

火災による損傷を受けた PC 橋の性能評価および補修 Assessment and Repair of a Fire-Damaged Pre-stressed Concrete Bridge

著：Mark de Melo, Rob Wheatley, Noel Gibbin, Mauricio Gonzalez-Quesada, Keith Harwood
訳：会誌編集委員会海外部会

火災を受けた PC 橋の補修および性能評価に関する研究事例は少なく、それらを適切に評価する指針に乏しいのが現状である。本文は 2011 年 4 月に火災によって損傷を受けた PC 橋の調査、性能評価および補修に用いられた手法を検証するものである。火災による損傷を受けた橋梁の試験、性能評価および補修に関する理解を深めることが本文の主眼である。

このディーンズブルック高架橋の一連の補修プロセスは、テクニカルレポート No.68「火災による損傷を受けたコンクリート構造物の評価、設計、補修 (TR68)」の妥当性を裏付けることとなった。全ステークホルダーの初動の速さと試験計画の精密さが、補修工事を進めるにあたりきわめて重要な事項であることが、本事例を通じて明らかにされた。本事例が提起するポイントは、重要なインフラの再構築が今後の補修工法の発展に貢献するであろうこと、火災による影響を評価するための標準化された試験方法の必要性の 2 点である。

キーワード：火災による損傷, PC 橋, 調査および補修, 性能評価, ディーンズブルック高架橋

1. はじめに

2011 年 4 月 15 日、ロンドン近郊 M1 高速道路のディーンズブルック高架橋の一部が廃棄物置場において発生した火災により損傷を受けた。この火災により、桁下面においてコンクリート表面の黒色化、コンクリートのはく離、鉄筋および PC 鋼材の露出などが確認され、桁自体が多大な損傷を受けている可能性が危惧された。

火災後に開始された一連の補修工事は 2011 年末に完了を迎えた。火災による損傷の影響の評価手法と補修方法について、いくつかの研究事例と参考文献が指針として引用されたが、主な参考文献として活用されたのが英国コンクリート学会のテクニカルレポート No.68「火災による損傷を受けたコンクリート構造物の評価、設計、補修 (以下、TR68)」であった。

本文はディーンズブルック高架橋の補修事例に関するケーススタディーについて述べたものである。本事例により得られた知見を通じて、今後更なる研究が必要となる領域が提示された。また、火災による損傷に関する検証と、補修工事にあたり実施された試験、評価、設計、補修に関する検討が行われた。

2. ディーンズブルック高架橋

M1 高速道路におけるディーンズブルック高架橋は、ジャンクション 2 とスクラッチウッドサービスを結ぶ接

続道路上の高速道路橋である。この接続道路はスクラッチウッドサービス内の多数の工業施設への主要アクセスであり、それら工業施設の多くは高架橋に隣接もしくは直下に位置していた。この工業施設から発生した今回の火災によって、ディーンズブルック高架橋は世間の注目を浴びることとなった。

本橋はもともと英国道路公社によって管理されていたが、現在では英国道路公社に代わって M25 拡幅工事の設計、施工、運営を担う特別目的事業体が管理運営している。

本橋はヘンドン都市高速道路プロジェクトの一部として 1964 年に建設された 3 径間の斜橋であり、径間長はそれぞれ 15.2 m, 23.5 m, 15.2 m, 斜角は 73°である。上部工は PC 桁と RC スラブからなる合成桁橋であり、橋台はフーチングにより支持される胸壁である。2 箇所の中間橋脚は各 5 つの楕円断面の RC 柱から成る。主桁は橋脚とラーメン接合される連続桁であり、橋台部においては弾性支承により支持される。また、橋軸直角方向に隔壁が 2 メートルごとに設けられている。

火災前に実施されていた通常点検において、本橋は良好な状態であったことが確認されており、英国道路公社が要求する性能を適切に保持しているとの評価を受けていた。側径間部に関しては、直下に工業施設があり、セキュリティフェンスが桁下面いっぱいまで設けられていることから、アクセスが非常に困難となっている。点

