

論文 凍害劣化の簡易診断技術に関する研究

遠藤 裕丈*1・田口 史雄*2・林田 宏*3

要旨: 本研究は、コンクリート構造物の凍害の程度を通常の日常管理の範囲で簡便かつ迅速に評価できる診断技術の確立を目指すものである。ここでは、表面からの劣化部の厚さを非破壊で簡易に推定できる表面走査法の理論に着目し、凍害診断への応用を試みた。表面走査法は、凍害を受けた劣化部の厚さをある一定の精度で非破壊により推定する方法として有効であることと、測定で得られるグラフの傾きから耐凍害性の閾値（相対動弾性係数 60%）を下回る部分の深さを推算できることが確認された。さらに、実構造物において実証的・臨床的な評価を行い、データ数は未だ少ないものの表面走査法の有効性の一端が示された。

キーワード: 凍害, 超音波伝播速度, 表面走査法, 診断

1. はじめに

我が国では今日までに多くのコンクリート構造物が建設されてきたが、経年による老朽化の進行に伴い、コンクリート構造物を長く使いこなすために必要な維持管理費は年々増加していくことが予想される。しかしながら我が国の財政事情は厳しく、今後は限られた財源の範囲で効率的な維持管理を進めることが要求される。

寒冷地のコンクリート構造物が受けやすい代表的な被害の一つに凍害がある。凍害は、コンクリート中の空隙に含まれる水分が凍結し、氷晶の形成に伴って発生する凍結圧によって空隙壁が破壊される劣化現象であり、コンクリート組織の弛緩による強度低下、塩化物イオンの浸透速度の増加、鉄筋付着力の低下などが懸念される。

コンクリート構造物における凍害の診断は、凍害が疑われる箇所からコアを採取し、コアの両側面に超音波の発・受振子をあて、深さ方向の伝播速度を調べることで凍害の深さ・程度を評価するのが一般的である。しかし、コア採取による方法は、コンクリート部材や鉄筋の損傷を引き起こす可能性があること、広範囲に亘って詳細な調査を進めるには多大な時間と労力を要すること、足場の設置が困難な構造物においては作業効率が大きく低下することが懸念される。

これらの課題を解決するため、本研究ではコンクリート構造物の凍害の程度を通常の日常管理の範囲で簡便かつ迅速に評価できる診断法の確立を目指し、表面走査法¹⁾を応用した簡易的な凍害診断技術に関する実験的な検討を行った。さらに、室内実験で得た知見の妥当性を検証するため、実構造物で臨床的な評価を試みた。

2. 表面走査法

表面走査法は、コンクリートの表面近傍に存在する劣

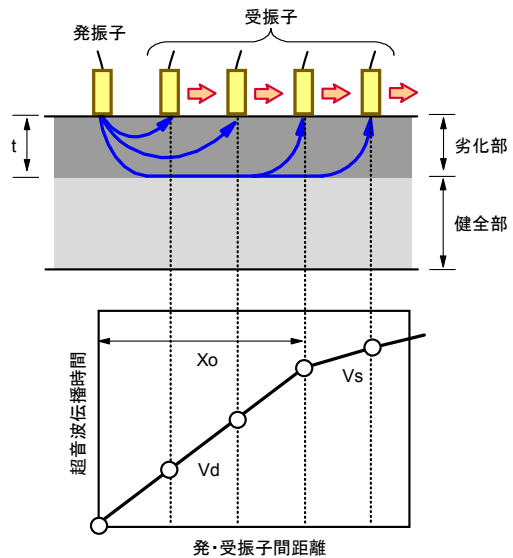


図-1 表面走査法¹⁾の概念

化層の厚さを超音波によって非破壊で推定する方法である¹⁾。図-1に示すようにコンクリートの表面からある深さの範囲に劣化部が存在する場合、コンクリートの表面に超音波の発振子と受振子を配置し、受振子を一定の間隔で発振子から遠ざけていくと、超音波は劣化部をなるべく迂回し、劣化がさほど進行していない組織を伝播経路に選びながら最短時間で受振子に到達しようとする性質があるため、発・受振子間の距離がある値以上になると、超音波の伝播経路は健全部の縁端面に全て一本化され、発・受振子間の距離の増加に対する超音波の伝播時間の増加の割合は小さくなる。このため、発・受振子間の距離と超音波伝播時間の関係は、図-1の下に示すような折れ線グラフとなる。

