

論文

[1171] 下面増厚した RC 床版の疲労性状に関する研究

佐藤 貢一^{1*}・小玉 克巳^{2*}・永井 健^{3*}

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）の損傷が問題となって久しく、原因として交通量の増大、大型車両の増加に対して床版厚の不足、配力鉄筋不足、コンクリートの品質不良等が挙げられ、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⁾。また走行する車両重量が大型化され、床版の補強工法の早急な開発が望まれている。

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。これまでの静的載荷実験で増厚後新旧床版が一体化し、床版の耐荷力及び曲げ性状が向上することが確認された²⁾。

本研究は本工法の疲労性状の確認を行うことを目的に滞水環境での繰り返し載荷実験を行った。また増厚方法として品質の安定化および作業の省力化による工期の短縮のため増厚部分のプレキャスト化を行い床版と一体化させる工法を採用した。

2. 実験概要

2. 1 実験供試体

実験に用いたRC床版供試体は実橋床版の80%モデルとし、寸法は図-1に示すもので幅200cm、床版厚は15cmとした。コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比64.5%、単位水量は157kg/m³、細骨材率47.5%のもので、主鉄筋としてSD295-D16、配力鉄筋としてSD295-D13を用いた。供試体の種類は、静的載荷試験、繰り返し載荷試験ともに無補強供試体2体（N-1、N-2）、CFRPを用いたプレキャスト板で補強したもの1体（FRP）、PC鋼線を用いたプレキャスト板で補強したもの1体（PC）の合計4体ずつとした。

2. 2 下面増厚工法

(1) 使用材料

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に比べて低く、特に曲げ、引張、付着強度が高く、さらに耐塩

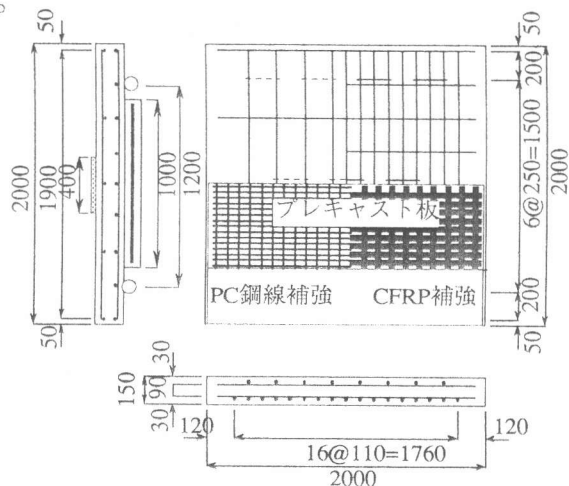


図-1 RC床版形状

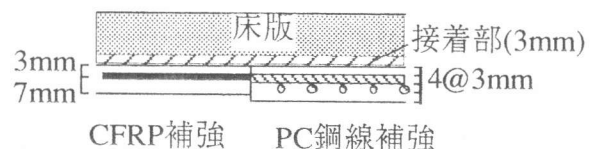


図-2 増厚部断面図

*1 奈良建設（株） 土木事業部技術部技術研究所研究員（正会員）

*2 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科，工博（正会員）

*3 武蔵工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻（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
1.19×10^3 (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

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。

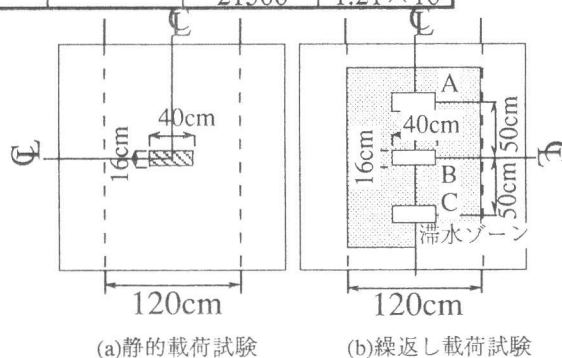


図-3 載荷試験状況

(2) プレキャスト板の製作及び接着

プレキャスト板の断面厚はCFRPを用いたもの

1.0cm、PC鋼線を用いたものは1.2cmとした（図-2）。プレキャスト板の接着は、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となるまで圧着し床版と一体化させた。

2. 3 載荷試験方法

(1) 静的載荷試験

静的載荷試験は、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、輪荷重面積の80%を想定した40cm×16cmの鋼板（厚さ1.0cm）を介し床版中央部に静的に漸増載荷し、主鉄筋、配力鉄筋、PC板補強筋、床版下面、プレキャスト板下面のひずみおよびたわみ量の計測を行なった。

