

第Ⅲ編 主要部材の腐食と延命化工法

1. はじめに

近年、橋梁を安全かつ長期間使用できるように補修、補強を行う気運が高まっており、鋼橋の寿命を延ばす試みが盛んに行われている。鋼材の使用は本質的に錆の問題を避けることはできず、維持管理を適切に行い補修・補強をタイムリーに行うことが、鋼橋の延命化を図ることに効果的である。

鋼橋の防錆・防食は一般に塗装で行われており、塗膜が健全な間は腐食が発生しないことから、一定周期で塗膜の塗替えが行われている。しかし、塗替えが行われていても桁端部や支承部周辺等の水分、土砂及びゴミが堆積しやすい箇所は、早い時期に塗膜が劣化し局部的な腐食が進行する。

また、海岸地域では塩分付着による部材の腐食が著しく進行する。その結果、適切な維持管理を怠った場合、断面減少等の大きな変状が発生することとなり、橋梁の安全性や耐久性を左右する要因となる。

橋梁は、主構造で種々の外力に抵抗すると共に形状を保持しており、主構造の腐食による断面欠損は落橋に繋がる危険性をもっている。従って、主構造の腐食は最小限に留める必要があり、新設橋の計画時には、当初から重防食塗装系等の採用や水抜き孔等の構造の改善を図ることが重要であり、また、既設橋においては定期的な点検調査による変状の早期発見及び適切な補修・補強を行うことが、安全の確保及び延命化、ひいてはランニングコストの低減を図ることに繋がることとなる。

主構造の腐食は、主構造そのものの構造詳細に起因するものと、床版、伸縮装置及び排水装置等の付属物の不具合によるものに大別され、前者は通風が悪く水分や塵埃が溜まり安い箇所に発生し易い傾向にある。本報告書では、これらの腐食箇所と原因を橋梁形式毎に腐食マップにて整理し、対策工法について、損傷が小さく耐力的に問題がない場合と断面欠損が大きく耐力不足が生じている場合に分けて事例を整理した。

いずれにしても、一般に鋼橋における腐食は、構造物全体にわたることは少なく、局部的に発生することが多い。従って、腐食部分の交換や当て板等の部分的な補修・補強で延命化することができ、鋼構造の長所である加工や接合のし易さを利用して、比較的容易に施工が可能である。

2. 腐食事例と原因

2.1 概要および腐食マップ

鋼構造物の弱点として発錆・腐食があるが、これらは一様に発生するのではなく、以下の構造を持ったところに発生しやすい。

- ① 風通しが悪い。
- ② 滞水しやすい。
- ③ 結露の発生しやすい。(密閉構造)
- ④ 雨水などが浸入しやすい。

従って、橋梁形式により、発生箇所は発生頻度の高い場所がある。これらをわかりやすいように、腐食マップという形でまとめた。(図 3-1～図 3-9)

腐食マップは、鋼構造物を下記の 6 種類に分類して整理した。

- ① 鈹桁 (コンクリート床版有り)
- ② 鈹桁 (コンクリート床版無し)
- ③ 箱桁 (コンクリート床版有り)
- ④ トラス、アーチ、ラーメン橋 (コンクリート床版有り)
- ⑤ 鋼床版
- ⑥ 鋼製橋脚

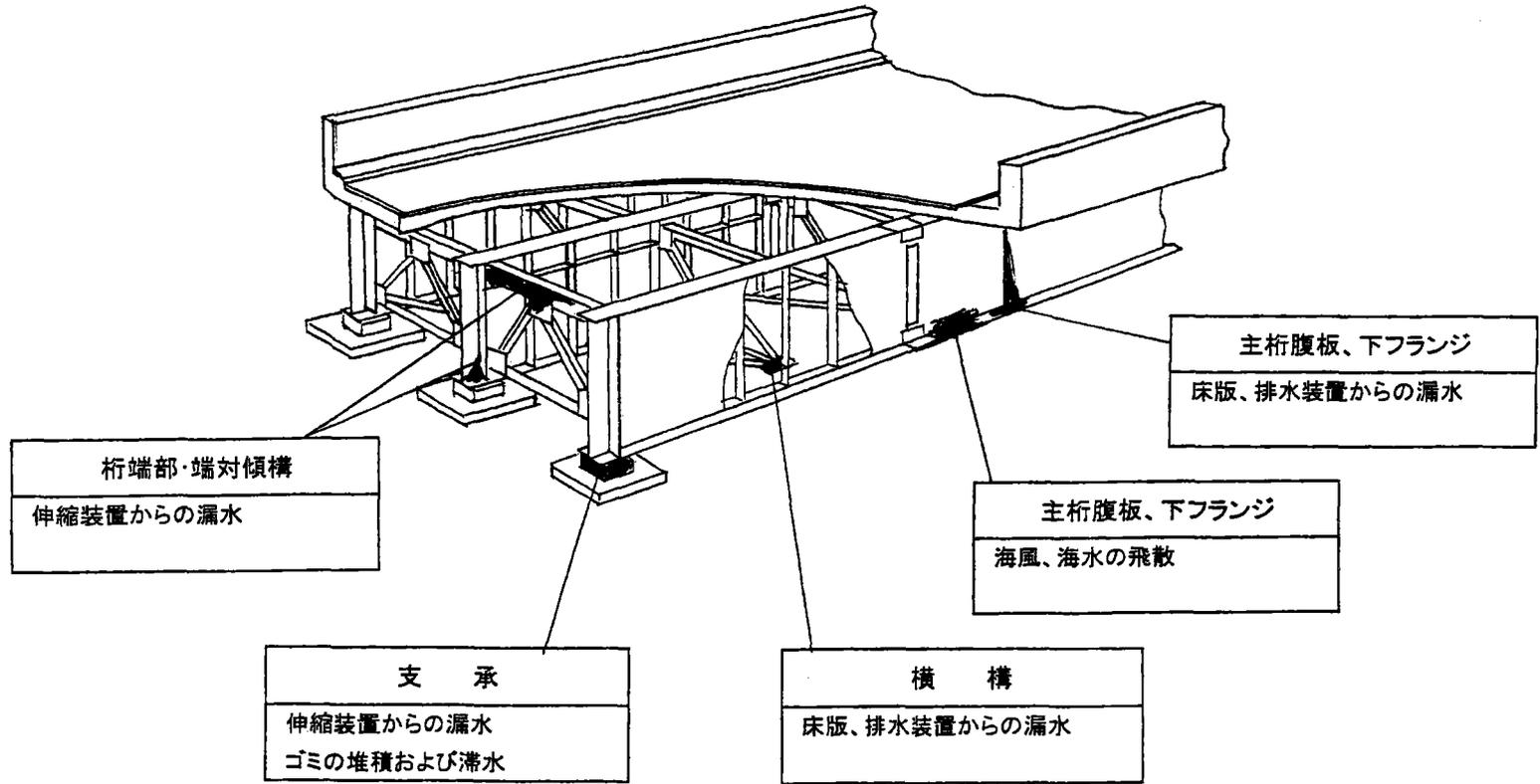


図 3-1 鋼桁 (コンクリート床版有り)

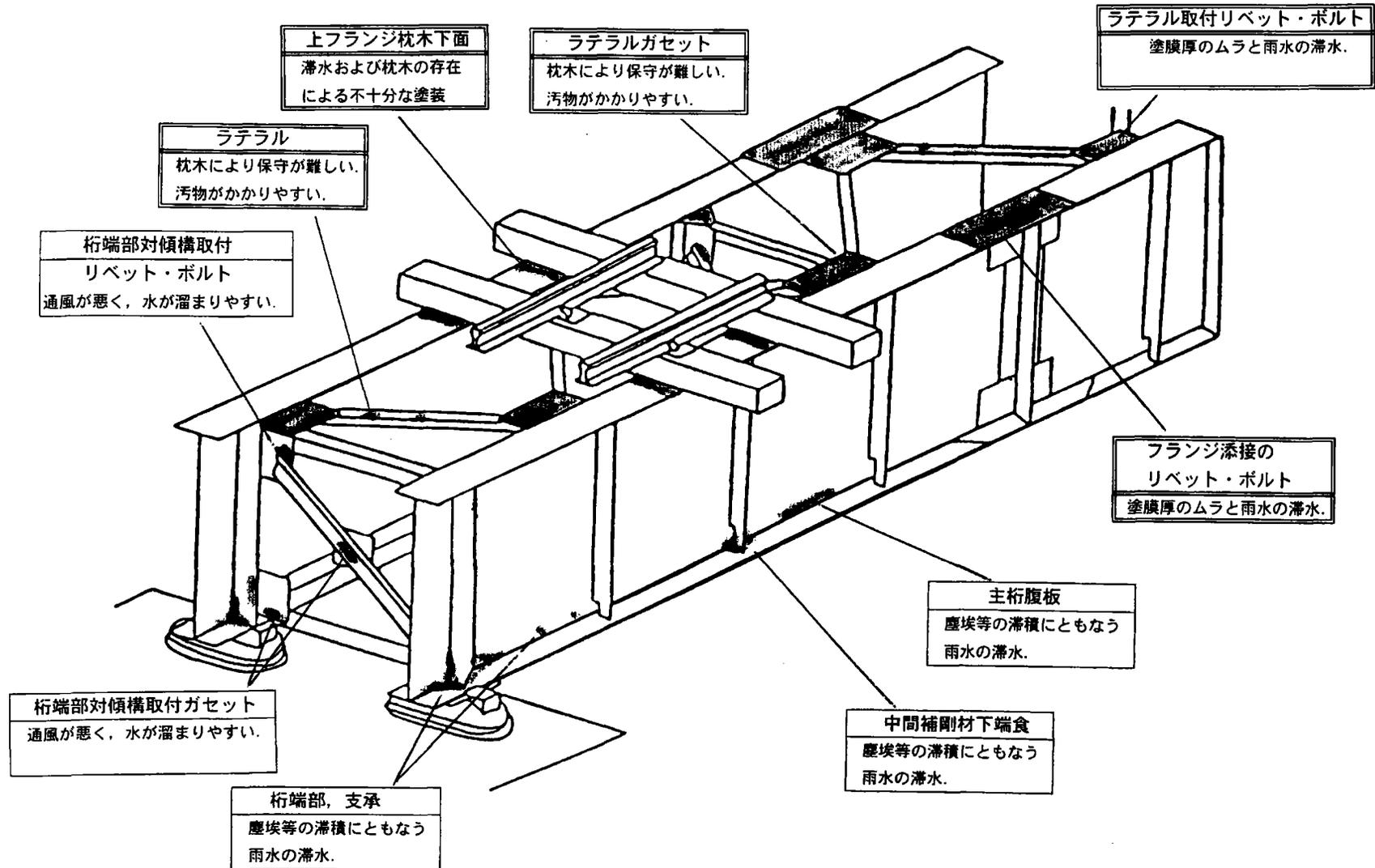


図 3-2 鉄桁 (コンクリート床版無し)

