

複合構造による補修・補強の現状

吉原 忠*

1. はじめに

コンクリート構造物の損傷形態としては、コンクリートのひび割れ、かぶりコンクリートの剝離、鉄筋の露出、コンクリートの劣化などがある。これらの損傷の原因としては、設計要因によるもの、施工要因によるもの、そして施工後の外的条件の変化によるものなどが考えられるが、実態としては、種々の要因が複雑にからみあっていることが多い。コンクリート構造物の補修・補強に際しては、これらの要因を究明し、除去できる要因は除去したうえで、具体的な補修・補強に入る必要がある。

本報文では、損傷の原因が究明され、除去可能な原因は除去されたものとし、その後の段階の補修・補強として、主として複合構造によって道路橋に対し行われている補修・補強工法について、その概要を紹介する。

ここでご紹介する補修・補強工法は、コンクリート構造物のコンクリートそのものの劣化の程度がはなはだしい場合には効果を発揮できないので、事前にこれを修復しておく必要がある。

なお、「補修」と「補強」の用語の使い分けについては種々議論のあるところであるが、本報文では、原則として以下のように使い分けをしている。

補修：損傷に対して、原形復旧する処理。

補強：耐力の増加を図る処理。損傷を生じている構造物のみを対象とするわけではない。

本報文には、厳密な意味での複合構造という概念に必ずしも適合しない場合が含まれていることと思われるが、広義の意味での複合構造とご理解頂ければ幸いである。

2. 外ケーブルによる補強

2.1 適用対象構造

RC 上部工、PC 上部工、RC 橋脚、PC 橋脚等の補修あるいは補強に適用できる。

2.2 基本的な考え方

発生しているひび割れの大きさ、間隔等、あるいは追加される荷重等を基にして、付与すべきプレストレス力を算定し、外ケーブルでそれを導入する方法である（図

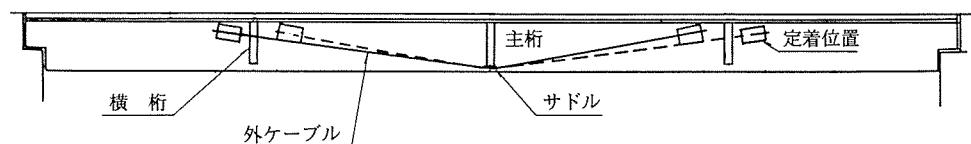
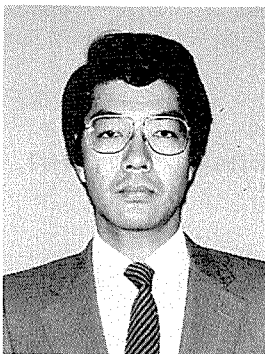


図-1 外ケーブルによる補強概念図



* Tadashi YOSHIHARA
首都高速道路公団
保全施設部保全技術課

図-1 参照)。補強時点で作用している望ましくない応力（コンクリートの引張応力等）を除去することができる。

外ケーブルを定着する装置（定着装置）と、偏向させるための装置（偏向具）を設置する必要がある（図-2 参照）。また、それらの装置は、堅固に固定されなければならない。通常これらの装置と既設桁との隙間には、間詰め材としてセメント系注入材料あるいはエポキシ樹脂を充填し、橋軸直角方向に配置された横締め鋼棒を使用して既設桁に固定される。

