FRP 板における強度特性に対する 応力集中部の干渉効果について*

藤 井 太 一** 前 川 善 一 郎** 中 易 秀 敏***

On the Effect of Interference of Stress Concentration on the Strength of Fiber Reinforced Plastics Laminates

by

Taichi FUJII, Zenichiro MAEKAWA and Hidetoshi NAKAYASU

(Faculty of Engineering, Osaka City University, Osaka)

Numerous investigations have been carried out on the mechanical behaviors of fiber reinforced plastics (FRP) with a single notch. But there are few studies on the effect of interference of many notches in FRP.

This paper deals with the laminated composites containing multiple circular holes arranged as follows; (1) a single row of holes parallel to the load axis, (2) a single row of holes normal to the load axis, (3) a single row of holes with a certain angle to the load axis, (4) a diamond pattern of holes with one hole in its center, (5) a diamond pattern without a central hole.

The relation between the breaking strength and the arrangement of holes in these materials subjected to tensile load is discussed, and the stress distribution in the vicinity of a hole is measured by photoelastic test and strain gauge test. The empirical equation involving the effect of interference of holes is proposed, which shows a good agreement with the experimental data.

(Received Oct. 22, 1975)

1 緒 言

近年種々のすぐれた機械的特性を有する繊維強化プラスチック (FRP) は広く構造物とか機械部品に用いられるようになってきており、同時に FRP の機械的挙動に関する研究も多岐にわたっている。その中で FRP 板に切欠き等の応力集中部を有する場合の機械的挙動は、等方性の鉄鋼材料等と異なり、異方性の影響から複雑になると考えられており、種々の形状の切欠きをもつ FRP 板の研究が今までに行なわれている。しかし切欠き等の応力集中部が干渉する影響に関する研究は、等方性材料については種々の切欠きに対して厳密解が得られているが^{1,2)}、異方性板における切欠きの干渉の影響の研究は少なく、FRP 板における切欠きの影響についての系統的な研究はほとんどみられない。

そこで本論文において一様引張荷重を受ける多数個の円孔の切欠きを有する FRP 板における強度特性に対する応力集中部の干渉効果についての検討を行なう

ために、(1)荷重方向に平行な円孔列をもつ場合、(2)荷重方向に垂直な円孔列をもつ場合、(3)荷重方向に平行かつ垂直な円孔列の混合した場合のおおのについて、静的引張試験を行ない、応力集中部の干渉効果を考慮に入れた FRP 板の強度特性に関する実験式を求めると同時に、ひずみ測定および光弾性実験からおおの場合についての弾性域内の応力集中部の干渉効果についての検討をも合わせて行なったものである。

2 供試材料および実験方法

本研究における供試材料である FRP 板の強化材として、平織ガラスクロス (#250)、マトリックスとして不飽和ポリエステル樹脂 (Riken 1560/L) が用いられ、ハンドレイアップ法にて常温で硬化して製作された。グラスファイバ重量含有率は 42.5% であり、積層数は 20 プライと 10 プライであり、おおの板厚は 6 mm と 3 mm である。板厚が 66 mm の FRP 板は強度試験用に使用し、板厚 3 mm のものは不飽和ポリエステル樹脂の光弾性感度が低いため (本実験で使った FRP 板の光弾性感度は 0.162 mm/kg である)、光弾性実験用の試験片に使用した。

* 原稿受理 昭和50年10月22日

** 正 会 員 大阪市立大学工学部 大阪市住吉区杉本町

*** 学生会員 大阪市立大学大学院 大阪市住吉区杉本町

つぎに試験片の形状に関して述べると、試験片の全長はすべて 250 mm であり、平滑試験片は Fig.1 の中の A に示すようなダンベル型とし、その他の円孔をもつ試験片はすべて短冊型で、チャック部にはアルミニウム板の補強板をとりつけた。円孔の種類には同じく Fig.1 に示すごとく最も基本的な一円孔の B 型、荷重方向に平行な円孔列をもつ C および D 型、荷重方向に垂直な円孔列をもつ E および F 型、荷重方向に平行かつ垂直な円孔列の混合した菱形配列の G および H 型と荷重方向に対して傾斜した I 型とを選んでいる。なお円孔の直径はすべて 6 mm であり、加工はドリルで行ない、ペーパー (#800) で最終仕上げを行なった。静的引張試験はアムスラー型万能試験機を用い、室温にて引張速度 1000 kg/min で行なわれ、同時に試験片の各部のひずみがひずみゲージ (ゲージ長さ 2 mm) を用いて測定された。

Fig. 1. Configuration of specimens.