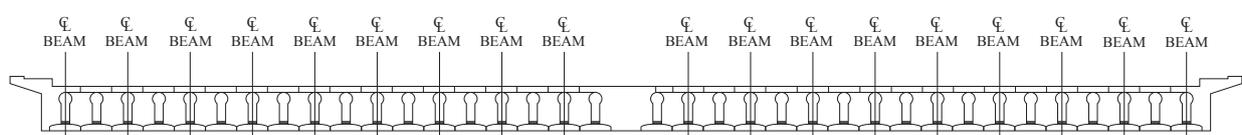


図 - 1 主桁断面図

検員は施設内部への立ち入りが困難であったことから、近年は公共エリアからの遠望目視による点検を行うに留まっていた。

3. 発生事象

本橋の火災が最初に報告されたのは、2011年4月15日（金）4:12であった。火災は放火により引き起こされ、廃棄物置場が中心となっていた。火災は、無数の廃棄物収集容器や廃棄物処理車が置いてある橋梁下にある近くの廃棄物収集関連施設まで広がった。廃棄物収集容器は3段積にされていた。廃棄物収集容器が橋梁下面近くにあったことは、橋梁の材料損傷に繋がった（図 - 2）。



図 - 2 火災直後の状況

ロンドン消防隊は、廃棄物置場のガスボンベの爆発防止に専念した。優先順位がガスボンベの温度上昇を避けることにあったため、橋梁直下の火はそのままにされ、橋は長時間、温度上昇する状態に置かれ、温度は800℃程度に達したと推定される。火災発生後、およそ3時間で橋梁下面からのコンクリート片のはく落が確認された。

4. 火災直後の対応

火事はタイミングが悪く、大きな影響を及ぼすこととなった。FAカップ（イングランドで開催されるサッカー大会（訳者注））の準決勝がウェンブレイ（Wembley）での開催が予定されており、ロンドンマラソンも予定されていた。自動車道が閉鎖され、過激なメディアからの興味と当局側からの注目を集めた。

消防隊から現場を引き渡されてすぐに、仮設の支持材が2m間隔で設置され、自動車道が段階的に再供用された。橋梁の調査は月曜日から行われ、初期の損傷評価では下段のPC鋼材は無視し、上段のPC鋼材の引張強度は元の75%と仮定する提案がなされた。これらの数値は、初期の計算と道路を片側3車線で時速50km以下としてHB荷重（英国基準における大型車荷重（訳者注））を載荷させないことを条件に再供用させることを保証するものであった。

5. プロジェクトの立上げ

復旧プロジェクトがTR68に記載されている以下の手順に従って立ち上げられた。

- 予備検査および初期損傷評価
- 試験および詳細評価
- 構造部材の補修設計
- 補修工事

戦略的位置や政治的な側面から、速やかな補修プログラムに対するプレッシャーがあった。各段階は、すべてが順番に進められたのではなく、一部は同時並行的に進められ、各種の検討は先行して行われ、次の段階に影響する事実が得られるまで幾重にも再検討がなされた。中心チームは、プロジェクトマネージャの指名とともに、直ちに立ち上げられた。

調査と復旧設計は、BD2/05に準拠した通常の承認プロセスとは異なり、第三者チェック（カテゴリーⅢ）による保証という条件が必要になった。プロジェクト当初から、本プロジェクトの難度や重要性が理解され、協力的な協働作業と初期段階からのすべてのパーティーが参加したことは、早期の関心とコンセンサスを得るために有益であり、迅速な設計へと繋がったことは明らかだった。英国道路公社は、現場調査の繰り返しを防ぐため、試験計画がすべての点において設計者と検査者で合意されることになるように熱心に取り組んだ。

