

土木学会平成 21 年度全国大会
研究討論会 研－21 資料

複合構造化による土木構造物の延命化

座 長	横田 弘	北海道大学大学院
話題提供者	松村 政秀	大阪市立大学大学院
	中村 一史	首都大学東京
	小林 朗	日鉄コンポジット(株)
	久利 良夫	(財)阪神高速道路管理技術センター

日 時	平成 21 年 9 月 3 日 (木) 13 : 00～15 : 00
場 所	福岡大学 七隈キャンパス VI-1 会場 1011

複合構造委員会

－ 目 次 －

複合構造化による土木構造物の延命化	1
横田 弘 北海道大学大学院	
鋼とコンクリートの合成・複合化による構造物の延命化技術	2
松村 政秀 大阪市立大学大学院	
FRP による鋼構造物の延命化技術	5
中村 一史 首都大学東京	
FRP によるコンクリート構造物の延命化技術	8
小林 朗 日鉄コンポジット(株)	
複合構造対策後の維持管理－鋼板接着補強 RC 床版を事例として－	11
久利 良夫 (財)阪神高速道路管理技術センター	

複合構造化による土木構造物の延命化

北海道大学（複合構造委員会委員長） フェロー 横田 弘

1. はじめに

性能設計が一般的になりつつある土木構造物においては、当初の設計のみならず、供用中においても性能をキーワードにした維持管理を実施していく必要がある。特に、今世紀は維持管理の時代と言われるように、土木構造物の維持管理の重要性が非常に高まっており、既存構造物の有効活用と延命化を図る技術の開発や施策の導入が積極的に進められている。

鋼やコンクリートなどの材料により建造され供用されている土木構造物では、母材とは異なる材料を用いて行う補修や補強が行われることも多い。そもそも複数の材料を合成あるいは混合した複合構造物は、元来材料の長所を伸ばし、欠点を補う合理的な構造形態であるため、補修・補強の目的で複合構造化を図ることは、きわめて理にかなっていると言える。また、FRP等の新しい材料を活用して、構造物に新たな性能を付与することも構造物の有効活用や延命化には有効となる。本研究討論会では、複合構造化による土木構造物の延命化に関する最新の情報と課題、および今後の新たな展開を議論していきたい。

2. 複合化による構造物の有効活用

一般の土木構造物では、材料の経年劣化による性能低下が生じることは避けがたい。そのため、定期的な点検診断を通して劣化の兆候をできる限り早く発見し対応を検討する、いわゆる予防保全の考え方に基づく対応が必要になっている。一方、経年劣化による性能低下に加えて、構造物に作用する荷重が厳しくなることで性能が不足する事例も多い。例えば、地球温暖化で懸念されている海面上昇や台風の強大化等がこれに該当する。いずれにせよ、性能が要求レベルに対して不足する場合には、補修・補強等の対策を実施することが構造物の有効活用、ひいては延命化に不可欠である。

補修・補強に際しての複合構造化の利点として、①耐力・合成の増大等断面性能の向上、②耐久性の向上、③施工の容易性などが期待できる。これらの利点を十分に発揮できるような材料の選定や複合の形態が必要となる。特に、性質の異なる材料が一体として挙動できるように配慮されれば、①の利点は確実なものとなる。②については、耐食性の高い材料を用いることで構造物全体の耐久性が向上するとともに、将来の維持管理の省力化も図れることになる。鋼をコンクリートで覆う、あるいは、コンクリートをFRPで覆う、といった方法がこれに該当する。ただ、部分的に被覆をして補修を行った場合、マクロセル電流により腐食が増大するような事例もあり、耐久性の向上を積極的に考える場合には、適切な設計上の配慮が求められる。また、③については、制約のある施工条件下などでは、重要となってくる。

3. おわりに

構造体を複合構造化し、延命化を図る技術については、性能の確保および向上の点で非常に有用である。今後種々の材料を用いた複合化や新たな複合技術などの技術開発が大いに期待される場所である。加えて、近年新しく開発された複合技術の評価や設計・施工法の一般化、新たな維持管理技術の開発なども重要な課題としてあげられる。土木学会複合構造委員会においてもその責務を果たしていきたいと考えており、各位のご支援とご協力をお願いしたい。

Key Words : 複合構造化, 延命化, 補修, 補強, 維持管理

連絡先 : 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 Tel / Fax 011-706-6204

鋼とコンクリートの合成・複合化による構造物の延命化技術

大阪市立大学大学院 正会員 松村 政秀

1. はじめに

これまでに数多く建設されてきた道路・鉄道・港湾などの構造物は、社会基盤構造物として非常に重要な役割を果たしている。しかしながら、鋼あるいはコンクリートからなるこれらの構造物は、材料の経年劣化、繰返し荷重の作用による性能低下など建設当初からの機能劣化は避けられず、また、すべての劣化要因を排除することもできないので、適切な補修・補強等を施し構造物の延命化を図ることが必要となる。このためには、可能な限り劣化要因を排除することが構造物の寿命を延ばす上で重要であり、常時からの適切な維持管理も必須である。また、鋼やコンクリートから構成される各種構造物の機能を保持する上でも、補修・補強により既設構造物の機能回復あるいは機能向上を図る上でも、性質の異なる異種材料が一体となり挙動することが重要である。ここでは、異種材料間の接合方式（機械接合ならびに接着接合）を概説するとともに、鋼とコンクリートによる構造物の延命化技術について紹介する。

2. 構造物の劣化

材料としての鋼やコンクリートは、表-1 に示すような要因により経年劣化する。定期点検あるいはモニタリングにより劣化や損傷が発見されると、その原因を究明し、劣化や損傷が構造物の耐荷力や耐用年数に与える影響を検討・推定して、その対策を立案・選定する。補修・補強の要否や再構築等の判定は、発見した損傷や劣化が耐荷力に与える影響、および供用期間中におけるライフサイクルコストとの関係も考慮する必要がある。損傷が軽微なうちに補修・補強等を行なう方が、経済的に構造物の延命化が期待できる。

3. 鋼とコンクリートの合成・複合構造

合成・複合構造は、複数の材料を用いて部材または構造物を構成し一体化させることで、お互いの材料の欠点を補い、それぞれの長所を有効活用することで、単一の材料または部材では得ることのできない優れた特性を有することを期待した構造¹⁾ (図-1) であり、図-2 に示すような部材が挙げられる。

合成・複合（構造）化の利点として、①材料の短所の補完と合成作用による断面性能の向上、②施工の省力化、③施工性の向上、④構造の軽量化や重量のバランス化、⑤防食、振動・騒音の低減などの高品質化、⑥複合化による補修・補強をはじめ、使用性能、安全性、耐久性、経済性、耐火性などが挙げられる（表-2）。ただし、鋼とコンクリートが一体となり挙動することが前提である。これらの利点に期待して、構造物の種類や設置場所の条件に応じて、合成・複合構造を新規建設から積極的に採用した合理的な構造物、既設