円孔群の切欠きを有する FRP 板の応力集中部の干渉の効果を調べるために、(1) FRP 板の試験片の幅の影響、(2) 荷重方向に平行な円孔列のピッチの影響、(3) 荷重方向に垂直な円孔列のピッチの影響、(4) 荷重方向とある角度をもつ円孔列のピッチの影響、(5) 中心に円孔をもつ場合の菱形配列のピッチの影響、(6) 中心に円孔がない場合の菱形配列のピッチの影響、という六つの系統の実験を行ない、おのおのの場合の強度特性についての検討を行なっている。

3 実験結果と考察

FRP 板における強度特性に対する応力集中部の干渉効果を調べるために行なった 6 系統の実験結果を以下に示す。

3.1 FRP 板の幅の影響

試験片の形状が A, B, D の場合である FRP 板の幅が破断強度に及ぼす影響を Fig.2 に示す。この図において縦軸に幅が 20 mm の場合の平滑試験片の破断応力 σ_n と円孔部をもつ試験片の破断応力 σ_u との比をとり、横軸には試験片の幅 (w) をとる。ここで

$$\sigma_n = \frac{p}{wt}, \quad \sigma_u = \frac{p}{(w-d)t} \quad (1)$$

t は試験片の厚さそして p は破断荷重を示す。なお本実験における σ_n は 14.3 kg/mm² である。この図から平滑試験片の幅の影響すなわちサイズ効果は FRP 板の場合、この実験の範囲ではあまり現われないと考えることができる。しかるに円孔付きの試験片では幅が大きくなると強度の低下が大きくなるが、その低下率は一定値に近づくものと考えられ、1 円孔と 3 円孔付きの試験片、 w/d がおよそ 4 以上では σ_u/σ_n の値はあまり大きく変化しないと思われる。これは幅が無限大になったときの応力集中係数が最大となり、幅が狭くなるに従い応力集中係数が低下する等方性板の場合と同じ傾向にある。

Fig. 2. Relation between strength reduction factor and the width of A and B type specimens.

3.2 荷重方向に平行な円孔列のピッチの影響

荷重方向に平行な円孔列のピッチの影響を調べるために、試験片形状が Fig.1 に示す B, C, D の場合の引張強度特性を Fig.3 に示す。縦軸は Fig.2 と同じく σ_u/σ_n であり、横軸は円孔の直径 (d) と荷重方向と平行な円孔列のピッチ (p_1) との比をとる。 $d/p_1 = 0$ の値は円孔が一つある B 型の試験片の引張強度を表わす。この図から d/p_1 の値が大きくなり、すなわち円孔のピッチが小さくなると $d/p_1 < 1$ の範囲で試験片のいずれの幅においても σ_u/σ_n の値はわずかに増加する。この結果は円孔の応力集中部の干渉効果により強度が増加することを示しているものである。

すなわち等方性板にみられるごとく、FRP 板においても荷重方向に平行な円孔列は円孔のもつ周辺条件の不連続性を緩和することにより応力集中を緩和するものと考えられ、円孔のピッチの小さいほど FRP 板

の強度を上げる上に有利となると思われる。

つぎに Fig. 4 (a)~(c)の破断写真において(b), (c)の円孔のピッチの小さい試験片 ($d/p_1=0.33$) の破断はいずれの幅においても必ず外側の円孔において起こり、円孔のピッチが大きくなると、(a)の試験片 ($d/p_1=0.125$) にみられるごとく中央の円孔から破断する場合も起こる。破断箇所は最も高い応力集中部から起きると考えられるため、これらの現象からピッチ p_1 の小さい試験片では応力干渉の影響で外側の円孔の応力集中が大きくなり、ピッチ p_1 が大きくなると干渉の影響がうすれ、三つの円孔の応力集中が同程度になり、中央の円孔部からも破断が起きると考えることができる。またこの写真から、FRP 板において損傷の進行状態

Fig. 3. Relation between strength reduction factor and the pitch of hole of B and D type specimens.

