

鋼部材接着接合部の設計法に関する検討

宇都宮大学 学生員 ○ 日野秀幸, 宮崎俊夫
正会員 中島章典, 鈴木康夫

1. はじめに

接着接合の部材への適用を考える際、使用条件を考慮した適切な接着剤の選択を行い、接着接合部の破壊強度を予測し、安全で合理的な設計を行うことが求められる。そのためには接着接合部の応力状態を把握すると共に、終局状態である接着剤の剥離等の破壊挙動を把握する必要がある。また、小さな接着面積を対象とした JIS 規格の試験法に基づく接着剤の接着強度を、大きな接着面積を持つ接合部の設計にどのように用いるかも検討課題となる。

既往の研究²⁾では、JIS 規格より大きな接着面積を有する試験体を用いて、鋼部材接着接合を対象とした引張試験、引張せん断試験、曲げ・せん断試験を行い、各応力状態における接着強度と破壊までの挙動を計測している。また、試験結果と理論式の比較によりせん断弾性係数を推定し、線形解析に用いることで線形範囲での接着接合部の挙動を定性的に再現すると共に、接着層の応力分布を推定している。

本研究では、鋼部材接着接合部の終局状態を推定するために剛体 - バネモデルを用いた非線形解析を行う。まず、様々な応力状態における静的強度試験結果を基に、各接着剤の材料特性を接着面に対してせん断方向、垂直方向で同定し、構成則を作成する。次に、破壊基準を設定した構成則を解析に組み込み、破壊に至るまでの挙動と破壊強度を試験結果と比較する。両者の比較により再現性のある解析結果の妥当性を確認する。静的強度評価に有意である材料特性値、破壊基準を用いて、接着接合部の設計時に考慮すべき点について検討する。

2. 試験概要

本研究では、鋼部材接着接合部を持つ引張試験、引張せん断試験、曲げ・せん断試験を行った。引張試験と 2 面せん断試験は、各接着剤の材料特性を推定する役割を持つ試験である。本試験で用いた鋼材は SS400、接着剤はエポキシ系接着剤、アクリル系接着剤である。接着作業及び養生は 20 の恒温室下で、载荷は室温下で行った。接着面の表面処理は鋼材の塗膜を除去した後、粒度 40 の研磨布で粗面化し、アセトンで脱脂した。各試験体の状況を図-?? に示す。

(1) 引張試験

図-?? のように鋼材同士を突き合わせ接着接合した試験体を用いて引張試験を行った。用いた鋼材の全長は 700mm である。本試験におけるパラメータは試験体断面 (16×32mm, 19×38mm, 25×50mm, 16×50mm) である。アムスラー型万能試験機を用いて引張力を载荷し