すべてのメンバーが参加しての会議（ワークショップ）は、ブレインストーミングや議論および合同での意思決定に役立った。この会議は、試験計画や試験結果の評価にも用いられた。この設計会議がダイナミックであることの一例を示すと、現場での応力試験の結果が電話で会議メンバーに直接伝えられるなどしたことがあげられる。順序立てて行われる通常の設計と比べて、本プロセスは全パーティーの士気を上げ、情報伝達を円滑にすることにより良い影響を与えた。初期段階では、損傷を修復する多くの選択肢の利点と欠点が議論された。

こうした、ある方法を選択する理由の見える化の改善は、早期の合意および不都合や工程を遅延させる見えない問題点のリスクを低減することに繋がった。これはとくに知識を有する検査者にとって有益であり、進行中の設計に対する設計思想にも影響した。設計者にとっては、もっとも早い段階で英国道路公社の審査チームによる助言と方向性を得ることができた。

初期の目視検査およびハンマーによる打撃テストから、損傷は南側の径間のほぼ全幅にかざられることが分かった。橋梁の下面に生じた火災による典型的な損傷事例を示す（図 - 3, 4）。PC鋼材は露出し、広範囲のコンクリートのはく落が見られる。多くの場合、相当な長さの桁の隅角部がはく落して周囲の鉄筋とPC鋼材が露出している。

6. 損傷の評価

損傷部材の材料試験により、TR68や参考文献で示さ



図 - 3 露出した鉄筋

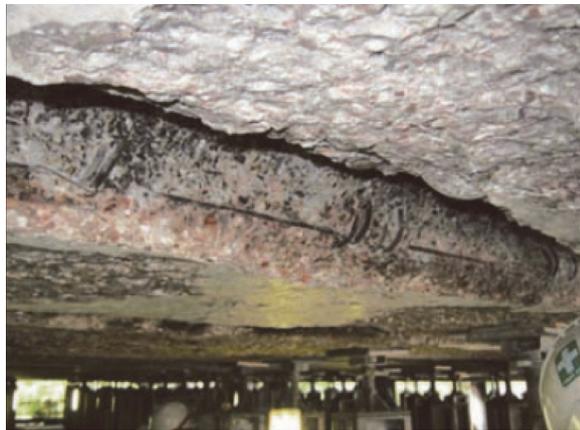


図 - 4 下面のはく離と隅角部の脱落

れた損傷の兆候を確認した。コンクリートは骨材、中空部でピンク色に変色し、骨材上を水平に微細なクラックが発生しており、図 - 4 で示されるように、いくつかの桁の隅角部がはく落していた。

損傷を受けた場所は温度が最大となる廃棄物収集容器や廃棄物処理車の位置に密接な関係があった。

目視検査に加えて、桁下面の非破壊シュミットハンマー試験を実施した。

シュミットハンマー試験により、火災による影響を受けている場所を識別し、図 - 5 に示すような分かり易い方法で結果を示すことができた。

試験ではまたコンクリート表面における火災の影響が目視や打音検査によって推測した範囲よりも広範囲にわたっていることが明らかになった。一番深刻な損傷を受けたと判断されたので、火災を受けた構造に必要な適切な性能を分析するために詳細な材料検査を実施した。

橋梁の他の部材に関しては、南側の橋台面を覆うカソード防食が火災によって壊された。橋台自体はこの層により保護され、主な損傷は見られなかった。また、橋脚、中央径間、北側の径間における構造の損傷も見られなかった。壁高欄は、広範囲に損傷を受けた東側の耳桁上に位置していた。いくつかの火災源のもっとも近くであった弾性支承の表面も最大 3 mm の深さで炭化しており影響を受けていた。

