FRP プレス成形におけるウェルドライン の生成と進展に関する研究[†]

平井 恒夫* 濱田 泰以**

Initiation and Growth of Weld Line during Press Moulding of Composites

by

Tsuneo HIRAI* and Hiroyuki HAMADA**

The press moulding process is being applied extensively as the mass production technology for composite materials especially FRP. In this process, although ribs are installed to strengthen the products, they tend to reduce the strength of products by the formation of interface due to two symmetrical flows from the both sides of flat parts toward the rib part. This interface is called "Weld Line".

The aim of this paper was to clarify the behavior of weld line. At first, the initiation and growth of weld line were observed by flow visualization experiments. Then, three point bending tests were carried out to evaluate the press moulded products containing the weld line. Furthermore, fracture surface was observed microscopically by using SEM. From the above experiments, the following results were obtained.

- (1) The weld line initiated at the opposite surface of the rib part and grew into the rib.
- (2) The weld line reduced the bending strength to the value less than that of the specimen made of only resin.
- (3) No reinforcement existed across the weld line.

Nextly, the numerical procedure to understand the growing of weld line was performed by applying the initial flow analysis presented previously. The results indicated that the weld line in the case of wide rib differed from that in the case of narrow rib width.

キー・ワード: FRP, プレス成形, ウェルドライン, BMC, SMC

1 緒 言

FRP 成形品には、構造上剛性を高めるためにリブ部を設けることが多くある。SMC, BMC を用いた加熱圧縮成形によると、これら複雑断面の部材を容易に成形することが可能なため現在その使用分野が拡大しつつある。しかし成形中の材料流動により、様々の難点が生じてくる。例えば製品の商品価値が著しく減ずるヒケと称されるへこみの問題、断面急変部でのレジソリッチ、外表面材料を内部に引き込んで生じるウェルドラインによる強度低下、硬化進展状況に伴って内部に発生する残留応力に基づく、そり、ひねりなどがあげられる。さらにこれら難点を解決し加工サイクルを速めることも求められている。

すでに筆者らは、対称面上にリブ部を有するT字形断面部材を対象としてBMC材を用いて、様々の成形条件下で実験を行い、その流れ様相の特徴を把握してきた。^{1,2)} 一方、数値解析においては、強化繊維の流れ方

向への配向を考慮し、複合材料の流れの支配方程式として均質異方性擬塑性流体方程式を導出し、³⁾ 本質的には非定常変形過程である流れ様相を流れの方向に解析領域を漸増しつつ定常解の積み重ねにより把握するProgressive Step by Step Methodを確立した。⁴⁾ さらに支配方程式にエネルギー方程式を付加し、金型温度の影響をも考慮した流れ様相の把握に努めた。⁵⁾ 圧縮終了後の硬化進展様相については、エネルギー方程式に化学拡散による発熱の影響を加え解析を進めた。⁶⁾ これら数値解析の妥当性は実験解析によって得られた流れ様相、温度分布と良い対応を示していることにより認められた。そこで数値解析手法を応用し加工のサイクルアップに寄与する金型配置についても検討を加えた。一方、ウェルドラインに関しては、その発生は成形初期において外表面部の材料がパンチ面より離れる部分が生じるために起るものと考えられ、成形中の初期流れに関して段階的に数値解析法を組み合わせることによ

[†] 原稿受理 昭和59年6月11日 Received June 11, 1984

* 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区烏丸今出川, Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Karasumaima-degawa, Kamigyo-ku, Kyoto

** 正 会 員 大阪市立工業研究所 大阪府城東区森之宮, Osaka Municipal Research Institute, Morinomiya, Joto-ku, Osaka

り表現した⁸⁾。さらに材料の不均質性の影響であると考えられるウェルドラインの“ゆらぎ”についても固有値解析を導入し検討を行った⁹⁾。これらウェルドラインに対する数値解析手法を応用し、その防止にはハイブリッド積層が有効であることを示唆してきた¹⁰⁾。

そこで本研究においては、ウェルドラインの生成過程の特徴を流れの可視化実験より、詳細に検討し、ついで強度特性について成形品の3点曲げ実験により明らかにする。また破面観察を行い、ウェルドラインの特徴を明確にする。さらに前述した数値解析を応用しウェルドラインの進展の容易さを把握する手法の確立を目指す。

2 ウェルドラインの特徴

2.1 可視化実験によるウェルドラインの生成過程

BMC 材を厚さ 6 mm まで予備圧縮し、それを 3 枚積層した試材を用いて成形を行った部材の断面図を Fig. 1 に示す。図中の丸印は、各層に等間隔にこの断面と垂直方向に挿入した同質の色違いの標点である。ウェルドラインは緒言でも述べたように中心軸をまたぎ“ゆらぐ”ような様相を示しながらリブ内部に進展し

Fig. 1. Cross section of FRP press molding.