(2) 繰返し載荷試験

繰返し載荷試験では荷重点を複数の箇所に移動させて載荷させることによって実橋床版に近い載荷状態となり、損傷状況も再現できることから³⁾、荷重を図-3(b)に示すA、B、Cの各位置に載荷した。また、床版供試体上に滞水ゾーンを設置して試験を行った。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載荷点を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、載荷速度は約5Hzで行った。繰返し載荷回数が1、5、50、0.5万、1.5万、5万、15万、30万、200万で繰返し載荷を止めて静的載荷試験を行った。

3. 載荷試験結果と考察

3. 1 静的載荷試験結果

(1) 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⁴⁾、松井⁵⁾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-4に示す。補強供試体FRP、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3割向上し、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。

N-2の破壊性状は載荷版直下を中心として楕円状の押抜き面が見られた。FRP、PCでは床版本体は押し抜きせん断破壊を起こしたが、プレキャスト板は押抜かれておらず破壊を生じなかった。

(2) 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。主鉄筋に作用する応力は、鉄筋のひずみの実測値から算定(ひずみ×弾性係数)した。載荷荷重5tfにおいて補強供試体FRP、PCの主鉄筋の応力はともに無補強供試体N-1、N-2の約7割、載荷荷重30tfにおいてはFRPが約5割、PCが約2割程度低減する結果が得られ、CFRPを用いたプレキャスト板は高い補強効果が示された。

(3) 床版中央のたわみ量

図-5に床版中央のたわみ量と荷重の関係を示す。下面増厚することにより無補強床版に比べ載荷荷重5tfではFRP、PCともに5割、載荷荷重30tfではFRPで約5割、PCで約2割程度のたわみ量の低減効果が見られた。補強供試体FRPがPCにくらべてたわみ量の低減効果が高い結果となったのは、主鉄筋の応力低減効果が高いことからわかるように補強筋CFRPとPPモルタルの付着が良好であったことからCFRPプレキャスト板が床版の変形を抑制したためであると考えられる。一方、補強供試体PCでは、荷重のごく初期の段階においてはFRPと同程度のたわみ量の低減が見られるが、荷重の増加に伴う床版の変形にプレキャスト板が追従するため床版変形の抑制効果は少ない。

図-6に床版を梁に近似(有効幅を用いた床版の近

表-3 静的載荷試験結果

供試体	押抜きせん断耐力(tf)		
	実験値(Pt)	計算値(Pc)	
		角田式	松井式
N-1	37.0	40.1(0.92)	42.8(0.86)
N-2	40.0	40.1(0.92)	42.8(0.86)
FRP	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

