

3. 高力ボルトによる補修補強設計法

3-1. 高力ボルトによる補修補強の現状

3-1-1. 我が国の高力ボルトによる補修補強

我が国における補修のほとんどが、欠損した断面積を補って元の断面積を確保するという考えで長いこと行われてきた。欠損した断面積を当て板で補う当て板補修では、当て板の形状を工夫することで自由に断面積を回復できるので当て板による補修が多用されてきた。この時、溶接による当て板補修では断面積は建設時に戻すことが出来ても、建設時の状態に対して、腐食による断面欠損では耐疲労性能が低下し、疲労き裂による断面欠損では耐疲労性能の問題が残り、疲労き裂が再び発生するという問題が指摘されてきた。これに対して高力ボルト摩擦接合は、溶接部特有の応力集中の問題がないため、疲労の弱点を作らずに断面回復を行うことができるとともに、疲労き裂が発生した箇所では、耐疲労性能を改善することができる。そのため、溶接による当て板補修の問題が指摘されてから、鋼橋の補修では高力ボルトによる補修が多くなり、今では、一般には、摩擦接合同レベルの軸力を導入した高力ボルトによる当て板補修が行われている。

わが国の高力ボルトを用いた当て板による補修補強は、そのほとんどが高力ボルト継手の規定を用いて設計されてきた。そのため、ここでは、我が国における高力ボルト継手の現状について述べる。

道路橋示方書¹⁾では、高力ボルト継手は、摩擦接合、支圧接合、引張接合で設計・施工することが規定されている。実際には、高力ボルト継手は、現場継手に対して用いられることが多く、摩擦接合として多用されている。これに対して、支圧接合は、古くは鉄道橋で6Tの高力ボルトを用いた設計が行われ、昭和41年から45年にかけて27橋で使用した実績がある。²⁾この他、7Tおよび9Tを使用した事例もある。そして、道路橋では昭和48年に、B8TおよびB10Tを使用した支圧接合が道路橋示方書に規定された。最近では、都市高速の鋼製橋脚隅角部に発生した疲労き裂の対策として支圧接合が用いられている。³⁾いずれも、打ち込み式高力ボルトが用いられている。また、引張接合は、横桁の主桁取付け部、吊り橋の塔の横梁の継手、落橋防止システム等に用いられている。しかしながら、いずれも、その使用は限定されている。

この3つの接合では、どの方法も、設計において継手部のずれを許していない。そして、応力ひずみ関係において、比例関係が保証された領域での使用が前提とされている。これらのことは許容応力度法の設計体系において重要な前提条件として扱われている。

また、わが国の継手の設計では、全強の75%を確保することを基本に行われていることも、継手の性能を生かした設計法を検討していく際には、議論する必要があるものと考えられる。

上述の3つの接合方法のうち、摩擦接合と支圧接合は、荷重方向に対してボルト軸方向が垂直に配置されるせん断型の高力ボルト継手として、引張接合はボルト軸方向が荷重方向と平行に配置される引張型の継手として区別される。継手の力学的性状の研究ではこの区別を行って実

施している研究もあり、ユーロコードの規定でも同じように区別している。

以上のように、わが国の道路橋示方書では、接合方法として3つの方法が規定されているが、補修補強に高力ボルトによる当て板が用いられる場合は、摩擦接合の考えが用いられている。そこで、摩擦接合が属するせん断型の高力ボルト継手の設計法について、3.2 でさらに詳述する。

3-1-2. 海外の補修補強

我が国における高力ボルトによる補修補強は、高力ボルト継手の規定で設計が行われていることを述べたが、海外でも補修補強に対する規定はなく、マニュアルや補修補強事例が示されている。

海外の補修補強事例を調べたが、一般的で基本的な対策が多い。また、我が国では見慣れない強事例もあったが、各国特有の標準的な詳細構造ならびに建設時の規定の違いから施工された構造物の詳細構造が異なることも多く、本節ではそれらの事例を特に収録していない。なお、4-4-1. (7)海外の補修方法の節に、桁端の補修についての文献調査結果をまとめている。

3-2. せん断型の高力ボルト継手の設計法

3-2-1. 国内外の基準類の比較^{3)~9)}

1990年代にユーロコードが整備され、ドイツでは2013年に橋梁に関するドイツ版が実際に使われ始めたようであるが、ヨーロッパの各国で作成され、使われてきた規定を統合するには約20年の月日を要している。それでも、ドイツ版とイギリス版を比較すると、ドイツ版で統合できなかった部分を四角で囲んで注記するなどに対応している。

ドイツでは、鋼橋の割合は7%、合成桁を合算しても20%に満たない市場のためか高力ボルト継手に関する研究はそれほど行われていない。高力ボルト継手に対するユーロコードの作成にあたっての実験なども、ドイツやイギリス以外の国で行われている。その実験は、片側のボルト配置が、応力方向の1本の試験体で検討され、応力方向に複数配置された各ボルトによる荷重分担に関する検討はなされていないようである。また、ボルト継手のせん断支圧に関する研究は、リベット継手の流れから、軸力を入れない試験体での検討が多い。

軸力を入れない試験体での終局耐力も軸力を入れた場合の耐力も、純断面で破断するケースにおいては、終局強度に大差はないことが確認されている。そのため、軸力を入れない継手の耐力について軸力を入れない試験体で得られた終局強度を用いて評価することの妥当性は一定程度あると考えられる。これに対して、終局に至る前のすべり直後の性能において、軸力を入れた場合と入れない場合では、例えば耐疲労性能における違いなどが考えられる。

