

## 鋼橋の寿命評価と補修・補強による延命化対策事例

佐々木 秀弥<sup>1)</sup> 稲村 和彦<sup>2)</sup>

近年、我が国でも鋼橋の維持・管理への関心が高まってきており、来たる21世紀には維持管理の時代を迎えようとしている。

鋼橋も年とともに老化し、徐々に機能が低下し、そのうちに使用ができず取替えとなる。鋼構造で堅固にみえる橋が、自然環境にさらされ、常時車両の走行荷重を支えることにより、少しずつ寿命を消費し続けているものである。もし突然に機能を停止してしまった時の社会的、経済的な影響は、かなり大きいものがある。

鋼橋の早期劣化を引き金として、現在、維持・管理の重要性が認識され始めており、近年徐々にそのシステム化のための情報が構築されるようになった。

本稿では、鋼橋の維持・管理の概念について考察するとともに、鋼橋の寿命や発生した変状の事例、健全度評価の考え方および特徴のある延命化の施工例を紹介し、鋼橋の保守設計の参考に供するものである。

### まえがき

我が国の鉄道橋は、1874(明治7)年に、東海道線大阪～神戸間の武庫川橋梁他2・3の橋梁に錬鉄製のトラス橋が使用されたのが最初である。その後、鉄道の発展に伴って多くの鉄の橋が架設されてきた。これらの中には既に経年100年を超えた現在でも、鉄道輸送を担っている橋も存在している<sup>1)</sup>。

このように鉄道の創設期に架けられた錬鉄製の橋やピントラスなどのほか、リベット桁や溶接桁など年代および型式の異なる種々の鋼橋(以後錬鉄製も含めて鋼橋という)を点検・保守しなければならない点が鉄道橋の維持・管理の特徴である。

現在、我が国には約44,000連の鋼橋が供用されており、その半数は経年60年以上で設計時の想定寿命(疲労からの物理的耐用年数)は過ぎ、全般的に老朽化の傾向にある。これら鋼橋の経年は進んでいるが、健全な橋も多く、すぐに取替えを要するものではないが、延命化をはかりつつ、いつ取替えたらいかなど今後の維持・管理の課題となっている。また、経年が進んだ橋を計画的

に取替える反面、補修・補強によって延命化を図る試みも行われるようになった。

本文では鉄道橋を対象とした鋼橋の寿命や取替え状況、健全度評価および補修・補強による延命化対策などについて概要を述べる。

### 1. 鋼橋の変遷と現存する古い橋梁の例

#### (1) 鋼橋設計の変遷

鉄道が初めて開業した1872(明治5)年当時、橋梁は総て木橋であった。それが1874年以降は錬鉄製の桁が使用され、1893(明治26)年に架けられた錬鉄製の標準鋼桁(以後、リベット構造のプレートガーダーを鋼桁という)を最後に、錬鉄に代わって構造用軟鋼が使用されるようになった。

錬鉄製の桁は1874年に大阪～神戸間の武庫川、下神崎川、下十三川および水戸川に径間70ftの3主構複線ポニーワーレントラスが39連架設されたのが最初である。鋼桁については1876年に京都～大阪間に初めて使用され、1885(明治18)年以降は作錬式といわれる標準鋼桁が多く使用された<sup>2)</sup>。

1) 橋梁営業部顧問 2) 東京設計部次長

鋼製の桁は1888(明治21)年に天竜川に架けられた径間200ftのダブルワーレントラスが初めてである。しかし、この桁は腹部材、縦桁および横桁が錬鉄であり、いわゆる錬・鋼混合のトラスである。総ての部材に鋼を使用したのは1889年に東海道本線の野洲川橋梁に径間100ftのワーレントラスが最初である。鋳桁については1893年以降で、作30年型といわれる標準桁に使用された。ただし、この桁は補剛材に錬鉄を用いており、総ての部材に鋼を用いたのは1902(明治35)年の作35年型の標準桁からである。

その当時の鉄道技術はイギリス人顧問技師の指導の下にあり、これらの橋梁もイギリス人技師の設計のもと、イギリスにおいて製作され、我が国に輸入されたものであった。設計技師ポーナル氏(C.A.W.Pownall)が1896(明治29)年帰国後は、小さな橋梁はほとんど日本人によって設計・製作および架設が行われた。しかし、トラス桁についてはポーナル氏に代って来日したアメリカ人技師クーパー氏(T.Cooper)によって設計され、アメリカで製作されたものを輸入するようになった(これをクーパー型トラスという)。なお、九州地区では1888(明治21)年以降ドイツ人技師の指導のもとに、ドイツから輸入されたトラス桁が多数架設された(これをボーストリング型トラスという)。このように明治時代の多くの橋梁は外国人技師の指導のもとに架設されたものであり、総てが日本人によって設計・製作・架設が行われたのは大正時代に入ってからである。

以上のような歴史的背景をもつ鋼橋の事例として、現在なおJR各社で使用されている橋梁の中で、最も古い最上川橋梁と海岸近くの厳しい環境にある余部高架橋を紹介する。

## (2) 最上川橋梁 (JR東日本・左沢線)

現在、鉄道橋梁として供用中で最も古いものが左沢(あてらざわ)線・最上川橋梁である。この橋梁は英国系トラスの代表的なもので、1886年に英国で製作されたポーナル型ダブルワーレン下路トラスで径間153ft、5連架けられている(写真-1)。

