

鋼床版デッキプレートの腐食減厚に対する補修方法の検討

STUDY ON THE REPAIRING METHOD OF CORRODED STEEL DECK PLATES

結城正洋* 新田與吉** 松本好生*** 名取 暢****

Masahiro YUKI, Yokichi NITTA, Yoshio MATUMOTO and Tohru NATORI

Practical repairing methods for corrosive deterioration on steel deck plates of the box girder bridge were studied. Corrosive deterioration treated in this study occurred at surfaces of steel deck plates under asphalt-pavement. Based on the results of investigations on the degree of deteriorations, attaching cover plates on corroded portions by bolting and bonding was chosen for the repairing method. The composite action between cover plates and deck plates was examined by loading tests using large scale models. Also, its contribution to the decrease of stresses in deck plates was confirmed by a finite element analysis.

1. はじめに

鋼床版橋梁は、近年における橋梁構造の大型化、連続化および箱桁化のすう勢もあって、その採用が増加してきている¹⁾。ところで、鋼床版の上面には、その保護と車両の安全かつ快適な走行の確保のため舗装が施される。鋼床版舗装に要求される特性としては、すべり抵抗性、耐流動・摩耗性などといった一般路盤上の舗装に求められる特性の他に、鋼床版の変形に追従でき、ひび割れ抵抗性のあること、さらに鋼床版の防錆の面から防水性に優れていることなどが要求される。これら要求特性に応える舗装材料として、基層にグーアスファルト混合物、表層にアスファルトコンクリートを組合せた2層仕上げによるものが一般的に使用されている²⁾。

これら舗装材の耐久性に関しては、舗装支持体である鋼床版の支持剛性の大きさ、その均一性あるいは添接材板や高力ボルト頭などのデッキプレート表面における凹凸が少なからず影響していることが考えられるが^{3), 4)}、このような鋼床版の有する構造的な要因と気温、日射、降雪などの気象環境的な要因、さらには交通量、交通荷重などといった供用環境的な要因とが重なり合い、舗装に対して不利に作用するとひび割れ、わだち掘れ、ポットホールなどの損傷が早期に発生することとなる⁵⁾。

* 首都高速道路公団 第一建設部 (〒101 千代田区岩本町 3-2-4)

** 首都高速道路公団 神奈川管理部 (〒221 横浜市神奈川区東神奈川 1-3-4)

*** (株)横河メンテック 技術管理室 (〒273 船橋市山野町27番地)

**** (株)横河ブリッジ 研究所 (〒261 千葉市美浜区新港88番)

舗装にひび割れが発生し、かつデッキプレートとの付着が不十分になると、舗装はデッキプレートの防食機能を果さなくなり、この部位より雨水がデッキプレート上面に侵入することとなる。舗装下のこのような箇所に錆び、腐食が発生した場合には、その確認が困難であり、発見が遅れた場合にはデッキプレートの減厚損傷に至ることも考えられる。

本文で取上げた橋梁は、供用開始後20数年を経た都市内高架橋であり、舗装のひび割れが他の橋梁と比較して早期に発生し、舗装の打換え時には、舗装厚の増厚、舗装材の変更などの対策を施して来たにも関わらず、ここ10年間に3回の打換え工事が必要であった。一方、本橋の点検業務の一環として実施されたデッキプレート下面からの板厚測定調査により、前述の舗装ひび割れ発生部に対応する部位のデッキプレートに腐食が原因と考えられる減厚が確認された。デッキプレートの減厚は、輪荷重を直接支持する床組部材としての応力増加を招くこととなり、この場合、輪荷重の繰返し作用による疲労強度上の問題が懸念され早急の対策検討が必要であった。

種々の対策工法の比較検討の結果、腐食減厚に対する断面補強として、腐食発生部位のデッキプレート上面に当て板を添接し補強を行うこととなった。当て板の接合方法については、高力ボルトによる接合を基本としたが、鋼床版の構造上の制約から高力ボルトの締付けが不可能な領域があったため、この部位を含めて当て板接合面全域に接着剤を塗布し、接着剤を併用することにより接合強度を補強することとした。しかしながら、このような接合方法において、当て板とデッキプレートとの合成効果がどの程度期待できるのか不明であったため、実橋の部分模型供試体を製作し、載荷実験により当て板の合成効果について検討した。また、実橋鋼床版部のF.E.M.解析を実施し、実橋における当て板補強の効果について確認した。さらに、この部位における舗装のひび割れ防止の観点から、当て板補強による鋼床版の局部変形性状の改善効果について検討を加えた。

