

腐食部を避けた鋼I桁ウェブ高力ボルト摩擦接合 当て板の補強効果に関する数値的検討

NUMERICAL STUDY ON REINFORCEMENT EFFECTS OF PATCH PLATE WITH FRICTION-TYPE HIGH-STRENGTH BOLTED CONNECTION ON THE WEB OF A STEEL I-GIRDER AVOIDING CORRODED AREAS

○戒能 由佳 *¹ 齊木 功 *² 白戸 真大 *³

Yuka KAINO*¹ Isao SAIKI*² Masahiro SHIRATO*³

ABSTRACT In steel plate patch reinforcement used to repair damaged steel members, the design generally assumes that the base material and the patch plate act together to resist loads. However, cases have been reported in which the load-sharing ratio of the patch plate is smaller than its cross-sectional area ratio. In this study, finite element analysis was performed to simulate loading tests and to examine the effects of web patch reinforcement in sound areas on load sharing and the strain distribution around the patch plate. The results indicate that, when the required number of bolts is provided, the patch plate can carry approximately 80% of the axial force corresponding to its cross-sectional area ratio.

Keywords: 当て板, 高力ボルト摩擦接合, 有限要素解析, 接触解析, 腐食

patch plate, friction-type high-strength bolt, finite element analysis, contact analysis, corrosion

1. はじめに

損傷した鋼部材の補修として用いられる鋼板当て板補強では、母材と当て板が一体となって抵抗すると仮定した設計が一般的である。当て板補修部の荷重伝達は継手の荷重伝達メカニズムと異なり、補修対象である母材腐食部においても荷重を分担するため、当て板と母材の荷重分担において、

*¹ 準会員 (学生)

東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻
(〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

*² 第2種正会員

博士(工学) 九州工業大学大学院工学研究院
建設社会工学研究系

(〒 804-0011 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

*³ 非会員

博士(工学) 国土技術政策総合研究所
(〒 305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

当て板の荷重分担率が断面積率よりも小さくなる
ことが報告されている。一軸引張の当て板補修を
対象に解析や実験を行い、当て板諸元やボルト本
数などによる荷重伝達のメカニズムやすべり挙動
の違いについて検討[1][2][3][4][5]が行われている。
また、当て板と断面欠損部を有する母材の伸びが
等しくなる条件や、骨組要素解析を用いて断面欠
損部の母材の平均応力の推定式が提案されている。
[6][7][8]

しかし、従来の研究において、曲げを受ける鋼
桁当て板補強における一体的な挙動が成立する条
件や終局挙動についての知見が少ない。また、腐
食部を避けたウェブ健全部当て板補強の補強効果
について検討した研究はほとんど見られない。

腐食が激しく素地調整した鋼材表面に不陸が残
る場合、当て板が密着せずに必要な摩擦力が得ら
れないことが想定される。こうした場合、不陸のな

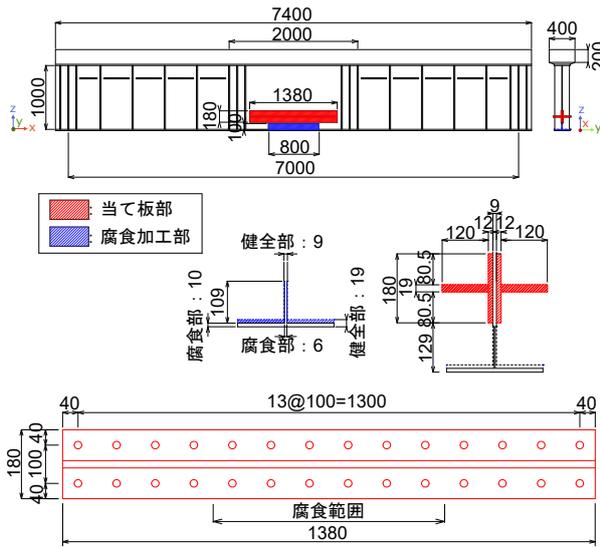


図1 荷重試験試験体寸法 (単位: mm)

い部分まで当て板を大きくすることや、実験データなどにより必要な摩擦力が得られることを十分に検討することが求められる。このとき、従来のように腐食部を覆う形で当て板をするのではなく、腐食を避けて健全部に当て板をすることで耐荷力を保持できることを確認できれば、より合理的な設計が可能になると考えた。

