

スプリットティー継手の疲労挙動に関する 実験的研究

渡邊英一¹・山口隆司²・杉浦邦征³・葛西俊一郎⁴

¹正会員 Ph.D 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

²学生員 工修 京都大学大学院 土木工学専攻 (〒606 京都市左京区吉田本町)

³正会員 Ph.D 京都大学助教授 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工修 (株) 神戸製鋼所 構造技術部 (〒657 神戸市灘区岩屋中町 4-2-15)

高力ボルト引張接合は、優れた力学的特性と施工性を有しており、各種構造物の接合部への適用が期待される。しかし、確立された設計基準などが存在せず、橋梁構造物への適用はほとんど進んでいない。橋梁用主部材の接合形式として用いる場合、静的荷重下での強度とともに繰り返し荷重下での強度、いわゆる疲労強度も重要となり、これに対する検討が基準確立のために必要となる。このようなことから、本研究ではその第1段階として高力ボルト引張接合の最も簡単なスプリットティー継手を対象として、その繰り返し荷重下での挙動と疲労強度をフランジ板厚を変化させ、疲労試験を行い、検討した。

Key Words : split tee flange joint, high strength bolt, fatigue test, thickness of flange plate

1. はじめに

高力ボルトフランジ継手は、部材軸直角方向に添接されたフランジプレートを高力ボルトにより接合する継手形式であり、高力ボルトに高い引張荷重を導入する点が特徴である。この継手形式は一般のボルト接合に比べて高力ボルトにあらかじめ高い軸力が導入されることから継手部に高い剛性を持たせることができること、外荷重の変動に比べてボルト軸力の変動が少ないことなどの優れた力学的性質を持っている。また、溶接による接合に比べて施工が容易であること、摩擦接合と異なり、接合部外観を平面的にすることが可能であり景観上優れていることなどの利点も有している。今後、様々な構造物が海岸部に加えて施工困難な山岳地に建設されるであろうということ、労働者の不足等による省力化の必要性が増すであろうことなどを考慮すると、優れた力学的性質を持ち施工が容易であるというこの継手形式は、今後その重要性が高まると考えられる。

この種の継手形式の研究は、短締め形式と呼ばれる2枚のフランジ板を短いボルトで締め付ける継手形式を中心に昭和40年代に主に建築分野で行われ、強度設計式の提案を目的とした静的強度を中心に盛

んに研究が行われてきた。これらの研究成果は現在の高力ボルト接合設計施工指針(日本建築学会)¹⁾にも生かされており、実構造物への適用も積極的に行われている。さらに、最近ではエネルギー吸収能の観点から耐震設計の一方策として研究が進められている。一方、土木分野でのこの種の継手形式に関する研究は、過去にほとんど行われておらず、そのため、道路橋示方書においても明確にその基準が示されていないのが現状である。しかしながら、土木分野においても最近では、高力ボルト引張接合の利点が注目され、文献2)-5)に見られるような研究もなされ、建築分野での研究成果と新たな知見を加え、橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)⁶⁾が(社)日本鋼構造協会橋梁用引張接合標準作成小委員会(委員長:武蔵工業大学教授西脇威夫)によって策定されている。また、本州四国連絡橋の来島大橋の主塔の接合部においても高力ボルト引張接合の一形式である長締め形式の接合形式が実際に採用されている⁷⁾。しかしながら、土木分野におけるこの種の継手形式の研究は、まだ始まったばかりであり、同指針(案)でも指摘がなされているように解決すべき課題もまだ多く残されている。

著者等はこのような状況を踏まえ、高力ボルトフ

ランジ継手の最も基本的な接合形式であるスプリットティー継手を対象として接合部剛性に注目した実験的・解析的研究を行い、その力学的挙動などを詳細に検討してきた^{8)~10)}。さらに、スプリットティー継手を構成する基本要素である高力ボルトを対象とした単調引張試験および疲労試験¹¹⁾も行い、その力学的挙動なども検討してきた。土木構造物では建築構造物に比べて繰り返し荷重に対する疲労耐久性が重要な問題となり、疲労の検討はこの継手形式を橋梁用の接合形式として積極的に採用していくためには不可欠である。しかし、特に疲労強度に関する研究成果としては文献¹²⁾があるのみで、今後実験的・解析的検討が必要と思われる。

このようなことから、本研究では高力ボルト引張接合の最も基本的な継手形式であるスプリットティー継手を対象とし、高力ボルトの軸力変動とフランジ板の変形に着目して繰り返し載荷試験を行い、繰り返し荷重に対する力学的挙動を明らかにするとともに疲労強度について検討した。

2. 疲労試験

(1) スプリットティー継手

対象としたスプリットティー継手を図-1に示す。この継手形式は、ウェブプレートからフランジプレートに、そして高力ボルトの締め付けによって生じた材間圧縮力の解放によって荷重が伝達される継手形式であり、引張継手の短縮め形式に分類される。

(2) 静的強度に及ぼす力学条項

この継手形式の静力学的挙動を最も支配する要因はフランジプレートの板厚であり、フランジプレートの板厚によりその力学的挙動は大きく異なる。フランジ板厚の異なる典型的な2つのケース⁸⁾の荷重-離間量曲線と荷重-ボルト軸力曲線をそれぞれ図-2、図-3に示す。実験供試体の諸元については文献⁸⁾を参照されたい。図中の f_{th} はフランジ板厚を示す。フランジ板が薄い場合は、フランジ板の変形が大きく荷重が小さい段階から離間が進行するが、大きな変形能を持つことが特色である。一方、フランジ板が厚い場合は、フランジ板はほとんど変形せず、高力ボルトの破断によって脆性的に破壊する。このような力学的挙動の違いはフランジ板の耐力と高力ボルトの耐力とのどちらが継手全体の力学的挙動に支配的であるかによって決まっている。また、高力ボルトの軸力の変動もフランジ板厚の大小で大きく異なっている。フランジ板が薄い場合、荷重が

