

論文 超音波試験による RC 床版の健全度評価に関する基礎的研究

森田達雄^{*1}・菅野匡^{*2}・庄中憲^{*3}・三浦康治^{*4}

要旨：供用開始から年月を経るにしたがって、ますます高速道路橋梁RCの劣化が激しくなっている。費用効果に優れた補修工法の選択が求められているなか、道路橋RC床版の劣化度診断法においては、いくつかの論文があるものの、いずれも確立されたものとはなっていない。本研究は、RC床版の疲労劣化のひとつの指標であるひびわれに着目し、超音波による寿命前期における劣化度診断法を提案することを目的として、床版の載荷実験と非破壊試験を行ったものである。3種の配合による4つのRC床版供試体に数段階の荷重を加え、逐次超音波試験を行って、ひびわれの進展と超音波伝播特性との関係を考察した。

キーワード：道路橋、床版、劣化、疲労、非破壊、超音波、ひびわれ

1. はじめに

高速道路は、供用開始から既に20年から30年を経過し、橋梁RC床版の劣化が、至るところで顕在化している。現在、目視による下面のひびわれの定期点検が行われており、劣化の著しい橋梁に対しては、補修工法の検討のための詳細点検が実施されている。しかしながら、詳細点検による診断法は、未だ確立されるまでに至っておらず、やはり劣化の程度は、下面のひびわれの状況に依っている例が大半である。

道路橋RC床版の劣化は、走行車両の輪荷重による疲労劣化を主たる特徴としている。疲労劣化の進行は、松井ら[1]によって研究され、昨年度に、筆者らは、松井らの研究を発展させた非破壊検査による余寿命診断法を提案した[2]。この方法は、ひびわれが側方に進展する過程の寿命後期にあるRC床版の疲労劣化の程度を最も端的に表すものとして内部に伝播するひびわれに着目した、超音波によるコンクリート内部の検査である。寿命の前半（劣化が顕著でなく比較的健全な状態）では、ひびわれは床版を貫通する方向に進展する過程にあり、ひびわれ深さの推定が診断に有効であると考えられるが、この程度の損傷状態にある床版に対して、ひびわれ深さの測定をすることは、費用が膨大となり実用的ではない。

本研究は、寿命の前半にありひびわれの貫通が顕著でない道路橋床版の診断法として、ひびわれの厚さ方向への進展に着目し、最終的に劣化度として数値化することを目的としたものである。本稿では、そのための基礎的研究として、超音波伝播の諸特性とひびわれ深さとの関係に特に言及した。

2. 試験方法

2. 1 供試体

*1 東京理学検査(株) 建設グループ 係長 正会員

*2 日本道路公団試験研究所 保全技術研究室 工修 正会員

*3 (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所 主任研究員 工修

*4 (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所 技術員

作製した供試体の配合と配筋をそれぞれ表1、図1に示す。モルタル、標準配合、粗骨材を多くした配合の3種類の配合と2種類の配筋（供試体A, B, Cは軸方向上下筋とも300mm^{ピッチ}、軸直角方向上下筋とも1440mm^{ピッチ}であり、供試体Dは供用されている床版をモデルとしており、軸方向、軸直角方向とも上筋150mm^{ピッチ}、下筋300mm^{ピッチ}）の組み合わせとし、4体の供試体を作製した。

表1 各供試体の配合表

供試体 記号	配合	呼び 強度	スランプ (cm)	粗骨材 の最大 粒径 (mm)	空気 量 (%)	水 セメント 比 (%)	細 骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
								セメント (C)	水 (W)	細 骨材 (S)	粗 骨材 (G)	混和 剤 (AB)
A	モルタル	24	21.5	25	—	52.0	100	450	184	1573	0	1.80
B, D	標準	24	8.0	25	4.5	52.0	45	291	151	850	1035	1.18
C	粗骨材多	24	12.0	25	3.5	52.0	35	291	151	663	1224	1.18