表-1 鋼およびコンクリートの劣化

鋼	コンクリート
・腐食、減肉、塗膜の劣化 ・疲労による損傷・劣化 ・座屈・変形 ・遅れ破壊（高張力鋼） ・その他（施工不良など）	・塩害による劣化 ・中性化による劣化 ・アルカリ骨材反応による劣化 ・疲労による劣化 ・その他（施工不良など）

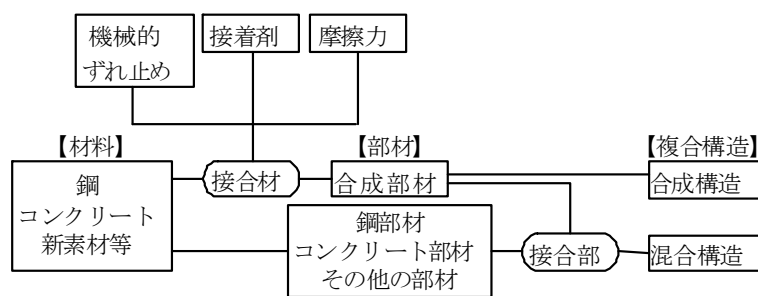


図-1 複合構造の構成¹⁾

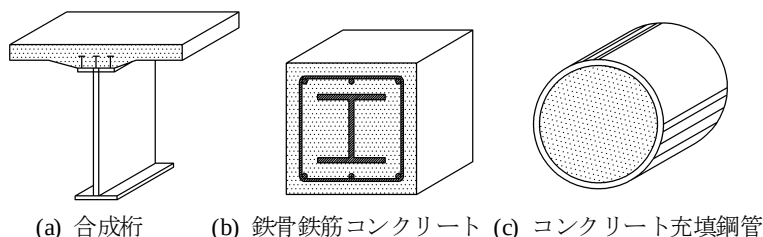


図-2 鋼・コンクリートの合成・複合部材の例

Key Words : 合成構造, 複合構造, 機械接合, 接着接合, 延命化技術

連絡先 : 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138 大阪市立大学大学院 TEL 06-6605-2735

表-2 複合化により期待できる効果²⁾

分 類	備 考
長所の組合せによる補完	強度，剛性，じん性，耐久性，耐火性
合成作用	断面二次モーメント
鋼部材の架設への適用	支保工，架設工
鋼部材の架設と躯体への適用	支保工と躯体要素
急速施工	工期の短縮
重量の低減，重量のつり合い	コンクリートと鋼との置き換え
高品質化	じん性，拘束効果
補修，補強	劣化の回復，耐震補強

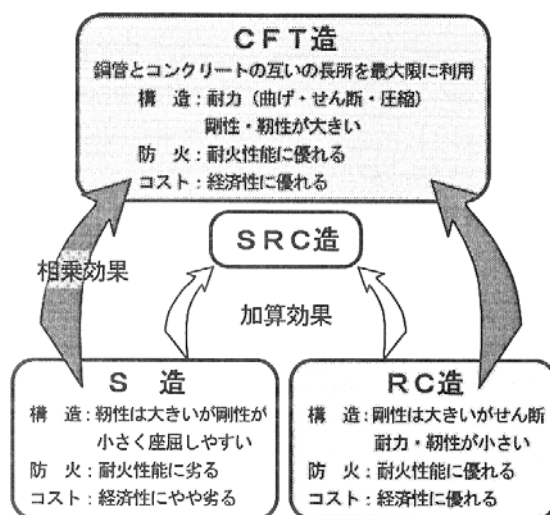


図-3 CFT造の相乗効果とその前提条件³⁾

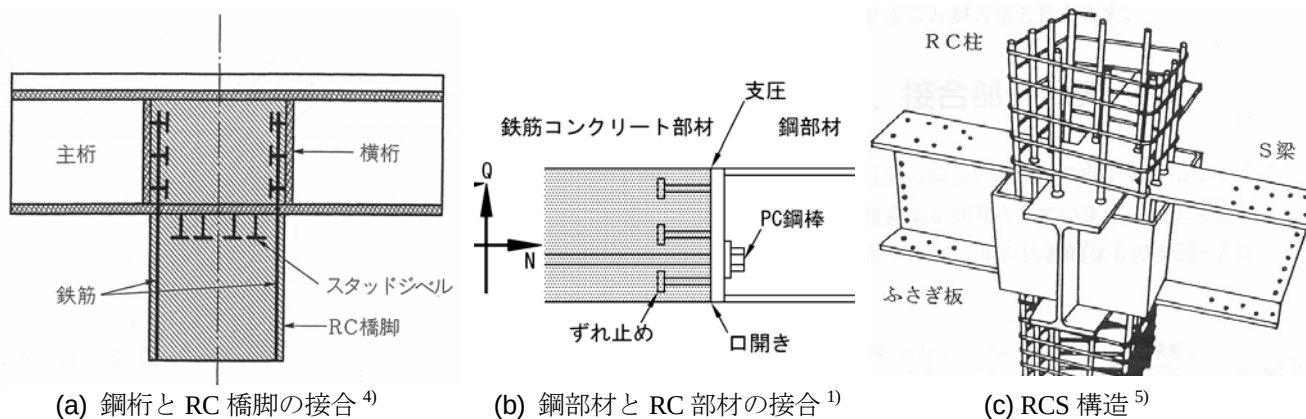


図-4 複合構造による新しい部材

構造物の機能向上を図るために合成・複合化した各種社会基盤構造物が建設されている。

道路橋では、コスト縮減の観点から、合成桁、合成床版が見直されるとともに、波形鋼板ウェブ橋、複合PCトラス橋、上下部一体構造など、比較的新しい形式の鋼・コンクリート複合構造の建設が増加している（図-4(a), (b)）。建築分野においても、経済的かつ耐震性能に優れるコンクリート複合構造（CFT）が急速に普及している。鉄骨とRCの長所を生かした複合構造（例えばRCS）も盛んに研究され実用化されている。鋼管内にコンクリートを充填したCFTは、鋼管とコンクリートの相乗拘束効果（コンファインド効果）により軸圧縮耐力、曲げ耐力、および変形性能の向上に有用である（図-3）。流動性に優れたコンクリートの開発と充填技術や充填確認技術の進歩、および性能の検証実験・解析技術の進歩など、設計・施工・経済性の有利さがその要因である。建築構造物などで柱をRC構造に、梁をS造にした柱RC梁S混合構造（RCS，図-4(c)）は接合部の局部破壊が抑制され、力の伝達もスムーズである。

既存の鋼構造物あるいはコンクリート構造物に対しても、同様な効果を期待して、鋼を用いたコンクリート構造物、コンクリートを用いた鋼構造物の補修・補強が、兵庫県南部地震以降、積極的に実施されている。特に、道路・鉄道橋では、通行車両による変動荷重を直接受ける部材（主桁、床版やそれを支持する鋼製橋脚など）の疲労・損傷を対象とする補強事例が数多く見られ、コンクリートを内部に充填する、あるいは鋼板等により巻き立てることによって合成・複合化を図り、機能回復あるいは機能向上を図っている（例えば⁶⁾）。

