

第Ⅲ編 長寿命化技術

本編では、鋼構造物の長寿命化技術について調査・検討した成果を報告する。

はじめに、リスクマトリクスの視点から長寿命化技術のニーズを把握する方法論を検討し、この視点から鋼構造物の補修・補強技術を整理することを試みた（1. 鋼構造物の対策技術の現状）。次に、長寿命化技術としての補修・補強に着目し、これらの設計に求められることを検討した（2. 長寿命化技術の設計）。また、設計された長寿命化技術を適切に施工するための留意事項を抽出・整理した（3. 長寿命化対策の施工に関する留意事項）。最後に、予防保全型と事後保全型それぞれの長寿命化対策事例と、長寿命化のニーズを解決するために用いられた新たな技術シーズの適用事例について紹介している（4. 鋼構造物の長寿命化対策事例）。

1. 鋼構造物の対策技術の現状

構造物の供用期間中には、寿命を阻害する様々な要因が発生する。これらの要因により寿命を阻害されることのないよう、新規に構造物を計画・設計・施工する段階、建設された構造物を維持管理する段階それぞれにおいて適切な手段を講じ、供用期間中に求められる鋼構造物の要求性能を満足させる必要がある。

新規に構造物を計画・設計・施工する際、例えば、道路橋に関しては道路橋示方書があるように、一般的には当該構造物の設計基準が存在する。この設計基準には、構造物の要求性能が示されるとともに、構造物の要求性能を確保すべく、これまでに得られた技術的知見をもって性能を検証する手法や作用の考え方なども示される。

一方、構造物を維持管理する段階においては、設計当時に想定した要求性能の変化や供用期間そのものの変化、設計時には必ずしも明らかではなかった外力などの作用による早期の性能低下などが、構造物の寿命を阻害する。これら寿命を阻害する要素に対して、供用期間中、構造物が要求性能を満たすよう、点検（調査、性能評価、対策の要否判定）や対策（維持、監視、補修、補強、使用制限、取替など）を実施して長寿命化を図る。

本章では、リスクマトリクスの視点から長寿命化技術のニーズを把握する方法論を検討し、長寿命化するためには、どのような技術が求められるかを概観する。ここには、補修・補強技術だけでなく、点検にかかる技術、使い方等のソフト対策技術、さらには新規構造物の計画や設計時に導入する技術も含まれていることが認識できる。

1.1 長寿命化技術のニーズ

鋼構造物の寿命を阻害する要素には、長期の供用期間中に生じる要求性能の変化といった機能的側面や、外力の作用による劣化や損傷といった物理的側面がある。第Ⅰ編や第Ⅱ編からわかるように、これまでは、これらについて個別の指標を設定して、その程度を評価してきた。例えば、劣化や損傷に対して調査で得られた情報をもとに対策の必要性を評価すること、調査で得られた情報をもとに将来の対策の必要性を予測すること、グレードアップされた耐震基準に対して保有する耐震性能を評価することなどである。しかし、煎じ詰めれば、寿命を阻害する要素が鋼構造物に影響を及ぼす強さを表現したいのであるから、ここでは問題を単純にするため、「リスク事象の発生確率」として整理することを考えた。

他方、ある一定のリスク事象の発生を想定した場合、全ての鋼構造物で同じ影響を受けるというわけではない。例えば、同程度に対策の必要性が高い2つの橋があったとしても、交通量の多い橋と少ない橋では、その優先性が違って当然であろう。また、代替路があるかどうか（迂回時間の長さ）によっても優先性が違ってくるであろう。ここでは、こういった影響の程度の違いについても、問題を単純にするため、ひとつの指標に集約して表現することを考える。すなわち、費用便益分析で便益を貨幣価値化する方法が一般的には知られており、これを参考に、「リスクによる損失額」（損失額には、物質的な損失の他、社会経済に及ぼす影響も含む）で整理することを考えた。

そして、この「リスク事象の発生確率」と「リスクによる損失額」の視点から、鋼構造物の長寿命化技術のニーズを把握する方法を検討しようとするれば、自ずとこれらを2軸とする「リスクマトリクス」が浮かび上がる。リスクマトリクスを活用し、4つのカテゴリー（「回避」「軽減」「転嫁」「受容」）に分類して理解することで、鋼構造物の状況（健全度と重要度）に応じて、どのような長寿命化技術が求められるのか（どのようにして寿命が尽きるリスクを回避、軽減、転嫁、受容させるのか）を整理することができ、また、異なる複数のリスクに対する優先性を評価することも可能となる。

1.1.1 リスクマトリクスと4つのカテゴリー

はじめに、リスクマトリクスの4つのカテゴリーである「回避」「軽減」「転嫁」「受容」について、鋼構造物の長寿命化の視点から、それぞれの内容を整理する。

リスクマトリクスでは、一般的に、一方の軸でリスク事象の発生確率や発生件数、他方の軸でリスクによる損失額や一定期間の総損失額をあらわし、その2軸で表現される領域を4つのカテゴリーに分ける。そして、対象となる事象が、リスクマトリクスのどこに位置するかを理解することで、とるべき対策やそのタイミング等を検討する基礎情報を得る。このためには、リスクの発生確率や件数を直接的に計測したり、リスクが発生した場合の損失額等を計測したりすることが求められる。

第Ⅰ編や第Ⅱ編では、点検・調査等で得られる情報や、それらをもとに診断・劣化予測される情報について調査・検討した結果が整理されている。具体的には、構造物の状態、置かれている環境や利用状況などの情報を、点検や調査により得ているのが現状であり、これらは直接的にリスクの発生確率を導くかたちではないものの、要求性能に対する保有性能を評価あるいは予測することにより、いわば間接的にリスクを表現できるものであると考えられる。また、リスクが発生した場合の損失額等の情報についても直接には整理されていないのが現状であるが、間接的には、例えば道路橋に着目すれば、交通量、緊急輸送道路区分、代替路の有無（迂回時間）、橋の大きさ（架替費用の大きさ）などの台帳に記載されている情報を活用して、社会的に及ぼす影響の程度を評価できると考えられる。

これらを踏まえて、ここでは、現実的な対応として、リスクマトリクスを図1.1のとおり表現することを提案する。

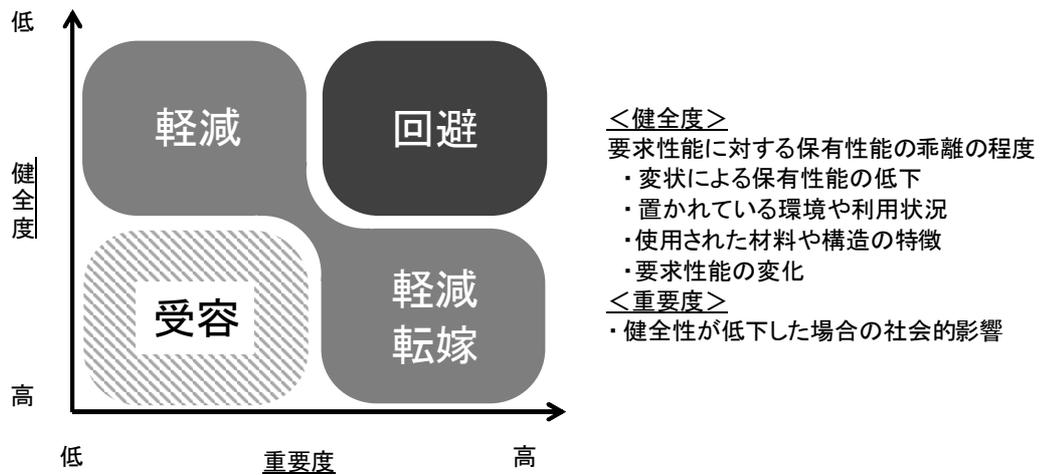


図 1.1 リスクマトリクス概念

(1) 「回避」 カテゴリー

構造物等の重要度が最高レベルでかつ、構造物や構造物を構成する部材（以下、「構造物等」という）の保有性能が要求性能に対して著しく低い状態である。例えば、国の基幹的な道路網に架かる鋼道路橋でかつ、これまでに重大な損傷が報告されている特定部位（ゲルバー部や桁端切欠部等）を有する場合などが、これに相当する。

このカテゴリーになることが想定される場合には、このカテゴリーになることをあらかじめ回避する措置をとる。

(2) 「軽減」 カテゴリー

構造物等の保有性能が要求性能に対して低い状態であり、このまま対策をとらなければ将来的に致命的になることが予測される状態、あるいは、構造物等の保有性能は要求性能に対して然程悪くないものの（健全度は低～中）、構造物等の重要度が中～高レベルにある状態である。

前者については、例えば、鋼道路橋の桁端部が腐食により減肉している場合や、耐候性鋼橋で異常なさびが発生している場合などが、これに該当する。この場合には、変状により低下した保有性能を補修するなどして回復させたり、置かれている環境や利用条件を変更したりするなどの対策を講じて、寿命が尽きるリスクを軽減する措置をとる。

また、後者が想定される場合には、構造物等の機能的な位置付けを見直すことで軽減することもできる。例えば、鉄道橋としての使命を終えた後、一部を撤去せずに展望台として用途を変更した事例などが、これに相当する。

(3) 「転嫁」 カテゴリー

構造物等の保有性能は要求性能に対して然程悪くないものの、構造物等の重要度が中～高レベルにある状態である（(2)の後者と同様）。

このカテゴリーにある場合には、万一のリスクの顕在化に備えて保険をかけたり、外部機関に運用を委託したりするなどして、リスクを転嫁する措置をとることもできる。

(4) 「受容」 カテゴリー

構造物等の保有性能は要求性能に対して然程悪くなく、重要度も比較的に低レベルにある状態

である。例えば、比較的良好な環境にかかる鋼橋で、建設後の経過年数が短い場合などが、これに相当する。

このカテゴリーにある場合には、(1)～(3)の措置を行わずに、例えば定期点検を行うなどして、リスクを受容する。

1.1.2 長寿命化技術の選定

(1) 基本

長寿命化技術を選定するプロセスにおいて、はじめに構造物等がリスクマトリクスのどこに位置するかを把握し、次に将来的にはどこに移動していくかを予測したうえで、最適な対策技術を講じることが求められる。これは言い換えれば、第Ⅰ編に示した点検や調査技術を駆使して鋼構造物の状態を特定するとともに機能的な重要度を把握し、第Ⅱ編に示した診断や劣化予測技術を駆使して鋼構造物が将来どのような状態になるかを予測することが必要不可欠であり、そういったプロセスを踏んだ上で、さらにコスト、改善効果（どれだけ性能が向上できるか）、効果の持続性（何年寿命を延ばせるか）などを考慮して長寿命化技術を選定するということである。

また、これまでに蓄積されてきた種々の知見を整理・分析することにより、変状しやすい構造特性や環境特性などを把握し、これを基に類似の構造物に対して、あらかじめ対策を検討するといった考え方もできる。

(2) 現実的なリスクマトリクス

図 1.1 では、リスクマトリクスと 4 つのカテゴリーの概念を表現したが、これをより実態に即して表現すると、図 1.2 のようになると思われる。

すなわち、図 1.1 で示したように、例えば、ある重要度を境に「受容」と「軽減」の対応が明確に区別して志向されるというよりも、図 1.2 で示したように、徐々に「受容」と「軽減」の範囲が変化すると捉える方が現実的といえる。

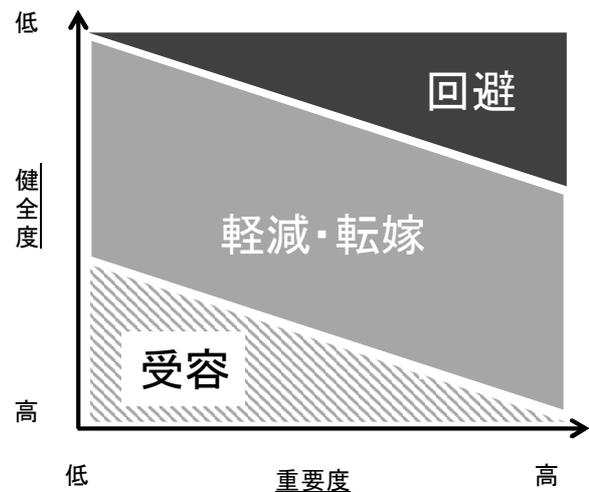


図 1.2 現実的なリスクマトリクスの概念

(3) 長寿命化技術の考え方

構造物等の重要度が然程高くない場合や、比較的劣化進行がゆるやかであることが知られている事象では、定期的な点検等により状態を把握するといった「受容」措置を講じつつ、一定程度劣化が進行していることが確認できた場合に「軽減」措置として補修工事を行うなど、事後保全的に対応を検討することができる。

これに対して、重要度が高い構造物等の場合には、不測の劣化進行により寿命となることのないよう、その「受容」範囲を変状が軽微な状態にとどめ、早めに「軽減」措置としての補修工事を行ったり、場合によっては構造物を建設する段階で仕様を高めたり、予防保全的な対応を検討するのがよい。

他方、同程度の重要度であっても、劣化進行が早かったり、知見が不足している事象については、点検頻度を短くしたり、モニタリングを行うなど、「受容」カテゴリにおける対策を検討するのがよい。また、こういった事象における不測の事態を想定して、事前の「軽減」措置（予防保全的な対応）を検討することも考えられる。

さらに、検査路や点検設備を整備することで、「受容」カテゴリを拡大するといったことも考えられる(図 1.3)。

構造物等の重要度が変化する場合もある。例えば、新規にバイパス道路を整備し、既存の道路は生活道路に位置付けて車両重量を制限することなどが考えられる。この場合には、横軸上の位置が左に移動することに伴って、相対的に「受容」範囲が拡大されることとなるため、長寿命化技術を再検討することで、より合理的かつ効率的な技術を選択できる可能性がある。

なお、土木遺産に認定されている橋梁や過疎地で代替路のない橋梁などで、重要度が高いと判断される場合には、相対的に「回避」の領域が大きくなる。重要度が低い構造物において「受容」できた状態、あるいは補修工事等による「軽減」措置で対応できた状態と同程度の状態であっても、重要度が高い構造物では「回避」措置を選択すべき場合があることに留意が必要である。

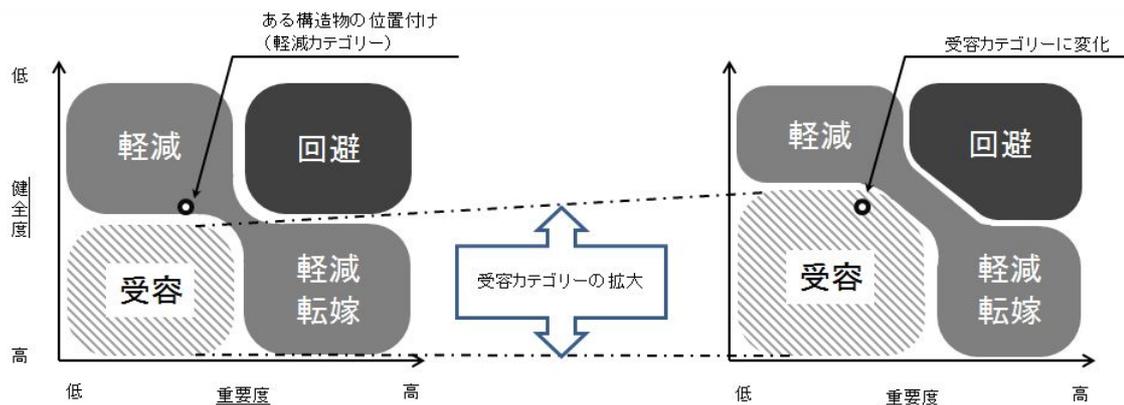


図 1.3 間接的対策技術

1.2 鋼構造物の補修・補強技術

鋼構造物のうち、例えば道路橋に着目した場合、劣化・損傷、その原因、適用される主な補修・補強対策は、既往の文献1)により、表 1.1 のとおり整理されている。

ここでは、これら既存の補修・補強技術のいくつかを例にして、1.1 で提案したリスクマトリクスの視点から長寿命化技術のニーズを整理することを試みた(表 1.2)。

あらかじめこのような情報を整理しておくことで、長寿命化技術の比較検討をより効率的かつ効果的に行うことが期待できるとともに、あらたに長寿命化技術を開発する際に、既存の技術と比較しやすくなるということも期待できる。

