

図-3 隅角部の当て板補強³⁾

当て板による補修・補強では、鋼製の当て板を母材に付加する方法によって、高力ボルト接合による場合と溶接接合による場合の2つに分類することもできる。一般に鋼橋の補修・補強工事は交通供用下で実施されることが多く、施工箇所も狭隘な場所が多い。そのため、交通供用下（振動下）の施工も確実に可能であり、疲労耐久性に優れる高力ボルト接合によって、母材に当て板が付加される場合が多い。なお、高力ボルト接合によって当て板を付加する場合、一般には高力ボルト摩擦接合が用いられ、母材の削孔による影響が大きい場合や当て板部をコンパクトとしたい場合には、高力ボルト支圧接合が用いられる。

本稿は、鋼部材の典型的な損傷である腐食損傷を対象とし、主として高力ボルト接合による当て補修・補強についてその現状とあるべき姿・課題をまとめたものである。

1.2 当て板補修・補強の荷重伝達メカニズム

当て板による補修・補強における荷重伝達メカニズムの模式図を図-4に示す。

図に示すように母材からの作用力は、母材と当て板に分かれて伝達される。高力ボルト摩擦接合の場合、高力ボルトに導入された軸力とすべり係数から決まる摩擦力によって作用力の一部が当て板に伝達される。このように、作用力のすべてが当て板に伝達されるわけではなく、この点が継手構造の荷重伝達メカニズムと大きく異なる点である。

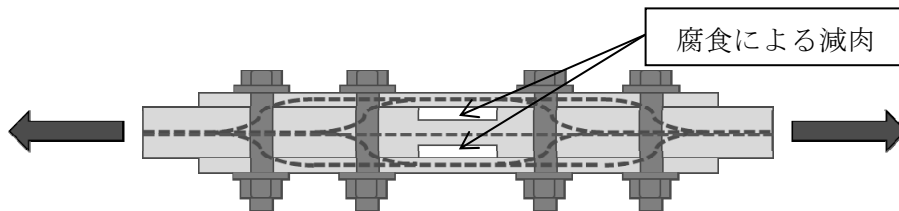
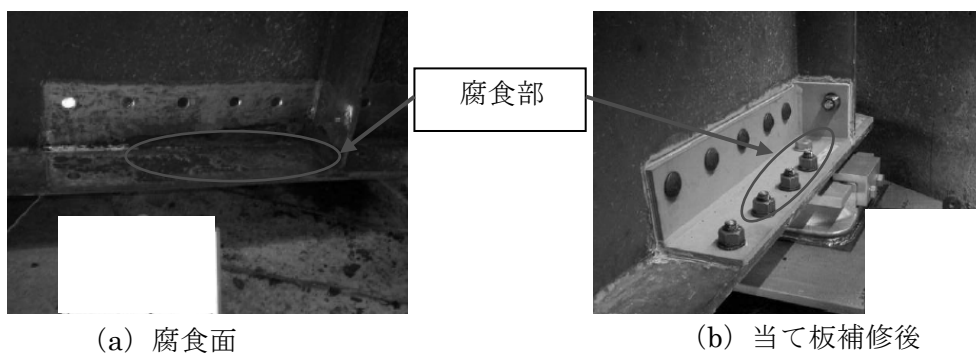


図-4 荷重伝達メカニズムの模式図



(a) 腐食面

(b) 当て板補修後

図-5 健全部・腐食部共に高力ボルトが配置された例

腐食損傷による当て板補修・補強では、腐食欠損部の断面性能の回復を目的とすることから、原則として、欠損厚以上の当て板が採用される。当て板のための高力ボルトの本数は、当て板が分担すべき作用力に対して高力ボルト摩擦接合部が許容すべり力に至らないように決定され、それらは健全部に配置される。なお、腐食部では、腐食の発生・進行を防止するため、当て板と母材の密着性を確保し、腐食部においても高力ボルトが配置されるのが一般的である。健全部・腐食部ともに高力ボルトが配置された当て板補修部の例を図-5 に示す。

高力ボルト接合によって当て板補修・補強された部位の主な限界状態としては、①健全部の純断面降伏、②母材腐食部の降伏、③高力ボルト接合部のすべり限界もしくは支圧限界、④高力ボルトのせん断降伏（破断）が考えられる。これらの限界状態を表-1 にまとめている。これらはいずれも設計作用力に対して超えてはならない限界状態であり、設計計算においてすべて考慮されるべきである。

表-1 高力ボルト接合によって当て板補修・補強された部位想定される限界状態

限界状態	内容	照査項目
①健全部の純断面降伏	当て板するために健全部において孔明けされることから、健全部の純断面において降伏する可能性がある。	純断面降伏強度
②母材腐食部の降伏	作用力は母材と当て板で分担されるため、母材の腐食部で降伏する可能性がある。	母材腐食部降伏強度 (断面積比) (荷重分担率)
③高力ボルト接合部のすべり限界／支圧限界	母材の変形・降伏によって主すべりもしくは部分すべり／支圧降伏が発生する可能性がある。	すべり強度／支圧強度 (すべり係数) (ボルト軸力)
④高力ボルトせん断降伏	締結材である高力ボルトがせん断降伏する可能性がある。	高力ボルトのせん断強度

既設構造物の補修・補強を考えた場合、注意を要するのは、③高力ボルト摩擦接合のすべり限界である。すべり限界は母材および当て板の接合面処理に大きく作用される。一般に現場での接合面処理は主に動力工具によって行われ、除錆度によって管理されている。そのため、品質のばらつきも大きく、新設構造物で要求される接合面処理となっていない場合も考えられ、設計で求められるすべり係数を確保できていない場合もある。

