

十字スプリットティー形式の引張接合に関する 基礎的実験と解析

Experiment and Analysis of Cross Ribed Split Tee Connection
Subject to Tension

谷平 勉* 利守尚久** 藤沢政夫*** 田井戸米好****

By Tsutomu TANIHIRA, Naohisa TOSHIMORI, Masao FUJISAWA and Yoneyoshi TAIDO

A tensile test of split tee connection with cross shaped rib was carried. The basic characteristics about the effects of stiffened rib, the behavior of separation in contact surface and the change of bolt tension etc., are researched. To verify the experimental values, this connection was analyzed numerically by three dimensional FEM model. In this studies, it is confirmed that the stiffened rib fitted up in split tee connection was very effective. This connection is very rigid so that the separation load increase and the bending stress of tee flange decrease respectively.

1. まえがき

高力ボルトを用いた接合形式のうち、ボルト軸力の作用方向に外力が働く引張接合は、ボルト締め付けによる大きな材間圧縮力が生じるため、非常に剛性の高い接合性状を示す。適当な構造部分に用いるならば構造の単純化、施工期間の短縮などの効果が期待できる接合方法である。引張接合の形式のうち、最もよく使われるものにスプリットティー形式がある。この継手構造は鉄骨構造の柱-梁接合部などによく使用されるT形断面のフランジ部を引張ボルト接合するもので、これまでに行われた多くの実験・解析などの研究³⁻⁷⁾によって提案された設計法が使用されている。

一方わが国の橋梁においてはこの引張接合は、アンカーフレームや支承の取り付け、ラーメン隅角部などに実施されているが、まだ一般的な接合法として広く使用されるまでには至っていない。しかしながら、その適用範囲は徐々に広がる傾向にあり、特に既設構造物への添加物の取り付け等の、補修工事などに利点を発揮できる優れた接合法として、今後の発展が期待できる。たとえば、鉄筋コンクリート床板を補強するために増設された縦桁を、既設の主桁に支持するためのブラケットの取り付け構造に高力ボルト引張接合が採用された例がある¹⁰⁾。この継手構造は鉄骨の継手に用いられるスプリットティーと似てはいるが、スプリットティーにおいては通常H形鋼、C T形鋼などが使用され、特に補剛リブを溶接しないのが普通であるの

*	工博	近畿大学助教授	理工学部土木工学科	(577	東大阪市小若江3-4-1)
**	工修	櫻田機械工業(株)		(272	千葉県市川市二俣新町2-1)
***		大阪市建設局	土木部橋梁課	(530	大阪市北区梅田1丁目2-2-500)
****	工博	石川島播磨重工業(株)	関西支社	(541	大阪市中央区本町4-29-1)

に比べ、この継手では、既設主桁の垂直補剛材をかわすためにティーウェブ長さを大きくとり、その面外方向変位を抑える目的で補剛リブを設けて十字スプリットティー形式の構造となっている。またフランジの厚さも比較的大きなものとなっている。このような形式の場合であっても、やむをえずスプリットティーの設計法を準用しているのが実状と思われる。本研究は補剛リブを取り付けた効果、厚いフランジを用いた場合の材間圧縮力に関する特性などを検討するため行った、一つの基礎的な実験の結果と、それらを裏付けるための解析結果について報告するものである。実験は実物大の供試体による静的載荷実験であり、解析は3次元要素を用いたFEM解析である。

2. 実験概要

供試体の形状寸法を図-1に示す。ボルトは現在最も多用されているM22径で材種はF10Tの六角ボルトを使用した。ティーフランジ厚さは型钢フランジ厚の最大級の50mm、ティーウェブ厚および、リブ厚は40mmとした。鋼材の材質はSM53Cである。またティーフランジの接触面は接触圧の分布状況、離間の発生等をより詳細に観察出来るようにフライス加工により仕上げた。ボルト軸力は図-2のように軸部に貼った2枚のひずみゲージによって測定した。供試体には材間圧縮力や離間状態を測定するために図-3に示す位置にひずみゲージを張り付けた。ティーフランジ自由面とボルト孔壁の接触面から2mmの位置には接触圧の変化状態及び離間の発生を知るためにゲージ長さ1mmの1軸ゲージを貼った。またティーフランジ自由端側面の接

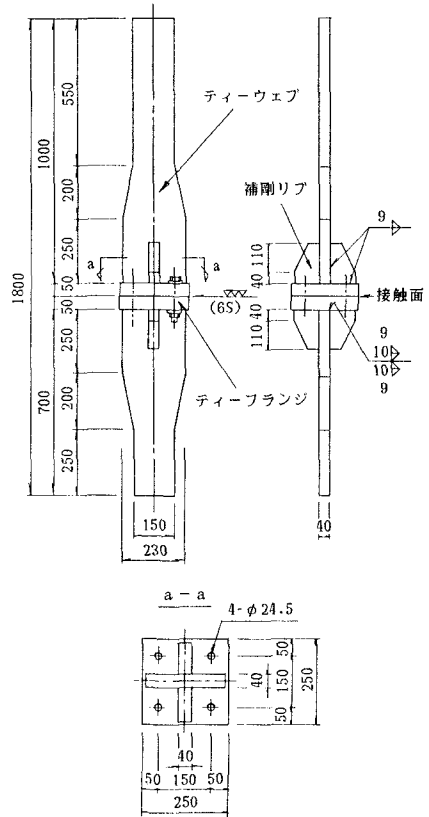


図-1 供試体

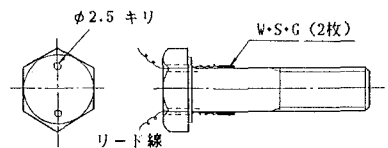


図-2 ボルト軸力の測定方法

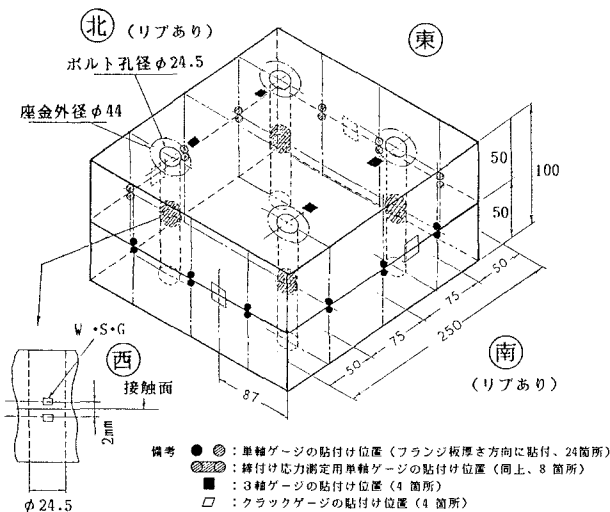


図-3 ティーフランジのひずみ測定位置

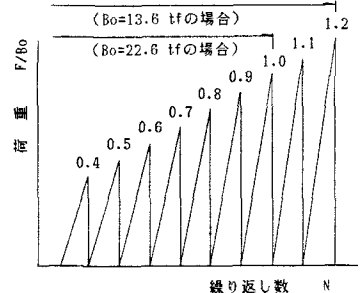


図-4 載荷パターン

表－１ 実験項目

試験区分	ボルト初張力 B_0 (t/本)	載荷荷重の上限値 (F/4 B_0)	調 査 項 目
N01	13.6	0.4～1.2 (0.1ピッチ)	1) ボルト軸力
N02	22.6	0.4～1.0 (0.1ピッチ)	2) 材間圧縮力 3) 離間状況

