

軸力が作用する CFRP 接着補修鋼板に対する CFRP 板のせん断変形を 考慮した理論解析

Analysis of CFRP bonded steel plate subjected to axial force
including the effect of shear deformation of CFRP plate

白井瑛人*, 北根安雄**, 石川敏之***, 伊藤義人****
Shirai Akito, Yasuo Kitane, Ishikawa Toshiyuki, Yosito Itoh

*名古屋大学大学院博士前期課程, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**Ph.D., 名古屋大学大学院准教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
ykitane@civil.nagoya-u.ac.jp

***博士(工), 京都大学大学院助教, 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

****工博, 名古屋大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Shear deformation of CFRP affects how the force transfers from a steel plate to a CFRP plate in a CFRP bonded steel plate under an axial force. A widely accepted shear lag theory to model a CFRP bonded steel plate does not usually consider the effect of shear deformation in the CFRP plate. This study proposes a way to account for the effect of shear deformation in the CFRP plate on the force transfer between steel and CFRP by increasing the thickness of adhesive layer in the conventional shear lag theory.

Key Words: CFRP, bond, repair, shear deformation, theoretical analysis

キーワード: 炭素繊維強化プラスチック, 接着, 補修, せん断変形,
理論解析

1. 序論

1.1 背景

日本の高度経済成長期に, 橋梁の架設が盛んであったため, 供用年数が 50 年以上となる橋梁数が今後急激に増加すると予想される. 道路橋示方書では橋梁の設計供用期間を 100 年としており, これら供用年数が 50 年を超える橋についても長期の安全性を保つことが求められる.

鋼橋の架け替え理由の 1 つは, 損傷による欠陥であり架け替え理由全体の約 14% を占めている. そのうち, 約 44% が鋼材の腐食が原因とされている¹⁾. 鋼橋だけでなく社会基盤施設の鋼構造物における経年劣化の一つが腐食であり, 腐食損傷により低下した耐荷力を回復させ, 鋼構造物の長寿命化を図ることが, 今後, 鋼構造物の維持管理において求められる. 合理的な補修方法は, 合理的な維持管理に直結するため, 合理的で経済的な補修方法の確立は非常に重要な課題である.

鋼構造物の補修・補強工法の 1 つとして, 繊維強化プラスチック (FRP) を用いた接着工法が近年注目されて

いる. 鋼構造物の補修・補強では, 炭素繊維を強化材に用いた CFRP が使用されることが多い. CFRP が使用されるのは, 他の FRP より弾性率が高いことがその理由である. CFRP 接着工法は CFRP をエポキシ等の接着剤を用いて対象鋼部材に接着し, 腐食断面欠損のある部材の耐荷性能回復, 耐震補強の必要な部材の耐荷力向上, 疲労き裂がある部材の疲労き裂進展の遅延などを目的とした補修工法である.

他の補修工法と比較した場合, CFRP 接着補修にはいくつかの利点がある. CFRP は軽量で, 人力での運搬・施工が可能であるため重機等の大掛かりな装置を必要としない. また, 接着によって CFRP と母材とを一体化するため, 溶接による入熱や, ボルト孔等の母材の断面欠損が発生しない. さらに, 軽量で高弾性・高強度の材料であるため, 施工後の付加重量の増加が少なく, 断面積の増加も少なく景観を損なわない. 加えて, 高い耐食性をもつことから施工後の耐食性が期待できる. CFRP 接着補修はこれら多くの利点を持ち合わせることから, 補修費用や維持管理費用を抑える合理的な補修方法として

期待されている²⁾。

国内のCFRP接着による鋼構造物の補修・補強事例も近年その数を増やしている。鋼橋の桁の耐荷力の向上を目的とした補修は、桜の目橋（宮城県）や山倉橋（千葉県）があり、鋼製橋脚の耐震補強を目的としたものは阪神高速湾岸線（大阪府）がある。また、腐食により性能が低下した鋼部材の補修は、浅利橋（山梨県）や本城橋（栃木県）などがある²⁾。また、NEXCO設計要領³⁾では、FRP接着補修が補修工法の一つとして取り入れられており、高伸度弾性パテ材を用いた接着構成や200mm以上の定着長を確保することなどの仕様が示されている。

しかし、これらいくつかの補修例がある一方で、CFRP板の接着端部における剥離に対する設計方法や、補修後の耐荷性能回復効果を定量的評価した補修設計方法が十分に確立されていないのが現状である。本研究では、付着長さの設計方法や接着後の耐荷性能回復効果に影響を与えると思われるCFRPのせん断変形に着目した。

1.2 本研究の目的および手法

断面欠損を有する鋼板に対するCFRP接着補修に関して、補修鋼板が軸力を受ける際の力学的挙動は、石川ら⁴⁾が古典的なせん断遅れ理論によって理論解析的検討を行っている。理論解析では、CFRPおよび鋼板は軸力を伝達する要素、接着剤はせん断力を伝達する要素としてモデル化されており、CFRPと鋼板を軸力部材とした有限要素解析（FEM解析）結果とも良好な一致を得ている。しかし、CFRP板をソリッド要素でモデル化し、CFRP板のせん断変形を考慮したFEM解析結果と比べると、理論解析結果は鋼板からCFRP板への応力伝達がより短い区間で生じるとされる。実際のCFRP接着補修鋼板ではCFRP板がせん断変形するため、鋼板からCFRP板への応力伝達が、CFRP板がせん断変形しないと仮定した場合に比べて、遅れることになる。これは、CFRP板の必要長さ、すなわち必要定着長にも影響を与えることになるため、CFRP板のせん断変形がCFRP接着補修鋼板の力学的挙動に与える影響を明らかにする必要がある。

本研究では、断面欠損を有する鋼板へのCFRP接着補修を対象とし、CFRP板接着補修鋼板の一軸引張荷重下における応力分布を求める理論解析において、CFRP板のせん断変形を考慮することを目的とする。

まず、CFRP板のせん断変形を考慮できるFEMモデルを構築し、FEM解析により、CFRPのせん断変形がCFRP接着鋼板の応力分布に与える影響を明らかにする。FEM解析では、鋼板の板厚や断面欠損長さなどを変化させた異なる寸法をもつモデルを考慮する。それらの結果と、既存の理論解析⁴⁾とを比較し、CFRP板のせん断変形の影響を考慮できる理論解析方法を提案する。具体的には、理論解析での接着剤の厚さを実際の厚さより増してCFRPのせん断変形の影響を、接着剤のせん断変形として考慮し、理論解析を行う。本研究では、この接着剤の

