

論文 吹付け下面増厚補強した道路橋 RC 床版の補強効果

佐藤 貢一^{*1}・檜作 正登^{*2}・肥田 研一^{*3}・引地 健彦^{*4}

要旨：東名阪自動車道四日市高架橋は供用開始以来 30 年以上が経過し、RC 床版の疲労損傷が生じていることから、床版下面に補強鉄筋を配置しポリマーセメントモルタルの吹付け工法により一体化させる下面増厚工法による床版補強工事を実施した。本工法は機械化施工により施工性・経済性の改善を図っている。本論文ではポリマーセメントモルタルの吹付けによる床版下面増厚工法の補強効果を載荷試験により検討し、その結果、床版の曲げ性状は改善され疲労耐久性が向上したことが確認された。

キーワード：RC 床版、吹付け、下面増厚、載荷試験、頻度計測、疲労損傷度

1. はじめに

昭和 40 年代以降、鋼橋 RC 床版の疲労損傷が報告され、疲労損傷に対して種々の補強方法が提案され延命対策が実施されている。日本道路公団名古屋管理局桑名管理事務所管轄東名阪自動車道四日市高架橋は、供用開始以来 30 年が経過し、通行車両の大型化、走行車両の増加等により遊離石灰を伴う二方向ひび割れが発生していた。そこで本橋の鋼橋 RC 床版（以下床版と記す）に、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM と記す）を使用した吹付けによる床版下面増厚補強を施した。本橋はランプ橋という環境から、長期の車線規制を伴う上面からの補強対策を行なうことは困難であるため、床版下面からの対策工である床版下面増厚工法を実施した。下面増厚工法は、現在までコテ塗りによる PCM での増厚が一般的であったが、今回実施した PCM 吹付けによる下面増厚工法は、吹付け機械化施工により施工の合理化を図り、施工性、経済性の向上を図った工法である。

本工法による床版補強効果を確認する目的で ダンプトラックを用いた載荷試験等を行なった。静的載荷試験により補強前後の床版たわみの変化、補強後の既設床版と下面増厚部材との一体化の確認を行い、また、

補強前後の応力頻度計測結果を荷重頻度に換算し、疲労損傷度を算出し補強効果の評価を試みた。

2. 橋梁及び補強概要

2.1 橋梁概要

東名阪自動車道は、名神高速道路のバイパス的存在であり、中部と関西及び伊勢・南紀を結ぶ交通・産業・観光路線として、交通量約 5～8 万台／日（名古屋西～亀山間）を抱え重要な役割を果たしている。また、21 世紀初頭には、伊勢湾岸道路（第二名神）との接続も予定されており、益々その利用度が増すと予想される。

四日市高架橋は、4 径間単純合成鉄桁橋の高架橋で床版形状は床版支間 2.69m 床版厚さ $t=20\text{cm}$ 主鉄筋 D16 @ 130 の鉄筋コンクリート床版である。

2.2 床版の物性と損傷度

既設床版の損傷調査は、浮き・剥離等を確認

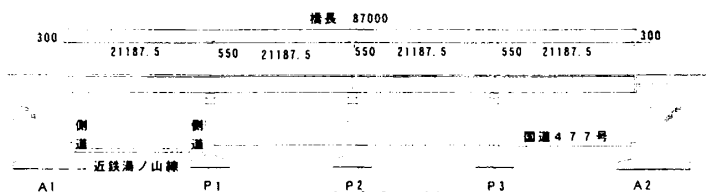


図-1 四日市高架橋概要図

^{*1} 奈良建設(株)技術研究所主任研究員(正会員)

