

FRP材を用いた非接着補剛による 鋼板の圧縮耐力向上に関する研究

中本 大暉¹・三枝 玄希²・松本 幸大³

¹正会員 豊橋技術科学大学大学院生 建築・都市システム学専攻

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

E-mail: nakamoto.daiki.md@tut.jp

²正会員 呉工業高等専門学校助教 建築学分野

(〒441-8580 広島県呉市阿賀南 2 丁目 2-11)

E-mail: g-mieda@kure-nct.ac.jp

³正会員 豊橋技術科学大学大学院准教授 建築・都市システム学専攻

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

E-mail: y-matsum@ace.tut.ac.jp

近年の大規模地震において鋼構造建築物では、損傷事例が多数報告されている。特に薄肉部材で構成される鋼構造部材の局部座屈により部材の耐力喪失が生じることからこれを防止する方法が提案されている。こうした中、近年、高剛性・高強度・軽量である FRP は構造物の補強材としての利用が進んでいる。FRP は接着によって補強を行うことが一般的であるが、剥離による脆性的な耐力低下の恐れがある。そこで FRP を使用し、接着接合を用いない補強・補剛法を検討した。本研究では、既往実験研究で行われた閉断面部材への座屈補剛法の検討を踏まえ、鋼板を対象に圧縮荷重作用下の座屈耐力を向上させる補剛法の効果及び設計法を検討した。実験の結果、圧縮耐力の向上が確認できた。また、評価法の提案により、補剛後の鋼板の短期許容圧縮応力度を評価することが可能であることを示した。

Key Words: FRP, Unbonded, steel plate, Compressive strength, Buckling

1. 研究背景・目的

1981年に適用された新耐震設計基準によって建築物の耐震性能は大幅に向上したが、適用以前の建築物は未だ数多く存在し、近年の大規模地震では損傷・倒壊事例が多数報告されている¹⁾。今後も大規模地震の危険性があり、基準に満たない建築物では耐震改修が進められている。特に薄肉部材で構成される鋼構造部材の局部座屈により部材の耐力喪失が生じることからこれを防止する方法が提案されている²⁾。

こうした中、高剛性・高強度・軽量である繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastics, 以下 FRP)は構造物の重量増加を最小限にとどめ、下部や基礎構造の負担増加が少ないことから補強材として注目を浴びている。FRP を接着して補強する際、接着層によって効率よく応力が伝達される。しかし、FRP の剥離や接着層の凝集破壊といった脆性的な破壊を呈する場合があります。メカニズムの解

明が複雑である。力学的メカニズムが比較的簡単である非接着接合は、適切な力学モデルを構築することで補強後も急激な耐力低下が起きることなく補強材として用いることができる。そこで本研究では、既往実験研究^{3,4)}で行われた閉断面部材への座屈補剛法の検討を踏まえ、鋼板を対象に圧縮荷重作用下の座屈耐力を向上させる非接着補剛法の効果及び設計法を実験、及び力学モデルによる定式化によって検討する。

2. 補剛材設計

(1) 必要剛性

本手法では鋼材の曲げ変形を拘束し、補剛範囲内での曲げ降伏を防止することを目標としている。図-1に補剛法の力学モデルを示す。H形鋼のフランジ・山形鋼など開断面材への応用を想定し、補強材を溝形とした。

部材の軸圧縮に対する耐力は、極めて寸胴な場合を除き、弾性座屈あるいは塑性座屈によって定義される。図-1に示すように、補剛材の変形量は3点曲げ状態(a)、補剛材の開き(b)から与えられる。後者の有効断面積を荷重点から45°の範囲と仮定したときの補剛材の変形量 δ_2 は式(1)となる。

$$\delta_2 = \frac{QH_2^3}{48E_{FRP,a}I_{FRP,a}} + \frac{3Ql_1(l_1+2l_2)}{E_{FRP,b}t_{FRP}^3} \quad (1)$$

中央部よりも非補剛部のほうが大きな曲げモーメントを受けると、非補剛部で曲げ降伏が発生する。非補剛部の鋼材が曲げ降伏する条件は、

$$P\delta_1 > P(\delta_1 + \delta_2) - \frac{QH_2}{4} \quad (2)$$

$$p < \frac{QH_2}{4\delta_2} \quad (3)$$

であるため必要剛性は、式(4)で評価される。

$$P = 1.5f_{sc}A_s < \left(\frac{H_2^2}{12E_{FRP,a}I_{FRP,a}} + \frac{12l_1(l_1+2l_2)}{E_{FRP,b}t_{FRP}^3H_2} \right)^{-1} \quad (4)$$