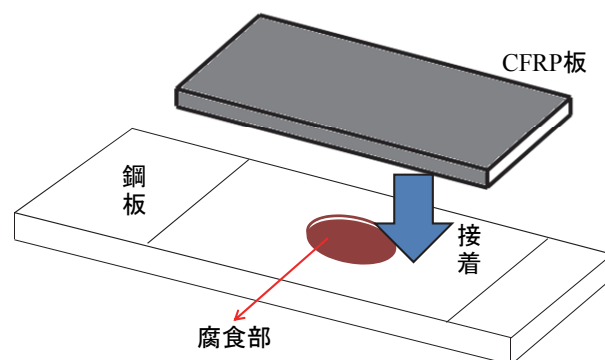


図-1 腐食鋼板へのCFRP板接着鋼板

見かけの厚さの決定方法を提案する。

2. 断面欠損を有する鋼板のCFRP接着補修

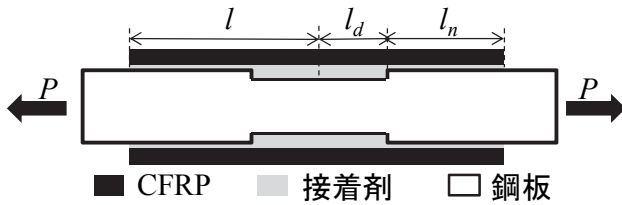
2.1 対象構造

CFRP接着補修された軸力を受ける鋼板では、鋼板の軸力が接着剤を介してCFRP板に徐々に伝達される。腐食等の断面欠損のある鋼板の補修では図-1に示すように、断面欠損部だけでなくその両側の健全部にわたってCFRP板が接着される。これは断面欠損部での鋼板が失った耐荷力をCFRP板によって回復するためには、健全部において鋼板からCFRPに応力が伝達される必要がある。そのために十分な定着長が必要であるからである。また補修鋼板の剛性を無欠損の鋼板の剛性まで回復させるために必要なCFRPの板厚は、断面欠損量などによって決定される。この十分な定着長と必要CFRP板厚については、古典的なせん断遅れ理論によって文献4)で明らかにされている。

本研究では図-2に示すような上下面に対称に、また鋼板の幅方向に一樣に断面欠損を有する鋼板に、対称にCFRP板を接着補修したモデルを考え、鋼板は引張軸力下にあると仮定する。また、図-3は図-2に示すモデルの断面欠損部分および一般部の断面図を示す。

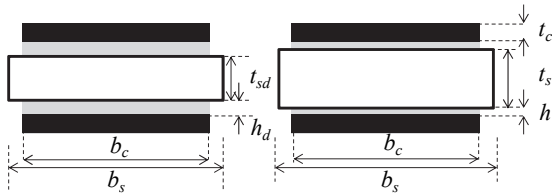
2.2 CFRPのせん断変形を考慮しない既存の理論解析

図-2に示すCFRP接着補修された断面欠損を有する鋼板の応力分布の解析解は、図-4に示すように、対称条件から、鋼板の上半分のみに対し微小区間での水平方向の力のつり合いを考える。接着剤の軸方向の弾性係数が鋼板やCFRPのそれと比べ小さいこと、接着剤ではせん断力により主に力が伝達されることから、接着剤がせん断力、CFRP板と鋼板は軸力のみ伝達すると仮定することにより、図-4に示す微小区間の水平方向の力のつり合いから断面欠損部と一般部の軸力に関する2階の微分方程式が導出される。この微分方程式を解くことにより鋼板の軸力 $N_s(x)$ が求められるので、これを用いて鋼板やCFRP板に発生する応力や接着剤に発生するせん断応力を算出できる⁴⁾。



P :作用外力, l_d :断面欠損の片側長さ
 l_n :一般部 CFRP 板の片側長
 l :CFRP 板の片側定着長さ

図-2 断面欠損を有する CFRP 板接着鋼板



t_{sd} : 断面欠損部の鋼板の板厚
 t_s : 一般部の鋼板の板厚
 t_c : CFRP 板の板厚
 b_s : 鋼板の幅
 b_c : CFRP 板の幅
 h : 一般部の接着剤の厚さ
 h_d : 断面欠損部の接着剤の厚さ

図-3 断面欠損部および一般部断面積

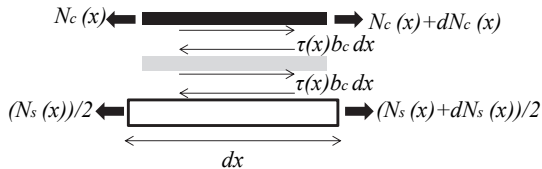


図-4 CFRP 接着鋼板の微小区間の水平方向のつり合い

2.3 CFRP のせん断変形を考慮した FEM 解析

(1) 解析条件

図-2 に示した CFRP 補修鋼板の引張荷重下における応力分布を FEM 解析により求め、前述の既存理論解との比較を行う。ここでは、鋼板と CFRP 板の幅が等しく、減肉部が幅方向に一樣であるモデルを考慮し、幅方向に一樣な力学挙動を仮定することで、2次元のモデルとした。対象の CFRP 接着補修鋼板は上下左右対称であるために、解析モデルでは図-2 に示される対称構造の 1/4 のみをモデル化し、解析モデルの対象領域を図-5 に示す。

FEM 解析の境界条件としては、モデルの左端（鋼板中

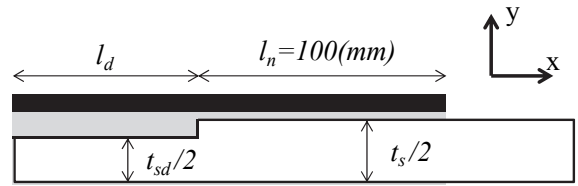


図-5 CFRP 接着補修 1/4 モデル

表-1 各部材の材料定数

	鋼板	接着剤	CFRP
ヤング率(GPa)	200	2.5	$E_1=150$ $E_2, E_3=4.7$
ポアソン比	0.3	0.36	$\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}=0.3$
せん断弾性係数 (MPa)	76923	919	$G_{12}, G_{13}=1468$
板厚(mm)	$t_s(9,12,16)$	0.2	2