7. 材料検査

消防隊は火の温度が最大 800℃ に達していると推定していた。火災後の点検でコンクリートの多大なはく離、

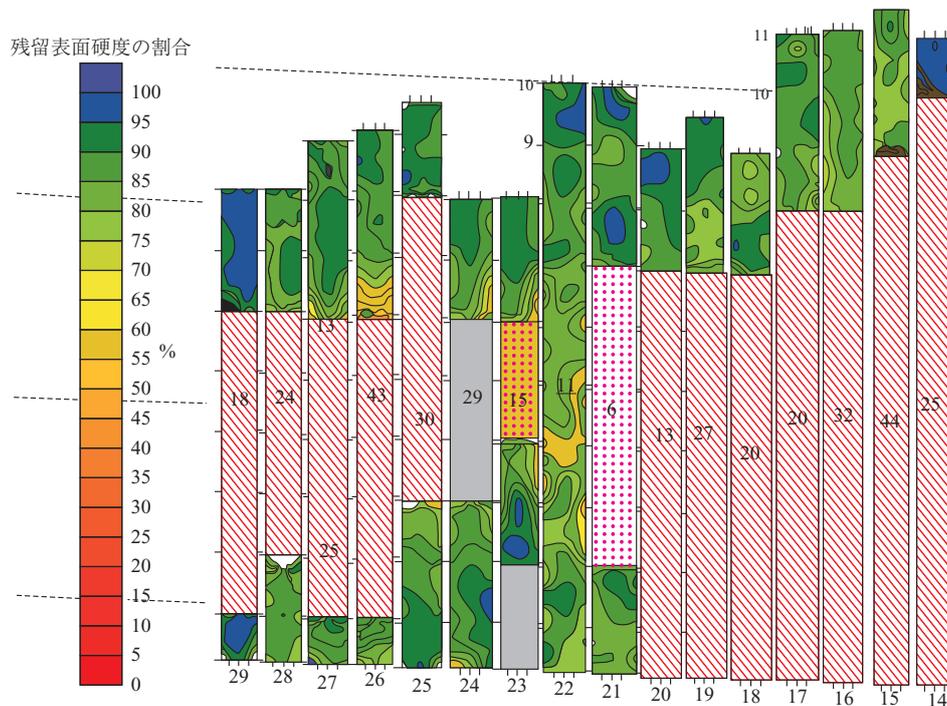


図 - 5 シュミットハンマー試験結果の解釈

(ハッチ部の破碎、損傷を受けていない桁との相対的な表面硬度の割合を示す)

PC 鋼材の露出が確認された。The Concrete Society 2008, *fib* 2008, CIB W14 のようなコンクリートの火災による損傷の参考文献によると、コンクリートや鋼が 300℃ 以上の温度下では、性能が大きく変化することが明らかにされている。鉄筋に関しては、500℃ 以上の温度下では強度の長期的な低下がみられる。TR68, CIB W14 ではまた、火災により損傷した鋼材のあるプレストレス部材の修復が困難で、一般的に取り壊して再構築することを推奨している。取り壊しは社会的に影響が大きいのが明らかだったので、補修後に安全に共用できるかどうかコンクリートや鉄筋や PC 鋼材の性能を材料的な観点から確かめることが焦点となった。表 - 1 に示す試験目的は、構造の詳細評価や補修設計にとって必要となる情報を得るために合点していた。

表 - 1 試験目的

Tests	Purpose
岩石学的試験	火災による損傷深さ
コア試料の圧縮試験	コンクリート強度
鉄筋の室内試験	鉄筋, PC 鋼材の状態, 残留引張強度
固有振動数試験 (非破壊) P-3500 携帯用歪計と CEA-06-250UN-350 ひずみゲージを使用した切断後の変形測定	切断後の初期と最終ひずみの測定によるプレストレスロス
目視検査と専門家による調査	弾性支承の状態
シュミットハンマー試験	表面に影響を与えた炎の広がり
中性化深さ, セメント種類, PH, 塩化物含有量	他の変化

8. コンクリート

桁の試験計画に考慮すべき事項は、PC 鋼材間距離が 25 mm であったことである。数本の $\phi 7$ mm の鋼材を切断せずにコンクリートコアを取り出すことは不可能であ

