

## [討議・回答]

高橋昭一  
橋 吉宏  
志村 勉 共著  
森下弘行  
伊藤博章  
三木千壽

# 「少数主桁橋の横桁取付構造に関する実験 検討」への討議・回答

(土木学会論文集, No.570/I-40 1997年7月号掲載)

▶ 討議者 (Discussion) ————— 渡邊英一 (京都大学)・杉浦邦征 (京都大学)・山口隆司 (大阪市立大学)  
Eiichi WATANABE, Kunitomo SUGIURA and Takashi YAMAGUCHI

## 1. はじめに

著者らは、少数主桁橋の横桁取付部の実物大部分模型に対して載荷実験を行い、4種類の取付構造、特に、疲労特性の観点から高力ボルト接合を基本とした取付構造を対象とし、その適用性を実験的に検討している。さらに、その中でも疲労特性に優れた引張接合を用いた形式(スプリットティー接合、およびエンドプレート接合)に関して、ボルト軸力の変動などを含め詳細な検討を行なっている。結論として、エンドプレート接合以外の接合形式が力学的観点から少数主桁橋の横桁接合構造として採用が可能であるとまとめている。

一般に、引張接合を用いた継手においては、高力ボルトおよびフランジプレート(もしくはエンドプレート)の破壊の組み合わせでその終局状態が決まる<sup>1)</sup>。特に、フランジプレートの局部変形と密接な関係がある高力ボルトの軸力増加に注意を払わなければならない。本論文では、橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)<sup>2)</sup>(以下、指針案と呼ぶ)を参照して、ボルトの降伏時および終局時におけるてこ反力によるボルト軸力の増加について検討がなされているが、作用外力の取り扱いが曖昧で、作用外力とボルト軸力の変化の関係が明確に示されることなく、上記のような結論が導かれている。

構造的に優れているにもかかわらずこれまで橋梁の接合形式として採用されてこなかった引張接合の合理性を広く、正しく理解していただくために本討議を申し入れる次第である。

## 2. 討議事項

### (1) 各部位の応力測定法に関して

本実験的検討では、疲労に対して横桁取付部の有効な構造詳細を明らかにするため、主桁のウェブ、

垂直補剛材、コネクションプレートに発生する局部応力およびボルトの軸力変動に着目している。ひずみゲージにより各部位のひずみ分布を計測し、それを応力-ひずみの線形関係を基に応力換算しているが、このような構造物試験に際しては、試供体を製作する際に用いた鋼材の材料試験を行い、正しい鋼材が使用されているかどうかを確認するとともに、ひずみの応力換算に用いる弾性係数を実測したり、部材の降伏判定のための降伏応力を実測する必要がある。論文中にはこれらに関する記載が無いので、実測の弾性係数、降伏応力などを示して頂きたい。

また、ボルト軸力の計測法<sup>3)</sup>としては、(i)ボルト軸心に孔をあけ、ゲージを挿入して、予載荷によってひずみと軸力のキャリブレーションを行う、(ii)ボルトヘッドにゲージを貼り、予載荷によってひずみと軸力のキャリブレーションを行う、(iii)ボルト軸平行部にゲージを貼り(少なくとも90°ピッチで4枚は必要)、ボルト平行部の断面積およびボルトの弾性係数からひずみを軸力に換算する、などが挙げられる。本論文では、どの手法を用いたのかを明確にして頂きたい。

### (2) てこ反力係数の算定に関して

指針案が参照している加藤-田中式は、主として建築構造物を対象としたスプリットティー継手の載荷実験に基づいたものであり、スプリットティー接合のフランジプレートの板厚比の適用範囲は、1~2(もしくは1/2)である。指針案では、対称なフランジプレートを有するスプリットティー接合を対称としたFEM解析により加藤-田中式において仮定するてこ反力作用位置の妥当性を確認し、てこ反力係数の算定にその経験式を採用している。しかし、本研究で対象としているようなフランジプレートの板厚が異なる場合のてこ反力作用位置の仮定の妥当性については何ら確証が無い。その点について詳細

な記述が求められ、それをもって安全性等の議論ができると考えられる。

### (3) スプリットティー接合に関して

著者らは、図-15に示す実験結果に基づきスプリットティー接合が適用可能であるとしている。特に、図中に示された作用外力とボルト軸力増加に関する推定曲線との比較からボルト軸力の増加が小さく、適用可能と結論づけている。図-15の横軸は、引張力をスプリットティー接合に使用したボルト本数で割ったボルト1本あたりの引張力として評価されているが、個々のスプリットティー接合部に作用する引張力が正しく評価できなければ、推定ボルト軸力曲線との比較は意味をなさなくなる。したがって、下記の理由により、引張力の算出法とこの評価法の妥当性を示すべきである。

