

報告 来島大橋アンカレイジにおけるマスコンクリートへの アフターボンド鉄筋の適用

増井直樹^{*1}・長谷川芳己^{*2}

要旨：来島大橋4 Aアンカレイジのマスコンクリートを平面的に4つのブロックに分割し、各ブロック毎に層状に打設し、打設後ブロック継目をグラウトにより一体化した。グラウトに必要な継目開度（開き幅）を確保し、継目を貫通する鉄筋の応力を軽減するため、グラウト完了までコンクリートとの縁を切り、その後上部工載荷までには付着を確保できるアフターボンド（硬化時期制御型エポキシ樹脂充填）鉄筋を開発し、同鉄筋を用いて継目の設計を行った。解析値は、実測結果と整合しており、アフターボンド鉄筋の適用による効果および継目設計方法の妥当性を確認した。

キーワード：マスコンクリート、ブロック分割、アフターボンド鉄筋、継目、耐久性

1. はじめに

長大吊橋のアンカレイジは、一般にその寸法が大きいため、躯体を平面的に複数のブロックに分割し層状に打設される。この場合、ブロック間の鉛直打継目（以下「継目」という）の一体化の方法として、コンクリートを最終安定温度まで冷却するためのクーリングを実施した後、ブロック間に設けたスロット（溝）にコンクリートを打設する方法と、収縮継目にグラウトを行う方法がある。ここでは、構造物規模、施工性を考慮し、後者を選定した。また、吊橋のケーブルを支えるための大きな荷重が作用する構造物であることから、鉄筋量も多く、打設ブロック間を貫通する鉄筋（以下「貫通鉄筋」という）も数多く配筋されている。しかし従来より、クーリングによる収縮、グラウト注入圧により貫通鉄筋に発生した応力が残留すること、貫通鉄筋の拘束により継目での開き幅（以下「継目開度」という）が小さくグラウトが充填不足となること、それに伴う貫通鉄筋の防錆が検討課題となっていた⁽¹⁾。これらの課題への対応として、来島大橋におけるアンカレイジでは、付着（硬化）時期を任意に制御可能なエポキシ樹脂（以下「アフターボンド樹脂」という）を塗布した鉄筋（以下「アフターボンド鉄筋」という）を開発し、貫通鉄筋として用いることにした。本論では、アフターボンド鉄筋の開発概要、同鉄筋を用いた継目の設計方法、および解析結果と実測結果との比較を行い、同鉄筋の継目への適用効果について報告を行う。

2. ブロック工法の概要および課題

来島大橋4 Aアンカレイジ（図-1）のようなマスコンクリートでは、打設時に生じるセメントの水和熱が逸散しにくいため、部材内部の温度が非常に高くなる。温度降下はコンクリートが硬化した後に生じるため、温度収縮は周辺に拘束され、部材内部に引張応力が生じ、温度ひび割れが発生する可能性がある。温度ひび割れの制御は、構造物の安全性・耐久性の確保にとって非

*1 （株）大林組 土木技術本部技術第五部技術課課長、（正会員）

*2 本州四国連絡橋公団 工務部工務第二課課長代理

常に重要である。材料・配合、施工、設計の各段階にて対策は講じられており、本アンカレイジでは施工上の対応として、ブロックに分割して打設する工法を採用した。本工法は、アンカレイジを平面的に4基のブロックに分割し（図-1）、各ブロックを層状に順次打設する。上部まで構築した時点で、躯体全体にクーリングを行い、躯体内の温度を降下させる。この温度降下による収縮変形をブロック間の継目に集中させ、開口した継目を確実にグラウトで充填し、構造物の一体化を確保する。しかし、従来のブロック工法では、以下の事項が課題とされてきた。

