

FRP 補強材のコンクリート構造物への適用

— LCC のケーススタディ —

渡部 寛文*1・中村 修*2・安藤 直文*3・中井 裕司*4

連続繊維（FRP）は、高強度と高耐久性を有する材料である。この材料をコンクリート構造物に適用する研究は、世界をリードするように日本で始まり、約 30 年を経過している。この間、公的機関、学会等から FRP をコンクリート構造物に適用するための設計施工指針が発刊されている。

FRP が実用化された 1990 年代はアルカリ骨材反応、海砂の使用によるコンクリート構造物の早期劣化が問題となった時期であり、FRP の高い耐食性は新しい補強材として歓迎され、適用実績を伸ばしてきた。

最近、コンクリート構造物の劣化事例がさらに増大し、対策の緊急性や維持管理コストの高さが指摘されている。FRP のコンクリート構造物への適用は、維持管理コストを最小限に抑え、建設から使用期間全体を含めたライフサイクルコストに関し高い優位性を備えている。

キーワード：連続繊維，FRP，ライフサイクルコスト

1. はじめに

近年、コンクリート構造物において、コンクリートの劣化や塩害による鋼材腐食が要因となり、構造物の耐久性を損なう事例が増加してきている。このため、膨大な社会資本ストックとしてのコンクリート構造物は、維持管理が社会的な問題として取り上げられている。既設構造物においては適切な維持管理、新設構造物においては長寿命化への強い要求があり、これらに関する新材料、新技術の開発が急がれている。このような状況の下、“性能照査型維持管理”、“耐久性向上”、“ミニマムメンテナンス”、“ライフサイクルコスト（LCC）”という言葉とともに、構造物の建設、維持管理に対する取組みが各発注機関、学会等において整理されてきた。

FRP 補強材は、橋梁の緊張材、グラウンドアンカーの緊張材、補修・補強分野での補強筋として活用されており、その素材の特性を各分野に応じ発揮している。FRP は非腐食性材料であり、コンクリート構造物の補強材として鋼材を FRP に替えることにより、鋼材の腐食劣化を原因とする耐久性の低下を抑えることができる。

この報告は、FRP 材料メーカーおよび施工会社より構成される建設用先端複合材技術協会（略称：ACC）が、LCC の観点から、従来の建設で補修により構造物の要求性能を維持する場合と、建設当初より FRP 補強材を用いてその性能を維持する場合とを比較し、FRP 補強材の活用による経済的優位性に関する検討について、および FRP 補強材のコンクリート構造物への適用事例についてまとめたものである。なお、本稿では FRP 緊張材（PC 鋼材に相当）と FRP 補強筋（鉄筋に相当）を総称して FRP 補強材としている。

2. ケーススタディ

2.1 要求性能

維持管理の対象となる要求性能は、構造物の種類やその管理者により多岐にわたる。維持管理の方法も予防維持管理から無点検維持管理まで幅広いものがある。ここでは、さまざまな管理者が、さまざまなレベルの維持管理を施し、100 年間供用することを検討の対象とした。

2.2 検討モデル

本検討では、検討対象構造物として「海上部および海岸線から 100 m まで」の位置に建設されるプレテンション方



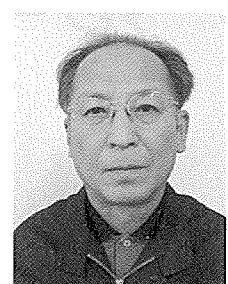
*1 Hirofumi WATANABE

建設用先端複合材技術協会
(川田建設(株))

*2 Osamu NAKAMURA

建設用先端複合材技術協会
(株)ピーエス三菱

*3 Naofumi ANDO

建設用先端複合材技術協会
(三井住友建設(株))

*4 Hiroshi NAKAI

建設用先端複合材技術協会
(前田工織(株))

