。すなわち、切削加工を施していない試験体の場合は、接触領域は母材に近い小さい領域に限られている(Fig.5参照)ため、母材の接触領域に近い部分に大きな軸力が生じ、リブプレートの自由端側では軸力は零に近い。この試験体(C-NF-87)では、Section3において測定された応力度のうち、最も大きかった応力度は公称降伏応力度の60%程度であった。Section3においては一体型試験体(C-NS-87)の軸力分布はほぼ一樣であり $N_{ave,Bo}$ に近

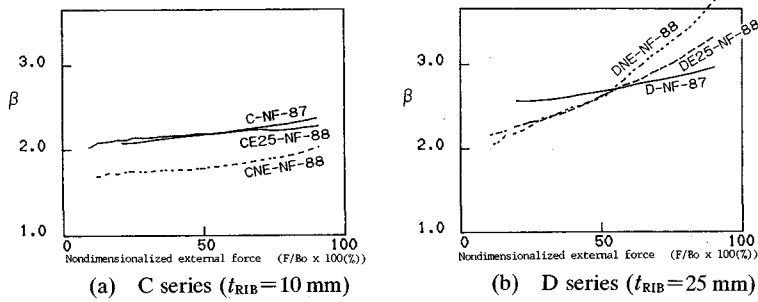


Fig. 14 Relationships between external force and ratio β in Not-finished specimens with various end-plate thickness (tension tests).

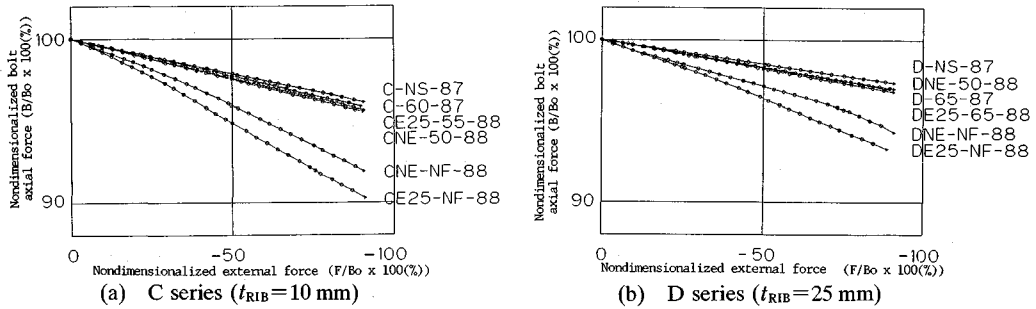


Fig. 15 Relationships between external force and bolt axial force (compression tests).

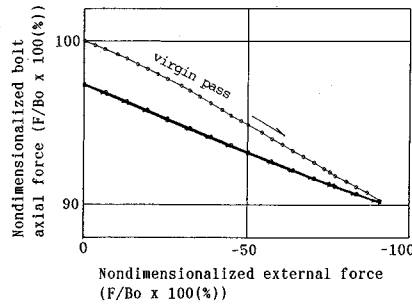


Fig. 16 Relationships between external force and bolt axial force in Not-finished specimen (CE25-NF-88, cyclic compression test).