表 1.1(1) 構造部位別の補修対策

劣化・損傷	構造部位	主な劣化・損傷要因	主な対策
防食機能の劣化や腐食	鋼材部	<ul style="list-style-type: none"> 床版のひび割れ，打継ぎ不良部からの漏水 伸縮装置，床版端部からの漏水 箱げた，橋脚内部の結露，滞水 飛沫塩分の付着 	<ul style="list-style-type: none"> 床版ひび割れ，伸縮装置の補修 床版防水工の施工 水抜き孔，換気孔の設置 塗装塗替え 腐食部添接板設置 部材取替え
疲労き裂	支承ソールプレート	<ul style="list-style-type: none"> 溶接部応力集中 支承可動機能の低下 	<ul style="list-style-type: none"> ストップホール施工（応急対策） き裂部添接板設置 部材取替え
	けた端切欠き部	<ul style="list-style-type: none"> 設計上考慮されていない二次応力 	<ul style="list-style-type: none"> ストップホール施工（応急対策） き裂部添接板設置
	鋼床版構造	<ul style="list-style-type: none"> 溶接部応力集中 大型車両等の影響 	<ul style="list-style-type: none"> ストップホール施工（応急対策） き裂部添接板設置
	鋼製橋脚隅角部	<ul style="list-style-type: none"> 溶接部応力集中 施工上不適切な細部構造 	<ul style="list-style-type: none"> ストップホール施工（応急対策） き裂部除去 き裂部添接板設置
	アーチ吊材	<ul style="list-style-type: none"> 風による渦励振 	<ul style="list-style-type: none"> ら旋鉄筋巻き付けによる空力特性改良
異常な変形	鋼材部	<ul style="list-style-type: none"> 車両の衝突，火災，地震 	<ul style="list-style-type: none"> 添接板設置 部材取替え
高力ボルトの遅れ破壊	高力ボルト	<ul style="list-style-type: none"> ボルトの強度等級（F11T以上） 湿潤な環境 	<ul style="list-style-type: none"> ボルト取替え 落下防止（第三者被害対策）
ボルトやリベットの緩み	添接部	<ul style="list-style-type: none"> 振動 伸び，変形 	<ul style="list-style-type: none"> ボルト取替え

表 1.1(2) 構造部位別の補強対策

劣化・損傷	構造部位	主な劣化・損傷要因	主な対策
疲労き裂	けた端切欠き部	<ul style="list-style-type: none"> 溶接部の応力集中 設計上考慮されていない二次応力 	<ul style="list-style-type: none"> 切欠き部への添接板の設置と細部構造の改良
	横げた及び対傾構取付部	<ul style="list-style-type: none"> 溶接部応力集中 設計上考慮されていない二次応力 	<ul style="list-style-type: none"> 腹板ギャップ細部構造の改良 溶接継手の疲労強度改善
	鋼製橋脚隅角部	<ul style="list-style-type: none"> 溶接部応力集中 施工上不適切な細部構造 	<ul style="list-style-type: none"> 隅角部への添接板の設置と細部構造の改良
	鋼床版構造	<ul style="list-style-type: none"> 溶接部応力集中 大型車両等の影響 	<ul style="list-style-type: none"> 補強部材設置等による剛性向上
	アーチ吊材	<ul style="list-style-type: none"> 風による渦励振 	<ul style="list-style-type: none"> 部材端部への添接板の設置と細部構造の改良
たわみ	主げた，鋼床版	<ul style="list-style-type: none"> 部材剛性の不足 大型車両等の影響 	<ul style="list-style-type: none"> 補強材設置等による剛性向上 支持点の変更・追加

表 1.2(1) 補修・補強技術の個票

工法名	当て板補強工法
工法の対象となる部位	鋼桁
変状の種類	疲労き裂
対策技術の 카테고리	軽減
工法の特徴	疲労き裂の原因となる応力集中や、き裂先端の応力集中部に「当て板」を添接することで、当該部位に作用する応力を当て板に流し、周辺応力を緩和することでき裂の発生、進展を抑制する。
工法の位置づけ	事後保全

工法の概要(図や表など)

<施工事例①>

<施工事例②>

<補強前>

<補強後>

局所応力の低減効果 (52.6MPa→7.1MPa)

<FEM解析による効果検証例>

概要
<p><適用に対する方案></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ボルト接合面の母材健全度の把握 ・既設塗装系の確認(補強部材の塗装仕様の決定) ・当て板補強後の不可視部分の確認、将来的な点検、補強時の影響検討 ・補強効果の事前検証・事後確認 ・施工手順の立案(ボルト締め付け手順等)

工法の特徴		評価		
効果	回避効果	---	×	
	軽減効果	当て板への応力伝達	◎	
	転嫁効果	---	×	
	受容効果	---	×	
	特記事項			
設計の成立性(対象とする事例への適合性)		<案件ごとに確認>		
既設構造物への影響	形状・線形への影響	特になし	◎	
	荷重の増加	軽微	○	
	既設構造物の補強の要否	必要になる場合がある。	○	
	その他(外観、使用性の変化等)	特になし	◎	
工法適応にあたっての制約条件		当て板補強が設置可能なスペースを有するか？ き裂部以外の母材が健全か？	○	
耐久性	耐久年数や不具合事例など	特になし	◎	
	耐久年数経過後の補修工法			
施工性 作業性	施工実績	実績多数	◎	
	工期			
対応可能な交通規制	対象道路および周辺道路	交通規制なし	ジャッキアップが不要であれば可能	○
		夜間の一車線規制日数	ジャッキアップが不要であれば可能	○
		夜間の全止め日数	ジャッキアップが不要であれば可能	○
		昼夜間の一車線規制日数	ジャッキアップが不要であれば可能	○
		昼夜間の全止め日数	ジャッキアップが不要であれば可能	○
	施工時期の制約	特になし	◎	
足場等の安全設備の必要性		必要	○	
維持管理上の留意点		本体と同様に管理	◎	
経済性	工事費	経済的	○	
	ライフサイクルコスト	経済的(本体と同等)	○	
本工法の採用に対する評価		◎		
		疲労亀裂に対して、多くの実績がある工法。		

評価の凡例: ◎:最も優れている、○:適用可能、△:好ましくないが適用可能、×:適用不可

表 1.2 (2) 補修・補強技術の個票

工法名		ストップホール工法		
工法の対象となる部位		鋼桁		
変状の種類		疲労き裂		
対策技術の категория		軽減		
工法の特徴		き裂先端に円孔を設けることにより、先端部での高い応力集中を軽減し、き裂の進展を抑制する。ストップホールに高力ボルトを挿入し、軸力導入することで、孔部の変形が拘束され、孔縁での応力集中を緩和できる。		
工法の位置づけ		事後保全		
<p>工法の概要(図や表など)</p>				
<p>概要</p> <p><適用に対する方案> ・現地にてMTを実施し、円孔内にき裂先端が収まっていることを確認する。 ・ボルト締め付けや添接板の効果は大きい、恒久対策とはなりえないことに留意する。 ・孔内面に新たな疲労き裂の起点となるような傷などを残さないよう、円滑に仕上げる。</p>				
工法の特徴		評価		
効果	回避効果	---	×	
	軽減効果	応力集中の軽減	○	
	転嫁効果	---	×	
	受容効果	---	×	
	特記事項	・緊急対策として採用されるケースが多い ・恒久対策や頻度計測等の事前調査までの暫定処置		
設計の成立性(対象とする事例への適合性)		<案件ごとに確認>		
既設構造物への影響	形状・線形への影響	特になし	◎	
	荷重の増加	特になし	◎	
	既設構造物の補強の要否	あくまで緊急措置であり、恒久措置を実施する	○	
	その他(外観、使用性の変化等)	特になし	◎	
工法適応にあたっての制約条件		孔明け、MT、グラインダー等の使用上の制約(狭隘部等)		
耐久性	耐久年数や不具合事例など	緊急対策	△	
	耐久年数経過後の補修工法			
施工性 作業性	施工実績	実績多数	◎	
	工期			
対応可能な交通規制	対象道路および周辺道路	交通規制なし	ジャッキアップが不要であれば可能	○
		夜間の一車線規制日数	ジャッキアップが不要であれば可能	○
		夜間の全止め日数	ジャッキアップが不要であれば可能	○
		昼夜間の一車線規制日数	ジャッキアップが不要であれば可能	○
		昼夜間の全止め日数	ジャッキアップが不要であれば可能	○
	施工時期の制約	特になし	◎	
足場等の安全設備の必要性		必要	○	
維持管理上の留意点		緊急対策	△	
経済性	工事費	経済的	○	
	ライフサイクルコスト	緊急対策	△	
本工法の採用に対する評価		○ 緊急対策としては実績多数である。ただし、変動応力が十分小さい箇所では、恒久対策にもなりうるが、実績はほとんどない。		

評価の凡例: ◎: 最も優れている、○: 適用可能、△: 好ましくないが適用可能、×: 適用不可

表 1.2(3) 補修・補強技術の個票

工法名		ICR処理(衝撃き裂閉口処理)工法		
工法の対象となる部位	鋼桁			
変状の種類	疲労き裂			
対策技術のカテゴリー	軽減			
工法の特徴	疲労き裂近傍の鋼材表面に塑性変形を与え、き裂の開口部を閉口させ、載荷荷重によっても開口しないよう処置を行うことで、疲労き裂の進展を抑制させる。 (C等級レベルの継手へ改善が可能)			
工法の位置づけ	予防保全・事後保全			
工法の特徴	工法の特徴		評価	
効果	回避効果	損傷部位はそのまま残る(ただし損傷部位ではなくなる)	△	
	軽減効果	疲労き裂進展速度の軽減 溶接止端部の引張残留応力の軽減	◎	
	転嫁効果	---	×	
	受容効果	---	×	
	特記事項			
設計の成立性(対象とする事例への適合性)	設計の成立性(対象とする事例への適合性)		<案件ごとに確認>	
既設構造物への影響	形状・線形への影響	特になし	◎	
	荷重の増加	特になし	◎	
	既設構造物の補強の要否	不要	◎	
	その他(外観、使用性の変化等)	特になし	◎	
工法適応にあたっての制約条件	ICR処理用の工具が、該当部位へ当てられるか、確認を要する		○	
耐久性	耐久年数や不具合事例など	実績は少ない	△	
	耐久年数経過後の補修工法	補強部材を取り付けないため、その後の補修・補強に対しても制約を作らない。		
施工性 作業性	施工実績	実績少ない	△	
	工期			
対応可能な交通規制	対象道路および周辺道路	交通規制なし	ジャッキアップが不要であれば可能	○
		夜間の一車線規制日数	ジャッキアップが不要であれば可能	○
		夜間の全止め日数	ジャッキアップが不要であれば可能	○
		昼夜間の一車線規制日数	ジャッキアップが不要であれば可能	○
		昼夜間の全止め日数	ジャッキアップが不要であれば可能	○
	施工時期の制約	特になし	◎	
足場等の安全設備の必要性	必要		○	
維持管理上の留意点	緊急対策		△	
経済性	工事費	経済的	◎	
	ライフサイクルコスト	緊急対策	○	
本工法の採用に対する評価	◎		設備が小さく、施工性が良好である上に、恒久対策としても採用可能である。特に、工場製作時に、疲労等級が低い部位に適用することで、当該部位の疲労等級が飛躍的に改善できる、「予防保全」としての役割が期待できる部分が大きく他と異なる。	

工法の概要(図や表など)

(a) 溶接止端部 (b) 母材部 【ICR処理の例】

<ICR施工手順・例(山田ら論文より引用)>
面外ガセット継手 L=75mm

図1 疲労強度改善効果 (NETIS登録情報より)

図1は、疲労強度改善効果を示すグラフである。縦軸は応力増強率(%)で、10、100、1000と表示されている。横軸は回数で、1.E+04、1.E+05、1.E+06、1.E+07と表示されている。グラフには、溶接止端部の設計疲労強度曲線(点線)と、ICR処理後の疲労強度曲線(実線)が示されている。ICR処理後の疲労強度曲線は、設計疲労強度曲線よりも高い応力増強率を示している。また、ICR処理後の疲労強度曲線は、溶接止端部の疲労強度曲線よりも高い応力増強率を示している。図1のグラフには、A、B、C、D、E、Fの各点があり、Aは溶接止端部の設計疲労強度曲線、BはICR処理後の疲労強度曲線、Cは溶接止端部の疲労強度曲線、DはICR処理後の疲労強度曲線、Eは溶接止端部の疲労強度曲線、FはICR処理後の疲労強度曲線を示している。

摘要

<適用に対する方案>
・比較的軽微な装備で施工が可能
・損傷度合いによる適用可否がある(腐食減肉が著しい部位などへの適用は、検討が必要である)

評価の凡例:◎:最も優れている、○:適用可能、△:好ましくないが適用可能、×:適用不可

表 1.2(4) 補修・補強技術の個票

工法名	溶接補修工法		評価	
工法の対象となる部位	鋼桁			
変状の種類	疲労き裂			
対策技術のカテゴリー	回避			
工法の特徴	き裂部をMT等で確認し、アークエアガウジングもしくは棒グラインダー等で除去し、溶接にて埋め戻す。 溶接後はグラインダー等で円滑に仕上げ、既設構造物より疲労等級を上げる工夫を施す。			
工法の位置づけ	予防保全・事後保全			
工法の概要(図や表など)				
概要				
<適用に対する方案> ・溶接補修の一番の課題は、供用下(振動下)での補修、品質の確保である。補修箇所が新たな弱点とならないよう、施工時期、手順等を決定し、品質を確保する。				
工法の特徴				
効果	回避効果	損傷部が除去される	△	
	軽減効果	損傷部が除去される	○	
	転嫁効果	---	×	
	受容効果	---	×	
	特記事項	供用下(振動下)での補修、品質の確保に留意		
設計の成立性(対象とする事例への適合性)	施工が可能であれば問題ない		○	
既設構造物への影響	形状・線形への影響	特になし	◎	
	荷重の増加	特になし	◎	
	既設構造物の補強の要否	不要	◎	
	その他(外観、使用性の変化等)	特になし	◎	
工法適応にあたっての制約条件	溶接施工が可能か?(狭隘部等)		○	
耐久性	耐久年数や不具合事例など	実績は多い	○	
	耐久年数経過後の補修工法	補強部材を取り付けないため、その後の補修・補強に対しても制約を作らない。		
施工性 作業性	施工実績	実績は多量、振動下での施工に配慮する	△	
	工期			
対応可能な交通規制	対象道路 および 周辺道路	交通規制なし	ジャッキアップで応力の開放が必要	△
		夜間の一車線規制日数	ジャッキアップで応力の開放が必要	△
		夜間の全止め日数	ジャッキアップで応力の開放が必要	△
		昼夜間の一車線規制日数	ジャッキアップで応力の開放が必要	△
	昼夜間の全止め日数	ジャッキアップで応力の開放が必要	△	
施工時期の制約	交通振動が少ない時間帯(夜間)		△	
足場等の安全設備の必要性	必要		○	
維持管理上の留意点	本体と同じだが、補修箇所が疲労耐久性の弱点とならないか、点検時に留意する		△	
経済性	工事費	経済的	○	
	ライフサイクルコスト	対策によっては抜本対策とならない可能性がある	△	
本工法の採用に対する評価			△	
疲労き裂の補修は、供用下での施工が多く、交通振動が溶接品質に与える影響が懸念される。特に疲労き裂は、重交通区間で発生することが多く、交通規制が困難なケースも少なくない。振動下での溶接施工は、品質に大きな影響を与えることから、施工時期や手順に配慮が必要である。				

