

## 論文 非破壊試験による道路橋 RC 床版の余寿命評価

菅野匡<sup>\*1</sup>, 堀江啓夫<sup>\*2</sup>, 飯束義夫<sup>\*3</sup>

要旨：道路橋 RC 床版では，下面のひびわれの目視点検を行い，劣化の程度を数段階に分類している．しかし，今日では，非破壊検査機器の進歩によって床版内部の状況を捕らえられるようになってきている．そこで，全面打ち換えに伴って撤去された床版とこれに鋼板接着補強を施したものを試験体として，非破壊検査でモニターしながら疲労実験を行った．载荷は，交通輪荷重を模した多点移動载荷である．その結果，過去の知見と相俟って累積損傷と RC 内部の状況が関係づけられ，非破壊試験による道路橋 RC 床版の余寿命評価法が見いだされた．

キーワード：道路橋，床版，診断，余寿命，ひびわれ，非破壊検査，超音波

### 1. はじめに

現在，日本道路公団所管の道路の橋梁 RC 床版では，目視による下面からの点検が行われている．劣化の程度は，漏水の見られるひびわれの発生状況に応じて，E から A のクラスで判定されている [1]．維持管理マネジメントの見地から，より定量的な診断が求められている．

一方，近年，数々の非破壊検査機器が実用化されるにいたり，RC 構造物においても，鉄筋位置，内部ひびわれ，ひびわれ深さなどの内部の状況が捕らえられるようになってきている．しかし，非破壊検査により RC 床版の点検を行ったものには，レーザー，赤外線カメラを用いて下面のひびわれを検査し，劣化度の判定に結び付けたものがあるが，他の方法は，診断技術が確立しているとはいえない．道路橋 RC 床版の劣化度判定法を下面のひびわれ以外で考察したものは，唯一，剛性の変化に着目した松井らの診断法 [2] を見るのみである．

そこで，本研究では，床版内部のひびわれの状況と同時に，文献 [2] で計測されている諸値が，疲労劣化の進行に伴ってどのように変化するかをモニターしながら疲労実験を行い，測定された値と余寿命とを対比して，これに劣化の進行の機構の観点から考察を加えた．

### 2. 実験方法

22年間の供用の後，床版全面打ち換え補修によって撤去された鋼プレートガーダー橋の RC 床版を，所要の大きさに整形して 4 体の試験体を作成した．なお，本橋梁は，昭和 44 年に供用が開始され，鋼橋 RC 床版設計基準の変遷によって同じ年に補強のために増設縦桁が施工されている．床版の諸元は表 1 に示すとおりである．供用中における損傷度は，ひとつの橋梁の中のパネルでも，損傷のない E から損傷の最も著しい A まで様々に判定されていた (図 1)．この橋梁でも，追越車線よりも登坂車線，走行車線の方が床版の劣化が著しい傾向がある．図 1 中網かけの部分は，試験体を切り取った部分である．

\*1 日本道路公団 試験研究所 保全技術研究室， 工修 (正会員)

\*2 日本道路公団 試験研究所 保全技術研究室 室長

\*3 日本道路公団 試験研究所 保全技術研究室 主任，工修 (正会員)

表2に試験体の一覧を示した。記された試験体の損傷度は、供用中のパネルのうちの切り取った一部分から判定しているため、図1の試験体の損傷度とは異なる。4体のうち3体には、鋼板接着補強を施した。施工は、当公団で一般に行われている方法に依った。鋼板は、厚さ4.5mmのSS400鋼材、鋼板を固定するアンカーボルトはM10×70を使用し、ピッチは500mm、注入厚さは5mmで、最終の注入圧力は0.2~0.4kgf/cm<sup>2</sup>とした。屋外で鋼桁上に試験体を乗せて下から施工し、その後試験体上面のひびわれから雨水が染み込まないようにビニールシートで覆って、樹脂の材料特性が安定するまで、2週間以上養生した。

試験体4体に対して、交通輪荷重を模した荷重による疲労実験を行った。床版の疲労実験には2つの方法がある。荷重をかけた車輪を試験体上で往復運動させるもの（輪荷重走行試験法）[3]と、1点載荷の疲労試験機を使い、ある回数の繰り返し載荷ごとに載荷点を移動することで載荷点を変えてゆくもの（多点移動載荷法）である。本実験においては、後者の多点移動載荷法を採った。