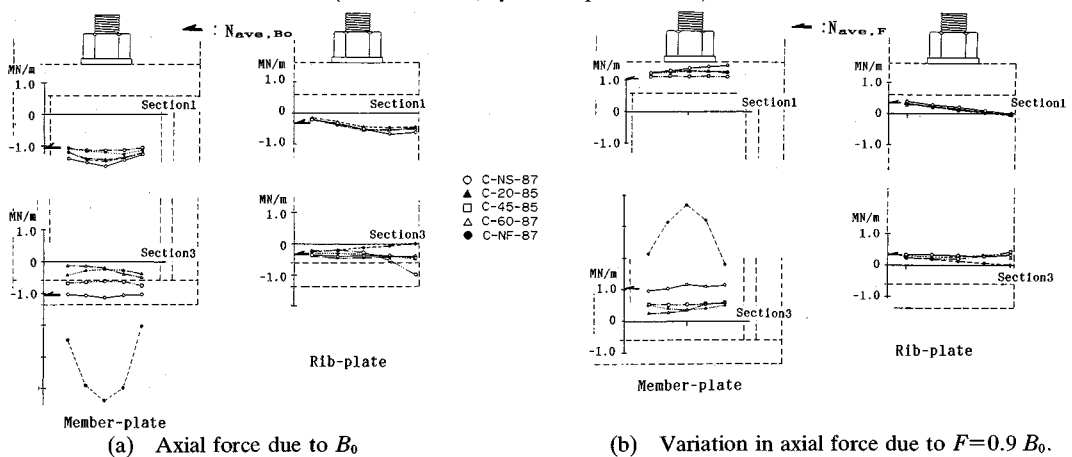


Fig. 17 Axial force per unit width in Member-plate and Rib-plate on various faying surface conditions (tension tests).

く、試験体はボルト初期軸力による応力をほぼ一様に分布させるのに必要な長さをもっているといえる。

Fig. 17(b) は荷重 $F=0.9 B_0$ によって生じた軸力の変化を示している。縦軸中の矢印記号は被締め付け部に $F=0.9 B_0$ による応力が一様分布した場合の軸力変化値 $N_{ave,F}$ を表わしている。Section 1 では、継手面状態の相違による分布状態の差異は特に認められない。Section 3 では、切削加工を施していない試験体の場合ボルト初期軸力導入時の分布に対応して母材の軸力変化が非常に大きく、リブプレートの自由端の軸力の変化は非常に小さくなっている。このような挙動は、文献 7) に示したばね系モデルで接合部挙動を記述する場合には、荷重伝達に有効に働く接合部断面積の減少とみなすこととなる。結果としてボルト付加軸力の増大が生ずることは 4. に示したとおりである。C-NS-87 の Section 3 における軸力変化は極めて $N_{ave,F}$ に近く、本論で用いた試験体は荷重による応力をほぼ一様に分布させるのに必要な長さをもっているといえる。

b) 継手面の状態を一定としエンドプレート厚を変化させた場合

Fig. 18 は切削加工を施したエンドプレート厚の異なる C 系列試験体の単位幅当りの軸力分布である。Section 1 では、ボルト初期軸力導入時 ((a) 図)、および $F=0.9 B_0$ 時 ((b) 図) のいずれにおいてもエンドプレート厚の差異による軸力分布状況の差異は認められない。Section 3 では、母材の軸力分布に差異が見られる。 $t_{END}=19 \text{ mm}$ の C-20-85 の軸力分布のみが平均軸力より小さくなっているが、これは 3. (2) で示したエンドプレートの変形の影響であると考えられる。しかし、この差異の影響はこの試験体の場合には 4. で示したようにボルト軸力挙動には現れてこなかった。

(2) 圧縮荷重を受ける場合

前節で示したように切削加工を施していない継手面をもつ接合部内には、Fig. 17(a) に示したようにボルト初期軸力導入時に平均応力を遙かに越える応力が発生する。これに引張荷重が載荷される場合には応力は除荷状態となるが、圧縮荷重が載荷される場合には負荷状態となり局部的には降伏応力度を越えることが予想できる。Fig. 19 は、CE 25-NF-88 の圧縮繰返し載荷試験における母材の Section 3 の各点の圧縮荷重とひずみ関係を示している。

カーボン紙によるボルト初期軸力導入時の接触領域も併せて示した。1 回目の載荷の後、おのおのの点で $-1000 \sim -3000 \times 10^{-6}$ 程度の圧縮ひずみが残留している。これらの点すべてで圧縮ひずみが残留したことから、この付近の材料は降伏応力度を越える応力履歴を受けたと判断することができる。2 回目載荷以降はほぼ弾性的に挙動しているとみなすことができる。

