

論文 下面増厚した RC 床版の疲労に関する研究

佐藤 貢一^{1*} 小玉 克巳^{2*}

要旨：道路橋鉄筋コンクリート床版は損傷が多く報告されており，原因として車両輪荷重の繰り返しによる疲労が考えられている。また走行する車両が大型化され，床版の効果的補強工法の早急な開発が望まれている。

本報告では下面増厚補強した床版の室内載荷実験を実施し，繰り返し荷重環境下における床版の応力性状を検討した。さらに室内実験の結果を用い実橋における床版応力測定結果に関してマイナー則を適用し補強前後の損傷進行度を検討した。検討の結果下面増厚補強することによって既設床版の損傷進行が低減され延命効果があることが示された。

キーワード：床版，補強，疲労，損傷度，劣化度，

1. はじめに

道路橋鉄筋コンクリート床版（以下、床版と略す）は損傷が多く報告されており，原因として交通量の増大，大型車両による繰り返し荷重環境下に対して，床版厚の不足，鉄筋量不足，コンクリートの品質不良等が挙げられる。さらに車両による繰り返し環境下における床版への雨水の浸透が床版の耐久性を低下させている^[1]。

著者らはこれまで損傷を受けた床版の補強工法として，床版下面に補強鉄筋を配置し付着強度にとむポリアクリル酸エステル系ポリマーセメントモルタル（以下PPモルタルと略す）で一体化する工法を提唱してきた^{[2][3]}。本報告では下面増厚補強した床版の室内載荷実験および実橋における下面増厚床版の応力測定を行い，繰り返し荷重環境下における床版の性状を検討した。

2. 室内載荷実験

2. 1 実験概要

(1) 床版供試体

実験に用いた床版供試体は図-1に示すように実橋床版の80%モデルとし，主鉄筋はSD295-D16 110mmピッチ，配力鉄筋はSD295-D13 250mmピッチを配置した。供試体の種類は無補強供試体2体（N-1、N-2），CFRP（格子状カーボン繊維）を用いたプレキャスト板を床版下面に接着増厚したもの1体（CFRP），PC鋼線を用いたプレキャスト板を床版下面に接着増厚したもの1体（PC）とし，静的載荷試験および滞水繰返し載荷試験を行った。プレキャスト板

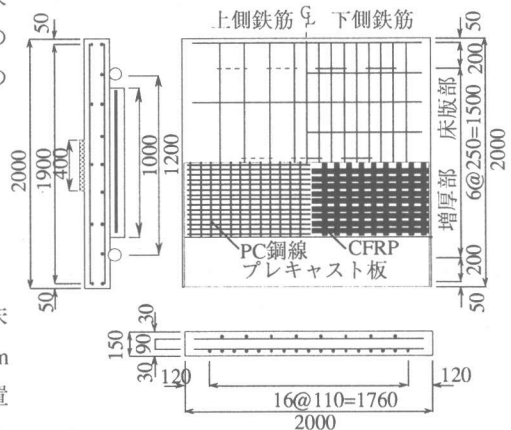


図-1 RC床版形状

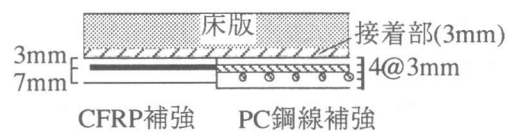


図-2 増厚部断面図

* 1 奈良建設(株)技術研究所，（正会員）

* 2 武蔵工業大学教授 土木工学科，（正会員）

表-1 PPモルタルの性状

弾性係数	圧縮強度	曲げ強度	引張強度	付着強度	凍結融解
1.19×10^5 (kgf/cm ²)	218 (kgf/cm ²)	92.5 (kgf/cm ²)	26.3 (kgf/cm ²)	25.0 (kgf/cm ²)	300cycle異常なし
促進耐候性試験	塩水噴霧		中性化促進試験		耐アルカリ性
3000時間異常なし	3000時間異常なし		コンクリートの1/5		異常なし

表-2 鉄筋および補強筋の性状

	弾性係数 (kgf/cm ²)	断面積 (cm ²)		降伏点応力 (kgf/cm ²)	破断強度 (kgf/cm ²)	引張剛性 (kgf)
		繊維断面積	総断面積			
鉄筋D16	2.1×10^6		1.986	3600	5365	—
鉄筋D13	2.1×10^6		1.267	3600	5365	—
CFRP	3.5×10^6	0.0499	0.1248	—	27000	1.75×10^6
PC鋼線	2.0×10^6		0.0605	—	21500	1.21×10^5

