

報告 東海道新幹線大規模改修工事コンクリート橋はね出し部対策の開発概要と保護モルタルの仕様

吉田 幸司*1・関 雅樹*2・加藤 千博*3・六郷 恵哲*4

要旨: 東海道新幹線では予防保全の観点から既計画であった大規模改修を前倒しして、2013年度より工事に着手した。コンクリート橋に対しては、はね出し部の中性化を抑止する抜本的対策として、新たな鋼板被覆工法を開発した。開発にあたっては機械式重ね継手を採用した薄型小型鋼板の採用により施工性の向上を図り、三次元 FEM 解析および実物大模型試験により性能評価を行った。また、新たに採用する防音壁構造に必要となる保護モルタルに関して、載荷試験や試験施工により要求性能に対する確認を行い、仕様策定を行った。

キーワード: 東海道新幹線, 予防保全, コンクリート橋, 鋼板被覆工法, 高靱性繊維補強ポリマーモルタル

1. はじめに

東海道新幹線は 1964 年に世界初の高速鉄道として営業運転を開始し、開業後 50 年が経過した。開業以来、東京・名古屋・大阪の三大都市圏を結ぶ大動脈として、我が国の経済活動を支えてきた。一方、開業以来お客様の死傷事故ゼロ、列車の定時運転など東海道新幹線の安全・安定輸送は国内外で高く評価されている。この安全性・安定性を支えている理由の一つとして、土木構造物の適切な維持管理が継続的になされてきたことが挙げられる。

一方、これまでの維持管理における状態把握と将来予測を踏まえ、いずれかの時点において、経年劣化による大幅な設備の更新が必要になることに備え、JR東海は、2018年から大規模改修に着手することを計画し、2002年に引当金積立計画について国土交通大臣の承認を受け、それ以降引当金を積み立ててきた。

また、大規模改修の工法については、2002年に開設した自社研究施設（愛知県小牧市）を中心に、長年にわたって研究開発を続け、その成果として土木構造物の延命化に有効である新たな工法を確立した。この工法は、部外有識者からなる「東海道新幹線土木構造物調査委員会」（委員長：小長井一男、横浜国立大学教授）においても、審議・ご助言をいただき、試験施工等を実施して実用化した。

この新工法を活用して、「予防保全」の観点から大規模改修を5年前倒しして着手することとし、2013年1月に引当金積立計画の変更申請を行い、同年2月に承認された。これを受け、2013年度から工事に着手した。「予防保全」はひび割れ等の変状の発生を抑止するため、使用性能を

当初の性能に回復させるための費用が「事後補修」や「事前補修」と比べて安価となり、コストダウンを図れることも大きな特徴と考えている。

2. 全断面修復工法（鋼板巻き）の研究開発概要

2.1 RC 構造物に関する既往の調査結果¹⁾

東海道新幹線には 148km のコンクリート橋がある。その中で、98.2km はラーメン構造の高架橋である。RC 構造物の特性として、引張応力側でのひび割れの発生は避けがたく、空気中の二酸化炭素の侵入による中性化の進行度の把握は、維持管理上重要な留意点である。東海道新幹線の RC 構造物の鉄筋は、異径鋼棒では SSD49（現在 SD295）、丸鋼では SS41（現在 SR235）が使用されており、鉄筋までのかぶりはスラブで 25mm、梁で 27mm、柱で 35mm となっており、現在の新設構造物の鉄筋かぶりより小さい。そのため、経時的な中性化の進行を調査しており、1995年に全数の 5%に相当する 216 高架橋を無作為に選定し、中性化深さを調査した。その結果、中性化深さは平均 15.1mm であった。中性化速度式で知られている、「 \sqrt{t} 則（ルート t 則）」に基づく予測の結果、中性化深さが 20mm（設計かぶり 25mm - 5mm）に到達するまでの期間は、建設から 54 年後（2018 年）となると考えられた。このため、2000 年から中性化深さが平均値を超える箇所、およびひび割れ発生箇所を優先して、中性化抑止対策として表面保護工を実施してきた。