ここで、原点から直線の傾斜が変わる変曲点までの距離を X_0 、劣化部と健全部縁端面の超音波伝播速度をそれ

*1 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 研究員 (正会員)

*2 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 上席研究員 博(工) (正会員)

*3 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 主任研究員 (正会員)

ぞれ V_d , V_s (V_d , V_s はともにグラフの傾きの逆数) とすると、劣化部の厚さ t は次式で表される¹⁾。

$$t = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}} \quad (1)$$

本研究は、この理論を凍害診断に応用することを目指したものである。図-1 の上に示す劣化部を凍害劣化が生じた範囲と捉えて、硬化コンクリートの凍害の深さおよび凍害の程度を表面走査法によって非破壊で評価できるかを調べた。

3. 室内実験の概要

3.1 供試体の配合

表-1 に供試体の配合を示す。水セメント比は北海道開発局道路設計要領の RC-1 および RC-4 (内陸部の道路構造物に適用される配合)²⁾ に準じて 55% とした。材料パラメータはセメントの種類と粗骨材の最大寸法に着目し、セメントは普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種の 2 種類、粗骨材は非混入(モルタル)、最大寸法 20mm、最大寸法 40mm の 3 種類とした。コンクリート供試体の単位セメント量は前述の要領²⁾ に準じて 280kg/m^3 とした。細骨材は除塩処理を施した苫小牧市錦岡産の海砂(密度 2.70g/cm^3 , 吸水率 0.89%)、粗骨材は小樽市見晴産の砕石(密度 2.68g/cm^3 , 吸水率 1.07%) を使用した。供試体の凍害劣化を促進させるため、AE 剤は使用しなかった。各配合にはセメント(普通…N, 高炉…B) と粗骨材(非混入…G0, 最大寸法 20mm…G20, 最大寸法 40mm…G40) を組み合わせ合わせた配合記号を付した。

3.2 供試体

供試体の寸法は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ とした(図-2)。供試体は材齢 7 日まで湿った麻布で覆い、その後は材齢 28 日まで恒温恒湿室(温度 20°C , 湿度 60%) に静置した。途中、材齢 21 日目に、後述する一面凍結融解試験において試験面(打設面)に試験水(淡水)を張るために必要な土手(幅 5mm, 高さ 20mm) をシリコンとエポキシ樹脂を用いて打設面に取り付けた。

3.3 一面凍結融解試験および測定

図-2 に実験の流れを示す。一般にコンクリート構造物の凍害劣化はコンクリートの表面から徐々に進行する。これらの状態を再現させる理由から、本研究では一面凍結融解試験によって供試体に凍害劣化を与えることとした。試験開始材齢は 28 日とした。試験は ASTM C672 を準用し、打設面に淡水を厚さ 6mm 張って -18°C で 16 時間、 23°C で 8 時間の 1 日 1 サイクルの凍結融解作用を 30, 59, 91, 121 サイクル与えた。所定のサイクルに達した後、土手を取り外し、超音波測定器を使用して表

表-1 供試体の配合

記号	セメント	G_{\max} (mm)	単位量(kg/m^3)			
			W	C	S	G
NG0	普通	—	267	486	1,551	—
NG20	普通	20	154	280	893	1,119
NG40	普通	40	154	280	893	1,123
BG20	高炉 B	20	154	280	889	1,115

【備考】 G_{\max} は粗骨材最大寸法、W は水、C はセメント、S は細骨材、G は粗骨材を表す。いずれの配合も水セメント比は 55%、細骨材率は 44%(NG0 を除く)である(NG0 はモルタル)。凍害劣化を促進させる理由から、AE 剤は使用していない。