そこで本研究では、鋼桁中央部断面の下フランジとウェブの一部に減肉を模擬し健全部に当て板補強を行った試験体の荷重実験の再現を有限要素解析により行い、ウェブ健全部当て板補強が荷重分担や当て板周辺のひずみ分布に及ぼす影響を検討した。

2. 解析対象および解析手法

2.1 解析対象

国土技術政策総合研究所で行われた鋼I桁曲げ荷重試験[9]に用いた試験体を解析対象とした。対象とする試験体寸法を図1に示す。鋼桁材料はSM400材とした。また、試験体は鉄筋コンクリート床版を有し、鋼桁と床版は橋軸方向に200mm間隔39列、橋軸直角方向に85mm間隔3列で合計117本のスタッドで一体化している。試験体は下フランジが最初に降伏し、ウェブは座屈せず、最終的には床版コンクリートが圧壊するように設計した。

腐食により局部的に板厚が減少した状態を模擬するため、試験体中央部断面において、下フランジを深さ9mm、ウェブを深さ3mmで、それぞれ800mmにわたり切削するとともに、削り出した部分を避けて新たなフランジとなる当て板を高力ボ

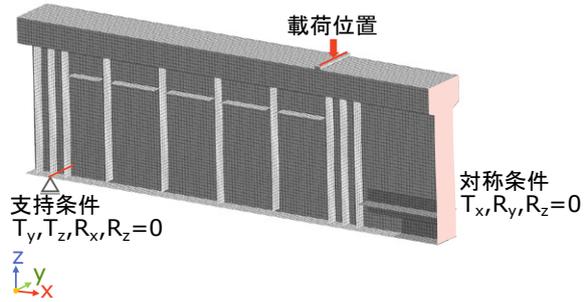


図2 試験体3次元有限要素モデル

ルト摩擦接合した。当て板の材質は母材と同じである。高力ボルトは、トルシア形S10TM22を用いており、設計ボルト軸力の標準値は205kNである。ボルト本数は、片側14本の計28本が用いられている。ボルトピッチは、道路橋示方書[10]で定められている、最小中心間隔、最大中心間隔を満たすように100mmとした。鉛直荷重が作用したときに平面保持を仮定して計算される下フランジが降伏する荷重が、腐食のない健全な桁と同等以上になるように当て板の諸元を決定した。このとき、当て板が分担できる軸力を大きくするため、当て板にフランジを設けてT形にすることで断面積を大きくした。

2.2 有限要素モデル

本研究では、荷重試験の試験体に対応した「試験体モデル」と、当て板の設計軸力を伝達できる必要ボルト本数を配置した「提案モデル」を用い、それぞれについて摩擦接合および完全合成の場合を考え、計4つのケースについて解析を行った。また、当て板の補強効果を確認するため、「健全モデル」と腐食を模擬した減肉を施し当て板がない「当て板なしモデル」についても解析を行った。表1に解析ケースを示す。

表1 解析ケース

ケース	モデル	当て板境界条件
1	試験体モデル	摩擦接合
2	試験体モデル	完全合成
3	提案モデル	摩擦接合
4	提案モデル	完全合成
5	健全モデル	—
6	当て板なしモデル	—

表 2 材料特性値

部材名	Young 率 (GPa)	Poisson 比	降伏応力 (N/mm ²)	モデルタイプ
鋼桁, 当て板	212	0.30	262	von Mises
ボルト	212	0.30	—	弾性
床版	35	0.20	52	von Mises
載荷版	35	0.20	—	弾性

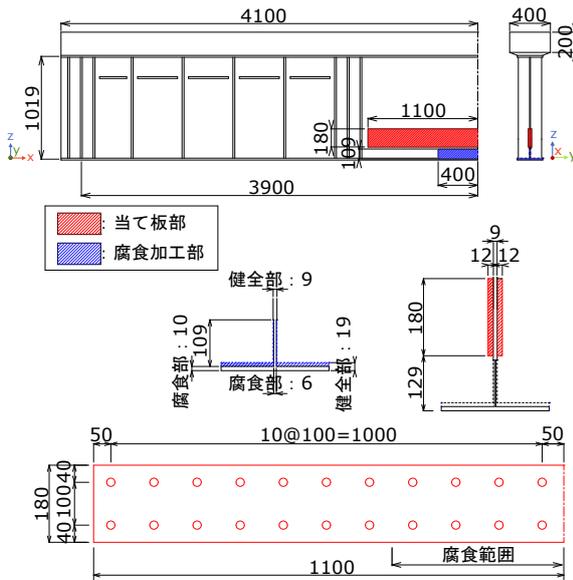


図 3 提案モデル寸法 (単位 : mm)

