

論文 凍害を受けたコンクリートのひび割れ密度の簡易推定手法の検討

都築 敦大^{*1}・長谷川 拓哉^{*2}・千歩 修^{*3}・福山 智子^{*4}

要旨: 本論文では、コンクリートの凍害劣化程度や凍害深さの簡易的な推定を目的として、コンクリートのひび割れ密度と凍害劣化や力学性状の関係を把握し、コンクリート表面の染色浸透探傷剤による明度の変化からひび割れ密度を推定する手法の検討を行った。その結果、染色浸透探傷剤による明度差はコンクリートのひび割れ密度と相関があり、明度差から凍害劣化の程度や圧縮強度および静弾性係数の低下を推定できる可能性を示した。また、提案した手法の実構造物から採取したコア試験体に対する適用性の検討を行い、実構造物においても劣化状況を把握する手法として適用できる可能性を示した。

キーワード: 染色浸透探傷剤, ひび割れ, 圧縮強度, 静弾性係数, 実構造物, 凍害

1. はじめに

寒冷地のコンクリート構造物を適切に維持管理するためには、凍害劣化程度や凍害深さを把握することが重要である。ひび割れ密度が凍害劣化の指標となることが指摘されているが¹⁾、ひび割れ観察には多大な労力と時間を要する等の問題がある。長谷川ら²⁾は、ひび割れ密度の簡易推定手法として染色浸透探傷剤を用い、ひび割れ部分の染色によるコンクリート表面の明度の低下から、ひび割れ密度を推定する方法を提案した。しかし、ひび割れ密度推定方法の実用化には、コンクリートの種別の影響や実構造物への適用性等の検討が必要である。

本研究では、凍害による劣化程度や範囲を評価する方法として、明度差によるコンクリートの凍害劣化深さ推定手法の開発を目的とし、ひび割れ密度とコンクリートの力学性状の関係を明らかにするとともに、実構造物から採取したコアに対する適用性を検討した。

2. 実験概要

表-1に実験の概要を示す。試験体は、既往の研究³⁾で所定の飽水度に調整後、凍結融解試験6サイクル(1サイクル:-20℃・18時間/20℃・6時間)を行った4種類(W/C40%, W/C60%:目標空気量2%の2調合, W/C50%:目標空気量4%, 5%の2調合)のコンクリートとした。表-2にコンクリートの調合と基礎性状を示す。1年間保管した試験体を50℃7日乾燥後、一次共鳴数および超音波伝播速度を測定し、得られた相対動弾性係数から、劣化度の異なる13体の試験体を実験の対象とした。なお、1年間保管条件は、W/C40%および60%の試験体は室内気中で、W/C50%の試験体は水中である。超音波伝播速度は、試験体の高さ方向2.5cmごとに直径方向を透過法にて測定した。測定後、乾式コンクリートカッターを用いて図-1に示すように切断し、図に示す各部分に対して圧縮強度試験、探傷試験、ひび割れの顕微鏡観察を行った。

表-1 実験の概要

試験体				ひび割れ発生方法	測定項目		
記号 ^{*1}	W/C (%)	保存方法	個数 ^{*2}		劣化程度	力学性状	ひび割れ密度
4-2	40	気中	3	気中凍結融解 ^{*3} (-20℃・18時間/ 20℃・6時間)	一次共鳴振動数	圧縮強度	顕微鏡観察(墨汁)
6-2	60		2				
5-4	50	水中	4		超音波伝播速度	静弾性係数	明度差測定(探傷剤)
5-5			4				

*1 試験体の記号は、水セメント比と目標空気量を示す 例 W/C 40%, 目標空気量 2%→4-2

*2 相対動弾性係数により劣化程度が異なるものを選定 *3 既往の研究の手順³⁾により行われた

表-2 コンクリートの調合と基礎性状

記号	W/C (%)	単位質量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%) AE 剤	空気量 (%)	スランブ (cm)	圧縮強度 (N/mm ²)
		W	C	S	G				
4-2	40	180	450	801	961	0	1.3	15.5	46.3
6-2	60	180	300	928	961	0	2.0	24.4	22.3
5-4	50	180	360	823	961	0.0075	4.4	22.0	27.4
5-5		180	360	796	961	0.0095	5.2	22.5	21.5

