FRP の継手に関する研究*

(強化プラスチック部門委員会研究報告)

策 添 正** 吉 田 治 夫***

On the Bearing Strength of Bolted Joints in FRP
(Report of Committee of Reinforced Plastics)

by

Tadasu TSUKIZOE

(Faculty of Engineering, Osaka University, Osaka)

and Haruo YOSHIDA

(Osaka Municipal Technical Research Institute, Osaka)

1 ま え が き

強化プラスチックが構造用材料として使用される
とき、一体成形が困難である場合には、必然的に継手
が必要となり、この部分の強度が問題となる。

継手における結合方式としては、接着によるもの、
ボルト結合によるもの、ならびにこれら両者の併用に
よるものがあり、構造による施工の難易および相手方
の材質によってそれぞれの場合に最も適した方法がと
られている。これらに関する調査研究もそれぞれの立
場において行なわれているが、繊維強化プラスチック
(FRP) の継手の強度を左右する要因は、FRP 自
身の材質特性だけでなく相手方の材質との関連など材
質に起因する要因の他に、継手の構造、形状寸法、結
合力(接着力あるいはボルト締付け力)、継手に作用
する荷重の形式など数多くの要因があり、かなり複雑
な様相を呈する。

日本材料学会強化プラスチック部門委員会におい
ては、FRP の継手強度の向上を期しその安全性を高
めるための基礎的資料を得るべく、部門委員会研究小
委員会を組織し、昭和49、50年度の2か年にわたって、
研究内容を9項目に分類し、各項目別に分担委員を定
め全員の協力によって研究を進めてきたが、ここに一
応の成果を得たのでこれを取りまとめて報告する。前
述のごとく継手強度に影響を及ぼす要因は数多くある
が、限られた期間内には、これらすべてについて解明
を行なうことはできないので、本研究においては、継

手は純然たる機械的結合とし接着は行なわず、荷重形
式は引張荷重(表I, 分担課題番号①, ②, ③, ④,
⑤, ⑥, ⑧)とし一部曲げ試験⑦を行なった。

2 研究組織

本研究のために組織された委員会研究小委員会の構
成と分担研究課題を表Iに示す。

3 試験方法

継手結合のためのボルト径 d は、板の厚さ t との関
係を考慮して、せん断にて破壊しない寸法でありかつ
実用上の常識的な寸法として、板厚 3, 5, 8 mm に
ついてそれぞれボルト径(孔径と同じ)を 5, 8, 14
mm と定めた。

ボルト径と試験片幅 w および端面距離 e の関係は分
担研究課題①において詳しく検討されるが、他の分担
研究課題における試験片の寸法を定めるために、予備
実験を行ない、試験片長さ $l=200$ mm とし、マッ
ト FRP については $w/d=7$, $e/d=4$, クロス FRP につ
いては、 $w/d=4$, $e/d=3$ を基準寸法とした。これは
図1に示すように、継手部分に引張荷重が作用した場
合、(1)引張り、(2)せん断、(3)圧壊および(4)複合(主と
して(1)と(2)の組合せ)の4種類の破壊形式を示すが、
継手の強度すなわちボルト1個あたりの荷重支え応力
は破壊形式(3)の圧壊の場合が最大の値を示すので、分
担研究課題のすべてについて常に圧壊が起こるように
するためには、 w および e の d に対する比がそれぞれの
材料について、前記の数値以上の値をとる必要があ
ると予想を立てたためである。

