

報告

超音波法による床版の層状ひび割れ発生深さの評価

角間恒*, 渡邊晋也**, 西弘明*, 小野秀一**

*博(工), (国研) 土木研究所 寒地土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

**博(工), (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所(〒417-0801 静岡県富士市大淵3154)

凍害や ASR が進行した床版では、内部に層状ひび割れが発生する特徴があり、健全度評価および対策手法選定においては、層状ひび割れの有無および発生深さを的確に評価することが重要になる。本報告では、凍害および ASR の複合劣化環境下で約 50 年間供用された実橋床版から採取したコンクリートコアを使用し、超音波法により層状ひび割れの有無および発生深さを評価する方法について検討した。

キーワード：層状ひび割れ，劣化深さ評価，超音波法

1. はじめに

鋼橋の RC 床版（以下、床版）では、凍害、アルカリシリカ反応（以下、ASR）、塩害等の材料劣化の進行が全国的に問題となっている。このうち、凍害や ASR では、床版内部にひび割れが層状に発生する特徴があり、健全度評価および対策手法選定においては、層状ひび割れの有無および発生深さを適切に評価することが求められる。

床版内部に発生したひび割れの調査では、コンクリートコア（以下、コア）を採取し、試験室において蛍光エポキシ樹脂等をひび割れに含浸させて観察する方法¹⁾が採用されることが多い。ただし、本手法により床版全体のひび割れ状況を把握するには複数箇所調査を実施しなければならず、採取可能なコアの本数に限度がある中でこのような調査を行うには困難を伴う。

以上より、強度測定等の他の調査とコアを共有でき、かつ、簡易に層状ひび割れの発生状況の評価ができれば、より詳細な劣化状況の把握に繋がると考えられる。そこで本研究では、床版から採取したコアに対し、従来からコンクリートの凍害劣化の評価に採用されている超音波法により、層状ひび割れの有無および深さを評価する方法について検討した。検討には、凍害および ASR の影響を受けた実橋床版から採取したコアを使用し、超音波伝播速度の測定および内部のひび割れ発生状況の調査を行い、これらの結果を比較した。

2. 調査方法

2.1 コア採取

本研究では、昭和 40 年に建設された実橋床版から採取したコアを使用して、層状ひび割れ発生状況の調査を行

った。対象橋梁の適用示方書は昭和 39 年鋼道路橋設計示方書であり、過去の調査²⁾により、凍害と ASR の影響を受けて部分的に床版上面の砂利化および層状ひび割れが発生していることが確認されている。

コアの直径は 75mm とし、湿式のコアボーリングマシンを使用して、床版の上下を逆にした状態で鉛直下向き（床版下面から上面）に採取した。図-1 に、床版下面の変状状況とコア採取位置を示す。本研究には 9 本のコアを使用し、床版下面の変状が比較的軽微な部材 A から 1 本 (A-1)、白色析出物を伴う網目状のひび割れが発生している部材 B および C からそれぞれ 2 本 (B-1~2) および 6 本 (C-1~6) のコアを採取した。なお、本床版の設計床版厚は 170mm であるが、コア採取位置における床版厚は 140~160mm の範囲にあった。

2.2 超音波伝播速度の測定

超音波伝播速度の測定にはプロセック社製ペンジット PL-200 を使用し、コアを室温で乾燥させた後、以下の三つの方法により実施した（図-2）。なお、採取時に分離が発生したコアでは、下面側の部分のみを対象とした。

(1) 方法 1

方法 1 では、コアの上下面に探触子を当て、コア軸方向（床版厚さ方向）に超音波を伝播させる。この方法では、探触子間を層状ひび割れが横切りやすいため超音波伝播速度の低下を捉えやすく、ひび割れの発生を検知しやすい方法と考えられる。

(2) 方法 2

方法 2 では、採取したコアの直径方向（床版水平方向）を超音波の伝播方向とし、探触子をコア軸方向に移動しながら順次測定を行う。本研究においては、測定間隔（探触子の移動間隔）を 20mm に設定した。この方法では深