P : 圧縮力, Q : 面外力, δ_1 : 非補剛部面外変形量, δ_2 : 補剛部面外変形量, H_1 : 部材長さ, H_2 : 補剛材長さ, f_c : 鋼構造設計規準許容応力度, E_{FRP} : FRP弾性係数, I_{FRP} : FRP断面二次モーメント, t_{FRP} : FRPの板厚

ここで、許容圧縮応力度の算出は、日本建築学会鋼構造設計規準によることとする。

(2) 耐力評価法

FRPにより補剛した部材に対して、鋼構造座屈設計指針より、記載される変断面部材の圧縮耐力評価法を援用し、等価細長比を用いて本補剛部材の圧縮耐力の評価法について提案を行う。評価方法を図-2に示す。非接着補剛のため合成断面で断面性能を評価する手法は過大評価となる可能性が考えられるため、部材を変断面とせず、鋼材と補剛材で構成された重ね梁部材として座屈固有値解析を同時に行うことで線形座屈荷重の下限値を求める。線形座屈荷重は式(5)で示される一般固有値問題として算出される。

$$[K_L]\{U_L\} + \lambda[K_G]\{U_L\} = 0 \quad (5)$$

$\{U_L\}$: 全体座標系での変位ベクトル

λ : 固有値

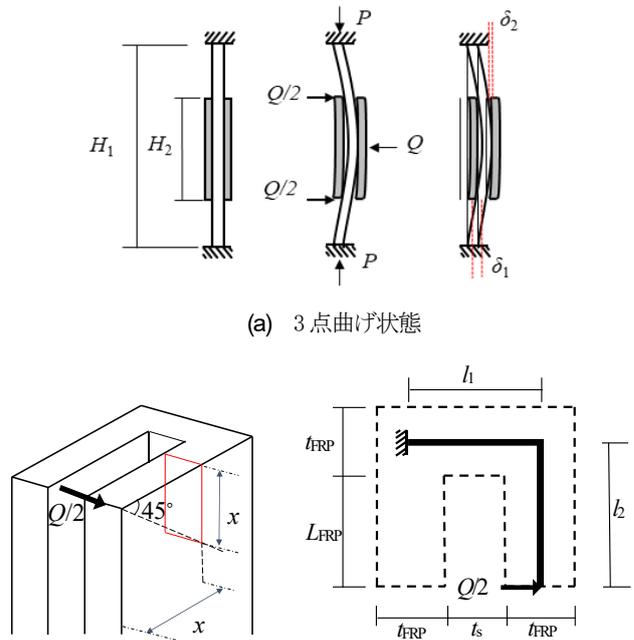
$[K_L]$: 弾性剛性マトリクス

$[K_G]$: 幾何剛性マトリクス

求められた固有値のうち最小のものが線形座屈荷重の最小値となる。

このような2つの評価を行うことで、補剛後の耐力は、FRPを鋼材の変断面圧縮部材として考えることで補剛後

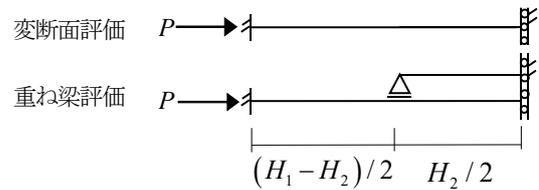
の最大耐力を、重ね梁として考えることで補剛後の最小耐力を評価できると考えられる。各評価法から等価な細長比を計算し各試験体の圧縮耐力に対応させ評価を行う。



(a) 3点曲げ状態

(b) 補剛材の開き

図-1 力学モデル



- 1) 無補強時の細長比および圧縮耐力
- 2) 変断面もしくは重ね梁として座屈固有値解析を行い補剛後の線形座屈応力を算出
- 3) 無補強時の線形座屈応力度に対応する等価な細長比 λ_{eq} を算出
- 4) 鋼構造設計規準に対応する応力度 f_c より圧縮耐力算出