*部材軸方向を 1, 幅方向を 2, 板厚方向を 3 とする

央面) で x 方向の変位を拘束, 下端 (板厚中心面) で y 方向の変位を拘束する。载荷条件として、鋼板の右端に x の正方向の強制変位を与える。この時、変形は弾性範囲内であること、CFRP 板の接着端部での剥離は生じないことを仮定し、線形弾性解析を行った。

本研究で使用する鋼板と CFRP 板、接着剤の材料定数を表-1 に示す。ここで、繊維方向以外のヤング率やせん断弾性係数は、Halpin-Tsai 式⁹⁾によって算出した。鋼板の片側欠損厚が 1.5mm (全体で 3mm の欠損) の場合に、欠損した断面剛性を CFRP 板で補う設計を行うと、表-1 に示した CFRP 板では、CFRP 板 1 層 (厚さ 2mm) の補修が必要となる。

本研究では、鋼板の健全部の板厚と欠損部長さをパラメータとし、鋼板の板厚を 9mm~16mm、欠損部の半長さを 10mm~200mm の範囲で変化させることで複数の解析ケースを作成した。解析ケースと各モデル名を表-2 に示す。CFRP 板の片側一般部接着長さに関しては 100mm とした。この 100mm は文献 4) で示された CFRP 板一般部必要最小長さよりも長いことを確認した。

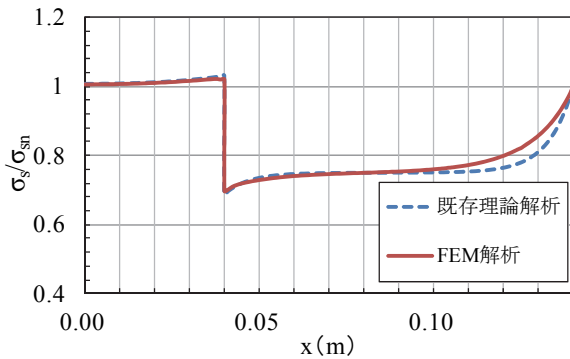
また、本研究では解析プログラム Abaqus ver.6.12⁶⁾ を用いて 2次元での解析を行い、解析では鋼板、接着剤、CFRP 板に 2次元平面応力要素 (CPS4) を使用し、CFRP 板のせん断変形を考慮した。平面応力要素を使用した理由は、本研究では図-1 に示すような、幅が軸方向長さに対して小さい構造を対象としているので、幅方向のひずみは考慮し、応力は生じないと仮定したためである。このとき、要素のサイズは 0.05mm×0.05mm とした。

(2) 解析結果

図-6 に鋼板厚 9mm、断面欠損厚 3mm、欠損片側長さ 40mm の欠損鋼板を CFRP1 層で補修したケース (ts9ld40L1) について、2.2 で述べた既存の理論解析と

表一-2 解析ケースおよびモデル名

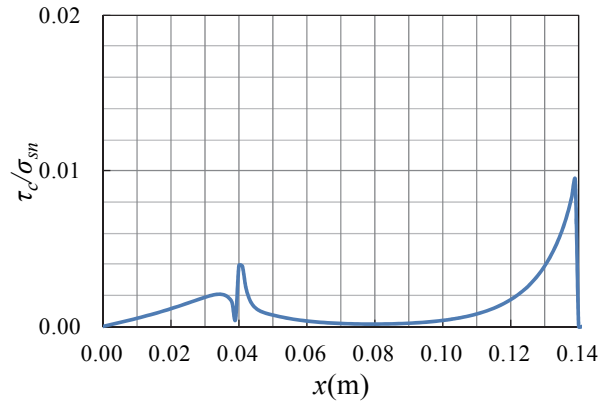
モデル名	$t_s(\text{mm})$	$l_d(\text{mm})$	$t_{sd}(\text{mm})$
ts9ld10L1	9	10	6
ts9ld20L1		20	
ts9ld40L1		40	
ts9ld50L1		50	
ts9ld100L1		100	
ts9ld200L1		200	
ts12ld10L1	12	10	9
ts12ld20L1		20	
ts12ld40L1		40	
ts12ld50L1		50	
ts12ld100L1		100	
ts12ld200L1		200	
ts16ld10L1	16	10	13
ts16ld20L1		20	
ts16ld40L1		40	
ts16ld50L1		50	
ts16ld100L1		100	
ts16ld200L1		200	



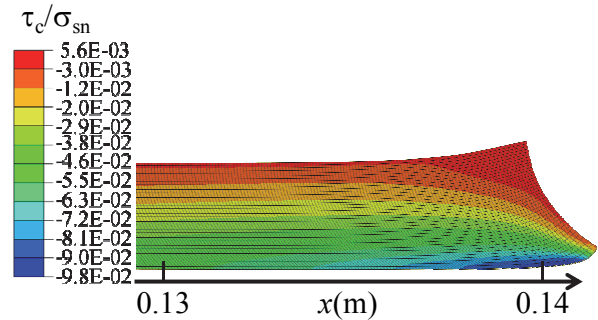
図一-6 鋼板応力の理論解析と FEM 解析の比較(ts9ld40L1)

FEM 解析を比較したグラフを示す。横軸は図一-5 で示したように部材軸方向に x 軸をとり鋼板中央からの距離を表している。縦軸は解析により得られた鋼板の応力 σ_s を健全部鋼板応力 σ_{sn} で除した応力比を表している。このとき、 σ_s と σ_{sn} は断面の平均値とした。

どちらの解析結果も接着端部から断面欠損の境界に至るまでの区間をみると、接着剤のせん断変形を介して鋼板から徐々に CFRP へ力が伝わり、ある一定の値に収束したのちに、断面欠損部で応力が最小となる。しかし、2 つの解析結果を比較すると、接着端部における FEM 解析の鋼板応力が既存の理論解析の鋼板応力より小さいことがわかる、これは CFRP のせん断変形の影響により、FEM 解析では、理論解析で想定しているほど鋼板から CFRP への応力の伝達が進んでおらず、応力伝達が遅く