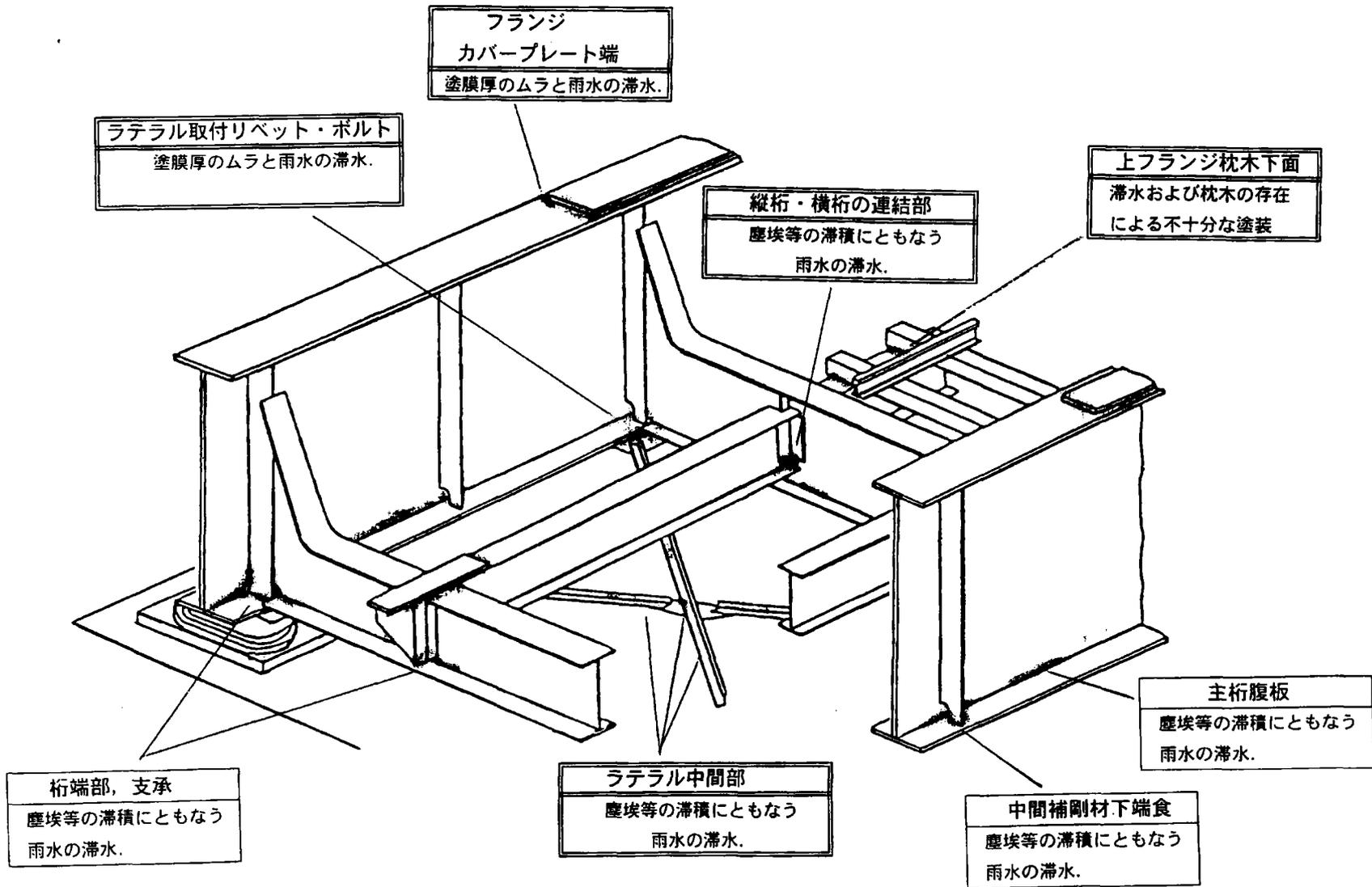


図 3-3 下路鉄桁〈コンクリート床版無し〉

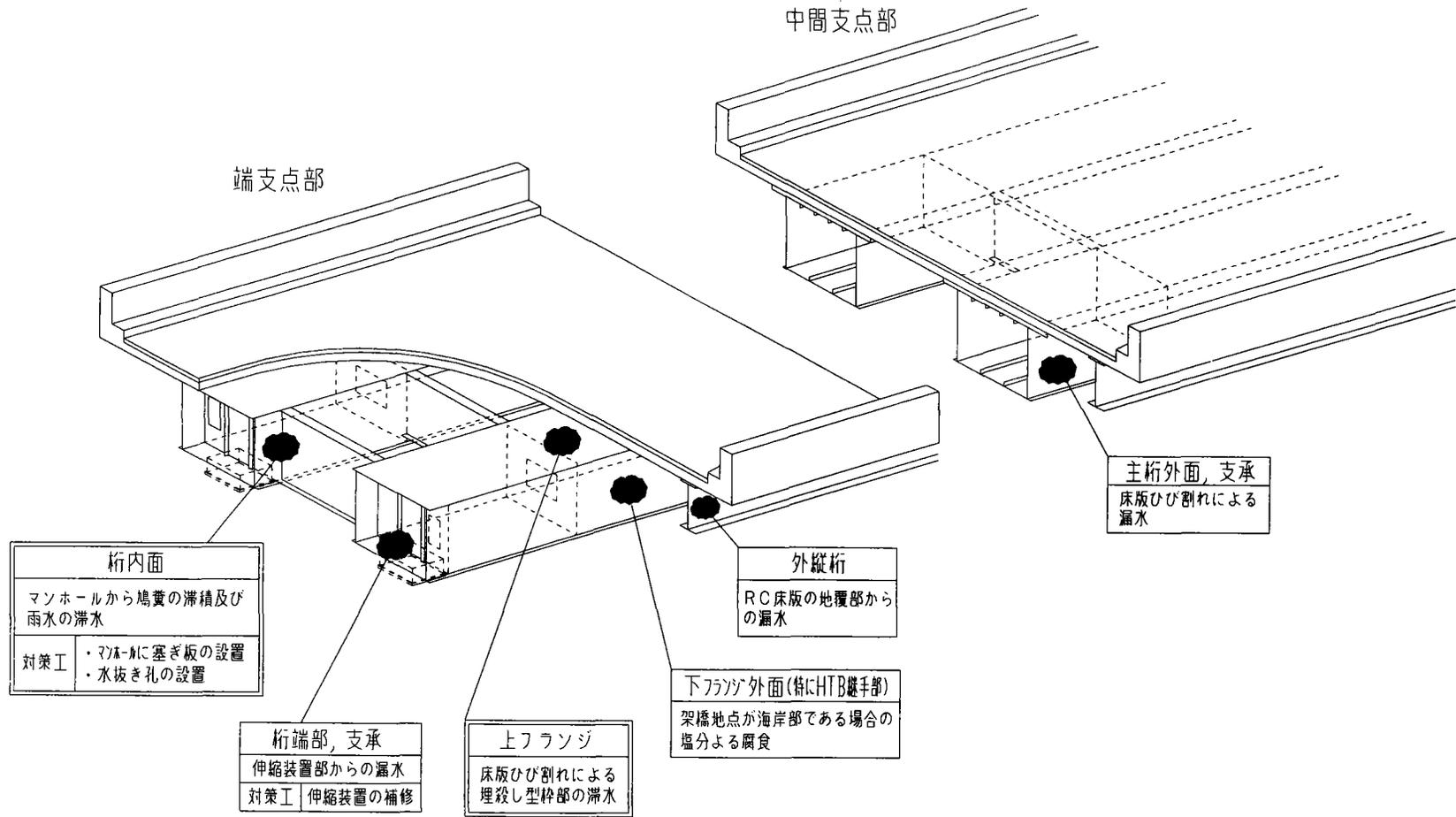


図 3-4 箱桁〈コンクリート床版有り〉

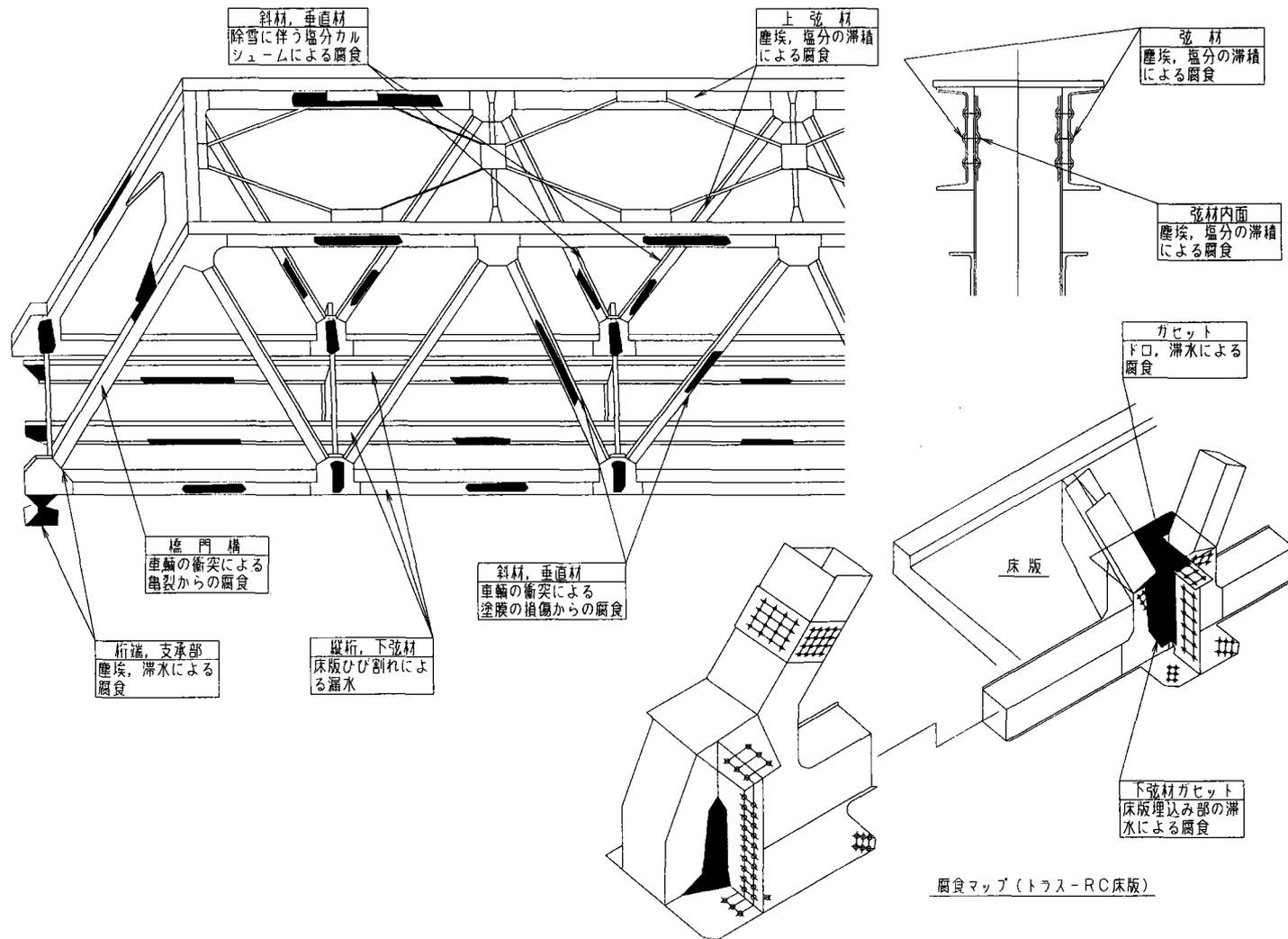


図 3-5 トラス橋〈コンクリート床版有り〉

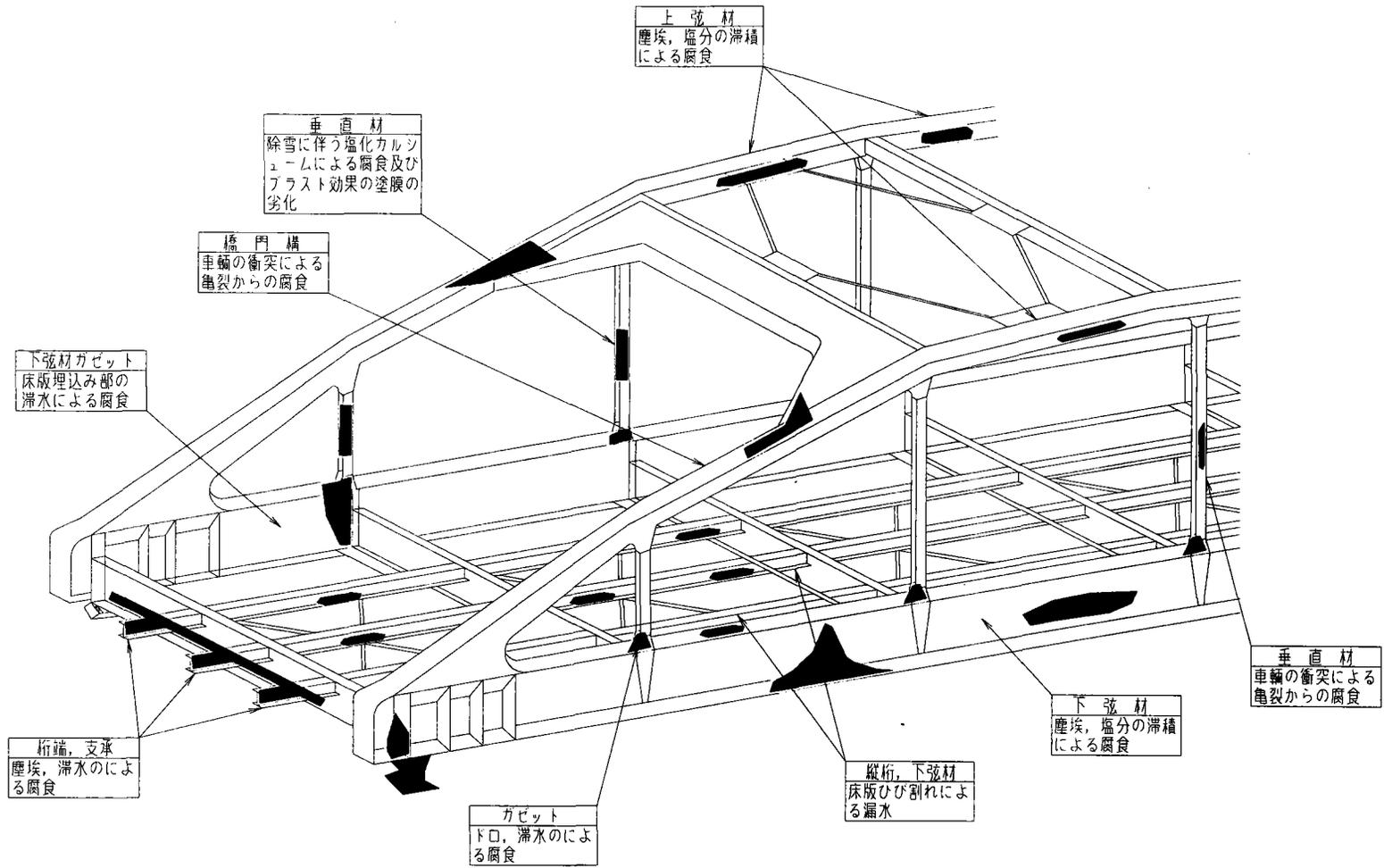


図 3-6 アーチ橋〈コンクリート床版有り〉

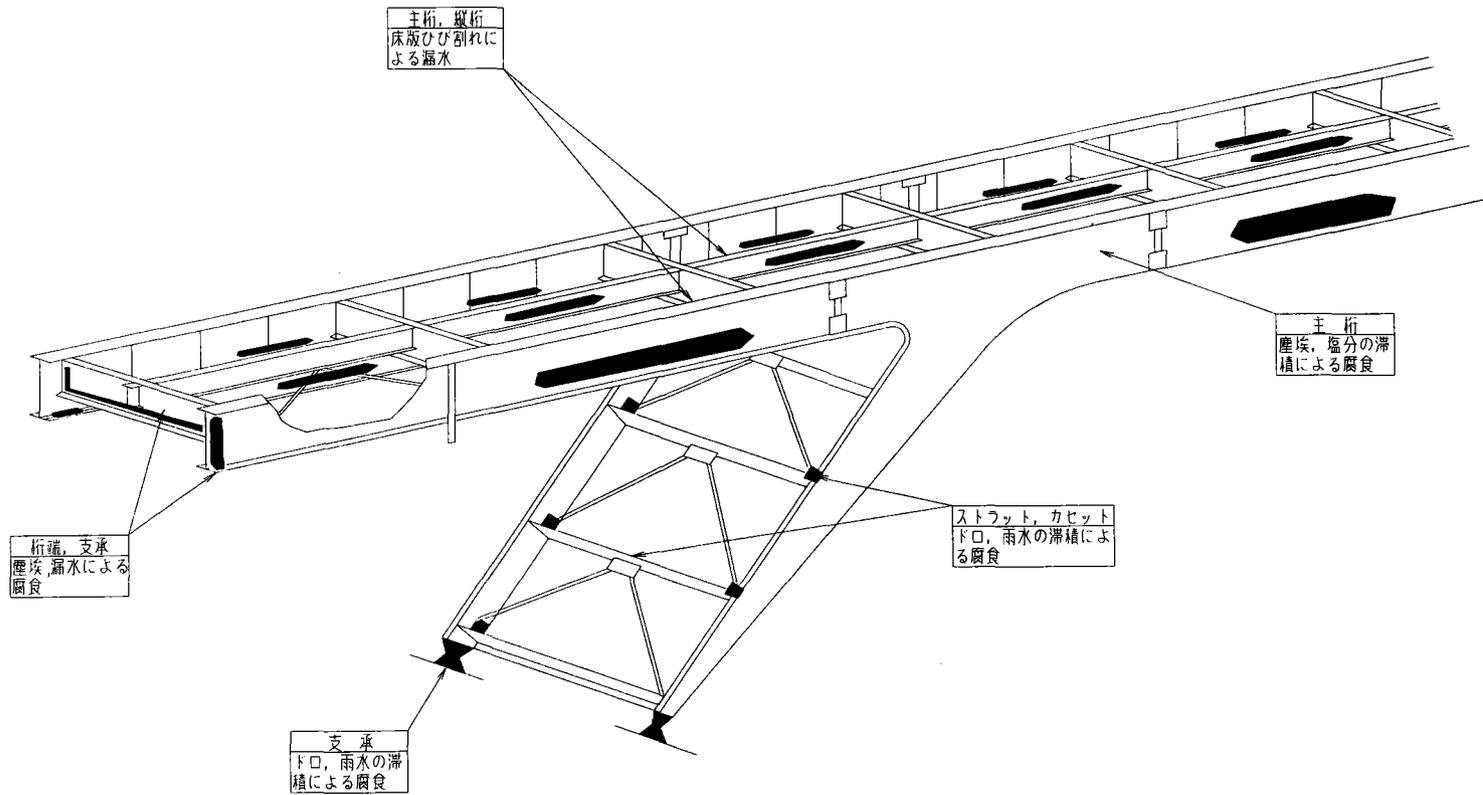


図 3-7 ラーメン橋〈コンクリート床版有り〉

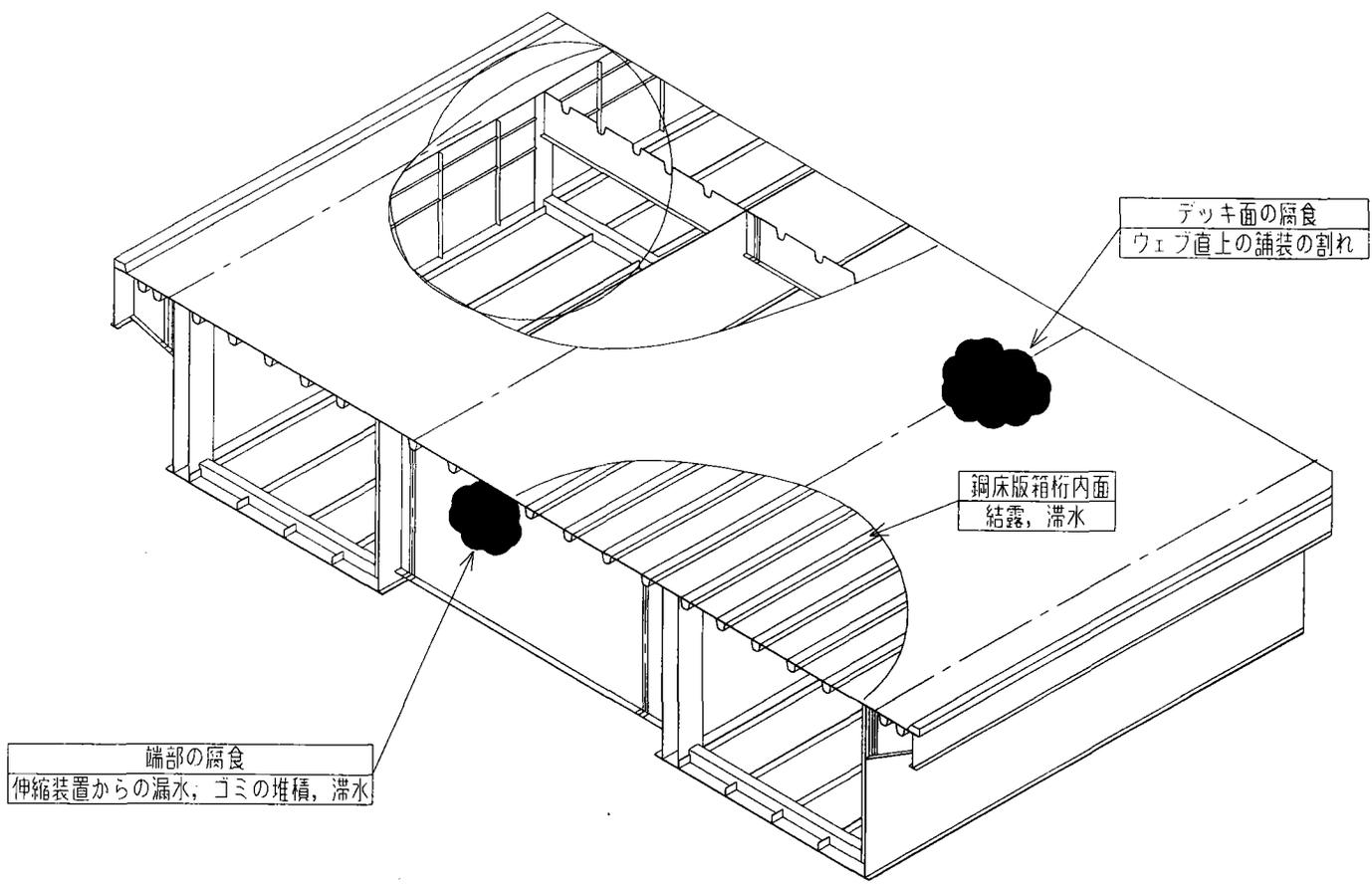


図 3-8 鋼床版

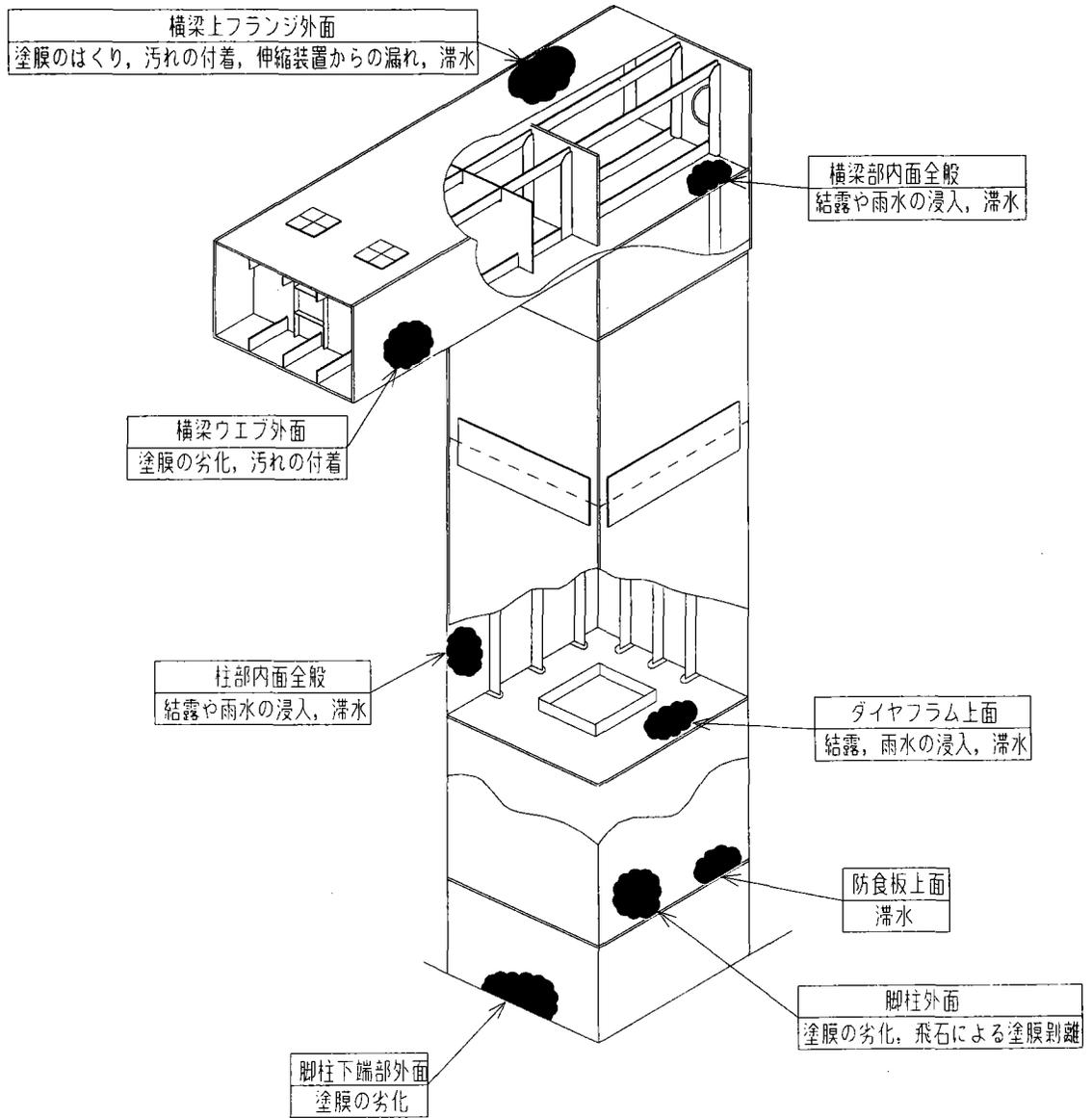


図 3-9 鋼製橋脚

2.2 鋸桁形式（コンクリート床版有り）

鋸桁形式では、基本的に密閉構造はないが、桁端部は密閉構造に近く、風通しが悪く、滞水しやすい。また、支承の周辺は土やゴミが堆積しやすく、これらが濡れた場合には、長時間にわたって湿潤状態が保たれる。

これらの要素に加え、桁端部には、損傷を起こしやすい伸縮装置が設置され、その損傷とともに路面からの漏水を起こすことも多い。これらから、桁端部のウェブ、下フランジには発錆・腐食が見られることが多い。特に、支間長の短い古い橋梁では、排水型の伸縮装置が採用されていることも多く、その場合にはかなり高い頻度で腐食が認められる。

2.3 鋸桁形式（コンクリート床版無し）

床版を持たない構造では、風通しは良くなるが、一方で雨水などの浸入は容易であるため、土やゴミなどが堆積している場合には、発錆・腐食を起こしやすい。

2.4 箱桁形式

箱桁内面は、基本的に密閉構造であるため結露が発生しやすい。また、床版にひび割れが発生しているような場合には、連結部より雨水が浸入することがある。これらによる滞水を速やかに排水できない構造になっている場合には、桁内面全体にわたって、発錆・腐食が発生する。

また、桁端部は、鋸桁よりもさらに密閉度が高いため、同様の原因で、発錆・腐食が見られることが多い

2.5 トラス、アーチ、ラーメン橋

これらの鋼構造における発錆・腐食状況は、鋸桁の場合と同様であるが、格点部など部材が入り組んだ構造になっている箇所が多いため、土やゴミが堆積しやすく、それらの箇所は発錆・腐食が発生しやすい。

下路橋において、垂直材が床版に埋め込まれている構造では、その周辺が特に腐食を起こし易く、また発見もしにくいため、発見されたときには、相当腐食が進行している場合がある。

2.6 鋼床版

発錆・腐食は、主に桁端部に発生することが多い。これは、風通しが悪く、またエンドプレートなど滞水しやすい構造をしていることに加え、損傷を起こしやすい伸縮装置が設置され、その損傷とともに路面からの漏水を起こすことが原因と考えられる。

2.7 鋼製橋脚

鋼製橋脚は、ほとんど密閉された構造であるため、風通しが悪く、温度変化に伴い、結露を起こす。また、詳細構造のまずさや脚の施工位置によっては、連結部やマンホールなどから内部へ雨水が浸入する事もある。これらの結露水や進入水が速やかに排水される構造になっている場合には問題は少ないが、逃げ場が無く滞水すると、脚内面の全体にわたって発生・腐食を起こす。特に、脚内部は普段目に付かない場所であるだけに、調査した時点では、数十センチにも滞水し、腐食も相当に進行している場合もある。

