

スプリットティー継手の平面 2 次元解析における一検討

The Assessment of 2-dimensional Analysis on Split Tee Flange Joints

渡邊英一*, 山口隆司**, 杉浦邦征***

Eiichi Watanabe, Takashi Yamaguchi, Kunitomo Sugiura

* Ph. D., 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

** 工修 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

*** Ph. D. 京都大学助教授 工学部土木工学科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

The high strength bolted flange joint may be thought to be very promising due to superiority in mechanical property and workability. However, this type of joint has been rarely used for bridge structures because of immature reliable design procedure. The objective of this study is to establish the 2-dimensional finite element analysis method, which is better suited for the parametric study rather than 3-dimensional finite element analysis that required high computing performance and large amount of memory area. In this paper, proposed is the 2-dimensional finite element analysis method using effective element thickness for high strength bolt and flange plate for split tee flange joints. It is demonstrated that the proposed method can predict the load-deformation curve, the 3-dimensional deformation and stress distribution.

Keywords : Split tee flange joint, Parametric analysis, 2-dimensional plane strain analysis, effective element thickness

1. はじめに

高力ボルト引張継手は、接合部の剛性が高く、ボルト軸力の変動が小さいなどの優れた力学的特性を有するとともに、施工性にも優れている。このように、この継手形式の実用性は非常に高いと思われるが、実際の橋梁構造物には積極的に適用されるには至っていないのが現状である。これは基礎的データの不足や信頼ある合理的な設計法が存在せず、道路橋示方書¹⁾に明示されていないためと思われる。このような状況下、日本鋼構造協会・橋梁用高力ボルト引張接合設計標準作成小委員会(委員長:西脇威夫武蔵工業大学教授)は、建築分野での研究成果^{2)~10)}を踏まえ、橋梁用の設計法確立に向けて、新たな研究成果^{11)~14)}も盛り込み橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)¹⁵⁾を策定した。しかし、同指針(案)において述べられているように、設計式の適用範囲の明確化、継手部剛性を考慮した設計法の確立など幾つかの課題も残されており、さらなる検討が必要である。

合理的な設計法を確立するためには多くの基礎的データを必要とし、各種のパラメータ(フランジ板厚、フランジ板幅、高力ボルト位置など)を変化させた実験もしくは解析が必要となる。実験では予算的・時間的制約を受けることから広範囲なパラメトリックなケースの検討には向かない。したがって、数値解析を行う必要がある

が、3次元問題として解析を行う場合、力学的挙動を正確に把握することが可能である反面、計算機に多大な記憶容量と高い演算能力および多くの計算時間を課すこととなり、実験と同様にパラメトリックなケースの検討には向かない。このようなことから、容易に多くのケースに対して解析が行える二次元解析を基本として実際の三次元挙動を表すことは非常に重要であり、これにより広範囲なパラメトリックケースに対しての検討が容易に可能となる。

したがって、本研究では、高力ボルト引張継手の最も基本的な構造であるスプリットティー継手を対象として、3次元の弾塑性有限要素解析を行い、これらの結果をもとに、荷重-変形関係、変形性状、応力状態を再現できるように2次元解析に有効幅係数を導入し、その妥当性について検討を加え、2次元有限要素解析手法の確立を目指すものである。

2. 3次元解析モデルおよび解析手法

本研究で検討する2次元解析の基本データとなる3次元弾塑性有限要素解析についてまず述べる。

本研究で用いた有限要素法は一定ひずみ要素(四面体要素)を用いた増分形の弾塑性有限要素法であり、2次元弾塑性有限要素解析プログラムであるEPIC4⁴⁾の基本

フローをコアとし、3次元解析用に拡張した。

本研究で対象とする高力ボルト引張継手の最も基本的な構造であるスプリットティー継手のモデルを図-1に示す。解析対象としては図-1に示すように構造上の対称性を考慮して実構造の8分の1の領域を解析モデルとした。2枚のフランジ板が接触している面については接触・離間を考慮する境界とした。接触面では水平面内の移動は自由とし、2枚のフランジ板の間でのすべりは生じない

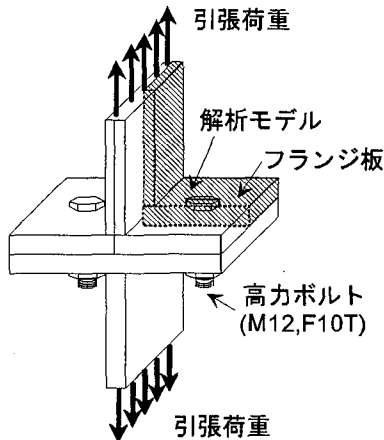


図-1 スプリットティー継手モデル

ものとした。高力ボルトの頭部とフランジ板が接触する部分については両者が離間することがないものと仮定し、材料定数を変化させることで両者を区別することとした。また、ワッシャーについては継手部の全体挙動に与える影響は少ないと考えられることから無視することにした。用いた材料定数を表-1に示す。高力ボルト、フランジ板ともに完全弾塑性体を仮定した。

