

超音波法を用いた床版の劣化調査について

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム ○角間 恒
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム 西 弘明

本研究では、床版から採取したコアに超音波法を適用し、床版における層状ひび割れの発生および発生深さを調査する手法について検討した。その結果、ひび割れ性状を考慮して超音波伝播速度計測における探触子配置を設定することで、蛍光樹脂含浸によるひび割れ観察に対して±20mm程度の精度で層状ひび割れの発生および発生深さを調査できることを示した。また、超音波法を用いて層状ひび割れの調査を行う際のフロー(案)および留意事項を整理した。

キーワード：床版、層状ひび割れ、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では床版内部に層状ひび割れが発生することがあり、本文中（2章）で実施した北海道内の国道橋を対象にした層状ひび割れ発生状況の調査では、層状ひび割れが発生した床版が北海道全域に存在することを確認している。

床版における層状ひび割れの発生や発生深さの調査では、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染料を添加した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、本調査の実施には専用のコアが必要であり、現地で採取できるコア本数に限度がある場合には、調査の実施に至らないことも多い。

そこで本研究では、他の調査（例えば、強度計測）とコアを共有することで効率的な調査が可能になると考え、床版から採取したコアに非破壊手法である超音波法を適用して層状ひび割れの発生および発生深さを調査する方法について検討した。検討には実橋床版から採取したコアを使用し、超音波伝播速度の計測およびコア内部のひび割れ発生状況の観察を行った結果を比較し、層状ひび割れの調査に対する超音波法の適用性や調査精度を考察した。また、その結果を基に、超音波法を用いた層状ひび割れの調査フロー(案)および調査時の留意事項を整理した。

2. 層状ひび割れ発生状況の調査

層状ひび割れの調査方法の検討に先立ち、国土交通省北海道開発局が管理する道路橋の床版における層状ひび割れ発生状況を調査した。

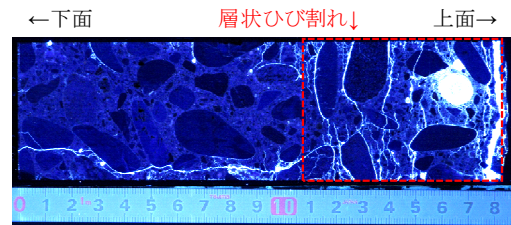


写真-1 層状ひび割れが発生したコアの例

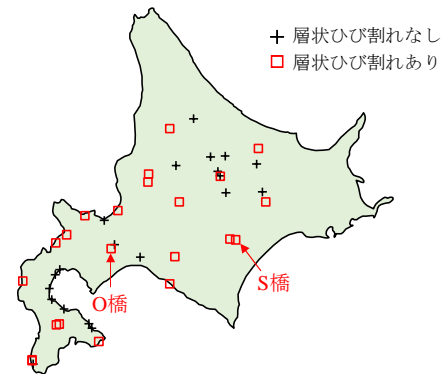


図-1 層状ひび割れの発生状況

(1) 調査方法

調査では、まず、橋梁定期点検において床版部材に対し、対策や詳細調査が必要（対策区分 C1、C2、S1）と判定とされた橋梁に対して劣化状況調査が行われた事例を収集し、その中から床版コンクリートの微細ひび割れ観察（以下、ひび割れ観察）が行われた橋梁を抽出した。ここでいうひび割れ観察は、コンクリートコア（以下、コア）を使用した蛍光樹脂含浸、あるいは、浸透探傷試験による観察のことを指す。次に、観察結果から、各橋梁における床版コンクリートの状態を「層状ひび割れなし」と「層状ひび割れあり」に分類した。層状ひび割れに関しては明確な定義がないが、本研究では、写真-1に示すように、粗骨材寸法程度の間隔で複数のひび割れ

が発生している状態を層状ひび割れと定義した。また、層状ひび割れは凍害や ASR に起因すると考えられるが、収集した事例の中で発生要因に言及したものはわずかであったため、発生要因による区別は行っていない。

