

ハイブリッドFRP積層体の支圧強度評価法に関する実験的研究

上山 裕太¹・北根 安雄²・松井 孝洋³・近藤 富士夫⁴・館石 和雄⁵

¹学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)
E-mail:ueyama.yuuta@d.mbox.nagoya-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)
E-mail:ykitane@civil.nagoya-u.ac.jp

³正会員 東レ株式会社 コンポジット技術第1部 (〒455-0024 愛知県名古屋市港区大江町9番地の1)
E-mail:Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

⁴正会員 東レ株式会社 東京本社ACM技術部 (〒103-8666 東京都中央区日本橋室町2-1-1)
E-mail:Fujio_Kondo@nts.toray.co.jp

⁵正会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)
E-mail:tateishi@civil.nagoya-u.ac.jp

本研究は、FRP部材のボルト接合部における支圧特性に関するデータの取得および評価を目的とする。そこで本研究は、強化繊維に炭素繊維とガラス繊維の両方を用いた積層構成の異なる5種類のハイブリッドFRP積層体、および、CFRP積層体、GFRP積層体を対象とし、Mottramらの提案する支圧試験法とピン接合法による2種類の支圧試験を実施し、得られた試験結果の比較を行った。また、各積層体の材料圧縮試験を行うことにより、強化繊維の種類や積層構成によっては、支圧強度が圧縮強度に比べて約50%も低下することを明らかにした。また、強化繊維の種類や積層構成の違いが支圧強度に与える影響を明らかにした。さらに、手締め程度のボルト軸力が支圧強度に与える影響についても検討を行い、ボルト軸力を導入すると支圧強度が大幅に増加することを明らかにした。

Key Words : hybrid FRP, bearing test method, bearing strength, compressive strength, bolted joint

1. 研究背景と研究の目的

近年、高度経済成長期に建設された鋼構造物では建設から 40~60 年経過したことで老朽化が問題となっている^{1,2}。特に鋼橋桁端部は狭間で湿気がたまりやすい部位であるため、著しく腐食劣化が進行した構造物も存在し、今後、現在健全な鋼構造物にも腐食が発生する可能性がある。したがって、腐食劣化が鋼構造物の重大な事故を引き起こす前に、構造物の性能を維持するための補修・補強対策をとる必要がある。

鋼橋桁端部の補修・補強にはこれまで鋼材を使用する場合が多かったが、近年、強化繊維とマトリックス樹脂からなる複合材料である FRP を用いた補修・補強が注目されている。FRP は優れた軽量性と耐食性を有しているため、腐食が問題となりやすい桁端部の補修・補強に適していると考えられる。ただし、FRP を用いた鋼橋桁端部の補修・補強工法の確立はなされておらず、実際の土木

鋼構造物の補修・補強に使用されている事例はまだ少ないのが現状である。また、FRP は材料コストが高いといった課題もあるため、材料生産・施工から維持管理までを含めたライフサイクルコストの削減を追求し、土木構造物の補修・補強に用いられることが望まれる。

そこで本研究では、強化繊維に炭素繊維とガラス繊維の両方を用いたハイブリッドFRPに着目した。炭素繊維は比強度・比弾性率に優れた繊維であり、優れた機械特性を有した繊維である。しかし、材料コストが高いという課題がある。一方、ガラス繊維は炭素繊維に比べて比強度・比弾性率は小さいが、材料コストが低いという特徴がある。これら二つの繊維を使用することで、互いを補完しあい、より広範囲の材料特性が得られ、目的に応じた材料を設計することができる³。しかし、異なる積層構成のハイブリッドFRP部材のボルト接合部における支圧特性を評価を行った研究は少なく、今後、ハイブリッドFRPを実構造物の適用していくためには、接合部に