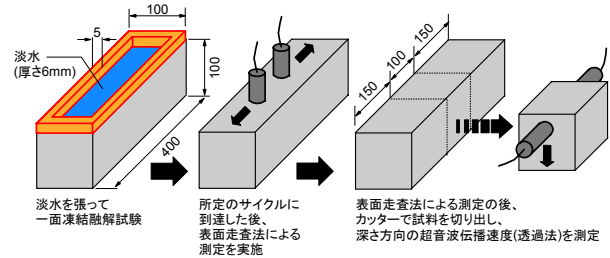


図-2 供試体および実験の流れ

面走査法による測定を行い、図-1 の下に示した発・受信子間距離と超音波伝播時間の関係を調べた。発・受信子間距離は 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400mm とした。使用した測定器の周波数は 28kHz, 発・受信子の径はいずれも 20mm である。

表面走査法による測定が終了した後、引き続きコンクリートカッターを用いて供試体の中央部から試料を切り出し、試料の切断面に超音波の発・受信子をあてて深さ 10~90mm 間の超音波伝播速度の分布を 10mm 間隔で調べた(以下、透過法と記す)。

4. 室内実験の結果および考察

4.1 表面走査法による測定結果

図-3 に表面走査法により求めた発・受信子間の距離と超音波伝播時間との関係を示す。折れ線グラフは「二本の直線による折れ線回帰プログラム³⁾」を使用し、原点通過を前提条件に求めた。試験開始前(0 サイクル)の測定では明確な折れ線はみられなかったが、サイクルの進行に伴って顕著な折れ線が表れることが確認された。普通ポルトを用いたシリーズは、NG0 に比べて NG20, NG40 の方が明らかな折れ線を示す結果となった。BG20 は、折れ線は表示されたものの、91 サイクル以降においては発信子から受信子に到達するまでの超音波伝播時間が大幅に長くなるデータが得られた。

4.2 表面走査法による凍害の程度の評価

表-2 に図-3 のグラフから求めた V_d と V_s (劣化部ならびに健全部縁端面の超音波伝播速度) および t (劣化部の厚さ) の計算結果を示す。一般に超音波伝播速度の精度は $\pm 5\%$ ⁴⁾ とされ、BG20 の 91 サイクルは V_d と V_s