従来は鋼製のケーブルが使用されていたが、近年 CFRP 等の新素材を利用する検討が始まっている。

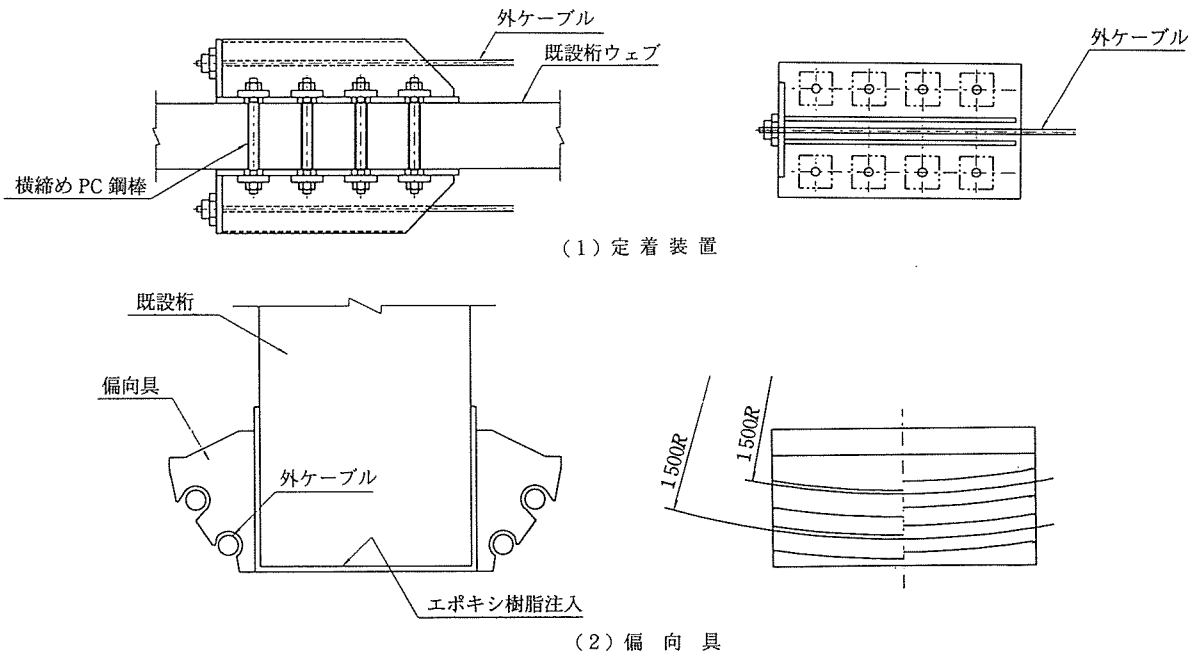


図-2 定着装置および偏向具の一例

2.3 採用にあたっての留意点

定着装置、偏向具周辺に発生する局所的な応力に対する検討が必要となる。また、本工法を採用した結果として発生する2次応力に対し、照査が必要である。

外ケーブルは、原則として補強する断面に対して対象に配置する必要がある。

PC 構造物に適用する場合、外ケーブルの定着装置は、既設の PC 鋼材との位置関係から、桁最端部に設置できないことが多い(図-3 参照)。その場合、定着装置よりも桁端部側は補強できないので、必要に応じて他の補強方法を検討することになる。

外ケーブル、定着装置、偏向装置等の防錆に対する配慮が必要である。

外ケーブルの耐久性を向上させるためには、防錆方法が特に重要であるが、施工性を含めた観点から、現時点では外ケーブルには防錆材で被覆された PC 鋼材を使用するのが望ましいと考えられる。