表-1 材料定数

材料定数	降伏応力 (kgf/mm ²)	ヤング率 (kgf/mm ²)
高力ボルト	90.0	21000
フランジ板	26.9	21000

表-2 解析ケース

解析ケース	STF1	STF2	STF3	STF4	STF5	STF6	STF7	STF8	STF9
フランジ板厚	10	10	10	10	12	12	13	13	15
フランジ板幅	56.7	63	78.75	94.5	63	94.5	63	94.5	63
解析ケース	STF10	STF11	STF12	STF13	STF14	STF15	単位 mm		
フランジ板厚	15	15	22	22	22	22			
フランジ板幅	78.75	94.5	56.7	63	78.75	94.5			

解析ケースとしてはフランジ板厚、フランジ板幅のみを変化させた15ケースを設定した。フランジ板幅については63mmを基本とし、その0.9倍、1.25倍、1.5倍の4通りを、フランジ板厚については10mm、15mm、22mmの3通りを設定した。高力ボルトにはすべてのケースに対し、M12(F10T)を用いることとし、M12(F10T)の標準ボルト軸力である6.53tonfを初期ボルト導入軸力として導入することとした。各ケースのフランジ板厚、フランジ板幅を表-2、および図-2に示す。図-2には現行の設計法（文献10）、15）で規定されているフランジ最小板厚、フランジ最小板幅も図示した。ただし、文献15）ではフランジ最小板幅の規定がM12に対しては存在しないことから、フランジ最小板厚のみを図示した。この図より、フランジ板の薄いものから厚いものまで、フランジ板の幅の広いものから狭いものまでを対象としていることがわかる。

要素分割においてはモデルをまず6面体分割し、それぞれの6面体をさらに24個の4面体分割する方法を採った。要素分割を解析ケースSTF2を例に図-3に示す。

なお、この図においては6面体による分割のみを示し、四面体による分割は省略した。最大規模の解析ケースで

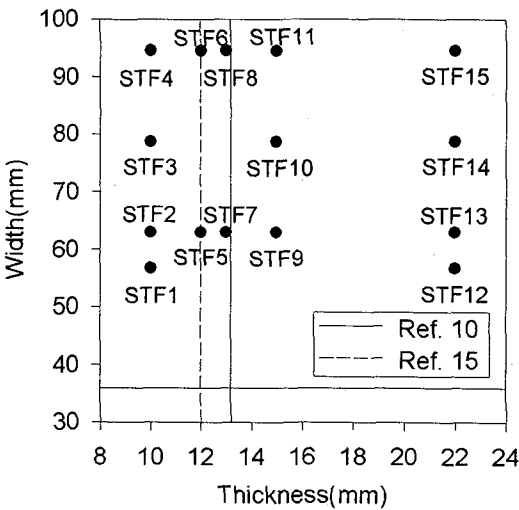


図-2 解析ケースの一覧

ある解析ケースSTF15で節点総数4531(総自由度13593)、要素総数18240である。

本研究で対象とする継手構造では載荷荷重の増大に伴い、2枚のフランジ板の間で離間を生じることになる。本解析では既に著者らが行った高力ボルト周辺部の解析¹⁷⁾と同様な方法で節点力もしくは節点変位により接触状態から離間状態への移行および離間状態から接触状態への移行の判定を行い、荷重の増大に伴い、境界条件を変化させ解析を進めることにした。本解析で用いた有限要素法は増分法によるもので要素1個を降伏させるのに必要な荷重増分と節点1個の境界条件の変更に必要な荷重増分を比較し、小さい方の増分を荷重増分として載荷する。解析手順は高力ボルトにあらかじめ初期ボルト導入軸力としてM12(F10T)の標準ボルト軸力である6.23tonfを導入し、ボルト下端部を固定した後、引張荷重を載荷するという手順で解析した。