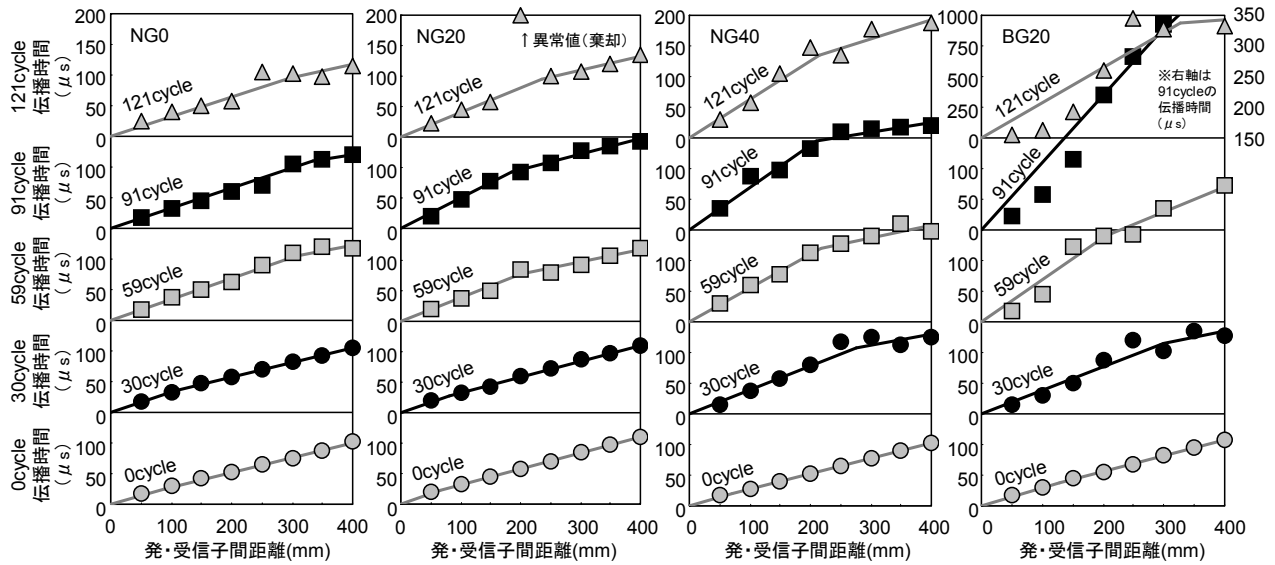


図-3 表面走査法による測定結果

の階差が±9%と5%を僅かに上回る程度であったため、これに関しては明確な変曲点はないと評価し、 t の算出は行わなかった。また、BG20の121サイクルの t は計算では145mmと算出されたが、供試体の高さが100mmである関係上、上限の100mmを t とした。

劣化部の速度 V_d の変化をみると、NG0は約3.0km/sのまままで推移し、大きな変動はみられなかったが、それ以外のシリーズはサイクルの進行に伴って低下している傾向が認められる。このことは、凍結融解の繰り返しのよって劣化部の損傷が進行していることを示している。

一方、劣化部の厚さ t をみると、NG20は概ね50~60mmの値で推移していることから、表面から中央付近までが凍害を受けていると評価される。NG40、BG20は30サイクル到達の段階で劣化部の厚さが80mm以上に達していることから、ややばらつきはみられるものの凍結融解試験開始直後から全体が大きく劣化していると評価される。NG0は劣化部の損傷度はさほど高くはないが、 t は計算上、NG40、BG20と同程度の値となった。

4.3 透過法による測定結果

図-4に透過法による測定結果を示す。この図は、緒方らの提案式⁵⁾(式(2))を用いて超音波伝播速度から動弾性係数を算出し、算出値から各深さの相対動弾性係数を式(3)より求め、その値をプロットしたものである。

$$E_{dn} = 4.0387V_n^2 - 14.438V_n + 20.708 \quad (2)$$

$$RE = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 V_n は n サイクルの超音波伝播速度(km/s)、 E_{dn} は n サイクルの動弾性係数(GPa)、 RE は相対動弾性係数

表-2 V_d , V_s , t の計算結果

cycle	NG0				NG20			
	V_d	V_s	階差	t	V_d	V_s	階差	t
30	3.0	4.2	17	21	3.0	3.8	12	14
59	2.9	5.7	33	88	2.6	5.1	33	56
91	3.0	6.1	33	96	2.0	4.0	33	53
121	3.1	4.6	19	64	2.5	4.4	28	63
cycle	NG40				BG20			
	V_d	V_s	階差	t	V_d	V_s	階差	t
30	2.6	5.9	40	87	2.6	5.1	32	85
59	1.8	5.0	47	75	1.4	2.4	25	51
91	1.5	6.1	61	82	0.9	1.1	9	— ¹⁾
121	1.6	3.2	33	62	0.3	3.0	79	100 ²⁾

【備考】 V_d と V_s (劣化部ならびに健全部縁端面の超音波伝播速度)の単位はkm/s。階差(V_s と V_d の平均値に対する V_s および V_d の変化率)の単位は%。 t (劣化部の厚さ)の単位はmm。
1) 階差が小さいため変曲点なしと評価し、 t は算出しなかった。
2) t の計算値は145mmとなったが、供試体の高さは100mmであるため、上限の100mmと評価値とした。

(%)、 E_{d0} は凍結融解試験前の動弾性係数(GPa)である。

NG0、NG20、NG40における相対動弾性係数の低下率は、粗骨材を用いたNG20、NG40が大きいことが確認された。モルタルと粗骨材との界面には遷移帯と呼ばれる材料的に不連続でポーラスな領域が存在する⁶⁾ことが知られており、この影響が考えられる。NG20では91サイクルから121サイクルにかけて相対動弾性係数が逆に増加する傾向が得られたが、この理由については特定できなかった。BG20は30サイクルまでは全シリーズ中、相対動弾性係数が最も大きかった。しかし、30サイクル経過後は相対動弾性係数が急速に低下する挙動を示した。

