

薄鋼板による H 形鋼フィレット部接着補修梁の載荷実験

玉井宏章*, 望月咲**, 服部宜紘***

Loading Test on Rehabilitated Beam Bonding Thin Steel Plates at Fillet of H-Shaped Section

by

Hiroyuki TAMAI*, Saki MOCHIZUKI** and Norihiro HATTORI***

We present a Rehabilitation technique bonding thin steel angle at the defect fillet of H-shaped members. In previous paper, the design requirement for the rehabilitation was shown. A calculation procedure for torsion and warping constants of this member are shown. The accuracy and efficiency of this procedure were demonstrated by a comparative study using twisting test and finite element analysis results. In this paper, the loading test on rehabilitated beam bonding thin steel angle at fillet of H-shaped section were performed. Also, 3D finite element analysis of the tests were executed. The efficiency and effectiveness of the rehabilitation technique were shown through the loading tests and analysis results.

Key words : Rehabilitation, Adhesive, Bonding, Light Gauge Steel Member

1. はじめに

これまでに著者らは、炭素繊維プレートを用いた鋼小梁の接着補剛工法を提案し、実用化してきた^{1)~3)}。特に小梁の補強では下フランジが腐食によって減厚した場合の補剛に適している。腐食環境下では、フランジとウェブとの間のフィレット部に腐食が貫通して、断面が一体とは言いがたいケースも散見される。

炭素繊維プレートは、曲げ剛性は小さくなく、局所的な形状に適用できないという難点があり、フィレット部の補強材としては不適格である。

そこで著者らは、簡単に成形可能で安価な製品である軽量形鋼の断面の一部を利用し、それを接着することによって断面を一体化させる補修工法を提案している。

前報では、このフィレット薄鋼板接着補修工法の設計式を示した。また、併せて、補修によって断面が一体化したかどうかを検討するための断面定数同定法を示し、既往の実験結果からその同定法の精度を検証

した。この同定法を用いて断面欠損が断面定数に及ぼす影響を示した。

本論文では、2種類のフィレット部の欠損を有し、欠損部長さを2段階に変化させたH形鋼梁を作製し、本フィレット薄鋼板接着補修を行った試験体についてと手上げ横座屈載荷試験を行って、補修前後の曲げ耐力を検討し、その挙動を有限要素法解析で追跡したので報告する。

2. 補修法の概要と設計式

補修法の概要を図1に示す。H形鋼の下フランジとウェブとのIフィレット部には腐食による断面欠損が生じている。この断面欠損部に山形の薄板鋼板を接着剤によって接着し、付加的にCFシートで被覆する。

この補修により、断面を一体化させ、下フランジに横曲げ抵抗をさせることで、フィレット部には曲げに伴うせん断流を円滑に伝達させて元の梁の性能を得るものである。この補修は全断面に接着するものではなく、部分補修を行うことを前提としている。

* システム科学部門 (Division of System Science)

** 工学研究科 (Graduate School of Engineering)

*** 工学部 (Faculty of Engineering)

2.1 設計式 (案)

図2に補強梁断面の垂直応力度，せん断応力度分布を示す。

作用する曲げ及びそれに伴うせん断力に対して，L形の薄板鋼板は，次式を満足させる。

$$\left(\frac{\sigma_b}{f_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_b}{f_s}\right)^2 \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに，

σ_b, τ_b : フィレット部の曲げによる垂直応力度，せん断応力度

f_t, f_b : 許容引張応力度，許容せん断応力度

作用するせん断応力に対して，接着剤は，次式を満足させる¹⁾。

$$\frac{\tau_{a\max}}{\tau_{au}} \leq 1.0 \quad (2)$$

ここに，

$\tau_{a\max}, \tau_{au}$: 接着剤の最大せん断応力度，クリープせん断耐力

であり，

$$\sigma_y \quad (3.a)$$

$$\tau_b = \frac{Q}{I_x} \cdot \frac{B \cdot d_f}{4} \cdot \frac{t_f}{t_p} \quad (3.b)$$

$$\tau_{a\max} = \sqrt{\frac{G_a}{E \cdot A_a} \cdot \frac{A_s \cdot A_p}{A_s + A_p} \cdot \frac{M_e \cdot h_p}{I_x}} \quad (3.c)^{1),2)}$$