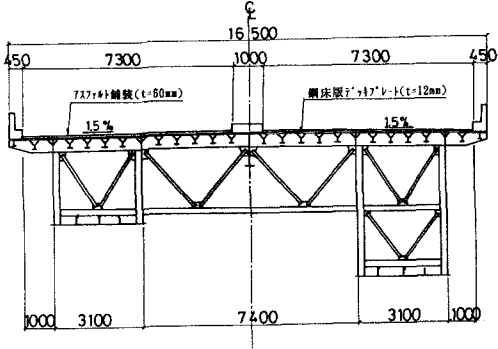


図-1、腐食が発生した橋梁の断面図

2. 腐食状況と原因

デッキプレートに腐食が確認された橋梁の断面図を図-1に示す。3径間連続鋼床版箱桁であり、12mm厚のデッキプレートの上に60mm厚のアスファルト舗装が施されている。鋼床版の縦リブにはY型リブが用いられており、また、箱桁腹板とデッキプレートとの取合部にはコーナプレートが設置されている。なお、横リブ間隔については約5mとなっている。

この橋梁においては、供用開始後数年で輪荷重通過位置である箱桁腹板コーナプレート直上部に舗装のひび割れが確認された。その後、種々の舗装材および舗装構成について試験施工が実施されてきたが、同部位におけるひび割れを完全に防止するまでには至っていない。鋼床版デッキプレートの腐食はこの舗装のひび割れ直下である箱桁腹板コーナプレート上におい

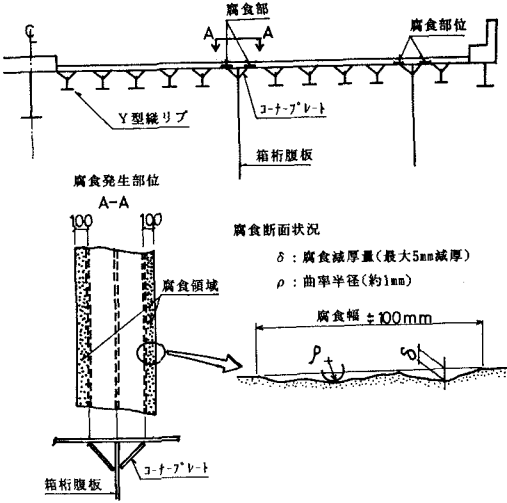


図-2 デッキプレートの腐食状況

で発生している。腐食状況について舗装の打換え時に調査した結果を図-2に示す。デッキプレートの腐食は舗装のひび割れに沿って橋軸方向に帯状に発生している。腐食幅は100mm程度であり、腐食深さについては1mm程度の軽微な部分から最大5mm程度の減厚を生じている部分までである。腐食部の表面状態に関しては、多少の凹凸は確認されるものの、その凹凸部における曲率半径は1mm以上となっており、ピット状の著しい孔食の発生は確認されていない。

デッキプレートの腐食原因としては、舗装のひび割れ部より雨水が侵入し、さらにこの部位における舗装とデッキプレートとの剥離によりデッキプレート上面が湿潤状態に置かれていたことによるものと考えられる。腐食を招いた主桁上における舗装のひび割れに関しては、輪荷重による鋼床版の局部変形が影響を及ぼしているものと考えられる。既存の研究によると輪荷重通過位置近傍の主桁や縦リブ上には幅員方向に負曲げ（主桁上においてデッキプレート上面が凸となる変形状）が作用し、これによる舗装材表面での引張りひずみの発生がひび割れ原因の一つであることが指摘されている^{3)・4)・6)}。腐食が確認された橋梁においても、大型車の輪荷重通過位置が箱桁腹板コーナプレート上となっていることから、この部位においてひずみ集中が生じていることが予想され、このことがひび割れの主原因と考えられる。なお、この橋梁の縦リブ支間は5.0mと現状の標準構造と比較して大きなものとなっている。そのため、箱桁腹板に隣接する縦リブのたわみが大きく、このことも比較的剛な支持点であるコーナプレート上にひずみ集中を発生させる要因となっていると思われる³⁾。

