# らせん積層 CFRP 平板の点および面載荷時曲げ挙動

Flexural behaviors of helicoidally laminated CFRP plates under point and surface load

北海道大学大学院工学院	○学生員	石澤郁馬 (Ikuma Ishizawa)
北海道大学大学院工学研究院	正会員	松本高志 (Takashi Matsumoto)
北海道大学工学系技術センター技術部	正会員	近藤健太 (Kenta Kondo)

## 1. はじめに

近年,炭素繊維強化ポリマー(Carbon Fiber Reinforced Polymer,以下 CFRP)が注目されている. CFRP は炭素 繊維と熱硬化性樹脂との複合材料で,低密度であり,比 強度と比剛性,耐腐食性に優れる材料である.土木分野 でも活用が期待されているが,CFRP は破壊時の挙動が 脆性的である点に留意が必要である.

これまでの研究では、生物界で最も強固な構造組織の 一つであるシャコの捕脚に見られるキチン繊維のらせん 積層を模倣した CFRP 細板(40mm×180mm×4mm)を 製作して 3 点曲げと 4 点曲げ載荷実験を行った<sup>1)2)3)4)5)</sup>. 荷重一変位曲線,最大荷重前後のエネルギー吸収量の比, 載荷中の供試体側面のひび割れ観察の比較により,配向 角度差の小さならせん積層構成にすることで CFRP の脆 性的な挙動が緩和されることを確認した.

しかしながら、この CFRP 供試体では梁軸方向より配 向角度差のある繊維が供試体側面で目切れとなる. 観察 においても側面の目切れ箇所からのひび割れ発生・進展 が多く確認されており、供試体に目切れがあることで損 傷や破壊挙動に何らかの影響を与えていると考えられる.

以上を踏まえて、本研究では目切れの影響が起こらな いようにするために、らせん積層を含む2種類の積層構 成の CFRP 平板(200mm×200mm×4mm)を作成し、 点載荷と面載荷の二つの載荷条件により載荷を行い、曲 げ挙動について比較検討を行った.

## 2. 実験方法

## 2.1 プリプレグ

CFRP の成形にはプリプレグによるオートクレーブ法 を用いた.プリプレグとは、炭素繊維基材に着色剤、充 填材等を適正な割合で混合した樹脂を含侵させたシート 状のもので、かつ硬化させる前のものである.使用した プリプレグは三菱レイヨン製の UD(Uni-Directional)プリ プレグで一方向に繊維が整列されたものである.プリプ レグ目付は 187.3(g/m2)、繊維目付は 124.3(g/m2)、繊維 含有率は 66.4(wt%)となっている.

#### 2.2 供試体

供試体はプリプレグを積層して製作する. 平板供試体 の辺方向を配向角 0°とし,角度を変えて積層していく. 製作する供試体の積層構成は圧縮面を1層目とし,反時 計回りを正方向として配向角を増やしながら積層してい く.表1の[]内の配向角を順番に積層していき,繰り返 し回数を下付きで表した. 積層構成によって名称を CP, SH9とする. 供試体の寸法は縦 200mm,横 200mm,厚 表1 供試体積層構成

名称	枚数	積層構成
СР	40	[0/90]20
SH9	40	[0/9/18/27/36/45/54/63/72/81/90/99
		/108/117/126/135/144/153/162/171]2



図1 供試体作製手順



図2 点載荷載荷条件



図3 面載荷載荷条件

## さ約4mm となっている.

供試体は図1のようにオートクレーブ法を用いて製作 した. 積層構成 CP の場合はプリプレグを 200mm 四方, SH の積層構成の場合は 290mm 四方に裁断し,積層構 成に合わせて積層していく.その際に、層間に気泡が入 らないよう,丁寧に圧力をかけながら貼り合わせていき, 積層したプリプレグをピールプライクロス、ブリーザー ファブリック,バキュームバックの順に覆い,シーラン トテープで上下面と真空引き口の真空ホースを密着した. その真空パックを上下1枚ずつ厚さ2mmのステンレス 板で挟み,用意した加圧器具で全体を加圧する.加圧し たプリプレグを電気炉に入れて室温から 80 度まで毎分 1 度ずつ温度を上げ,80 度を1時間維持,さらに130 度 まで毎分1度ずつ温度を上げ、130度を2時間維持する ことで CFRP を成形する. 完成した CFRP について、 SH9 の供試体は 200mm 四方に裁断し,供試体とした. 供試体の名称は(載荷方法)-(積層構成)-(供試体番号),の 順で表す.載荷方法の名称は点載荷を P(point-loading), 面載荷を S(surface-loading)と表す.供試体は載荷方法と 積層構成の組み合わせごとに3枚ずつ作製し、それぞれ に1,2,3,と番号を振った.

