

## 4. 鋼橋の維持管理に配慮した設計・施工の留意点 —過去の補修・補強事例からのフィードバック—

保全委員会 保全技術小委員会

### 1. はじめに

高度経済成長期に架設された多数の鋼橋が我が国にあり、20年後には建設50年以上の橋梁が全ストック量の半数近くになることが予想され、橋梁の高齢化に伴うこれらの維持管理が重要視されています。一方、鋼橋の維持管理に携わる技術者においては、高度経済成長期に活躍したベテラン技術者から若手技術者への世代交代の時期が近づいており、経験工学ともいわれる保全工事においては、その技術および経験の伝承は重要な課題となっています。本発表は、この技術および経験伝承の第一歩として、若手技術者を対象として、過去の事例からフィードバックした基本および初歩的な保全設計・施工の留意点をまとめたものです。

### 2. 弱点を知って設計・施工に留意しよう！

#### 2.1 最も損傷事例が多いのはここだ！

—劣化損傷の常習犯：桁端部—

図-2.1は一般的な鋼桁の損傷マップです。床版、添接部、主桁・横桁交差部等の亀裂などいろいろな箇所に損傷は発生していますが、その多くは当該橋梁の置かれた立地条件（交通量の多寡、山間部か都市部かなど）に大きく左右されると考えられます。ただ、立地条件によらず損傷の発生事例が多いのが桁端部と言えます。

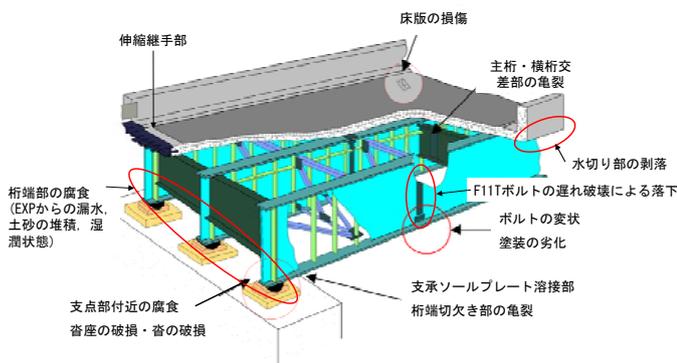


図-2.1 損傷マップ例（鋼桁）

図-2.2は直轄国道の鋼橋の箇所別損傷数をまとめたグラフです。最も損傷数の多いのは「主桁」、次に

「支承」の順となっています。また、損傷の種類としてはほとんどが腐食となっていることが判ります。これらの損傷箇所のうち、「主桁」「支承」「伸縮」「落橋防止」の4つを「桁端部」としてまとめて整理したのが図-2.3のグラフです。桁端部の損傷数は全体の64%を占めており、桁端部の点検・補修がいかに大切であり、なかでも腐食を防ぐ工夫が重要であることが判ると思います。