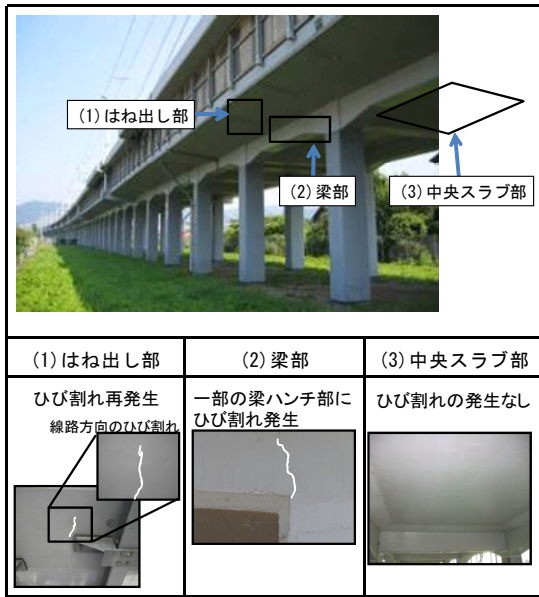
しかしながら、表面保護工施工箇所のうち、はね出し部の一部において、列車通過に伴う繰返し荷重により、表面保護工にひび割れが再発生していることが確認されている（写真-1）。このひび割れは、ただちに安全・安

*1 東海旅客鉄道（株） 新幹線鉄道事業本部 施設部 工事課 担当課長 工博（正会員）

*2 東海旅客鉄道（株） 取締役専務執行役員 新幹線鉄道事業本部長 工博（正会員）

*3 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部 技術開発部 グループリーダー 工修

*4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 工博（正会員）



※ひび割れは強調して表現
写真-1 表面保護工のひび割れ再発生状況

定輸送に問題となるものではないが、再発生したひび割れ箇所は、表面保護工による中性化抑止効果が失われ、鉄筋の腐食が進行する。その結果、RC構造物の使用性能が満たされなくなる懸念がある。そこで、はね出し部に生じるひび割れの抜本的な中性化対策として、全断面修復工法（鋼板巻き）（以下、鋼板被覆工法と呼ぶ）の新たな開発を進めた。

なお、コンクリート中の海砂や飛来塩分による塩分量の問題やアルカリ骨材反応などについては、これまでの調査結果により、問題のある構造物は東海道新幹線にはないことが分かっている。例えば、塩分含有量については、1998年と1999年に、東京から新大阪間で32橋梁を対象に調査を実施している。その結果、鉄筋より深い部分では、最大でも 0.7kg/m^3 であり、鉄筋の腐食限界 1.2kg/m^3 に対して小さい値であった。

2.2 新たな鋼板被覆工法の概要

今回、新たにはね出し部の中性化抑止を目的として、鋼板被覆工法を技術開発した。本工法の開発課題の一つは、はね出し部下面に鋼板を設置するためのアンカー削孔本数を極力減らすことであった。このため、長縄²⁾が高架橋柱の耐震補強工事において技術開発した、耐震補強の薄型小型鋼板工法に改良を加えて、新たに機械式重ね継手を下面鋼板に追加した（図-1）。またこの工法の特徴として、はね出し部コンクリートと上面および下面鋼板を貫通するアンカーボルトにより、はね出し部を鋼板と鉄筋コンクリートの一体構造として補強した点が挙げられる。この結果、耐力面では、はね出し部コンクリート断面の上下に配置された既存鉄筋量を増やすことにつながっている。施工面でも溶接が不要な構造としたこと、また、鋼板の板厚を従来の6.0mmから2.3mmとす