関する基礎的データが必要となる。

本研究では、ハイブリッドFRP部材ボルト接合部における支圧特性に関するデータの取得および評価を目的とする。そこで強化繊維に炭素繊維とガラス繊維の両方を用いた積層構成の異なる5種類のハイブリッドFRP積層体および、CFRP積層体、GFRP積層体を対象とし、Mottramらの提案する支圧試験法とピン接合法による2種類の支圧試験を実施し、得られた試験結果の比較を行うとともに強化繊維の種類や積層構成の違いが支圧強度に与える影響を明らかにする。また、各積層体の材料圧縮試験を行うことで、支圧強度と圧縮強度の比較を行う。また、手締め程度のボルト軸力を与えた接合実験を行うことで、手締め程度のボルト軸力が支圧強度に与える影響についても検討を行う。

2. 試験に用いた積層体の概要

本研究では、強化繊維に炭素繊維とガラス繊維、マトリックス樹脂に引抜成形性、経済性、強化繊維の強度発揮特性等を考慮してビニルエステル樹脂（エポキシアクリレート樹脂）を使用したFRP積層体を用いる。使用する

強化繊維は5種類あり、UT70-60が一方向の炭素繊維、BT70-30が二方向平織の炭素繊維、UM46-34が高弾性な一方向の炭素繊維、GF-UD600が一方向のガラス繊維、WR500は二方向平織のガラス繊維である。表-1に強化繊維シートの材料特性を示す。また、マトリックス樹脂にはビニルエステル樹脂R-804を使用している。表-3にマトリックス樹脂の材料特性を示す。強化繊維の形態は、取扱性、成形性からシート状の織物を用いる。また、CFRP小型構造部材の成形法は、断面形態、量産性、経済性、品質特性を考慮すると引抜成形法が最適だが、試験品や小ロットなどは初期投資が嵩むため、本研究では引抜成形法と同等の機械特性を示すことができるVaRTM（Vacuum assisted Resin Transfer Molding）によって成形された試験体を用いる。

本研究で用いるFRP積層体の積層構成は表-2に示した7種類であり、それぞれ強化繊維の種類と割合、繊維方向の比率が異なる。水準1から水準5は炭素繊維とガラス繊維の両方を使用したハイブリッドFRP積層体である。水準1と水準2では炭素繊維の種類が異なり、水準2の方がより高弾性な繊維を用いている。水準3から水準5では、±45°方向に入っている繊維の総数が異なる。また、水準6はCFRP積層体、水準7はGFRP積層体で

表-1 強化繊維シートの材料特性

種類	品番	目付け(g/m ²)	厚み(mm)	引張強度(N/mm ²)	弾性率(kN/mm ²)
CFクロス	UT70-60	600	0.333	4900	245
	BT70-30	300	0.167	4500	245
	UM46-34	340	0.185	4200	440
GFクロス	UD600	645	0.253	3400	72
	WR570	570	0.224	3400	72

表-3 マトリックス樹脂の材料特性

名称	比重(g/cm ³)	引張強さ(N/mm ²)	引張伸び率(%)	曲げ強度(N/mm ²)	曲げ弾性率(kN/mm ²)	熱変形温度(°C)
R-804	1.13	80	4.6	135	3	105

表-2 FRP積層体の水準

		方向	水準						
			1	2	3	4	5	6	7
CFRP	UT70-60	0°	5	0	0	0	0	0	0
	BT70-30	0/90°	0	0	0	0	0	5	0
		±45°	0	0	0	0	0	6	0
	UM46-34	0°	0	10	7	7	7	5	0
GFRP	GF-UD600	0°	0	0	0	0	0	0	6
	WR500	0/90°	4	4	0	4	6	0	3
		±45°	2	2	8	4	2	0	4
方向の比率(%)		0°	69	70.8	40.1	55.1	62.5	57.2	59.2
		90°	15.5	14.6	0	15	22.5	12.6	11.2
		±45°	15.5	14.6	59.9	29.9	15	30.2	29.6
狙い	CF種の違い		○	○					
	45°層の影響				○	○	○		
	CFとGFの違い							○	○