の断面厚はCFRP1.0cm、PC鋼線1.2cmとした（図-2）。
補強方法は、あらかじめ床版下面の脆弱層をミニディ
スクサンダーで取り除き表面処理した後、PPモルタル
とコンクリートアンカーを使用して接着部分のPPモル
タルが3mmとなるまでプレキャスト板を圧着し床版と
一体化させた。

(2) 増厚材料

PPモルタルは、白セメントと珪砂からなるコンパウ
ンドと複合ポリマーエマルジョンを6：1の割合で練り
混ぜ製作した。PPモルタルは、表-1に示すように弾性
係数がコンクリートの約1/2で、特に曲げ、付着強度が

コンクリートと比較して高い。さらに耐塩害、耐中性化、耐凍結融解性に優れている。補強筋はCFRP
（Carbon Fiber Reinforced Plastic）、PC鋼線の2種類とした。CFRPは格子状のもの（プレキャスト板あ
たり主鉄筋方向10cmピッチ20本、配力鉄筋方向2.5cmピッチ40本）を用い、PC鋼線は直径2.9mmのもの
（プレキャスト板あたり主鉄筋方向8.0cmピッチ27本、配力鉄筋方向2.0cmピッチ50本）とした（図-1）。
CFRP、PC鋼線の性状を表-2に示す。

(3) 荷重試験方法

荷重試験は、図-3(a)に示すように支持スパン120cmとし、相対する二辺を単純支持、他の二辺を自由端
として行った。荷重は、輪荷重50cm×20cmの80%を想定した40cm×16cmの鋼板（厚さ1.0cm）を介し載
荷した。静的荷重試験は床版中央部に静的に漸増荷重し、主鉄筋、配力鉄筋、PC板補強筋のひずみの計
測を行なった。

繰返し荷重試験では床版供試体上に滞水ゾーンを設置して試験を行った。この滞水状況で荷重点を複
数の箇所に移動させて荷重させることによって実橋床版に近い荷重状態となり、損傷状況も再現でき
ることから¹⁴⁾、荷重を図-3(b)に示すA、B、Cの各位置に荷重した。繰返し荷重は1点あたりの繰返し回数
が30万、200万に達した時点で順次荷重点をA→B→C→Aと移動させた。荷重振幅の上限値は繰返し回数
200万までは、無補強供試体で10tf（無補強供試体の静的破壊荷重の25%）、補強供試体で17tf（無補強供
試体の静的破壊荷重の42.5%）、繰返し回数200万以降は、無補強供試体で14tf（無補強供試体の静的破壊
荷重の35%）、補強供試体で22tf（無補強供試体の静的破壊荷重の55%）とし、下限値は無補強供試体で
1.5tf、補強供試体で3.0tfとした。また、荷重速度は約5Hzで行った。繰返し荷重回数が1、5、50、0.5万、
1.5万、5万、15万、30万、200万で繰返し荷重を止めて静的荷重試験を行った。

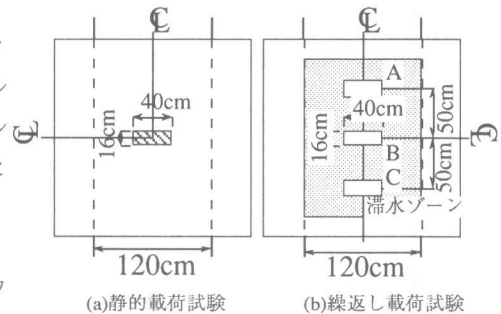


図-3 荷重試験状況

3. 載荷試験結果と考察

3. 1 静的載荷試験結果

a 破壊耐力と破壊形態

4体の供試体の破壊性状はすべて押抜きせん断によって破壊した。各供試体の破壊荷重および角田ら^[5]、松井ら^[6]の提案した押抜きせん断耐力の算定式による計算値を表-3に示す。補強供試体CFRP、PCともに破壊荷重が約50tfと無補強供試体N-1、N-2に比べて耐力が約1.3倍に向上し、松井式で算定した計算値と符合することから、補強後の床版の耐力も算定が可能であると考えられる。

b 主鉄筋に作用する応力

図-4に荷重と主鉄筋に作用する応力の関係を示す。載荷荷重10tfにおける補強供試体CFRP、PCの主鉄筋の応力はともに無補強供試体N-1、N-2の約0.3～0.5に低減し、載荷荷重30tfにおいてはCFRPが約0.5、PCが約0.8程度に低減する結果が得られた。無補強及び補強供試体いずれの供試体も鉄筋の降伏後に押し抜きせん断破壊した。このことから補強の有無にかかわらず、RC床版の破壊は床版内の鉄筋が降伏しせん断抵抗を失い押抜きせん断破壊するものと考えられる。