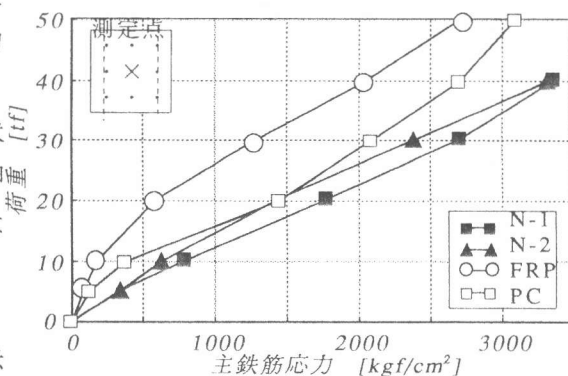


図-4 荷重と主鉄筋応力度との関係

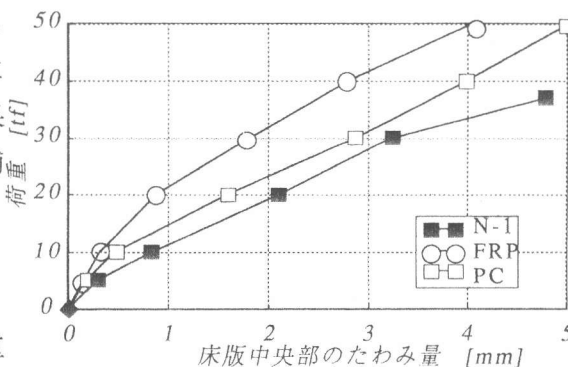


図-5 荷重と床版中央部のたわみ量の関係

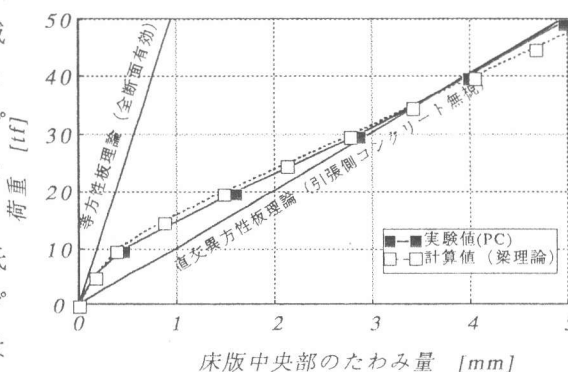


図-6 たわみ量の実測値と理論値との比較

似計算)して求めたたわみ量の理論値と実測値の比較を示す。ひびわれ発生後の断面二次モーメントについてはBransonの4乗式を用いた。また等方性板理論及び直行異方性板理論⁶⁾の算定値も図中に付記する。下面増厚床版の実測値と理論値がほぼ一致し増厚後の床版たわみ量を計算によって把握できることが示された。

3. 2 疲労強度と破壊形態

(1) 疲労強度

表-4に繰返し載荷試験の結果を示す。4体の供試体は全て押抜きせん断で破壊し、破壊は載荷点近傍に限られていたため、疲労寿命は供試体1体あたりではなく載荷点ごとに整理した。また、☆印は所定の繰返し載荷回数に達しても破壊を起こさなかったものである。また、図-7に各供試体の荷重比と疲労寿命の関係を示した。無補強供試体N-1では、上限荷重14.8tf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、FRPではC点で1644980回で破壊、PCでは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。供試体数が2体と少ないが、無補強供試体に上限荷重17.0tfを載荷した場合の疲労寿命を推定すると約23回となった。これらの結果より下面増厚補強による疲労寿命の向上が確認できた。RC床版の損傷には輪荷重の繰返し載荷ばかりでなく、雨水のひびわれへの浸透が大きく影響していると言われており、滞水下でのRC床版の疲労寿命は乾燥状態の約1/200~1/300に低下する⁷⁾との報告もある。そこで、RC床版を乾燥状態で行った角田ら⁸⁾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⁹⁾の多点移動繰返し載荷試験結果と本実験結果の比較を行った(図-7)。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ほぼ一致し、床版の滞水による疲労強度の低下を確認することができた。一方、本実験の補強供試体では、供試体PCの載荷点C、供試体FRPの載荷点Aの結果が滞水下での無補強RC床版の結果に近くなっているが、その他の結果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。

(2) 破壊形態

4体の供試体は全て押抜きせん断によって破壊を起こし、鉄筋の疲労破断は生じなかった。図-8に無補強供試体N-2、補強供試体PC、最終ひびわれ発生状況を示す。無補強供試体は最終的なA点での荷重14tの載荷で、約20万回(A点で合計270万回)での漏水量は1分あたり73cc、約30万回(A点で合計280万回)では170cc、31.5万回(A点で合計281.5万回)では約2000ccに達し、約82万回で破壊を生じ、破壊直前で漏水量が急増する性状を示した。補強供試体PCにおいては、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なものであった。補強供試体FRPにおいては、PCとは異なり上限荷重17.0tfで繰返し回数が1850回の時点で漏水が始まった。さらに2.5万回の時点で

表-4 繰返し載荷試験結果

	上限荷重 (tf)	下限荷重 (tf)	荷重比	荷重振幅 (tf)	疲労寿命(回)		
					載荷点A	載荷点B	載荷点C
N-1	14.8	2.0	0.37	12.8	300000☆	50000	—
N-2	10.0	1.5	0.25	8.5	2000000☆	2000000☆	2000000☆
	14.0	1.5	0.35	12.5	820160	500000☆	500000☆
PC	17.0	3.0	0.425	14.0	2000000☆	2000000☆	2000000☆
	22.0	3.0	0.55	19.0	35620	—	3800
FRP	17.0	3.0	0.425	14.0	43020	—	1644980