横梁部は、上記に加え、外面においても、上部構造からの漏水による滞水、塗膜の劣化などにより、発錆・腐食の発生が見られることがある。特に、桁端部を乗せているような場合には、伸縮装置部からの漏水により、著しい発錆・腐食が見られることがある。

脚柱部外面は、一般的に発錆・腐食の発生は少ないが、経年変化による塗膜の劣化や、飛石などによる塗膜の傷から、発生していることが有る。また防食板や根巻きコンクリート上部に滞水している場合には、その部位から発錆・腐食を起こしていることがある。

3. 延命化工法

3.1 補修・補強の基本的な考え方

腐食に対して補修・補強を行う必要がある状態には大きく分けて、①腐食により断面が減少しており耐力的に問題となっている状態と、②耐力的にはまだ余裕があるがそのまま放置することの出来ない状態の2つに分けられる。補修・補強方法を考える場合、この2つの状態では、大きく違ったものとなる。①の場合、断面回復を計る必要があり、腐食部の取替え、当て板等による補強などの方法が必要となる。②の場合においては、塗装の塗替え、腐食因子の排除など、腐食がこれ以上進行しないような対処のみで一応は十分と考えられる。しかし、いずれにせよ現状復旧のみでなく、対策後に腐食が再発生しにくいよう、塗装系の向上や構造の改善などの予防保全的な対策を考慮することが望ましい。

図 3-10 に腐食部の補修・補強パターンを、以下に解説を示す。

(1) 耐力不足が生じている場合の補修・補強

腐食により断面減少が生じ、耐力不足が生じている場合には、断面回復の処置が必要である。断面回復を図る方法としては、

- ・腐食部に当て板を添接し補強する。
- ・腐食部を部分的に切断撤去し、新規材を挿入する。または新しい部材と取り替える。
- ・腐食部の近傍に部材（バイパス材）を追加して補強する。

等の方法が考えられる。

当て板の添接方法としては、高力ボルトを用いる方法と溶接による方法方法とがある。これらを腐食部に用いる場合、それぞれに問題点があり注意が必要である。

高力ボルトを用いる方法では、腐食による板表面の凹凸が激しいと、腐食材と添接板間に十分な接触面が確保できず、力の伝達が期待とおりになされない事が危惧される。この様な場合、接着剤と高力ボルトを併用することにより、摩擦接合としての強度を得ることが出来るととともに、腐食空隙部への充填効果も得られ、有効な手段となる。

溶接によるによる場合においては、溶接可能な腐食程度であるかどうか（ケレンにより健全面を完全に露出させることが可能か）の十分な検討とともに、供用化の橋梁に対する現場溶接となり、その施工性および品質保証が問題となる。また、部材に新たな応力集中点を残すこととなり、疲労上の配慮も必要である。

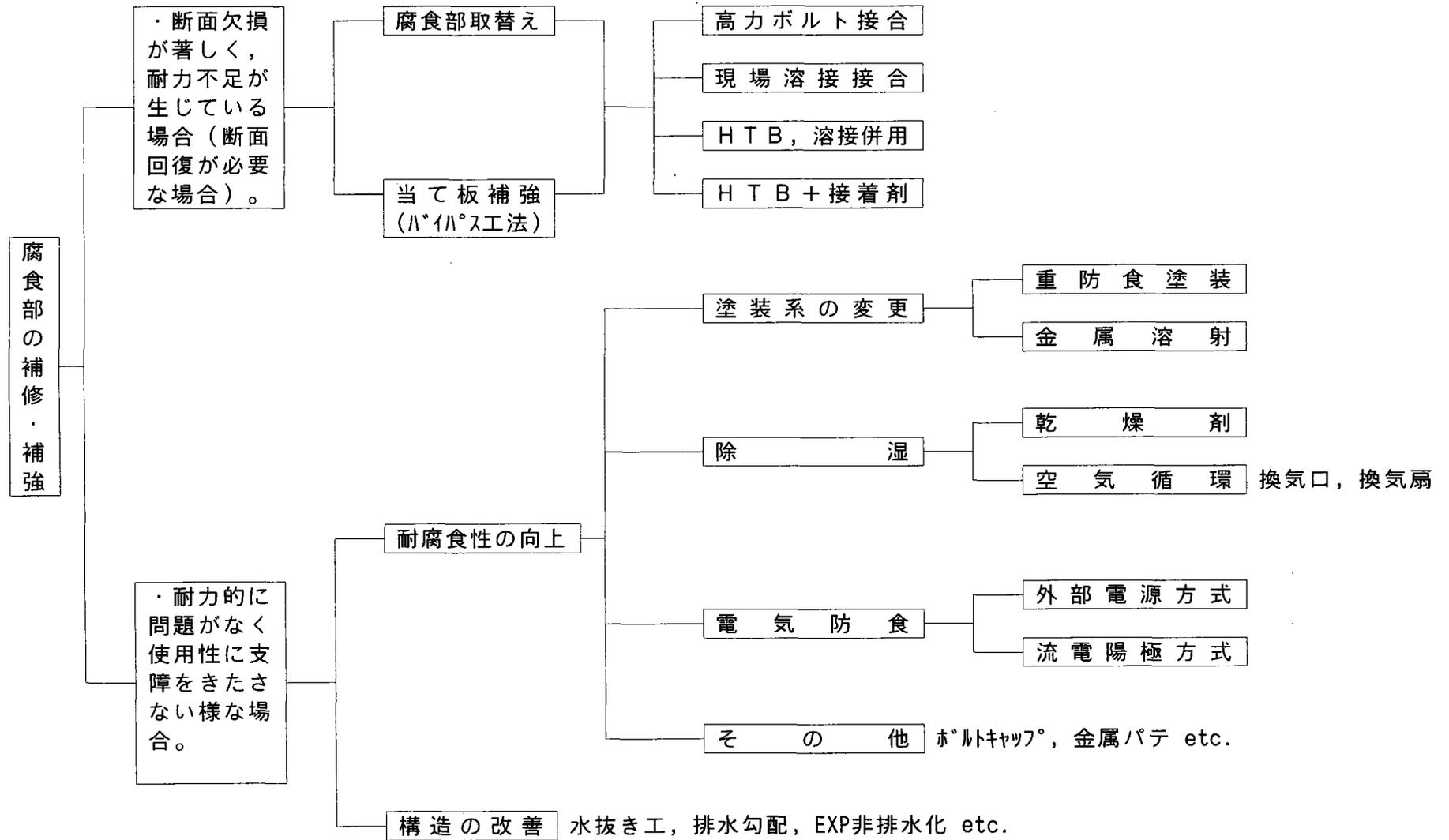


図 3 - 10 腐食部の補修・補強パターン

図 3-11 に各種の方法により添接補強を行った腐食部材の疲労試験結果例を示す。

この試験結果においては、溶接による添接補強においても J S S C の F 等級は十分満足している結果となっている。腐食程度にもよると考えられるが、溶接品質を確保すれば、ある程度の腐食においては溶接による添接も十分適用可能といえる。