ある。

また、これらの FRP 積層体の材料特性を得るために引張試験、圧縮試験、面内せん断試験、層間せん断試験、曲げ試験を行った。引張試験は土木学会基準 JSCE-E 531-2007 に、圧縮試験は JIS K 7018 に、曲げ試験は JIS K 7017 に、面内せん断試験は ASTM D 7078 に、層間せん断試験は JIS K 7057 に従って試験を行った。表 4 に材料試験結果を示す。このような材料特性をもつ積層体に対して、2 種類の支圧試験を行い支圧強度の比較を行う。

3. 支圧試験方法

(1) ピン接合法による支圧試験

本試験は ASTM D953 や EN 13706 で規定されている支圧強度試験を参考にして行う。載荷試験機には前川式万能試験機を用いる。図-1(a)に示すように FRP 試験体（厚さは平均で水準 5 が 6.3mm、水準 6 が 6.4mm）と鋼製添接板、鋼製母板をステンレスボルト（M20）で接合する。このとき FRP 試験体と鋼製添接板の間にスペースを空けることでピン接合とする。FRP 試験体と鋼製母板のつかみ部を試験機でつかみ引張荷重を載荷する。鋼製添接板と鋼製母板はステンレス鋼 SUS304 を用いている。試験機のつかみ部間の変位を変位計で測定し、それを試験体の変位とみなす。試験は水準 5 と水準 6 の積層体に対して、各 3 体ずつ試験を行う。

表-4 材料試験結果

(a) 引張試験

		水準 1	水準 2	水準 3	水準 4	水準 5	水準 6	水準 7
引張強度	平均値(MPa)	1428	943	624	736	748	884	600
	変動係数	0.020	0.068	0.107	0.145	0.086	0.034	0.023
引張弾性係数	平均値(GPa)	82.0	145.6	96.1	110.9	116.5	128.2	25.8
	変動係数	0.064	0.045	0.023	0.036	0.063	0.046	0.052

(b) 圧縮試験

		水準 1	水準 2	水準 3	水準 4	水準 5	水準 6	水準 7
圧縮強度	平均値(MPa)	408	333	360	352	416	360	379
	変動係数	0.053	0.080	0.059	0.048	0.069	0.068	0.050
圧縮弾性係数	平均値(GPa)	76.3	131.9	85.4	91.4	94.3	111.3	30.9
	変動係数	0.071	0.092	0.029	0.014	0.034	0.016	0.032

(c) 層間せん断試験

		水準 1	水準 2	水準 3	水準 4	水準 5	水準 6	水準 7
層間せん断強度	平均値(MPa)	36	29	36	34	36	36	35
	変動係数	0.016	0.021	0.012	0.031	0.055	0.026	0.032
層間せん断弾性係数	平均値(GPa)	4.3	4.7	3.2	3.6	3.8	3.3	4.0
	変動係数	0.143	0.048	0.275	0.031	0.186	0.144	0.161

(d) 面内せん断試験

		水準 1	水準 2	水準 3	水準 4	水準 5	水準 6	水準 7
せん断強度	平均値(MPa)	96	89	128	123	99	143	150
	変動係数	0.079	0.093	0.041	0.017	0.018	0.062	0.039
せん断弾性係数	平均値(GPa)	5.3	5.3	8.4	6.7	5.0	12.6	5.9
	変動係数	0.012	0.031	0.019	0.065	0.024	0.093	0.061

(e) 曲げ試験

		水準 1	水準 2	水準 3	水準 4	水準 5	水準 6	水準 7
曲げ強度	平均値(MPa)	629	364	334	341	337	386	418
	変動係数	0.055	0.058	0.085	0.075	0.071	0.053	0.061
曲げ弾性係数	平均値(GPa)	63.7	99.2	68.1	75.9	74.0	114	26.0
	変動係数	0.089	0.053	0.015	0.026	0.049	0.061	0.012

また、図-2(a)にピン接合法支圧試験体の寸法を示す。試験体がせん断破壊および引張破壊で破壊することを防ぐために、縁端距離をボルトの直径の8倍、幅を6倍とした。また、ボルト孔の直径は21mmとし、ボルト径20mmに対し、1mmのクリアランスを設けている。支圧面にボルトのねじ部が入らないようなボルトを使用した。