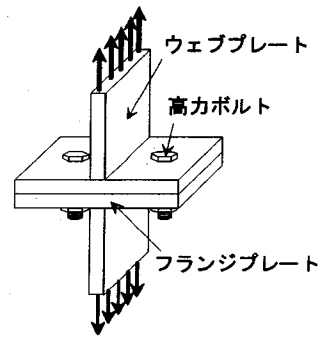


図-1 スプリットティー継手

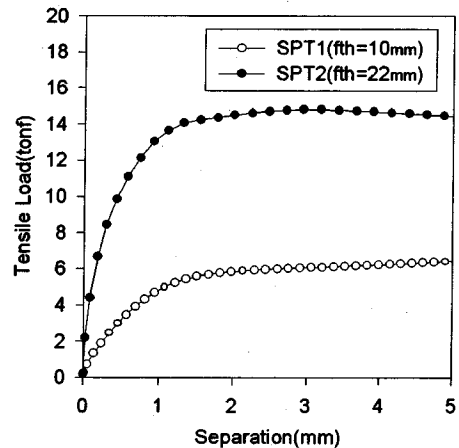


図-2 荷重-離間量曲線

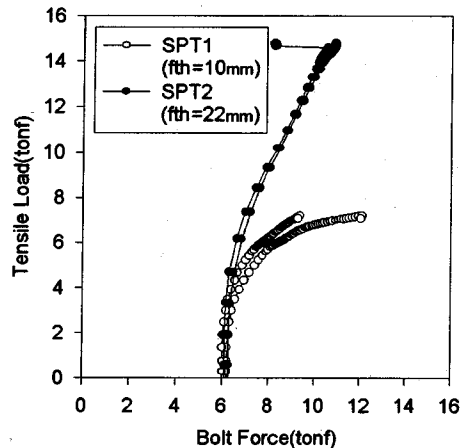


図-3 荷重-ボルト軸力曲線

小さい段階からボルト軸力の増加が大きいことがわかる。これは、フランジ板の変形による反力の発生のためのボルト軸力の増加の他にフランジ板が薄いために高力ボルトが高力ボルトのヘッド外縁を支点にして曲げられ、その結果、高力ボルトに引張・

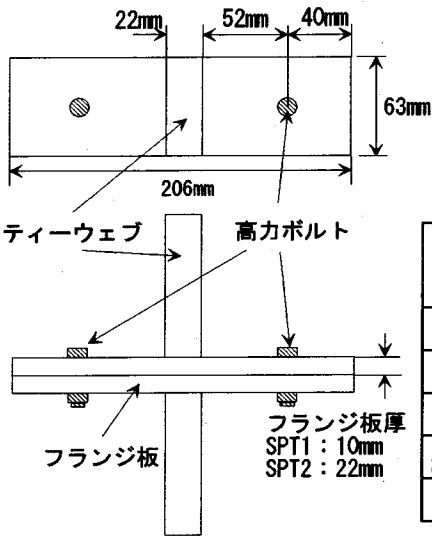


図-4 供試体の諸元

表-1 単調載荷実験結果

フランジ板厚	降伏荷重
10mm	5.1tonf
22mm	14.0tonf

表-2 疲労試験供試体の載荷パターン

供試体	最小荷重	最大荷重	荷重振幅	応力比	Pmax/YL	載荷周期
	Pmin	Pmax				
SPT1A	100	2500	2400	0.040	0.49	2.0Hz
SPT1B	100	5000	4900	0.020	0.98	2.0Hz
SPT1C	100	3750	3650	0.027	0.74	2.0Hz
SPT2A	100	7500	7400	0.013	0.54	2.0Hz
SPT2C	100	3750	3650	0.027	0.27	2.0Hz

単位: kgf

YL: 降伏荷重

曲げが作用し、軸力が増加したものと考えられる。一方、フランジ板が厚い場合は、荷重が小さい段階における軸力の増加はあまり見られず、フランジ板が薄い場合に比べてそれほど曲げられておらず、ボルト軸応力がほぼ均一になるように引っ張られる傾向にあると考えられる。

(3) 疲労試験供試体の設定と疲労試験方法

このようにフランジ板厚が異なればその力学的挙動も異なることから、繰り返し荷重下での挙動や疲労強度を検討する際にフランジ板厚の異なるものを対象とする必要がある。したがって、本研究ではフランジ板が厚いものと薄いものの2種類を疲労試験の供試体として設定した。

供試体の諸元を図-4に示す。フランジ板が厚いものと薄いものとは、フランジプレートの板厚が異なるのみでフランジプレートの形状、ボルト穴位置およびウェブプレートの形状は共通である。供試体の諸元は著者等が既に行っているスプリットティー継手の単調載荷実験で用いた供試体と同じ寸法⁸⁾とし、得られている静力学的挙動を参考とすることにした。単調載荷実験で得られた降伏荷重を表-1に示す。次に疲労試験供試体に与えた荷重振幅と応力比、および載荷周期を表-2に示す。荷重振幅は表-1に示した降伏荷重を参考にし、降伏荷重の4分の1、2分の1の2パターンを基本パターンとして設定した。しかし、フランジ板が薄い場合については降伏荷重の2分の1の荷重振幅を与えた場合でも疲労破壊しなかったため、降伏荷重の4分の3と

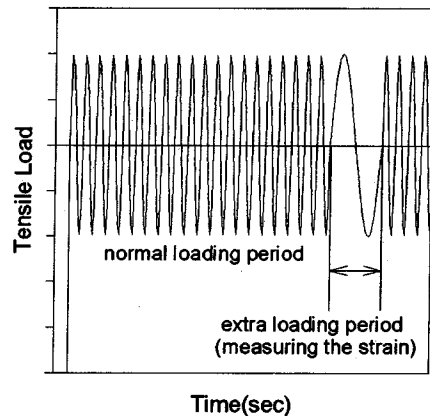


図-5 載荷荷重の時間変化

降伏荷重レベルの荷重振幅を与えることにした。

供試体の製作に当たってはティーウェブとティーフランジの溶接部分に特に注意を払い、この応力集中部での疲労強度の低下を招かないようにした。ティーウェブとティーフランジの溶接は、ティーウェブにK型の開先をとり、部分溶け込み溶接を行い、その後グラインダーで表面処理を行った。

疲労試験は、(株)島津製作所製サーボパルサー疲労試験機を用い、荷重制御で行った。荷重ゼロから目標荷重までの片振りの載荷を基本としたが、下荷重をゼロで制御する場合、載荷安定性が悪いので、下限の荷重を100kgfに設定した。載荷周期については試験機の性能を考慮し、荷重-時間曲線が正しく正弦波形となるのを確認して、2.0Hzとした。与えた荷重振幅の波形を図-5に示す。荷重振幅は制御

プログラムの制約上、正弦波形で与えており、最初に荷重振幅の半分の荷重が載荷され、その後、図に示した波形で周期的に載荷されることになる。図中の周期の短い部分は荷重と変位のみを計測する通常の載荷周期 (2.0Hz) であり、図中の周期の長い部分はボルト軸力やフランジ板の変形状態を連続的に計測する載荷周期 (0.001Hz) である。