評価の凡例: ◎: 最も優れている、○: 適用可能、△: 好ましくないが適用可能、×: 適用不可

表 1.2(5) 補修・補強技術の個票

工法名	炭素繊維シート工法		工法の特徴		評価																
工法の対象となる部位	鋼桁																				
変状の種類	疲労き裂																				
対策技術のカテゴリー	軽減																				
工法の特徴	疲労亀裂の周辺に炭素繊維シートを貼り付け、き裂部の作用応力を低減する。 特に、溶接品質の確保が困難な現地や、高力ボルトの断面欠損が問題となる場合などで、炭素繊維シートの接着が採用されるケースがある。																				
工法の位置づけ	予防保全・事後保全																				
工法の概要(図や表など)																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>引張強度(N/mm²)</th> <th>ヤング係数(kN/mm²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>高強度型</td> <td>3400</td> <td>245</td> </tr> <tr> <td>中弾性型</td> <td>2900~2400</td> <td>390~450</td> </tr> <tr> <td>高弾性型</td> <td>1900</td> <td>540~640</td> </tr> <tr> <td>鋼</td> <td>400~570</td> <td>200</td> </tr> </tbody> </table> <p><炭素繊維シートの材料特性></p> <p><炭素繊維シートの補強効果></p> <p>上記は、杉浦ら「炭素繊維シート(CFRP)を用いた鋼部材部分補修に関する実験研究(土木学会:第6回複合構造の活用に関するシンポジウム)」2005より抜粋</p>			種類	引張強度(N/mm ²)	ヤング係数(kN/mm ²)	高強度型	3400	245	中弾性型	2900~2400	390~450	高弾性型	1900	540~640	鋼	400~570	200				
種類	引張強度(N/mm ²)	ヤング係数(kN/mm ²)																			
高強度型	3400	245																			
中弾性型	2900~2400	390~450																			
高弾性型	1900	540~640																			
鋼	400~570	200																			
<p>設計の成立性(対象とする事例への適合性)</p> <p><案件ごとに確認></p>																					
<p>既設構造物への影響</p> <p>形状・線形への影響: 特になし (◎)</p> <p>荷重の増加: 特になし (◎)</p> <p>既設構造物の補強の要否: 不要 (◎)</p> <p>その他(外観、使用性の変化等): 特になし (◎)</p>																					
<p>工法適応にあたっての制約条件</p> <p>狭隘部への適用は困難(定着長が確保できない) (○)</p>																					
<p>耐久性</p> <p>耐久年数や不具合事例など: 実績が少ない (△)</p> <p>耐久年数経過後の補修工法: (○)</p>																					
<p>施工性 作業性</p> <p>施工実績: 実績が少ない (△)</p> <p>工期: (○)</p>																					
<p>対応可能な交通規制</p> <p>対象道路および周辺道路</p> <p>交通規制なし: ジャッキアップが不要であれば可能 (○)</p> <p>夜間の一車線規制日数: ジャッキアップが不要であれば可能 (○)</p> <p>夜間の全止め日数: ジャッキアップが不要であれば可能 (○)</p> <p>昼夜間の一車線規制日数: ジャッキアップが不要であれば可能 (○)</p> <p>昼夜間の全止め日数: ジャッキアップが不要であれば可能 (○)</p> <p>施工時期の制約: 特になし (◎)</p>																					
<p>足場等の安全設備の必要性: 必要 (○)</p>																					
<p>維持管理上の留意点: 本体と同様に管理 (◎)</p>																					
<p>経済性</p> <p>工事費: 比較的高価 (△)</p> <p>ライフサイクルコスト: 経済的(本体と同等) (○)</p>																					
<p>本工法の採用に対する評価</p> <p>△</p> <p>施工実績が少なく、中長期的な効果が不明であるため、採用に際しては十分な検討が必要である。</p>																					
<p>概要</p> <p><適用に対する方案></p> <ul style="list-style-type: none"> 炭素繊維シートにも、貼り付け層数や、定着長などの制約があり、適用に際しては、設計完了後に現地状況を照らし合わせ、適用可能か確認する必要がある。 炭素繊維は亀裂と直交して貼付するが、亀裂位置、部材との取り合いを考慮して、貼付可能か判断する必要がある。(既往の亀裂発生位置では、適用範囲に限られる) 炭素繊維を貼付する接着剤の耐久性に依存する。 																					

評価の凡例:◎:最も優れている、○:適用可能、△:好ましくないが適用可能、×:適用不可

表 1.2(6) 補修・補強技術の個票

工法名	ボルト取替え		
工法の対象となる部位	鋼桁		
変状の種類	高力ボルトの遅れ破壊や腐食		
対策技術のカテゴリー	回避		
工法の特徴	脆性遅れ破壊の懸念があるF11T高力ボルトから、S10TもしくはF10Tの高力ボルトへ取替えを行う。		
工法の位置づけ	予防保全・事後保全		

工法の概要(図や表など)			
① F11TからF10Tへのボルト交換の留意点 摩擦接合のボルト1本あたりの許容力の違いを把握し、継手照査を行う。			
表- 摩擦接合用高力ボルトの許容力 (1ボルト1摩擦面あたり)			
ボルト等級	呼び径	許容力 (kN)	割合
F11T	M22	51	1.00
F10T	M22	48	0.94
	M24	56	1.10

摘要			
<p>たたき点検や超音波探傷にて、ボルトの異常の有無を確認し、異常が確認され取替えの必要が生じた場合は、F10TやS10Tの高力ボルトへの取替えを実施する。</p> <p>この際、取替え範囲は、当該構造物の重要性や緊急性などを勘案して決定する。また、もとのボルトはF11Tであることが多いため、ボルトの許容値の違い(約5%)について、継手部耐力の照査を行い、要求性能を満足することを確認する。</p> <p>実施工においては、ボルトの取替え手順(一度に取り替える本数、取り替える方向)を、応力照査を行いながら各作業手順ごとで安全性を確認する必要がある。また、RC床版やPC床版、合成床版のように、コンクリートと接触している部分のボルト取替えについては、実施の要否も含め、床版コンクリートの撤去方法を併せて、施工計画の構築が必要となる。</p>			

工法の特徴		評価		
効果	回避効果	完全な取替えが可能	○	
	軽減効果	完全な取替えが可能	◎	
	転嫁効果	---	×	
	受容効果	---	×	
	特記事項			
設計の成立性(対象とする事例への適合性)		導入軸力の違いによるボルト本数の妥当性確認が必要	○	
既設構造物への影響	形状・線形への影響	特になし	◎	
	荷重の増加	特になし	◎	
	既設構造物の補強の要否	ボルト本数の妥当性確認	○	
	その他(外観、使用性の変化等)	特になし	◎	
工法適応にあたっての制約条件		母材・添接板が健全であること。ボルト締め付けが可能であること。所要耐力を有すること。	○	
耐久性	耐久年数や不具合事例など	特になし	◎	
	耐久年数経過後の補修工法			
施工性 作業性	施工実績	実績多数	◎	
	工期			
対応可能な 交通規制	対象道路 および 周辺道路	交通規制なし	上フランジ側のボルト取替え時、および下路橋では必要	△
		夜間の一車線規制日数	(対象案件による)	---
		夜間の全止め日数	(対象案件による)	---
		昼夜間の一車線規制日数	(対象案件による)	---
	昼夜間の全止め日数	全止めは不要	○	
施工時期の制約		特になし	◎	
足場等の安全設備の必要性		必要	○	
維持管理上の留意点		一般橋梁と同様	◎	
経済性	工事費	本工法以外の対策が少ない	---	
	ライフサイクルコスト	一般橋梁と同様	◎	
本工法の採用に対する評価		◎	ボルト損傷において、最も一般的な対策工法といえる。	

評価の凡例: ◎: 最も優れている、○: 適用可能、△: 好ましくないが適用可能、×: 適用不可

表 1.2(7) 補修・補強技術の個票

工法名	落下防止対策工	
工法の対象となる部位	鋼桁	
変状の種類	高力ボルトの遅れ破壊や腐食	
対策技術のカテゴリー	受容・軽減	
工法の特徴	ボルトの脱落による第三者被害を防止するため、ボルトの落下防止を行う。	
工法の位置づけ	予防保全・事後保全	

工法の概要(図や表など)		
対策事例の例(橋建資料より抜粋)		
		
落下防止キャップの取付例	落下防止ネットの取付例	

摘要		
<p>損傷事例が多く報告されているF11T高力ボルトの脱落防止対策としては、非常に一般的かつ有効な手段である。特に、遅れ破壊や腐食等の損傷が確認されていないボルトに対しては、ボルト取替え工に直接移るのではなく、本工法にて経過観察されるケースが多い。</p>		

工法の特徴		評価		
効果	回避効果	---	×	
	軽減効果	第三者被害防止にはなるが、構造的な安全性の面は軽減されない	△	
	転嫁効果	---	×	
	受容効果	第三者被害防止にはなるが、構造的な安全性の面は軽減されない	○	
	特記事項	第三者被害防止にはなるが、構造的な安全性の面は軽減されない		
設計の成立性(対象とする事例への適合性)		特になし	◎	
既設構造物への影響	形状・線形への影響	特になし	◎	
	荷重の増加	特になし	◎	
	既設構造物の補強の要否	特になし	◎	
	その他(外観、使用性の変化等)	対策工(ネット、キャップ)が目立	△	
工法適応にあたっての制約条件		特になし	○	
耐久性	耐久年数や不具合事例など	抜本対策にはならない	△	
	耐久年数経過後の補修工法			
施工性 作業性	施工実績	実績多数	◎	
	工期			
対応可能な交通規制	対象道路および周辺道路	交通規制なし	基本的には不要(ただし下路橋では必要となるケースもある)	△
		夜間の一車線規制日数	(対象案件による)	---
		夜間の全止め日数	(対象案件による)	---
		昼夜間の一車線規制日数	(対象案件による)	---
		昼夜間の全止め日数	全止めは不要	○
	施工時期の制約	特になし	◎	
足場等の安全設備の必要性		必要	○	
維持管理上の留意点		損傷部位は残るため、継続した維持管理が必要	△	
経済性	工事費	経済的だが抜本対策ではない	---	
	ライフサイクルコスト	継続的な維持管理が必要	△	
本工法の採用に対する評価		○		
		応急対策・経過観察対策としては有効であるが、恒久対策とはならない。		

評価の凡例: ◎:最も優れている、○:適用可能、△:好ましくないが適用可能、×:適用不可

【参考文献】

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋補修・補強事例集（2012年版），2012
- 2) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.
- 3) 東京都：みのわ陸橋緊急補修工事 竣工図書
- 4) 首都高メンテナンス東東京(株)：ホームページ，<http://www.shutoko-me.jp/crack.html>
- 5) 石川敏之・山田健太郎・柿市拓巳・李蒼：ICR 処理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂の寿命向上効果，土木学会論文集 Vol166 No. 2/264-272，2010
- 6) JFE エンジニアリング：NETIS ホームページ，
http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=KT-110069
- 7) 杉浦 江・大垣賀津雄・長井正嗣・小林 朗：炭素繊維シート（CFRP）を用いた鋼部材部分補修に関する実験研究，土木学会 第6回複合構造の活用に関するシンポジウム，2005
- 8) 一般社団法人日本橋梁建設協会：平成25年度四国3協会合同技術講習会資料，2013

2. 長寿命化技術の設計に求められること

『供用期間中に要求性能を合理的に満足するには、系統だった構造物の維持管理が必要である。そのためには、維持管理計画を策定し、着実に実施していくことが不可欠である』(文献 1))。

では、維持管理を着実に実施するための維持管理計画を、いつ策定するのかということだが、これは、新規に鋼構造物を計画・設計する際はもちろん、鋼構造物の維持管理を実施する中で、既に策定された維持管理計画についても環境の変化や要求性能の変化等に応じて適宜見直すことが重要といえるであろう。一方、既設の鋼構造物の中には、明確な維持管理計画が存在してこなかったものもあるが、それらも含めて、維持管理計画を策定することが求められる。

さらに文献 1)によれば、維持管理とは、供用期間中、構造物が要求性能を満たすよう実施する一連の行為の総称であって、一般に点検、対策、記録で構成され、補修や補強は対策のひとつの方法として整理されている。また、予想される変状に対する対策は、維持管理計画に定めておくことが示されている。

これらのことから、いわゆる「維持管理計画」では、供用期間が明確にされ、その中で予想される変状に対して必要な場合は補修や補強が計画されること、PDCAにより適宜、補修・補強の内容を含む維持管理計画をも見直されることを知ることができ、「長寿命化」という概念は維持管理計画の見直しの一部として整理することもできる。

他方、あえて区別すれば、供用期間をより長期に見直す際に必要となる補修や補強を長寿命化技術として定義し、一定の供用期間中、構造物の要求性能を満たすために計画される補修や補強は長寿命化技術に含まないという見方もできる。

以上のことを踏まえつつも、本検討ではこれらを明確に区別せず、いずれにしても構造物の寿命を阻害する様々な要因に対して、構造物の要求性能を満たすために実施する補修や補強を長寿命化技術と捉えて議論することとした。

ここでは、長寿命化技術の設計に求められることとして、図 2.1 に示す 7 項を提案する。

- ① 当該技術によりどれだけ長寿命化を図れるか明確にすること
- ② 作用を適切に設定すること
- ③ 当該技術の効果を評価する方法を明確にすること
- ④ 設計計算を行う場合は解析手法を明確にすること
- ⑤ 設計の前提となる材料や施工の条件を明確にすること
- ⑥ ライフサイクルコストを評価すること
- ⑦ 維持管理方法を明確にすること

図 2.1 長寿命化技術の設計に求められること

なお、図中①～⑤は、個々の構造物の特定の事象に着目した長寿命化技術の設計にかかる事項であるが、⑥と⑦は、それに加えて構造物全体として、あるいは当該構造物を含むシステム全体として、将来的に発生する種々の事象を想定して総合的な長寿命化技術を設計する視点も示している。

(1) 当該技術によりどれだけ長寿命化を図れるか明確にすること

長寿命化技術という言葉には時間の概念が含まれており、補修や補強を実施した結果として、当該構造物の寿命をどれだけ長くできるかということ、設計で明確にするべきである。あるいは、導入しようとする補修・補強技術に関して、過去の実績等から目標とする標準的な年数を設定しつつ、そこに近づいたら詳細調査を行うといったような、維持管理の考え方を明示すべきである。

現時点では、その補修・補強技術によりどれだけ寿命を長くできるのかを明確にするのは容易ではない。構造物の置かれる環境や荷重などの作用の種類や強さの違い、劣化・損傷が生じた部位や程度、使用材料のばらつきや施工品質、構造物が造られた時代背景にも大きく左右される構造ディテールなど様々な要因を受けて、同じ補修・補強技術を適用したとしても、長寿命化される期間が異なるためである。さらに、当該補修・補強技術そのものの使用材料のばらつきや施工品質などによっても左右されるであろう。これらのばらつき等を踏まえながら、どれだけ寿命を長くできるかを精度よく設計することは、現時点では容易ではないだろうが、時間の概念を含む「長寿命化」にかかる技術を整理していくためには、「どれだけ寿命を長くできるのか」といった課題を避けて通ることはできない。

後述する内容とも関連するが、新たに補修や補強技術を開発する際には、どのような条件のもとでどれだけ寿命を長くできるかを明確にすることをも含めた技術開発が必要であり、加えて、既存の補修や補強技術についても再評価を行うなどして、これらを明確にすべく取り組む必要がある。またさらには、新設構造物を含む設計体系そのものを、限界状態設計法に基づく部分係数法に移行していくなど、補修や補強技術を開発・設計するための環境を整備することにも取り組む必要がある。

このような状況における次善の対応として、導入しようとする補修・補強技術に関して、過去の実績等から目標とする標準的な年数を設定し、設定した時期に近づいたら詳細調査を行うなどして、補修・補強設計で想定した年数まで長寿命化できるのかをチェックする手段もある。当面はこれにより長寿命化技術の導入を推進し、上記課題を解決すべく、技術開発や設計体系の見直しに必要なデータを蓄積していくことも重要である。