4.4 表面走査法と透過法の測定結果の比較

ここで、表面走査法から求めた t (表-2)および深さ t の相対動弾性係数を図-4に書き入れ、前項4.2で述べた評価の妥当性について検証する。

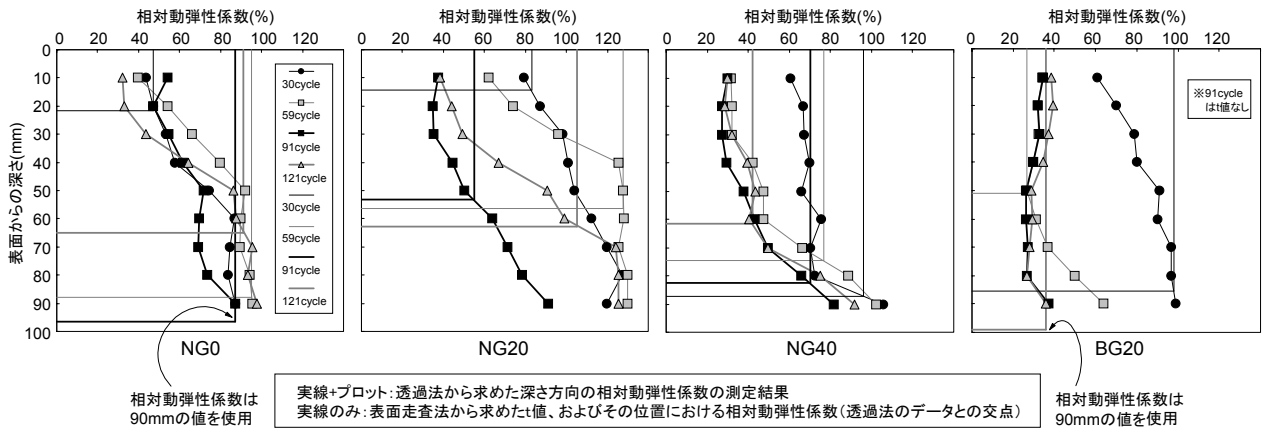


図-4 透過法による測定結果

NG20 は、59、121 サイクルにおいては深さ 40~60mm までの範囲で相対動弾性係数の低下がみられたが、それより深い範囲の相対動弾性係数はほぼ一定であった。91 サイクルはこのような傾向はみられないが、深さ 60mm 以降の相対動弾性係数は耐凍害性の閾値とされる 60%⁷⁾ 以上となっている。これらのことは、表面から深さ 40~60mm までの範囲で品質低下が生じていることを示唆し、表面走査法の評価とほぼ一致する。NG40 は試験開始直後、BG20 は 30 サイクル以降から全体的に相対動弾性係数が著しく低下しており、表面走査法の評価と対応している。なお、NG40 における深さ 80mm 以降の相対動弾性係数はいずれのサイクルも 60%以上であることから、劣化部の深さの下限値は約 80mm と診断され、表面走査法の評価と符合する。NG0 は、深さ約 50mm 以降の相対動弾性係数がほぼ一定となっており、劣化部の厚さは 50mm 前後と診断されるが、51、91 サイクルにおける表面走査法の t はこれよりも深く安全側に評価された。

BG20 の 59 サイクルは表面走査法と透過法の結果が一致しなかったが、全体的にみると表面走査法はある程度の精度で劣化部の厚さを非破壊で推定する方法として有効と言える。

4.5 表面走査法による劣化部の相対動弾性係数の診断

表面走査法による劣化部の相対動弾性係数の診断について検討する。はじめに、図-1 の折れ線グラフの原点から変曲点までの傾きに注目する。この傾きの逆数は劣化部の超音波伝播速度 V_d を表すが、速度は相対動弾性係数と密接な関係にあることが式(2)より読み取れる。そこで、この傾きと透過法から求めた最浅位置(深さ 10mm)の相対動弾性係数との関係を調べた。図-5 に結果を示す。図には筆者が過年度に行った研究(供試体はコンクリート)⁸⁾ で得た回帰式を重ね合わせた。総合的にみると、傾き 0.3 付近では同じ傾きでも相対動弾性係数が大きく異なるように見えるが、モルタル(NG0)とコンクリートに分け、コンクリートのプロットにのみ着目する