既設構造物の曲げ振動周期と外ケーブルの自己振動周期を離す必要がある。このため、外ケーブルの取付け間隔は最大で7~8 m 程度とするのが望ましい。

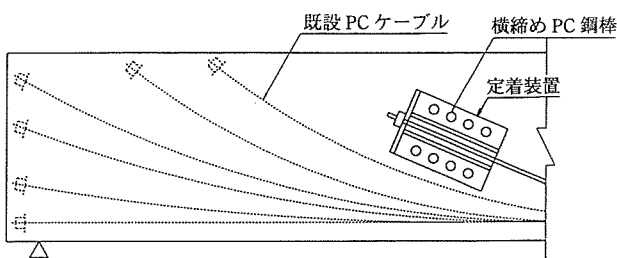


図-3 PC 桁への定着装置配置例

2.4 施工手順の概要

外ケーブルによる補強の施工手順の概略をフローで示すと、図-4 のとおりである。

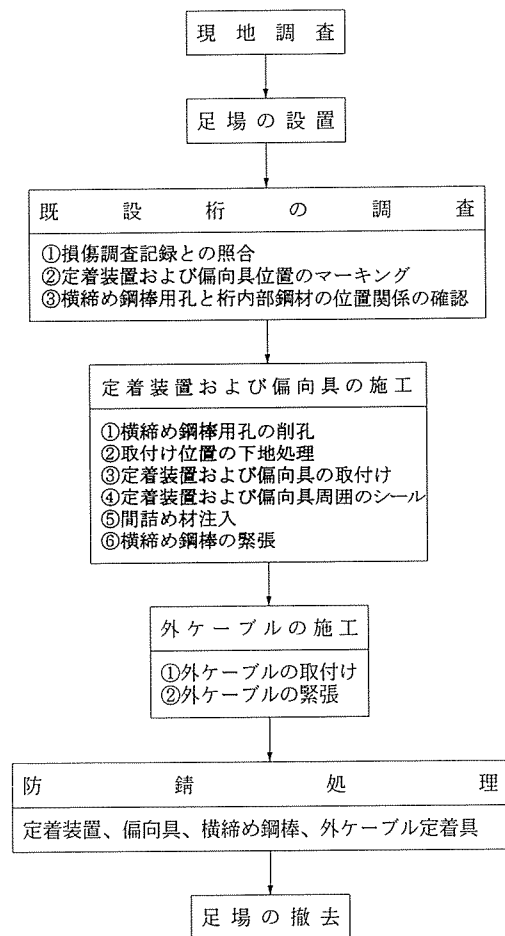


図-4 外ケーブルによる補強の施工手順

3. 鋼製縦桁増設による補強

3.1 適用対象構造

主として鋼桁 RC 床版の補強に適用されるほか、他の種類の版構造への適用も考えられる。

3.2 基本的な考え方

床版を支持する主桁間に縦桁を増設し、床版支持間隔を小さくすることによって、床版に作用する曲げモーメントを小さくし、結果として床版に発生する応力を低減させる方法である（図-5 参照）。

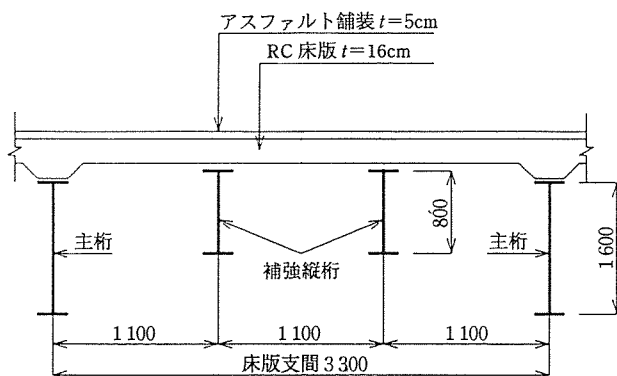


図-5 増設縦桁の配置例

3.3 採用にあたっての留意点

増設する縦桁の剛性が主桁の剛性と比べて小さすぎる場合には、縦桁の床版支点としての効果があまり期待できない。すなわち、縦桁の剛性は、主桁の剛性と見合ったものが必要となる。したがって、鋼桁橋に適用する際には鋼製の縦桁で足りるが、コンクリート桁橋に適用する際には鋼製の縦桁では剛性が不足する場合も考えられる。この場合、コンクリート製の縦桁を増設することになるが、死荷重の増加に対して、基礎の補強を検討する必要がある。