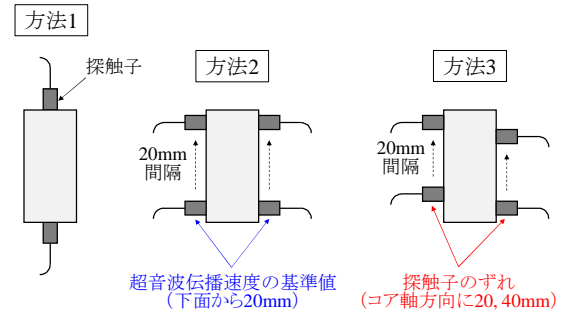


図一 床版下面の変状状況とコア採取位置

さ毎に超音波伝播速度の測定を行うことから、表面からの劣化深さを推定したい場合に採用されることが多い。

(3) 方法3

方法3は、コア周面に当てた探触子をコア軸方向に順次移動しながら測定する点において方法2と同様であるが、2つの探触子を当てる高さをコア軸方向にずらしている。本研究ではコアの直径方向に発生しているひび割れを対象としており、本方法においては、探触子間にひび割れを横切らせることで超音波伝播速度の低下を捉えやすくし、かつ、深さ方向への劣化分布を把握できるようにすることを意図している。ここでは、探触子のずれ量を20mmおよび40mmとし、超音波伝播速度を算出する際の伝播距離には探触子間の直線距離を用いた。



図二 超音波伝播速度の測定方法

表一 測定結果 (方法1)

コア番号	V _n ^{*1} (m/sec)	E _d ^{*2} (%)	層状ひび割れの有無	
			外観 ^{*2}	切断面 ^{*3}
A-1	4216.9	86.4	なし	なし
B-1	(欠損)	(欠損)	あり	あり
B-2	(欠損)	(欠損)	あり	あり
C-1	4162.4	84.0	あり	なし
C-2	2666.9	32.0	あり	あり
C-3	2320.6	22.6	なし	あり
C-4	999.3	4.1	なし	あり
C-5	2029.9	20.1	あり	あり
C-6	4242.2	80.5	なし	なし

*1 V_n: 超音波伝播速度, E_d: 相対動弾性係数

*2 可視光下でのコア外観の観察による

*3 紫外線照射下でのコア切断面の観察による

2.3 コア内部のひび割れ発生状況の調査

超音波法を用いた層状ひび割れ発生深さ評価の精度を検証するため、超音波伝播速度測定後に、コア内部のひび割れ発生状況の調査を行った。調査では、蛍光染料を添加した低粘度エポキシ樹脂（粘度 100 ± 50MPa・s (20°C)、以下、蛍光エポキシ樹脂）を低真空状態で含浸・硬化させた後、コアを切断し、紫外線照射の下で切断面の写真を撮影した。

3. 調査結果および考察

3.1 ひび割れ発生状況

図-3に、蛍光エポキシ樹脂含浸前に可視光下で撮影したコア外観(左図)、および、同含浸後に紫外線照射下で撮影したコア切断面の写真(右図)を示す。

可視光下で行ったコアの目視観察によると、9本のうち4本(B-1, B-2, C-1, C-2, C-5)でコアの分離を含む水平方向へのひび割れが確認され、このうち3本(B-1, B-2, C-5)ではひび割れが複数発生し、2本(C-1, C-2)ではひび割れが1本のみ発生している状態であった。

蛍光エポキシ樹脂含浸による調査では、層状ひび割れの発生が確認されたコアは6本(B-1, B-2, C-2, C-3, C-4, C-5)あり、B-2においてコア全長にわたって層状にひび割れが発生していた以外は、下面からの高さが80mmより上側の範囲で層状に発生している特徴がある。また、6本の中には、目視観察ではひび割れの発生が確認されなかったC-3およびC-4が含まれているほか、B-1およびB-2においては、コアの目視観察で確認されるよ

