

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

Opening Characteristics of High Strength Bolted Flange Joints and its Tensile Rigidity

渡邊英一* 山口隆司** 杉浦邦征*** 葛西俊一郎****

Eiichi Watanabe, Takashi Yamaguchi, Kunitomo Sugiura & Shun-ichirou Kasai

Studied herein are the mechanical characteristics of high strength bolted flange joints necessary for the development of the rational design procedure, namely, contact/opening behavior and joint rigidity. In order to evaluate the load-deformation characteristics and the failure mode, tensile loading tests were carried out. Furthermore, the finite element analysis considering material and boundary non-linearity was made to evaluate the interfacial stress distribution and the joint rigidity as a function of the flange plate thickness, the loading eccentricity, the bolt pre-stress force and so on. The mechanical superiority of the flange joint is discussed within limited amount of experimental and analytical results.

1. はじめに

高力ボルト引張接合は、高力ボルトを締め付けて継手面間に接触圧力（フランジプレートもしくはエンドプレートの間の圧縮力）を生じさせ、作用荷重によって生じる部材断面内の応力の伝達を、ボルトの軸方向（部材軸方向）に沿った接触圧力の減少と釣り合わせて行う接合形式である。この接合形式では、応力伝達に関与する部分が、高力ボルトによる締付のためにボルトの軸断面積以上の面積を有すると考えられることから、接合部の剛性は高く、また、作用外力によるボルト軸力の変動が小さいため、疲労に強いなどの優れた力学的特性を有している。一方では、摩擦接合に比べて必要ボルト数が減少し、添接板が不要になるなど美観上も優れており、さらに、その構造形式から現場溶接接合に比べて施工が容易で、施工期間が短縮できるなどの利点も有している。

このように、引張接合形式の適用性は非常に高いと思われるが、実際の橋梁構造物に積極的に使用されているとは言い難い。現行の道路橋示方書¹⁾では、この接合形式を採用するにあたって、ボルトの許容応力度・締付応力・継手部の剛性および応力状態などを十分に検討することを要求しており、基礎的データの不足や合理的な設計法が存在しないために、ほとんど主部材には適用不可能である。このような状況下、橋梁用高力ボルト引張接合作成小委員会（（社）日本鋼構造協会、委員長 西脇威夫・武蔵工業大学教授）は、建築構造物の高力ボルト引張接合に関する研究成果を整理するとともに、委員会の研究活動で明らかにされた新しい知見を含めて、橋梁用高力ボルト引張

*	工博, Ph. D.	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)
**	工修	京都大学大学院土木工学専攻 (博士後期課程)	(〒606 京都市左京区吉田本町)
***	Ph. D.	京都大学助手 工学部土木工学科	(〒606 京都市左京区吉田本町)
****	工修	(株)神戸製鋼所 構造技術センター	(〒651 神戸市脇浜町1-3-18)

接合設計指針（案）²⁾をまとめている。高力ボルト引張継手を設計する際には、継手部における応力伝達面積を正確に知る必要があるが、この面積は、ボルトプレストレスの大きさやフランジ板の形状に大きく依存していると考えられ、信頼ある評価式が存在しないのが現状である。したがって、同設計指針（案）では応力伝達面積に関連した継手部の「離間現象と接合部の変形」の解明が、この種の継手の普及に貢献できると報告されている。

一般に、高力ボルト引張継手の構造上、直接、応力伝達面積を知ることが多くの困難を伴う。しかし、応力伝達面積は接合部の剛性と非常に密接な関係があり、この接合部剛性は比較的容易に評価できる。したがって、本論文では、「離間現象と接合部の変形」に関する研究の手始めとして、特に、高力ボルト引張継手の基本部分である高力ボルトとその周辺部に注目し、軸対称問題として、その引張剛性を評価し、応力伝達機構について検討する。このような基本部分を取り上げた理由は、ボルトプレストレス、フランジ板厚および荷重作用点と荷重伝達点との間の偏心距離などが、高力ボルト引張継手の剛性にどのような影響を及ぼすかを検討するためである。ここでは、引張載荷実験とともに接触・離間を考慮した弾塑性有限要素解析を用い、載荷実験で定性的に接触・離間挙動を捉え、パラメトリックな有限要素解析により、接合部剛性、さらには接合部の応力伝達面積を評価した。さらに、接合部剛性に影響を及ぼす無次元パラメータを抽出し、非線形最小二乗法を用いて接合部の剛性評価式を算定した。

2. ボルト周辺部モデルおよび接合部剛性による応力伝達面積の評価

本論文では、高力ボルト引張継手の接触・離間挙動、および接合部剛性を調べるために、図1に示すようなボルト周辺部を取り出した軸対称基本部分モデルを設定した（以下、このモデルをボルト周辺部モデルという）。このモデルは2枚の円形板を中心で高力ボルトによって締結したものであり、円形板の外縁に一樣な引張力を加える。ボルト周辺部モデルの円形板の板厚が、高力ボルト引張継手のフランジ板厚に、円形板の半径が高力ボルト引張継手の荷重伝達点とボルト軸心との間の偏心距離（図中）にそれぞれ対応している。ここではボルトプレストレスおよび円形板の形状が接合部の引張剛性に及ぼす影響を明らかにするために、円形板の板厚およびその半径をパラメータとして取り上げた。