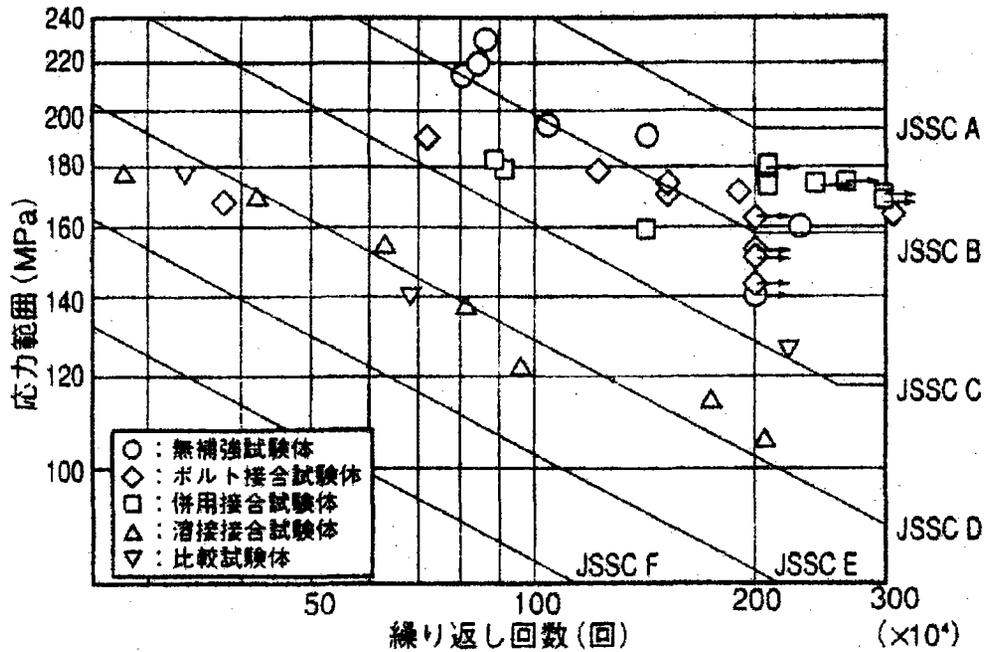


図 3 - 11 添接補強した腐食部材の疲労試験結果

高力ボルトと溶接とを併用する場合は、上記の注意点とともに、従来通り、道路橋示方書に従い、下記の点に注意する必要がある。

- ・ 応力と直角なすみ肉溶接と高力ボルト摩擦接合は併用してはならない。
- ・ グループ溶接を用いた突合せ溶接または応力に平行なすみ肉溶接と高力ボルト摩擦接合は併用して良いがその荷重分担については十分な検討が必要である
- ・ 溶接と高力ボルト支圧接合は併用してはならない。

腐食部を部分的に取替える場合、一時的に断面の欠損が生ずることとなる。その部位が主要部材である場合や広範囲に切断・撤去する場合には、部材の仮受けまたはバイパス材の取付け等による応力低減の処置が必要である。補強板取付のため、連結部のボルトを取り外す場合にも同様の考慮が必要である。床組部材の場合、床版があるため腐食部の撤去や補強材の添接が困難な事が多く、腐食部の近傍に部材を追加することで補強を行う場合が多い。

これらの腐食部の補修・補強に併せて、腐食原因の排除やより耐食性に優れた防錆処理の採用など、予防保全的な対策を講ずることも必要と考えられる。

(2) 耐力的に問題がない場合

腐食損傷の程度が軽く、耐力的に問題がないと判断される場合の対策工法としては、機能回復としては腐食部のケレン及び塗装の塗替えのみで良いが、腐食の再発生を防止する観点から次の工法が挙げられる。

A. 主構造の耐腐食性の向上を図る工法

- 1) 塗装系の変更
- 2) 除湿
- 3) 電気防食
- 4) その他

B. 構造ディテールの改善

以下に各項目の概要を示す。

1) 塗装系の変更

現況の塗装系では発錆が早く、期待する塗膜寿命が短いと判断される場合には、防食機能が高い塗装系（重防食塗装）に変更したり、金属溶射等の特殊な工法を用いる場合がある。

なお、延命化を図るための塗装方法については、第I編で詳述している。

2) 除湿

箱桁内部に発生し易い結露は、発錆の大きな原因の一つである。これに対する対策法として乾燥材の設置、換気口や換気扇による空気循環を行う方法である。

新設橋においては、乾燥空気を循環させる方法が採用された事例があり、既設橋梁の補修においても今後、有効な手段であると考えられる。

3) 電気防食

この方法による腐食対策は、水中構造物やコンクリート中の鉄筋には有効とされるが、空気中の構造物での事例は少ない。

4) その他

ボルトキャップによる高力ボルトの防錆、金属パテによる腐食欠損部の埋め戻しを行う場合がある。

5) 構造ティテールの改善

改善方法として、下記の3方法が挙げられる。

①水抜き孔の設置

箱桁下フランジやアーチ垂直材取付け部において水抜き孔を設置する。

②伸縮装置の非排水化

主構造における腐食部位で最も多いのが桁端部であり、その原因の一つが伸縮装置の破損である。伸縮装置が樋をもつ排水型伸縮装置である場合には、非排水型に改良する方法がある。

③部材エッジ部のR仕上げ

部材の角部は塗料が十分に付着せず塗膜厚が薄くなる傾向となり、他の部位に比べ早期に塗膜が劣化する。従って、グライダーにより2mm程度のR加工を行う。

	断面形状	加工方法
S		垂直のまま
C1		45度に巾1%で面取りをしたもの
C1r		C1に再度面取りをしたもの
C2		45度に巾2%で面取りをしたもの
C2r		C2に再度面取りをしたもの

エッジ部の形状

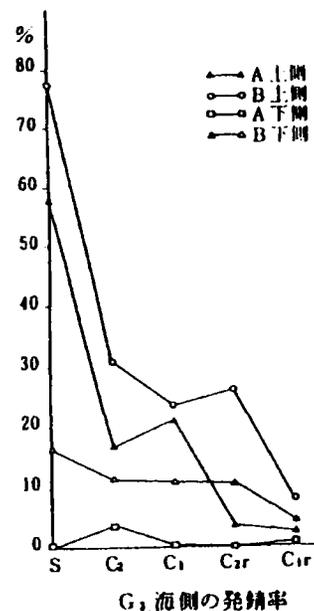


図 3 - 11 実橋における部材面取りの発錆との関係

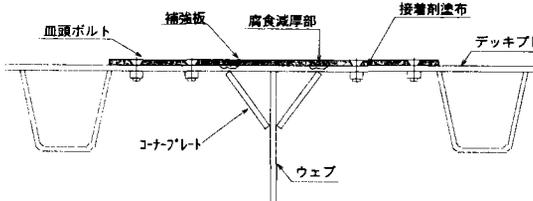
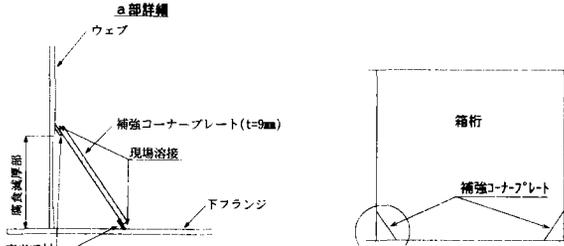
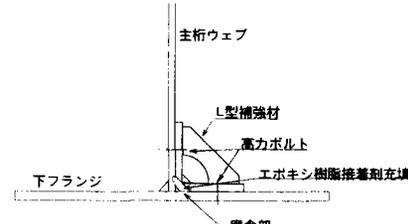
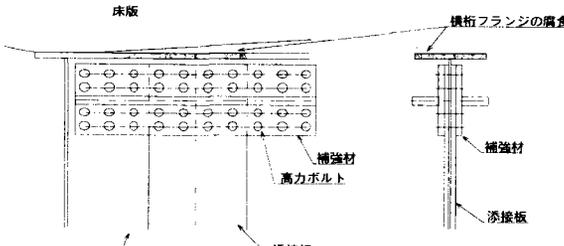
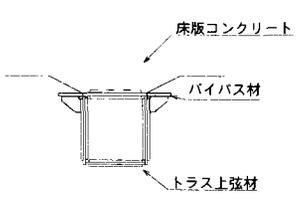
(社会資本の腐食・紡食 平成6年3月 (社)鋼材倶楽部)

3.2 補修・補強事例

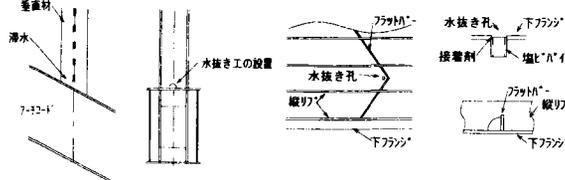
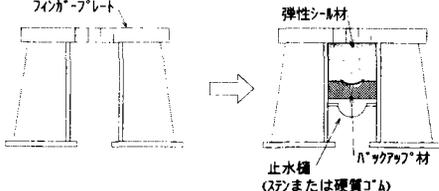
表 3 - 1 に主要部材の補修・補強事例を、写真 3 - 1~9 に事例写真を示す。

表 3-1 主要部材の補修・補強例

工法	補修・補強概要	概要図または仕様(例)	備考	写真NO	効果
	<p>事例1：鉄道橋縦桁上フランジ腐食部の取替え</p> <p>単純下路リベットトラス橋(鉄道桁)において、縦桁上フランジアングルが著しく腐食し部分的に70%以上の断面欠損が生じていたため、上フランジ部材の新規部材との取替えを行った事例。</p> <p>取替え部リベットを昼間作業で高力ボルトに取替えておき、夜間線路閉鎖時間内に作業可能な範囲を順次新規部材に取替えた。</p>	<p>補修前 補修後</p>	<p>在来のリベット構造では、合い面に鉛丹が塗布されており、そのままでは現基準の高力ボルト接合で要求される摩擦係数を確保することは困難である。したがって、リベットを高力ボルトに取替える場合は、摩擦係数の低減を考慮した継手強度の検討を行う必要がある。</p> <p>本事例においては、既往の試験結果などから、摩擦係数を0.2として検討を行っている。</p>	写真 3-1	現状復旧
	<p>事例2：支間中央付近主桁の下方フランジの腐食部の取替え</p> <p>主桁支間中央付近の下方フランジ、ウェブに著しい腐食が発見され、腐食部を取り除き、元通りの部材に取り替えた事例。</p> <p>当該構架は、主要幹線道路を跨ぐ高架橋であったため、通行止めおよびベント設置等の方法をとることが出来ないことから、一時的に応力を受け持つ仮設部材(バイパス材)を取り付け、腐食部の撤去、復旧を行った。</p>	<p>STEP1: 補強材(鋼板)の治具取付 STEP2: 腐食部切斷、撤去 STEP3: 取替え部材取付 STEP4: 鋼板治具撤去、リベット取付</p>	<p>バイパス材を設置して腐食部を撤去する場合、応力の伝達経路、性状およびその有効性について十分な検討を行う必要がある。当該事例においては、模型桁により動的載荷試験を実施し、その確認を行っている。</p>		現状復旧
腐食部の取替え	<p>事例3：腹板孔食部の取替え</p> <p>主桁、横・縦桁等の腹板が部分的に腐食し、断面欠損に至っている事例がある。特に内桁の腹板下端で下フランジに近い箇所に多く見られ、水分、塵埃などが溜まりやすいためと考えられる。</p> <p>この様な部分的な腐食、欠食の場合には、腐食部分をガス切斷し、撤去部材と同材・同厚の鋼板を当てる補修方法が一般的である。</p>		<p>鋼板の添接方法としては、高力ボルトによる方法と現場溶接による方法とがある。高力ボルトによる方法では腐食による板表面の凹凸により十分な接触面が確保できない場合が懸念される。溶接による方法では部材に新たな応力集中点を残すこととなり疲労上の配慮が必要となるとともに、その施工性および品質保証が問題となる。</p> <p>一般的には、構造上溶接でしか添接出来ないような場合を除き、高力ボルトによる方法がほとんどと思われる。</p>		現状復旧 + α
	<p>事例4：トラス弦材腐食添接板の取替え</p> <p>トラス下弦材の添接部が孔食を含んだ著しい腐食を生じていたため、その添接板を新規部材と取り替えた事例。</p> <p>取替えに当たっては、軸力伝達部材として下フランジのこぼ面にバイパス材を溶接添加し、取替え後撤去している。</p>		<p>事例2同様、バイパス材による応力の伝達経路、有効性については十分な検討が必要である。</p>	写真 3-2	現状復旧
特記	<p>腐食部の取替えは、2次部材(構構、ガセット等)ではよく行われるものの、主要部材についてはある程度の補強を伴ったものがほとんどであり、単純な取替え事例は少ない。したがって、腐食部を撤去して新設部材を取付ける場合については、ある程度の補強を伴っていてもここに分類した。</p>				

