

コンクリート部材の凍害診断への 表面走査法の適用に関する研究

(独) 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○遠藤 裕丈
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム 田口 史雄
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム 林田 宏

コンクリート構造物の凍害診断では、凍害が疑われる箇所からコアを採取し、コアの分析を行って劣化の程度を把握、評価するのが一般的である。しかし、コア採取は、部材とりわけ鉄筋の損傷が懸念される。また、調査範囲が広範に及ぶ場合、調査に多大な時間と労力を要する。そこで、通常の日常管理の範囲で簡便かつ迅速に凍害の程度を評価できる診断技術の確立を目指し、コンクリート表面からの劣化層の厚さを非破壊で推定できる表面走査法の凍害診断への応用について検討を行った。さらに、北海道内の道路橋のコンクリート部材を対象に、表面走査法による凍害診断を試みた。

キーワード：コンクリート、凍害、超音波伝播速度、表面走査法、非破壊調査

1. はじめに

我が国では、これまでに多くのコンクリート構造物が建設されてきた。これらの構造物は、今も住民の安全と生活を支える重要な役割を担っている。一方で老朽化および劣化が進行している構造物も存在している。これからは構造物を適切に維持管理し、うまく使いこなすことが強く求められている¹⁾。とりわけ厳しい財政事情の下で合理的に維持管理を行うには、劣化の程度を経済的かつ効率的に診断できる技術の充実が望まれる。

寒冷地のコンクリート構造物が受けやすい代表的な劣化に凍害が挙げられる。一般に凍害の診断では、凍害が疑われる箇所からコアを採取し、コアの側面に超音波の発・受振子をあててコア内部の超音波伝播速度の分布を調査し、その結果をもとに凍害の範囲や程度の把握、評価が行われる。しかし、コア採取はコンクリート部材や鉄筋を損傷させる可能性があることや、部材の広範囲で調査を行うには多大なコストと時間および労力を要する等の課題を有している。

そこで、本研究ではコンクリートの凍害の程度を簡便かつ迅速に把握できる診断技術の確立を目指し、表面からの劣化層の厚さを非破壊で推定できる表面走査法²⁾の凍害診断への応用について検討を行った。

2. 表面走査法

表面走査法は、コンクリート表面近傍に存在する劣化

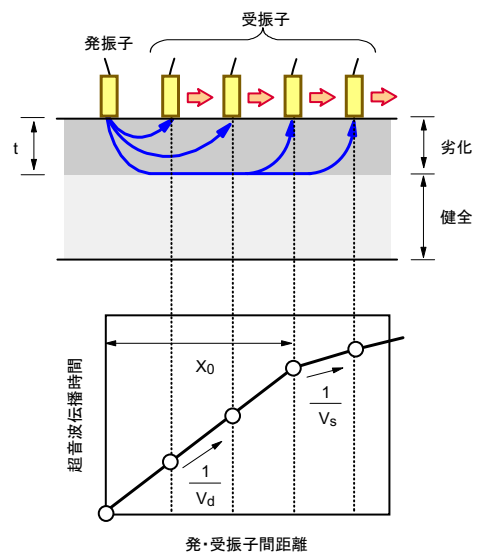


図-1 表面走査法概念

層の厚さを超音波により非破壊で推定する方法である²⁾。超音波は損傷の程度が小さ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する性質がある。図-1に示すような劣化層が表面近傍に存在する場合、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、発・受振子間距離がある値以上になると超音波の伝播経路は健全層の縁端面に一本化され、発・受振子間距離に対する伝播時間の増加率は小さくなる。このため、発・受振子間距離と超音波伝播時間の関係は図に示すような折れ線グラフとなる。

ここで、原点から変曲点までの距離を X_0 、劣化層と健全部縁端面における超音波伝播速度をそれぞれ V_d 、 V_s （直線の傾きの逆数）とすると、劣化層の厚さ l は次式

表-1 コンクリートの配合

配合番号	W/C (%)	G _{max} (mm)	使用セメント	単位量 (kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
1	55	—	普通	267	486	1551	—
2	55	20	普通	154	280	893	1119
3	55	40	普通	154	280	893	1123
4	55	20	高炉B	154	280	889	1115