りも多くのひび割れが発生しており、目視観察では確認できていないひび割れがより深い位置で発生していた。

3.2 超音波伝播速度

(1) コア軸方向 (方法1)

表一に、方法1により測定したコア軸方向への超音波伝播速度を示す。B-1およびB-2においてデータ欠損があるのは、コアの分離面である探触子の設置面に著しい不陸があり、適切に測定が行えなかったためである。また、表中には、式(1)により計算した相対動弾性係数、ならびに、外観および切断面における層状ひび割れの有無も併せて示している。C-1については、測定対象としたコアの分離位置より下側にひび割れが確認されなかったことから、層状ひび割れなし(切断面)に分類した。

$$E_d = (V_n/V_0)^2 \times 100 \quad (1)$$

ここで、E_d: 相対動弾性係数(%), V_n: 超音波伝播速度(m/sec), V₀: 超音波伝播速度の基準値(m/sec)であり、

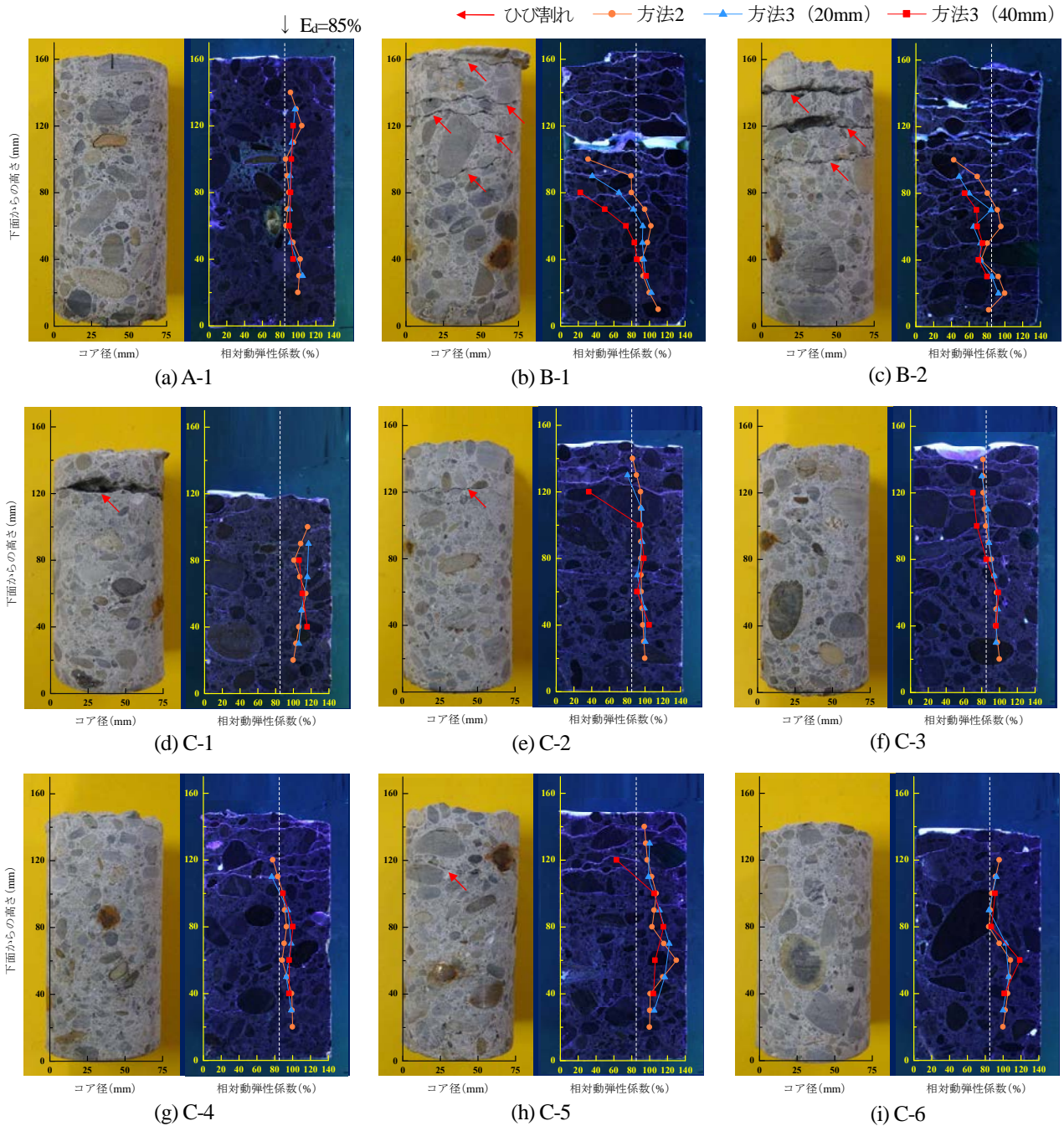


図-3 コア外観および切断面の状況ならびに相対動弾性係数の分布 (方法2および3)

V_0 には方法2により測定した下面から20mmの位置での値を採用した。

表-1より、層状ひび割れが確認されなかったコア(A-1, C-1, C-6)では、 V_n が4,200m/sec以上、 E_d が80%以上であったのに対し、層状ひび割れが確認されたコアでは、 V_n が2,700m/sec以下、 E_d が35%以下にまで低下していた。