

フィレット薄鋼板接着補修工法の開発

その1 設計法の概要

玉井宏章*, 御厨健太**, 中島康太**

Development of Rehabilitation Technique bonding thin Steel Plates at Fillet of H-Shaped Members Part 1 Outline of Design

by

Hiroyuki TAMAI*, Kenta MIKURIYA**and Kota NAKASHIMA

We present a Rehabilitation technique bonding thin steel angle at the defect fillet of H-shaped members. The design requirement for the rehabilitation are shown in this paper. The sectional shape of the rehabilitated member is changed in the longitudinal direction, so a torsion and warping constants evaluation was required. A calculation procedure for torsion and warping constants of this member are shown. The accuracy and efficiency of this procedure are demonstrated by a comparative study using twisting test and finite element analysis results. By use of the evaluation procedure, the influence of length of the fillet defect are examined. Then we demonstrated a simply supported beam with central vertical load after this rehabilitation. The validity of the design requirement res shown through the stress distribution of steel angle and adhesive from 3D finite element analysis.

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、断面が一体とはいえな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する。

本論文では、このフィレット薄鋼板接着補修工法の概要を説明し、その設計式を提案する。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後に、補修単純支持梁について有限要素法解析を行って設計式の妥当性を検討したので報告する。

2. 補修法の概要

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し、

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

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

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、下フランジに曲げ抵抗をさせ、フィレット部には曲げ抵抗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。

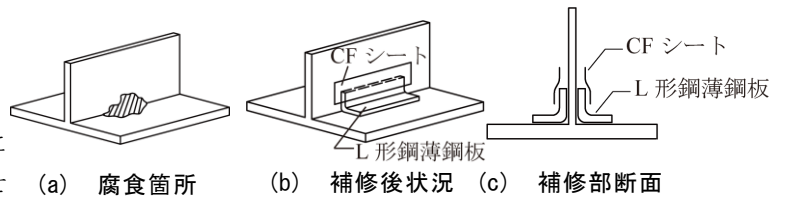


図1 補修法の概要

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

作用するせん断力に対して、接着剤は、次式を満足させる¹⁾。

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

ここに、

- τ_{amax}, τ_{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、

$$\sigma_b = \frac{M}{I_x} \cdot \frac{d}{2} \quad (3.a)$$

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

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

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

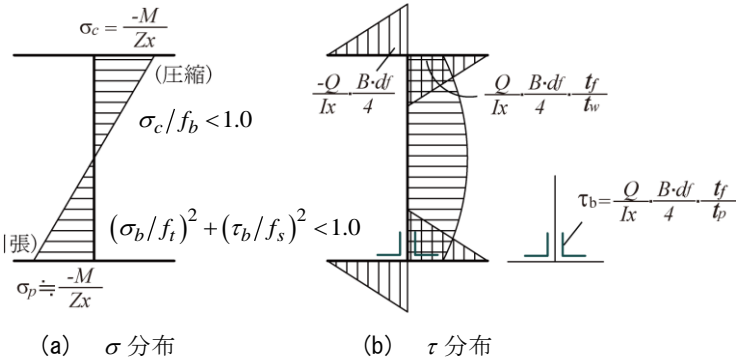
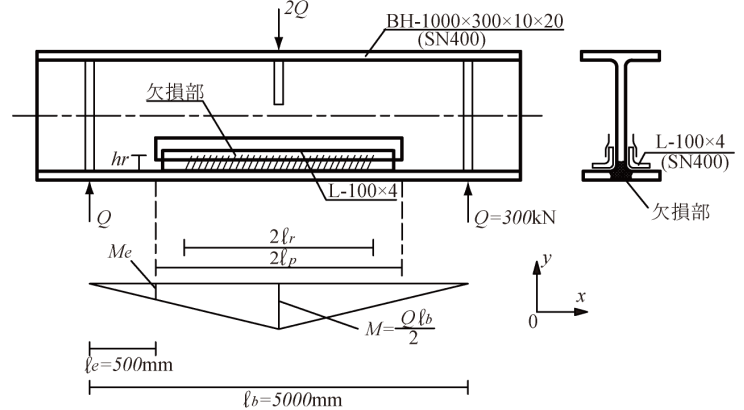
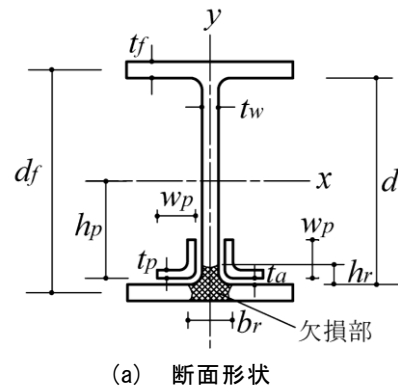


図2 梁断面の垂直応力, せん断応力分布



(b) 補修単純支持梁 (設計例題)