増設縦桁を支持するには、ある程度の剛性を有する横桁が必要となるため、例えば鋼桁の場合には、対傾構を充腹横桁に交換する必要がある。

増設縦桁と床版を密着させるため、増設縦桁上フランジと床版下面の間には、エポキシ樹脂を充填する（図-6 参照）。

橋梁に添架物等がある場合には、増設縦桁を所定の位置に設置することが不可能な場合もあり得る。構造物の

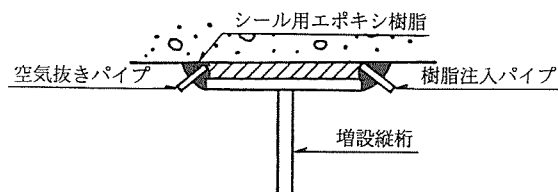


図-6 エポキシ樹脂注入

補強を行う場合には共通する留意点ではあるが、補強部材を所定の位置に設置できることを事前に確認しておく必要がある。

この補強方法の基本的な考え方からして、補強は、床版の劣化があまり進んでいない時期に行うのが望ましい。

3.4 施工手順の概要

鋼製縦桁増設による補強の施工手順の概略をフローで示すと、図-7のとおりである。

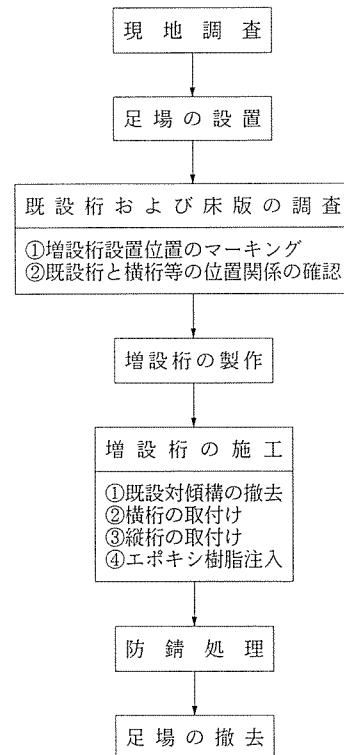


図-7 鋼製縦桁増設による補強の施工手順

4. 鋼板接着による補強

4.1 適用対象構造

RC 床版、RC 桁、PC 桁、RC 橋脚、PC 橋脚等の補強に適用される。

4.2 基本的な考え方

対象とする構造物に鋼板をエポキシ樹脂で接着して既設コンクリートと合成させ、鉄筋を増加したのと同等の効果を期待し、補強を行う方法である。補強効果を発揮するのは補強後に作用する荷重に対してのみであり、ジャッキアップ工法等を併用しない限り、補強時点で作用している望ましくない応力（コンクリートの引張応力等）を除去することはできない点に注意する必要がある。

4.3 採用にあたっての留意点

鋼板を接着する工法には、①圧着工法（図-8 参照）

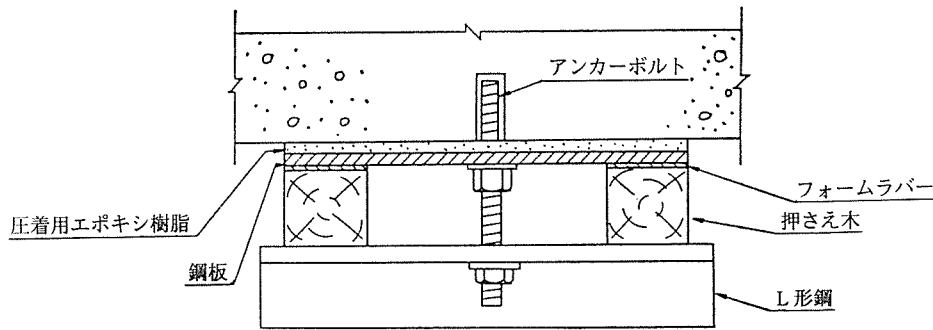


図-8 圧着工法

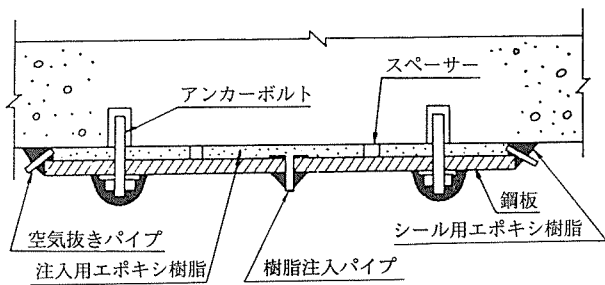


図-9 樹脂注入工法

と②注入工法（図-9 参照）とがある。圧着工法は、接着面にあらかじめ接着材を塗布しておく工法であり、注入工法は、鋼板を所定の位置に設置したあと、周囲をシールし、接着材を注入する工法である。注入工法の場合、接着面に存在する小さなクラックへの注入効果も期待でき、また、接着面の不陸が多少大きくても対応できる、曲面への施工にも対応しやすいなどの特色がある。