触線上には離間荷重を知るためのクラックゲージを貼った。ボルトの初期導入軸力を標準ボルト軸力の60% ($B_0=13.6\text{tf}$) の場合と、100% ($B_0=22.6\text{tf}$) の2ケースについて実験を行い、それぞれ試験区分No.1とNo.2とした。載荷パターンは図－4に示すような静的繰返し載荷とした。初期ボルト軸力が13.6tfの場合は、載荷の上限は初期導入軸力の和の40%から120%まで10%ピッチの単調増加とし、初期ボルト軸力が22.6tfの場合は、その最大値を初期導入ボルト軸力の和の100%までとした。今回の実験の目的は荷重とボルト軸力、材間圧縮力の関係、および離間状態の調査などである。これらをまとめたものを表－1に示す。実験全体の流れを図－5に示す。なお試験機は近畿大学大型構造物実験装置を使用した。

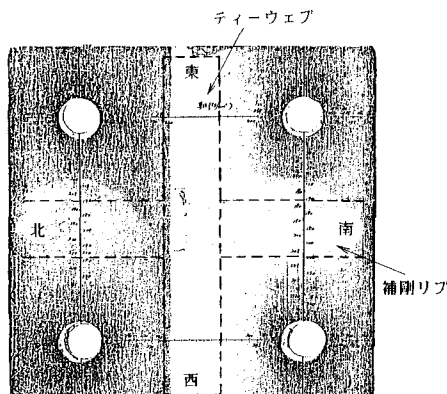
3. 実験結果と考察

3.1 初期材間圧縮力

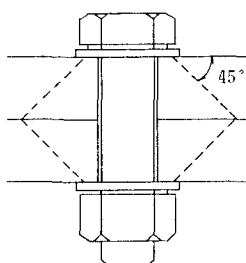
初期ボルト軸力を導入した時のティーフランジ間の接触領域と圧力分布は、色の濃淡によって圧力分布を測定することが出来る高圧用感圧紙 (7" $\times$ 4" $\times$ 1/4 HA+C

R270) を用いて測定した。図－6はその測定によって得られた接触領域を示す。無限板における1本のボルトに対する Rotscherらの応力伝達の仮定^{2) 5) 11)} (図－7) をそのまま有限な板にも適用できるとして今回の

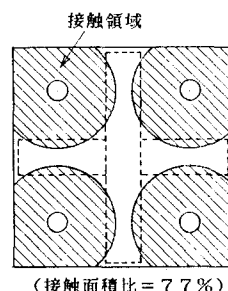
供試体の接触面の図中に描くと図－8のような接触領域が得られる。これを仮定接触領域とする。これによると、接触



図－6 接触領域 ($B_0=22.6\text{tf}$ の場合)

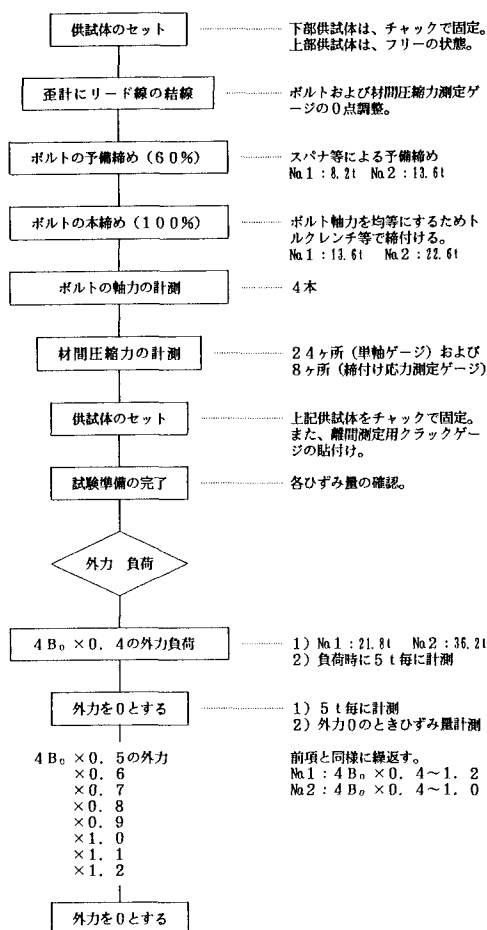


図－7 応力伝達の仮定



(接触面積比 = 7.7%)

図－8 仮定接触領域



図－5 実験手順

面積の全体に占める割合は約 77%となるが、図-6の接触領域のボルト周辺の色のついた部分を接触域としてその面積率を求めると、約 70%となり、期待される接触面積のはぼ 90%であった。またこの図でティーフランジの自由端部で接触圧が高くなっているところが観測された。これは、切削仕上げの微妙な差によって接触状態が大きく影響されることから考えて、接触面の平面性の問題と推定される。

ボルト初期軸力22.6tfの時の接触面積率(ρ)は 70%であったので平均接触圧は $\sigma = \Sigma B_0 / \rho A = 213 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ 程度になる。感圧紙によって得られた接触圧力の分布を図-9に示す。ボルト孔周辺の材間圧縮応力が400~800kgf/cm²と大きな値を示し、自由端部にも局部的にこれと匹敵するような応力が現われていることがわかる。

図-10には初期ボルト軸力導入時のボルト孔壁と、ティーフランジ自由端に貼り付けたひずみの分布を示したものである。ボルト孔壁には300~400 μ のほぼ均一な圧縮ひずみが発生しているのに対し、ティーフランジの自由端ではひずみのばらつきが大きい。図-6の感圧紙の結果からもわかるように東・西面よりも南・北の方向に、より大きい初期圧縮ひずみが導入されている。また接触領域の非対称性のため、南面でのひずみの方が北面よりも大きく、東面よりも西面が大きいなど、機械仕上げした接触面であっても局部的にみると、初期材間圧縮ひずみの分布に偏りがあることがわかる。またティーウェブ軸線下では初期材間圧縮力がほとんど生じないということがわかる。

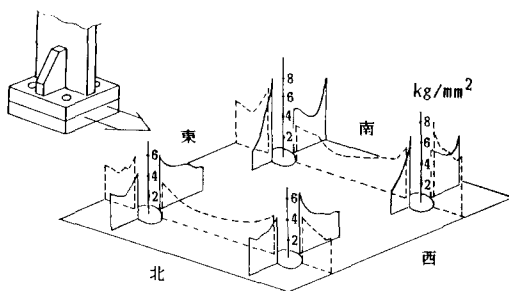


図-9 初期材間圧縮応力の分布($B_0=22.6\text{tf}$)

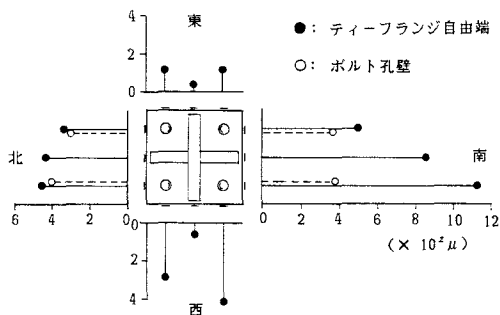


図-10 ティーフランジ端面とボルト孔壁における初期圧縮ひずみ($B_0=13.6\text{tf}$)