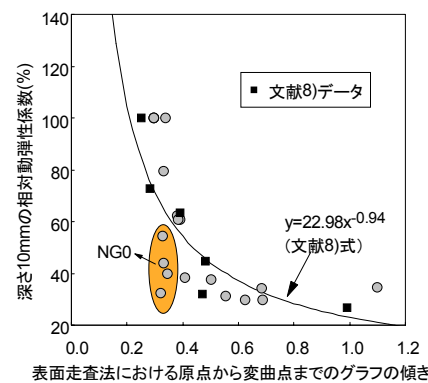


図-5 傾き(原点~変曲点)と深さ 10mm の相対動弾性係数

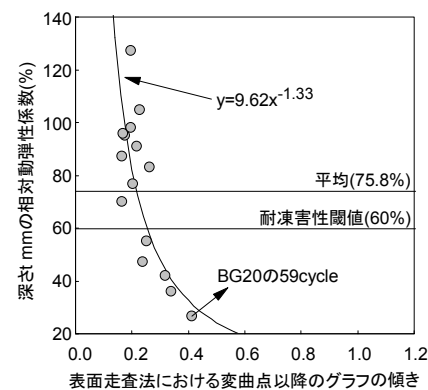


図-6 傾き(変曲点以降)と深さ t の相対動弾性係数

と、傾向は過年度データ⁸⁾とも概ね一致していた。

次に、図-1 の折れ線グラフの変曲点以降の傾きに注目する。この傾きの逆数は健全部縁端面を通過する超音波の速度 V_s を表す。そこで同様に V_s と深さ t の超音波伝播速度の関係を調べた。図-6 に結果を示す。健全部縁端面も傾向は同様であった。深さ t の相対動弾性係数は平均 75.8%で、表面走査法と透過法の結果が一致しなかった BG20 の 59 サイクルを除くと、表面走査法は約 80%の精度で健全部縁端面の相対動弾性係数を耐凍害性の閾値である 60%⁷⁾よりも高いと診断していることが確認さ

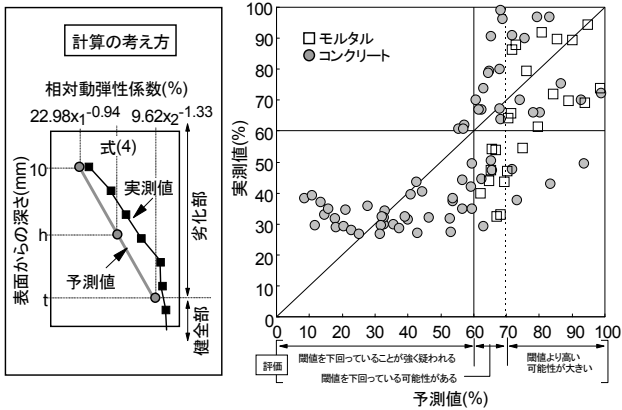


図-7 相対動弾性係数の予測値と実測値

れた。一方で、劣化部の厚さが大きく安全側に評価されているケースも見受けられた。これは、例えばNG20の59 サイクルのように劣化部の相対動弾性係数が比較的高いにも関わらず、品質が変化する位置までを超音波が劣化部と判断したこと(図-4)が一因に挙げられる。

以上の結果を用いて、深さ10mm~ t の区間では深さ方向に相対動弾性係数が直線的に低下するものとみなし、本研究の範囲で相対動弾性係数の予測を試みた。上記の考え方に基づくと、表面から任意の深さ h (劣化部内)の相対動弾性係数の予測値は次式で表される。

$$RE_h = \left\{ \frac{9.62x_2^{-1.33} - 22.98x_1^{-0.94}}{t-10} \right\} \times (h-10) + 22.98x_1^{-0.94} \quad (4)$$

ここに、 RE_h は深さ h ($10\text{mm} \leq h \leq t$)における相対動弾性係数の予測値(%), x_1 は原点から変曲点までのグラフの傾き, x_2 は変曲点以降のグラフの傾きである。