本橋梁は東海道本線・長良川橋梁に用いられていた200ftのものを153ftに改造して使用したもので、山形鉄道(旧長井線)にも同型式のものが3連存在している。

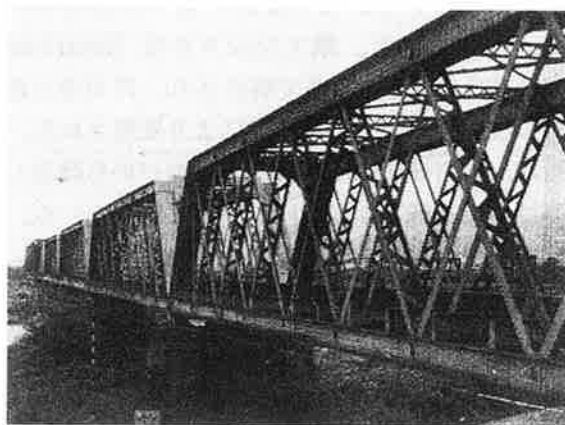


写真-1 1886年製作 左沢線・最上川橋梁の全景

弦材は $\pi$ 断面で、弦材間の連結にはリベットが用いられている。斜材は2本のバーから成り、ピンで弦材に連結された構造となっている。圧縮力の作用する斜材は、2つのバーをレーシングで組んで強度を確保している。

また、横桁は格点部で直接下弦材に載せる構造となっており、縦桁は横桁にリベットで結合した構造となっている。

なお、本橋梁ではトラス橋の延命化をはかるため、緩んで力を伝達しなくなっている斜材のアイバーを短縮する工事が施工されている<sup>1)</sup>。

## (3) 余部高架橋 (JR西日本・山陰本線)

古い鋼構造物として有名なものに余部高架橋がある。山陰本線・鎧～余部間に位置し、橋台2基、鋼橋脚11基、鋳桁23連の延長310.5m、高さ41.4mの我が国有数の鋼トレスル型橋梁である(写真-2)。

本橋梁は1907(明治40)年に鉄道院の古川靖一技師が米国 Philadelphia の橋梁技師であるウォルフフェルト氏(P.L.Wolfelt)と協議をして設計したも



写真-2 1911年架設 山陰本線・余部高架橋の全景

のといわれている。この設計に基づき1909年に工事が着工された。鋼トレスルは American Bridge CO.Pencoyd工場で作製され、門司港を経由して現地に搬入し、足場式により架設された。鉸桁は、石川島造船所で製作され神戸から陸送し、工事は着工以来2年の短い工期で完成している。

余部高架橋は日本海から150mの所に位置し、常時海風にさらされ冬期には特に天候が悪く湿潤となるため、建設以来その保守には並々ならぬ努力が重ねられてきた。建設直後は請負制で塗替え塗装が行われたが、1917(大正6)年頃より専属の工事工手(橋梁守りと呼んだ)2名が常時塗替え塗装や部材の取替えなどの保守に従事するようになった。しかし、戦時中には塗料など材料が不足し防錆塗装ができなかったために、鋼材の腐食が急激に進行した。そのため1950年より2年間に亘って、腐食の甚だしい橋脚主柱のレーシングバーが全面的に取替えられた。その後も随時水平材のレーシングバー、斜材の山形鋼などが部分的に取替えられたが、1968年から8年間で残り総ての水平材、斜材の取替えが行われた<sup>3)</sup>。この結果、鋼橋脚では主柱以外の部材は総て新しい部材に取替えられて現在に至っている。

現在においてもこれまでと同様、腐食部材の取替えや定期的な塗替え塗装が行われるなど、他の橋梁に比べてはるかに丁寧な保守が行われている。

## 2. 鋼橋の寿命

### (1) 寿命についての考え方

鋼橋を設計・製作し保守を行うとき、まず対象橋梁の寿命はどの程度あるかと考えられるであろう。しかし、我が国においては、鋼橋における設計耐用年数(以下寿命という)に関して明確な定義付けがなされていない。文献<sup>4)</sup>(JSSCレポートNo19;鋼構造物の寿命に関する調査)によれば、寿命については、「構造物として使用されてから何らかの理由により使用が停止されるまでの期間」の意味に、また、耐用年数は「構造物が使用されてから要求性能を満足しつつ、物理的な耐荷力、使用性を保持することを期待する期間」の意味に用いられることが多いと述べられている<sup>4)</sup>。

鋼橋は製作・架設後に何らかの理由により使用が停止されるもので、その理由には腐食・亀裂など構造物自身に起因するものから、荷重の増大、

河川改修など構造物に要求される機能や環境の変化に起因するものなど色々のものがある。そこで使用停止の理由に応じて次の3つに分類される。

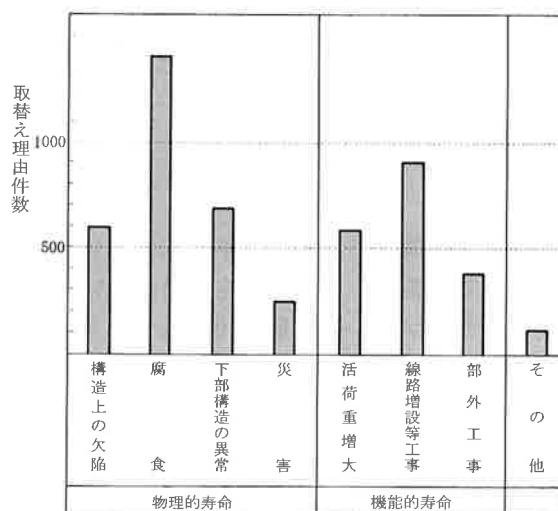
- ①物理的寿命
- ②機能的寿命
- ③経済的寿命

物理的寿命とは腐食や疲労亀裂の進行など使用開始後の変状により耐荷力不足になり使用停止したもの、機能的寿命とは河川改修や交通量・荷重の増大に対応するために停止したもの、また、経済的寿命とは低下した性能を向上するために要する費用と取替えに要する費用とを勘案し、取替えが経済的と判断されて決まる寿命である。