荷重比：上限荷重/無補強供試体の静的破壊荷重
☆：破壊しなかったもの

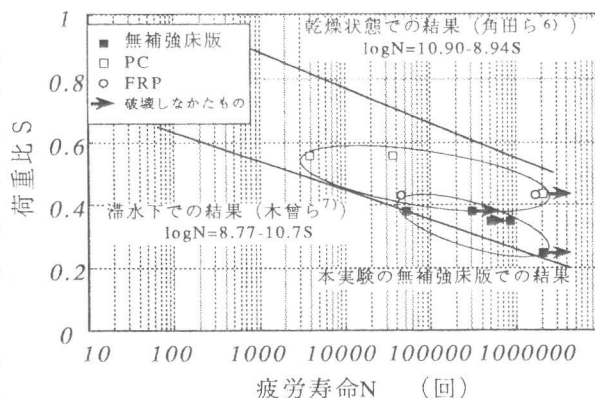


図-7 荷重比と疲労寿命の関係

は床版とプレキャスト板の間に剥離が生じ、その剥離部分から水が側面に噴き出てくる状態となり、43020回の早期に破壊に至った。C点での載荷では約170万回で破壊とA点に比べればかなり疲労寿命が伸びる結果となった。載荷点による寿命の相違や、補強供試体PCに対し早期に破壊する結果の原因として、床版供試体自体の偏心あるいは、PC鋼線プレキャスト板の高い変形追従性が破壊に至るまで剥離を生じない結果となった事が考えられるが、今後のさらなる検討が必要である。

3. 3 主鉄筋に作用する応力

図-9, 10に各繰返し回数における荷重と主鉄筋に作用する応力の関係を示す。全てA点載荷時のものである。

無補強供試体N-2の載荷1回目においては、約6tfを境にコンクリートの全断面を有効とした弾性領域から引張側コンクリートを無視したいわゆるRC断面への遷移領域に移っており、この時点でひびわれが発生していると思われる。載荷1回目における弾性領域のグラフの勾配を1.00とすると各繰返し回数でのグラフの勾配は、5回が0.342、50回が0.326、30万回が0.288、200万回が0.253、250万回が0.240となり、繰返し回数が進むにつれてグラフの勾配が緩やかになる傾向になっている。この傾向は繰返し回数が増加するにつれてひびわれの発生による主鉄筋応力負荷の増加、すなわち繰返し載荷によるRC床版の劣化の進行を示しているものと考えられる。

補強供試体PCでの載荷1回目においては、約11tfでひびわれが発生していると思われこの時点でも境に弾性領域からRC断面への遷移領域へ移行している。ひびわれ発生後の応力負荷の増加は無補強供試体N-2に比べて少なくなっており、下面増厚による主鉄筋に作用する応力の低減効果が確認できる。また、無補強供試体N-2と同じ繰返し回数の勾配との比をとると、1回が1.404、5回が1.796、50回が1.634、30万回が1.442、200万回が1.429と傾きが無補強供試体N-2に比べて立っていることから、下面増厚補強によってひびわれの発生による主鉄筋応力負荷の増加、RC床版の劣化の進行を抑制していることがわかる。

3. 4 RC床版の劣化度

松井ら¹⁰⁾は、RC床版の劣化度をたわみ量を用いて次式のように表した。

$$D\delta = \frac{W - W_0}{W_C - W_0} \quad (1)$$

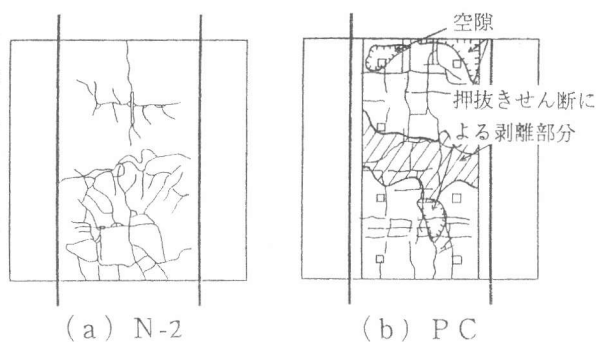


図-8 最終ひびわれ性状

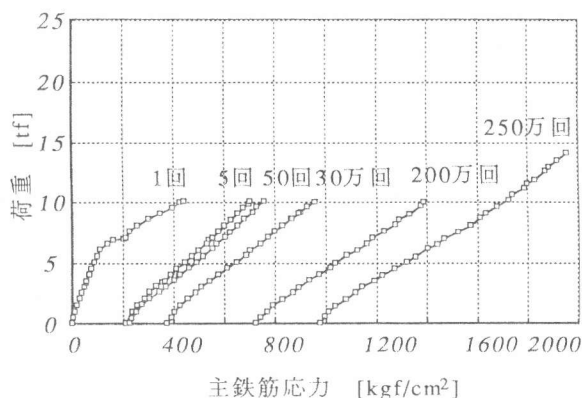


図-9 荷重と主鉄筋応力の関係 (N-2)