Fig. 16 で同試験体の繰返し荷重によるボルト初期軸力減少状況を示したが、これは上述の母材に残留した永久ひずみの結果であろう。引張接合のボルト軸力の減少は、引張荷重によってボルトのねじ部が降伏することによって生じることはよく知られているが、圧縮荷重によって上記のような挙動を呈した場合にも生じ得る。

6. 接合部各構成要素の荷重負担

接合部に外力が作用すると、それは接合部構成要素に負担されながら継手面に生じている接触圧とつり合う。しかし、継手面の状態や応力を測定する断面により、構成要素のそれぞれが負担する量に相違が生ずる。

任意の荷重増分に対し実測より得られる単位幅当りの軸力増分を、板幅方向にスプライン補間を行って積分した値を母材およびリブプレートに対して求め、それを荷重増分で除した値を、母材あるいはリブプレートの負担率とする。このような負担率を F/B_0 が $0 \sim 0.3$, $0.3 \sim 0.5$, $0.5 \sim 0.75$, $0.75 \sim 0.9$ の各区分について求めたものの一部を Fig. 20 に示す。また、同図の最右列のグラフは、①ボルトの負担率 [文献 7) では α で示される] を文献 7) による方法で求め、②リブプレートおよび母材の負担率をそれらが負担すべき荷重によって生ずる応力が完全に一様分布するという仮定によって算出したものである。

Section 1 の負担率はいずれの試験体においても理想的接触状態をモデル化した C-NS-87 の場合に近い。負担率に対する接触状態の影響は、荷重が小さい場合には Section 1 までは及ばない。継手面に最も近い Section 3 では、切削加工を施した試験体 CE 25-55-88 の負担率は F/B_0 が 0.75 を越えない領域では C-NS-87 に非常に近い。

切削加工を施していない試験体 CE 25-NF-88 では、初期の接触領域が継手面の中心に近い部分に限られているため母材の負担率が大きくなっている。この試験体では Section 2 においてもなお継手面の状態の影響は消えない。

C-NS-87 のグラフと最右列のグラフの比較および Fig. 17 より、C-NS-87 では継手面に近い Section 3 ではほぼ一様に応力が分布したとみなすことができる。

実験を行ったすべての試験体について上記のような実測データの解析を行ったが、エンドプレート厚が負担率におよぼす影響は顕著には見られなかった。

継手面近くの断面に様に応力が分布する場合、それは最も接合部断面積を有効に活用する接合部となるが、本試験体に切削加工を施した場合、ほぼそのような状態になることが確かめられた。

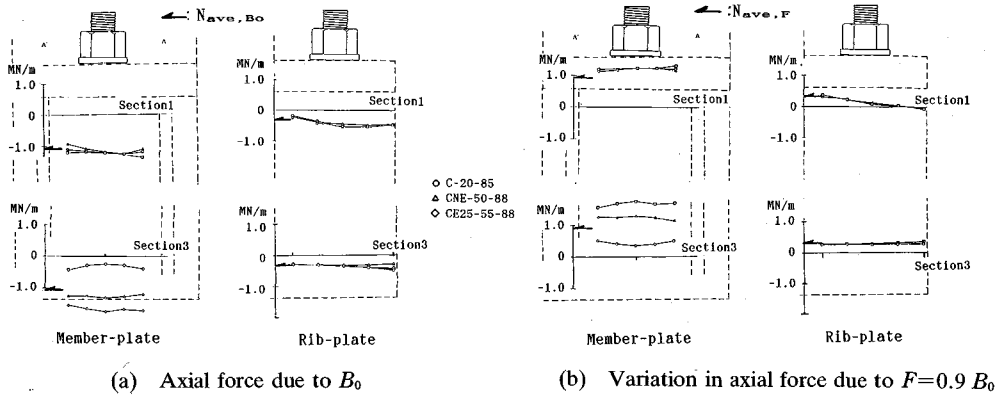


Fig. 18 Axial force per unit width in Member-plate and Rib-plate on various end-plate thickness (tension tests).