工法	補修・補強概要	概要図または仕様(例)	備考	写真NO	効果
当 て 板 補 強	<p>事例1：鋼床版補修デッキプレート腐食部の当て板補強 主桁腹板上の舗装に輪荷重により構軸方向にひび割れが生じ、その直下に雨水が浸入、鋼床版上面が湿潤状態におかれ腐食したため、当て板により補強を行った事例。 当て板の接合用高力ボルトは、ボルト頭の突出が舗装に悪影響を及ぼさないよう皿頭高力ボルトとし、接合部の剛性を高めるとともに腐食部の充填材として接着剤を併用している。</p>		腐食部への当て板の添接に接着剤を併用することは、剛性向上とともに腐食部への充填、止水効果も期待でき、非常に有効な方法と考えられる。	写真 3-3	補強 (腐食断面 +α)
	<p>事例2：鉄道上箱桁の主桁ウェブ腐食部の補強 鉄道上箱桁内部に、桁端部からの浸水(桁端ダイヤフラムが開口式)による著しい腐食が生じていたため、当て板により補強を行った事例。 調査の結果、耐荷力的に問題となる部位は主桁ウェブの断面減少部分であったため、断面減少を補うようコーナープレートを取り付けて補強している。コーナープレートの取付は、桁下が鉄道で外面からの作業が出来ないため、現場溶接で行っている。</p>		腐食部の取替え事例3でも記したように、発錆箇所への溶接には十分な溶接の品質管理が必要である。	写真 3-4	補強 (腐食断面 +α)
	<p>事例3：主桁下フランジ-ウェブすみ肉溶接部の腐食補強 鉄桁主桁下フランジとウェブのすみ肉溶接部に腐食による断面欠損が認められ、当て板により補強を行った事例。 すみ肉溶接腐食欠損を補強材のすみ肉溶接で、主桁フランジ・ウェブの腐食およびボルト孔の断面欠損を補強材断面で補うよう、補強材断面を決定している。</p>			写真 3-5	補強 (腐食断面 +α)
	<p>事例4：横桁上フランジ腐食部の補強 床版コンクリートハンチ部と横桁上フランジとの隙間に水・塵埃が浸入し湿潤状態となり腐食していた断面をT型の補強材で補強した事例。 床版との隙間がほとんどなく腐食部の取替えが出来ないため、上フランジ直下のウェブ両面にフランジ断面を補うT型補強材を取り付けている。</p>			写真 3-6	補強 (腐食断面 +α)
	<p>事例5：トラス上弦材腐食部の補強(バイパス工法) トラス上弦材上フランジの添接部に腐食とともにF11Tボルトの遅れ破壊が生じていたため、バイパス材を取付け継手応力をバイパス材に受け持たせることにより補修した事例。</p>		バイパス材による応力の伝達経路、有効性については十分な検討が必要であるとともに、バイパス材の取付方法にも注意が必要である。		構造変更
特記					

工法	補修・補強概要	概要図または仕様(例)	備考	写真NO	効果																																																											
耐腐食性の向上	<p>・塗装系の変更</p> <p>腐食を伴っている部材に対して、構造物としての耐力的には問題ないものの、一般的な塗装では発錆も早く期待する塗膜寿命も短いと考えられる場合、およびこのまま腐食が進行すると近い将来耐力・耐久性に影響してくると判断される場合、補修方法の1つとしてより防食機能の高い塗装系に変更したり、特殊な塗装方法を用いる場合がある。</p>	<p>重防食塗装仕様例</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>工程</th> <th>塗料</th> <th>標準使用量 kg/㎡</th> <th>標準膜厚 μm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>素地調整</td> <td>工具を用いてルーズな塗膜や錆層を除去。</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>第1層</td> <td>厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料</td> <td>200</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>第2層</td> <td>超厚膜型無溶剤エポキシ樹脂系塗料</td> <td>3500~5000</td> <td>2000</td> </tr> <tr> <td>第3層</td> <td>厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料</td> <td>200</td> <td>90</td> </tr> </tbody> </table> <p>*実観を考慮しなくてよい場合は第1,3層をタールエポキシ樹脂系塗料とする。</p> <p>現場施工可能な溶射方法分類</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">溶射材料</th> <th colspan="4">溶射材料</th> <th rowspan="2">作業性</th> <th rowspan="2">温度上昇</th> </tr> <tr> <th>鉄鋼・合金</th> <th>セラミック</th> <th>サーメット</th> <th>プラスチック</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ガス溶線式</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>高い</td> <td>中</td> </tr> <tr> <td>ガス粉末式</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>やや低い</td> <td>やや高い</td> </tr> <tr> <td>アーク溶線式</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>高い</td> <td>低い</td> </tr> <tr> <td>プラズマ式</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>やや低い</td> <td>やや高い</td> </tr> </tbody> </table>	工程	塗料	標準使用量 kg/㎡	標準膜厚 μm	素地調整	工具を用いてルーズな塗膜や錆層を除去。			第1層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	90	第2層	超厚膜型無溶剤エポキシ樹脂系塗料	3500~5000	2000	第3層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	90	溶射材料	溶射材料				作業性	温度上昇	鉄鋼・合金	セラミック	サーメット	プラスチック	ガス溶線式	○	○	○	○	高い	中	ガス粉末式	○	○	○	○	やや低い	やや高い	アーク溶線式	○	○	○	○	高い	低い	プラズマ式	○	○	○	○	やや低い	やや高い	<p>塗装の塗替えに際しては、ケレンが不十分な場合、表面上変化がなくとも、厚膜塗料の中で腐食が進行する恐れもあり、腐食部を完全に取り除く必要がある。電動ワイヤのほかにプラストなどを用いることも有効と考えられる。</p>	写真 3-7	性能向上 + 現状維持
	工程	塗料	標準使用量 kg/㎡	標準膜厚 μm																																																												
	素地調整	工具を用いてルーズな塗膜や錆層を除去。																																																														
	第1層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	90																																																												
第2層	超厚膜型無溶剤エポキシ樹脂系塗料	3500~5000	2000																																																													
第3層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	90																																																													
溶射材料	溶射材料				作業性	温度上昇																																																										
	鉄鋼・合金	セラミック	サーメット	プラスチック																																																												
ガス溶線式	○	○	○	○	高い	中																																																										
ガス粉末式	○	○	○	○	やや低い	やや高い																																																										
アーク溶線式	○	○	○	○	高い	低い																																																										
プラズマ式	○	○	○	○	やや低い	やや高い																																																										
<p>・除湿</p> <p>箱桁内部などは密閉に近い構造であるため、一般的には外面に比べて腐食環境はよいと考えられるが、内部にいったん水分が入り込むと、外気温の上下によりこれが結露し、発錆の大きな原因となる。この水分を取除く方法として、乾燥剤の設置や換気扇、換気口による空気循環を行うことがある。</p>	<p>・乾燥空気循環による除湿例</p> <p>・換気扇による除湿例</p>	<p>来島大橋のケ-711、尾道大橋の箱桁内などの新橋では乾燥空気を循環する方法が採用されている。既設橋梁においても今後有効な手段の1つと考えられる。</p>		環境向上 + 現状維持																																																												
<p>・電気防食</p> <p>電気防食は防食電流を鋼材表面に送り込むことにより鋼の電位を下げ防食する方法で、水中構造物やコンクリート中の鉄筋などに有効とされる。空気中の鋼構造物にも適用可能であるが事例は少ない。</p> <p>電気を流入する方法としては、外部電源から防食電流を供給する外部電源法と、異種金属間電位差を利用して防食電流を得る犠牲(流電)陽極法の2つがある。</p>	<p>・電気防食方法</p> <p>外部電源方式</p> <p>犠牲(流電)陽極方式</p>	<p>鋼橋としては、東京湾横断道路の鋼製脚海中部に、Al合金陽極による電気防食が採用されている。</p>		環境向上 + 現状維持																																																												
<p>・その他</p> <p>ボルトキャップによる高力ボルトの防錆、金属パテによる腐食欠損部の埋め戻し等で防食することもあ</p>	<p>・ボルトの防錆キャップ</p> <p>・金属パテの仕様例</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>組成</td> <td>鉄粉80%+エポキシ20%</td> </tr> <tr> <td>色状・状態</td> <td>濃灰、パテ状</td> </tr> <tr> <td>混合比率</td> <td>主材:硬化剤=9:1(重量比)</td> </tr> <tr> <td>可使時間</td> <td>45分(21℃)</td> </tr> <tr> <td>硬化時間</td> <td>1.5~2時間(21℃)</td> </tr> <tr> <td>圧縮強さ</td> <td>96N/mm²</td> </tr> <tr> <td>引張強さ</td> <td>69N/mm²</td> </tr> </tbody> </table>	組成	鉄粉80%+エポキシ20%	色状・状態	濃灰、パテ状	混合比率	主材:硬化剤=9:1(重量比)	可使時間	45分(21℃)	硬化時間	1.5~2時間(21℃)	圧縮強さ	96N/mm ²	引張強さ	69N/mm ²			写真 3-8, 9	性能向上 + 現状維持																																													
組成	鉄粉80%+エポキシ20%																																																															
色状・状態	濃灰、パテ状																																																															
混合比率	主材:硬化剤=9:1(重量比)																																																															
可使時間	45分(21℃)																																																															
硬化時間	1.5~2時間(21℃)																																																															
圧縮強さ	96N/mm ²																																																															
引張強さ	69N/mm ²																																																															
特記																																																																

工法	補修・補強概要	概要図または仕様(例)	備考	写真NO	効果																						
構造の改善	<p>事例1：水抜き孔の設置 設計・架設時は想定しなかった思わぬところに滞水が生じ腐食の原因となっている事例がある。このような場合、水抜き孔などの排水処置を行うことは簡便ながら有効な手段と考えられる。</p>	<p style="text-align: center;">A-子垂直材の排水孔設置例 箱桁下フランジ排水孔設置例</p> 	<p>応力的に問題とならないよう考慮するとともに、外観も出来る限り損なわれないような工夫が望ましい。</p>		現状維持																						
	<p>事例2：伸縮装置の非排水化 桁端部における腐食の主要因は伸縮装置からの漏水・落水である。これを防止する方法として伸縮装置の非排水化がもっとも一般的な方法として用いられている。</p>	<p style="text-align: center;">鋼製フィン・ジョイントの非排水化例</p> 	<p>充填材である弾性シール材には種々の材質・形状が提案されているが、供用していく内にシール材の剥離、損傷などいろいろな問題が生じており、耐久性に富んだ装置は未だ開発されていないのが現状である。したがって、非排水装置については取替え部品と考え、取替えが容易な構造とすることが必要である。</p>		現状維持																						
	<p>事例3：塗装時部材コバ面のR仕上げ 部材の角部は塗料が十分に付着せず薄くなる傾向にあり、他部位に比べて早期に塗膜劣化が生ずる。グラインダによりR加工を施し、塗膜厚を確保することは有効である。</p>	<p style="text-align: center;">R仕上げ例</p>  <p style="text-align: center;">角部の形状と塗膜厚</p> <table border="1" data-bbox="525 974 1058 1086"> <thead> <tr> <th rowspan="2">エッジ形態 膜厚(μm)</th> <th colspan="2">シャープエッジ</th> <th colspan="3">R加工されたエッジ</th> </tr> <tr> <th>エッジ部</th> <th>一般部</th> <th>エッジ部</th> <th>一般部</th> <th>エッジ部</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1回塗り膜厚</td> <td>10</td> <td>70</td> <td>14%</td> <td>50</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>2回目までの膜厚</td> <td>40</td> <td>140</td> <td>29%</td> <td>110</td> <td>140</td> </tr> </tbody> </table>	エッジ形態 膜厚(μm)	シャープエッジ		R加工されたエッジ			エッジ部	一般部	エッジ部	一般部	エッジ部	1回塗り膜厚	10	70	14%	50	70	2回目までの膜厚	40	140	29%	110	140		
エッジ形態 膜厚(μm)	シャープエッジ			R加工されたエッジ																							
	エッジ部	一般部	エッジ部	一般部	エッジ部																						
1回塗り膜厚	10	70	14%	50	70																						
2回目までの膜厚	40	140	29%	110	140																						
特記																											



腐食部材



取替え後

写真-1 腐食部材の取替え

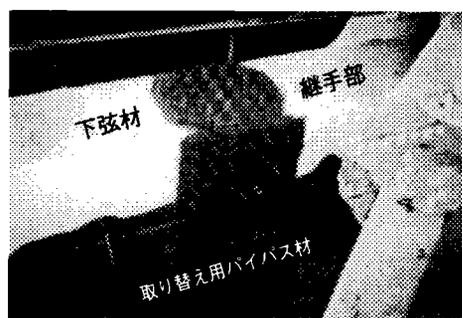


写真-2 パイパス材による取替え

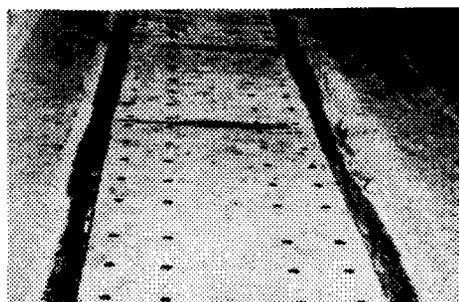
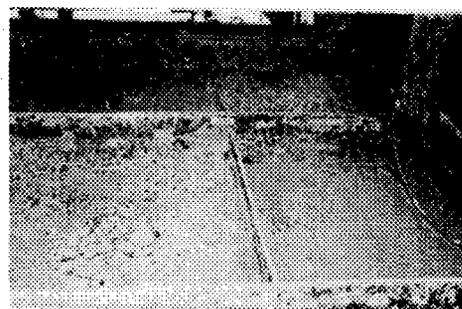


写真-3 デッキプレートの当て板補強

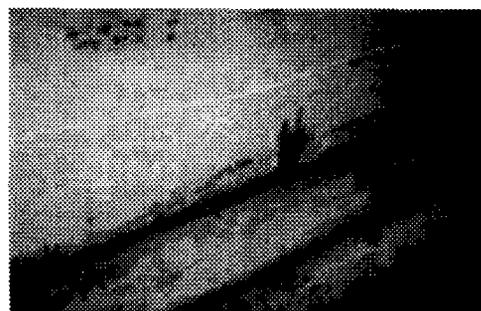


腐食状況

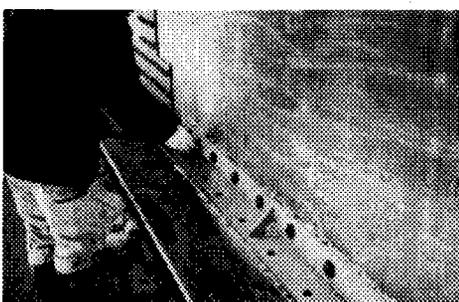


補強後

写真-4 コーナプレートによる腐食部の補強

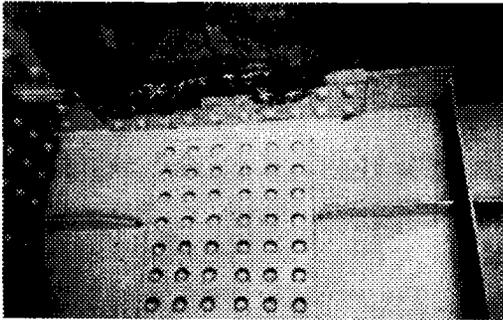


腐食状況

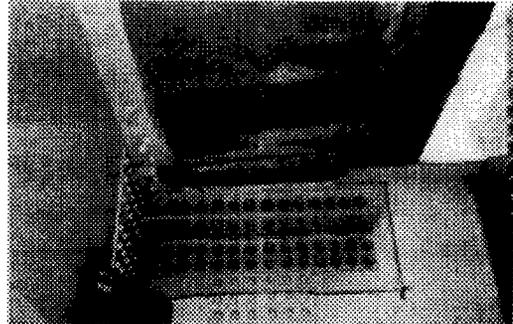


補強後

写真-5 主桁下フランジ-ウェブすみ肉溶接部の腐食補強



腐食状況



補強後

写真-6 横桁上フランジ部の腐食補強



写真-7 超厚膜型塗料による塗装

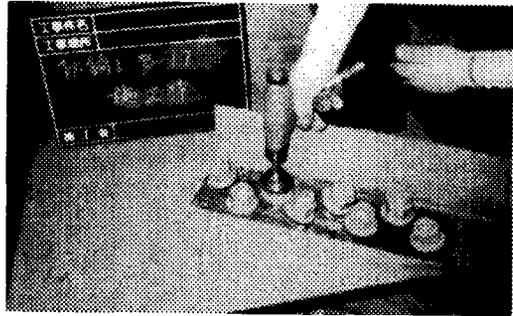
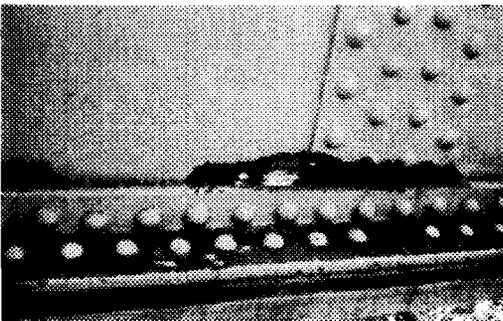
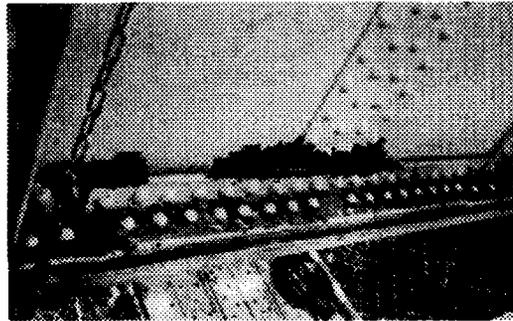