試験片の試験部位の形状および試験方法は図2に示
す。ボルトの締付けを必要としない試験については、

* 原稿受理 昭和50年11月27日

** 正 会 員 大阪大学工学部 吹田市山田上

*** 正 会 員 大阪市立工業研究所 大阪市北区北扇町

表I 研究組織

分担研究課題番号および分担研究課題名		担 当 委 員		担 当 材 料
①	厚さ t に対する幅 w および端面距離 e の関係	大阪市立大学	藤 井 太 一	マット FRP ($t=3$), クロス FRP ($t=3$)
		同志社大学	平 井 恒 夫	マット FRP ($t=5$), クロス FRP ($t=5$)
		京都大学	田 中 吉之助	マット FRP ($t=8$), クロス FRP ($t=8$)
②	孔のピッチ p の影響	立命館大学	藤 谷 景 三	マット FRP ($t=3$), クロス FRP ($t=3$)
③	継手形式の影響	京都大学	遠 藤 吉 郎	マット FRP ($t=3$)
		京都工芸繊維大学	鈴 木 恵	クロス FRP ($t=3$)
④	孔数の影響	大阪工業技術試験所	植 村 幸 生	マット FRP ($t=3$), クロス FRP ($t=3$)
⑤	ボルト締付け力の影響	大阪工業技術試験所	植 村 幸 生	マット FRP ($t=3$)
		大阪市立工業研究所	吉 田 治 夫	クロス FRP ($t=3$)
⑥	炭素繊維強化プラスチック	大阪大学	築 添 正	CFRP
⑦	曲 げ 試 験	同志社大学	網 島 貞 男	クロス FRP ($t=3$)
⑧	応 力 解 析	大阪市立大学	藤 井 太 一	
		同志社大学	平 井 恒 夫	
		東京医科歯科大学	宮 入 裕 夫	
⑨	試 料 作 成	武田薬品工業(株)	高 木 収 一	樹脂, マット FRP 成形
		旭ファイバーグラス(株)	岩 下 誠 治	ガラスマット
		日本触媒化学工業(株)	仁 木 正 夫	樹脂, クロス FRP 成形
		日本硝子繊維(株)	山 崎 福太郎	ガラスクロス
		東レ(株)	村 山 和 永	CFRP 原材料および成形

ボルトの代わりにこれと同じ外径のピンを用いた。

4 試 験 材 料

本研究に使用した材料は、ガラス繊維強化ポリエステル樹脂積層板および炭素繊維強化エポキシ樹脂積層板である。前者についての組成を次に示し、またその力学特性ならびにガラス含有率などについての実測結果を表Ⅱに示す。

(1) ガラスマット強化ポリエステル樹脂積層板 (マット FRP)

表Ⅱ 試験材料特性 (ガラス繊維強化ポリエステル樹脂積層板)

試験材料		称呼厚さ (mm)	引張特性			曲げ特性			ガラス含有率*			強化材 積層枚数
種別	記号		実測厚さ (mm)	引張強度 (kg/mm ²)	引張弾性係数 (kg/mm ²)	実測厚さ (mm)	曲げ強度 (kg/mm ²)	曲げ弾性係数 (kg/mm ²)	実測厚さ (mm)	重量含有率 (%)	体積含有率 (%)	
マット FRP	M 3	3	3.37	7.97	848	3.36	18.0	816	3.322	25.3	14.1	3
	M 5	5	5.72	9.37	854	5.86	15.1	745	6.103	23.8	13.0	5
	M 8	8	8.70	9.67	993	8.34	17.0	844	8.602	27.1	15.2	8
クロス FRP	C 3	3	2.59	27.2	2136	2.66	26.8	1499	2.707	52.5	34.7	4
	C 5	5	3.36	35.6	2770	3.77	27.9	2069	3.773	60.6	42.6	7
	C 8	8	6.02	32.8	2522	6.18	23.2	2125	6.218	59.2	41.6	11

20℃, *) ガラス比重 2.47 として計算

樹脂: ポリマール3308 (オルソ系常温硬化型三液性
ポリエステル樹脂, 武田薬品)

強化材: チョップドストランドマット CM 455 FA
(旭ファイバグラス)

硬化促進剤: QP-3, 0.5 部 (Co 系速硬性促進剤,
武田薬品)

硬化剤: パーメック N, 0.5 部 (MEKPO, 55% 溶
液, 日本油脂)