(2) 作用を適切に設定すること

長寿命化技術の設計においては、荷重を含めた作用を適切に設定する必要がある。

文献 2)によれば、作用には、構造物に集中あるいは分布して作用する「直接作用」、構造物に課せられる変形や構造物内の拘束の原因となる「間接作用」および、構造物の材料を劣化させる原因となる「環境作用」とがある。これらは、設計供用期間中に絶えず作用する「永続作用」、設計供用期間内の変動が無視できない「変動作用」、確率統計的手法による予測は困難であるが社会的に無視できない「偶発作用」に区分される。また、これに対して、『荷重とは、構造物に働く作用を必要に応じて、構造物の応答特性を評価するモデルを介して、断面力や応力や変位等の算定という設計を意図した静的計算の入力に用いるために構造物に直接載荷される力学的力の集合体に変換したもの』と言われている。

新規に構造物を設計する際に適用される技術的基準において、作用は、これまでの調査結果に基づく標準的な値や、過去に観測された最大の値を考慮して設定したもの、あるいは変動作

用を確率論的に処理して一定のモデルに置き換えたものなどが示されている。これらは不特定多数な新規構造物を設計することを前提として設定されたものであるが、既設構造物においては、現に適用された材料があり自重や剛性などが概ね確定していること、当該構造物が設置されている環境特性や使用履歴を供用期間中にある程度把握できることなどから、新規構造物を設計する際に存在していた各種の不確定さがある程度は小さくできる。補修や補強の設計時には、これらを適切に考慮して設定することが求められる。

なお、文献 2)によれば、『社会的に対応の必要があると判断される作用および構造物の所有者が必要と判断した作用を対象に設計を行う』とされている。すなわち、作用は設計者が個々の構造物を設計する際に設定するというよりも、構造物の管理者や所有者が基準として定めるべき事項であるといえる。

(3) 当該技術の効果を評価する方法を明確にすること

補修や補強により長寿命化をはかる際、寿命を阻害する要因に対して、その程度やメカニズムを踏まえながら、どのようにしてその要因を解消できるのか、その考えは何によって担保し得るのかといった、効果を評価する方法を明確にすることが求められる。

例えば、鋼道路橋の桁端部に生じることのある腐食損傷は、路面の雨水が伸縮装置や橋面排水装置から漏水することで、桁端部が湿潤状態になり、腐食が発生する典型的な損傷事例である。路面の凍結防止剤が多量に散布される場合には、飛来海塩の影響を受ける橋梁よりも腐食速度が著しく速くなることがあるといわれている。このようなメカニズムで腐食した部位には、通常の防食対策である塗装塗替えを実施するだけでなく、止水や導水などの腐食環境改善をあわせて実施することで、要因を解消できることが知られている。¹⁾

この事例の場合には、理論的に考案された解決策を適用し、その後の維持管理を通じて確認してきた実績により効果が検証されており、この範囲において当該技術の効果が担保されているといえる。他方、これから開発されようとしている新技術においては当然ながら実績が無いため、研究段階で蓄積したデータの公表や、それらにかかる公的機関での技術認定等が求められる。

また、当該技術の適用に伴う、他の部位や構造全体への影響、さらには周辺環境へ及ぼす影響についても、適切に評価することを忘れてはならない。

(4) 設計計算を行う場合は解析手法を明確にすること

前項(3)において、ことさら設計計算により効果を評価する場合には、変状の状態に応じて、新設当初とは異なる部材の材料特性や構造の幾何学的特性、支持条件等、実態を適切に評価して、外的作用に対する構造物の挙動を適切に再現できる解析手法を選定していることを明示する必要がある。

例えば、道路橋の設計計算に用いる解析手法として、従来、主として死荷重、活荷重等の様々な荷重の組合せに便利な方法として、はり理論、格子計算等による線形構造解析が用いられてきたが、近年のコンピューター技術の著しい進歩により、床版等を含むより多くの部材の立体的な配置を表現したモデルによる有限要素解析、幾何学的非線形性の影響をも考慮した有限変位解析、動的解析等の高度な解析手法も従来に比べてかなり一般的に用いられるようになって

きた。補修・補強対策においては、構造物の構造形式や照査の目的に応じて、これらの手法を適宜選択して使用すること、さらには変状の状態に応じて材料特性や構造の幾何学的特性、支持条件等にかかる諸条件を適切に設定することが求められる。これらの比較的高度な解析手法を用いる場合であっても、上述のとおり荷重の載荷方法や変状状態を踏まえた特性に適合した適切なモデル化がなされなければ十分な精度を有する解が得られないので注意が必要である。さらに、例えば有限要素解析で得られる応力の算出結果の設計への反映方法等、解析方法ごとに結果の取扱いやその評価の方法について十分な検討が必要であることは、新規の構造物を設計する際と何ら違いはない。(以上、文献3) 参考)

具体的な一例をあげると、設計自動車荷重が20トンで設計された鋼道路橋のRC床版を、現行の25トン荷重に対応できるよう補強する際、RC床版下面のコンクリート表面に炭素繊維シートを接着する方法がある。この方法を適用する場合、一般的に、部材断面における許容応力度設計法の体系を踏襲する中で、炭素繊維シートを鉄筋量換算してRC断面として計算する解析手法が採用される。これに対して、当時の建設省土木研究所らが実施した輪荷重載荷試験により、この解析手法で設計された供試体について、一定の条件の下で、疲労耐久性があることが確認されている⁴⁾。このことを通じて、この解析手法により設計計算すれば、所要の補強効果を期待できるということが出来る。

長寿命化技術の設計で設計計算を行う場合には、この事例のように、実験により妥当性が検証された解析手法を適用していることを明示するという方法もある。

(5) 設計の前提となる材料や施工の条件を明確にすること

補修・補強技術を設計する際、設計の中で想定した材料の特性や品質、またそれらの前提となる施工の条件を明示する必要がある。言い換えれば、新規に構造物を設計する場合と同様、使用する材料は所要の特性を有するとともに安定した品質が確保されていることが確認できること、それらを実現するための施工方法が確立されていることが、使用上の前提条件となる。このことは、主たる材料である鋼材やコンクリートだけでなく、例えば接着剤や新材料などについても同様である。

(6) ライフサイクルコストを評価すること

長寿命化対策を実施する場合、当該技術による経済性については、ライフサイクルコスト(以降、LCCと称す)により評価することが求められる。

一般的には、何らかの補修・補強等を実施しようとする段階で、どのような補修・補強技術を適用するのがLCCにおいて最も経済的かという問題を検討する。LCCには、対策した後にかかる費用をも含めることから、対策後に実施すべき維持管理のシナリオを可能な限り明確に想定して、それらの費用を積算することになる。このためには、個々の構造物の変状や作用環境、構造形式や使用材料にかかる特徴などを踏まえて劣化予測を行う必要があり、予測される将来の状態に対して適用可能な補修・補強技術とその効果(どれだけ寿命を長くできるか、どれだけ性能を回復できるか等)を明らかにすることが求められる。

さらに、何らかの補修・補強等を実施しようとする段階だけではなく、例えば定期点検に合わせる等して、当初の維持管理計画において想定された維持管理のシナリオに対して実態がず

れていないかなどを検証し，必要に応じてその段階で LCC を再評価して維持管理のシナリオを補正するといったことも求められる。

なお，さらなる高度化を見通した場合には，個々の部材・部位の補修・補強対策だけに着目してライフサイクルコストを評価するだけではなく，構造物全体として経済的となるよう配慮すること，さらには，当該構造物を含むシステム全体（例えば橋梁でいえば，「当該橋梁を含む区間や路線全体」）として経済的となるよう配慮するといったことも考えられる。

(7) 維持管理方法を明確にすること

以上のように，補修・補強技術には様々な課題がある。このため，繰り返しになるが，導入しようとする補修・補強技術に関して，過去の実績等から目標とする効果（どれだけ寿命を長くできるか，どれだけ性能を回復できるか等）を設定し，その後の維持管理を通じてこの効果をチェックすることが重要となる。当面はこのようにして長寿命化技術の導入を推進し，上記課題を解決すべく，技術開発や設計体系の見直しに活用できるデータを蓄積していくことが重要となる。

ある補修・補強技術を適用した構造物のその後の維持管理において，何に着目して，どの程度の頻度で，何をどのように確認するか（どのような計測機器を用いて，どのようなデータを計測するか）など，維持管理方法をあらかじめ明確に設定することが不可欠である。また，常時のみでなく，大地震等異常時における確認のポイントも整理しておくべきであろう。

【参考文献】

- 1) 土木学会鋼構造委員会：2013年制定 鋼・合成構造標準示方書 維持管理編，2013.
- 2) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002.
- 3) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所：国総研資料第28号 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，2002.

3. 長寿命化技術の施工に関する留意事項

社会基盤施設における鋼構造物は、主に道路橋、鉄道橋、水門、水圧鉄管港湾施設等があり、それぞれの役割や周囲の環境、使われ方などに応じて、長寿命化対策を施工する際に留意すべき事項があると考えられる。

本章では、このうち鋼橋（道路橋、鉄道橋等）に着目して、長寿命化技術の施工に関する留意事項について調査・検討した成果を報告する。

3.1 長寿命化工事（補修・補強）の特殊性

(1) 既に存在し供用されていること

補修・補強工事の対象となる鋼橋は、交通・輸送網を支える上で重要な役割と責任を担っており、保守点検、補修・補強工事のためとはいえ、一般的には交通を安易に制限することはできない。また、工事対象となる橋梁の周囲は長い供用期間にそれなりの周辺環境を形成し、秩序が保たれ、安定した状況にある。

このような中で工事を進めなければならないことは、新設工事にはない大きな特徴である。

また、このような背景から、関係機関との協議や地域社会との調整は複雑になり、新設工事に比べてこれらに多くの時間を要する。さらに材料や機材の搬出入等に関する条件は、その時どきの協議等に応じて様々であり、施工方法や積算体系の標準化を困難にする一因ともなっている。

(2) 高度な専門的技術

設計により要求された性能を実現するため、補強・補修工事を施工する者が、品質や出来形を適切に確保することが極めて重要である。このため、施工者には、新設橋の設計、製作、架設における専門的技術とともに、過去の技術基準の内容、当時の使用材料や施工技術の特徴などにかかる十分な理解が求められる。

例えば、交通供用下で行う支承の取替工事で、桁の扛上から降下までの一連の作業を仮受けで行う場合、上部工や下部工に及ぼす影響を照査しなければならない。また、塗装塗替工事や防食対策として行われるブラスト・金属溶射などでは、施工に伴う周辺環境への騒音や粉じん対策を行うだけでなく、作業者の健康被害防止の観点から旧塗膜に含有される有害物質（鉛、PCB、クロム等）を調査するなどして適切な対策を講じることが求められる。

(3) 施工上の制約

補修・補強工事の施工では、多種多様な制約を受ける。工事ごとにその内容は異なり、その影響は工事全般に及ぶことが多い。

以下、補修・補強工事に特有の制約について、一般的な新設工事と対比しながら整理する。

1) 施工規模、施工時間の制約

補修・補強工事は、一般的には小規模な内容となり、施工量が少ない。その上、交通規制等の条件により短い作業時間しか確保できないことや、工事区間を小さく分割せざるをえないといった制約がある。

他方、工事発注に際して一定規模の施工量を確保する観点から、これら小規模な補修工事を

まとめられることがある。しかし、広範な地域に点在し、工種が異なる小規模な工事をまとめて発注されても規模のメリットが効かず、かえって小規模工事が輻輳して工事全体が繁雑になる等デメリットとなることもある。

2) 交通供用下における施工制約

補修・補強工事は、そのほとんどが交通供用下で行われる。工事に必要な足場の設置撤去などは交通を制限せざるを得ない場合もあり、夜間に交通規制するなど、限られた時間と空間での作業となることも多く、新設工事に比べて一般的には作業の効率が低下する。

3) 作業空間および作業姿勢の制約

支取替や桁端部の補修・補強工事、床版下面の補修工事などでは、狭隘な空間での作業となることが多い。特に跨道橋や跨線橋の補修工事においては、十分な作業空間を確保できず、厳しい姿勢での作業となることが多い。適当な作業空間を確保できるかどうかによっても、工事の効率が大きく左右される。同種の同数量の工事であっても、現場によって工事の進捗に大きな差が生じるのは、当該制約が主な原因のひとつである。

4) 機材の運搬および設置の制約

補修・補強工事は供用下の施工となることから、短期間で工事を完了させることを要求される場合が多い。また、実作業時間に対する段取り、調整、片付け、盛替えおよび待機に要する時間の割合が高いといった特徴もある。そういった状況に対応するため、人員や資機材などの資源を適切に配分したり、綿密な工程計画を策定・実践したりする等、高いノウハウが求められる。

このようなことから、各種機械の稼働率は新設工事に比べ低下する傾向となる。

5) 各関係機関との協議における留意事項

補修・補強工事では、新設工事とは異なり供用下での施工となるため、施設の管理者（発注者）による事前の関係機関協議だけでなく、工事契約後の施工業者による具体の施工計画に基づいた協議や申請等が必要になる場合が多々ある。これに多くの日数を費やすことを余儀なくされ、実質的に施工にかかる日数が短くなってしまう事例もある。

施工者は契約工期を順守しつつ求められる施工品質等を確保するため、想定以上の人員や機材を短期間に投入する必要があるばかりでなく、施工の品質や出来形などの管理も非常に高度なものを要求されることになる。

安定した施工品質や出来形を確保するため、発注者も、できるだけ事前の関係機関協議等を効果的に進めるなど工夫して、実質的な施工に必要な工期を設定することが重要である。

工事する際に協議を行うことの多い関係機関には次のようなものがある。

表 3.1 主な関係機関

関係機関	摘 要
道路管理者	工事対象橋梁と交差する道路などを管理する機関
河川管理者	工事対象橋梁と交差する河川を管理する機関
港湾管理者	海岸や港湾近傍に架橋されている工事対象橋梁の場合
交通管理者（警察）	工事対象橋梁や交差道路の交通を管理している機関
公共交通機関（バスなど）	道路や交差河川を使用している公共の交通機関
地元自治会	工事対象橋梁の近接住民，その自治会
鉄道（JR 各社，私鉄など）	鉄道近接工事等の場合
漁業関係者	河川を渡河する橋梁で漁業権がある場合
その他	工事対象橋梁に添加している電力，電話，上下水道など

3.2 補修・補強設計における留意事項

一般的に発注される工事では，設計と施工を分離したものが多く，工事が発注される時点で，既に詳細設計が完了している場合がほとんどである．しかし，補修・補強設計のために足場をかけるなどして詳細に既設橋の計上寸法や変状を調査することは少なく，施工の準備段階で明らかになることが多いのが現状である．

詳細設計による図面をそのまま施工図面として工事を進めて，工事中に不具合が発生することもある．様々な板厚の鋼材を少量ずつ組み合わせて製作し，制約の多い現場に搬入することなどを適切に考慮して，設計で前提とした事項や施工への申し送り事項を明示するなどの工夫が求められる．

詳細設計において配慮すべき，工場製作や製品加工面の留意事項を，以下に述べる．

(1) 設計－施工計画

鋼橋の新設工事では，工場製作の完了後に架設（現場施工）を行うといった具合に，施工フローの区切りが明確であるのに対して，補修・補強工事の場合は，細部設計～工場製作と現場施工が並列的に進行するところに大きな違いがある（図 3.1 参照）．

1) 実測調査

補修・補強工事では，既設構造物への部材取付けを行うため，既設構造物の詳細な実測調査が必要不可欠となる．設計で要求する品質を確保するためには，現場での実測の精度とそれに基づいた図面の修正，工場製作への実測データの反映などが重要となる．

実測調査は，近接による調査となるため足場を設置した後に行うことになる．この調査は，鋼橋の専門的な技術者の他に工場製作に携わっている技術者（設計や原寸）も同行しないと，精度の良いデータは得られないこともあるため配慮が必要である．

2) 工場との関係

鋼橋の補修・補強の材料は工場で作成するものが中心であり，コンクリート構造物のように

現場近隣から材料を調達し、現場で構築できるものは少ない。補修・補強工事の出来形や品質の精度を確保するためには、設計・工場製作と施工計画・現場施工が連携しながら一体となって進めていくことが肝要である。

例えば、橋台・橋脚にブラケットを設置する際、既設鉄筋を避けてアンカーボルトの位置を決定したうえで補強部材を加工する必要があるため、型紙などを使って正確に寸法をおさえ、工場製作に反映させることはその典型といえる（写真3.1、写真3.2）。