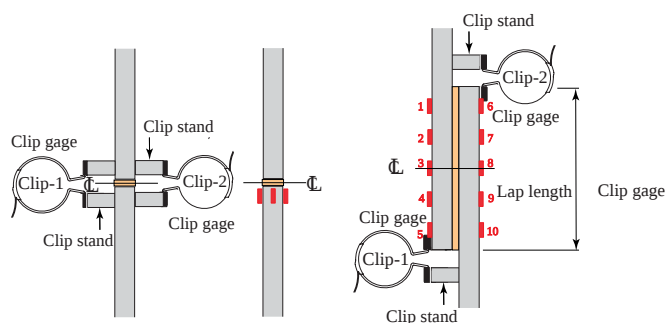


図-1-a 引張試験体

図-1-b 1面せん断試験体

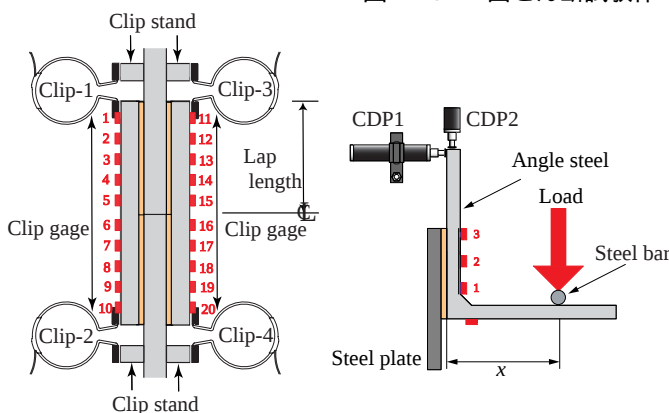


図-1-c 2面せん断試験体

図-1-d 曲げ・せん断試験体

図-1 試験体及び計測位置

た。計測項目は、鋼材のひずみ及び接着接合部の伸びであり、それぞれひずみゲージ及びクリップ型変位計で測定した。

(2) 引張せん断試験

図-??, 図-?? のように 1 面せん断試験体, 2 面せん断試験体を用いて、引張せん断試験を行った。母材、添接材に使用した鋼材の厚さはそれぞれ 12mm, 6mm である。接着剤を被着材の両面に塗布し、接着後に万力を用いて接着面が動かない程度に固定した。本試験におけるパラメータは、接着面 (シングルラップ, ダブルラップ), ラップ長 (50mm, 75mm, 100mm, 150mm), ラップ幅 (50mm, 100mm) である。アムスラー型万能試験機を用いて引張力を载荷した。計測項目は、1 面せん断試験体の母材表面, 2 面せん断試験体の添接材表面のひずみ、母材・添接材間の軸方向相対ずれ変位とし、それぞれひずみゲージ及びクリップ型変位計で測定した。また、試験に先立って、マイクロメーターを用いて接着層の厚さを計測した。

Key Words: 鋼部材, 接着接合, 破壊試験, 剛体ばねモデル, 設計法

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院工学研究科情報制御システム科学専攻 Tel.028-689-6208 Fax.028-689-6208

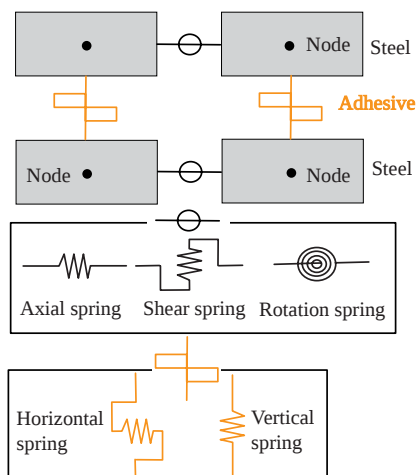


図-2 解析モデル

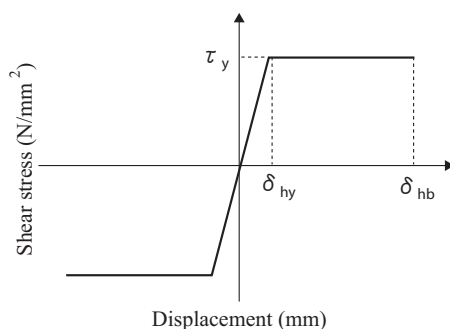


図-3 接着層の水平ばねの構成則

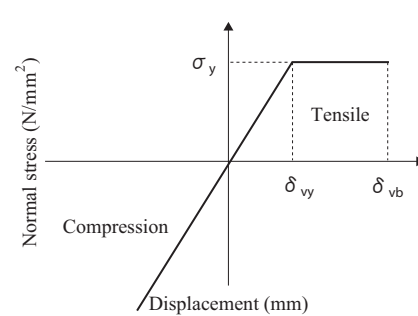


図-4 接着層の鉛直ばねの構成則

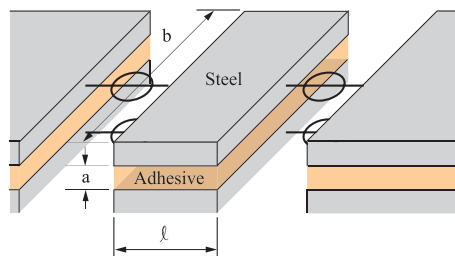


図-5 接着層のばね要素の1要素

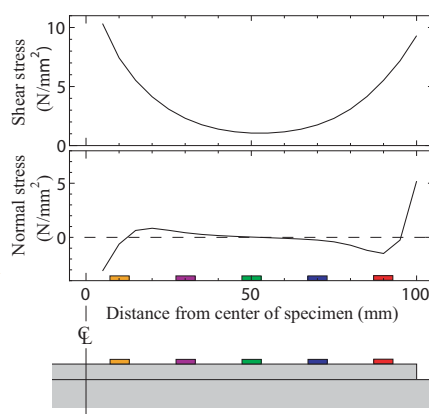


図-6 接着層の応力分布 (DA100, 解析結果)