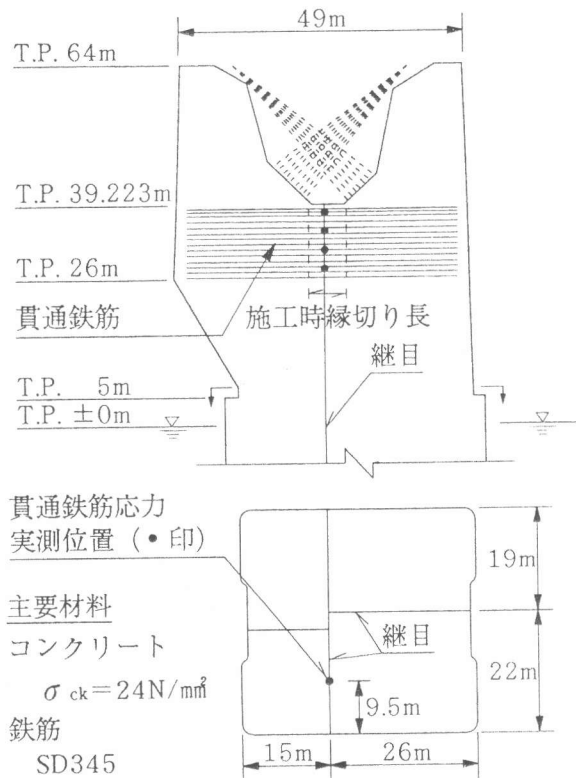


図-1 来島大橋4Aアンカレイジのブロック分割および主要材料

- ①ブロック継目を貫通する鉄筋の施工時応力の発生と残留（過応力）
- ②継目グラウト充填性向上のための継目開度の確保
- ③継目の耐久性向上のための貫通鉄筋の防食すなわち、従来の工法では、継目貫通鉄筋に大きな施工時応力が発生し完成後も残留するため、供用中に作用する荷重によりひび割れが生じやすくなること、また、躯体と同等以上の強度を有する継目グラウト充填の不確実性等の課題があった。来島大橋4Aアンカレイジでは、“アフターボンド（後付着）鉄筋”を適用することにより、上記各課題に対応することとした。

- ①施工時において、継目付近にて、貫通鉄筋とコンクリートとの縁を切ることによって、貫通鉄筋の施工時応力を軽減する。
- ②上記縁切りにより、継目グラウトが確実に実施できるだけの継目開度を確保する。
- ③継目グラウト注入後、主要上部工荷重載荷時までには貫通鉄筋はコンクリートと一体化し、継目の耐久性を確保する。

3. アフターボンド鉄筋樹脂の開発

アフターボンド鉄筋とは、工場にて鉄筋をシースに挿入し、その隙間を硬化時期制御型エポキシ樹脂にて充填した鉄筋である（図-2）。従って、現場では、工場製作されたアフターボンド鉄筋を配筋するのみで、一定期間流動性（縁切り）を保った後硬化を開始し、主要上部工荷重作用前には完全硬化し、コンクリートと一体化するものである。これにより、コンクリート打設後、所要期間コンクリートと鉄筋との縁切りを行い、その後、一体化の時期が自在に制御できる。また、鉄筋は防食効果に優れたエポキシ樹脂によって被覆されていることから、高い耐久性も確保される。なお、従来より同様の性質を有する樹脂が適用されているが、本構造物では流動性を保持する期間が0.5～1.5年程度と非常に長いこと、また、鉄筋周辺のコンクリートの温度履歴が作用することを考慮して、実験により樹脂の温度変化をも考慮した硬化特性を検証した。当該アンカレイジに用いたアフターボンド鉄筋の径は、D51, D38, D32であり、総本数約1,700本（先行プロ