新設構造物で行われる無機ジンクを塗布した接合面と既設構造物で行われる場合が多い動力工具による接合面（2種ケレン相当）の例を図-6 に示す。

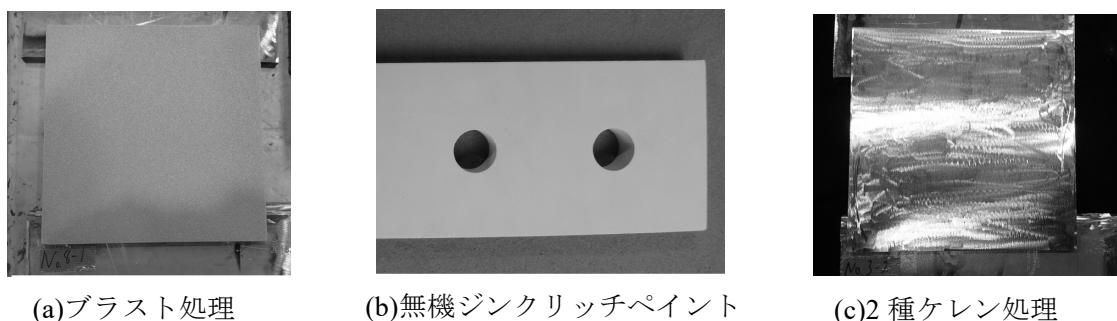


図-6 処理方法による接合面の違い

表面粗さが低下するとすべり係数が低下することはすでに知られており、そのため、表面粗さが不十分な場合、すべり係数は 0.4 を満足しない場合もある。すべり係数が低い場合、当て板への荷重伝達が乏しく、母材腐食部の分担荷重が大きくなり、母材純断面ではなく、腐食部が最初に降伏する。その結果、腐食部の変形が大きくなって当て板と母材との相対変位も大きくなり、すべり限界に至る。一方、すべり係数が高い場合、当て板への荷重伝達が十分に行われ、腐食部の荷重分担が小さく、母材の純断面が最初に降伏する。この母材純断面の降伏により、母材と当て板の相対変位は外側から大きくなる。

高力ボルト摩擦接合ではすべり後は支圧状態となり接合部耐力は増加すると予想されるが、高力ボルト摩擦接合により当て板を付加する当て板補修・補強の場合、母材もしくは腐食部の降伏が発生する可能性が高く、支圧による耐力の上昇を見込む場合は、十分な検討が必要である。

1.3 当て板補修工法の事例紹介

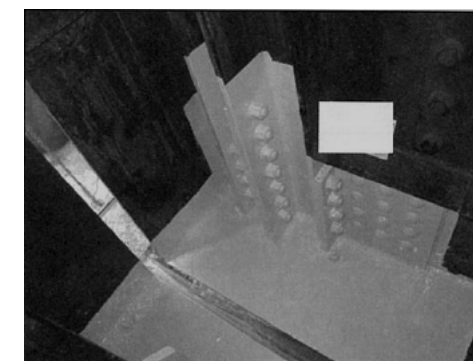
ここでは、腐食損傷を対象とした当て板による補修・補強の代表的な事例を紹介する。腐食損傷を対象とすることから、桁端部、部材添接部、リベットなどによる部材集成部、トラス構造の弦材格点部などが対象となる。

桁端部の腐食に対する当て板補修工法の例を図-7 に示す。図-7 (a) は鋼鉄桁橋の場合、(b) は鋼箱桁橋の事例である。

下フランジおよび腹板、支点上補剛材の腐食に対し、アングル材を使って補修・補強を行っている。特に、桁端部では、座屈防止の観点から断面剛性の確保にも重点が置かれることが多い。



(a)鋼鉄桁橋の補修事例



(b)鋼箱桁橋の補修事例

図-7 主桁端部の腐食補修事例¹⁾

側縦桁径間部の腐食に対する事例を図-8 に示す。床版からの漏水によって、側縦桁ウェブおよび下フランジに腐食による断面減少が生じており、耐力不足の懸念から、ウェブと下フランジに当て板補修が実施されている。当て板部材を曲げモーメントに抵抗させるため、ウェブの当て板とフランジ

の当て板とをレ型すみ肉溶接としている。補修対象箇所の溶接ビートを避けるために母材と当て板の間にフィラープレートを設置することもある。

いずれの事例も当て板厚は、減肉厚以上かつ道路橋示方書で規定される最低板厚以上となっている。必要ボルト本数については、道路橋示方書で規定されるボルト配置で決まっていることが多く、150mm ピッチで配置されている。

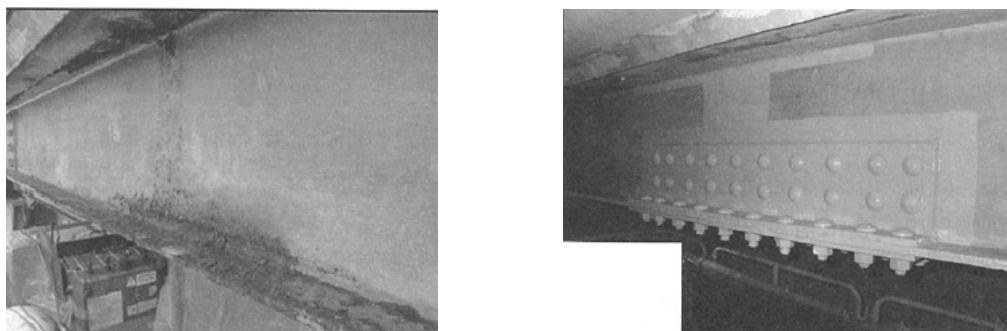


図-8 側縦桁の補修事例¹⁾

2. 設計

2.1 設計方針およびフロー

当て板による補修・補強設計では、断面欠損部の性能回復を目的として、当て板の形状および板厚、高力ボルト接合の場合、ボルト本数および配置、溶接接合の場合、隅肉溶接におけるのど厚を決定することになる。当て板補修・補強設計のフローを図-9に示す。

当て板の断面計算の考え方は、表-2に示すように大きく3通りに分類される。方法1は、死荷重供用下で既設部材に当て板することを想定する場合であり、死荷重は既設部材の残存断面で負担し、活荷重などの後荷重を当て板の断面で負担するとして断面計算を行う。方法2は設計計算上、既設部材の残存断面に荷重の負担を期待せず、当て板の断面ですべての荷重を負担すると仮定して断面計算を行う。方法3は当て板の断面計算は行わず、損傷部材の当初設計と同等の板厚と材質の当て板を設置する。