次に、接合部剛性と応力伝達面積の関連について述べる。本論文で対象としているボルト周辺部モデルに対して、接合部での応力伝達面積を載荷実験により直接評価するためには、フランジ板間の接触圧を計測する必要がある。接触圧の測定方法としては感圧紙による方法³⁾も存在するが、載荷に伴い変化する接触圧を測定することはこの方法では困難であり、事実上不可能であると言わざるを得ない。一方、剛性は荷重－変形曲線の接線勾配として定義され、図2に示すような棒部材の場合、応力伝達面積（ A ）は部材断面積と等しく、部材長さを ℓ 、ヤング率を E とすると、その引張剛性（ K ）は次式で定義される。

$$K = \frac{AE}{\ell} \quad (1)$$

このように剛性は応力伝達面積（部材断面積）の関数となっており、本論文では、直接、応力伝達面積を評価するのではなく、まず、接合部の剛性を求め、式（1）を用いて応力伝達面積に換算することにする。接合部での変形は同じ断面内で一様でないため、この点の変形量を用いて荷重－変形曲線を定めるのかということが重要となる。ここでは、接合部の主な役割が主部材から主部材への荷重を伝達することであることから、主部材からの荷重伝達点（図1に示す●点での変形量（離間量））を用いて荷重－変形曲線を定め、その接線勾配を接合部剛性と定義し、評価した。

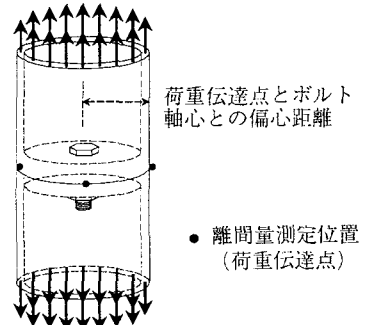


図1 ボルト周辺部モデル

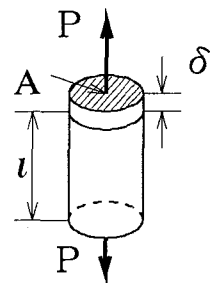


図2 棒部材の例

3. 引張載荷実験による接触・離間挙動

3. 1 モデルの寸法および載荷実験の概要

引張載荷実験に用いたボルト周辺部モデルの供試体を表1に示す。E-1, E-2およびE-3供試体は同じ半径を有し、板厚のみが異なる供試体群である。また、E-4供試体はこれらとは異なる半径を有する。重要なパラメータである円形板の板厚については、板の初等理論に基づいて、周辺を単純支持した円形板の中央にボルト導入軸力と同じ大きさの集中荷重を載荷し、その時の発生する最大応力が降伏応力に達するような板厚を基本板厚(19mm)とした。なお、高力ボルトには文献4)で定められている標準ボルト軸力(62.3kN)を導入することとした。

これらの供試体に対して変位制御の単調引張載荷実験を電気油圧サーボ式材料試験機を用いて行った。載荷実験で用いた装置の概要を図3に示す。アクチュエータ(ジャッキ)／ロードセルと載荷治具の間にはヒンジを設け、偏心載荷を生じさせないようにした。載荷実験中、引張荷重、アクチュエータの変位、2枚の円形板の間の離間量、ボルト軸力をそれぞれコンピュータによるオンライン計測で測定した。離間量の測定は、図1に示す4点(●点)において、クリップ式変位計を用いて行った。また、ボルト軸力はボルト軸力測定用ゲージをボルト平行部の軸心に埋め込んで測定を行った。

表1 載荷実験供試体

供試体名	円形板の板厚	円形板の半径
E-1	19	52
E-2	10	52
E-3	5	52
E-4	10	78

使用ボルト M12(F10T) 単位 mm

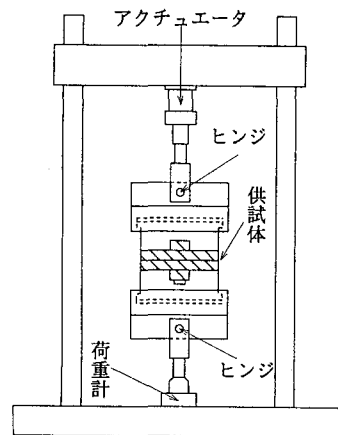


図3 載荷装置の概要

3. 2 引張載荷実験結果

載荷実験から得られた荷重－離間量曲線、荷重－ボルト軸力曲線をそれぞれ図4、図5に示す。離間量については4点で測定した値の平均値を用いた。また、E-1, E-2, E-3供試体の接合部剛性－荷重曲線を図6に示す。図中における縦軸の無次元化剛性は高力ボルトの剛性(K_B)によって、横軸の無次元化荷重は高力ボルトの破断強度(P_0)によってそれぞれ無次元化した。さらに、図6にはボルトプレストレスの影響を調べるために全体剛性の値も図示した。この全体剛性は円形板とボルトが直列でつながっていると考えた場合の剛性であり、次式のように全体剛性(K_T)は板剛性(K_P)とボルト剛性(K_B)から求められる。

$$K_T = \frac{K_B K_P}{K_B + K_P} \quad (2)$$

ただし、板剛性は板の初等理論に基づき、周辺を単純支持された円形板の中央に集中荷重が載荷された場合の円形板の中央点の荷重－たわみ関係の傾きで定義した。円形板の半径を R 、板厚を t 、ポアソン比を ν 、ヤング率を E_P とすると、板剛性(K_P)は、次式で求められる。

$$K_P = \frac{16\pi D}{R^2} \frac{1+\nu}{3+\nu} \quad (3a)$$

$$\text{ただし } D = \frac{E_P t^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3b)$$