3. 2 滞水繰返し載荷試験

a 疲労強度と破壊形態

4体の供試体は全て押抜きせん断で破壊した。補強供試体の床版下面のひびわれの形成および漏水状況は無補強と同様であった。無補強供試体N-1では、上限荷重14tfでB点において5万回で破壊、N-2が上限荷重10.0tfでA点において約82万回で破壊を生じた。一方、下面増厚した補強供試体では上限荷重17.0tfの場合、PCではA、B、C点3点とも200万回でも破壊を生じないとの実験結果が得られた。雨水の床版への浸透を検討するためにRC床版を乾燥状態で行った角田ら^[7]の定点繰返し載荷試験結果および滞水下で行った木曾ら^[8]の多点移動繰返し載荷試験結果と本実験結果の比較を図-5に示す。本実験の無補強供試体での結果は、滞水下で行った木曾らの実験結果とはほぼ一致し、補強供試体では乾燥状態での結果に近くなっている。以上のことから、下面増厚補強することによって、滞水によるRC床版の疲労強度の影響を抑制できるものと考えられる。

表-3 静的載荷試験結果

供試体	押抜きせん断耐力(N)			
	実験値(P _t)		計算値(P _c)	
			角田式	松井式
N-1	37.0	38.5[1.00]	40.1(0.92)	42.8(0.86)
N-2	40.0		40.1(0.92)	42.8(0.86)
CFRP	50.0[1.30]		41.3(1.21)	50.9(0.98)
PC	49.5[1.29]		41.7(1.19)	52.8(0.94)

[]内は補強供試体の破壊荷重の無補強供試体の破壊荷重に対する割合
()内は計算値の実験値に対する割合

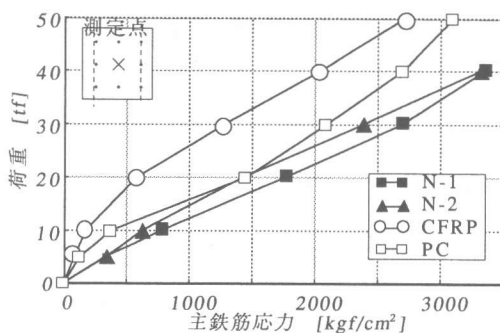


図-4 荷重と主鉄筋応力度との関係

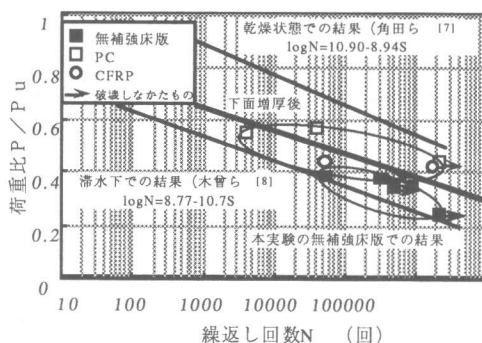


図-5 荷重比と疲労寿命の関係

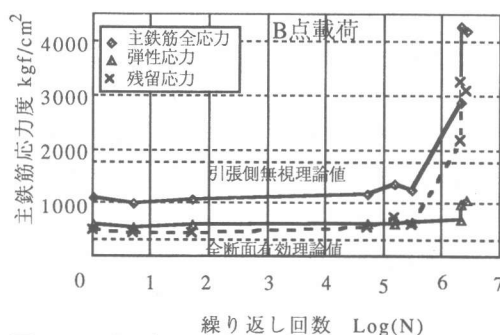


図-6 荷重と主鉄筋応力の関係 (N-2)

b 主鉄筋に作用する応力

床版の主鉄筋応力度と繰返し回数との関係を図-6, 7に示す。補強の有無にかかわらず繰返し回数の増加にともない残留応力が増加し、最終的に破壊している。この傾向は繰返し回数が増加するにつれてひびわれが進展し、断面二次モーメントの低下、鉄筋残留ひずみ量増加により主鉄筋弾性応力度と残留応力度との和である全応力が降伏荷重を超え押抜きせん断破壊したものと考えられる。すなわちこの傾向が繰返し载荷によるRC床版の劣化の進行および破壊を示しているものと考えられる。