断面計算の方法は、腐食損傷箇所の調査結果、損傷部材が供用中に果たす機能、施工方法などから設計者が決定するケースが多い。これらの断面計算方法で決定される断面は、あくまで設計上必要な断面が決定されるに過ぎず、当て板を付加する手法によって断面の見直しが必要になる場合もある。例えば、後述するが、高力ボルト摩擦接合で当て板を付加する場合、設計上十分なボルトが配置されたとしても母材と当て板の断面積比と荷重分担率が必ずしも一致しない場合があると報告されており⁴⁾⁵⁾、これらにも配慮する必要がある。このように両者が必ずしも一致しないのは、全接合面ではなく、摩擦力の存在する領域において荷重伝達がなされること、構造詳細にもよるが、純断面の降伏で当て板部の限界状態が決まることが多いことなどに関係している。したがって、今後、合理的な補修・補強を行うためには、これらの定量的な検討を行った上で当て板断面の決定方法を確立する必要がある。

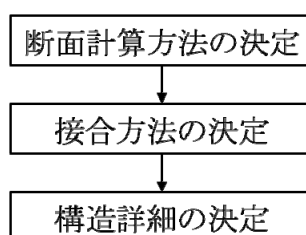


図-9 当て板補修・補強の設計フロー

表-2 当て板の断面計算方法

方法1	方法2	方法3
残存断面で死荷重を、当て板で活荷重の負担を期待して断面計算	残存断面に荷重の負担を期待せず、当て板で死荷重と活荷重を負担するとして断面計算	当て板の断面計算は行わず、損傷部材の当初設計と同等の板厚および材質の当て板を設置

2.2 当て板の接合方法

当て板の接合方法としては、溶接接合と高力ボルト接合に大別されるが、現場溶接における制約（作業空間および作業姿勢が限定されること、当て板と母材の密着が十分でない場合が想定されることなど）、品質管理上の問題点（工場溶接でないこと、部位によっては疲労亀裂の発生の可能性が高いこと、建設年代の古い鋼構造物では溶接性に劣る鋼材が使用されていることなど）から、高力ボルト接合によって当て板が付加される場合が一般的である。一方、溶接接合では高力ボルト接合と比較して気密性に優れ、継手効率が高く、継手構造が簡単になることなどの利点を有しており、水中構造物の腐食損傷では溶接接合が採用されるのが一般的である。

当て板による補修・補強は、既設部材に新たに設置した当て板へ荷重の伝達経路を変更することで腐食損傷箇所に作用する応力を低減させる。そのため、既設部材から当て板への荷重の伝達経路の変更を行うことになり、荷重伝達のための遷移区間を十分確保する必要がある。また、腐食損傷範囲においても材片の浮き上がりを防止する目的でボルトを配置することが多い。なお、当て板断面は既設母材を補うように設計されるが、応力が既に発生している部材への取り付けのため応力の一時解放が必要となる場合もある。

当て板接合部の設計は、構造物の管理機関の基準類に従って行われるが、該当する基準類が存在しない場合、道路橋では道路橋示方書の規定にしたがって設計されることが多い。

(1)高力ボルト接合

既に述べたように、当て板を付加する場合の高力ボルト接合としては、高力ボルト摩擦接合が最も多い。なお、腐食による既設部材の表面の凹凸が著しい場合、接合面における接触が十分確保できず設計で予想した通りの荷重伝達が得られないことがある。このため設計で用いるすべり係数の設定では、これを考慮する必要がある。また、既設部材の初期形状によっては、当て板間に局所的な隙間が生じる場合も想定され、防錆上の配慮が必要となる。このような場合、腐食損傷部と当て板の間に樹脂あるいは接着剤を塗布する補修事例⁶⁾もある。

当て板の板厚は、道路橋示方書における最低板厚 8mm を満足するように決定される。板厚は、断面急変に伴う新たな応力集中を避けるため、既設鋼板の板厚以上、同材質としていることが多い。ボルト本数の設計では、①断面欠損を補う場合と②耐力を向上させる場合とで設計方法が異なる。前者は、断面欠損部分を補う当て板サイズを設定し、この断面に見合う作用力に対して安全となるようボルト本数を決定する。後者は腐食部と健全部の境界に作用する軸方向力、せん断力、曲げモーメントに対して安全となるようなボルト本数を決定する。ただし、設計実務において実際は応力でボルト本数が決まるケースは少なく、ボルトの最大間隔による本数で決められることが多い。接合面の処理は、既設鋼板側を2種ケレン以上、当て板側を無機ジンクリッチペイントとすることが多い。

当て板によるボルト接合では、現場孔あけの際、一時的に耐力不足となることが危惧される。そのため、施工時の耐力照査を行わなければならない。

また、設計で求められるすべり係数を確保するため、不陸調整としてエポキシ樹脂を用いる場合があるが、この場合、エポキシ樹脂の接着効果を考慮することにより一層、合理的な補修部の設計が可能となる。ただし、現時点では、エポキシ樹脂がすべり耐力に与える影響が不明確であり、エポキシ

樹脂の接着力や、エポキシ樹脂部に配置されたボルト軸力によるすべり耐力の増加量を定量的に評価するには至っておらず、設計上考慮しない。

3. 施工および維持管理

3.1 高力ボルト接合の施工

高力ボルト接合（高力ボルト摩擦接合）による場合の施工フローを図-10に示す。

孔あけ、ケレンによる素地調整を行い、不陸整正のために、エポキシ樹脂を既設部材に塗布した後、当て板を添接し、ボルト締めを行う。

ボルト孔あけでは、対象箇所の形状を調査・実測した上で設計に反映させ、ボルト位置を決定する。既設鋼板のボルト孔周辺は、密着性を確保するためディスクサンダー等により、できる限り平坦に仕上げる。また、接合面の表面処理は設計すべり係数を確保する施工を行う。

エポキシ樹脂を塗布する場合には、施工温度は5℃以上とする。当て板と母材は、ボルト締め付けにより密着させ肌すきが生じないようにする。エポキシ樹脂の塗布および金属パテの施工状況の例を図-11に示す。