図3 例題の形状

- 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
- 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

フィレット薄鋼板接着補修工法の開発
その1 設計法の概要

2.2 設計例題

図3に例題の形状を示す。BH-1000x300x10x20 (SN400)、スパン5mの単純支持梁で、せん断力 $Q=300\text{kN}$ 、曲げモーメント $M=750\text{kNm}$ の応力が作用する場合の下フランジフィレット部が完全に腐食している部分について、薄板鋼板 (SN400、板厚 $t_p=4\text{mm}$)、接着厚 $t_a=1\text{mm}$ 、幅 $w_a=100\text{mm}$ を用いた、接着補修の可否を判定する。支持端から薄板鋼板の接着端部までの長さ l_e は 500mm とする。

○各断面定数を計算する。

$$\begin{aligned} I_x &= 3.619 \times 10^9 \text{ mm}^4, & I_y &= 9.00 \times 10^7 \text{ mm}^4 \\ Z_x &= 7.238 \times 10^6 \text{ mm}^3, & d &= 1000 - 2 \times 20 = 960 \text{ mm} \\ d_f &= 1000 - 20 = 980 \text{ mm}, & B &= 300 \text{ mm} \\ A_a &= 100 \times 1 = 100 \text{ mm}^2, & A_s &= 300/2 \times 20 = 3000 \text{ mm}^2 \\ A_p &= 4 \times 120 = 480 \text{ mm}^2, & l_e &= 500 \text{ mm} \end{aligned}$$

○各合応力を算定する。

$$\begin{aligned} M &= 750 \text{ kN}\cdot\text{m}, & Q &= 300 \text{ kN} \\ M_e &= Q \cdot l_e = 300 \times 0.5 = 150 \text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

○クリープせん断耐力と各許容応力度を算定する。

文献3より、クリープせん断耐力は、
 $\tau_{au} = 3.0 \text{ N/mm}^2$ (温度 20 度時)

許容引張応力度は、

$$f_b = \frac{235}{1.5} = 157 \text{ N/mm}^2$$

また、許容せん断応力度は、

$$f_s = 80 \text{ N/mm}^2$$

○検定を行う。

薄板鋼板

薄板鋼板部分内で最大モーメントが生じるとすると、

$$\sigma_b = \frac{M}{Z_x} = 104 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_b = \frac{Q}{I_x} \cdot \frac{B \cdot d_f}{4} \cdot \frac{t_f}{t_p} = 30.4 \text{ N/mm}^2$$

$$\left(\frac{\sigma_b}{f_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_b}{f_s}\right)^2 = \left(\frac{104}{157}\right)^2 + \left(\frac{30.4}{80}\right)^2 = 0.58 \leq 1.0 \rightarrow \text{OK}$$

接着剤

$$h_p = 1000/2 - 20 - 1 - 4/2 = 477 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \tau_{a\max} &= \sqrt{\frac{1115}{2.05 \times 10^5 \cdot 100} \cdot \frac{3000 \cdot 400}{3000 + 400} \cdot \frac{150 \times 10^6}{3.61 \times 10^9}} \cdot 477 \\ &= 2.74 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\frac{\tau_{a\max}}{\tau_{au}} = \frac{2.74}{3.0} = 0.91 \leq 1.0 \rightarrow \text{OK}$$

3. 断面定数の同定方法

設計方法では、2.2節の設計例で示したように補修によって断面が一体となって横座屈等に抵抗することを条件としている。本工法の部分的なフィレットの補修によって補修後の梁の、弱軸曲げ剛性、ねじり定数、そり定数が健全な梁のそれらと同等な値を有することを確認しておく必要がある。特に補修は部分的に行われ材軸方向に変断面となるため、実験的な確認が必要となる。そこで本節では必要な断面定数を再度確認し、それらの定数の実験的な同定方法を述べる。

3.1 等曲げ時の許容曲げ応力度

鋼構造の梁の曲げ抵抗を発揮させるには作用応力を許容曲げ応力度以下とし横ねじり座屈を生じさせないようにする必要がある。この主な影響因子としては横補剛区間長さの他にねじり剛性、そり剛性がある。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。

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

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 を降伏モーメントとして、

${}_p \lambda_b = 0.3 \leq \lambda_b \leq {}_e \lambda_b = 1.29$ の場合は、次式で得られる。

$$f_b = \frac{1}{\frac{3}{2} - 2 \left(\frac{\lambda_b}{{}_e \lambda_b} \right)^2} \left(1 - 0.4 \cdot \frac{\lambda_b - {}_e \lambda_b}{{}_p \lambda_b - {}_e \lambda_b} \right) \cdot F \quad (5.a)^4$$