疲労試験では繰り返し荷重に対する耐久性を明らかにするためにボルト軸力およびその変形状態、フランジプレートの変形状態の変化を計測した。ボルト軸力についてはボルト軸平行部に4枚のひずみゲージを貼り、測定したひずみ値から軸力に換算することとした。なお、4枚のひずみゲージは、ひずみゲージの値から高力ボルトの変形状態がわかるように図-6に示すように配置した。また、応力集中ゲージを用いてフランジプレートの変形状態を調べることとし、図-6に示すように応力集中ゲージを配置した。特にフランジプレートとウェブプレートの溶接部近傍での応力と高力ボルトヘッドの近傍での応力集中を測定することを目的として配置している。計測点数の総数は高力ボルトの軸力測定用ひずみゲージで8点、応力集中ゲージで40点の合計48点である。これらのデータはあらかじめ決められた荷重サイクル数の時のみ計測し、1サイクルの荷重の変化によるこれらの値の変化を連続的に計測した。通常は荷重と変位のみを計測した。ひずみゲージの値を計測する場合は、測定点数も多いことから、各計測点の同時性を保つことが重要となる。したがって、計測時の載荷の周期を非常にゆっくりと設定すると共に、サンプリング速度が1000点1秒のデータロガーを用い、高速に計測することとした。設定した計測時の載荷周期は0.001Hzであり、通常の載荷周期の2000分の1である。なお、計測はマイクロコンピュータによるオンライン計測で行った。本試験では、まず、高力ボルトに軸力を導入する必要があるが、これについては軸平行部に貼られたひずみゲージのひずみ値を用いて規定の軸力を高力ボルトに導入した。なお、規定のボルト軸力はM12の標準導入軸力である6.26tonfである。

(4) 高力ボルトの疲労試験結果

著者らが既に行った高力ボルト (M12) の疲労試験結果から得られたS-N線図を図-7に示す。この図より、疲労強度は鋼構造物の疲労設計指針¹³⁾による疲労強度よりも高い値を示し、指針の疲労強度が安全側の強度となっているのがわかる。また、初期の導入軸力を減少させることで疲労寿命が延びてお

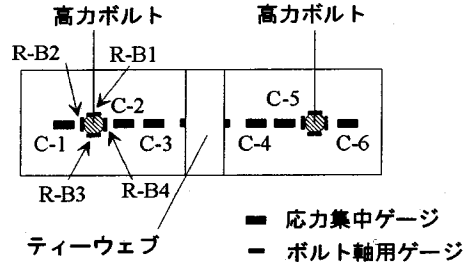


図-6 ゲージ配置図

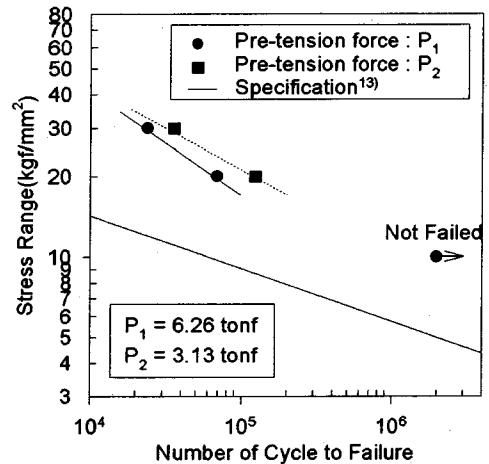


図-7 高力ボルトのS-N線図

表-4 疲労試験結果

供試体	破断サイクル	破壊形式	Pmax/YL
SPT1A	—	破壊せず	0.49
SPT1B	17848	FL	0.98
SPT1C	82000	FL	0.74
SPT2A	139480	BT	0.54
SPT2C	—	破壊せず	0.27

YL: 降伏荷重, Pmax: 最大荷重
FL: フランジ板とウェブとの溶接部の先端破壊
BT: 高力ボルトのネジ部の谷部からの破壊

り、導入軸力が異なると疲労強度が異なることもわかる。このように導入軸力の疲労強度に与える影響は顕著であり、高力ボルトのネジ山の谷部分において高い応力集中が存在することが原因であると考えられる。

3. 疲労実験結果

(1) 疲労破壊状況

疲労試験の結果を表-4に示す。

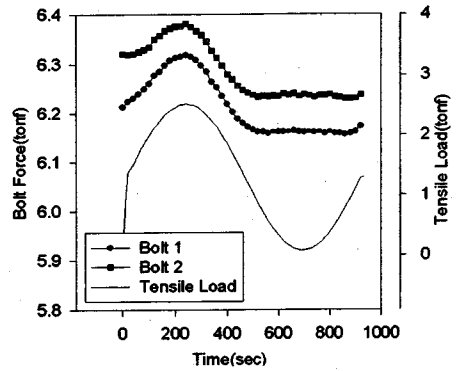
本研究では繰り返し回数 200 万回を基準に、それ以下の繰り返し数で破壊した場合を疲労破壊と定義する。疲労破壊したケースの破壊状況は次のようなものとなった。フランジ板が薄いもの (SPT1B, SPT1C) は、フランジプレートとウェブプレートの溶接部のフランジプレート側の溶接止端から亀裂が生じ破壊した。一方、フランジ板が厚いもの (SPT2A) は、高力ボルトの疲労破壊により高力ボルトが破断し破壊した。その部位はナット近傍のねじ部の谷部分である。このように破壊形式がフランジ板での破壊と高力ボルトでの破壊に大きく2つに分類できるのは静力学的荷重下における場合と同じである。破壊のメカニズムは次のように推測される。静力学的条件下ではフランジ板の曲げ強度と高力ボルトの引張強度との大小関係から破壊形式が決定され、繰り返し荷重条件下における疲労破壊では溶接部の疲労強度と高力ボルトの疲労強度との大小関係から疲労強度が決まっていると考えられる。この溶接部の疲労強度については、特にフランジ板厚の違いによる影響が大きいと思われる。すなわち、フランジ板が厚い場合は、フランジ板の曲げ応力度が低いため、溶接部での疲労破壊は起きなかったと考えられる。一方、フランジ板が薄い場合は、曲げ応力度が高く疲労破壊したと考えられる。

疲労破壊しなかった供試体の高力ボルトを試験後に観察したところ、フランジ板が薄い供試体 (SPT1A) およびフランジ板が厚い供試体 (SPT2C) ともに曲げやねじ部でのくびれといった顕著な変化は見られなかった。これらのケースでは与えた荷重振幅は小さく、そのためボルト軸力はほとんど変動せず、高力ボルトには疲労損傷が蓄積されなかったと思われる。

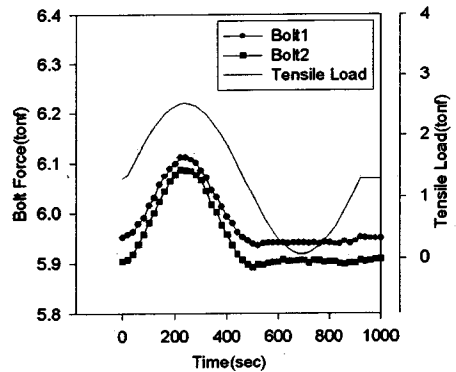
ボルト軸力の振幅が最大と予想される、荷重振幅が最大のケース (SPT2A, 荷重振幅:7.40tonf, フランジ板厚 22mm) に対しても高力ボルトの軸力の振幅は荷重振幅の 20% となっており、ボルト軸力の振幅を外荷重の振幅に対して低く抑えるという初期導入軸力の効果が確認できる。