調査結果は橋梁単位で集計しており、同一橋梁内の複数箇所でもひび割れ観察をしたうち 1 箇所でも層状ひび割れが発生していれば、「層状ひび割れあり」に分類した。

(2) 調査結果

図-1 では、調査結果を地図上にプロットした。本調査でひび割れ観察結果を収集できたのは 42 橋であり、そのうち床版コンクリートに層状ひび割れの発生が確認されたのは 22 橋であった。対象データには地域等の偏りがあるが、観察結果を収集できた地域には万遍なく層状ひび割れが発生しており、床版における層状ひび割れが北海道全域で発生していることが明らかである。また、本調査は、あくまでも定期点検で対策や詳細調査が必要と判定され、かつ、調査の段階で管理者の判断によってひび割れ観察が行われた橋梁を対象としたものであり、ひび割れ観察の実施に至っていない橋梁を含めると、相当数の橋梁で層状ひび割れが潜在していると示唆される。

3. 超音波法による層状ひび割れ調査の概要

(1) 対象橋梁

超音波法による層状ひび割れの調査方法の検討には、実橋床版から採取したコアを用いた。対象橋梁は図-1 中に示す 2 橋 (O 橋、S 橋) であり、表-1 に対象橋梁の基本諸元を示す。また、写真-2 には対象橋梁における床版下面の状況を示しており、両橋梁ともに床版下面には白色析出物を伴うひび割れが発生していた。

a) O 橋

O 橋は、昭和 40 年に供用が開始された昭和 39 年鋼道路橋設計示方書に準ずる 2 径間単純合成鉄桁橋であり、供用開始から 49 年が経過した平成 26 年に供用を終えている。調査には本橋の撤去床版から採取した直径 75mm のコア 9 本を使用した。コア採取は、床版を上下逆にした状態で鉛直下向き (下面から上面) に実施した。

b) S 橋

S 橋は、昭和 41 年に供用が開始された昭和 39 年鋼道路橋設計示方書に準ずる 2 径間連続非合成鉄桁橋であり、調査時点で供用開始から 52 年が経過していた。調査には供用中の床版の下面から鉛直上向きに採取した直径 65mm のコア 3 本を使用した。

(2) 超音波伝播速度の計測

超音波伝播速度の計測にはプロセック社製パンジット PL-200 を使用し、コアを室内で乾燥させた後、以下に示す 4 ケースについて実施した (図-2)。なお、採取時に

表-1 対象橋梁の諸元

橋梁	O 橋	S 橋
架橋地域	道央地方 (山間部)	道東地方 (平野部)
上部構造形式	2 径間単純合成鉄桁	2 径間連続非合成鉄桁
供用開始	昭和 40 年	昭和 41 年
適用示方書	昭和 39 年鋼道路橋設計示方書	
設計床版厚	170mm	150mm
供用状況	平成 26 年に供用終了	供用中



(a) O 橋



(b) S 橋

写真-2 床版下面の変状状況

分離が発生したコアでは、分離位置より下面側のみを計測対象とした。

ケース V 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) への超音波伝播速度を計測した。

ケース C-0 は、従来からコンクリート構造物における凍害劣化調査への適用実績がある方法²⁾であり、コア軸直角方向 (床版水平方向) を計測方向として、探触子をコア軸方向に移動しながら順次計測を行った。本計測における探触子の移動間隔は 10mm あるいは 20mm とした。

ケース C-20 および C-40 では、ケース C-0 と同様に、コア周面に当てた探触子をコア軸方向に 10mm あるいは 20mm 間隔で移動しながら順次計測するが、層状ひび割れが探触子間を横切りやすいよう二つの探触子を当てる高さをコア軸方向にずらしている。本調査における探触子のずれ量 (以下、ずれ量) はケース C-20 と C-40 でそれぞれ 20mm と 40mm とし、ケース C-20 の計測は O 橋においてのみ実施した。なお、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。