#### 2.3 載荷条件

載荷実験装置には、オートグラフ(SHIMADZU AG-1250kN)を使った. 点載荷と面載荷の方法をそれぞれ図 2 と図 3 に示す. 点載荷は支点間距離を 150mm, せん 断スパンは 75mm, 面載荷は支点間距離, せん断スパン は 50mm とし, いずれも載荷速度 2.0mm/min の変位制 御で実験を実施した. 三軸ロゼットゲージは供試体の底 面スパン中央に貼付してひずみの計測を行い, 載荷実験 中の供試体の底面と斜め上側からのビデオ撮影も行う. 最大荷重は 125kN とし, これ以上続けると供試体が完 全に破断すると判断したときに実験終了とした.

#### 3 実験結果

#### 3.1 荷重変位曲線

実験で計測した荷重と変位の関係を図 4, 図 5, 図 6, 図 7 に荷重変位曲線として示す.荷重と荷重計測時の変 位については(荷重,変位)として以下では表す.単位に ついて,荷重は kN,変位は mm である.

#### 3.1.1 点載荷

まず図 4 の CP について,最大荷重と最大荷重時変位 は供試体番号順に(21.20, 12.99),(20.33, 13.24),(20.30, 9.84)となった. P-CP-1, P-CP-2 は最大荷重直後の大き な荷重降下の後に大きな荷重の増加はなく,緩やかに荷 重を低下させていった. P-CP-3 は最大荷重後に小さな 荷重減少と増加を繰り返した後変位が 11.29mm の時点 で大きな荷重降下が見られ,その後は P-CP-1 と P-CP-2 の供試体と同様の挙動を見せた.

次に図 5 の SH9 について,最大荷重と最大荷重時変 位は供試体番号順に(32.58, 12.18),(35.13, 11.43), (32.25, 13.60)となった.いずれの供試体も最大荷重後 は大きな荷重降下を示した後に,荷重増加と減少を繰り 返しながら徐々に荷重が低下する結果となった.



#### 3.1.2 面載荷

まず図 6 の CP について,最大荷重と最大荷重時変位 は供試体番号順に(54.05,14.02),(50.18,13.12),(51.78, 13.43)となった. S-CP-1 では 8.40mm, S-CP-2 では 8.67mm, S-CP-3 では 8.94mm でそれぞれ 11.55kN, 11.88kN, 12.78kN の荷重降下が見られ, その後最大荷 重を計測した. S-CP-2 と S-CP-3 は最大荷重後にしばら く荷重の増加が見られたが, その後大きな荷重降下が見 られ, その後は荷重が増加することはなかった. S-CP-1 は最大荷重後大きな荷重降下が見られ, そのあと少しの 荷重増加が起こり, 次の荷重降下後は荷重の増加が起こ らなかった.

次に図 7 の SH9 について, 第一ピーク荷重と第一ピ ーク荷重時変位は供試体番号順に(40.43, 8.43), (43.15, 8.95), (45.63, 9.13)となった. いずれの供試体も最大荷 重後大きな荷重の降下が見られ, その後は荷重降下を繰 り返しながらも全体的には荷重を増加していき, S-SH9-1 は 29.36mm 時点で 40.82kN と最大値を計測する結果 となった.

#### 3.2 エネルギー吸収量の比

図8の荷重変位曲線において、曲線の下の面積をエネ ルギー吸収量として算出する.算出には区分求積法を用 いた.変位0mmから最大荷重時変位までのエネルギー吸 収量(①)と最大荷重時変位からさらに最大荷重時変位の 45%分の変位までのエネルギー吸収量(②)との比率(②/ ①)を算出する.算出した結果を図9,図10に示す.

## 3.2.1 点載荷

CP について, エネルギー吸収量の比は供試体番号順 に 0.62, 0.47, 0.82, となり, 平均値は 0.64 であった.

SH9 について, エネルギー吸収量の比は供試体番号 順に 0.66, 0.52, 0.60 となり, 平均値は 0.60 であった.

CP にばらつきはあったが, SH9 よりもわずかにエネ ルギー吸収量の比が大きくなる結果となった.

#### 3.2.2 面載荷

CP について, エネルギー吸収量の比は供試体番号順 に 0.48, 0.83, 0.49 となり, 平均値は 0.60 であった.

SH9 について, エネルギー吸収量の比は供試体番号 順に 0.59, 0.62, 0.60 となり, 平均値は 0.61 であった.

また, SH9 については実験終了時までのエネルギー 吸収量の比を算出した結果, 4.71, 4.33, 4.47 となり, 平均値は 4.47 であった.

S-CP-2 で平均値を底上げする形となったが, SH9 の 方がエネルギー吸収量の比が大きくなる結果となった.

# 3.3 実験後の供試体観察

実験後の供試体について,底面部の写真を図 11,図 13 に,側方の写真を図 12,図 14 に示す.撮影に使用し た供試体は P-CP-1, P-SH9-3, S-CP-3, S-SH9-2 である. 肉眼で確認できる表面と内部の破壊状況について述べて いく.

#### 3.3.1 点載荷

P-CP-1 について,底面部は十字にひび割れが起きていた.ひび割れは繊維の方向に沿って進展していた.内部も十字のひび割れが幾重にも起こっていることが観察できた.

次に P-SH9-3 について,最底面は繊維に沿ったひび割 れが起きており,側面からみると内部はねじれるように ひび割れが進展している様子が確認できた.