^{*2} 日本道路公団名古屋管理局桑名管理事務所改良助役

^{*3} (株)千代田コンサルタント構造保全部部長

^{*4} (株)千代田コンサルタント構造保全部

するたとき調査と、130万画素デジタルカメラ撮影によりひび割れ幅・延長を計測した。(写真-1)。既設床版の損傷を画像データとして保存・蓄積することが可能で、補強後の床版維持を行うモニタリングの基礎データとして利用が可能である。ひびわれ密度はひびわれ幅 0.2mm 以上で平均 2.85m/m²で最も損傷の進行した床版は5.24m/m²であった。ひびわれは遊離石灰・錆汁を有するものを含み、下面増厚施工前に床版下面の浮きや鉄筋の発錆箇所の断面修復を実施し、橋面の防水も行った。

既設床版のコア抜き供試体を用いて圧縮強度、静弾性係数、中性化深さの物性調査を行った。本床版の物性は部分的に損傷の著しい個所を含むが概ね設計値以上の強度性状を有していた(表-1)。橋梁全体の損傷状況は輪荷重による疲労損傷が主であった²⁾。

2.3 補強方法

吹付け床版下面増厚工法は、既設床版コンクリート下面に新たに補強鉄筋(D6 50×100mm)を配置し、0.7 N/mm²の高圧空気でPCMを床版下面に吹付け、既設構造物と増厚一体化させる工法である(図-2)。本工法は、従来のコテ塗り工法の人力施工による問題点を改善し、施工性の向上による工期短縮や施工費用の低減を図り、機械化施工による材料性状の均一化により、施工精度の向上を図っている。施工に際し、床版下面の脆弱層は、ウォータージェット工法により取除き、健全なコンクリート部分を露出させ(180N/mm², 5分/m²)、補強鉄筋をコンクリートアンカー(M-8)で設置した(6.0本/m²)。また、プレウェットティング工で床版下面に散水し接着面を湿潤状態にした。モルタルポンプにより床版下面までPCMを圧送し、一層目のPCMを補強鉄筋位置まで吹付け(写真-2 t=12mm)、補強鉄筋下面で内部空隙充填や吹付けPCMを十分均すことを目的に充填工を実施した。充填が終了後直ちに所定の厚さまで二層目の吹付けを行った(t=10mm)。仕上げ方法は吹付けとした。

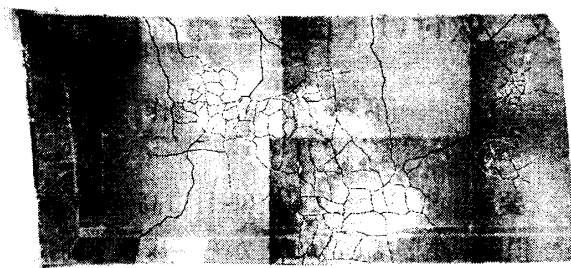


写真-1 床版損傷状況

表-1 物性調査結果

圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (× 10 ⁴ N/mm ²)	中性化深さ (mm)
27.5 ~ 33.4	2.3 ~ 3.1	13 ~ 14

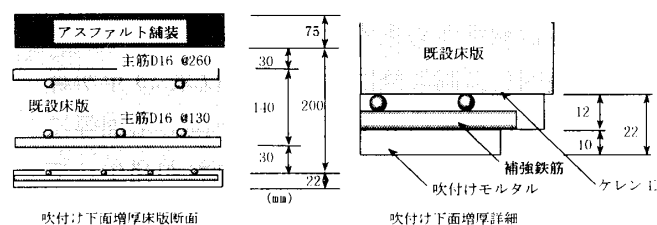


図-2 下面増厚施工断面図

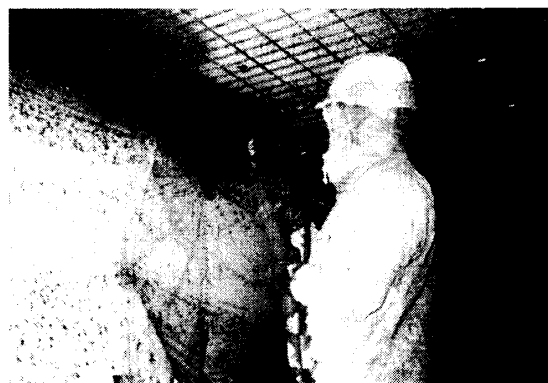


写真-2 吹付け PCM 施工状況 (一層目)