Fig. 4. Failure patterns of D and I type specimens.

Fig. 5. Isochromatic fringe patterns of C and F type specimens for $\sigma_u = 2.08 \text{ kg/mm}^2$ at D type and $\sigma_u = 2.52 \text{ kg/mm}^2$ at F type.

を示す白化現象を観察すると、(b)(c)の試験片において白化が進行していない部分は円孔間を通して存在し、(a)の試験片では円孔間の中央部で白化が進行している。これらの現象はピッチ p_1 が小さくなると円孔間の縦断面に生じている圧縮応力が減少するためと考えられる。また Fig. 5 (a)の光弾性実験における写真からも中央と端部の円孔周辺の応力分布が異なっていることが明白である。以上の現象は Fig. 6 にみられるような円孔の周辺部のひずみ測定から得られた各部の応力集中率の結果からも明白である。ただし円孔周辺部のひずみ測定の位置は円孔縁より 2.0 mm 離れた位置である。Fig. 6 において $\sigma_u = p/(w-d)$ を基準応力とした各部の応力 σ_v との比である応力集中率 $\alpha = \sigma_v/\sigma_u$ を縦軸にとり、横軸に d/p_1 をとる。ここで σ_v はひずみ量に弾性率 ($E=1920 \text{ kg/mm}^2$) を乗じて得た。この図より中央の円孔の a 部の応力集中係数は端部の円孔の b 部のそれに比べて円孔のピッチの影響を大きく受けることがわかる。また円孔間の中央部 c 点の荷重方向のひずみ ϵ_c と平均ひずみ ϵ_m との比と d/p_1 との関係も Fig. 6 に同時に示される。c 点のひずみは p_1 が小さくなると急激に低下することがわかる。ひずみ測定の結果からも弾性範囲において応力集中の緩和は円孔の位置によって異なり、3 個の円孔のうち中央の円孔が一番大きく、また円孔のピッチが小さくなるほど干渉効果も一層大きくなると考えることがで

Fig. 6. Relation between stress concentration factor and strain ratio and the pitch of hole of B and D type specimens.

きる. また FRP 材料における円孔部の周辺部の応力集中係数 α の逆数 (Fig. 6) と強度低下率 σ_u/σ_n (Fig. 2) とを比較すると, σ_u/σ_n の方が大きい. これは弾性範囲での応力集中率がそのまま強度低下率につながらないことを示し, FRP の特性により弾性範囲から断面全体が破壊にいたるまでに応力集中率の緩和が起こるものと考えられる.

3.3 荷重方向に垂直な円孔列のピッチの影響

Fig. 1 の中の B, E, F 型の試験片を用いて, 荷重方向に垂直な円孔列のピッチの影響を調べる. Fig. 7 において縦軸は σ_u/σ_n であるが, σ_u は次の値である. ここで n は円孔の数である.