### (2) 取替え理由別件数調査

図-1は1955年から1966年度の11年間に亘って取替えられた鉄道橋の理由別件数を調査した結果(JSSC Vol.5. No.39. 鋼構造物の耐用性調査報告・鉄道橋編「表3.2.1」をグラフにしたもの)を示したものである。

鉄道橋では腐食、亀裂などの橋梁自体に問題があつて取替えられたもの(物理的寿命)の数が多。鉄道橋は永年に亘って使用された経年の古い桁が多く、また、戦時中には適切な保守ができなかったために荒廃が進んだこと、戦後の輸送量の増強に伴い古い桁の補強を行ったが、溶接部に亀裂が生じたために、当時盛んに取替えが行われたことが主な原因と考えられる。最近の傾向として



注) 1. 対象期間：(昭和39年～41年度) 対象橋梁数：2,325連  
 2. 取替え原因が複数のものについては第1順位他、第2順位のものも含めている。  
 3. 上記分類のうち構造上の欠陥、腐食を物理的寿命に分類した。

図-1 鋼橋の取替え理由件数内訳

は、河川改修や道路拡幅によるなどの機能的な理由により取替えられるもの（機能的寿命）が多くなっている。

### （3）鋼橋の疲労破壊

橋桁に作用する外力は、桁自体などからなる死荷重を除けば列車や自動車などの常時作用で、しかも不規則な大きさで変動する活荷重が支配的である。したがって、疲労破壊は鋼橋の供用開始後に想定されるものといわれている。従来、我が国では疲労は鉄道橋の問題と考えられてきた。これは鉄道橋では道路橋に比べて部材に生じる応力のうち活荷重の占める割合が高く、また、設計荷重に近い大きさの荷重が載荷されるが、道路橋では設計活荷重に相当するような載荷状態になるチャンスが少ないと考えられていた。事実、道路橋でも使用状態の厳しいいくつかの路線の橋梁において、床構造や橋梁各部に疲労損傷が現れており、疲労は無視できない現象となっている。

我が国の在来線鉄道橋では60年、新幹線では70年、本州四国連絡橋では100年を設計寿命としてその間に通過する走行荷重に対して安全性の照査が行なわれている。

疲労強度には、構造のディテール、そこに外力によって繰り返し生じる応力の変動範囲とその繰り返し数が支配的な因子となっている。また、鋼橋の環境条件も影響を及ぼすもので、供用年数の永いことは、その間に作用する荷重の評価が困難になるものである。

## 3. 寿命の要因となる変状例

### （1）多く見られる変状

鋼橋には時間の経過とともに機能の低下を引き起こす様々な変状（鉄道では損傷のことを変状という）が発生する。したがって、この変状に対してその発生した原因を探り、適切な補修・補強を行うことが、鋼橋の寿命を伸ばす上で極めて大切なことである。鋼橋に発生する変状を今日までの事例で大別すると次のように分類される。

#### 1) 腐食

鉄道橋で経年60年以上の桁はほとんどがリベット桁で、部材の表面は凹凸状となり腐食の進行しているものが多い。特に、列車の通過のたびにこすられる枕木との接触面（開床式橋梁

の主桁・縦桁上フランジ上面）（写真-3）や、支承部付近などの塵埃の付着し易い箇所などは、塗装の劣化が早く、腐食が生じやすい（写真-4）。

また、戦時中に架設された鋼橋の中には、資材不足によって防錆塗装ができず、保守管理に空白が生じ、それが原因となって腐食が進行したものも多いと考えられる。

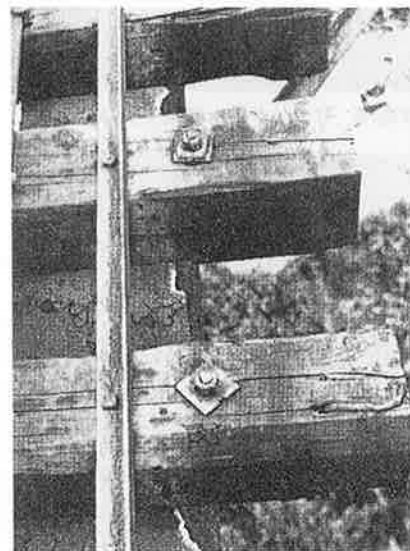


写真-3 開床式上路鉄桁の主桁上フランジ上面の腐食・欠食

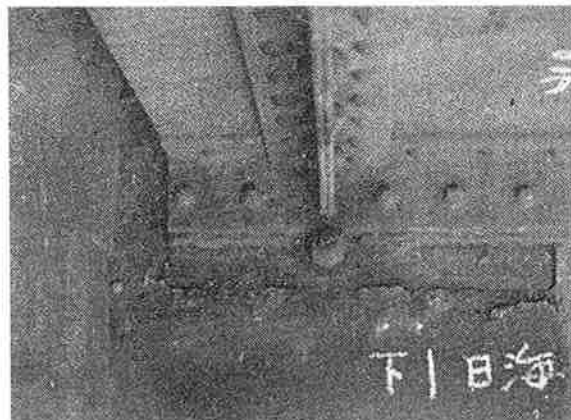


写真-4 鉄桁支承部付近の主桁下フランジの腐食

#### 2) 支承部の変状

支承部にも多くの変状が発生している。特に、リベット桁には支承座面の破損が目立っている（写真-5および写真-6）。沓の据付には硬練りのコンクリートモルタルが用いられることが多かったためと、鋼製ライナーの残置などの施工不良が起因となって変状が発生することが多い。この他、アンカーボルトの腐食、破断、座面の



