# (5) 複合応力を受ける接着接合部の静的強度 の評価に関する実験的検討

清野 久美子1・タイ ウィサル2・中村 一史3・堀井 久一4

<sup>1</sup>学生会員 東京都立大学 大学院 博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1) E-mail: kiyono-kumiko@ed.tmu.ac.jp

<sup>2</sup>宇都宮大学 助教 社会基盤デザイン学科(〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町 350) E-mail: vthay@cc.utsunomiya-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京都立大学 大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1) E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 コニシ株式会社 大阪研究所 研究開発第4部(〒538-0053 大阪市鶴見区鶴見4-7-9) E-mail: horii-hisakazu@bond.co.jp

近年,腐食や疲労により損傷が生じた鋼構造物の補修・補強方法として,接着接合部のニーズが高まっ ている.しかしながら接着接合部の静的強度を評価する標準的な方法はなく,試験方法と試験データの蓄 積が必要となっている.本研究では複合応力下での鋼部材の接着接合部の静的強度を評価するための簡便 な試験方法の開発を目的として,試験装置を設計・作製した.本試験方法では,突合せ接着された中空円 筒形の試験片に対して引張力とトルクを載荷することで複合応力を与え,これらの荷重は手動で載荷でき る構造とした.試験結果から,接着剤の弾性係数は参照値より若干高く評価されること,接着剤強度の相 関関係は直線に近い包絡線になることが示された.さらに,垂直応力の比率が大きいほど強度が小さくな り,ばらつきも大きくなることが確かめられた.

Key Words: adhesive bonding, combined stress, cohesive failure, steel member, repair and strengthening

# 1. はじめに

我が国では、1960年代後半からの高度経済成長期に建 造された橋梁をはじめとする多くの構造物は建設後50年 以上が経過し、損傷が多数報告されている.現在、それ らの損傷が生じた鋼構造物に対して行われる補修方法と して、一般に高力ボルト接合や溶接接合が適用されるが、 接着接合も適用され始め、その補修・補強のニーズが高 まっている.しかしながら、実績が少ないこと、接着強 度にばらつきが大きく、その原因も解明されていないこ とが挙げられ、接着接合による補修・補強が普及する中 で、接着強度の標準的な評価方法がなく、試験方法も統 ーされていないことは大きな課題といえる.

土木学会から発刊された「FRP 接着による構造物の補 修・補強指針(案)」では、鋼板と当て板の接着接合部 における強度の評価方法として4つの試験方法が提案さ れている<sup>1)</sup>.また、引張力を与える角度を変えることで 複合応力を与える試験 <sup>2)~5</sup>,本研究と同様に中空円筒試 験を用いた試験 <sup>0~7</sup>などが提案されている.しかしなが ら,これらの試験方法には,構造的な応力集中や特別の 装置を必要とすることなどの課題がある.

そこで本研究では、複合応力を受ける鋼部材の接着接 合部の静的強度について、簡便な試験方法を提案する. JISK 6868-1<sup>9</sup>を参考に、治具や試験体の形状を、FEM に より解析を行って設計した. 突合せ接着接合を行った円 筒に対して、多軸試験装置など特殊な試験機を用いず、 手動で引張力とトルクを加え、垂直応力とせん断応力の 複合応力を与える構造とした. 開発した試験装置を用い て、複数の応力比の載荷を行い、理論値や既往の強度試 験の結果と比較することで、提案する試験方法が複合応 力を受ける鋼部材の接着接合部の静的強度の評価に適用 できるかどうかを検討した.

# 2. 接着接合部の複合応力を考慮した試験方法

#### (1) 既往研究による検討事例と課題

まず,現在土木学会では,鋼板と当て板の接着接合部 における強度の評価方法について,(a)片面に当て板が接 着された鋼板の曲げ試験,(b)ダブルストラップ接合部の 引張試験,(c)両面に当て板が接着された鋼板の引張試験, および(d)シングルラップ接合部の引張試験の4つを試験 方法として提案している<sup>1)</sup>.試験方法の概略図を図-1に示 す.これらの試験では鋼板に接着用樹脂材料で当て板を 接着することで作製した供試体に対し,評価対象の作用, 破壊が想定される接着用樹脂材料の応力状態や接着剤に 生じる垂直応力の, せん断応力での応力比(の, / te)に応じ て供試体の寸法や試験方法を変更する必要がある.