また、ボルト剛性はボルトのヤング率を E_B 、ボルト定着長さを ℓ 、ボルト有効断面積を A とすると、次式で求められる。

$$K_B = \frac{AE_B}{\ell} \quad (4)$$

なお、接合部剛性は荷重伝達点での荷重－離間量曲線の傾きであることをすでに述べたが、実験で離散的に計測された荷重と離間量から、荷重増分を離間量増分で割ることで接合部剛性とした。

図4において、E-1、E-2、E-3供試体を比較すると、円形板の半径が同じ場合、円形板が薄いほど、初期剛性は小さく、作用荷重が小さい段階から離間が進行することがわかる。また、最も円形板が厚いE-1供試体とそれ以外のものでは荷重－離間量曲線の形状が異なっていることがわかる。これはボルトの変形と円形板の曲げ変形のどちらが卓越しているかの違いによるものと思われ、円形板が厚いE-1供試体の場合、ボルトの変形が卓越しており、円形板が薄いE-2、E-3供試体の場合、円形板の曲げ変形が卓越していると思われる。一方、E-2、E-4供試体を比較すると、円形板の板厚が同じ場合、円形板の半径が大きいほど初期剛性は小さく、作用荷重が小さい段階から離間が進行することがわかる。しかし、最終的な荷重－離間量曲線の形状は似通っており、円形板の半径が終局的な挙動に与える影響はほとんど無く、むしろ初期の挙動に与える影響の方が大きいことがわかる。このように最終的な崩壊が板曲げに支配される場合、円形板の板厚に比べて円形板の半径は終局強度に影響を及ぼさないが初期剛性には多大な影響を及ぼすと考えられる。

図5にボルト軸力の変動を示す。円形板が厚いE-1供試体の場合、引張荷重がボルトプレストレスに至るまでボルト軸力は一定で、ボルトプレストレス到達後、引張荷重とボルト軸力が等しく推移して行くことがわかる。円形板が厚い場合、初期の段階では引張荷重をボルトが負担することはなく、材間圧縮力の減少によって負担する。その後、2枚の円形板は接触状態から完全離間状態へ移行し、材間圧縮力が全て解放されると引張荷重をボルトがすべて負担すると考えられる。一方、円形板が薄いE-3供試体の場合、引張荷重がボルトプレストレスに到達する以前にボルト軸力が次第に増加しているのがわかる。これは円形板が薄いために円形板がボルト頭部外縁部を支点として曲げられ、そのためボルトが引っ張られような形となり、ボルト軸力が増加したためと考えられ、スプリッター継手に見られるてこ作用に類似していると考えられる。この時、2枚の円形板は接触状態から完全離間状態へ移行せず、ボルト周辺部分が接触状態のまま、円形板の変形だけが進行していくと考えられる。E-2、E-4供試体を比較すると、荷重－ボルト軸力曲線の形状は非常に似通っており、円形板の半径による違いはほとんど見られない。これは円形板の半径/板厚の比がその挙動に影響を与えないほど小さいためと考えられる。

図6の接合部剛性－荷重曲線より、円形板が厚いほどそ

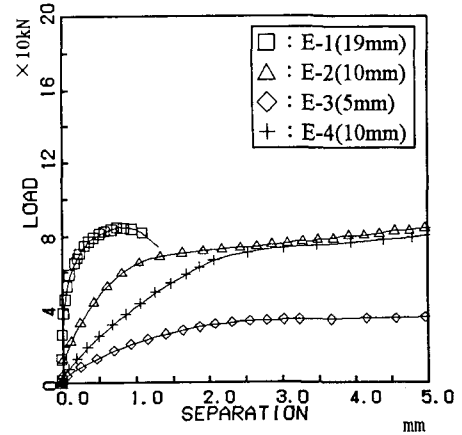


図4 荷重－離間量曲線

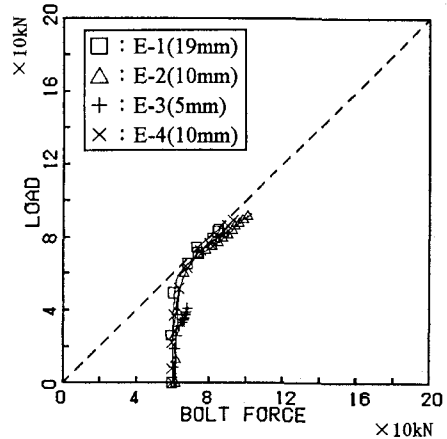


図5 荷重－ボルト軸力曲線

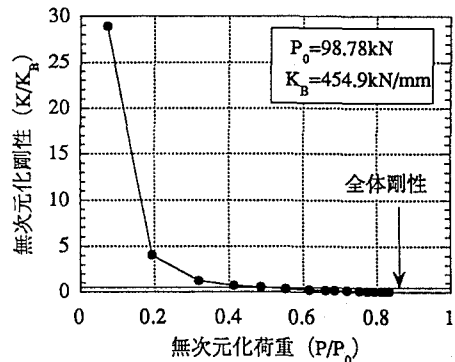


図6 接合部剛性－荷重曲線（その1）
（E-1 供試体）

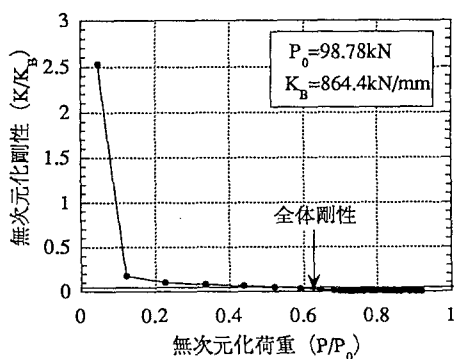


図6 接合部剛性－荷重曲線（その2）(E-2)