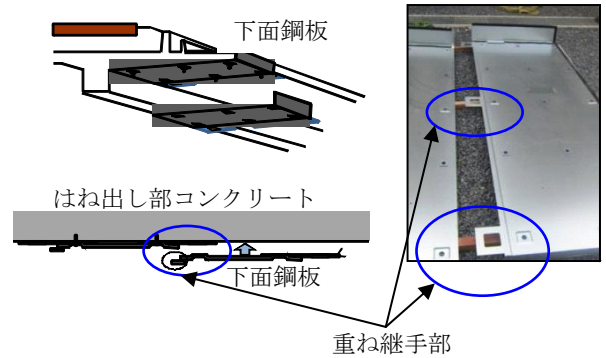


図-1 鋼板の機械式重ね継手工法

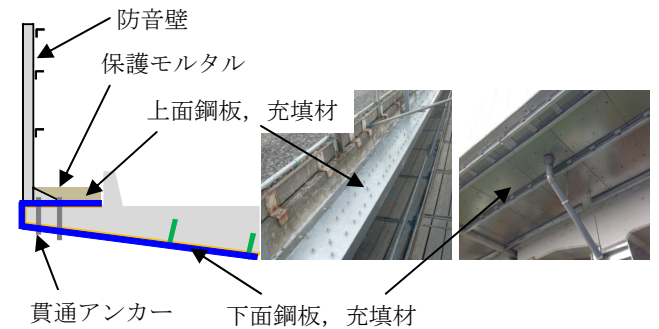


図-2 新たな全断面修復工法（鋼板被覆）の概要

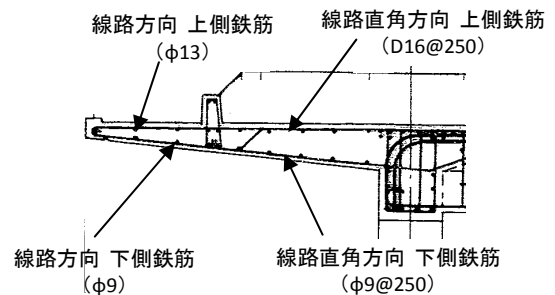


図-3 はね出し部の配筋図の例

ることで、軽量化により人力施工を容易にした。はね出し部コンクリートと上面および下面鋼板を貫通するアンカーボルトを最少本数とし、さらにエポキシ樹脂をはね出し部コンクリートと鋼板の隙間に充填し、一体化を高めている（図-2）。

東海道新幹線には建設当初、防音壁は設置されていなかったため、防音壁設置に伴う荷重は設計に見込まれていない。標準設計されている高架橋の場合、上側の鉄筋は異形のD16mm、下側の鉄筋は丸鋼のΦ9mmが250mm間隔で配置されている（図-3）。そのため、新たな鋼板被覆工法は、はね出し部に取り付けられる防音壁への風荷重等も考慮した構造設計とした。具体的には、防音壁の設置により作用する風荷重等が、はね出し部に与える影響を極力小さくするように構造形式を検討した。この際、鋼板による補強効果は、高山³⁾が実施した実験的な研究による、鋼板のみかけの降伏強度算定式により算定した。今回設置したアンカーボルトにより、エポキシ



(a) 従来の構造 (b) 新構造
写真-2 防音壁支柱の取付け方法の変更

樹脂の接着力が将来の劣化により低下した場合においても、耐力補強効果が得られることを確認している。

従来の防音壁構造では、2m間隔に設置された支柱を介して、荷重が集中的にはね出し部に作用していた。今回の構造では、防音壁から作用する荷重が均等にはね出し部に作用するように、支柱レス構造の防音壁（以下、支柱レス防音壁と呼ぶ）を開発し、線路方向に連続的に取り付ける構造とした（写真-2）。風荷重を受ける防音壁取り付け部は、はね出し部上面に設置する鋼板とコンクリート躯体をアンカーボルトで一体化することで強化した。また、保護モルタルにより取り付け部を被覆する構造とした（図-2）。保護モルタルの詳細については、第3章にて述べる。

2.3 三次元 FEM 解析による評価

今回提案する新たな構造形式に関して、特にはね出し部での荷重載荷時における応力状態について、非線形 FEM 解析による検証結果を述べる。解析プログラムは、ひび割れが発生している RC 構造物の三次元非線形解析を精度よく実施することができる COM3D を使用した。既設はね出し部のコンクリートは、前川らの弾塑性破壊モデル⁴⁾による非線形性を考慮した RC 要素とし、鋼板については平面要素、防音壁についてはシェル要素およびソリッド要素としてモデル化をした。風荷重については、防音壁に静的な水平方向の荷重とした。この解析モデルにより従来の構造形式と新たな構造形式の比較を行った。解析モデルと解析結果を図-4に示す。図-4には、防音壁外側からの風荷重（設計風荷重： 3.0kN/m^2 ）における、はね出し部下面における線路直角方向のひずみ分布を示している。従来の構造形式では防音壁の支柱付近に発生するひずみが、他の場所に比べて大きくなっているのに対して、新しい構造形式では概ね均等にひずみが発生している。このことから新しい防音壁の取り付け構造が従来の構造と比べて荷重分散効果が高いことを確認した。

2.4 実物大模型試験による確認

前節の解析により、今回開発した新たな構造形式は、線路方向に荷重分散効果があり、はね出し部の負荷が低減されることを確認した。ただし、計算上の仮定として、はね出し部のコンクリートと鋼板が一体となって挙動していることが前提である。このため、実構造物において、