また,文献2)~5)では複合応力の条件を,引張力を与え る角度によって変化させる試験方法を提案している.例 として,文献5)の試験方法の概略図を図-2に示す.これら の試験方法では,図-3に示すような応力状態となり,継 手先端にせん断応力が集中するという問題が生じる.

継手先端に応力集中が生じるという問題を解決した試 験方法としては、文献6)、7)で提案されているものがある. 中空円筒状の試験体に突合せ接着を行い、引張力とトル クを与えることで複合応力を生じさせる構造で、2つの力 を与えるためには二軸試験機が必要となる. 試験体の加 工が容易であり任意の応力比を生じさせられる試験方法 であるが、大規模な試験装置を必要とすることが問題点 として挙げられる.





図-2 文献 5)における試験方法 5)



図-3 接着剤の応力状態<sup>8)</sup>

このように接着接合の強度評価方法は統一されておら ず、土木学会の提案する試験方法の場合も、複数の応力 条件を設定するためには試験方法や供試体の寸法を変化 させる必要があるという問題がある.よって、端部での 応力集中がなく、同一の試験方法で複数の応力条件につ いての載荷が可能で、二軸試験機等の大規模な試験装置 を必要としない簡便な試験方法が求められる.そこで本 研究では、文献6)、7)の試験方法を参考に、JIS K 6868-1<sup>9</sup> に準拠した円筒形の形状を採用し、大規模な装置を使用 せず手動で載荷できる試験方法を開発することとした.

#### (2) 試験方法の検討

本研究の目的は、簡便な試験方法の提案であるため、 PC鋼材の緊張に用いられるセンターホールジャッキお よび太径ボルトの締結に用いられるパワーレンチを併用 することで、突合せ接着された中空円筒形試験体に対し て、手動で複合応力を与える載荷する方法を検討した.

図-4に,試験体および試験装置の概略図を示す.まず 引張力の載荷はセンターホールジャッキとダイセット

(金型を精密に上下運動させるために用いられる治具) を組み合わせる構造とした.ダイセットの可動部の間に スペーサとなる鋼板を挟み込み,並進運動を拘束した状 態で,一方がダイセットに加工した孔に引っ掛かる形状, もう一方が長ボルトと組み合わさる形状(雌ねじを加工) である試験体を,接続した長ボルトをセンターホールジ ャッキで緊張することで載荷する.

次に、トルクは、引張力と反対側から試験体に載荷す る構造とした.試験体の一方はダイセットの四角形の孔 に合わせた四角柱、もう一方は円柱でパワーレンチが接 続する孔を明けた形状とすることで、四角柱側は回転が 拘束され、円柱側からトルクが載荷できる.



## 3. 試験装置の設計・製作

#### (1) 試験装置, 試験体の設計

試験装置のダイセット等は試験体に合わせた形状にす るため、まず試験体の寸法を検討する過程を示す.

中空円筒形の試験体の外径,内径は,JISK 6868-1<sup>9</sup>(接着剤 - 構造接着のせん断挙動の測定 - 第1部: 突合せ接合中空円筒ねじり試験方法)を参照した.文献 8)では,試験体寸法の推奨値は A~C の3種類提示されている. そこで,本研究で用いる載荷装置(センターホールジャッキ: ENERPAC RCH202(最大引張力: 200kN),パワーレンチ: TONE 強力パワーレンチ P600A(最大トルク:6000N・m))の能力,および文献 8)で提示された接着剤(コニシ E258R)の主応力 110.7 N/mm<sup>2</sup> から破断まで載荷が可能な最大寸法を計算し,外径 36mm,内径30mmのAを採用することとした.計算には,式(1),(2)を用いた.

$$\sigma_y = \frac{P}{\pi (r_0^2 - r_i^2)} \tag{1}$$

$$\tau = \frac{2}{\pi} \frac{Tr_o}{r_0^4 - r_i^4}$$
(2)