(3) コア内部の層状ひび割れ発生状況の観察

超音波法を用いた層状ひび割れ調査の精度を検証するため、超音波伝播速度計測後に、コア内部のひび割れ発

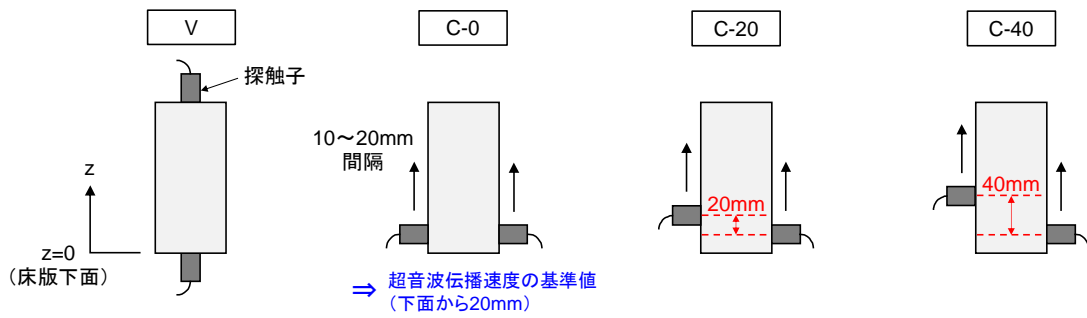


図-2 超音波伝播速度の測定方法

← ひび割れ(目視観察) 分離(調査対象外) ● C-0 ▲ C-20 ■ C-40

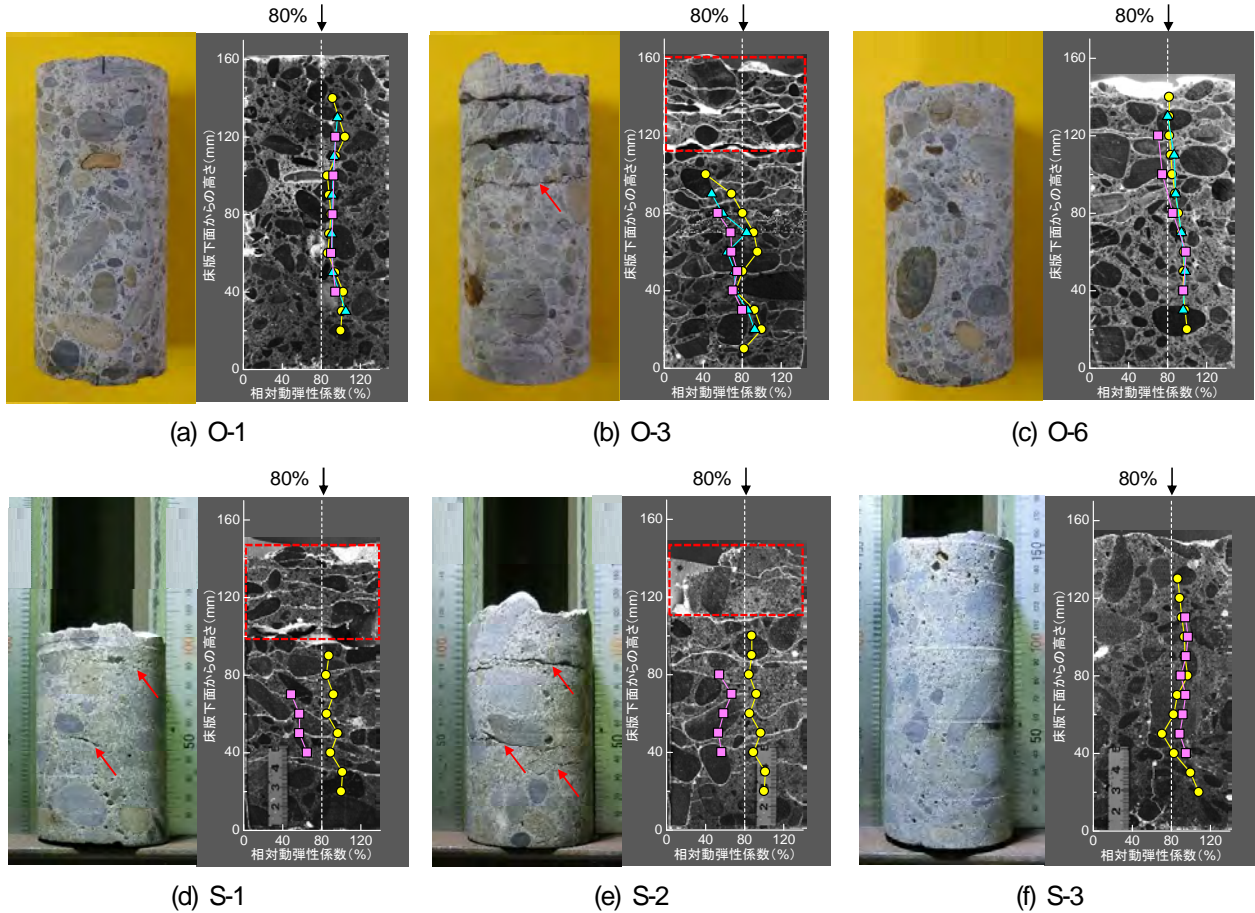


図-3 コア外観および切断面の状況ならびに相対動弾性係数の分布

生状況を観察した。観察では、蛍光染料を添加した低粘度エポキシ樹脂(粘度 $100 \pm 50 \text{MPa} \cdot \text{s}$ (20°C))、以下、蛍光樹脂)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。