(2) Mottramらの提案する支圧試験

本試験は Mottram ら^{4,5)}が ASTM D5764-97a で規定された木材の支圧試験を参考に行った支圧試験法を参考にして行う。载荷試験機には前川式万能試験機を用いる。図-1(b)に支圧試験の様子を示す。支圧面とボルトのネジ部の接触によって、支圧面が応力集中を受けて支圧強度が低下するのを防ぐために平滑な直径20mmのピンを使用する。

図-2(b)に Mottram 支圧試験体の寸法を示す。試験体は、

長さと幅がピンの直径の6倍の正方形の板で、上部に直径21mmの半円孔が明けられている。

試験体の側面のみが接触するように試験体を試験体ホルダーの溝にはめ、試験体の上端の半円孔にピンを上から押しつけ、鉛直方向に圧縮荷重を载荷することで支圧強度を評価する。载荷速度は0.01mm/sとする。载荷治具上板に下側から変位計を当てることで治具の変位を測定し、その変位を試験体の変位とみなす。

本試験は、支圧強度に関してピン接合法と同等の評価ができると報告されており、また、ピン接合法に比べて試験体も小さくできるため、ピン接合法では長さが足りず試験が行えないような部材に対しても適用でき、さらに様々な载荷方向に対しても試験体の切り出し方向を変化させることで対応できるという利点がある。

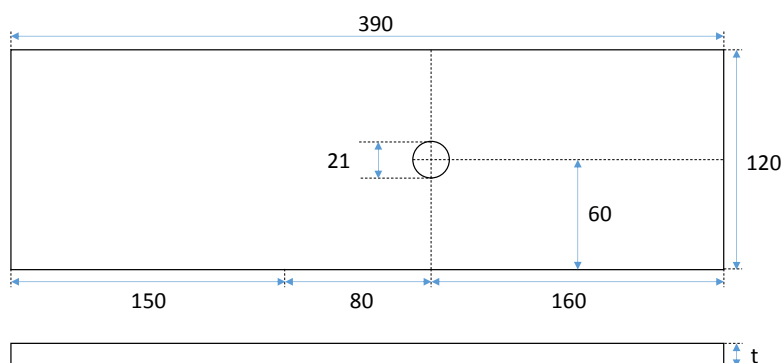


(a) ピン接合法

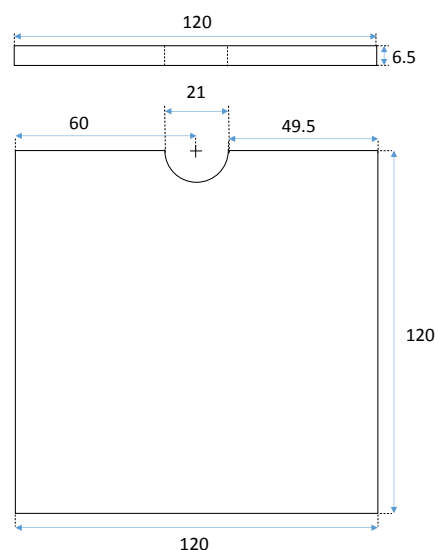


(b) Mottram 法

図-1 支圧試験の様子



(a) ピン接合法による支圧試験体寸法



(b) Mottram らの支圧試験体寸法

図-2 支圧試験体寸法

4. 支圧試験結果と考察

ピン接合法および Mottram 法による支圧試験の荷重－変位関係の例として、それぞれの試験方法での水準 6 の 1 体目の荷重－変位関係を図-3 に示す。Mottram 法では最大荷重に達するまでに変位がほとんど出ていないのに対して、ピン接合法では荷重が小さい領域で変位が大きく出ていることが確認できた。これはピン接合法による支圧試験では、引張荷重増大時にボルトと試験体の間に

隙間が存在し、荷重が小さい時点でこの隙間を埋めるための変位が出たことが原因である。また、両方の試験法で、最大荷重に達した後は、直後に荷重が少し減少したのち、非常に緩やかに荷重が減少する挙動が見られた。