3. 2 載荷時のティーフランジのひずみ挙動

(1) ティーフランジ自由端のひずみ挙動

ティーフランジ自由端の接触面近傍のひずみ測定値から、ボルト初期張力導入後の値を0点として荷重-ひずみ関係を示したのが図-11および12である。図-11は初期ボルト軸力が13.6tfの場合で、図-12は22.6tfの場合である。接合部に引張外力が作用すると、外力はボルト締め付け力と打ち消し合う形で伝達される。接合面の材間圧縮応力は一般に減少するが、ティーフランジの曲げの影響によって材間圧縮応力が増大する部分もある。外力が大きくなって来ると、初期圧縮応力が打ち消され接合面の圧縮応力がなくなり離間が発生し始める。離間が発生するまでは接合部全体が線形挙動をしているが、離間の発生とともに非線形状態となり力の伝達機構を変化させながら、やがて全接合面が離間してボルトだけが外力を受け持つ状態になる。この図-11、12はその間のひずみ挙動を示している。

一般にスプリットティー継手では外力の作用線とボルト軸心とは一致せず、偏心引張の状態になる。そのため図-13のような接合板の曲げ変形が生じ、いわゆるてこ反力(R)が発生する。このてこ作用の支点となる領域では引張外力によって材間圧縮ひずみが増加することになる。図-11、12から南・北面の中央を除く両側にこの現象がみられる。東・西面にはてこ作用の影響は見られなかった。これは十字スプリットティー継手の特徴として補剛リブ軸線の下にはリブからも引張力が作用するので、圧縮ひずみは早期に減少し、てこ作用の影響は受けにくいからである。このことから、引張り外力は主として、ティーウェブから作用

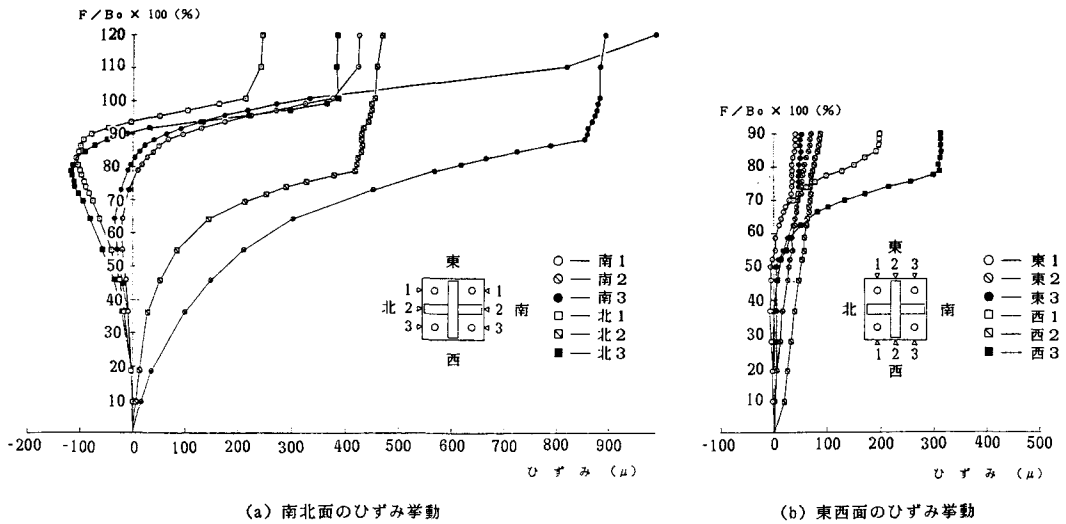


図-1 1 ティーフランジ自由端のひずみ挙動 ($B_o=13.6 \text{ tf}$)

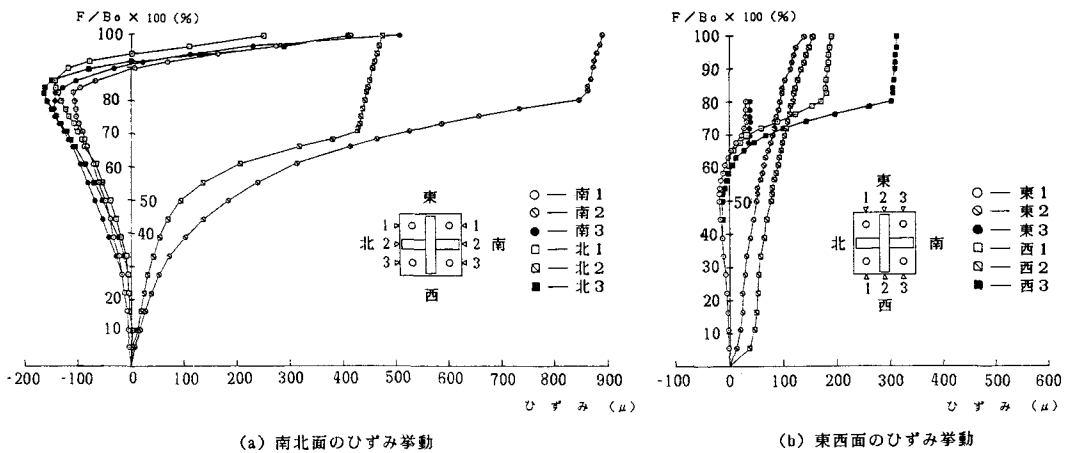


図-1 2 ティーフランジ自由端のひずみ挙動 ($B_o=22.6 \text{ tf}$)

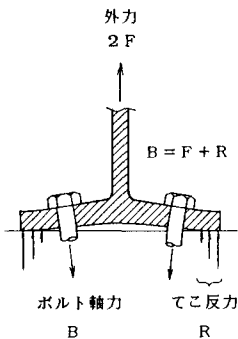


図-1 3 てこ作用

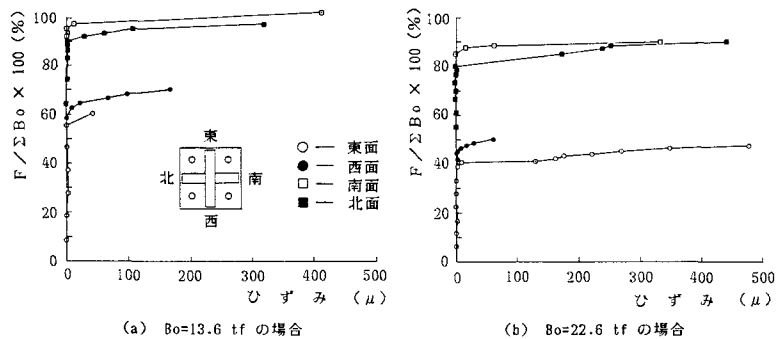


図-1 4 クラックゲージによる測定結果

するものの、補剛リブからも一部伝達されていることがわかる。すなわち補剛リブは補助的な荷重伝達作用をしていることがわかる。

次に離間が発生するとその接触面での接触圧がなくなり、ひずみも変化しなくなる。したがって、図-11、12で示したように、外力を増加させてもひずみが増えなくなる状態が、そのひずみ位置の近傍が離間したことを示すと考えられる。また側面に貼ったクラックゲージの測定値を図-14に示す。この図のひずみが急増する位置がクラックの発生点であり、ここで離間が生じたと考えられる。これらひずみの変化から各測点での離間荷重を求めた結果を図-15に示す。ここで数値はボルト初期張力の和に対する推定離間荷重の百分率を示す。離間荷重はティーウェブおよび補剛リブから遠い測点ほど大きくなっていることがわかる。ただし、ティーウェブ軸線下の測点には明確なひずみの不変化点が現われていないため、離間荷重を特定できなかったが、これらの測点の初期圧縮ひずみが小さいこと、離間はティーウェブ軸下の接触面から始まることを考え合わせると、かなり早期に離間しているものと推定できる。