【略称】 W/C : 水セメント比、G_{max} : 粗骨材の最大寸法

のように表される²⁾。

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

なお、コンクリートが全体的に健全もしくは劣化している場合は品質が均質なため、発・受振子間距離と超音波伝播時間の関係は折れ線ではなく、直線グラフとなる。その場合の t は0か部材の全厚のいずれかとなる。

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。図に示す劣化層を凍害で損傷した範囲に見立て、凍害の深さおよび程度を表面走査法により非破壊で診断できるかを調べた。はじめに、表面走査法の適用性について基礎的な検討を行うため、室内実験を実施した。次に、この検討結果をふまえて、北海道内の道路橋のコンクリート部材を対象に実証的な検討を行った。

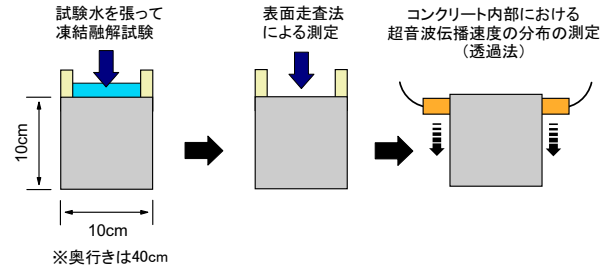


図-2 実験の流れ



写真-1 表面走査法による測定状況

3. 室内実験による基礎的検討

(1) 実験概要

a) コンクリートの配合

表-1にコンクリートの配合を示す。水セメント比は、北海道開発局道路設計要領のRC-4に準じて55%とした。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種類とした。細骨材は、除塩処理を施した苫小牧錦岡産の海砂（密度2.70g/cm³、吸水率0.89%）を使用した。粗骨材は、小樽見晴産の碎石（密度2.68g/cm³、吸水率1.07%）を使用した。粗骨材の最大寸法は、非混入（モルタル）、20mm、40mmの3種類とした。なお、凍害を促進させるねらいでAE剤は使用しなかった。

b) 供試体および養生

供試体の寸法は100×100×400mmとした。打設後、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℃、湿度60%）に静置した。凍結融解作用面は打設面（100×400mm）とし、打設面には試験水を溜めるための囲いを設置した。

c) 凍結融解試験および測定

凍結融解試験はASTM C 672に準じて行った。図-2に示

すように、打設面に試験水として淡水を深さ6mm程度張り、-18℃で16時間、23℃で8時間の1日1サイクルの凍結融解作用を120サイクル与え、途中、おおむね30サイクルに1回の割合で、周波数28kHzの超音波測定器を用いて表面走査法による測定と、コンクリート内部の超音波伝播速度の分布の測定（以下、透過法と記す）を行った。写真-1に表面走査法による測定状況を示す。発・受振子の径はともに20mmである。表面走査法における発・受振子間距離は、50、100、150、200、250、300、350、400mmとした。折れ線回帰は既往のプログラム³⁾を使用し、原点通過を前提に行った。透過法では、深さ10、20、…、80、90mm位置の動弾性係数を式(2)⁴⁾より計算し、式(3)から各位置の相対動弾性係数を求めた。