Fig. 2. Experimental apparatus for flow visualization.

ている。このようなゆらぎの様相は、均質等方性材料を用いて同様の成形を行った際には見られなかった。そこでウェルドラインの生成過程を詳しく検討するために Fig. 2 に示すような装置を用いて可視化実験を行った。この金型は、組立て方式であるため、リブ幅は自由に設定することができるが本論文では 30 mm の場合について検討する。リブ長さ H は 12~60 mm で可変である。材料流動を観察するために、強化ガラスを取り付け、図中矢印の方向より写真撮影を行った。強化ガラスと材料の接触面には、材料流動が壁面の摩擦の影響を受けないようにワセリンを塗布した。試験片は、Fig. 3 のように厚さ 6 mm の BMC 材を 3 枚積層し、端面に格子を描いた。材料流動は格子の変形状態で表した。また各層内でのずれの様相や格子線の明確でない箇所は破線で表すこととした。

Fig. 3. Shape and dimensions of specimen used.

Fig. 4 に変形状態図を示す。それぞれ変位量 2.7 mm, 4.5 mm, 成形完了の段階である。Fig. 4 (a)においてはリブ背面部で材料が左右より圧縮され、そして折れ曲ることにより、パンチ面より材料が離れている。また積層面や内部で積層面に平行にずれが生じている。Fig. 4 (b)では、リブ背面部でパンチ面に接していない部分への充てんがみられるが、その様相は非対称なものとなっている。この部分では強化繊維の貫通しない界面となっているものと観察される。また全体的な流れ様相は、格子点の各段階での位置を結び得られる有

Fig. 4. Deformation state obtained by the flow visualization experiment.

限変位ベクトルより判断することができる。たとえば Fig. 4 の(a)(b)(c)の格子点を順次結ぶと、すでに我々が指摘してきた複合材料の流れの様相である金型肩部を回り込み回する流れやリブ内部での蛇行流れなどがみられる。

2・2 ウェルドラインの強度特性

ウェルドラインを有する部材の強度特性を3点曲げ試験により検討する。Fig. 5 に示すようにT字形部材より、リブ部を取り去り、ウェルド部を引張側に設置し曲げ試験を行った。また比較のため Fig. 6 に示す押出し器により強化繊維が試験片長手方向に配向するように材料を押し出し、その後 120 mm×12 mm×6 mm の金型で硬化させた直方体試験片についても実験を行った。

Fig. 5. Shape of specimen used for three point bending test.

Fig. 6. Extruder for the specimen.

実験結果を曲げ応力-荷重負荷点の変位量をスパンで除した無次元量との関係で示すと Fig. 7 となる。この場合、スパン-厚さ比は7とした。曲げ強さは、ウェルドラインが部材中に含まれると1/4以下に低下していることがわかる。またウェルドラインが生じていない場合は、最大応力に達してから一定荷重を示した後に破断に至るが、ウェルドラインが存在する場合には、直線的に曲げ応力が増大し最大応力後は、急激に低下している。Fig. 5 に示すように成形する際、リ

Fig. 7. Relation between bending stress and non-dimensional deformation by span length.

ブ長さ H を変えるとウェルドラインの長さも変化するが、Fig. 1 に示したように試験片断面をウェルドラインが貫通している場合には最大応力後に応力が直ちに0となる場合がある。

つぎに強化繊維を混入しない樹脂部のみの部材と比較したのが Fig. 8 である。ウェルドラインが存在する場合の試験片寸法は、Fig. 7 に示した場合と同様である。樹脂部のみの部材は、Fig. 2 に示す金型を用いて 134 mm×100 mm×14 mm の直方体を作成し、その後 $b=10$ mmの幅に切り出した。この場合スパンを変化させることにより l/h を変化させた。スパン厚さ比が大きくなるにつれて両者とも曲げ強さは低下するが、ウェルドラインが存在する場合は、曲げ強さで10 MPa 以上低いことがわかる。

Fig. 8. Relation between bending strength and span/thickness.