ここに，

M, Q : 検定する断面位置の曲げモーメント，せん断力

B, d : H形鋼の幅，ウェブの内法高さ

d_f : フランジ間距離

E, I_x : 鋼のヤング係数，強軸断面2次モーメント

t_f, t_p : フランジ及び薄板鋼板の板厚

G_a, A_a : 接着剤のせん断弾性係数，フランジ半分の接着面における接着層断面積

A_s, A_p : H形鋼の下フランジ半分の断面積

$A_s = b \cdot t_f$ ，下フランジに接着下部分の薄板鋼板断面積

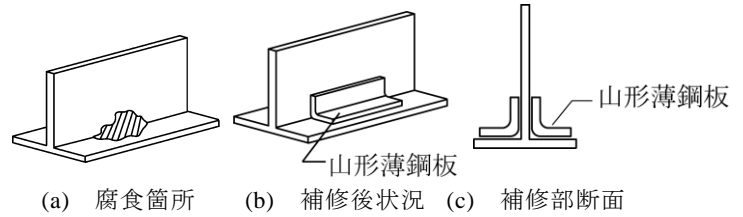


図1 補修法の概要

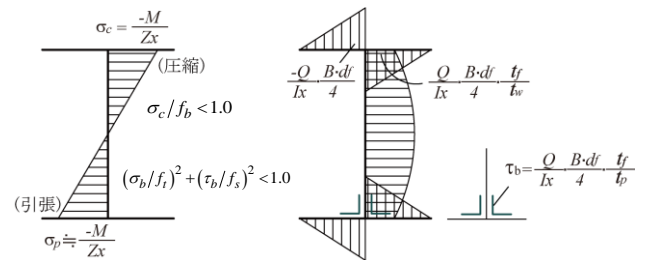


図2 梁断面の垂直応力，せん断応

M_e, h_p : 薄板鋼板の端部位置での梁材の作用曲げモーメント，図心からフランジに接する薄板鋼板までの距離

τ_{yz} : 曲げによる接着層のせん断力

2.2 検定用の許容曲げモーメント

横ねじり座屈を生じない曲げ応力度に耐えれば，本補修工法の妥当性が示せる。補修が健全な場合の検定用の許容曲げモーメント M_a を以下に示す。ねじり剛性 GJ ，そり剛性 EI_w を腐食前の性能を維持しているものとする。等曲げ状態にある梁の弾性横ねじり座屈を起す強軸回りの曲げモーメントは，次式で表される。

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y \cdot G \cdot J}{l_b^2} + \frac{\pi^4 \cdot E \cdot I_y \cdot E \cdot I_w}{l_b^4}} \quad (4)$$

I_y は弱軸断面2次モーメント， l_b は横補剛区間長さである。また，長期の許容曲げ応力度 f_b は，

$$\lambda_b = \sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}}$$

M_y は降伏モーメントである。

$p \lambda_b = 0.3 \leq \lambda_b \leq e \lambda_b = 1.29$ の場合は，次式で得られる。

$$f_b = \frac{1}{\frac{3}{2} - \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda_b}{e \lambda_b}\right)^2} \left(1 - 0.4 \cdot \frac{\lambda_b - e \lambda_b}{p \lambda_b - e \lambda_b}\right) \cdot F \quad (5)$$

よって，検定用の許容曲げモーメント M_s は，

$$M_s = Z_x \cdot (1.5 \cdot f_b) \quad (6)$$

補修後 M_s まで横ねじり座屈が生じなければ提案した補修法は有効であることになる。

表 1 素材試験結果

	板厚 mm	σ_y N/mm	σ_u N/mm	ϵ_{st} %	ϵ_i %	ϵ_u %
フランジ	7.0	337	560	2.0	12.0	24.0
ウェブ	5.0	337	560	2.0	12.0	24.0
山形鋼	3.0	308	505	1.5	11.0	22.0
接着剤	1.0	34.8	57.8	-	-	-