4. 超音波法による層状ひび割れ調査の結果

(1) コアのひび割れ発生状況

図-3 の左図には蛍光樹脂含浸前に可視光下でコアの外観を観察(以下、外観観察)した結果を、同右図には蛍光樹脂含浸後に紫外線照射下でコア切断面を観察(以下、切断面観察)した結果を示す。また、表-2 の列

「層状ひび割れの観察結果」には、全 12 本のコアに関して、外観観察および切断面観察による層状ひび割れの有無、ならびに、切断面観察により確認した層状ひび割れ発生深さ(以下、観察深さ)をまとめている。

外観観察においては、O 橋では 9 本中 4 本(O-2、O-3、O-5、O-8)で、S 橋では 3 本中 2 本(S-1、S-2)で層状ひび割れの発生が確認された。

切断面観察においては、O 橋では 6 本(O-2、O-3、O-5、O-6、O-7、O-8)、S 橋では 2 本(S-1、S-2)で層状ひび割れの発生が確認され、その中には、外観観察ではひび割れの発生が確認されなかった O-6 および O-7 も含まれている。また、層状ひび割れが、外観観察で確認されたよりも深い位置で発生しているコア(例: O-3)や、

表-2 調査結果の一覧

橋梁名	コア名	層状ひび割れの観察結果			超音波法による調査結果									
		外観観察	切断面観察		ケースV			ケースC-0		ケースC-20		ケースC-40		
			有無	深さ (mm)	V ₀ (m/sec)	V _d (m/sec)	E _d (%)	深さ (mm)	差 (mm)	深さ (mm)	差 (mm)	深さ (mm)	差 (mm)	
O橋	O-1	なし	なし	0	4539	4217	86.3	0	0	0	0	0	0	
	O-2	あり	あり	130	4039	(欠損)	(欠損)	90	-40	100	-30	120	-10	
	O-3	あり	あり	140	4098	(欠損)	(欠損)	135	-5	140	0	140	0	
	O-4	なし	なし	0	4542	4162	84.0	0	0	0	0	0	0	
	O-5	あり	あり	100	4713	2667	32.0	0	-100	0	-100	65	-35	
	O-6	なし	あり	90	4879	2321	22.6	0	-90	40	-50	80	-10	
	O-7	なし	あり	60	4928	999	4.1	55	-5	65	5	55	-5	
	O-8	あり	あり	70	4527	2030	20.1	0	-70	0	-70	55	-15	
	O-9	なし	なし	0	4729	4242	80.5	0	0	0	0	0	0	
S橋	S-1	あり	あり	120	4076	2560	39.5	0	-120	(未計測)	(未計測)	130	10	
	S-2	あり	あり	120	4079	2420	35.2	0	-120	(未計測)	(未計測)	150	30	
	S-3	なし	なし	0	4296	4132	92.5	0	0	0	0	0	0	

密に発生しているコア（例：S-1）も見られた。

これ以降、層状ひび割れの有無に関する記述は、切断面観察に基づいて行うことをここに記す。

(2) 超音波伝播速度

a) コア軸方向（ケース V）

表-2 の列「ケース V」には、ケース V により計測した超音波伝播速度および次式から求めた相対動弾性係数をまとめている。

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

ここで、E_d：相対動弾性係数（%）、V_d：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、V₀には、ケース C-0 により下面から 20mm の位置で計測した超音波伝播速度を採用した。

表-2 より、層状ひび割れが確認されなかったコア（O-1、O-4、O-9、S-3）では E_d が 80% 以上であり、層状ひび割れが確認されたコアでは E_d が 40% 以下にまで低下していた。また、後述する他の 3 ケースと比較して、層状ひび割れがある場合の超音波伝播速度の低下が大きくなった。相対動弾性係数に基づくコンクリートの劣化判定では、E_d=85% を閾値としてこれを上回るとき健全と判定することがある²⁾が、本調査においても同程度の閾値を設定することで、層状ひび割れの有無を判定できると考えられる。なお、これ以降では、E_d=80% をひび割れ有無の閾値として検討を進める。

b) コア直径方向（ケース C-0、C-20、C-40）

図-3 の切断面観察結果の上には、ケース C-0、C-20、C-40 により計測した E_d のコア軸方向への分布を重ねて示しており、いずれも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、図中にはひび割れ有無を判定する閾値 E_d=80% を破線により示した。表-2 の列「ケース C-0」「ケース C-20」「ケース C-40」には、それぞれのケースから得られた層状ひび割れ発生深さ（以下、推定深さ）を示しており、「深さ」が 0mm のコアは、