ポットライフ: 50分

後硬化: 55℃, 20時間

成形方法: 1 プライ 1mm として, 定盤上で規定厚
さのスペーサーにて枠を組み, 手摺法にて成形を行な
った後, 上面にセロファンをしき, 余分の樹脂を除去
し, そのまま硬化させる。

(2) ガラスクロス強化ポリエステル樹脂積層板 (ク
ロス FRP)

樹脂: エポラック G-503PTWY (日本触媒)

強化材: ロービングクロス EWR-55EC (日本硝子
繊維)

硬化条件: 温度 18℃, 触媒パーメック N, 0.9%,
ポットライフ, 45分

後硬化(ポストキュア): 40℃一昼夜放置, 80℃ 3時
間

試験材料の積層方法は, マットおよびクロスともに
布 (幅 1m) のロール巻取方向 (縦方向) をそろえて
積層した。積層板の大きさ (端面切落し後の寸法) は,
マット FRP は 40cm×80cm, クロス FRP は 40
cm×40cm とした。

板の厚さは, マット FRP およびクロス FRP とも
に, 3, 5, 8mm を目標とし, それぞれの材質につい
ては厚さにかかわらずほぼ一定のガラス含有率にな
るように, それぞれの板厚に応じて積層枚数を定めた。
試験片はすべて, 縦方向に引張応力あるいは曲げ応力
が発生するように採取した。

5 実験ならびに考察

- ① 厚さ t に対する幅 w および端面距離 e の関係,

図 3 ~ 14

支え応力 $\sigma = P/(d \cdot t)$ は e/d が大きくなるほど, ま
た w/d が大きくなるほど大きくなり飽和値に近づく,
支え応力が飽和値に達する e/d および w/d の値は,
マット FRP とクロス FRP とでは異なり, マット

図 3 端面距離 e と支え応力との関係 (マット FRP,
 $t=3$)

図 4 幅 w と支え応力との関係 (マット FRP, $t=3$)

図 5 端面距離 e と支え応力との関係 (マット
FRP, $t=5$)

図6 幅 w と支え応力との関係 (マット FRP, $t=5$) 図11 端面距離 e と支え応力との関係 (クロス FRP, $t=5$) 図7 端面距離 e と支え応力との関係 (マット FRP, $t=8$) 図12 幅 w と支え応力との関係 (クロス FRP, $t=5$) 図8 幅 w と支え応力との関係 (マット FRP, $t=8$) 図13 端面距離 e と支え応力との関係 (クロス FRP, $t=8$) 図9 端面距離 e と支え応力との関係 (クロス FRP, $t=3$) 図14 幅 w と支え応力との関係 (クロス FRP, $t=8$) 図10 幅 w と支え応力との関係 (クロス FRP, $t=3$)

FRP では $e/d \geq 4$, $w/d \geq 7$ の値を示し, クロス FRP では $e/d \geq 2$, $w/d \geq 2$ の値を示す。

支え応力が飽和値に達するまでは, 破壊形式は(1)引張りまたは(4)複合であるが, 飽和値に達するとすべて破壊形式は(3)圧壊となる。したがって継手として最大の強度を得るためには破壊形式(3)すなわち圧壊が起こるように幅 w および端面距離 e を設定する必要がある。

その寸法は前述の実験値に示す値以上とすればよい。

以上の結果は、厚さ $t=3, 5, 8$ mm のいずれに対しても適用できることであって、板厚による差異はとくに認められなかった。

② 孔のピッチ p の影響, 図15, 16

本分担課題では孔はすべて2個であるから、孔1個あたりの支え応力 $P/2dt$ にて整理した。マット FRP の場合はピッチの大きさに比例して支え荷重は増大する。これはピッチ $p \leq 6d$ の実験範囲では、破壊はすべて破壊形式(1) (引張り) にて破壊しているためであり、 p をさらに大きくすれば破壊形式が変わり、破壊形式(3) (圧壊) となり、支え荷重は飽和値に達するものと考えられる。