一般に、これら合成・複合構造物（建設当初から、補修・補強により合成・複合化した構造物を含む）は既に一般的な構造形式として定着している感があるが、土木・建築構造物とも1990年代後半から本格的な導入が始まりまだあまり年数を経していない。一方で、諸事情（社会的責任、社会的不安、瑕疵責任、損害賠償など）から損傷事例が公表されないことも多い。このため、土木学会 複合構造委員会 維持管理小委員会（委員長：杉浦邦征 京都大学大学院教授）では、道路・鉄道・港湾の各構造物の管理者を対象として、複合構造物の維持管理にかかる点検・調査状況についてアンケート調査（計48構造物）も実施してい



図-5 鋼とコンクリートの接合部の損傷事例⁷⁾

表-3 各種接合法の特徴⁸⁾

項 目	機械接合 (リベット・ボルト)	接 着	溶 接
予備機械加工	×	◎	◎
薄板接合	○	◎	×
異種材料接合	◎	◎	×
表面処理	◎	×	○
耐熱性	◎	△	◎
応力分布	○	○	○
大面積接合	◎	◎	×
加工ひずみ	○	◎	×
微小部接合	×	○	△
省エネルギー	○	◎	×
熟練度の必要性	○	○	×
疲労強度	○	◎	×
修理の難易	◎	△	○

る。その結果、鋼とコンクリートの接合部では施工後の目視確認だけでなく、防錆対策や劣化診断も困難であり、維持管理上の弱点となりやすい、また、現場にて管理状況を的確に判断できる複合構造物に見識の深い技術者も不足しているという現状が確認できる。図-5 に示すトラス橋斜材のコンクリート床版への埋込み部の鋼材の腐食とそれを主因とする斜材の破断(2007.6) もこれに類似した事例として挙げられる。

4. 異種材料の接合

複合構造物においては、異種材料間の接合面での応力伝達の程度が合成・複合部材の性能に著しい影響を及ぼすことから、ダイアフラムや巻立てによる閉じ込めの他、機械接合あるいは接着接合などにより一体化を図る。このとき、表-3 に示すように、各種接合方法はそれぞれ特徴を有しており、各箇所に見合った適切な接合方法が採用される必要がある。また、接合箇所が維持管理上の弱点とならない配慮も必要である。

機械接合は、鋼材同士の場合にはボルトやリベット、鋼とコンクリートの場合には形鋼、頭付きスタッドや孔明き鋼板などのずれ止め(シアコネクタ)による。一方、主として鋼やコンクリート部材に連続繊維材料・FRP を接着する接着工法の場合には、補強のみならず補修も可能、大型重機が不要などの利点が挙げられる。接着樹脂の劣化や補強効果の長期発現性、終局状態が脆性的(剥離・破断)である、という欠点を有するものの、コンクリート構造物への施工実績は豊富であり、補強後の検査・評価技術についても今後の進展が望まれている。

5. まとめ

社会基盤構造物への維持管理費を含む公共投資が大幅に削減される中で、社会基盤構造物の経済的な維持管理技術の展開が強く求められる。鋼やコンクリートなどの材料の性能低下が構造物の機能低下に直結することから、構造物の安全性および健全性を保つ上で、適切な維持管理(点検による損傷・劣化の適切な診断を含む)とそれに基づく補修・補強、すなわち、機能回復あるいは機能向上を図り構造物を延命化させることが重要である。構造物の合成・複合化は、構造物の耐荷力および耐久性などの機能向上に有用である。一方、一部を除き、合成・複合構造物の歴史は浅く、短期、長期にわたる補強効果の発現やその評価、接合部の維持管理性、技術者の育成など、維持管理技術に課題を残している。

参考文献

- 1) 土木学会 鋼・コンクリート合成構造連合小委員会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計(1)基礎編：理論編，構造工学シリーズ 9-A，土木学会，1999.
- 2) 池田尚治：土木分野における複合構造，プレストレスコンクリート，Vol.37，No.2，1995.
- 3) 「コンクリート充填鋼管(CFT)造 技術基準・同解説」，(社)新都市ハウジング協会ほか，2002.9.
- 4) 笹井幸男，桑山豊六，佐藤正勝：上信越自動車道北千曲橋の施工，橋梁と基礎，pp.11-17，2006.9.
- 5) 坂口 昇：柱 RC 梁 S 混合構造の現状，建築コスト研究，Vol.34，2001.
- 6) 斉藤雅充，杉本一郎，小林裕介，市川篤司：既設鋼鉄道橋の合成構造化によるリニューアル工法の提案，鉄道総研報告，Vol.22，No.10，2008.10.
- 7) 山田健太郎：次世代に伝える鋼橋—今なにが必要か—，ベース設計資料，No.140，土木編，建設工業調査会，pp.26-30，2009.
- 8) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物への接着接合の適用，JSSC テクニカルレポート，No.26，1993.11.

FRP による鋼構造物の延命化技術

首都大学東京 正会員 中村一史

1. はじめに

金属系の材料に FRP を接着して補修、補強する技術は、主に航空機分野で開発され、発展してきた¹⁾が、軽量の FRP は現場でのハンドリングに優れるため、鋼橋など、鋼構造物の延命化技術の一つとして期待されている。近年、国内外で研究開発が進められ、実構造物へ試験的に適用され始めている。このような動向を受け、土木学会 複合構造委員会「FRP による鋼および複合構造の補修・補強小委員会（委員長：明星大学 鈴木博之 教授）」では、2006 年 10 月から活動を開始し、それらの情報収集を行って、設計、施工に関する技術資料の取りまとめを行っている。本報では、FRP 接着による鋼構造物の補修・補強設計の基本的な考え方、鋼橋への適用事例、および、海外における設計ガイドラインの整備の状況を紹介する。

2. 補修・補強設計の基本的な考え方

(1) 適用材料

FRP は、強化繊維（種類、方向）と樹脂の組み合わせにより様々な機械的性質を持つが、鋼部材の補修・補強材には、主に、炭素繊維（CF）をシート状に束ねた炭素繊維シート（以下、CF シート）や、炭素繊維を引き抜き成形により帯板状に加工した炭素繊維強化プラスチック板（以下、CFRP 板）が使用される。CF シートは、エポキシ樹脂接着剤を含浸させ、必要な数量を積層して施工される。硬化後は CFRP 板と同等の性質となる。また、CFRP 板の標準的な寸法は、厚さ 1~2mm、幅 50mm、長さ 50m であり、1 枚で CF シートの数枚分に相当するため施工の合理化を図ることができる。一般に、CFRP 板はパテ状のエポキシ樹脂接着剤などを用いて接合される。硬化後の CF シートおよび CFRP 板の弾性係数、引張強度は、繊維の種類により異なるが、鋼と同等以上である。また、重量は鋼の約 1/5 と軽量であり、切断、加工も容易であることから、現場でのハンドリングに優れている。