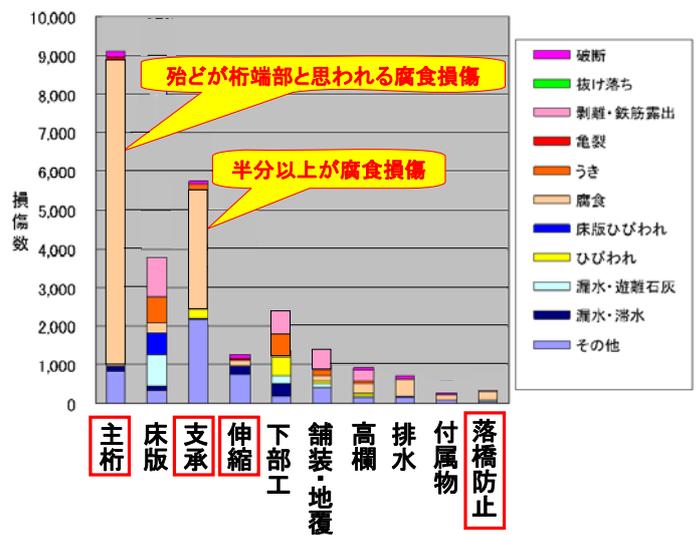


図-2.2 鋼橋の箇所別損傷数

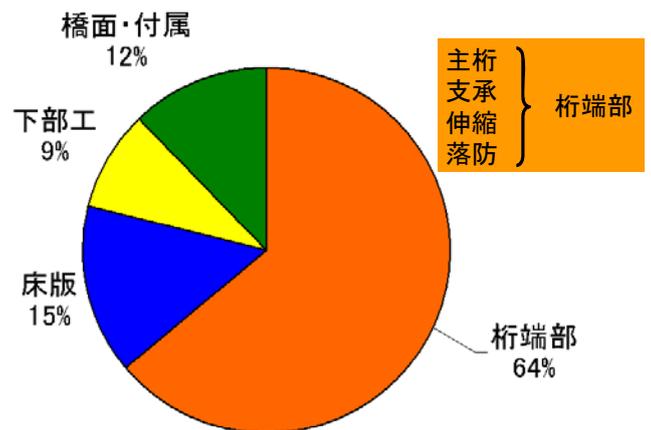


図-2.3 桁端部に着目した箇所別損傷発生率

桁端部とはどの部位になるかを図-2.4に示します。また、桁端部の損傷例を写真-2.1から写真-2.4に示します。

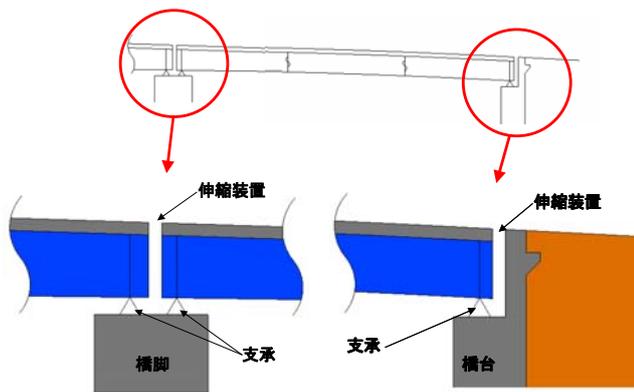


図-2.4 桁端部

写真-2.1 は、主桁や端横桁の部材が腐食し、支承にも錆が発生しています。また、橋台パラペット部分のコンクリートは鉄筋が露出しています。写真-2.2 は腐食により桁端部に断面欠損が生じた事例です。こうなると当て板も困難であり、腐食部を切り取り、部材取り替えを行わなければなりません。写真-2.3 は支承の腐食事例です。腐食が原因で固結し、回転、移動機能は喪失していると思われます。この様に支承の回転が拘束されると、写真-2.4 のようにソールプレート前面に亀裂が発生する場合があります。この亀裂の発生は、活荷重条件や亀裂発生箇所の溶接品質など多くの要因によるものですが、支承の回転拘束も大きな要因の一つと考えられます。

【なぜ桁端部に腐食・損傷が多いのか】

図-2.5 に桁端部の腐食・損傷要因図を示します。桁端部は桁の伸縮を吸収する部位であるため、一般的に伸縮装置が設置されています。伸縮装置は温度変化等により伸縮しながら、常に輪荷重の衝撃を受ける部位であり、経年によりある程度劣化・損傷していくことは仕方のない部位と言えます。その伸縮装置の劣化・損傷により、橋台・橋脚上に土砂、雨水が流れ落ち、支承廻りに土砂の堆積、雨水の滞水ができるようになります。また、桁端部は一般的に狭隘、閉鎖的な空間で風通しが悪い上、メンテナンスもしにくく、一度堆積・滞水した土砂・雨水はそのままの放置されるケースが多く、過酷な腐食環境下におかれるため、発錆・腐食が生じやすく、また腐食の進行も速いものと考えられます。以上の原因を以下にまとめます。

①伸縮装置の劣化・損傷

- 路面からの土砂・雨水の流れ落ち
- 土砂の堆積・雨水の滞水



写真-2.1 桁端部の損傷（腐食）



写真-2.2 桁端部の損傷（腐食欠損）



写真-2.3 桁端部の損傷（支承の腐食）



写真-2.4 桁端部の損傷（ソールプレート前面の亀裂）

②閉鎖的空間・狭隘（風通しの悪さ）

堆積物の滞留

湿気の滞留

メンテナンス性の悪さ

【桁端部の損傷・劣化を防ぐには】

①伸縮装置の劣化・損傷

写真-2.5 から写真-2.7 に伸縮装置の損傷・劣化例を示します。

非排水型伸縮装置は、水や土砂が漏れないよう、遊間にスポンジや止水ゴムが設置されています。しかし、経年劣化によりこの部分が破損して、路面の水や土砂が漏れることがあります（写真-2.5）。また、以前は排水型の伸縮装置もありました。止水ゴムなどがなく、下から眺めるとフィンガーの間から空が見えます（写真-2.6）。この写真は桁を塗り替えた直後のもので綺麗ですが、いずれ水が流れてきて桁端部が腐食することになります。伸縮装置自体に損傷はないのですが、止水ゴムなどが付いた非排水型の伸縮装置に取り替えるか、または非排水化を行う必要があります。写真-2.7 は伸縮装置からの漏水により脚上に土砂が堆積した例です。かなりの土砂が堆積しており腐食も始まっています。

伸縮装置の劣化原因としては、大きく3点が挙げられます。1点目は、通行車両による繰り返される衝撃、2点目は、過積載車両による過大な衝撃、3点目は、伸縮の繰返しおよび経年によるゴムやスポンジ部材の劣化です。これらは伸縮装置の機能およびその状況から、避けることが出来ないのは事実です。そのため、伸縮装置の劣化・損傷に対しては、定期的な点検と交換が必要であり、重要なポイントと言えます。

定期的な点検と修理・交換を容易にするためには、

定期点検を容易にする

点検の都度、足場を設置しなくても良いように、検査路・梯子等を設置し、伸縮装置下側にアクセスできるようにしておく

補修・交換を容易にする

レーンマーク位置で伸縮装置を分割しておくなど交換しやすい構造の採用

など、将来のことを考慮して計画をすれば、桁端部の劣化・損傷をかなり防ぐことができます。

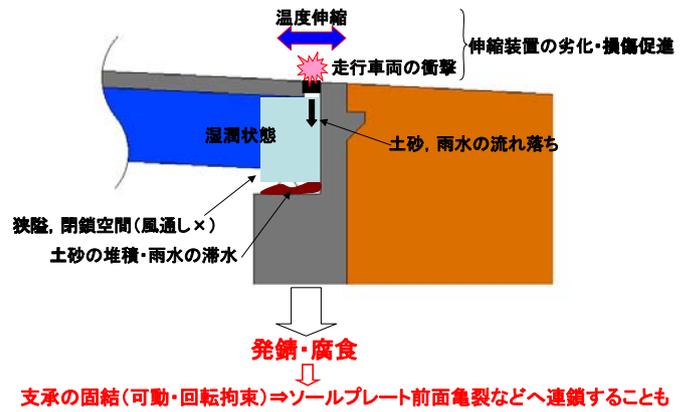


図-2.5 桁端部の腐食・損傷要因



写真-2.5 非排水型伸縮装置の劣化



写真-2.6 排水型伸縮装置（垂れ流し）



写真-2.7 橋脚上の土砂の堆積

## ②閉鎖的空間・狭隘（風通しの悪さ）

桁端部は、主桁に囲まれた閉鎖的空間のうえ、限られたスペースに支承や落橋防止、移動制限などが配置された狭隘な場所となっています。

写真-2.8、2.9は狭隘な桁端部の事例です。見るからに風通しが悪く、メンテナンスも困難な状況になっています。また、後から取り付けた落橋防止や移動制限により、更に狭隘になっている例も多くあります(写真-2.10、2.11)。