表-5 と図-4 に Mottram 法とピン接合法による支圧試験によって得られた支圧強度結果をまとめる。ただし図-4 の棒グラフは FRP 積層体の各水準の支圧強度の平均値を示しており、平均値±標準偏差の範囲を合わせて示している。Mottram 法により得られた支圧強度は、ガラス織

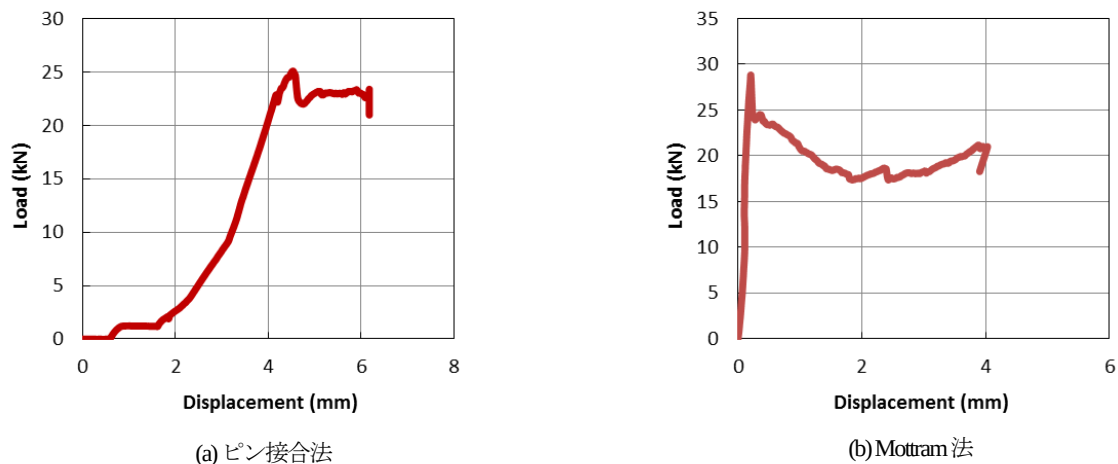


図-3 支圧試験の荷重－変位関係の例

表-5 支圧試験結果

		水準 1	水準 2	水準 3	水準 4	水準 5	水準 6	水準 7
Mottram らの支圧試験	支圧強度(MPa)	265	190	202	201	206	216	351
	標準偏差(MPa)	22.7	13.6	6.92	8.29	12.3	15.1	24.4
	変動係数	0.086	0.071	0.034	0.041	0.059	0.070	0.070
ピン接合法	支圧強度(MPa)	-	-	-	-	169	183	-
	標準偏差(MPa)	-	-	-	-	8.12	3.35	-
	変動係数	-	-	-	-	0.048	0.018	-

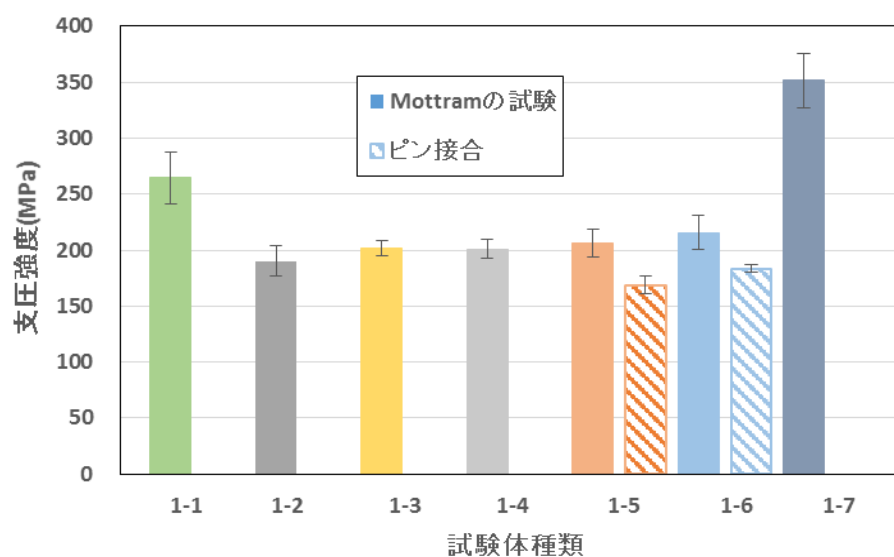
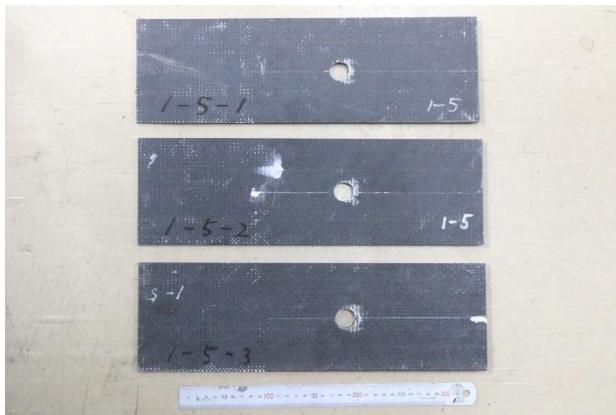