セメント: 普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)

細骨材: 錦岡産陸砂(密度: 2.69g/cm³)

粗骨材: 常盤産砕石(密度: 2.67g/cm³) AE 剤: アルキルエーテル系

*1 北海道大学 大学院工学院空間性能システム専攻 (学生会員)

*2 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 准教授 博(工) (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 教授 工博 (正会員)

*4 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 助教 博(工) (正会員)

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じて行い、試験体の高さと同径の比に基づく補正係数を測定値に乗じて圧縮強度を算定した。静弾性係数は、圧縮強度試験と同時にひずみを測定し、JIS A 1149 に準じて算定した。

図-2 に探傷試験の手順²⁾を示す。試験体切断面をカーボラダム#100、#800 を順に用いて研磨後、試験体を50℃の乾燥器に3日間静置した。乾燥させた試験体に浸透液を塗布して30分間浸透させた後、洗浄液を含ませた布で表面の余剰浸透液を除去した。最後に現像剤を塗布し、図-3 に示すようにひび割れ中の浸透液を毛細管現象により白色の現像剤中に赤く浮き出させた。この時、色彩色差計で $L^*a^*b^*$ 表色系にて測定し、明度 L^* を指標とした。色彩色差計の測定径は直径10mmで、各試験体に対して表面のセメントペースト部分における任意の9点を測定し、その平均値を評価した。なお、明度の基準値として染色前の試験体の明度と、同一試験体の別の部位で現像剤のみを塗布した場合の明度を測定した。

ひび割れの顕微鏡観察では、既往の研究⁴⁾より、蛍光エポキシ樹脂と同等にひび割れが観察可能な墨汁を用いた。真空脱泡装置にて3時間試験体に墨汁を注入し、表面を軽く研磨後、倍率が120倍の顕微鏡を用いてひび割れ観察を行った。図-4 のように試験体に10mm間隔で側線を引き、測線長1mmあたりの測線を横切るひび割れ本数をひび割れ密度として算出した⁵⁾。

また、実構造物から採取したコアを対象として実構造物への適用性の検討を行った。表-3 に採取したコアの概要を示す。シリーズ(I)では北海道内で約40年間供用されたRC壁式防護柵(以下壁高欄)⁶⁾を、シリーズ(II)では北海道函館市に存在するRC造建築物を対象としている。

シリーズ(I)で対象とした壁高欄は、橋梁の床版と一体で施工された直壁型の壁高欄であり、1971年に施工されたものである。当該箇所は市街地であるが、1km弱の距離に海岸線が、0.5km弱の距離に山がある。2012年から撤去された壁高欄試験体の中で、比較的健全な壁高欄(A,B)と、劣化程度が大きい壁高欄(C,D,E)からコアを採取し、調査を実施した。シリーズ(I)では、壁高欄に劣化が多く確認された車道側をコア上端としている。

シリーズ(II)で対象としたRC建築物は地上3階、延床面積が470m²の建物で、1956年に竣工されたものである。1km弱の距離に海岸線があり、標高300m程度の場所に位置している。外壁側および内壁側に塗膜防水材が使用されており、一部にはモルタル仕上げがなされている。シリーズ(II)では、コアの外壁側を上端としている。

採取したコアは、現場で密閉して実験室に搬入し、20℃・60%R.H.の恒温室で3ヶ月以上静置後、50℃の乾燥器で7日間乾燥を行い、測定を行った。直径方向に対して透過法による超音波伝播速度と図-2 に準じて処理したコア表面の明度差を深さ2cmごとに測定した。