(2) ボルト軸力の変化

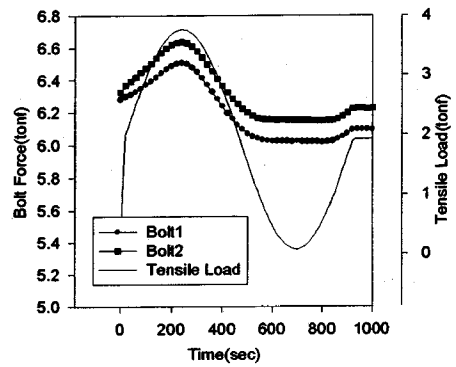
ある荷重サイクルにおけるボルト軸力の時間変化と作用荷重の時間変化を図-8に示す。ボルト軸力は高力ボルトに貼られた4枚のひずみゲージから得られたひずみの平均値にヤング率と軸平行部の面積を乗じて算出した。板厚、荷重振幅に関わらず、ボルト軸力は図-8に示すようなパターンで遷移して



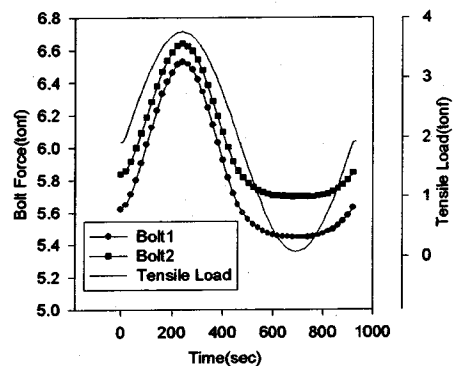
(a)SPT1A (第1サイクル)



(b)SPT1A (第200万サイクル)



(c)SPT1C (第1サイクル)



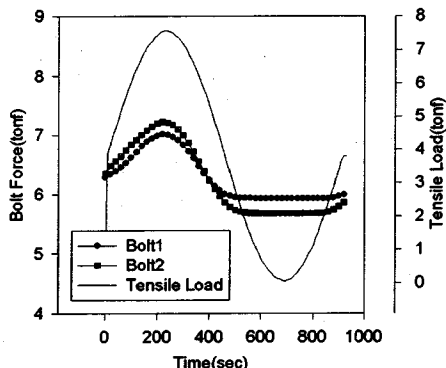
(d)SPT1C (第8万サイクル)

図-8 ボルト軸力の時間変化

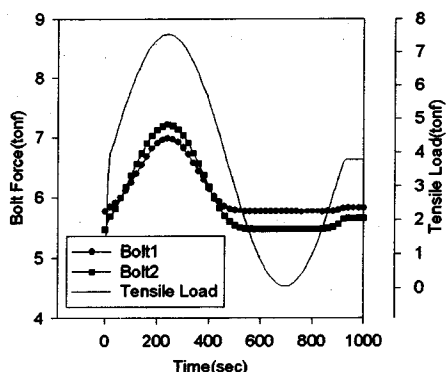
いる。既に示したように荷重振幅を正弦波形で与えていることから、まず、初期荷重（荷重振幅の2分の1の荷重）からの荷重上昇とともにボルト軸力は上昇し、その後、荷重が減少するにつれてボルト軸力も減少する。このボルト軸力の上昇はフランジ板が薄いほど、与えた荷重振幅が大きいほど大きい傾向にある。そして、ある程度ボルト軸力が減少すると荷重が変化してもボルト軸力が変化せず一定となる。これは初期ボルト導入軸力による材間圧縮力の影響である。すなわち、静的引張荷重下における荷重-ボルト軸力曲線のボルト軸力の一定状態の部分に相当し、このボルト軸力の一定値はボルトに導入されているボルト軸力の値そのものを表している。異なる荷重サイクル数におけるボルト軸力の時間変化を比較すると初期の荷重サイクルでの変化とそれ以後の荷重サイクルでの変化とは1サイクルの載荷前と載荷後のボルト軸力の変化の傾向が異なっている。すなわち、初期の荷重サイクルでは1サイクル載荷終了後のボルト軸力が1サイクル載荷開始前よりも下がる傾向にあり、その後の荷重サイクルではそのような傾向は見られず、1サイクル終了後のボルト軸力はほぼ1サイクル開始前と同じボルト軸力を有している。このようなことから、軸力の損失がほぼ初期の段階に起きていていると考えられる。

次に、ボルト軸力の荷重サイクル数に対する変化を図-9に示す。ボルト軸力は図-8と同様にして求めた。この図の横軸はサイクルであり、縦軸はボルト軸力およびボルト軸力の振幅である。軸力振幅は最大ボルト軸力と最小ボルト軸力の差をとった。

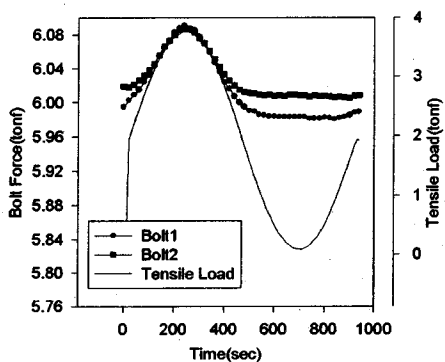
疲労破壊しなかった2つのケース（SPT1AとSPT2C：板厚は異なる）を比較してみると、ボルトの軸力変動はよく似ており、載荷初期の段階（ともに約10万サイクルまで）でかなり軸力が低下し、その後軸力の低下は非常に緩やかになるということがわかる。この場合の初期の軸力の低下量は初期導入軸力に対して最大で約3.0%である。この値は文献14)における初期の軸力損失の結果にほぼ一致しており、荷重振幅による軸力損失ではなく、境界面の弱層の変形に伴う軸力損失であると考えられる。また、与えた荷重振幅とボルト軸力の振幅を比較すると、ボルト軸力の振幅はかなり小さく、荷重振幅に対する割合はフランジ板が薄い場合（SPT1A：荷重振幅2.4tonf）で5~7%程度、フランジ板が厚い場合（SPT2C：荷重振幅3.65tonf）で3%程度となっている。この結果は初期導入軸力の影響によりボルト軸力の振幅が低く抑えられるという静的引張実験結果と整合性がある。特に、フランジ板が厚い場合、ボ



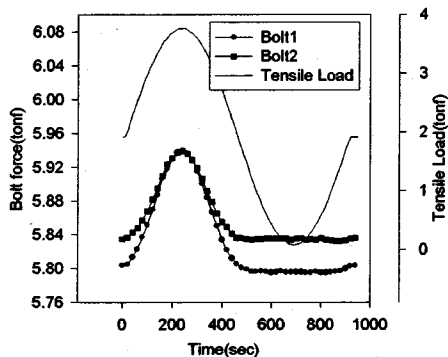
(e)SPT2A (第1サイクル)