3. 腐食減厚部の応力性状

デッキプレートの腐食については発生部位が限られており、また腐食による減厚領域も局所的であることから腐食減厚が橋梁全体挙動へ及ぼす影響はほとんどないものと考えられる。しかし、床組み部材としての鋼床版においては、減厚により局部的な応力、変形の増大が考えられた。そこで、実橋鋼床版部を対象としたF.E.M.解析を実施し、腐食減厚が鋼床版デッキプレートの応力性状に及ぼす影響について検討した。

3.1 F.E.M.解析モデル

解析モデルにおける要素分割図を図-3に示す。幅員方向に関して上下線の片側を取り出し、橋軸方向の横リブ間隔3パネル分（実際のモデルの作成は橋軸方向に関する対称性を利用し、横リブ間隔3パネルの1/2についてモデル化している）について箱桁を含み3次元立体モデル化したものである。モデルにおける使用要素はシェル要素と棒要素であるが、解析での着目部位であるデッキプレートおよびY型縦リブの斜材、腹板コーナプレートについてはシェル要素を用いモデル化している。解析での荷重作用位置は、橋軸方向に関しては中間パネルの中央断面である。幅員方

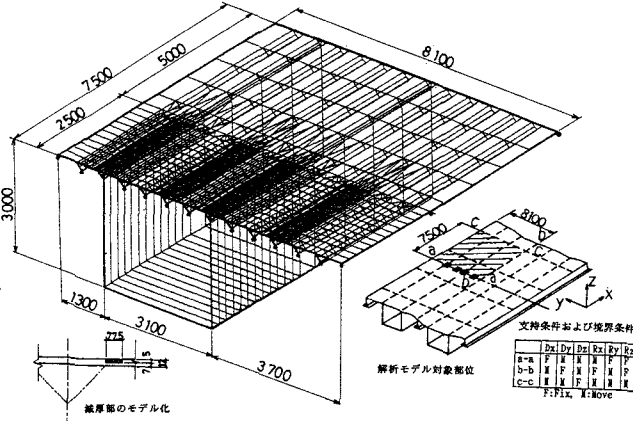


図-3 実橋鋼床版部のF.E.M.解析モデル

向については、実橋の輪荷重通過位置に関する調査結果を参考に数ケースの載荷位置について予備解析を実施し、それら解析ケースの内、腹板コーナプレート上における応力の発生が最も顕著である解析ケースの載荷位置とした。輪荷重は道路橋示方書・同解説に示されているT-20後輪荷重とし、後輪設置幅および長さについても同示方書に示されている寸法と同一とした⁷⁾。腐食減厚に関しては、実橋における調査結果から、

その形状を図-3中に示すように減厚量を最大腐食量の5mmと仮定し、橋軸方向全線についてデッキプレート上の板厚を12mmから7mmに減厚した。また、その幅については、この部位における要素の寸法をも考慮し77.5mmとした。なお、実橋における腐食面に極端な凹凸が発生していないこと、解析における微細な凹凸形状に対するモデル化は困難であることなどの理由から、腐食面については平滑な面と仮定し、腐食部を一様に減厚させた。

3.2 デッキプレートの応力・変形状

デッキプレートの応力分布を図-4に示す。図中にはコーナプレート上のデッキプレートに腐食減厚が有る場合と無い場合の2ケースについての解析結果を示した。これらの図より橋軸方向応力および幅員方向応力とも版の面外曲げ作用が卓越した分布性状を呈していることが判る。また、箱桁腹板、コーナプレートおよびY型縦リブ斜材の取り付け部を支持点とした連続板的な性状を示しており、これら支持点上のデッキプレート上面には負曲げ作用による引張応力が発生している。なお、発生する応力は幅員方向応力が橋軸