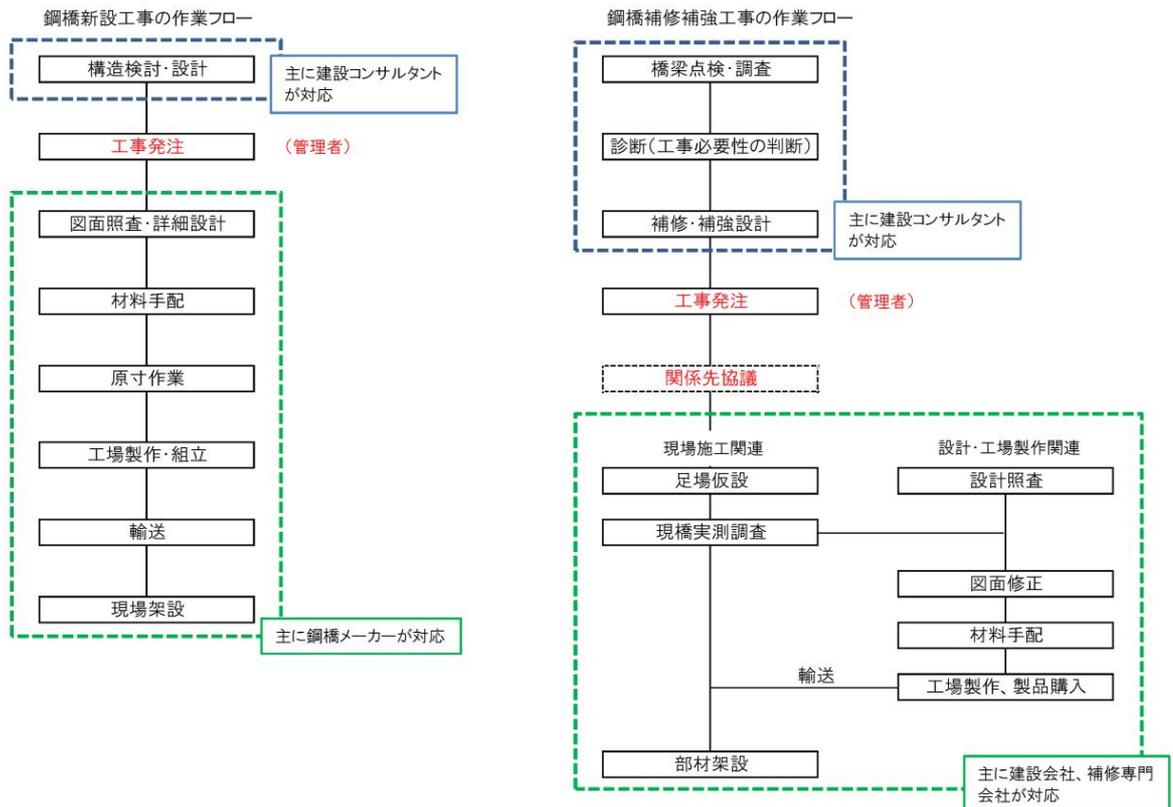


図 3.1 鋼橋新設工事と補修・補強工事の作業フローの違い



写真 3.1 アンカーボルト位置計測状況



写真 3.2 孔位置写真計測状況

(2) 既存の図面に関する配慮

補修・補強設計において、既設橋の調査は不可欠である。調査に際して、変状の広がりや程度は比較的容易に確認されるが、既設部材の取り合い寸法や添架物の大きさや位置などを把握することも忘れてはならない。橋梁が建設された当時の竣工図には、当該橋梁そのものしか表現されていないが、現況では、供用開始後に設置された添架物や取付支材等が存在する場合もあるので、設計の際には留意が必要である。(図 3.2)。

例えば、箱桁内部に補強部材を設置する際、竣工図面をもとに判断すれば搬入できた部材であっても、実際には多くの添架物が支障となってしまう事例(写真 3.3)や、配管類が干渉して作業用足場の設置に支障となる事例(写真 3.4)などが挙げられる。

設計の段階でこのような干渉物を把握し、設計図面に反映することにより、当初は予定していなかった補修部材の設計変更や干渉物の移設などにかかる時間や手間が発生しないよう、対策することができる。

なお、補修・補強工事の竣工図や施工計画書などは、将来の維持管理に重要な基礎資料となるため、工事規模の大小に関係なく、適切に保管しておくことが重要である。

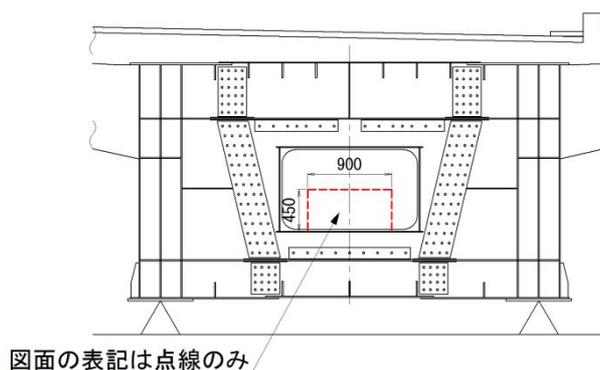


図 3.2 竣工図での表記



写真 3.3 実際の箱桁の内状況



写真 3.4 作業足場と干渉する配管類

(3) 鋼材や製品の手配期間の確保

既設構造物の補修・補強工事では、製作する部材が少量となるため、新規に建設する構造物の場合とは異なり、市中品による材料手配となりやすいという特徴がある。市中品がない場合は鋼材をロール手配することになるが、いずれにしても、入荷までに通常は2～3ヶ月程度かかる。

前述のとおり、補修・補強工事では設計図をもとに内容を照査し、必要に応じて修正を加えて鋼材の発注手続きを行うため、あらかじめこの期間を考慮した工程を考えることが求められる。しかし、補修・補強は小規模な工事が主体のため、これら材料手配に必要な工程は過少に見積もられることがある。現場施工に必要な十分な期間を確保するためには、製作のための適切な期間を設定することが不可欠であるため、事前に材料流通の動向を調査するなど工夫することが望ましい。

また、2次製品となる鋼製支承（標準支承も含む）は、金型や鋳型から製作するため、鋳型製作期間（約30日程度）を工期に見込んだ設定が必要となる。鋼製高欄の取替についても、橋面の縦断勾配を反映させた製作が必要であり、現場の形状に合わせるための期間を考慮することが求められる。

3.3 施工計画において留意すべき事項

(1) 作業スペースに対する留意事項

補修・補強工事の現場は、対象構造物そのものや添架物などが輻輳していることが多く、十分な作業空間が確保できずに非効率な作業となることがある。このため、現場状況を勘案して作業スペースを計画したり、スペースの制約を踏まえた補強部材の分割を計画したりするなどの配慮が肝要である。

例えば、部材搬入時のマンホールの大きさを事前に把握したうえで補強部材の大きさを検討したり（図3.3、写真3.5参照）、アンカー削孔や高力ボルト締め付け等に用いる機械の寸法を事前に確認したうえで既設の部材に干渉しないよう検討したりすることが求められる。

理論的に優れた補修や補強方法を設計したとしても、実際の現場でうまく取付かなければ効果を発揮できない、また、作業員の施工姿勢（上向き、横向き）もイメージした施工計画を立案できれば、より一層、設計で期待した品質を確保する環境を整えることができる。

塗装塗替えに際して塗膜を除去する場合、施工計画には十分な配慮が必要である。

塗膜除去を目的としたブラスト施工には、大型のコンプレッサーが常時必要であり、その作業半径は最大でも200m程度である。

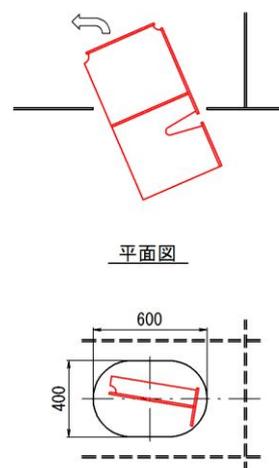


図 3.3 既設マンホールと部材



写真 3.5 マンホールからの取込

機材を設置する場所の選定が、効率的な施工に不可欠である。また、ブラストの工法によっては、研削材を 30~40kg/m² 程度使用し、施工後はそれらが足場上に積層することになる。このような場合には、使用済みの研削材の重量を考慮した足場の仮設計画を立案する必要がある。

(2) 部材運搬への配慮

供用中での施工が条件である補修・補強工事では、橋梁を新設する工事とは異なり、必ずしも重機を使用できるとは限らない。また、補強部材を取り付ける位置まで運搬するルートにも制約を受けることが多い。

例えば、補修・補強工事における人力の運搬では、2人で70kg程度の部材を運ぶのが限界で、それを超えると運搬用の設備等（写真3.6）が必要となる。また、橋面から荷降ろしを行い、桁下に引き込む設備（写真3.7）が必要となることもある。

このような取込や運搬に関する設備計画は、取付け位置まで部材をいかに安全に運搬するかも含めて、現場に応じたものとする必要がある。



写真 3.6 作業足場上で運搬台車設備



写真 3.7 トロリーを使用した引き込み設備

(3) 品質管理基準

補修・補強工事では、明確な品質管理基準がないのが現状である。このため、道路橋示方書や各管理者（発注者）が新設橋梁を建設する際に用いる共通仕様書を参考にする場合が多い。

しかし、既設橋の経年変化や架設時の誤差への配慮が必要となるなど、新設の基準・規格をそのまま適用するのが困難な場合も見受けられる。また、補修・補強工事は様々な現場固有条件のもと、工種も多種多様であり、新設の基準・規格を準用して、一様に管理基準を設定することが難しい場合もある。そのため、経験の浅い技術者が担当したり、不慣れた工種を担当したりする場合には、品質管理の基準値や目標値を決めるために、相当の労力を要することがある。

さらに、同じ工種の工事であっても、現場毎に施工条件が異なるため、類似の施工事例において設定した基準値等を準用できない場合があるので留意が必要である。

3.4 主な損傷の対策にかかる施工上の留意事項

3.4.1 疲労き裂対策の施工上の留意事項

疲労き裂の対策は、応急的対策と恒久的対策に大別される。

一般的に、応急的対策では、き裂の先端を除去するストップホール工法が適用される。恒久的対策では、き裂の除去後に溶接で埋め戻したうえで止端仕上げして強度等級を向上させたり、高力ボルトで補強部材を添接したりするなどして、構造を改善して応力集中を緩和する手法がとられる。

現場溶接により補修を行う場合、交通供用下における振動や溶接姿勢等の条件、母材の耐溶接性などを十分に考慮して、溶接品質を確実に確保できるか確認する必要がある。

3.4.2 腐食対策の施工上の留意事項

腐食した鋼橋の性能を回復して長寿命化を図る際、性能を回復させるための工法を適用する前処理として、腐食損傷の原因をきちんと取り除くことが重要である。

腐食が軽微な場合には、塗装塗替えを行うことが多い。腐食により鋼部材の断面減少が進んだ場合に適用される代表的な工法には、当て板工法がある。当て板工法は、腐食による断面減少が生じた部位に対して、鋼板や形鋼などの鋼部材（当て板）を添えることで部材断面を補う工法である。断面剛性を回復させるとともに、発生応力を低減させて、腐食した部材の性能回復を図る。

腐食損傷の再発を防ぎ、当て板工法に期待した効果を継続的に発揮させるためには、前処理として行うケレン作業（素地調整）により、さび等を確実に除去することが求められる。

他方、ケレン作業後の部材表面に生じる不陸が大きくなる場合には、当て板との間に不陸ができて、そこから水が浸入して、腐食が進行する恐れもある。また、隙間の影響により、設計で期待した応力低減等の効果を発揮できない恐れもある。

このような場合の対処方法として、**図 3.4**のように母材と当て板との間にエポキシ樹脂や金属パテを塗布(**写真 3.8 参照**)して隙間を埋める等により工夫された事例がある。また、当て板と母材との間に水が浸入するのを防ぐため、当て板の周囲を弾性シール材で処理 (**写真 3.9 参照**) する等により工夫された事例がある。

なお、当て板工法は一般的に、高力ボルトにより添接することが多い。現場溶接による添接を検討する場合には、交通供用下における振動や溶接姿勢等の条件、母材の耐溶接性などを十分に考慮して、溶接品質を確実に確保できるか確認する必要がある。

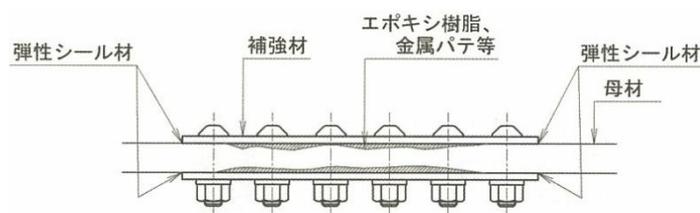


図 3.4 添接面の不陸修正



写真 3.8 腐食欠損部の不陸修正
(エポキシ樹脂パテ)



写真 3.9 当て板部の外周シール
(シリコン樹脂パテ)

【参考文献】

- 1) 土木学会：鋼橋の疲労対策技術，2013
- 2) 土木学会：腐食した鋼構造物の性能回復事例と性能回復設計法，2014

4. 鋼構造物の長寿命化対策事例

本章では、予防保全型と事後保全型それぞれの長寿命化対策事例と、長寿命化するために用いられた新たな技術シーズの適用事例について紹介する。

予防保全型の一つ目の事例として、発見された損傷に対して各種の調査や試験により検討を重ねて標準工法を開発し、同じ構造ディテールで損傷が確認されていない部位にも予防保全的に対策を実施した東海道新幹線の実例を紹介する。これは、1. で整理したリスクマトリクスの「回避」対策である。二つ目の事例は、今後 100 年寿命を延ばす政策方針のもとで、劣化要因を除去するための補修や耐震性能を向上させる補強などを実施した東京都の実例で、リスクマトリクスの「軽減」対策である。

事後保全型の実例については、経過観察していた損傷に進展がみられたことから補修を行った東京都の実例を紹介する。リスクマトリクスの「受容」対策をとっていたが、健全度が低下したことを受け「軽減」対策を講じたものである。

また、新たな技術シーズを適用した事例では、鋼床版の疲労き裂対策として導入した鋼繊維補強コンクリート（以降「SFRC」という）舗装の実例、当て板補修の際に腐食減肉部にエポキシ樹脂系接着剤を塗布した事例について紹介する。なお、これらはいずれもリスクマトリクスの「軽減」対策である。

この他、本州四国連絡高速道路株式会社や阪神高速道路株式会社などの高速道路各社では、策定した長寿命化計画のもとで、メンテナンスサイクルを継続的に発展させるべく、点検、診断、修繕、更新等を着実に進めるとともに、基準類や情報基盤の整備、新技術の開発・導入に取り組んでいることが、次のサイト等から確認できる。

本州四国連絡高速道路株式会社

http://www.jb-honshi.co.jp/corp_index/company/chojyummyou/

阪神高速道路株式会社

<http://www.hanshin-exp.co.jp/company/torikumi/anken/ijikanri/>

首都高速道路株式会社

<http://www.shutoko.co.jp/efforts/safety/infrastructure/>

中日本高速道路株式会社

<https://www.c-nexco.co.jp/koushin/infrastructure/>

東日本高速道路株式会社

<http://www.e-nexco.co.jp/effort/aging/infrastructure/>

西日本高速道路株式会社

<http://www.w-nexco.co.jp/koushin/infrastructure.html>

4.1 予防保全型の実例（その1）¹⁾

4.1.1 概要

予防保全型の実例として、まず開業 50 周年を迎えた東海道新幹線でこれまで行われてきた取り組みを紹介する。

東海道新幹線には約 9.5 万トンの鋼橋があり、これを短期間に多量に設計・施工（従来は年間約 1.5 万トン）する必要があったため、リベット構造に替わり溶接構造を全面的に採用するとと

もに、標準設計を多用した。

このため東海道新幹線の設計にあたっては、様々な形で応力集中に対する配慮が行われ、構造各部に対し、図 4.1 に示すように、できるだけ応力集中を小さくするディテールを標準化し、より有効なものを選べるようにした。