2.2 荷重方法

本試験で行った繰り返し曲げ荷重の方法を図2に、荷重の模式図を図3に示す。まずはじめに各供試体ともひびわれの発生する荷重まで静的荷重を行い、発生時点で一時停止して、荷重を除荷してから超音波試験を行い、試験終了後再び静的荷重により段階的にひびわれを発生させ、各段階ごとに超音波試験を行い、RC床版が破壊する直前まで繰り返し荷重及び試験を実施した。各供試体とも、原則として荷重は5段階程度とした。

2.3 超音波測定装置

本試験で使用した超音波測定装置（コンクリート用マルチ超音波測定器）の仕様を表2に示す。本装置は周波数可変の超音波測定器本体と高ゲインの低周波探触子から構成されている。また、励振パルスとしてパースト波（65Vpp）が用いられ、周波数は約20KHzから約1MHzまでの可変である。

2.4 試験方法

計測器の構成及び探触子の配置を図4に示す。各荷重段階終了後に、測定ライン1（鉄筋間）及び測定ライン2（鉄筋上）の2測線上で探触子間距離を150mm, 300mm, 450mm, 600mm, 750mmとした場合の各超音波データ（①伝播時間、②透過パルス高さ）を読み取る。伝播速度は、見かけのものとして、読み取った探触子間距離を伝播

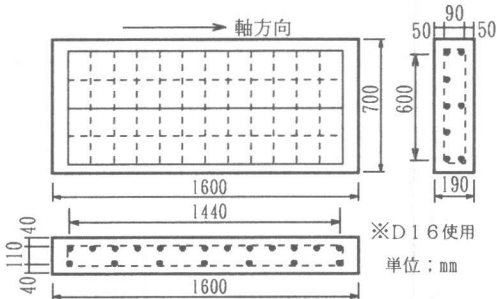


図1 供試体形状寸法

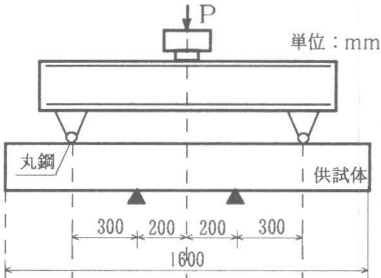


図2 荷重方法

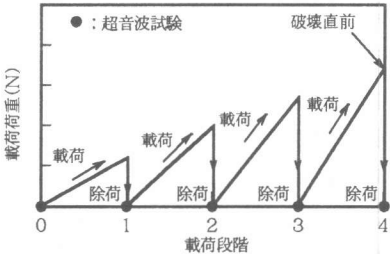


図3 荷重の模式図

表2 超音波測定装置の仕様

名称		仕様
超音波測定装置	励振周波数	20～1000KHz(連続可変)
	送信電圧	約65V _{pp}
	測定範囲	100～2000mm
	測定モード	縦波, 横波
	LCD表示内容	音速 3桁表示、最小値10m/s
		伝播時間 3桁表示、最小値0.1μs
		版厚, 空隙等 3桁表示、最小値 1mm
		ひび割れ深さ 3桁表示、最小値 1mm
	寸法	約W250mm×H130mm×D300mm
	重量	約 8kg (NiCdバッテリー含む)
探触子	縦波	0.5C76N(送信用), 0.5C40N(受信用)
接触媒質	縦波	ゾニコートーE

時間で除したもので定義した。また、周波数解析のため、受信波形をパーソナルコンピュータに記憶し、FFT解析により各周波数成分を解析した。送信周波数は、A供試体において34KHz、56KHz、79KHzの3段階の送信周波数でデータの採取を行い、今回の非破壊試験に適する送信周波数を求めた。1測定点での測定は、再現性が得られる複数回の測定を行った。なお、橋梁のRC床版への実際の適用を考慮して、測定は表面走査法を採用した。