σ_y : 降伏応力, σ_u : 引張強さ, ϵ_{st} : 硬化開始歪,
 ϵ_i : 一様伸び, ϵ_u : 破断伸び

表 2 試験体シリーズ

試験体名	腐食タイプ	欠損率 [%]	欠損長さ $2l_b$ [mm]
LN		0	0
D30I	I	30	600
D70I		70	1400
D30II	II	30	600
D70II		70	1400
R30II	II	30	600
R70II		70	1400

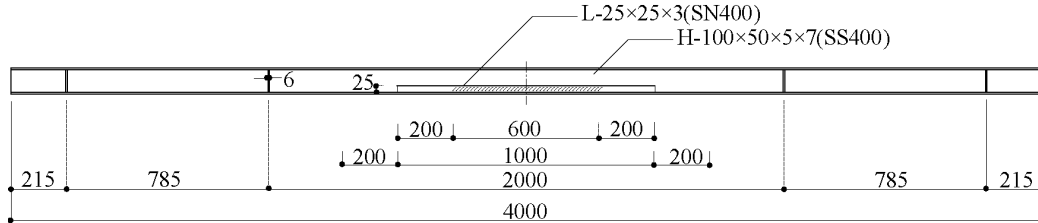


図 3 試験体形状

なお、本試験体の検定用の許容曲げモーメント M_a は $6.16 \text{ kN}\cdot\text{m}$ で、荷重 P_s は 7.84 kN となる。

3. H 形鋼梁の等曲げ載荷実験解析（横座屈実験）

3.1 実験概要

○試験体

試験体シリーズを表 2、試験体形状を図 3、図 4 に示す。

試験体は、図 3 に示す H 形鋼（H-100x50x5x7, SS400）で、材長 4000 mm、横補剛区間長さ l_b を 2000mm とする。

試験体の中央にフランジ部から高さ h_r ($h_r=10\text{mm}$) までウェブが欠損する場合（腐食タイプ I）、及びこれに加えてフランジ部が幅 b_r ($b_r=10\text{mm}$) だけ欠損する場合（腐食タイプ II）について欠損率を 30%、70% と変化したものと欠損率が 30% と 70% の腐食タイプ II について、フィレット両側から L-25x25x3 (SS400) の山形薄板鋼材が図 4 のように接着厚さ $t_a=1\text{mm}$ 、材長=欠損長さ+400mm(定着長さ=200mm)の接着補修したものと腐食なしの試験体計 7 体を用意した。素材特性を表 1 に示す。

○試験装置

図 5 に試験装置を示す。試験体を支点に設置し、支点から張出した先端にジャッキシステム（ピン、ロードセル、油圧ジャッキ）を接合する。左右の支点、それぞれから外側に等距離(785mm)にジャッキを接合し、鉛直方向に等しい荷重 P を載荷する、4 点曲げ載荷実験とする。載荷は、ジャッキで引張力を加える単調載荷実験とする。

○計測方法

荷重 P は、ジャッキ先端のロードセルにより計測する。

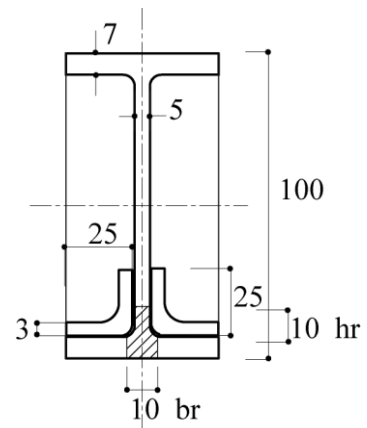


図 4 補修単純支持梁断面図

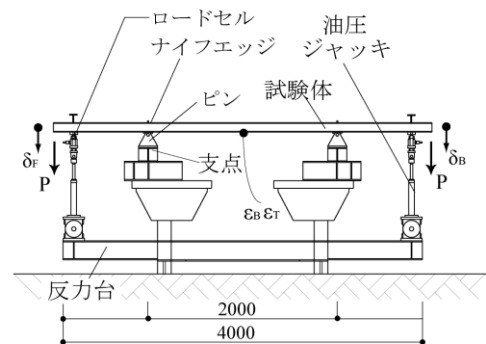


図 5 試験装置

図 6(a)に示すように試験体の載荷点、支点回り中央に変位計をセットして、変位 $\delta_F, \delta_B, \delta_C, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_{pt}, \delta_{pb}$ を計測する。また、ひずみゲージの貼付け位置を図 6(b)に示す。