ック、後行ブロック各850本)である。

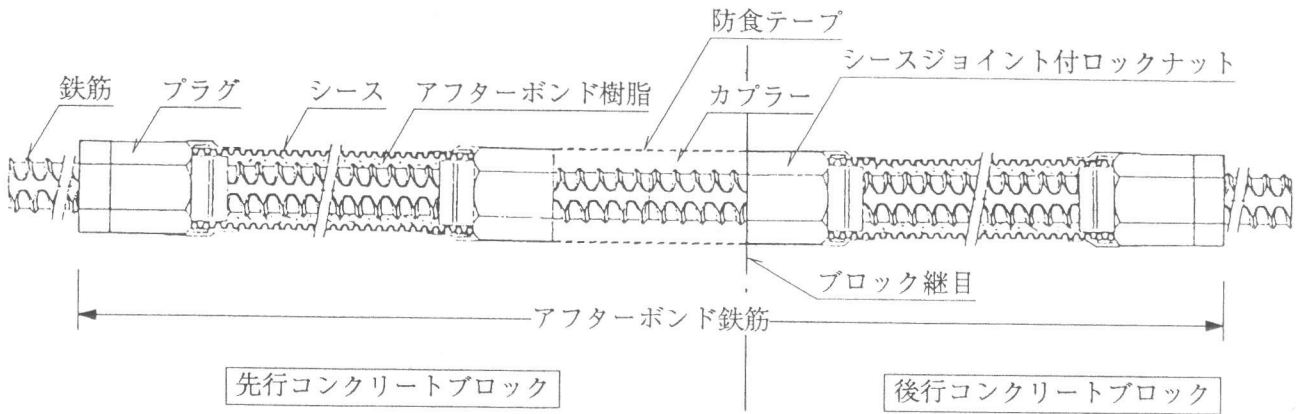


図-2 ブロック継目に設置したアフターボンダ鉄筋構造図

4. アフターボンダ鉄筋を用いた継目の設計

4.1 設計条件

アフターボンダ鉄筋を用いた継目の設計条件は、以下の通りである。

- ①継目グラウト充填のための所要継目開度——最大グラウト圧作用時0.8mm以上、最小グラウト圧作用時0.1mm以上（グラウト材料の充填性およびグラウト中の気温変化が開度に及ぼす影響を考慮）、なお、継目部に作用する引張力はすべて鉄筋により負担されるため、開度の最大値は定めていない。
- ②貫通鉄筋の過応力制限値——最大グラウト圧作用時 $80\text{N}/\text{mm}^2$ 以下（供用時荷重に対するひび割れ制御を考慮）
- ③樹脂の所要硬化特性——継目グラウト完了まで未硬化、かつ補剛桁架設前までに硬化完了（図-3 参照）

樹脂の硬化特性は、図-3に示すように、樹脂の未硬化状態を示す指標として稠度（自由落下した円錐の貫入量 JIS K 2220）

を用い、他方、硬化完了を示す指標として圧縮強度を用いる。なお、事前に実施した未硬化・硬化時の樹脂の力学性能試験結果より、付着が無視できる“未硬化状態”とは稠度50以上の状態を示し、“硬化完了”とは樹脂と鉄筋との付着強度以上となる時の樹脂の圧縮強度であり、 $60\text{N}/\text{mm}^2$ 以上に到達した状態を示す。樹脂と鉄筋との付着強度は、

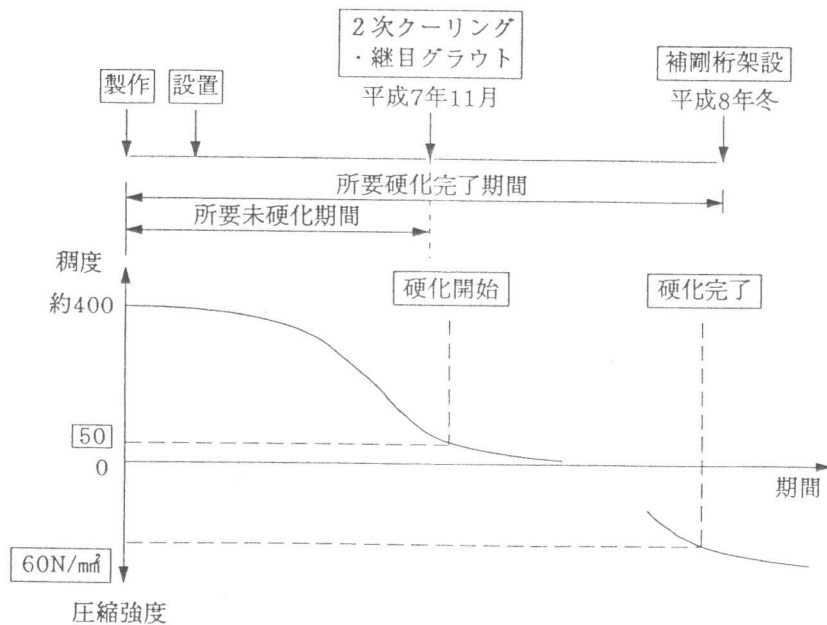


図-3 アフターボンダ樹脂の設計硬化条件

2~3N/mm²であり、コンクリートの場合とほぼ同等である。

4.2 継目開度および継目貫通鉄筋応力の解析

(1) 解析方法

本アンカレイジにおいては、躯体コンクリートへの拘束を軽減し継目開度を増加させることと、過応力を低減することを目的に、継目付近にてアフターボンド鉄筋により貫通鉄筋とコンクリート間の付着切り（縁切り）を行うことにした。本解析では、継目開度および継目貫通鉄筋応力に最も大きな影響を及ぼす縁切り長さをパラメータに選定し、FEM解析を用いて所要の縁切り長を決定した。