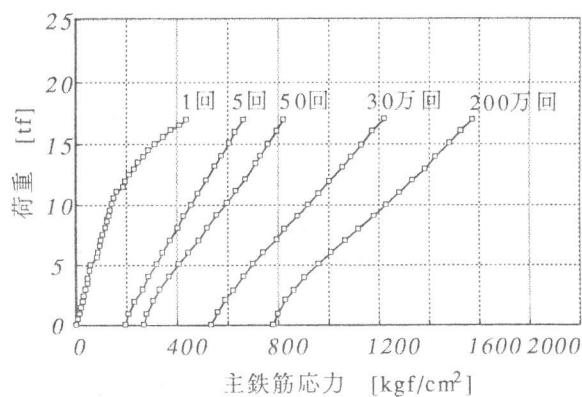


図-10 荷重と主鉄筋応力の関係 (PC)

ここで、 W ：弾性たわみの実測値、 W_0 ：コンクリートの全断面を有効と仮定した等方性板の理論たわみ、 WC ：引張側コンクリートを無視の状態での直交異方性を考慮した理論たわみであり、 $D_{\delta} \div 1.0$ となった時点がRC床版の使用限界と定義している。

上式を用いて各床版供試体の劣化度を求め、繰返し回数との関係を表すと図-11のようになる。無補強供試体N-2では、1回目の載荷時で劣化度が0.72となった。劣化度 D_{δ} を、ひびわれ発生によるRC床版の剛性のコンクリートの全断面を有効とした剛性に対する低下の割合として考えると、1回目の載荷によってRC床版の剛性は約3割に低下していることがわかる。上限荷重を10tfから14tfに上げた繰返し回数200万回付近からは、劣化度が一気に1.0を越えて使用限界状態に至った。

補強供試体PCの劣化度は同繰返し回数の無補強供試体N-2の劣化度に比べて低くなっており、ひびわれによる剛性の低下を抑制していることがわかる。これは、PC鋼線プレキャスト板が床版本体の変形に追従し、床版本体の破壊に至るまで剥離を生じていないためであると考えられる。補強供試体FRPは前述した通り床版自体の偏心によって1回目の載荷によってFRPプレキャスト板の剥離が生じ、劣化度は1.0を越えて使用限界状態に至った。この点について今後の検討が必要である。

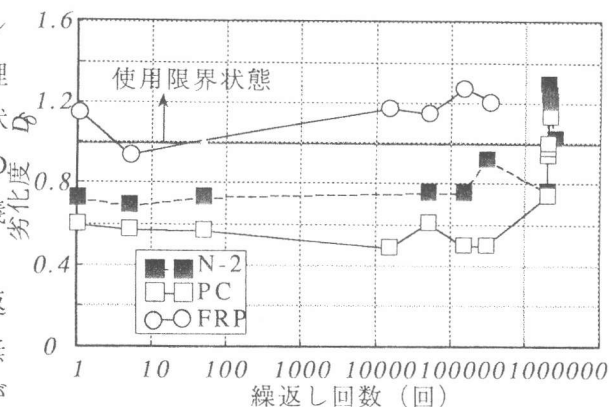


図-11 繰返し回数と劣化度の関係

4. 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) 下面増厚補強すること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た。
- 2) 下面増厚補強した床版においては、主鉄筋に作用する応力、たわみ量を低減することができた。特に、床版の変形に高い追従性を持つPC鋼線プレキャスト板によって補強した床版では、床版本体の破壊に至るまで剥離を生じなかったため、主鉄筋に作用する応力、たわみ量の低減効果が高かった。
- 3) RC床版の剛性は繰返し回数が増すにつれて低下するが、下面増厚補強することによってRC床版の剛性を維持することができ、寿命に至るまでRC床版としての機能が十分発揮されることが示された。

【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) 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, pp.341-346, 1993.6
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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力の評価式、土木学会論文集No.348/V-1, pp.133-141, 1984.8
- 6) 土木学会：構造力学公式集
- 7) 松井繁之：移動輪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, 1987.10
- 8) 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
- 9) 木曾茂、神谷誠、飯東善夫：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
- 10) 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