接着剤は、エポキシ樹脂系のものが多く用いられている。硬化後の弾性係数、強度は、補修・補強材に比べて 2 オーダーほど低くなる。接着層は、0.4~2mm 程度の厚さであり、接着端部などの定着部において、作用力を面的に受けて伝達している。したがって、せん断応力が支配的となり、補修・補強設計では接着層のはく離に十分留意する必要がある。

(2) 設計、施工

これまでの適用実績を踏まえ、作用力により分類した適用部材と事例を表-1 に示す。①~③の国内事例については、第 3 章で紹介する。また、④については、幾つかのディテールに対して検討されているが、適用事例はほとんどなく、標識柱基部の疲労き裂を対象に、CF シート接着による応急的な補修が、一時的な試験施工²⁾として、行われているのみである。

表-1 作用力により分類した適用部材と事例

作用力による分類	事例（国内）
①曲げモーメントを受ける部材	桜の目橋 ⁴⁾ 、山倉橋 ⁵⁾
②軸力を受ける部材	浅利橋 ⁶⁾ 、本城橋 ⁷⁾
③耐震補強	円柱鋼製橋脚 ⁸⁾
④繰返し荷重を受ける部材（疲労）	標識柱基部の疲労き裂 ²⁾

補修、補強設計では、FRP が接着された鋼部材の断面を、完全に一体化された合成断面と考え、作用力に応じて曲げ剛性あるいは引張剛性を算出して、着目部位の応力や変位が、適切に低減されているかどうかを照査する。死荷重の作用下で、FRP が接着される場合には、FRP は活荷重などの後荷重に対して抵抗するため、死荷重による応力は緩和されない。これに対して、プレストレスを導入した FRP を接着する場合や、死荷重をベントなどで一時的に仮受けする場合には、死荷重時の応力も緩和できるが、後者は大掛かりな工事となり、FRP のメリットを十分に発揮できない。欧米では、プレストレスの導入について積極的に取り組んでおり、今後、この方面の研究開発が期待される。なお、表-1 の中で、②の軸力を受ける部材については、腐食などによる部分的な欠損部の補修を対象としたものである。また、③の耐震補強については、「炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン（案）³⁾」が既に取りまとめられている。

一方、はく離に対しては、設計で配慮しておく必要がある。一般に、十分な定着長を確保することで対処されるが、例えば、曲げモーメントを受ける部材の場合、作用応力が小さくなる桁端部付近で定着すればよい。また、積層時に端部をずらして段差を付けたり、端部にテーパを付けたりすることも有効な方法である。

Key Words : 鋼構造物、鋼橋、補修・補強、FRP 接着、設計ガイドライン

連絡先：〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL 042-677-2783

さらに、施工においては、接着接合を確実にするために、下地処理が極めて重要である。第一種ケレン（ブラスト処理）が最も望ましいが、実施工では、ディスクサンダーなどを用いて丹念に下地処理を行う場合が多い。また、常温硬化型エポキシ樹脂の場合、24時間程度で十分な接着強度が得られるが、温度が低い場合には養生時間が長くなり、5℃以下では加温養生する必要がある。さらに、必要に応じて、クランプなどで固定される。

3. 国内における鋼橋への適用事例

(1) 桜の目橋⁴⁾（所在地：宮城県、施工年月：2002年4月）

桜の目橋は5径間ゲルバートラス橋であり、B活荷重への対応のために、横桁がCFRP板接着により補強された（図-1）。CFRP板（弾性係数155GPa、引張強度2.4GPa）は、予め工場において、厚さ12mm（10層）、幅200mm、長さ2,100mmに積層加工された（重量約10kg）。現場では、横桁の下フランジ下面をディスクサンダーで下地処理した後、専用治具で接着剤を均一に塗布し、加工済みのCFRP板を貼付している。約24～48時間の養生後、クランプを取り外し、塗装して仕上げている。横桁補修箇所数は41箇所あり、取り付け作業は約1週間で完了している。鋼板をボルトで取り付ける工法の場合、施工に必要な日数は45日であり、大幅な工期短縮を実現している。



図-1 横桁下フランジへの適用例（桜の目橋）

(2) 山倉橋⁵⁾（所在地：千葉県、施工年月：2006年3月）

山倉橋は鋼単純合成I桁橋（3連）であり、車道幅員の拡幅に伴う主桁の耐荷力向上のために、プレストレスを導入したCFRP板接着による主桁（桁高1,700mm）の補強が行われた（図-2）。この工法は、既設コンクリート構造物の補強用に開発され、鋼橋へ応用されたものである。長さの異なる2組のCFRP板（厚さ2mm、幅50mm、長さ15.60～23.15m、弾性係数165GPa、引張強度2.4GPa）を用い、長い方を先に施工した後、短い方を重ねて施工することで、作用曲げモーメントに対して効果的に補強している。また、桁連結部では添接板の段差を跨いでCFRP板を設置している。プレストレスを導入するため、固定プレート（両端部）と中間定着体が高力ボルトで設置されている。施工手順については、まず、下地処理された下フランジに接着剤を塗布して、CFRP板を緊張した後、中間定着体を設置し、保護工、塗装を施して仕上げている。



図-2 主桁下フランジへの適用例（山倉橋）

(3) 浅利橋⁶⁾（所在地：山梨県、施工年月：2007年6月）

浅利橋は鋼3径間連続ワーレントラス橋（2連）であり、下弦材の腐食箇所の補修に、CFシート（弾性係数640GPa、引張強度1.9GPa、設計厚さ0.143mm）が適用された（図-3(a)）。積層数は、鋼に換算した断面積が欠損断面積と同等以上になるように決定され、箱形断面の上フランジに3層、ウェブ2面に各3層を接着している。欠損部は主に上フランジであるが、部材の平均応力を緩和する目的の補修であるため、欠損部のないウェブにも分散して接着している。はく離の防止のために、両端部の定着長を100mm確保した上で、各層の接着端では25mmずらして段差を設けている。また、試験車両の走行により補修効果を確認している。

(4) 本城橋⁷⁾（所在地：栃木県、施工年月：2008年11月）

本城橋は単純下路トラス部（4連）と2径間連続曲線箱桁橋部からなり、トラス部の斜材がRC床版に埋め込まれた部分の腐食箇所（引張応力が作用する斜材36箇所）の補修が行われた（図-3(b)）。斜材が破断した木曽川大橋（岐阜県）、本庄大橋（秋田県）と同じ構造形式である。補修には、炭素繊維のストランド（約10μmの炭素繊維の数千本の束）を1本ずつ硬化させたCFRPストランドをすだれ状に加工したストランドシート（弾性係数640GPa、引張強度1.9GPa、設計厚さ0.286mm）が適用されている。鋼材の減厚に応じて、2～6層接着している。開発されたストランドシートは、含浸接着が不要で工期短縮ができ、はく離しにくいという特徴がある。



(a) 下弦材（浅利橋） (b) 斜材（本城橋）

図-3 トラス軸力部材への適用例

(5) 円形鋼製橋脚の耐震補強⁸⁾ (所在地：大阪府，施工年月：2003 年 9 月)