超音波法により層状ひび割れが検出されなかった（コア全長で E_d が 80% 以上であった）ことを表す。また、表中の「差」は観察深さと推定深さの差を表し、負の値の場合、超音波法が層状ひび割れ発生深さを実際より浅く推定したことを意味する。

ケース C-0 では、層状ひび割れが確認されなかった全てのコアで、コア全長で E_d が 80% を上回った（例：図-3 の O-1）。これに対し、層状ひび割れが確認されたコアでは、部分的に E_d が低下するコア（例：同 O-3）があったが、全長で E_d が 80% を上回り、層状ひび割れが見落とされるコア（例：同 O-6、S-1、S-2）もあった。

ケース C-20 および C-40 においては、層状ひび割れが確認されなかったコアでは、ずれ量によらずコア全長で E_d が 80% を上回り、ずれ量の違いによって E_d の分布が著しく変化することはなかった（例：同 O-1）。層状ひび割れが確認されたコアに関しては、ケース C-0 では層状ひび割れの見落としが生じたが、ケース C-20 および C-40 では層状ひび割れが横切りやすいよう探触子を配置したことで、層状ひび割れを検出できている（例：同 O-6、S-1、S-2）。ただし、ずれ量 20mm の場合には一部のコアで層状ひび割れの見落としが生じ（例：同 O-6）、検出精度がずれ量に依存する結果となった。層状ひび割れに関する既往の調査事例³⁾では、層状ひび割れは粗骨材寸法と概ね同程度の間隔で発生していることが報告されており、一般的に床版コンクリートには最大寸法 20～25mm 程度の粗骨材が使用されていることを考慮すると、探触子間隔をそれより大きくする必要がある。

(3) 層状ひび割れ調査の精度

a) 検出精度

表-3 には、ケース C-0、C-20、C-40 による層状ひび割れの検出精度を整理した結果を示す。ここでは、切断面観察および超音波法による調査結果を基に、層状ひび割れがないコアを「適正評価」または「誤検出」に、層状ひび割れがあるコアを「検出」または「見落とし」に分

表-3 検出精度

		ケース C-0	ケース C-20	ケース C-40	
層状ひび割れなし	コア総数(本)	4	4	4	
	適正評価	コア数(本)	4	4	4
		割合(%)	100	100	100
	誤検出	コア数(本)	0	0	0
		割合(%)	0	0	0
層状ひび割れあり	コア総数(本)	8	6	8	
	検出	コア数(本)	3	4	8
		割合(%)	38	67	100
	見落とし	コア数(本)	5	2	0
		割合(%)	63	33	0

<検出結果の分類>

蛍光樹脂含浸	超音波法	分類
なし ×	なし →	適正評価
なし ×	あり →	誤検出
あり ×	あり →	検出
あり ×	なし →	見落とし

類し、それぞれの割合を求めている。

層状ひび割れがないコアでは、超音波伝播速度の計測方法によらず全てのコアが「適正評価」に分類され、健全なコアから層状ひび割れを誤検出することはなかった。

層状ひび割れがあるコアでは、ケース C-0 において 8 本中 5 本で層状ひび割れを見落とし（見落とし率 63%）、層状ひび割れを的確に検出できていない結果になった。これに対して、ケース C-20 では見落とし率 33%、ケース C-40 では同 0% であり、ひび割れの性状を考慮した探触子配置を選択し、さらにずれ量を大きくすることで、層状ひび割れの見落としが抑制された。

b) 深さ推定の精度

表-4 には、ケース C-0、C-20、C-40 による層状ひび割れ発生深さの推定精度を示す。ここでは、層状ひび割れがあるコアを、観察深さと推定深さの大小関係を基に「過小評価（観察深さ>推定深さ）」「合致（観察深さ=推定深さ）」「過大評価（観察深さ<推定深さ）」に分類し、それぞれの割合および差の平均値を求めた。