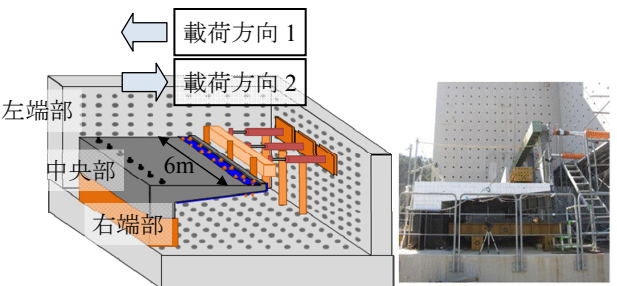
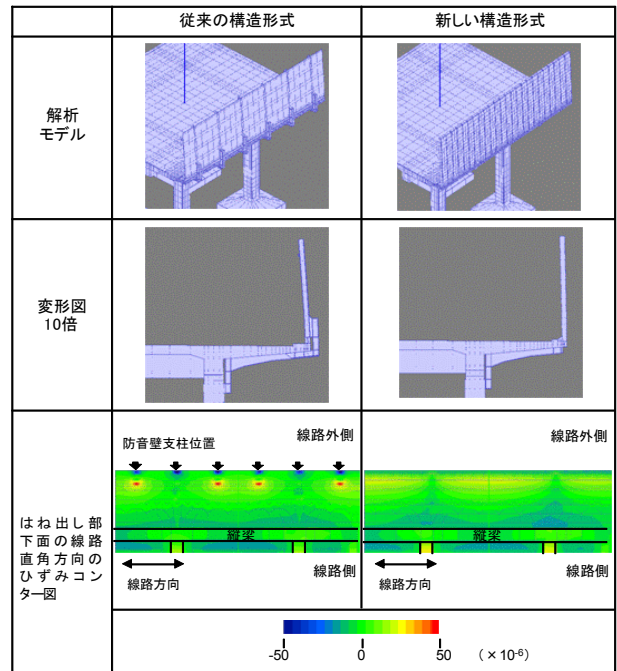
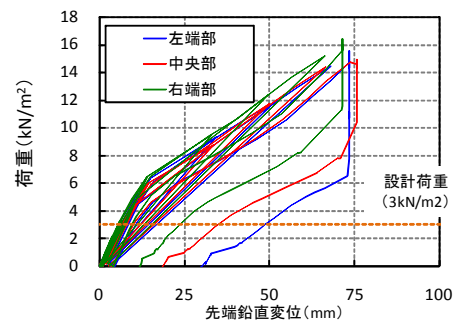
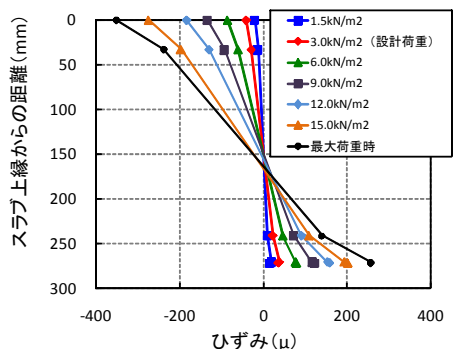


図-5 実物大模型試験の概要と載荷状況



(a) 荷重変位曲線



(b) 鉛直方向ひずみ分布

図-6 試験結果（防音壁外側からの風荷重）

はね出し部のコンクリート、鉄筋及び鋼板の間で平面保持が成り立つことを確認する必要がある。

そこで、2.3mmの鋼板をアンカーボルトおよびエポキシ樹脂ではね出し部と一体化した実物大模型を製作し、載荷試験を実施した。風荷重がはね出し部に均等に伝わるように、防音壁を模擬した3本の支柱に同時に荷重を載荷させた(図-5)。なお、はね出し部は図-3に示した標準的なRCラーメン高架橋の構造諸元とした。また、コンクリートは普通24-12-20Hを使用し、鉄筋は異径鋼棒に対してはSD295を、丸鋼に対してはSR235を使用した。