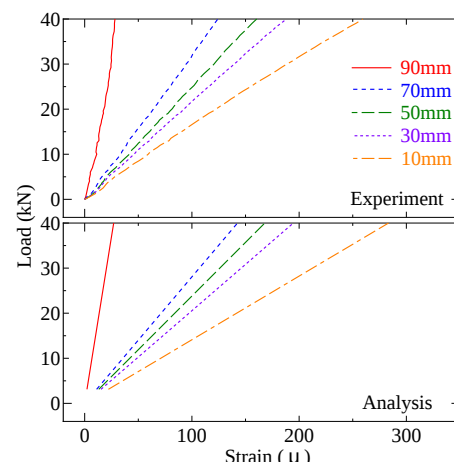


図-7 荷重ひずみ関係の比較 (DA100)

(3) 曲げ・せん断試験

図-?? のように山形鋼と平鋼を接着接合した部材を用いて、曲げ・せん断試験を行った。山形鋼に鉛直方向の荷重を作用させることで、接着接合部に曲げモーメントとせん断力の割合を作用させた。用いた鋼材の厚さは共に 12mm、山形鋼は脚長 150mm、平鋼は幅 300mm、高さ 125mm である。本試験におけるパラメータは、接着長さ (40mm, 60mm, 80mm)、接着幅 (100mm, 150mm)、載荷位置である。載荷位置は 3 種類とすることで試験体に作用する曲げモーメントとせん断力の割合を変化させた。フレーム載荷式試験機を用い、載荷点には丸鋼を載せ、試験体幅方向に均一な線荷重を載荷した。計測項目は、山形鋼接着部における鉛直方向のひずみ、山形鋼上端における水平方向及び鉛直方向の変位とし、それぞれひずみゲージ及び高感度変位計で測定した。

3. 解析概要

本研究では、剛体・ばねモデルを用いて非線形解析を行う。試験体は、図-?? のように鋼材のばね要素は軸ばね、せん断ばね、回転ばねの 3 種類、接着層は水平ばね、鉛直ばねの 2 種類のばねでモデル化する。剛体長さは 2 面せん断試験体、1 面せん断試験体で 5mm、曲げ・せん断試験体で 4mm とし、剛体の節点位置は材料

の重心位置に合わせた。

(1) 接着層のばね要素の構成則

接着層の水平ばね、鉛直ばねの構成則をそれぞれ図-??、図-?? に示す。水平ばねは接着層に働くせん断応力を分担するばねであり、構成則に用いるせん断応力-伸び関係は、図-?? のように降伏応力に達した後は応力の増加はなく、破壊変位に達した時に破壊に至る弾性-降伏-破壊型でモデル化した。一方、鉛直ばねは接着層に働く直応力を分担するばねであり、その直応力-伸び関係は図-?? のように、引張領域では水平ばね同様、弾性-降伏-破壊型でモデル化し、圧縮領域では降伏値を設けず弾性でモデル化した。

図-?? のような、剛体長さ ℓ 、被着材幅 b の鋼材間に配置された接着層厚 a の接着層のばね要素を考える時、弾性域における水平ばね定数 k_h と鉛直ばね定数 k_v はそれぞれは $k_h = Gb\ell/a$ 、 $k_v = Eb\ell/a$ で算出される。ここで、 E は接着剤のヤング係数、 G は接着剤のせん断弾性係数である。被着材幅、接着層厚は計測値、剛体長さは設定した値を用いるため、ヤング係数 E 、せん断弾性係数 G を同定することになる。本来、接着層厚の強度に与える影響は大きいですが、今回の試験結果では、接着層厚がメーカーの提示する接着層厚と同程度であれば、接着強度と層厚に明確な関係性が見られなかつ