$$\sigma_u = \frac{p}{(w - nd)t} \quad (2)$$

横軸に d/p_2 をとり, p_2 は荷重方向に垂直な円孔列のピッチである. 本実験の範囲では d/p_2 の値が大きくなると, すなわち円孔のピッチが小さくなると, 2 円孔および 3 円孔共 σ_u/σ_n の値はわずかに減少することがわかる. また Fig. 3 における荷重方向に平行な円孔列の場合の σ_u/σ_n と比較すると, 荷重方向に平行な円孔列の方が幾分大きいことがわかる. 等方性の無限板において荷重方向に垂直な円孔列の円孔縁の最大の応力集中率は荷重方向に平行な円孔列のそれと比較すると小さい. しかしに等方性の有限板の場合荷重方向に平行な円孔列において試験片の幅 w が小さくなると応力集中率は低下する. 一方荷重方向に垂直な円孔列の場合最大の応力集中率は円孔の数 n , 円孔の直径 d が与えられているとすると, 試験片の幅 w , 円孔のピッチ p_2 , 端の円孔中心から直線へりにいたる距離 e の三つの因子により決定されるが, 適当な円孔列の配列で集中応力が最低になり, 荷重方向と平行な円孔列の場合と特性が異なる. 本実験の範囲 (円孔の総面積/帯板の断面積 = 0.26~0.36) では, かかる配列をもつ等方性板において d/p_2 が約 0.3 より大きいところでは, 荷重方向に垂直な円孔列の応力集中率は荷重方向に平行な円孔列のそれに比べると大きくなる. 一方 d/p_2 が約 0.3 より小さい範囲では逆となるが, 両者の差は有限板の場合無限板に比べ小さくなっている. しかしに Fig. 3 の荷重方向に平行な円孔列の場合の強度低下率 σ_u/σ_n の逆数と Fig. 7 の荷重方向に垂直な円孔列の σ_u/σ_n の逆数とを比較すると, d/p_2 が 0.3 より大きいところでは等方性板の応力集中の傾向と合致するが, d/p_2 が 0.3 より小さいところでは逆である. この原因として有限板では応力集中率の差が小さくなることと, FRP 板の特性より弾性限度内における応力集中率が破断時の挙動を示す強度低下率につながらず, 応力集中の緩和が生じるためと考えられる. つぎに Fig. 8 において試験片の a および b 部のひずみ測

Fig. 7. Relation between strength reduction factor and the pitch of hole of B, E and F type specimens.

Fig. 8. Relation between stress concentration factor and the pitch of hole of F type specimen.

定 (円孔縁より 2.7 mm 離れた位置) から得られた応力集中率を示す. 縦軸の応力集中率 α は Fig. 6 と同じく基準応力を $\sigma_u = p/(w - nd)t$ ととり, 各部のひずみから計算された σ_u との比をとる. 横軸は d/p_2 である. この測定の範囲で中央部と端部の円孔とのひずみには大きな相違はないが, 中央部のひずみが少し大きくなるようである. 等方性板における a 部と b 部との応力集中率を比較すると, e/w のある値を境にして応力集中率の大きさが逆転するが, 本実験の FRP 材料の場合 $nd/w = 0.26 \sim 0.36$, $e/w = 0.24 \sim 0.32$ の範囲では a 部の応力集中率が b 部より大きくなっているが, e/w のさらに小さい範囲で b 部の応力集中率が大きくなるものと考えられる. 光弾性実験の結果の写真を Fig. 5 (b) に示し, a および b 部の応力分布に相違があることがみられる. なおき裂の発生は中央部および端部の円孔の側壁から起こる場合が考えられるが, 破断は瞬時に起こり, 両方の側壁からほぼ同時にき裂が発生するものと考えられる. これらの実験結果から円孔列の応力集中の干渉の影響は荷重方向と円孔列とのなす角度で異なり, 荷重方向に平行な円孔列の場合, 円孔のピッチ p_1 が小さくなると破断強度が増加し, 他方荷重方向に垂直な円孔列では干渉の影響で円孔のピッチ p_2 が小さくなると破断強度が低下することが判明する.

3.4 荷重方向とある角度をもつ円孔列のピッチの影響

Fig. 1 中の I 型の形状の試験片を用いて、荷重方向とある角度をもつ円孔列のピッチの影響のうち主として角度が 45° の場合について調べ、この結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 において縦軸にこれまでと同じく σ_u/σ_n をとっているが、 σ_u に $p/(w-d)t$ の値を用いている。また横軸は円孔間のピッチである $\sqrt{p_1^2 + p_2^2}$ と円孔の直径 d との比をとっている。荷重方向とある角度をもつ円孔列のピッチの影響は荷重方向と平行な円孔列のピッチの影響と垂直方向のピッチの影響の混合したものと考えることができる。角度が 45° の場合には円孔のピッチが増加すると破断強度が増加する。これは角度が 90° の場合の円孔列のピッチの影響と同じ傾向にあり、力線の流れ等を考慮しても 90° の円孔列の配列と類似しているためと考えることができる。Fig. 4 (d) に破断写真の一例を示す。き裂は端部の円孔と中央の円孔から生じている。すなわち三つの円孔の周辺の応力集中がほぼ同じであったことを示している。これも荷重方向に垂直な円孔列の場合と同じ傾向である。

Fig. 9. Relation between strength reduction factor and the pitch of hole of I type specimen.