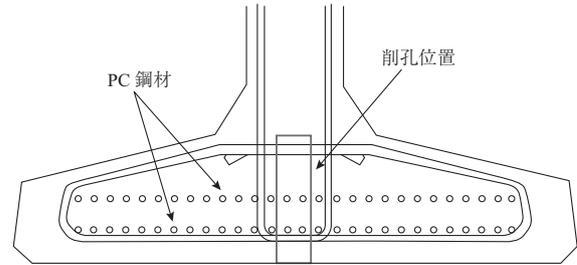


図 - 6 下フランジ内のコンクリート削孔位置

ったが、鋼材を切断することは残存強度を減らすこととなる。コア削孔は橋梁への過度な損傷をさけつつ十分な材料データを入手できるように計画した。鋼材を極力切断しないために $\phi 50 \times 200$ のコアを選択した。図 - 6 に示すように、数本の PC 鋼材を切断し、桁のウェブに向かって垂直に 4 体のコアを採取した。試料の採取は、とくに損傷が厳しかった箇所で行った。深い位置の試料では岩石学的評価、薄片の岩石学的顕微鏡試験、圧縮強度、塩化物含有量、中性化深さ、PH 値を測定した。さらに、上段の鋼材を切断しないですむ 80 mm より浅いコアを岩石学的評価、塩化物含有量、中性化深さ、PH 値を取得するために損傷した各桁から採取した。

岩石学的試験からの結果により、ある場所では桁の表面が 600℃ 以上の温度にさらされていた。さらに、桁の大部分で張出し床版部は 300℃ 以上にさらされていた。これにもかかわらず、図 - 7 に示す岩石学的分析では、熱浸透が最初に初期外観検査で懸念された深さよりも深くはなかった。CIB W14 に提案されているように、変色の一群が最大 20 mm 厚となっており、はく離していない箇所では、熱が桁の表面近くで残存しコンクリートを損傷させることが論証されている。これははく離していないコンクリートが PC 鋼材の位置において急激な温度上昇から保護するために十分な断熱を行っていたことを示している。