また強度評価の一つの方法として破壊力学の手法を用いて、リブ長さ H を変化させることにより、ウェルドラインの長さを変え、その長さをき裂長さとして、破壊じん性値 K_Q を求めると、き裂長さが大きくなるにつれて破壊じん性値も増大する傾向となる。したがって、ウェルドラインの強度評価に対しては、破壊力学的手法を用いることができないものと考えられる。

2・3 ウェルドラインの破面観察

2・2 節で3点曲げ試験を行った後の破面観察を走査電子顕微鏡を用いて行った。この場合ウェルドライ

ンが試験片断面を貫通していないものを用いた。ウェルドラインの生じていない部分 (Fig. 9 (a)) では、破断した強化繊維が観察される。その破断面は Fig. 9 (b) によると断面の一部よりき裂が進展し破断した様相を示している。また繊維と樹脂部との接着の不十分により繊維が引き抜かれた跡だと思われる空洞が観察された。つぎにウェルド部 (Fig. 9 (c)(d)) では、破断面

Fig. 9. Fractographs of specimen with weld line.

に沿った強化繊維が良く観察され、強化繊維の断面も Fig. 9 (b) にみられたような鋭い破断面ではなく、強化繊維を破断して破壊が進行した様相はみられない。したがって、ウェルドラインでは強化繊維の貫通は無く、2・1節で示したように二つの界面が単に接着している部分であることが明らかとなった。2・2節で示したように、ウェルド部が樹脂単体の材料よりも強度が低いのは、ウェルド部でそれを横切る強化繊維がなく、樹脂部となっているため破壊がまずこのウェルド部で発生し、さらに樹脂単体の強度より、樹脂と強化繊維の接着強度の方が低くかつ応力集中をきたし、破壊がウェルド部に沿って進展するためであると考えられる。また、破壊力学的手法によりウェルド部の強度評価ができないのは、このような不均質構造を有する材料に対する破壊力学的手法の応用限界の一端を示すものと考ええる。

3 ウェルドラインの発生、進展に関する数値解析

3・1 数値解析方法

ウェルドラインの発生^{8)~10)}に関しては、材料の初期流れの数値解析方法を用いた。すなわち塑性流動が開始するまでについて線形増分解析を行い、変形状態を求める。各要素のひずみ状態より近似的に初期粘性を各要素について求めた。その結果を受けて流動解析に移り流速分布を求めた。すでに示したようにウェルドラインの発生は、パンチ面より材料が離れる部分が生じることによるため、パンチと材料との接触面において圧力分布に負圧が生じるものと考えられる。そこで線形増分解析においてパンチ面上の節点に注目し、節点反力が圧縮から引張りに変化する場合には、パンチ面の拘束を解く条件を与えた。

以上の方法をウェルドラインの進展について応用するために、流動解析の後に再び線形増分解析を行うこととする。解析方法のフローチャートを Fig. 10 に示す。この場合、流動解析によって得られる粘性の分布より近似的に線形増分解析に用いる剛性の分布を求め

Fig. 10. Flow chart of the numerical analysis.

た。これより強化繊維配向方向の影響が線形増分解析に反映され、各段階ごとのパンチ面上の圧力分布のモードについて検討することとなる。

Fig. 11 に用いた要素分割図を示す。解析対象は、中央にリブ部を有するT字形断面とした。A-Eは中心軸A-Bがパンチ面、B-C、C-Dが金型壁面である。D-Eがリブ流入口であり、本研究ではウェルドラインの進展に及ぼすリブ幅の影響を検討するためD-Eの長さが15 mmと5 mmの2種類とした。線形増分解析においては、パンチ面が0.1 mmずつ変位する変位増分法を用いた。

Fig. 11. Finite element model.

3・2 数値解析結果

線形増分解析により得られた変形図のリブ直上部においてパンチ面の拘束を解いた節点を黒丸で表した。Fig. 12 では、第2ステップでは、中心線付近とリブ肩部直上に黒丸が見られるが、第4ステップ以降は、その数が増し、リブ部全体に拘束を解いた点が生じる。つぎにこの線形増分解析結果を受けて行った流動解析結果を Fig. 13 に示す。流れ様相は、金型肩部にう回する傾向にあり、2・1節で示した可視化実験結果と良い対応を示している。Fig. 14 は、第1段階の流動解析後の線形増分解析結果である。パンチ面の拘束を解いた点は、リブ幅全体にわたっており、ステップによってほとんど変化がみられない。圧力分布のモード変化がないということは、ウェルドラインの進展が容易

Fig. 12. Deformation state obtained by linear incremental analysis (rib width 30 mm).

Fig. 13. Velocity vectors obtained by flow analysis in the initial step (rib width 30 mm).