ここでは、補修補強の設計法を検討することを考え、既存構造物がどのような規定に基づいているかについて知るため、ここでは、1980年代の規定を比較する。

この表3-1-1には、F10T級の高力ボルトを用いた場合のそれぞれの接合で用いられる当時の規定について、設計軸力(導入軸力)、ボルトとボルト孔のクリアランス、設計で仮定されてい

る伝達機構、設計荷重時の継手部での変位、支圧に対する許容応力、ボルト 1 本が受け持つ伝達力の許容値をまとめてある。

この表から分かるように、わが国の道路橋示方書 (JSHB) の支圧接合のボルト 1 本当たりの許容値(強度表示)186MPa は、DIN の GV (摩擦接合) 179MPa とほぼ等しい。ここで導入軸力は $0.75\sigma_y$ (JSHB) と $0.71\sigma_y$ (DIN) とほぼ等しいが、ボルトとボルト孔のクリアランスは、JSHB ではゼロであるが、DIN では 2mm 許している。さらに、支圧応力に対する許容値も、JSHB の σ_y に対して、DIN では $2\sigma_y$ である。JSHB の解説に、「疲労試験によれば、支圧応力度を母材の許容引張応力度の 2 倍までとしても、とくに異状を生じないが、実施例もないので、さしあたりこの示方書では、母材の降伏点までとした」と書かれているように、降伏しないことを前提に設計体系が守られている。

ドイツでは、すべり荷重を限界値としないが、軸力を導入し、パスボルトを使用しない接合を約 10 年前に導入している。補修における制約条件や、受注会社の製作能力、採算性の視点から、導入されたことが考えられる。

USA では、米国の RCSC の性能に関する規定の中で、「本当の終局強度はせん断支圧強度で、すべりを起こすと問題となるケースに対しては、摩擦接合として設計する」となっている。また、表で示した AASHTO では、せん断支圧に対する終局強度による設計は、すべりを起こしても問題とならないと考えられるブレースに対してせん断支圧接合の許容値が示されており、ブレースに対してだけ支圧接合で設計することが許されている。

表 3-1-1 日本、USA、ドイツのせん断型高力ボルト継手に関する規定比較

規定	ボルトの材質/規格	設計軸力 $\times \sigma_y$	ボルト軸とボルト孔壁のクリアランス (mm)	設計荷重の伝達機構 (仮定)	設計荷重の伝達機構 (実際)	設計荷重時の継手の変位 (mm)	支圧許容値 σ_B (MPa) $\times \sigma_y$	ボルト1本当たりの許容値 (MPa)	
摩擦接合 (JSHB ¹⁾)	F10T	0.75	2.5	摩擦	摩擦	0	—	124	
支圧接合 (北海道)	F10T	0.68 ²⁾	0.9	支圧	支圧+摩擦	0	0.86	186	
支圧接合 (JSHB ¹⁾)	B10T	0.75	0	支圧	支圧+摩擦	0	1	186	
AASHTO (1983)	general	M253	1.6	摩擦	摩擦	0	—	124	
	Brace			支圧	支圧+摩擦	1.6	1.22	248	
DIN18809 (1987)	GV ^{**}	DIN6941	0.71	2.0	摩擦	摩擦	0	2.0	179
	GVP ^{**}	DIN7968	0.71	0.3	摩擦	摩擦	0.3	2.0	304
	SLP ^{**}	DIN7968	0.35	0.3	支圧+摩擦	支圧+摩擦	0.3	1.75	281
0.07			支圧		支圧 \gg 摩擦	1.33			
リベット接合 (JSHB ¹⁾ 1980)	SV34	0	0	支圧	支圧 \gg 摩擦	0	1	98 ³⁾	
	SV41							127 ³⁾	

1) JSHB : 道路橋示方書

2) 荷重を載荷してから締め付けを行う

3) 現場継手に対する値

**GV : 計画した軸力が導入された、摩擦接合 (すべらない連結)

GVP : 計画した軸力が導入され、パスボルトを用いた摩擦接合 (すべらない連結)

SLP : パスボルトを用いたせん断支圧連結

3-2-2. すべりを許さない設計

高力ボルト摩擦接合は、すべりを限界として、すべりを許容していないため、継手部での特異

な変形を許さない設計法で、わが国では最も多く使われている。許容応力度設計法の体系の中で、継手部での特異な変形がないため、全体の構造解析において、継手部の位置を意識することなく線形弾性解析を行うことが可能になっている。

すべりなどによる継手部での特異な変形を許さない設計としては、摩擦接合の他、わが国では、打ち込み式支圧接合が知られている。クリアランスをゼロとすることで、特異な変形を生じることなく摩擦抵抗による力の伝達とせん断支圧による力の伝達の双方を期待した設計法である。打ち込み式は、ボルト孔径をボルト径より 0.5mm 小さく加工し、打ち込み時に軸部の突起をつぶしながら挿入することで、ボルトとボルト孔を密着させている。この密着を図った上で、ボルトに摩擦接合同レベルの軸力を導入している。そのため、摩擦接合より大きい剛性と耐力が期待できる。さらに、施工初期から全てのボルトがボルト孔と支圧状態にあることを保証することは、支圧接合の力の伝達において、ボルトがほぼ均等に分担することを保証するために必要と考えられている。しかしながら、終局状態では、孔辺が降伏し、塑性変形を起こすことが考えられるので、これによって製作誤差のために一部のボルトに力が集中することは回避されることが考えられた。このボルトによる伝達力の均等化を保証するため、摩擦接合継手において、すべりを起こした後に、支圧接合の耐力を期待する場合に対して、ボルトが破断する前に孔辺が降伏することを保証するための板厚制限を設けることを提案され、最大板厚の概念が示された。ただし、このケースは、次項のすべりを許容する構造物に適用が限られることに注意をしたい。