写真 4.1 S 跨線橋疲労損傷状況

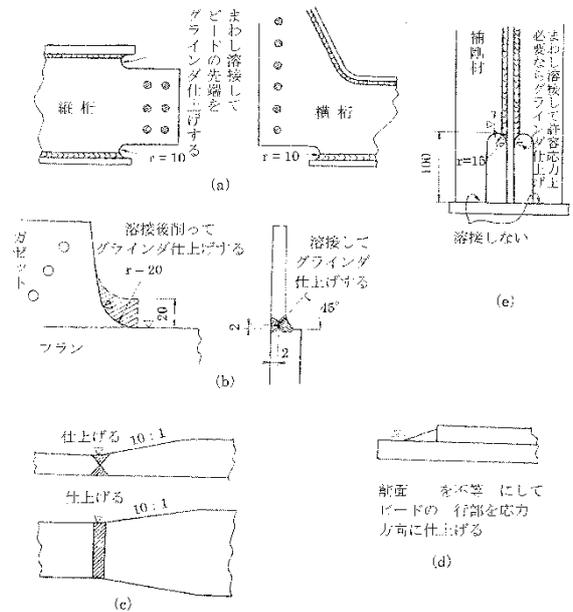


図 4.1 疲労を考慮した細部設計

ところが、設計段階でいろいろ配慮したものの、供用を開始してみると一部で10年もたないうちに疲労き裂が発生するものも現れた。写真 4.1 に1974年に発見されたS跨線橋の損傷状況を示す。このき裂は、中間横桁の端部でウェブが斜めに破断したもので、発見後、直ちにベントによる下支えと、当て板による仮補修の処置がとられた。図 4.2 に当該部の設計図を示す。図からわかるように、横桁の下フランジはウェブの切り欠き部までで止めていたこと、さらに、横桁の端部でウェブと下フランジが連結されていないことがウェブの切り欠き部に起こる応力集中の原因であった。このディテールは、現在では使っていけないことになっているものの、当時の標準的なディテールで、広く用いられており、いわゆる「基準不適合」ともいえる。

しかし、これらの疲労損傷はこれまでの在来線に比べ発生率が高いものの、当時の設計示方書

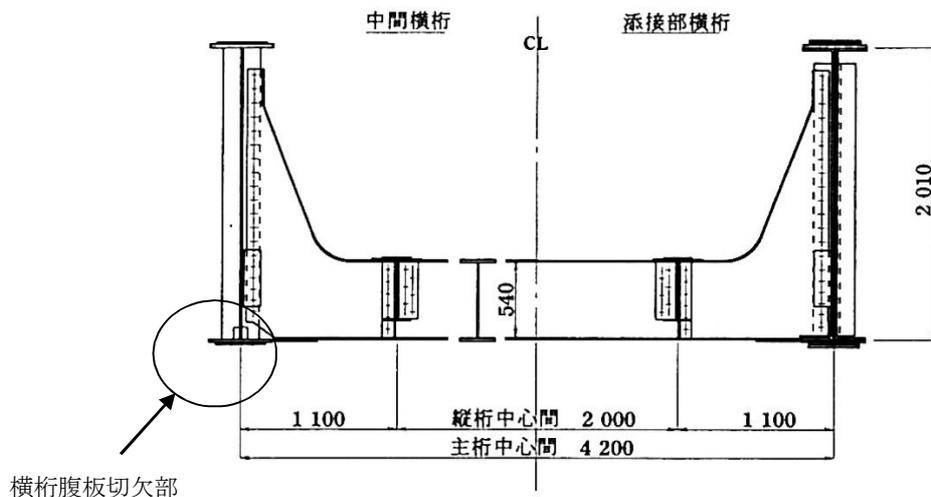


図 4.2 S 跨線橋横桁端部設計図

に従ってチェックされた主要な部材・箇所から生じたものではなく局部的なもので、検査の充実や局所の予防保全的な補強・改良により対処できると判断された。このことが、東海道新幹線では事前に状況を把握する検査を充実させ、予防保全的に手を打っていく体制を整える必要があるとした根拠になっている。

4.1.2 寿命を左右する要素と原因

本事例における、当該鋼橋の寿命を左右する要素は、物理的要素である。すなわち、疲労き裂による断面欠損により、耐荷力性能が低下している。

この大きな原因として、本橋では、リベット構造に比べ疲労に敏感な溶接構造を採用したことがあげられる。また前述したように、疲労の起因となる応力集中に対しては様々なディテールの配慮をしていたが、今から見ると不適切といえるものがあつたといえる。これについてはその後時間と労力をかけ、実橋測定から始まり、FEM解析、疲労試験など多方面からの検討・開発が実施された。その結果、原因は主にディテール上の問題で生じた損傷であることが明らかになった。さらにこの損傷発生には切り欠き部の加工面の良否や、沓座の損傷、レールジョイントの存在なども影響を与えることがわかつた。

4.1.3 疲労損傷に対する予防保全型対策

当該事例の場合、同時期に供用を開始した鋼橋が多量（約9.3万トン）にあり、損傷箇所と同様なディテールが広く採用されていることから、「予防保全型」の対策が実施された。

まず実橋測定により、疲労によるダメージの実態を定量的に把握することから始めた。同時にFEM解析を実施して実橋測定の検証を行うとともに、疲労試験を実施して対策として提案された技術の検証も行った。ここで用いられた測定や診断方法は、その後の維持管理における疲労の診断手法として標準化されるとともに、新しい設計に用いるディテールとしても標準化された。

改良したディテールは、図4.3に示すように下フランジを連結部までウェブに沿って延長させるもので、「鋼橋のディテール集」に加えられることで標準化も図られた。また補修補強工法についても、「鋼構造物の補修・補強・改造の手引き」などに順次反映されていった。

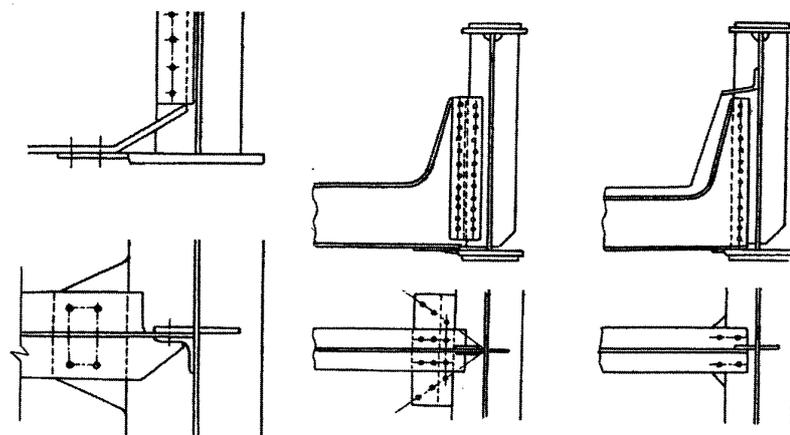


図 4.3 改良ディテール

また、疲労試験などの結果により「当て板」を高力ボルトで取り付けた補修は、き裂を残したままでもその後のき裂進展は見られないことが確認され、「当て板工法」として標準化されるとと

もに、東海道新幹線についてはき裂が発見されていない部位についても予防保全策として採用され、1977年までに心配となる当該箇所すべてに施工された。

当該事例に挙げた東海道新幹線は、短期間に多量に設計・施工されたため、従来のリベット構造から疲労に敏感な溶接構造への技術的変革をもたらすと共に、標準設計を多用することで、同じような疲労損傷が内在する結果となった。

この結果から、必然的に「予防保全型」の対策技術が進歩し、今日の鋼鉄道橋の技術を支えているものといえるだろう。

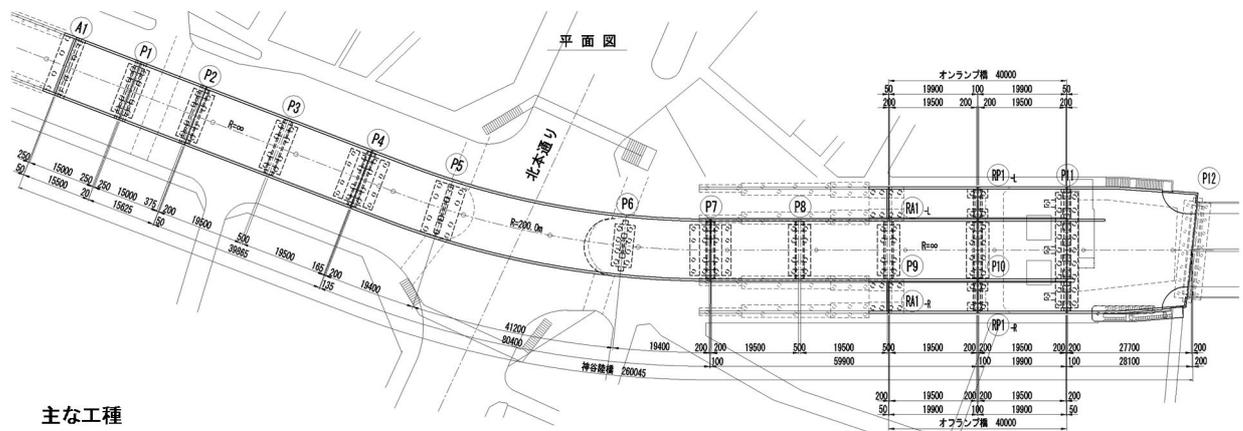
なお、同様の予防保全策は、東海道新幹線の運営主体が国鉄から JR 東海に変わった後も引き続き行われている。最近では2013年から東海道新幹線土木構造物大規模改修工事と称して、全線の下路トラス桁や下路プレートガーダーを対象とした床組接合部補強等が行われている¹⁾。

4.2 予防保全型の事例（その2）

4.2.1 概要

予防保全型の二つ目の事例として、1968年に建設した東京都建設局が管理する神谷陸橋（単純合成鈹桁橋、3径間ゲルバー式鋼箱桁橋+鋼鈹桁橋）の長寿命化を紹介する（図4.4）。

神谷陸橋は、主要地方道環状七号線（第318号）の一般国道122号（北本通り）との交差部に位置し、橋の重要度（主要幹線橋等）などから、政策方針として、今後100年寿命を延ばすこととなり、長寿命化対象橋梁と位置付けられた。具体的には、主桁および横梁の断面補強、床組の断面補強、落橋防止装置の補強・取替、ダンパーの設置、伸縮装置取替、主桁・床版の連続化、支承取替が行われた。



主な工種

- ・主桁補強 (P2~P12)
- ・主桁、床版連続化 (P3, P5, P6, P8, P9)
- ・支承取替 (P2~P12の全支承)
- ・ダンパー設置 (P4)
- ・伸縮装置取替 (P2, P4, P7, P10~P12) など

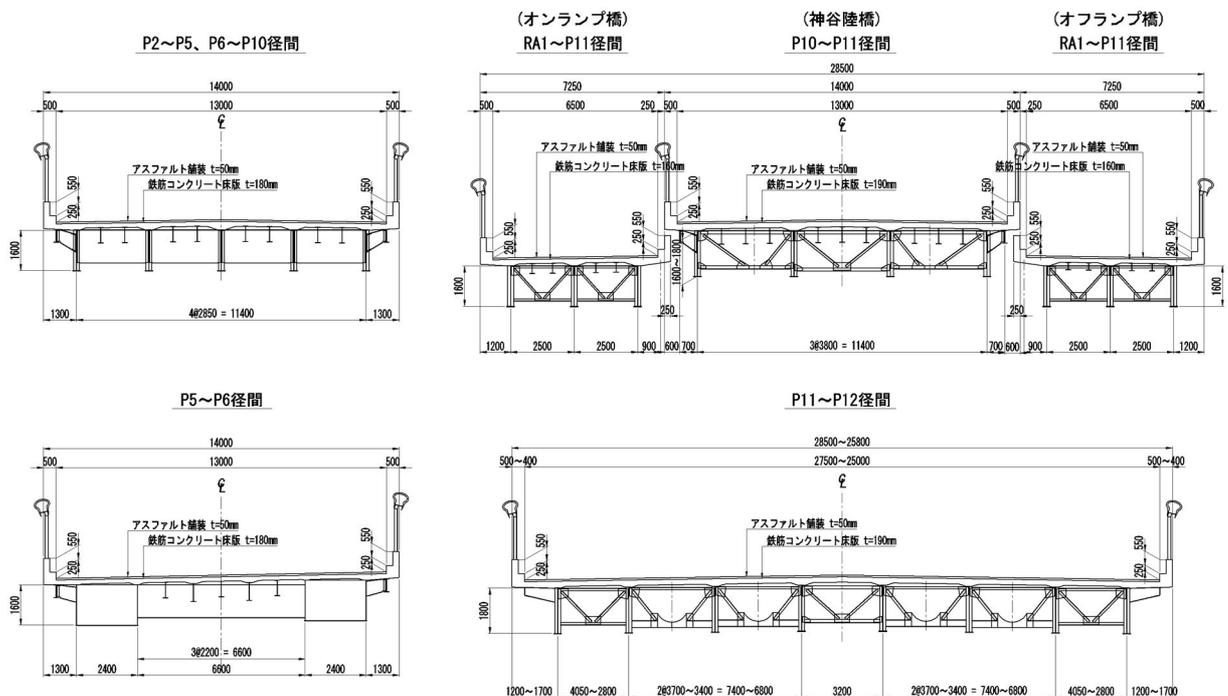


図4.4 神谷陸橋の概要

4.2.2 寿命を左右する要素と原因

本橋では、今後 100 年寿命を延ばすことを考えた時、寿命を左右する要素として、物理的要素と機能的要素があることが指摘された。具体的には、物理的要素として、桁端部や支承部の劣化損傷が、機能的要素として、単純桁やゲルバー桁から成る構造系に起因する耐震性能不足が、考えられた。これらの原因として、物理的には伸縮装置からの漏水が、機能的には交通量の増加や要求される耐震性の見直し（向上）が、それぞれ考えられた。

4.2.3 長寿命化するための予防保全型対策

この事例では、主桁および横梁の断面補強、床組の断面補強、落橋防止装置の補強・取替、ダンパーの設置、伸縮装置取替、主桁・床版の連続化、支承取替が行われたが、ここでは主桁の連続化と支承取替について紹介する。

①主桁連続化

[単純鉄桁の連続化]

連続桁は単純桁に比べて耐震性に優れること、伸縮装置を撤去することにより車両の走行性を改善し騒音振動問題を低減すること、伸縮装置からの漏水を防ぎ桁端部や支承部の劣化損傷を解消することを目的として、単純鉄桁を連続化している。

設計は『桁連続化の設計例と解説、平成 12 年 7 月、日本橋梁建設協会』に基づいてウェブのみを連結することとし、中間支点到に生じる負の曲げモーメントに対して、モーメントプレートおよびシャーププレートのみで成立する断面として設計している。

施工上の工夫として、連続化する主桁ウェブの目違いを解消するため、事前計測を行いフィラーを挿入している。また、支点上補剛材間のモーメントプレートは温度変化による桁の伸縮を考え事前計測による長さよりも数mm短い部材を製作し部材設置時に隙間を埋めるシムプレートを挿入している（図 4.5）。

[ゲルバー桁の連続化]