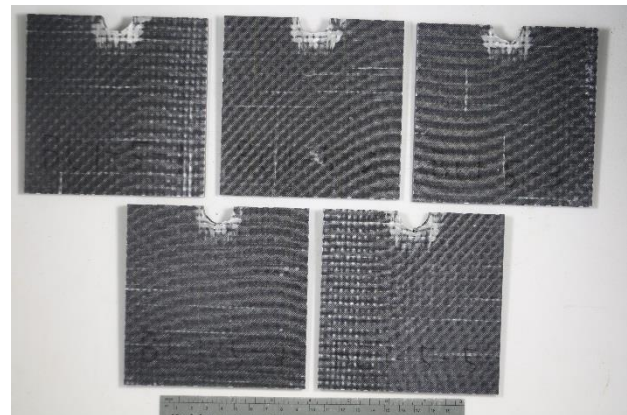
図-4 支圧強度の比較

表-7 ピン接合法の支圧強度と Mottram らの支圧試験の支圧強度に対する比

	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5	水準6	水準7
強度の比 (ピン接合/Mottram)	-	-	-	-	0.82	0.85	-



(a) ピン接合法



(b) Mottram 法

図-5 試験後の支圧試験体

表-6 支圧強度の圧縮強度に対する比

	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
Mottram 法	0.65	0.57	0.56	0.57	0.49	0.60	0.93
ピン接合法	-	-	-	-	0.41	0.51	-

維のみの FRP 積層体である水準7で最も大きく、351MPa であった。残りの水準1から水準6では、高強度の炭素繊維 1 方向材を使用した水準1が大きく、265MPa であり、他の水準2から水準6ではあまり大きな差はなく、約 200MPa であった。これらの結果から、支圧強度に関しては、繊維方向の違いによる影響は小さくなく、炭素繊維かガラス繊維かの繊維の種類による影響が大きいことが明らかとなった。

また、Mottram 法およびピン接合法による支圧試験後の試験体の様子を図-5 それぞれに示す。全ての試験体で支圧部が板厚方向にはらみ出す変形（ブルーミング）を示していた。しかし、実際のボルト接合部で2面せん断であり両面に添接板がある場合には、この変形は抑制されることから、支圧強度は本試験結果よりも上昇することが予想される。

次に、表-7に水準5と水準6において試験方法間の比較を行うと、ピン接合法の支圧強度が Mottram 法の支圧強度よりも水準5で約 18%、水準6で約 15%小さくなる結果となった。ピン接合法では、M20のボルトを使用して、その軸部が試験体に当たるように実験を行ったが、Mottram 法に比べて、支圧応力が板厚方向に一樣ではなかった可能性が支圧強度の違いの原因の一つと考えられる。Mottram 法で、ボルト接合部の支圧強度を評価するためには、今後さらに多くの試験を行うことでデータの