写真-5 リベット桁・鉄桁支承部の破損

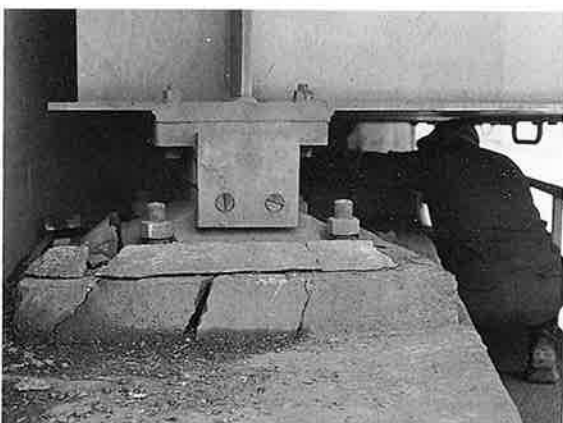


写真-6 スパン36m溶接桁ベアリングプレート沓座の破損

損傷に伴う鉄製支承の割れなどの変状も発生している。

### 3) 疲労による亀裂

鉄道橋は列車荷重により発生する応力の占める割合が大きく、また、応力の繰り返しが多いため疲労による亀裂が発生しやすい。特に、列車頻度の多い線区の溶接桁で、下路トラスや下路桁の床組、縦桁や横桁の腹板端部にはこのような変状が発生することが多い。これは溶接継手という溶接桁特有の問題の他、リベット桁に比べ、部材がスレンダーになって振動し易くなっていること（一般に、溶接桁はリベット桁に比べて許容応力度が大きい設計になっている）などが原因である。

また、溶接桁では補剛材下端やダイヤフラム、開床式の桁では枕木受けなどにもこの種の変状が見受けられる。

### 4) リベットや高力ボルトの弛み

下路桁の床組で縦桁・横桁の連結部や綾材の取付け部および綾構材の吊材取付け箇所などに、リベットや高力ボルトの弛みが多く見られる。

### 5) 異常な力や変位による急激な変状

地震、洪水、火災、大型トレーラーの衝突などによる異常な力や、橋台・橋脚の大きな変位などによって、橋梁に急激な変形が発生することがある。これにより橋桁部材に破損や割れ、あるいは材質変化などが生じる。一般に、このような変状に対しては、応急復旧工事が必要になることが多い。

## (2) 寿命の要因

前項(1)に述べたように、桁自身に問題があつて取替えられたリベット構造の鋼橋の多くは、腐食が主な原因である。特に、上路鉄桁の主桁、下路鉄桁およびトラス桁の床組で、縦桁・横桁など枕木の直接接触する部材の腐食は、これら橋桁の取替えを左右する重要な要因となっている。また、鉄桁の支承部付近の腐食も同様である。

現在では実例は少ないが、溶接桁の取替えの要因となる変状として、疲労を考慮する必要がある。特に、列車頻度の大きな線区にある溶接桁で、死荷重が軽く応力変動の大きい開床式の桁、あるいは応力の繰り返し数が大きく現われる短支間の桁では問題になるものと考えられる。リベット桁には、疲労亀裂の発生はほとんど見られていない。

なお、現在まで発生している疲労亀裂のほとんどは、設計で疲労の照査を行わない2次部材に多いが、今後は主桁フランジの縦溶接ビード部や、溶接ガセットでの亀裂発生の可能性があり、溶接桁の取替え時期を判断する一つの目安になるものと考えられている。

## 4. 健全度評価の考え方

鋼橋に発生する変状の中で、取替え時期に影響を及ぼす主な変状は、リベット桁については腐食であり、溶接桁については疲労による亀裂を考える必要がある。

以下に、これらの変状が発生している橋桁についての取替え時期を判断するための健全度評価の考え方について、現在、鉄道総合技術研究所で検討されている試案を紹介する。

### (1) 腐食による変状の場合

前述したように戦前に架設された古い鋼橋の中には、戦時中の保守管理の空白により腐食が進ん

だものも多い。昭和40年代に入ると耐力の小さな橋桁を中心に取替えが進められたが、それでも相当数の腐食が進行した桁および設計荷重の小さな桁が残された。これらの桁に対して、鉄道橋特有の手法である橋梁の入線管理手法（橋梁入線基準規定；鉄桁健全度評価委員会報告）が導入された。これは、列車の橋梁への入線に対して使用制限を行う方法である。使用制限としては、荷重制限と速度制限の2つの方法がある。荷重制限は軸重をある限度内に抑えるためのものである。速度制限は入線する車両の速度を下げることにより走行時の衝撃を小さくし、作用力をある限度以内に抑えるために行うものである。