高力ボルト軸力の管理は摩擦接合用高力ボルトのそれに従う。高力ボルトへの軸力導入は、既設鋼板にエポキシ樹脂を塗布し、当て板を取り付け後直ちに行う。ただし、欠損部がボルト周辺かつ広範囲に渡る場合などでは、軸力導入による当て板の変形を防ぐため、エポキシ樹脂ではなく、金属パテを用いるのがよい。締め付けは、継ぎ手外側端から締め付けると当て板が浮き上がり、密着性が悪くなるため、中央から外側に向かって締め付ける。

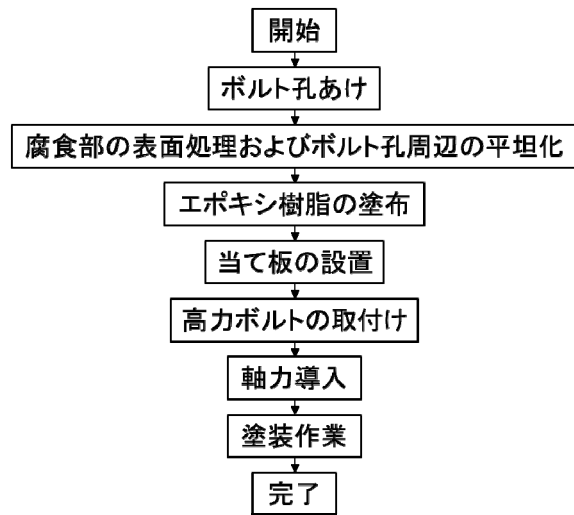


図-10 高力ボルト接合（エポキシ樹脂を塗布する場合）の施工フロー

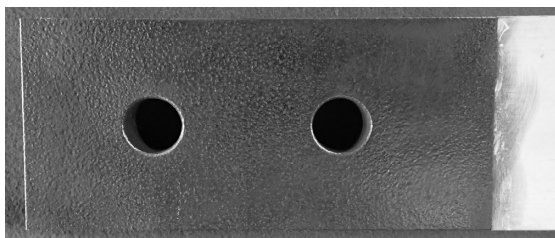


(a)施工前



(b)エポキシ樹脂施工後

エポキシ樹脂の施工状況



(c)施工前



(d)金属パテ施工後

金属パテの施工状況

図-11 接合面の不陸調整

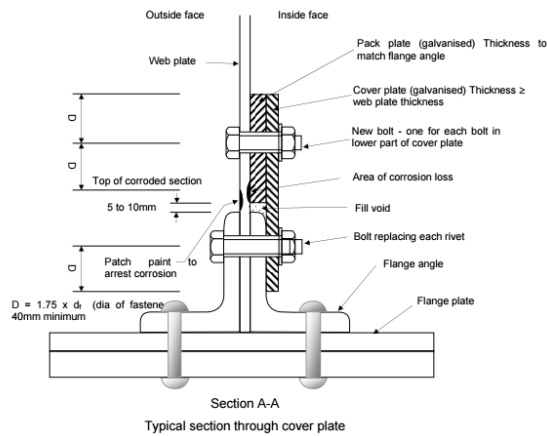


図-12 フィラーを用いる場合の例⁷⁾

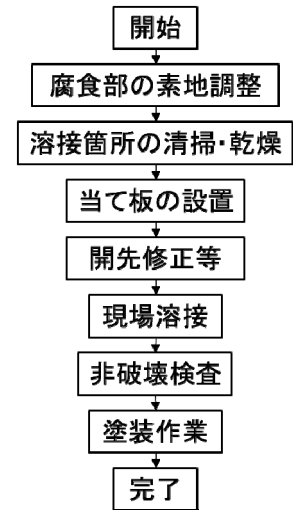


図-13 溶接接合の施工フロー

図-12には、不陸調整および高さ調整をフィラーによって行い、当て板している事例を示す。

3.2 溶接接合の施工

溶接接合の場合の施工フローを図-13に示す。

施工に先立ち、対象箇所の形状を調査、実測し、当て板の設計に反映し形状を決定する。また、当て板を取り付ける範囲には素地調整を行う。次に、当て板と母材は密着させ肌すきが生じないように設置する。溶接を行う部分には、溶接に有害な黒皮、さび、塗料、油等を除去するとともに溶接近傍を十分に乾燥させる。

溶接による残留応力、ひずみの増加、溶接欠陥の発生など、腐食発生前の状態よりも疲労強度が劣る場合があることから、品質が確保できるような溶接方法、施工管理方法を検討する。特に、現場では、上向き・下向き・横向き等の姿勢で溶接を行うことが想定され、溶接作業者は有資格者とする必要がある。また、溶接箇所は健全な箇所を原則とする。

3.3 維持管理

当て板補修・補強部の維持管理にあたっては、腐食損傷に至った原因を究明し、再劣化しないよう、腐食の原因が除去されていることが最も重要である。そのため、該当部位での腐食の再発生には注意しなければならない。また、当て板と母材の密着性も重要な観察項目であり、当て板と母材の離間やずれが発生していないかについても十分注意しなければならない。さらに高力ボルトを用いて当て板を設置する場合、高力ボルトの腐食に加え、高力ボルトの軸力が維持されているかについても重要な点検項目である。

4. 当て板による補修・補強に関する研究動向

4.1 概要

腐食部に対する当て板による補修・補強に関する研究は、高度経済成長期に多数建設された橋梁群が経年50年を迎えるころから盛んになり始めた。このような50年を超える橋梁数が増大するという背景を踏まえ、長寿命化修繕計画策定事業費補助制度が平成19年4月に開始された。さらに、橋梁の維持管理とは直接関係しないが、平成24年12月に笹子トンネル天井板落下事故が発生し、社会全体に維持管理の重要性が改めて認識され、補修・補強といった維持管理に関連した問題を扱う機運が高まり、近年では多くの研究がなされるようになった。

当て板による補修・補強という観点から研究の動向を見てみると、疲労亀裂に対する当て板補修・

補強のものが多く、腐食した部材に対する当て板補修・補強はそれと比べると少なかった。腐食に対する当て板補修・補強に関する研究では、当て板による補修・補強効果の実験的検証や、施工性を向上させるための不陸調整用エポキシ樹脂の積極的な活用、さらには、当て板を炭素繊維板に変更し、エポキシ樹脂で接着する方法の検討や、スタッドボルトの採用など様々な検討がなされてきている。最近では、当て板補修部のモニタリングなど健全度診断につながる研究も多くなされている。また、近年では、載荷実験に基づく研究より数値解析によりその挙動を予測し、それもとに課題を解決していく研究が多くなされているのも特徴である。