試験体の 3次元有限要素モデルを図 2 に示す。橋軸方向を x 方向、橋軸直角方向を y 方向、鉛直方向を z 方向とした。有限要素モデルは、対称性を考慮して 1/2 モデルとし、対称条件として支間中央部断面で橋軸方向変位および橋軸直角軸、鉛直軸周りの回転を拘束した。支点は線支持とし、ローラー支持条件として支点補剛材位置の下フランジで橋軸直角方向、鉛直方向の変位および、橋軸、鉛直軸周りの回転を拘束した。集中荷重による局部的な変形を避けるため、載荷位置には載荷版として弾性体のソリッド要素を設け、強制変位を与えて 4 点曲げ載荷を再現した。

鋼桁、当て板は平面シェル要素、床版、載荷版はソリッド要素、ボルトは骨組要素でモデル化している。試験体で鋼桁と床版がスタッドで一体となっていたことから、有限要素モデルでは鋼桁、床版、載荷版の節点を共有し一体とした。ボルトピッチは試験体と同様に 100mm である。

さらに、材料非線形性及びペナルティ法による接触を考慮した。試験体の当て板接合面はディスクサンダーにて 2 種ケレンの下地処理が行われたことから、摩擦係数は 0.25 とし、ボルト軸力は M22 高力ボルト設計軸力の 205kN を初期軸力として与えた。この初期軸力が当て板の節点に集中荷重として作用することで、当て板とウェブの間に支圧力が作用し、母材と当て板の摩擦による荷重伝達を可能とした。解析ステップは、ボルト軸力を導入するステップと載荷位置に強制変位を与えるステップの 2 ステップで構成した。

完全合成のモデルでは、当て板の全節点と対応するウェブの節点を共有させた。

提案モデルは、当て板端部と腐食部端部の間を延長して腐食部の外側で後述する必要ボルト本数 12 本を満たすモデルとした。提案モデルの寸法を図 3 に示す。ボルト本数は、必要ボルト本数から余裕を持たせ腐食部の外側で片側 14 本、腐食部も含めると片側 22 本とし、計 44 本を用いている。なお、提案モデルでは、設計通りに荷重伝達できるボルトを配置した場合の補強桁の挙動を把握することを目的としたため、垂直補剛材などの実構造における制約を考慮していない。また、当て板のフランジを省略することで必要ボルト本数を減らした。

鋼桁、当て板、ボルトは鋼材で、床版、載荷版はコンクリートとした。載荷試験における材料試験結果を参照し、鋼材は Young 率 $E = 212$ GPa, Poisson 比 0.3 とし、コンクリートは Young 率 $E = 35$ GPa, Poisson 比 0.2 とした。鋼桁、当て板、床版は弾塑性体として、von-Mises の降伏基準と線形等方硬化則に従い、弾塑性接線が Young 率の 1/100 になるように硬化係数を設定した。材料試験結果より初期降伏応力は、鋼材が 262N/mm², コンクリートが 52N/mm² とした。表 2 に各部材の材料特性値を示す。