図-2 耐力評価方法

3. 材料試験

本試験で使用する CFRP, GFRP, HFRP について、引張・曲げ試験を行った。CFRP・GFRP および同様の基材構成からなる HFRP の力学的性質を明らかにし、理論値との整合性を確認することを目的とする。材料試験結果を基に補剛材の設計を行う。成形には、炭素繊維クロス [0/90](200gsm)、ガラス繊維クロス [0/90](580gsm)、エポキシ樹脂(E205)を用いた。炭素繊維、ガラス繊維、エポキシ樹脂の性質をそれぞれ表-1 から表-3 に示す。なお、表-2 に示すガラス繊維のシート厚さはメーカーが示している長繊維 E ガラスの比重から算出した。成形の様子を図-3 に、成形後の試験体を図-4 に示す。本研究では、大掛かりな設備が不要であり、多積層 FRP を成形することに適した、真空樹脂含浸法 (Vacuum assisted Resin Transfer Molding, 以下 VaRTM) を用いた。VaRTM は、現場での作業が容易であり、技術者の技量に左右されにくく、ハンドレイアップ法に比べ繊維含有率が高く均質で高品質な FRP の成形が可能である。鉄板上にて成形を行い、硬化後、所定寸法に切出し試験体を作成した。試験体製作後、板厚を計測し繊維含有率を求め、積層板理論による弾性率の推定を行った。

試験結果を表-4 に、試験時の様子を図-5 に示す。引張試験では、積層数は各試験体 10ply とし同一の試験体を各 3 体ずつ行った。試験体寸法を図-6 に示す。試験体寸法は幅 25mm、試験区間 150mm であり両端 50mm にアルミタブを接着し試験機掴み部とした。試験体中央部の両面に歪ゲージを貼り付け計測を行った。引張弾性率の算出には歪が 0.05%-0.25% の際の値を用い、両面の歪ゲージの平均値を用いた。全ての試験体で試験区間内での破断に至り、引張弾性率は積層板理論による計算値と概ね一致した。

表-1 炭素繊維物性⁹⁾

弾性係数 [GPa]	230
引張強度 [MPa]	2900
シート厚さ [mm]	0.112

表-2 ガラス繊維物性⁷⁾

弾性係数 [GPa]	72.6
引張強度 [MPa]	3430
シート厚さ [mm]	0.227

表-3 エポキシ樹脂物性⁸⁾

弾性係数 [GPa]	1 以上
引張強度 [MPa]	20 以上

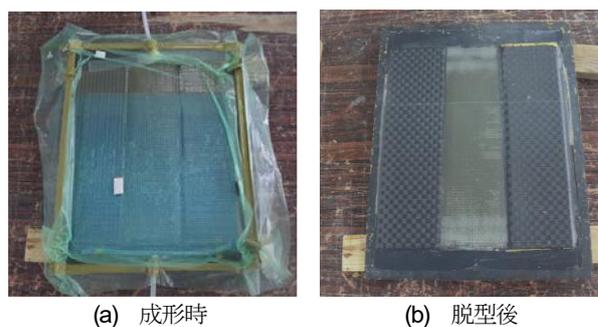


図-3 VaRTM 成形

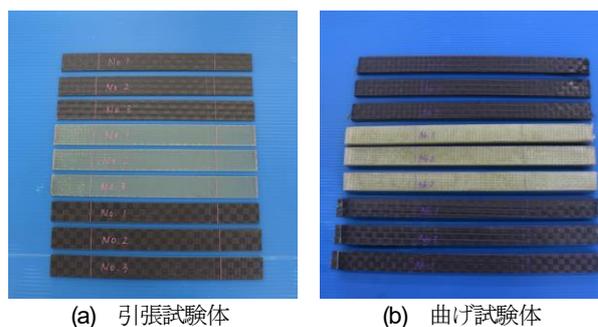


図-4 材料試験体



図-5 材料試験時の様子

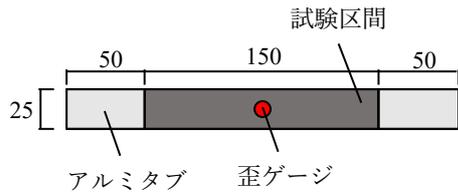
表-4 材料試験結果

積層構成		積層板理論 弾性率 [GPa]	引張強度 [MPa]	引張弾性率 [GPa]	曲げ弾性率 (歪ゲージ) [GPa]	曲げ弾性率 (変位計) [GPa]
CFRP	引張[0/90] ₁₀ 曲げ[0/90] ₄₀	72.21	1237	72.09	64.60	58.35
GFRP	引張[0/90] ₁₀ 曲げ[0/90] ₄₀	24.37	490	26.88	20.52	16.97
HFRP	引張[[0/90] ₂ [0/90] ₃] _s 曲げ[[0/90] ₈ [0/90] ₁₂] _s	36.85	501	37.11	72.10	32.73