(2) ボルト孔壁のひずみ挙動

ボルト孔壁のひずみの変化状態を図-16に示す。ボルト孔壁には初期ボルト導入により大きな圧縮ひずみが発生するが、引張り外力の作用とともに減少し側壁よりも早く離間する。側壁の場合と同じようにひずみの変化が止まる点を離間として、その時の荷重を図-15に示した。初期導入ボルト軸力の違いによるボルト孔壁のひずみの挙動の差を比較すると、初期ボルト軸力が大きいほど、圧縮ひずみが急速に減り始める外力比(F/B_0)が大きくなっている。しかし側壁の場合と同様に、ボルト孔壁のひずみから推定した離間荷重の外力に対する比は、初期ボルト軸力の大きさに拘らず、ほぼ同じであった。南側のボルト孔壁での離間荷重が $0.53 \sim 0.59 B_0$ であるのに対し、北側では約 $0.70 B_0$ と大きくなっているのは初期材間圧縮力について前述したように南側の接触面積が北側に比べて少なかったために、先行して離間したためと考えられる。ボルト周辺での離間

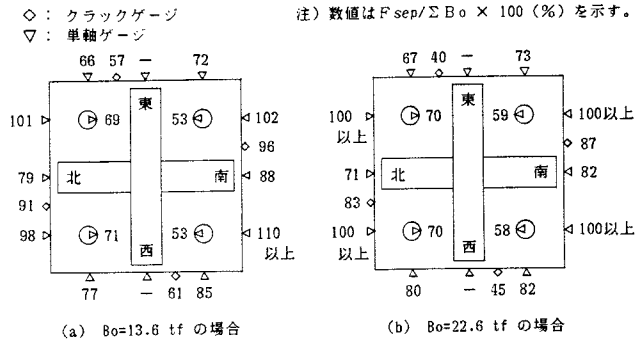


図-15 離間荷重の推定値

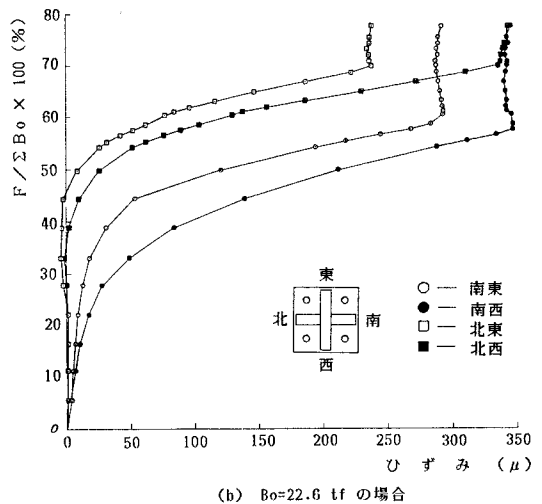
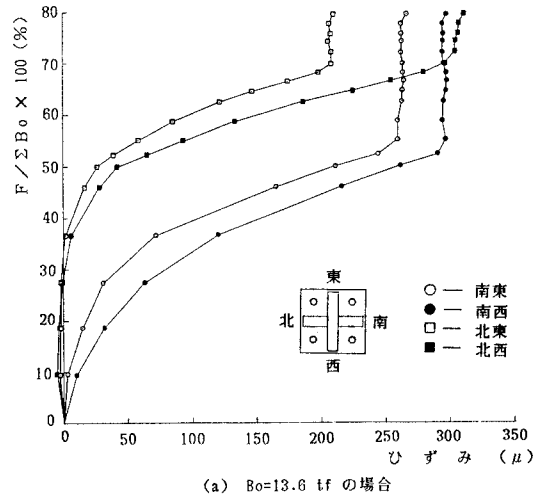


図-16 ボルト孔壁のひずみ挙動

を接合部の離間であるとすると、図-15に示した孔壁での推定離間荷重の平均をとれば、接合部の離間荷重はボルト初張力の62～64%となる。

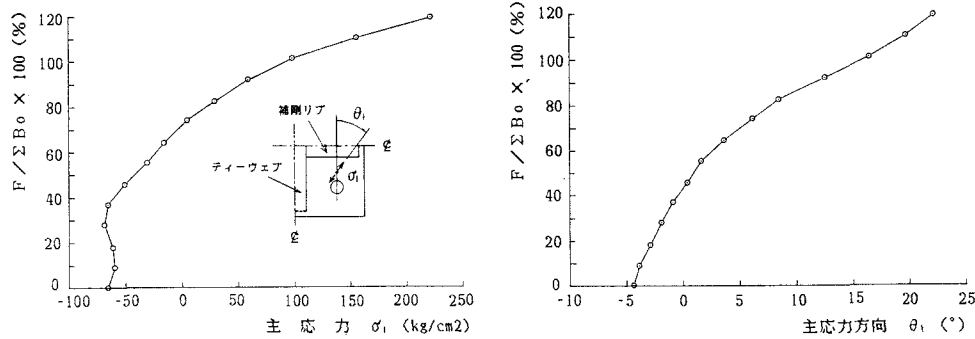


図-17 ティーフランジ表面の主応力と主応力方向 (B0 = 13.6 tf の場合)

(3) ティーフランジ表面のひずみ挙動

ティーフランジ上面に貼付けた3軸ゲージの測定値からティーフランジ表面の主応力及びその方向を求めた。その結果を図-17に示す。ボルト締め付け時の主応力方向は、ほぼティーウェブに平行な方向であった。接合部に引張外力が作用するとティーフランジの曲げ変形に応じて、主応力及びその方向は変化する。補剛リブがない場合の主応力方向は、荷重の増加とともにティーウェブに平行または直行する方向に近づくと考えられるが、十字スプリットティー継手の場合は、補剛リブからも外力が伝達されるので最大荷重時までに26度程変化した。ボルト締め付け時には最大主応力は約70kgf/cm²であった。引張り外力が初期ボルト軸力の40%弱までは主応力に大きな変化が見られない。しかしながら主応力の方向は徐々に変化していて、非線形性状を示していることが推測できる。すなわち、外力を掛け始めたときからすでに、ティーウェブの真下あたりの位置から離間が徐々に広がり始めているのではないと思われる。120%載荷時であっても主応力の値は220kgf/cm²程度であった。ゲージ貼付け位置が最大応力発生位置とは限らないが、この試験体の寸法であれば接合部の耐力は高力ボルトで決まるものと考えられる。

3.3 離間の進行過程

離間および初期材間圧縮力の測定値などに若干の非対称性、ばらつきなどがみられるが、図-15に示すフランジ側面及びボルト孔側面に貼ったゲージから推定した各位置の離間荷重から接合面のおおよその離間の進行状態を以下のように推定することが出来る(図-18)。

- ①約25%載荷時：初期材間圧縮ひずみが最も小さいティーウェブ軸線部分は、引張外力の作用直下でもあり、早期に離間が始まる。引張り外力が増加するにしたがって離間はボルト方向に向かって進行する。
- ②約50%載荷時：補剛リブによる荷重の分担の効果により、離間領域はリブ軸線部に広がると同時にボルト方向にも進行する。
- ③約75%載荷時：ボルト周辺及びリブ先端部分にも離間が進む。