当て板の荷重伝達メカニズムや当て板の荷重分担に関しては、永田ら⁸⁾が FEM 解析を実施し当て板と母材の間に生じる荷重伝達メカニズムを検討している。そこでは、当て板と母材の荷重分担比とその断面積比が必ずしも一致しないことを明らかにし、それが何に支配されているかについてボルト本数や当て板板厚をパラメータとして検討を行っている。

当て板補修・補強において、接着剤を積極的に活用することを目的として研究が近年多くなされているのも特徴的である。森下ら⁸⁾は、人工的に腐食表面を作成した短冊形の母材に接着剤により当て板を添接した供試体に対し載荷実験を行い、接着剤を用いた当て板の補修効果を確認し、その終局挙動と性能回復効果を検討している。その結果、当て板厚が 3.1mm の場合、2.3mm よりも板端部での応力集中が大きく、作用荷重が小さい段階からそこで剥離し、終局強度は当板厚の小さい 2.3mm の方が大きくなることを示している。青木ら^{9) 10)}は、片面当て板接着補修された断面欠損を有する鋼部材の曲げ応力性状を検討し、鋼床版デッキプレート腐食部に対する片面当て板接着補修効果について議論している。さらに、村中ら¹¹⁾は、実橋の腐食した添接板の補強を想定し、重ね板・フィラー、及び接着剤を用いた試験体に対する引張試験を行っている。その結果、接着剤を併用することで添接板が一体となり、接着剤を使用しない場合に比べ添接板への荷重伝達がスムーズになると述べている。名取ら¹²⁾は高力ボルト接合と接着接合とを併用した当て板補修部に対し、引張試験、疲労試験、曲げ試験を行い、高力ボルト摩擦接合と接着接合の併用効果を論じている。その結果、凹凸を有する腐食材に高力ボルト接合のみを行った場合のすべり係数が 0.25~0.4 程度であるのに対し、接着剤と併用することですべり係数が 0.4 を十分に満足したと報告されている。また、疲労試験の結果から、高力ボルト摩擦接合のみあるいは高力ボルト摩擦接合と接着剤接合とを併用する場合、疲労強度はすみ肉溶接の場合に比べ高いことが示されている。丹波ら^{13) 14)}は、接着剤と高力ボルトを併用した場合の引張試験を行い、接着剤が剛性や当て板補修部の耐力に及ぼす影響や断面欠損部に設置した高力ボルトの効果を検討し、断面欠損部に高力ボルトを配置した場合においても高力ボルトの締付け力により周辺の当て板に荷重伝達が行われ、効果的であると結論付けている。

4.2 当て板厚の設定に関する研究

すでに述べたように当て板補修部の荷重伝達メカニズムに着目した研究事例はほとんどないため、著者のグループでは、当て板と母材の荷重分担率、適切なすべり限界および降伏限界の設定および評価法について検討する研究^{15) 16)}を行っている。

母材の腐食を想定した減肉部に当て板補修を行った供試体を製作し、当て板厚、ボルト本数、導入軸力、すべり係数をパラメータとして引張載荷実験を行っている。また、同様のモデルに対し、パラメータを増やした FEM 解析も実施している。載荷実験の実施例と解析モデルの例を図-14、15 にそれぞれ示す。これら一連の研究成果から、当て板厚が厚いまたはすべり係数が高い場合、母材の純断面が先に降伏し、板厚が薄いまたはすべり係数が小さい場合、母材腐食部残存断面の降伏が先に生じ、その降伏位置によりすべり挙動が異なることを明らかにした。また、荷重分担率と断面積率の関係から当て板板厚の設計式についても検討している。



図-14 載荷実験時の状況

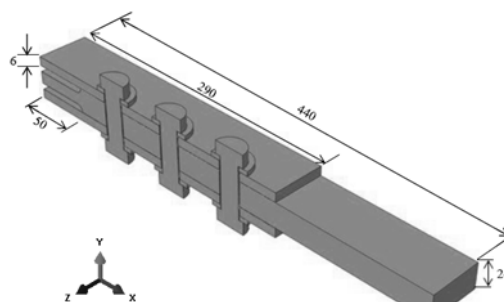
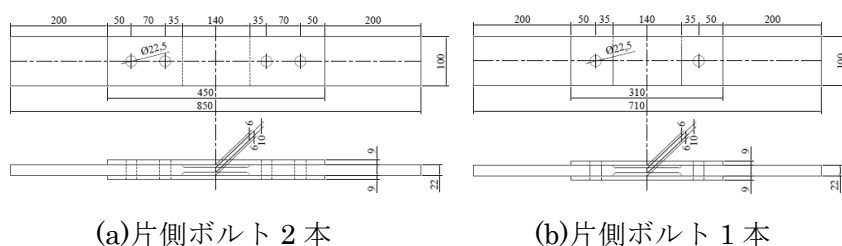


図-15 解析モデルの例

4.3 高力ボルト摩擦接合と接着接合を併用した研究

腐食部位の不陸を調整し、当て板と母材の密着性を高めるために、金属パテやエポキシ樹脂が施工される。エポキシ樹脂は鋼板の接着剤としても用いられており、これを活用することができれば、当て板補修部位のコンパクト化が可能となり、施工時間の短縮も期待される。しかしながら、荷重伝達メカニズムの異なる接合形式の併用は認められず、それを検討している研究事例も少ない。そのため、著者のグループは、高力ボルト摩擦接合と接着接合とを併用した当て板補修部の力学的挙動を検討するため、引張試験を中心に実験的な検討を行っている。この研究では、現場の施工条件を反映し、当て板には無機ジंकリッチペイントが塗布され、母材側は動力工具でグラインダー処理された接合面とし、いわゆる異種接合面の組み合わせとなっていることも特徴的である。接着剤の有無、当て板長、ボルト本数の違いをパラメータとして供試体を設定している。供試体の一例を図-16に、接着剤塗布状況を図-17に示す。なお、実験では、接合面での破壊メカニズムの理解を助けるため、接着剤に青色の顔料を混ぜている。