一方、わが国の北海道で開発された接触式支圧接合は、ボルトを締め付ける前に支圧状態にすることによって、最大摩擦抵抗を超えてもすべりによる特異な変形を回避するという考え方で設計法が作られている。この接合法は逆の力が加わる交番応力の発生するところではこの前提が成立しないので注意を要する。また、孔辺が降伏を起こす場合、それにし上がった相対変位が生じる可能性があることにも留意したい。

3-2-3. すべりを許した設計

継手部での特異な変形を許容する設計としては、ボルトとボルト孔のクリアランスがある継手が初期状態では摩擦で力が伝達され、地震など異常時荷重が載荷された場合に、すべりを起こし、変位を生じてせん断支圧状態になった後、摩擦抵抗とせん断支圧抵抗で、異常時荷重に耐えるように設計する方法が考えられる。3.2.1 で述べたように AASHTO の規定には、この考えが 1980 年代に採用されている。

わが国の道路橋示方書では、継手部での特異な変形は許さずに設計が行われてきているが、平成 14 年に性能照査型設計に移行したので、要求性能に応じて、継手部での特異な変形を許さないという前提も今後見直すことができると考えられる。例えば、落橋防止システムの設計や耐震性能 3 に対する設計では、すべりによる変形を許容した設計を行うことが考えられる。

このすべり後の継手の性能を利用するには、3.2.6 に述べる注意点に留意する必要があり、そのためには、すべり後の継手の力学的挙動を理解する必要がある。

また、すべりを起こすことを前提とした場合、すべりおよびせん断支圧状態における塑性変形

によって、エネルギー吸収が行われるので、これを効果的に用いて設計法を確立することが期待される。

3-2-4. 高力ボルト継手の性能

高力ボルト継手は、ボルトが破断しない限り、このボルトによる拘束効果（摩擦抵抗を含む）が期待できる。そして、軸力を導入して用いる場合、母材あるいは添接の全断面が降伏して板厚が薄くならない限り、摩擦抵抗が期待できる。

高力ボルトの高い強度で、ボルトの破断荷重が大きくなり、ボルトが破断しないで使用できる領域が広がる。また、軸力が導入される場合、力が接触面で伝達され、溶接のような応力集中がないため、耐疲労性能もよい。すべりを生じた後、支圧状態になっても、摩擦接合の開発時期の疲労試験結果から耐疲労性能がよいことが確認されている。すなわち、摩擦接合を開発するために行われた疲労試験であるが、疲労強度が高いので大きい応力範囲で行われるため、すべりを起こした試験結果も多い。試験中にすべりを起こしたデータ、すなわち、大きい応力範囲で試験を行い、上限荷重がすべり荷重以上となった試験データを用いて検討を行った結果、疲労強度は支圧状態になっても大きい。この理由として、軸力により孔辺の応力集中が緩和されていることが考えられる。

また、添接板の板厚は自由に選ぶことができ、ボルトの配置も含めて検討することでクリティカルになる断面をコントロールし、添接板が先に限界状態に至ることで、添接板をエネルギー吸収部材とする一方、比較的簡単に交換のできる部材（添接板）をコントロール部材とすることで、復旧性の向上策の一つとしても展開の余地ができ、設計の自由度が広がる。例えば、添接板の合計厚を母材の厚さより小さくして、添接板の純断面を先に降伏させることも考えられる。しかしながら、この継手部をクリティカルになる位置とする考えは、継手部が先に限界状態に至ることを意味し、全強の 75%以上の耐力を保証する設計体系の中では、この性能を活かすことが出来ない。そのため、高力ボルト継手のこれまでの設計法に縛られずに、その力学的特性様々な形で生かすには、全強の 75%を確保する考えやすべりを起こさないという仮定を見直す必要があるものと考えられる。

3-2-5. 軸力を導入した高力ボルト継手のすべり後性能の適用可能性

3-2-3. に述べたように、継手部でのすべり、すなわち、継手部での特異な変形が問題とならないケースとして落橋防止装置や耐震性能 3 にする設計が考えられる。すなわち、ごくまれに生じる巨大な荷重に対する設計で、損傷が許容されるケースである。この他に、補修補強対策の分野では、既設橋の制約から、規定を満足して設計できないケースで、要求性能を満足しない部分の性能をいくらかでも向上させたり、性能低下の進行を遅延させたりする場合に適用できる可能性がある。これまで、補修では十分安全側に余裕を持って設計施工して用いられてきているので、比較的経過観察のし易い場所では、このすべり後の力学的特性を踏まえて、断面やボルト本数を減らして、経済的な補修補強設計を実現する可能性を検討していくことが望まれる。

3-2-6. すべり後の耐力を期待するときの注意点

(1) 支圧による孔辺の局所的な塑性変形によるボルトの均等分担の保証

我が国の設計では、高力ボルト継手部でのずれ（特異な変形）を許していない。これは許容応力度法の設計体系において重要な前提条件であることをととして扱われてきている。この前提によって、継手部での変形を特別に考えずに全体の構造解析ができ、かつ、継手部での力の伝達において、継手部の各ボルトで均等に分担して力を伝達できると仮定して設計が行われている。この前提で設計を可能にするため、高力ボルト摩擦接合では、伝達する力の方向の最大ボルト本数に制限を設けている。これは多列ボルトでは、端部のボルトの方が、力の伝達が大きくなるからで、これはよく知られたことである。

このため、すべり後の耐力を期待した設計を行う場合、力の伝達における、このボルトの均等分担を保証する必要がある。参考文献 10)ではこれを保証するため、ボルトの限界値に達する前に、必ず、ボルトの支圧部の鋼板が降伏し、各ボルトによる力の分担が均等化することを保証するため、最大板厚の概念を導入している。但し、ここでの均等化の保証は、(3)で述べるように、製作誤差のために、ボルトが支圧状態になる時期が各ボルトで異なることから生じる、すべり後の比較的初期の段階での分担力の不均等が解消されることを意味する。