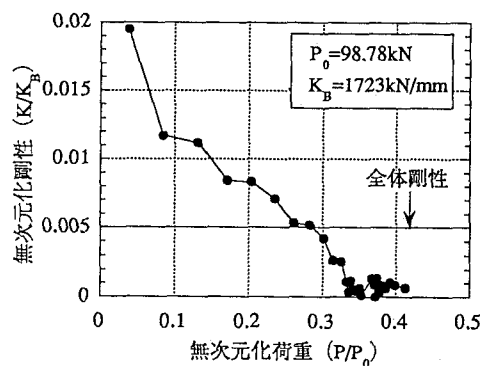


図6 接合部剛性－荷重曲線（その3）(E-3)

の剛性は高く、荷重の増大により接合部剛性が指数関数的に減少していることがわかる。また、作用荷重があるレベルに達するまで接合部剛性が全体剛性を上回っていることがわかり、この範囲内ではボルトプレストレスの導入によって接合部剛性が増加していると考えられる。さらに、このボルトプレストレスによる剛性の増大の効果が認められる荷重上限値は円形板が厚いものほど大きいことがわかる。

4. 有限要素解析による接触・離間挙動

4. 1 解析手法

ボルト周辺部モデルに対して、載荷実験結果を補完し、さらに、基礎データの蓄積を図るために、一定ひずみの三角形要素を用いた二次元弾塑性有限要素解析を行い、接触・離間挙動を明らかにし、接合部剛性を評価する。ボルト周辺部モデルが引張荷重を受けると、接触面が次第に離間していくことから、境界上の節点力の正負にしたがって境界条件を変更できるようEPIC4⁵⁾の修正を行い、解析を行った。

本論文で用いた有限要素解析では接触・非接触状態を次のようにして取り扱う。接触状態の節点は変位を0に拘束した変位拘束節点であり、非接触状態の節点は節点荷重を0に拘束した荷重拘束節点として与えられる。したがって、接触状態から非接触状態へ変化する場合は変位拘束節点から荷重拘束節点に、非接触状態から接触状態へ変化する場合は荷重拘束節点から変位拘束節点に変更すればよいことになる。接触／非接触の判定は荷重増分を与え、荷重増分の前後で、節点力の符号が反転した時に接触から非接触へ、節点変位の符号が反転した時に非接触から接触への状態の変更があるものと考えた。そして、この時、節点力、もしくは節点変位が0になるような荷重増分を境界条件を変更するのに必要な荷重増分とした。これらを踏まえ、有限要素解析においては、新たに要素1個を降伏させるのに必要な最小の荷重増分と節点1個の境界条件を変更するのに必要な最小の荷重増分の二つを比較し、小さいほうの荷重増分を逐次与え、塑性化による剛性変化、非接触による境界変化を考慮した。

4. 2 ボルト周辺部モデル要素分割および解析手順

ボルト周辺部モデルの解析ケースを表2に示す。解析ケース名の2番目の英字は円形板の半径を表わし、Sが52mm、Mが78mm、Lが104mmである。また、解析ケース名の数字が大きくなるほど円形板の板厚が小さくなる。この解析モデルの概略を要素分割（AS-3の場合）とともに図7に示す。有限要素解析ではボルト周辺部モデルの対称性から、図7に示すような4分の1の部

表2 解析ケース

解析ケース名	円形板の板厚	円形板の半径	板厚－半径比
AS-1	22	52	0.423
AS-2	19	52	0.365
AS-3	15	52	0.288
AS-4	10	52	0.192
AS-5	5	52	0.0962
AM-1	25	78	0.321
AM-2	19	78	0.244
AM-3	15	78	0.192
AM-4	10	78	0.128
AL-1	25	104	0.240
AL-2	19	104	0.183

単位 mm

分を軸対称問題として取り扱うことにした。要素分割においては高力ボルトと円形板の接触部分および荷重載荷部分で要素分割を細かくするように設定した。ボルトと円形板の接触部分では、滑りや離間などの現象が予想されるが、 $B/L \ll 1$ であること、高い軸力が導入されていることなどから、このモデルではボルトと円形板の接触部分を離れることがないものと仮定し、連続として取り扱い、ボルトと円形板の材料定数を変化させてそれぞれを区別することにした。さらに、実構造では、ボルトと円形板の間にワッシャーが存在するが、ワッシャーの径とボルト頭部の径の違いがわずか（外径差 0.6mm）であること、ボルト頭部の厚さに比べてワッシャーの厚さが薄いことなどから、ワッシャーを省略してモデル化を行った。また、ボルトにおいてもねじ部分と平行部分で径に違いがあるが、材料定数を変化させることで径の違いを考慮した。円形板の板厚と半径がともに最も大きいケース（AL-1）で節点数 390、要素数 684である。ここで用いた材料定数を表 3 に示す。既に述べたようにボルト平行部分とボルトねじ部分で材料定数を変化させているが、ボルトの材料定数を基本としてボルト平行部分に適用し、ボルトねじ部分はボルト平行部分とボルトねじ部分の面積比を用いてボルト平行部分の材料定数を低減させ、ボルトねじ部分の材料定数とした。また、ボルト平行部分およびねじ部分、円形板部分の材料の応力-ひずみ関係は完全弾塑性とした。