写真-2.8 風通しの悪い桁端部



写真-2.9 狭隘な桁端部



写真-2.10 落橋防止の設置でスペースのない例1



写真-2.11 落橋防止の設置でスペースのない例2

桁端部の閉鎖的空間、狭隘な状況に対しては、新設時から、それらを配慮した設計をすることが必要で、対策としてもっとも効果的です。図-2.6に新設橋梁に望ましい桁端構造を示します。

桁の移動量から遊間を決め、普通に計画すると配慮前の図のように、主桁と橋台パラペットの隙間が狭く、また桁下空間も狭くなってしまいます。

改善方法として、まず、橋台天端を広くして、支点位置を支間中央側に移動します (Step1)。

遊間が広がるため、主桁の上側部分と床版を少し延ばします。また、橋台パラペットの上側も拡げて遊間を計画どおり確保します。そうすることで、スペースができ風通しが良くなります (Step2)。

更に、橋台の天端面を下げます (Step3)。

下げた分を補うため、沓座を設けます。沓座は支承位置に設けるため、主桁間では風通しが良くなります。また、支承の点検・交換などのメンテナンスも容易となります (Step4)。

更に、下部工天端面に、排水勾配を設けることで効果アップが期待出来ます (配慮後)。

これらの方法は、新設橋の設計時に計画しなければ難しい方法ですが、これから新設橋梁を設計する場合は是非配慮してもらいたい構造です。

既設橋梁の場合、桁端部の空間を広げることは困難ですが、図-2.7のように、桁端部に切り欠きを設けること、単独沓座を一体型沓座にする方法等(写真-2.12)で、空間の確保や水はけの効率化を図ることが可能となります。また、落橋防止構造などを設けるときは、その後の維持管理を配慮して配置することが重要です。

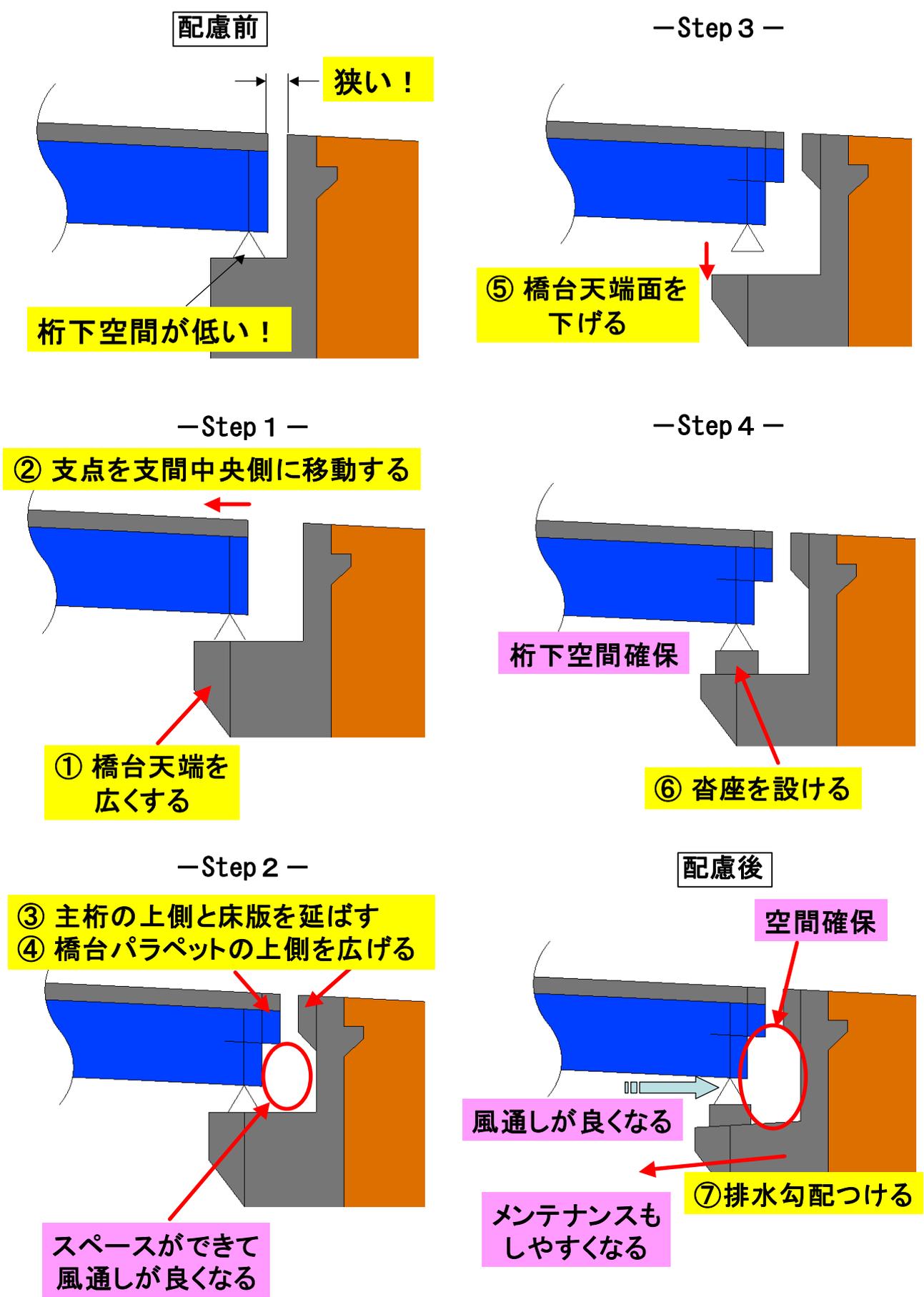
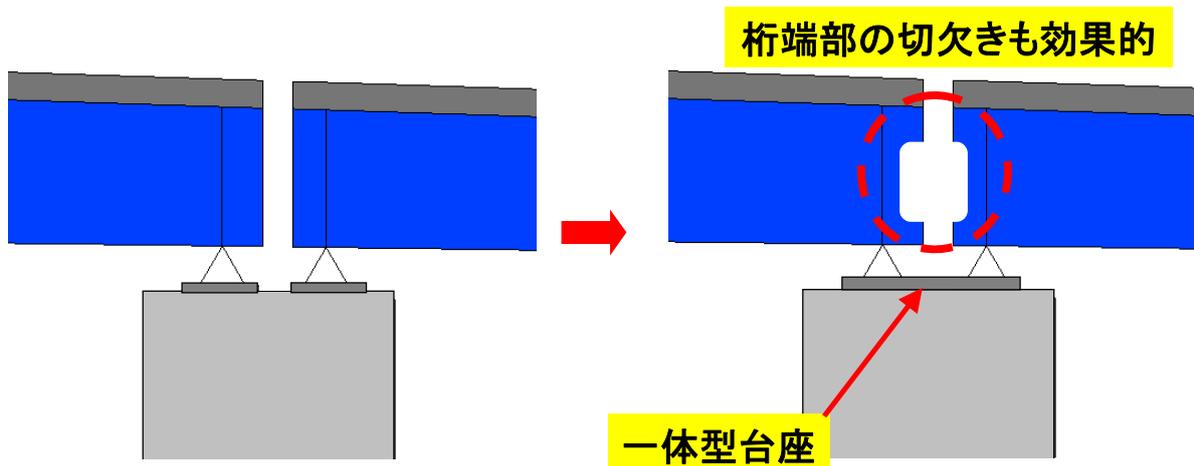