防音壁外側からの風荷重(載荷方向1)に対する試験結果を図-6に示す。鋼板とはね出し部コンクリートとの一体性がなくなり、全面的な鋼板の剥離が発生した荷重は、設計荷重である 3kN/m^2 (風速約 50m/s)の5.5倍に当たる 16.5kN/m^2 を載荷したときである。また、鉛直方向ひずみ分布から設計荷重の範囲内においては、鋼板と既設構造物が一体として挙動することを確認できた。なお、縦軸のスラブ上縁からの距離は、はね出しスラブ部上面を 0mm として、 33mm が上側鉄筋位置、 240mm が下側鉄筋位置、 270mm がコンクリートスラブ下面、 272mm が下面補強鋼板のひずみゲージ貼付位置である。また、防音壁内側からの風荷重(載荷方向2)に対しては、設計荷重の 3.0kN/m^2 の約3.3倍に当たる 10.0kN/m^2 を載荷したときでも鋼板の剥離は生じなかった。

3. 保護モルタルの仕様策定

3.1 保護モルタルの要求性能

支柱レス防音壁基部には、保護モルタルの打設を考えている。これは、防音壁基部の平滑化による保守用通路の確保、防音壁基部の鋼材にモルタルを充填することによる防音壁基部の耐力向上、および雨水等の侵入による鋼材腐食の防止が目的である。そのため、要求性能として、乾燥等による収縮が小さく、防音壁を介して作用する列車風と風荷重、および列車振動によるひび割れが発生しないことが必要である。また、施工後、短時間で強度が発現すること、かつ施工性・経済性の良いコンクリートもしくはモルタルの材料を選定する必要がある。そこで施工性および性能を確認するため、コンクリートまたはモルタルの打設を行うとともに、風荷重を想定した

載荷試験ならびに本線での試験施工を行った。

3.2 載荷試験の概要

自社研究施設内の実物大試験高架橋に、今回開発した支柱レス防音壁を設置し、コンクリートまたはモルタルを打設した。打設したコンクリートまたはモルタルの種類と打設範囲を図-7に示す。各材料とも 2.5m もしくは 3.0m の範囲で打設を行った。以下に各コンクリートおよびモルタルの材料について記すとともに、打設状況を写真-3に示す。

(1) 普通コンクリート+膨張材

普通コンクリート(普通24-18-25N)に混和材として膨張材を使用することで、コンクリートの乾燥収縮の抑止を図っている。レディミクストコンクリートとしてプラントから運搬し、コンクリートポンプ車を用いて打設する。

(2) 無収縮モルタル+繊維補強材

無収縮モルタル(プレミクスタイプ)は流動性に優れ、支柱レス防音壁基部への打設が容易である。また、材料分離やブリーディングが無く、安定した無収縮性が期待される。繊維補強材は長さ 30mm 程度のポリプロピレン製のもので、攪拌時に繊維が骨材に絡まり、切れて拡がり、均等に分散することでモルタルのひび割れ抑制効果が期待される。現場にて練り混ぜを行い、人力による打設が可能である。

(3) 普通コンクリート+膨張材+繊維補強材

膨張材によりコンクリートの乾燥収縮の抑止を図るとともに、前述した繊維補強材によるひび割れ抑制効果も期待される。膨張材のみを加えた(1)との比較により、繊維補強材の効果を確認する。打設は(1)と同様の方法で行う。普通コンクリートは普通24-21-25Nを使用した。

(4) 高靱性繊維補強ポリマーモルタル

高靱性繊維補強ポリマーモルタル(プレミクスタイプ)は、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料⁵⁾の一種であり、特殊ポリマーと多量の短繊維を配合し、高い靱性と短繊維の架橋効果により、乾燥収縮及び引張力作用時のひび割れ抑制が期待され、ひび割れ後もひび割れ幅を微小に抑制する効果も期待される。また、材齢3時間程度で圧縮強度の発現も期待できる。現場にて練り混ぜを行い、人力にて打設が可能である。ただし、打設時の流動性はやや低い。