3. 考察

3. 1 超音波伝播に与える各種影響因子

3. 1. 1 送信周波数

本非破壊試験は、道路橋RC床版を対象としたものであり、実際の適用を考えれば、表面法に依らなければならない。また、診断は、縦桁と横桁で囲まれたひとつひとつのパネルに対して行われるべきものであり、ひとつのパネル全面の診断を効率良く行うためには、音源から受信探触子までの距離は必然的に大きくならざるを得ない。探触子間距離の大きな表面法の適用例は希少であり、3つの送信周波数で実験し、適当な送信周波数を選択した。

送信周波数を34KHz、56KHz、79KHzの3段階に切り替えて、各载荷段階ごとに5つの探触子間距離で伝播速度を計測した結果を図5に示す。測定装置の測定限界の問題もあると思われるが、送信周波数56KHzと79KHzでは、探触子間距離が長い場合に载荷によるひびわれの進展に伴い明瞭な超音波の受信波形が得られなくなっている。また、ノイズの影響を受けて誤差が大きくなり、測定値の信頼性に乏しくなっている。それゆえ、今回の試験では、最も低い34KHzを採用した。

3. 1. 2 鉄筋

RC床版内部には鉄筋が密に配置されており、超音波試験が鉄筋の影響を受けることは、十分予想される。内部の鉄筋の受信波に与える影響を考察するために、鉄筋間隔を300mmと実際の床版より大きくした供試体Aにおいて、探触子と鉄筋までの距離を変えて試験をした。各载荷段階

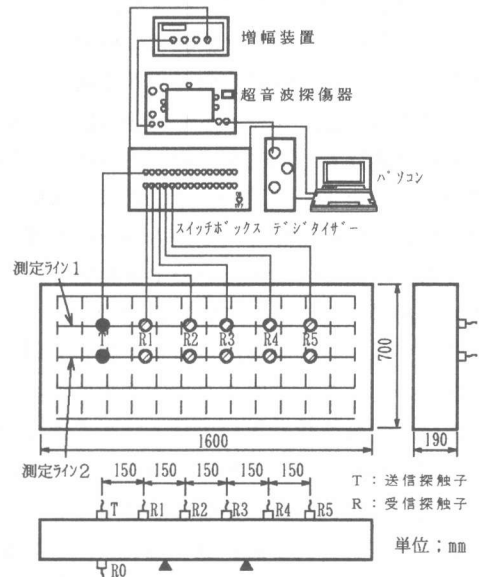


図4 計測器の構成及び探触子の配置

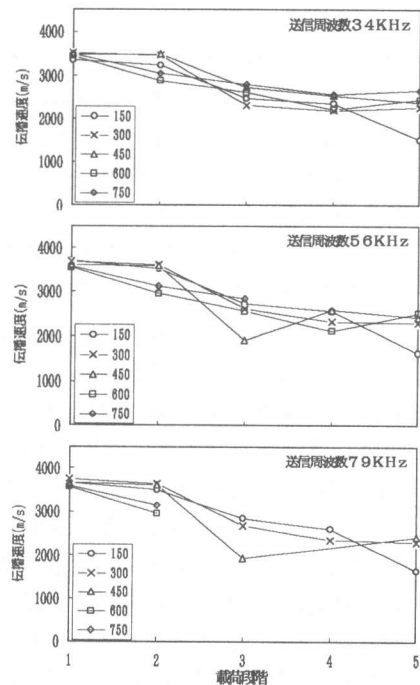


図5 各载荷段階と伝播速度の関係

ごとに得られた超音波試験結果を図6に示す。横軸に荷重段階を取り、縦軸には測定値の変化量を比較する為、各測定値から初期値を差し引いた値を取った。プロットした値は、5つの探触子間距離における値を平均したものである。測定ライン直下に鉄筋がある場合は、床版に曲げひびわれが発生しているにもかかわらず、見かけの伝播速度の低下量が緩やかになり、伝播速度が最終的に上昇している。透過パルス高さに関しては、鉄筋間の測定値に比較して低下量が緩やかである。また、卓越周波数については、低い送信周波数を用いているために顕著な傾向は認められない。これらの事から、明らかに超音波試験結果が鉄筋の影響を受けていると推測される。超音波伝播試験においては、鉄筋を伝播する超音波を十分考慮に入れなければならない。