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

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

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

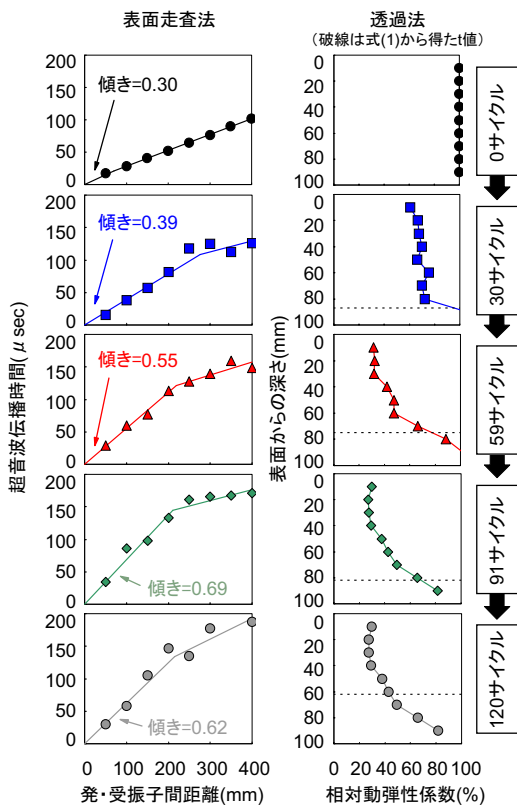


図-3 試験結果の一例 (配合番号3)

弾性係数(%), E_d は凍結融解試験前の動弾性係数(GPa)である。

(2) 実験結果・考察

図-3に試験結果の一例(配合番号3)を示す。透過法のグラフより、表面から内部にかけて凍害が経時的に進展していることがわかる。これに連動する形で、表面走査法のグラフに顕著な折れ線が出現した。表面走査法のグラフにおける原点からの直線の傾きは、サイクル数の増加に伴って大きくなっている。この傾きの逆数は劣化層の超音波伝播速度を表しており、劣化層では凍害が進展していることが表面走査法のグラフから明確に読み取れる。

ここで、式(1)から求めた t を透過法のグラフに破線で書き入れた。一般に相対動弾性係数が60%を下回ると、凍結融解作用を受けた際の長さ変化率は急速に大きくなるとされ⁹⁾、土木学会コンクリート標準示方書[設計編]では凍害に関する性能を満足するための相対動弾性係数の最小限界値が60~85%に設定されている⁹⁾。しかし、120サイクルの結果をみると、表面走査法では相対動弾性係数が60%よりも小さい40%以上の範囲が健全と診断されている。各サイクルにおける破線の位置に着目すると、破線は相対動弾性係数が増加に転じた位置の近傍(30、120サイクル)、もしくは増加している途中の位置(59、91サイクル)に描かれていることがわかる。このことから、凍害診断においては、表面近傍に存在する劣化層から、劣化層に比べると劣化の程度

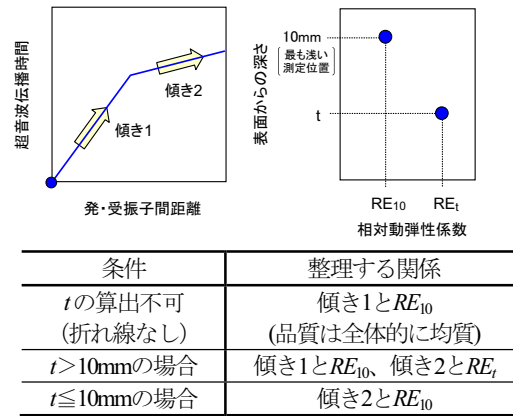


図-4 直線の傾きと相対動弾性係数の関係の整理の考え方

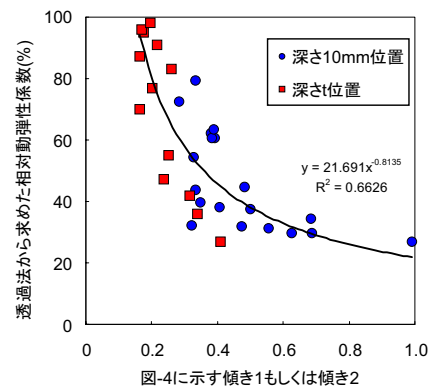


図-5 表面走査法のグラフから求まる直線の傾きと透過法から求めた相対動弾性係数の関係(深さ10mm位置と深さ t 位置)