その結果、接着剤による荷重伝達によって当て板補修部のすべり耐力が向上すること、高力ボルトの軸力影響範囲外でも接着剤により荷重伝達がなされること、望ましい接合面の破壊モードは無機ジंक内部の凝集破壊、もしくは接着材の凝集破壊であり、これを担保するためにプライマーが有効であること、併用接合ではあるが、ボルト一本あたりのすべり耐力に換算して設計が可能であることなどを示めている。ただし、現状では、荷重伝達に有効と考えられる接着剤の塗布範囲は明確になっておらず、耐力評価式も含め、今後検討が必要である。



(a)片側ボルト 2本

(b)片側ボルト 1本

図-16 供試体形状の例



図-17 接着剤塗布状況

4.4 スタッドボルト当て板の開発に関する研究

当て板による補修・補強において、当て板を付加するために高力ボルト接合を用いる場合、損傷部の片側、もしくは両側から当て板を添え、高力ボルトを挿入し当て板を固定することになるが、対象部材が閉断面であれば、高力ボルトを挿入、締め付けるために、ハンドホールなどの加工が必要となり、それが難しい場合、ボルト接合を断念せざるを得ない。そのため、現状では片面施工ボルトの一

つであるワンサイドボルトが使用されることが多い。ワンサイドボルトの摩擦接合接手の基礎的特性についての研究¹⁷⁾もある。ワンサイドボルトの例を図-18に示す。このような状況を踏まえ、孔開け加工を必要とせず、容易に締結できる、スタッドボルトが注目されている。スタッドボルトの例を図-19に示す。スタッドボルトには、締め付け軸力を容易にトルク管理であるトルシア形スタッドボルトも開発されている¹⁸⁾。

スタッドボルトが実際の当て板による補修・補強に用いられた事例としては、Uリブ鋼床版のUリブとデッキプレートへの当て板による補修・補強が挙げられ、鋼床版下面からの施工が可能であること、スタッドボルトに導入された軸力により当て板にも荷重伝達されることなどが確認されており、当て板による補修・補強に効果的であることが示されている¹⁹⁾。しかしながら、スタッドボルトを用いた当て板補修の実績が少ないこと、許容である当て板の拡大孔径が明確でないこと、導入軸力が疲労強度の観点から低く抑えられていることなど、課題も残されている。

著者のグループは、このような背景を踏まえ、スタッドボルトを用いた一面摩擦接合継手のすべり試験を行い^{18), 20)}、課題解決に取り組んでいる。ここでも、現場での補修・補強を想定し、母板は動力工具による素地調整程度2種、連結板は無機ジンクリッチペイントによる処理を行った供試体を対象に検討している。特に、母板と当て板間の荷重伝達機構を解明するとともに、疲労強度を明らかにすることに注目している。

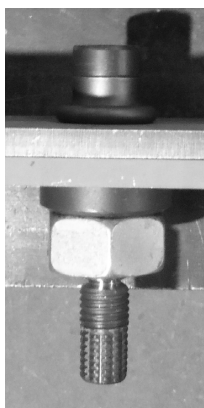


図-18 ワンサイドボルトと締め付け例



図-19 鋼板に溶植されたスタッドボルトの例 (M20)

5. 腐食損傷を対象とした当て板による補修・補強工法の課題とあるべき姿

当て板による補修・補強工法では、既設構造物に対する現場での補修・補強であることから、一般に確実な応力伝達に配慮し、新設橋梁の部材設計と比較してもより安全側に設計されることが多い。そのため、既設構造部材から補修・補強部位である当て板およびその母材部での荷重伝達メカニズムについて詳細な検討がなされず、適切なボルト配置、当て板板厚などの検討は行われることは少なかった。しかしながら、今後一層増えると予想される腐食損傷橋梁の補修・補強を考えれば、荷重伝達メカニズムを把握した上で、構造詳細に基づく当て板補修・補強工法の確立が望まれる。このことは、工期の短縮、施工の省力化をもたらす、非常に有益である。

接合部、添接部においては、その性格上、終局限界を想定した設計がこれまでなされておらず、終局限界を対象とした研究も少ないことから、これらに関する研究成果を蓄積する必要がある。許容応力度設計法から限界状態設計法や性能照査型設計法へ設計体系が移行する中、補修・補強部位の限界状態を正確に把握し、設計における限界状態を明確化することは重要である。

さらに、現場での補修・補強を想定すると、その品質確保や健全度診断も非常に重要となる。すでに述べたように、当て板における接合面処理は、荷重伝達に大きく影響し、重要ではあるが、目視や経験によってその品質の確認を行っているのが実態ではあり、必ずしも適切に管理ができていないと言いがたい。したがって、現場に適した簡易な品質管理基準および健全度診断技術の確立に向けた取

り組みを進めていかなければならない。

以下に、腐食損傷を対象とした当て板による補修・補強工法の課題を列記する。

- ・既設構造物の補修・補強を対象とした設計法の確立
(補修・補強設計のための部分係数の設定, 劣化の考慮)
- ・新材料・新構造の活用
(接着材との併用接合, 新しい締結構造 (リベットなど))
- ・補修範囲の決定法の確立
(保守的な技術判断に基づく補修・補強範囲からより合理的な技術判断による合理的な補修補強範囲の設定)
- ・当て板工法の設計方針の決定
(対象とする限界状態の明確化, 適切な当て板断面の設定)
- ・損傷部材に孔あけする場合の断面性能確保の手法の開発 (孔引き控除が大きい場合を想定)
- ・不陸調整用エポキシ樹脂の当て板による性能回復効果への影響評価
- ・高力ボルト摩擦接合に代わる新しい当て板接合法の開発
- ・品質管理基準の確立と健全度診断手法の開発