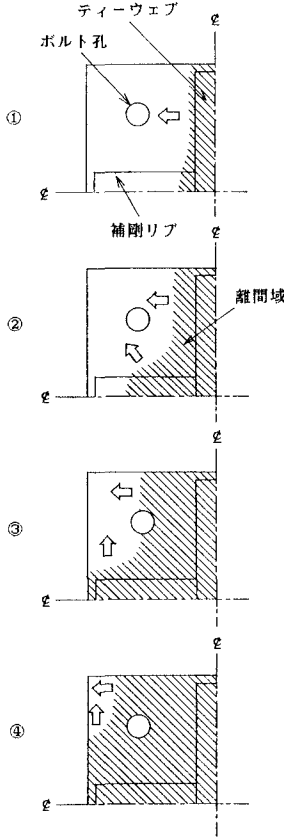


図-18 離間の進行過程

④約100%載荷時：ボルト周辺部が離間した後、外力の増加とともに離間は自由端に向かって進行し、最終的にはティーフランジの隅角部が離間する。

3. 4 ボルト軸力と荷重の関係

(1) ボルト初期張力の影響

1本のボルトで締め付けた2枚の板を想定し、その接合部をバネモデルに置換した場合、離間前のボルト軸力(B)と引張り外力(F)の関係は①式で現われ、この時離間荷重(F_{sep})は②式となる。これをグラフ化すると図-19のようになる。

$$B = B_0 + \frac{1}{1 + K_p/K_b} F \quad \text{---①}$$

$$F_{sep} = (K_b/K_p + 1) B_0 \quad \text{---②}$$

ここでK_b：ボルトのバネ定数、K_p：板のバネ定数
②式では、広がりのある圧縮領域を1本のバネで置換しているため、この考え方では、全領域が同時に離間することになるが、実際には荷重作用点に近いところから順次離間していくので、その時のボルト軸力-荷重関係は非線形でありグラフは曲線になる。実験で得られたボルト軸力と荷重の関係を図-20に示す。この曲線となる部分は、ボルト初期張力にかかわらずFがおよそ0.6~0.7B₀あたり以後に現れ、その後実験の最大荷重まで続く。荷重を1.2B₀まで載荷した場合でも、全域にわたる離間には至っていない。ボルト孔壁のひずみ測定値から、引張り外力が初期ボルト軸力の和の62~64%に達すると、ボルト近傍が離間することは既に述べたが、それ以上の荷重が作用するとこの作用の影響で、ボルト軸力の増加率が大きくなるものと考えられる。この、ボルト軸力が急に増え始めるときが離間荷重であり、これは初期張力の値にほぼ比例することがわかる。

表-2に、荷重の増加にともなうボルト軸力の増加量（付加軸力）の測定値を示す。②式ではボルト付加軸力の大きさは初期ボルト軸力の大きさに関係なく、K_bとK_pによって決まることになるが、この表の測定値を見ると、ボルト周辺部が離間していない荷重（F/ΣB₀<0.6）では、初期軸力が違ってもボルト付加軸力はほぼ同程度であるが、作用外力が大きくなると、初期ボルト軸力が大きいほうが付加軸力比は小さくなり、接合部の相対的な剛性は初期張力が高いほど大きいことがわかる。また図-6と関連して、接触面の状態によって比較的大きな範囲に接着している北側のボルトの付加軸力が小さく出ている。

2) 初期ボルト軸力の減少率

荷重除荷後のボルト軸力の減少率を表-3に示す。初期ボルト軸力の和の60%載荷時におけるボルト軸力

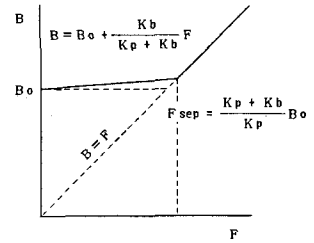


図-19 単一引張ボルトのボルト軸力-荷重関係

ボルト軸力 B (tf)

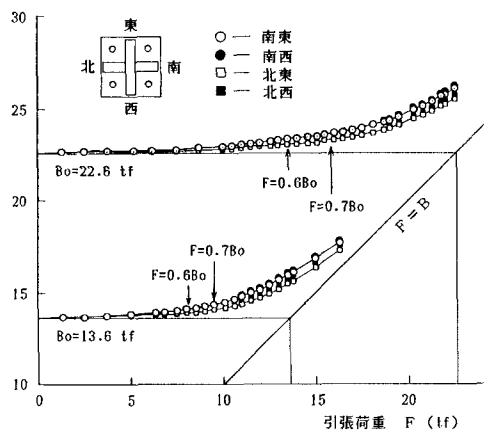


図-20 ボルト軸力と引張外力との関係

表-2 ボルト付加軸力

F / Σ B ₀	[(B - B ₀) / B ₀ × 100 (%)]							
	B ₀ =13.6t				B ₀ =22.6t			
	南東	南西	北東	北西	南東	南西	北東	北西
0.5	2.6	2.5	1.2	1.2	2.1	2.0	1.1	1.1
0.6	3.6	3.5	1.9	1.8	3.3	3.1	1.9	1.9
0.7	5.5	5.7	3.2	3.4	4.5	4.6	2.9	3.1
0.8	8.8	9.3	5.8	6.3	6.5	6.6	4.7	4.8
0.9	11.4	12.0	8.1	9.1	9.7	10.2	7.4	8.1
1.0	17.3	18.1	13.7	15.3	14.7	15.3	12.8	13.3

表-3 ボルト初張力の減少率

F / Σ B ₀	[ΔB / B ₀ × 100 (%)]							
	B ₀ =13.6t				B ₀ =22.6t			
	南東	南西	北東	北西	南東	南西	北東	北西
0.6	0.23	0.00	0.12	0.06	0.42	0.38	0.24	0.45
1.0	0.74	0.58	0.71	0.53	0.77	0.84	0.70	0.87
1.2	0.96	0.81	0.88	0.82				

の減少率は0.4%未満で、荷重が初期軸力之和の120%に達しても、除荷後のボルト初張力の減少率は1%弱と僅かであった。本実験で用いた寸法の場合、この程度の繰返し载荷実験では軸力減少率は十分小さい。

4. 数値解析による検討

4. 1 立体有限要素解析の概要

今回行ったリブを有するスプリットティー継手の実験結果を検証するとともに、リブのない通常のスプリットティー継手との比較を行うために数値解析を行った。スプリットティー継手を2次元モデルでFEM解析した例としてはNairらの報告⁸⁾があるが、十字形状の補剛リブを有する場合、2次元モデルではその効果を評価することはできない。本文ではリブおよび厚板フランジの効果をできるだけ忠実にモデル化するように、3次元FEMによって解析した。ただし今回は溶接部を組み込めるほど細かくは出来なかった。解析モデルの要素分割と境界条件を図-21に示す。鋼材部分は五面体および六面体の中実体要素でモデル化し、ティーフランジは板厚方向に5分割、縦横9分割とした。ボルト部はNairと同じように実際のボルトの伸び剛性と等価なバネ要素で置き換えた。そのバネ要素を座金外周部に均等に分散して配置した。解析は対称性から、接合部片側の1/4を対象とした3次元モデルである。

解析手順を図-22に示す。最初に初期ボルト軸力に相当する支点変位をバネ要素に与えて、初期ボルト

軸力導入時の計算を行う。このとき、ティーフランジの変形によりバネが幾分か伸び、ばね力の合計が所定の軸力量より減少した場合には、再度支点変位量を増加させるという繰返しを行う。初期ボルト軸力は22.6tfに設定した。次に引張外力をティーウェブに载荷して計算するが、そのときティーフランジ底面に支点反力に引張が生じていればその点の変位拘束を解除して再計算する。この計算を変位拘束した点で新たに引張反力が発生しなくなるまで繰返す。この時拘束を解放した点でフランジ板厚方向の変位が負にならないかチェックする。引張外力の载荷ステップは初期ボルト軸力と引張外力の比で0.1から0.5までは0.1のピッチで、単調増加载荷し、それ以降は外力比1.2まで0.05ピッチで計算した。