この場合、安全性の確認は、橋梁に発生する応力度が設計時の許容応力度を割増した保守限応力度を超えないことを確認することによって行っている。このとき橋桁の保有耐力を評価する指標として、以下に示す「現有応力比率（ $S_R$ ）」を用いている<sup>5)</sup>。

$$\text{現有応力比率 } S_R = (\sigma_m / \sigma) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_m$ ：保守限応力度

$\sigma$ ：当該線区の許容最高速度で車両が入線した際に部材に発生する最大応力度

この値が小さいほど腐食による断面の減少が大きいことを意味しており、100より小さくなると、使用制限などの措置が必要になる。この指標を用いると、腐食が桁全体に及ぼす影響の程度が把握できる。現在、腐食の進んだ鋼橋の取替えの必要性、あるいは延命化のための補修・補強の時期を判断する場合の健全度評価の目安として、鉄道総合技術研究所（検討委員会）ではこの指標を用いて表-1に示す案を提案している。

表-1 現有応力比率に対する健全度評価区分（案）<sup>10)</sup>

現有応力比率 $S_R$ (%)	判定区分	検査への反映
$S_R \leq 100$	AA	詳細な検査の実施
$100 < S_R \leq 120$	A(A <sub>1</sub> またはA <sub>2</sub> )	

注) AA；対策を早急に実施する。

A；対策を検討し、実施計画に組み入れる。

(A<sub>1</sub>:早期に、A<sub>2</sub>:数年程度を目標に)

## (2) 疲労による変状の場合

疲労による変状の程度を把握する指標として、線形累積疲労被害則に基づき、以下に示す「疲労

損傷度(D)」を用いている<sup>6)</sup>。

$$\text{疲労損傷度 } D = \sum (n_i / N_i) \quad (2)$$

ここに、 $N_i$ ：ある応力範囲を繰り返し負荷したときの亀裂の発生する繰り返し数

$n_i$ ：その応力範囲の繰り返し数

既設の鋼橋では、これまでに累積した疲労損傷度を $D_{pv}$ 、今後受けるであろう疲労損傷度を $D_{av}$ とすると、その和が1になったときに疲労破壊すると考える。

$$D_{pv} + D_{av} = 1 \quad (3)$$

これを実際に適用する場合には、応力を測定し、その測定波形から1列車あたりの疲労損傷度を求める。さらに、その結果を利用して亀裂の発生が予想される時期を推定する方法が用いられている。

疲労の影響を大きく受けた鋼橋の取替え時期は、フランジと腹板とのすみ肉溶接継手など、その破損が重大な事故につながるような継手が亀裂の発生する時期に達するものかどうか、一つの目安になるものである。このような場合の健全度評価の考え方として、鉄道総合技術研究所(検討委員会)では表-2に示す案を提案し、検討が行われている。

表-2 累積疲労損傷度による健全度評価区分（案）<sup>10)</sup>

累積疲労損傷度	判定区分	検査への反映
$D \geq 1.0$	A	(A <sub>1</sub> )
$1.0 > D \geq 0.8$		(A <sub>2</sub> )

注) A; 対策を検討し、実施計画に組み入れる。

(A<sub>1</sub>:早期に、A<sub>2</sub>:数年程度を目標に)

## 5. 鋼橋の維持・管理技術

鋼橋の維持管理について最近の技術開発に関する報告がある<sup>7)</sup>。これによれば、橋の各部材へのアクセスや検査方法、損傷や劣化の原因調査、将来における損傷の進行度の評価やモニタリングの方法、補修・補強の設計法など各種の技術的開発がなされつつある。これらの中には進行中のものもあり、また、既に実用化され試行中のものもある。従来からの技術であっても、その精度が高くなったり、小型化されハンディーになったり、記録性や後処理の能力が向上したり大幅に改良されたものもある。これからの鋼橋の維持・管理技術

でさらに研究開発が望まれるのは、機器などのいわゆるハード面よりも、各種の情報収集とその利用といったいわゆるソフト面の充実が重要となってきたと思われる。

また、たとえば、検査については、どの位置(Where)を、どのような時期あるいは間隔(When)で、どのような能力を有する者(Who)が、どのような方法(How)で行うかの3W1Hのいずれも欠かすことはできない。最初の2つのWについては鋼橋の腐食や疲労といった経年によって生じる各種の変状の発生や進行性が十分に考慮されていること、また、鋼橋の健全度を評価するに十分なデータを収集するような検査マニュアルや点検シートが用意されていること、残りのWについては果たして検査している者が橋梁の変状について十分な知識を有しているかなど、鋼橋の状態に関して正しい情報を収集できることが大切である。

鋼橋の維持・管理計画や補修・補強設計をする上で、損傷度や健全度を評価することが必要となる。図-2は損傷度や健全度評価および補修・補強による寿命の延命化の概念を模式的に表したものである。

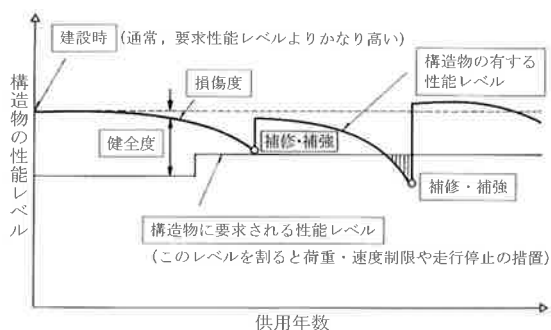


図-2 補修・補強による寿命延命化の概念図

構造物は建設した時点から経年によってその性能は低下しはじめ、初期状態からの低下の程度を損傷度、構造物の要求性能に対する現状の程度を健全度と判断しており、補修・補強により構造物の性能レベルを向上することにより、耐用年数が延長されるものと考えられる。