図15 孔のピッチ p と支え応力との関係 (マット FRP, $t=3$)

図16 孔のピッチ p と支え応力との関係 (クロス FRP, $t=3$)

クロス FRP の場合は $p \geq 3d$ にて支え応力の最大値 (飽和値) に達し、破壊形式(3)すなわち圧壊となる。したがって継手としての最大支え強度を得るためにはマット FRP の場合は p は $6d$ よりさらに大きくとり ($p \geq 7 \sim 8d$ 程度)、クロス FRP の場合は $p \geq 3d$ 程度が必要である。このことは孔が数多く並んでいるとき、各孔に均等に荷重が作用すれば前項①における孔1個の場合の実験結果と一致するが、不均等荷重が予想されるので圧壊形式の破壊を得るためには w の値は前項で得た限界値より少し大きくなることが考えられる。なお e の値はマットの場合は $e=4d$ 、クロスの場合は $e=3d$ にて実験を行なった。

③ 継手形式の影響, 表Ⅲ

マット FRP の場合は、継手強度は継手形式(b)が最

表Ⅲ 継手形式の影響

マット FRP $w/d=7, e/d=4$, 締付け力 $20 \text{ kg} \cdot \text{cm}$		
継手形式	荷重 $P(\text{kg})$	支え応力 $P/(dt)(\text{kg}/\text{mm}^2)$
a	476	32.1
b	586	36.6
c	394	26.4
d	474	30.0

クロス FRP $w/d=4, e/d=3$, 締付け力 $5 \text{ kg} \cdot \text{cm}$		
継手形式	荷重 $P(\text{kg})$	支え応力 $P/(dt)(\text{kg}/\text{mm}^2)$
a	580	38.9
b	630	43.1
c	480	31.3
c _w	538	35.9
d	420	29.0
d _w	530	34.7

クロスヘッド速度 $30 \text{ mm}/\text{min}$, $20 \pm 2^\circ\text{C}$, $60 \pm 5\% \text{ RH}$

大の強度を示し、ついで(a)であり、(c)または(d)は最も弱い値を示している。これは継手の構造上(a), (b)には曲げモーメントが発生しないため当然考えられることであるが、(a)と(b)を比較した場合本実験においてはボルトに締付け力 $20 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ を与えているために、FRP と鋼の組合せよりも FRP 同志の方が摩擦力が有効に働いていることが認められる。

クロス FRP の場合は、継手強度と継手形式の関係はマット FRP の場合とほぼ同じような順序となり、強度は形式(b)が最大の値を示し、ついで(a), (c), (d)の順に小さくなる。形式(c), (d)の場合はボルトが傾斜し、孔の側面からき裂が進展して破壊するが、ボルトに座金を入れると (表中の c_w および d_w) これが防止され強度がやや上昇することがわかった。

④ 孔数の影響, 図17

実験項目①はすべて孔が1個の場合について実験を行なったが、そのときに得られた結論が孔が多数ある場合にも適用できるか否かを調べるために本実験においては実験項目①における試験片を孔数 n に相当する分だけ横に並べたときと同じ寸法の試験片寸法にて実験を行なった。

マット FRP においては、2孔になると最大支え応力は1孔の場合の1割強大きくなるが、3孔になると

図17 孔数 n と支え応力との関係 ($t=3$)

1孔の場合と同程度となる。これは荷重分担が均等にならないためと考えられるが、いずれの場合も破壊形式は(1)の引張形となる。

クロス FRP の場合は、破壊形式はすべての孔について形式(3)の圧壊となり、孔数の影響は認められない。

⑤ ボルト締付け力の影響、図18, 19

マット FRP およびクロス FRP とも、当て板は試験材料と同じ材料を用い、締付け力による当て板の損傷およびボルト、ナットの損傷による摩擦係数の変化による影響をなくするために、当て板およびボルト、ナットは試験片ごとに新しいものを使用した。なお締付け力によりナットが当て板に食い込み、締付けトルクと締付け力との間に一定の関係が得られなくなること防ぐために座金を使用した。