また、圧着工法に使用するエポキシ樹脂は比較的粘度が低くダレやすいため、鋼板に塗布してから接着するまでの作業においては、塗布したエポキシ樹脂が鋼板からたれ落ちないように注意が必要である。この作業性の問題等から、圧着工法は近年はあまり実施されていない。

接着する鋼板としては、短冊状の比較的小さいサイズの鋼板を適当な隙間を開けて使用する場合（短冊鋼板）と、より大きなサイズの鋼板を全面的に使用する場合（全面鋼板）とがある。短冊鋼板は、長手方向を補強したい方向に向けて使用する。一方、全面鋼板は、主鉄筋方向と配力鉄筋の両方向の補強を行うことができる。

全面鋼板を使用する場合、補強以後にひび割れの発達があっても直接目視できなくなるので、注意が必要である。

接着する鋼板の板厚は、計算上はかなり薄くなることが多いが、施工性を考慮すると、極端に薄いものは好ましくない。特に、注入工法を採用する場合には、エポキシ樹脂の注入圧力によって大きなたわみが発生する。これを考慮すると、経験的には 4.5 mm 程度の板厚の鋼板を使用するのが望ましい。また、景観を考慮して鋼板

の仮固定に皿ボルトを使用する場合には、6.0 mm 程度の厚さが必要と考えられる。

鋼板の接着面に錆、汚れ、油脂類の付着等があると、エポキシ樹脂による接着性能を阻害するので、注意が必要である。

なお、上述の仮固定用のボルトには、設計上、鋼板とコンクリートとの一体化作用は期待しない。

4.4 施工手順の概要

鋼板接着による補強の施工手順のうち、圧着工法の概略をフローで示すと、図-10 のとおりである。

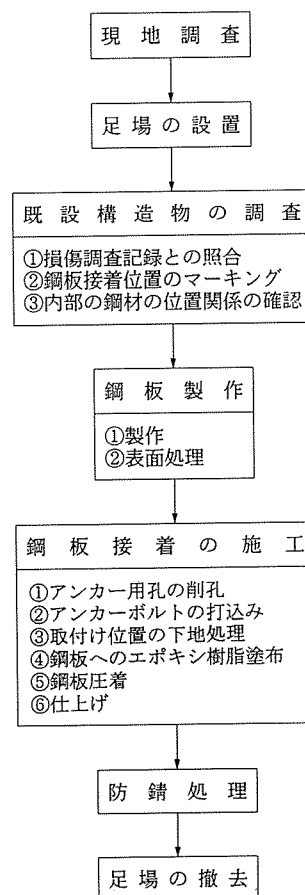


図-10 圧着工法による鋼板接着補強の施工手順

鋼板接着による補強の施工手順のうち、注入工法の概略をフローで示すと、図-11のとおりである。

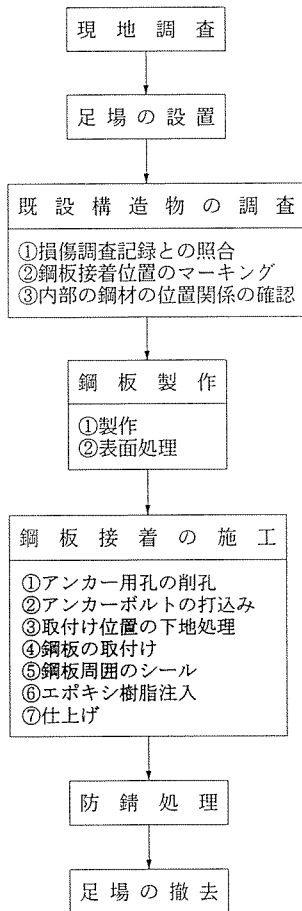


図-11 注入工法による鋼板接着補強の施工手順

5. ガラス繊維接着による補修

5.1 適用対象構造

壁高欄を有する RC 床版張出し部の補修に適用できる。

5.2 基本的な考え方

RC 床版張出し部の最先端の角の部分は、コンクリートの締固めが不十分になりやすく、損傷を受けやすい。この部分の損傷は、最終的にかぶりコンクリートの落下を引き起こすことがある。本工法は、このような落下事故による第三者への被害を未然に防止するとともに、その結果として進行する劣化を事前に防止するための、あくまでも補修を目的とする方法である。