この最大板厚の概念では、降伏して分担が均等化を保証しているため、各ボルトが均等に分担するために支圧部での変形可能量を確認する必要がある。高力ボルト摩擦接合は、ふつう、M22(S10T)が用いられ、この場合、クリアランスは 2.5mm で、製作精度は、±0.5mm に対して、10mm 程度あれば十分と考えられる。これに対して、文献 11)によれば、母材板厚 9mm の場合、縁端距離が 60mm では、20mm 程度の孔の拡大が期待できる。ただし、この変形には、支圧変形だけではなく、縁端部のせん断変形も含まれている可能性が大きい。板厚が 19mm の場合に、縁端距離が 60mm では、孔の拡大量が 10mm 程度と小さくなるが、これは、ボルトのせん断耐力によって最大荷重が決まるため、支圧変形の割合が大きくなっているものと考えられる。この支圧部における孔径の変形可能量については、さらにデータを増やして、その傾向を把握する必要があるものと考えられる。

(2) すべり荷重より大きい耐力が期待できない事例

摩擦接合継手においてすべりを起こした場合、すべりを起こした後に、ボルトとボルト孔の孔辺が支圧状態になり、すべりは止まると考えられるが、その継手の形状によって必ずしも止まらない。摩擦接合では、すべり後のことを想定していないので、すべり後の終局耐力がすべり荷重より大きくなることを保証しているわけではない。

例えば、荷重方向のボルト 1 本の高力ボルト摩擦接合継手で、板厚 9mm、縁端距離 40mm、SS400、F10T(M22)、2 面摩擦接合では、下記の計算からも分かるように、縁端の破断荷重はすべり荷重とほとんど変わらない。こうした形状の継手では、実験結果からも、縁端部の破断荷重がすべり耐力より若干小さくなることが確認されている。

$$2 \text{ 面} \times 40\text{mm} \times 9\text{mm} \times 400\text{MPa} / \sqrt{3} = 166277\text{N} \quad \text{縁端破断荷重}$$

$$2 \text{ 面} \times 48\text{kN} \times 1.7 = 163200 \text{ N} \quad \text{すべり荷重}$$

これに対して、我が国の建築の規定では、縁端の破断強度の照査が規定され、ユーロコードでは、縁端距離に関する規定がある。また、道路橋示方書の支圧接合の規定には、荷重方向のボルト本数が 1 本と 2 本の場合に対して、縁端距離の規定はあるが、非常に安全側の規定になっており、その特性を生かすことのできる既定にはなっていない。

(3) すべり後の継手の終局耐力と継手の各部位の終局耐力

すべり後の継手の終局耐力は、材料強度から求めた各部位の終局耐力の最も小さい値より、さらに小さくなることが考えられる。そのため、各部位の純断面引張破断強度、縁端のせん断破断強度、ボルトのせん断破断強度を材料強度から求めて、その最小値を継手の耐力とすると継手の耐力を危険側に評価してしまう危険がある。

例えば、応力方向に 2 本のボルトが配置された継手では、母材の縁端部において全断面がせん断降伏すると、縁端部の剛性がなくなるため、母材の縁端に近いボルトによって伝達される力は増えず、その分、外側のボルト（添接板の縁端に近いボルト）の分担が大きくなり、ボルトの分担力の不均等化により、外側ボルトが破断する場合があります。この場合、一般に設計で仮定されている均等を仮定して求める全ボルトによる継手の耐力は小さくなる。この現象は、これまで一般に破断モードとして考えてきた純断面の引張破断、ボルトのせん断破断、鋼板のせん断破断（端抜け破断）などに加えて、複合した破断モードとして考慮する必要があると考えられる。

上述のように、すべり後の継手の終局耐力は、材料強度から求めた各部位の終局耐力の最も小さい値より、さらに小さくなる場合が考えられる。

3-2-7. 性能を活かした摩擦接合

摩擦接合は、すべり荷重を限界荷重として設計されているため、すべり後の性能を考慮して設計されていない。すべり後の性能である高い耐力とエネルギー吸収能を活用するためには、すべり後の力学的特性を解明して、それに適した構造詳細とする必要がある。例えば、2 列の継手で縁端の長さを標準値 40mm に対して 60mm にするだけでも、設計荷重として設定する荷重より大きい荷重に対して抵抗が期待できる。また、その場合、エネルギー吸収能も期待できる。

3-2-8. 夢を持つための提案

高力ボルト継手は、ボルトが破断しない限り、このボルトによる拘束効果（摩擦抵抗を含む）が期待できる。そして、軸力を導入して用いる場合、母材の破断で板厚が薄くならない限り、大きい摩擦抵抗が期待でき、応力集中が起りにくいため、高い耐疲労性能も期待できる。もともと、高力ボルト継手は、ボルトの高い強度による恩恵を受けてきた。

その一つとして、摩擦接合は、許容応力度法の設計体系の中で、便利に使われてきた。しかしながら、ここ 20 年で、2 回の大震災を経験する中、耐震性の向上の対応には、色々な形で、対

応することが考えられる。そのひとつとして、継手部における上述したエネルギー吸収能を生かした設計が考えられる。

しかしながら、現在の設計体系では、全強の 75%の規定があるため、こうした設計では、この規定から開放されて、すべりなどによる継手部での特異な変形を許容することで、継手を自由に設計し、継手部で塑性変形を許すことで、構造物の破壊過程をコントロールして、要求された耐力を確保し、粘り強い構造物を造っていくことができることが期待される。