写真-8 ボルトキャップ



腐食状況



補修後

写真-9 金属パテによる補修例

3.3 補修・補強時の留意点

鋼材を使用した構造物の補修・補強方法の特徴として、比較的容易に部材を切断・撤去でき、ボルト接合や溶接接合により健全な部材を新たに取り付けることができるということである。しかしながら、補修・補強での施工計画や品質管理を疎かにすると、施工中の事故の発生や補修・補強箇所における損傷の再発生や新たな損傷の発生を引き起こす。このようなことから、鋼構造物に関する補修・補強方法に関する研究がなされ、その成果は指針^{2),3),4)}や手引き⁵⁾、および参考資料⁶⁾として示されている。

設計・計算図書から対象となる鋼橋の設計条件と使用鋼材を確認・整理する。ここで、荷重条件や細部構造の留意点を含め、当時の設計示方書の内容を十分に把握し、設計思想を理解しておくことが必要である。

また、供用開始時から現在に至るまでに行われた補修・補強工事を橋梁台帳や道路台帳から整理する。特に、縦桁増設などの新規部材の追加や床版の増厚補強は、橋の剛性や力学的性状を変化させるので、これらの補強工事についてはその設計図書を入手して工事の詳細について把握しておくことが重要である。

3.3.1 材料

(1) 材料の確認

部材の材質は設計計算書や設計図面などに記載してあるが、設計図書を保存していなかったり、紛失したり、また、橋歴が古く図面がないものなどでは、その材質が不明なケースがある。このような場合、実部材から試験片を採取し、材料分析および材料試験および施工試験を行うことが可能であれば問題ないが、中には試験片の採取が困難な場合がある。ここでは、試験片の採取が困難な場合における非破壊試験による材料の分析方法および材料の採取が可能な場合の採取にあたっての留意点について述べる。

橋梁のなかには桁端の余裕が無い場合や材料強度の余裕量が不明なため、試験片の採取が困難なケースがある。その場合、材料の識別を比較的簡単に行える方法として「鋼の火花試験法」(JIS G 0556)がある。火花試験法については(財)鉄道総合技術研究所が作成した「鋼構造物の補修、補強、改造の手引き」⁵⁾の中に詳しく記述されている。火花試験はグラインダーによって生じる火花の形態を観察し、炭素量や特殊元素の有無の判定を行い、化学成分のわかった標準図と比較することにより材質を推定するものである。表3-2に火花試験による鋼材の区分表を示す。火花試験では火花を水平に飛ばすようにし、観察にあたっては、火花流線を先端、中央および根元部の3部分に分け、各部を詳細に観察することが必要である。

材料の採取が可能な場合には、以下の項目について注意する必要がある。

①材料試験片は、試験片を採取しても橋体の耐荷力に影響がない橋桁端部などから採

取する。

②材料試験片を採取する場合、試験片に熱ひずみなどの採取時の影響が入らないように注意しなければならない。

表 3 - 2 火花試験による材料区分 5)

鉄材の区分	鉄桁の概要	火花試験の特徴	適用例
錬鉄 ベッセマー鋼等	<ul style="list-style-type: none"> ・錬鉄 ・明治7年～明治33年頃まで製作 ・ベッセマー鋼 明治21年～(明治26年作30年式で標準化) C:0.05%程度以下 S:0.06%程度以下 P:0.08%程度以下 		<p>$\sigma = 1150 \text{ kg/cm}^2$</p> <ul style="list-style-type: none"> ・錬鉄 (作錬式型, ボーナル型桁) ・ベッセマー鋼 (作30年式)
軟鋼 S39 SS39 SS41 SM41 SM50 等	<ul style="list-style-type: none"> ・S39, SS39 ……明治34年～ ・SS41, SM41 ……明治15年～ ・SM50 ……明治34年～ C:0.1～0.3% S:0.04～5% P:0.04～5% 		<p>錬鉄, ベッセマー鋼以外は「保守標準」に示す。</p> <p>年代区分に従った値を用いる。 (達桁, 作35年式)</p>
構造用炭素鋼 S××C	<ul style="list-style-type: none"> C:0.1～0.5%程度 S:0.03% 以下 P:0.035% 以下 		<p>破線は細くやや短い。 破裂部は非常に小さいが数が多い。</p> <p>ピン, アンカーボルト等</p>
錬鉄, 錬鋼, 錬鋼品 C量0.6%以上 FC SC SF	<ul style="list-style-type: none"> ・錬鉄 C:3.3～30.8% ・錬鋼 C:0.35%程度以下 ・錬鋼品C:0.60%以下 S:0.035%以下 P:0.03%以下 		<p>流線が非常に短く根元からパチパチする。</p> <p>シュー等</p>

(2) 材料の溶接性や継手性能の確認

橋歴の古い橋梁の補修・補強に際して、昔の鋼材（以下、古材と呼ぶ）を対象として溶接や切断などの加工を施す場合、材料の加工性についての検討が必要であり、誤った加工をすると、かえって新たな欠陥を生じさせてしまい補修・補強の意味をなくしてしまうことがある。このようなことから、試験片が採取可能な場合には溶接の施工性能試験や継手耐力などの継手性能の確認試験を行い、施工性や安全性を確認した後に補修・補強の計画を行う。部材から試験片を採取することが難しい場合には、(財)鉄道総合技術研究所にてまとめた「鋼構造物の補修、補強、改造の手引き」の中に古材の加工上の注意点および古材の継手性能についてまとめているので参考とするのが良い。表3-3に古材に対する加工上の注意点を示す。古材のうち、1940年以降（昭和15年以降）の鋼材についてはほぼ現行の鋼材と同じ性質であることから、製作時期やJIS鋼種の適用が判明すれば試験などを行わずに溶接の施工性を確認することが可能である。それ以前の鋼材については、鋼材の靱性が低かったり、溶接性に影響を及ぼす元素を含有していたりするので注意を要する。

なお、橋歴の古い橋梁では部材の接合方法としてリベット継手が用いられているが、腐食やき裂の発生に伴う補修・補強においてリベットを高力ボルトに交換する際には、材片接触面に鉛丹が残存しているとすべり係数が0.25~0.28程度しか得られないことから、所定の係数が得られるように接触面の表面処理を実施しなければならない。

表 3 - 3 古材の加工上の注意点 5)

鋼材名	製作時期	代表的な適用橋梁形式	使用上の注意点	判別方法	
主として錬鉄	1883年程度以前 (M26年以前)	<ul style="list-style-type: none"> ・作錬式 ・作30年式桁の補剛材 ・1886年製のポーナル型、ボーストリング型ピントラスのアイバーと床組の一部に使用 	<ul style="list-style-type: none"> ・材質が不均一で層状剥離を起こすこともある。 ・強度は現行の41キロ材より低い(引張強度:70~80%, 伸び:数分の1程度, 靱性:非常にもろいものが多い) ・P, Sが多いものもあり, 溶接はさけるべきである。 	<ul style="list-style-type: none"> ・火花試験 ・成分試験 ・引張試験 ・製作年代からの推定 	
主としてベッセマー鋼等	1909年以前の鋼 (M42年以前)	<ul style="list-style-type: none"> ・クーバー型ピントラス ・日鉄型 ・北陸式 ・山陽基本型 ・山陽補強型 ・達1715, 達10の I ビーム桁 ・鉄作乙1075 ・帝鉄880 ・作35(鉄作7) 	<ul style="list-style-type: none"> ・強度は現行の鋼材と変わらないものもある。しかし、特に、ベッセマー鋼はバラツキが大きく、錬鉄と同程度と考えれば安心できる。 ・Siが少ないため、溶接性は劣るので、溶接は避けた方がよい。 ・P, S, Oの含有率が高いため、靱性は劣る。 	<ul style="list-style-type: none"> ・火花試験 ・成分試験 ・引張試験 ・製作年代からの推定 	
鋼	S39	1926~1928年以前 (T15~S3年以前)	<ul style="list-style-type: none"> ・I ビーム桁 達95, 達875 ・上路鉄桁 達680, 達540, 達425 達94, 研甲355 ・下路鉄桁 達123, 達16, 達74 	<ul style="list-style-type: none"> ・材質的に不均一のものが多い(S, C, Oが多く, Siが少ない。) ・強度的には規格値は保証されている。 ・しかし、靱性は低く割れやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・製作年代がある程度判明すれば, ・成分試験 ・母材のCOD試験もしくは衝撃試験で十分
	SS39	1928年以降 (S3年以降)	<p>「鋼鉄道橋設計示方書(メートル)」(S3)によった橋梁</p> <p>達344, 達827, 達1084 達407</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・溶接は可能であるがその方法は検討の余地もある。 ・老朽化した母材は、溶接部よりも靱性は劣っているし、いったんき裂ができると大きな割れに結びつきやすい。 	
	SS41	1940年以降 (S15年以降)	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼鉄道橋設計示方書(メートル) (S3) ・鋼鉄道橋設計示方書(改訂) (S31.9) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ほぼ現行の鋼材と同じ性質である。ただし、腐食が著しく進行しているものは、腐食に対する配慮が必要となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・製作時期とJIS鋼種の適用が判明すれば十分である。
	SM41	1951年以降 (S26年以降)	<ul style="list-style-type: none"> ・高張力鋼(案) (S34) ・溶接桁(案) (S35) <p>によった橋梁</p>		
	1970年以降 (S45年以降)	<p>「構造物設計標準(制定)」(S45.3)</p> <p>によった橋梁</p>			

3.3.2 部材撤去等による荷重の流れ（再分配）

腐食が著しい部材は、添接板による補修・補強や、腐食部材を撤去し、新規部材に取替えることによる補修・補強が行われる。新規部材への取替えでは、分担していた荷重が部材撤去時の断面損失により他の部材へ再配分される。この再配分が他の部材の余剰耐力を低下させ、施工時の事故の引き金になることもあるので注意しなければならない。また、施工法によっては、撤去によって再配分された力が新規部材を取替えた後もそのまま分配された状態に置かれ、工事完了後の構造系として、工事前の構造系よりも耐力低下している可能性もある。

このようなことから、部材撤去等の施工を実施する際には、工事ステップ毎の力の分配を照査し、部材の補強などを行うことが重要である。また、計算にあたっては、より実際の力の伝達が評価する計算方法を採用することが重要と考えられる。

また、図3-12のような部材撤去をせずに新に部材を付加して腐食部材への力の分配を補うような補強方法が採られることもある。このような工法を採用する場合にも、実際の力の伝達を評価できるような計算手法を用いて、その力の再配分効果を検討しておくことが重要である。

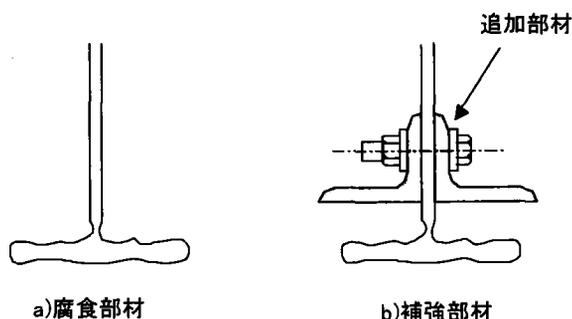


図3-12 新規部材の付加による部材の補強

3.3.3 接合方法

鋼橋の部材の接合に用いられている接合方法は、大略すると高力ボルト摩擦接合と溶接接合である。補修・補強においてもこの二通りの接合方法が用いられるが、一般的には品質管理の確実性から高力ボルトによる摩擦接合が多く用いられている。溶接接合の場合、振動下の溶接になると補修・補強の効果がその施工結果（品質）によって左右されることが大きいことから頻繁に使用されることはない。溶接接合が用いられる補修・補強としては、対象部位が局部的であるために高力ボルトの配置ができずに十分な力の伝達の確保が難しいと予想される場合や小さな疲労亀裂の補修等であり、また、高力ボルト接合を採用しようにもボルトを締め付けることが難しいケースなどである。

以下に、高力ボルト接合と溶接接合の長所と短所を示す。

●高力ボルト接合

[長所]

- ① 補修部の品質保証が容易
- ② 添接板への円滑な応力伝達が期待できる
- ③ 継手としての疲労強度が高い

[短所]

- ① 継手として広範囲の添接板が必要
- ② 添接板に合わせ広範囲の摩擦面処理が必要
- ③ 狭隘部での施工が困難

●溶接接合

[長所]

- ① 高力ボルトの設置が難しい狭隘部での作業が可能
- ② 継手としての効率が高い

[短所]

- ① 補修部の品質保証方法が困難
- ② 工場溶接と異なって全姿勢溶接
- ③ 継手形式によっては疲労強度上弱点
- ④ 応力および振動作用下での溶接

3.3.3.1 溶接

(1) 概要

鋼橋の供用中における溶接施工は、

- ① 橋梁の自重による静的な大きな応力が作用
- ② 交通による不規則な揺れや振動の発生、およびそれにともなう変動応力が作用
- ③ 作業空間の制約（全姿勢の溶接）や防風対策が必要
- ④ 品質管理における検査方法の制約

など、工場製作時とは異なる条件下での施工となる。この場合、スレージングを設置して橋を多点支持することにより、死荷重応力は軽減され、且つ交通振動も抑制され、工場製作時の施工条件に近づけられる。しかしながら、スレージングの設置は、設置にともなう交通規制による経済効果への影響、作業日程の制約、および工事費の増大へと繋がる。

また、鋼材の降伏点や弾性係数は溶接作業時の熱による鋼材の温度上昇にともない低下し、溶接の溶融部ではほとんどゼロになる。このため、供用中の溶接施工では、局部的に構造が不安定な状態になり、

- ① 引張強度の低下にともなう部材の延性破壊
- ② 部材の座屈
- ③ 部材の変形

等の発生の可能性がある。

さらに、供用中に溶接施工した溶接部では、

- ① 拘束条件下での溶接による高い残留応力の発生
- ② 振動にともなう溶接欠陥の発生
- ③ 溶接姿勢の制限によるビード形状の不整
- ④ 局所的な変形の発生