STF2, STF13の3次元解析の結果を荷重-離間量曲線、荷重-ボルト軸力曲線ともに図-4に示す。なお、図中には著者等がすでに行ったスプリットティー継手の載荷実験結果¹⁸⁾も示した。荷重-離間量曲線の横軸はティーウェブ直下でのフランジ板の間の開口変位であり、縦軸は載荷荷重である。また、ボルト軸力-荷重曲線の横軸は高力ボルト1本のボルト軸力であり、縦軸はボルト軸力との比較のため載荷荷重の2分の1を荷重としている。これによるとフランジ板が薄いSTF2は解析結果と載荷実験結果が良く一致していることがわかる。また、フランジ板が厚いSTF13においても最大強度付近までは比較的良好に一致していることがわかる。最大強度以降の挙動の相違は3次元解析における高力ボルトの材料定数を完全弾塑性とした材料定数の設定に問題があるためと思われる。フランジ板が比較の厚い場合、高力ボルトの挙動が支配的となり、高力ボルトの材料定数が解析結果に大き

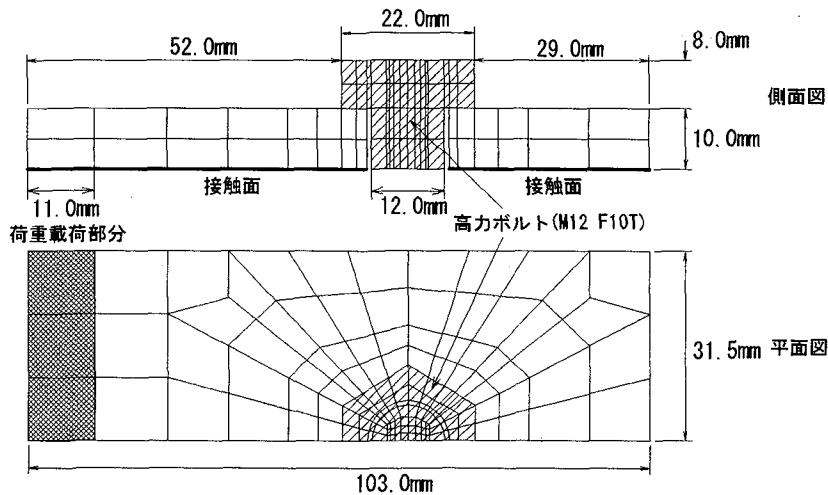
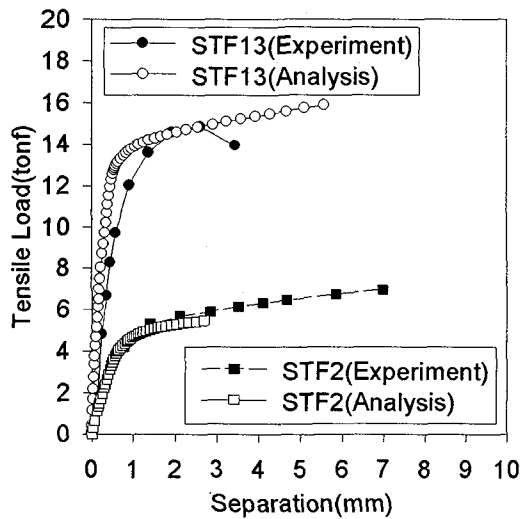
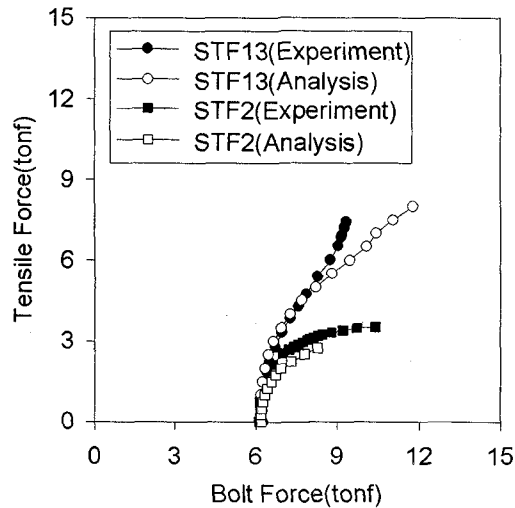


図-3 解析モデルの概要と要素分割(STF2)



(a) 荷重-離間量曲線



(b) 荷重-ボルト軸力曲線

図-4 3次元解析結果

な影響を与える。高力ボルトのような高張力鋼の場合、完全弾塑性と仮定して最大荷重以降も解析することには無理があると思われる。しかし、最大強度付近まではフランジ板が厚い場合も、薄い場合も比較的良好に一致していることから、本解析で用いた解析モデルおよび解析手法は妥当であると考えられる。