3・5 中心に円孔をもつ菱形配列の場合のピッチの影響

Fig. 1 における G 型試験片を用いて、中心に円孔をもつ菱形配列の場合の強度特性の実験結果を Fig. 10 に示す。縦軸の σ_u/σ_n のうち σ_u は $p/t(w-3d)$ の値を用いている。まず荷重方向に垂直な円孔列のピッチ (p_2) を固定し、荷重方向に平行な円孔列のピッチ (p_1)

を変化させると、破断強度はほぼ一定であるが、わずかに最大値をもつピッチが存在するように思われる。一方荷重方向に平行な円孔列のピッチを $p_1=1.5d$ と固定した場合に p_2 を増加させるに従い破断強度は低下している。破断強度の増減に関しては円孔列の位置による不連続性の緩和状態に起因するものと考えられ、荷重方向に平行な円孔列と荷重方向に垂直な円孔列との干渉の相乗効果の結果と思われる。Fig. 11 (a) に負荷状態における試験片の透過写真を示す。Fig. 4 と異なり白化に見えるところが損傷の進行していない部分で、円孔が近接すると円孔列を包絡線で結んだ一つの切欠き部として作用する状態がわかる。なお破断は荷重方向に垂直な 3 円孔列をもつ断面で起こり、中央および端部の円孔の側壁からほぼ同時にき裂が発生する。

Fig. 10. Relation between strength reduction factor and the pitch of hole of G type specimen.

3・6 中心に円孔をもたない菱形配列の場合のピッチの影響

Fig. 1 における H 型試験片を用いて、中心に円孔をもたない菱形配列の場合の強度特性の結果を Fig. 12 に示す。縦軸の σ_u/σ_n のうち σ_u は $p/t(w-2d)$ の値をとっている。円孔のピッチ p_1 および p_2 をおのおの固定した場合両者共、ピッチが増加するにつれ破断強度が増加することがわかる。この結果は 3・5 の中心に円孔をもつ菱形配列の場合と同じく、荷重に平行および垂直な円孔列の相乗の干渉によって得られたものと思われる。Fig. 13 に円孔の a 点の応力集中率と b 点のひずみ比を示す。なお a 点は円孔縁より

Fig. 11. Observation of whitening of G and H type specimens for $\sigma_u=2.80 \text{ kg/mm}^2$ at G type and $\sigma_u=3.13 \text{ kg/mm}^2$ at H type.

2.0 mm の位置である。応力集中率およびひずみ比の計算方法は前述と同じである。この図において a 部の応力集中率は円孔のピッチ p_1 が増加すると応力集中の緩和により減少することを示し、b 点のひずみ比は p_1 が大きくなると大きくそして変化も大きい。つぎに p_1 と p_2 との比を一定にしつつピッチの長さを変化したときの a 点の応力集中率 b 点のひずみ比はあまり変化がない。かかる干渉の影響により前述の破断特性が得られたものと考えられる。Fig. 11 (b) に本試験片の透過写真を示すが力線の流れの状態をは握することができる。そして破断は荷重方向に垂直な 2 円孔がある断面で生じるがき裂は円孔の端部よりの側壁から起こる。この位置は荷重方向に垂直な 2 円孔をもつ等方性板における最大の応力集中の位置と一致している。

Fig. 12. Relation between strength reduction factor and the pitch of H type specimen.

Fig. 13. Relation between stress concentration factor and strain ratio and the pitch of hole of H type specimen.