等の問題が生じる可能性があり、これらの問題は、構造物の長期的な安全性に影響を与える可能性がある。

また、溶接部の品質は施工環境を含んだ施工条件に強く依存する。このため、前述したように補修・補強での溶接接合は高力ボルト接合による施工が難しい狭隘な場所に用いられるため、溶接作業やひずみ矯正および品質管理（特に非破壊検査）が必ずしも信頼性のある方法で実施される保証はなく、工場溶接と同等の品質を確保することが難しいケースが多々ある。

このため、無理な現場溶接施工を実施した場合、

- ①信頼性の低い検査方法の採用による見落とし溶接欠陥からの疲労亀裂の発生
- ②不完全なひずみ矯正や入熱の高い溶接方法の採用による局部的な変形が残留していること、および高い残留応力が生じていることによる局部座屈の発生

等の問題が施工後生じる可能性がある。

(2) 現場溶接における検討の流れ

補修・補強に溶接接合を採用する場合、その作業は供用下での現場溶接となる。供用下での現場溶接は、条件によっては施工環境のみを設備すれば工場溶接と同等の品質を確保することが可能になる場合もあるが、ほとんどの場合、詳細検討や施工試験等を行って、初めて工場溶接と同等の品質を確保することが可能になる。一般には、図3-13に示すような溶接接合を採用するにあたっての検討手順を参考にし、溶接接合の適用について検討しておく必要があるであろう。

(3) 施工上の注意点

・溶接時の温度管理

前述したように溶接時には溶融部の強度や弾性係数が低下するとともに、その周囲も熱伝導により加熱され、強度の低下による構造不安定な状態になる可能性がある。このため、溶接時の過大な入熱は、溶接部周辺を熱伝導により耐力を低下させる温度まで上昇させるとともに、その範囲も広げることになる。

また、一般に、被溶接部の温度が低い場合、鋼材の種類、板厚、継手の拘束状態および溶接金属の水素量によっては、収縮応力や熱ひずみに起因する応力集中等による低温われの発生の可能性が高くなる。

さらに、振動下の溶接では、溶接の入熱がある限界値を超えるとルートギャップ間の変動が主原因の高温われが発生する可能性が高くなる。

このように温度管理が供用中の橋梁における現場溶接施工時の安全性や溶接欠陥の発生に大きな影響を及ぼすことから、施工環境等の検討とともに、施工試験により温度条件（予熱温度、パス間温度）と欠陥の発生や振動と欠陥の発生について調査したうえで施工要領書を作成し、溶接作業を行うことが必要であろう。

表3-4、3-5に鋼種による予熱温度とパス間温度について示す。

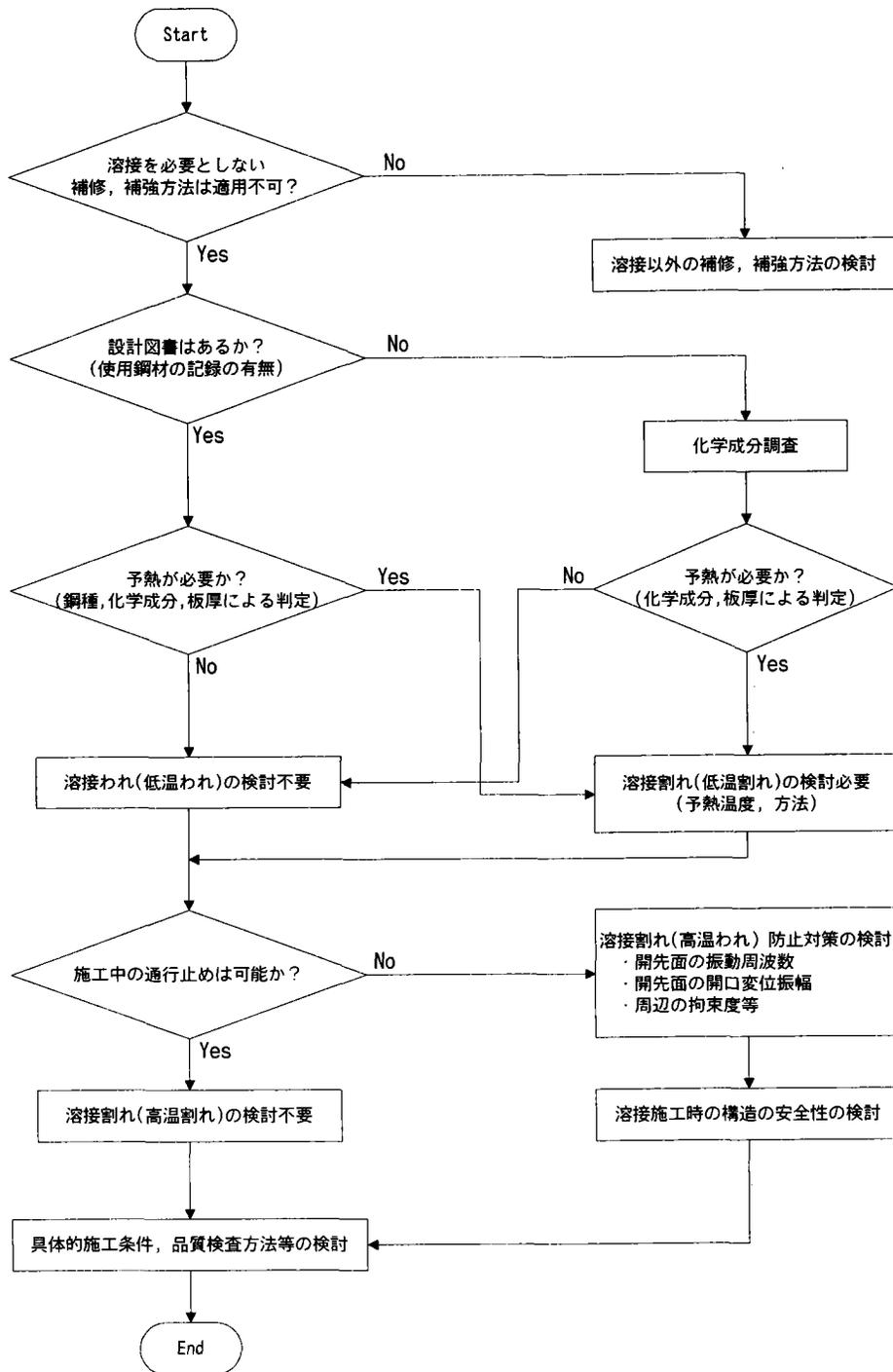


図 3 - 1 3 溶接による補修・補強の検討フローの例⁶⁾

表 3-4 鋼種で評価する場合の予熱 (T) とパス間温度 (θ)³⁾

鋼 種	$t \leq 25$	$25 < t \leq 50$
SS400, SM400	$T = \theta = 0$	$T = \theta = 0$
SM480, SM520, SM490Y	$T = 0, \theta = 75$	$T = \theta = 75$
SM570	$T = \theta = 75$	$T = \theta = 100$

表 3-5 鋼種が不明な場合の予熱 (T) とパス間温度 (θ)³⁾

C_{eq}	P_{eq}	$t \leq 25$	$25 < t \leq 50$
$C_{eq} \leq 0.35$	$P_{eq} \leq 0.20$	$T = \theta = 0$	$T = \theta = 0$
$0.35 < C_{eq} \leq 0.45$	$0.20 < P_{eq} \leq 0.25$	$T = 0, \theta = 75$	$T = \theta = 75$
$0.45 < C_{eq} \leq 0.50$	$0.25 < P_{eq} \leq 0.30$	$T = \theta = 75$	$T = \theta = 100$
$0.50 < C_{eq}$	$0.30 < P_{eq}$	$T = \theta = 100$	$T = \theta = 125$

$$C_{eq}(\%) = C + Mn/8 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 + (Cu/13)$$

$$P_{eq}(\%) = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + S$$

現場での補修・補強のための溶接作業は、前述したように工場製作における溶接作業と異なり、品質を確保する上で様々な注意を払わなければならない。とりわけ、最低限以下のような項目に留意して溶接を行わなければ、溶接による補修・補強部の品質を確保することは難しい。

・ 施工環境

- ① 溶接作業にあたって姿勢の確保が可能かどうか。
- ② 桁下に対して溶接作業が可能かどうか。また、養生をすることによって可能かどうか。

・ 施工中の荷重状態

1) 通行止めが可能（変動荷重が作用しない状態）

- ① 溶接時に溶接部の強度や弾性係数が低下することを考慮した構造的な安定性。
- ② 溶接作業時の熱応力が既存応力に加わって作用した場合の構造強度。

2) 通行止めが不可（変動荷重が作用する状態）

- ① 振動状態によって、アンダーカット、ブローホール、溶け込み不足等の溶接欠陥を発生させる原因となることから、溶接に関する施工環境や施工性。
- ② 溶接部の高温われの発生に、開先面の振動数や開口変位振幅、周辺の拘束度、鋼材および溶接材料の化学成分等が振動下の溶接では関与するため、その振動状態やその振動状態を再現した施工試験または実際の現場での施工試験による溶接部の欠陥の発生状況。
- ③ 溶接時に溶接部の強度や弾性係数が低下することを考慮した構造的な安定性。
- ④ 溶接作業時の熱応力が既存応力に加わって作用した場合の構造強度。

図 3 - 1 4 に変動荷重下の溶接施工の可否判定フローを示す。また、図 3 - 1 5 , 3 - 1 6 および表 3 - 6 , 3 - 7 に各パラメータの概要を示す。

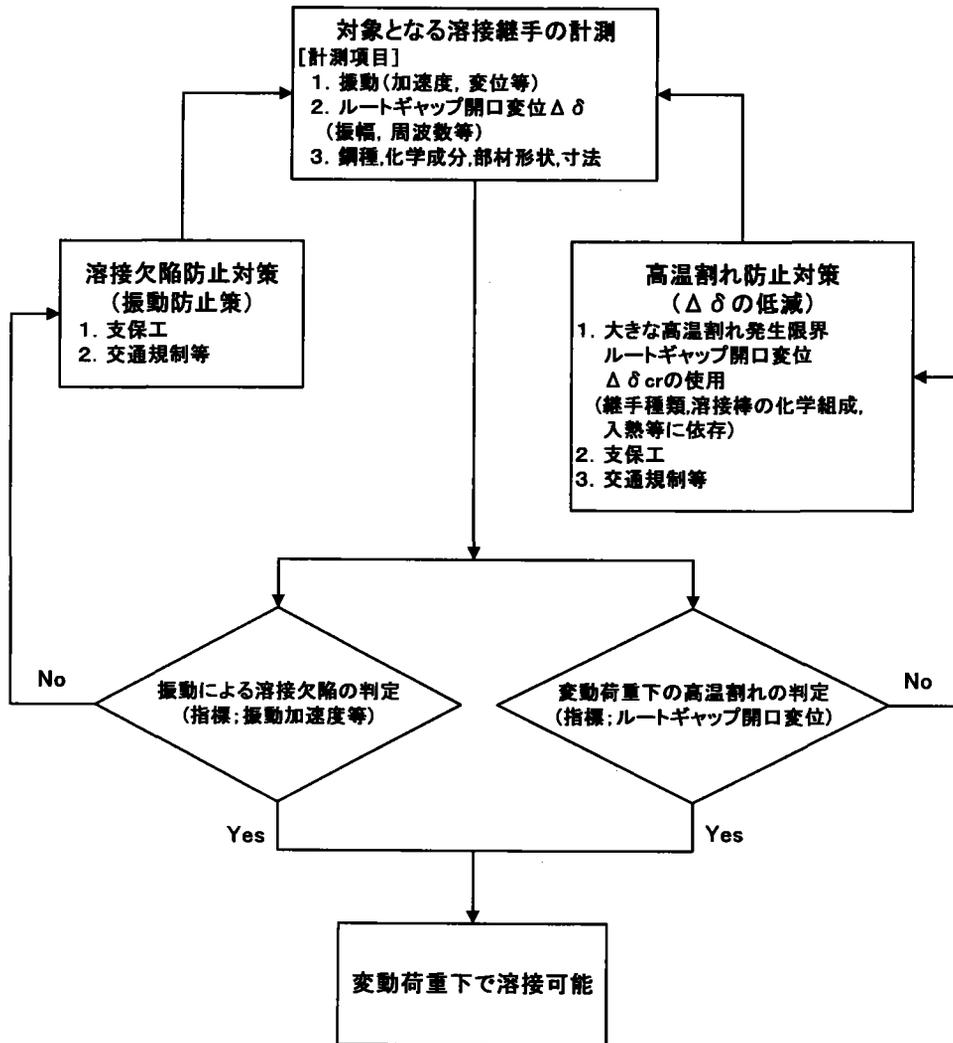


図 3-14 変動荷重下の溶接施工の可否判定フロー³⁾

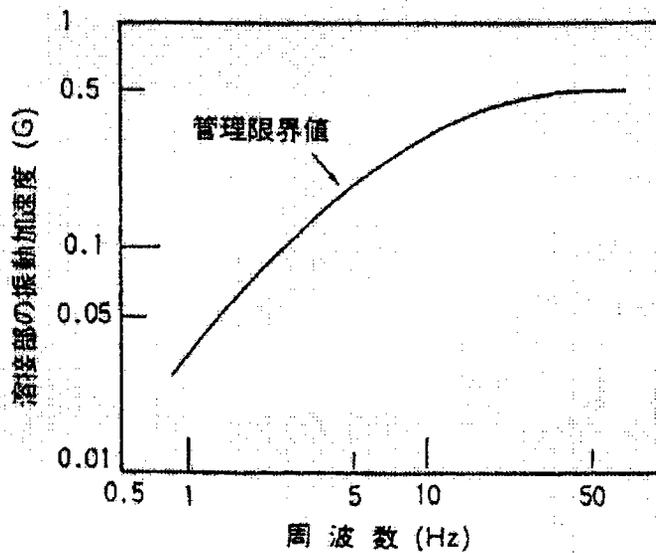
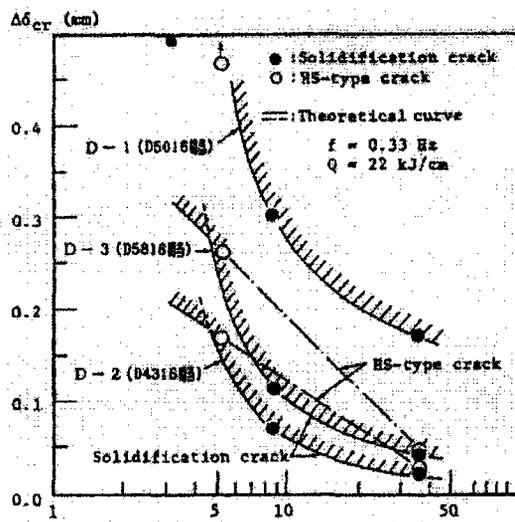


表 3 - 6 変動荷重作用下での溶接を行う場合の注意事項³⁾

高温割れ可能性判定		$\Delta\delta (\Delta\delta_{eff}) < \Delta\delta_{cr}$
$\Delta\delta_{cr}$	化学組成	低 C, Si, P, S および高 Mn 系の溶接棒 → $\Delta\delta_{cr}$ が大
	入 熱	入熱大(過度なウィーピング等) → $\Delta\delta_{cr}$ が低下
	継手剛性	継手剛性大(短いスリット等) → $\Delta\delta_{cr}$ が低下
	$\Delta\delta$ の周波数	周波数大 → $\Delta\delta_{cr}$ が低下
$\Delta\delta$	大きさ	拘束治具, 重車両の走行規制等による 低減が可能
	周波数	車両走行速度を遅くすることによる 周波数の低周波数化