阪神高速道路湾岸線（天保山料金所）の円形鋼製橋脚では，柱定着部の耐力，断面が小さいこと，また，建築限界から柱外部への補強部材の設置が困難なことから，CF シートを橋脚の周方向に巻き立てる方法を採用している（図-4）．CF シート（引張弾性率 390GPa 以上，引張強度 2.45GPa 程度，目付量 300g/m²，幅 200mm）を，橋脚の軸方向に 1 層，周方向に 3 層巻き立てている．同時に，中詰めコンクリートの抜け出し防止のために適切な補強対策を行っている．下地処理（ディスクサンダーによる塗装除去）およびプライマー塗布を施した鋼表面に，CF シートを突き合わせ，かつラップ部をずらして周方向に貼付している．CF シート外側には，対衝突のための防護工を施している．施工期間（約 11 日間）のうち，CF シート巻立ては 4 日で完了し，工期短縮にも有用であったと報告されている．



図-4 円形鋼製橋脚への適用例（阪神高速道路）

4. 海外における適用事例と設計ガイドラインの整備の状況

文献 9) に，欧米を中心とした FRP 接着による補修・補強の事例が紹介されている．特に，英国で多くの適用事例があり，主に，車両荷重の増加に伴う耐荷力向上のために，補強が行われている．補強の対象は，歴史的，文化的な価値のある鋳鉄橋あるいは初期の鋼橋であり，英国では，構造の改変が少ないこと，また，施工が簡便で短工期である点が高く評価されている¹⁰⁾．他方，アメリカでも，応力の低減を目的として，鋳鉄橋の下フランジに CFRP 板を接着して補強した試験的な事例が見られる．

このように適用実績が蓄積されつつある中で，海外では，FRP 接着による鋼構造物の設計ガイドラインが，英国¹¹⁾，イタリア⁹⁾で策定されている．また，アメリカでは，大学を中心に研究開発された成果に基づいてガイドラインを提案している例¹³⁾もある．さらに，国際学会「International Institute for FRP in Construction (IIFC)」に設置されているワーキンググループ「FRP-Strengthened Metallic Structures」¹⁴⁾では，国際会議等を通じて，事例収集，情報交換が活発に行われており，2010 年までに設計ガイドラインの策定が予定されている．

5. おわりに

以上のように，軽量で施工が簡便であることは，現場における FRP の大きなメリットであり，今後も適用は増えていくものと思われる．また，欧米を中心に設計ガイドラインが策定されている状況の中で，国内においても FRP 接着による補修・補強技術の普及を図るためには，設計，施工マニュアル等の整備が望まれる．FRP による鋼および複合構造の補修・補強小委員会では，3 年間の調査検討結果を踏まえて，FRP を用いた鋼構造物の設計・施工の考え方，適用事例，文献調査結果を掲載した技術資料を，平成 21 年度末に発刊する予定である．

参考文献

- 1) A. Baker, F. Rose and R. Jones: Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structures, Elsevier, 2002.
- 2) 山田 聡，片桐英喜，前野裕文，山田健太郎：門型標識柱の基部に発生した疲労き裂の補修効果の検討，日本鋼構造協会，鋼構造論文集，Vol.16，No.61，2009.
- 3) 池田尚治 編：炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン（案），土木研究センター，2002.7
- 4) 板垣一也，渡邊憲市，鈴木博之：炭素繊維強化樹脂板（カーボン板）による鋼橋補強の事例，第 8 回鋼構造物の補修・補強技術報告会論文集，日本鋼構造協会，pp.49-54，2002.6
- 5) 村上英樹，安森 浩，小林 朗，立石 晶洋：鋼部材に対する炭素繊維プレートを用いた緊張力導入に関する実験的研究，プレストレストコンクリート技術協会，第 15 回シンポジウム論文集，pp.359-362，2006.10
- 6) 杉浦 江，大垣賀津雄，稲葉尚文，富田芳男，長井正嗣，小林 朗：炭素繊維シートを用いた鋼部材補修法に関する一検討，土木学会，第 7 回複合構造の活用に関するシンポジウム，No.56，6 pages(CD-ROM)，2007.11
- 7) 橋梁新聞：トラス橋補強一栃木県・本城橋，1012 号，2008.12.10
- 8) 徳林宗孝，吉元郁男，池田啓士，長谷川敏之，岡田崇，藤津幾雄：円形鋼製柱の炭素繊維シートによる耐震補強，橋梁と基礎，Vol.37，No.12，pp.37-42，2003.12
- 9) National Research Council: Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures - Metallic Structures, 2007.6 (<http://www.cnr.it/sitocnr/Englishversion/CNR/Activities/RegulationCertification.htm>)
- 10) 五十畑 弘 編：歴史的鋼橋の補修・補強マニュアル，土木学会，鋼構造シリーズ 14，pp.51-52，2006.11
- 11) S. S.J. Moy, Editor: FRP Composites - Life Extension and Strengthening of Metallic Structures, ICE Design and Practice Guides, 2001.1
- 12) J. M. C. Cadei, T. J. Stratford, L. C. Hollaway and W. G. Duckett: Strengthening Metallic Structures Using Externally Bonded Fibre-Reinforced Polymers. CIRIA, C595, 2004.
- 13) D. Schnerch, M. Dawood, S. Rizkalla, E. Sumner: Proposed Design Guidelines for Strengthening of Steel Bridges with FRP Materials, Construction and Building Materials, Vol.21, Issue 5, pp.1001-1010, 2007.5
- 14) FRP-Strengthened Metallic Structures (Working Groups): International Institute for FRP in Construction (IIFC), http://www.iifc-hq.org/organization/home_working.html

FRP によるコンクリート構造物の延命化技術

日鉄コンポジット（株） 正会員 小林 朗

1. はじめに

土木構造物の設計耐用期間が概ね 100 年と明確に提示されることとなり、構造物の長寿命化に対する要求が高まり、構造物の劣化現象を正しく理解するとともに耐久性向上に関する技術開発が急がれている。すなわち、各種劣化・損傷の計測技術の確立、劣化・損傷を有する構造物の残存性能の評価、構造物の健全性を維持し、延命化を図るための補修・補強法の確立が重要となっている。一方、FRP は軽量・高強度で腐食が発生しないといった優れた材料特性を持ち、また接着接合に適していることから、FRP を既設コンクリート構造物の表面に接着して複合化する FRP 接着工法がコンクリート構造物の補修・補強工法として近年盛んに利用されるようになってきている。このような状況のもと土木学会 複合構造委員会 維持管理小委員会（委員長：杉浦邦征 京都大学大学院教授）では、複合構造物の劣化・損傷実態調査、残存性能評価および延命化のための補修・補強法についての検討を行う中で、接着接合による補強・補修に関する最近の技術動向について調査を行ってきた。本報では、FRP 接着によるコンクリート構造物の延命化技術について概説する。