そこで、落橋防止システムや耐震性能 3 に対しては、ボルトの破断だけは回避し、純断面部での引張塑性変形や荷重方向のボルトによる荷重方向のせん断による塑性変形によるエネルギー吸収能を生かした設計を行うことで、終局状態における継手部でのエネルギー吸収を期待した設計を行うなどの検討をする意味はあると考えられる。

3-3. 高力ボルトによる補修補強設計法

補修補強について、補修は損傷（変状）による性能の低下を回復するもので、補強は建設時より性能を向上させることを目的として行う対策と考えられるが、ここでは、補修補強を対策という言葉でその差を設けずに述べる。その代わりに、ここでは、対策によって対策後の目標性能をどのレベルにするか、あるいは、どのように考えているかについて述べるようにする。

例えば、発生した疲労き裂の対策では、もとの状態に戻すと、これまで使用してきた中で受けたものと同等の負荷（応力範囲と繰返し数の同じ組み合わせ）が加われば、き裂は再発する可能性が高い。そのため、一般にはき裂で減少した有効断面を元に戻すだけでなく、疲労き裂が再発しないように対策が検討される。この対策では、もとの構造に対して耐疲労性能を上げることが求められるが、一般にはき裂の「補修」と呼ばれている。そのため、ここでは、説明上、「補修」「補強」という言葉を使う必要がない限り、補修補強を区別せずに、対策という言葉で述べる。

3-3-1. 高力ボルトによる対策の種類

(1) 高力ボルトだけを用いた補修

疲労き裂の対策では、まず、ストップホールが用いられる。このストップホールに高力ボルトを入れて締め付けることで、耐疲労性能を向上させる（ストップホール部からのき裂の再発を防ぐ）対策が行われることがある。また、さらに座金を鋼板で作成し、その性能を向上させることも行われることがある。

(2) 当て板を用いた高力ボルトによる対策

当て板を用いた高力ボルトによる対策は、当て板として単なる鋼板だけでなく、形鋼および鋼板を用いて構成された部材を用いることで、様々な損傷および補強（性能の向上）に対応することができる。すなわち、追加部材として製作部材を含めて考えることで、簡単なものから大掛かりなものまで自由に対策できる。なお、既設構造と新部材との連結は一般に摩擦接合で行われる。

この損傷部を切断して新材と交換する考えは、連結に適した部分で切断すればよいので、いろいろな場合に適用できる万能な方法であるが、必然的に、コスト高になる。そのため、性能とコストを考えて、最適な切断位置を決定することが重要になる。

一方、2本ボルトでも、形鋼など薄板構造で構成される立体的な追加部材を用いると、3次元的な応力にも対応でき、疲労き裂対策として用いられている。例えば、主桁と横桁の交差部に発生した疲労亀裂の対策では、面外方向の変位を抑えることができるので、き裂の進展を抑制する効果が期待できる。すなわち、この場合、モードⅢに対するき裂進展を抑制できる。このモードⅢのき裂進展に対する抑制効果については、単なる鋼板を2面摩擦で補修する場合も期待できる。すなわち、高力ボルトで締め付けることで、両側の添接板でモードⅢの開口を抑えることができる。

当て板を用いた高力ボルトによる対策に期待できる性能向上効果については、さらに 3-3-3. で述べる。

(3) 特殊ボルトを用いた補修

ワンサイドボルトや、主桁のウェブと上フランジと垂直補剛材の溶接部に活荷重による首ふりによって発生したき裂に対して垂直補剛材を用いて上フランジを支持する場合に確実にメタルタッチさせる施工に用いられるボルトなど、特殊ボルトがあるが、ここでは、それらの特殊ボルトを用いた補修があるということ述べるにとどめる。

3-3-2. 高力ボルトによる対策の制約条件

高力ボルトによる対策は、まず、高力ボルトで締め付けて部材を連結するため、ボルトを通すための孔を明けることが基本になる。この孔を明けるスペースや添接板を設置するスペースが必要となる。また、摩擦接合の原則を守るには、ボルト中心から鋼板の縁端までの距離を確保する必要がある。さらに、最小ボルト本数などの規定を満足する必要がある。また、鋼板が立体的に組み立てられている部分では、孔明け加工やボルトの締め付けの施工が可能か確認する必要がある。また、この施工のための設備を確保しなければならない。これらの施工では、動力工具のための発電機などの装備が必要であるが、最近では、電池式の動力工具も使えるので現場の状況は、変わっていくことも考えられる。そのため、こうした施工条件に関する制約は固定的に考えるのではなく、制約を緩和していく技術開発も必要と考えられる。また、どのような制約条件があるか確認するとともに、その制約をどのように考えていくかが、この高力ボルトによる当て板対策の可能性を広げることにつながるものと考えられる。

高力ボルトによる当て板対策は、新設の橋梁で確立されてきた高力ボルト摩擦接合継手の規定に従って用いられてきたが、補修補強対策では、この規定に従うことはできなくとも、この高力ボルトの継手の性能を活用できる場合があると考えられる。例えば、応急補修では、設計荷重に対して摩擦抵抗では耐えられなくても、補修をしない状態より安全性は向上するケースは多いと考えられる。特に、疲労き裂対策では、面外に対する変位を拘束する効果は大きいと考えら

れる。また、すべりを起こして支圧状態になってもボルトで締め付けておけば、面内の力に対しても耐疲労性能を期待できる。

このように、制約条件を確認することの必要性和制約条件に縛られるだけではなく、高力ボルトによる当て板対策の基本性能が個々の現場の要求性能に合えば、あるいは、要求性能の一部を満たせば、制約に縛られずに対策を用いる道を拓いていくことも、今後、使える費用が限られていく社会には必要と考えられる。