これまで、補修・補強を対象とした設計基準や施工・維持管理に関するマニュアルやガイドラインは示されて来なかった。しかしながら、増大する補修・補強の需要に対して応えて行くためには、既設構造物であることを適切に反映した上記のような基準類の整備が急務である。今後、腐食損傷部位に対して当て板による補修・補強が求められる場合は少なくないと判断され、本稿がこれら基準類の整備の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会 鋼構造委員会 腐食した鋼構造物の長寿命化のための性能回復技術検討小委員会：鋼構造シリーズ 23 腐食した構造物の性能回復事例と性能回復設計法, 丸善出版, 2014.8.
- 2) 国土交通省：「鋼橋（上部構造）の損傷事例」,
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_1.pdf> 2017年7月3日アクセス.
- 3) 首都高速道路株式会社：「首都高速道路構造物の補修・補強」,
<<http://www.shutoko.co.jp/company/enterprise/road/plan/251225/repair/>> 2017年7月3日アクセス.
- 4) 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A2(応用力学), Vol. 69, No. 2 (応用力学論文集Vol. 16), I_595-I_604, 2013.
- 5) 永田和寿, 町田幸大, 小川麻実, 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, Vo.23, No.90, pp.27-37, 2016.
- 6) 「道路橋 補修・補強事例集」編集委員会：道路橋 補修・補強事例集, オフィス・スペース, 2013.5.
- 7) Chief Engineer Civil : Engineering Manual TMC 302 STRUCTURES REPAIR version 2.0, 2009.12.
- 8) 森下太陽, 藤井堅, 森田和也, 堀井 久一, 中村秀治：腐食した鋼板の鋼板接着による性能回復, 構造工学論文集, Vo.57A, pp.747-755, 2011.
- 9) 青木康素, 坂野亮太, 石川敏之, 河野広隆, 足立幸郎：片面当て板接着補修された断面欠損を有する鋼部材の曲げ応力性状, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.647-656, 2013.
- 10) 青木康素, 石川敏之, 河野広隆, 足立幸郎：鋼床版デッキプレート腐食部に対する片面からの当て板接着補修の提案, 土木学会論文集, Vo.72, No.1, pp.263-278, 2016.

- 11) 村中昭典, 勝野壽男, 梶本勝也, 皆田理: 腐食した鋼部材接合部の補強法に関する研究, 土木学会中国支部第 51 回研究発表会, pp.611-612, 1999.
- 12) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 腐食部材の添接板補強に関する研究, 土木学会論文集, No.682, I-56, pp.207-224, 2001.7.
- 13) 丹波寛夫, 行藤晋也, 山口隆司, 杉浦邦征: 接着剤と高力ボルトを併用した軸方向力を受ける当て板補修に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vo.61A, pp.585-563, 2015.
- 14) 丹波寛夫, 橋本国太郎, 田中大介, 杉浦邦征: 腐食した鋼桁端部の当て板補修に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vo.60A, pp.94-104, 2014.
- 15) 永田和寿, 小川麻実, 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解析的研究, 土木学会第 71 回年次学術講演会, pp.225-226, 2016.9.
- 16) 藤本高志, 永田和寿, 小川麻実, 山口隆司: 引張荷重を受ける当て板補修部の載荷実験と荷重伝達に関する考察, 土木学会第 71 回年次学術講演会, pp.219-220, 2016.9.
- 17) 鈴木博之, 川辺裕一, 藤永政司, 中島一浩: 高力ワンスайдボルト摩擦接合接手の基礎的特性, 鋼構造年次報告論文集 第 15 巻, pp.401-408, 2007.11.
- 18) 山本佑大, 山口隆司, 彭雪, 奥村学: 高力スタッドボルトを用いた一面摩擦接合継手の力学的挙動に関する研究, 土木学会関西支部年次学術講演会, I-8, 2017.5.
- 19) 田畑晶子, 儀賀大己, 小野秀一, 山口隆司: ねじ付きスタッドにより当て板した鋼板の繰り返し引張挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A1, Vol.73, No.1, pp.114-125, 2017.
- 20) 山本佑大, 山口隆司, 彭雪, 奥村学: 高力スタッドボルトを用いた一面摩擦接合の当て板補修に関する実験的研究, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I-624, 2017.9. (印刷中)

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

腐食損傷した部材の当て板補修・補強の現状と理想

大阪市立大学大学院
山口隆司

大阪市立大学
OSAKA CITY UNIVERSITY

1

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

目次

1. 当て板補修・補強工法
2. 設計
3. 施工および維持管理
4. 当て板による補修・補強に関する研究の動向
5. 腐食損傷を対象とした当て板による補修・補強工法の課題とあるべき姿

大阪市立大学
OSAKA CITY UNIVERSITY

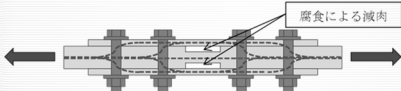
2

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

1. 当て板補修・補強工法

○当て板補修の概要
鋼部材にき裂や断面欠損などの損傷が生じた際に、鋼製の当て板を高力ボルトもしくは溶接により付加し、断面性能の回復を図る。

○当て板補修荷重伝達メカニズム



腐食による減肉

大阪市立大学
OSAKA CITY UNIVERSITY

3

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

腐食部に対する当て板補修事例(鋼鉄主桁端部)



(補修前) (補修後)

大阪市立大学
OSAKA CITY UNIVERSITY

4

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

腐食部に対する当て板補修事例(箱桁端部)



(補修前) (補修後)

大阪市立大学
OSAKA CITY UNIVERSITY

5

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

腐食部に対する当て板補修事例(側縦桁)



(補修前) (補修後)

大阪市立大学
OSAKA CITY UNIVERSITY

6

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

疲労き裂に対する当て板補修事例

(補修前) (補修後)

大阪市立大学

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

隅角部に対する当て板補強事例

(補強後)

大阪市立大学

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

当て板補修・補強部の主な限界状態

限界状態	内容	照査項目
①健全部の純断面降伏	当て板するために健全部において孔明けされることから、健全部の純断面において降伏する可能性がある。	純断面降伏強度
②母材腐食部の降伏	作用力は母材と当て板で分担されるため、母材の腐食部で降伏する可能性がある。	母材腐食部降伏強度 (断面積比) (荷重分担率)
③高力ボルト接合部のすべり限界/支圧限界	母材の変形・降伏によって主すべりもしくは部分すべり/支圧降伏が発生する可能性がある。	すべり強度/支圧強度 (すべり係数) (ボルト軸力)
④高力ボルトせん断降伏	締結材である高力ボルトがせん断降伏する可能性がある。	高力ボルトのせん断強度