超音波伝播速度あるいは相対動弾性係数に基づくコンクリートの劣化判定では、 $V_n=4,000\text{m/sec}$ や $E_d=85\%$ を閾値とし、これらを上回るとき健全と判定することがあり^{3), 4)}、床版厚さ方向に超音波伝播速度を測定する場合には、 $V_n=4,000\text{m/sec}$ や $E_d=85\%$ を閾値とすることで概ね層状ひび割れの有無を判定できている。なお、判定精度にやや差異があるのは、コアの乾燥状態や V_0

の取り方の違いに影響するものと考えられる。

(2) コア直径方向 (方法2および3)

図-3の紫外線照射下で撮影したコア切断面の写真(右側写真)上には、方法2および3により測定した相対動弾性係数の深さ方向への分布を重ねて示しており、方法3では二つの探触子の平均高さを下面からの高さとしている。また、図中には層状ひび割れ判定の目安として $E_d=85\%$ を破線により示した。

探触子をコア軸方向の同じ高さ当たる従来の劣化深さ評価(方法2)においては、層状ひび割れの発生が確認されなかったコア(A-1, C-1, C-6)では、全ての測定高さで $E_d=85\%$ を上回った。これに対し、層状ひび割れの発生が確認されたコアにおいては、B-1およびB-2

のように層状ひび割れの発生している範囲で E_d が著しく低下するコアがある一方で、85%をわずかに下回るコア (C-3, C-4) や85%を上回るコア (C-2, C-5) があり、 $E_d=85%$ を劣化判定の閾値とする場合には層状ひび割れの見落としが発生した。これには、ひび割れの発生している方向と超音波の伝播経路の関係が影響しており、ひび割れに対して平行に超音波が伝播する本方法では、探触子間を横切るひび割れがあったとしても超音波の迂回距離が短く V_d の低下が生じにくいいため、層状ひび割れに対する感度が低くなったと考えられる。