蓄積を行い、ピン接合法との関係性を定量的に明らかにする必要がある。

また、各支圧試験方法で得られた支圧強度の材料圧縮強度に対する比を表-6に示す。Mottram 法とピン接合法ともにほとんどの水準の積層体で、支圧強度は圧縮強度に比べて大幅に小さくなることが明らかになった。Mottram法の支圧強度は水準1から水準6で圧縮強度の約 50～65%、ピン接合法の支圧強度は圧縮強度の約 40～51%であった。ただし、強化繊維にガラス繊維のみを使用した水準7では、支圧強度は圧縮強度の約 93%であり、大きな違いは見られなかった。

5. ボルト軸力が支圧強度に与える影響

4章で述べたように、Mottram 法とピン接合法の両方の支圧試験法で、支圧試験体の支圧部が板厚方向にはらみ出す変形（ブルーミング）が確認された。しかし、実際のボルト接合部で母板の両面に添接板があり、ブルーミングが抑制される接合部では、支圧強度はこれらの試験結果よりも上昇することが予想される。そこで実際のボルト接合部を想定し、ボルト軸力が支圧強度に与える影響について検討を行った。

本試験は、3章で示したピン接合法による支圧試験と

表-8 ボルト軸力を導入した支圧試験の支圧強度とピン接合法の支圧強度

	水準5	水準6
ボルト軸力を導入した場合の支圧強度(MPa)	497	689
強度の比 (ボルト軸力導入/ピン接合)	2.94	3.76

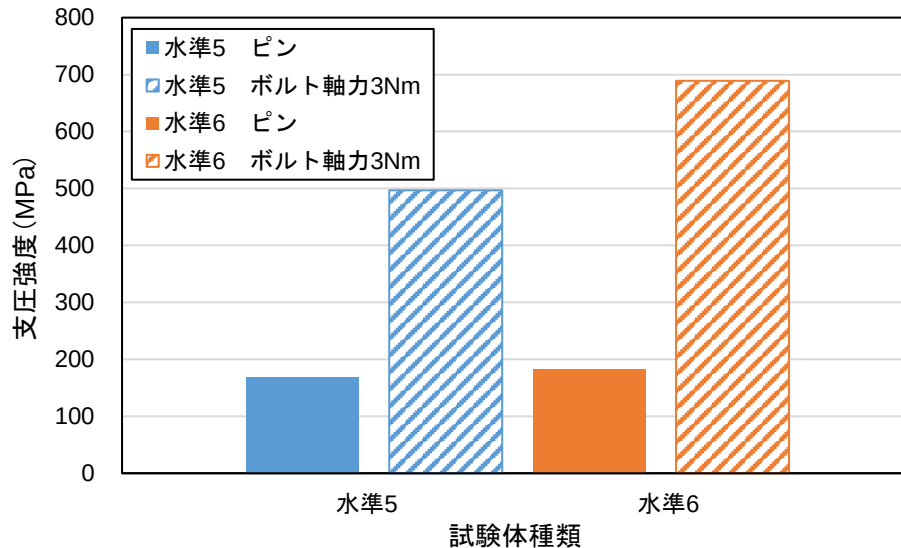


図-6 ボルト軸力を導入した支圧試験での支圧強度とピン接合法での支圧強度の比較

同様の試験方法で行う。鋼製母板は試験体と同じ板厚のものを使用して、FRP 試験体と鋼製添接板の間にスペースをなくし、トルクレンチを用いて 3N・m のトルク（手締め程度）でボルトを締めつけることで、ボルト軸力を導入する。試験体は積層体水準 5 と水準 6 を使用して、3体ずつ製作した。

手締め程度のボルト軸力を導入した場合の支圧試験結果とピン接合法による支圧試験結果の比較を表-8 と図-6 に示す。水準 5 と水準 6 とともにボルト軸力を導入することで、ピン接合での場合に比べて支圧強度が大幅に増加することが確認できた。水準 5 ではボルト軸力を導入した場合の支圧強度が、ピン接合での支圧強度の約 2.94 倍、水準 6 では約 3.76 倍であった。したがって、ボルト軸力導入により、添接板が、試験体の支圧部で板厚方向へのはらみ出し変形を抑制することで、ピン接合の場合に比べて支圧強度が増加することが確認できた。