図-2.6 新設橋梁に望ましい桁端構造



**落橋防止装置の配置の際は、維持管理を配慮！**

図-2.7 既設橋梁に対する配慮例



写真-2.12 一体型台座の施工例



写真-2.13 リベットの施工

2.2 昔の橋はこんなところに注意！

—今は使われていない材料・構造—

(1) リベット

溶接，高力ボルトが使用される前の一般的な継手方法として使われてきた材料にリベットがあります。写真-2.13にリベットの施工状況を示します。釜で熱したリベットをリベット孔に挿入し，リベットハンマーにより打撃してかしめています。熟練した技術が必要であるうえ，労力もかかるためリベットは嫌われて，技術の進歩とともに溶接，高力ボルトが使われるようになり，昭和50年初頭を最後にほとんど使用されなくなりました。現在の示方書では，鋼橋の材料からもリベットは削除され，その設計方法の記述も，古い文献を探さないと見みることは出来ません。

図-2.8にリベット継手の模式図を示します。リベットは摩擦接合ではなく，ボルト軸部のせん断とボルト孔壁との支圧により抵抗する継手です。模式図にあるように赤熱されたリベットを，リベット径+1.5mm程度のリベット孔（22φの場合23.5φ孔）に挿入，打撃によりリベット頭を成型すると同時にリベット孔内の隙間が充填され，支圧接合が有効となります。

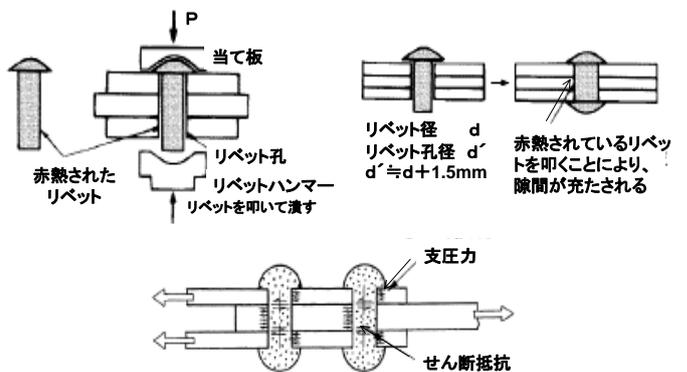


図-2.8 リベット継手の模式図

リベット自体は強度的にも材料的にも特に問題はありませんが、リベット継手部に対して補修・補強を行う場合には、その取扱に留意が必要となります。

#### 【リベットの留意点1ー腐食リベットの取替え】

写真-2.13のようにリベット頭が腐食して欠損している場合、その周辺の母材も腐食し、あばた状になっているケースが多く、この様なリベットをHTB等に取り替えると、母材の凹凸からボルト孔に水が浸入し、逆に腐食が進行するという事例も見受けられます(図-2.9参照)。