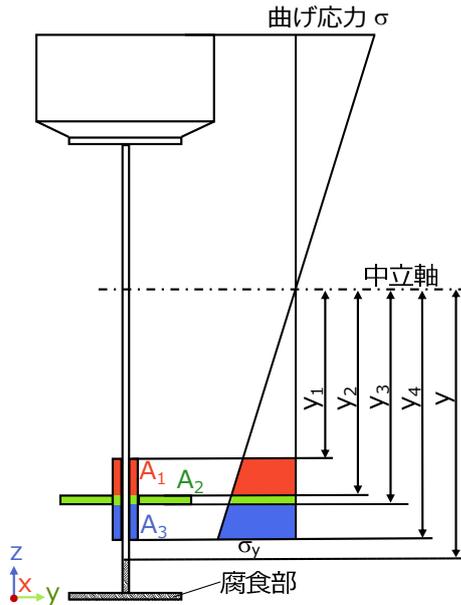


図4 支間中央断面の応力分布（試験体モデル）

2.3 必要ボルト本数

当て板への荷重伝達に必要なボルトの本数を必要ボルト本数とする。当て板が新たなフランジとなる場合を考えて、腐食部分が応力を分担しないものと仮定する。断面平面保持の仮定のもと、ウェブ健全部下端が降伏するときの当て板に発生する軸力から必要ボルト本数を試算する。当て板に発生する軸力 P は、図4に示す応力分布の当て板部分を積分して求める。

$$P = \left(\frac{\sigma_y}{y} y_1 + \frac{\sigma_y}{y} y_2 \right) \frac{A_1}{2} + \left(\frac{\sigma_y}{y} y_2 + \frac{\sigma_y}{y} y_3 \right) \frac{A_2}{2} + \left(\frac{\sigma_y}{y} y_3 + \frac{\sigma_y}{y} y_4 \right) \frac{A_3}{2} \quad (1)$$

ここに、 σ_y はウェブ健全部下端の初期降伏応力、 y はウェブ健全部下端から中立軸までの距離、 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 はそれぞれ当て板上端、当て板フランジ上面、当て板フランジ下面、当て板下端から中立軸までの距離、 A_1 、 A_2 、 A_3 はそれぞれ当て板上部、当て板フランジ、当て板下部の断面積である。

また、道路橋示方書[10]では高力ボルト摩擦接合に対する照査に関して、すべり係数 μ 、ボルト軸力 N により、すべり強度 V を

$$V = \mu \times N \times \text{低減係数} \quad (2)$$

と求めている。ここに、1ボルト線上に並ぶボルト

本数を考慮して、低減係数を試験体モデルで1.0、提案モデルで0.94とした。

すべり耐力 V_{sd} は、すべり強度 V および摩擦面数 m により

$$V_{sd} = \xi \times \Phi \times V \times m \quad (3)$$

と求められる。ここに、 ξ は調査・解析係数、 Φ は抵抗係数である。

したがって、必要ボルト本数は、

$$n = \frac{P}{V_{sd}} \quad (4)$$

と試算できる。

これらを踏まえると、鋼材の強度の特性値が 235 N/mm^2 、ボルト軸力が 205 kN より、必要ボルト本数は、試験体モデルで23本、提案モデルで12本となる。なお、荷重試験の試験体では寸法の制約からボルト本数は片側14本であり、必要ボルト本数を満たしていない。

3. 解析結果

3.1 解析モデルの妥当性

解析により得られた荷重ひずみ関係を図5、荷重変位関係を図6に示す。ここで、荷重は2点載荷荷重の和とし、ひずみは支間中央における床版上面の軸方向ひずみ、変位は支間中央における鉛直変位とした。

試験体モデルにおいて、平面保持の仮定のもとで下フランジ下面が降伏するときの荷重を P_y とする。 P_y は、

$$P_y = \frac{2M_y}{\ell} = \frac{2\sigma_y I}{\ell y} \quad (5)$$

と求められる。ここに、下フランジ下面が降伏するときの曲げモーメントを M_y 、支点から載荷点までの距離を ℓ 、鋼材強度の特性値を σ_y 、断面二次モーメントを I 、中立軸から下フランジ下面までの距離を y とした。試験体モデルの降伏荷重は $P_y = 2008 \text{ kN}$ となる。また、提案モデルの降伏荷重を同様に計算すると 1533 kN と求められる。

コンクリートの圧壊はモデル化していないので、圧壊に相当するひずみ 3500μ に達した点を耐荷力として比較する。図6より、健全モデルでは $1.30P_y$ 、当て板なしモデルでは $1.03P_y$ 、試験体モデルでは $1.30P_y$ で圧壊に相当するひずみに達した。このことから、当て板なしモデルは、健全モデルに比べて耐荷力が低下しているものの、試験体モデルで