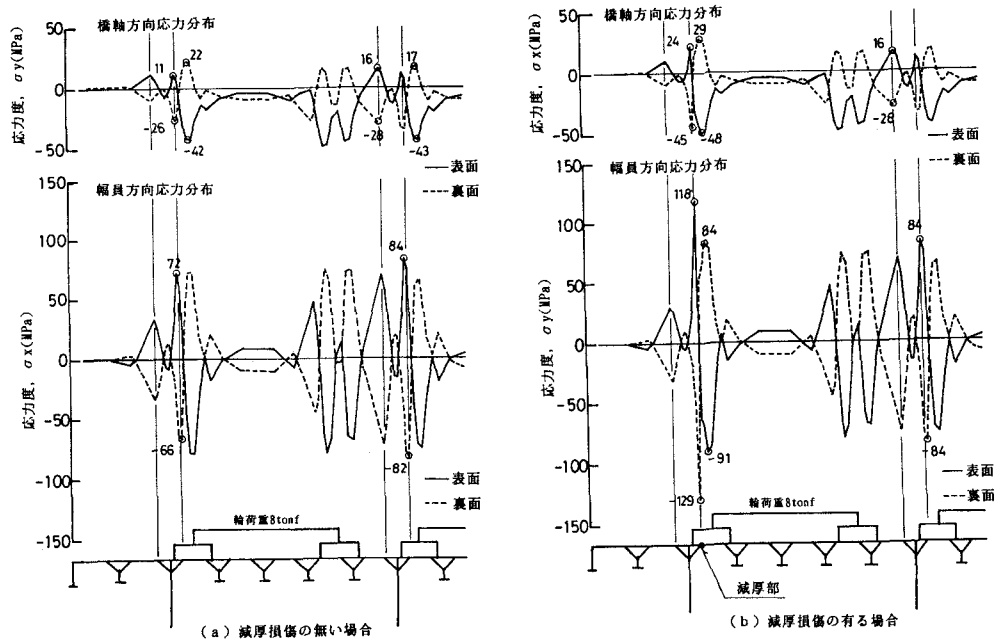


図-4 鋼床版デッキプレートの応力性状

方向応力に比較して大きな値となっており、幅員方向に関しては箱桁コーナプレート上において70~80MPa程度の引張応力が生じている。また、コーナプレート上を減厚した場合、減厚局部およびそのごく近辺において応力の増加が認められる。今回の解析では実橋の腐食状況調査から減厚量を5mmと仮定したが、この場合、発生する応力が大きい幅員方向に関し、減厚部での応力は減厚のない場合における応力の1.6倍程度に増加することとなる。

幅員方向断面におけるデッキプレートのたわみ分布を図-5に示す。縦リブ系のたわみと版系のたわみが重複したたわみ性状となっており、輪荷重載荷位置近傍の縦リブのたわみおよび

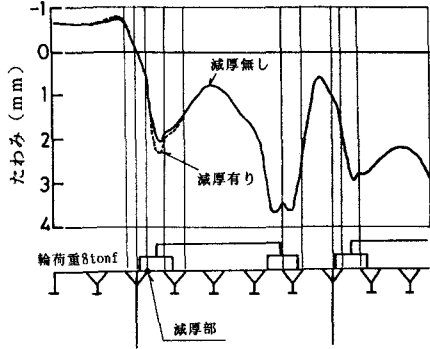


図-5 デッキプレートのたわみ性状

のF.E.M.解析において、当て板とデッキプレートとの接合を完全合成（以下単に合成と呼ぶ）と仮定した場合と完全非合成（以下単に重ね梁と呼ぶ）と仮定した場合の2ケースについて解析を実施し、実験結果と解析結果とを比較検討することにより行った。

5.1 模型供試体の形状・寸法

模型供試体の形状・寸法を図-7に示す。実橋の箱桁腹板近傍部を取り出した部分模型供試体である。鋼床版の板厚、Y形縦リブの寸法およびY形縦リブ間隔については実橋と同一寸法としたが、橋軸方向については、横リブ間隔を2.5m(実橋横リブ間隔：約5.0m)とし、横リブ間隔1パネル分を取り出した構造とするとともに、幅員方向に関しては、箱桁腹板に相当する主桁と3本のY形縦リブおよび両端における耳桁から構成される構造とした。

