# 複合応力を受ける接着接合部における 静的強度のばらつきの改善と評価について

清野 久美子1・中村 一史2・タイ ウィサル3・堀井 久一4

1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>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>3</sup>正会員 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>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

鋼構造物の補修・補強に FRP 接着工法を適用する場合,設計で想定される接着強度を評価する必要があ る.提案されている複合応力下の試験方法では,構造実験を伴い接着端部で応力が集中すること,共通の 形状の試験体で複数の条件の試験ができないこと,大掛かりな載荷装置を必要とすることなどの課題があ る.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の評価方法の開発を目的として, 過年度に設計・製作した試験装置を改良し,接着強度の評価を行った.突合せ接合した鋼製円筒形の試験 体において,過年度に採用した接着方法では厚さを均一に接着することが困難であった.そこで,精緻に 接着層厚を計測するとともに,接着層厚を簡便かつ均一に制御できる治具を開発した.その結果,接着層 厚を 0.1mm 以下で制御することができること,接着強度および破壊形式のばらつきが改善され,接着強度 も高く評価され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

断面欠損,き裂などの損傷が生じた鋼構造物では,一 般的に高力ボルト接合や溶接接合が補修方法として採用 されるが,接着接合も適用され始めている.しかしなが ら,適用実績が少ないことや接着強度のばらつきが大き いこと,接着強度の標準的な評価方法がなく試験方法が 統一されていないなど,多くの課題も残されている.

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 異なる組合せの複合応力を与える試験<sup>2)、5)</sup>、本研究と同 様に中空円筒の鋼材を突合せ接着した試験体を用いた試 験<sup>6)~8</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な装置を必要と することなどの課題がある.

そこで過年度には、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した<sup>9</sup>. この試験方法では、突合せ接着接合を行った中空円筒の 鋼材に対して、多軸試験装置など特殊な試験機を用いず、 既存の加力装置(センターホールジャッキおよびパワー レンチ)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。その結果、複合応力 を考慮した接着接合部の静的強度を評価できることが示 されたものの、垂直応力の割合が大きい載荷条件につい て強度のばらつきが大きいなどの課題が残された.強度 のばらつきの要因として、接着接合部の厚さの可能性が あることがわかった.

本研究では、過年度に提案した試験方法について接着 層の厚さ計測方法および接着方法を改善することで、よ り精緻な接着と試験体の作製を試みた.また、過年度と 同様に複数の応力比の複合応力で載荷を行い,過年度の 実験結果と比較するとともに,接着接合部の静的強度の より精緻な評価ができるかどうかを検討した.

# 2. 円筒形突合わせ接着継手試験体の作製方法

#### (1) 既往の研究における問題点

過年度に行った研究において、円筒形突合わせ接着継 手試験体の接着にはV字型のマグネットブロックを用い た.図-1に、接着時の状況を示す.この時、中空円筒形 の鋼材同士は、突き合せた状態でマグネットにより固定 されているが、突き合わせ部が重力により鉛直下向きに わずか下がることで、接着層の厚さは上部が厚く下部が 薄くなり、厚さが不均一な状態になる.また、過年度の 研究では、接着層の厚さは、計測精度が 0.05mm のノギ スで簡易的に計測していた.本研究では、より精密に計 測するため、計測精度が 0.001mm であるデプスゲージを 適用した.いずれの方法でも、接着前に鋼材のみの寸法 と接着後の鋼材と接着剤をあわせた寸法の差で接着層の 厚さを計測した.表-1、図-2 に、計測結果の一例と計測 位置の概略図をそれぞれ示す.この結果から、計測位置



図-1 過年度における接着時の状況

	表-1	接着層の厚さの計測結果
+		

計測位置	1	2	3	4	平均
接着層の 厚さ (mm)	0.575	0.476	0.415	0.586	0.513



図-2 厚さの計測位置の概略図(断面図)

のうち,上部にあたる1と下部にあたる3で0.171mmの 厚さの差があることがわかった.また,接着時に直径 0.4mmのガラスビーズを挟み,接着層の厚さを管理して いるものの,平均で0.512mmであったため,ガラスビー ズより0.1mm以上厚く接着されていたことがわかった.