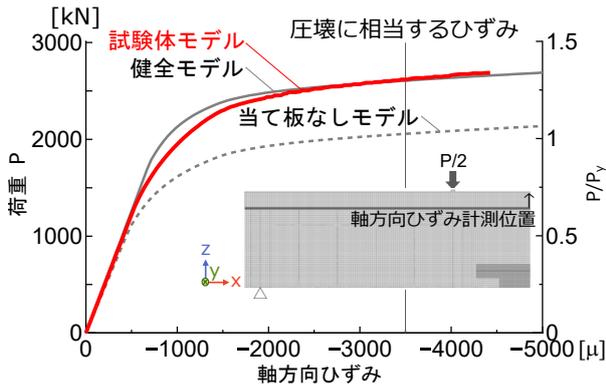


図5 荷重ひずみ関係

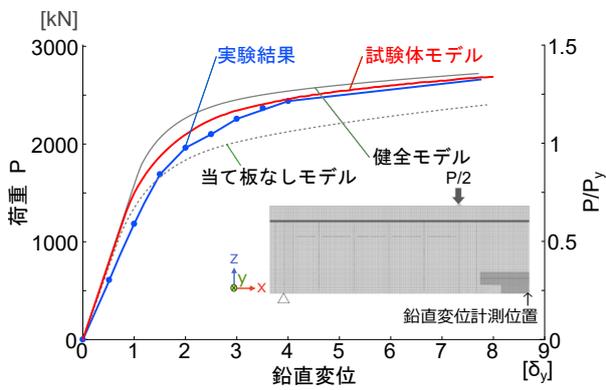


図6 荷重変位関係

は当て板補強によって耐荷力が健全モデルと同等になることが確認できる。

ここで、荷重試験で下フランジが降伏したときの支間中央の鉛直変位 9.43mm を $1.0\delta_y$ とする。実験結果と試験体モデルの解析結果を比較する上で、誤差ノルムを標準化した値 R を

$$R = \sqrt{\frac{(x_e - x_b)^2}{x_e^2}} \quad (6)$$

と定義する。ここに、実験の各荷重ステップにおける結果を x_e 、試験体モデルの結果を x_b とする。図6において、 $0.5k\delta_y$ ($k = 0, 1, \dots, 8$) に対する荷重を x とし R を評価すると、 $R = 8.7\%$ となった。

荷重試験の結果と解析結果の損傷過程を比較する。荷重試験では $0.59P_y$ において、下フランジが降伏し、 $1.35P_y$ において床版上面が圧壊した。一方で、試験体モデルでは、 $0.70P_y$ において下フランジが降伏し、 $1.30P_y$ において床版上面が圧壊した。ここで、鋼材の降伏は設計における降伏強度

に対応する 1175μ 、コンクリートの圧壊は 3500μ とした。

解析結果が実験結果をある程度再現できていることから、本解析モデルにより当て板の補強効果に関する検討ができるものと判断した。

3.2 せん断ひずみ分布

弾性範囲において、せん断ひずみ分布を確認する。実際は平面保持しないことや当て板の荷重分担率が小さいことにより、図6において降伏荷重 P_y 時には非線形性が現れるため、降伏荷重の $1/2$ の荷重の時の結果を比較する。

降伏荷重の $1/2$ の荷重の時の試験体モデル、提案モデルにおける摩擦接合、完全合成の xy せん断ひずみのウェブにおける分布を図7、図8に示す。図7(a)より、荷重点から支間中央の間は等曲げ区間であるにも関わらず、当て板や腐食により断面が変化する部分で xy せん断ひずみが生じたことが確認できる。これは、当て板や腐食により断面が変化するとき、力の連続を満たすために軸方向の膜力の不足分が鉛直方向から伝達されるからだと考える。

図7(b)より、当て板端部と腐食部端部の間を延長することで、短い区間での断面変化がなくなり、試験体モデルに比べて提案モデルの xy せん断ひずみが低減したことが分かる。

また、完全合成の場合は当て板とウェブが完全に一体となっているため、摩擦接合と比較して断面変化の影響が大きく、図7よりも図8の方が大きなせん断ひずみが生じることが確認できる。

3.3 高さ方向ひずみ分布

次に、試験体モデル、提案モデルの支間中央における、降伏荷重の $1/2$ の時の x 方向ひずみの高さ方向分布を図9に示す。摩擦接合のウェブと当て板の x 方向ひずみを比較すると、試験体モデルでは相対差が -34.8% 程度、提案モデルでは相対差が -8.4% 程度となった。摩擦接合では、完全合成と異なりウェブと当て板が一体となっていないため、当て板のひずみはウェブより小さくなることを確認した。また、図9(a)より、試験体モデルの x 方向ひずみの高さ方向分布は摩擦接合、完全合成の両方で線形からの乖離が見られ、断面変形が生じていることが分かる。これは前節で述べたせん断ひずみの影響であると考えられる。