3・7 応力集中干渉効果の実験式

本研究において五つの型の円孔列をもつ試験片の破断強度特性の実験結果についての考察を行ってきたが、荷重方向に平行な円孔列と荷重方向に垂直な円孔列の場合を基本の型とし、他の型の円孔列における応力集中の干渉の状態が二つの基本の円孔列の干渉効果の相乗したものと考えることができるならば、各配列の破断強度比 σ_u/σ_n に関して次の実験式を考えることができる。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_n} = k_1 \exp \left(k_2 \frac{d}{p_1} + k_3 \frac{d}{p_2} + k_4 \frac{d^2}{p_1 \cdot p_2} \right) \quad (3)$$

ここで k_1 , k_2 , k_3 および k_4 は円孔列の型によってき

まる定数である。本実験においては、(1)中心に円孔をもつ菱形配列 (G型) の場合 $k_1=0.705$, $k_2=0.069$, $k_3=-0.154$, $k_4=-0.069$ であり、とくに $d/p_1=0$ のときは荷重方向に垂直な 3 円孔列の σ_u/σ_n の値を示し、 $d/p_2=0$ は荷重方向に平行な 3 円孔列を示し、原点は 1 円孔付試験片のそれを示す。(2)中心に円孔をもたない菱形配列 (H型) の場合 $k_1=0.705$, $k_2=0.069$, $k_3=-0.105$, $k_4=-0.244$ であり、 $d/p_1=0$ のときは荷重方向に垂直な 2 円孔列の σ_u/σ_n を意味し、 $d/p_2=0$ のときは荷重方向に平行な 2 円孔列を表わす。た

Fig. 14. Two dimensional interference effect for the strength of G type specimen.

Fig. 15. Two dimensional interference effect for the strength of H type specimen.

Fig. 16. Two dimensional interference effect for the strength of I type specimen.

だし、この場合、原点は除くものとする。(3)荷重方向とある角度をもつ円孔列 (I 型) の場合 $k_1=0.705$, $k_2=0$, $k_3=0$, $k_4=-0.522$ であり, $d/p_1=0$ と $d/p_2=0$ の場合 1 円孔付試験片の σ_u/σ_n を示す。

三つの型の円孔列の破断強度低下率 σ_u/σ_n の実験値と(3)式から得られた計算値との比較を Figs. 14~16 に示す。これらの図において σ_u/σ_n の値が d/p_1 , d/p_2 より求めることができる。そして実験式の値と実験値とがおおよそ一致しているのがみられる。

4 結 論

本研究において一様引張荷重を受ける多数個の円孔群の切欠きを有する FRP 板における応力集中部の干渉効果についての検討を行なうために、五つの型の円孔列の破断強度特性が調べられ、本実験の範囲において次の結果が得られた。

(1) 荷重方向に平行な円孔列をもつ FRP 板においては干渉効果により応力集中が緩和され円孔のピッチが小さくなると破断強度特性は向上する。

(2) 荷重方向に垂直な円孔列の場合、本実験の範囲で応力集中の緩和が阻止され、円孔のピッチが小さくなるほど破断強度は減少する。

(3) 中心に円孔のある菱形配列および中心に円孔のない菱形配列そして荷重方向とある角度をもつ円孔列をもつ FRP 板の破断強度特性荷重方向に平行および

垂直な円孔列の応力集中の干渉効果の相乗したものに起因すると考えることにより簡単な実験式を導き、実験値とかなりの一致をみた。

(4) 本研究で行なった実験は限定された範囲のものであり、円孔間のピッチが円孔の直径より小さい範囲、また端部の円孔の中心と直線へりまでの距離をさらに変化させた場合の破断強度特性についての研究が今後に残された課題と考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、光弾性実験に関して神戸高等専門学校 五辻精一氏のご協力に深く感謝の意を表する。

(昭和50年3月27日 第4回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Whitney, J. M., and R. J. Nuismer, J. Composite Materials, 8, 253 (1974).
- 2) 西田正孝, 応力集中, 134 (1967) 森北出版
- 3) Peterson, R. E., Stress Concentration Factors, 108 (1974) John Wiley & Sons
- 4) Howland, R. C. J., Proc. Roy. Soc., London, A-148, 261 (1935).
- 5) 林 卓夫, 機論, 25, 1125 (1959).