ケース C-0 においては、層状ひび割れを検出できなかったコアを含む全 8 本で層状ひび割れ発生深さを過小評価し、観測深さと推定深さの差の平均は 69mm であった。

ケース C-20 および C-40 においては、「合致」や「過大評価」に分類されるコアもあったが、全体的には層状ひび割れの発生深さを過小評価する傾向があり、その割合（過小評価率）は 60~70% であった。ただし、観察深さと推定深さの差を見ると、ケース C-20 での差の平均は 63mm であり、ケース C-0 と同様に層状ひび割れの発生深さが極端に過小に推定されたのに対し、ケース C-40 での差の平均は 15mm であり、ずれ量を 40mm にした場合に深さの推定精度が大幅に改善された。また、「過大評価」となった 2 本における観察深さととの差の平均は 20mm であった。このことから、ケース C-40（ずれ量 40mm）を採用したうえでひび割れ判定を行う相対動弾性係数の閾値を $E_r=80\%$ に設定することで、蛍光樹脂含浸による観察結果に対して、±20mm 程度の精度で層状ひび割れの発生および発生深さを調査できるといえる。

表-4 発生深さの推定精度

		ケース C-0	ケース C-20	ケース C-40	
層状ひび割れあり	コア総数(本)	8	6	8	
	過小評価	コア数(本)	8	4	5
		割合(%)	100	67	63
		差の平均(mm)	-69	-63	-15
	合致	コア数(本)	0	1	1
		割合(%)	0	17	13
		差の平均(mm)	—	—	—
	過大評価	コア数(本)	0	1	2
		割合(%)	0	17	25
		差の平均(mm)			
差の平均(mm)		—	5	20	

<深さ推定結果の分類>

観察深さ >	推定深さ	→	過小評価
観察深さ =	推定深さ	→	合致
観察深さ <	推定深さ	→	過大評価

表-5 適用性の評価

方法	適用性		コメント
	検出	深さ推定	
ケース V	○	×	4ケースの中で、層状ひび割れがあるときの超音波伝播速度の低下が最も顕著であり、層状ひび割れの検出のみを目的にする場合には最も有効な方法になる。ただし、発生深さの推定には適用できない。
ケース C-0	△	△	これまでにコンクリートの劣化判定に用いられてきた実績があるが、床版における層状ひび割れ調査に適用する場合には、層状ひび割れの見落としや発生深さの過小評価が懸念される。
ケース C-20	△	△	ひび割れの方向を考慮して探触子をコア軸方向にずらす配置としたが、ずれ量が層状ひび割れ発生間隔と同程度であり、層状ひび割れの発生および発生深さの推定精度の大幅な改善は期待できない。
ケース C-40	○	○	ひび割れの方向および発生間隔を考慮した探触子配置とすることで、層状ひび割れの発生および発生深さの推定に適用できる。切断面観察結果に対する発生深さの推定精度は±20mm程度である。

<適用性>

○:適用できる、×:適用できない、△:適用できるが精度が劣る

c) 層状ひび割れ調査への超音波法の適用性評価

以上の計測および精度検証結果を基に、床版から採取したコアを用いた層状ひび割れ調査への超音波法の適用性を評価した結果を表-5 にまとめる。

ケース V では、層状ひび割れがある場合に超音波伝播速度低下が 4 ケースの中で最も顕著であり、層状ひび割れの検出のみを目的とする場合には有効な方法である。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。

ケース C-0 では、外観観察により判別可能なひび割れさえも見落とされることがあった。また、ケース C-20 ではケース C-0 から層状ひび割れの検出精度がやや改善されたが、発生深さを過小に推定した。以上より、これらの方法では、層状ひび割れ調査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。

ケース C-40 は、層状ひび割れに対する感度の点でケース V に劣るが、発生深さの推定への適用可能性が高く、層状ひび割れ調査において 4 ケースの中で最も有効な方法になると考えられる。