供用中の車輪通過位置と実験載荷位置が試験体に関して不統一であれば、押し抜きせん断疲労の損傷の局所性から、試験体の損傷度と余寿命の関係が不明確になることが予想される。供用中の車両の走行位置と実験における載荷位置との関係に配慮し、すべての試験体で供用時の増設縦桁位置を載荷点とした。そして、過去のRC床版試験体疲労実験結果を参考に、高サイクル疲労の領域となる繰り返し回数で押し抜きせん断疲労破壊を試験体にもたらす荷重を推定し、この荷重で、試験体が最終的に破壊にいたるまで繰り返し載荷をした。

ここで、床版では、ひびわれに浸透した水の影響により、疲労耐力が著しく低下することが指摘されている[3]。供用中の床版の置かれている過酷な環境を再現するために、繰り返し載荷中は試験体上面に水を

表1 橋梁諸元

形式	鋼単純合成桁橋
橋長	40.0m
支間	39.2m
有効幅員	12.3m
床版厚	18cm
主鉄筋	圧縮 D16 ctc260mm
	引張 D16 ctc130mm
配力鉄筋	圧縮 D16 ctc340mm
	引張 D16 ctc170mm
かぶり	3cm

表2 試験体

試験体連番	損傷度	補強工法
1	D	無補強
2	D	鋼板接着
3	C	鋼板接着
4	A	鋼板接着

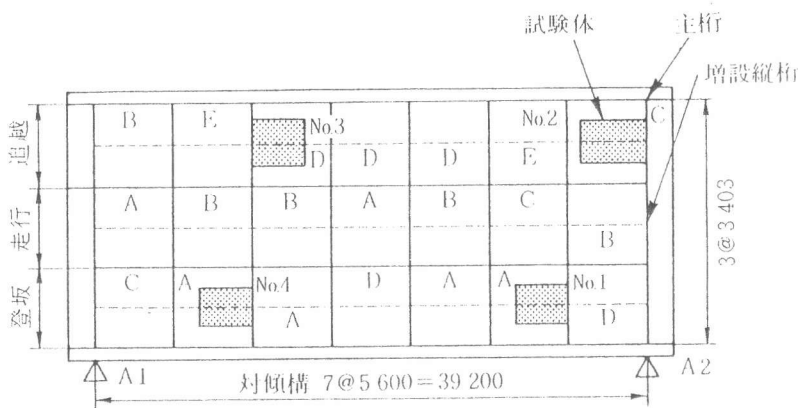


図1 供用中損傷度と試験体位置

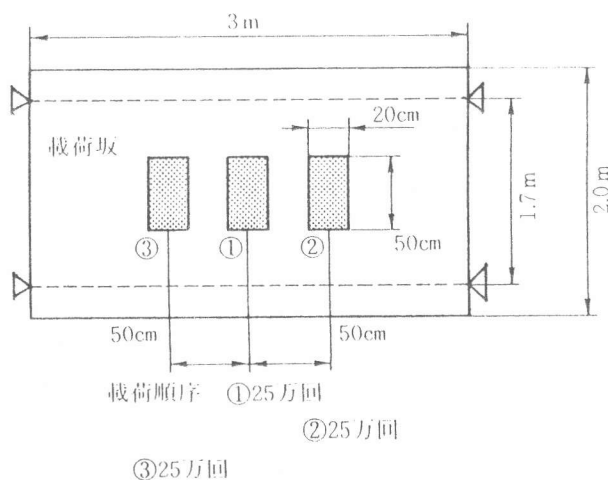


図2 載荷方法

滞留させ、上面のひびわれから水の浸透を促した。

疲労実験前には、ひびわれと漏水跡に着目した全試験体の目視試験を行い、実験前と後には、試験体から切り取ったコアの圧縮強度試験を行った。疲労寿命への影響が無いよう、実験前のコアは、支持点の外側から切り取った。また、ひびわれ密度が、床版の損傷度を示すか否かを調べるために、無補強の試験体で繰り返し载荷前を含めた疲労実験中10回のひびわれ密度の測定を行い、文献[2]との比較を行った。簡単のために、目視試験は、漏水のみられるひびわれに着目した。さらに、疲労実験開始から破壊までの間に、载荷を中断して8回の超音波非破壊試験を実施した。試験項目は、超音波P波位相反転法によるひびわれ深さの測定と超音波反射共振法による内部ひびわれの測定[4]である。超音波伝播に対する、ひびわれに浸透した水の影響を小さくするために、非破壊試験前には、载荷中断後1日以上強制的に試験体へ風を当て、乾燥させるよう努めた。鋼板接着補強した試験体では、下面からの打音法による鋼板剥離検査を逐次行った。