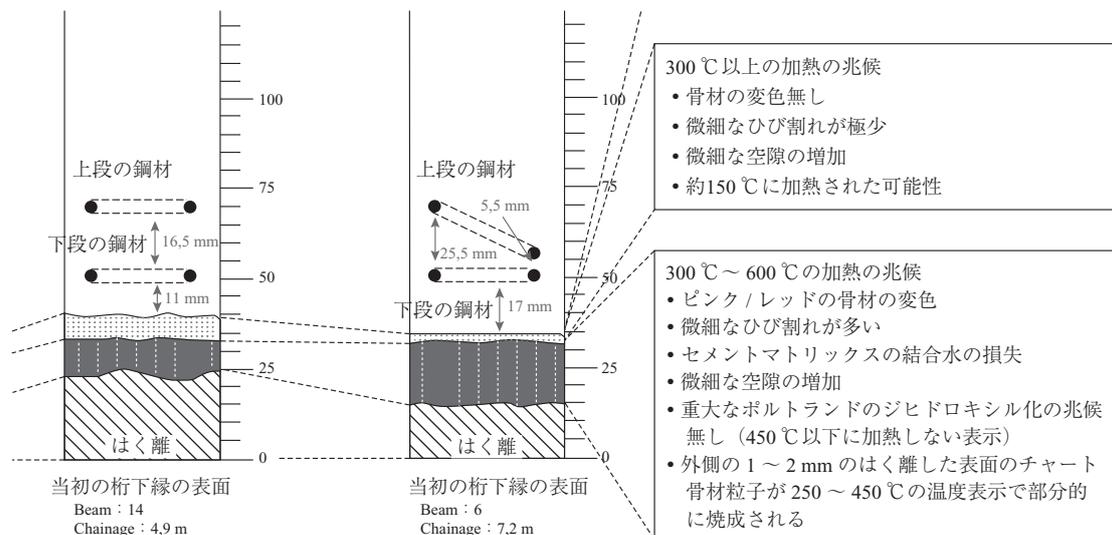


図 - 7 標準的な岩石学的試験結果

岩石学的試験では火災の到達温度に上限があり、脆弱なコンクリートであっても鉄筋を火災から守るための保護層として作用することを示している。また、岩石学的試験結果をコンクリート損傷と同じくらいプレストレスロスの予測にうまく使用できるように、試験の位置を選択する必要があった。

9. 鉄筋と PC 鋼材

試験室内で試料の引張強度試験、化学分析、硬さ試験および顕微鏡検査を行った。PC 桁は $\phi 7\text{mm}$ 、引張強度 1545MPa の PC 鋼材で緊張した。

試験結果から、鉄筋と PC 鋼材の材料特性は、火災による大きな影響を受けていなかったことが証明された。PC 鋼材の脱炭素化は鋼材の外縁からほぼ 0.1mm に限定されており、最悪のケースの鉄筋でも 0.3mm であることが組織試験からあきらかにされた。硬さおよび引張強度は影響を受けていなかった。CIB W14 では PC 鋼材の強度は、温度が 300°C 以上になるときに影響を受けると提示されており、この結果は、PC 鋼材が 300°C 以上の温度にはさらされていないことを示している。引張試験では、鉄筋の応力 - ひずみ関係についてはすべての値を得ることができたが、PC 鋼材については、試料破壊時の損傷を回避するようにゲージが取り外されたので、鉄筋と同等のデータを得ることができなかった。

ひずみ測定は、 0.2% のひずみ時の耐力以上になった場合、信頼性の高い結果を得られるほど正確なものではなかった。そのため、記録されたひずみから値を取り PC 鋼材の安全側の終局ひずみとし、PC 鋼材の終局ひずみ 0.0085 とコンクリートの終局ひずみ 0.0035 以内で終局時の計算を調整することとした。

10. 残存プレストレス

TR68, fib 2008 および CIB W14 を含む参考文献では、PC 鋼材が 300°C 以上の温度にさらされると、強度がかなり減少すると示されているが、その残存強度を推定するための性能試験については言及されていない。プレストレスのロスは構造物の安全性を決定する重要な要素と考えられるため、以下の2つの標準的でない試験を実施した。切断後の鋼材の変形を測定する試験（ひずみ開放試験）と固有振動数の測定である。

ひずみ開放試験は、PC 鋼材が切断された場合に観察される変形を計測することで、残存プレストレスを直接的に得ることができる。参考文献には、ひずみ開放試験と理論的に予測されたプレストレスのロスとの良い相関関係が示されている。

加えて、非破壊の固有振動数試験を行った。残存プレストレスは曲げ剛性のほとんど無いピン支点に固定された PC 鋼材の固有振動数の測定結果から推定した。実際には、試験結果は、試料端部の固定法や剛性、PC 鋼材とコンクリートの付着によって左右されてしまう。これらの試験結果は、主に残存プレストレスや火害の指標として使用された。

PC 鋼材の残存プレストレスは、直接的な測定と岩石学的顕微鏡試験の結果を基に PC 鋼材の受熱温度を評価することで得たプレストレスのロスの間接的な測定とを合わせて推定された。図 - 7 に示す試験結果は、かぶり確保できる場合は 50mm あれば 100°C を超える PC 鋼材の加熱を避けるのに十分であることを示している。TR68 は、この程度の温度ではプレストレスの $10\sim 15\%$ の損失と強度のごくわずかな損失を引き起こすことが示されており、これは試験の結果と良く相関している。