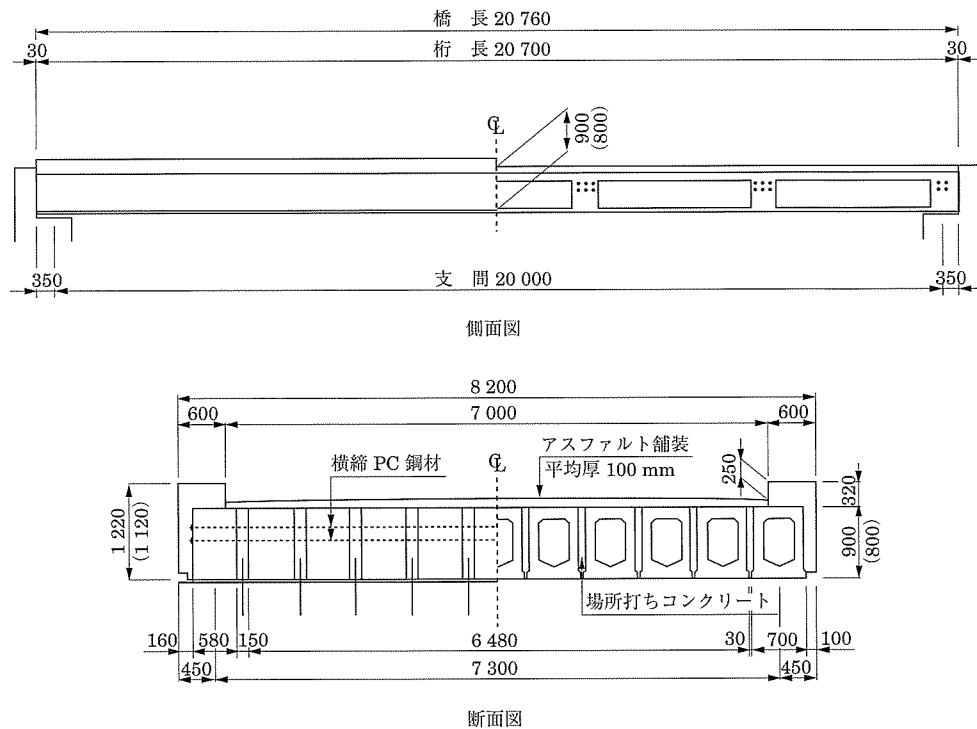


図 - 1 橋梁一般図

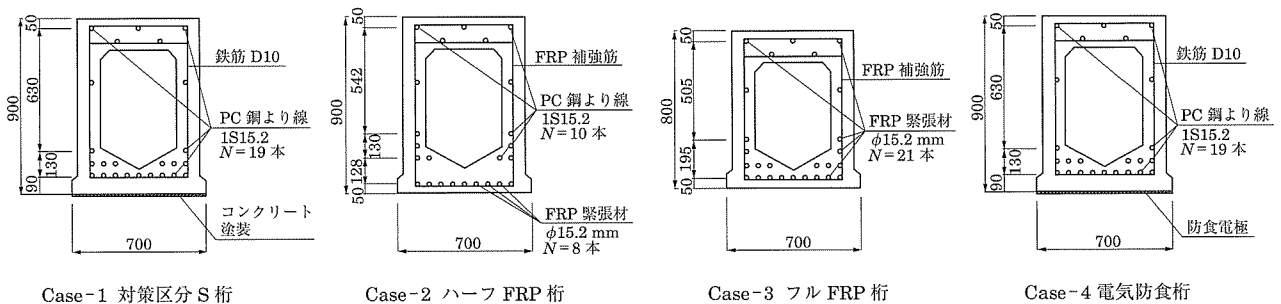


図 - 2 主桁断面図

式単純床版橋を想定した。橋梁の諸元を以下に示す。

- ・橋 長：20.76 m
- ・支 間：20.0 m
- ・幅 員：8.2 m
- ・斜 角：90°
- ・活荷重：B 活荷重
- ・塩害対策：道路橋示方書による対策区分 S

(フル FRP 桁は対策区分Ⅲの断面)

- ・最下段緊張材位置 (桁下縁より)：
 - 対策区分 S 桁 (PC 鋼材・鉄筋使用 + コンクリート塗装を併用) 90 mm
 - ハーフ FRP 桁 (FRP と鋼材を併用) 50 mm
 - フル FRP 桁 (すべての補強材が FRP) 50 mm