- ・2個所のスプリットティー接合部に作用している引張力の合力の算出法：横桁に載荷した荷重を基に横桁取付部に作用する曲げモーメント、せん断力は算定できるが、スプリットティー接合部に作用している引張力の合力は横桁のフランジプレートより添接板を介してティーウェブ（コネクションプレート）に働く断面力でなければならない。曲げおよびせん断力を受ける部材の接合部の設計の基本仮定として横桁の上下フランジの接合部が曲げモーメントを伝達し、横桁のウェブの接合部がせん断力のみを伝達するとした考え方が多用されるが、これはあくまでも設計の簡易化のための仮定に過ぎない。
- ・2個所のスプリットティー接合での引張力の分担率：さらに、垂直補剛材を挟んで、2列ボルトと3列ボルトを用いたスプリットティー接合が用いられており非対称の構造形式となっている。したがって、横桁のフランジからの伝達力として引張力が明らかにされたとしても、この引張力をふたつの異なるスプリットティー接合へどのように分担させるのか、その分担率を、ボルト本数の比を基に2:3とする根拠はない。
- ・たとえコネクションプレートにひずみゲージを貼り、その断面積および弾性係数から引張力を換算しようとしても、応力集中部であるため、その換算は非常に困難と考えられる。

ここでは、指針案と対応させるために外力をボルト本数で割ったものを横軸にしたと本論文では述べられているが、著者らも認めているように、ボルト軸力の増加量が位置によって異なっており、指針案が想定しているモデルとは異なっている。したがって、指針案のような引張力をボルト本数で割ったボ

ルト1本あたりが分担する平均的な引張力を用いて評価することはできないと考えられる。

また、比較対象とされた作用外力とボルト軸力増加の推定曲線に関しては、指針案に規定の無い領域に対しても関係が示されている。すなわち、ボルト降伏時 $B_y$ からボルト終局時 $B_u$ （破断）までの作用荷重-ボルト軸力の関係式の求め方は、指針案に規定されているが、本論文では導入ボルト軸力 $B_0$ からボルト降伏時 $B_y$ までの関係をも含め推定曲線が図中に示されている。この推定曲線の算定法に関する明確な記述が無い。

以上の理由により、実験によって得られたボルト軸力変動を明確に定義されていない作用力に基づいた推定曲線との比較を行い、その結果を基に横桁取付構造の妥当性を結論付けるには飛躍がありすぎると考えられる。当然、2列ボルトと3列ボルトのスプリットティー接合における各ボルトの軸力変化の優劣を議論することは不可能であり、結果的にそれらの相対的な安全性を議論することはできないと考えられる。

一方、裏当て板の有無によるボルト軸力の変化はほとんど同じであり、裏当て板がない場合でも十分適用可能と結論づけられているが、裏当て板が無い場合、板（主桁ウェブ）の局部変形によりボルト軸力が増加したという考察との矛盾がある。一般には、ボルト軸力の増加は、スプリットティー接合のフランジプレートの局部変形および相手側（取付側）の板の局部変形に左右されるため、裏当て板の効果について、物理現象に照らし合わせて詳細な検討をすべきである。また、裏当て板の構成（一枚もしくは二枚）についての検討は、主桁ウェブに発生するひずみ計測に基づいているが、垂直補剛材の裏側において主桁ウェブのひずみ計測を行っており、主桁ウェブの正確な局部変形を考察するに値するひずみが得られているのか明らかにすべきである。

### (4) エンドプレート接合に関して

エンドプレート接合に関しても、既に述べたスプリットティー接合に関する問題点と同様に、考察対象となる図-21においての作用荷重の定義・推定曲線の決め方などが、議論に値するものであるとの確証が必要である。

さらに、エンドプレートの板厚は、論文中に示されているてこ反力係数から判断すると十分に厚いと思われ、てこ反力によるボルト軸力の増加はほとんどないと考えられる。しかしながら、図中のA点のボルトにおいては、載荷直後から線形的に軸力が増加しており、この原因に関して考えられる原因を示

していただきたい。一方、B点やD点のボルトにおいては、フランジ板が厚い場合の軸力変化の挙動を表しているように考えられる。さらに、A点のボルトにおいては、B点のボルトの約2倍以上の軸力増加を生じており、著者らが述べているようなモデルの製作精度のみが主な原因であるとは考えられない。