が相対的に小さい品質の層へ転じる位置の近傍が t と診断される傾向にあることが確認された。

次に、 V_s 、 V_p の逆数に相当する表面走査法のグラフから求まる直線の傾きと、透過法から求めた劣化層に相当する表層および深さ t 位置の相対動弾性係数との関係について考察する。考察は、図-4に示す考え方に基づいて行った。ここでは、透過法における測定が可能な最浅位置が発・受振子の径の1/2に相当する深さ10mmである理由から、10mmの位置の値を表層の値とした。ただし、 t が10mm以下になる場合は10mm位置は劣化層に属さないことになるため、折れ線以降の直線の傾きとの関係をとることとした。図-5に整理した結果を示す。表面走査法におけるグラフの傾きが大きくなると相対動弾性係数が小さくなる形の分布が示された。

図-3の透過法の結果からわかるように、凍害の程度は内部よりも表面側の方が大きい。これは、表面から内部にかけて相対動弾性係数が大きくなることを意味している。すなわち、表面走査法による診断を行うと、図-6に示すように深さ10mm位置と深さ t 位置(折れ線が生じる場合のみ)の相対動弾性係数の近似値は相関が最も高い回帰式である式(4)から算出され、それ以外の位置の相対動弾性係数は図-6に示す塗りつぶした範囲にプロットされる旨の推定結果が得られることになる。

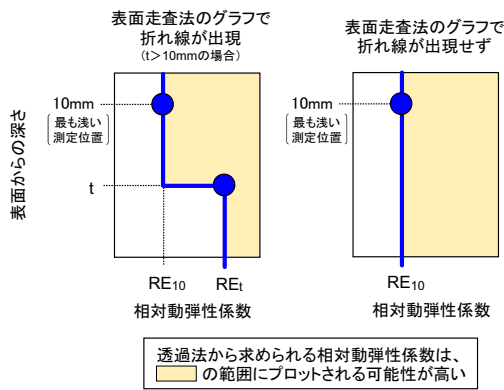


図-6 表面走査法から推定される透過法から求められる相対動弾性係数の予測範囲

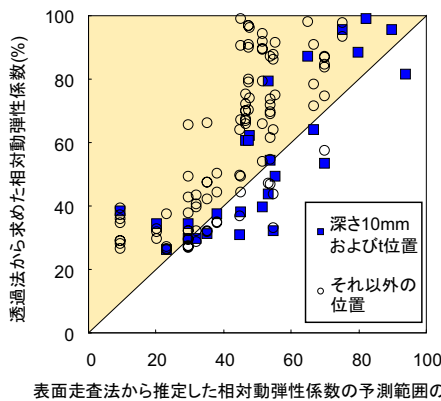


図-7 相対動弾性係数の予測範囲の下限 (図-6の線上の値)と透過法から求めた相対動弾性係数の関係

$$RE = 21.7x^{-0.81} \quad (4)$$

ここに、 x は表面走査法によるグラフの傾き1もしくは傾き2 (図-4) である。

図-7はこの妥当性を検証した結果である。図に示すように、透過法から求めた○印のデータは全体 (N=114) の約8.6割が塗りつぶした範囲にプロットされ、図-6で述べた考え方の妥当性を概ね確認することができた。

4. 実構造物での実証的検討

(1) 調査概要

a) 調査箇所

次に、3章で述べた室内実験の結果をふまえ、実構造物で実証的な検証を行った。図-8に調査対象構造物の位置を示す。対象は道路橋で、ここでは北海道内の6橋で調査を行った。調査は、凍害が疑われる上部工30箇所と下部工42箇所の計72箇所で行った。写真-2に表面走査法による測定の実況、写真-3に透過法による測定を行うための試料の採取の実況を示す。表面走査法における発・受振子間距離は室内実験同様、50、100、150、200、

Hirotake Endoh, Fumio Taguchi, Hiroshi Hayashida

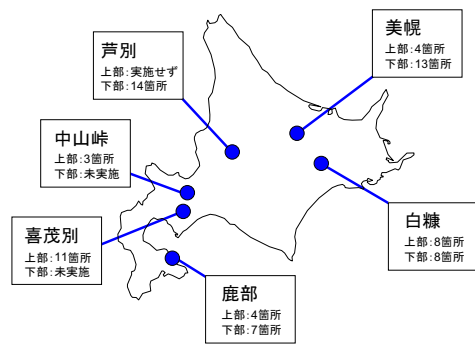


図-8 調査対象構造物 (道路橋) の位置

美幌・下部 (橋座面)