ここで、断面変形の度合いを定量化するために、ひずみ分布を回帰した直線との残差ノルムを標準

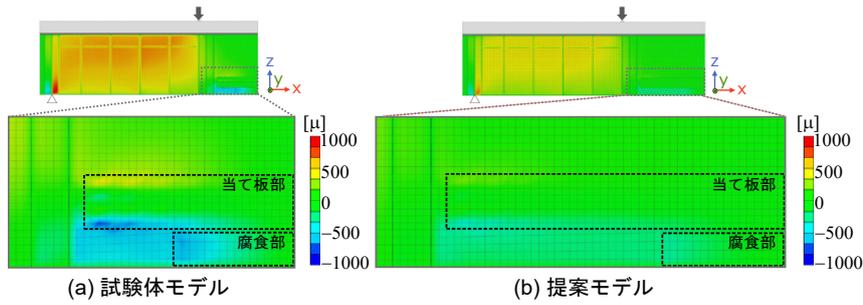


図7 ウェブせん断ひずみ分布：摩擦接合

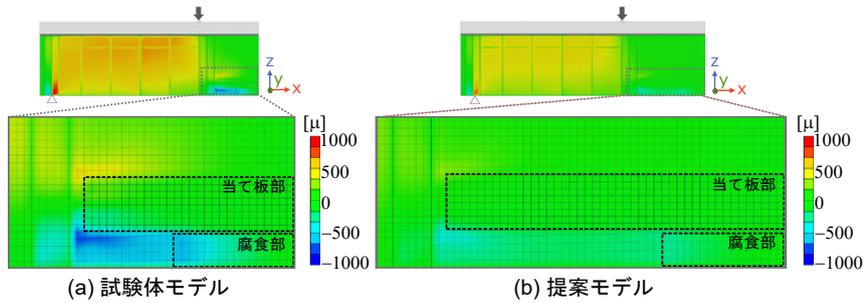


図8 ウェブせん断ひずみ分布：完全合成

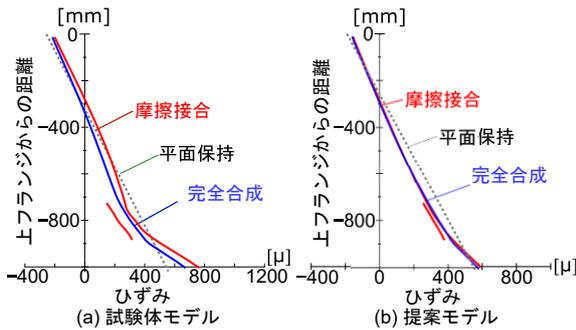


図9 高さ方向ひずみ分布

化した値として,

$$E = \frac{\sqrt{(\varepsilon - \varepsilon')^2}}{|\varepsilon|} \quad (7)$$

を定義する. ここに, 有限要素解析で得られる x 方向ひずみを ε , ウェブの x 方向ひずみ ε の高さ方向分布を回帰した直線から得られるひずみを ε' とした. $(\varepsilon - \varepsilon')^2$ と $|\varepsilon|$ の高さ方向の平均を用いて E を求める. 平面保持が完全に成立するとき $E = 0$ となり, E の大きさは断面変形の大きさを表す.

試験体モデル, 提案モデルの完全合成, 摩擦接合の場合の E を表3に示す. 表3より, 試験体モデルと提案モデルを比較すると, 摩擦接合では23.1%

表3 断面変形の大きさ E

	試験体モデル	提案モデル
完全合成	24.4%	14.3%
摩擦接合	23.1%	11.5%

から11.5%, 完全合成では24.4%から14.3%となり, 試験体モデルに比べて, 提案モデルにおける平面保持とのずれ E の方が小さくなる傾向が確認できた. このことから, 提案モデルでは断面変化部に生じるせん断ひずみが低減したことにより平面保持に近づいたと考えられる.