また、図-20に示されたボルト軸力の減少に対して、何らかの考察が必要と考えられる。初期導入軸力によって接合部剛性が高まるといった利点が失われるため、どのような物理的現象によるものか提示していただきたい。一般に、接合する板が引張力により降伏すると、板厚が減少し、ボルト軸力が抜けるといった報告はある<sup>1)</sup>。

さらに、スプリットティー接合との相対比較において、スプリットティー接合では、2列のボルト配置にもかかわらず、エンドプレート接合では、ボルトが1列配置の合計4本であり、しかもM22が用いられているなど(スプリットティー接合ではM24を合計10本用いている)、構造的に不相当なケースを比較対象とされている。検討対象とされた構造形式をどのようにモデル化し、どのような限界状態を基に構造詳細を決定したかの議論が、明確にされない以上、エンドプレート接合の適用可能性を否定できない。

なお、エンドプレートを薄くして、エンドプレートの全塑性モーメントから設計外力を求めるとした記述は、合理性に欠け、削除すべきと考えられる。

### 3. 誤りの訂正

論文文中に見られた細かい誤りと思われる点について以下に示す。

(i) 頁111の右上3行目のてこ反力係数であるが、指針案における(3.2.2)式によれば降伏時のてこ反力係数は0.316になると思われる。0.288は実験結果から求められたものであろうか。

(ii) 頁111の右上4行目で、指針案では裏当て板の必要性に触れられていないと述べられているが、指針案の4.1.5には被接合部の補強について規定されてお

り、十分な補剛をするものと決められている。

(iii) 図-16において、ティーウェブの内面曲げ剛性と主桁ウェブの面外たわみの曲げ剛性の大小から、図中に示された局部変形の概略は、物理的に不合理と考えられる。また、作用外力として、 $P$ は $4P$ と $6P$ の間違ひではないか。

(iv) 図-17において、ボルト軸力の作用方向は、スプリットティー接合の対称面上でその法線方向と一致しなければならない。ただし、ボルト軸線は、曲げ作用により曲率を有し、対称面上でのその接線方向は、対称面の法線方向と一致する。

(v) 図-22において、局部変形の概略は、物理的に不合理と考えられる。

### 4. おわりに

本論文は、橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)を参照しつつ、構造的に優れているにもかかわらずこれまで橋梁の接合形式として採用されてこなかった引張接合の合理性を広く世に知らしめるには、的確な報告と考えられる。しかし、引張接合を議論する上で、最も重要なボルト軸力の増加の評価に関して余りにも曖昧な記述が多く、局部応力およびボルト軸力の計測法に始まる実験計画に関した多くの疑問点に対して詳細な回答が望まれる。

### 参考文献

- 1) 渡邊英一, 杉浦邦征, 山口隆司, 葛西俊一郎: 高力ボルト引張継手におけるボルト周辺部の離間現象と引張剛性, 構造工学論文集, 土木学会, 第40A巻, pp.153-162, 1994年3月。
- 2) 日本鋼構造協会: 橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案), 1993年2月。
- 3) 黒田充紀, 広橋 涉, 増田陳紀: 2種類の高力ボルト軸部ひずみ測定法の妥当性について, 土木学会論文集, No.441/I-18, pp.183-198, 1992年1月。

(1998. 1. 21受付)

▶ 回答者 (Closure) ————— 高橋 昭一 (日本道路公団)・橋 吉宏 (川田工業)・志村 勉 (川田工業)  
森下 弘行 (川田工業)・伊藤 博章 (川田工業)・三木 千壽 (東京工業大学)  
Shyoichi TAKAHASHI, Yoshihiro TACHIBANA, Tsutomu SHIMURA,  
Hiroyuki MORISHITA, Hiroaki ITO and Chitoshi MIKI

### 1. はじめに

本研究の主題は、少数主桁橋を対象とした主桁と

横桁取付部の構造に対して、安全性と適用性を検討しようとするものである。ここで、4タイプの構造を検討対象としており、研究の主題は引張ボルト形

式に限定しているものではない。検討対象とした接合方法のうち討議の対象となったスプリット・ティー接合とエンドプレート接合について、討議者は引張ボルト接合の合理性を示し、力学的挙動を明らかにした上で実構造物への適用をすべきであるとの立場をとっていると考えられる。本研究は、討議者が引用している日本鋼構造協会の橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案) (平成5年2月、以下 JSSC指針案と呼ぶ) では適用外と考えられる版剛性の小さい主桁ウェブと横桁との接合部に対して、引張接合の長所を生かせるとの判断から、実物大モデルの実験により適用性を確認したものであり、架設時を含めた安全性の照査を目的とした継手部およびその周辺部の局部応力の把握が主なる検討項目である。引張ボルト形式以外の横桁取付部の構造に対する性能比較もこのような観点から行っており、研究のスタンスが討議者とは基本的に異なっている。したがって、引張ボルト形式に関して本論文はこの範囲における報告であることをご理解していただくとともに、この範囲では JSSC指針案で適用外とされている対象の接合に引張ボルト形式を用いるにあたっての課題を指摘したに留まっている。