### 3. 目視試験結果と切り取ったコアの圧縮強度試験結果

図3は、すべての試験体の疲労実験前の下面のひびわれと漏水跡を示したものである。ひびわれ密度は、試験時の照度に依存するが、それぞれ、7.2, 6.4, 5.5, 8.1 $m/m^2$ である。いずれの試験体も供用中に中央に増設縦桁があったため、中央にひびわれはない。ここは疲労実験で载荷点となる部分であり、押し抜きせん断疲労の破壊形態から考えて、この一様でないひびわれの分布が余寿命へ与える影響は小さい。

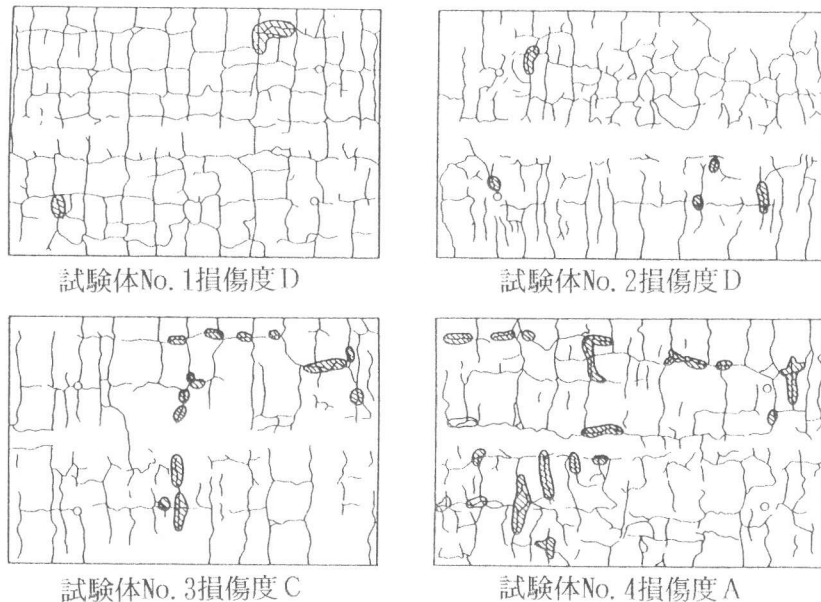


図3 試験体下面ひびわれ、漏水跡

図4は、無補強の試験体に関して、疲労実験中の漏水の見られる

ひびわれの密度を、非破壊試験時の繰り返し回数とその破壊までの繰り返し回数で除した寿命比との関係で示したものである。漏水ひびわれ密度は、寿命比0.1まで急激に増加するが、以後、勾配は小さくなる。

試験体は供用されていたものであり、供用中に受けた劣化をこの数字は考慮していない。供用中に費やした寿命比をMiner則を仮定して計算し、これを考慮に入れると、疲労実験の寿命比0.1は、全寿命の0.5に相当する。曲線は、文献[2]のひびわれ密

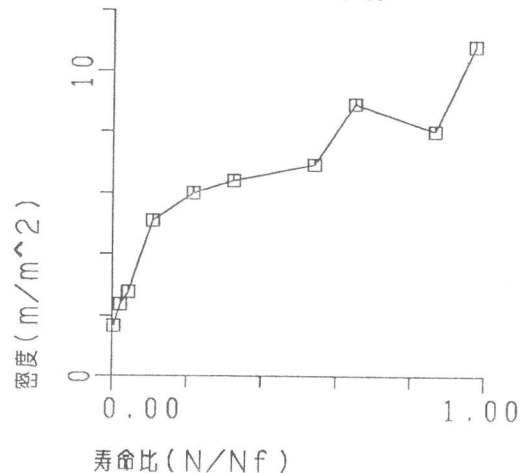


図4 漏水ひびわれ密度の変化

度と同様となる。以後、供用中に費やされた寿命を考慮に入れた、床版の生涯における寿命比を、実験における寿命比の後に括弧書きで示す。

文献[2]では、床版が板としての連続性を喪失することによって、ひびわれ面に段差が発生するとし、これを使用限界状態としている。無補強の試験体で、下面に段差が発生する時を捕えた。寿命比0.65(0.8)で段差を発見した。文献[2]は、段差が発生する寿命比を10体の試験体について得ているが、本実験結果はそれらの値よりも若干高めの値を示した。これは、疲労実験法の違いに起因していると考えられる。