ここに,

 $\sigma_{y}$ :垂直応力 (N/mm<sup>2</sup>) P:引張力 (N)  $r_{0}$ :中空円筒の外側の円の半径 (mm)  $r_{i}$ :中空円筒の内側の円の半径 (mm)  $\tau$ :せん断応力 (N/mm<sup>2</sup>) T:トルク (N・mm)

試験体の高さは、汎用有限解析プログラムである Msc. Marc/Mentat2019を用いた FEM 解析によって検討を行った. 表-1 に、解析に用いた材料特性値を示す.3種類の高さの寸法を設定し、図-5のようなモデル1~3を作成した.引張力は試験体上面の各節点に対して集中荷重として載荷し、トルクはリンク機構(RBE2)を用いて試験体上面の各節点と試験体上部に追加した節点を接続した上でその節点に集中荷重として載荷した.また、試験体下面の全節点の変位を0と指定することで拘束条件を与えた.要素サイズは、接着剤層および接着剤に面する鋼材(高さ1mm)は回転方向に1°ずつ360分割、高さ方向に0.1mmずつ分割した.接着剤層に面していない鋼材の部分は回転方向に5°ずつ72分割、高さ方向に1mmずつ分割した.図-7に、境界条件を含む解析モデル図を示す.

このように作成したモデルに対して,引張力のみを載 荷する場合,引張力とトルクを載荷する場合,トルクの みを載荷する場合それぞれの接着剤内部に生じる応力を 理論値と比較することで,試験体に必要な高さを選定す る.引張力およびトルクの載荷の組合せは実際に試験で

<b>図-1</b> 材料物性值					
部材	項目	値			
<b>'</b>	弹性係数(kN/mm <sup>2</sup> )	3.6			
按有別	ポアソン比	0.3			
鋼材	弹性係数(kN/mm <sup>2</sup> )	205			
	ポアソン比	0.3			





図-6 解析モデル図赤枠部の拡大図



図-7 境界条件を含む解析モデル図

<b>表-2</b> 載荷条件							
載荷条件名	Т	TS1	TS2	TS3	S		
応力比 <i>σy/τ</i>	$\infty$	1.88	1.05	0.73	0.00		
引張力 (kN)	137.7	111.9	87.2	70.4	0.0		
トルク (N・m)	0.0	1818.8	2544.3	2936.6	4200.7		

検討する応力比として,最大主応力を先述の通り 110.7 N/mm<sup>2</sup>としたときの破断に必要な荷重を与える.複合応 力の応力比は文献 8)に記載されている「鋼板と当て板の 接着接合部における強度の評価方法(案)に基づく評価 事例」の結果と比較できるように選定した.表-2に,応 力比とともに載荷条件を示す.なお,TS2 は実験の都合 で省略した.

以上の条件で解析を行い, 接着剤内部に生じる垂直応

カ, せん断応力, 主応力を比較する. 解析結果は, それ ぞれの載荷条件で類似の傾向であるため, 代表例として 載荷条件 TS1 の結果を示す. 図-8 に, 載荷条件 TS1 にお ける接着剤内部の応力の比較をそれぞれ示す. なお, 横 軸の「円筒中心からの距離」は, 円筒の中心軸から水平 方向の座標で, 図-7 の X軸である.

以上の解析結果から,試験体の中空円筒部分の高さは 50~100mm では接着剤内部に生じる応力に差異はない ため,扱いやすいコンパクトな大きさであること,ひず みゲージの設置に十分なスペースが確保できることを考 慮し,長さ 50mm を採用して,設計することとした.

次に、外径、内径、高さが決定した試験体のモデルを 用いて、作用応力を評価するために設置するひずみゲー ジの位置を検討する.ひずみゲージによる計測値から作 用応力を評価するため、解析では鋼材のひずみが理論値 に近い値となる位置を選定する必要がある.このとき、 材料物性値は、試験体の高さの検討に用いた解析と同様 であり、モデルは実際の試験体と近い形状で作成したも



(a) 接着剤内部の垂直応力の比較



(b) 接着剤内部のせん断応力の比較



図-8 載荷条件 TS1 における接着剤内部の応力の比較

のを用いた(図-9).