## (2) 接着層の厚さ管理と均一化の方法

前節から、円筒形の鋼材を水平に配置、固定して接着 する方法では自重により傾き、接着層の厚さが不均一と なること、挟み込んだガラスビーズの径より厚くなるこ とがわかった.そのため本研究では、①試験体を水平方 向にクランプで締め付ける方法と、②試験体を鉛直方向 に重ね、より精緻に固定することができるように設計し た固定治具を用いた方法で試験体を作製した.図-3、図 -4 に、2 つの接着方法を示す.図-3 は、これまで使用し たV字型のマグネットブロックを上下にはめ込みながら 水平方向はクランプによって締め付け、固定する構造で ある.図-4 は、試験体と同じ形状で内側をくり抜いた円 筒形のアルミ材で鋼材を覆い、水平方向はスプリング付 きのキャッチクリップで締め付け、鉛直方向には自重に よって固定される構造である.

## (3) 接着層の厚さの計測結果と考察

新しい接着方法を用いた場合の接着層の厚さの計測結



図-3 クランプと上下V字型のマグネットブロックを併用 した接着方法



図4 鉛直方向に重ね側面から拘束する接着方法の概念図

表-2 接着方法改善後の接着層の厚さの計測結果

計測位	置	1	2	3	4	平均
計測値	$\bigcirc$	0.419	0.426	0.417	0.399	0.415
(mm)	2	0.383	0.419	0.417	0.414	0.408



果の例を表-2に示す(クランプを使用した場合を①, 鉛 直方向に重ねた場合を②とする). どちらも最も厚い計 測値と最も薄い計測値の差が0.1mm以下となったが, ク ランプを用いる方法では締付けが強いと厚さが不均一に なるなど調整が難しく, 固定する際に微調整を必要とし ない, 鉛直方向に重ねる方法で接着することとした.

## 3. 複合応力を考慮した載荷方法と実験シリーズ

## (1) 試験装置の構造と概要

複合応力を考慮した載荷には、過年度の研究<sup>9</sup>と同様 の試験装置を使用した. 突合せ接着された中空円筒形試 験体に対して、センターホールジャッキで引張力を、パ ワーレンチでトルクを加えることで手動で複合応力を与 える構造である. 図-5 に、試験体および試験装置の概略 図を示す.

試験体は端部の形状が異なる 2 つの中空円筒形の鋼材 を突合せ接着したものである.接着接合部から 50mm の 長さが外径 72mm,内径 60mm の中空円筒形であり,そ の先は中実となっている.一方の鋼材(図-5(a)の右側) は中空円筒部分より径が大きい円柱形状で,端部にはパ ワーレンチの差し込角が加工されている.もう一方の鋼 材(図-5(a)の左側)は四角柱で,長ボルトが接続でき るように雌ねじを加工している.

€件	
	भ

載何余忤名	1	151	183	8
応力比 <b>σ<sub>y</sub>/τ</b>	$\infty$	1.88	0.73	0.00

表-4 材料物性值

部材	項目	値
<b>'</b>	弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )	3.6
1女 1月11	ポアソン比	0.3
公园十十	弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )	205
亚叫什么	ポアソン比	0.3

続いて載荷の仕組みについて説明する.引張力は,図 -5(a)の右側がダイセットに開けられた孔にはめ込まれ 並進運動が拘束された状態で,左側に接続された長ボル トがセンターホールジャッキによって引っ張られること で作用する.トルクは,引張力と反対側から載荷される. 図-5(a)の左側は四角柱であるためダイセットに開けら れた孔にはめ込まれたとき回転方向に拘束され,その状 態で円柱状の右側に接続されたパワーレンチからトルク が載荷できる構造である.

載荷はロードセルを用いて引張力を、トルク計を用い てトルクを計測しながら行う.このとき、引張力と垂直 応力およびトルクとせん断応力の関係は、式(1)、(2)で 表される.