2. FRP 接着によるコンクリート構造物の補修・補強の現状

2.1 連続繊維シート接着工法

(1) 工法概要

コンクリート構造物の補修・補強に使用される FRP 材料としては、炭素繊維シートやアラミド繊維シートなどの連続繊維シートが最も広く用いられている。連続繊維シート接着工法は、コンクリート表面に液状の接着剤を塗布し、その上から連続繊維シートを貼り付けて連続繊維の素線間に接着剤を含浸させて FRP を成形すると同時にコンクリートと一体化する工法である。

炭素繊維は、高強度型、中弾性型および高弾性型の 3 種類に、アラミド繊維は単独重合型と共重合型の 2 種類に分類される。これらの繊維を一方向に配列した一方向性連続繊維シートが補強用途では主として用いられている。補修・補強の目的に応じて設計計算により、繊維の種類や繊維目付量（繊維シート 1m²あたりの繊維の質量）および積層数を決定し、必要層数のシートをコンクリート表面に接着する。

FRP とコンクリートの接着剤としては、2 液混合常温硬化型エポキシ樹脂が最も多く利用されている。その他に、低温での硬化特性や速硬化性の点で優れるメチルメタアクリレート（MMA）樹脂などアクリル系樹脂が用いられることもある。

(2) 適用例

1) 道路橋 RC 床版の補強

道路橋の RC 床版は、車両の大型化や重交通の影響によりひび割れなどの疲労損傷が発生しやすい。また古い基準で設計・施工された RC 床版は、床版厚や鉄筋量が現行のものより不足しており、疲労耐久性が不足しているものも多い。そのため、延命化手法として鋼板接着工法や炭素繊維シート接着工法および上面増厚工法などの対策が実施されてきた。最近では、下面からの施工で交通止めを必要とせず施工性が良く、腐食の恐れのない炭素繊維シート接着工法が RC 床版の補強工法として広く利用されるようになってきている。

図-1 に炭素繊維シート接着工法の標準断面を示すが、RC 床版の下面に炭素繊維シートをエポキシ樹脂などの接着剤で一体化することで、たわみの低減、ひび割れの拘束効果などが得られ疲労耐久性が向上する。この補強効果については、炭素繊維シート補強床版の輪荷重走行試験により確認されている。図-2 は、床版下面に引張剛性の異なる炭素繊維シートを接着補強した RC 床版の輪荷重走行試験結果であるが、無補強の S-U に比べて炭素繊維シートを補強した他の供試体の床版中央たわみは顕著に低減され、輪荷重の走行に伴うたわみの増加も非常に緩やかで無補強床版に比べて 4～17 倍の破壊寿命となりその補強効果はシートの引張剛性が大きいほど高かったと報告されている¹⁾。補強効果は、シートの引張剛性に依存する

Key Words : FRP, 連続繊維シート, FRP プレート, 補修・補強, 接着, 延命化

連絡先：〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8 日鉄コンポジット（株） TEL 03-5623-5558

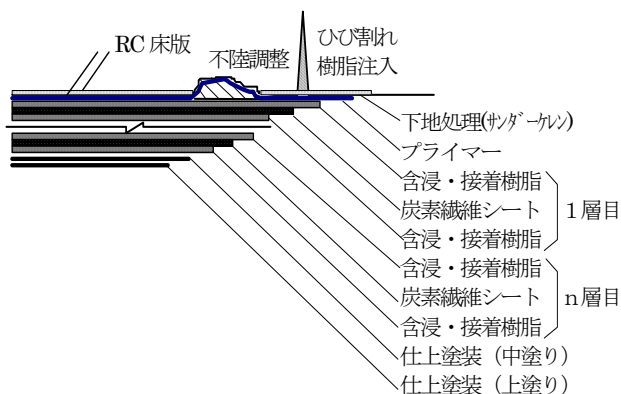


図-1 炭素繊維シート接着工法標準断面図

と考えられており、繰返し作用する微小ひずみに対応するもので繊維の強度や伸び性能に対する要求は高くない。そのため最近では、繊維目付量や積層数を低減できる中・高弾性型の炭素繊維シートの利用が増えている。跨線橋では、床版下に架線があるため、絶縁性のアラミド繊維シートが用いられることもある。

2) 鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強

古い基準で設計・施工された RC 橋脚では、主鉄筋の段落し位置が不適切であったり、せん断補強筋が不足したりしているものが多い。連続繊維シート巻立て工法は、せん断補強やじん性補強および段落し部の曲げ補強に使用

されている²⁾。段落し部の曲げ補強では、主鉄筋段落し部の上下に適切な定着長を確保して連続繊維シートを主鉄筋方向に接着して既設 RC 柱と一体化することで、段落し部の曲げ耐力を向上させて基部の曲げ破壊が先行するようにする。高強度型の炭素繊維シートが用いられることが多く、曲げ補強の軸方向シートの外周に定着性向上とせん断補強を兼ねて周方向に連続繊維シートを巻き立てるのが一般的である。せん断補強とじん性補強では、連続繊維シートを柱の周方向に巻き立てて補強する。せん断補強では、連続繊維シートはせん断補強鉄筋と同様にせん断トラスの引張材として機能する。繊維の種類や補強量によって補強効率が異なり、シートの弾性係数の高い方でせん断補強効率が高くアラミド繊維に比べて炭素繊維シートの方が有利となる。じん性補強では、曲げ圧縮によりコンクリートが圧壊、剥落することを繊維が拘束して防ぐ機能が期待される。このため、繊維の伸び性能が大きい方が補強効率が高いのでアラミド繊維シートが用いられることもある。さらに破断伸びが 10% 近いような高伸度繊維を用いる研究も進められている。

2.2 CFRP プレート接着工法

CFRP プレートは帯板状の連続繊維補強材で、幅 50～100mm 厚さ 0.5mm～4.0mm 程度の CFRP プレートがコンクリート梁の曲げ補強に利用されている。高強度タイプの炭素繊維を用いたものが主であるが、近年、中・高弾性炭素繊維を用いたプレートも開発されている。CFRP プレート接着工法では、エポキシ樹脂接着剤をプレート上に塗布し、これをコンクリートの表面に圧着して接着する。このため接着に使用するエポキシ樹脂は、連続繊維シート用のエポキシ樹脂に比べて粘度が高いパテ状のものが使用されている。

連続繊維シートと異なり、工場で連続繊維に樹脂を含浸して FRP 化するので、樹脂の含有量が一定で気泡の少ない品質の安定した連続繊維補強材が得られる。補強現場での含浸工程が不要であるので連続繊維シート接着工法に比べて工期短縮を図ることができる。一方で CFRP プレートは、幅が狭く厚いプレートを部分的に接着するため、連続繊維シートに比べて接着範囲が極端に狭くまた接着界面に生じる付着応力も高くなるので連続繊維シートに比べて低い曲げモーメントで剥離が発生するので剥離について十分検討する必要がある。