床版では、供用あるいは繰り返し载荷によって微細なひびわれが発生し、圧縮強度が低下するという知見がある。これを確認し、さらに载荷位置と圧縮強度の低下量との関係を考察するために、疲労実験前後に試験体よりコアを切り取り、圧縮強度試験に付した。図5に、コアの切り取り位置、圧縮強度試験結果を示した。図中の白丸、黒丸は、それぞれ実験前、実験後に切り取ったコアの位置を示している。個々の圧縮強度は位置によるばらつきがあるものの、疲労実験後の強度の平均値は、実験前の平均値より低下し、さらに、低下量は、载荷前の損傷度に依存した。損傷度が高い場合は、破壊までの繰り返し载荷数が少なく、载荷点近傍の圧縮強度低下量が小さい。

また、コア切り取り位置と圧縮強度の関係を見ると、载荷板端より一定の距離の点で低い強度がみられるが、供用中の車両走行による強度低下と疲労実験による強度低下のそれぞれの寄与は、本実験のみからは明らかにできない。

#### 4. 疲労実験結果

疲労実験結果を図6にまとめた。上限荷重は角田らの式[5]により求めた劣化の無い状態での押し抜きせん断耐力( $P_s$ )で無次元化した。下限荷重は4tfである。図中試験体番号の後に余寿命を示した。余寿命は、一例として、東名高速道路の軸重解析結果を用い、過去20年間の東名

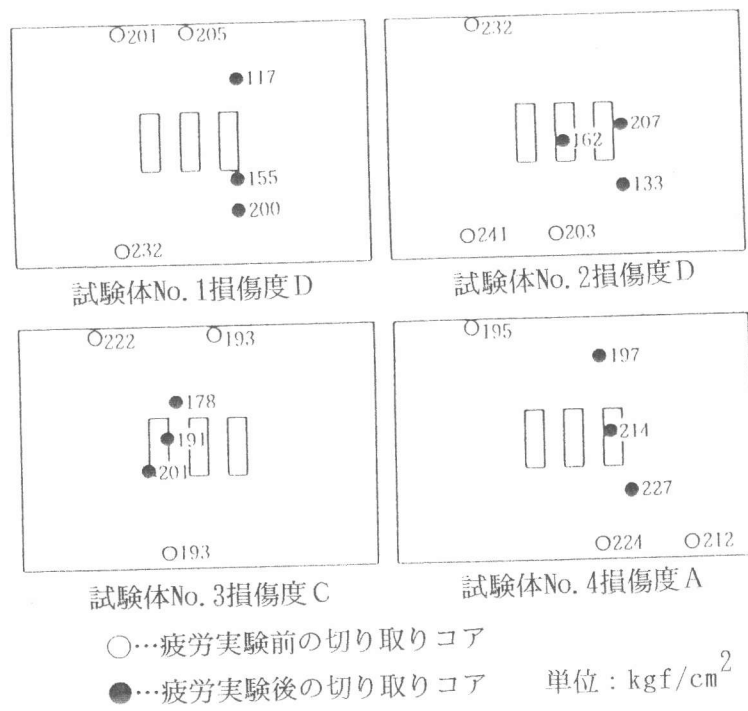


図5 切り取りコア圧縮強度

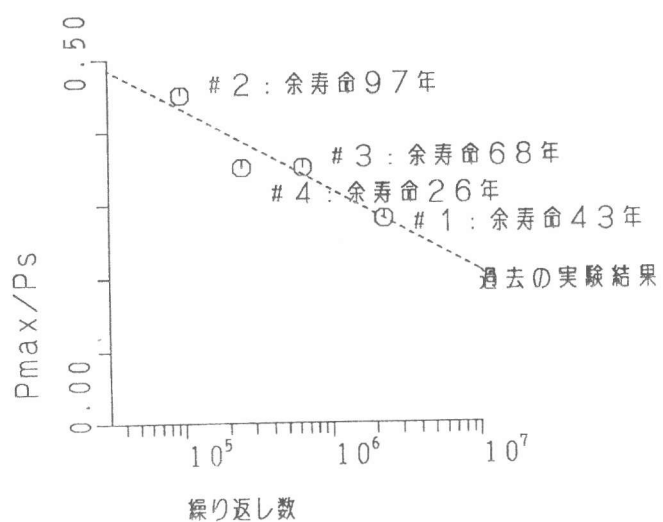


図6 疲労実験結果

高速道路の交通量が今後も直線的に増加するものとして、Miner則を仮定して計算したものである。ただし、一般に、輪荷重移動載荷法による実験結果より、大きい値を示す。また、図中の破線は、昭和31年、昭和39年の鋼道路橋設計示方書に基づき設計された、貧配合でしかも意図的に乾燥収縮ひびわれを起こした、床版供試体の、多点移動載荷による過去の疲労実験結果である。