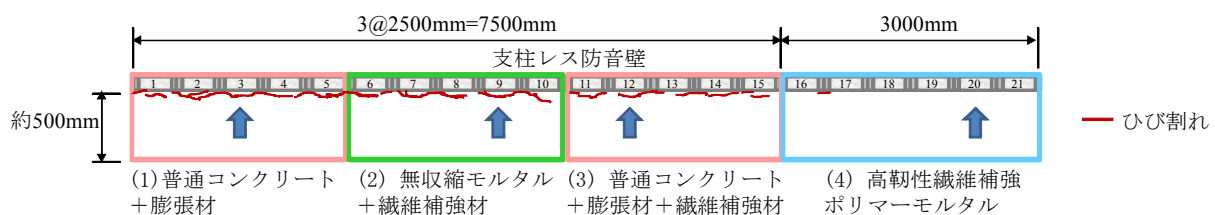


図-7 各コンクリートおよびモルタルの打設範囲

3.3 荷重試験による性能評価

風荷重が防音壁に作用した場合に、保護コンクリートまたはモルタルのひび割れ状況を確認するため、設計荷重 3.0kN/m^2 の2倍程度の荷重を作用させる荷重試験を実施した。荷重試験終了後のひび割れ発生状況を写真-4に、ひび割れ発生位置および写真撮影位置を図-7に示す。写真および図から分かるように、高靱性繊維補強ポリマーモルタルでは、ほとんどひび割れは見られなかったが、その他の材料では、防音壁のフレームおよびリブ付近に線路方向のひび割れが発生した。このことから、高靱性繊維補強ポリマーモルタルは設計荷重の2倍程度の荷重が作用しても、ひび割れはほとんど発生せず、他の材料と比較しても、ひび割れ発生に対する抵抗性が高いことを確認した。

3.4 本線試験施工による性能評価

保護コンクリートまたはモルタルは、夜間、東海道新幹線が運行していない時間帯に打設される。朝6時から始発の運行が開始されるため、強度が十分に発現していない状態で、列車振動及び列車風の影響を受けることとなる。このような状況下で打設される保護コンクリートまたはモルタルの性能を確認するため、東海道新幹線本線での試験施工を実施した。

施工した材料および施工条件を表-1に示す。前節までに述べた高靱性繊維補強ポリマーモルタルや一般的な早強コンクリートに加えて、短時間での強度発現を考慮し、プレミクスタイプの超速硬性のある無収縮材料を施工した。

配筋状況を写真-5に示す。D13の異形鉄筋を線路方向および線路直角方向に配筋した。なお、配筋は保護コンクリートまたはモルタルの材料によらず同一である。

打設日から3~5ヶ月程度経過した後、現地調査を実施し、ひび割れ発生の有無を確認した。調査結果が表-1に示されているが、高靱性繊維補強ポリマーモルタル以外の材料には、ひび割れが確認された。調査時点での各材料の状況を写真-6に示す。この写真から分かるように、ひび割れは線路直角方向に発生しており、前節で述べたようなベース部基部付近に線路方向に生じるひび割れは確認されていない。したがって、発生したひび割れは、風荷重の影響ではないことが推察される。ひび割れの発生位置は、中間リブ直上及び支柱レス防音壁の境界部に集中しており、ひび割れが生じた全ての材料で同様の傾向であった。支柱レス防音壁は構造上、中間リブ位置のかぶりが薄くなりやすく、ひび割れが生じやすいと考えられる。また、繊維が混入されているコンクリートの方がひび割れ幅は小さい傾向であった。高靱性繊維補強ポリマーモルタルは、調査時点において、ひび割れは確認されなかったことから、新しく開発した支柱レス防



(a) 「普通コンクリート+膨張材」と「普通コンクリート+膨張材+繊維補強材」



(b) 「無収縮モルタル+繊維補強材」



(c) 「高靱性繊維補強ポリマーモルタル」

写真-3 各材料の施工状況

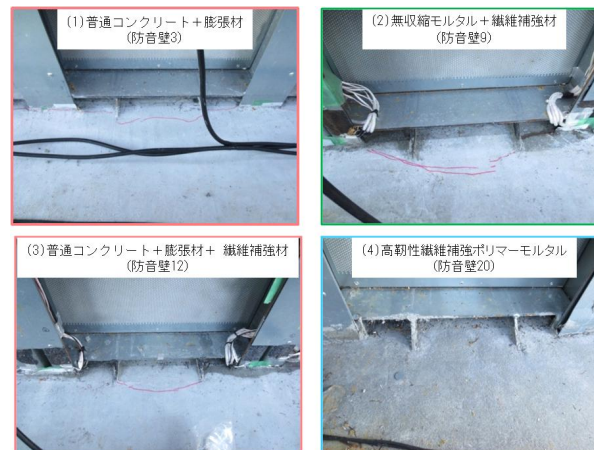


写真-4 ひび割れ状況

表-1 試験施工した材料

施工材料	打設延長 (m)	打設時の平均気温 (°C)	打設後経過日数	ひび割れの発生位置	最大ひび割れ幅
(1) 高靱性繊維補強ポリマーモルタル	43	19.0	85日~100日	なし	なし
(2) 早強コンクリート	24	14.8	83日	中間リブ直上防音壁境界	0.4mm
(3) 早強コンクリート+繊維補強材	24	17.0	78日	中間リブ直上防音壁境界	0.1mm
(4) 超速硬無収縮モルタル	42	5.9	88日~93日	中間リブ直上防音壁境界	0.4mm
(5) 超速硬無収縮コンクリート	48	16.0	142日~144日	中間リブ直上防音壁境界	0.1mm