2.3 検討ケース

本報告では、図 - 2 に示す Case - 1 ～ 4 の 4 断面を代表として設定し、検討ケースとした。

(1) Case - 1 対策区分 S 桁

一般的な塩害対策区分 S の桁として、桁高 900 mm、通

常の PC 鋼より線と鉄筋を使用し、最下段緊張材位置を下縁より 90 mm としたものである。道路橋示方書では対策区分 S の桁に対し、塗装鉄筋の使用またはコンクリート塗装の併用を規定しているが、ここではコンクリート塗装を施すものとした。コンクリート塗装は現時点で経年劣化が避けられないものと考え、維持管理は 5 年ごとの定期点検、16 年ごとの再塗装、再塗装時の一部断面修復を想定した。

(2) Case - 2 ハーフ FRP 桁

桁の外形は対策区分 S 桁と同様とし、最下段の PC 鋼材を FRP 緊張材 (CFRP：炭素繊維) に、鉄筋を FRP 補強筋 (GFRP：ガラス繊維) にそれぞれ置き換え、中上段は PC 鋼より線を用いたケースである。FRP は通常の鋼材に比べ材料コストが高く、塩害対策としての使用量を最小限とすることにより、イニシャルコストを低減する目的で設定したものである。FRP 緊張材位置を下縁より 50 mm とし、コンクリート塗装は行わない。維持管理については、表面 (下縁) 付近に劣化する要素のないことから、10 年ごとの定期点検のみを想定した。なお、中段 PC 鋼材のかぶり

170 mm と大きくなっているが、これの理由については次節で詳説する。

(3) Case-3 フルFRP桁

このケースは横締めPC鋼材を除くすべての鋼材をFRPに置き換えたものである。鋼材の腐食を考慮する必要がないため、対策区分Sの環境にありながら、対策区分Ⅲの断面（一般環境と同等）とすることができる。コンクリート塗装はハーフFRP桁と同様に行わず、維持管理も10年ごとの定期点検のみとした。

(4) Case-4 電気防食桁

対策区分S桁でコンクリート塗装を行うかわりに、電気防食工法を採用したケースである。電気防食システムは建設時にすべて設置し、完成時より100年間通電し続けるものとした。供用中の維持管理として、25年ごとのメンテナンスと50年ごとの電極交換を想定した。

各検討ケースの維持管理履歴を示すと図-3のようになる。

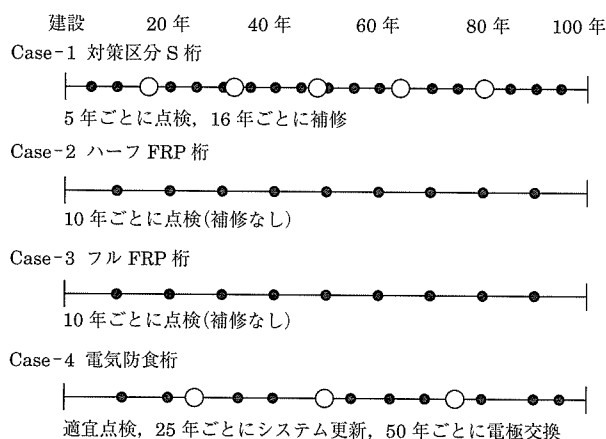


図-3 各検討ケースの維持管理履歴

2.4 劣化予測

(1) 塩化物イオン濃度分布

塩害は鋼材に接触しているコンクリートの塩化物イオン濃度がある値を超え、鋼材の不動態被膜が破壊され腐食することにより発生する。コンクリート中の塩化物イオン濃度分布は、表面からの深さ、経過時間および塩化物イオンの見かけの拡散係数をパラメータとして求められ、コンクリート標準示方書〔維持管理編〕では次式より与えられる。

$$C(x, t) = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right)$$

ここに、

$C(x, t)$: 深さ x (cm)、時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_0 : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

D_{ap} : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

erf : 誤差関数

γ_{cl} : 予測の精度に関する安全係数 (1.3)

上式の C_0 については、コンクリート標準示方書〔維持管

理編〕より飛沫帯に位置するものとして $13.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ を設定した。また、 D_{ap} は水セメント比 (W/C) をパラメータとするが、本検討においては道路橋示方書で想定している $W/C = 36\%$ (工場で製作されるPC構造) を使用して求めた。 γ_{cl} については、100年間という長期の供用であることを考慮し1.3とした。さらに、コンクリート中には製造時より微量の塩化物イオンが混入していることがあり、その値をJISの制限値である $0.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ とした。以上の条件を基に、塩化物イオン濃度分布を求めたところ図-4のようになった。