写真-2.13 リベット頭の腐食例

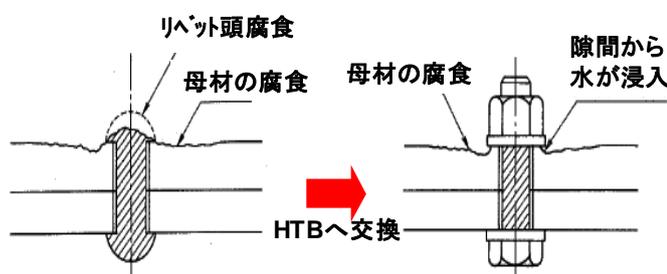


図-2.9 リベット交換後の水の浸入

リベット頭がなくなっても、リベットが緩んでない場合は、継ぎ手としての機能は、ほとんど低下しないことがわかっているので、ボルトに取り替えるよりも、それ以上腐食を進行させない対策を行う方が好ましい場合も考えられます。また、ボルトに取り替える場合は、ボルト廻りをシールするなどの防水対策が必要となります。

#### 【リベットの留意点2ー腐食リベットの取替え】

次にリベット取り替え時の留意点としては、リベットを高力ボルトに取り替えた場合、高力ボルト継手として必要な摩擦係数0.4を確保することが困難な場合があることです。

リベットの接合面には防錆塗料として鉛丹錆止め塗料が使用されていることが多く、その摩擦係数は0.3程度ともいわれています。

接合面の全てのリベットを取り替える場合は、接合面の処理、ボルトのサイズアップ、打込み式高力ボルトの使用などを検討する必要があると考えられます。

#### (2) 高力ボルト F11T

昭和40年代後半～50年代初頭にF11Tの高力ボルトが盛んに使われました。現在多く使用されているF10Tと比較して1割程度高強度のため、設計上ボルト本数の削減が可能という理由からです。F13Tの更に高強度なボルトも一時期使用されていました。

しかし、ある時間が経過した後、突然、脆性的に破壊する現象が発生しました。写真-2.14のように応力集中する部位でないと破断しています。これは高張力鋼特有のもので、「遅れ破壊」と呼ばれている現象です。F13Tは、使用后1年程度でこの現象が発生したことから、使用された時期はわずかでしたが、F11Tに関しては多くの工事で使用されており、現在でも多くの継手に残されています。

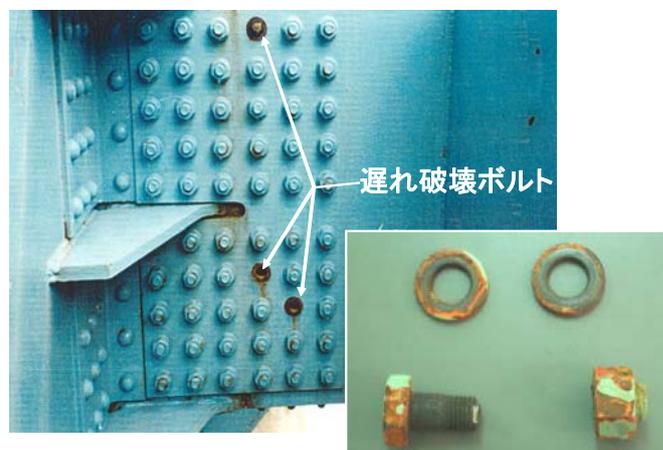


写真-2.14 F11T高力ボルトの遅れ破壊

F11T高力ボルトの使用の確認方法としては、図面で確認します。このとき「3種」という表示がされている場合があります。最終的には現地でもボルトヘッドマークを確認します。高力ボルトには、ボルトの頭とその種類が明記されています。写真-2.15は、F11T高力ボルトのヘッドマークです。塗装され見づらいですが、近寄れば確認することが可能です。

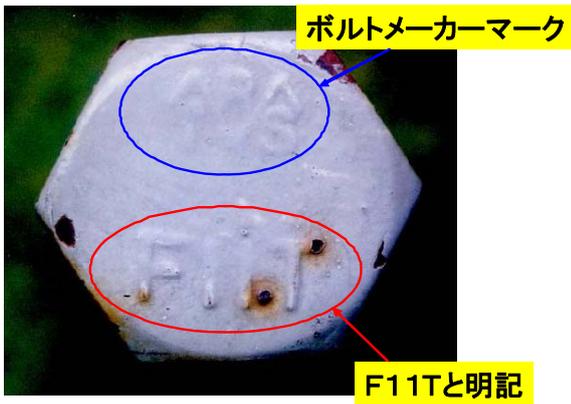


写真-2.15 F11T ボルトヘッドマーク

F11T ボルトの使用が確認された場合、破断ボルトの落下による第三者被害を防止することが重要です。方法としては、専用の落下防止キャップを取付ける方法(写真-2.16)やネットで添接部を囲む方法(写真-2.17)などがあります。

抜本的対策は、ボルトを取替えることとなります。但し、F10Tに替えると継手強度が下がるので、継手の応力照査が必要となります。応力照査の結果次第では、ボルト径を上げるなどの処置が必要となります。