3-3-3. 当て板を用いた高力ボルトによる対策に期待できる性能向上効果

(1) 耐疲労性能の向上

高力ボルトを用いた当て板による対策の長所として、耐疲労性能の向上があげられる。すなわち、溶接による対策では、疲労き裂が発生する原因となる溶接ビード形状、不溶着部の存在、溶接欠陥などによる応力集中や溶接残留引張応力が問題となるが、軸力を入れたタイプの高力ボルトによる対策では、軸力を導入することで孔周辺の応力集中も緩和され、疲労の問題はほとんど起きていない。そのため、疲労亀裂の補修では、一般に溶接部からき裂が発生することが多いため、高力ボルトによる補修を行うと、疲労亀裂による断面欠損を解消するだけでなく、建設時にあった応力集中部の問題を解消することができる。すなわち、高力ボルトを用いた当て板による対策では、欠損断面を確保できるばかりでなく、同時に、応力集中部を作らないことによる耐疲労性能の向上が図れる。

また、この当て板を用いた高力ボルトによる対策は、き裂の補修ばかりでなく、腐食による損傷時にも用いられる。これは、腐食による断面欠損を溶接による当て板補強で対策をしようとした場合、静的な耐力は回復できても、溶接によって対策時に新たに疲労上の弱点を作ってしまう。この疲労に強いということから、腐食に対する対策でも、原則、高力ボルトによる対策が用いられる。

(2) 断面増加による耐荷性能（終局時の性能）の向上

当て板による対策は、溶接による対策も、高力ボルトによる対策も、静的な耐力不足に対して対応可能である。しかしながら、耐疲労性能を確保した上で、断面増加を図り、静的な耐荷性能も向上させるには、1) で述べたように高力ボルトによる対策が必要になる。

また、高力ボルトによる継手では、その形状によっては5) で述べるように終局時にエネルギー吸収が期待できる。また、地震時には、溶接の場合に可能性が残る溶接割れや疲労き裂からの脆性破壊の問題も、高力ボルトによる対策では回避でき、き裂進展のストッパーとして用いることも考えられる。

さらに、添接板やボルトで剛性が高まり座屈し難くなるという効果をもたらすことも考えられる。

(3) 三次元的な拘束効果

3-3-1. 2) でも述べたように、当て板を用いた高力ボルトによる対策は、溶接のような応力集中部を作らずに、面外変形の拘束によって三次元的な拘束効果が期待でき、モードⅢのき裂進展を防ぐことができる。この効果は、両側からの鋼板による対策でも期待できる他、主桁と横桁の交差部の疲労き裂に対して山形鋼を用いた場合にも期待できる。この他にも部材の構成でいろいろなケースに対応可能である。

(4) 面内圧縮応力を受ける場合の圧縮耐力の向上

支点上のウェブにはふつう支点上補剛材が設置されるが、このウェブと支点上補剛材には面内に大きな圧縮力が働き、この部分の耐力では局部座屈が問題となる。このため、板を両側からあてて、高力ボルトで締め付けると、断面積が増加するとともに、板厚が増加するので、圧縮耐力の向上に有利である。

この場合の力の伝達機構として、摩擦を期待するよりも、座屈防止機能を高めることを目的として対策を考えると、特にケレンや軸力管理などの施工管理上、現場の負担が軽くなると同時に性能が確保されることが考えられる。また、施工の工夫で、極力メタルタッチによる支圧で力を伝達すると効率的な経済的な設計が可能になる。特に要求性能によっては、継手部にある程度変形がでて、初めて耐力が期待できる構造でも、人的な被害を防げる可能性がある。すなわち、摩擦接合で設計した連結部で、ボルトとボルト孔のクリアランス分すべりを起こしても、安全は確保されることが考えられる。

例えば、リベット橋において、支点上のウェブは、その耐力上の必要から、複数の鋼板で構成されている。このウェブが腐食で板厚が薄くなり、あるいは、断面欠損していた場合、その外から2枚板を当て、高力ボルトで締め付けることが考えられる。また、リベットの頭が腐食で欠損していた場合、せん断型の継手部では、その耐力は比較的下がらないことが報告されているが、面内圧縮力を受けた場合、ウェブを構成する多層の板が板厚方向に分離し、板厚が極端に低下することで、局部座屈が発生し、ウェブの耐力が低下する。この場合も高力ボルトによる締め付けによって、耐力を向上させることができる。なお、リベット橋の対策では、当て板を当てている場合、リベットの頭を回避するための孔を明ける必要がある。

このリベット橋における支点部の支圧による伝達を期待するには、リベットの時代には、ウェブの下端より下フランジ下面の方が10mm程度下がっているのでこの対策が必要である。すなわち、この隙間に、10mm角の角材を挿入すると、上述のメタルタッチで支圧による力の伝達が期待できる。

(5) 終局時における変形性能

終局時の変形性能は、耐震構造において利用できるものと考えられる。高力ボルトによる連結部でのエネルギー吸収には、すべりによるエネルギー吸収と塑性変形によるエネルギー吸収がある。塑性変形によるエネルギー吸収は、その安全な壊れ方とエネルギー吸収量から考えて、高力ボルトではなく鋼板の変形を対象とすることが妥当と考えられる。特に、高力ボルトのせん断

破壊は、部材の分裂をもたらす、材料特性からも、このボルトの塑性変形を期待してはならないと考えられる。また、取り換えができるという視点とフェールセーフ的な視点から、同じ鋼板でも、母材より、添接板でエネルギーを吸収させることが合理的と考えられる。この場合、添接板をエネルギー吸収部材として、母材より先に降伏させるには、母材より添接板の断面を小さくする必要はあるが、全強の 75%以上に設計する規定に従い添接部の強度を確保する考えとも関係して、継手部の強度を確保する考えから添接板は母材より断面を大きくする習慣がある。また、塑性変形を起こすと、ボルトの鋼板がかみ合い、容易に分離することが難しいため、交換部材として考える場合、この交換方法も検討する必要があるものと考えられる。