コア周囲の異なる高さに探触子を当てる方法 (方法3) の場合、層状ひび割れの発生が確認されていないコアでは、方法2と同様にコア軸方向の位置によらず $E_d=85%$ 以上を満たし、探触子のずれ量の違いにより深さ方向への E_d の分布が著しく変化することもなかった。これは、探触子間を横切るひび割れが発生しておらず、探触子間を直線的に超音波が伝播したことを表している。また、方法2において層状ひび割れの見落としがあったC-2およびC-5では、探触子のずれ量を20mmとした場合には E_d の分布にさほど変化はなかったが、ずれ量を40mmにすることで層状ひび割れ部 (下面からの高さ約120mm) において E_d が60%以下にまで低下した。同様の傾向はB-1, B-2, C-3でも見られており、方法1と比較して E_d の低下は小さいものの、探触子のずれ量を40mmとした場合に層状ひび割れによる E_d の低下を捉えやすい結果となっている。これは、探触子のずれ量を大きくすることでひび割れが探触子間を横切りやすく、かつ、超音波の迂回距離が長くなり V_d の低下が顕著になったためである。さらに、本研究の範囲においては、探触子のずれ量を40mm、 E_d の閾値を85%としたとき、蛍光エポキシ樹脂含浸によるひび割れ調査と同等の精度で層状ひび割れ発生深さを評価できていることがわかる。

3.3 層状ひび割れ発生深さ評価への超音波法の適用性

上記より、床版における層状ひび割れ検知および発生深さ評価に対する超音波法の適用性を表-2に整理した。

方法1では、層状ひび割れが発生している場合の超音波伝播速度低下が三つの方法の中で最も顕著であり、ひび割れ検知を目的とする場合には有効である。ただし、劣化に関する情報が深さ方向に平均化されるため、ひび割れ発生深さの評価には適用できない。

方法2では、既往の研究を参考に $E_d=85%$ をひび割れ判定の閾値としたとき、コア外観の目視により判別可能なひび割れでさえも見落とされることがあった。このことから、本方法では層状ひび割れ検知および深さ評価において十分な精度が確保できない可能性が懸念される。

方法3は、層状ひび割れに対する感度の点で方法1に劣るが、ひび割れ発生深さ評価への適用可能性が高く、健全度評価を行ううえでは、三つの方法の中で最も有効な方法になると考えられる。

表-2 測定結果のまとめ

方法	結果	適用性の評価	
		検知	深さ
方法1	方法1~3の中で層状ひび割れによる超音波伝播速度の低下が最も顕著に表れる。 層状ひび割れの有無を判定することはできるが、深さの評価には適用できない。	○	×
方法2	ひび割れの発生方向と超音波伝播方向との関係性から、超音波伝播速度が低下しにくい場合がある。 層状ひび割れを過剰に検知することはないが、見落としが発生する可能性が高い。	△	△
方法3	探触子のずれ量を大きくすることで、層状ひび割れの有無および深さの両方を捉えることができる。	○	○

適用性の評価 ○:適用できる, ×:適用できない
△:適用できるが精度が劣る

4. まとめ

本研究では、実橋床版から採取したコアを使用して、超音波法により床版における層状ひび割れの有無および発生深さを評価する方法について検討した。その結果、(1)従来の劣化深さ評価方法 (方法2) では層状ひび割れの見落としが懸念され、(2)ひび割れ性状に合わせて超音波の伝播経路 (探触子の配置) を設定すること (方法3) で、層状ひび割れの有無および発生深さを高精度に評価できる可能性があることを示した。

以上の結果は1橋を対象とした検討により得られたものであり、今後、他の橋梁を対象に評価方法の有効性及び精度の検証を行っていく。

参考文献

- 1) 岩城圭介, 加藤淳司, 平間昭信, 塩谷智基: 微視的断面観察による酸劣化したコンクリートの微細構造の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.999-1005, 2004.
- 2) 角間恒, 佐藤孝司, 西弘明: 北海道において複合劣化を受けた鋼橋RC床版の調査事例, 寒地土木研究所月報, No.770, pp.13-18, 2017.
- 3) 川端雄一郎, 松下博通, 猪野和歌人, 山田一夫: 既設構造物におけるASR診断手法および対策時期の判定に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.2063-2068, 2006.
- 4) 林田宏, 田口史雄, 遠藤裕丈, 草間祥吾: 超音波伝播速度測定によるコンクリート構造物の凍害診断に関する基礎的研究, 寒地土木研究所月報, No.656, pp.10-15, 2008.

(2018年7月20日受付)