有限要素解析の手順は、まずボルト導入軸力（標準ボルト軸力、62.3kN）をボルト下端に載荷する。次にボルト下端の変位を拘束（ボルト部分を固定部分とする）し、円形板の外縁に引張荷重を載荷する。ただし、2枚の円形板の接触部分は常に接触・非接触を考慮できる部分として解析を行う。境界条件と載荷条件の概要をボルト軸力導入時、引張荷重載荷時に分けて図 8 に示す。

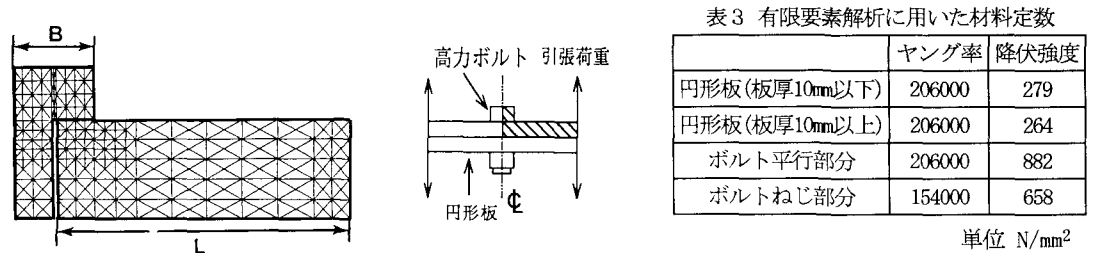


図 7 解析モデル

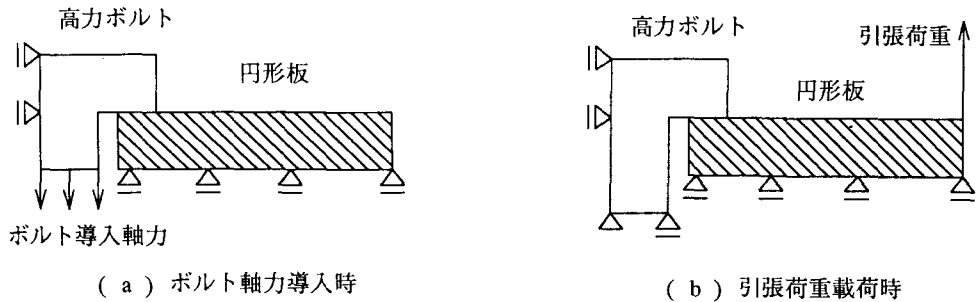


図 8 有限要素解析における載荷条件と境界条件

4. 3 接触・離間挙動の有限要素解析結果

有限要素解析により得られた荷重－変形曲線をAS-2、AS-4、AS-5を例に図 9 に示す。ここで示す荷重は引張荷重であり、変形は荷重載荷点での節点変位である。円形板の板厚がその半径に比べて比較的大きい場合（AS-2），荷重－変形曲線は双直線形であり、かなり高い荷重レベルまで変形がほとんど進行しないことがわかる。これは、円形板での降伏が板厚が厚いためにほとんど起こらず、ボルトのねじ部分での全断面降伏によって大きく変形が進行するためと思われる。このことは、図 1 0 (a)に示す塑性域の進展状況からも確認できる。この場合、板厚の影響は双直線の 1 次勾配に表れており、板厚が厚いほどその勾配は急になっていると考えられる。一方、円形板が薄い場合（AS-5），荷重－変形曲線の形状は双直線形とはならず、初期の荷重段階から変形が進行していくのがわかる。円形

板が薄い場合、ボルトが全断面降伏する以前に円形板の曲げ変形が進行し、円形板の降伏によって大きく変形が進行すると考えられる。図10(b),(c)に示す塑性域の進展状況からその状況が確認できる。このように、板厚によって、①ボルトの降伏、②円形板の降伏の二つの破壊形式に大きく分類されたと考えられ、載荷実験結果との整合性を確認した。

次に荷重-ボルト軸力曲線をAS-2, AS-5を例に図11に示す。また、それぞれの円形板の節点力の分布図を図12に示す。図11より、円形板が厚い場合(AS-2)、ボルト軸力は荷重がボルト導入軸力に達するまで、ボルト軸力はそれ程大きく変化せず、到達後、作用荷重とボルト軸力は等しくなるように変化していくのがわかる。これは引張載荷実験でも見られた現象であ