圧縮フランジは、次式を満足する必要がある。

$$\frac{\sigma_c}{f_b} \leq 1.0 \quad (5.b)$$

ここに、 σ_c は圧縮フランジの最大作用応力度である。このように、 GJ 、 EI_w 及び EI_y が十分に確保される必要がある。

3.2 弱軸曲げ剛性の評価

材軸方向の断面形状が変化したり、部分的に補修された部材の断面定数評価法を以下に示す。まず、弱軸曲げ剛性の同定法を示す。

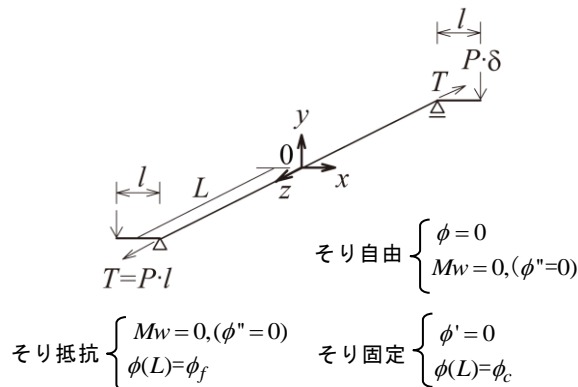
弱軸側に曲げが作用するように両端単純支持された梁の荷重と中央たわみを弾性範囲で計測すると、弱軸曲げ剛性は次式で得られる。

$$E \cdot I_y = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot \delta} \quad (6)$$

ここに、 l は支点間距離である。

3.3 ねじり定数、そり定数の評価

図4に示す両端単純支持された梁がねじりを受ける場合を考える。



ねじり角を ϕ とし、図4のような座標系をとると、両端のそりを自由としたとき、すなわち、 $z=0$ で $\phi=0$ 、 $\phi''=0$ 、 $z=L$ で $\phi''=0$ とした時、端部のねじりモーメント T とねじり角 ϕ とは次式の関係が成立する。

$$T = G \cdot J \cdot \frac{d\phi}{dz} \quad (7.a)$$

$z=0$ であるので、ねじり角は次式で表される。

$$\phi = \frac{T}{G \cdot J} \cdot z \quad (7.b)$$

$z=L$ でのねじり角は、

$$\phi(L) = \frac{T \cdot L}{G \cdot J} = \phi_f \quad (7.c)$$

純ねじりとそりねじりが混在し、ねじりモーメントを端部に作用させた場合の微分方程式は、次式となる。

$$T = G \cdot J \cdot \frac{d\phi}{dz} - E \cdot I_w \cdot \frac{d^3\phi}{dz^3} \quad (8)$$

この微分方程式の一般解は次式で表される。

$$\phi = C_0 + C_1 \cosh(\lambda \cdot z) + C_2 \sinh(\lambda \cdot z) + \frac{T \cdot z}{\lambda^3 \cdot E \cdot I_w} \quad (9.a)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{G \cdot J}{E \cdot I_w}} \quad (9.b)$$

いま $z=L$ でそり固定、 $z=0$ でそりモーメント M_w が0となり、断面が自由にゆがんでいる状態、すなわち、 $z=0$ で $\phi=0$ 、 $\phi''=0$ 、および、 $z=L$ で $\phi'=0$ という境界条件を考えると積分定数は決まり、ねじり角は次式で表される。

$$\phi = \frac{T}{G \cdot J} \cdot \left\{ z - \frac{1}{\lambda} \frac{\sinh(\lambda \cdot L) - \sinh(\lambda \cdot L - \lambda \cdot z)}{\cosh(\lambda \cdot L)} \right\} \quad (10.a)$$

$z=L$ でのねじり角は、

$$\phi(L) = \frac{T \cdot L}{G \cdot J} \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{\lambda \cdot L} \tanh(\lambda \cdot L) \right\} = \phi_c \quad (10.b)$$

同じねじりモーメント T に対する端部境界条件が異なるねじり角が実験的、解析的に求められれば、(7.c)式、(10.b)式より、

$$G \cdot J = \frac{T \cdot L}{\phi_f} \quad (11.a)$$

$$\lambda \cdot L = \frac{\tanh(\lambda \cdot L)}{1 - \frac{\phi_c}{\phi_f}} \quad (11.b)$$

$\lambda \cdot L (= \kappa)$ の初期値を1と仮定して(11.b)式を繰返し代入すれば、解の λ が求まり、(9.b)式から残りの断面定数は次式で得られる。

$$E \cdot I_w = \frac{G \cdot J}{\lambda^2} \quad (11.c)$$

一般に純ねじりとそりねじりの応力分担率を定めるパラメータである、ねじり定数比 κ は次式で定義される。

$$\kappa = \lambda \cdot L = L \cdot \sqrt{\frac{G \cdot J}{E \cdot I_w}} \quad (12)$$