4. 2 初期材間圧縮力の分布

初期ボルト軸力導入時における、ティーフランジ底面の各要素に生じる圧縮応力の分布を図-23に示す。ボルト座金直下部分には380kgf/cm²の応力を生じており、図-8に示した仮定接触領域にほぼ相当する範囲に分布していた。この分布状態はリブがある場合でもない場合でも同じ結果が得られており、リブの有無に

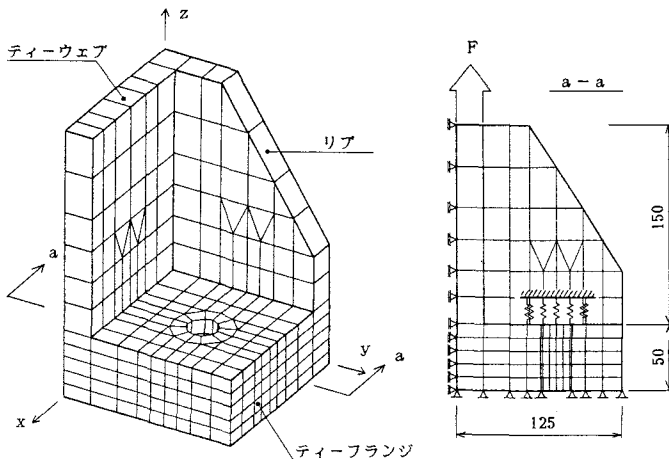


図-21 解析モデルの要素分割と境界条件

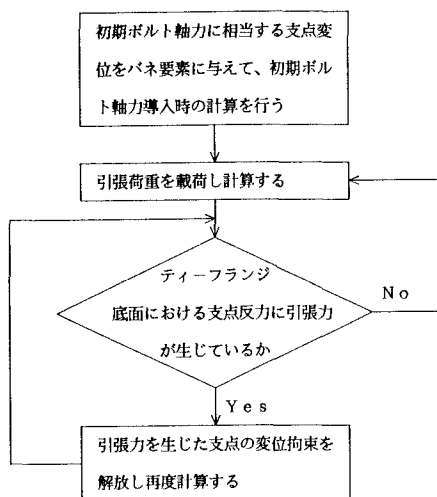


図-22 解析手順

よる初期材間圧縮力の差はみられなかった。
実験結果ではティーフランジ自由端に大きな
材間圧縮力が生じていたが、解析結果から判
断するとそれは接触面の仕上げの誤差から生
じたものと思われる。また図から分布はほぼ
対称で、コーナー部にわずかながら負の値が
でている。図-24はボルト孔中心をとる
断面でのティーフランジの変形状態と初期材
間圧縮力の分布を示したものである。ボルト
孔から離れるにしたがい、直線状に減少して
いる。図中の破線はRotscher

らの応力伝達の仮定線であ
る。この図からもティーフ
ランジの自由端側の接触圧
が内側より大きくなること
がわかる。

4. 3 ティーフランジの 応力と変形挙動

ティーフランジ底面要素
の主要点における、フラン
ジ厚方向の応力と荷重の関
係を図-25に示す。要素
No. 2, 3, 4は実験時のフラン
ジ自由端の測点に、要素No.
5はボルト孔壁の測点に近
い要素である。要素 No. 4,
5には応力の急変点が現わ
れて、これが接合面に引張
応力が発生した荷重と対応
しており、この急変点から
離間荷重を推定出来ると考
えられる。リブがない場合
の離間荷重はボルト初期張
力 and の 60~65%であるの
に対して、リブがある場合は
75~80%であり、15%ほど増
加している。要素 No. 1~3
の応力挙動に着目すると、
リブのない場合ボルト位置
で離間が発生するまでどれ
もよく似た挙動をしている。
ボルト位置に離間が発生し

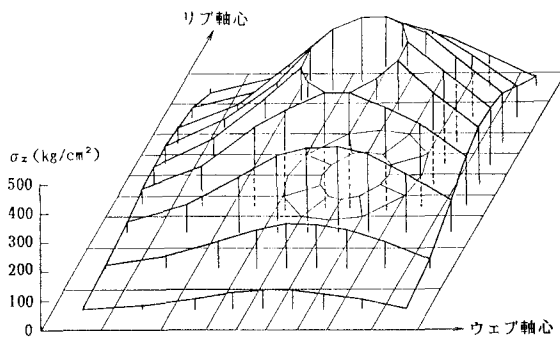


図-23 初期材間圧縮応力の分布

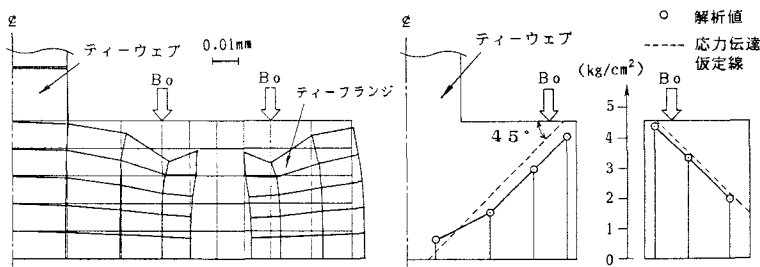


図-24 ティーフランジの変形状態と材間圧縮応力の分布

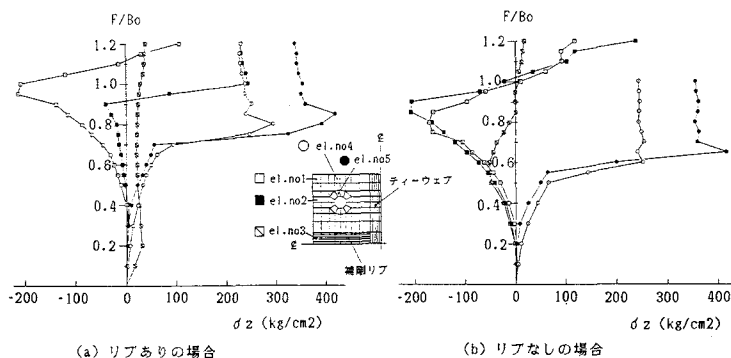


図-25 ティーフランジの応力挙動

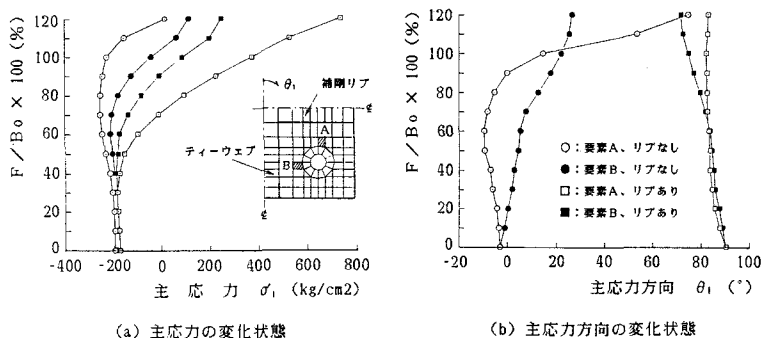


図-26 ティーフランジ表面の主応力と主応力方向

た後、要素No. 3では圧縮応力が解除され始めるが、自由端隅角部に近いNo. 1, 2ではてこ反力がさらに大きくなり圧縮応力が増している。これに対してリブのある場合にはボルト位置で離間が発生するまでは応力の値は比較的小さくリブによる補剛効果のためティーフランジの曲げ変形が抑制されていることがわかる。ボルト位置で離間が生じた後は、自由端の隅角部にてこ反力が集中し、リブなしの場合と比べ、てこ反力が生じる領域が少ないことがわかる。リブ先端部(要素No. 3)の応力は荷重がボルト初期張力の20%を過ぎると不変化点に達している。ボルト位置から遠く初期材間圧縮力が小さい上に、リブから伝達される引張荷重に近いので早期に離間すると考えられるが、この結果はむしろ、ティーフランジの先端部の実験結果とよく一致している。これは、実験ではリブとティーフランジの剛性にかかなりの差がある事を示しているのに対して、本解析モデルでは剛性の差を十分表現していないためと考えられる。また外出の載荷法についても検討の余地があると思われる。