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

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

ここに,

**σ**<sub>y</sub> : 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<sub>i</sub> : 中空円筒の内側の円の半径 (mm)

τ : せん断応力 (N/mm<sup>2</sup>)

T : トルク (N・mm)

#### (2) 試験条件

載荷条件は,過年度と同様に,垂直応力のみ与える T, せん断応力のみ与える S, それぞれ異なる複合応力を与 える TSI および TS3 である. 表-3 に,それぞれの応力比 を示す.

試験体に使用した鋼材(S45C),接着剤(コニシ: E258RS)も過年度と同様であり,表-4 に,材料物性値 を示す.このとき,接着剤の材料物性値は文献1)を参照 している.

また,過年度では,重ね配置の3軸ひずみゲージを用 いて鋼材表面の垂直ひずみを0°,45°,90°の3方向で計 測し,ロゼット解析を用いて載荷時の引張力およびトル クを算出していた.本研究では,平面配置の3軸ひずみ



図-6 3軸ひずみゲージの設置位置

ゲージを使用した. 平面配置の3軸ひずみゲージは,主 に引張力を与える際に生じる曲げの影響を低減するため に採用した. このとき,ひずみゲージは図-6に示すよう に円周上に90°ずつずらし,4か所に設置する. 過年度の 研究と同じ位置で,外力と式(1),(2)から求めた鋼材表 面の垂直応力,せん断応力の値と最も近い値が生じるこ とを有限要素解析を用いて選定した.

# 4. 試験結果と考察

#### (1) 接着層厚さの均一化を図った試験結果

表-5に、試験結果を示す.実施したすべての試験のうち、接着層の厚さが均一(計測した4箇所の厚さのなかで、最大の差が0.1mm以下)であり、破壊形式が凝集破壊であった試験における破壊時の強度およびそれぞれの載荷条件における平均値、変動係数をまとめている.表中の斜線部は、ひずみゲージの不具合で計測できなかったものである.引張強度、せん断強度は破壊時の鋼材表面のひずみと表-4に示す鋼材の材料物性値から垂直応力およびせん断応力を算出した値である.また、最大主応力の算出には、以下の式(3)を用いた.

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

ここに,

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

 $\sigma_{ve}$ :垂直応力 (N/mm<sup>2</sup>)

 $\tau_e$ : せん断応力 (N/mm<sup>2</sup>)

この結果から、複合応力を与える載荷条件 TS1, TS3 では強度が低く、次に垂直応力のみ与える載荷条件 Tが 強度が高く、せん断応力のみ与える載荷条件 S が最も強 度が高いことがわかる.また、強度のばらつきが大きい 載荷条件は TS1, T であり、垂直応力が加わる条件では 比較的ばらつきが大きくなる傾向が見られた.

次に、各載荷条件の試験数と界面破壊が生じた試験数

非社	引張	強度	せん断強度		最大主応力		力
戦何 条件	値	平均值	値	平均值	値	平均值	変動 係数
	36.1		0.9		36.1		
	46.9		0.0		46.9		
	40.0		0.8		40.0		
	43.2		0.0		43.2		
т	42.6	40.0	0.9	06	42.6	40.0	0.094
1	38.7	40.9	0.7	0.0	38.7	40.9	0.004
	40.8		0.6		40.8		
	39.6		0.0		39.6		
	36.1		0.6		36.1		
	46.2		1.0		46.3		
	28.1		14.5		34.3		
	29.1		/		/		
TS1 -	32.8	32.0	19.3		41.7		0.113
	31.4		14.8		37.3	38.2	
	35.0		15.4	15.5	40.8		
	35.7		18.0		43.2		
	35.5						
	23.3		13.1		29.2		
	36.0		16.6		42.5		
	34.7		13.4	39.3			
	20.0		22.3		34.4		
	22.7		24.8		38.6		
	23.9		27.5	25.2	42.0	38.8	0.062
	23.9	22.5	26.2		40.8		
т53	20.8		24.3		36.9		
155	21.3	22.3	22.1	25.2	35.2		
	23.3		26.4		40.5		
	24.7		25.0		40.3		
	22.4		26.0		39.6		
	21.7		27.3		40.2		
	-0.1		45.3		45.2		
	0.6		45.2		45.5		
	0.4		45.0		45.2		1
	-0.1		39.8		39.8		
	0.0		45.5		45.5		
S	-0.1	0.1	46.4	44.1	46.3	44.1	0.045
-	0.3		42.8		43.0		
	0.0		45.7		45.7		
	0.0		42.0		42.0		
	0.0		43.3		43.3		
	-0.1		45.5		45.2		