## 2. 討議事項について

### (1) 各部位の応力測定法に関して

構造物試験に関して、鋼材の材料試験を行う必要があるとのことであるが、試験の主旨からはミルシートの照合で十分であると考え、本試験ではミルシートによる照合で材料試験に替えている。なお、弾性係数については、鋼材によるばらつきは極めて小さく個別に求めるようなものではなく、降伏応力についてもミルシートの値は信頼できると考えている。また、正しい鋼材かどうかについては、鋼材購入のシステムからミルシートと鋼材にまちがいが生じることはない。

ボルトの軸力計測法については、文献1)に示されている軸表面にゲージを貼る方法で軸力を計測した。この軸力計測方法は、一部でボルト製造時の品質管理にも用いられている方法であるので、本論文の中では記述する必要がないと判断した。ただ、討議で指摘のゲージの枚数であるが、文献1)では2枚のひずみゲージによるひずみ計測法について、得られるひずみ値が軸部の平均ひずみとみなせることを述べており、2枚のひずみゲージで計測しても問題ないと考えた。

### (2) てこ反力係数の算定に関して

本文中で述べているように、JSSC指針案は本研究で対象としている版剛性の小さい主桁ウェブと横桁との接合には適用範囲外である。これは、討議事項のようにてこ反力係数の見積方法がこのような部位を対象としていないことによる。しかし、本研究ではこのような接合に対しても引張ボルト形式は適用可能と考え、その安全性を確認するために検討を行ったものである。討議での指摘のように、JSSC指針案に対応するような検討は本研究の目的ではない。本研究は、実物大モデルで直接的にその安全性を確認しており、見積もったてこ反力係数に対応するボルト軸力の変動以下であれば、少なくとも実橋に適用するには安全性が担保されると判断した。

### (3) スプリットティー接合に関して

本論文では、設計断面力に対して許容応力度あるいは軸力を超えるか超えないかで、実橋への適用の可否を判断することになっている。これは、試験によって得られたボルト軸力の変動に対して、設計で見積もったてこ反力係数に対応するボルト軸力の変動の許容値との比較により行うことができると考えた。設計で見積もったてこ反力係数に対応するボルト軸力の変動の許容値を設定するために目安としたのが推定ボルト軸力曲線である。この推定曲線の算定に関しては、版剛性の小さい主桁ウェブと横桁との接合に対して適用範囲外であるものの明らかに安全側の適用であることや、本試験の第一の目的が設計された構造の安全性を照査することであることを考えると、推定曲線にある程度の誤差を含んでいても、設計者が実橋への適用の可否を判断できると考え、本文中に示した方法で推定曲線を設定した。ここで、実橋への適用の可否の判断基準としては、実験値が推定曲線を越えたとしても、許容外力  $P_a$  に対応するボルト軸力の変動値以下であれば、実橋に適用してもよいとした。

討議事項の図-15のボルト1本あたりの外力  $P$  の算定法については、本文中の説明が不十分であったこともあり、討議事項に一部誤解があると思われる。本文中に「ボルト1本あたりの外力  $P$  は、継手に作用する引張力をボルト本数で割った値」と記述しているが、これは、2箇所のスプリット・ティー接合に引張力が等しく分担されるとしたうえで、それぞれの箇所におけるボルト1本あたりの外力を求めたものである。したがって、分担率そのものについてはここでは考慮していない。また、スプリット・ティー接合部に作用する引張力については、設計の基本どおり安全側を見込んで、上下フランジの接合部

が曲げモーメントを伝達するとみなして引張力の評価を行っている。実際は、横桁のウェブも引張力の伝達に寄与するため、ティーウェブに働く引張力は過大に評価されているものと推測される。しかし、上記した許容外力  $P_a$  に対応するボルト軸力の変動値を安全性の目安にすると、ボルト1本あたりの外力  $P$  の算定方法を厳密に議論しなくても、実橋への適用の可否は判断できるものと考えられる。ボルト1本あたりの外力  $P$  の算定方法として、JSSC指針案と対応して外力をボルト本数で割って評価したのも、同様な理由による。ただ、討議での指摘のように、2列ボルトと3列ボルトの優劣についての議論は、さらなる基礎的な研究がなされた上で議論する必要があるものと考えられる。