このように維持・管理はその性能の経時的变化、すなわち寿命に大きな影響を与えるものである。

## 6. 補修・補強による延命化対策事例

### (1) 補修・補強の考え方

鋼橋の補修・補強とは何であろうかと質問すると、補修は損傷を受ける以前の元の状態に戻すこと、補強は元より強くすること、というのが一般的な答えである。しかし、疲労については元の状態に戻すことは正解ではない。元の状態が良くないから疲労損傷が生じたのであり、溶接で元に戻すと元より悪いことになりかねない。明らかに溶接欠陥が原因ならば、欠陥のない溶接に替えることが補強である。

鋼橋の損傷に対する補修は元に戻すのではなく、原因を十分に明らかにして、建設時には存在しなかった新しい技術や知識を駆使して行うものである。しかし、これは色々な部材を取り付けることを指すのではない。たとえば、永久的な対策として原因となる部材を取り除き、亀裂の先端にストップホールをあけ、無理な変形を緩和するための処置を行うことも高度な技術である。

補修・補強は橋梁のもつ性能を回復させるもので、何らかの形で必ず延命化につながるものである。最近、これまでなら取替えられたであろう鋼橋に対して、明らかにその時期を延期する目的で補修・補強が行われるようになってきた。本項ではこのような事例について紹介する。

### (2) 部材の取替え

腐食は総ての部材で同じように進行するわけではない。特に、鋼橋の寿命に影響を与える腐食は、前述のように枕木に直接接する部材である。このような腐食の進行した部材を新しい部材に取替えることによって、橋桁全体の延命化を図ることがよく行われる。その例として、トラス桁の部材取替えがある<sup>9)</sup>。

通常、トラス桁の腐食は、縦桁・横桁などの床組に比べて主構弦材はそれほどではない。したがって、これらの腐食した部材を取替えれば、トラス桁全体の大幅な延命化が可能である。

このように腐食した部材の補修・補強には一般に高力ボルトが用いられ、腐食鋼材の高力ボルト継手の強度の確認が必要であり、施工に当たって試験が行われ、調査した結果が報告されている<sup>9)</sup>。

工事は、列車を走行させながら列車間合いで施工するという活線施工で行われているため、この



間合いをどの程度確保できるかによって、工事の内容・規模が決定されるものである。以下にその特徴のある施工例を紹介する。

1) トラス縦桁の取替え<sup>10)</sup>

図-3の例はトラス床組部材の縦桁を列車間合いで更換する工法であり、旧縦桁の横に新しい縦桁をブラケットを設けて組立て、横取り工法により取替えた。このとき、軌道保守の省力化のため、レールを直接縦桁上フランジの上に取り付ける鋼直結軌道を採用したほか、塗装の塗替え経費軽減のため新しい縦桁を亜鉛めっき仕様とした。

なお、疲労亀裂に関しても、トラス桁では影響線長が長く応力の繰り返し数の少ない弦材よりも、影響線長が短く応力の繰り返し数の多い縦桁・横桁に亀裂が発生し易く、現実に変状事例も多い。溶接トラス桁も、将来的にはこのような工法が採用され部分的な補修が行われるものと考えられる。

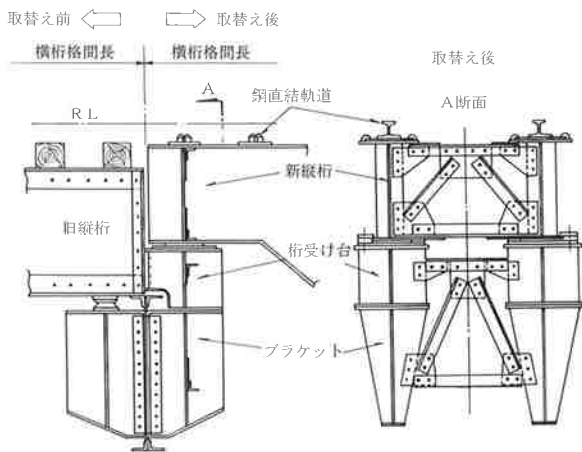


図-3 トラス橋の格間部分 縦桁の取替え

2) 縦桁上フランジの取替え<sup>10)</sup>

経年の多いリベット桁では上フランジの腐食・欠損の変状が甚だしく、このような場合には縦桁全体の取替えを行わずに、腐食の激しい縦桁上フランジの部分的な取替えを行うこともある。