表-6 各載荷条件での界面破壊の割合

45.5

45.2

0.6

載荷条件名	Т	TS1	TS3	S
全試験数(体)	14	19	12	12
界面破壊の試験数(体)	3	6	0	1
界面破壊の割合(%)	21	32	0	8

を表-6 に示す.この結果から,強度のばらつきが大きい TSI, T で界面破壊が生じる割合が圧倒的に高く,TS3, S ではほぼ凝集破壊であったことがわかる. 接着接合は, せん断応力に強く,垂直応力に弱いという性質がそれら を組み合わせた複合応力にも影響を与えていると考えら れる.

図-7に、破壊時のせん断応力と垂直応力の相関関係を示す.また、図中には式(3)に、最大主応力の平均

#### 表-5 接着接合部の強度(MPa)

(40.6MPa)を  $\sigma_{pe}$ として代入したときの破壊包絡線,および以下の式(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(指数の m, nを算出)求めた破壊包絡線をそれぞれ併記する.

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

ここに,

 $\sigma_v$ :各試験体の破壊時の垂直応力 (N/mm<sup>2</sup>)

 $\sigma_{yy}$ :垂直(引張)強度(N/mm<sup>2</sup>)

- τ : 各試験体の破壊時のせん断応力 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\tau_{\mu}$ : せん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)

式(4)の数値はそれぞれ $\sigma_{ur}$ =40.9,  $\tau_{r}$ =44.1, m=1.0, n=1.3 であった.本研究では過年度と同様に $\sigma_{u}$ および $\tau_{u}$ にそ れぞれ載荷条件 Tおよび Sの主応力の平均を代入し,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.

各破壊包絡線の推定精度について考察する.まず式 (3)の破壊包絡線については,強度が低い載荷条件 TS1, TS3 と強度が高い載荷条件 S がそれぞれ包絡線から外れ, ばらつきが生じた結果となった.一方,式(4)の破壊包 絡線については,いずれの載荷条件でも概ね適切な相関 関係を表しているといえた.実験値(プロット点)と包 絡線の相関係数を比較すると,最大主応力による包絡線

(式(3))で 0.946, 強度評価式による包絡線(式(4))で 0.969 となり, 強度評価式による包絡線の方が相関は良 好であるという結果となった.

## (2) 接着層厚さのばらつきが接着強度に及ぼす影響

過年度の試験結果と比較することで,接着層の厚さを 均一化することによる接着強度への影響を考察する. 図 -7に,破壊時のせん断応力と垂直応力の相関関係を過年 度と本研究の結果を併せて示す.この結果から,本研究 の実験値は,過年度の実験値と比べて,いずれの載荷条 件についても強度が高くなること,また,ばらつきが小 さくなっていることがわかる.

それらを定量的に評価するため、それぞれの載荷条件 での破壊時の主応力(平均)および強度のばらつきをま とめた. 表-7に、それらの結果を示す.まず、破壊時の 主応力はTS3以外は10%以上増加しており、特にTS1は 27%の増加率であった.次に増加率が高いのはTであっ たことから、接着層の厚さを均一に管理することは特に 引張方向の強度に対して影響が大きいことが確認された. これは、前節で述べたように、接着接合は、相対的に垂 直方向の強度が小さい特性が関係していると考えられ、 過年度のように厚さが均一でない場合、接着層が薄い部 分に応力が集中し、その部分から破壊(はく離)すると 考えられた.