κ が0.4以下であればそりねじりが、10以上であれば純ねじりが主要なねじり抵抗となることが知られている。例題の試験体はそりねじりと純ねじりが拮抗する場合を取り扱う。

4. 腐食の断面定数に及ぼす影響

本節では、文献5での実験例を用いて、3節の断面定数同定法の妥当性を示す。その後、フィレット部が腐食した場合の腐食長さを変化させた有限要素法解析によって、その断面定数に及ぼす影響を検討する。

4.1 断面定数同定法の精度

文献5の実験概要を図5に示す。

フィレット薄鋼板接着補修工法の開発
その1 設計法の概要

表 1 素材材料定数

	E	ν	σ_y	σ_u
	N/mm ²	-	N/mm ²	N/mm ²
H-200x200x9.2x11.4 (フランジ, SM490A)	205000	0.30	411	542
H-200x200x9.2x11.4 (ウェブ, SM490A)	205000	0.30	443	565
BH-1000x300x10x20 (SN400)	205000	0.30	235	400
L-100x4 (SN400)	205000	0.30	235	400
接着剤 (E258W)	2280	0.39	34.8	57.8

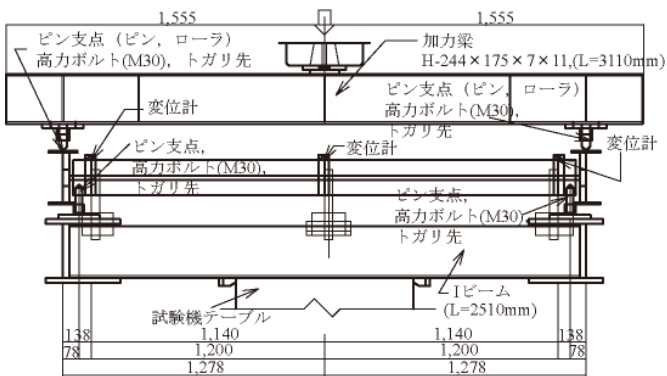
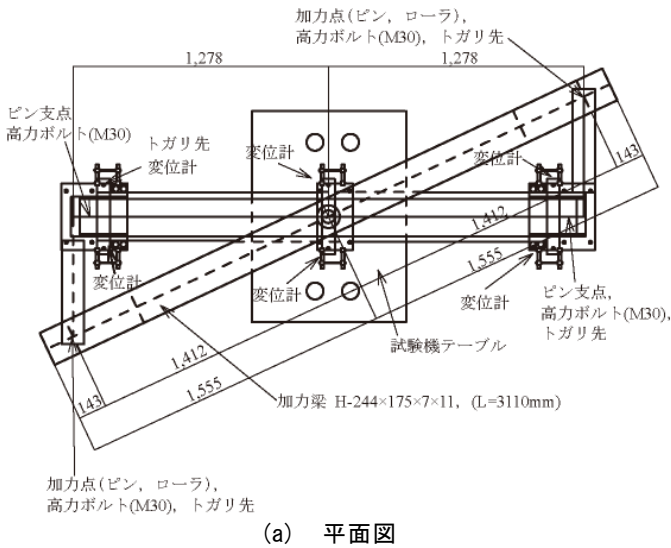


図 5 断面定数同定実験の概要 5)

試験体は、図 6 の断面欠損のない、H-200×200×9.2×11.4(SM490A)について、端部の断面のそりが自由に生じるもの(図 7(a))及び、日の字断面を溶接し、そりに抵抗するもの(図 7(b))について、材長 2L を 2470mm と 1670mm を計 4 体用意している。

図 5 の装置により端部両端に等しいねじりモーメント T を加え、アーム先端の鉛直変位 δ とその腕の長さ l から対応するねじり角 ϕ を計測している。(図 4 参照) 表 1 に素材試験結果を示す。