音壁の構造、および東海道新幹線本線での施工に適した材料であると考えられる。ただし、長期にわたる乾燥収縮や温度変化の影響については、継続した調査が必要である。

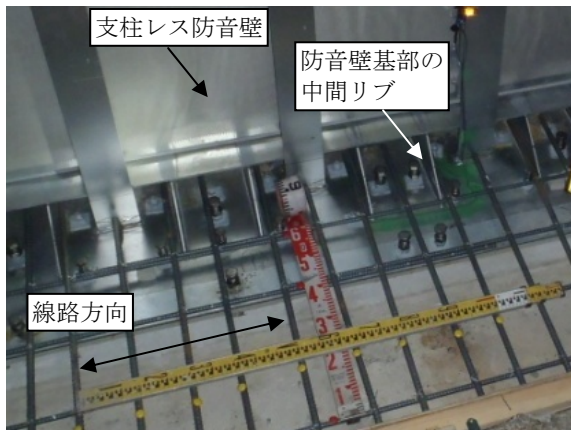


写真-5 配筋状況



(a) 高韌性繊維補強ポリマーモルタル (ひび割れなし)



(b) 早強コンクリート (c) 早強コンクリート+繊維



(d) 超速硬無収縮モルタル (e) 超速硬無収縮コンクリート

写真-6 代表的なひび割れ状況図

3.5 保護モルタルの仕様

載荷試験および本線での試験施工を踏まえて、支柱レス防音壁基部の構造に打設する材料として、高韌性繊維補強ポリマーモルタルが適していることを確認した。使用する材料の性能を表-2に示す。各試験項目、試験条件および要求性能は、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)⁵⁾を参考にした。

表-2 保護モルタルの要求性能表

項目	試験条件		要求性能
圧縮強度[N/mm ²]	JIS R 5201	3時間	8以上
		7日	24以上
		28日	40以上
曲げ強度[N/mm ²]	JIS R 5201	7日	15以上
付着強度[N/mm ²]	JIS A 1171	3時間	0.8以上
		7日	1.5以上
引張強度[N/mm ²]	一軸直接引張試験	28日	4.5以上
引張終局ひずみ[%]		28日	2.0以上
引張平均ひび割れ幅[mm]		28日	0.15以下
硬化収縮率[%]	JIS A 1129		0.05以下

4. まとめ

今回、東海道新幹線 RC 構造物の維持・強化対策として、はね出し部の中性化を確実に防止し、併せて耐力補強となる鋼板被覆工法の最適な構造形式を確立した。また、新型の防音壁設置にあたり必要となる保護モルタルについても試験施工等の確認により仕様策定を行った。維持・強化対策を選定する場合、部位ごとに構造形式、荷重状態および変状状態が異なるため、その部位にあった適切な工法により対策を実施する必要がある。RC 構造物のはね出し部においては、本工法を実施することで、東海道新幹線を健全に維持していくことが可能である。

なお実態調査の結果、RC ラーメン高架橋の梁部、中央スラブ部、並びに RC 桁式橋梁の主桁については表面保護工のひび割れの発生がなく、中性化の進行は抑止できている。これまで実施してきた表面保護工により当面の間、中性化の進行を防止できる。そのため、鋼板被覆工法の実施は、構造物の状態により適切な時期に実施することにより、構造物の健全性を維持することができる。

参考文献

- 1) 田中宏昌：東海道新幹線ラーメン高架橋の現状評価と維持管理システムに関する研究，筑波大学学位論文，2001.4
- 2) 長縄卓夫，岡野素之，小松章，相京博幸：鋼製パネル組立てによる RC 柱の耐震補強に関する研究，構造工学論文集，Vol.52A，pp.521-528，2006.3
- 3) 高山博文，新山純一，三島徹也，鈴木顕彰，渡辺忠朋：あと施工アンカーによる鋼板補強工法の補強効果に関する実験的研究，土木学会論文集，No.592，V-39，pp.1-11，1998.5
- 4) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991.5
- 5) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー127，2007