3. 2次元解析モデルおよび2次元解析手法

2次元解析においては、平面ひずみ問題として解析し、3次元解析と同じように一定ひずみ要素を用いた増分形の有限要素法を用いることにした。なお、3次元解析と同様にEPIC4⁴⁾を基本とし、文献12)も参考とした。詳細な解析手順は文献17)を参考にさせていただきたい。2枚のフランジ板の間の境界条件、フランジ板とボルトの間の境界条件、材料定数などは3次元解析で用いたものと同じものを用いることにし、荷重増加に伴う境界条件の変更の方法、さらには解析手順も同じとした。したがって、3次元解析と2次元解析においての差異は、基本的には次元の違いのみである。

2次元解析に用いたモデルを図-5に示す。このモデルは3次元モデルをフランジ板の中心線において板厚方向に切断したものに对应しており、対応する面における分割の様子は同じである。ただし、図中の高力ボルト部分においては実際の構造では奥行き方向にフランジ板の部分が存在することから、高力ボルトの要素と重なることになるが、フランジ板の要素も導入した。最大規模の解析ケースで節点総数328(総自由度数656)、要素総数576である。3次元解析と比較して節点数が約1/14(総自由度数が約1/21)に、要素数が約1/32にそれぞれ減少しており、解析において確保すべき配列が大幅に減少しており、2次元解析の有利さがうかがえる。

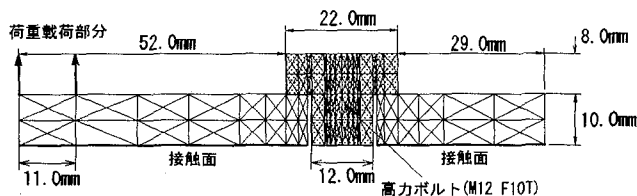


図-5 2次元解析モデル(板厚10mmの場合)

本研究で対象とするような板幅方向(奥行き方向)に一樣でない構造に対して2次元平面ひずみ解析を行う場合、重要となるのは要素の厚さであり、これをどのように設定するかが問題となる。すなわち、単純にフランジ板の幅、高力ボルトの径を要素の厚さとしても意味のある解析結果は得られない。したがって、本解析の場合、フランジ板の要素、高力ボルトの要素、それぞれに対して有効幅係数を導入し、2次元解析に用いるべき要素の

厚さを次のように定義した。

$$w_f = k_f \cdot w_{f0}$$

$$w_b = k_b \cdot w_{b0}$$

ただし、 w_f は有効フランジ板幅、 w_{f0} はフランジ板幅、 w_b は有効ボルト幅、 w_{b0} はボルト幅、 k_f はフランジ有効幅係数、 k_b はボルト有効幅係数である。

したがって、本研究では2次元解析で3次元挙動が正しく推測できるようにこの有効幅係数 k_f 、 k_b を検討することになる。

4. 結果と考察

フランジ有効幅係数およびボルト有効幅係数の決定は既に表-2で示したすべての解析ケースに対し、3次元解析結果の荷重-離間量曲線をまず正しく再現できるという観点から決定することにした。有効幅係数の評価に当たっては、得られる荷重-離間量曲線が離散点の集まりとしての曲線であり、何らかの数値指標を用いた評価は困難であることから、目視により曲線の差異を評価する方法を採った。

4.1 フランジ有効幅係数について

フランジ板厚(10mm, 22mm)、フランジ板幅(63mm, 94.5mm)の異なる典型的な4ケースに対してフランジ有効幅係数を変化させた場合の結果を図-6に示す。なお、離間量は、ティーウェブ直下でのフランジ板間の開口変位である。フランジ板が薄い場合は、有効幅係数の影響を受け、有効幅係数を大きくすると強度が大きくなる傾向にある。一方、フランジ板が厚い場合は有効幅係数の影響をほとんど受けず、有効幅係数の違いによる荷重-離間量曲線の差異はフランジ板が薄い場合ほど見られない。このような傾向はスプリットティー継手の破壊形式の違いによるものと思われる。すなわち、フランジ板が薄い場合はフランジ板の挙動が支配的となり、フランジ有効幅係数の影響を強く受ける。一方、フランジ板が厚い場合は高力ボルトの挙動が支配的となり、フランジ有効幅係数の影響をあまり受けない。しかし、全く影響を受けないというわけではなく、係数の違いによる若干の差異も認められる。したがって、フランジ板が継手全体の挙動に与える影響は非常に大きいと言える。

4.2 ボルト有効幅係数

フランジ板厚(10mm, 22mm)、フランジ板幅(63.5mm, 94.5mm)の異なる典型的な4ケースに対してボルト有効幅係数を変化させた場合の結果を図-7に示す。なお、離間量は、ティーウェブ直下でのフランジ板間の開口変位である。フランジ板が薄い場合は高力ボルトの有効幅係数を変化させても荷重-離間量曲線の形状にそれほど大きな差は見られず、特に板幅が狭いもののほどその傾向が