(3) 主桁桁端支承部の改造

経年による腐食は、枕木と直接接する部材の他、塵埃などの溜まりやすい支承部付近にも発生しやすい。特に、ソールプレートとベッドプレートを

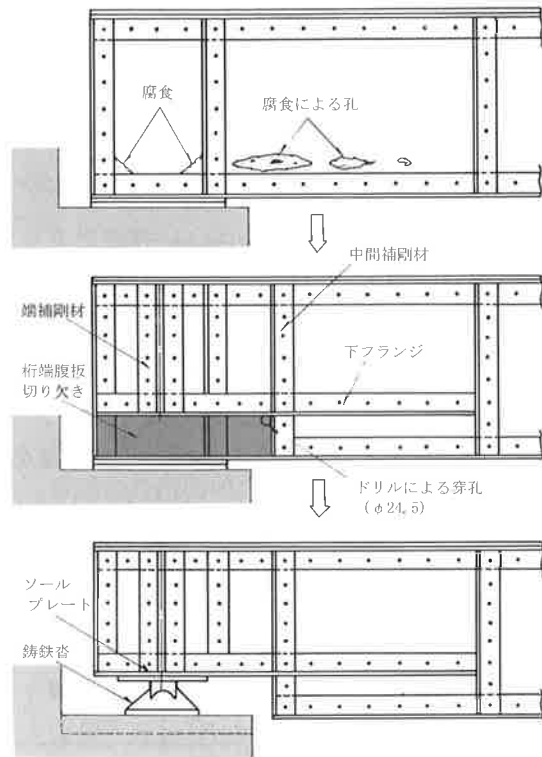


図-4 上路鉄桁 桁端支承部の改造

用いただけの簡易な支承構造の鉄桁に多い。このような桁では、図-4に示すような施工順序で桁端部を切り欠き、構造を改良して、沓を設けて橋桁の延命化が行われている。

(4) ピン結合トラス橋におけるアイバーの短縮

明治期のトラス橋の多くは、格点にピン、引張材にはアイバーを用いた、いわゆるピン結合トラス（以下ピントラスという）であった。このピントラスはいまだに数十連が現存している。これらのピントラスは、アイバーの折損事故が相次いで発生したことから、国鉄時代には取替えが決定され、健全なものも含めて順次計画的に取替えられて、現在残っているのはその生き残りである。

ピントラスは、腐食、あるいはリベットの弛みなどの変状の他、ピンの摩耗、アイバーのピン孔の拡大に起因するアイバーの弛緩という構造的な問題を抱えている。このアイバーの弛緩は、トラス橋としての力学的なバランスをくずし、寿命を縮める変状である。その対策工法としてはアイバーの短縮工法であり、昭和30年代頃までは盛んに実施されていたが、それ以降は施工が困難なため実施されなくなっていた。しかし、JR会社に



なつてからこれらのピントラスをできる限り永く使用するという方針となり、一度は消えた技術が再び現在の技術を取り入れて復活された<sup>11)</sup>。これなど明らかに橋梁の延命化を目的とした補修である。

(5) 特殊塗料による防錆・防食塗装<sup>12)</sup>

枕木と接触する部材が、孔喰するほど腐食が進行した場合には、部材の取替えを行う。しかし、腐食によりかなりの断面欠損の進んだ部材に対しては、高強度で高防食性の塗膜を形成するガラスフレーク塗料を用いて、腐食の進行を止め、延命化を図ることが試みられている。たとえば1.(3)で紹介した余部高架橋の縦桁にもこの方法が用いられている。表-3にその塗装系を示す。

表-3 枕木下面用塗料による塗装系<sup>12)</sup>

工程	塗料名	標準使用量 (g/m <sup>2</sup> )	塗装間隔 (20℃)
第1層	専用プライマー	はけ 300	16時間～7日
第2層	ガラスフレーク塗料	はけ 1050	
第3層	ガラスフレーク塗料	はけ 1050	24時間～7日

- 注) 1. 素地調整程度は塗替ケレン1を適用する。  
 2. 現場塗装用に塗装方法および標準使用量を設定している。工場塗装では、エアレススプレー塗りとし、標準使用量は専用プライマー200g/m<sup>2</sup>であり、ガラスフレーク塗料は1200g/m<sup>2</sup>とする。  
 3. 施工にあたっては、鋼構造物塗装設計施工指針を適用する。

(6) 亀裂発生部の補修・補強

亀裂の発生したものおよび亀裂の発生が予想される溶接桁に対する補修・補強は、一般に、補強当て板による方法が行われている。また、部材によっては、横揺れ防止工などと組合わせた対策を講ずることもある。たとえば、下路桁の床組部材の縦桁・横桁の腹板切り欠き部で、切り欠きコーナー部の溶接ビード止端から発生した亀裂部に対しては、補強当て板による補修が行われている(図-5および図-6)。

また、鉄道橋では疲労や振動および2次応力などの原因によって過去に変状が発生した構造ディテールについては、その変状の発生によって耐久性が低下しないようにディテールを改良し、設計の標準化が行われている。変状の発生により改良したディテールと変状を想定して改善した設計ディテールの事例や、溶接鉄道橋の疲労による損傷事例が報告されている<sup>13)</sup>。