(2) 解析モデルおよび作用荷重

2次元FEM解析（平面ひずみ解析）を用いて、橋軸および橋軸直角方向の各ブロックの中心を通る4つの断面を検討した。本報告では、このうち、完成後に大きな荷重作用を受けることから、特に多量の貫通鉄筋が配置されている橋軸方向断面における検討を示すこととする。解析モデルを図-4に示す。継目は図-5に示すように、継目間に鉄筋もしくはコンクリートを模擬したバネ要素を介在させることでモデル化した。貫通鉄筋が設置される上部のブロック間では、継目貫通鉄筋を模擬し、縁切り区間端部をつなぐバネ要素を設定し、継目間の力の伝達が行えるモデルとした。一方、貫通鉄筋に比べはるかに径が小さく配置間隔が大きいリフト筋（縁切り無し、非構造鉄筋）を用いる下部（T.P.5~26m）のブロック継目は、引張時にリフト筋の剛性、圧縮時にコンクリートの剛性をもつバネ要素とした。作用荷重は、図-6に示すように、自重、グラウト注入圧（25~80KN/m²）および温度荷重である。

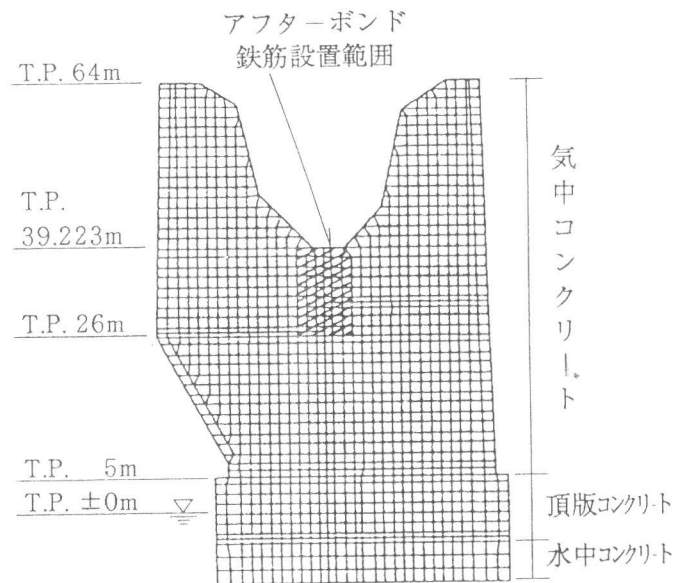


図-4 解析モデル

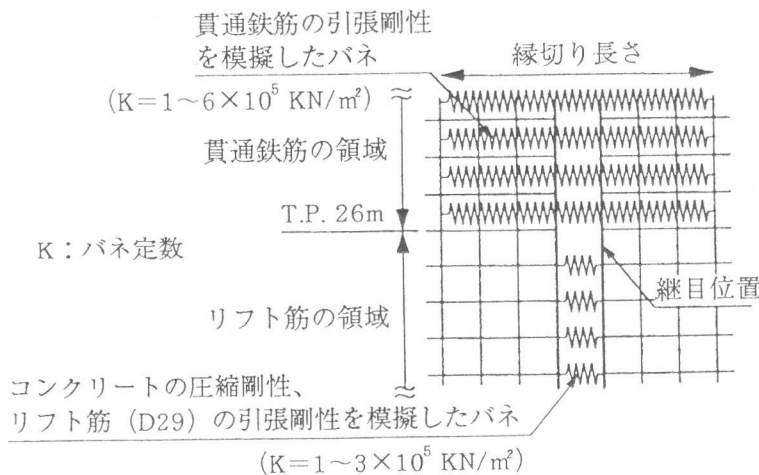


図-5 継目解析モデル

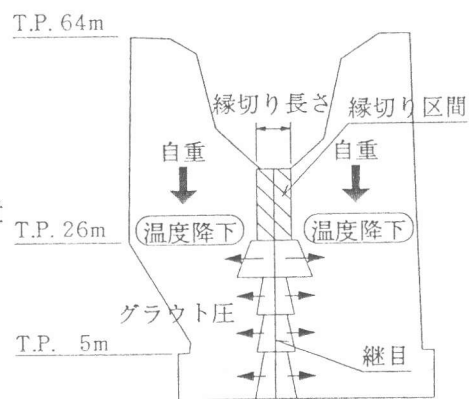


図-6 作用荷重模式図

(3) 解析結果

①継目開度（グラウトの充填性）

縁切り長さが 1.2m, 3.0m, 4.0mの場合につき、最小開度を算定したところ、最大グラウト圧作用時、各々0.4mm, 0.8mm, 1.2mmであった。これより、設計条件を満足するため、縁切り長を3.0mとした。また、最小グラウト圧作用時の開度の解析結果を図一七に示しており、所要開度（0.1mm以上）が得られていることを確認した。