(a) CFRP の断面平均せん断応力



(b) 接着端部の CFRP せん断応力(τ_c/σ_{sn})コンター図およびせん断変形

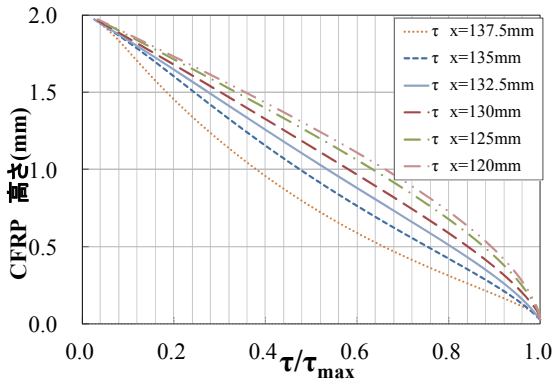
図一-7 FEM 解析による CFRP に発生するせん断応力とせん断変形

なっていることを示している。

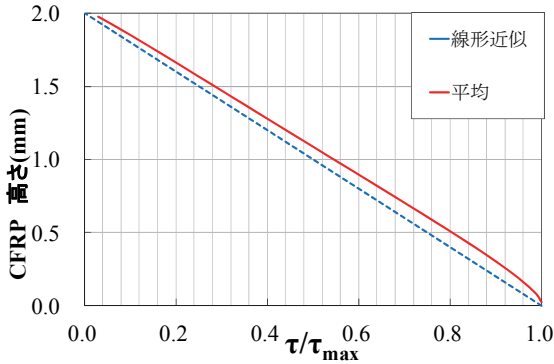
図一-7(a)に、1 層の CFRP で補修した鋼板厚 9mm で欠損部半長さ 40mm のモデル (ts9ld40L1) の FEM 解析で得られた軸方向の CFRP の断面平均せん断応力分布を示す。グラフの縦軸は CFRP のせん断応力 τ_c を健全部の鋼板の応力 σ_{sn} で除したものであり、横軸は軸方向における対象構造の中心位置からの距離である。図一-7(b)は接着端 (この場合 $x=140\text{mm}$) 付近の CFRP の変形(変形倍率 20 倍)とせん断応力コンター図である。図から明らかのように、CFRP では接着端で大きくせん断応力が生じ、大きくせん断変形をしていることがよくわかる。

図一-8に1層の CFRP で補修した鋼板厚 9mm で欠損部半長さ 40mm のモデル (ts09ld40L1) の CFRP 板断面高さ方向におけるせん断応力分布を示す。縦軸は CFRP の板厚方向の座標であり、横軸は中心からの距離 $x(\text{mm})$ におけるせん断応力 τ をその地点での CFRP 下端に生じるせん断応力 τ_{max} で除した値である。

また、 $x=120, 125, 130, 132.5, 135, 137.5(\text{mm})$ の 6 か所の断面でのせん断応力の高さ方向分布の平均値とせん断応力は高さ方向に線形分布するとした線形近似線を図一-8(b)に示す。これらから、CFRP 板の下端つまり接着層との境界でせん断応力は最大となり CFRP 板の上端ではせん断応力は 0 となる。軸方向において接着端から中心位置方向へみていくと、せん断応力の板厚の高さ方向分布はある一定の曲線に近づいていく。図一-7(a)で示す断面



(a) 各断面での板厚方向せん断応力分布



(b) 板厚方向のせん断応力分布モデル

図-8 CFRP に生じるせん断応力分布 (FEM 解析)

平均せん断応力が極めて小さい $x=80(\text{mm})$ 付近の断面でもこの曲線に近いことを確認した. 接着端部のせん断応力が大きい領域で, 図-8(a) で示した 6 点の平均をとると, 図-8(b) に示すようにほぼ線形の分布に近づくことから, 本研究では CFRP のせん断応力およびせん断ひずみは板厚の高さ方向に線形分布すると仮定する.

3. CFRP のせん断変形を考慮した理論解析

3.1 CFRP のせん断変形を考慮するための接着層厚

前章で述べたように, CFRP 板はせん断変形を生じ, その応力分布は板厚方向 (y 方向) に線形分布することから位置 x における CFRP に生じるせん断応力 $\tau_c(x, y)$ を式(1)のように表現することができる.

$$\tau_c(x, y) = \tau_{max}(x) \left(1 - \frac{y}{t_c}\right) \quad (1)$$

ここで,

t_c : CFRP の厚さ

$\tau_{max}(x)$: 位置 x での CFRP の最大せん断応力

また, 位置 x での CFRP 板のせん断変形量 $\delta_c(x)$ は, 板厚の高さ方向にせん断ひずみを積分することで以下のように得られる.

$$\begin{aligned} \delta_c(x) &= \int_0^{t_c} \frac{\tau_c(x, y)}{G_{13}} dy \\ &= \int_0^{t_c} \frac{\tau_{max}(x)}{G_{13}} \left(1 - \frac{y}{t_c}\right) dy \\ &= \frac{\tau_{max}(x)t_c}{2G_{13}} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで,

G_{13} : CFRP の面外せん断弾性係数

である.

この CFRP 板のせん断変形量 $\delta_c(x)$ は CFRP 上面と下面の軸方向 (x 方向) 変位の差として表れ, 2.2 で示した既存の理論解析では考慮されていない物理量である. CFRP のせん断変形が存在することで, 接着剤から同じせん断応力を受けても CFRP 板の接着面での変位が軸方向変位だけの場合に比べて大きくなり, 鋼板から CFRP 板の軸方向応力の伝達の効率が悪くなる. これが, 図-6 で示した既存の理論解析とソリッド要素を用いた FEM 解析での鋼板応力分布の差の原因である.

本研究では, この CFRP 板のせん断変形が, CFRP 接着鋼板に与える影響を接着剤の変形に換算することで, 鋼板および CFRP の軸力分布をより正確に表現できるよう, 理論解析を修正することを試みる. 具体的には, CFRP 板に生じるせん断ひずみエネルギーを接着剤のせん断ひずみエネルギーに置き換えることを考える.