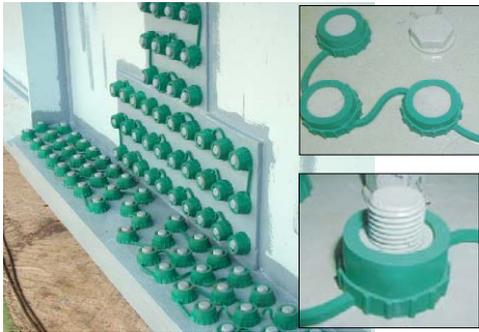


写真-2.16 落下防止キャップ取付

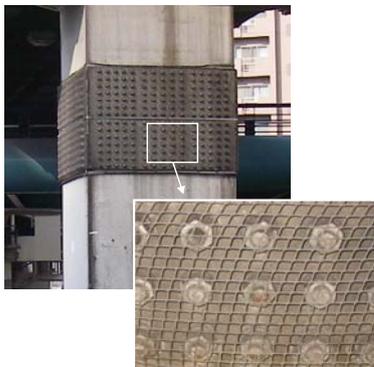


写真-2.17 ネットによる落下防

### (3) 古材 (硫黄含有量の多い鋼材)

鋼材に含まれた硫黄の量は、溶接性に大きく影響し、硫黄含有量が高い鋼材は、溶接性に劣るだけでなく、

溶接を行うと高い拘束力により図-2.10のようなラメラティアと呼ばれる板厚方向の層状の割れが発生する可能性も高くなります。

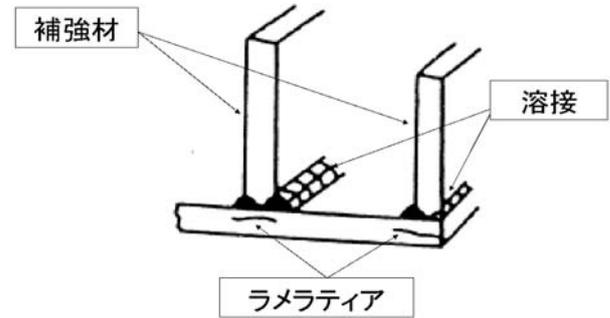


図-2.10 ラメラティア

図-2.11は、高炉5社の鋼材の硫黄含有量に関するグラフです。硫黄の含有量が、鋳造方法の変化に伴い1970年代半ば頃から急激に減少しており、現在の鋼材は、1970年以前の鋼材に比べると格段に溶接性は向上しています。

溶接は非常に便利な継手方法ですが、1970年代以前の材料に対しての適用は、慎重な検討が必要です。

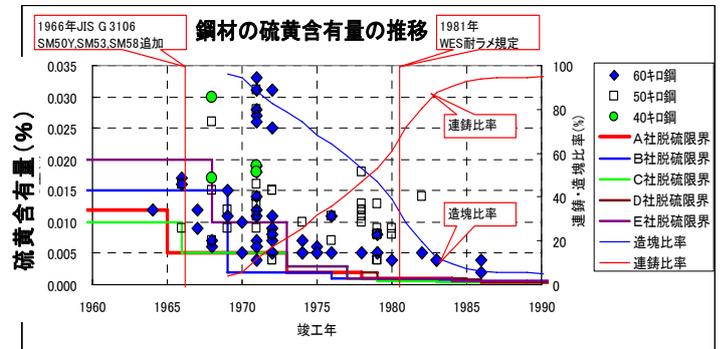


図-2.11 鋼材の硫黄含有量の推移

### (4) 桁高変化部 (フランジ曲げ構造)

隣接桁との桁高差を吸収するため、桁端部で桁高を低くする構造を桁端切欠部といいます。また、不静定次数を下げるために、切欠いた桁を組み合わせる構造をゲルバーヒンジと呼んでいます。

このような桁高変化部は、図-2.12のように、昔はフランジを曲げ加工して製作していました。

フランジ曲げ部は、応力集中が発生し、構造的にも溶接内部にルートギャップと呼ばれる隙間を残しやすいため、亀裂発生事例が数多く報告されている部位の一つです。

【桁端切欠】

【ゲルバーヒンジ】



図-2.12 フランジ曲げ構造

現在では、この様な箇所は図-2.13のように割込みフランジ形式が採用され、当該部位での損傷事例は、ほとんど無くなっています。

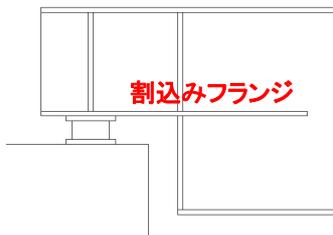


図-2.13 割込みフランジ構造

今後、この様な構造を設計する際には、フランジ曲げ構造は避けるべき構造といえます。

写真-2.18は、桁端切り欠き部における亀裂の当て板補強例です。割込みフランジ状補強板付の当て板で補強しています。

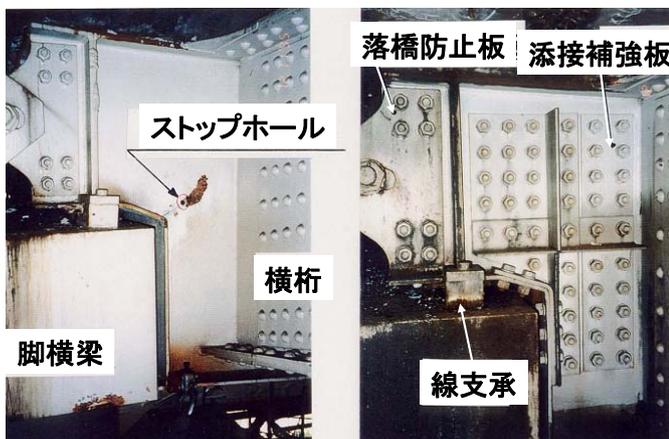
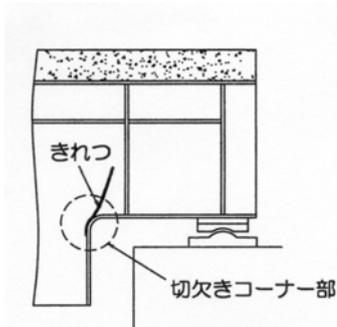


写真-2.18 桁端切り欠き部の補強例

写真-2.19はゲルバー構造部の補強例です。当て板による補強後、最終的には連続化によりゲルバー構造自体を解消しています。

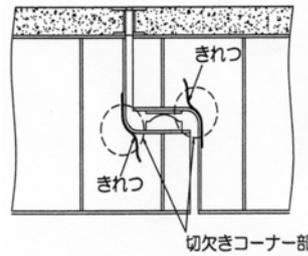


写真-2.19 ゲルバー構造部の補強例

3. 違いを知って設計・施工に留意しよう！

3.1 そのまま補強しても効果は・・・

－死荷重には効かない補強－

既設桁は、基本的に死荷重載荷状態です。そこへ補強材を取付けた場合、補強材は、活荷重に対しては分担しますが、既に載荷されている死荷重に対しては分担することはありません。