顕著であることがわかる。一方、フランジ板が厚い場合は高力ボルトの有効幅係数の影響を非常に強く受け、高力ボルトの有効幅係数が大きいほど強度が高くなる傾向にある。このような板厚によって異なる影響を示すのは前節で述べた継手の破壊形式の違いによるものと考えられる。すなわち、フランジ板が薄い場合、フランジ板の挙動が支配的となるため、高力ボルトの有効幅係数の影響をほとんど受けない。一方、フランジ板が厚い場合は、高力ボルトの挙動が支配的となり、高力ボルトの有効幅係数の影響を大きく受けると考えられる。

4.3 フランジ有効幅係数とボルト有効幅係数の決定

以上の傾向を踏まえ、表-2の解析ケースすべてに適用可能なフランジ有効幅係数およびボルト有効幅係数を決定することを試みた。既に前節で用いた典型的な4ケー

スにおいては、図-6、図-7よりフランジ有効幅係数、ボルト有効幅係数がそれぞれ0.90、0.65の場合、荷重－離間量曲線をかかなりの精度で再現できることがわかる。次にこれらの係数を用いた場合の2次元解析結果の変形モード（STF2、STF13）を図-8に示す。なお、変形量については実際の変形量を20倍している。また、比較のために同じ荷重段階における3次元解析による結果も図示した。これによるとフランジ板が薄いSTF2の場合、高力ボルトはほとんど変形しておらず、高力ボルト位置でフランジ板が大きく変形していることがわかる。また、フランジ板端部においてはフランジ板はほとんど変形していないこともわかる。一方、フランジ板が厚いSTF13の場合はフランジ板はあまり曲げ変形を受けず、フランジ板端部を支点として回転するような形で変形している。