滞水環境下における繰返し载荷荷重比と繰返し回数との関係は係数A, Bを用いて式(1)で示される。

$$\text{Log } N = A - B(P / P_u) \quad (1)$$

N : 破壊までの繰返し回数

A : 係数8.77

P : 载荷荷重

B : 係数10.70

P_u : 静的破壊荷重

静的破壊は鉄筋の降伏によって生じ、繰返し荷重環境下においても同様であることから上式は鉄筋の応力比を用いて下式のように表わすことができる。

$$\text{Log } N = A - B(S / S_y) \quad (2)$$

S : 主鉄筋作用応力

S_y : 主鉄筋降伏応力

4. 実橋における増厚効果

4. 1 橋梁概要と計測

(1) 橋梁概要

本橋梁は図-8に示すように橋長207.1mの10径間単純合成の鋼鈑桁橋で3本主桁構造である。床版支間は2.8mで竣工後に支間中央部に桁増設が行われている。床版厚さは19cm主鉄筋D16@100, 配力鉄筋D13@250が配置されている。床版の損傷状況は、0.2mm～0.7mm程度のひびわれが2方向に発生し部分的に亀甲状となり、1パネルにつき数カ所の遊離石灰や錆汁が発生している状況である。

本工法は、サンドブラストによりRC床版下面の脆弱層を取り除き表面処理を行った後、図-9に示すように補強鉄筋(D6橋軸@50, 橋軸直角@100)を床版下面にアンカーで固定し、3層に分けてPPモルタルをコテ塗りにより所定の厚さ(18mm)まで増厚し床版との一体化を行った。補強鉄筋は、現状のRC

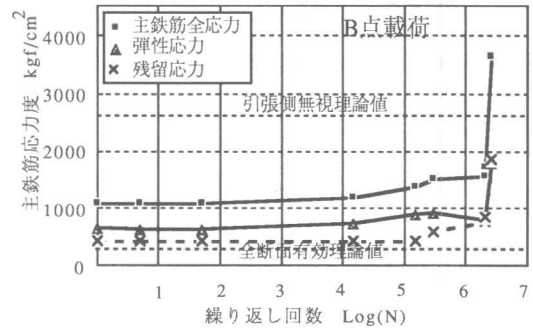
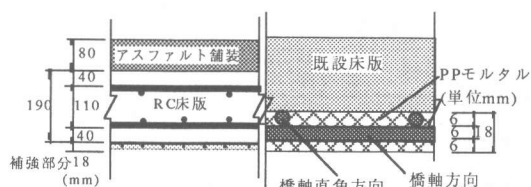


図-7 荷重と主鉄筋応力の関係 (PC)



床版増厚状況図

増厚詳細図

図-9 床版増厚概要

床版設計法に基づき既設床版で不足する鉄筋量を補った。PPモルタルの中性化速度がコンクリートの1/5であること、また接着強度が高く防錆作用を有することから、本工法では補強部分のかぶり厚さを6mmとした。下面増厚施工は交通開放のまま行った。

(2) 計測方法

計測は、RC床版の主鉄筋の応力度を、主鉄筋に張り付けた抵抗ひずみ線ゲージにより、図-10に示す床版スパン中央部で2日間交通開放のまま測定した。測定は鉄筋の応力値が最も高くなると想定されるP8-P9-A2間の支間中央部とし、データの信頼性を高めるために測点Aと測点Bの2箇所で行った。計測は一般通行下における車両による主鉄筋の応力振幅を測定し頻度解析した。

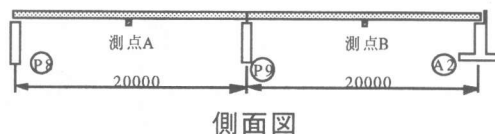
4. 2 計測結果と考察

(1) 鉄筋応力度

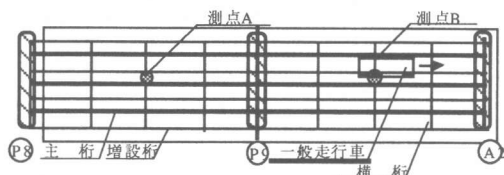
2日間(48時間)の交通開放下での床版鉄筋応力振幅の計測結果を図-11, 12に示す。補強前の最大応力振幅はA点で350kgf/cm²B点で350kgf/cm²であった。この主鉄筋の応力度の最大振幅は下面増厚補強することによって30~40%程度低減し、測定回数も40~80%低減した。

(2) 実橋床版の損傷度

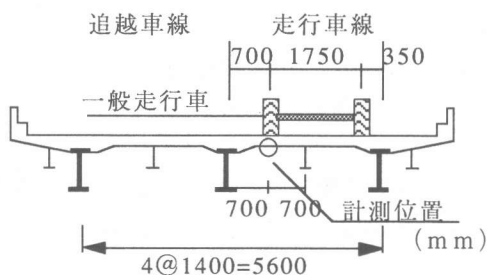
道路橋床版の様に変動する交通荷重の作用する構造物に対して最も簡便な解析手法としてマイナーの仮設がある。荷重一定として载荷したときの破壊回数 N_i に対して、組み合わせ荷重下での荷重作用回数を n_i とすると、疲労破壊するための条件は以下の式(3)に対して $D=1$ と定義されている。