中央部のねじり角 ϕ 、支点回転角 θ は次式で算出する。

$$\phi = \frac{\delta_{ht} - \delta_{hb}}{H}, \quad \theta = \frac{\delta_2 - \delta_1}{D} \quad (7.a,b)$$

横座屈現象は、ねじり角 ϕ と下フランジの両端面の垂直ひずみで検出し横座屈モーメント $M_{cr,exp}$ 、 $M - \phi$ 関係

を用いて Southwell の方法で求める。

さらに、実験除荷寸前の変形状態や除荷時の変形の戻り方、除荷後の変形状態を観察した。

3.2 解析概要

○解析モデル

解析モデルを図7に示す。解析対象の対称性から1/2解析を行った。支点および加力点はその断面の節点をリジッドリングで6自由度節点で結び図の境界条件を与えた。20節点六面体要素で、H形鋼梁、山形鋼、接着剤を分割した。

R70 II 試験体では、要素数は550、節点数は3396である。MSC Mark 2016を用いて複合非線形解析を行った。

○素材特性

すべての材料は、等方弾性体とし、鋼材はヤング率 $E=205000\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.28$ とし、接着剤はヤング率 $E=3100\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.39 とした。

いずれの材も降伏条件は Mises の条件を用い、素材試験で求めた応力-歪関係を用いて硬化係数を入力した。

○初期不整と初期応力

横座屈現象を誘発するように初期不整として中央フランジ部に x 方向集中節点力 5N を与え横曲げ変形を与えた。

初期応力は、予備解析で横座屈耐力に及ぼす影響は小さかったため本解析では導入していない。

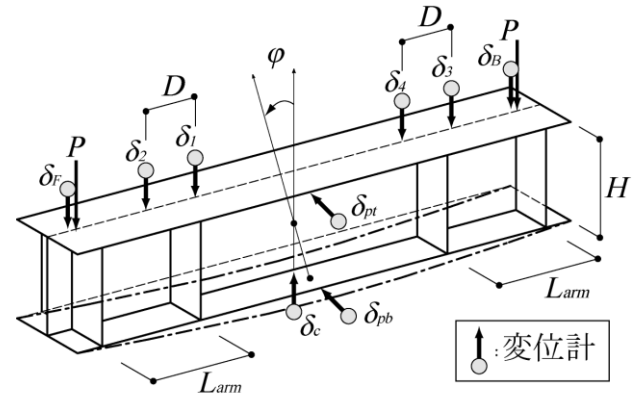
○計測諸量

加力は、加力点での強制変位で与え、荷重は加力点鉛直反力 P を変位は加力点の鉛直変位 δ_F を、フランジ中央の側端部材軸方向垂直歪 δ_T 、 δ_B を平滑化手法を用いて板中央節点位置で求めた。

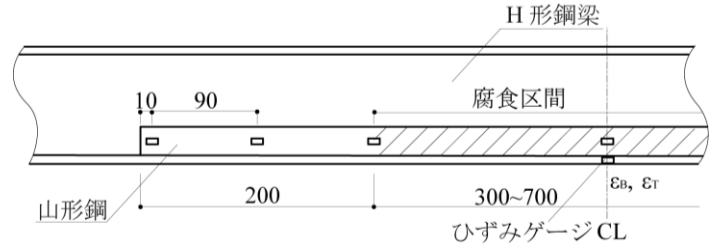
4. 試験結果

実験結果を図8~10に、解析結果を図9~11にそれぞれ示す。

図8は(a)LN, D70 I, D70 II, R70 II 各試験体, (b)LN, D30 I, D30 II, R30 II 各試験体の荷重と加力点変位関係の実験値を、図9はD70 II 試験体(欠損試験体)について(a)荷重-加力点変位関係, (b)荷重-下フランジ側面歪関係を、実験値を実線で、解析値を破線で示す。図10はR70 II 試験体(補修試験体)について図9と同様の関係を示す。図11には(a)D70 II 試験体, (b)R70 II 試験体の最終の座屈変形状況の解析結果を示す。