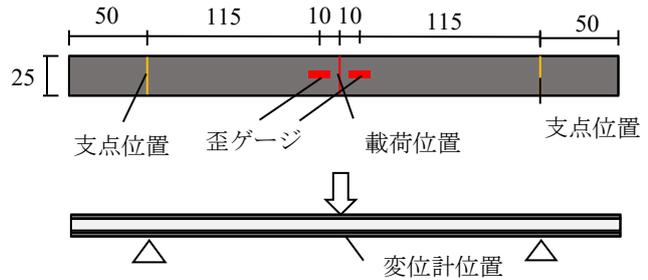
※積層構成のうちアンダーラインはガラス繊維を示す

本研究で提案する補剛材は曲げモーメントを受けるため、曲げ弾性率を求めることを目的として3点曲げ試験についても行った。試験体寸法は幅 25mm、長さ 350mm、試験区間 250mm である。試験体中央部下面に変位計を取り付け、変形量の計測を行った。弾性率の算出には最大荷重の20~50%の際の値を用いた。図-8に曲げ試験応力-ひずみ関係を、図-9に試験荷重-変位関係を示す。CFRP 試験体、GFRP 試験体ではひずみゲージから算出される試験体では積層板理論の値と概ね一致した。HFRP

試験体では、CFRP 縁端部のひずみを計測しているため、CFRP の弾性率と一致していることが分かる。変位計から算出される弾性係数はすべての試験体で積層板理論によって計算される値と比較し、小さいものとなった。これは剪断変形による影響によるものと考えられる。本補剛材ではFRPの曲げ剛性により座屈補剛を行うため、変位計から算出される曲げ弾性率を用いて補剛材の設計を行う。