P4～P7 間は、直線鉄桁と P5～P6 間の曲線箱桁を P5、P6 支点部にある横梁（箱

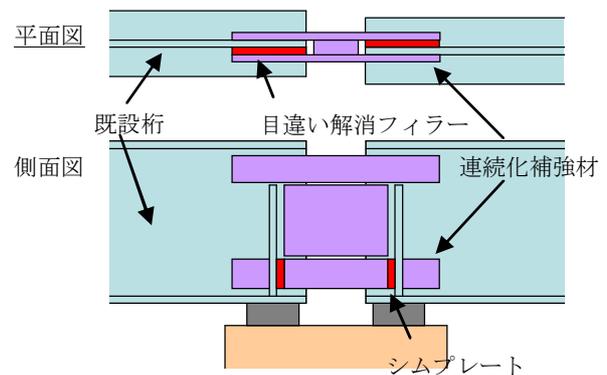


図 4.5 単純鉄桁の連続化

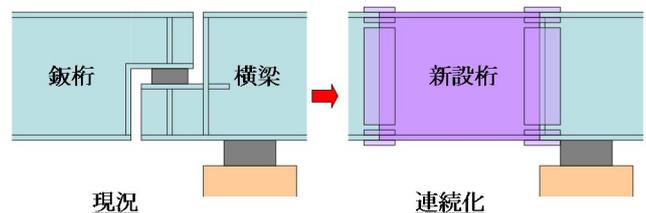
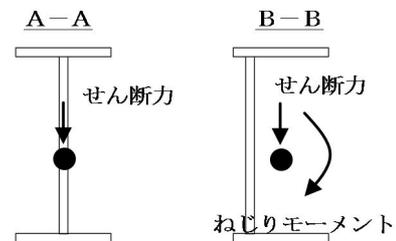
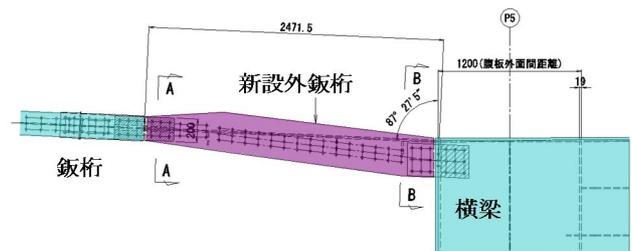


図 4.6 ゲルバー桁の連続化

断面) から突き出た「桁受台」に「鋳桁切欠き部」を支持する 3 径間のゲルバー桁橋となっている。ゲルバー構造は耐荷性、耐震性、耐久性の観点から解消することが望ましいことから、鋳桁と横梁を連結する連続化構造へ変更している。

一般的には、曲線箱桁と直線鋳桁を連続化することは困難である。本工事では、曲線箱桁の端部の横梁を補強することで剛性を高め、曲線桁から生じるねじりモーメントを横梁で吸収させることで、連続化構造を成立させた。

外鋳桁は横梁との平面位置の制約から断面形状を I 型から溝型へすりつけて連結した。当該断面はせん断中心が図心と一致しないため、ねじりモーメントが作用するという問題が生じる。よって、ねじりモーメントに抵抗できる断面として設計した (図 4.6)。

既設桁の現況を計測し、新設桁の製作に反映する必要があるが、計測にはデジタル水平機などを使用し、製作精度向上に努めた。また、新設桁および新設添接板の原寸型紙を利用して既設桁の切断・ボルト孔明などを実施することで、新設桁と既設桁の取り合い部にて不具合が生じないように配慮した。

② 支承取替

全ての支承をタイプ B 支承に取替え、長寿命化を図っている (写真 4.2)。

P5, P6 は仮設ベントにて仮受け支点を設けて支承を取替える計画であったが、ベント設置箇所の地耐力が不足しており、地盤改良を行う必要があることが分かった。地盤改良工事の実施には、車道および歩道の規制を伴うため、既設橋脚へ仮受け支点用のブラケットを設置する工法に変更した (図 4.7, 写真 4.3)。既設橋脚の箱断面内部への侵入が不可能であったため、ブラケットの設置にはワンサイドボルトを使用した (図 4.8)。



写真 4.2 支承取替 (支承モルタル施工前)

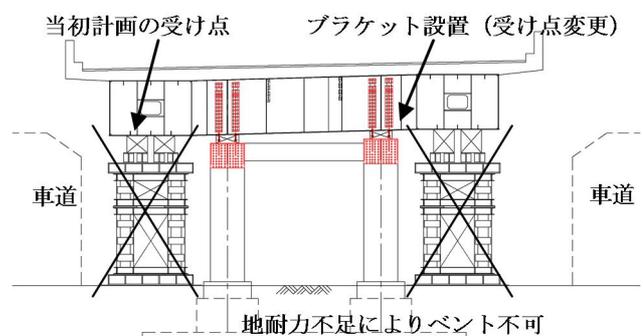
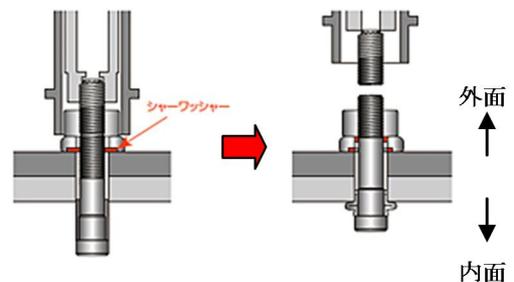


図 4.7 P5, P6 の仮受け点変更概要



写真 4.3 仮受けブラケット



(出典: (株) ロブテックス HP)
図 4.8 ワンサイドボルト

4.3 事後保全型の事例

4.3.1 概要

事後保全型の事例として、1964年に架設した東京都建設局が管理する等々力陸橋（単純合成鈹桁橋×6+3径間連続合成鈹桁橋+単純合成鈹桁橋×4）を紹介する（図4.9）。

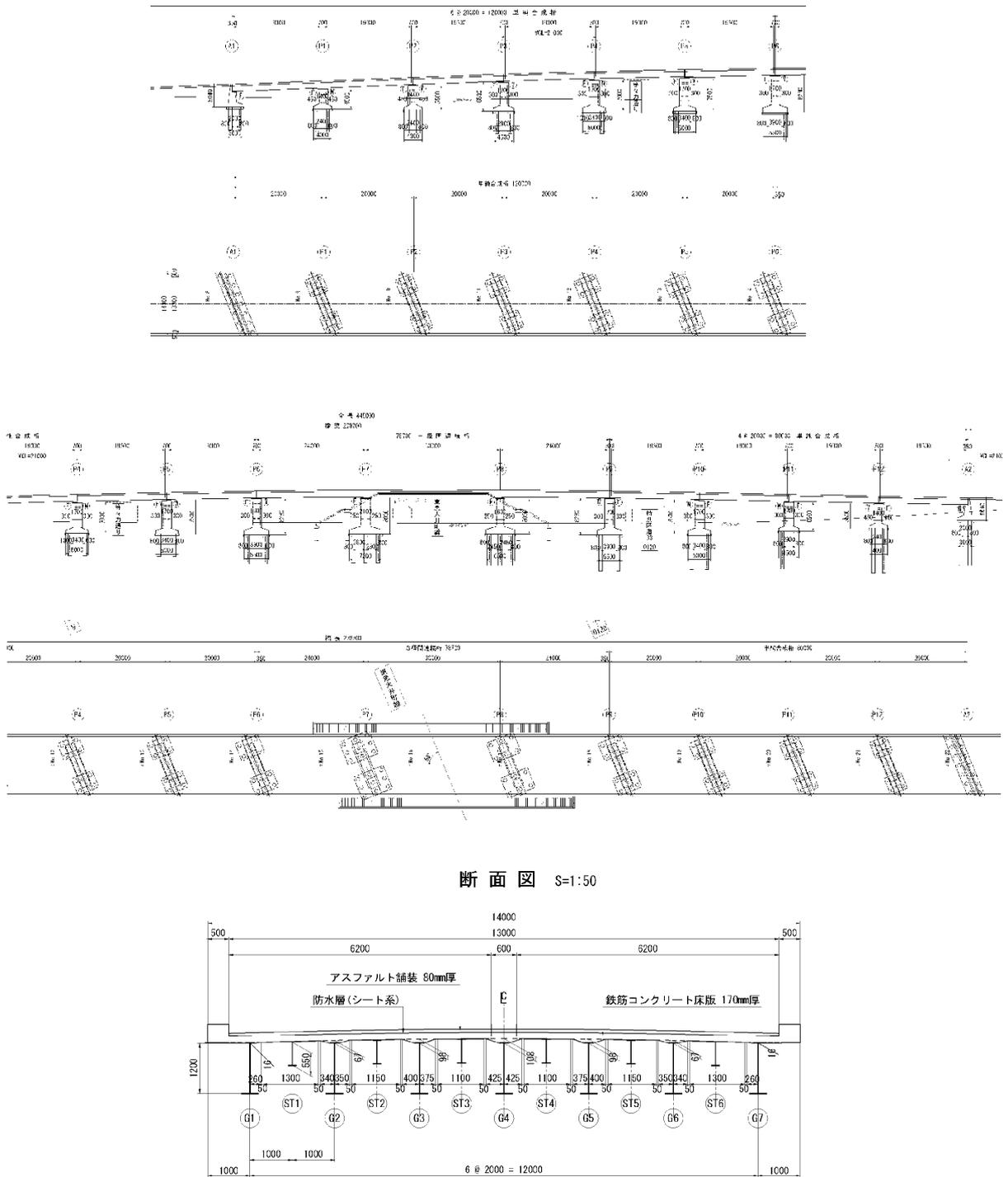


図4.9 等々力陸橋の概要

等々力陸橋は、主要地方道白金台町等々力線（第 312 号）目黒通りの東急電鉄大井町線との交差部に位置する、橋長 278m、総幅員 14m の単純活荷重合成鈹桁橋 6 連、3 径間連続合成鈹桁橋 1 連、単純活荷重合成鈹桁橋 4 連からなる鋼製の橋梁で、1964 年 3 月に架設された。適用された技術基準は昭和 31 年の鋼道路橋設計示方書である。

平成 19 年度に実施した定期点検で、地覆コンクリートのひび割れ・遊離石灰・浮き、RC 床版のひび割れ、RC ラーメン橋脚梁部のひび割れ・遊離石灰が発見された。いずれも軽微な損傷だったことから経過観察してきたが、数年後に損傷の進展が確認されたことから、事後保全として剥落防止対策を行った。

4.3.2 寿命を左右する要素と原因

本橋に生じた床版、地覆、RC 橋脚のひび割れや遊離石灰は、構造物の安全性の面では然程強い影響を及ぼすものではないが、桁下の駐車場、駐輪場、区道を利用する不特定多数の第三者への影響の面で、対策が必要な状況と判断された。

また、これらの損傷は、コンクリートの中性化による鉄筋の腐食が原因と考えられた。

4.3.3 事後保全型による補修対策

床版は過去に縦桁増設で補強されており、生じたひび割れが耐荷力上問題となる程度ではないこと、本橋の 12 時間交通量は約 27,000 台と多く、桁下で作業可能な工法が求められたことなどを踏まえ、本橋の補修対策として、第三者影響の観点から剥落防止対策が採用された。

具体的には、コンクリートの浮いた部分を除去し、鉄筋に防錆処理を施した後、ポリマーセメントモルタルにより断面修復を行い、その後、コンクリート表面にエポキシ系の浸透固化材で下地処理し、ビニロン繊維によるメッシュ材を貼り付けて表面を被覆した(図 4.10(a), 図 4.10(b))。

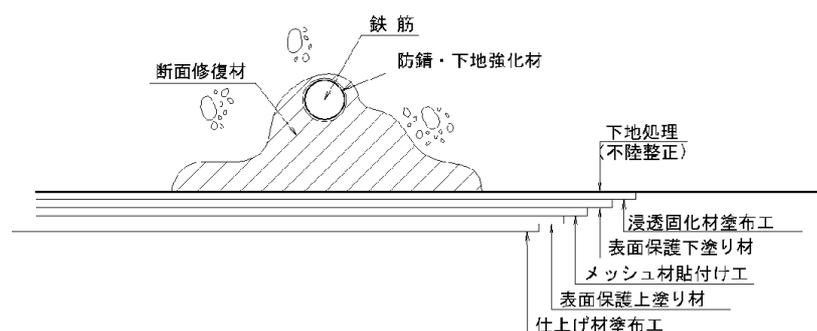


図 4.10(1) 等々力陸橋の対策

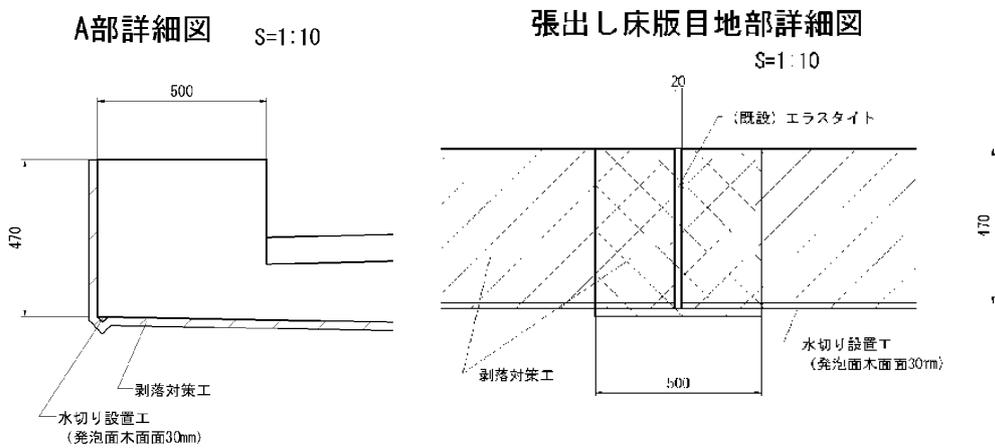
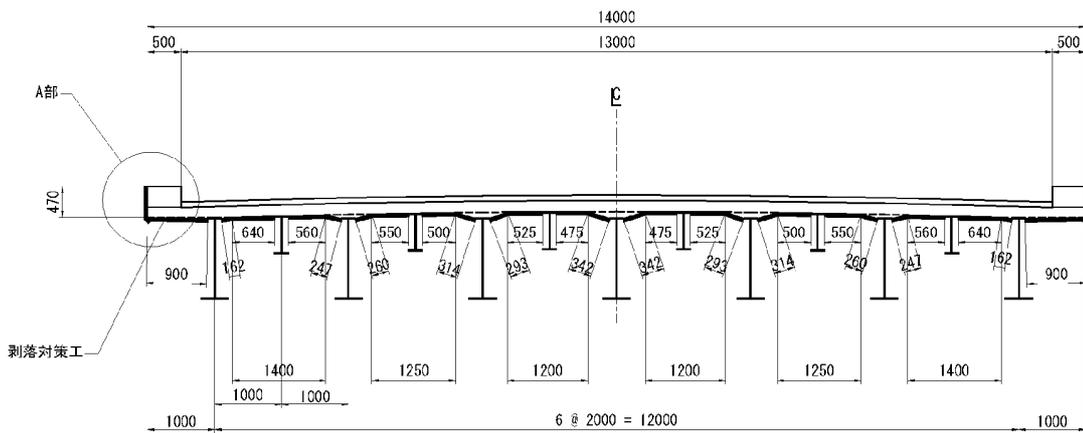


図 4.10 (2) 等々力陸橋の対策

4.4 新たな技術シーズの適用

4.4.1 基本的考え方

これまでに整理してきたように、長寿命化対策の選定は、その寿命を左右する要素の把握、その原因の特定、鋼構造物の置かれた環境や重要度などを考慮した対策技術の選定という流れが基本となる。この選定の過程で比較検討される対策技術は、ある程度の効果が確認されているという理由から、既往の実績を有する技術であることが多い。

しかし、既設構造物は長期間の供用を経る中で様々な原因を受けて変状が生じており、既往の対策技術では必ずしも効果的な解決を期待できない場合がある。

このような場合には、他の分野で用いられている技術や、例えば企業が有する技術、ノウハウ、設備、知見など、全く異なるところに目を向けることで、技術シーズが見つかるかも知れない。長寿命化のニーズは複雑化、高度化する一方で「待ったなし」の状況にあり、そういった技術シーズの活用も含めて、長寿命化を実現することが求められる。

以降には、新たな技術シーズを適用した事例として、鋼床版の疲労き裂対策として導入した S F R C 舗装の事例、当て板補修の際に腐食減肉部にエポキシ樹脂系接着剤を塗布した事例について紹介する。

4.4.2 鋼床版の疲労き裂対策として導入したSFRC舗装の事例²⁾

近年、特に大型車の交通量の多い主要幹線道路に位置する鋼床版において、横リブと縦リブの溶接部、縦リブとデッキプレートとの溶接部、縦リブ相互の溶接部などに疲労き裂が発生した事例が確認されている。中でも、閉断面リブとデッキプレートの溶接線に沿ったき裂は、デッキプレートに貫通した場合に外側からの発見が難しく、車両走行の安全性に大きな影響を及ぼす。