図-7に結果を示す。(1)NG40等のように相対動弾性係数が深さ10mm~ t 間で直線的に一定の割合で低下していないケースもある、(2)深さ10mmではモルタルとコンクリートで計算値にやや開きが異なる(図-5)、この2つの影響で実測値との差はやや大きい結果となり、今回の検討では正確な相対動弾性係数の値を求めるまでに至らなかったが、式(4)は耐凍害性の閾値を下回っている部分の深さを推定する一手法としては有効と言える。

5. 実構造物での検証・臨床的評価

5.1 調査箇所

次に、実構造物において表面走査法による調査を行い、室内実験で得た知見の妥当性について検証を試みた。

今回、筆者らは、北海道美深町を流れる天塩川沿いに立地する河川樋門の操作台コンクリートならびに韓国ソクサ地区に立地する高速道の中央分離帯コンクリートの2箇所調査を行う機会を得たので、ここではその結果について述べる。図-8に位置図、写真-1に調査

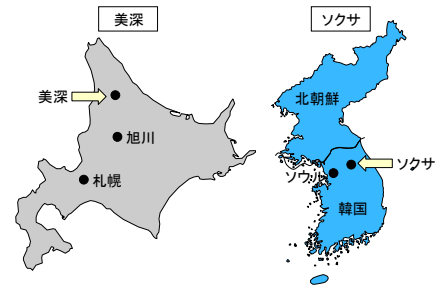


図-8 位置図(左:北海道・美深, 右:韓国・ソクサ)



写真-1 調査状況(左:美深, 右:ソクサ)

状況を示す。両地区とも、厳冬期は最低気温が -20°C を下回る厳しい環境下に位置している。

5.2 表面走査法による測定結果

図-9に操作台および中央分離帯にて実施した表面走査法の測定結果を示す。いずれの部位も変曲点を確認された。変曲点前後の直線の勾配の差は、操作台よりも中央分離帯の方が大きかった。各直線の勾配から V_s と V_d および原点から変曲点までの距離(X_0)を求め、式(1)より劣化部の厚さを計算したところ、操作台は24mm、中央分離帯は42mmと算出された。

式(4)の h に10を代入して各部位の深さ10cmの相対動弾性係数を予測したところ、操作台は74%、中央分離帯は50%と算出された。操作台は、変曲点は確認されたものの、図-7を基に診断すると「閾値より大きい可能性が高い」という評価となり、コンクリートの品質は全体的に比較的良好と診断される。これに対し、中央分離帯は「閾値を下回っていることが強く疑われる」という評価となり、表層における凍害の程度はやや大きいと診断される。一方、健全部縁端面の相対動弾性係数は、操作台は式(4)の h に24を代入すると69%、中央分離帯は h に42を代入すると68%と算出された。これらの情報をもとに診断を行ったところ、図-11のようになった。

5.3 透過法による診断結果

前項で述べた評価の妥当性を調べるため、コアを採取して透過法による測定を行った。なお、ソクサではコア採取ができなかったため、美深でのみ測定を行った。

図-11の左図に結果を重ね合わせて示す。相対動弾性係数は式(2)、式(3)より求めた。 E_{d0} については、本事例のように供用開始前の値がない場合、健全とみなせる箇

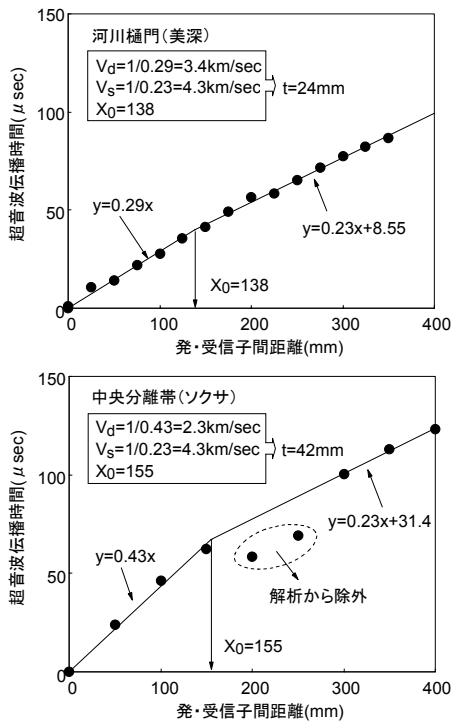


図-10 表面走査法の結果(上:美深,下:ソクサ)