図-6 に示すような応力伝達の遅れが生じている接着端部から断面欠損の境界に至るまでの区間において, 接着剤のせん断ひずみエネルギー U_e と CFRP のせん断ひずみエネルギー U_c はそれぞれ式(3)と式(4)のように表わすことができる.

$$U_e = \frac{1}{2} \int_V \frac{\tau_{max}(x)^2}{G_e} dV \quad (3)$$

$$= \frac{b_c}{2G_e} h \int \tau_{max}(x)^2 dx$$

$$U_c = \frac{1}{2} \int_V \frac{\tau_{max}(x)^2}{G_{13}} \left(1 - \frac{y}{t_c}\right)^2 dV \quad (4)$$

$$= \frac{b_c}{2G_{13}} \frac{t_c}{3} \int \tau_{max}(x)^2 dx$$

ここで,

G_e : 接着剤のせん断弾性係数

h : 接着剤の厚さ

既存の理論解析では接着剤はせん断応力のみを, 鋼板と CFRP は軸力のみを伝える部材として仮定しているため, 対象構造物全体に生じるせん断ひずみエネルギー U は, $U = U_e$ となる. 一方 FEM 解析では前述したように

接着剤だけでなく FRP もせん断変形が生じるため、この時 U は式(5)のように表わすことができる。

$$U = U_e + U_c$$

$$= \frac{b_c}{2G_e} \left(h + \frac{t_c}{3} \frac{G_e}{G_{13}} \right) \int \tau_{max}(x)^2 dx \quad (5)$$

式(3)と式(5)を比較すると、式(5)では接着剤の板厚が式(3)よりも $t_c G_e / 3G_{13}$ だけ厚くなっていると見ることができる。したがって、本研究では理論解析に使用する接着剤の板厚を必要に応じて厚くすることで、CFRP 板のせん断変形を理論解析で考慮することができると予想した。ここでは、式(5)の括弧内の項を接着剤の換算接着層厚 h' と呼び、式(6)に示す。この換算接着層厚を文献4)の接着層厚に代入することにより、簡便にCFRP のせん断変形を考慮できるような既存の理論解析を修正する。

$$h' = h + \frac{t_c}{3} \frac{G_e}{G_{13}} \quad (6)$$

式(6)より G_{13} が G_e に対して極めて大きいせん断剛性の場合、CFRP のせん断変形は非常に小さくなり、接着剤の厚さは理論解析と同じとなるのがわかる。

表-1 にある材料定数および寸法のと看、 $h=0.2(\text{mm})$ に対して、式(6)は $h'=0.617(\text{mm})$ を与える。

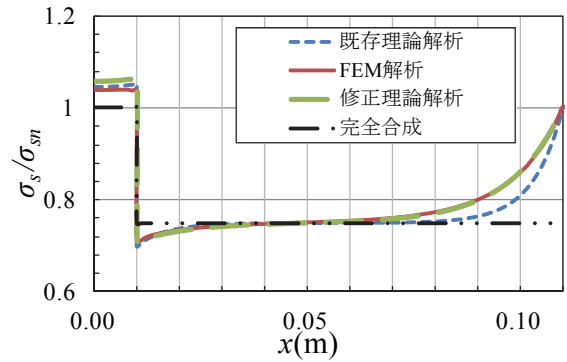
3.2 解析結果と考察

式(6)による接着剤の換算厚を用いた修正理論解析と FEM 解析の鋼板応力分布図を図-9、接着剤のせん断応力分布図を図-10 に示す。図-9(a)と図-10(a)に鋼板厚 9mm で断面欠損半長さ 10mm、図-9(b)と図-10(b)に鋼板厚 12mm で断面欠損半長さ 40mm、図-9(c)と図-10(c)に鋼板厚 16mm で断面欠損半長さ 200mm のケースを示しており、すべてのケースで片側断面欠損厚 1.5mm に対して CFRP 板を 1 層接着している。また、すべてのケースで $h'=0.617(\text{mm})$ である。

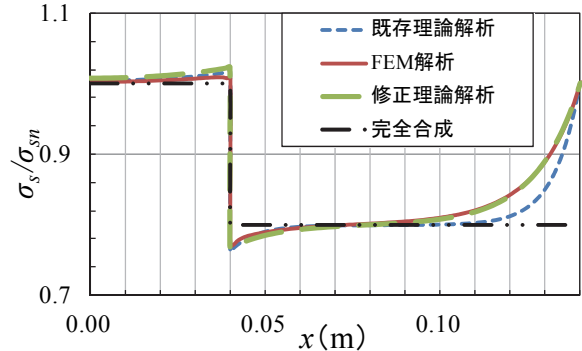
図-9 からわかるように、既存理論解析では、一般部において鋼板から CFRP への力の伝わりが FEM 解析と比べ早い結果が見られたが、換算接着層厚を用いた修正理論解析では、断面欠損や断面欠損長さに違いがあっても、一般部において鋼板の応力分布が概ね FEM 解析結果と一致しており、鋼板から CFRP 板への力の伝達が正確に表現できていることがわかる。

(1) 一般部における鋼板応力の誤差

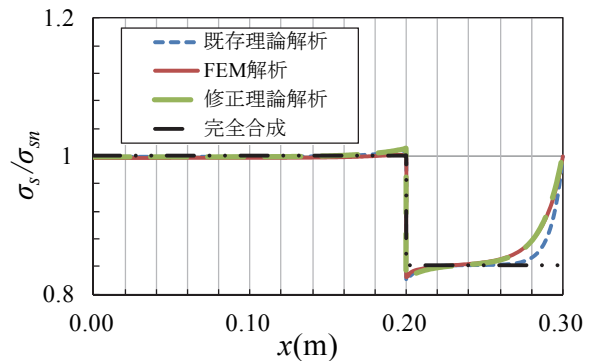
前述したように一般部の鋼板応力において、修正した理論解析は概ね FEM 解析結果と一致している。ここで式(7)に示すような理論解析の鋼板応力の FEM 解析からの誤差の二乗和平方根 I を、既存理論解析と修正理論解析ともに表-3 に示す。



(a) 鋼板厚 9mm で断面欠損半長さ 10mm (ts09ld10L1)



(b) 鋼板厚 12mm で断面欠損半長さ 40mm (ts12ld40L1)



(c) 鋼板厚 16mm で断面欠損半長さ 200mm (ts16ld200L1)

図-9 鋼板応力分布の解析間の比較

$$I = \sqrt{\sum_{x_i=l_d}^l \left\{ \frac{\sigma(x_i) - \sigma_{FEM}(x_i)}{\sigma_{FEM}(x_i)} \right\}^2} \quad (7)$$