大阪市立大学

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

接合面の表面処理方法

高力ボルト摩擦接合において、すべり係数確保のため表面処理が重要である。

(ブラスト処理) (無機ジンクリッチペイント) (2種ケレン)

大阪市立大学

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

2. 設計

設計フロー

```

    graph TD
      A[断面計算方法の決定] --> B[接合方法の決定]
      B --> C[構造詳細の決定]
  
```

当て板断面計算方法

方法1	方法2	方法3
残存断面で死荷重を、当て板で活荷重の負担を期待して断面計算	残像断面に荷重の負担を期待せず、当て板で死荷重と活荷重を負担するとして断面計算	当て板の断面計算は行わず、損傷部材の当初設計と同等の板厚および材質の当て板を設置

大阪市立大学

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

接合方法

○高力ボルト接合

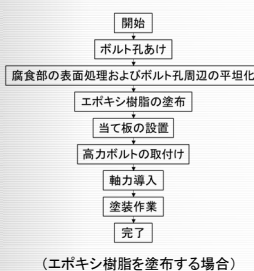
既設部材の凹凸により接触面における接触が十分確保できず、設計で予想した通りの荷重伝達が得られないことがある。
→設計時すべり係数の設定で考慮が必要

不陸調整としてエポキシ樹脂を用いる場合があり、接着効果を考慮することでより合理的な補修設計が可能となる。
→現時点では、設計上考慮しない

大阪市立大学

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

3. 施工及び維持管理 高力ボルト接合の施工フロー




○注意項目

- 接合面の表面処理は、設計すべり係数を確保する施工
- 軸力導入はエポキシ樹脂塗布直後に行う。ただし、ボルト周辺に欠損部がある場合、軸力導入による当て板の変形を防ぐため金属パテを用いるのがよい。

大阪市立大学 13


第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

高力ボルト接合の不陸調整施工状況

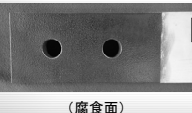


(腐食面)

エポキシ樹脂塗布




(エポキシ樹脂塗布後)



(腐食面)

金属パテ塗布

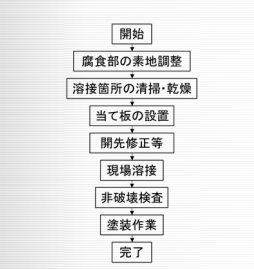


(金属パテ塗布後)

大阪市立大学 14

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

溶接接合の施工フロー



○注意項目

- 素地調整を行い、当て板と母材の肌すきが生じないように設置。
- 溶接部分の有害物質を除去し、十分な乾燥が必要。
- 溶接後の品質を確保できるような溶接方法、施工管理方法を検討する必要がある。
- 作業者は有資格者

大阪市立大学 15

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

維持管理

当て板補修・補強部の維持管理にあたり、腐食損傷原因を究明し、再劣化しないようそれが除去されていることが最も重要。

重要な点検項目

- 当て板と母材の密着性(離間、ずれがないか)。
- 高力ボルトの腐食、軸力が維持されているか。

大阪市立大学 16

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

4. 当て板による補修補強に関する研究の動向

4.1 既往の研究

腐食に対する当て板補修・補強に関する研究では、

- 当て板による補修・補強効果の実験的検証
- 施工性を向上させるための不陸調整用エポキシ樹脂の積極的な活用
- 当て板を炭素繊維板に変更し、エポキシ樹脂で接着する方法の検討
- スタッポルトの採用

など様々な検討がなされてきている。

大阪市立大学 17


第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

4.2 当て板板厚の設定に関する研究

当て板補修を行った供試体を製作し、引張載荷実験を行い、当て板と母材の荷重分担率、適切なすべり限界および降伏限界の設定および評価法について検討を行っている。

母材純断面の降伏が先に生じる場合
(当て板厚が厚い、またはすべり係数が高い)
→ 当て板端部から部分すべり

腐食部残存断面の降伏が先に生じる場合
(当て板厚が薄い、またはすべり係数が小さい)
→ 主すべり

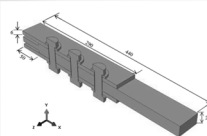


大阪市立大学 18

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

4.2 当て板板厚の設定に関する研究

実験と同様のモデルに対し、パラメータを増やしたFEM解析を実施



実験供試体の1/4モデル

荷重分担率が断面積率と一致しないため、得られた結果より、荷重分担率と断面積率の関係を求め、当て板板厚の設計式について検討している。

大阪市立大学 19

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY


4.3 高力ボルト摩擦接合と接着接合を併用した研究

高力ボルトと接着剤を併用した当て板補修部の力学的挙動を検討するため、引張試験を中心に実験的な検討を行っている。

接着剤の効果

→軸力影響範囲外でも荷重伝達が認められ、すべり耐力が向上。

接着剤が荷重伝達に有効な範囲は明確でないため、耐力評価式も含め、今後の検討が必要である。




大阪市立大学 20

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

4.4 スタッドボルト当て板の開発に関する研究

スタッドボルトを用いた一面摩擦接合当て板試験体による引張試験を行い、当て板補修における母材と当て板間の荷重伝達機構を検討している。

高力ボルトによる当て板の場合と同様なすべり耐力および破壊モードを示す。
→スタッドボルトの当て板への有用性を確認



今後、溶接部近傍の荷重伝達機構や疲労強度について、解析と疲労試験を行う予定である。

大阪市立大学 21

第20回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 2017/8/4 OSAKA CITY UNIVERSITY

5. 腐食損傷を対象とした当て板による補修・補強工法の課題とあるべき姿

- 既設構造物の補修・補強を対象とした設計法の確立
- 新材料・新構造の活用
- 補修範囲の決定法の確立
- 当て板工法設計方針の決定
- 損傷部材に孔あけする場合の断面性能確保の手法の開発
- 不陸調整用エポキシ樹脂の当て板による性能回復効果への影響評価
- 高力ボルト摩擦接合に代わる新しい当て板接合法の開発
- 品質管理基準の確立と健全度診断手法の開発

大阪市立大学 22

OSAKA CITY UNIVERSITY

ご清聴ありがとうございました。

大阪市立大学 23