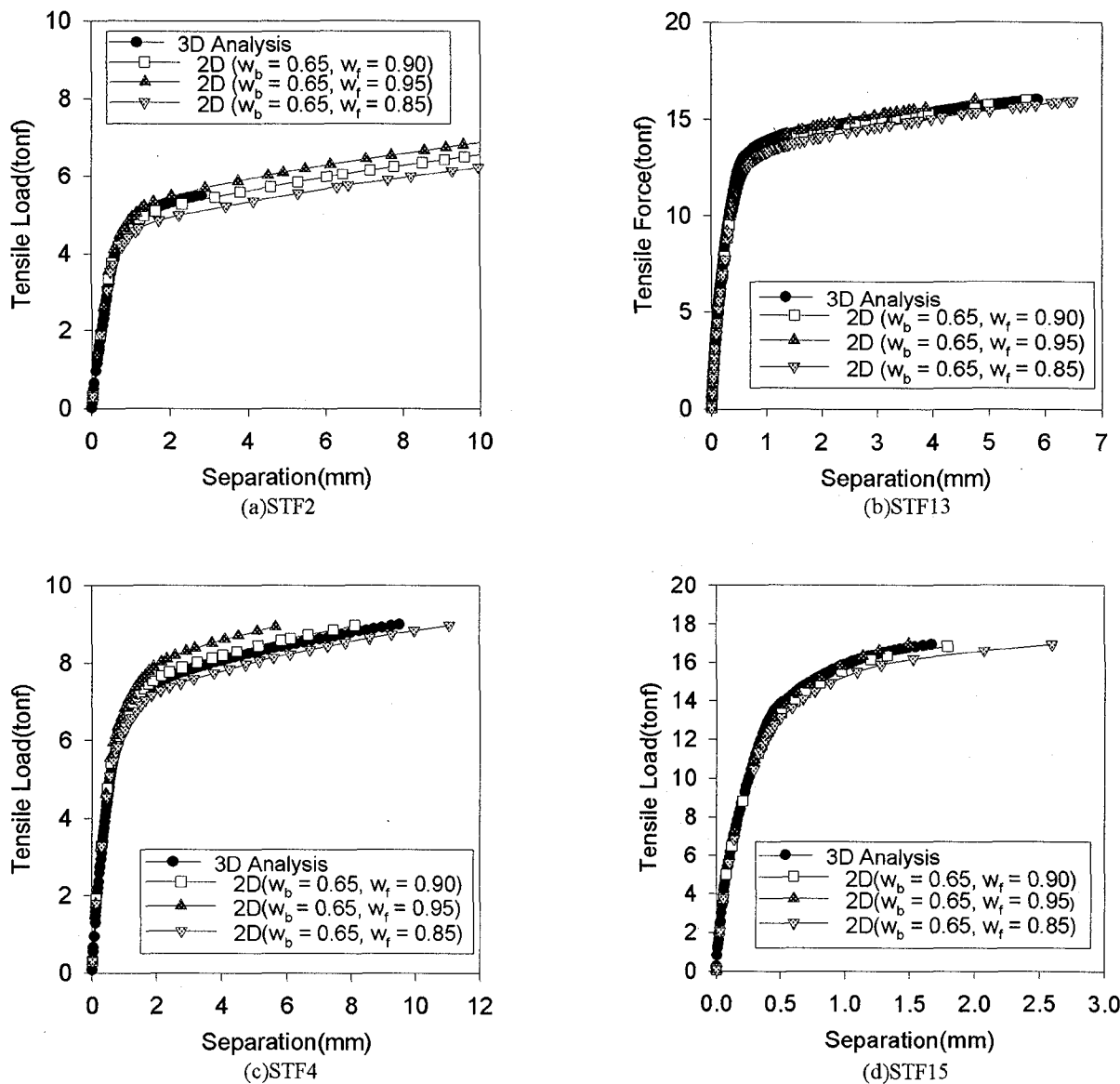


図-6 フランジ有効幅係数の変化

また、高力ボルトがボルト軸部で大きく変形していることもわかる。これは3次元解析結果および載荷実験結果から得られた板厚の違いによる変形モードの違いの結果

と一致しており、2次元解析におけるこのような有効幅係数の設定に問題がないことがわかる。

これらの有効幅係数（フランジ有効幅係数：0.90，ボ

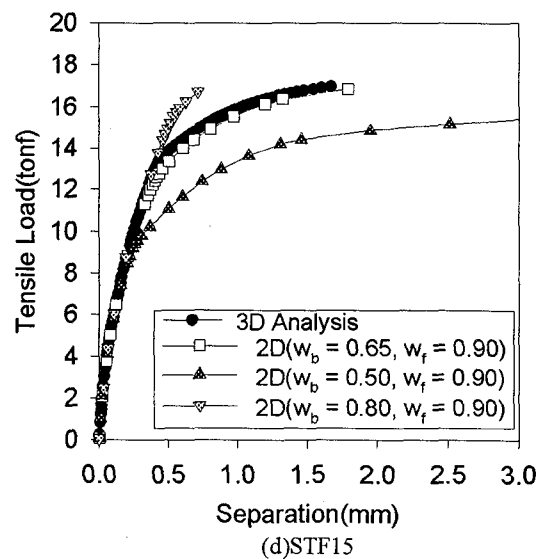
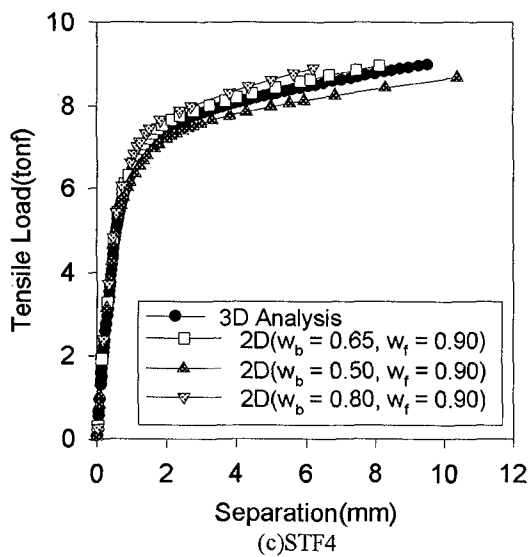
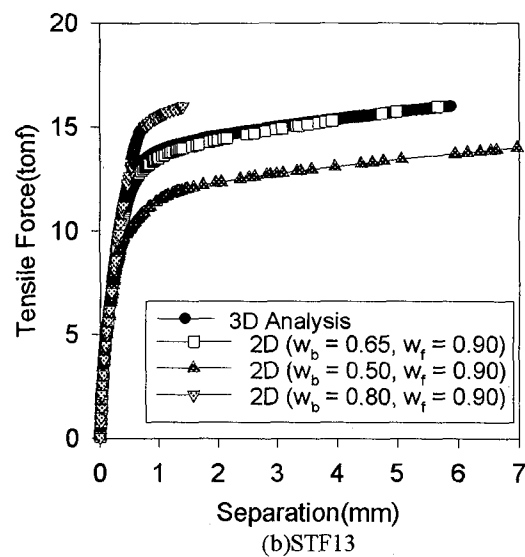
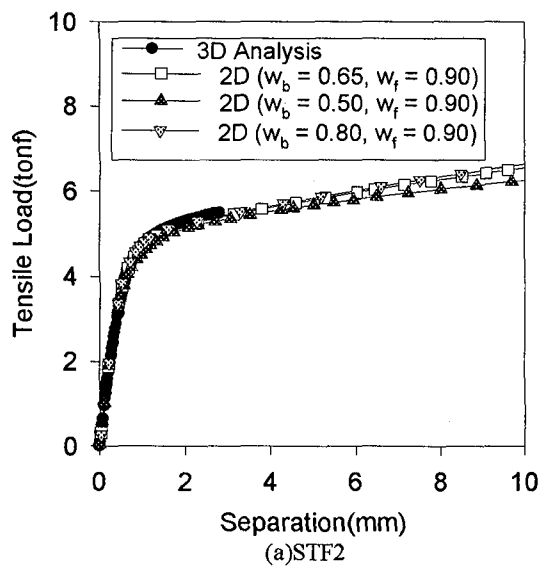