火に直接さらされた範囲の PC 鋼材は、プレストレスの重大な損失を被った。このような2つの範囲では、残存プレストレスが 9.6kN まで減少し、損失は 60% だった。軸方向に 1m 離れた箇所採取した試料では、PC 鋼材は火にさらされておらず、かぶりも残っており、プレストレスのロスも同程度ではなかった。したがって、プレストレスのロスは火にさらされた PC 鋼材に限られていると考えられる。プレストレスのロスの程度は補修作業中に再度確認された。火にさらされた PC 鋼材を対象に行った打音検査では、PC 鋼材とコンクリートの付着に影響を受けた可能性はあるが、プレストレスのロスが無い場合とある場合では明確な違いがあることが明らかになった。

11. 性能評価と補修設計

性能評価と補修設計は橋梁設計マニュアル (Design Manual for Roads and Bridges, BD44/95, BD24/92 (BS5400-4)) に沿って行われた。5時間もの火にさらされたにも関わらず、部材が初期のプレストレスを保持しているという事実は、今回の補修計画にとって有益なことであった。耐荷性能は減少したが、要求性能は十分保持されていた。使用限界状態は減少し、補修部材のひび割れ制御法はクラス 2 とした。なお補修部材には PC 部材を使用していない。橋の損傷は広範囲にわたったが、大部分は十分に終局限界に対して余裕があり、桁の耐久性能は作用荷重に対し十分であった。それゆえ補修計画は部材、橋台そして支承の耐久性の保持を目的に計画された。

損傷したコンクリートをウォータージェット工法により取り除き、補強用メッシュを設置した後、コンクリートを吹付けた。まず専門業者とともに、補修計画と補修対象部材の選定を行った。代表的な補修計画の詳細を図 - 8 に示す。薄い色は補修において研ってよい範囲を示している。コンクリートが取り除かれ、外部からの補強を施されたうえで、新しくコンクリートを打ちかえた。その際、追加鉄筋に対するかぶりを確保するため、濃い着色分だけ増厚してコンクリートを打ちかえた。PC 鋼材についても、補修中に下段の鋼材が露出しないよう、定着させ続けなければならなかった。それゆえ、補修計画では、定着部の支圧破壊についても考慮する必要があった。