白糠・下部 (擁壁面)



写真-2 構造物での表面走査法による測定の実況



写真-3 透過法による測定を行うための試料の採取の実況

250、300、350、400mmとした。透過法による測定は深さ10、20、…、90、100mm位置で行った。透過法で実施する相対動弾性係数の算出は室内実験と同様に式(2)、式(3)により行った。式(3)の E_{d0} は緒方らの研究⁹⁾にならない、健全とみなせる箇所の値を使用することとした。ここでは各橋で採取したコアの最深位置にあたる深さ100mm位置の全ての動弾性係数の値の平均を各橋の E_{d0} とした。

b) 調査結果の整理の方法

図-4、図-5にもとづき、表面走査法のグラフから傾き1および折れ線が生じた場合は傾き2を求め、式(4)より深さ10mmおよび深さ t の相対動弾性係数を算出した。この結果をもとに図-6と同じ形の図を作成し、この図に透過法から求めた相対動弾性係数を重ね合わせることで構造物での適用性を評価した。

c) 超音波伝播時間の補正

一般に、超音波伝播速度はコンクリートの水分率に大きく依存する⁷⁾。表面走査法による診断を行う際の構造物の表面は乾燥している場合もあれば濡れている場合もあって一様ではないことに鑑み、超音波伝播時間

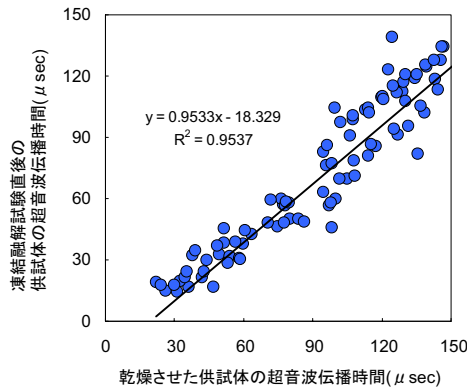


図-9 乾燥させた供試体と凍結融解試験直後の供試体における超音波伝播時間の関係 (室内実験)

の補正を行うこととした。

図-9は、3章の室内実験の供試体を乾燥させた場合の表面走査法による超音波伝播時間と、凍結融解試験直後の表面走査法による超音波伝播時間を比較したものである。乾燥温度は細孔に大きな変化を与えない温度とされる40℃⁸⁾とし、乾燥日数は7日間とした。データを回帰分析したところ、式(5)が得られた。

$$T_w = 0.95T_d - 18.3 \quad (5)$$

ここに、 T_w は凍結融解試験直後の伝播時間(μsec)、 T_d は乾燥させた場合の伝播時間(μsec)である。

図-10は、高周波容量式のコンクリート水分計で調べた供試体の表面水分率を示している。凍結融解試験直後の平均は6.2%、乾燥後の平均は3.4%であった。データは、ばらつきが少なく安定とされる概ね $\pm 2\sigma$ ⁹⁾の範囲にプロットされた。前掲した図-3は、凍結融解試験直後の測定値を用いて整理したものである。そこで、これにあわせる形で、構造物調査では表面水分率が6.2%の時の超音波伝播時間を解析に用いることとした。図-9、図-10より表面水分率の増減に対する超音波伝播時間の変化率を調べ、その結果をもとに式(6)に示す補正式を導出した。

$$T_r = T_s \times (-0.09W + 1.53) \quad (6)$$

ここに、 T_r は補正後の伝播時間(μsec)、 T_s は構造物での実測の伝播時間(μsec)、 W は表面水分率(%)である。

現場では式(6)を用いて伝播時間の補正を行った。

図-11は凍結融解試験直後に調べた透過法による相対動弾性係数と乾燥させた後に調べた相対動弾性係数を比較したものである。多少ばらついているが概ね45度線上にプロットされた。そこで相対動弾性係数に及ぼす乾燥の影響は小さいと考え、補正の対象は伝播時間のみとし、式(4)は補正せずそのまま適用することとした。