5.2 試験方法

荷重の載荷断面は横リブ間の中央断面とした。幅員方向の載荷位置については、実橋の現橋状態を対象とした前述のF.E.M.解析と同一の載荷位置とした。また、荷重載荷点における載荷幅、長さについても実橋F.E.M.解析と同一としている。供試体の支持については、両端の横リブ断面における主桁下フランジと耳桁下フランジとをローラーを介して支持する方法とした。なお、静的載荷試験における最大荷重は、道路橋示方書・同解説に規定されているT-20後輪荷重と同一の8tonとした⁸⁾。疲労試験については静的載荷試験と同一の載荷位置において荷重振幅8tonにて繰返し数400万回まで実施した。また、繰返し数100万回毎に静的載荷試験を実施し、デッキプレートの応力性状の変化について確認した。

5.3 当て板補修要領

供試体の当て板補修要領を図-8に示す。実橋において想定される補修作業に従って当て板の添接を実施した。作業では、まず孔加工が完了した当て板材、デッキプレートについて添接面の表面処理を実施した。当て板添接面については工場ブラスト処理、デッキプレートの添接面については現場グラインダー処理を想定した表面処理としている。次に、2液混合タイプの接着剤を所定量混合した後、当て板、デッキプレートの添接両面にこてを用いて均等に塗布した。その後当て板をデッキプレートに設置し皿

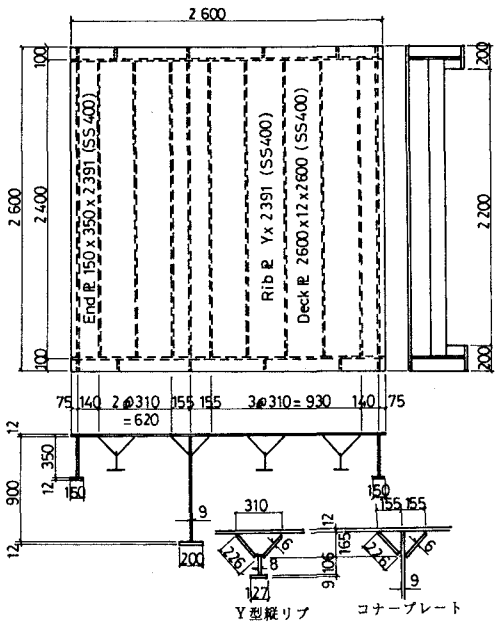


図-7 模型供試体の形状・寸法

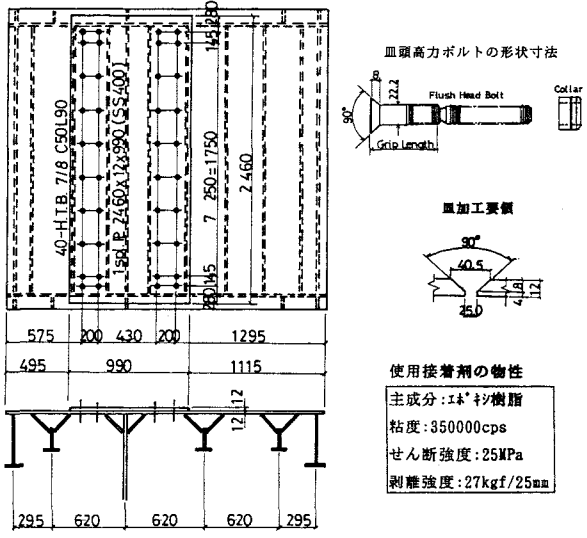


図-8 供試体の当て板添接要領

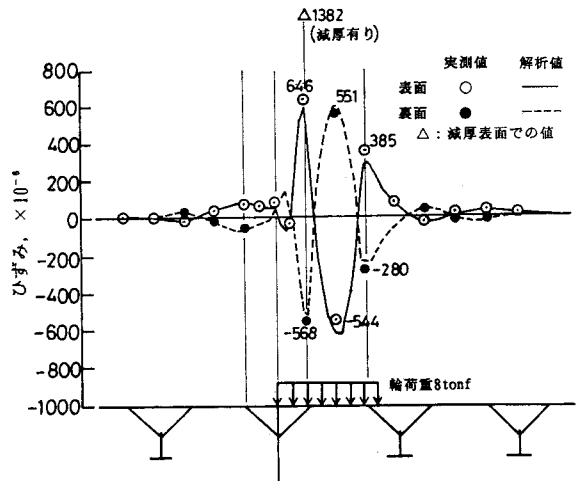
頭高力ボルトにより接合した。使用した接着剤はエポキシ樹脂系の室温硬化型接着剤である。当て板補修の実施工における作業時間を考慮し可使時間1時間程度の接着剤を選定した。また、皿頭高力ボルトはベベル角が90度の皿頭を有したグリップ締付け形式の高力ボルトである。このボルトにおいては、通常六角ボルトのナットに相当するカラーと呼ばれる円筒形の部品を塑性形成させボルト軸部にくい込ませることにより締付け軸力を得るため、締付け時の共回りの心配はなく摩擦接合用的高力ボルトとしての使用が可能である。なお、このボルトの締付け軸力の最小保証値は17.6tonfである。