この主な原因は、デッキプレートの剛性が小さく、輪荷重の戴荷により板曲げが生じることと考えられ、デッキプレートの剛性確保が課題となっていた。

本項で紹介するのは、1970年頃からコンクリートの引張特性を改善するために繊維補強コンクリートの開発・実用化された技術シーズであるSFRCを、鋼床版上の舗装に活用してデッキプレートの剛性を確保した事例である。

当該橋梁は、31径間、全長987mの道路橋のうちの、3径間連続鋼床版2箱桁橋で、デッキプレート厚は12mm、Uリブは幅320mm、高さ200mm、厚さ6mm、支間長は40m+56m+50mである(図4.11)。1983年に上り線2車線が完成し、2005年に上り線に並行して下り線2車線が開通した橋梁で、上下線で分離した上部工が共通の橋脚によって支持されている。

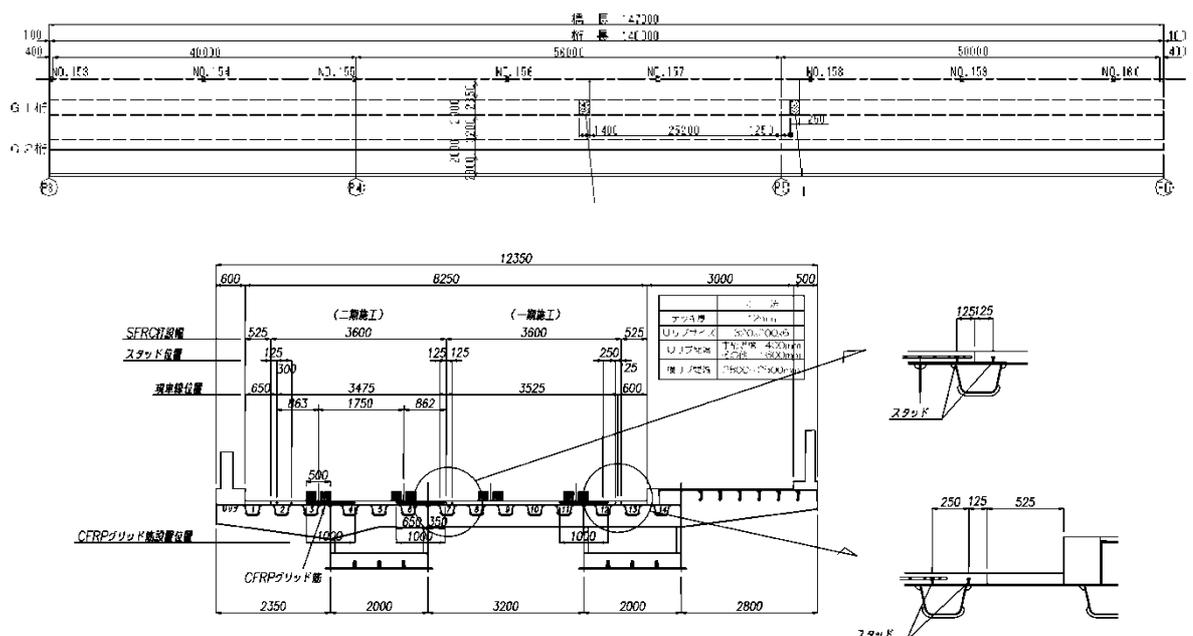


図 4.11 平面図および断面図²⁾

本橋はすでに20年以上供用しており、車輪通過直下の鋼床版溶接部には、デッキプレートと閉断面リブとの溶接部等に疲労損傷が見られた。

デッキプレートの剛性を向上させて局部変形を低減する必要があったことから、対策工法の比較検討において、当て板補強やストップホール、新規部材への交換などの従来から用いられてきた対策技術にとどまらず、SFRCの活用が検討された。SFRCを用いることで、鋼床版の局部変形を抑えて局部応力を低減させ、疲労耐久性を向上させることが期待された。

SFRC舗装は、名古屋高速道路公社で使用実績のある技術であったが、当時は縦断勾配の大きいランプ部や料金所等における舗装の損傷対策として用いられていた技術である。鋼床版の疲労対

策としては、横浜ベイブリッジ下層の一般国道357号、湘南大橋、首都高速道路(株)で採用された実績がある。

本橋では、SFRC舗装を幅員方向に二分割して施工した。径 ϕ 9mm、高さ30mmのスタッドジベルを施工幅の両端部および施工目地部に橋軸直角方向2列、300mm間隔に設置している。

接着剤は水浸輪荷重疲労試験にて付着強度の低下がなかった高耐久型のエポキシ系接着剤を塗布量 $1.4\text{kg}/\text{m}^2$ で使用している(写真4.4)。また、接着剤はデッキプレートとSFRCとの接合だけでなく、SFRC同士の施工目地部やSFRCと伸縮装置との接合などの、立ち上がり面にも使用された。

コンクリートは、早強コンクリートを用い、コンクリートの設計基準圧縮強度 $29.4\text{N}/\text{mm}^2$ 、膨張剤 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 、スチールファイバーは長さ30mmを $120\text{kg}/\text{m}^3$ としている。また、箱桁主桁ウェブ直上のSFRC舗装内には負曲げによるひび割れ後の剛性確保のため、100mmメッシュのCFRP(炭素繊維)グリッド筋を主桁ウェブ中心に幅方向1.0m、下かぶり30mmで用いている(写真4.5)。なお、CFRPグリッド筋の断面積は 39.2mm^2 、引張強度は $1400\text{N}/\text{mm}^2$ としている。



写真 4.4 接着剤とスタッドジベル²⁾

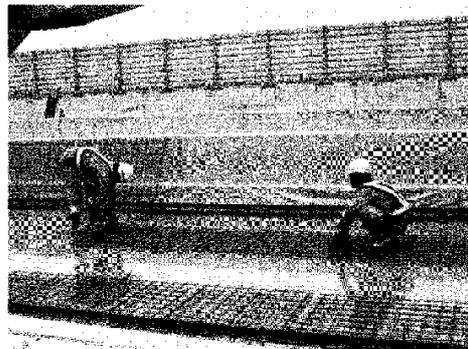


写真 4.5 CFRP グリッド筋の設置²⁾

4.4.3 当て板補修の際に腐食減肉部にエポキシ樹脂系接着剤を塗布した事例

定期点検で箱桁外面に確認された桁端ウェブのき裂(写真4.6)について、箱桁内から詳細調査を実施したところ、大規模な層状剥離した錆(写真4.7)が確認された道路橋の事例である。錆を除去し、減肉厚を調査したところ、最大5mm程度の減肉が確認され、一部は疲労き裂と重なり、貫通している部分もあった。この原因は、桁端部で急激に断面変化する支承ソールプレート近傍で応力集中が生じたこと(き裂)、箱桁内側の水抜き用スカーラップが塵埃で詰まるなどして滞水したこと(減肉)、腐食減肉による応力集中でき裂が助長されたことと考えられた。



写真 4.6 外面からのき裂状況



写真 4.7 内面における錆の層状剥離

本項では、当該損傷に対し、疲労き裂と腐食減肉が生じた部位への当て板補強について、エポキシ樹脂系接着剤を塗布した事例を紹介する。

支承ソールプレート近傍の主桁ウェブに発生した疲労き裂の対処には、一般的に当て板補強が適用され、施工実績も多い。(写真4.8)

一般的な当て板補強の設計思想は、当て板を高力ボルト(支圧接合もしくは摩擦接合)にて連結し、き裂発生部位における作用応力度を低減させることを目的としている。

一方、当該当て板補強の前提は、母材(ここでは主桁ウェブ)がき裂部以外健全であることである。これは当て板補強を高力ボルトで連結する際、ボルトの支圧に抵抗できるか、もしくは摩擦接合面を確保できるかが、設計上必要となるためである。

本橋では、主桁ウェブ($t=9\text{mm}$)に5mm程度の腐食減肉が確認されているため、母材に支圧耐力が期待できず、摩擦接合面も確保できないことから、き裂補強として、高力ボルトによる当て板補強の採用が困難と考えられた。当て板補強が困難となる場合、当該き裂損傷部の一部撤去・復旧という「部分取替え」工法の採用が検討されたが、本橋は主要幹線道路上に位置し、非常に重要度が高いため、施工期間中の安全確保、社会的影響に配慮し、仮受け期間が短く、既設構造物への影響を最小にできる「当て板補強」の採用を再度検討することとなった。

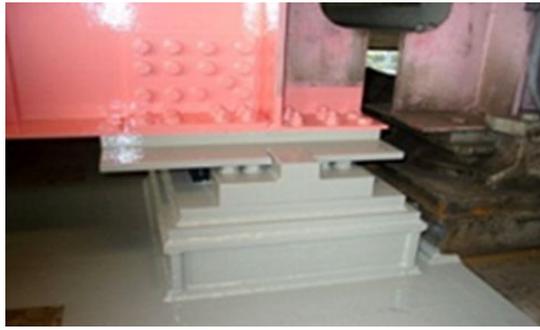
腐食減肉部への当て板補強に関しては、腐食部材への当て板補強を目的とした研究が実施されており、村越らの研究³⁾⁴⁾によれば、腐食減肉が生じた部位にエポキシ樹脂系接着剤を塗布し、通常の高力ボルト接合(摩擦接合)を行うことで、母材が健全な場合の当て板補強と同等の性能が得られることが報告されている。この研究によれば、5mm程度までは摩擦接合継手と同等のすべり耐力が得られるとされていたため、本橋においても、「エポキシ樹脂系接着剤と高力ボルト(摩擦接合)による併用継手」を採用する方針で検討が進められた。

橋梁補修に対するエポキシ樹脂系接着剤の適用は、以前より使用事例があり、特にコンクリートの補修で実績が多くみられる。鋼構造の事例は少ないが、接着剤のみや、高力ボルトと併用した継手の事例がある。しかしながらこれらは薄層の接着剤塗布の実績であり、接着剤自体の層間剥離や、接着剤のクリープによる高力ボルト軸力の低減が懸念される腐食面への接着剤塗布の適用については、別途に検討する必要がある。

そこで、本工法を採用するにあたり、次の点に留意し、すべり試験(図4.12)を実施し、当該継手の保有性能を確認したうえで、設計上の許容値が設定された。

- ① 使用する接着剤の種類
- ② 接着剤の塗布時期(夏季か冬季か)
- ③ 塗布から当て板設置までのインターバル
- ④ ボルト締め付けタイミング
- ⑤ 許容値の設定方法(実験結果のばらつき、安全率等)
- ⑥ 補強効果の検証(補強前:FEM, 図4.13参照)
- ⑦ 補強効果の検証(補強後:応力頻度計測, 図4.14参照)

また、実施工に先立ち、施工時期に配慮した施工手順を実験・設計段階で決定し、施工計画書を立案して、実施工している。さらに、施工後にも、技術シーズによる補強効果を確認するための試験を行うなどして、技術シーズに期待した性能が発現されているかを確認している。



(首都高 HP より抜粋)

写真 4.8 当て板補強の施工事例

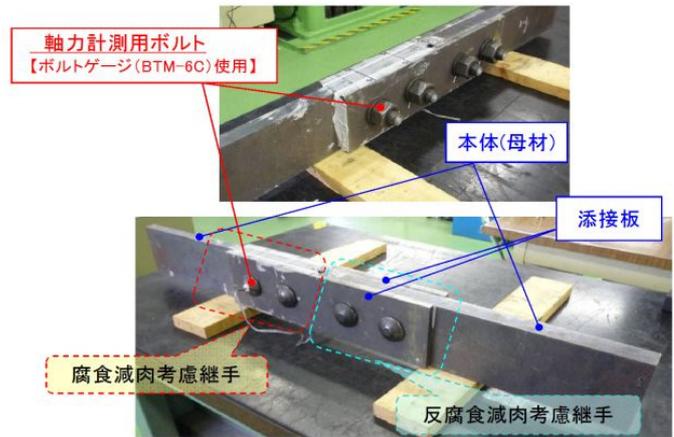


図 4.12 すべり試験体

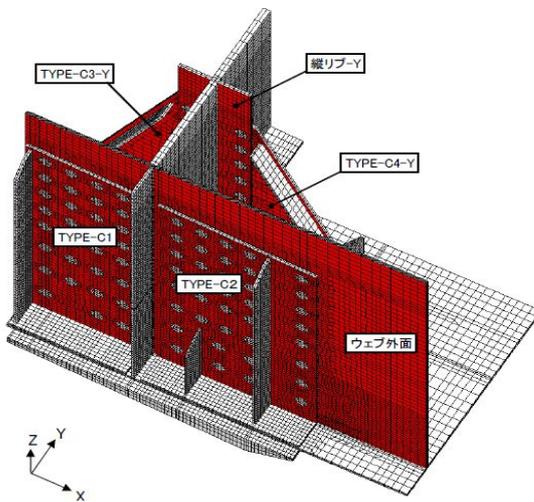


図 4.13 FEM 解析モデル

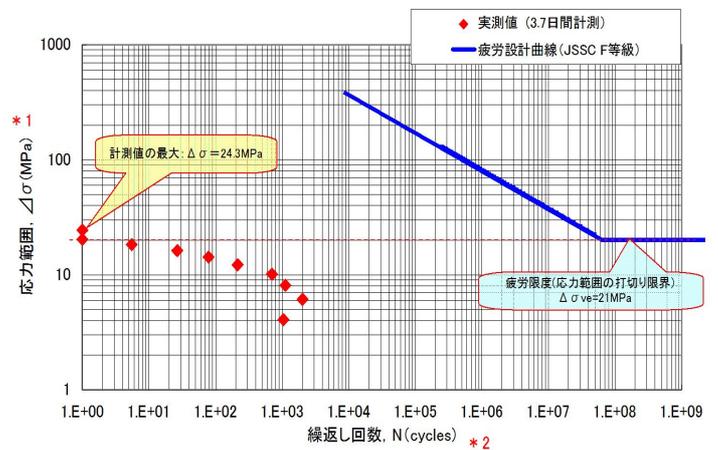


図 4.14 応力頻度計測結果

【参考文献】

- 1) 鍛冶秀樹・高橋和也・伊藤裕一：東海道新幹線土木構造物維持・強化-鋼橋の維持・強化，橋梁と基礎，11月号，2012
- 2) 児玉孝喜・緑川和由・玉越隆史・村越潤・山本洋司・一瀬八洋・大田孝二：大平高架橋の鋼床版における S F R C 舗装によるひずみ低減効果，土木学会，第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集，2008
- 3) 独立行政法人土木研究所構造物研究グループ橋梁チーム：接合面にエポキシ樹脂を塗布したボルト継手に関する検討（土木研究所資料第 4091 号），2008
- 4) 村越潤・田中良樹・船木孝仁：接合面にエポキシ樹脂を塗布したボルト継手の力学的挙動に関する実験的研究，土木学会，構造工学論文集 Vol. 54A，2008
- 5) 阿部英彦・中野昭郎・市川篤司・稲葉紀昭：語り継ぐ鉄橋の技術，鹿島出版会，2008
- 6) 橋梁の長寿命化-神谷陸橋長寿命化工事-，土木施工，2013
- 7) 東京都：等々力陸橋維持工事 竣工図書
- 8) 東京都：みのわ陸橋緊急補修工事 竣工図書

- 9) 首都高速道路(株) : ホームページ,
<http://www.shutoko.co.jp/company/enterprise/road/plan/251225/repair/>
- 10) 本州四国連絡高速道路(株) : ホームページ,
http://www.jb-honshi.co.jp/corp_index/company/chojyummyou/
- 11) 阪神高速道路(株) : ホームページ,
<http://www.hanshin-exp.co.jp/company/torikumi/anzen/ijikanri/>
- 12) 首都高速道路(株) : ホームページ,
<http://www.shutoko.co.jp/efforts/safety/infrastructure/>
- 13) 中日本高速道路(株) : ホームページ,
<https://www.c-nexco.co.jp/koushin/infrastructure/>
- 14) 東日本高速道路(株) : ホームページ,
<http://www.e-nexco.co.jp/effort/aging/infrastructure/>
- 15) 西日本高速道路(株) : ホームページ,
<http://www.w-nexco.co.jp/koushin/infrastructure.html>