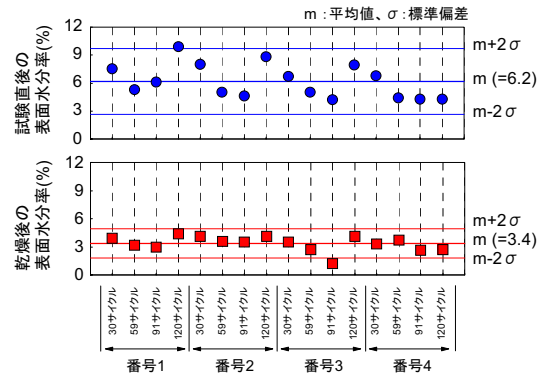


図-10 乾燥させた供試体と凍結融解試験直後の供試体における表面水分率の測定結果 (室内実験)

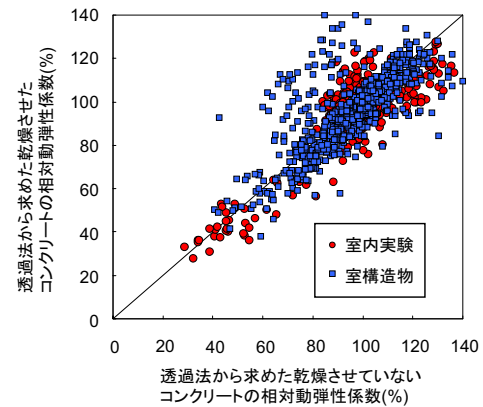


図-11 乾燥させていない場合と乾燥させた場合の透過法から求めた相対動弾性係数の関係 (室内実験と実構造物、深さ10、20、…、90、100mm位置の値)

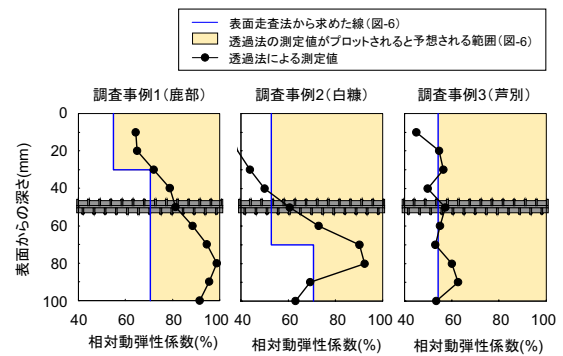


図-12 構造物での調査結果の一例

(2) 調査結果・考察

図-12に調査結果の一例を示す。調査事例1と2は表面走査法のグラフで折れ線が生じたケースであり、傾き1と傾き2 (図-4) を式(4)に代入し、その計算値を用いて図-6の左と同じ形に整理した。調査事例3は表面走査法のグラフで折れ線が生じなかったケースであり、品質は均質と判断して傾き1 (図-4) を式(4)に代入し、その計算値を用いて図-6の右と同じ形に整理した。仮に、鉄筋の埋設位置を50mmとした場合、表面走査法においては、調査事例1は鉄筋位置の相対動弾性係数が60%⁹⁾を下回っておらず耐凍害性能は保持されていると推定され、調査事例2と3は60%を下回っており、耐凍害性能は低下

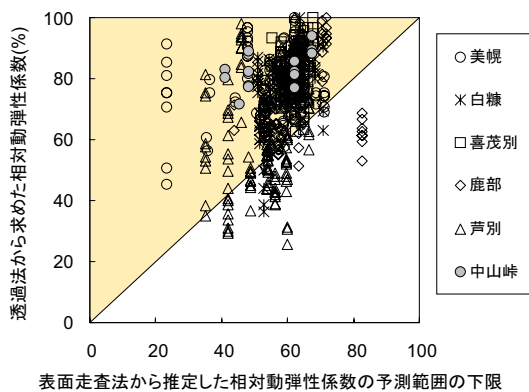


図-13 相対動弾性係数の予測範囲の下限 (図-6の線上の値) と透過法から求めた相対動弾性係数の関係 (構造物)