表-2 吹付け材料配合

水／ 粉体質量比%	粉体(ポリマー含む) kg	水 kg	フロー値 mm
16.5	100	16.50	160~170

2.4 モルタル強度性状

吹付け用 PCM はアクリルパウダーをポリマー材として使用したプレミックス PCM である。材料は普通ポルトランドセメント、珪砂に加え、短繊維、混和剤、ポリマーがあらかじめ袋詰めされており現場で水と混合するだけである（表-2）。吹付け採取 PCM の強度性状は一週強度で既設床版強度以上の値を示し、建研式付着強度は 2.4N/mm^2 以上の値を示した。また、吹付け採取供試体は標準採取供試体と比較し 10% 以上の強度増加が見られた。これは高圧力の吹付けにより PCM が緻密化したものと考えられる（表-3）¹⁾。

3. 計測概要

3.1 載荷試験

本橋は 6 主桁の単純鋼合成鉄桁橋である（図-3）。静的載荷試験は、総重量約 200kN のダンプトラックを一台または二台使用し、載荷位置を変化させ行なった。計測は図-3 に示す位置の既設床版と補強部の上下二方向鉄筋ひずみ、補強モルタルひずみ、主桁変位および床版相対変位について行なった。床版相対変位は横桁に変位計を設置して計測した。また、下面増厚補強による床版の疲労性状の変化を確認するため、応力頻度計測を主に既設床版内上下主鉄筋について行なった。頻度計測を行なう鉄筋については、4 ゲージ法でゲージを貼付し気温による影響を防いだ。頻度計測は 3 日間連続して行ない、データは応力振幅法で処理し記録した。

3.2 解析モデル

補強前後に行なった試験計測結果より疲労損傷度を算出し、補強効果を検討するため、本橋を補強前後についてそれぞれモデル化し有限要素法による解析を行った。解析モデルは床版、主桁フランジ、主桁ウェブ、地覆および高欄は

表-3 吹き付けモルタル強度性状

養生日数	供試体採取方法	圧縮強度 N/mm^2	曲げ強度 N/mm^2	引張強度 N/mm^2	付着強度 N/mm^2	静弾性係数 $\times 10^4 \text{N/mm}^2$	施工面積 m^2/day	ロス率
σ_7	吹付採取	30.1	8.4	3.6	2.4	1.30	48~60	1.37
	標準採取	27.1	6.3	2.6	1.9			
	増加率	(1.11)	(1.33)	(1.38)	(1.26)			
σ_{28}	吹付採取	39.1	9.8	4.0	2.4	1.20	48~60	1.37
	標準採取	35.3	7.1	2.6	1.9	1.37		
	増加率	(1.11)	(1.38)	(1.54)	(1.26)	(0.88)		