図9 エネルギー吸収量の比(点載荷)



図10 エネルギー吸収量の比(面載荷)

### 3.3.2 面載荷

S-CP-3 について,載荷面内部にはひび割れが確認されなかった.ただし,載荷面の縁に沿って繊維が大きく破断している様子が確認できた.

次に S-SH9-2 について,載荷面の周辺ではひび割れは 確認されず,支点周辺での大きなひび割れが確認された. そのひび割れを境に底面側に折れ曲がるようにして破壊 が進んでいた.

#### 4 考察

まず,荷重変位曲線から第一ピーク荷重と第一ピーク 荷重時変位について比較する.

点載荷において第一ピーク荷重の平均値を比べると CP は 20.61kN, SH9 は 33.32kN と SH9 の方が 12.71kN 大きい結果となった.一方で先行研究として行っていた 3 点曲げ載荷実験と 4 点曲げ載荷実験ではいずれも CP の方が平均 1.31kN, 2.23kN 大きくなるという結果であ った. これについては前述したように目切れの影響が起 こらない供試体であることが関係していると考えられる. 今回の実験で載荷点下にある繊維は全て引張方向に抵抗 する向きとなっており, CP, SH9 いずれの供試体も引 張に抵抗する繊維の本数は同じである. さらに SH9 の 繊維方向は多くの方向を向いており, CP に比べて繊維 一方向に対する荷重が分散された結果, 第一ピーク荷重 が大きくなったと考えられる.

次に面載荷について,第一ピーク荷重の平均値を比べ ると CP の方が 8.93kN 大きい結果となった.これにつ いては,載荷面の縁に対する繊維の本数と方向を考慮し て,点載荷と同様の考察をすべきと考えており,今後検 討していきたい.

次にエネルギー吸収量の比について比較する.

P-CP, P-SH9, S-CP, S-SH9 各方法で平均値はそれぞ れ 0.64, 0.60, 0.60, 0.61, と大きな違いが見られなか った. これについては, CP では第一ピーク荷重後に少 し荷重の保持が見られたこと, SH9 では荷重の増減は 見られたが,全体として大きな低下となっていなかった ことが要因となり,大きな違いを生まなかったと考えら れる.

しかしながら, S-SH9 は第一ピーク荷重後に大きな荷 重降下はあるものの,その後全体的には荷重上昇を継続 して第一ピーク荷重と同等のレベルにまで至っている. これにより大きなエネルギー吸収量の比を生み出してい る.

最後に,実験後供試体写真の観察について, CP では 直交二方向に割れが進展しており局所的な破壊が発生し たことに対して, SH9 では大きく広がるような破壊が 観察された.これにより変形も SH9 では局所的ではな く広域的に生じている.また,打音によって確認したと ころ, SH9 は全方向に広く剥離によると考えれる鈍い 音がしたのに対して, CP ではこうした鈍い音が生じる 領域は限られた.SH9 の積層構成により繊維の配向角 が多方向であることにより,内部における剥離が広がっ てこうした挙動を生んでいると考えられる.

以上のようなメカニズムについては、今後ビデオ映像 の分析により、損傷と破壊を荷重変位曲線と関連付けて 行っていく必要がある.

#### 5 まとめ

本研究では、らせん積層構成の CFRP を作成して、 CFRP 平板の曲げ挙動を点載荷および面載荷実験で確認 した.

実験の結果,荷重変位曲線において,供試体の繊維目 切れの影響を無くしたことでらせん積層の CFRP の最大 荷重が大きくなることが確認された.

次にエネルギー吸収量の比において, 同条件下では 積層構成によるエネルギー吸収量の比に違いは見られな かったが,らせん積層は全体的に大きな値を示した.

最後に実験後の供試体写真の観察において, CP では 破壊が局所的だったのに対し、SH9 では破壊がより広 範囲に起こることが確認された.



図 11 実験後供試体底面写真(点載荷)



図 12 実験後供試体側方写真(点載荷)



図13 実験後供試体底面写真(面載荷)



図 14 実験後供試体側方写真(面載荷)

# 参考文献

- L. K. Grunenfelder, N. Susangpanya, C. Salinas, GMilliron, N. Yaraghi, S. Herrera, K. Evans-Lutterodt, S. R. Nutt, P. Zavattieri & D. Kisailus: Bio-inspired impact-resistant composites, Acta Biomaterialia, Vol. 10, No. 9, pp. 3997-4008, 2014.
- 2)石澤郁馬, 細目貴之, 松本高志: らせん積層 CFRP の 曲げ破壊形態, 第 73 号土木学会北海道支部論文報告 集.
- 3)細目貴之,石澤郁馬,松本高志:らせん積層 CFRP の 曲げ特性,第73号土木学会北海道支部論文報告集.
- 4)近藤健太, 松本高志: UD プリプレグを用いたらせん積 層構成 CFRP の作製精度と材料特性の考察, 第 73 号 土木学会北海道支部論文報告集.
- 5)石澤郁馬,近藤健太,松本高志:らせん積層 CFRP の 4 点曲げ挙動に関する実験,第 74 号土木学会北海道 支部論文報告集.