強度のばらつきに着目すると、過年度にはすべての載



図-7 破壊時のせん断応力と垂直応力の相関関係





表-7 各研究での破壊時の主応力と強度のばらつき

載荷条件名		Т	TS1	TS3	S
- - - - - - - - - - - - - - - - - - -	過年度	34.9	30.0	35.6	37.9
土/心/J (N1/mmm2)	本研究	40.9	38.2	38.8	44.1
$(1N/mm^2)$	増加率	+17%	+27%	+8%	+16%
変動	過年度	0.145	0.151	0.112	0.106
係数	本研究	0.084	0.113	0.062	0.045

荷条件において変動係数が10%以上であったが、本研究 ではTSI以外は10%未満に改善された. 複合応力を与え る載荷条件であるTSIとTS3では、強度がほぼ等しい値 となったものの、強度のばらつきは、過年度と同様に差 がある結果となった. 同様の実験が行われた文献 8)で は表面粗さによっても式(4)の指数 m, n が変化すること が確認されているなど、複合応力の強度特性に及ぼす因 子を整理することも必要と考えられる.

次に、破壊形式について比較する.図-8に、それぞれ の載荷条件での破断面の一例の写真を示す. 破断面の傾 向として、Tは破断面全体にほぼ一様に接着剤が付着し (図-8(e)), TS1, TS3 は破断面の半分が厚く, 残りは 薄く接着剤が付着する(図-8(f), (g)). また, TS3 は TS1 よりめくれ上がるような形態が多くみられる. S は破断 面全体に、TS3 と同様のめくれ上がるような形態で、接 着剤の付着が確認された(図-8(h)).載荷条件 T, S に ついては過年度においても破断面全体に、ほぼ一様に接 着剤が付着していた(図-8(a), (d))が, TS1, TS3 はまだ らに接着剤が付着していることも多くあった(図-8(b), (c)). しかしながら、本研究においては、TS1、TS3の 破壊形態はほぼ全ての試験体で同じ傾向であった. この ことから、接着層の厚さを均一にすることで破断面の形 態も安定すると考えられる. このような破断面の傾向は 同様の実験を行った文献 6) でも確認されていることか





(c) TS3 (過年度)



(e) T (本研究)



(g) TS3 (本研究) 図-8 破壊形式の比較

ら,接着方法の改善により,破壊形式も安定して制御されているといえた.一方で,前節で述べた通り,TS1 では界面破壊した試験も多くみられたため,凝集破壊が生じた場合の破壊形式はばらつきが改善されるものの,界面破壊が生じることへの改善には影響が少ないことがわかった.

#### (3) 接着接合部の力学特性

本研究では過年度の実験同様、ひずみゲージとクリッ プ型変位計を用いて接着接合部の弾性係数の評価を行っ た.1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 応力-ひずみの関係を、それぞれの載荷条件で求めた弾 性係数の平均に最も近い勾配となった例を選定し、図-9, 10に示す.

文献 1) の参照値である弾性係数 E=3600N/mm<sup>2</sup>を図中 の実線で示し比較している.図より,すべての載荷条件 で,弾性係数は参照値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=1385 N/mm<sup>2</sup>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.過年度の研究でも考察した通り,接着層 の円筒外縁部に生じる応力が小さいことが原因と考えら







(d) S (過年度)

(b) TS1 (過年度)



(f) TS1 (本研究)



載荷条件		弹性係数	せん断弾性係数 G
		$E(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$
т	過年度	4362	-
1	本研究	4803	-
TS1	過年度	4611	2323
	本研究	4597	2557
TS3	過年度	4871	2612
	本研究	3759	2560
S	過年度	-	2034
	本研究	-	2148
参照	3值1)	3600	1385

表-8 各載荷条件で計測した弾性係数の比較

表-9	各載荷条件	で計測した	弾性係数の	変動係数の比較

載荷条件		弹性係数	せん断弾性係数
т	過年度	0.092	-
1	本研究	0.113	-
TC1	過年度	0.289	0.234
151	本研究	0.056	0.154
TS3	過年度	0.197	0.326
	本研究	0.182	0.094
c	過年度	-	0.412
3	本研究	-	0.073

れる. 試験体の設計の際に用いた解析では, 接着層の円 筒外縁部では, 理論値と比較して約 83%の垂直応力が 生じていた. 円筒外縁部で垂直応力が減少する傾向につ いては文献 10)で行われた応力解析でも確認されている. より精緻に評価するためには試験体の寸法や接着剤の材 料物性値によって円筒外縁部に作用する垂直応力がどの 程度低減するかを考慮する必要があると考えられる.