表 3 - 7 換算ルートギャップ $\Delta\delta_{eff}$ の考え方

継 手		変位方向	換算値 $\Delta\delta_{eff}$	継 手 の 例
すみ肉 溶 接	開先なし	溶接線直角方向	$0.8 \times \Delta\delta$	
		溶接線方向	$0.67 \times \Delta\delta_H$	
	開先あり	溶接線直角方向	$\Delta\delta$	
		溶接線方向	$0.67 \times \Delta\delta_H$	
突 合 溶 接		溶接線直角方向	$\Delta\delta$	
		溶接線方向	$0.67 \times \Delta\delta_H$	



3.3.3.2 高力ボルト接合及び高力ボルト接合併用接着材使用工法

鋼橋において、部材の腐食及び欠損等が発見された時の補修方法としては、以下の補修工法が考えられる。

- ・ 当て板添接工法
- ・ 腐食部分切断新規部材挿入工法
- ・ 腐食部材撤去及び新規部材交換工法

上記の補修方法に高力ボルト接合及び高力ボルト接合併用接着材使用工法を施工した場合の留意点について記述するものとする。

(1) 高力ボルト接合

高力ボルトを使用するの長所としては、一般的には橋体自体を痛めない及び摩擦接合による施工により管理が容易であるという2点が上げられる。

しかし、短所としては、3.1に於いて記述がある通り、「高力ボルトを用いる方法では、腐食による板表面の凹凸が激しいと、腐食材と添接板間に十分な接触面が確保できず、力の伝達が期待とおりにされない事が危惧される」という点と空隙部の腐食及び摩擦接合における塗膜の除去という3点が挙げられる。

上記に於いて長所と短所を記述したが、品質管理及び現場施工の容易差という点に於いて高力ボルトによる補修工法は、有効な補修工法と考えられる。

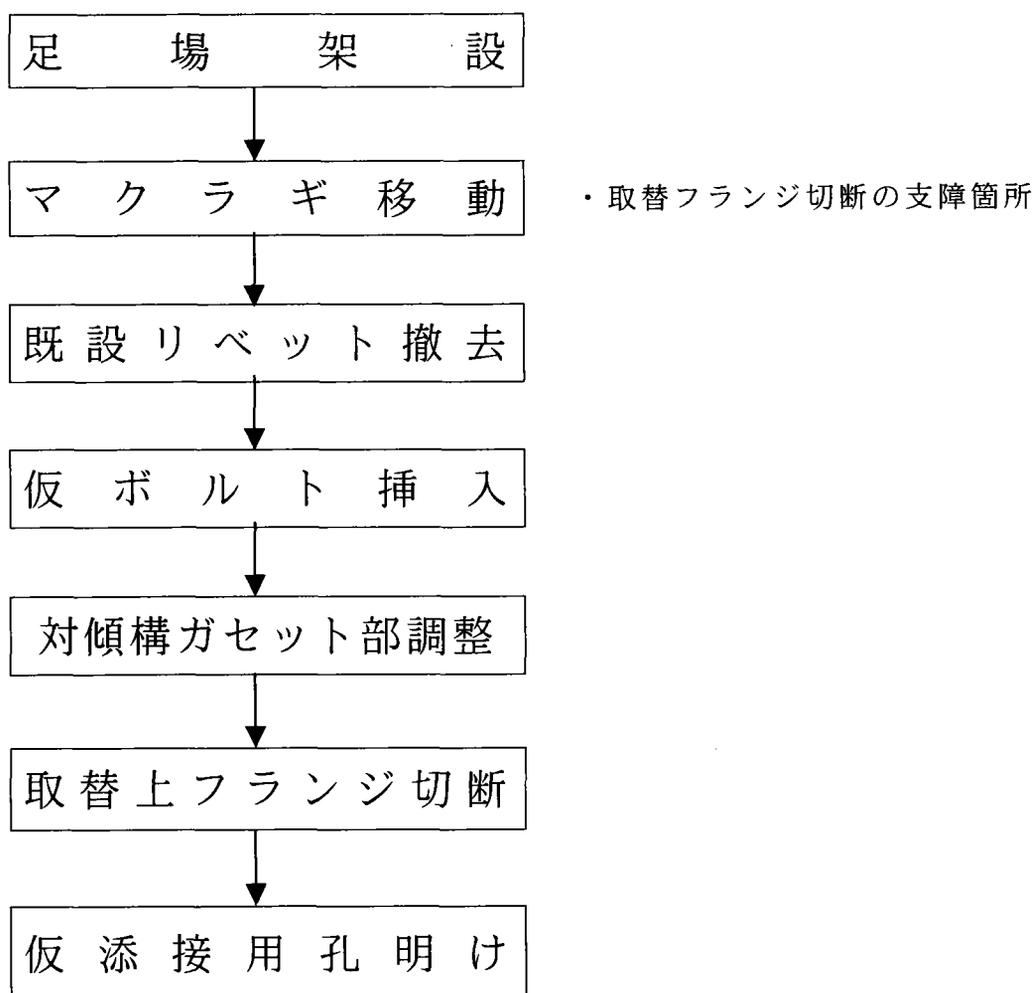
下記に高力ボルト（摩擦接合）における施工留意点を示す。

- ・ きれつ部断面欠損部をあて板を使用して施工する場合、あて板を以てきれつ部断面欠損部を分担するものと考え、新規構造物を施工する時と同じように高力ボルト摩擦接合法に準拠するものとして考える。
- ・ 補修部の強度照査については、変動応力を考慮して照査をする事が必要である。
- ・ あて板などは、既設橋の鋼材と同等以上の強度が確保できるものを使用する。
- ・ 摩擦接合の施工条件として、あて板接合面の塗膜除去及び表面処理を行うこと。
- ・ あて板を取り付け箇所は、必ず実測する必要がある。
- ・ 肌すき等がある場合、フィラープレートを挿入し桁と一体化させるようにする。

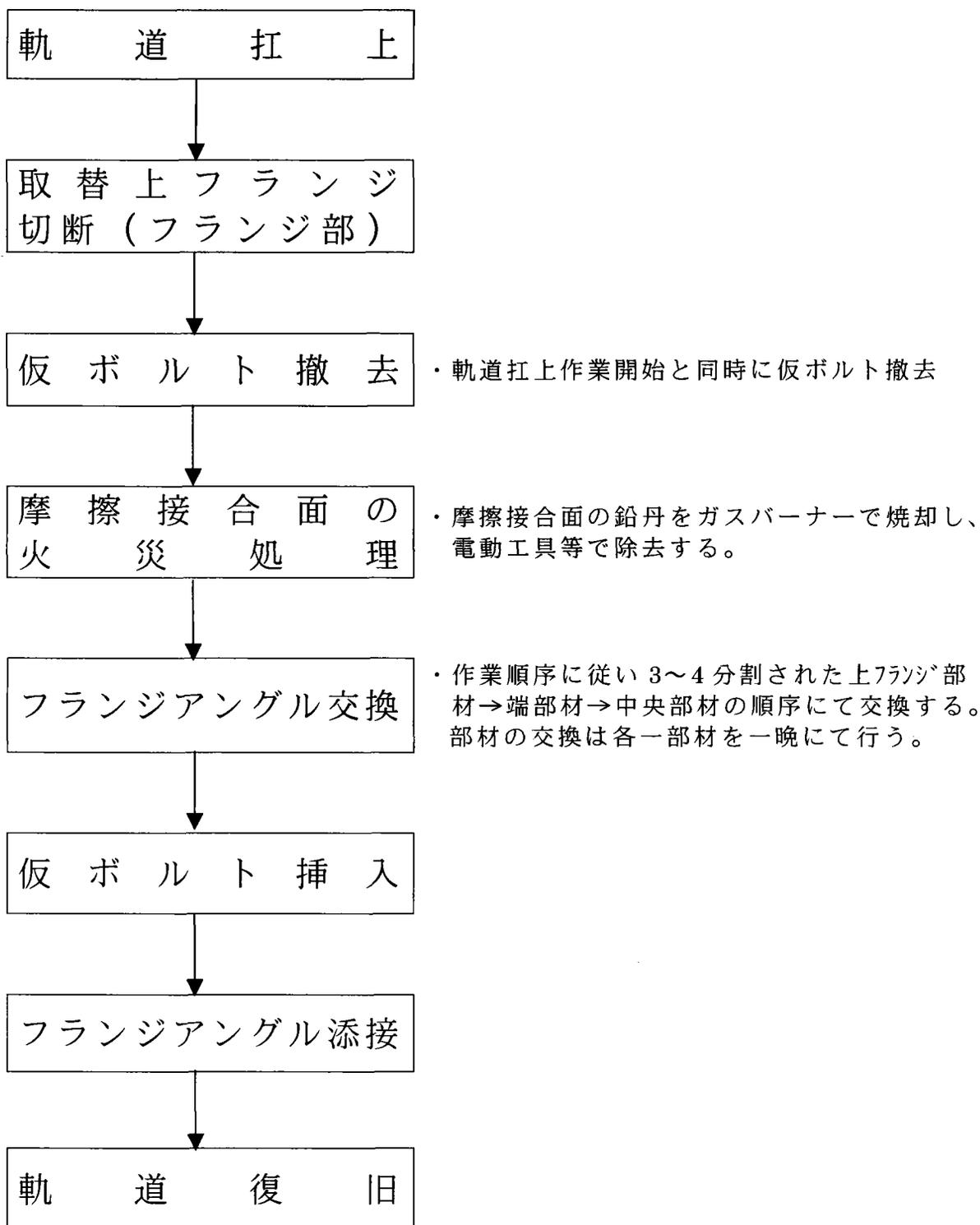
- ・ 供用下の橋梁を高力ボルト摩擦接合法により施工する場合、孔明けを行うことにより一時的耐力の低下を生むこととなるので、事前の検討が必要となる。(断面減少により)

下記にリベットから高力ボルト及び腐食部材から新規部材に交換した補修フローチャートを記載する。これは、(財)鉄道総合研究所の文献から引用したものである。

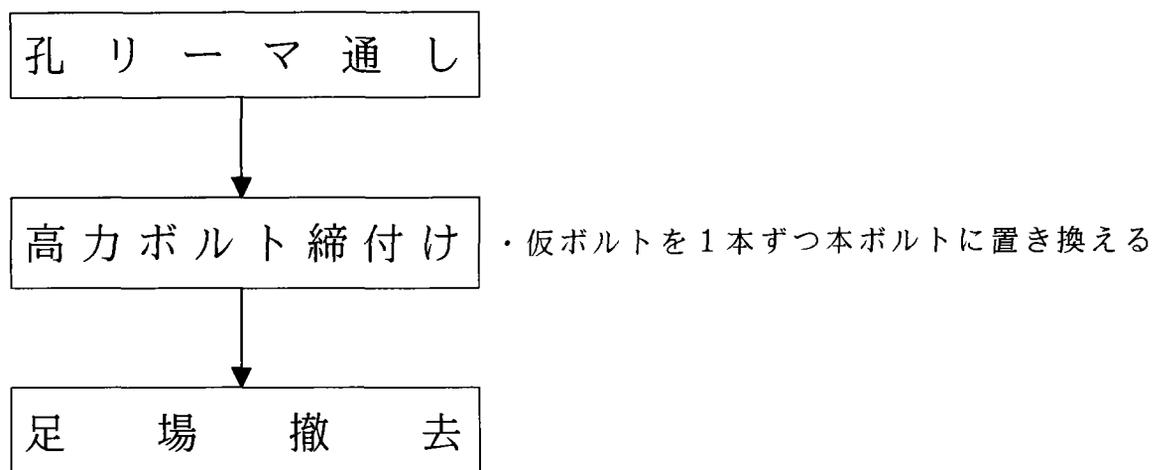
○線路閉鎖前作業



○線路閉鎖中作業



○線路閉鎖後作業



高力ボルトは、品質管理及び現場管理面に於いて補修工法に使用するのに適していると考えられるが、前述したように凹凸があった場合にたいする問題等に対して、これから検討していかなければならない。しかし、腐食及び欠損等については、高力ボルトは有効な補修材料であり、これによる接合は、有効な補修工法と考えられる。

前述したように凹凸があった場合に対する問題については、高力ボルト接合併用接着材使用工法の項にてふれることとする。

(2) 高力ボルト接合併用接着材使用工法

現在、鋼材と鋼材の間に接着剤を使用しているのは、鋼板接着併用縦桁増設工法程度と考えられるが、鋼材と鋼材の間に接着剤を使用し、かつ高力ボルトを使用した例としては、舗装ひび割れが原因で鋼床版が腐食し、高力ボルト接合併用接着材使用工法を施工した例がある。

高力ボルト接合併用接着材使用工法は、鋼材が腐食して凹凸があった場合でも、あて板と鋼床版との間の充填材としての機能が期待される。またボルト接合が不可能な箇所でも接着材と高力ボルトを併用接合することにより、剛性を確保することができるとともに、接着材のせん断強度を期待することができ、高力ボルトの必要本数を減少させ仮締め程度でも施工可能としている。

この工法は、鋼床版等に有効であると考えられるが、2点ほど留意点が挙げられる。

- ・ 注入をどのように施工するか
- ・ 接着材の垂れをどのように防止するか。

接着材の垂れについては、エポ°キシ樹脂系の接着材を使用しての実験の際に、主剤、硬化剤にケイ砂をいれてパテ状にして垂れを防いでいる。

この工法は、今後増えていくと思われるが、交通量の多い箇所や上面以外の箇所での適用が課題になるのではないかと考えられる。

4. 参考文献

- 1) 町田：鋼橋の溶接による補修・補強，(財)溶接接合工学会第9回セミナー資料，1999.5
- 2) (社)日本鋼構造協会：供用下にある鋼構造物の溶接による補強・補修指針(案)，JSSCテクニカルレポート，No.8，1988
- 3) (社)日本鋼構造協会：供用下にある鋼構造物の溶接施工指針(案)，JSSCテクニカルレポート，No.22，1993
- 4) (社)日本鋼構造協会：供用下にある鋼構造物の高力ボルトによる補強・補修指針(案)，JSSCテクニカルレポート，No.15，1989
- 5) (財)鉄道総合技術研究所：鋼構造物の補修・補強・改造の手引き，1992.7
- 6) (社)道路協会：鋼橋の疲労，1997.5
- 7) 土木学会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価，丸善，1996.10
- 8) 村越，名取：鋼橋の防錆防食，1994.4
- 9) 古閑ほか：鋼橋の腐食部補修事例，横河ブリッジ技報，NO25，1996.1
- 10) 日本橋梁建設協会：橋梁技術者のための塗装ガイドブック，1993.4
- 11) 金子ほか：乾燥空気による箱桁内防食，橋梁と基礎，1999.5
- 12) 山田ほか：鋼床版箱桁橋のデッキプレートの補修・補強，橋梁と基礎，1994.8
- 13) 片脇：電気防食と電気防食設計指針(案)について，橋梁と基礎，1986.6
- 14) 名取ほか：鋼橋の補修・補強，横河ブリッジ技報 NO.21 1992.1
- 15) 大野ほか：腐食部材の健全度評価に関する研究，横河ブリッジ技報 NO.27