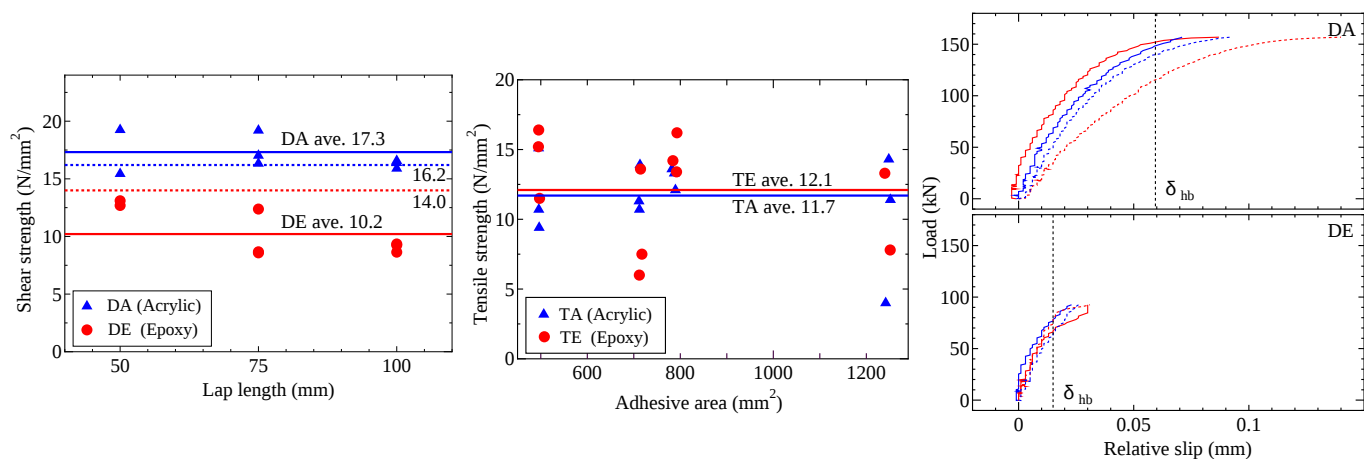


図-8 せん断強度 - ラップ長関係 (2面せん断試験結果) 図-9 引張強度 - 接着面積関係 (引張試験結果) 図-10 荷重 - 相対変位関係 (2面せん断試験結果)

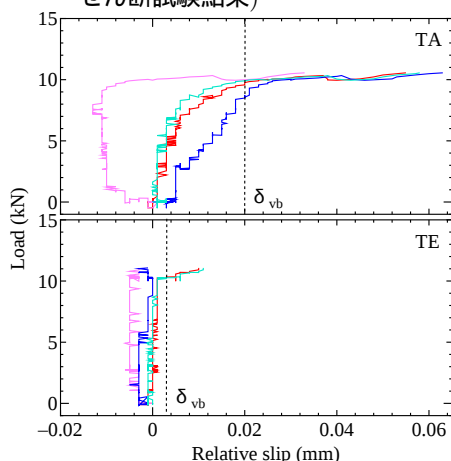


図-11 荷重 - 相対変位関係 (引張試験結果)

たため、2面せん断試験体より計測した接着層厚の平均値を用いることとした。

よって、各ばねの構成則の設定に必要なパラメータは、水平ばねにおいてせん断弾性係数 G 、降伏せん断応力 τ_y 及び破壊変位 δ_{hb} 、鉛直ばねにおいてヤング係数 E 、降伏応力 σ_y 及び破壊変位 δ_{vb} となる。以降に各パラメータの設定方法を示す。

(2) せん断弾性係数 G 及びヤング係数 E の設定

せん断弾性係数 G 及びヤング係数 E は、2面せん断試験結果と解析結果のひずみ挙動の比較により設定する。図-?? に、弾性範囲の荷重下における接着層の典型的な応力分布を示す。図のように、接着層端部及び中央部に引張力、圧縮力が大きく集中して作用することから、特に接着層端部のひずみ挙動に着目し、ヤング係数を推定した。この場合、荷重は弾性範囲と想定される破壊荷重の $1/4$ 程度までとし、2面せん断試験体の各ラップ長で定性的に再現できる値を求めた。図-?? に解析結果と試験結果の荷重 - ひずみ関係の一例を示す。解析結果は試験結果を定性的に再現していると言える。以上の試験結果と解析結果の比較から、せん断弾性係数 G はアクリル系で 400N/mm^2 、エポキシ系で 700N/mm^2 、ヤング係数 E はせん断弾性係数 G の3倍とした。