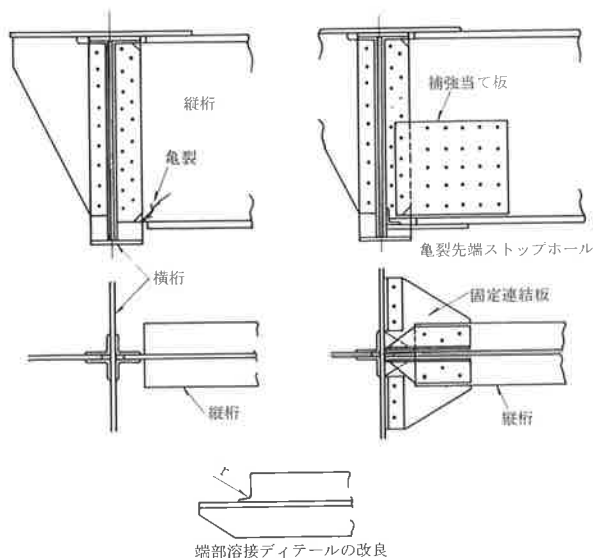


図-5 縦桁腹板亀裂部の補強当て板による補修

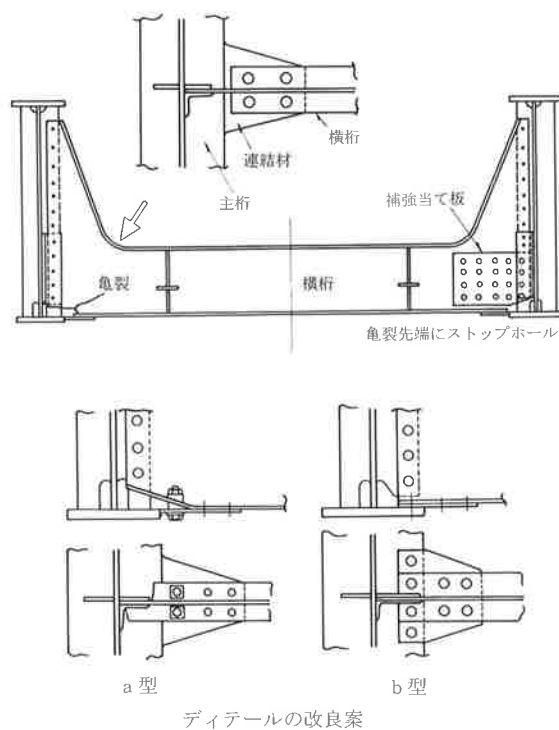


図-6 横桁腹板亀裂部の補強当て板による補修

(7) 沓座コンクリート損傷部の補修

沓座の補修は橋桁を仮受けした後、沓据付位置のコンクリートを箱抜きし、補強鉄筋の組立てを行う(写真-7)。桁に固定した上沓から吊金具などで下沓を吊り、型枠を組立てた後に速やかに無収縮モルタルを注入する。モルタルが所定の強度に達したことを確認し、沓の吊金具と桁の仮受け部材の撤去を行う。



写真-7 沓座補修 補強鉄筋の組立施工例

注入材料には、無収縮モルタルと樹脂モルタルなどがある。一般には無収縮モルタルのセメント系が用いられるが、補修には樹脂モルタルを使用することがある。

#### あとがき

鋼橋の維持・管理は今日までなんとなく地味な、また、あまり陽の当たらないような分野の仕事との印象を与えてきたが、実際には、鋼橋に関する材料、構造、荷重、環境などの広い知識を結集して初めて可能となる高度の技術が必要な分野である。車両の走行性から、より高度な整備を求められる上でも、現在ある路盤構造物を将来とも十分に機能させていくこと、そのための維持・管理技術をますます向上させることが必要であると思われる。また、良い設計で、良い材料を用い、良い製作をされた構造物は、当然使用開始後の劣化の程度は遅く、維持保守が楽になるはずであり、想定される寿命までの維持・管理を含めた構造物の設計を考慮することが重要である。

すでに膨大な数の鋼橋を所有している現在では、それを健全に保ち続ける技術についても真剣に取り組んでいかなければならない。老朽した構造物をよく維持し、新しい工法を用いて延命化を図り、永く保存・活用することが、これからの鋼橋技術者の果たすべき使命である。21世紀はますます維持・管理が重要な時代になるものと考えられる。

終わりに、本稿をまとめるにあたり、多くの情報を提供していただいた鉄道総合技術研究所ならびに株式会社BMCの関係者に対し感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 小西純一・西野保行・淵上龍雄：明治時代に製作された鉄製トラス橋の歴史と現状（第1報～第5報），日本土木史研究発表論文集，1985～1989.
- 2) 久保田敬一：本邦鉄道橋の沿革に就いて，業務研究資料，第22巻，第2号，1934.1.
- 3) 西村俊夫・大野正二郎：余部橋梁の実態と対策，構造物設計資料，No.5，1966.3.
- 4) 日本鋼構造協会：鋼構造の寿命に関する調査，JSSCレポート，No.19，1991.8.
- 5) 鉄道総合技術研究所：建造物の保守管理の標準・同解説（鋼鉄道橋），1987.
- 6) 阿部允・内藤繁・小芝明弘・阪本謙二：鋼鉄道橋の維持管理における疲労の評価，鉄道研究報告，Vol.6，No.4，1992.4.
- 7) 三木千寿：橋梁の維持・管理技術について，道路，平成元年版，1989.6.
- 8) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手続き，1992.
- 9) 佐々木秀弥：腐食鋼材の疲労強度ならびに古材に設けた高力ボルト継手に関する文献調査，駒井技報，Vol.8，1989.
- 10) 市川篤司：鋼鉄道橋の補修・補強の概要，橋梁と基礎，Vol.28，No.8，1989.8.
- 11) 鶴巻栄光・野沢伸一郎・阿部正強・青木隆：ピン結合トラス橋の維持管理，橋梁と基礎，Vol.23，No.6，1989.6.
- 12) 町田洋人・江成孝文・桐村勝也：ガラスフレーク塗料の鉄道橋枕木下塗料について，防錆管理，Vol.25，No.12，1991.12.
- 13) 佐々木秀弥：溶接鉄道橋のあゆみ（溶接橋の疲労損傷事例とディテールの改良），駒井技報，Vol.13，1994.