図-7 ボルト有効幅係数の変化

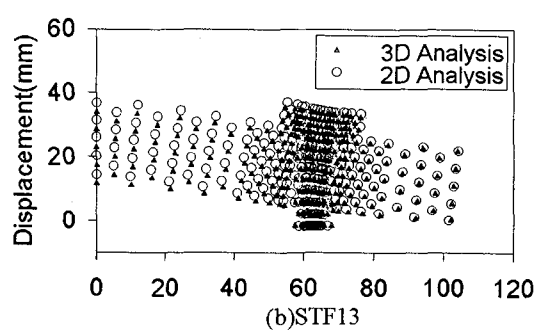
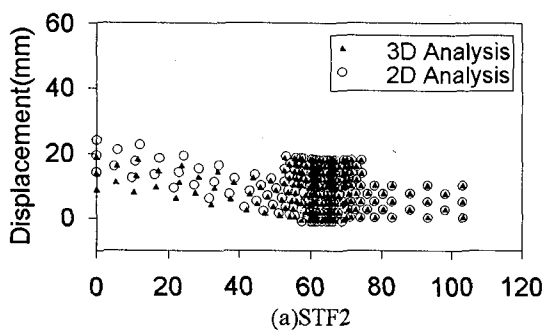


図-8 フランジ板中心線上における変形状態（降伏荷重付近）

ルト有効幅係数：0.65)を用いて、今回行った3次元解析のすべてのケースに対して適用可能であるかを次に調べることにした。若干の差異は見られるがすべてのケースにわたってこの有効幅係数を用いることで正しく荷重－離間量関係が得られることがわかった。

4.4 発生応力の照査

フランジ板厚(10mm, 22mm)およびフランジ板幅(63mm, 94.5mm)が異なる典型的な4ケースに対してフランジ板に発生する最大応力を先に決定した有効幅係数(フランジ有効幅係数：0.90, ボルト有効幅係数：0.65)を用いた2次元解析と3次元解析とで比較を試みた。得られた最大発生応力とその位置を表-3に示す。これによるとフランジ板が薄いものに対しては発生最大応力およびその位置ともに有効幅係数を用いた2次元解析により十分精度良く推定できることがわかる。しかし、フランジ板が厚い場合、最大発生応力の値に差が見られ、特にフランジ板幅の広いもののほど差が大きいことがわかる。これは、フランジ板よりも高力ボルトの挙動が支配的であるためと思われる。したがって、有効幅係数を用いた2次元解析による応力の照査が困難であることがわかる。

表-3 二次元解析と三次元解析の発生応力の比較

解析	二次元解析		三次元解析	
ケース	発生最大 応力	部位	発生最大 応力	部位
STF2	27.4	A	27.7	A
STF4	27.2	A	28.7	A
STF13	21.3	A	27.2	A
STF15	14.6	A	27.2	A

A：載荷側ボルト近傍部

STF2, STF4はフランジ板が薄いケース

STF13, STF15はフランジ板が厚いケース

4.5 ボルト曲げ応力

フランジ板が最も薄いSTF2とフランジ板が最も厚いSTF13の2ケースに対するボルトに発生する曲げ応力の変化を図-9に示す。ボルト曲げ応力は、ボルトの固定端における節点力を基に算出したモーメントをボルト有効断面を考慮して弾性断面係数で除して算出した。なお、2次元解析においては、先に決定した有効幅係数(フランジ有効幅係数：0.90, ボルト有効幅係数：0.65)を用いた。3次元解析結果より、フランジ板が薄い場合の曲げ応力は、フランジ板が厚い場合のその倍以上であることがわかる。2次元解析と3次元解析の結果を比較すると、板厚の大小に関わらず、両者の曲げ応力には差が見られ、2次元解析の方が発生曲げ応力を高く評価して