(f)SPT2A (第6万サイクル)



(g)SPT2C (第1サイクル)



(h)SPT2C (第200万サイクル)
図-8 ボルト軸力の時間変化

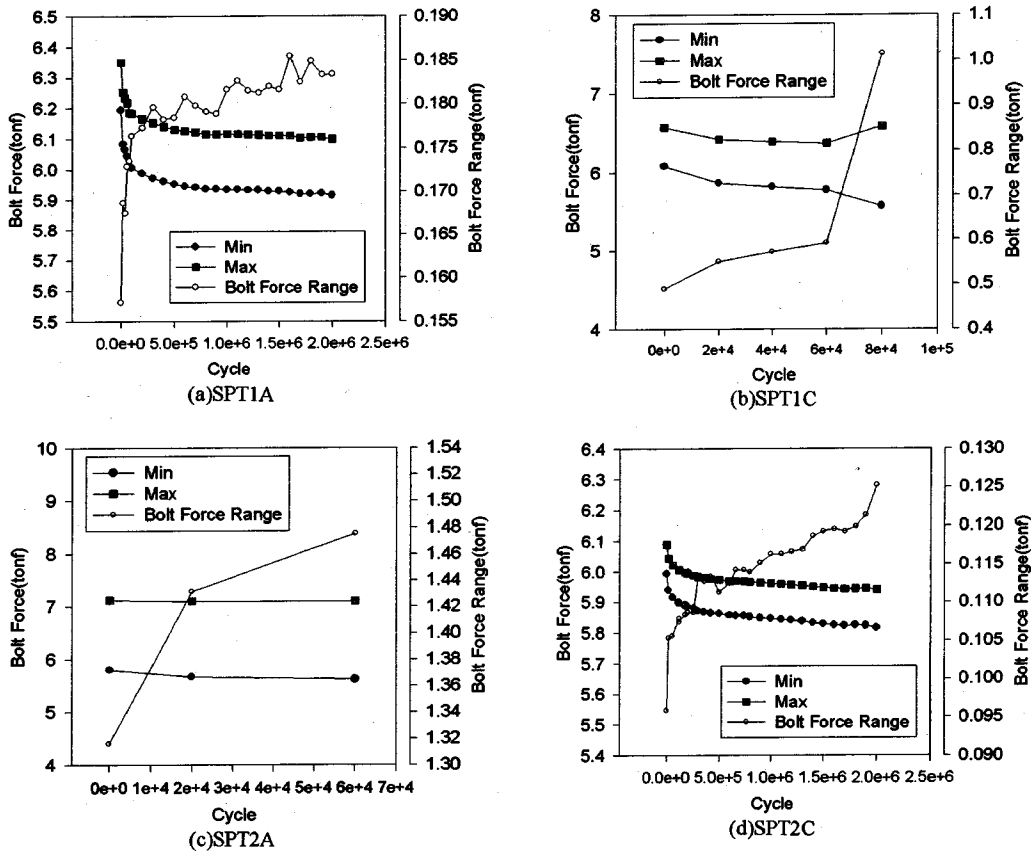


図-9 ボルト軸力の荷重サイクル数に関する変化

ルト軸力の振幅は低く抑えられており、高力ボルトの軸力の振幅を低く抑えるという観点からはフランジ板は厚い方が望ましいと考えられる。フランジ板が薄い場合、フランジ板が厚い場合よりも、この割合が高いのは高力ボルトに曲げが作用し、付加軸力が加わるためと考えられる。

疲労破壊した2つのケース（SPT1CとSPT2A：板厚が異なる）においては、疲労破壊しなかった場合と同様の初期の軸力損失が見られる。しかし、軸力振幅の荷重振幅に対する割合も、フランジ板が厚いもの、薄いものともに約18~20%前後（フランジ板が薄いSPT1C：荷重振幅3.65tonf、フランジ板が厚いSPT2A：荷重振幅7.4tonf）であり、疲労破壊しなかったケースに比べるとかなり高くなっている。特に、破断サイクルに近い荷重サイクルとなるとボルト軸力の振幅が急に大きくなっており、その増加の度合いはフランジ板が薄い方が大きな値となっている。フランジ板が厚い場合、高力ボルトの疲労破壊（クラック）を生じていることから、高力ボルトのねじ部の塑性変形により生じた残留変形の結果、最

小軸力が減少し、軸力振幅が上昇したと考えられる。一方、フランジ板が薄い場合、最大ボルト軸力は上昇し、最小ボルト軸力は減少するという傾向が特に見られる。この最大軸力の上昇は、フランジ板とテーウェブの溶接部分でのクラックの発生が関係しており、クラックの発生により大きな曲げ変形がフランジ板に生じたため、高力ボルトがより引っ張り上げられ、軸力が上昇したと思われる（クラックの発生については図-12(a)も参照）。また、最小軸力の減少はフランジ板が大きく曲げられることにより塑性化が進展し、フランジ板厚が減少するとともにボルトの塑性化により最小軸力が減少したと思われる。

以上のことから、破壊形式は異なるが、ともに疲労破壊の近くでボルト軸力の振幅の増加が見られることから、ボルト軸力振幅の著しい変動が疲労破壊発生の目安になると考えられる。