継目開度の一般的な傾向を、要因別に以下に示す。

温度降下による開度：

T.P. 20m～28m付近のリフトは夏期打設であるため、他のリフトに比べ温度降下量が大きく、開度も大きくなっている。一方、継目の上部および下部では、他のリフトに比べ温度降下量が小さいため、見かけ上膨張することとなり継目は接触する結果となる。

自重による開度：

T.P. 26m付近を境界に、開度特性に変化が見られるのは、貫通鉄筋による拘束のため構造系が変化し、開度が小さくなるためである。

グラウト注入圧による開度：

荷重作用は構造系が変化した後であるため、貫通鉄筋による拘束の影響が小さく、全域においてほぼ均一な開度を生じる。

②貫通鉄筋応力

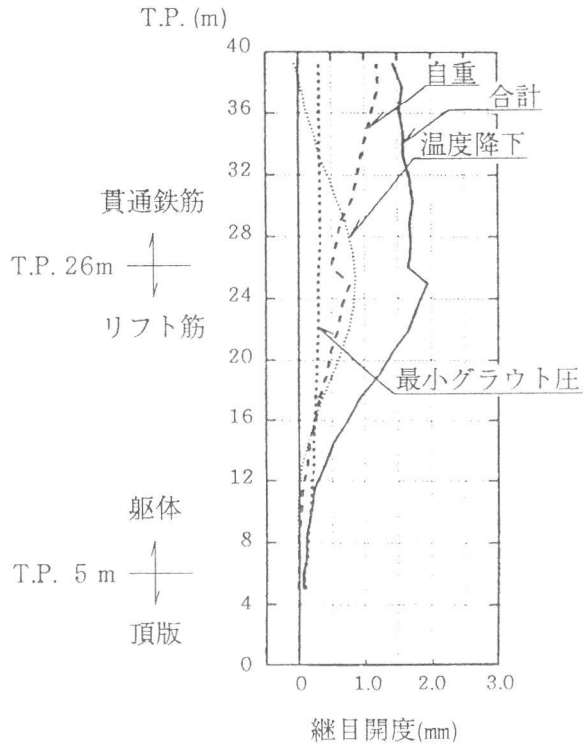
縁切り長さ3.0mの場合の貫通鉄筋の応力の解析結果を図一八に示す。鉄筋の応力算定には、最大グラウト圧を用いており、グラウト圧により約40N/mm²、温度降下により約15N/mm²程度の引張応力が生じ、その合計値が設計条件の80N/mm²以下であることを確認した。なお、図一八に示した引張応力はグラウト注入時の値であり、注入後また完成後には低下する。この低下した後に残留する引張応力を考慮して、供用時の設計を行っている。

5. 実測結果との比較・検証

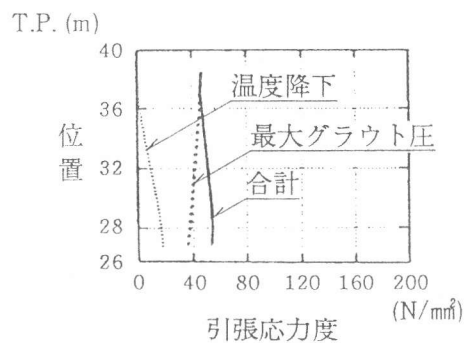
継目開度、貫通鉄筋応力、アフターボンド樹脂硬化特性につき、実測値と解析値を比較・検証した。

5. 1 継目開度および貫通鉄筋応力

図一九に、グラウト直前の開度実測結果を示しており、設計時よりコンクリート打設時期がずれたため、開度分布は4～6m程度上方に平行移動した形状となった。しかし、開度分布形状および