境界条件は、実際の載荷に近くなるように節点等を選 択し、変位指定についても試験体がダイセットの孔には め込まれ、回転や引張方向に拘束されるという構造が再 現できるように解析を行った.境界条件およびサーフェ スの設定を図-10 および図-11 に示す.

以上の条件で解析を行い、中空円筒部の鋼材表面について垂直ひずみおよびせん断ひずみを複数節点で抽出し、



図-9 ひずみゲージ貼り付け位置選定の解析モデル図







図-11 解析モデル図(下部)



その値から引張力を逆算した値と実際に載荷した外力 (引張力およびトルク)を比較することで,ひずみゲー ジを設置する適切な位置を選定する.図-12 に,ひずみ 値から同定した外力の比較を示す.なお,横軸の「高さ」 は,図-9のZ軸方向の位置を,トルクの作業側を起点と して示している.

解析結果より, せん断応力は高さ方向に一定であるた め, 垂直応力に着目し, 最も引張力を正確に計測できる 位置として, 高さ 19mm, 58.4mm(接着剤厚さを含めた 高さ)に, 3 軸ひずみゲージを 4 箇所ずつ計 8 箇所に設 置することで, ひずみゲージが一部測定できなかった場 合も他の箇所で補完できるようにした.図-13 に, 3 軸ひ ずみゲージの設置位置を示す.なお,外力の計測は,検 証の結果,高さ 19mmの位置のみで十分であったため, 4 箇所で計測することとし,その箇所を,図-12 に破線で 示している.



図-13 3軸ひずみゲージの設置位置

#### (2) 試験装置, 試験体の製作

図-14 に,設計した載荷方法や試験体の寸法から製作 した試験装置の組立図を示す.

次に,試験体の接着方法を示す.表面処理,接着剤の 塗布,接合,養生,仕上げの手順で行った.試験体の形 状が円筒であるため,V字型マグネットブロックに固定 することでずれが少ない接合を行った.また,この際接 着剤の厚さの調整には直径 0.4mm のガラスビーズを用 いた.

#### (3) セットアップ

セットアップは装置の構造,組合せにより,以下の順 序で行う.

a) 試験体とベアリングのセット

接着した試験体をダイセットの孔に差し込む.この とき、試験体はまだ回転できる状態である.

- b) ひずみゲージとデータロガーの接続
- c) 接着剤のせん断変形の計測に用いるブリッジの接着
- d) 試験体の固定

回転を拘束するための四角柱の治具を差し込む.

e) 固定用鋼板のセット ダイセットの可動部を拘束するための鋼板を取り付 ける.

f) 引張力載荷装置のセット(図-15)

g) トルク載荷装置のセット(図-16)



図-14 試験装置の組立図



図-15 引張力を載荷する部分のセットアップの様子

図-16 トルクを載荷する部分のセットアップの様子

## 4. 試験結果と考察

#### (1) 複合応力を考慮した接着接合部の力学特性

ー軸ひずみゲージで計測した垂直ひずみおよびクリッ プ型変位計を用いて計測したせん断ひずみから求めた応 カーひずみ曲線を図-17,18にそれぞれ示す.また,表-3に実験結果に基づいた弾性係数を示す.

これらの結果から、文献 1)の参照値である弾性係数 E=3600MPaと比較すると、ほとんどの試験で弾性係数が 想定より大きいことが確認された.ポアソン比を 0.3 と したときのせん断弾性係数 G=1385MPa との比較につい ても、同様に想定より大きいことが確認された.弾性係 数が大きく評価される原因としては、接着剤層の円筒外 縁部に生じる応力が小さいことが考えられる.試験体の 設計の際に用いた解析で、接着剤層の円筒外縁部では、 垂直応力が一様に分布すると仮定した場合の理論値と比 較して約 83%の値であった.解析値と同様の応力分布で ある場合、求められる弾性係数は表-4のようになるため、