(3) 高力ボルトの変形状

高力ボルトの軸平行部に貼り付けた4枚のひずみ

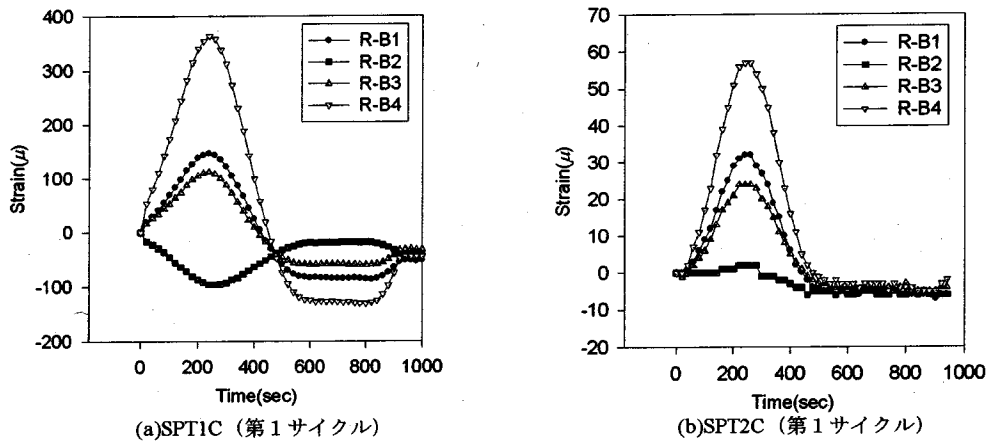


図-10 高力ボルトのひずみの時間変化

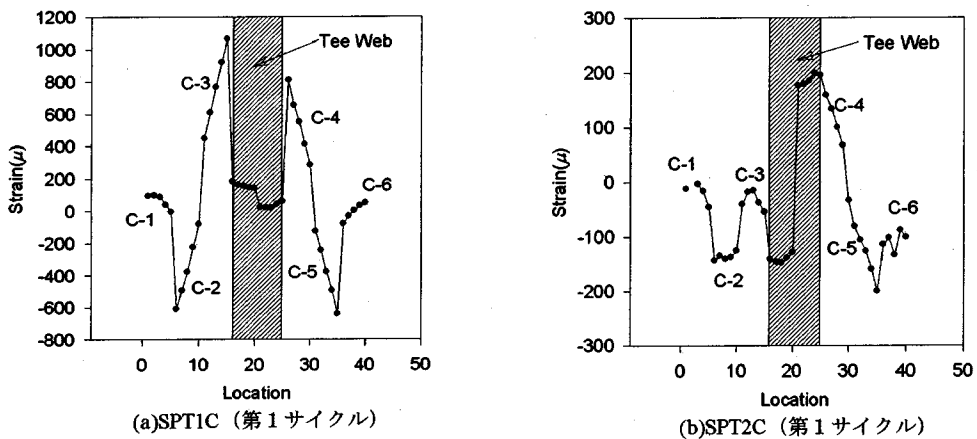


図-11 フランジ板のひずみ分布

ゲージのそれぞれの値の時間変化をフランジ板の薄いものと厚いものを例に図-10に示す。ここでは高力ボルトを締め付け、その後、初期荷重（荷重振幅の2分の1の荷重）まで載荷した後の変形に注目することにし、初期荷重でのひずみの値を実際のひずみの値から引くことにしてこれを縦軸のひずみとした。

同図より、ひずみの時間変化がフランジ板厚によって異なることが認められる。すなわち、フランジ板が薄い場合、ティーウェブ側の軸ひずみ（R-B4）が荷重の増加とともに大きな引張の値を示す一方で、外側のひずみ（R-B2）が圧縮の値を示している。したがって、フランジ板の変形により高力ボルトが引き抜かれるような形となり、ボルトは曲げられている状態にあると考えられる。荷重が増大する領域と減少する領域で引張の値を示す部位が変化しているのは初期荷重（荷重振幅の2分の1）の状態で既にいくらかの曲げが入っているためと思われる。

一方、フランジ板が厚い場合は、薄い場合と異なり、ティーウェブ側のひずみ（R-B4）も外側のひずみ（R-B2）も同じように引張の値を示している。したがって、フランジ板が薄い場合のようにボルトに大きな曲げが加わったとは考えられない。しかし、2つの値には差異も見られ、一様に引っ張られたのではなく、多少の曲げが加わっていると考えられる。

一般にフランジ板が薄い場合、てこ反力により、ボルト軸力は増加すると考えられているが、本研究で取り上げたようなフランジ板厚の場合、むしろ、ボルトヘッド部分をフランジプレートが持ち上げるような形で変形し、ボルトに引張曲げが作用しボルト軸力が上昇していると考えられる。

(4) フランジプレートの変形性状および最大発生応力

フランジプレートに貼り付けた応力集中ゲージから得られたある荷重サイクルにおけるひずみ分布を

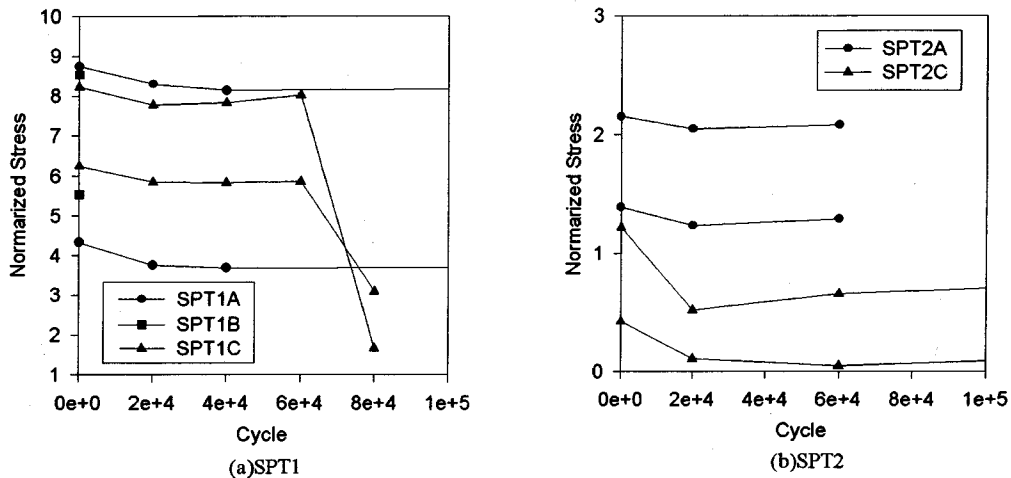


図-1 2 溶接近傍部での発生応力の変化

フランジ板の薄いものと厚いものを SPT1C, SPT2C を例として図-1 1 に示す。図中の横軸は測定点番号を示しており、対応するゲージ位置を図中に示した(図-6 参照)。測定点番号は左から右へ順に 1 番から 40 番までであり、一つの応力集中ゲージに 5 点の測定点が存在する。斜線部分のひずみはティーウェブ上のひずみを表している。

フランジ板が厚い場合、フランジ板のひずみの大きさやその分布形状は荷重サイクル数の増大に関わらず、ほとんど変化せず、その値も小さい。例えば、高力ボルトで疲労破壊した荷重振幅の最も大きい SPT2A では、フランジ板に発生したひずみは最大で 500μ 程度であり、フランジ板の降伏ひずみが約 1400μ であることからフランジ板は弾性的挙動をしていることがわかる。また、ひずみ分布の形状からフランジ板が高力ボルト周辺部で沈み込むように変形していると考えられる。

一方、フランジ板が薄い場合、疲労破壊しなかった SPT1A についてはフランジ板でのひずみの最大値が 800μ 程度、疲労破壊した SPT1B, SPT1C については 1200μ 程度と高く、局部的に降伏している可能性がある。これはフランジ板が厚い場合に比べて大きな値を示しており、フランジ板の変形が顕著であることが確認できる。この最大値はウェブ近傍部で発生しており、溶接近傍部における高い応力集中も影響していると考えられる。また、フランジ板が厚い場合と同様にひずみ分布の形状から高力ボルト周辺部がボルト導入軸力の影響により沈み込んでいる状態にあることもわかる。疲労破壊しなかった SPT1A では荷重サイクル数が増えるにも関わらず、ほとんどひずみの大きさや分布の形状も変化せず、