この実験をシュミレーションするため、4 節点シェル要素による有限要素法解析を行った。解析はこれら

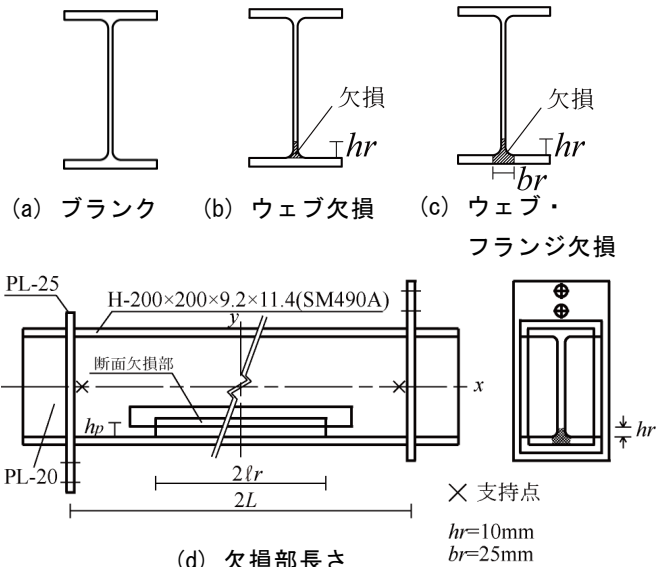


図 6 欠損部の形状

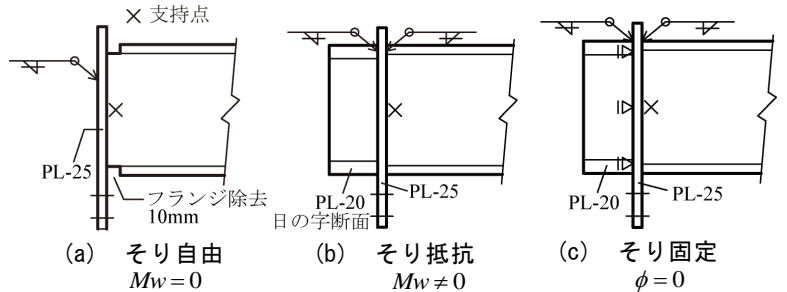


図 7 端部の境界条件

表 2 断面定数の同定結果

H-200x200x9.2x11.4								
	FEM.			Cal.			Ratio	
2L	ϕ_c / ϕ_f	GJ	EI_w	GJ	EI_w	κ	GJ	EI_w
mm	-	N·mm ²	N·mm ⁴	N·mm ²	N·mm ⁴	-	F.E.M./Cal.	F.E.M./Cal.
2470	0.235	1.82E+10	2.83E+16	1.92E+10	2.77E+16	0.70	0.94	1.02
1670	0.127	1.76E+10	2.74E+16	1.92E+10	2.77E+16	1.03	0.92	0.99

4 ケースに加えて、端部がそり固定の場合(図 7(c))2 ケースを追加して行った。

実験及び解析結果を図 8 及び表 2 に示す。

有限要素法解析をは要素数 1472、節点数 1526 として解析を行った。図 8 は(a)2L=2470mm、(b)2L=1670mm と部材長毎に分けて、ねじりモーメント T と端部のねじり角 ϕ との関係を実験値、有限要素法解析値及び算定値について示す。表 2 は、有限要素法解析値及び算定値について示す。表 2 は、有限要素法解析結果の同じねじりモーメントに対するそり自由の場合のねじり角に対するそり固定の場合のねじり角の比: ϕ_c / ϕ_f 、3 節(11.a)式~(11.c)式による純ねじり剛性 GJ とそりねじり剛性 EI_w の同定結果 GJ 及び EI_w の算定値と試験体のねじり定数比 κ 、 GJ 及び EI_w の算定値に対する同定値の比を示す。