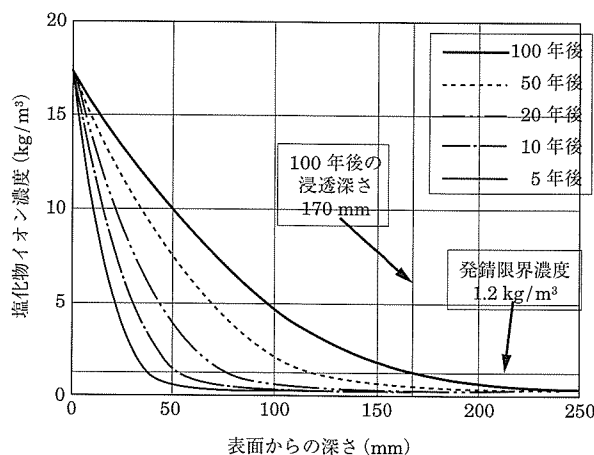


図-4 塩化物イオン濃度分布

(2) 発錆限界塩化物イオン濃度

鋼材の発錆限界塩化物イオン濃度については各機関、団体より提示されており、その値はおおむね $1.2 \sim 3.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ の範囲にある。本検討においてはそのなかでもっとも厳しい値である $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ を採用した。

前項 図-4 において、供用開始から100年後の塩化物イオン濃度分布曲線（最上段の曲線）に着目すると、発錆限界濃度 $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ を下回る範囲は、コンクリート表面から170 mmより深い部分であることが分かる。この結果より、Case-2 ハーフFRP桁の中段PC鋼材のかぶりを170 mmに設定した。

2.5 LCCの算定方法

(1) 積算条件

当該橋梁の製作、架設に関する積算条件は以下のとおりである。

- ① 主桁製作場所：東京都内
- ② 架設位置：主桁製作場所より100 km
- ③ 架設条件：河川内より300 t吊クレーンにて1日で架設
- ④ 緊張材：SWPR 1S15.2BまたはCFRP ϕ 15.2 mm
- ⑤ 補強筋：SD345 D10またはGFRP 100 mmグリッド
- ⑥ 労務費：鋼材、FRPを問わず同額

(2) 割引率

LCCの検討を行う場合、将来の貨幣価値をどのように評価するかが結果に大きな影響を与えることが知られている。割引率とは将来の貨幣価値を現在の価値に置き換えるために用いられる指標であり、インフレ率や国債の金利等をパ

ラメータとして算出される。割引率を大きく想定すると、将来の貨幣価値を小さく評価することとなり、将来発生する維持管理に関するコスト負担を覆い隠す効果があるため、慎重に適用する必要がある。本検討では各ケースに対し、割引率を用いない（0%）場合と、国内で比較的用いられることの多い2%とした場合とでLCCを算定した。

2.6 LCC 算定結果

100年後のLCCを図-5、6に示す。図中の（ ）内の数値は、Case-1対策区分S桁を1.0とした場合の比率を表している。

(1) 割引率0%の場合

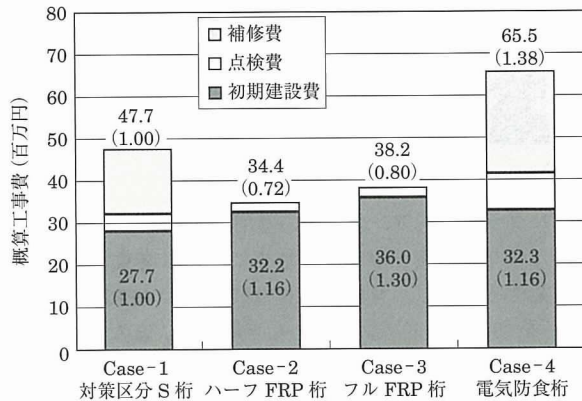


図-5 LCC (割引率0%)