図-18 せん断応力とせん断ひずみの関係(せん断方向)

表-3 🏹	設計活荷重載荷時の最大	•	最小ひずみ
-------	-------------	---	-------

載荷条件	弹性係数 E(MPa)	せん断弾性係数 G(MPa)
Т	4362	-
TS1	4611	2323
TS3	4871	2612
S	-	2034
参照值1)	3600	1385

表-4 円筒外縁部の応	円筒外縁部の応力減少を考慮した弾性係数						
載荷条件	Т	TS1	TS3				
弾性係数 E(MPa)	3620	3827	4043				

弾性係数が大きく評価される点については円筒外縁部で の応力が小さいことが原因と考察した.一方,せん断弾 性係数については,FEM解析で求めた試験体断面に生じ るせん断応力は理論値とほぼ一致していたため,本試験 方法では接着接合部のせん断弾性係数が若干高く評価さ れると考えられた.

#### (2) 強度相関関係と破壊形式

表-5に、試験から求めた破壊強度および最大主応力の 計測結果を示す. 表から, 純粋な引張力またはトルクを 載荷する場合(載荷条件 T,載荷条件 S)であっても載 荷していない方向への応力が生じること,載荷条件 TS1 では他の載荷条件に比べて強度が低いことが確認された. また、載荷条件 TS1 では破壊形式が界面破壊となること が多く,空隙等の接着不良による強度への影響も大きか ったため、垂直応力の比率が高い複合応力下では強度が 低くなる傾向があるといえる.また、最大主応力の平均 は文献 8)の参照値(110.7MPa)よりかなり小さくなり, 34.7MPa となった. これは、文献 8)と本研究では、最大 荷重時のひずみの評価方法が異なるためであると考えた. 文献8)では、ひずみの値がゼロになる点を、本研究では ひずみが最大となる点を破壊時荷重としているため、本 研究での破壊時荷重および破壊強度が小さくなったと考 えられる.

次に、これらの値から与えられる破壊時のせん断応力 と垂直応力の相関関係を図-19 に示す.また、図中には 式(3)に、最大主応力の平均(34.7MPa)を σ<sub>pe</sub>として代 入したときの破壊包絡線、および式(4)に示す強度評価 式において、最小二乗法でカーブフィットさせた破壊包 絡線をそれぞれ併記する.

$$\sigma_{pe} = \frac{\sigma_{ye}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ye}}{2}\right)^2 + \tau_e^2}$$
(3)

 $\left(\frac{\sigma_{y}}{\sigma_{yu}}\right)^{m} + \left(\frac{\tau}{\tau_{u}}\right)^{n} = 1$ (4)

ここに,

 $\sigma_{pe}$  : 主応力 (N/mm<sup>2</sup>)



- : 垂直応力 (N/mm<sup>2</sup>)  $\sigma_{ve}$
- $\tau_{_{o}}$ : せん断応力 (N/mm<sup>2</sup>)
- :各試験体の破壊時の垂直応力 (N/mm<sup>2</sup>)  $\sigma_v$
- : 垂直(引張) 強度(N/mm<sup>2</sup>)  $\sigma_{vu}$
- :各試験体の破壊時のせん断応力 (N/mm<sup>2</sup>) τ
- : せん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)  $\tau_{\mu}$

まず,図-19から,載荷条件TおよびTS1において, 強度のばらつきが大きいことが確認された、この状態は 既往の研究でも言及されており、本研究同様に中空円筒 状の試験体を用いた試験を行った文献 6)では、複合応力 の応力比 ( $\sigma_r/\tau$ ) が大きいほど強度のばらつきが大きいと いう結果が示されている.