また, 完全合成と摩擦接合を比較すると, 試験体モデルでは完全合成で24.4%に対し摩擦接合が23.1%, 提案モデルでは完全合成で14.3%に対し摩擦接合が11.5%となり, 摩擦接合より完全合成の E の方が大きくなる傾向となった. 完全合成の場合は, 摩擦接合と異なり当て板とウェブが完全に一体となっており, 前節で述べたように xy せん断ひずみが大きいためだと考えられる.

3.4 当て板の軸力分担

先行研究[11]を参考にして, 当て板に発生する軸力と平面保持の仮定のもとで求めた当て板の設計軸力との比を軸力比とする. 降伏荷重の1/2の

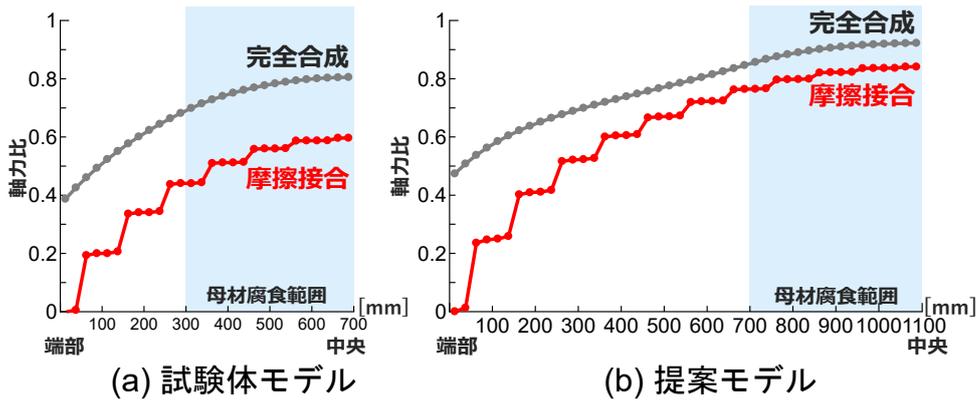


図 10 当て板の軸力分担

荷重の時の試験体モデル、提案モデルの当て板端部から支間中央部の軸力比の分布を図 10 に示す。摩擦接合の軸力比に着目すると、当て板端部から支間中央部にかけて軸力比が増加していることから、高力ボルト摩擦接合により軸力が徐々に当て板に伝達されることが分かる。

完全合成の軸力比に着目すると、設計時の仮定と同様に母材と当て板が完全に一体となっても当て板に生じる軸力は設計より小さくなった。これは、設計軸力は平面保持を仮定して求めているのに対し、解析モデルでは断面変形が生じたためだと考える。また、提案モデルでは平面保持に近づいたことにより、試験体モデルに比べて軸力比が大きくなった。

次に、腐食部端部における摩擦接合によって伝達される軸力の完全合成に対する割合に着目する。図 10 より、腐食部端部における軸力比は、試験体モデルにおいて完全合成で 0.70、摩擦接合で 0.44 と完全合成の 63% となった。提案モデルにおいて完全合成で 0.86、摩擦接合で 0.76 と完全合成の 88% となった。このことから、必要ボルト本数を満たすことで、摩擦接合が伝達可能な軸力の完全合成に対する割合が大きくなることが分かった。

3.5 当て板の軸力の推測

設計時にボルトの本数から当て板に生じる軸力を推測することができれば、より合理的な設計ができると思う。各ボルト位置におけるボルト本数の必要ボルト本数に対する比とボルト間の軸力比の平均値の関係を図 11 に示す。両対数グラフで直線近似を行い、べき乗関数で近似を行うと

$$r = \left(\frac{n'}{n}\right)^{0.512} \times 0.737 \quad (8)$$

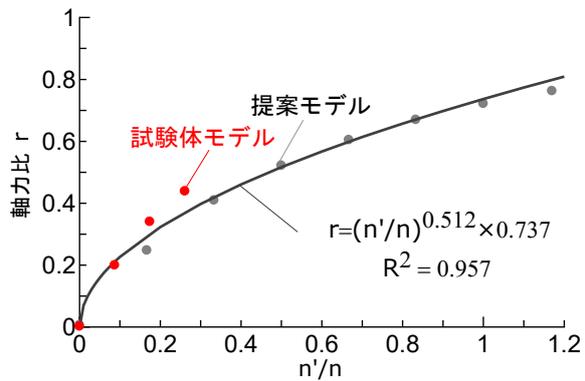


図 11 軸力比とボルト本数の関係

となった。ここで、 r は軸力比の平均値、 n' は配置したボルト本数、 n は必要ボルト本数である。相関係数は $R^2 = 0.957$ となった。なおこの近似式は本研究で対象とした限られたモデルの結果であり、一般化するためにはさらなる検討が必要である。