※四週強度試験結果、圧縮・曲げ JIS A 1108、引張 JIS A 1113
付着：高強度コンクリート板建研式、静弾性係数 ASTM C 469

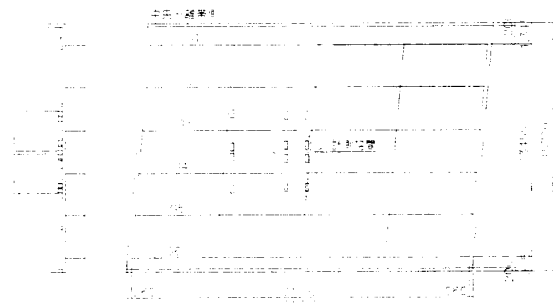


図-3 橋梁概略寸法と載荷位置の例

表-4 材料定数

	弾性係数 (GPa)
鋼材	206
コンクリート	24.5
ポリマーモルタル	11.7

	バネ係数 (kN/mm)
鉛直バネ	98

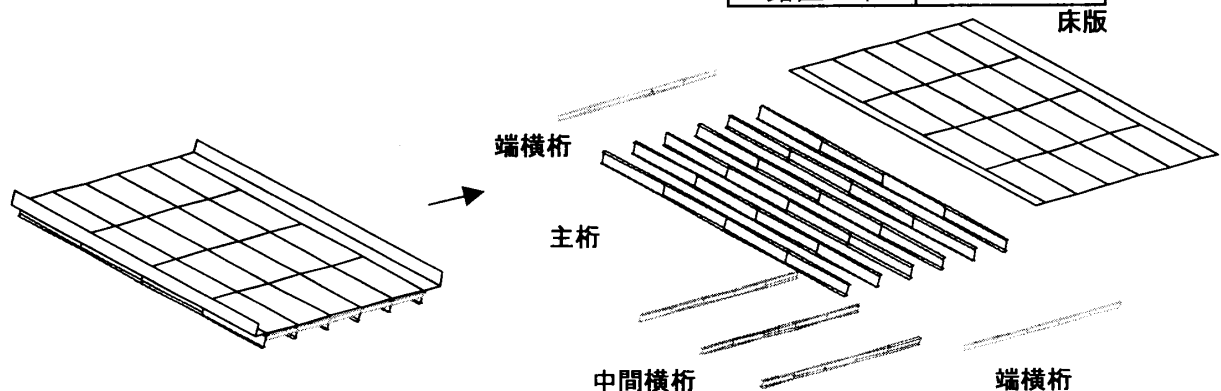


図-4 橋梁解析モデル

それぞれ板要素とし、横桁は断面 2 次モーメントの等しい 1 枚のウェブとしてモデル化した。また、床版と主桁フランジが重なる部分は、一体とした挙動をさせるため、床版の剛性を十分大きくし剛部材で結合し、横桁と重なる床版ハンチ部分は剛性のみを十分大きくした。なお、本橋ではゴム沓が使用されているため、鉛直バネのみを考慮しバネ定数を推定し入力した。解析モデルの材料定数等を表-4 に、モデル概要を図-4 に示す。コンクリートの弾性係数は本橋床版より採取したコア試験結果を、ポリマーモルタルの弾性係数は補強工事時の材料試験値を参考にした。解析における床版厚さは、後述する床版剛性に寄与する断面高さを求め、コンクリートの厚さに換算して入力した。

4. 静的荷試験結果

4. 1 計測結果

下面増厚補強後既設床版下側主鉄筋ひずみは 50%程度に減少した(図-5)。また、補強後のひずみ分布から補強部が既設部と一体として挙動し、補強鉄筋、ポリマーセメントモルタルが引張に抵抗していることが分かる。これら下面増厚補強床版の弾性挙動は、新旧床版が一体化し合成効果を発揮したことによるものといえる。

本計測により得られた主鉄筋ひずみと載荷位置から解析的に求めた計測断面に作用した曲げモーメントの関係は、補強後主鉄筋ひずみ量が約 50%に低減した(図-6)。床版は損傷の進行に伴い橋軸直角方向ひび割れが貫通し、主鉄筋方向にはり状化することが知られている³⁾。図-6 には床版が 200cm~50cm 幅のはりに離散化した場合のはり全断面有効と引張側コンクリートを無視した断面(以下 RC 断面と記す)とした場合の曲げモーメントとひずみの関係を付記している。補強前の主筋ひずみ量は、はり幅 200cm の RC 断面より上側に位置し、はり状化は進行していなかったものと考えられる。