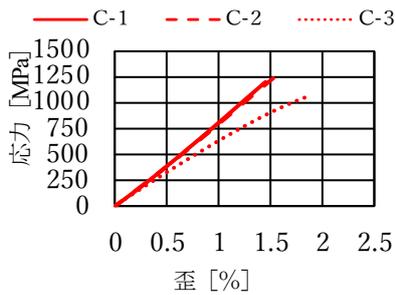


(a) 引張試験体

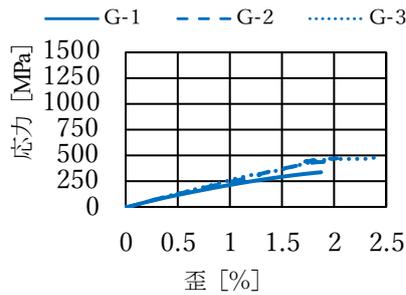


(b) 曲げ試験体

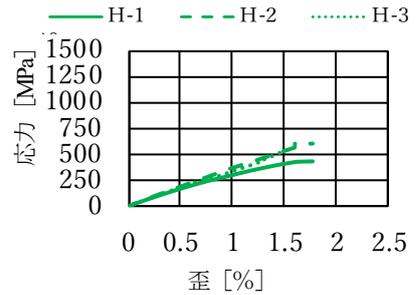
図-6 試験体寸法



(a) CFRP 引張試験

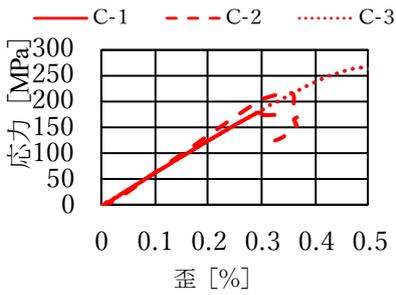


(b) GFRP 引張試験

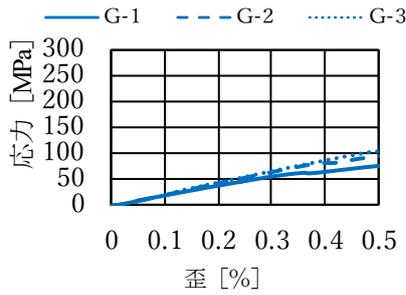


(c) HFRP 引張試験

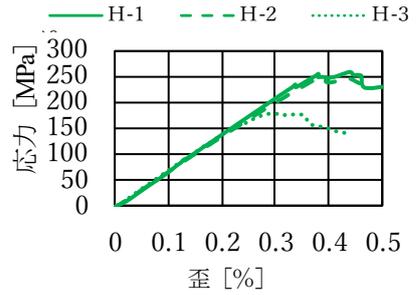
図-7 引張試験 応力-ひずみ関係



(a) CFRP 曲げ試験

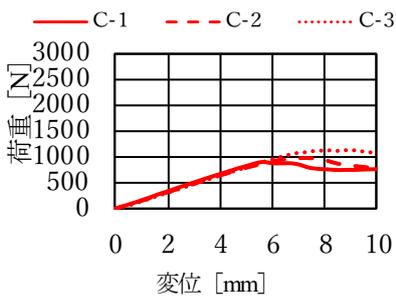


(b) GFRP 曲げ試験

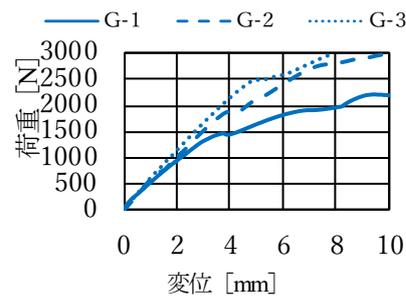


(c) HFRP 曲げ試験

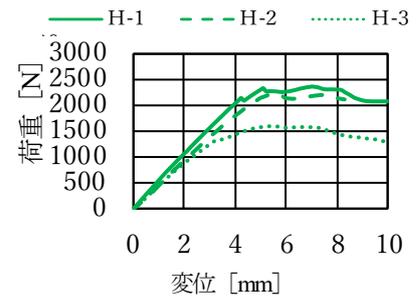
図-8 曲げ試験 応力-ひずみ関係



(a) CFRP 曲げ試験



(b) GFRP 曲げ試験



(c) HFRP 曲げ試験

4. 座屈補剛試験

(1) 対象部材

本試験では、H形鋼のウェブに対する軸圧縮試験とし、ウェブの座屈をFRPによって補剛する。使用するH形鋼は、SN400B、300×150×6.5×9.0である。機械的性質を表-5に示す。本試験では、幅200mmとして軸圧縮試験を行う。なお、材端の支持条件を両端固定・移動拘束、部材長さはフィレットを除いたウェブ長と仮定し計算を行う。鋼構造設計規準では、許容圧縮応力度は式(6)、式(7)で算出される。

$$f_c = F \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{2}{5} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \\ \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \end{array} \right\} \quad (\lambda \leq \Lambda \text{ のとき}) \quad (6)$$

$$f_c = \frac{0.277}{\left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2} F \quad (\lambda > \Lambda \text{ のとき})$$

λ : 細長比, Λ : 限界細長比

ただし、限界細長比 Λ は

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}} \approx \frac{1500}{\sqrt{F/1.5}} \quad (7)$$

である。

鋼構造設計規準による座屈耐力の計算結果を表-6に示す。長期許容圧縮応力を1.5倍した値が短期許容圧縮応力度となる。

表-6 鋼構造設計規準による座屈耐力の計算

部材長 [mm]	256
幅 [mm]	200
厚さ [mm]	6.5
断面積 [mm ²]	1300
断面二次モーメント [mm ⁴]	4577
座屈係数	0.5
有効座屈長さ [mm]	128
断面二次半径 [mm]	1.876
細長比	68.22
限界細長比	91.63
長期許容圧縮応力度 [MPa]	167.35
短期許容圧縮応力度 [MPa]	251.03
長期許容圧縮耐力 [kN]	217.56
短期許容圧縮耐力 [kN]	326.33

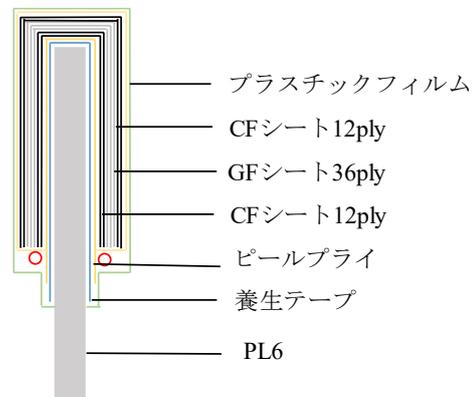


図-10 成形模式図

(2) 成形方法

VaRTM成形法を用いてPL6鋼板に成形を行う。成形の模式図を図-10に、成形の様子を図-11に示す。補強対象であるH形鋼のウェブ厚は6.5mmであるのに対し、成形用の鋼板の板厚は6mmであるため養生テープをあらかじめ積層することにより0.5mm板厚を増した。成形後、鋼板から取り外し切断加工を行い、所定の寸法に切出し実験を行った。試験体寸法を図-12に示す。無補剛試験体、および補剛材長さ $H_2=100\text{mm}$, 150mm , 200mm の合計4試験体を作成し、 $L_{FRP}=50\text{mm}$ となるように成形した。積層構成は[[0/90]₁₂[0/90]₁₈]sである。なお、積層構成のうちアンダーラインはガラス繊維を示す。