初期建設費はCase-3フルFRP桁がもっとも高く、Case-1対策区分S桁の1.30倍であり、材料コストの影響が出ている。また、Case-2ハーフFRP桁とCase-4電気防食桁はともにCase-1の1.16倍となっている。しかし、100年間の維持管理コストを加えた総額（LCC）では、FRPを用いた2ケースがともに対策区分S桁より20%以上コストダウンに期待でき、FRPがLCCの低減に大きな効果のあることが分かる。逆に電気防食桁は対策区分S桁よりも維持管理コストがかかり、1.38倍となった。腐食性環境が厳しくなればなるほど、この傾向は強まっていくものと推測される。

(2) 割引率2%の場合

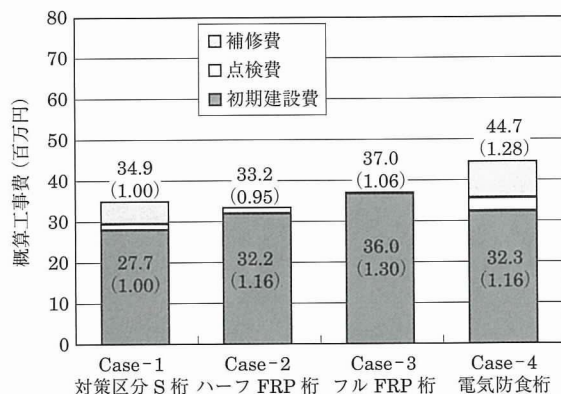


図-6 LCC (割引率2%)

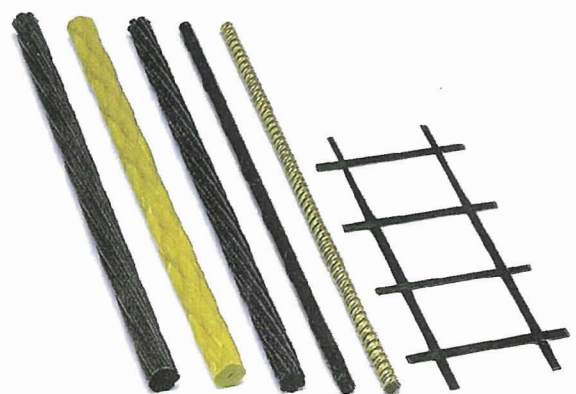
割引率2%を適用すると、維持管理コストは見かけ上小

さくなり、適用しない場合の40%程度となった。このような条件では各ケースのLCCが近接する。そのなかでも、ハーフFRP桁は対策区分S桁に比べ5%のコストダウンが可能である。フルFRP桁は先ほどと違い、補修不要のメリットが減じた分、6%の割高となった。電気防食桁は割引率を適用しても高く、対策区分S桁の1.28倍となった。

割引率をさらに大きくすれば（たとえば4%）、LCCの順位は逆転し、FRP補強材を用いたケースが割高になっていくものと予想されるが、先述のように維持管理コストを安く見積もる結果となり、LCCを算定すること自体の意味合いが薄れてしまうので注意すべきである。その点、FRP補強材を用いることは、「維持管理コストの予測と実質のギャップ」という不安材料を取り除くことができ、これは大きなメリットであるといえる。

3. FRP 補強材の適用事例

国内におけるFRP補強材の適用実績は現在約300件ある。適用理由としては耐食性、施工性、軽量等が多く、特殊な例として非磁性を利用したものもある。FRPの素材にはAFRP（アラミド繊維）、CFRP（炭素繊維）、GFRP（ガラス繊維）、VFRP（ビニロン繊維）などがあり、これら繊維をエポキシ樹脂、ビニルエステル樹脂等でロッド状、より線状、組紐状、格子状等に固化・成型する。FRP補強材製品の例を写真-1に、続いて適用事例を各分野ごとに示す。



左より、NACCストランド（CFRP）
FiBRA（フィブラ：AFRP）
CFCC（CFRP）
リードライン（CFRP）
テクノロジー（AFRP）
ネフマック（CFRP）

写真-1 FRP 補強材製品の例

(1) 新設橋梁への適用事例

この橋は岸壁と海上施設を結ぶ2径間のポストテンションとプレテンション併用単純桁橋である。橋長44.75m、幅員4.0mで、とくにポストテンション桁はCFRP緊張材（6φ12.5mm）を用いた3分割プレキャストブロック工法