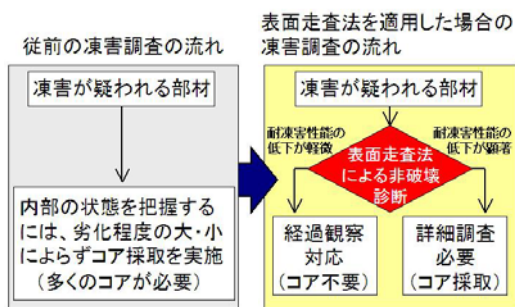


図-14 従前および表面走査法の適用による調査の流れの比較

表-2 調査費の縮減効果の評価

		従前の診断	表面走査法適用
数量	超音波 (表面走査法)	—	72×8=576点
	コア採取 (補修込み)	72孔	33孔
	超音波 (透過法)	72×10=720点	33×10=330点
調査費 (従前を1とする)		1.00	0.55

※交通規制に必要な費用や諸経費は含まれていない

していると推定される。

ここで、この図に透過法の結果を重ね合わせてみた。調査事例1と2における鉄筋位置の相対動弾性係数は81%と61%、調査事例3は57%であった。事例1において、構造物でも耐凍害性能が保持されていることを表面走査法により非破壊で推定できる知見を得ることができた。

図-13は構造物調査で取得した全データを図-7と同じ要領で整理した結果である。全体 (N=685) の約8.8割が塗りつぶした範囲にプロットされ、図-6で述べた考え方は構造物でも概ね適用できることが確認できた。

(3) 調査費の縮減効果の評価

図-12では代表して3箇所の結果を示したが、今回の調査で行った表面走査法では、全72箇所のうち33箇所まで深さ50mm位置の相対動弾性係数が60%を下回っていると推定された。実際に透過法で調べたところ、この33箇所のうち11箇所が60%を下回っていることが確認された。残りの61箇所は60%以上であった。

従前の凍害診断の流れでは、図-14に示すように、コンクリート内部の状態を把握するにはコアが必要なた

め、上記の結論を得るためには72箇所全てにおいてコア採取を実施する必要がある。一方、表面走査法を適用した場合、調査対象の72箇所の中からコア採取が望ましい箇所を33箇所に絞り込むことができる。これによって、部材の損傷を最小限にとどめることができ、さらにはコア本数の縮小が図れるため調査時間の短縮による省力化および調査費の縮減効果が期待される。

表-2は今回の調査を例に従前の診断による調査費と表面走査法を適用した場合の調査費を比較したものである。従前を1とすると、表面走査法を適用した場合は0.55となり、45%のコスト縮減が図れる結果となった。

5. まとめ

本研究では、通常の日常管理の範囲で簡便かつ迅速に凍害の程度を評価できる診断技術の確立を目指し、表面走査法の凍害診断への応用を試みた。得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- (1) 表面走査法は、ある一定の精度で耐凍害性能が低下している範囲を非破壊で推定することができる。
- (2) 表面走査法の適用により、凍害診断に要する調査費の縮減効果が期待できる。

参考文献

- 1) 宮川豊章, 保田敬一, 岩城一郎, 横田弘, 服部篤史: 土木技術者のためのアセットマネジメント—コンクリート構造物を中心として—, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.1, pp.24-43, 2088.2
- 2) 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.
- 3) 群馬大学ホームページ: 二本の直線による折れ線回帰, (<http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/lecture/stats-by-excel/vba/html/oresen-kaiki.html>)
- 4) 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
- 5) 北海道土木技術会コンクリート研究委員会コンクリート維持管理小委員会: 北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き(案), p.4-30, 2006.3
- 6) 土木学会: 2007年度制定コンクリート標準示方書 [設計編], p.123, 2008.3
- 7) 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, 土木学会第62回年次学術講演概要集, pp.1141-1142, 2007.9
- 8) 堀宗朗, 多田浩治, 斎藤裕, 三浦尚: 細孔構造の変化に着目したコンクリートの低温劣化の診断法の基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.723-728 1991.
- 9) 日本コンクリート工学協会: コンクリート技術の要点'99, p.124, 1999.