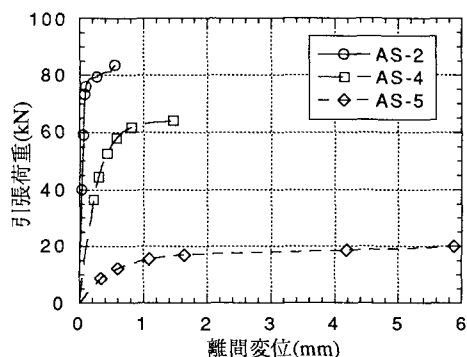


図9 荷重-離間量曲線

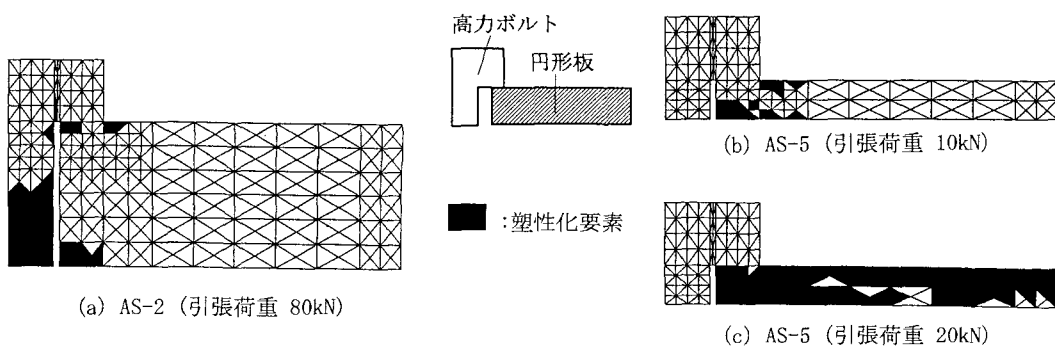


図10 塑性域の進展状況

り、作用荷重がボルト導入軸力に到達するまで、引張荷重の大部分を材間圧縮力が負担し、作用荷重がボルト導入軸力到達以後は、ボルトが負担することを表わしていると考えられる。また、図12(a)より、ボルトとの接触部分で円形板は圧縮状態にある。一方、図11より、円形板が薄い場合、ボルト軸力は減少しており、引張載荷実験と異なった結果を示している。図12(b)より円形板はボルト穴近傍部分で引張状態にあり、ボルト頭部最外縁で大きな圧縮状態にあることがわかる。円形板が薄い場合、このように完全に圧縮状態とならないのは、節点力の分布状態(図12(b))から、円形板がボルト頭部最外縁を支点として曲げられるためと考えられる。ボルト穴近傍部で円形板は引張力を受けていることから、ボルトと円形板は本来、非接触状態に移行していると考えられる。しかし、本解析ではボルトと円形板の間は常に接触状態にあると仮定しており、この状態を考慮できず、円形板の塑性化に伴う板厚の変化に追随し、軸力の減少が見られたと思われる。したがって、円形板が薄いものに対してはボルトと円形板が常に接触状態にあるとした仮定は成立せず、ボルトと円形板の間での接触/非接触も考慮して解析する必要があると考えられる。

次に円形板の接触面上での法線方向節点力の分布をAS-2, AS-5を例に図13に示す。この図から、板厚が厚いほど、節点力の分布は、等分布に近い傾向にあり、ある広がりを持って力を伝達する傾向にあるといえる。

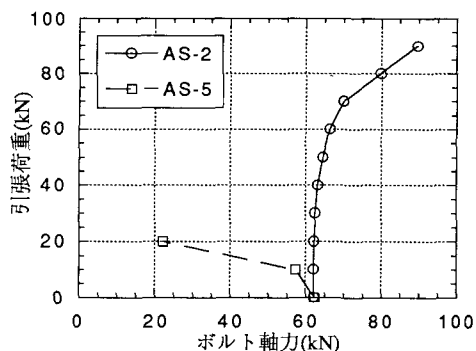


図11 荷重-ボルト軸力曲線

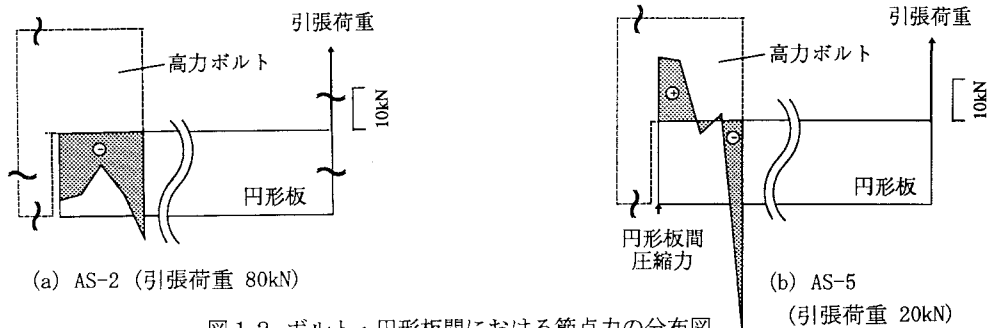


図 1 2 ボルト・円形板間における節点力の分布図

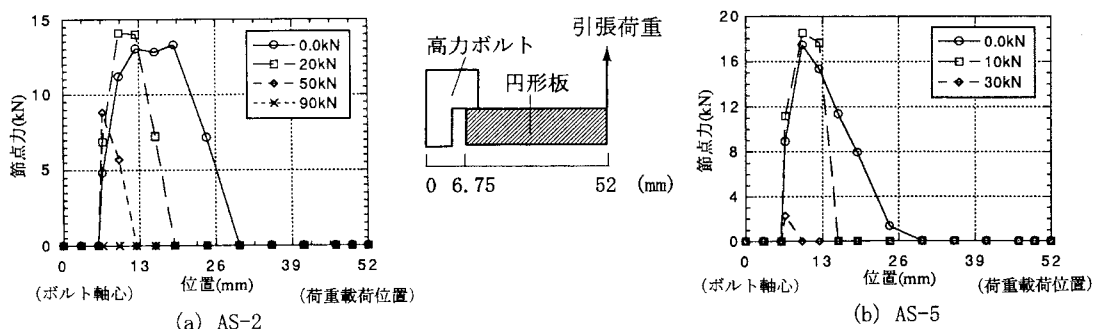


図 1 3 円形板間の接触面における節点力分布図

5. 有限要素解析に基づく接合部剛性

5. 1 接合部剛性

有限要素解析によって得られた剛性-荷重関係をAS-2, AS-5を例に図 1 4 に示す。ボルトプレストレスによる接合部剛性の増加を調べるためにボルト剛性 (2) 式, 円形板の板曲げ剛性 (3) 式, および, この両者から決まる全体剛性 (4) 式を図中に示した。接合部剛性は, 載荷実験結果で求めた接合部剛性と同じように荷重-離間量曲線における荷重増分と離間量増分から求めた。