また、図-7 にボルト軸力を導入した支圧試験体の試験後の様子を示す。本試験では FRP 試験体と鋼製の添接板を密着させていたが、試験体の支圧部分では、最終的には添接板を外側に押し出すようにして、ピン接合法の場合と同様に、板厚方向へのはらみ出しが見られた。

今後ボルト軸力を導入した場合の支圧強度については、さらに試験を行って、ボルト軸力導入の程度と支圧強度との関係を定量的に明らかにする必要がある。



図-7 試験後のボルト軸力を導入した支圧試験体

6. 結論

本研究では5種類のハイブリッド FRP 積層体および、CFRP 積層体、GFRP 積層体を対象とし、2 種類の支圧試験を実施し、得られた試験結果の比較を行った。また材料圧縮試験を行うことで、支圧強度と圧縮強度の比較を行った。さらに、手締め程度のボルト軸力が支圧強度に与える影響についても検討を行った。

- (1) ピン接合法の支圧強度は Mottram らの支圧試験の支圧強度に比べて約 15%~18%小さくなることが明らかになった。
- (2) 水準 1 から水準 6 の積層体では支圧強度は圧縮強度

の約 40～65%となり、支圧強度は圧縮強度に比べて大幅に小さくなることが明らかになった。ただし、ガラス繊維のみを用いた水準 1-7 では、圧縮強度の約 93%であり、大きな違いは見られなかった。

- (3) ボルト締結時に 3N・m のトルク与えて手締め程度のボルト軸力を導入することで、添接板により支圧部の板厚方向へのはらみ出し変形（ブルーミング）が抑制され、支圧強度がピン接合法に比べて約 2.94～3.76 倍と、大幅に上昇することが明らかになった。Mottram 法とピン接合法の支圧強度の関係性や、ボルト軸力と支圧強度との関係性は、今後さらなるデータの蓄積を行う必要がある。

謝辞：本研究は、地域住民生活等緊急支援交付金（地方創生先行型）を受け、福井県が中心となって平成27年度に実施した研究プロジェクトの一部である。ここに深く

感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 名取暢：鋼橋の腐食事例とその対策，溶接学会全国大会講演概要，pp.15-18，1994.
- 2) Vo Thanh Hung, 永澤洋, 佐々木栄一, 市川篤司, 名取暢：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析，土木学会論文集，No.710，pp.141-151，2002.
- 3) 土木学会 構造工学委員会：FRP 橋梁－技術とその展望－，土木学会，264p.，2004.
- 4) Mottram, J. T., and Zafari, B. : Pin-Bearing Strength for Bolted Connections in Fiber-Reinforced Polymer Structures, Structures and Buildings, Vol.164, No.SB5, pp.291-305, 2011.
- 5) Matharu, N. S., and Mottram, J. T.: Laterally unrestrained bolt bearing strength: Plain pin and threaded values, Proc. 6th Inter. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012), Rome, Section 14: Codes and Design Guidelines, Paper 311(CD-ROM), 2012.

EXPERIMENTAL STUDY ON BEARING STRENGTH EVALUATION METHOD OF HYBRID FRP LAMINATES

Yuta UEYAMA, Yasuo KITANE, Takahiro MATUI, Fujio KONDO and Kazuo TATEISHI

The purpose of this study is evaluation of bearing characteristics in the bolted joint of the FRP member. Therefore, in this study, bearing test suggested by Mottram et al. and pin joint bearing test were performed on five different hybrid FRP laminates consisting of both carbon fiber and glass fiber, CFRP laminate and GFRP laminate, and test results were compared. Then influence of the difference in the type or the stacking sequence on bearing strength was clarified. Results showed that bearing strength is about fifty percent of compressive strength depending on the type or the laminated structure of the reinforcing fibers. Also, the results showed that bearing strength from the Mottram method was smaller by about 15 to 18 percent than that from the pin joint method. Then influence of bolt axial force on bearing strength was examined and the significant increase of bearing strength due to the bolt axial force was confirmed.