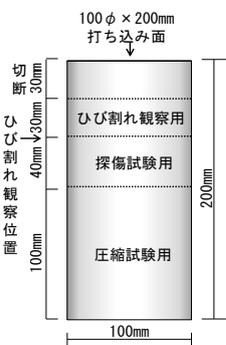


図-1 試験体切断位置

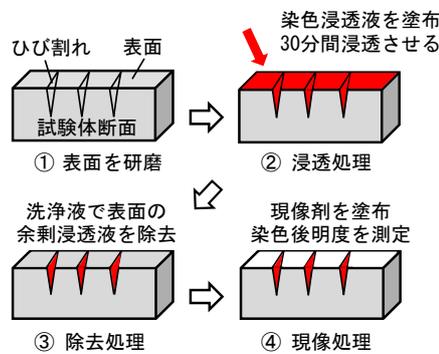


図-2 明度差測定の概要

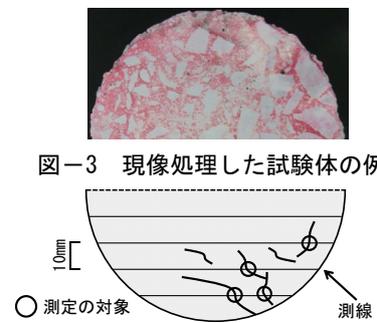


図-3 現像処理した試験体の例

図-4 ひび割れの観察方法

表-3 採取したコア試験体の概要

シリーズ	構造物	採取部材	コア名称	長さ (mm)	採取部材の劣化状況	コアの劣化状況	鉄筋	備考
(I)	橋梁	壁高欄 A	A	203	劣化が少ない	目立った劣化なし	有	-
		壁高欄 B	B	203	劣化が少ない	目立った劣化なし	有	-
		壁高欄 C	C	199	鉄筋腐食、剥落	一部にひび割れ	有	上部にコアの破断あり
		壁高欄 D	D	197	軽度な剥落	一部にひび割れ	有	上部にコアの破断あり
		壁高欄 E	E	216	水平ひび割れ	コア全体にひび割れ	無	中央でコアの破断あり
(II)	RC 建築物	南西壁 (貫通)	a	246	外観に変状は確認されない	目立った劣化なし	無	外壁側に46mmのモルタル仕上げ
		北壁 (貫通)	b	164			無	-
		北西壁 (貫通)	c	206			無	外壁側に38mmのモルタル仕上げ

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ密度と凍害劣化

図-5 に相対動弾性係数と顕微鏡観察から得られたひび割れ密度の関係と、既往の研究¹⁾で提案された関係式をあわせて示す。図-6 に超音波伝播速度とひび割れ密度の関係と、両者を対数近似とみなした場合の関係式をあわせて示す。相対動弾性係数、超音波伝播速度はひび割れ密度と相関がみられ、ひび割れ密度は凍害劣化指標として妥当であると確認できた。なお、図-5 において、本実験のひび割れ密度は、既往の研究の関係式と比較して低く評価された。これは、ひび割れを顕微鏡観察する際の倍率等の条件の違いによるものと考えられる

3.2 ひび割れ密度と力学性状

図-7 に顕微鏡観察によるひび割れ密度と圧縮強度比の関係と、図-8 にひび割れ密度と静弾性係数比の関係を示す。図中に実験結果から得られたそれぞれの関係式を示す。なお、同材齢の試験体の健全な状態における圧縮強度、静弾性係数が不明であるため、ここでは式(1)のように各 W/C ごとに最も大きい圧縮強度、静弾性係数を健全な状態における基準値と仮定し、各試験体の圧縮強度比、静弾性係数比を算定した。これらの図より、本実験のひび割れ密度と圧縮強度比、静弾性係数比には相関がみられ、ひび割れ密度から圧縮強度、静弾性係数の低

下割合を推定できる可能性がある。しかし、ひび割れ観察の条件の違いがひび割れ密度と圧縮強度比および静弾性係数比に及ぼす影響については検討の余地がある。

$$\text{圧縮強度比} = \frac{\text{試験体の圧縮強度}}{\text{各 W/C の試験体の中で最も大きい圧縮強度}} \quad (1)$$