図 1 4 より, 板厚が異なることによって, 剛性-荷重曲線の形状が大きく異なることがわかる。円形板が厚い場合 (AS-2), 初期の荷重段階とボルト降伏強度付近の荷重段階の 2 ヶ所で大きく剛性が減少している。一方, 円形板が薄い場合 (AS-5), 次第に剛性が減少していることがわかる。これらの結果から剛性の低下の様子は図 1 5 に示すような次の 3 つに分類されると考えられる。円形板の半径に比べてその板厚が比較的大きいものの場合, 初期の剛性が非常に高く, その後減少し, ほぼ一定の剛性をしばらく保つようになる。このように一定の剛性を保つのはボルトプレストレスの効果によるものと思われる。このときの剛性の大きさはほぼ円形板の剛性に近いと考えられる。その後, 荷重がボルト降伏強度に達するとボルトが全断面降伏し, 剛性は急激に低下し零になる。一方, 円形板の半径に比べて比較的小さいものの場合, 初期の剛性も小さく, 次第に零になっていき, ボルト

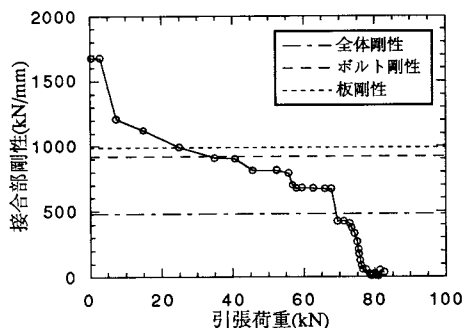


図 1 4 剛性-荷重曲線 (その 1) (AS-2)

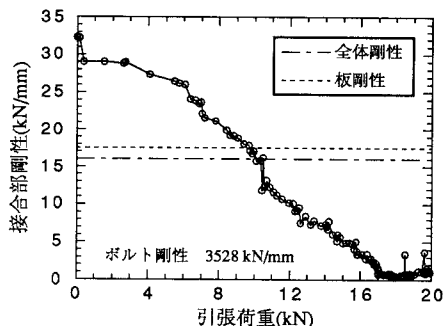


図 1 4 剛性-荷重曲線 (その 2) (AS-5)

降伏強度に到達する以前に剛性は零になる。これは円形板が薄い場合、円形板の降伏が著しく進展していくためと思われる。また、ボルトプレストレスによる剛性の向上は比較的小さいと思われる。最後に、円形板の半径に比べて比較的板厚が大きい場合と小さい場合の中間的な場合が存在するものと思われる。したがって、ボルト周辺部の剛性を評価する場合、円形板の半径と板厚、ボルトの強度、板の強度、ボルトプレストレスの効果を正しく評価する必要がある。

5. 2 ボルト周辺部の剛性評価式の提案およびパラメータの同定

接合部の剛性を一般的に評価するために、4節で示した、板厚、円形板の半径をパラメータとした有限要素解析結果をもとに重回帰分析を行った。重回帰分析にあたって、次のような無次元量を用いた。剛性に関する K/K_0 、円形板の径厚比 t/R 、作用荷重とボルトの導入軸力および終局強度の比 P/P_0 、 P/P_u である。 K_0 は周辺を単純支持された円形板の中心に集中荷重を載荷したときの中心点での荷重一たわみ関係から求めた剛性であり、この剛性を評価式におけるボルト周辺部モデルの基準剛性としてことにした。 P_0 はボルトプレストレスであり、 P_u は終局強度である。

有限要素解析結果から得られた剛性低下の3パターン（図15）をもとに次のような剛性評価式を仮定した。

$$\frac{K}{K_0} = \left\{ C_1 \left(\frac{t}{R} \right)^{C_2} - 1 \right\} \left(1 - \frac{P}{P_u} \right)^{C_3} + \left\{ 1 - C_4 - C_5 \left(\frac{t}{R} \right)^{C_6} \right\} \left(1 - \frac{P}{P_u} \right)^{C_7} + \left[C_4 + C_5 \left(\frac{t}{R} \right)^{C_6} \exp \left\{ -1.5 \left(\frac{P}{P_0} \right)^8 \right\} \right] \left(1 - \frac{P}{P_u} \right)^{C_7} \quad (5)$$

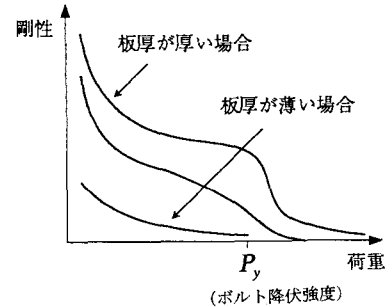


図15 剛性低下の3パターン

ここで終局強度（ P_u ）についてはボルトの降伏強度と周辺を単純支持された円形板の中央に等分布荷重が載荷されたときの円形板の塑性崩壊荷重の小さいほうを終局強度として設定した。この時の円形板の塑性崩壊荷重は、円形板の半径を R 、板厚を t 、降伏応力を σ_r 、分布荷重半径を a とすると次式で与えられる。

$$P = \pi \frac{6R}{(3R-2a)} \frac{\sigma_r t^2}{4} \quad (6)$$

式（5）における右辺の各項の剛性への貢献度について説明する。第1項および第2項は円形板の半径と板厚の比（径厚比）を係数に持ち、終局強度を基準にした荷重段階の指数関数となっており、剛性の指数関数的な低下を表す項である。第3項は図16に示すような形状を表す関数形であり、剛性がボルトプレストレスの効果により荷重がボルト導入軸力に達するまでは一定の値を取り、それ以降は剛性が減少し、終局強度に達した段階で剛性が零になることを表わすためのものである。荷重が零の時の剛性は、第1項の板厚と半径の比の指数関数の部分で表される。これにより、円形板の板厚と半径の比によって初期の剛性が変化することを表している。すべての項に対して終局強度に関する項がかかっており、荷重が終局強度に達した場合、剛性が零になるように設定している。