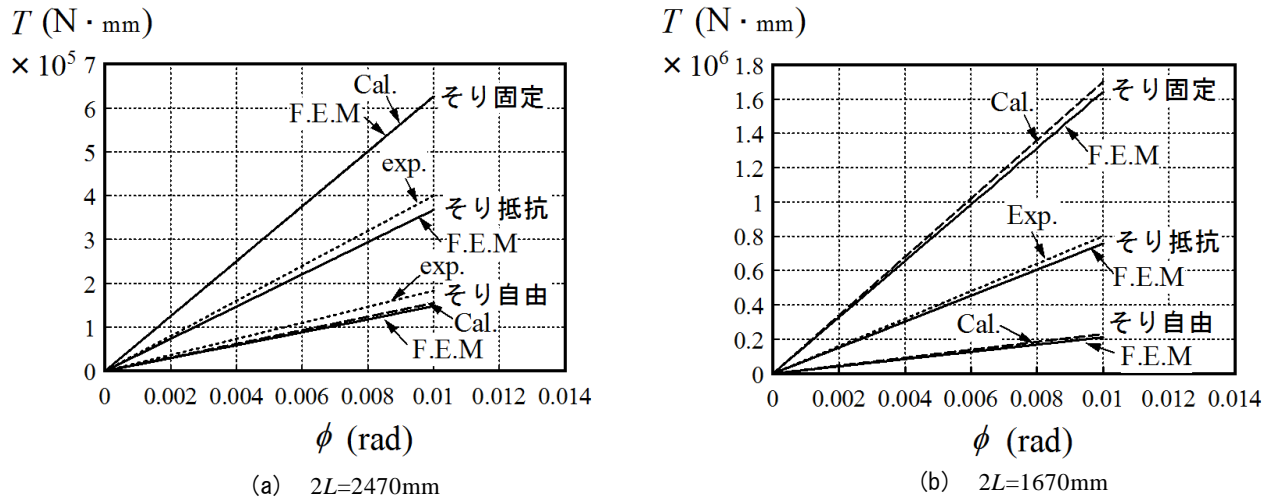


図8 断面定数有限同定法の妥当性
有限要素法解析の精度

表3 腐食長さの断面定数に及ぼす影響

(a) 腐食タイプ I

H-200x200x9.2x11.4, $2L=2470\text{mm}$							
l_r	FEM.			Eval.		Ratio	
	ϕ_f	ϕ_c	ϕ_c/ϕ_f	GJ	EI_w	J/J_0	I_w/I_{w0}
mm	$\times 10^{-6}\text{rad/N}\cdot\text{mm}$	$\times 10^{-6}\text{rad/N}\cdot\text{mm}$	-	$\text{N}\cdot\text{mm}^2$	$\text{N}\cdot\text{mm}^4$	-	-
0	0.0680	0.0160	0.235	1.82E+10	2.83E+16	1.00	1.00
250	0.0680	0.0160	0.235	1.81E+10	2.82E+16	1.00	1.00
500	0.0683	0.0160	0.235	1.81E+10	2.82E+16	1.00	1.00
750	0.0685	0.0161	0.235	1.80E+10	2.80E+16	0.99	0.99
1000	0.0689	0.0163	0.237	1.79E+10	2.75E+16	0.99	0.97

(b) 腐食タイプ II

H-200x200x9.2x11.4, $2L=2470\text{mm}$							
l_r	FEM.			Eval.		Ratio	
	ϕ_f	ϕ_c	ϕ_c/ϕ_f	GJ	EI_w	J/J_0	I_w/I_{w0}
mm	$\times 10^{-6}\text{rad/N}\cdot\text{mm}$	$\times 10^{-6}\text{rad/N}\cdot\text{mm}$	-	$\text{N}\cdot\text{mm}^2$	$\text{N}\cdot\text{mm}^4$	-	-
0	0.0680	0.0160	0.235	1.82E+10	2.83E+16	1.00	1.00
250	0.0689	0.0163	0.237	1.79E+10	2.76E+16	0.99	0.98
500	0.0699	0.0176	0.251	1.77E+10	2.50E+16	0.97	0.88
750	0.0709	0.0197	0.278	1.74E+10	2.13E+16	0.96	0.75
1000	0.0720	0.0223	0.309	1.72E+10	1.78E+16	0.94	0.63