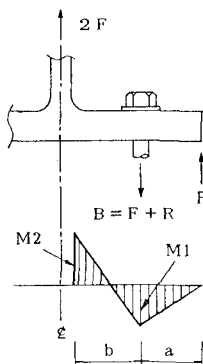


図-28 てこ作用

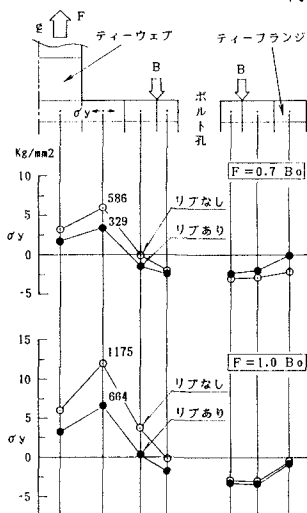
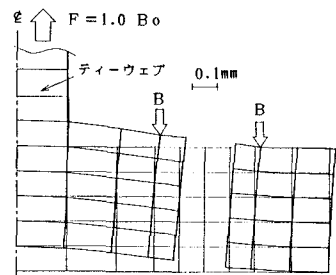
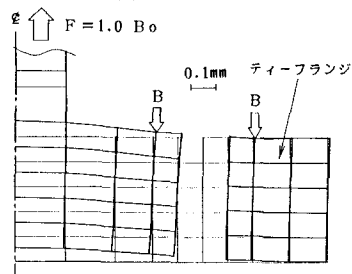


図-29 ティーフランジ上面の曲げ応力の分布



(a) リブなしの場合



(b) リブありの場合

図-27 ティーフランジの変形状態

ティーフランジ表面での主応力と主応力方向の推移を図-26に示す。ほぼ実験時の測点に対応している要素Aにおける挙動は図-17に示した実験結果と、傾向はよく似ている。しかし、測点と、要素位置が多少ずれているため数値的にはかなり違った値を示している。また、要素Bにおける最大荷重時までの主応力の変化量はリブなしの場合の950kgf/cm²に比べ、リブ有りの場合は450kgf/cm²と約半減している。

図-27は引張外力が初期ボルト軸力に等しいときのティーフランジの変形を示したものである。リブのある無しに拘らず、ティーフランジの変形パターンはほぼ同じであるが、リブ有りの場合にはその補剛効果によって、曲げ変形量が抑制されている。ティーウェブ軸心位置においてティーフランジの変形量を比較すると、リブなしの場合0.104mmであるのに対してリブがある場合には0.064mmで、69%に減少している。またリブの有無に拘らず、離間していない箇所は、ティーフランジ端部のみであることから、てこ反力はフランジ端部に線荷重として働いていると考えられる。この時のてこ反力(R)と引張外力(F)との比、すなわち、てこ反力比($p=R/F$)を求めると、リブなしの場合： $p=9.02\%$ 、リブがある場合： $p=5.27\%$ のようにリブの補剛効果によって58%も低減されていた。高力ボルト接合設計施工指針(日本建築学会)²⁾に示されている、スプリットティー接合部の設計式ではティーフランジの曲げ耐力の検討を行う場合、ティーフランジを梁と考え、そこに働く力の釣合いから作用モーメントは図-28のようになるとして、 M_1, M_2 を次式で与えている。

$$M_1 = R a, \quad M_2 = F b - R a \quad \text{--- ③}$$

この式に $p=R/F$ を代入すると

$$M_1 = p a F, \quad M_2 = (b - a p) F \quad \text{--- ④}$$

となり、てこ反力比の大きさによって作用モーメントを求めることが出来る。

図-29には、ティーフランジ上面の要素における、曲げ応力の分布図を示す。最大引張応力をリブの有無で比較すると、 $F=1.0 B_0$ の時、リブなしの

場合は 1175kgf/cm²、リブありの場合は 664kgf/cm²であった。両者の比をとれば 57%であった。ところが④式のM₂の式に F=1.0B₀のときのでこ反力比の値と、実験時の供試体の寸法から定まるaとbの値を代入して、リブがある場合とない場合のM₂の比を計算すると97%になる。ティーフランジを梁と考えた従来のスプリットティーの考え方で作用モーメントを算定した場合、M₂はbFが支配的になりてこ反力比pの影響をあまり受けないことになる。それに対して解析結果ではこの寸法の継手に対しては約 1/2の値となる。このことから、十字スプリットティー継手に関しては、従来のスプリットティー継手の設計式は適用できないということが言える。

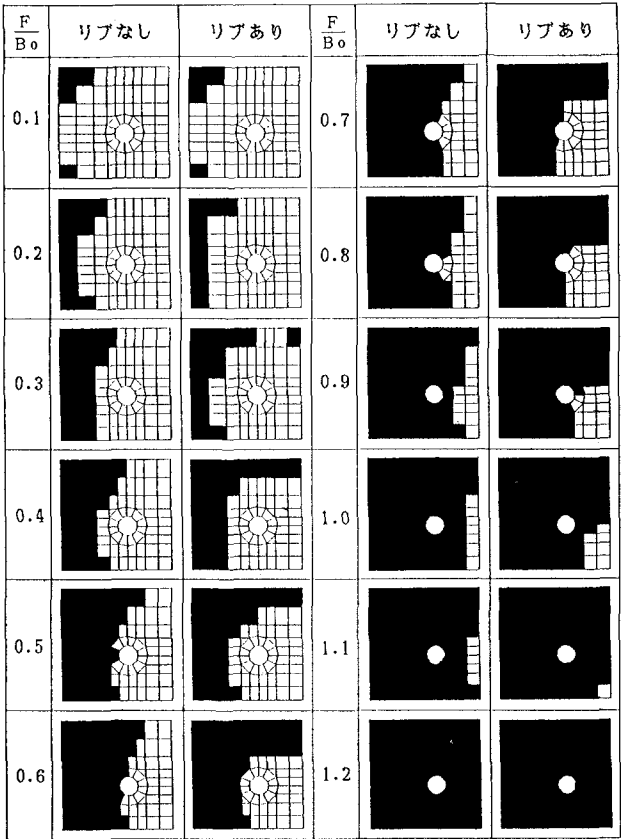
4. 4 離間の進行過程

解析では、載荷ステップ毎に、ティーフランジ底面の支点反力に引張力を生じなくなるまで、変位拘束を解除しながら反復計算を行った。各載荷ステップ毎にティーフランジ底面における変位拘束を解除した領域を求めると、図-30のようになった。この図ではリブの有無による離間の進行過程の違いも比較した。リブのない通常のスプリットティー継手