であることを示している。

Fig. 15 には、第2段階の流動解析結果を示す。金型肩部をう回する流れはみられている。Fig. 16 には、この段階後の線形増分解析結果を示す。第2ステップでは、パンチ面の拘束を解く節点は、みられず、第4ステップ以降も中心線沿いに存在するが前段階よりはその数は少なくなっている。このことは、ウェルドラインの進展が流れによる材料状態の変化（たとえば粘性、強化繊維の配向）が影響し、妨げられることを示している。

Fig. 14. Deformation state obtained by linear incremental analysis (rib width 30 mm).

Fig. 15. Velocity vectors obtained by flow analysis in the second step (rib width 30 mm).

つぎにリブ幅が狭い場合の結果を Fig. 17~21 に示す。塑性流動が開始するまでの線形増分解析結果 Fig. 17では、第2ステップでは、パンチ面の拘束を解く節点はみられず、第4ステップ以降もその数は少ない。Fig. 18 に示す流れの様相は金型肩部を大きくう回する傾向がみられている。次段階の線形増分解析結果 Fig. 19 ではパンチ面の拘束を解く節点数は増しているが、第2段階の流動解析 (cf. Fig. 20) 後の線形増分解析結果 Fig. 21 では、第2ステップではそれらの節点はみられず、それ以降は、中心軸に沿った部分と金型肩部真上の部分にみられており、また同じ場所にみられずモードが変化している。ステップごとに変化が現れることは、ウェルドラインの進展を阻止する効果があるものと考えられる。すでに示したリブ幅が広

Fig. 16. Deformation state obtained by linear incremental analysis (rib width 30 mm).

Fig. 17. Deformation state obtained by linear incremental analysis (rib width 10 mm).

Fig. 18. Velocity vectors obtained by flow analysis in the initial step (rib width 10 mm).

Fig. 19. Deformation state obtained by linear incremental analysis (rib width 10 mm).

Fig. 20. Velocity vectors obtained by flow analysis in the second step (rib width 10 mm).

Fig. 21. Deformation state obtained by linear incremental analysis (rib width 10 mm).

い場合と比べると狭い場合が、ウェルドラインが進展し難いことがわかった。

4 結 言

FRP プレス成形品に生じるウェルドラインについて、その生成過程、強度特性を実験により明らかにし、ついでウェルドラインの進展を把握できる数値解析手法の開発を試みた結果、以下のような結言を得た。

(1) ウェルドラインは、材料がパンチ面より離れる部分から生じることが流れの可視化実験により明らかとなった。

(2) また、その進展は対称軸をまたぎ“ゆらぎ”の傾向がみられる。

(3) ウェルドラインを含む部材の曲げ強度は、含まない場合の1/4となり、さらに強化繊維を含まない樹脂部単体の部材よりも低い強度しか有さない。

(4) 破壊後の破面観察の結果、ウェルドラインに沿って強化繊維は配向しており、これを貫通している強化繊維は存在しない。

(5) 線形増分解析と流動解析とを組み合わせた初期流れに関する解析法の実用により、ウェルドラインの進展を把握し得る解析手法を開発し、リブ幅の違いによるウェルドライン進展の容易さの相違が明らかとなった。

本研究に対して多くのご助言を頂いた、大阪府立工業技術研究所横山敦士氏、同志社大学大学院（現在住友電工）坂 寛延氏に感謝します。

また走査電子顕微鏡による破面観察に当っては、大阪市立工業研究所伊丹正郎氏に多大なご協力を頂いたことを記し、感謝いたします。

（昭和59年3月22日 第13回 FRP シンポジウムにて講演）

参 考 文 献

- 1) 平井恒夫, 片山伝生, 木村照夫, 石瀬寿一, 濱田泰以, 材料, **28**, 1218 (1979).
- 2) 平井恒夫, 濱田泰以, 材料, **32**, 1004 (1983).
- 3) T. Hirai and T. Katayama, Proc. of 2nd Int. Conf. on Composite Materials, p.1283 (1978).
- 4) T. Hirai, T. Katayama and H. Hamada, Advances in Composite Materials, p.1606 (1980).
- 5) 平井恒夫, 濱田泰以, 強化プラスチック, **27**, 2, 46 (1981).
- 6) 平井恒夫, 濱田泰以, 坂 寛延, 材料, **33**, 85 (1984).
- 7) T. Hirai, T. Katayama and H. Hamada, Progress in Science and Engineering of Composite, **2**, 1593 (1982).
- 8) 平井恒夫, 濱田泰以, 横山敦士, 坂 寛延, 強化プラスチック, **29**, 198 (1983).
- 9) T. Hirai, H. Hamada and A. Yokoyama, Proc. of Int. Sympos. on Fracture Materials, 6-4 (1983).
- 10) 平井恒夫, 濱田泰以, 横山敦士, 材料, **33**, 55 (1984).