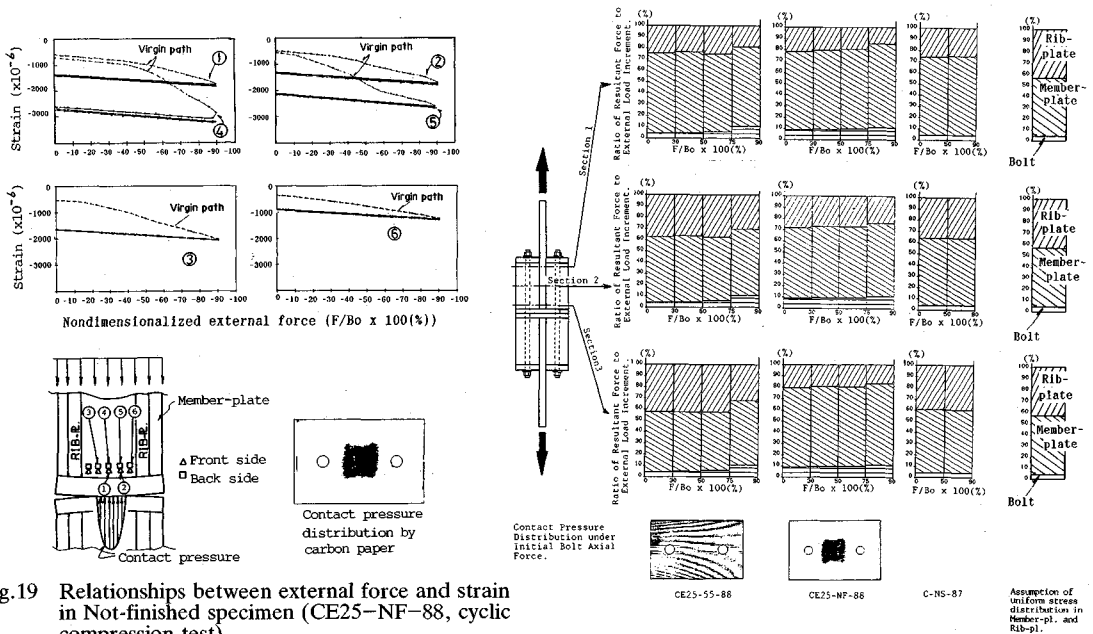


Fig. 19 Relationships between external force and strain in Not-finished specimen (CE25-NF-88, cyclic compression test).

Fig. 20 Ratio of resultant force in Bolt, Member-plate and Rib-plate to external force increment (tension tests).

7. まとめ

本論は、高力ボルト引張接合・長締め形式の継手部の形式および仕上げ状態によって力学的挙動がどの様に変化するかについて検討した。主な結論を以下に述べる。

(1) 本研究で用いた試験体の構造形式において継手面が切削加工されている場合には、エンドプレートを①継手部の両側に用いる、②継手部の片側だけに用いる、③用いない、のいずれの場合においても挙動は巨視的には相違はない。また、継手面の切削加工による表面あらかし値は $50 \mu\text{m}$ 程度で挙動に大きな相違は生じない。

(2) 継手面に切削加工を施さない場合には、本論の範囲ではボルト付加軸力は、理想状態をモデル化した一体型試験体によって得られたボルト付加軸力の約2~4

倍となった。

(3) 継手面に切削加工を施さない場合には、接触面積は小さく、被締め付け部内に応力集中が発生する。

(4) 継手面に切削加工を施していない試験体に圧縮荷重を載荷すると(3)で述べたように被締め付け部の一部に応力集中が生じ、その部分の応力度は降伏応力度を越え、除荷後に永久変形が残留する。そのためボルト初期軸力が減少することがある。本実験の場合には減少量は約3%であった。

