箱形断面 CFRP 梁の FEM 解析と耐荷力推定式の検討

北海道大学　正会員　松本高志　学生員　○櫻庭浩樹　清水建設（株）正会員　稲田裕　吉武謙二　杉山博一
清水建設（株）フェロー会員　後藤茂　石塚与志雄　東レ（株）正会員　鈴川研二　松井孝洋

1. はじめに

Carbon fiber reinforced plastic（CFRP）は、軽量・高強度、耐候性に優れているなど、近年土木分野において適用が研究されている材料である。現状では修復や補強材料としての利用がほとんどであり、主要部材として設計された例は少ない。よって建設構造物を対象とした設計を可能にするためには、損傷、破壊に基づいたモデルの構築と解析による再現が必要になっている。現在までに、CFRP を用いた実験 [1)]と解析による検討 [2)]が行われている。本報では、この実験を FEM により再現している。その結果から実験で破壊が生じている箇所の応力状態を把握し、CFRP の材料試験から得られた特性値と理論式の応力を用いて、箱形断面 CFRP 梁の耐荷力を推定することを目的としている。

2. 箱形断面 CFRP 梁の曲げ軸力載荷実験

実験ではCFRP の矩形の外殻にコンクリートを中詰したものを対象としている。図 1 に曲げ試験の側面図を示す。CFRP は梁軸方向と周方向の繊維比率が異なる 5 種類の繊維配向（S1～S5）のものが用いられている。また中詰の有無（無しは e と示す）、コンクリートの種類（普通強度、低強度コンクリート、それぞれ N,L と示す）、および、曲げモーメントと軸力の比率である曲げ軸力比（∞、0.32、0.16、0.04）をパラメータにした全 25 ケースの試験体で行われている。以下の検討では、’S3-∞-e’のように試験条件を’繊維配向-曲げ軸力比-中詰め’で表している。実験では、スパン中央での曲げ引張破壊が想定されていたが、曲げ引張破壊が発生したのは、S5-∞-N のみであり、載荷点直下の下フランジ（図 1 ○）で破壊が生じた。他の 24 ケースでは載荷点位置において、上フランジ載荷板端部せん断スパン側の CFRP 部（図 1 ◎）が面外に折れたような破壊性状であった。よって耐荷力を推定する際には、この破壊性状に着目し、推定式の検討を行っていく。

3. FEM 解析

FEM は実験の破壊箇所の応力状態を把握することを目的に行った。実験は様々な試験条件で行われているが、基本となる軸力、中詰なしの試験条件で、また繊維配向のバランスが良い S3（S3-∞-e）に着目した。CFRP には直交異方性のソリッド要素を用いた。梁は対称性を考慮し 1/4 対称モデルとした。モデルでは実験と対応させるため、載荷点と支点には幅 50mm、厚さ 15mm の鋼板を用いて CFRP と剛結し、CFRP の破壊規準には Tsai-Wu の破壊規準を用いた。

FEM の結果では、Tsai-Wu の破壊規準による FEM の破壊指標値において、上フランジの載荷板付近で高い値を示した。実験においても、載荷板端部で破壊していることから FEM の再現性が見られた。図 2 に FEM の P=35.9KN 時における上フランジ中央部の梁軸方向圧縮応力と面外せん断応力の分布を示す。載荷板の端部は 350 と 400mm であり、その影響を受けて端部から 1 節点離れた節点では理論値より高い圧縮応力が生じている。また面外せん断応力は、載荷板付近で卓越して発生していることが確認できる。それ以外では破壊に影響するような大きさは見られず、ほぼ 0 になっていることか

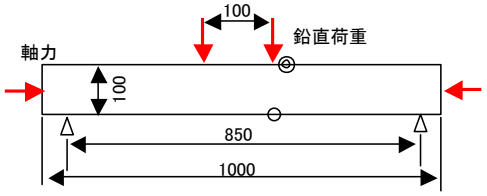

図 1　曲げ試験側面図

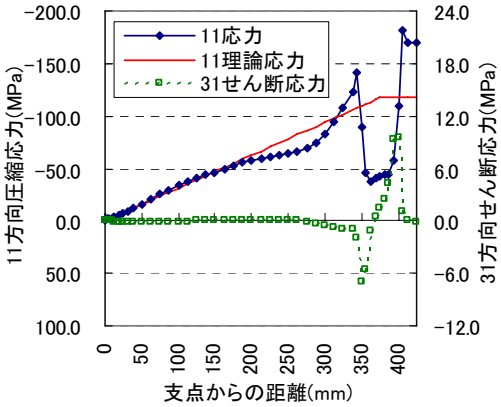

図 2　梁軸方向圧縮応力と面外せん断応力

キーワード　CFRP、箱形断面、耐荷力、Tsai-Wu の破壊規準
連絡先　〒060-8626　札幌市北区北 13 条西 8 丁目　Tel 011-706-6171

ら載荷板による局所的なものだと考えられる。よって上フランジの載荷板付近では、梁軸方向圧縮応力、面内せん断および面外せん断応力の 3 応力が作用していることが確認できた。また下フランジでは、卓越した面外せん断応力は確認できず、破壊に主として寄与しているのは梁軸方向引張応力、面内せん断応力の 2 応力であった。