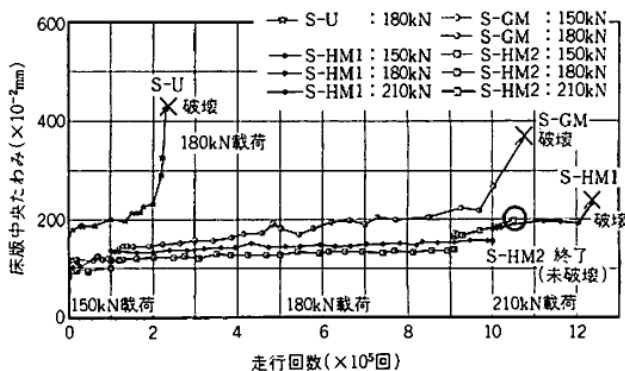


図-2 輪荷重走行回数と床版中央たわみ¹⁾

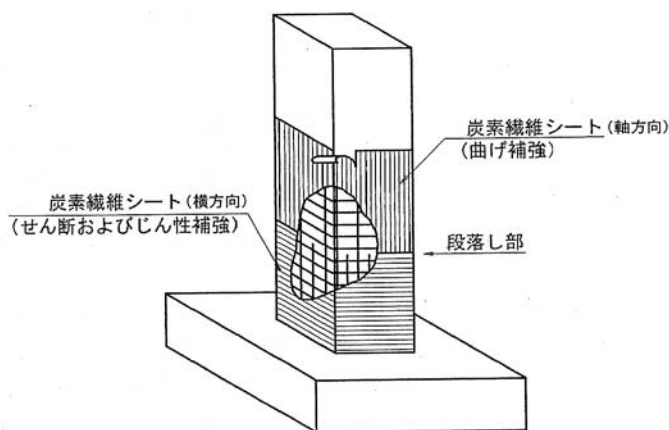


図-3 連続繊維シート巻立て工法概要図²⁾

3. FRP 接着によるコンクリート構造物の補修・補強の設計の考え方と基準類

連続繊維シート接着工法の設計基準としては、土木学会からはコンクリートライブラリー101「連続繊維シート接着工法を用いたコンクリート構造物の補修補強指針」(2000)³⁾が発刊されている。本指針では、連続繊維シートを接着したコンクリート部材の曲げ耐力、せん断耐力およびじん性の評価手法が連続繊維シートのはく離を考慮して述べられている。RC床版やRCはりなどの下面に、曲げ補強を目的として連続繊維シートを接着した場合、シートの剥離の有無によって終局耐力が変化する。そのため最大曲げモーメントによる曲げひび割れ位置でシートに作用する応力と連続繊維シートとコンクリートの界面剥離破壊エネルギーの関係からはく離の判定を行っている。せん断補強効果の評価において問題となるのは、トラス理論式にシートの引張強度をそのまま適用すると、終局時にシートにより受け持たれるせん断耐力が過大に評価されることである。これは、シートの剥離が原因で終局時にシートに作用している応力の平均値がシートの引張強度以下となっていることが原因と考えられている。以上の問題を解決するため、引張強度の低減係数(せん断補強効率)をトラス理論値に乘じることにより、終局時にシートにより受け持たれるせん断耐力を算定する方法が提案されている。

CFRP プレート接着工法に関しては、わが国では土木構造物に対する適用事例も少なく設計基準類も整備されていないのが現状であるが、米国では ACI が設計基準を発刊するなど海外では設計基準類の整備が進みつつある。

4. FRP 接着工法の維持管理

連続繊維シートや CFRP プレートを接着したコンクリート構造物に対してその補強効果を所要の期間持続させるためには、接着接合の一体性が確保されている必要がある。そのため維持管理上重要となる事項の一つとして、補強後にシートやプレートとコンクリート間の界面に浮きや剥離などが発生した場合の検知方法や、当該部位における補修の要否の判断が挙げられる。点検手法としては、目視や打音検査による手法が一般的であるが、赤外線サーモグラフィによるはく離検知手法も研究され、シートの接着面から加熱することにより温度変化を与えることではく離部範囲が明瞭に識別できることが報告されている⁴⁾。また人工的にはく離を設けた供試体の凍結融解試験を行い、直径 30mm 以上の大きさのはく離では水分の浸入の確率が高く補修が必要としている。小規模な浮きやはく離に対する補修方法としては樹脂注入が一般的である。浮きやはく離の面積が広い場合には、連続繊維シートでは当該部分を切除してシートを重ね貼りするパッチング補修または全面貼り代えが、FRP プレートでは継手強度が確保できないことから貼り代えが行われる。

5. おわりに

FRP 接着によるコンクリート構造物の補修・補強に関しては、近年の精力的な研究により耐荷力の向上効果や RC 床版の疲労耐久性の向上効果については明らかにされつつある。一方で、既存構造物の維持管理においては、アセットマネジメントが導入されるなど、ライフサイクルコストや構造物の劣化曲線を考慮することが求められつつある。したがって、FRP 接着による補修・補強後のコンクリート構造物の耐久性や劣化予測、点検手法や変状対策などの維持管理に関してさらなる知見の蓄積が期待される。

参考文献

- 1) 星島時太郎、他：損傷した道路橋床版の炭素繊維シートによる補強効果に関する実験的研究、橋梁と基礎、1998年9月
- 2) (財) 海洋架橋・橋梁調査会：既設橋梁耐震補強工法事例集、2005.4
- 3) 土木学会：連続繊維シート接着工法を用いたコンクリート構造物の補修補強指針、コンクリートライブラリー101、2000
- 4) 宇佐美 惣、長田光司、井ヶ瀬良則、斉藤 誠：炭素繊維巻立て工法の施工時の欠陥が耐久性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21, No.2, pp. 1225-1230, 1999

複合構造対策後の維持管理 ―鋼板接着補強 RC 床版を事例として―

阪神高速道路管理技術センター 正会員 久利 良夫

1. はじめに

複合構造物の多くは、建設後の経過年数も短いことから、顕著な劣化性状を示しているものは少ない。しかし、トラス橋では、斜材がコンクリート床版を貫通する部分において腐食が生じるなど、複合構造物ではないが鋼材とコンクリートなどの異種材料の間で重大な劣化損傷を生じている事例もある。複合構造物では、このような接合部は必ず出来ることから、維持管理上において、特に重要であると考えられる。

ここでは、阪神高速道路の複合構造物を対象に、事例を紹介するとともに、補強後に複合構造物となった鋼板接着補強 RC 床版について維持管理の現状を述べる。

2. 阪神高速道路の主な複合構造物

阪神高速道路の複合構造物には、建設時のものとして複合門型橋脚、波形鋼板ウェブ PC 橋など、震災復旧時の再構築として複合橋脚（RC 柱＋鋼製梁）、補修・補強後に複合構造物となったものとして鋼板接着補強 RC 床版、RC 橋脚耐震補強の橋脚柱部の鋼板巻立てなどがある。

これらは、ほとんどが建設から十数年程度と比較的新しい構造物であることから、発生している損傷は、図-1 のような鋼部材とコンクリート部材との接合部での浮きや図-2 のような腐食など、現時点では耐荷力に影響を及ぼさないと考えられるものがほとんどである。