(a) 変位の計測点



(b) ひずみゲージ貼付け位置

図6 計測の概要

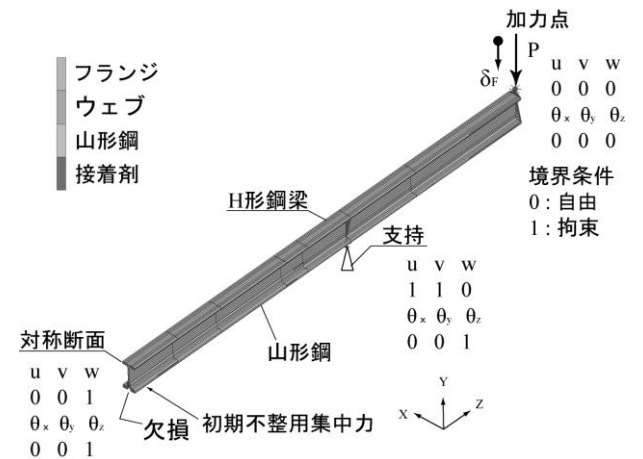


図7 解析モデル

これらの結果から以下のことが分かる。

- 1) 欠損無しの LN 試験体と比較して、欠損ありの試験体の最大耐力は3~6割程度減少する。
- 2) 欠損率の異なる試験体を比較すると、D30 I 試験体の剛性の低下はわずかであるが、その他の試験体は欠損なしの LN 試験体と比較して7割程度剛性が低下している。
- 3) 軽量形鋼による補修をすれば R30 II, R70 II 試験体は、欠損無しの LN 試験体と比較して剛性が1割程度上昇し、最大耐力も増大する傾向にある。
- 4) 実験で得られた最大抵抗曲げモーメントは、 $M=P \cdot L$ で求めると、R30 II 試験体は $13.7\text{ kN}\cdot\text{m}$ 、R70 II 試験体は $13.1\text{ kN}\cdot\text{m}$ となり、健全な場合

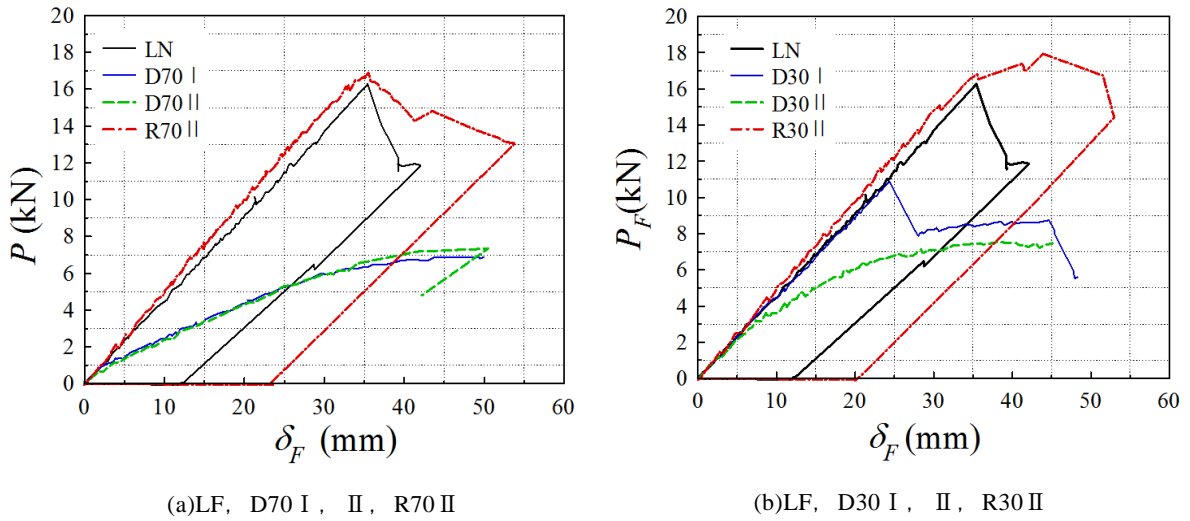


図8 荷重-加力点変位関係 (実験値)