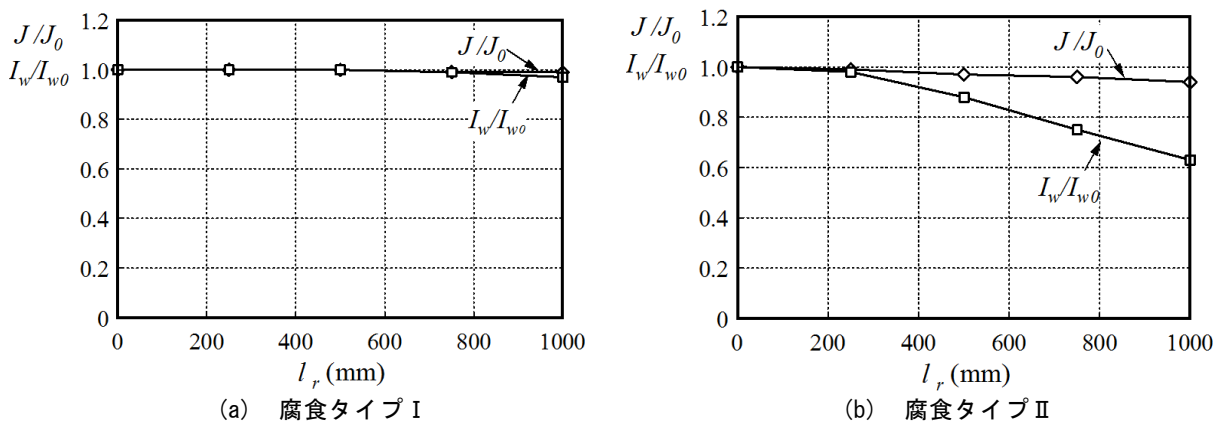


図9 腐食長さが断面定数に及ぼす影響

ファイレット薄鋼板接着補修工法の開発
その1 設計法の概要

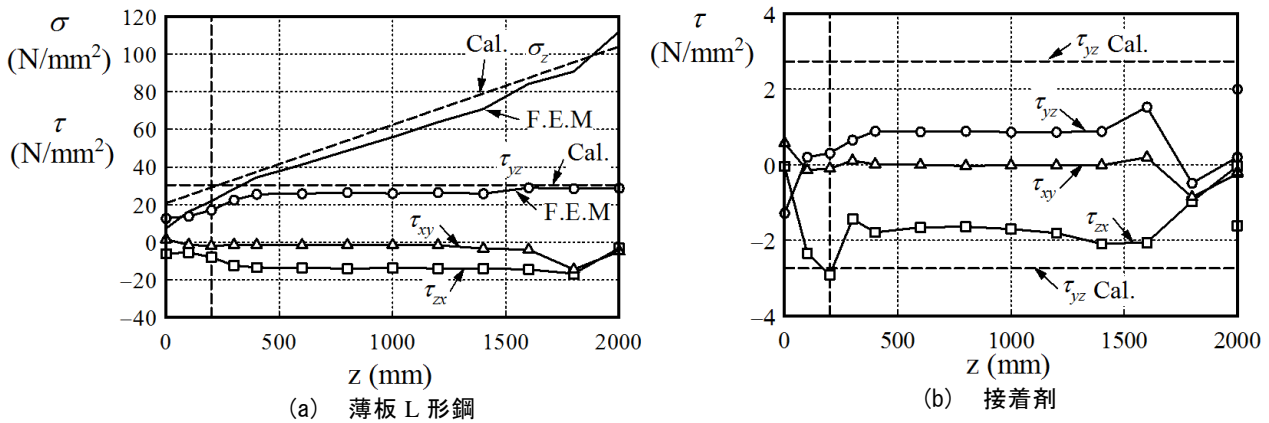


図 10 補修単純支持梁試験体の応力分布

これらの結果から、

- 1) ねじり角 0.01rad までは T と ϕ の関係には線形性がある。
- 2) そり抵抗の端部条件では、そり固定の条件と比べ拘束度が少ないこと
- 3) 有限要素法解析結果は実験値及び算定値を十分な精度で近似できる。
- 4) 有限要素法解析結果を用いればねじり係数比が $0.7\sim 1.0$ の梁では、断面定数同定法により、 GJ は 6% 以内、 EI_w は 2% 以内の精度で断面定数を同定できる。

4.2 腐食長さの断面定数に及ぼす影響

図 6(d)に示すように H-200×200×9.2×11.4 (SM490A)の断面で、材長 $2L$ が 2470mm の試験体の中央に、下フランジ部から高さ h_r までウェブが欠損する場合 (腐食タイプ I 図 6(b)) 及び、これに加えてフランジが幅 b_r だけ欠損する場合 (腐食タイプ II 図 6(c)) について、断面欠損長さ $2l_r$ を 0, 250, 500, 750, 1000mm と変化させ、端部境界条件をそり自由 (図 7(a)) 及びそり固定 (図 7(c))、として解析を行い、それぞれ単位ねじりモーメントあたりの端部のねじり角 ϕ_f 、 ϕ_c を求める。(11.a)式～(11.d)式を用いて求めた ϕ_f 、 ϕ_c から純ねじり剛性 GJ とそりねじり剛性 EI_w を評価して、腐食長さが、断面定数の及ぼす影響を調べた。

解析結果を図 9 及び表 3 に示す。図 9 には (a) 腐食タイプと (b) 腐食タイプ II に分けて、欠損なしの純ねじり定数に対する純ねじり定数の比 J/J_0 及び欠損なしのそりねじり定数に対するそりねじり定数の比 I_w/I_{w0} と半断面欠損長さ l_r との関係を示す。

表 3 には判断面欠損長さ l_r 、端部がそり自由及びそり固定の場合の単位ねじりモーメントあたりのねじり角 ϕ_f 、 ϕ_c とそれらの比 ϕ_c/ϕ_f 、解析結果から同定した

純ねじり剛性 GJ 、そりねじり剛性 EI_w と J/J_0 、 I_w/I_{w0} の比を、各解析ケースについて、(a)腐食タイプ I、(b)腐食タイプ II に分けて示す。

これらの結果から以下のことがわかる。

- 1) ウェブのみの断面欠損である腐食タイプ I では、材長の 6 割程度の断面欠損長さであっても純ねじり剛性 GJ 、そりねじり剛性 EI_w には、ほとんど低下は生じない。
- 2) ウェブとフランジとに断面欠損がある腐食タイプ II では、材長の 6 割程度の断面欠損長さの時、断面定数 GJ は 4% 、 EI_w は 25% 程度低下する。
- 3) フランジに欠損がある場合には、ファイレット補修が重要である。またその際、顕著な断面定数の劣化が生じるのは、断面欠損長さが材長の 6 割以上の時に生じる。

5. 補修設計法の妥当性

2 節で提示した補修設計法の妥当性を証明するため、断面定数の劣化が顕著と考えられる。ウェブとフランジともに断面欠損のある腐食タイプ II で、断面欠損長さが材長の 7 割の単純支持梁に補修を施した場合について、想定荷重を載荷して、補修材及び接着剤が所定応力内にとどまるか、有限要素法解析により検討した。