(5) 本論で用いた試験体はボルト初期軸力および荷重によって生ずる母材・リブプレート内の応力を継手面に近い断面にほぼ一様分布させるのに必要な長さをもつ

ていた。

本研究を遂行するにあたり、株式会社サクラダの遠藤秀巨技術開発室長、利守尚久氏、山中和明氏には試験体の製作にあたり多大なるご協力を頂きました。また、武蔵工業大学土木工学科 皆川 勝講師ならびに同大学構造実験棟 仲宗根茂技士補には、実験の実施にあたり多くの助言と協力をいただきました。さらに、実験の実施およびデータ整理については、当時武蔵工業大学工学部土木工学科学生であった関口紀隆、三浦昭一朗、村上範行、吉松 徹（昭和62年度）、吉沢説哉、小林公人、岩城光利、中前 豊（昭和63年度）、加藤康司、小林伸一、斎藤秀樹（平成元年度）各氏の鋼構造研究室における卒業研究としての努力によるものです。ここに記して各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会編：道路橋示方書・Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編，日本道路協会，pp.174～192，1990.2
- 2) 日本鋼構造協会・橋梁用高力ボルト引張接合標準作成小委員会：引張接合使用例一覧（中間報告書），1990.4
- 3) 土木学会・鋼構造委員会・鋼構造終局強度研究小委員会・材料および細部構造分科会継手班：最終報告書，1990.4.
- 4) 関西道路研究会・道路橋調査研究委員会・接合小委員会：鋼橋の接合に関する調査研究報告書，1990.3.
- 5) 鋼橋技術研究会・示方書研究部会・海外設計基準研究分科会：昭和63年度分科会成果報告書，1989.5.
- 6) 西脇威夫・増田陳紀・皆川 勝・黒田充紀・鈴木康弘：長締めボルト引張接合のボルト軸力，構造工学論文集，Vol.35A，pp.991～999，1989.3.
- 7) 西脇威夫・黒田充紀・増田陳紀・鈴木康弘：高力ボルト引張接合・長締め形式におけるばねモデルによるボルト付加軸力，土木学会論文集，No.416/I-13，pp.403～410，1990.4.
- 8) 黒田充紀・増田陳紀・皆川 勝・西脇威夫：接触面平坦度を考慮したスプリット・ティー接合部挙動の解析的検討，土木学会論文集，No.416/I-13，pp.365～374，1990.4.
- 9) Bouwman, L.P. : Fatigue of bolted connections and bolts loaded in tension, Stevin laboratory report 6-79-9, Delft Univ. of Tech., 1979.
- 10) 日本鋼構造協会引張ボルト接合班：高力ボルト引張接合について，JSSC, Vol.3, No.24, pp.64～67, 1967.
- 11) 日本規格協会編：摩擦接合用高力ボルト・六角ナット・平座金のセット，JIS B 1186, 1979 (1984).
- 12) 日本規格協会編：表面あらさの定義と表示，JIS B 0601, 1982 (1987).
- 13) 日本規格協会編：幾何偏差の定義及び表示，JIS B 0621, 1984.
- 14) 日本道路公団：構造物施工管理基準，日本道路公団，1989.11.

(1990.5.22・受付)

LOAD TRANSMISSION INFLUENCED BY FAYING-SURFACE CONDITIONS IN LONG BOLT TENSION-TYPE CONNECTIONS

Takeo NISHIWAKI, Mitsutoshi KURODA,
Nobutoshi MASUDA and Yasuhiro SUZUKI

Mechanical behaviours of long bolt tension-type connections are significantly affected by faying surface conditions of the connections. In this paper, load transmission behaviours influenced by the faying surface conditions in the connections are studied by experiments. Experiments were performed using specimens with various faying surface conditions and various details of the connections. The influence of faying surface conditions on additional bolt axial forces due to external forces are firstly discussed. Secondly, stress distributions in the connection elements are investigated. Thirdly, contributions of the connection elements to load transmission are examined.