5.4 併用接合における合成効果

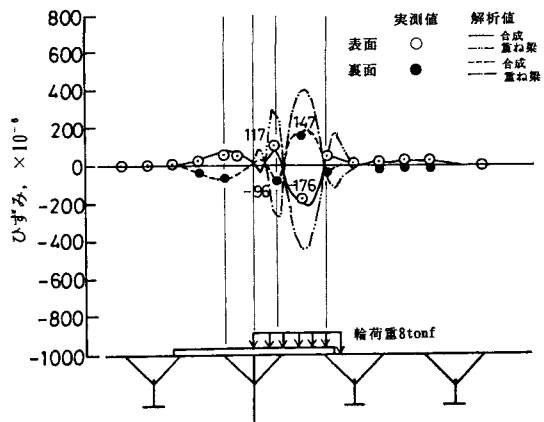
当て板補修前後におけるデッキプレートの幅員方向ひずみの分布を図-9に示す。補強前におけるデッキプレートのひずみ分布に関しては、前述した実橋F.E.M.解析結果と同様の性状を示している。すなわち、載荷領域において面外曲げ作用の卓越したひずみ分布となっており、コーナプレート上およびYリブ斜材上のデッキプレート上面には引張ひずみが生じている。また、図中に供試体のF.E.M.解析結果を示したが、解析値は実験値と良く一致しており、今回のF.E.M.解析モデルの妥当性が確認できる。なお、コーナプレート上に減厚損傷を付与した場合の結果について

も付記したが、減厚部においては引張ひずみの増加が著しいことが判る。当て板補修後に関しては、デッキプレートの面外曲げ作用は認められるものの、減厚により増加したひずみは減厚前におけるひずみ値を下回る程度にまで低減されている。また、F.E.M.解析値との比較において、当て板の接合を合成と仮定した解析値は実験値と良く一致していることから、高力ボルトと接着剤とを併用した今回の当て板接合においては合成に近い接合挙動が期待できるものと考ええる。

次に当て板補修構造について疲労試験を実施し、その後静的載荷試験を行った結果を図-10に示す。荷重振幅8tonfにて400万回繰返し載荷した後においてもデッキプレートに発生するひずみおよびその分布性状に大きな変化は認められず、この程度の載荷重および載荷回数においては、荷重の繰返し載荷に伴う合成効果の変化はほとんどないことが判る。また、疲労試験終了後、当て板材の皿加工部およびYリブ斜材とデッキプレートあるいはコーナプレートとデッキプレートとの溶接部について疲労亀裂の発生を磁粉探傷試験により調査したが、これら部位からの疲労亀裂の発生は認められなかった。これらのことから、今回の当て板接合方法に関しては、荷重の繰返し作用に対して耐久性のある接合方法と言える。



(a) 当て板補修前



(b) 当て板補修後

図-9 供試体デッキプレートのひずみ分布

6. 実橋における当て板補修効果

実橋における当て板補修の効果について、前述した実橋鋼床版部のF.E.M.解析モデルを用いて検討した。また、当て板補修部における鋼床版の変形性状に着目し、その改善による舗装のひび割れ防止効果についても検討を加えた。なお、当て板補修構造の解析に際しては、前項の実験結果より当て板とデッキプレートとが合成されているものと仮定したが、接着剤の経年に伴う物性の変化に関して不明な点もあるため、ボルト接合のみの場合を想定した解析として、一部、重ね梁と仮定した場合についても検討を加えた。また、鋼床版に発生する応力、変形に関しては舗装と鋼床版との合成効果により異なることが考えられたため、舗装材の面外曲げ剛性を鋼換算し、デッキプレートの板厚増加として考慮した場合についても解析を実施した。