(3) 降伏せん断応力 τ_y 及び降伏応力 σ_y の設定

降伏せん断応力 τ_y は2面せん断試験結果から得られたせん断強度を基づき設定する。図-?? に2面せん断試験 (ラップ幅 50mm) で得られたせん断強度 - ラップ長関係を示す。せん断強度は最大荷重を接着面積で除したものとした。平均せん断強度はアクリル系 (DA) で 10.2N/mm^2 、エポキシ系 (DE) で 17.3N/mm^2 であった。なお、図中の点線は、接着剤メーカーが提示するせん断強度であり、アクリル系が室温養生の下で 16.2N/mm^2 、エポキシ系が養生温度 20 の下で 14.0N/mm^2 である。接着層端部への応力集中の影響から、せん断強度はラップ長の増加に伴い低下する傾向が見られた。接着層のばね要素1つに対応する接着面積は、全接着面積に対し十分に小さい範囲を考えていることから、本試験の範囲ではせん断強度低下の影響が少ないと考えられるラップ長 (50mm) の試験結果の最大値を参考に、アクリル系で 20N/mm^2 、エポキシ系で 14N/mm^2 を τ_y に設定した。

降伏応力 σ_y は引張試験結果から得られた引張強度を参考に設定する。図-?? に引張試験で得られた引張強度 - 接着面積関係を示す。引張強度は最大荷重を接着面積で除したものとした。平均引張強度はアクリル系 (TA) で 11.7N/mm^2 、エポキシ系 (TE) で 12.1N/mm^2 であった。試験結果から得た引張強度はばらつきが大きい。その要因として、載荷試験機に設置する際、接着接合部に曲げが作用したことが考えられる。この点から、試験結果の最大値を参考に、アクリル系で 15.0N/mm^2 、エポキシ系で 16.0N/mm^2 と平均引張強度より大きい値を σ_y に設定した。

(4) 破壊変位 δ_{hb} 、 δ_{vb} の設定

接着層に対し、水平方向の破壊変位 δ_{hb} は、図-?? に示すような2面せん断試験結果の荷重 - 相対変位関係を参考に設定する。ラップ長に影響なく、伸びが、アクリル系で 0.060mm 、エポキシ系で 0.015mm 程度で破壊、もしくは急激な伸びの増加が見られた。この時、接着層の一部に剥離が発生したと考えられる。よって、この時の伸びを破壊変位 δ_{hb} とした。

接着層に対し、鉛直方向の破壊変位 δ_{vb} は、図-?? に

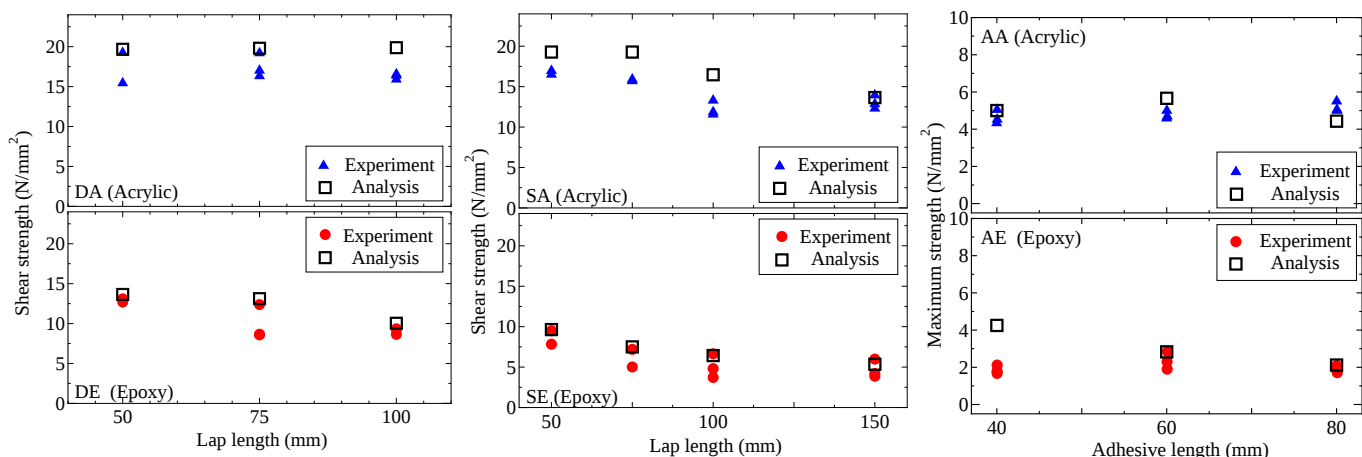


図-12 せん断強度 - ラップ長関係 (2面せん断試験) 図-13 せん断強度 - ラップ長関係 (1面せん断試験) 図-14 破壊強度 - 接着面積関係 (曲げ・せん断試験)