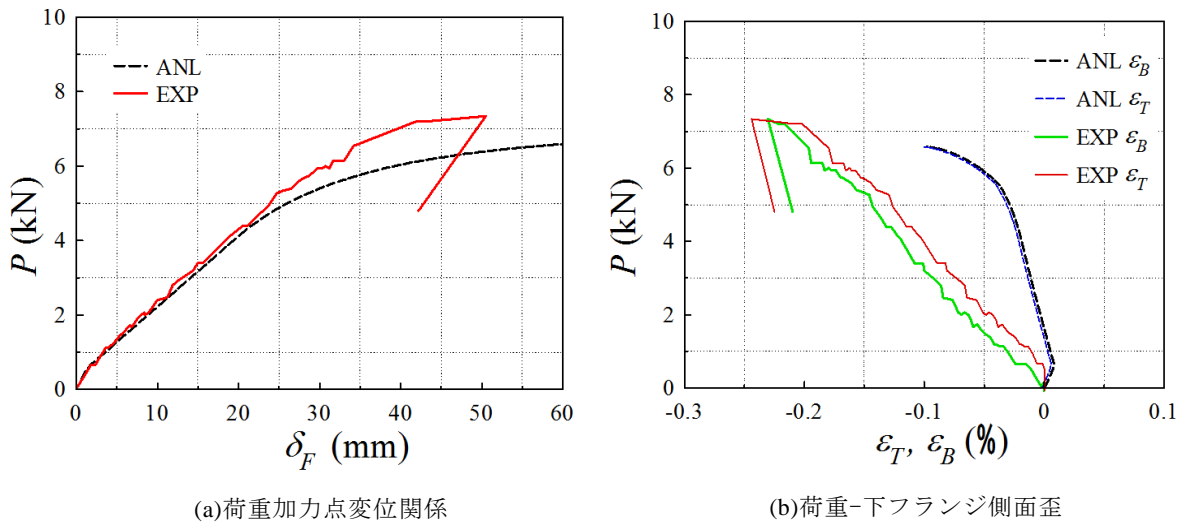


図9 D70 II 試験体 (欠損試験体) の変形性状

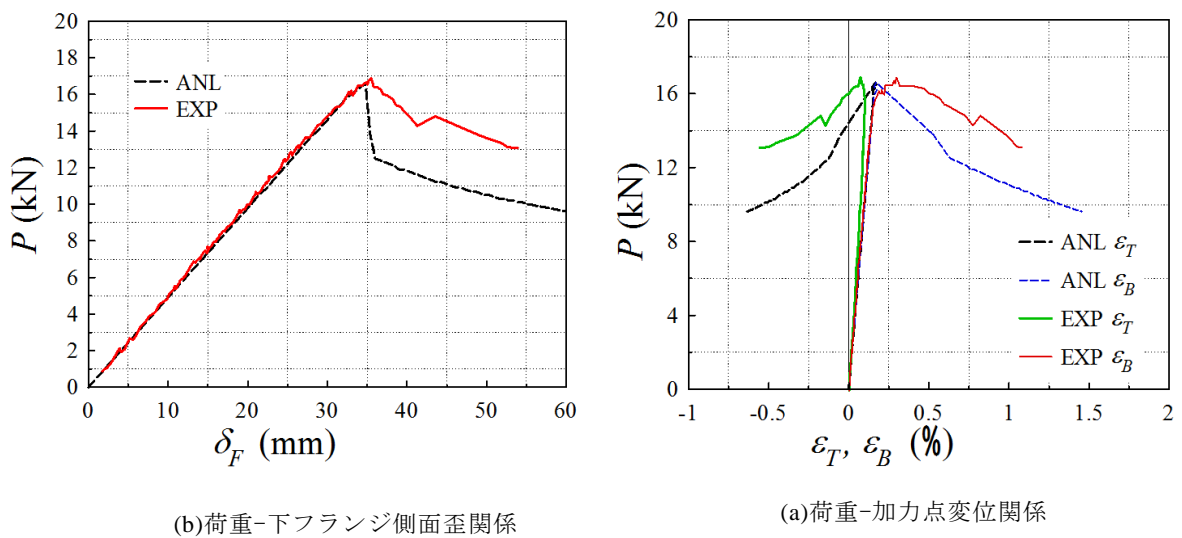


図10 R70 II 試験体 (補修試験体) の変形性状

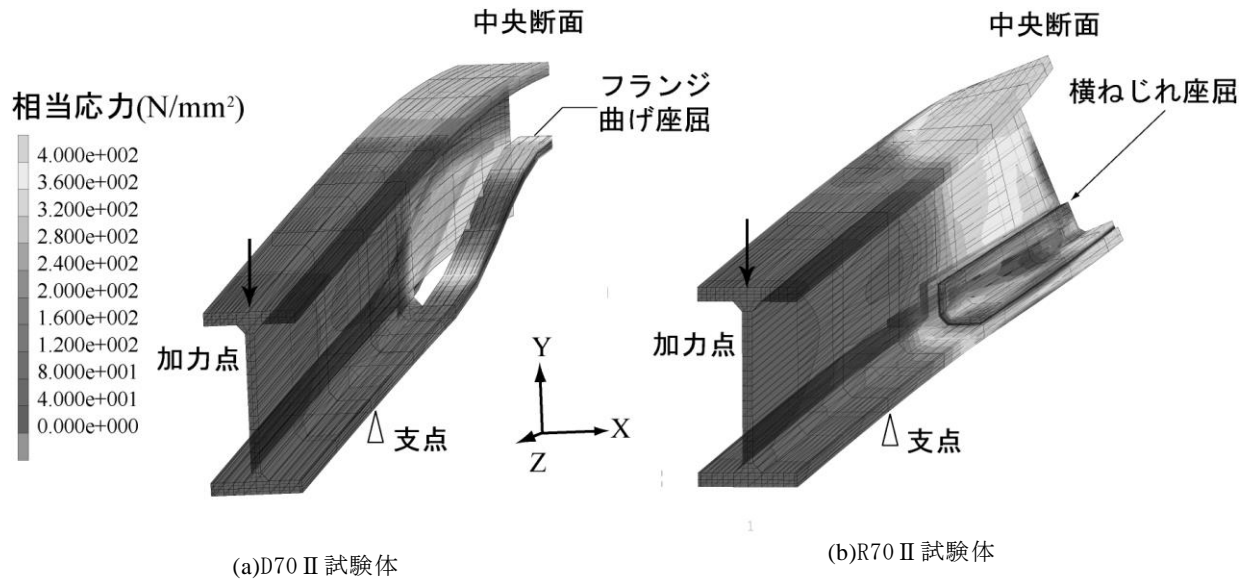


図 11 D70 II, R70 II 試験体の座屈性状

の許容曲げモーメント M_s $6.16\text{kN}\cdot\text{m}$ よりも大きくなり有効である。

- 5) 欠損試験体 (D30 I, II, D70 I, II) はフランジの曲げ座屈が補修試験体 (R30 II, R70 II) は横ねじり座屈が無欠損試験体と同様に生じる。また、横ねじり座屈後も山形鋼ははがれていない。
- 6) 有限要素法解析は、欠損補修試験体の最大耐力及び歪性状やフランジ曲げ座屈、横ねじり座屈現象を良好に追跡できる。

5. まとめ

本論文では、フィレット薄鋼板接着補修工法の設計式を提案し、H形鋼梁の曲げ載荷実験を行った。

本研究で得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) 補修後の試験体では、欠損なしの試験体よりも剛性が1割程度上昇し、最大耐力も増大した。
- 2) 軽量形鋼による接着補強により、断面性能を改善することができる。

謝辞

本研究の試験材料は藤本信介(東レ建設(株))及び堀井久一((株)コニシ)の両氏により支給していただきました。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 玉井宏章, 高松隆夫, 原伸幸, 灰谷徳治, 服部明生: 連続繊維プレートによる鋼構造建物の補強法に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第12巻, pp.239-246, 2004.11.
- 2) 玉井宏章, 陣川晃司, 中村憲一: 炭素繊維プレートと鋼との複合材の接着剤せん断耐力 その1 引張載荷試験, 長崎大学大学院工学研究科研究報告, 44(83), pp.21-27, 2014.