具体的には、床版張出し部先端のコンクリート部分をガラス繊維で覆い、そのガラス繊維を周辺のコンクリートと接着するもので、仮にある部分が剥離しても、周辺の健全なコンクリート部分とガラス繊維との付着で、剥離した部分のコンクリートを支え、落下を防ぐ。

首都高速道路公団での本補修における仕様は表-1のとおりである。

5.3 採用にあたっての留意点

損傷をうけた部位の周辺はある程度健全であり、落下しようとする部分の重量を安全に支えることが可能でなければならない。

ガラス繊維と壁高欄との間に万一水が浸入した場合の水抜き効果を考慮して、首都高速道路公団では、床版下面へのガラス繊維接着範囲は、高欄面から 60 cm までとしている。

5.4 施工手順の概要

ガラス繊維接着による補強の施工手順の概略をフローで示すと、図-12のとおりである。

表-1 ガラス繊維補修仕様

工 程	材 料	標準使用量 (kg/m ²)	目標膜厚 (μ)	塗装方法	塗装間隔 (20°C)
① 素地調整	—	—	—	—	—
② プライマー	エポキシ樹脂 プライマー	0.10	—	は け ローラー	1時間～ 7日間
③ パ テ	エポキシ樹脂 パ テ	0.40	—	へ ら	1時間～ 7日間
④ 含 浸 材	エポキシ樹脂系 含浸接着材	0.30	450 以上	へ ら	16時間～ 7日間
⑤ 貼 布	ガラスクロス (GCL 90)	0.10		へら押え	
⑥ 含 浸 材	エポキシ樹脂系 含浸接着材	0.20		へ ら	
⑦ 中 塗 り 工	エポキシまたはポリウ レタン樹脂塗料中塗り	0.12	60 以上	は け ローラー	5時間～ 3日間
⑧ 上 塗 り 工	ポリウレタン 樹脂塗料 上塗り	0.12		は け ローラー	—