次に、それぞれの破壊包絡線の推定精度について考察 する. 式(4)の数値は、それぞれ $\sigma_{u}$ =34.9、 $\tau_{u}$ =37.9、m=1.2、 n=1.1 であった.本研究ではσ<sub>u</sub>および τ<sub>u</sub>にはそれぞれ載 荷条件 TおよびSの主応力を代入し、最小二乗法でカー ブフィットさせることで m, n を求めた. 最大主応力か ら求めた破壊包絡線については、強度が比較的高い載荷 条件Sと強度が低いTS1 が包絡線と若干外れた結果とな るのに対し、強度評価式から求めた破壊包絡線はどの載

مليك رامك	引張	引張強度 せん		せん断強度		最大主応力	
載荷							
条件	値	平均值	値	平均值	値	平均值	係数
	44.0		1.0	1(	44.0	34.9	0.145
	35.9		1.0		35.9		
	40.7		2.6		40.9		
	35.0		1.0		35.0		
т	25.9	24.9	0.4		25.9		
1	32.1	34.0	1.8	1.0	32.2		
	37.7		1.3		37.7		
	36.2		0.8		36.2		
	30.7		1.5		30.7		
	29.7		4.4		30.3		
	25.4		13.7		31.4		30.0 0.151
	26.2	24.9	11.7	12.3	30.7	30.0	
	16.2		8.8		20.1		
TS1	30.5		13.5		35.6		
27.	27.4		11.9		31.8		
	22.8		12.2		28.1		
	25.7		14.2		32.0		
	15.8		24.1	25.2	33.2	35.6	0.112
	16.7		21.5		31.4		
	13.3	17.7	24.4		32.0		
	18.2		19.9		31.0		
TS3	21.3		23.1		36.0		
-	18.2		30.0		40.4		
	16.6		24.4		34.1		
	16.5		29.8		39.2		
	22.4		29.2		42.5		
	1.5	0.7	37.3	37.5	38.0	37.9	0.106
S	0.0		35.4		35.5		
	4.7		40.3		42.7		
	0.3		38.0		38.2		
	-0.2		29.7		29.6		
	0.5		40.1		40.4		
	-1.9		41.9		41.0		

**表-5** 接着接合部の強度 (N/mm<sup>2</sup>)

荷条件についても適切な相関関係を表していることが読 み取れる.相関係数で比較すると、最大主応力による包 絡線で 0.895, 強度評価式による包絡線で 0.932 となり, 強度評価式による包絡線の方が相関は良好であるという 同様の結果となった.

また, m=1.2, n=1.1 という数値はかなり小さく, 直線 に近い包絡線を表している.これは、載荷条件 TS1 のよ うな引張力の比率が大きい複合応力下では垂直応力が小 さくなることが影響していると考えられる.

次に、試験方法について課題となる点を考察する.図 -13 のように設置したひずみゲージの計測値の平均を接 着剤のひずみ特性の検討や強度評価に用いたが、計測値 が計測位置によってずれる試験結果が多く確認された. この原因として、接着剤層の厚さが均一でないことが考 えられた. 接着剤層の厚さは実験当初にノギスで計測し た値ではおおよそ 0.4mm であったものの計測精度が十 分でなく, 改めてデプスゲージ(最小表示量: 0.001mm) で接着前の試験体の高さおよび接着後の試験体と接着剤 の合計の高さを計測し、接着剤層の厚さを計算したとこ ろ、最も差が大きい部分で約0.1mmの厚さの差異が生じ ていたことがわかった. 接着接合時の固定養生に、V字 型マグネットブロックを用いたが、不十分であるといえ た.検討の結果、上部からさらに固定具を追加(図-20) すれば、均一に接着することができることが確かめられ た. 接着方法の改良前と改良後の計測結果の例を表-6 に 示す.ゲージ位置の1は図-20の上部,3は下部である. この場合、4 箇所のひずみゲージでよりほぼ同じ値が計 測されたため、 今後の実験では、 強度のばらつきを改善 するための接着方法の検討が重要であるといえた.

# 5. まとめ

本研究では、複合応力を受ける鋼部材の接着接合部の 簡便な静的強度評価方法の提案し、実際に行った試験結



改良後の接着の様子

表-6 円周4箇所それぞれの接着剤層の厚さ(mm)

ゲージ位置	1	2	3	4	平均值	max-min
改良前	0.508	0.419	0.455	0.508	0.473	0.089
改良後	0.419	0.426	0.417	0.399	0.415	0.027

果から接着接合部のひずみ特性の検討および破壊強度と 強度の相関関係を検討した.その結果,以下のことがい えた.