フランジ板は弾性的挙動をしていたと考えられる。一方、疲労破壊した SPT1B, SPT1C では、荷重サイクル数の増加とともにひずみの値も大きくなり、分布形状も変化しており、残留ひずみも認められ、塑性化が進展していったと考えられる。

フランジ板とティーウェブの溶接部分に最も近い場所(溶接近傍部から 10mm)での応力の変化を図-1 2 に示す。なお、縦軸の応力は次のように無次元化した。まず、引張荷重をティーウェブの断面積で除し、これを基準応力とする。さらに、応力集中ゲージから得られたひずみの値に材料試験から得られたヤング率を乗じ、発生応力とする。そして、この発生応力を既に求めた基準応力で除し、これを無次元化応力とした。フランジ板が 10mm の場合、無次元化応力は $4\sim 9$ の範囲に、フランジ板が 22mm の場合、無次元化応力は $1\sim 2$ の範囲にあり、フランジ板の薄い方が載荷した荷重に対して高い応力が発生している。これにはフランジ板厚の違いによる発生応力の差やティーウェブ板厚とフランジ板厚の相対的な大きさが関係していると考えられ、フランジ板が薄く、相対的にもティーウェブ厚に比べフランジ板厚が小さい場合、発生応力が高いと考えられる。さらに、フランジ板とティーウェブの溶接部で疲労破壊したケースである SPT1C では 60000 サイクルと 80000 サイクルの間で無次元化応力が急激に減少しており、この 2 つのサイクルの間で、ティーウェブとフランジ板の溶接止端部にクラックが発生したと思われる。なお、フランジ板厚に関わらず、無次元化応力がティーウェブの左右で異なっていることから、供試体を偏心して引っ張っていると考えられ、純引張での荷重を行うことが困難であるということがわ

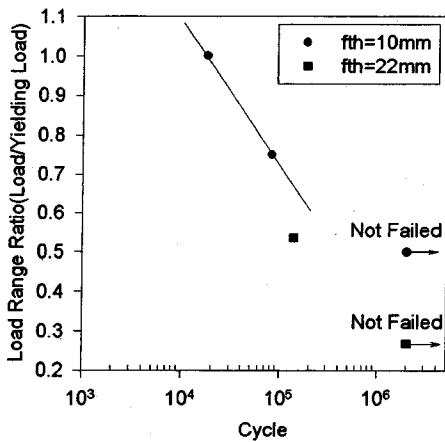


図-13 無次元化 S-N 線図

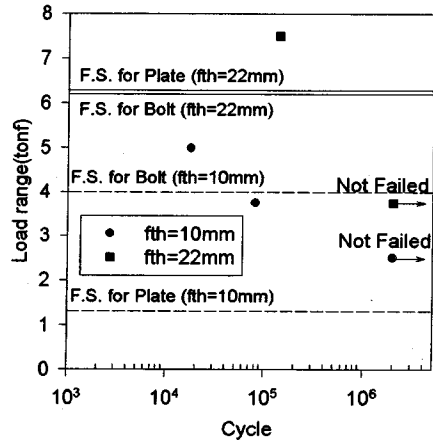


図-14 S-N 線図

かる。

(5) 疲労強度

まず、単調引張荷重下でのスプリットティー継手供試体の降伏荷重で無次元化した荷重振幅を縦軸にとった S-N 線図を図-13 に示す。なお、降伏荷重は荷重-離間量曲線(図-2)の弾性域での直線と塑性域での直線を最小 2 乗法により求め、これらの直線の交点とした。同図より降伏荷重で無次元化した場合、フランジ板が薄いものの方が疲労強度が高いことがわかる。ただし、継手全体の降伏荷重を支配しているものが、フランジ板が厚いものは高力ボルト、フランジ板が薄いものはフランジ板であり、板厚によって異なり降伏荷重の値そのものがかなり異なっている。一般に継手部の設計では継手部の有する降伏荷重が必要であり、これを基準に設計することから降伏荷重で無次元化している。

次に縦軸に作用荷重の値をとった S-N 線図を図-14 に示す。なお、図中には高力ボルトの 200 万回推定疲労強度とフランジプレートとウェブプレートの溶接部分の 200 万回推定疲労強度をそれぞれの板厚について記入した。図中の F.S. は推定疲労強度を表す。なお、この両者の推定疲労強度のうちで低い方の値を継手の推定疲労強度とする。それぞれの推定疲労強度の求め方について簡単に述べる。まず、高力ボルトの推定疲労強度であるが、文献 13) を参照し高力ボルトの疲労強度を強度等級 K4 とし、 6.6kgf/mm^2 とした。そして高力ボルト M12 の有効断面積を乗じ、荷重振幅として 557kgf を決定した。次に単調引張実験結果の荷重-ボルト軸力曲線(図-3)をもとに 557kgf の軸力増分を与える荷重の増分値をグラフより読みとりそれを推定疲労強度とした。

決定した推定疲労強度はフランジ板厚が 10mm の場合、 4.1tonf 、フランジ板厚が 22mm の場合、 6.2tonf である。次に、フランジプレートとウェブプレートの溶接部分の推定疲労強度は、文献 13) の横突合せ溶接継手の疲労強度を参照した。まず、止端仕上げをした継手、強度等級 C、 12.8kgf/mm^2 を疲労強度として設定した。次にスプリットティー継手を両端固定梁の中央に分布荷重が載荷されるようなモデルに置き換え、分布荷重が載荷される端での発生応力が決定した疲労強度になるような載荷荷重を計算し、これを 200 万回推定疲労強度を与える荷重とした。このモデルについては計算される発生ひずみがフランジ板上に貼り付けた応力集中ゲージのひずみ値とほぼ一致していることから(板厚 10mm の場合で実験値 567.5μ 、計算値 619.8μ 、板厚 22mm の場合で実験値 460.5μ 、計算値 383.2μ)、ひずみの算定に関しては問題はないと考えられる。フランジ板厚 10mm の推定疲労強度は 1.30tonf 、フランジ板厚 22mm の推定疲労強度は 6.25tonf である。

図-14 より、絶対荷重振幅に対してはフランジ板が厚い場合、フランジ板が薄い場合に比べて疲労強度が高くなっている。また、フランジ板が薄い場合、継手の推定疲労強度は実験結果のそれよりも小さく、安全側の疲労強度が与えられている。さらに、疲労破壊形式の推定についても継手の推定疲労強度がフランジ板のそれによって決まっていることから実験結果と一致しており、正しい推定が行える。一方、フランジ板が厚い場合は、ボルトで実際に破壊していることから、ボルトの疲労強度については正しく推定している。疲労破壊形式の推定に関しては、フランジ板の推定疲労強度が高力ボルトの推定疲労強度より若干高く評価され、疲労破壊がボルトによって