3. 1. 3 配合

供用中のRC床版を点検する場合、施工時の配合が未知である場合は多い。配合条件が超音波に与える影響を考察するために、3種類の配合条件の供試体を用いて、各超音波パラメータを測定した結果を図7に示す。横軸には破壊荷重を1とした場合の非破壊試験時の荷重比を取り、縦軸には各パラメータの初期値からの変化量を取った。この図から伝播速度と透過パルス高さに関しては、損傷が大きくなるに従い両者とも同様な傾向で低下していることがわかる。卓越周波数については特に顕著な傾向は認められない。図8に伝播速度及び透過パルス高さと荷重比の相関を示す。縦軸に荷重比を取り、横軸には各パラメータの初期値からの変化量を取った。標準配合と粗骨材を多く含んだ配合の供試体の場合、伝播速度と透過パルス高さの低下率はほぼ直線的であり、よく近似しているが、モルタル供試体の場合は、2次曲線的な低下率である。これはモルタルが粗骨材を含んでいない為、ひびわれの進展が急激である事に起因していると考えられる。

3. 2 ひびわれと超音波パラメータの関係

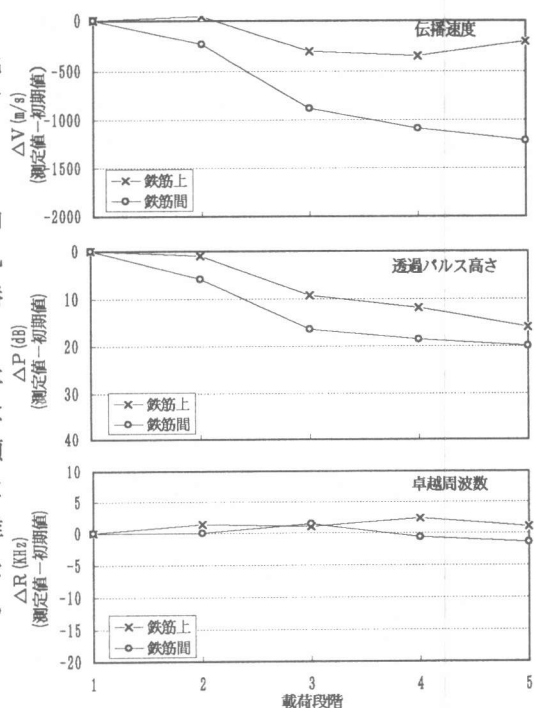


図6 鉄筋の影響と各パラメータの関係

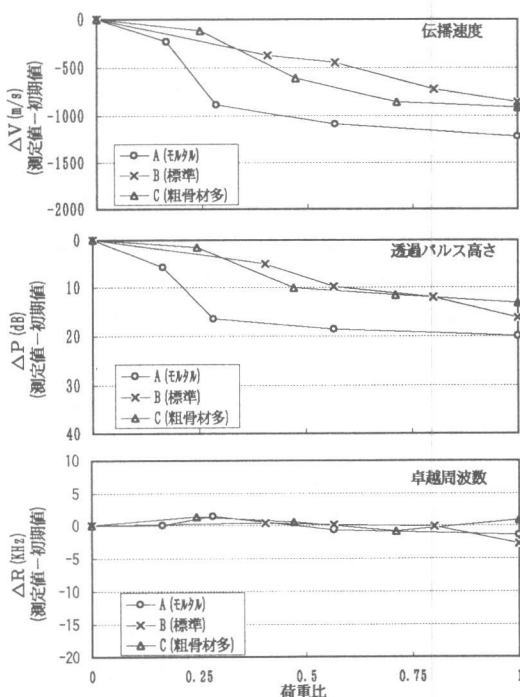
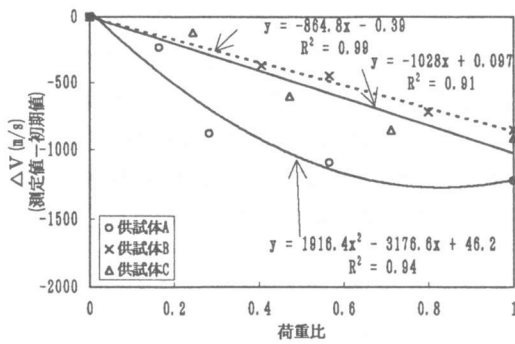
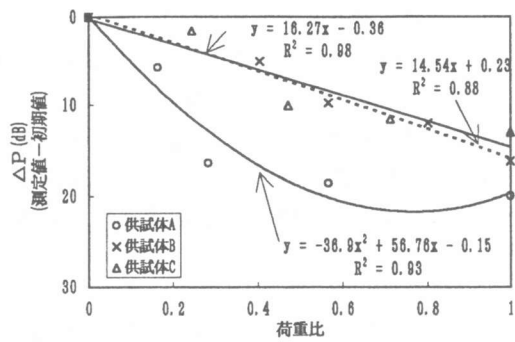


図7 配合の影響と各パラメータの関係



a) 伝播速度と荷重比の相関関係



b) 透過パルス高さと荷重比の相関関係