B活荷重への対応を目的とした工事では、補強材の取付けで問題ないが、死荷重に対して主桁を補強する場合は、ジャッキアップ等で主桁の死荷重キャンバーを戻した後、補強材を設置し、ジャッキダウンを行い補強材に死荷重を分担させるステップが必要になってきます。設計時においても、上記ステップでの解析が必要になってきます。

既設桁を補強する際は、その補強する目的、対象荷重をよく考えて、設計および施工する必要があります。

3.2 通行止めは簡単にはできません・・・

－活荷重作用下での施工－

現在供用している橋を、通行止めすることは容易ではありません。補強工事のほとんどは活荷重作用下での施工となります。

通行止めが出来ず活荷重が載荷されている状態で、補修・補強工事を行う場合の留意点を

2点ほど説明します。

まず1点目として、補修・補強をする際は、一時的

に既設部材断面を欠損させることがあります。具体的には、補強材取付け用のボルト孔がこれにあたります。荷重荷状態状態でボルト孔を明けた場合、既設部材の断面が欠損し、条件によっては応力が超過する場合があります。孔引断面での応力照査が必要になります。

2点目として、車両等の走行による振動下での施工になることです。具体的に、もっとも大きく影響する施工が現場溶接です。供用下での溶接施工は特に注意が必要であり、そのような場合は、振動状態の確認と施工法の検討が必要です。その際、日本鋼構造協会（JSSC）の「供用下にある鋼構造物の溶接による補強・補修指針（案）」が参考になります。

### 3. 3 こんなところにこんなものが！

#### —図面に載っていない構造物・付属物—

補強部材を取付けようと思ったら、支障物と干渉し、取付け出来なかったことが多々あります。

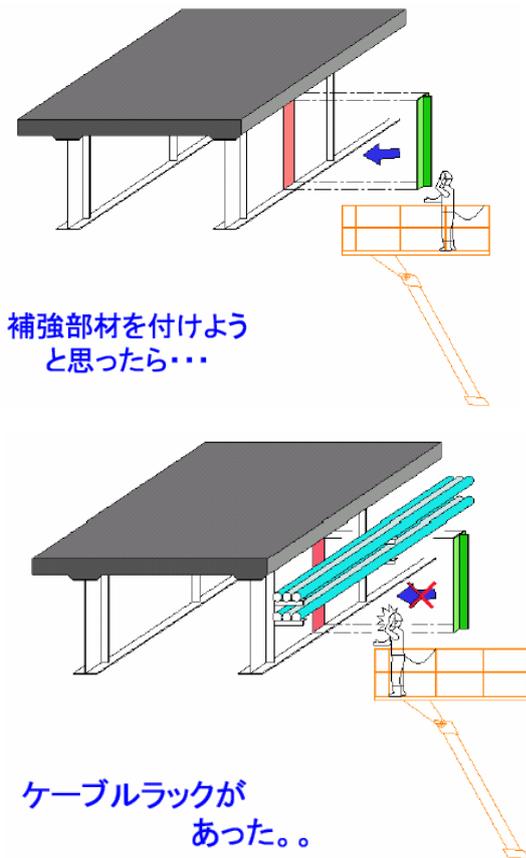


図-3.1 図面に記載のない付属物

現地担当者は設計担当者に対し、「補強図面には載っていないぞ」とクレームを伝え、設計担当者は、「竣工図には載っていなかったのだから判らなかった」と答えるでしょう。確かに、施設関係は、竣工図に載っていないことが多いです。

現地担当者は、「現場を見る」と怒り出すかもしれません。しかし、設計担当者は、「一度見に行ったけれど、当初はそこに付ける予定じゃなかったのだから気付かなかったよ」と言い訳します。確かに、意識していない箇所は、一度や二度見ても見落とすことがあります。

図面のみで判断し、設計を進めていくことは危険です。まずは現場を見て、基本構想で設計を進めて問題ないかを確認することが、補修設計の第一歩と言えます。現場状況によって、柔軟に設計内容の見直しをすることも必要です。また、デジタル写真やビデオ撮影で、現場状況を記録することも有効な手段です。

写真-3.1は、ある橋梁の支承廻りについて3次元計測（3Dレーザー計測）を行った例です。上が実物のデジタル写真、下の2枚が3次元計測データの処理画像です。任意の平面画像に加工が可能で、支障物などを後で確認することが出来ます。複雑な構造物の場合、この様な新しい装置を活用することも有効な手段です。