鋼板接着した試験体の余寿命を比較すれば、試験体の劣化が激しくなるにしたがって低下することは図から明らかである。損傷度がAのものは、他の研究から類推できる余寿命から考えても、鋼板接着補強による延命効果は小さい。

図7に各試験体の残留たわみ、弾性たわみを示した。無補強の試験体に関して、文献[2]では、段差の発生時点とともに、引張側無視の剛性での弾性たわみに達する時点を使用限界状態とし、この考えに基づく劣化度関数を提案している。しかし、本実験では、破壊時に漸く引張側無視の剛性に達するという結果を得た。

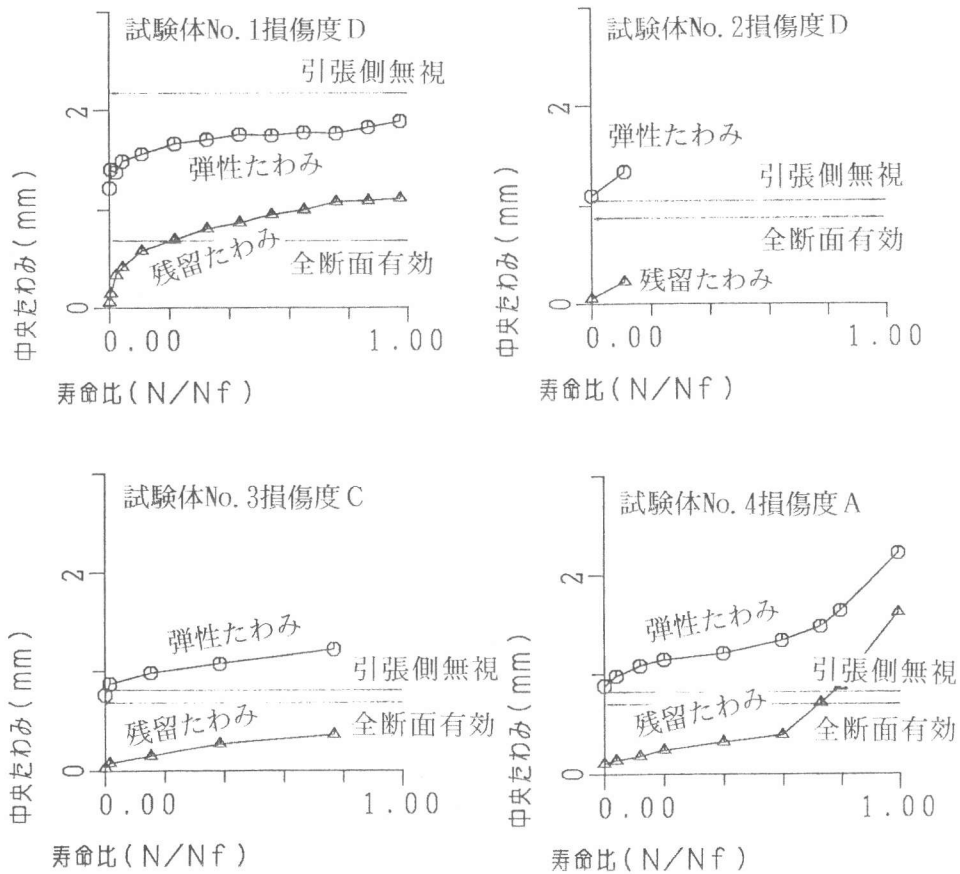


図7 たわみと寿命比の関係

### 5. 非破壊試験結果

まず、無補強の試験体の結果について、次に鋼板接着補強した試験体の結果について述べる。

図8には、下面からのひびわれ深さの測定による、ひびわれが貫通した時点の寿命比を、測定位置との対比で示した。モニターしたひびわれのすべてが、寿命比0.04(0.5)