3.3 明度差によるひび割れ密度の推定

図-9 に、明度差とひび割れ密度の関係を既往の研究²⁾の結果とあわせて示す。明度差は、現像剤のみを塗布した場合の明度から、浸透探傷試験による染色後の明度を引いたものを示している。現像剤を塗布することで表面は白くなり明度は高くなるが、ひび割れ等の存在により染色すると明度が低下する。明度差が増加するほどひび割れ密度が大きいことを示している。図-9 より式(2)が得られ、図-10 に式(2)より推定したひび割れ密度と実測したひび割れ密度の関係を示す。両者には高い相関が見られ、明度差からひび割れ密度を推定し、凍害劣化程度や力学性状の低下を簡便に推定できると考えられる。

$$C_n = -0.0755 \exp(0.1514 \Delta L^*) \quad (2)$$

ここに、

C_n : 単位測線上あたりのひび割れ密度(本/mm)

ΔL^* : 明度差(現像剤のみの明度 - 染色後の明度)

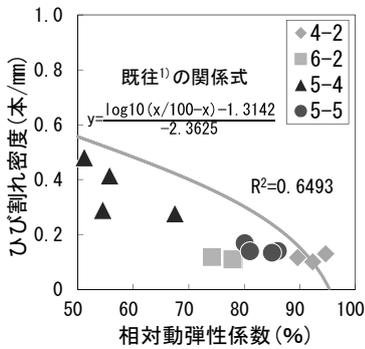


図-5 相対動弾性係数とひび割れ密度の関係

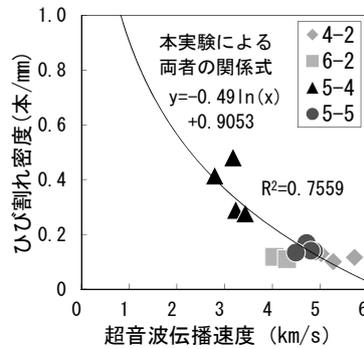


図-6 超音波伝播速度とひび割れ密度の関係

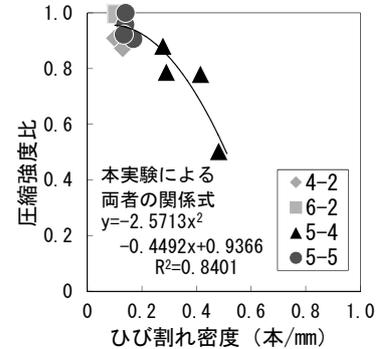


図-7 ひび割れ密度と圧縮強度比の関係

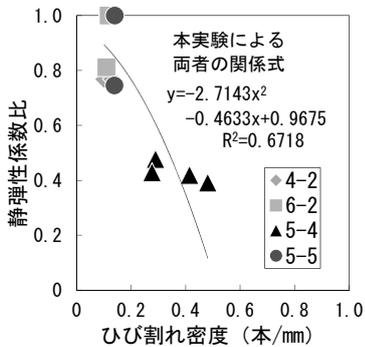


図-8 ひび割れ密度と静弾性係数比の関係

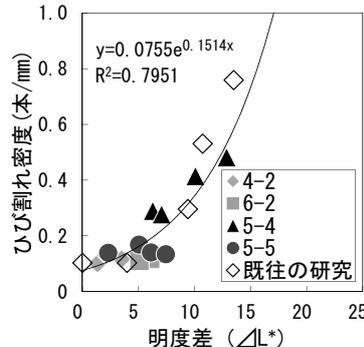


図-9 明度差とひび割れ密度の関係

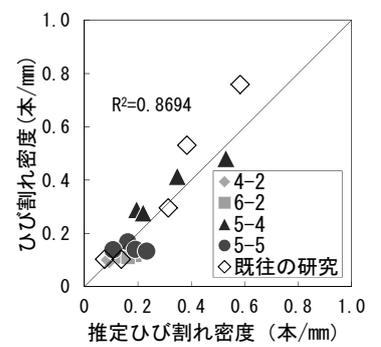


図-10 ひび割れ密度の推定値と実測値の関係

3.4 実構造物コアへの適用

(I) 既存壁高欄より採取したコア試験体⁶⁾

図-11 に超音波伝播速度の測定結果を示す。本実験では、断面方向に安定した超音波伝播速度が得られなかった。これは、鉄筋やコア破断による表面の凹凸の影響等が原因と考えられる。超音波伝播速度の平均値を図中に示す。表-3 に示す通り、比較的健全と考えられるコア A の平均値と比較すると、B-D の超音波伝播速度の平均値は小さく、何らかの劣化を生じている可能性があるものと思われる。