4. おわりに

本研究では、鋼桁中央部断面の下フランジとウェブの一部に減肉を模擬し健全部に当て板補強を行った試験体を対象に、非線形有限要素解析を行い、ウェブ健全部当て板補強が、荷重分担や当て板周辺のひずみ分布に及ぼす影響を検討した。またその際、有限要素解析と載荷実験の荷重変位関係や終局状態に至る過程を比較することで、有限要素モデルの妥当性を確認した。

ウェブ健全部に当て板補強を行うことで、断面変化部で力の連続を満たすためにせん断ひずみが生じ、桁が断面変形する。当て板端部と腐食部端部を離すことでせん断ひずみは低減し、完全合成した場合の支間中央における平面保持とのずれの

大きさ E は 24.4% から 14.3% と小さくなり、平面保持に近づくことを確認した。その結果、完全合成の腐食部端部での軸力比は 0.70 から 0.86 と大きくなった。

また、腐食部端部より外側で必要ボルト本数を満たすことにより、腐食部端部における摩擦接合が伝達可能な軸力の完全合成に対する割合は 63% から 88% と大きくなり、完全合成に近づいた。

本研究のケースで提案モデルの腐食部端部における軸力比は 0.76 となり、必要ボルト本数を満たしても軸力比が 1 とならない。しかし、ボルト本数の必要ボルト本数に対する比と当て板の軸力比について一定の関係性を明らかにすることができた。このように、軸力比とボルト本数の関係性を明らかにすることで、ボルト本数の必要ボルト本数に対する割合から当て板に生じる軸力を推定することで合理的な設計が可能になると考えられる。

参考文献

- [1] 永田和寿, 町田幸大, 小川麻美, 山口隆司: 引張を受ける高力ボルト鋼板当て板接合部の荷重伝達機構に関する解析的検討, 鋼構造論文集, 第 23 巻第 90 号, 2016.
- [2] 永田和寿, 小川和花, 小川麻美, 藤本高志, 山口隆司: 高力ボルト鋼板当て板補修部の荷重伝達機構に関する検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol64A, 2018.
- [3] 永田和寿, 藤本高志, 小川和花, 山口隆司: 高力ボルト摩擦接合を用いた腐食損傷に対する当て板補修部のすべり挙動に関する実験的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol65A, 2019.
- [4] 神野巧矢, 山口隆司, 小笠原照夫, 内田大介, 森山仁志, 網谷岳夫: 引張荷重作用下で施工された高力ボルト摩擦接合当て板の力学的挙動, 構造工学論文集, 土木学会, Vol66A, 2020.
- [5] 石川敏之, 清水優, 服部篤史, 河野広隆: 断面欠損した鋼板の当て板補修効果, 土木学会論文集, Vol69, No.2, 2013.
- [6] 石川敏之, 八重垣諒太: 当て板高力ボルト補修された断面欠損鋼板に生じる応力の推定, 構造工学論文集, Vol64A, 2018.
- [7] 石川敏之: 当て板補修された偏心欠損を有する鋼板の応力評価, 構造工学論文集, Vol67A, 2021.
- [8] 石川敏之, 八重垣諒太: 軸力を受ける高力ボルト添接補修された断面欠損鋼部材の分担軸力の

推定, 土木学会論文集, Vol77, No.1, 2021.

- [9] 白戸真大, 手間本康一, 清水集平: 道路構造物の補修・補強に関する基本工法の充実に向けた試験調査, 道路調査費等年度報告, 2023.
- [10] 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 丸善, 2017.
- [11] 神野巧矢, 山口隆司, 浅野貴弘, 伊川嘉昭, 小山雅己, 水内將司: 曲げを受ける鋼 I 桁下フランジの高力ボルト摩擦接合当て板補修・補強部の荷重伝達, 土木学会論文集, Vol. 79, No.3, 22-00119, 2023.