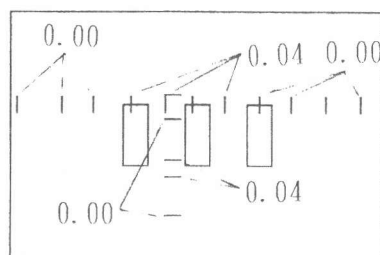


図8 ひびわれ貫通の寿命比

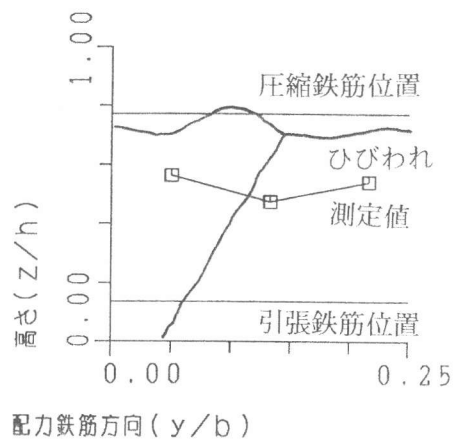


図9 内部ひびわれ

までに貫通している。図4と考え合わせれば、実際の橋梁においても早期にひびわれが貫通している可能性は高い。

図9に、ひびわれの側方への進展が見られ始めた、寿命比0.22(0.6)における内部ひびわれの測定値と、疲労実験終了後切断して行った測定値の検証結果を示した。測定値はひびわれの状態を捕らえており、ひびわれの発生を測定できた。最終的に、このひびわれが、押し抜きせん断疲労の破壊面となった。こ

これらの無補強試験体に関する非破壊試験の結果は、文献[2]に提示されたひびわれ進行機構からみても妥当なものである。

図10に鋼板接着試験体で打音法によりモニターした鋼板剥離の進行を示

した。剥離が徐々に広がり、相当程度になって破壊にいたっている状況が見て取れる。上面からひびわれ深さを測定した結果からは、剥離の起こる箇所では、比較的早くひびわれが貫通し、剥離が引き起こされていた。この事実から、剥離が広がり、補強効果が薄れた後、押し抜きせん断破壊したと結論づけられる。余寿命から考えれば、鋼板が剥離するのは寿命の末期に属する。したがって、鋼板接着補強された既設橋においては、鋼板の剥離を監視することが肝要である。

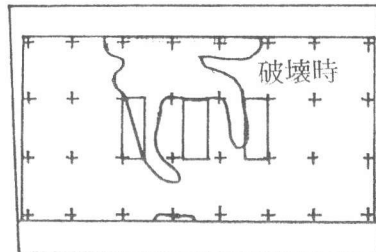


図10(a)試験体No.2損傷度D

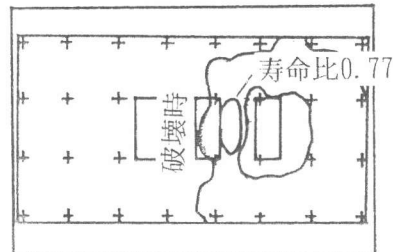


図10(b)試験体No.3損傷度C

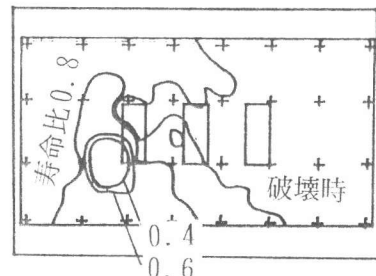


図10(c)試験体No.4損傷度A

図10 鋼板剥離の進行

## 6. 結論

- (1) 疲労実験による無補強床版試験体のひびわれ密度の変化、段差の発生時点そして圧縮強度の低下は、過去の知見と同様の結果を示し、本実験結果の有効性を裏付けた。
- (2) ひびわれ深さをモニターすることでひびわれが早期の劣化が把握でき、また、内部に伝播したひびわれも測定可能であった。内部のひびわれをモニターすることでより破壊現象に即した劣化度判定、余寿命予測が可能である。非破壊検査は、このための有用な方法である。
- (3) 鋼板接着補強を施したRC床版では、鋼板剥離状況が、劣化を示す有効な指標である。

## 参考文献

- [1] 維持修繕要領 橋梁編, 日本道路公団, 1988.
- [2] 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 第374号 /I-6, pp.419-426, 1986.
- [3] 松井繁之: 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, 1987.
- [4] コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1992.
- [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し抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.229, pp.105-115, 1974.