6.1 当て板補修による応力低減効果

箱桁腹板コーナプレート上のデッキプレート上面における幅員方向応力度について解析結果をまとめたものを表-1に示す。表中、比較検討のため前述した当て板補修前の構造に対する解析結果についても併記している。当て板の接合仮定に関わらず当て板補修後における減厚部での応力は減厚のない初期状態における応力度以下にまで低減されていることが判る。また、合成仮定においてはその低減量が大きなものとなっている。前述した模型供試体による実験において、当て板とデッキプレートとの合成効果が確認されていることより、今回提案した当て板補修はデッキプレートの応力低減に関し十分効果のある対策であると言える。舗装の剛性を考慮した場合の当て板補修の効果に関しては、当て板補修による応力度の低減割合が舗装を考慮しない場合を下回る結果となっている。これは、舗装剛性の考慮により当て板材の剛性向上への寄与が相対的に少なくなったためと考えられるが、この場合においても当て板補修により減厚の無い現橋状態における応力度まで低減される結果となっている。

6.2 変形性状の改善効果

箱桁腹板コーナプレート近傍におけるデッキプレートのたわみ性状を図-11に示す。現橋構造においてはコーナプレートとYリブ斜材間におけるたわみが

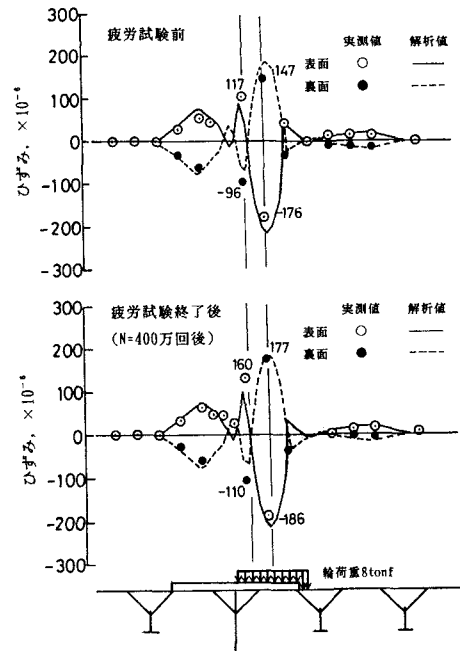


図-10 荷重の繰返し載荷後のひずみ分布

表-1 実橋における当て板補修の効果

(単位: MPa)			
対象構造		舗装考慮無し	
		舗装考慮有り	
現橋構造	減厚損傷無し	72(1.00)	27(1.00) 54(1.00)
	減厚損傷有り	118(1.64)	— —
当て板補修構造	当て板合成	23(0.33)	12(0.44) —
	当て板重ね梁	49(0.69)	— 41(0.76)

注1: 舗装の変形係数として9800NPaを仮定
注2: ()内値は減厚損傷の無い現橋構造との比
▽: 応力度の着目部位

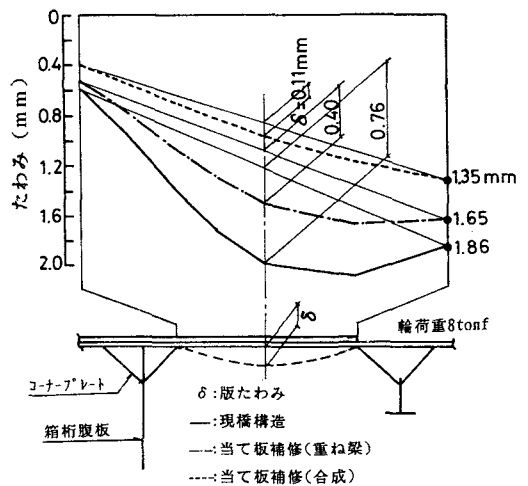
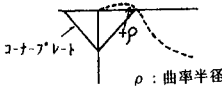