ここで、

$\sigma(x_i)$: 理論解析における位置 x_i での σ_s / σ_{sn}

$\sigma_{FEM}(x_i)$: FEM 解析における位置 x_i での σ_s / σ_{sn}

x_i : $l_d \sim l(\text{mm})$ の範囲における 1mm 間隔の評価点

表-3 より、応力誤差を表すパラメータ I の値は本研究の提案する修正理論解析を行うことによって、全モデルで 1/3 程度に小さくなる改善がみられ、式(3.6)の換算接着層厚が有効に機能していることがわかる。

表-3 各理論解析の誤差の比較

モデル名	パラメータ I		収束長さ誤差(%)		断面欠損部鋼板 応力誤差(%)		接着剤最大せん断応力 誤差(%)	
	既存解析	修正解析	既存解析	修正解析	既存解析	修正解析	既存解析	修正解析
ts09ld10L1	0.25	0.082	-13	-1.6	+1.4	+3.1	+71	-2.5
ts09ld20L1	0.25	0.081	-10	-1.6	+1.2	+2.8	+71	-2.5
ts09ld40L1	0.25	0.079	-13	-3.2	+1.2	+2.7	+71	-2.5
ts09ld50L1	0.25	0.080	-13	-4.8	+1.2	+2.7	+71	-2.5
ts09ld100L1	0.26	0.086	-12	-3.3	+1.2	+2.7	+71	-2.5
ts09ld200L1	0.26	0.099	-12	-3.3	+1.3	+2.7	+71	-2.5
ts12ld10L1	0.20	0.060	-11	-1.6	+1.3	+2.2	+72	-2.3
ts12ld20L1	0.20	0.060	-11	-1.6	+1.1	+1.9	+72	-2.3
ts12ld40L1	0.20	0.060	-11	-3.2	+1.0	+1.9	+72	-2.3
ts12ld50L1	0.20	0.060	-11	-3.3	+1.0	+1.8	+72	-2.3
ts12ld100L1	0.20	0.064	-11	-3.2	+1.0	+1.8	+72	-2.3
ts12ld200L1	0.20	0.073	-13	-4.7	+1.0	+1.8	+72	-2.3
ts16ld10L1	0.16	0.044	-8.7	-4.4	+1.0	+1.5	+72	-2.2
ts16ld20L1	0.16	0.045	-8.8	-4.4	+0.87	+1.4	+72	-2.2
ts16ld40L1	0.16	0.044	-8.8	-5.8	+0.78	+1.2	+72	-2.2
ts16ld50L1	0.16	0.045	-6.1	-3.0	+0.83	+1.3	+72	-2.2
ts16ld100L1	0.16	0.046	-11	-7.8	+0.79	+1.2	+72	-2.3
ts16ld200L1	0.16	0.053	-7.5	-4.5	+0.81	+1.3	+72	-2.2

また、式(6)の換算接着層厚はCFRPと接着剤のせん断剛性比 G_e/G_{13} によって決定される値である。付録に本研究で扱った表-1とは異なる G_e/G_{13} の値を用いて、鋼板厚9mm、断面欠損半長さ40mm、片側減肉量1.5mmに対して1層のCFRPで補修を行ったケース(ts09ld40L1)で、 G_e/G_{13} が、修正理論解析の精度に与える影響を検証した。その結果、CFRP板と接着剤のせん断剛性比が変化しても、式(6)の換算接着層厚が有効に機能していることが明らかとなった。

(2) 収束長さ誤差

図-9より、既存の理論解析では、断面欠損の長さや鋼板の厚さによらず、接着端付近での鋼板からCFRPへの応力の伝わり方がFEM解析に比べ早い、つまり鋼板応力の減少が短い区間で生じていることがわかる。

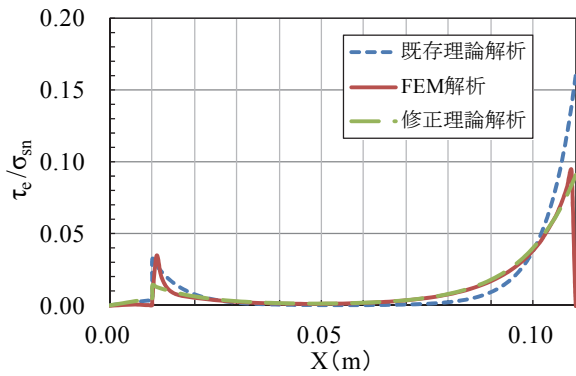
ここで、完全合成断面を仮定した場合の鋼板応力に収束するまでの接着端からの長さに着目すると、修正理論解析は既存理論解析より大きくFEM解析に近づいたことがわかる。本論文では、この鋼板応力が完全合成断面を仮定した場合の値に至るまでの長さを収束長さと呼ぶ。表-3に理論解析の収束長さのFEM解析値からの誤差を示す。ここで負の値は、理論解析がFEM解析より収束長さが短いことを示している。収束長さの誤差は、FEM解析を基準にとると、断面欠損の短いモデルts09ld10L1では既存解析で13%であるのに対し、修正解析では1.6%、

断面欠損の長いモデルts12ld200L1では既存解析で13%に対し、修正解析で4.7%となる改善がみられた。他のモデルにおいても同様の改善がみられた。

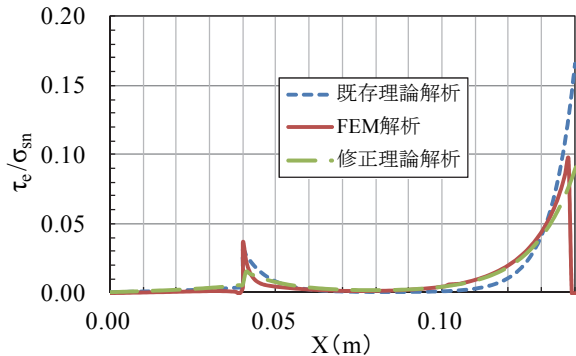
表-3に示すどのケースも、文献4)で示されたCFRP板の必要定着長は45.5mmであるが、同じ計算方法で換算接着層厚 h' を用いると、必要定着長は79.9mmとなり、大きな差が生じる。本研究では、これより十分長い100mmを定着長としたため、CFRPのせん断変形が補修効果に与える影響は小さい。実際の補修事例²⁾でも十分に定着長を確保している場合が多いが、そのような場合においてはCFRPのせん断変形が必要定着長に与える影響は少ないと考えられる。