鋼板の塑性変形には、支圧部の塑性変形、純断面の引張塑性変形、ボルトからの支圧によって生じる鋼板のせん断塑性変形が考えられる。支圧部の塑性変形は、支圧状態の初期に、製作誤差のために一部のボルトだけが支圧状態になって生じる塑性変形から全ボルトが支圧状態になっても生じる塑性変形があるが、その変形量はそれほど大きくならないし、その単独の変形では終局限界状態（破断）に至ることはない。これに対して、純断面の引張塑性変形や、ボルトからの支圧によって生じる鋼板のせん断塑性変形は大きい、その変形で終局限界状態に至るので、その点の注意が必要である。ことに、母材は変形が添接板で両面から拘束されるが、添接板は外面が自由なため、拘束効果が、母材ほど期待できない。この拘束効果を期待するには、座金などで工夫する必要があるものと考えられる。

3-3-4. 高力ボルト継手と高力ボルトによる対策の違い

連結部において高力ボルト摩擦接合継手を用いる場合、引張応力部材ではボルト孔による断面欠損を考慮するため、継手がない場合には断面力に余裕がある位置に継手を配置する。しかしながら、継手部の設計段階で、純断面引張応力に余裕を持たせずにボルトを配置して設計することも多い。そのため、継手部のすべり後の終局耐力は、ボルトのせん断破断や母材のせん断破断ではなく、純断面の引張破断で終局耐力に至る継手が多いものと考えられる。

一方、補修では全断面が破断したケースを補修することは少なく、断面が残っているケースが多いものと考えられる。また、き裂が発生していない建設時の段階では応力に余裕がある場合も多い。こうしたケースでは、補修後の純断面の引張破断で終局限界状態に至らないことも考えられる。

ことに、疲労き裂の対策では、き裂発生前におけるき裂発生点の応力範囲（応力変動幅）の公称値（設計で求められる応力）は小さいことが多い。そのため、残存断面積にもよるが、その構造の静的な設計引張応力はかなり小さい場合も考えられる。高力ボルトによる当て板補修を採用することでき裂発生が問題となる溶接部はなくなり、き裂発生の可能性がある部位の応力集中の問題は高力ボルトによる当て板対策でボルトを締め付けることで解消できることが多い。この場合、全強の 75%の制約がなければ、実応力で設計することで必要ボルト本数などを少なくすることが可能な場合もあると考えられる。ただし、単純な引張りだけでなく、せん断にも抵抗する必要がある場所での補修も多いことが考えられるので、このことも考慮して適切な補修

方法を検討する必要があるものと考えられる。当然のことながら、全強の 75%の規定を守らない場合、この規定の意図と対象のケースではその意図が問題にならないことを再確認する必要がある。

このように、高力ボルトによる対策は、現在高力ボルト継手の規定を用いて行われているが、これに縛られることなく、それぞれの対策で求められている性能を確認し、高力ボルトによる対策の性能を活かす工夫と努力をしていく必要があるものと考えられる。

3-4. 高力ボルトによる対策の適用性

高力ボルトによる対策は、軸力を入れると耐疲労性能も確保でき、様々な補修補強に適用できる。また、損傷部分を含む切断位置を比較的自由に決定できるので、その意味でも適用可能性は大きい。しかしながら、切断して交換する部材が大きくなれば、その分、コストも上がる。一方、損傷部分を局部的に補修しようとする、ボルト孔を明けるスペースが確保できないなどの制約で規定を満足しない場合もある。一方、補修補強で要求される性能は、道路橋示方書に規定されている新橋で要求される性能と異なる場合も考えられる。そこで、本節では、従来の仕様照査型設計法での設計に縛られずに、補修補強で要求される性能を考え、高力ボルトによる対策の適用性を検討する。

3-4-1. 耐震対策

耐震対策で用いられる耐震性能によっては、ある程度の変形は許容できる場合もあり、主荷重に対して摩擦接合で設計された継手のすべり後の性能を期待して設計することが考えられる。この場合の設計法を要求される性能から検討するとその適用性が広がる可能性がある。また、耐震性向上を目的に取り付けられる構造では、現行の設計法で大前提となっている弾性設計の枠を外し、継手部を先に損傷させて、この部分でエネルギーを吸収させる考えも有効と考えられる。こうしたケースでは、現行の継手部の全強に対する設計の考え方からも解放される必要がある。

3-4-2. 応急対策

応急対策では、求められる要求性能を検討することで、必ずしも、新橋に求められる性能まで性能を回復する必要がない。例えば、損傷の進行を抑える目的と安全性を少しでも向上させる目的から行う対策も考えられる。

疲労き裂を例に考えると、ストップホールを明けるだけでも、き裂の進展は抑制され、き裂の再発生までの時間を確保できる。ストップホール部にボルトを挿入し、締め付ければ、さらに疲労き裂の再発生までの時間を延ばすことができる。き裂が長い場合は、ストップホールに近い部分と、き裂の発生点の端部（開口端部）を、片側 2 本ボルトの摩擦接合で拘束しただけでも、その疲労き裂の再発生を遅らせることができる。ことに、ねじりが発生する部分では、面外せん断の開口モード、すなわち、き裂先端付近の変形様式モードⅢを 2 面添接で両側から拘束する意味は大きい。き裂が進展すると、断面欠損部が拡大し、静的な耐力が下がり、その低下速度はき

裂が長くなるほど速くなるので、き裂が短い段階での対処が有効と考えられる。なお、き裂が短い場合、部材が入り組んでいるため施工器具が入らず、ペンシル型のグラインダーでも除去できない場合もあるので、この場合は、施工できる長さに成長（進展）してから施工する。