床版相対たわみ量の補強前後の比較を図-7 に示す。図中には補強前床版の全断面有効と RC

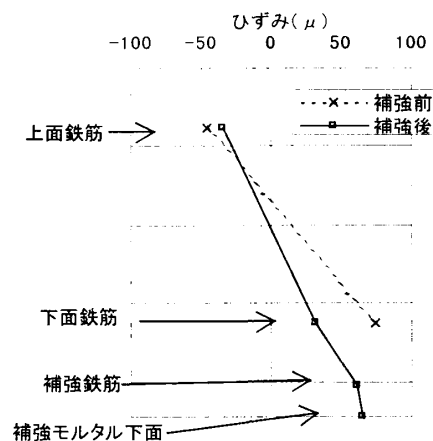


図-5 ひずみ分布

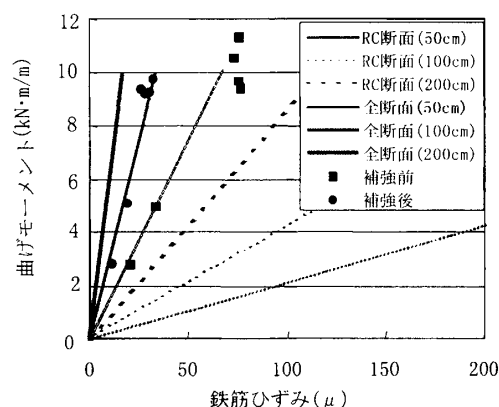


図-6 床版相対たわみ量と計測位置との関係

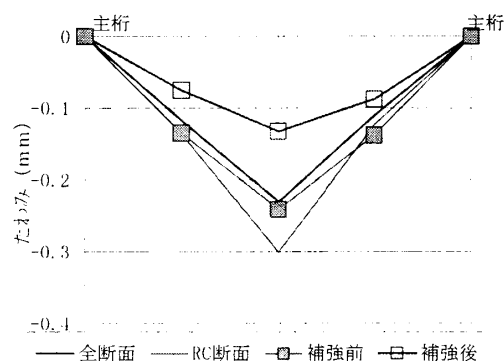


図-7 床版相対たわみ量と計測位置との関係

断面の相対たわみ量計算値を示している。補強前に比べ補強後のたわみ量は床版中央部で 55%減少した。たわみ量の減少効果は床版支間全域に均等に現れている。補強前の既設床版のたわみ量は概ね全断面有効と RC 断面の間に位置する状況であったが、補強後は既設床版全断面有効としたたわみ量より減少した。この床版たわみ量の低減効果は損傷により低下した断面剛性が下面増厚することにより向上し、たわみ量が低減したものと考えられる。

図-8 は後輪荷重を橋軸方向に移動させ、計測位置の前後で静的に荷重を載荷させた場合の、輪荷重の移動と床版中央たわみ量の推移を示したものである。輪荷重移動全域にわたり補強後は計測位置のたわみ量が減少した。補強前のたわみ量分布は計測点近傍で局部的にたわみ量が増加した。既設床版は車両走行荷重の繰り返しによりひび割れが生じ床版の断面剛性が低下した結果、局部的にたわみ量が増加したものと考えられる。一方補強後のたわみ量分布は補強前と比べなだらかな曲線形状を示し、補強後は床版の断面剛性が向上し、版機能が回復したことが分かる。

4.2 補強前後の剛性低下断面の推定

前述の有限要素解析モデルで、床版はひび割れによる剛性低下を考慮し異方性版とした。橋軸直角方向は、曲げによるコンクリートの引張応力領域と有効な高さを考慮しひびわれによる剛性低下断面(以下、剛性低下断面と記す)を求め、橋軸方向は、主桁との合成作用により全圧縮となると仮定し全断面有効とした。剛性低下断面は図-9 に示すフローにより求めた。計測ひずみと一致する剛性低下断面の鉄筋ひずみは、図-11 に示すように床版の有効位置まではコンクリートが引張り力にも抵抗すると仮定して求めた。ここでコンクリート断面は平面保持を仮定している。最終的に、直角方向断面は、既設床版の有効高さ 13cm と補強部分 (PCM も含む) を有効とした計算と一致した。この時の鉄筋ひずみの測定値と計算値の比較を図-10 に示す。