場合は、引張外力がティーウェブから作用するので、ウェブ取り付け位置からボルト方向に向かって、順次離間していく。ボルト直下での離間はF=0.5B₀の時から始まり、F=0.9B₀で、完全にボルト座金直下部分は離間している。これに対して、リブのある十字スプリットティーの場合は、引張外力がティーウェブとリブの双方からティーフランジに作用することになり、離間はティーウェブとリブの両方から自由端に向かって進行している。引張外力が分散されることにより、ボルト直下部分での離間荷重は、リブのない場合よりも大きくなり、F=0.7B₀から離間がはじまり、F=1.0B₀まで続いている。この結果から、補剛リブを設けて、引張外力を分散させることにより、接合部の離間荷重を引き上げる効果をもたらしていることがわかる。

4. 5 ボルト軸力と荷重の関係

ボルト軸力と荷重の関係を、リブの有無で比較して、図-31に示した。この図からわかるとおり、ボルト付加軸力は、リブのある十字スプリットティーの方がリブのない場合より小さい。ボルト周辺が離間する荷重レベルである、F=0.7B₀でボルト付加軸力を比較すると、リブのある場合は0.8%であるが、リブなしの場合では1.9%となり、リブでティーフランジを補剛することによって、てこ反力が半減していることがわかる。同じ荷重レベルでの実験結果では、ボルト付加軸力の平均は3.8%であった。これは実験時の材間圧縮



注) 着色部分は離間した領域を示す。

図-30 離間の進行過程 (解析結果)

力がリブ先端のティーフランジ自由端で大きかったために、ボルト周辺が離間した時点でもティーフランジの自由端ではまだ離間しておらず、このためにてこ反力が解析結果より増大し、ボルト軸力が大きくなったものと考えられる。

引張接合の破断形式はティーフランジの曲げ破壊ないしはボルトの引張破断である。今回対象とした引張接合部に関しては、ティーフランジの曲げ応力は前述した通り $F = 1.0 B_0$ でも十分弾性範囲内にあり、ボルトの引張破断で最大耐力が決まるものと考えられる。

5. 結論とまとめ

スプリットティー継手のてこ反力の問題が引張り接合部を決定する重要な要素となっている。このてこ作用を抑えるべく、リブで接合部を補強すること、および厚手のフランジを使用して剛性をたかめることが、有力な方法であると考えられる。

今回、リブで補強した、比較的厚いフランジを持つ十字スプリットティーに関して、引張り接合継手としての諸特性を明らかにするため、静的な実験と数値解析を実施し、それらの効果を検討したが、ここで得られた主な結果は、以下に示すとおりであった。

- 1) 静的載荷実験結果から推定される十字スプリットティー継手の離間荷重は、ボルト初期張力の約64%であった。これは初期ボルト張力が異なっても、ほぼ同じ結果であり、離間荷重は初期ボルト軸力に比例していた。
- 2) ボルト軸力、ティーフランジのひずみとも、ほぼ可逆的な挙動を示しており、特に、ボルト初張力の減少量は1%未満であった。
- 3) リブで補剛してティーフランジの剛性を高めれば、てこ反力を低く抑えることが出来る。解析結果では補剛リブを設けることにより、てこ反力は半減していた。同時にフランジ表面の最大応力もほぼ1/2に減少していた。リブの剛度をパラメーターとして両者の関係を明確にする必要がある。
- 4) 補剛リブはティーウェブから作用する外力を分散させる効果があるので、てこ反力の発生する領域を減少して、接合部の離間荷重（ボルト周辺での離間荷重）を引き上げる効果をもたらしていた。また補剛リブがある場合の接合部の離間荷重がリブなしの場合より、初期ボルト軸力の和の15%ほど増加していた。

実験、解析及びその比較などを通じて以上のような結論が得られた。また本解析モデルを用いた解析によって、リブの有無による特性の違いなどの基本的な性質を把握することができたと考えている。また解析結果は傾向としては概ね実験結果とよく対応しているが、数値的には十分一致しているとは言い難い部分もある。なにぶん1ケースの実験と解析であり、十分なデータを得られた訳ではなく、実験法および解析の際のモデル化に改良の余地があると考えられる。今後、今回の実験及び解析の結果をふまえ、十字スプリットティー形式の接合部の設計のためのデータを積み重ねて行きたい。

なお本研究は関西道路研究会・道路橋調査研究委員会・接合小委員会の調査研究活動の中の一部を著者らが代表してまとめたもので、委員会メンバーには終始熱心な討議を戴いた。また今回の実験にあたって、ボルトメーカーの諸氏に非常にお世話になった。関係諸氏に深く感謝の意を表するものである。

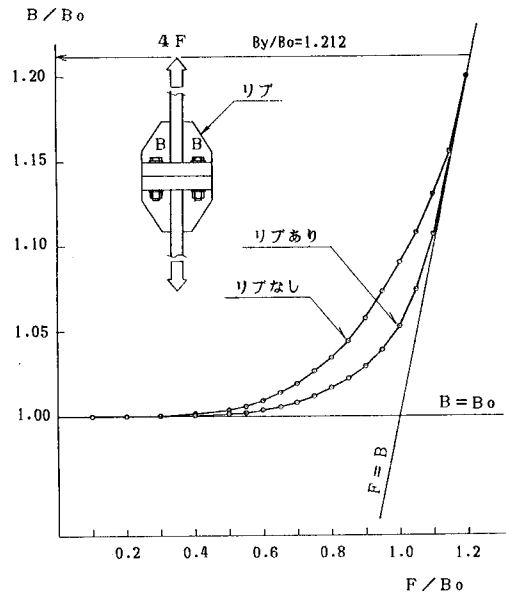


図-3 1 ボルト軸力-荷重関係

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会接合小委員会：鋼構造接合資料集成ーリベット接合・高力ボルト接合ー、技報堂出版、1977
- 2) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工指針、1983
- 3) 加藤 勉：高力ボルト引張接合部の設計式（スプリットT接合），JSSC Vol. 5, No. 46, p73-80, 1969. 10
- 4) 田中 尚、田中淳夫：高力ボルト引張接合部の設計式について，JSSC Vol. 11, No. 120, p5-10, 1975. 12
- 5) 藤本盛久、橋本篤秀：高力ボルト引張接合に関する研究、第2部、split-tee型引張接合の解析（その1）および（その2）、日本建築学会論文報告集、第190号、p59-67, 1971. 12／第191号、p7-18, 1971. 1
- 6) 日本鋼構造協会接合小委員会引張ボルト接合班：高力ボルト引張接合実験報告、JSSC, Vol. 8, No. 74 p17-37, 1977. 9
- 7) 橋本篤秀：高力ボルト引張接合の設計式について、JSSC, Vol. 13, No. 141, p28-32, 1977. 9
- 8) R. S. Nair, P. C. Birkemoe and W. H. Munse: High Strength Bolts Subjected to Tension and Prying, Journal of the Structural Division, Proc. of ASCE, Vol. 100, No. ST2, p351-372, 1974. 2
- 9) Geoffrey L. Kulak, John W. Fisher and H. A. Struik: Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, Second Edition, Chapter 17, Tension-Type Connections, p263-288, A Wiley-Interscience Publication, 1987
- 10) 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
- 11) F. Rotscher: Die Maschinenelemente, Springer, Berlin, 1927

（1989年10月2日受付）