(a) 強化基材 (b) 含浸途中

図-11 成形時の様子

表-5 鋼材機械的性質

降伏点 [MPa]	402
引張強度 [MPa]	479
弾性係数 [GPa]	200

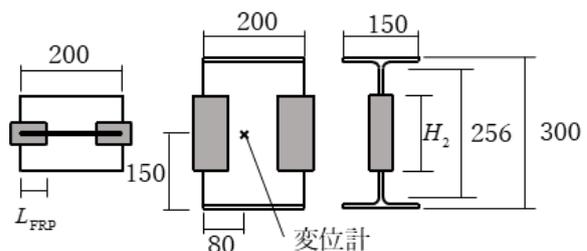


図-12 試験体寸法

(3) 試験結果

試験体および実験写真を図-13に、応力-クロスヘッド変位関係を図-14に、応力-中央部変位関係を図-15に、試験結果を表-7に示す。一回目試験終了後、補剛材に目立った損傷が見られなかったため取り外して二回目試験を行った。応力は、荷重を鋼材の断面積で除した値を用いた。無補強試験体では中央部に、補剛したすべての試験体でFRP補剛材端部に曲げ変形が発生した。また、一回目試験と二回目試験において明確な差異が見られないことから、補剛材の損傷は極めて小さかったと考えられる。補剛する長さを長くすることにより、座屈耐力が向上していることが分かる。座屈発生後も補剛長の長い試験体の方が、軸方向に対して高い応力で変形が進行していることが分かり、補剛によって座屈発生後の耐力低下を防いでいると考えられる。

(4) 座屈後安定耐力

図-14には、日本建築学会鋼構造座屈設計指針⁹⁾による座屈後安定耐力も鎖線によって併記してある。座屈後安定耐力は式(8)、式(9)で求めることができる。

$$\bar{\lambda} \leq 0.15$$

$$N_u = N_y$$

$$0.15 < \bar{\lambda} \leq 0.3$$

$$N_u = \frac{1}{11\bar{\lambda} - 0.65} N_y \quad (8)$$

$$\bar{\lambda} > 0.3$$

$$N_u = \frac{1}{6\bar{\lambda} + 0.85} N_y$$

$$\bar{\lambda} = \frac{k_B l_B}{\pi i_B} \sqrt{\frac{F}{E}} \quad (9)$$

N_u : 座屈後安定耐力 N_y : 引張降伏限界耐力

$\bar{\lambda}$: 基準化細長比 l_B : 接点間長さ i_B : 最小回転半径 k_B : 座屈後の安定耐力に関する有効長さ係数

図-14では $k_B=0.55$ として計算している。また、補剛した試験体では、図-2の重ね梁評価で算出された等価な細長比を用いて座屈後安定耐力を算出した。計算された座屈後安定耐力と実験値の比較を行うと、無補強試験体