マット FRP の支え強度は締付け力 0 の場合が最低で、締付け力の増加とともに接触面に摩擦力が働き、継手強度は多少増大するが、ほとんど変化はない。これは破壊形式がすべて引張破壊であることのためであると考えられる。

クロス FRP の場合は、支え強度は締付けトルクが 45 kg・cm までは締付けトルクの増加とともに急激に増大するがそれ以上の締付けトルクを与えても支え強度はほとんど変わらない。これはマット FRP の場合と破壊形式が異なりすべて圧壊による破壊であるために、孔の付近が圧壊によってボルトの軸方向に盛り上がるというのが締付け力によって拘束され摩擦力の影響を大きく受けるためと考えられる。締付けトルク

図18 締付けトルク T と支え応力との関係 (マット FRP, $t=3$)

図19 締付けトルク T と支え応力との関係 (クロス FRP, $t=3$)

が 45 kg・cm 以上では支え応力が一定になるのは摩擦力の限界を越えたためと考えられる。

⑥ 炭素繊維強化プラスチック (CFRP)、表Ⅳ、図20

試験片製作条件と諸元を表Ⅳに示す。継手支え応力と端面距離の関係を図20に示す。

(1) 方向強化材④、面圧強度は $e/d=5\sim7$ にて飽和

表Ⅳ 試験片製作条件と諸元 (CFRP)

	一方向 CFRP	アングルブライ CFRP
CFRP 成形条件	トレカブリプレグ P 203 170°C 1 min 予備加熱 170°C 90 min 硬化 (10 kg/mm²) 170°C 120 min アフタキュア	
体積含有率 (%)	60.3	61.6
積層数	9 プライ	
積層構成	④ 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0 (9 プライとも引張方向の一方向強化材)	⑤ +45. -45. 0. 0. 0. 0. 0. -45. +45 ⑥ 90. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 90 ⑦ 90. 0. 0. 0. 90. 0. 0. 0. 90
厚さ (mm)	2	2
ピン径 d (mm)	6	6
e/d	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	1, 2, 3, 4, 5, 6
w/d	4.17	4.17
全長 l (mm)	150	150

図20 端面距離 e と支え応力との関係 (CFRP)

する。試験片の大部分はせん断破壊で破壊した。

(2) アングラプライ材, 試験片⑩の面圧強度は $e/d=2\sim3$ にて飽和する。破壊形式はピン孔上部の圧壊でありこのとき表層+45°のプリプレグのはく離が起こっている。

試験片⑪の面圧強度は $e/d=3$ にて飽和し, 破壊形式はピン孔上部の圧壊であって, このとき表層+90°のプリプレグのはく離を伴っている。

試験片⑫の面圧強度は $e/d=2\sim3$ にて飽和する。破壊形式は⑩と同様であって表層+90°のプリプレグのはく離を伴った圧壊である。

結論として, 一方向強化材に対して一部を45°方向または90°方向のアングラプライとすると, 面圧強度の飽和点が $e/d=5\sim7$ から $e/d=2\sim3$ に改善される。かつ $P/(dt)$ の飽和値も 22 kg/mm^2 から $25\sim29 \text{ kg/mm}^2$ に改善される。その反面, 引張強度はほぼ半減している。

⑦ 曲げ試験, 表V

継手部ボルト位置を中心とした4点曲げ試験であり, 支点間隔 80 mm, 荷重点間隔 46 mm である。試験片は孔付近で破断しているものもあるが ($w=2d, e=4d$), ほとんどのものは継手の重なり部分以外で曲げ破壊を起こしている。したがって板幅がとくに小さくない限り, 継手部分は曲げモーメントに対してとくに弱くないことはない。試験結果を表Vに示す。