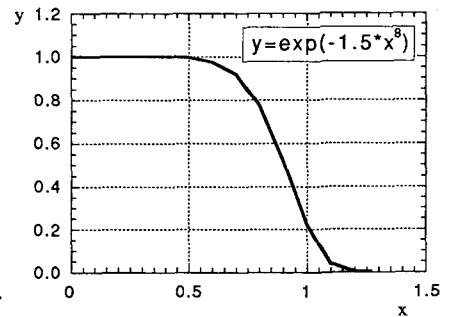


図16 関数の形状

5. 3 回帰分析結果

AS-1～AL-2までの11ケースの有限要素解析結果から得られた剛性－荷重関係をもとに、決定した評価式のパラメータを表4に示す。未定係数 $C_1 \sim C_7$ の決定には、非線形最小2乗法を用いることとし、制約条件付き非線形最小2乗回

題を逐次2次計画法を用いて解くプログラムであるNLSSQ[®]を用いて

決定した。また、図17には、载荷初期から終局状態までの剛性を式(5)により評価した結果をAS-2、AS-4を例に示す。図中における相対誤差はそれぞれのケースの剛性の最大値を基準値とし、残差の絶対値を基準値で割ることによって算出したものである。また、すべての解析ケースに対して、式(5)の剛性評価値と有限要素解析から得られた剛性を比較した結果を図18に示す。

図17より、円形板が厚いものほど剛性の変化を正しく評価していることがわかる。円形板が薄いものに対しては剛性の変化の様子に解析値と評価値でやや差異が認められるが、オーダー的な面からみれば問題はないと考えられる。また、図18より、ほぼ全てのデータ点に対して、おおむね精度良く剛性が評価できていると思われる。

表4 剛性評価式の係数

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
1.63	0.01	3.65	0.845	1.34	7.30	0.01

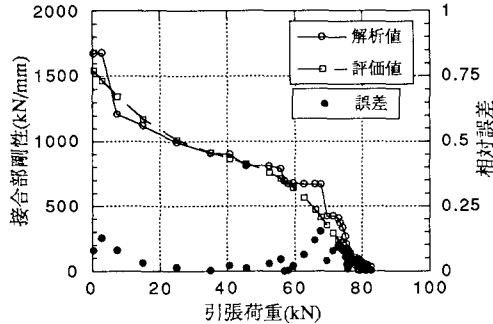


図17 剛性評価結果 (その1) (AS-2)

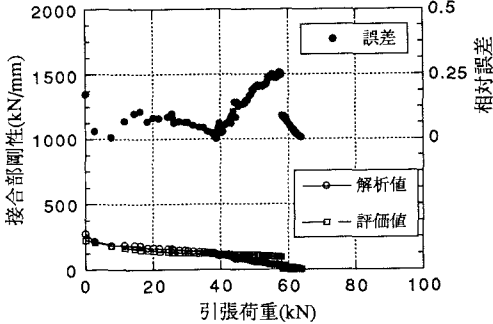


図17 剛性評価結果 (その2) (AS-4)

6. 結論

高力ボルト引張接合部における剛性評価の手始めとして、ボルト周辺部モデルを取り上げ、引張载荷実験を行うとともに有限要素解析を行い、次のような結論を得た。

- 1) ボルト周辺部モデルの剛性は、円形板の半径、板厚、ボルト及び円形板の強度に大きく依存しており、円形板の半径が小さいほど、円形板の板厚が大きいほど大きくなる傾向にある。
- 2) 本論文で述べた手法により、ボルト周辺部の簡易的な剛性評価は可能である。
- 3) ボルト周辺部モデルのより正確な有限要素解析を行うにはボルトと円形板の接触部分を接触/非接触を考慮して解析を行う必要がある。また、今後はボルト周辺部において、継手に要求される剛性を確保するための必要最小限の板厚について検討を加える必要がある。

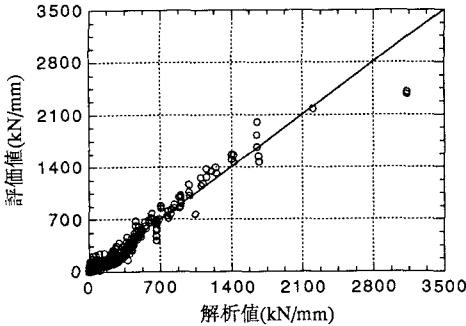


図18 解析値と評価値の比較

【参考文献】

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，1990.2.
- 2) (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.
- 3) 谷平勉，利守尚久他：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，構造工学論文集Vol136A，pp. 1073～1086，1990年3月.
- 4) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工指針，丸善，1993.3.
- 5) 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.
- 6) ASNOP研究会：非線形最適化プログラミング，日刊工業新聞社，1991.4.

(1993年9月16日 受付)