側面図



平面図



断面図

図-10 橋梁概要図

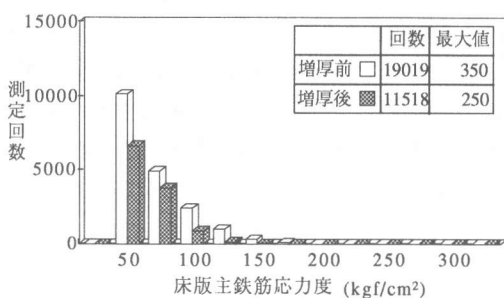


図-11 応力振幅と測定回数(A点)

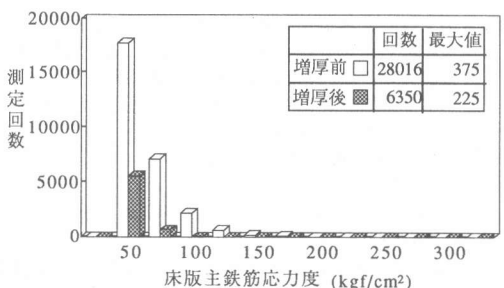


図-12 応力振幅と測定回数(B点)

表-4 増厚前後における床版劣化度

	補 強 前		補 強 後	
	測点A	測点B	測点A	測点B
損傷度 (1年)	0.0108	0.0149	0.0063 (0.58)	0.0031 (0.21)
劣化度 (30年)	0.3240	0.4474	0.1890	0.0930
疲労寿命	62.6	37.0	107.3 (1.7)	178.2 (4.8)

$$D = \sum (n_i / N_i) \quad (3)$$

RC床版の疲労寿命を予測する上で式(3)に示すマイナー則が成立すると仮定する。室内での床版の疲労実験結果より床版の主鉄筋弾性応力度は破壊直前まではほぼ一定であり、弾性応力度と疲労寿命の関係は式(2)で示される。この弾性応力度が低減することによって疲労寿命が向上する。本計測で得られた床版主鉄筋の応力振幅補強前後の値(図-11, 12)から式(2)を用いて各応力振幅値の破壊回数を算定しマイナー則より床版の損傷度を求めた(表-4)。表中の損傷度は本計測48時間の計算結果を年間の交通変動がないものとして1年間分に換算した年間損傷度である。また劣化度は年間損傷度の値に本橋梁の供用期間30年倍したものである。今回の計測の結果より年間損傷度は下面増厚することにより40~80%低減し、 $D=1$ と定義される疲労破壊までの疲労寿命が約1.7倍以上に向上すると考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を以下に列挙する。

- 1) 下面増厚補強によって疲労寿命が向上し、また床版上の滞水による疲労強度の低下を抑制できる。
- 2) 繰り返し荷重作用下の床版の破壊に至る経緯は床版主鉄筋の残留応力が増加し、弾性応力との和の全応力が降伏応力に達したときに押抜きせん断破壊するものと考えられる。
- 3) 実橋の計測結果より下面増厚補強することにより主鉄筋の応力振幅頻度が低減することが確認できた。このことから車両の繰り返し荷重による年間損傷度が低減し、疲労寿命が向上するものと推定される。

参考文献

- 1) 例えば、阪神高速道路公団：道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性、1991.12
- 2) 例えば、永井健、佐藤貢一、小玉克巳：下面増厚補強した鉄筋コンクリート床版に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.2, pp341-346, 1993.6
- 3) 例えば、佐藤貢一・小玉克巳・大木浩靖・須田幸彦・渡辺裕一：下面増厚した鋼橋RC床版の効果、コンクリート構造物の補修補強に関するシンポジウム論文報告集、PP.77-84, 1992.2
- 4) 後藤祐司：鋼橋RC床版の損傷機構に関する一考察、橋梁と基礎、pp.111-115, 1983.8
- 5) 角田与史雄、井藤昭夫、藤田嘉夫：鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究、土木学会論文報告集第229号、pp.105-115, 1974.9
- 6) 前田幸雄、松井繁之：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
- 7) 角田与史雄、藤田嘉夫：RCスラブの疲労押抜きせん断強度に関する基礎的研究、土木学会論文報告集第317号、pp.149-157, 1982.1
- 8) 木曾茂、神谷誠、飯束善夫：橋梁床版の補強に関する実験的研究、土木学会第48回年次学術講演概要集I-65, pp.278-279, 1993.9
- 9) 松井繁之、前田幸雄：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