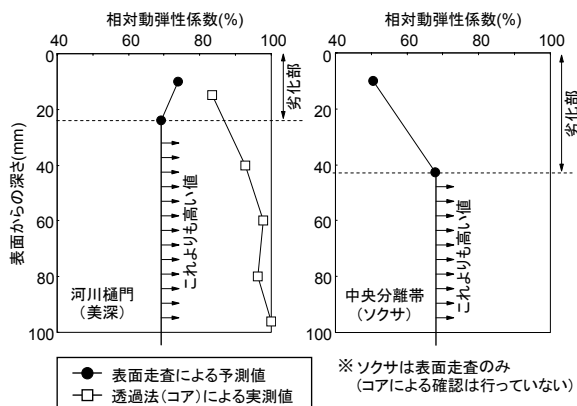


図-11 表面走査法による予測・診断の結果(左図:美深,右図:ソクサ)ならびに透過法による実測結果(後者は美深のみ実施)

所の値を用いる⁵⁾ことになっている。そこで、ここでは最深部(深さ96mm)の動弾性係数を E_{d0} とした。相対動弾性係数はいずれの深さも閾値より高い値であった。深さ10mmの相対動弾性係数は80%以上の値で、「閾値より大きい可能性が高い」という表面走査法の診断結果とも一致していた。

6. まとめ

本研究では、コンクリート構造物の凍害の程度を通常の日常管理の範囲で簡便かつ迅速に評価できる診断法の確立を目指し、表面走査法の理論を応用した簡易的な凍害診断技術について実験的・臨床的な検討を行った。得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- (1) 表面走査法は、凍害を受けた劣化部の厚さをある一定の精度で非破壊により推定する方法として有効である。
- (2) 表面走査法で得られるグラフの傾き(原点~変曲点, および変曲点以降)から、耐凍害性の閾値(相対動弾性係数60%)を下回っている部分の深さを推算することができる。
- (3) 実構造物においても表面走査法と透過法の評価は一致する傾向が示された。データ数は未だ少ないものの、表面走査法の有効性の一端が確認された。

謝辞: 北海道美深の河川樋門の調査では北海道開発局, 韓国ソクサの中央分離帯の調査では Yonsei University の Ann 博士ならびに Korea Expressway Corporation より全面的なご協力を頂きました。また、韓国での調査は、平成21年度科学技術振興調整費(課題名「コンクリート構造物の LCM 国際標準の確立」, 研究代表者: 上田多門)および独立行政法人土木研究所運営費交付金(重点プロジェクト研究 11.2「コンクリートの凍害, 塩害との複合劣化挙動及び評価に関する研究」)により行われたものであることを付記し、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 柏忠二, 明石外世樹, 小阪義夫: コンクリートの非破壊試験法—日欧米の論文・規格・文献—, p.42, 1980
- 2) 北海道開発局道路設計要領, 第3集橋梁, 第2編コンクリート, p.3-コ 2-4, 2006.4
- 3) 二本の直線による折れ線回帰, 群馬大学 HP (<http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/lecture/stats-by-excel/vb/a/html/oresen-kaiki.html>)
- 4) コンクリート構造物の非破壊試験法, 社団法人日本非破壊検査協会編, 養賢堂, p.130, 1994
- 5) 緒方英彦, 野中資博, 藤原貴央, 高田龍一, 服部九二雄: 超音波法によるコンクリート製水路の凍害診断, コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.63-70, 2006.12
- 6) 加藤佳孝: 骨材—ペースト界面に形成される遷移帯の形成メカニズムとそのモデル化に関する研究, コンクリート工学, Vol.37, No.5, pp.53-56, 1999.5
- 7) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書[設計編], p.123, 2008.3
- 8) 遠藤裕丈, 田口史雄, 林田宏, 草間祥吾: 非破壊による凍害深さの診断, コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法委員会報告書・シンポジウム, pp.293-298, 2008.8