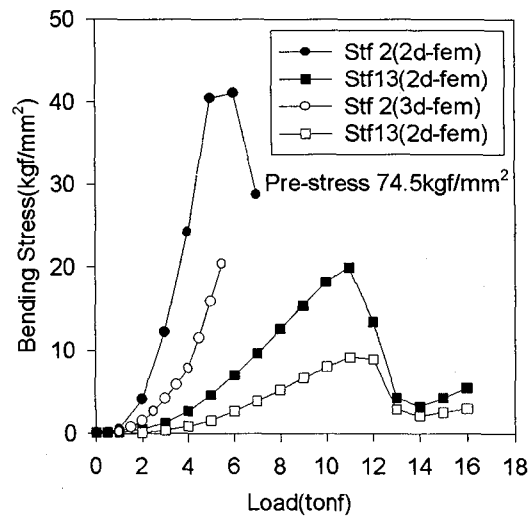


図-9 ボルトに発生する曲げ応力の変化

いることがわかる。したがって、有効幅係数を用いた2次元解析によって曲げ応力の変化を推定することは困難であり、ボルトの挙動が支配的であっても、有効幅係数のみで局所的な応力・ひずみの分布を評価することは困難であるといえる。

5. 結論

本研究では、高力ボルト引張継手の最も基本的な構造であるスプリットティー継手に対し、フランジ板厚およびフランジ板幅を変化させた3次元弾塑性有限要素解析を行い、この結果をもとに2次元弾塑性有限要素法による解析手法について検討した。ここで得られた結論を以下に示す。

- 1) 本研究で取り上げた範囲内においては有効幅係数を用いるという簡単な手法により、2次元解析において3次元挙動(荷重－離間量関係, 変形モード)を正しく予測できる。なお、この時の有効幅係数はフランジ板, 高力ボルトそれぞれに対して0.90, 0.65である。
- 2) 設計において重要な情報となる最大応力およびその場所については、有効幅係数を用いた2次元解析と3次元解析では板厚が薄い場合に対しては良く一致するが、板厚が厚いものに対しては2次元解析結果の方が小さい値を示し、板幅が大きいもののほど差は大きい。また、ボルトに発生する曲げ応力については、板厚の大小に関わらず、有効幅係数を用いた2次元解析により、変化の様子は推定できるが、その大きさについては精度よく推定できず、安全側の評価となる。
- 3) 今後はさらに解析ケースを増やし、本研究で決定した有効幅係数の適用範囲を明確にするとともに、設

計法の確立を目的とした基礎的資料の収集の点から板厚が厚いものに対する2次元解析による発生応力の照査およびボルトの発生応力照査を可能とする有効係数を検討すべきである。また、本研究で取り上げたモデルは最も基本的なものであり、ボルト数やボルトの配置が異なる実際の継手構造に対して基本モデルの端部の境界条件を工夫することで実際の継手構造を再現する方法を確立する必要がある。

【参考文献】

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，1993.2.
- 2) 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，pp.5-10，1975.12.
- 3) 接合小委員会・引張ボルト接合班：引張接合，JSSC，Vol.2，No.12，1966.
- 4) 田辺宏志，上杉英樹，橋本篤秀，田中淳夫，高田周三：Split Teeを用いた高力ボルト引張接合に関する研究（その1．ボルトおよびTeeフランジ挙動に関する理論的研究，日本建築学会論文報告集号外，p.447，1967.10.
- 5) 田辺宏志，上杉英樹，橋本篤秀，田中淳夫，高田周三：Split Teeを用いた高力ボルト引張接合に関する研究（その2．ボルトおよびTeeフランジ挙動に関する実験，日本建築学会論文報告集号外，p.448，1967.10.
- 6) 加藤勉：高力ボルト引張接合の設計式（スプリットT接合），JSSC，Vol.5，No.46，pp.73-80，1969.
- 7) 藤本盛久，橋本篤秀：高力ボルト引張り接合に関する研究・第1部・板のバネ定数設定のための軸対象3次元弾性理論解析（その1），日本建築学会論文報告集第164号，pp.27-33，1969.10.；同（その2），日本建築学会論文報告集第165号，pp.67-76，1969.10.
- 8) 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），日本建築学会論文報告集，第190号，pp.59-68，1971；同（その2），日本建築学会論文報告集，第191号，pp.7-18，1972.
- 9) (社)日本鋼構造協会・技術委員会・安全性分科会接合小委員会・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.74，1972.2.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) (社)日本鋼構造協会：橋梁用高力ボルト引張接合設計指針（案），1993.2.
- 16) 山田嘉昭，横内康人：有限要素法による弾塑性解析プログラミングEPIC4解説，培風館，1981.3.
- 17) 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.
- 18) 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，1993.7.

(1994年9月14日受付)