5. 頻度計測と疲労損傷度

応力頻度計測より得られた補強前後の結果から疲労損傷度を算定する。頻度計測は 3 日間それぞれ補強前後で行ったため、3 日間の疲労損傷度を図-12 に比較する。疲労損傷度は、応力頻度分布、S-N 線図とマイナー則を用いて表すことができる。輪荷重のような押し抜きせん断を引き起こす荷重の S-N 線図は、載荷荷重 P を

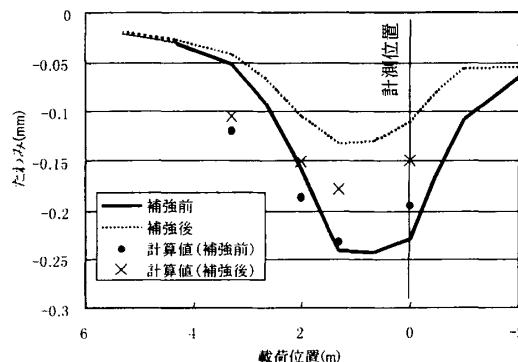


図-8 輪荷重の移動と床版中央たわみ量の推移

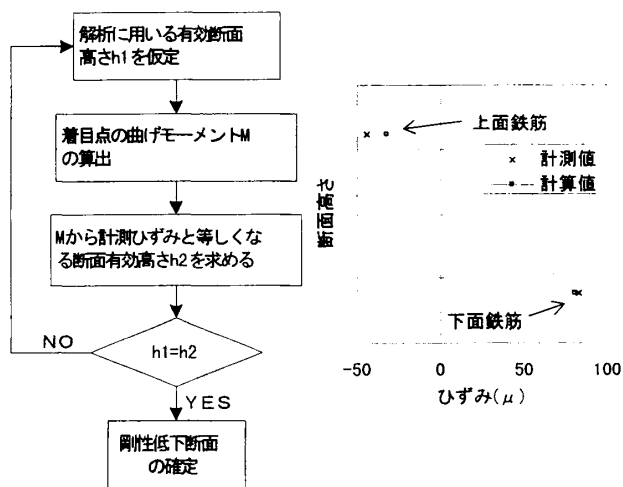


図-9 断面有効高さの推定 図-10 断面ひずみ分布

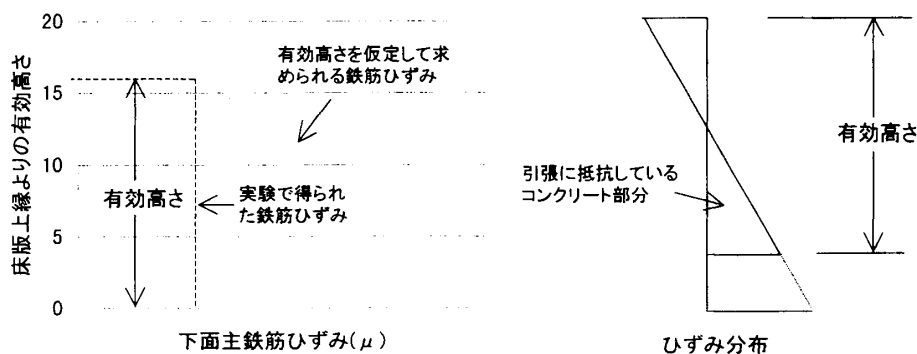


図-11 床版有効高さの仮定

床版（はり状となった床版）のせん断耐荷力 P_{sx} で無次元化した荷重と、疲労寿命の関係で表されている³⁾。松井式⁴⁾を用いて算定したせん断耐荷力は補強前後でそれぞれ 394kN, 576kN となる。静的載荷試験で得られた既設床版主鉄筋ひずみと荷重の関係より、頻度計測より得られた鉄筋ひずみと荷重の関係を求めると図-13 に示すようになる。