図8 伝播速度及び透過パルス高さの荷重比の相関

供試体Aにおいて、各载荷段階ごとに得られた超音波パラメータの変化を図9に示す。横軸に载荷段階を取り、縦軸には超音波パラメータの変化量を取った。また、測定結果は測定ライン1（鉄筋間）でおこなったものであり、送信周波数は34KHzである。

3. 2. 1 伝播速度の変化

測定ライン直下に鉄筋が無い場合の結果は、载荷によるひびわれ数の増加及びひびわれ深さの進展に伴い、どの探触子間距離においても伝播速度は低下傾向である。ただし、探触子間距離が短い場合は、単独のひびわれの進展に左右されるためばらつきが大きくなる。探触子間距離が600mm以上であれば载荷による損傷度と伝播速度の間に、ばらつきの少ない伝播速度の低下が見られる。伝播速度の変化量は、全ての探触子間距離における測定値の平均で、初期载荷時約240m/s、破壊直前で約1200m/sであった。

3. 2. 2 透過パルス高さの変化

伝播速度と同様に载荷によるひびわれ数の増加及びひびわれ深さの進展に伴い、一部の箇所を除きどの探触子間距離においても、透過パルス高さは低下傾向である。ただし、探触子間距離が短い場合と長い場合では減少の傾向に差異が見られる。透過パルス高さの変化量は、全ての探触子間距離における測定値の平均で、初期载荷時約6dB、破壊直前で約20dBであった。

3. 2. 3 卓越周波数の変化

今回適用した送信周波数34KHzでは、载荷によるひびわれ数の増加及びひびわれ深さの進展に伴い、探触子間距離600mm以上で若干の卓越周波数の低下が見られるが、損傷程度との関係を明らかにするまでの顕著な変化は認められない。