補修作業中の監督は常時、火災による損傷を受けた構造物の補修経験がある技術者により行われた。損傷の無

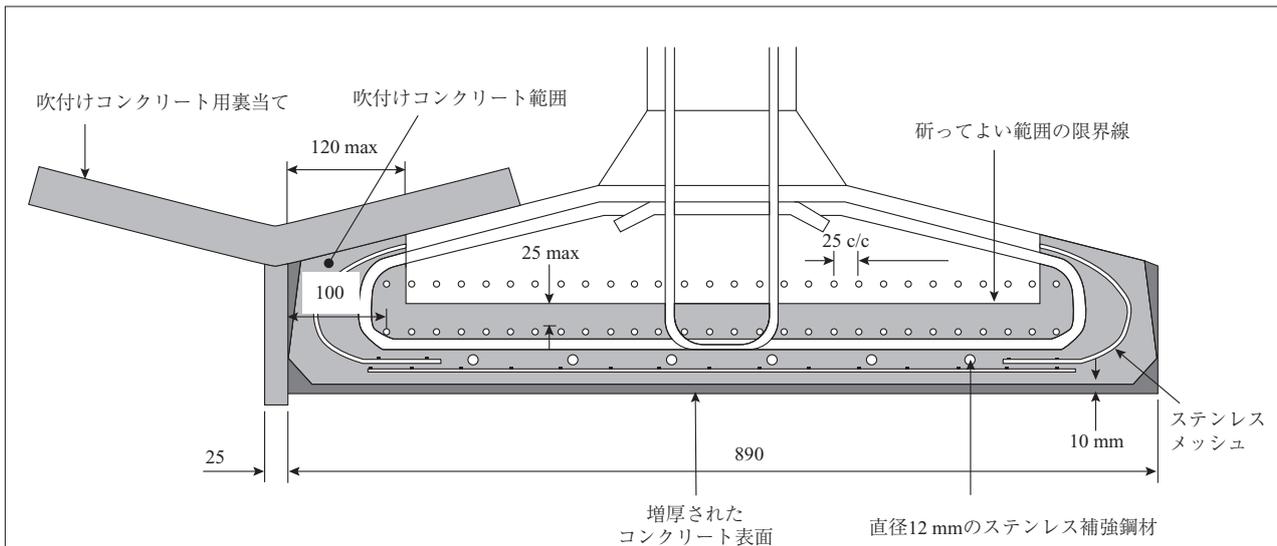


図 - 8 代表的な補修計画

い範囲に影響を与えずに、損傷を受けたコンクリートすべてを取り除くことが特に重要となる。これは補修作業における信頼性が高いレベルにあるということの証明でもある。

橋梁上での補修作業による交通渋滞への影響について、完全な通行止めではなく、部分的な通行止めを抑えることが重要であった。

損傷したコンクリートを研るため、ある一つの部材から支柱をとりはずす必要があったが、これはこの段階でその部材が弱点となることを意味した。コンクリートを研った後、支柱の頂部と部材の間にモルタルを打設し、支柱は再設置された。交通管理のなかで、補修作業帯と走行車線とをきちんと分けることにより補修作業は段階的に実行された。もし補修作業が走行車線に接近する場合は、作業を夜間に制限した。そして振動は制限値である 5 mm/s^2 以内であることを確認しながら行われた。計測値はおおむね $1 \sim 3 \text{ mm/s}^2$ であった。補修前後の桁下面を図 - 9、10 に示す。



図 - 9 補強前の桁下面



図 - 10 補強後の桁下面

12. 結 論

PC 橋の補修および性能評価に関する指針は不足している。かざられた研究プロジェクトと火災による損傷を受けたコンクリート構造物に関する資料ができたことは有益であった。そして 2011 年 4 月の火災により損傷を受けたディーンズブルック高架橋に関する調査、評価、補修方法から学ぶべき教訓は下記のとおりである。

- 本橋の補修を通じて得られた経験は、火災による損傷を受けた PC 構造物の構造性能を評価する TR68 の妥当性を裏付けることとなった。かぶりが残った部分については、火にさらされた後でも深刻な損傷には至らなかった。火に直接さらされた PC 鋼材の損傷は大きかったが、特定箇所に限定されたものだった。
- クラス 1 (フルプレストレス) の使用限界状態設計と終局限界状態評価との間の範囲は、耐力上の余裕の有効な指標となる。
- 初期段階での計画の立案と承認に関する全ステークホルダーの初動の速さが、プロジェクトの促進に非常に重要であった。

○ 海外文献 ○

- 試験計画の精密さが、火災による損傷を受けた PC 橋にとってきわめて重要となる。たとえば、コンクリートの部材厚方向の温度分布を把握するための岩石学的検査である。
- この計画の本質は、標準化された試験基準が無いなかで、供用下にある PC 鋼材の残存プレストレスの評価を行ったことである。これは将来の研究にとって価値のある分野である。
- この戦略的な取組みと重要なインフラ構造物の再構築のための費用を考えると、PC 構造物についてさらなる試験を行うことと補修方法を発展させることの意義は大きいと考えられる。

This article was first issued in SEI (*Structural Engineering International*), August 2014, page 408-413

* : 会誌編集委員会海外部会委員
秋山 博 (株) 錢高組
横田 剛 (株) ピーエス三菱
三浦 廣高 (鹿島建設 (株))
田原 徹也 (首都高速道路 (株))
田中 慎也 (株) IHI インフラ建設

【2014年12月1日受付】



図書案内

PC 技術規準シリーズ

コンクリート構造設計施工規準 —性能創造型設計—

定 価 4,000 円 / 送料 300 円

会員特価 3,400 円 / 送料 300 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編
技報堂出版