4. 耐荷力推定式の検討

推定式の検討では、Tsai-Wu の破壊規準を満たす応力状態から CFRP 梁の耐荷力推定式を決定した。推定に用いる材料特性値を表 1 に示す。耐荷力の推定に用いる算定応力は、上フランジの破壊部に着目する場合は梁軸方向圧縮応力、面内せん断および面外せん断応力の 3 応力とした。しかし、載荷板の影響による局所的な面外せん断応力は理論式から求められないため、チモシェンコ梁によるせん断応力を仮定した。FEM の結果においてはチモシェンコ梁のような挙動は確認されなかったが、上フランジ破壊部を推定する場合において、仮定に基づいた面外せん断応力を用いることとした。下フランジ引張破壊部では、面外せん断応力は考慮せず、梁軸方向引張応力および面内せん断応力の 2 応力としている。

耐荷力を推定する際の梁の着目点は FEM の結果と実験結果を考慮し、上フランジ着目点は載荷板端部せん断スパン側から 1 節点離れた箇所の隅角部とした。下フランジ着目点は実験の破壊部に着目し、載荷点直下の隅角部とした。また実験では、ウェブの破壊は生じていないが、せん断破壊を検証するため、ウェブの中央も着目点とし、合計 3 着目点で推定を行った。断面の着目点を図 3 に示す。

中詰めなしと中詰めあり・軸力なし CFRP 梁の耐荷力推定結果を図 4、5 に示す（軸力なしを示す∞は省略）。図では実験の破壊荷重を実線、推定値を点線で表している。図 4 の中詰めなし CFRP 梁では、全ケースで上フランジが最小の耐荷力になり、実験の破壊荷重に近い結果が得られた。ウェブ中央と下フランジ着目点では、上フランジより大きな耐荷力が推測され、破壊は生じないと判断できる。次に、中詰めありの CFRP 梁では、実験の破壊時には中詰めコンクリートにひびが入っていることを考慮し、コンクリートの引張応力を無視して換算断面を求め、推定を行った。図 5 より、S5-N のみで下フランジでの引張破壊が推定されていることがわかる。他のケースでは、ウェブ中央とほぼ同程度ではあるが上フランジでの破壊が推定された。よって図 4、5 の結果から、実験の破壊性状を概ね推測できていることがわかる。

表 1　材料特性値

材料特性値	単位	S1	S2	S3	S4	S5
σ_1^T	MPa	1790	1759	1759	715	295
σ_1^C	MPa	−515	−511	−544	−247	−173
τ_{31}	MPa	49.5	46.9	46.1	46.1	46.1
τ_{12}	MPa	71.1	68.1	67.7	67.7	67.7

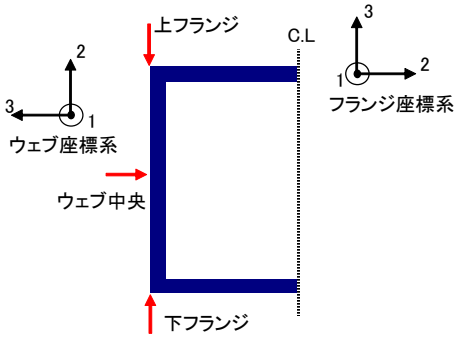

図 3　断面着目点図

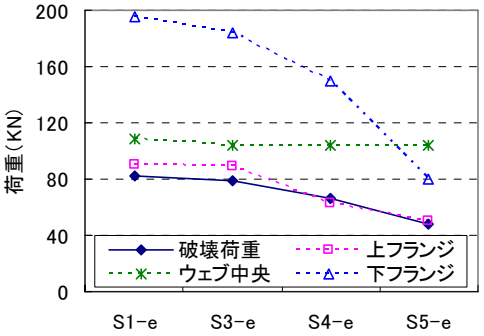

図 4　中詰めなし CFRP 梁

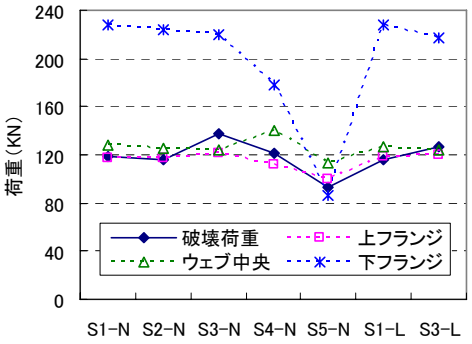

図 5　中詰めあり・軸力なし CFRP 梁

5. まとめ

実験の再現を図った FEM により、実験の上フランジ破壊箇所には載荷板の影響による局所的な面外せん断が生じていることがわかった。また FEM の結果から破壊に寄与している応力を把握し、推定式を検討することで実験の耐荷力、破壊性状を概ね推定できた。今後は、より実験結果に一致するように、面外せん断応力の算定手法の改善などを図っていく予定である。

参考文献

1)　稲田裕他、土木学会第 62 回年次学術講演会、CS15-009、2007.

2)　Bishnu Prasad Gautam 他、土木学会第 62 回年次学術講演会、CS15-008、2007.