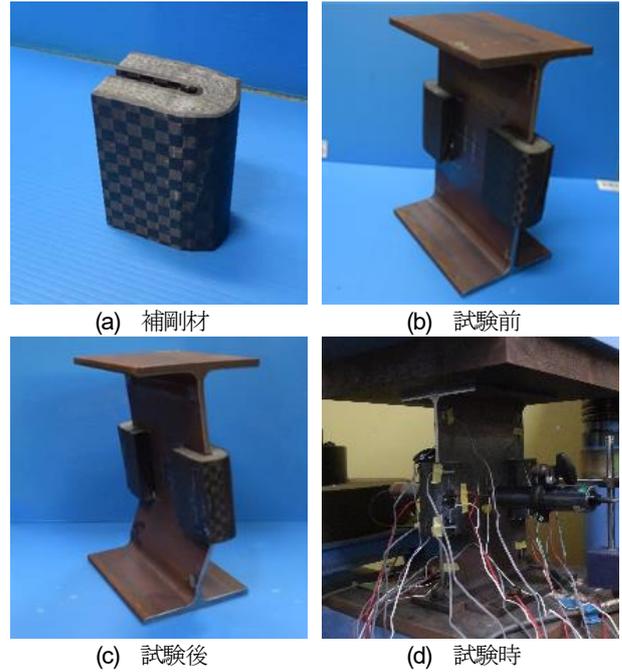


図-13 試験体写真

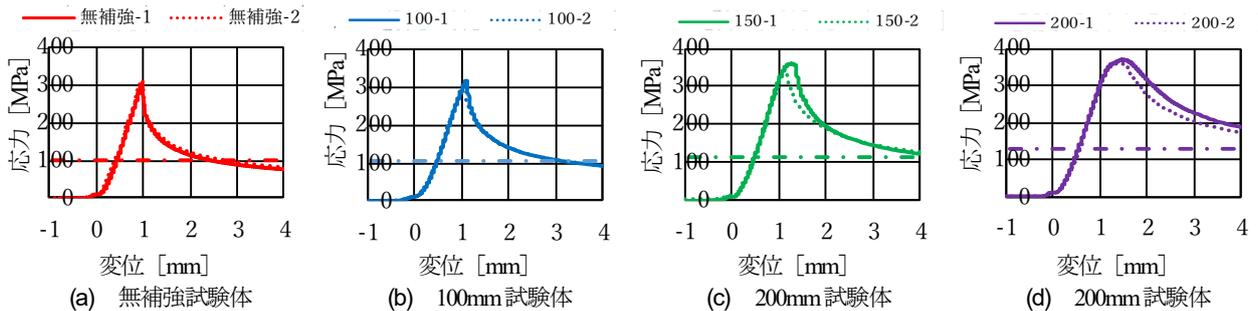


図-14 応力-クロスヘッド変位関係

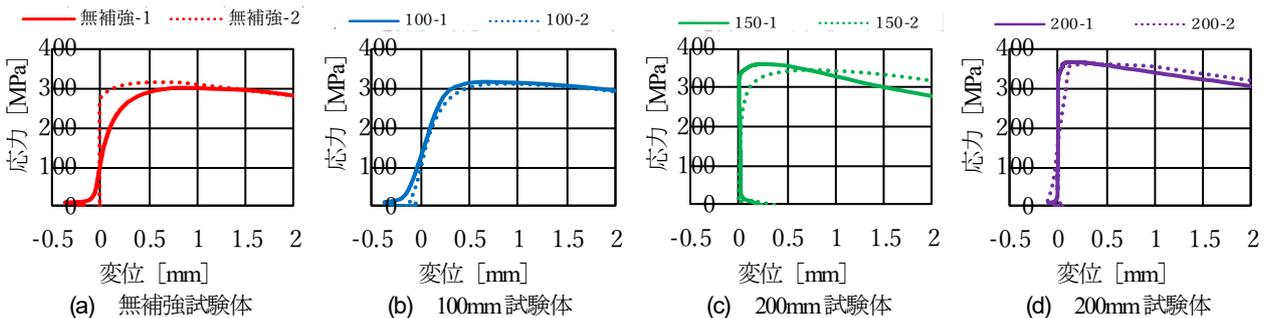


図-15 応力-中央部変位関係

表-7 試験結果

試験体	座屈耐力 [MPa]	1回目試験との比較 [%]	補剛効果 [%]	変断面評価		重ね梁評価		
				等価な細長比	座屈後安定耐力 [MPa]	等価な細長比	座屈後安定耐力 [MPa]	
無補強	1	302.05	-	-	68.21	98.95	68.21	98.95
	2	314.49	-	-				
100	1	316.56	-	2.69	41.92	142.32	64.23	103.74
	2	313.81	-0.87	1.79				
150	1	361.19	-	17.17	29.19	180.66	56.13	115.06
	2	343.77	-4.82	11.52				
200	1	369.15	-	19.75	18.17	235.62	48.29	128.69
	2	361.48	-2.08	17.26				