このように、応急対策は、建設時のレベルに性能を戻すことよりも、損傷の進行を抑えるためや、致命的な損傷を回避するために行う場合もある。こうした補修補強では、現行の規定に縛られずに、その要求性能と、その本来の性能を評価することで、高力ボルトを用いた対策の適用性は広がることが考えられる。

この本来の性能の評価において、高力ボルトを用いた対策では、縁端距離など詳細規定を満足できなかった場合にどのような性能向上が期待できるか、その性能を把握することで、適用可能性が広がることが考えられる。

3-4-3. 経過観察

高力ボルトによる対策は、経過観察が比較的容易にできる場所では、前述のように必ずしも現行の摩擦接合の規定を満足して高力ボルトによる対策が採用できない場合にも、その不足部分を経過観察で補うことで採用できると考えられる。これまで補修補強は安全側の設計が行われ、その限界値は把握されない場合が多い。再補修を余儀なくされた場合に、補修補強の限界値が把握されてきたと言ってもよいのではないかと思われる。再補修になるようなことは避けたいという考えから、過度な安全側の設計も行われることが少なくなかったようにも思われる。このような事情から、補修補強は、新設橋梁と同様に、あるいは、新設橋梁よりさらに限界値が把握されずにきたものと考えられる。これに対して、補修箇所が増大し、維持管理に使える費用に限られる今日では、どこまで性能を回復すべきか、あるいは、ある対策で、どの程度性能が改善されるかを定量的に評価できるようにしておくことは意味あることと考えられる。

経過観察がしやすい場所では、経過観察を併用して損傷に対するリスクに対処して、試験的に低コストで性能回復が期待できる対策を採用することで、コストを抑えた妥当な対策をみつけていく道を拓いていくことができると考えられる。

3-4-4. リベット橋梁の対策

リベット橋梁の対策では、ことに面内の圧縮応力を受ける部分では、両側から当て板を当て、締め付けることで、耐力向上を図ることができる。これは、摩擦接合ではなく、多層の板がバラバラになることや腐食による薄肉化に対して、座屈を回避する対策として適用可能と考えられる。この手法で、リベットの頭が腐食で損傷した場合にも、多層の鋼板が分離することを防止可能である。このように、必ずしも摩擦接合の規定を守らなくても、高力ボルトを用いた対策を有効に活用できる道は考えられる。

必ずしも高力ボルトを用いない場合もあるが、支圧で力を伝達することによる耐力の向上が考えられる。例えば、リベット橋梁では、フランジは、山形鋼材をウェブの両側にリベットで接合し、フランジを形成している場合があるが、この場合、反力は支点上補剛材だけで受け持つと

仮定して設計が行われている。すなわち、溶接橋梁のようなウェブ→フランジ→支承という支圧による力の伝達ではなく、リベット橋梁では、ウェブ→支点上補剛材→フランジ→支承という形で力が伝達すると仮定して設計が行われている。ウェブ下端と両側フランジの側面とフランジ上面あるいは支承上面の4面で囲まれた細い角柱の空間に、これに勘合する角柱を差し込めば、支圧耐力は格段にアップすると考えられる。摩擦接合はすべり荷重を限界荷重とするため、そこで期待できる耐力は低いが、この支圧による伝達を期待することで、低コストで耐力アップを図ることが可能と考えられる。これは、橋の利用状況を踏まえた集約化や撤去の考えも出てきた今日、コストを抑えた耐力向上方法の意味は大きいものと考えられる。この他、補修時のジャッキアップなど施工時の対策としても有効と考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅱ鋼橋編，2002
- 2) 社団法人鋼材倶楽部・日本構造協会接合小委員会：鋼構造接合資料集成ーリベット接合高力ボルト接合一，1977
- 3) 森川久他3名：箱桁面柱を有する鋼製橋脚に発生した疲労損傷の調査と応急対策，土木学会論文集，NO.703/I-59，pp.177-183，2002.4
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅱ鋼橋編，1980
- 5) 北海道土木技術会鋼道路橋研究会：接触式高力ボルトについて・北海道における鋼道路橋の設計および施工指針，1983
- 6) AASHOTO：Standard Specification for Highway Bridges，Twelfth Edition，1983
- 7) DIN 18809：Staebleme Strassen- und Wegbruecken- Bemmesung，Konstruktion，Herstellung，1987
- 8) AASHOTO：Standard Specification for Highway Bridges，Twelfth Edition，2002
- 9) prEN1993-2：Eurocode3 – Part3，Steel Bridges，2003
- 10) 三ツ木幸子，深谷道夫，酒井武志，山口隆司，石井信行：支圧抵抗を期待した高力ボルト継手に関する2，3の考察，鋼構造年次論文報告集，第14巻，pp.647-654，2006.11
- 11) 高井俊和，山口隆司，三ツ木幸子，西川真未：高力ボルト継手の終局挙動における孔変形に着目した2，3の考察，構造工学論文集，Vol.60A，pp.694-702，2014.3
- 12) 三ツ木幸子他三名：ボルトおよびリベット継ぎ手の疲れ試験データベースの作成とその利用：土木学会論文集 第404号/I-11（報告），1989
- 13) 潘超，山口隆司，金銅晃久，三ツ木幸子：疲労き裂の高力ボルト当て板補修による応急補修の設計法の検討，鋼構造年次論文報告集，第21巻，pp.216-222，20013.11
- 14) 三ツ木幸子，山口隆司，潘超，金銅晃久，橋本国太郎：疲労亀裂の高力ボルト当て板による補修補強に関する2，3の考察，鋼構造年次論文報告集，第18巻，pp.507-514，20010.11