3. 鋼板接着補強 RC 床版の維持管理

(1) 鋼板接着補強 RC 床版

RC 床版への鋼板接着補強工法は、図-3 のように RC 床版下面に 4.5mm 程度の鋼板を接着するものである。鋼板は、アンカーボルトで RC 床版に固定し、鋼板と床版との間（約 4mm）にエポキシ系樹脂を注入し、既存の床版と一体化させる。この鋼とコンクリートの合成効果により、活荷重に対して床版耐力を向上させるものである。本工法では、鋼板を接着することにより RC 床版そのものが見えなくなるが、床版のひび割れへの樹脂注入が行われる、コンクリート破片の落下に伴う第三者被害を防止できる、などの特徴がある。

鋼板接着工法は、1970 年頃から採用されはじめ、道路橋において多くの実績がある。阪神高速道路では 1972 年の床版陥没損傷があって以降、「1971 年以前の基準を適用した床版」と「点検の結果早急な対策は必要ないが計画的な補修が必要と判断した床版」に予防保全対策として実施してきた。現在は、鋼桁の RC 床版の約 15 万パネルのうち約 7 万パネルの補強に適用している。しかし、補強後 30～40 年近くを経過しているものもあり、一部の床版に鋼板の浮きや漏水などが見られることから、以下に鋼板接着補強 RC 床版（以下、鋼板補強床版）の損傷状況と課題を述べる。

(2) 損傷状況

鋼板補強床版の点検では、一般的に「目視による漏水、遊離石灰、錆、腐食」や「ハンマーにより鋼板をたたくことによる不良音、すなわち鋼板の浮き」などを確認する。阪神高速道路では、目



図-1 複合橋脚の接合部生じている浮き



図-2 RC 脚鋼板巻立て上端部の腐食状況

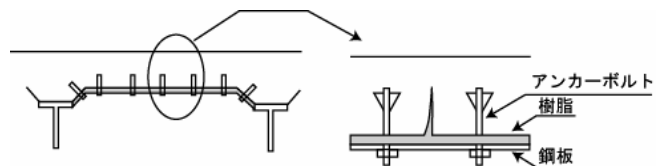


図-3 鋼板接着工法の概要¹⁾

Key Words : 複合構造, RC 床版, 鋼板接着, 維持管理, 損傷

連絡先: 〒541-0054 大阪市中央区南本町 4-5-7 阪神高速道路管理技術センター 企画研究部 TEL 06-4244-6043

視による点検が主であり必要に応じてたたき点検を実施している。表-1は、阪神高速道路における点検項目と判定区分である。点検の結果、約7万パネルの内10%程度のパネルで鋼板の浮きや腐食、漏水などを発見している。

このうち、補修対策の必要があると判断したAランクの損傷を図-4に示す。鋼板の浮きは、疲労試験結果ではハンチ部や鋼板の継ぎ目部から進行しているが、実橋では、必ずしもハンチ部や鋼板継ぎ目部に浮きが集中しておらず、図-5のように広い範囲に見られる。中には、パネル全面に浮きを確認しているパネルも見られる。

鋼板の浮きの原因は、「樹脂の充填不足」「鋼板と樹脂界面のはく離」「床版と樹脂界面のはく離」などが考えられるが、これまでの点検結果では樹脂の充填不足は確認されていない。

漏水や遊離石灰については、箱桁張出部床版の耳縦桁やブラケットの上フランジ、I 桁支間部床版の中央分離帯直下に位置する主桁上フランジ部、片勾配を有する非合成箱桁の上フランジ、地覆や分離帯部での排水管や電気配管の床版下面引出部などから見られる(図-6)。ここで漏水に泥水やさび汁が伴うときには注意が必要であり、特に、泥水の場合には、鋼板接着したRC床版に貫通ひび割れの発生が懸念されることから、早急に詳細点検を行い、適切な対策を講ずる必要がある。

(3) 再補修

広範囲に鋼板の浮きが見られたパネルについては、一部樹脂の再注入による補修を実施している。しかし、補修時には鋼板の浮きの箇所に樹脂を充填したものの、数年後再度浮きが生じたものもあるなど、補修効果については明確になっていない。

(4) 維持管理上の課題

鋼板補強床版は、予防保全対策として実施しているため床版の耐荷力は十分であり、鋼板の浮きが直ちに耐荷力の低下にはつながらない。このため、鋼板補強床版の維持管理は、鋼板の浮きや漏水など損傷の程度や範囲をもとに表-1に示した劣化度を評価・判定してきた。しかし一方では、補強後数十年を経過した床版もあることから、鋼板補強床版の劣化進行過程、鋼板の浮きと床版の性能との関係、すなわち床版の耐荷性能に影響を与える鋼板の浮きの限界範囲やこれらと点検結果との関連付けなど、より合理的な維持管理に向けた検討を現在実施しているところである。

4. おわりに

複合構造物に共通していえることは、鋼とコンクリートとの接合部が維持管理上の重要なポイントである。今回は、補修・補強後に複合構造物となった事例であるが、鋼板接着補強RC床版について紹介した。ここでも接合部での浮きや鋼板の腐食が大部分を占めている。また、接合部は、応力が急変する箇所となることから、設計時や点検の計画、実施において特に配慮する必要がある。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計施工と維持管理，森北出版，2007.10.
- 2) 道路構造物の点検要領 土木構造物編，阪神高速道路株式会社，2005.10.

表-1 阪神高速道路における鋼板接着補強RC床版の点検項目と判定区分²⁾

工種		A	B	C
補修済床版	不良音	たたき点検において、鋼板1枚の1/3程度以上の範囲に不良音がある。	たたき点検において、鋼板1枚の1/3程度以下の範囲に不良音がある。	たたき点検において、不良音がわずかにある。
	漏水および遊離石灰	鋼構造物に、Aランクの腐食を生じさせている。	①漏水、遊離石灰の著しい流出がある。 ②構造物に、Bランクの腐食を生じさせている。	漏水、遊離石灰がわずかにある。
	さびおよび腐食	①鋼板の0.2mm程度以上の腐食がある。 ②鋼板全面積(パネル)の1/2以上にさびがある。	①鋼板の0.2mm未満の腐食がある。 ②鋼板全面積(パネル)の1/2未満にさびがある。	鋼板にさびが点在している。
	鋼板の変形	鋼板の著しい変形や、すべりが認められる。	鋼板の一部に変形が認められる。	変形はあるが軽微である。
	シール部のはく離	シール部の一边を超え、範囲に進行性のはく離がある。	シール部の一边にわたって、はく離がある。	シール部の一边にはく離、またはひび割れがある。

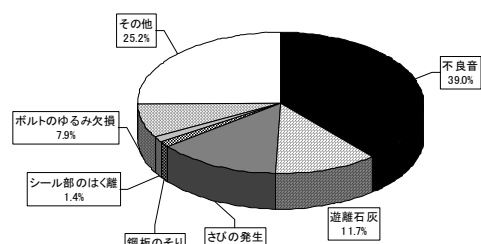


図-4 Aランク損傷の内容



図-5 鋼板接着補強RC床版の鋼板の浮き



図-6 鋼板接着補強RC床版の漏水