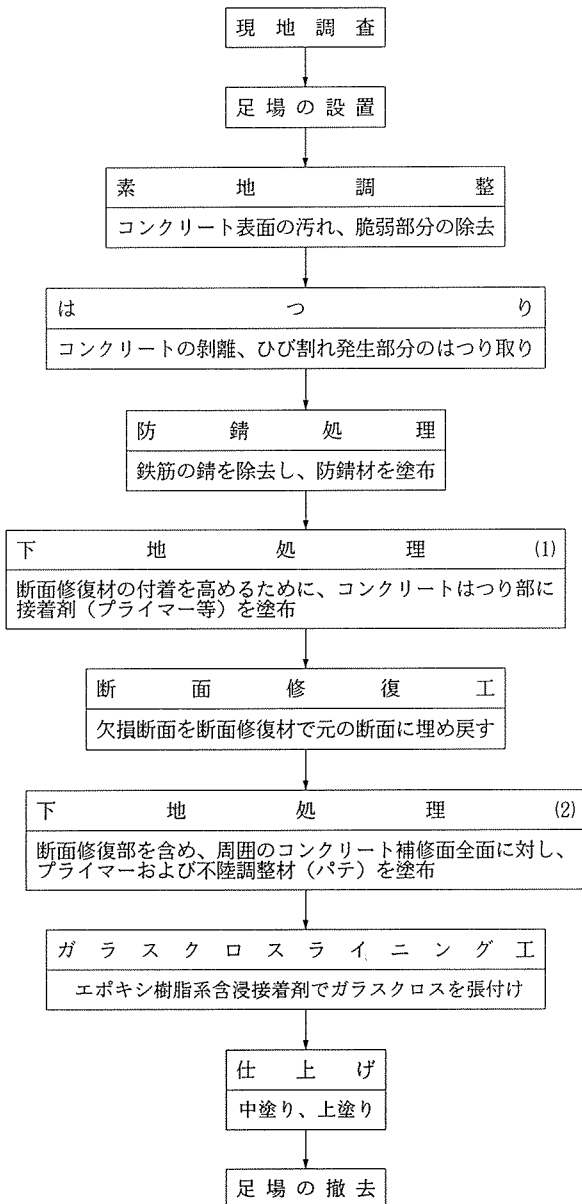


図-12 ガラス繊維接着による補修の施工手順

6. 炭素繊維接着による補強

本方法については、上述の諸方法に比較して事例も少なく、参考文献等も少ないと思われるため、若干詳しくご紹介する。

6.1 適用対象構造

RC床版補強、RC橋脚耐震補強等に適用された事例があるほか、材料や施工方法等の研究開発が進むことで、コンクリート桁の補強等にも適用可能になっていくものと考えられる。

6.2 基本的な考え方

鋼板接着工法で使用する鋼板を炭素繊維に置き換えたものである。すなわち、対象とする構造物に炭素繊維で織られた布を接着して既設コンクリートと合成させ、鉄

筋を増加したのと同等の効果を期待し、補強を行う方法である。

鋼板接着工法と比較し、補強材が非常に軽量で所要厚さも薄く、作業性が良いこと、仮固定用のアンカーボルトが不要となり、既設コンクリートを傷めないこと、補強材料として供給される形態が薄いため、所要厚さになるまで重ねることで最適な厚さを得ることができるなどの特色がある。

首都高速道路公団で昭和30年代に建設された橋梁の中には、RC床版を有する開断面鋼桁形式の橋梁がある。このような形式の桁の場合、鋼製の補強部材を桁内に搬入してのRC床版補強工事は非常に困難であるが、炭素繊維を使用できれば、狭い桁の中での補強工事が可能となる。

現在、コンクリート構造物の補強に使用されている繊維材料としては、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維などがある。床版補強に使用する場合には、既設の鉄筋の引張応力度を低減させることが主目的となるため、高弾性のものが要求される。上記材料の中では炭素繊維が軽量・高強度・高弾性・高耐蝕性（耐酸性、耐アルカリ性、耐有機溶剤性）などの面で優れた性質を有しているため、最も適している。

炭素繊維は原料によりPAN系（ポリアクリロニトリル）とピッチ系（石油または石油ピッチ）に大別される。

炭素繊維を床版補強材料として使用する場合には、まとまった量の繊維束が引張力に対して有効に働くように、炭素繊維をエポキシ樹脂によって集束させた板状の炭素繊維強化複合材料(CFRP)として用いる。

炭素繊維をRC床版下面の補強材料として使用していくにあたっては、どのような形態で使用するのが適切であるかを考慮する必要がある。RC床版補強に採用できる炭素繊維には以下のような形態のものがある。

① クロス

炭素繊維を2方向に織った製品であり、エポキシ樹脂を塗布含浸して必要補強層数、床版へ接着する。

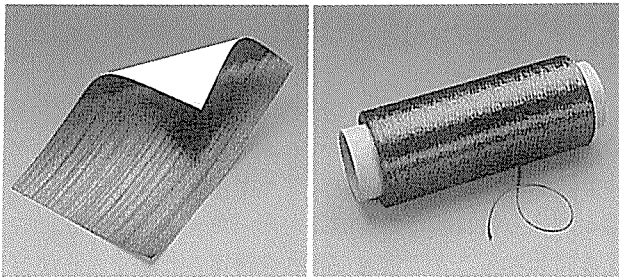
② クロスプリプレグ^{注)}

炭素繊維を2方向に織ったクロスに加熱硬化型の樹脂を含浸させた製品であり、所定の加熱硬化条件(150℃, 30分)を満たすように加熱して床版へ接着する。

③ クロス硬化板

上記のプリプレグを必要層数だけ工場で加熱圧着した1枚の硬化した成形板であり、鋼板接着と同様に、エポキシ樹脂を用いて床版へ接着する。

注) プリプレグ(プリ・インプレグネイト): 予め繊維に樹脂を含浸させること。



UDテープ

炭素繊維素材

写真-1 炭素繊維

④ UDプリプレグ

炭素繊維を1方向に引きそろえて常温硬化型のエポキシ樹脂を含浸させた製品で、少量のエポキシ樹脂を塗布して必要補強層数、床版へ接着する。

上記4種類の補強材料に対し、RC試験梁を使用した接着施工性と曲げ補強効果の確認試験、損傷の進んだRC試験梁を利用した曲げ補強効果の確認試験、実物大のRC試験床版を使用した曲げ補強効果の確認試験、さらに実橋（管理用施設の橋梁部分）のRC床版を使用した施工性試験および接着力試験等を行い、実橋への施工性や炭素繊維を格子状に接着する形態の効果を確認している。