を世界で初めて採用した（1996年竣工）。



写真-2 新設橋梁

(2) PC桁補強工事への適用事例

供用中の橋梁の桁補強に、外ケーブルとしてCFRP（11φ 12.5 mm）およびAFRP（7φ 14.7 mm）の緊張材が用いられた。FRP緊張材は高強度かつ耐食性に優れており、外ケーブル材料として好適である。とくに補修・補強の施工では、狭隘な足場内でケーブルを展開架設する機会が多く、FRP緊張材のもつ軽量というメリットが大いに生かされる分野である（1999年竣工）。



写真-3 PC桁補強

(3) 海洋構造物への適用事例

港湾施設のなかでも、栈橋床版の下面は塩分環境のとくに厳しい部位の一つである。写真のプレキャスト部材はCFRP φ 12.5 mmを緊張材に用いたPC床版で、部材敷設後に上部コンクリートを打設し、合成構造としたものである（1993年竣工）。



写真-4 海洋構造物

(4) 基礎構造物への適用事例

科学研究施設やスーパーコンピュータ施設の基礎構造に求められる条件として、非磁性があげられることがある。本例ではAFRPロッド（φ 12.7 mm）を補強筋として使用し、鋼材使用による磁場の乱れを防止する構造とした（2000年竣工）。



写真-5 基礎構造物

(5) グラウンドアンカーへの適用事例

このり面補強工事では、地中における腐食と急斜面での作業性を考慮し、軽量で耐食性に優れたAFRP（9φ 7.4 mm）をグラウンドアンカーとして用いた。また、AFRP製軽量受圧板との組み合わせにより、作業効率が大幅に向上した（1994年竣工）。



写真-6 グラウンドアンカー

(6) トンネル補修・補強への適用事例

農業用水路のトンネル部の覆工補修・補強部材として、CFRPグリッド（50 mmピッチ）を採用した。CFRPグリッドは軽量で施工性に優れ（トンネル壁面の凹凸に追従するよう施工できる）、増厚工の厚さを最小限（12.5 mm）とすることで流水断面の減少を抑えることができる（2003年竣工）。

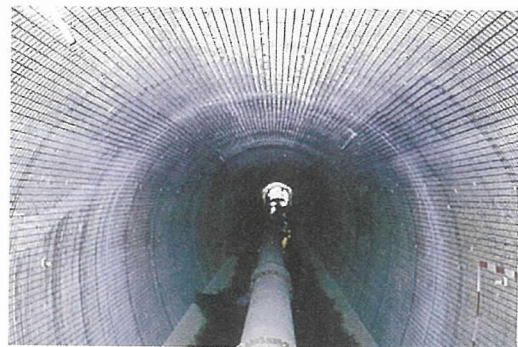


写真-7 トンネル補修・補強

4. おわりに

本報告ではFRPの高耐久性に着目し、FRP補強材を用いたコンクリート構造物と既往の技術で造られたコンクリート構造物とでLCCに関するシミュレーションを行った。その結果、FRP補強材を用いることでLCCの低減が十分可能であることが分かった。

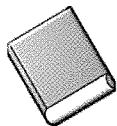
建設用先端複合材技術協会では、本報告の基となる活動として、FRP補強材のLCCに関する適用状況の調査、およびFRP補強材をPC橋に適用した場合のLCCのケーススタディを実施し、報告書としてまとめ、発刊してきた。

FRPが塩分環境下で腐食や劣化しないことはほぼ明らかであり、その優れた特性を利用した施工事例も数多くある。今後、FRPに関する研究がさらに進み、恒久的なコンクリ

ート構造物を造るうえでの決め手として、FRP補強材が健全な社会資本の構築に一層寄与することを願いつつ、本報告を終える。

参考文献

- 1) ACC 倶楽部：ライフサイクルコスト適用性検討研究会報告書、2002
 - 2) ACC 倶楽部：FRP補強材を用いたコンクリート構造物のライフサイクルコストのケーススタディー、2002
 - 3) 建設用先端複合材技術協会（ACC）：FRP補強材を用いたコンクリート構造物のライフサイクルコストのケーススタディー・2、2006
 - 4) 土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕
 - 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編、1996
- 【2010年2月17日受付】



刊行物案内

コンクリート構造診断技術

コンクリート構造診断技術講習会テキスト

2009年5月

定価 7,500円／送料 500円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会