⑧ 応力解析, 図21

ボルト孔周辺部に抵抗線ひずみ計を貼付してひずみ

を測定し, 応力解析を行なった結果の一例を図21に示す。孔の周辺から 2.5 mm 隔った場所における応力については, 荷重軸線上における荷重方向の圧縮応力を σ_{c4} , 同じく荷重軸線上における荷重方向に垂直方向の引張応力を σ_{t3} , 荷重軸に直交する軸線上における荷重方向の引張応力を σ_{t2} にて表わすと, マット FRP およびクロス FRP とも σ_{t2}/σ_{c4} , σ_{t3}/σ_{c4} の絶対値は w および e が大きくなるにつれて小さくなる傾向がみられた。今回の委員会研究と全く同じ強化材を用いて行なった前回の委員会研究の結果ではマット FRP の場合引張強さは圧縮強度の約 1/2 であることを考慮すればこの傾向は破壊形式が圧壊に近づいていく傾向を示し, クロス FRP の場合は引張強さは圧縮強度の約 2 倍であるから w/d および e/d の値がマット FRP に比べてはるかに小さい値でも, 破壊形式は圧壊となり, 両材質とも実験結果とよく一致することを示している。

図21 応力測定 $w/d=5$, $e/d=3$, (マット FRP, $t=3$)
 $\sigma_0=0.66 \text{ kg/mm}^2$, $E=847 \text{ kg/mm}^2$, ポアソン比 0.332

6 結 言

以上の実験結果をまとめると,

(1) 幅 w および端面距離 e が増大すれば継手強度は増大するが, これらの値のボルト径に対する比すなわち w/d , e/d が継手材料特有のある値以上になると継手強度は飽和値に達し, 破壊形式はボルト孔における圧壊となる。

(2) ピッチ p とボルト径 d の比 p/d を前項(1)における w/d の特定値に等しくとっておけば最大の継手強

表V 曲げ試験結果 (クロス FRP, $t=3$)

$w \backslash e$	$2d$			$3d$			$4d$		
	W (kg)	M (kg·cm)	σ (kg/mm ²)	W (kg)	M (kg·cm)	σ (kg/mm ²)	W (kg)	M (kg·cm)	σ (kg/mm ²)
$2d$	23.7	20.1	17.8	25.2	21.4	19.0	9.5	8.1	14.4 ⁽¹⁾
$3d$	38.7	32.9	19.5	40.0	34.0	20.1	40.7	34.6	20.5
$4d$	51.3	43.6	19.4	46.3	39.4	17.5	51.5	43.8	19.5
$5d$	62.0	52.7	18.7	54.5	46.3	16.4	67.7	57.6	20.4

注(1) 孔付近で破断しているから, 孔径を考慮した最小断面について板1枚の曲げ応力を計算した (その他はすべて, 孔のない部分の板1枚について応力を計算した)。

度が得られる。

(3) 継手形式は、FRP による両側継目板補強が最良である。

(4) 孔が多数並んでいるときは、孔のピッチを(1)項におけば w/d の特定値以上にとっておけば、孔の相互干渉はない。

(5) ボルト締付け力の影響は破壊形式が圧壊である場合は締付け力の増大とともに継手強度も増大するが飽和値がある。

(6) 板幅がとくに小さくない限り曲げ強度は、継手によって低下することはない。

(7) 応力解析ならびに継手の最適設計については、

なお検討すべき問題があるが本報告に掲載するまでにはいたらなかった。

参 考 文 献

- 1) 藤井日出見, 強化プラスチック, **20**, 459 (1974).
- 2) 林 毅, “複合材料工学”, p. 833 (1971) 日科技連出版社
- 3) FRP 接着委員会, 強化プラスチック, **14**, 313(1968).
- 4) 宮入裕夫, 強化プラスチック, **21**, 394 (1975).
- 5) 増田雄市郎, 強化プラスチック技術協会第20回 FRP 総合講演会講演要旨集, p. 39 (1975).
- 6) 平井恒夫, 吉田治夫, 材料, **23**, 954 (1974).