(3) 断面欠損部の鋼板応力の誤差

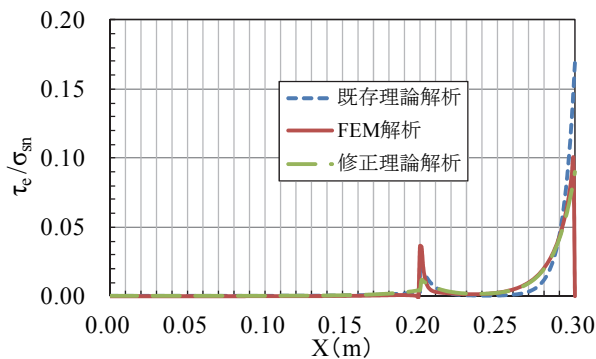
一方で、断面欠損部での鋼板最大応力に着目すると、修正理論解析による断面欠損部の鋼板応力はFEM解析の値より大きな値を示す結果となった。ただし、その誤差は一番大きいものでも3.0%であり、大きな誤差ではないが、既存理論解析の応力誤差は1.4%であったので、断面欠損部の鋼板応力については、既存理論解析よりも誤差が少し大きくなった。修正理論解析によるこの断面欠損部の鋼板応力の誤差は、3%程度応力を安全側に見積もることになることを意味しており、設計上は大きな問題ではないと判断できる。



(a) 鋼板厚6mmで断面欠損半長さ10mm (ts09ld10L1)



(b) 鋼板厚12mmで断面欠損半長さ40mm (ts12ld40L1)

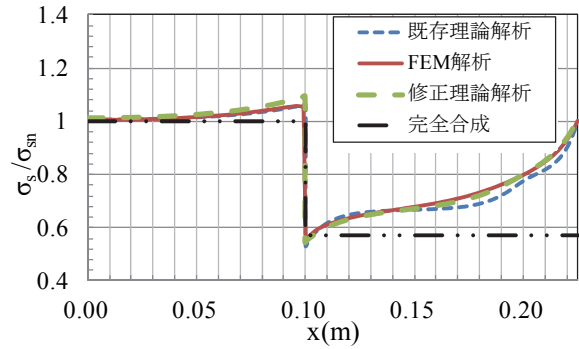


(c) 鋼板厚16mmで断面欠損半長さ200mm (ts16ld200L1)

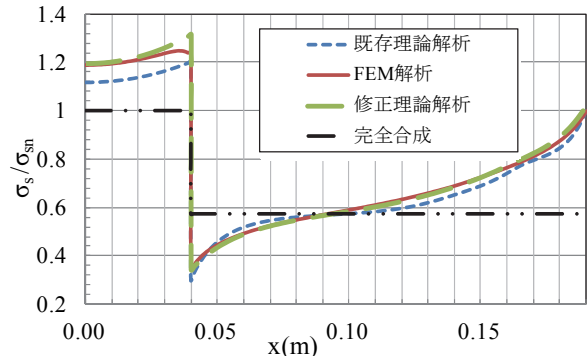
図-10 接着剤せん断応力分布の解析間の比較

(4) 一般部における接着剤のせん断応力の誤差

修正理論解析では、鋼板の応力だけでなく、接着剤のせん断応力分布についても FEM 解析と概ね一致する改善がみられた。図-10は、3つの解析ケースにおける接着剤のせん断応力の分布を、FEM 解析、既存理論解析、修正理論解析で比較している。特に、接着端に生じる最大せん断応力は、既存理論解析結果は FEM 解析結果と非常に近くなっている。表-3に示すように、最大せん断応力の FEM 解析値からの誤差は、既存理論解析で約+72%であったものが、修正理論解析では約-2%まで小さくなる改善がみられた。



(a) CFRP2層 (ts12ld100L2)



(b) CFRP3層 (ts12ld40L3)

図-11 複数層 CFRP 板を接着した場合の鋼板応力分布の解析間の比較

3.3 複数層の CFRP 接着補修への有効性

3.1では、CFRP 一層で接着補修した断面欠損鋼板において式(6)のように接着剤の層厚を換えることで、CFRP 板のせん断変形の影響を考慮できるような理論解析の修正を行った。ここでは、CFRP 板2層目の影響は、2層目の接着剤に含め、CFRP 板3層目の影響は、3層目の接着剤に考慮し、式(6)の換算接着層厚を使用した理論解析が CFRP 板を2層や3層接着した場合でも、CFRP のせん断変形を考慮した応力挙動を再現できるかどうか、各解析の比較をもとに検証する。

各解析の比較を図-11に示す。図-11に示すグラフは、鋼板12mm、断面欠損量6mm、断面欠損半長さ100mm、CFRP板2層(2mm×2)のモデル (ts12ld100L2) と鋼板12mm、断面欠損量9mm、断面欠損半長さ40mm、CFRP板3層(2mm×3)のモデル (ts12ld40L3) の鋼板応力分布であり、CFRP 板複数層接着した鋼板の理論解析は、文献7)の解析手法を使用した。定着長は、1層のモデルと同様100mmとし、NEXCO 設計要領³⁾にあるように各層の FRP 端部のずらし量を25mmとする。

図-11(a)より CFRP 板2層により接着補修した場合は、一般部の区間で、修正理論解析は FEM 解析と近い値を示すことから、CFRP のせん断変形を考慮した鋼板の応力挙動を表現できている。しかし、断面欠損部応力において、x=100mm で、FEM 解析からの誤差が既存理論解

析の場合-0.83%であったのに対し、修正理論解析では+3.0%と大きくなった。

図-11(b)より CFRP 板3層により接着補修した場合は接着端から合成断面の収束値に至るまでの区間（モデル ts12ld40L3 の場合、 $0.095\text{m} \leq x \leq 0.190\text{m}$ ）で、修正理論解析は FEM 解析と非常によく一致している。また、完全合成断面の収束値に至ってから断面欠損境界までの区間（モデル ts12ld40L3 の場合、 $0.040\text{m} \leq x \leq 0.095\text{m}$ ）で、既存理論解析は FEM 解析より大きな値を示しているが、修正理論解析ではこの区間においても、FEM 解析と近い値を示している。完全合成断面の収束値に至る長さにおいても、理論解析の修正を行うことで-3.5%から-2.5%になる改善がみられた。断面欠損部の鋼板応力においてもその最大誤差は、鋼板応力が最大となる $x=40\text{mm}$ で生じ、既存理論解析では FEM 解析結果を下回る-6.2%であったが、修正理論解析では+5.9%となっており、誤差の絶対値はほぼ同じであった。