次に,過年度に計測した弾性係数と比較する.表8に, 各載荷条件で算出した弾性係数およびせん断弾性係数の 平均を過年度の値と本研究の値でまとめたものを示す. 過年度においては垂直応力の比率が大きい載荷条件ほど 弾性係数が小さくなる傾向があったが,本研究において はその反対の傾向が見られた.せん断弾性係数について は過年度と大きく異なる結果は確認されなかった.せん 断ひずみの計測はクリップ型変位計を用いて1箇所のみ で行っているため,本研究で進めた接着層の厚さの改善 による影響が小さいと考えられる.

**表-9**に,各載荷条件で求めた弾性係数,せん断弾性係数のばらつきを変動係数で比較したものを示す.載荷条件 *T*の弾性係数以外はばらつきが大きく改善されており,接着層の厚さの均一化は接着接合部のひずみ計測において非常に重要であると考えられる.

# 5. まとめ

本研究では,過年度に提案した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について,接 着方法を改善し接着層の厚さの均一化を行い,過年度の 研究結果と比較,検討した.過年度と同様に破壊強度と 強度の相関関係や接着接合部の力学特性を検討した結果, 以下のことがいえた.

- 円筒形鋼材を垂直に重ねて固定・養生するアルミ 製ジャケットを設計・製作し、適用した.その結
   果、接着層の厚さの差を 0.1mm 以下の均一な状態
   で、接着作業を簡便化することができた.
- (2) 接着層の厚さの均一化によって、接着接合部に応 力が均等に作用することで、各載荷条件での接着 強度が高く評価されること、そのばらつきも改善 されることが確かめられた.特に、垂直応力の占 める割合が大きい載荷条件ではそれらの効果は顕 著であった.
- (3) 接着層の厚さが均一であれば、複合応力を受ける 載荷条件で凝集破壊が生じた破断面の形態が安定 する傾向があるが、界面破壊の抑制には効果がな いことが確かめられた。
- (4) 接着層の厚さの均一化によって、弾性係数、せん 断弾性係数においてばらつきが低減すること、特 にせん断弾性係数で顕著にばらつきが改善される ことがわかった。

なお、本研究では、過年度の研究で課題とした偏心に よる影響を軽減することに成功したが、複合応力を受け る載荷条件で強度がかなり低いことや界面破壊が生じや すいことについては改善できておらず、他のパラメータ ーについて比較する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.
- 杉林俊夫,池上皓三,白鳥 英亮:組合せ応力化の接 着強度におよぼす表面あらさと接着面圧の影響,日 本接着協会誌,14(5), pp.167-172, 1978.
- 9) 清野久美子,タイウィサル,中村一史,堀井和久: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,第14回複合・合成構造の活用に関するシンポジ ウム講演集,5-1-5-8,2021

10) 杉林俊夫,池上皓三,白鳥 英亮:円筒突合せ試験片 による接着強度試験法-1-接着層の応力解析,日本接 着協会誌,17(2),pp.50-59,1981.

(Received August 26, 2022)

# IMPROVEMENT AND EVALUATION OF VARIATIONS IN STATIC STRENGTH OF BONDED JOINTS UNDER COMBINED STRESS

# Kumiko KIYONO, Hitoshi NAKAMURA, Visal THAY and Hisakazu HORII

The test methods for bonded joints under combined stress have the following problems: stresses are concentrated at the edge, which involves structural experiments; multiple loading conditions cannot be tested on a test specimen of common shape; and a large scale loading device is required. In this study, we improved the testing device designed and fabricated in previous study and evaluated the bond strength to develop a simple static strength evaluation method for bonded joints of steel members under combined stresses. It was difficult to bond the butt-jointed the steel tube specimens uniformly in thickness using the bonding method of previous years. Therefore, the thickness of the adhesive layer was precisely measured, and a jig was developed to easily and uniformly control the thickness could be controlled to 0.1 mm or less, that variations in adhesive strength and failure modes were improved, and that adhesive strength was evaluated as high.