起こると予想される。しかし、推定疲労強度の大きさはほぼ同じであり問題が残る。したがって、フランジ板が厚い場合に対してもさらに精度を上げるために、用いた強度等級、発生応力照査モデルについてさらに検討する必要がある。

このようにスプリットティー継手の疲労強度ではフランジ板厚が重要なパラメータとなっていることがわかる。フランジ板厚が異なれば、継手の荷重-変形関係が異なりフランジ板とボルトの荷重分担が異なる。したがって、継手の疲労強度も異なる。本研究におけるフランジ板が厚い場合でも、その疲労強度は約 6.5tonf 程度であることから、初期導入軸力にボルト本数を乗じた値まで荷重を載荷すること、すなわち高力ボルトの性能を十分に活かすことは疲労強度の面から不可能であると思われる。これを可能にするには、かなり厚いフランジ板を用いるか、長いボルトを用いる長締め形式とする必要があると思われる。

以上の結果より、疲労強度の面からは作用荷重が大きい場合はフランジプレートを厚くしたスプリットティー継手とし、作用荷重が比較的小さい場合はフランジ板を薄くしたスプリットティー継手とすることで降伏荷重に対して効率的な継手にすることが可能であると考えられる。また、フランジ板厚をコントロールすることでスプリットティー継手の疲労強度のコントロールが可能であると考えられ、繰り返し荷重が作用する環境においてスプリットティー継手を合理的に設計可能であると考えられる。

4. 結論

本研究では、スプリットティーフランジ継手の疲労試験を行い、その繰り返し荷重下での力学的挙動と疲労強度について検討した。得られた結論を以下に述べる。

- 1) フランジ板厚の大小により疲労破壊形式が異なり、フランジ板が厚い場合は高力ボルトで、フランジ板が薄い場合はティーウェブとティーフランジの溶接部の止端で疲労破壊した。
- 2) 繰り返し荷重下におけるボルト軸力の変動は荷重振幅に比べて低く抑えられており、ボルト導入軸力の効果が確認できる。
- 3) 破壊形式が異なる場合においても、ボルト軸力振幅の上昇が疲労破壊前に見られる。したがって、スプリットティー継手の疲労破壊の目安になると考えられる。
- 4) フランジ板が薄い場合はフランジ板が曲げられ

るとともにボルトにも引張曲げが作用している。一方、フランジ板が厚い場合はフランジ板はそれほど変形せず、ボルトにも曲げはほとんど作用しない。このフランジ板が薄い場合にボルトに引張曲げが作用することは、てこ反力発生以外のボルト軸力の増加の一因と考えられ、むしろ支配的と思われる。

- 5) スプリットティー継手の疲労強度は継手の降伏荷重で無次元化した場合、フランジ板が薄い場合の方が高く、継手の降伏荷重を基準にすればフランジ板が薄い方が優れている。また、疲労強度の推定にあたっては静的荷重下での力学的挙動が十分参考になる。
- 6) 今後はさらにフランジ板厚だけではなくフランジ板幅、ボルト軸心とティーウェブ中心間の距離などをパラメータとして実験データの蓄積を行い、疲労強度に対して詳細な検討を加えるつもりである。

謝辞：本研究の疲労試験を行うに当たり、供試体の設計、製作において（株）コベルコ科研には多大なお世話をいただいた。ここに感謝の意を表したいと思います。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高力ボルト引張接合設計施工指針，丸善，1993.3.
- 2) 関西道路研究会，道路橋調査研究委員会：接合小委員会報告書，鋼橋の接合に関する調査研究，pp.85-182，1989.3.
- 3) 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，第 416 号/I-13，pp.365-374，1990.4.
- 4) 黒田充紀，増田陳紀，利守尚久：スプリット・ティー接合の力学的挙動に及ぼす溶接角変形の影響，土木学会論文集，第 441 号/I-18，pp.127-136，1992.1.
- 5) 渡邊崇志，黒田充紀，西脇威夫，横尾真治：T 接合の設計式の特性とその改良，土木学会第 47 回年次学術講演会概要集第 1 部門，pp.934-935，1992.9.
- 6) (社)日本鋼構造協会：橋梁用引張接合設計指針(案)，1993.2.
- 7) 大橋治一，谷中幸和，水川洋介，梅田聡：引張接合を用いた吊橋主塔の力学特性に関する研究，構造工学論文集 Vol41A，pp.991-1001，1995.3.
- 8) 渡邊英一，杉浦邦征，山口隆司，葛西俊一郎：高力ボ

- ルトフランジ継手部の剛性に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集第1巻, pp.31-38, 1993.7.
- 9) 渡邊英一, 山口隆司, 杉浦邦征, 葛西俊一郎: 高力ボルト引張継手におけるボルト周辺部の離間現象と引張剛性, 構造工学論文集 Vol.40A, pp.153-162, 1994.3.
- 10) スプリットティー継手の接触・離間挙動と引張剛性, 鋼構造年次論文報告集第2巻, pp.93-100, 1994.11.
- 11) E. Watanabe, K. Sugiura, T. Utsunomiya, T. Yamaguchi, T. Mitamura, S. Kasai and K. Sugii: Fatigue Strength of High Strength Bolted Tensile Joints, *EASEC5*, 1995.7 (in Print).
- 12) 三木由充, 堀川浩甫: スプリットティー形式の高力ボルト引張接合における疲労特性に関する研究, 第46回土木学会年次学術講演会概要集第1部門, pp.606-607, 1991.9.
- 13) (社) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂, 1993.4.
- 14) A. Ahmad, E. Watanabe, K. Sugiura and K. Hatanaka: Tension Loss in High Strength Bolts, *Journal of Structural Engineering*, Vol.41A, pp.87-94, 1995.3.

(1995. 8. 1 受付)

FATIGUE BEHAVIOR ON SPLIT TEE FLANGE JOINTS

Eiichi WATANABE, Takashi YAMAGUCHI, Kunitomo SUGIURA
and Shun-ichiro KASAI

Although high strength bolted tensile joints could have much advantage over the originated bolted connections from the view point of its mechanical behavior, structural simplicity and easiness of erection, tensile joints have not been commonly used for primary members of bridge structures because of the lack of rational design procedure for such joints. In order to apply tensile joints for bridge structures, it is necessary to establish the rational design procedure based on the strength not only under static loading but also under cyclic loading. In this study, split tee flange joint which is a typical high strength bolted tensile joint, cyclic loading test is carried out varying the thickness of the flange plate. Based on experimental results, the mechanical behavior under cyclic loading and the fatigue strength of tensile joints are assessed. As a result, it is confirmed that split tee flange joints are rationally designed considering static and cyclic loading.