図一七 継目開度の解析結果

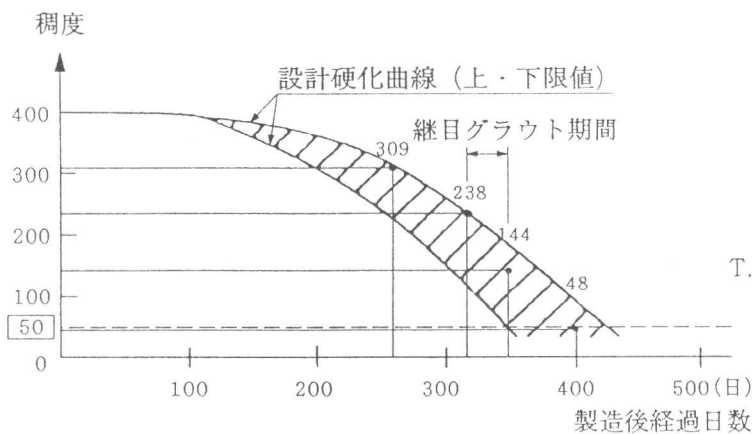


図一八 貫通鉄筋の過応力の解析結果

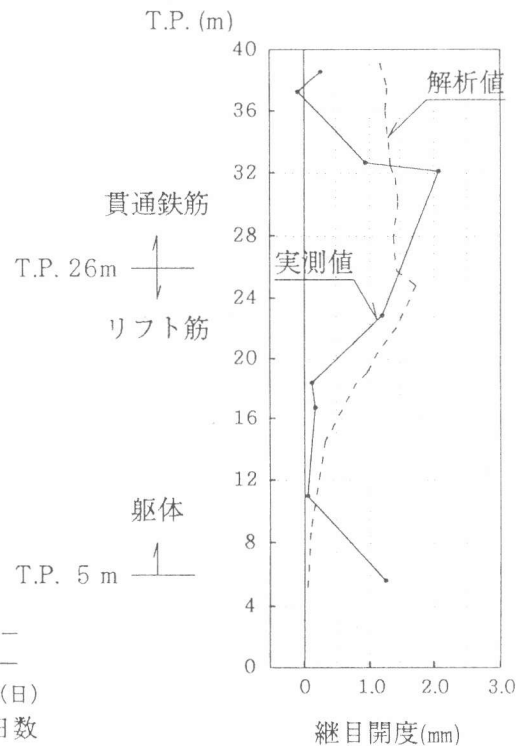
開度の最大値はほぼ同程度となっており、グラウト圧作用時には所要の開度が得られると判断しグラウトを実施した。また、貫通鉄筋応力実測値（位置は図一1参照）は、温度降下によるものが5~15N/mm²、またグラウト圧によるものが10~35N/mm²であり、図一8に示した解析値とほぼ整合した。

5. 2アフターボンド樹脂の硬化特性

アフターボンド樹脂を、最も多量の貫通鉄筋を設置している箇所付近のコンクリート中に埋設し、実鉄筋と全く同じ条件にて硬化特性を計測している。図一10に設計値と実測結果を比較しており、アフターボンド樹脂の稠度は、継目グラウト時において238~144であり、所要値（50以上）を十分満足していることから、未硬化（縁切り）状態にあったことを示している。



図一10 アフターボンド樹脂硬化特性実測結果



図一9 継目グラウト直前の継目開度
解析値と実測値との比較

6. 今後の課題

今回の橋梁用マスコンクリートへのアフターボンド鉄筋の開発・適用を踏まえ、今後の主要検討課題は以下のようにとりまとめられる。

- ①特に、継目開度、貫通鉄筋応力等に関し、実測データに基づく予測解析精度の向上
- ②アフターボンド鉄筋用樹脂の硬化特性の簡易評価（例えば、積算温度の概念の適用可能性等）
- ③アフターボンド鉄筋の生産性（製造・運搬・据付）向上

7. おわりに

アフターボンド鉄筋の適用により、従来大型アンカレイジの構造上の弱点であった継目の施工性および耐久性向上を計った。継目付近の挙動解析結果は、ほぼ所要の精度で実測値と整合した。今後、長径間吊橋のアンカレイジのみならず、種々の大型構造用コンクリートへのアフターボンド鉄筋の適用性についても検討していく所存である。

参考文献

- [1] 本州四国連絡橋公団：橋梁用マスコンクリート設計・施工基準同解説（案）、1990