- (1) 円筒状の試験体の端部の形状,反力を受けるダイセットへの加工を行って,一般的なセンターホールジャッキとパワーレンチを併用することで,複合応力の載荷方法を提案できた.
- (2) 円筒外縁部での垂直応力が理論値の約 83%に減少 するとして補正を行った場合,接着剤の垂直ひずみ はおおむね参照値に近い特性を示すことが確かめ られた.
- (3) 提案した載荷装置を用いて評価された接着強度は、 垂直応力(引張力)の比率が大きい複合応力下では、 強度が低いこと、また、その影響により、強度相関 関係は、直線に近い包絡線となることがわかった.
- (4) 既往の研究と同様に, 複合応力の応力比(σ,/τ)が 大きいほど強度のばらつきが大きいことが確かめ られた.

なお、本研究では、引張力の偏心作用がそのばらつき の要因の一つとして考えられた. 自重の影響で試験体接 着時に接着剤の厚さに偏りが生じることが引張力の偏心 に影響があり、接着方法の修正が改善につながると考え られる. 強度のばらつきの要因が明らかになっていない ことについては、他の複合応力の応力比について試験を 行う、他のパラメーターについて比較する(養生の条件 等)といった追加の検討が必要であり、今後の課題とし たい.

#### 参考文献

- 複合構造委員会編: FRP 接着による構造物の補修・補強指 針(案),複合構造シリーズ09,土木学会,2018.7
- Dos Santos, D.J., and Batalha, G.F.: Failure Criterion for Adhesively Bonded Joints Using Arcan's Experimental Method, Polímeros, 24(4), pp.441-445, 2014.
- Jiang, X., Qiang, X., Kolstein, H., and Bijlaard, F.: Analysis on Adhesively-Bonded Joints of FRP-steel Composite Bridge under Combined Loading Arcan Test Study and Numerical Modeling, Polymers, 8(18) 2016.
- 4) Dufour, L., Bourel, B., Lauro, F., Haugou, G., Leconte, N., and Carrere, N.: Failure stress criterion for adhesively bonded joint at different strain rates by using dynamic Arcan test device, Proceedings of the European Physical Journal Conferences 94, 01024\_1-01024\_5, 2015.
- Cognard, J.Y., Davies, P., Gineste, B., Sohier, L.: Development of an improved adhesive test method for composite assembly design, Composites Science and Technology, 65, pp.359–368, 2005.
- Liu, M., and Dawood, M.: Experimental study and probabilistic bond strengths of adhesively-bonded steel butt joints under mixed-mode loadings, Engineering Structures, 172, pp.163–171, 2018.
- Spaggiari, A., Castagnetti, D., and Dragoni, E.: A design oriented multiaxial stress-based criterion for the strength assessment of adhesive layers, Composites Part B, 157, pp.66–75, 2019.
- 9) JISK 6868-1, 接着剤 構造接着のせん断挙動の測定
  第1部: 突合せ接合中空円筒ねじり試験方法

(Received September 10, 2021)

# EXPERIMENTAL STUDY ON EVALUATION OF STATIC BONDING STRENGTH UNDER COMBINED STRESS

# Kumiko KIYONO, Thay VISAL, Hitoshi NAKAMURA, and Hisakazu HORII

Recently, there has been an increase in demand for adhesive joints as a method for repairing and strengthening steel structures damaged by corrosion and fatigue. However, the method for evaluating the static strength of the adhesive joint is not unified, and it is necessary to develop the test method and to accumulate the test data. Therefore, in this study, the adhesive joint of the steel member under combined stress is used. A test device was designed and manufactured to develop a simple test method for evaluation of the static strength. In this test method, a combined stress is applied by applying as the tensile force and torque using a butt-joined steel tube specimen, and these loads can be manually loaded. From the test results, it was shown that the elastic modulus of the adhesive was evaluated slightly higher than the reference value, and that the correlation of the adhesive strength was an envelope close to a straight line. It was also confirmed that the larger ratio of normal stress, the lower strength and the larger variation.