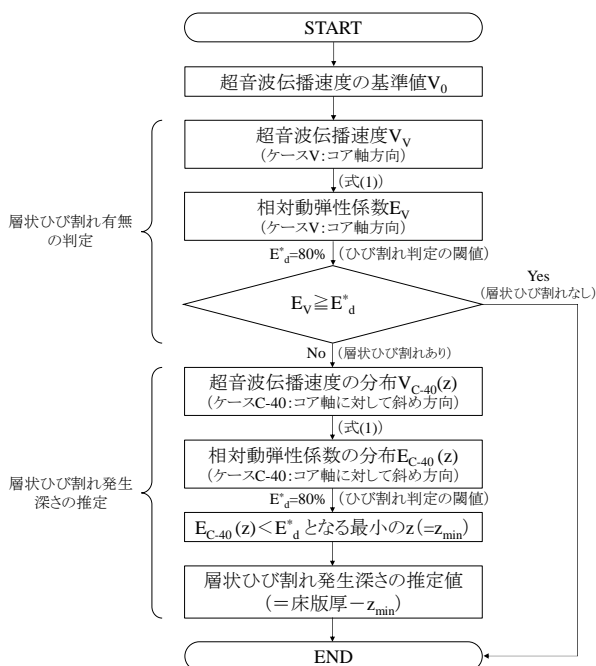


図-4 調査フロー(案)

5. 超音波法による層状ひび割れ調査フロー(案)

(1) 調査フロー(案)

4章の結果に基づき、床版から採取したコアに超音波法を適用して層状ひび割れの調査を行う際のフロー(案)を図-4のとおり整理した。本フロー(案)では、層状ひび割れの調査を二段階で行うこととし、まずコア軸方向への超音波伝播速度を計測して相対動弾性係数を求めることにした(ケースV)。これは、層状ひび割れの有無を判定することを目的とするものであり、コア軸方向への相対動弾性係数がひび割れ判定の閾値以上のときには「層状ひび割れなし」と判定して調査を終了し、閾値未満のときのみ「層状ひび割れあり」と判定して層状ひび割れ発生深さの推定(ケースC-40)を行う。

(2) 調査時の留意事項と今後の課題

a) 超音波伝播速度の基準値

本研究においては、相対動弾性係数を計算する際の超音波伝播速度の基準値をコア毎に設定したが、表-2のように、同一橋梁の中であってもコア毎に超音波伝播速度の基準値が異なっていた。また、基準値の計測位置にひび割れが発生している場合などには、基準値自体を設定できないことも想定される。本論文で対象とした2橋では、下面から20mmの位置で計測した超音波伝播速度を基準値にして層状ひび割れの発生および発生深さを精度良く調査することができたが、今後、基準値の設定方法について精査する必要があると考えられる。

b) コア端部におけるデータ欠損

本研究により、層状ひび割れの調査において、コア周面に当てる探触子をコア軸方向に40mmずらすことの有

効性を示したが、この方法では、コア端部の数10mmの範囲にデータ欠損が生じることになる。実際、図-3に示すように、ケースC-40による計測では、探触子配置に起因して下面側40mm程度の範囲でデータを取得できていない。本手法の適用に当たっては、データ欠損によりコア端部における層状ひび割れの調査精度が低下することに留意が必要である。

c) 調査結果の妥当性

本研究では、水平方向のひび割れが卓越したコアを対象に一連の検討を実施したが、超音波伝播速度の低下が水平方向以外のひび割れ(例えば、曲げひび割れ)に起因する場合もある。したがって、採取位置における床版下面や採取したコアの性状等を踏まえて、調査結果の妥当性を評価することも不可欠になる。

6. おわりに

本研究では、床版から採取したコアに超音波法を適用し、床版における層状ひび割れの発生および発生深さを調査する方法について検討した。その結果、ひび割れ性状を考慮して超音波伝播速度計測における探触子配置を設定することで、層状ひび割れの発生および発生深さを精度良く調査できることを示した。また、超音波法を用いて層状ひび割れの調査を行う際のフロー(案)および留意事項を整理した。

以上の結果は2橋に対する検討から得られたものであり、今後は適用実績を蓄積し、調査方法の有効性や精度の更なる検証を行っていく。

謝辞: 本研究の実施に際し、国土交通省北海道開発局より実橋における調査資料およびコンクリート試料をご提供いただきました。また、超音波伝播速度の計測は、(一社)日本建設機械施工協会施工技術総合研究所との共同研究により実施したものである。ここに付記し、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、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) 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。
- 3) 澤松俊寿、岡田慎哉、西弘明、三田村浩、松井繁之：46年間供用した寒冷地における道路橋RC床版の劣化損傷状況、土木学会第68回年次学術講演会講演概要集、I-414、2013。