示すような引張試験結果の荷重 - 相対変位関係を参考に設定する． δ_{hb} の設定時と同様の観点から，アクリル系 0.020mm，エポキシ系 0.003mm とした．

接着接合部は，試験体の接着層の一部が剥離によって欠損した時，接着面積の減少と共に破壊に至ると考え，水平ばね，鉛直ばねのいずれかが破壊変位に達した場合を破壊基準とした．また，接着層全体が降伏に達した時，その後の急激な伸びの増加に伴い破壊に至ると考え，接着層全面において水平ばね，鉛直ばねのいずれかが降伏応力に達した場合も破壊の条件とした．これらの構成則，破壊基準を用いて解析を行う．

4. 試験結果と解析結果の比較

ここには図を示さないが，1面せん断試験結果，曲げ・せん断試験結果とそれぞれの解析結果の破壊に至るまでのひずみ挙動を比較したところ，各試験体，ラップ長においてひずみ挙動を定性的に再現することができた．次にここでは，破壊荷重に着目して考察する．

図-?? に2面せん断試験結果 (ラップ幅 50mm) と解析結果から得られるせん断強度 - ラップ長関係を示す．解析結果の破壊強度は，高めではあるものの試験結果の破壊強度を定量的に再現している．アクリル系の解析では (図-?? 上)，全ての試験体で接着層全面の水平ばねが降伏せん断応力に達し，破壊に至った．一方，エポキシ系の解析では (図-?? 下)，ラップ長 50mm の試験体は接着層全面の水平ばねが降伏せん断応力に達したことにより破壊したのに対し，ラップ長 75mm，100mm の試験体は，接着層端部で水平ばねが破壊変位 δ_{hb} に達したことによって破壊に至った．その結果，エポキシ系の解析結果は，試験結果と同様にラップ長の増加に伴うせん断強度の低下傾向が見られた．

図-?? に1面せん断試験結果 (ラップ幅 50mm) と解析結果から得られるせん断強度 - ラップ長関係を示す．せん断強度は最大荷重を接着面積で除したものとした．解析結果は，アクリル系のラップ長 100mm 以上，エポキシ系は全てのラップ長の範囲において，ラップ長の増加に伴いせん断強度が低下した．これは，接着層端部に引張が生じ，接着層端部の鉛直ばねが破壊変位 δ_{vb} に達

したことにより破壊したためである．

1面せん断試験結果と2面せん断試験結果を比較すると，アクリル系及びエポキシ系共に1面せん断強度が2面せん断強度に比べ低くなっている．解析結果の両者を比較すると，エポキシ系の解析では前述したように破壊要因が引張に起因するため，試験結果と同様の傾向を示した．一方，アクリル系の解析では，短いラップ長である 50mm，75mm の1面せん断試験体は，接着層全面の水平ばねが降伏せん断力に達したことによって破壊に至るため，1面せん断強度と2面せん断強度に差は見られず，試験結果との間には差異が生じた．

図-?? に曲げ・せん断試験結果 (接着幅 100mm，載荷位置 50mm) と解析結果から得られる破壊強度 - 接着長さ関係を示す．破壊強度は最大荷重を接着面積で除したものとした．解析では，アクリル系の接着長さ 40mm の試験体以外は，接着面積によらず接着層の下方の鉛直ばねが破壊変位 δ_{vb} に達することで破壊に至った．一方，アクリル系接着長さ 40mm の試験体は，引張領域が降伏応力に達し，破壊に至った．エポキシ系の接着面積 40mm において，特に，解析結果と試験結果の間に差異が生じた．

5. まとめ

本研究では，静的強度試験結果を基に接着剤の材料特性を把握し，破壊基準を考慮した構成則を解析に組み込み，非線形解析を行った．その結果，各載荷条件及び各ラップ長において，破壊に至るまでの挙動を定性的に再現できた．一方，破壊荷重は，1面せん断試験及び曲げ・せん断試験においては，試験結果との間に差異が見られた．その理由としては，せん断応力と鉛直応力の練成が破壊条件に及ぼす影響や，鉛直ばねの圧縮領域の特性を考慮する必要が考えられ，この点は，発表の際に考察を加えて述べる．

参考文献

- 1) 日野 秀幸，中島 章典，鈴木 康夫，齋藤 誠，西 健治：異なる応力作用下における鋼部材接着接合の力学性状に関する研究，土木学会年次学術講演会概要集，pp.495-496，Vol.62，2007.9.