解析対象は 2.2 節で示した図 3 の設計例題である。

BH-1000×300×10×20 (SN400) 支点間長さ 5000mm で、下ファイレット部に、ウェブに $h_r=10\text{mm}$ 、フランジに $b_r=25\text{mm}$ 、欠損長さ $2l_r=1600\text{mm}$ の断面欠損があり、ファイレット両側から L-100×4(SN400)の L 形薄板鋼材が図 2(a)のように、接着厚さ $t_a=1\text{mm}$ 、材長 $2l_p=4000\text{mm}$ (定着長さ 200mm) が接着補修している。この単純支持梁に設け荷重 $2Q=600\text{kN}$ の中央集中荷重が作用する時の応力度検討を行った。解析は、接着層の応力を検討できるように、Serendipity 族の 20 節点立体要素を用い、

解析対象の対称性を考慮して 1/4 解析をした。要素数は 333、節点数は 2208 とした。鋼材、接着剤の素材特性は表 1 のものを用いた。

設計荷重を受けた時の L 形薄板鋼板隅角部表面及び L 形薄板鋼板と下フランジとの接着剤の層厚中央部の応力度と変位形状関数を利用した平滑化法によって求め、L 形薄板鋼板端部から中央部への材長方向の応力分布を調査した。

解析結果を図 10 に示す。

図 10 には(a)L 形薄板鋼材の垂直応力 σ_z 、せん断応力 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} の端部からの応力分布を σ_z と σ_{yz} 算定値の応力分布とともに、(b)接着剤のせん断応力 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} の端部からの応力分布を、 τ_{yz} の算定値の応力分布とともに、それぞれ示す。尚、 $z=200\text{mm}$ 位置は、H 形鋼に断面欠損が生じ始める箇所として縦線が入っている。

これらの結果から以下のことが分かる。

- 1) L 形薄板鋼板の垂直応力度及びせん断流から求めたせん断応力は、材端から 300mm 以上の位置で、算定値とはほぼ一致する。
- 2) 本設計例では、許容耐力に対する垂直応力度とせん断応力度の比は、同程度であること、上述の結果を考えあわせるとファイレット薄鋼板接着補修工法の L 形薄鋼板に対する(1)式の設計式は妥当である。
- 3) 接着剤のせん断応力度 τ_{yz} は、端部の負側の応力集中と曲げ勾配により生じる正の一定せん断応力との和として分布性状が決定される。又、中央部では、せん断応力の反転が生じるため応力分布には乱れが生じている。
- 4) 接着剤のせん断応力度 τ_{yz} の端部の負側への応力集中の程度は -2.2N/mm^2 と予想値 2.74N/mm^2 とほぼ同程度である。
- 5) 断面欠損を生じる位置での接着剤のせん断応力 τ_{zx} は応力集中が生じるが、その値は 2.74N/mm^2 以下となっている。
- 6) 接着剤の設計式(2)式は、設計例題については安全側の評価となっている。

6. まとめ

ファイレット薄鋼板接着補修工法の設計式を示し、断面欠損が断面定数に及ぼす影響を示した後に、補修単純支持梁について有限要素法解析を行って設計式の妥当性を検討した。得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) 変断面を有する梁材の純ねじり剛性、そりねじり剛性を求める断面定数同定法は工学上十分な精度を有する。
- 2) ウェブのみの断面欠損が材長の 6 割程度の場合、純ねじり定数、そりねじり定数にほとんど影響しない一方、フランジにも断面欠損があると、それぞれ 4%及び 25%低下が生じる
- 3) ファイレット薄鋼板接着補修工法の L 形薄鋼板に対する設計式は妥当である。

今後、設計例題を追加し、より細かな要素分裂で精度を高めた解析を行って設計式の適用範囲を見定めるとともに、接着の定着長及び接着剤の設計式をより妥当なものに改良する予定である。

参考文献

- 1) 陣川晃司, 玉井宏章, 御厨健太, 高松隆夫, 藤本信介, 堀井久一, 炭素繊維プレート接着補強鋼部材の接着剤疲労試験 その 1 予備疲労試験の概要, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 55 号, p365-366, 2016.3.
- 2) 御厨健太, 陣川晃司, 玉井宏章, 高松隆夫, 藤本信介, 堀井久一, 炭素繊維プレート接着補強鋼部材の接着剤疲労試験 その 2 予備疲労試験結果, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 55 号, pp369-372, 2016.3.
- 3) 服部明生, 玉井宏章, 高松隆夫, 小澤吉幸, 久保田啓仁, 炭素繊維プレートと鋼との複合材の高温クリープ限界せん断応力, 鋼構造設計基—許容応力度設計法一, 丸善, 2005.9.
- 4) 日本建築学会: 鋼構造設計規準—許容応力度設計法一, 丸善, 2005.9.
- 5) 喬崎雲, 河野昭彦他 5 名, 超高強度乾式組立材の振り剛性に関する実験的研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 48 号, pp365-368, 2009.3.