以上から、既存の理論解析に比べ、修正理論解析は定着部全体で CFRP のせん断変形による軸力の伝達遅れがある鋼板の応力挙動を精度よく再現できていることがわかる。検証した解析ケースは限定的であるが、2層または3層の CFRP 接着補修を行う場合でも、式(6)の換算接着層厚を使用し理論解析を行うことは有効であることを示した。

4. 結論

本研究では、断面欠損を有する鋼板に対する CFRP 接着補修を対象とし、CFRP 板接着補修鋼板の一軸引張荷重下における応力分布を求める理論解析において、接着剤の厚さを実際の厚さより増すことにより、CFRP 板のせん断変形の影響を考慮できる理論解析方法を提案した。本研究で得られた結論を以下に示す。

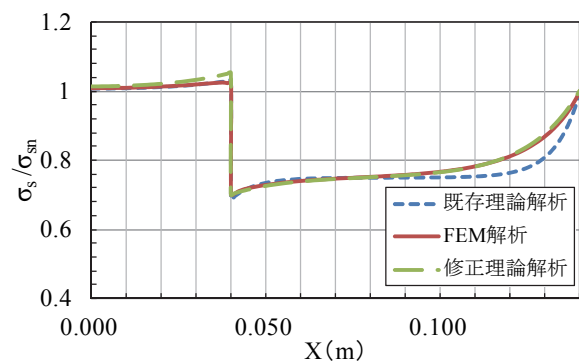
- 1) 引張荷重下にある CFRP 板補修鋼板において、CFRP 板にせん断変形が生じると、鋼板から CFRP への荷重伝達が遅くなる。
- 2) 1層の CFRP 接着補修鋼板の引張荷重下における鋼板の応力分布は、既存の理論解析において、接着層厚を式(6)で計算される CFRP のせん断変形を考慮するための換算接着層厚に置き換えることにより、精度よく予測できる。
- 3) 換算接着層厚を用いた修正理論解析を行うことにより、一般部における鋼板応力分布、および完全合成断面を仮定した場合の応力に達する長さは、既存理論解析より大幅に改善され、FEM 解析結果に近くなる。ただし、修正理論解析では、断面欠損部の鋼板最大応力が FRP 解析結果より約3%大きくなった。
- 4) 一般部接着端に生じる接着剤の最大せん断応力は、換算接着層厚を用いた修正理論解析を行うことに

より、精度よく推定できる。

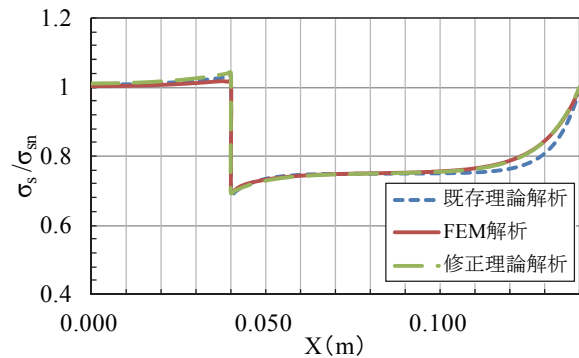
- 5) 1層で提案した換算接着層厚を用いた解析方法は、2層や3層の CFRP 接着補修鋼板の引張荷重下における CFRP 板のせん断変形に起因する軸方向力伝達遅れについても有効である可能性を示した。

付録

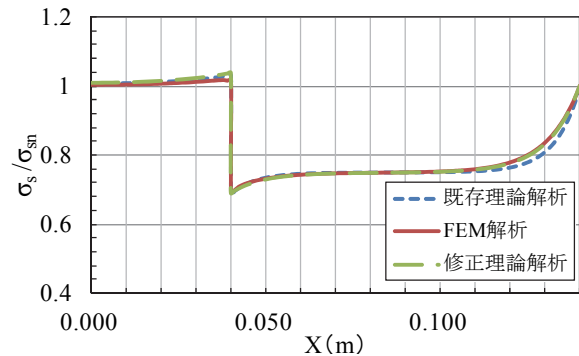
付図-1に鋼板厚9mmで断面欠損半長さ40mmのモデル (ts09ld40L1) の修正理論解析と FEM 解析の鋼板応力分布図を示す。付図-1(a)には $G_{13} = G_e$ 、付図-1(b)には $G_{13} = 3G_e$ 、付図-1(c)には $G_{13} = 5G_e$ の場合を示している。本文では、表-1に示した $G_{13} = 1.6G_e$ のみでの検討



(a) $G_{13} = G_e$



(b) $G_{13} = 3G_e$



(c) $G_{13} = 5G_e$

付図-1 CFRP 板のせん断弾性率を変化させた場合の鋼板応力分布の解析間の比較 (ts09ld40L1)

結果を示しているが、これらの結果より、CFRP 板と接着剤のせん断弾性率比が変化しても、換算接着層厚を用いた修正理論解析は、鋼板の応力分布を正確に表現できることが明らかとなった。また、 G_{13} の値が大きくなると、CFRP 板のせん断変形が小さくなるため、一般部において、既存理論解析と FEM 解析の鋼板応力の差が小さくなっていくことがわかる。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：橋梁の架替に関する調査結果 (IV)，国総研資料，第 444 号，2008.
- 2) 土木学会：FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端，複合構造レポート 05，2012.
- 3) 東・中・西日本高速道路(株)：設計要領第二集【橋梁保全編】，2013.
- 4) 石川敏之，北根安雄：断面欠損を有する接着補修に必要な CFRP 板の長さおよび板厚の決定方法，応用力学論文集，Vol.13，pp.911-920，2010.
- 5) Robert M.Jones：Mechanics of composite materials Second Edition，2012.
- 6) Dassault Systèmes：Abaqus 6.12 Japanese Documentation，2012.
- 7) 宮下剛，長井正嗣：一軸引張を受ける多層の CFRP が積層された鋼板の応力解析，土木学会論文集，Vol.66，pp.378-392，2010.

(2014 年 9 月 24 日受付)

(2015 年 2 月 1 日受理)