ただし、その計測方法の計測精度、誤差をきっちりと理解して使用することが重要です。

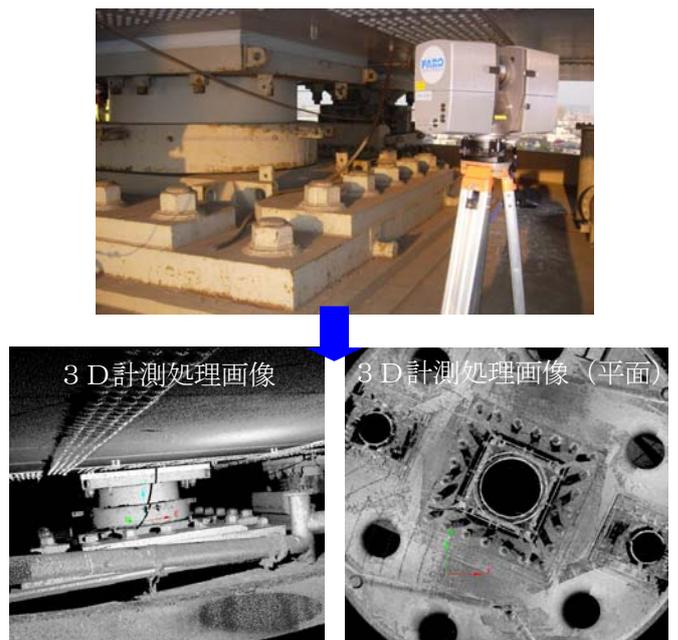


写真-3.1 3Dレーザー計測例

#### 4. 現場を知って設計・施工に留意しよう！

##### 4. 1 思っている以上に狭いかも。

###### —狭隘な施工空間—

写真-4.1は実際の補修現場の状況写真です。

トラス橋の格点部でボルトの孔明作業を行っている写真は、トラス格点部の空間が狭く、小型の機器を入れるのがやっとという状態が判ります。HTBの締め付け状況では、1人がなんとか入って施工出来ています。杓座のはつり状況では、体も入らない状態で非常に狭隘な空間となっています。

図面での感覚より、実際の現場は狭いことが多いと考えて下さい。



写真-4.1 補修現場での施工状況

施工スペースを考慮した構造となっているか、施工できるかどうかのチェックを行うことは、補修・補強工事では必要不可欠といえます。具体例としては、アンカー削孔時のコアドリル高さの確認、マンホールより小さい部材となっているか、締付けの出来るボルト配置となっているかなどがあげられます。

##### 4. 2 これって人力で運ぶの？

###### —重機を使用できない施工箇所—

箱桁の内部に、補強材を取付ける場合などは、重機の使用は出来ません。そのような場合、ほぼ人力に頼ることとなります。写真-4.2のように、チェーンブロック等を使用しながら、ほぼ人力で少しずつ搬入・運搬することが大半となっています。

設計時に部材を分割・小型化することは必須になります。現地での架設条件を想定して、思いやりのある設計が必要です。



写真-4.2 部材の人力運搬

#### 4. 3 やって見ないと判らないことも…

##### ーアンカーボルトの削孔の場合ー

補修・補強工においては、実際に現場で施工してみないと判らない部分があります。その代表的な例として、アンカーボルトの削孔について紹介します。アンカーボルトの削孔では、始めに電磁レーダ等による鉄筋探査を行います(写真-4.3)。しかし、その探査深さは、せいぜい20cm程度であり、2段目以降の鉄筋は探査できません。2段目以降の鉄筋探査は、鉄筋が切れない小径ドリルにより、パイロットホールを明け、確認を行います(写真-4.4)。これらの探査により、コア削孔可能な箇所を決定し、ダイヤモンドコアにより削孔を行います(写真-4.5)。

この時、鉄筋の損傷を防止するため、コアドリルが鉄筋に触れると電源を遮断するセンサー付きコードリールなどを使用することもあります。

このような配慮をしても、コア削孔を行うと、トライ&エラーの繰り返しにより、写真-4.6のように、多くの駄目孔を明けることとなります。この後、アンカーボルトを定着し、定着後のアンカー位置を計測して工場製作に反映することとなります(写真-4.7)。

この様に、実際に現場で施工して、初めて判ることがあるからこそ、設計時の事前の配慮、工夫が必要であり、重要となります。

アンカーボルトの場合には

- ・アンカー位置の移動に対応出来るようリブ間隔を広めに設定する。
- ・アンカー位置がはみ出すことのないよう、補強部材のベースを若干大きめにしておく。
- ・アンカー孔は出来るだけ細径、小本数としておく。などの設計時の配慮でかなり助かります。



写真-4.3 電磁レーダによる鉄筋探査



写真-4.5 ダイヤモンドコアドリルによる削孔



写真-4.4 パイロットホールによる鉄筋確認

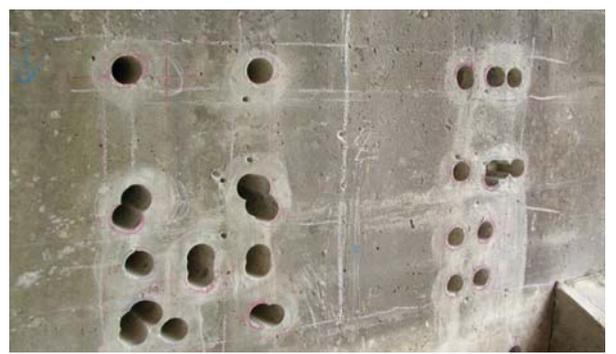


写真-4.6 アンカー削孔跡(トライ&エラーの跡)



製作反映

写真-4.7 アンカー定着後の製作反映

## 5. まとめ

### (1) 弱点を知って設計・施工に留意しよう！

- ・桁端はもっとも損傷事例が多い。桁端の損傷原因を理解し、桁端構造に留意することでかなりの損傷を防ぐことが出来る。
- ・昔の材料・構造を補修・補強する際はその背景、特性を良く理解しておく必要がある。

### (2) 違いを知って設計・施工に留意しよう！

- ・既に作用している荷重と補強の目的を理解して設計することが必要。
- ・供用下での施工となることを考えておくことが必要。
- ・図面に載っていない構造物もある。まずは現地確認が重要。

### (3) 現場を知って設計・施工に留意しよう！

- ・補修現場は思っている以上に狭い。施工を考慮した設計が必要。
- ・やってみないと解らないことがある。だからこそ設計時の工夫、配慮が必要。