6.3 採用にあたっての留意点

補強効果を発揮するのは補強後に作用する荷重に対してのみであり、ジャッキアップ工法等を併用しない限り、補強時点で作用している望ましくない応力（コンクリートの引張応力等）を除去することはできない点は、鋼板接着による補強と同様である。

施工の良否が補強効果に大きな影響を及ぼすため、施工に際しては、細心の注意が必要である。

炭素繊維は、樹脂硬化後においても鋼板等に比較してはるかに柔らかく、ナイフなどで容易に切断することができる。このため、容易に第三者が近づけるような場所での適用には、注意が必要である。

6.4 施工手順の概要（クロスの場合）

炭素繊維接着による補強のうち、クロスを使用する場合の施工手順の概略をフローで示すと、図-13のとおりである。

7. あとがき

複合構造による補修・補強の現状というタイトルで、首都高速道路公団の事例を中心にご紹介した。

新たに構造物を設計する場合と異なって、構造物の補修・補強設計を行う際には、設計手法のようなものは十分に確立されていない。したがって、既往の設計例等を

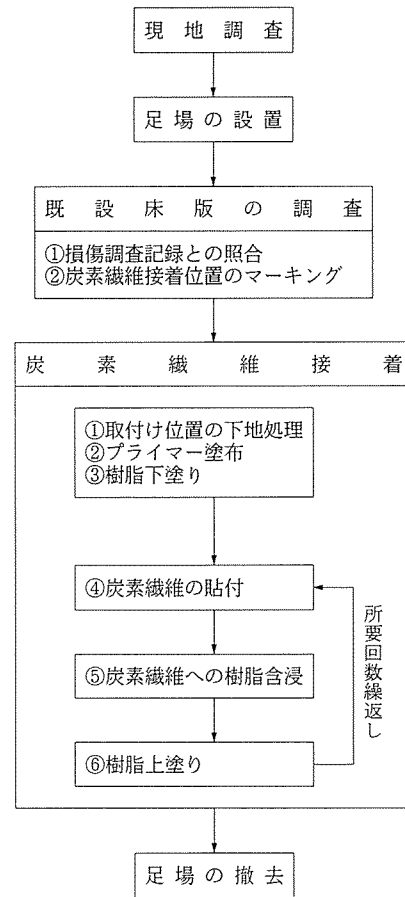


図-13 クロスによる炭素繊維接着補強の施工手順

参考に設計を進めることが多いが、その適用にあたっては、既往例の背景、すなわち補強が必要となった損傷の種類、程度、その損傷の発生原因、構造、施工条件等々を十分に把握する必要があると考えられる。

本報文が、今後の補修・補強の検討に際して、幾らかでもご参考となれば幸いである。

参考文献

一般論：

- 1) 道路橋補修便覧，日本道路協会，昭和54年2月
- 2) 道路橋震災対策便覧（震災復旧編），日本道路協会，昭和63年2月
- 3) 橋梁と基礎，Vol. 28, No. 8, 建設図書，平成6年8月

炭素繊維補強関連：

- 4) 菊地ほか：炭素繊維接着による床版補強の検討，土木学会第46回年次学術講演会概要集第5部，平成3年9月
- 5) 丸山ほか：炭素繊維接着による床版補強の検討（第2報），土木学会第47回年次学術講演会概要集第5部，平成4年9月
- 6) 丸山ほか：炭素繊維接着による床版補強の検討（第3報），土木学会第49回年次学術講演会概要集第1部，平成6年9月

【1995年1月27日受付】