裏あて鋼板の有無に関する検討であるが、主桁ウェブの板厚が22mmの場合について裏あて鋼板が無くても安全であるとの結論を得ているため、論文の流れからはこの検討結果の報告は不要であったかもしれない。討議事項は、裏あて板の有無によるボルト軸力の変化と主桁ウェブで計測されたひずみの変化についての相関性を求めているが、本試験で得られたデータからは、そこまで考察できるまでには至っていないのが現状である。

#### (4) エンドプレート接合に関して

考察対象となる図-21に対する討議事項については、スプリット・ティー接合の場合と同様の回答である。

討議事項の左右対称軸における軸力の変化のばらつきについて、モデルの製作精度以外の理由を求めているが、著者らは、製作精度が軸力の増加に対して非常に大きな問題であると考えている。もちろん、このような現象をおこす原因を究明することが重要であることは認めるが、本研究においては実橋と同じように製作し組立された接合部の挙動として捉えて安全性を評価すべきであると考えた。模型において使用している鋼材の板厚、材質および溶接方法は実構造物に合わせており、T型の垂直補剛材はビルトアップにより製作し、接合面については機械切削仕上げは行っていない。したがって、実構造物である程度の溶接ひずみが残っていることを想定したものであり、ここで生じている軸力の変化については、実構造物と同じ程度であると考えられる。機械切削仕上げを行わないことについては、対応するような製作時および架設時の精度管理を考えるとコストの上昇が甚だしく、経済性を目的とした少数主桁橋に対して現実的でないためである。

また、図-20に示したボルト軸力の減少については、圧縮側控え材付近のエンドプレートや垂直補剛材の

フランジプレートが圧縮力を受けて縮んだと解釈すれば、特に考察すべきことではないと考えられる。

エンドプレートとスプリット・ティー接合に採用したボルトのサイズと配置についての討議であるが、ボルトのサイズについては、架設時の品質管理から職人のミスが少なくなるように、主桁に直接連結するものについてはM24で統一し、横桁のフランジおよびウェブに直接連結するものについてはM22で統一しており、ボルトの配置については物理的な条件から決定している。したがって、力学的合理性から構造を決めている訳ではない。ただし、力学的には数を減らす方向も考えられるが、継手部の安全性からはこの程度の数が必要と判断される。

また、エンドプレートを薄くして云々については、文献2)を参考に考え方の一例を紹介したまでのことであり、エンドプレート接合に関する詳細については文献2)を参照願いたい。

#### 3. 誤りの訂正について

(i) 頁111のてこ反力係数について、校正時のチェックミスで0.238が誤りで0.218である。

(ii) 裏あて鋼板を補強とみなすか解釈の違いによるが、垂直補剛材自体も補強材とみなすこともできる。いずれにしても、JSSC指針案は、はりとはり、あるいは、はりや柱など同程度の剛性を有する部材相互の接合を対象にしているため、ここで解釈について議論するのはあまり意味がないものと思われる。

(iii)~(v) 本文中の説明を補足するために描いた局部変形の概略図に細かい配慮を欠き、論文を読みづらくしていることに対してお詫び申しあげる。

#### 4. おわりに

本研究は、ホロナイ川橋の詳細設計の段階で構造選定を行うために実施した検討結果をまとめたものである。この過程の中、すなわち「ものづくり」の過程の中で、許された時間と限られた費用内で構造を決定しなければならないことが条件であり、設計者としては安全な構造を提供することが第一の目的になる。引張ボルト接合の合理性を示し、力学的挙動を明らかにして理論を整備した上で実構造物への適用を行うのは理想的に思えるが、これに固執するのも現実問題としてむずかしい。討議者とはこのようなスタンスの相違があるものの、研究者の立場として横桁の接合法に関して本論文を詳細に検討していただいたことに感謝する次第であり、引張ボルト形式を版剛性の小さい主桁ウェブと横桁との接合に

用いるにあたっての基礎的な研究や設計法の整備については、今後の課題とさせていただきたい。

#### 参考文献

- 1) 黒田充紀, 広橋渉, 増田陳紀: 2種類の高力ボルト軸部ひずみ測定法の妥当性について, 土木学会論文集, No.441 / I-18, pp.183-198, 1992年1月,
- 2) Kulak, G.L., Fisher, J.H. and Struik, J.H.A.: Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, JOHN WILEY & SONS, pp.289-322, 1987.

(1998. 7. 8受付)