図-11 デッキプレートの局部たわみ性状

顕著に発生している。当て板補修構造ではこのたわみ変形が減少しており、とりわけ合成仮定の当て板補修構造においては現橋構造の1/7程度に低減している。また、当て板添接よりYリブ斜材取り付け点におけるたわみも多少減少しており、当て板が縦リブの断面剛性にも寄与していることが判る。このようなデッキプレートにおける変形性状の改善は、コーナープレート上における引張ひずみの集中を低減させる効果があるものと思われる。表-2はコーナープレート上におけるデッキプレートの曲率半径を示したものである。既存の研究によると舗装のひび割れ防止を図るためにはこの曲率半径を大きくすることが有効であることが述べられている⁴⁾。表より明らかなように、当て板の接合を重ね梁と仮定した場合においてもこの部位での曲率半径は2倍程度に改善されることとなり、舗装のひび割れ防止の観点からも今回の当て板補修は効果的な対策であると言える。

表-2 コーナープレート上の曲率半径

	曲率半径(ρ)
現橋構造(減厚無)	20m
当て板構造(合成)	149m
当て板構造(重ね梁)	39m



7. まとめ

鋼床版デッキプレートの腐食損傷に対する補修対策について、模型供試体による載荷実験、実橋鋼床版部のF.E.M.解析を実施しその効果について検討した。これらの実験、解析および実橋の腐食状況調査より得られた結果を以下に要約して示す。

- (1) デッキプレートの腐食は輪荷重直下である箱桁腹板コーナープレート上に発生している。この部位の舗装には橋軸方向のひび割れが発生していることから、この舗装の損傷が腐食の原因であると考えらる。
- (2) 実橋のF.E.M.解析により腐食減厚による影響を検討した結果、腐食発生部位である箱桁腹板コーナープレート上のデッキプレートには版の面外曲げ作用による負曲げが作用し、減厚局部では高い引張応力が発生することが明らかとなった。
- (3) 腐食減厚部における応力の低減対策として皿頭高力ボルトと接着剤との併用接合による当て板補修を提案し、この接合方法におけるデッキプレートとの合成効果について模型実験により検討した。その結果、今回提案した併用接合によりほぼ合成効果に近い接合強度が得られることが判明した。また、T-20荷重の繰返し載荷による合成効果の変化は認められず、今回の併用接合は耐久性においても問題がないことを確認した。
- (4) 実橋における当て板補修の効果についてF.E.M.解析により検討した結果、腐食減厚部での応力は腐食発生前の初期状態における応力にまで低減されることとなり、その補修効果が確認できた。
- (5) 当て板補修により輪荷重直下におけるデッキプレートのたわみが低減されるとともに舗装のひび割れ発生部におけるデッキプレートの曲率半径が改善されることとなり、当て板補修はデッキプレートの腐食原因である舗装のひび割れ防止に対しても効果的な対策であることが確認された。

本検討の結果から高力ボルトと接着剤を用いた当て板添接により実橋の補修を行うこととなったが、補修効果の最終確認として補修前後において実橋の応力測定を行うこととしている。その結果については当て板補修の実施工およびその他の検討内容を含め別の機会に報告したいと考えている。

参考文献

- 1) 渡辺昇, 大島久: 鋼床版設計実例の全国調査と鋼床版の経済設計, 橋梁と基礎, 76-9, 1976.9
- 2) 飯島尚, 小島逸平, 岩崎尚義: 鋼床版舗装の全国現況調査, 土木技術資料, 25-3(1983), pp.15-20
- 3) 多田宏行: 鋼床版舗装の設計と施工, pp.11-22, 鹿島出版社, 1990.

- 4) 菲澤憲吉, 芳村仁: 鋼床版舗装の局所曲げと内部応力, 構造工学論文集, Vol. 33A, 1987. 3
- 5) 窪田昭夫, 小島逸平, 加藤朝雄: 橋面薄層舗装に関する長浦試験舗装, 土木技術資料, 20-7, 1978.
- 6) 本州四国連絡橋公団: 本州四国連絡橋橋面舗装基準(案), pp. 4-5, 1983. 4
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (Ⅰ 共通編, Ⅱ 鋼橋編), pp. 11, 丸善, 1990. 2
- 8) 名取暢, 寺尾圭史: 接着剤を併用した腐食材の当て板補強について, 土木学会第46回年次学術講演会概要集, 第1部, 1991. 9
- 9) 名取暢, 寺田博昌, 村山稔: 皿頭高力ボルトの鋼床版現場継手部への適用について, 土木学会第45回年次学術講演会概要集, 第1部, 1990. 9

(1992年9月21日受付)