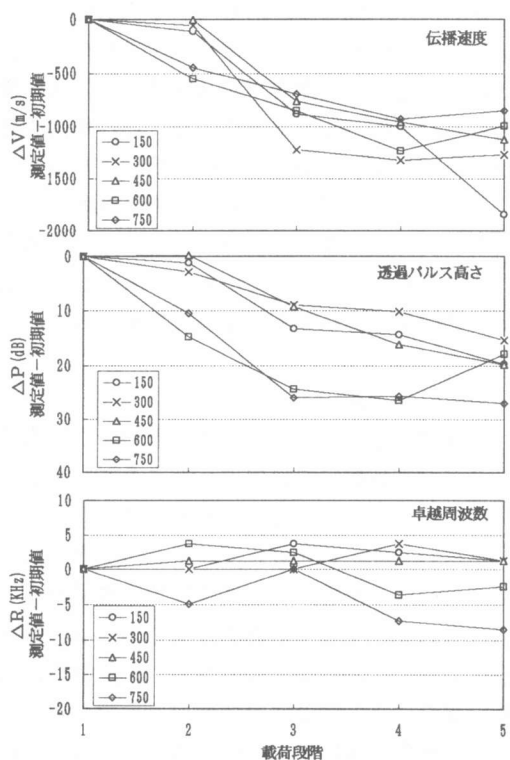


図9 各载荷段階と超音波パラメータの関係

4. 簡易健全度評価法の構築

曲げひび割れによる損傷と超音波試験で得られる伝播速度及び透過パルス高さが、非常に密接な関係にあることを、本実験結果は示している。載荷荷重比を目的変数、2つの超音波受信パラメータを説明変数とする重回帰分析を実施し、今回の試験における簡易健全度評価式を構築した。評価式を以下に示す。ここで ΔV [m/s]は初期値と比較した際の伝播速度の変化量、 ΔP [dB]は初期値と比較した際の透過パルス高さの変化量であり、荷重比は破壊荷重を1と考えたものである。

$$\text{荷重比} = -0.00044 \times \Delta V [\text{m/s}] + 0.034359 \times \Delta P [\text{dB}] + 0.029898 \dots \dots (1) \text{式}$$

この式の妥当性を検証するために、RC床版のコンクリート配合と配筋を用いた供試体Dにおいて、重回帰分析により得られた各載荷段階ごとの伝播速度及び透過パルス高さの平均値を簡易健全度評価式に当てはめてみた。これを図10に示す。この図より現段階では、サンプル数が少ないため誤差は認められるものの、概略的には損傷の程度を捕らえていると考えられ、今後サンプル数を増やす事などにより、実橋RC床版モデル供試体においても損傷度を把握できる。

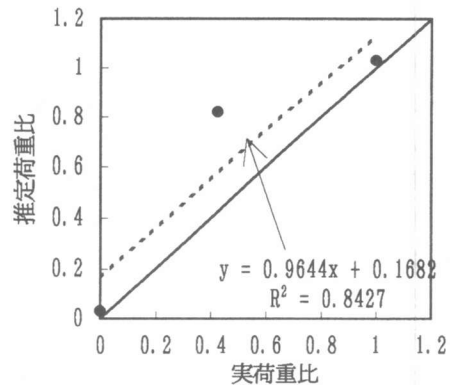


図10 簡易健全度評価法の妥当性の検討

5. まとめ

本実験の結果をまとめると以下のように要約される。

- (1) 送信周波数については、およそ50KHz以上の周波数では載荷によるひび割れの増加及び進展に伴い測定が困難になる可能性がある。
- (2) 探触子間距離を変えて超音波試験を行い、それら全ての平均値を使うことにより、曲げひび割れによる損傷度と伝播速度及び透過パルス高さの間に密接な関係が得られる。
- (3) 測定ライン直下に鉄筋がある場合は、鉄筋の影響を受けるため損傷度の把握が困難になる。
- (4) 配合による相違については、測定値のばらつき等を考慮すると粗骨材を含んだ場合と含まない場合によって低下の傾向が大別できる。
- (5) 実橋RC床版モデル供試体においても、伝播速度と透過パルス高さから概略的な損傷程度は把握可能であったが、誤差を有しているためサンプル数を増やすこと、推定式を改善することが必要である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 菅野匡・堀江啓夫・飯束義夫：道路橋RC床版の余寿命評価、コンクリート工学協会年次論文報告集、Vol. 18、No. 1、1996. 7.