よりも補剛した試験体の方が、座屈後安定耐力が安全側に評価できている。このことから、座屈発生後も十分な補剛効果があると推測される。

(5) 耐力評価

図-16 は実験で得られた座屈耐力を耐力評価法で得られた等価細長比に対応させプロットしたものである。一回目試験を○と実線、二回目試験を×と点線で示している。縦軸は実験で得られた最大応力値、各線の左端は変断面評価、右端は重ね梁評価で算出された等価細長比を示している。全ての試験体で耐力評価の下限值である重ね梁評価が、鋼構造設計規準短期許容圧縮応力度と線形座屈曲線の間にプロットされていることが分かる。変断面評価の場合すべての試験体で短期許容応力度よりも下回っている。このことから補剛による最大値・最小値の評価は適切に行えており、重ね梁評価を用いることで補剛後の耐力を安全に評価できると考える。

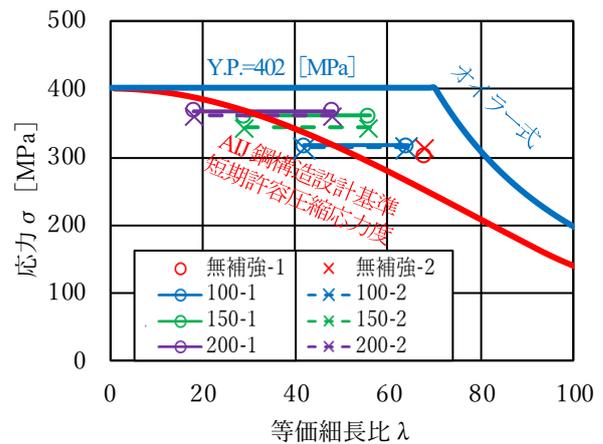


図-16 耐力評価

5. 結論

本研究では、鋼板を対象に FRP による圧縮耐力向上法の検討として、実験を行い補剛効果の分析を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- 1) 鋼板が補剛材によって変形を拘束され、補剛材端部の鋼材部で塑性化が進行することが確認でき、結果として圧縮耐力が上昇することを示した。
- 2) 重ね梁の力学モデルとして圧縮耐力を算定することで、補剛後の短期許容圧縮応力度を評価することが可能であることを示した。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人 建築研究所：平成 28 年熊本地震建築被害報告書（速報），国総研資料 No.929 号／建築研究資料 No.173 号，2016.9

- 2) 小林洗貴，近藤諒翼，タイ ウィサル，中村一史，松本幸大，松井孝洋，越智寛：VaRTM 成形を応用した CFRP 部材による鋼桁端部の補強に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），複合構造論文集第 5 巻(論文)，Vol.74, No. 5, p.II_44-II_55, 2018.5
- 3) 丸田遼太郎，三枝玄希，藤本信介，小原優明，松本幸大：円形鋼管部材に対する非接着 CFRP 半割管による座屈耐力向上効果に関する解析的研究，第 7 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演集 (CD-ROM), 2018.11
- 4) Fengky Satria Yoresta, Ryotaro Maruta, Genki Mieda, Yukihiro Matsumoto: Unbonded CFRP strengthening method for buckling control of steel members, Construction and Building Materials, Volume 241, 14 pages, 2020.4
- 5) 日本建築学会：鋼構造設計規準－許容応力度設計法－，2005
- 6) 東レ株式会社 HP 製品カタログ https://www.torayca.com/lineup/product/pro_002_01.html
- 7) セントラルグラスファイバー株式会社 HP http://www.centralfiberglass.com/jp/glass_fiber/outline/index.html
- 8) コニシ株式会社 HP カタログ一覧 <http://www.bond.co.jp/bond/cat-alog/pdf/>
- 9) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針，2018

(Received August 28, 2020)

STUDY ON BUCKLING CONTROL METHOD USING UNBONDED FRP FOR STEEL PLATE

Daiki NAKAMOTO, Genki MIEDA and Yukihiro MATSUMOTO

In recent years, many cases of damage to steel buildings have been reported in large earthquakes. A method to prevent loss of bearing capacity of a steel structural member due to local buckling, especially if it consists of thin-walled members, has been proposed. Recently, FRP has been used as a reinforcement material for structures due to its high rigidity, high strength and light weight. And although FRP is generally reinforced by adhesion, there is a risk of brittle deterioration due to exfoliation. A reinforcement and stiffening method using FRP, without adhesive bonding, was studied. In this study, based on the previous experimental studies on buckling and stiffening methods for closed-section members, the effects of buckling and design methods to improve the buckling strength of steel plates under compressive loading were investigated. The experimental results showed that the compressive strength was improved. The proposed evaluation method enables us to evaluate the short-term allowable compressive stress of steel plates after stiffening.