図-13 に示す荷重分布と同じ荷重分布を用い、マイナー側を用いて算定した疲労損傷度（表-5）は、補強前 3.58×10^{-7} から補強後 2.76×10^{-9} に約 1/100 に減少した。この算定による補強効果は補強によるせん断耐荷力の増加が変化の要素となったものである。

6. まとめ

疲労損傷を受けた床版に下面増厚補強を施し、補強効果の確認試験・計測を行なった。本検討の結果を以下に示す。

1) 静的載荷試験においては、補強後の床版たわみおよび既設床版下側主鉄筋ひずみは補強前と比べ減少した。補強後のひずみ分布は補強部が既設部と一体として挙動し、平面保持が成立する弾性的なひずみ分布を示した。また、PCM も引張りに抵抗していることが分かった。

2) 損傷した床版の断面剛性は下面増厚補強することにより向上し、床版の相対たわみ量が減少した。補強前は断面剛性の低下から輪荷重の載荷に対し局部的なたわみ量の増加が見られたが、補強後のたわみ分布はなだらかな曲線形状となり版機能の改善が確認された。

3) これらのことから本補強工法が曲げ補強効果を発揮したことが確認できた。

4) 応力頻度計測結果を、静的載荷試験結果と有限要素解析結果から、輪荷重の頻度分布に換算することを試みた。こうして得られた補強前後の荷重頻度から補強前後の一般通行車両による疲労損傷度を算出し、補強後の疲労損傷度をマイナー側を用いて算定した。算定された疲労損傷度は補強前と比べ補強後は約 1/100 に減少

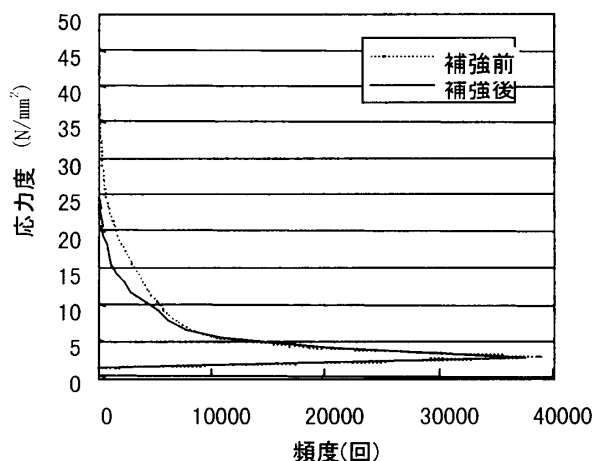


図-12 補強前後の応力頻度分布

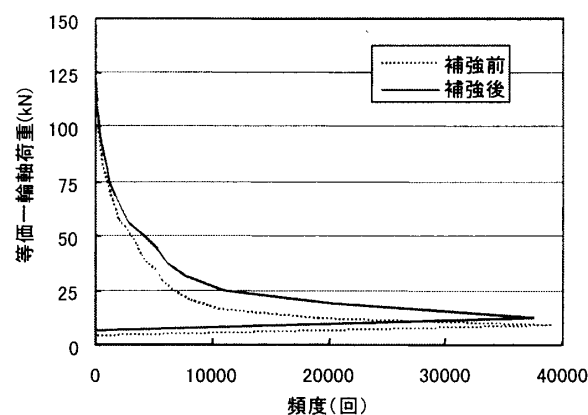


図-13 等価一輪軸荷重と頻度関係

表-5 補強前後の疲労損傷度

補強前	3.58×10^{-7}
補強後	2.76×10^{-9}

する結果となり、疲労耐久性が改善される事が分かった。

参考文献

- 1) 後藤, 小玉: ポリマーセメントモルタルの吹き付け性状に関する研究, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, V. pp596-597, 1997. 9
- 2) 松井, 前田: 道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集, No. 374/I-6, pp. 419-426 (1986. 10)
- 3) 松井: 移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 2, pp. 627-632
- 4) 前田, 松井: 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式, 土木学会論文集, No. 348/V-1, pp. 133-141 (1984. 8)