図-12 に明度差の測定結果を示す。明度差は、現像剤のみを塗布した場合の明度からの差で表している。コア A では比較的ばらつきのない明度差となり、比較的健全であることが確認できた。コア B-E は、明度差が大きい箇所が見受けられ、部分的にひび割れ等が生じていることが考えられる。ここで、 \bar{x} -R 管理図の手法を利用し、各測定点の明度を個々の製品データとみなし、平均値と UCL, LCL を算定した。結果を図中に示す。UCL から逸脱している測定値は、明度差が有意に大きいといえ、その部分にひび割れ等を生じている可能性が高いと考えら

れる。コア B, C, D では UCL に近いまたは超えている部分は比較的核心部、つまり表層にあたり、凍害劣化が疑われる。なお、コア D において壁高欄に剥落がみられた車道側の明度差が健全な値を示しているが、測定に用いたコアは外観上変状のない部分から採取されており、壁高欄 D の車道側では剥落箇所以外については健全であると思われる。E では一般的に明度差が大きい部分が多く、ひび割れ等が多いといえ、ASR による劣化が疑われる。このように明度差から推定される劣化状況は、劣化要因を特定する情報の一つとなることが考えられる。

(II) 既存 RC 建築物より採取したコア試験体

図-13 に、超音波伝播速度の測定結果を示す。コア b, や c では一部超音波伝播速度が低下した箇所がみられたが、空洞などの初期欠陥によるものか、劣化によるものかを判別することは難しい。

図-14 に明度差の測定結果を示す。仕上材部分で染色剤がコンクリート部分に比べ多量に浸透し、明度差が上昇することが確認でき、コアの状況を把握しておく必要があるといえる。また、骨材の影響により明度差が低下した箇所が見受けられた。シリーズ(I)と同様に各測定点

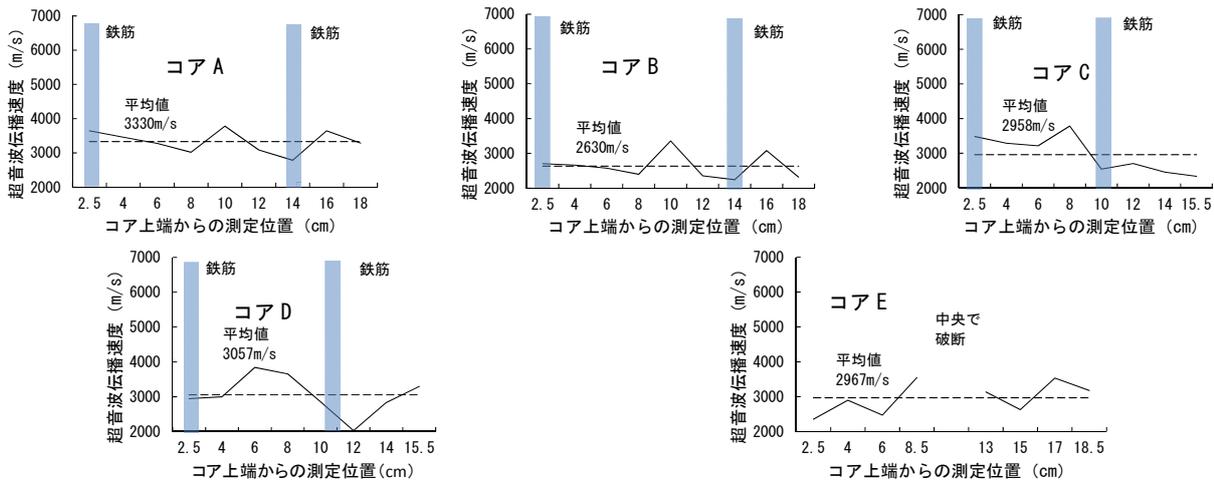


図-11 既存壁高欄から採取したコア試験体の超音波伝播速度測定結果

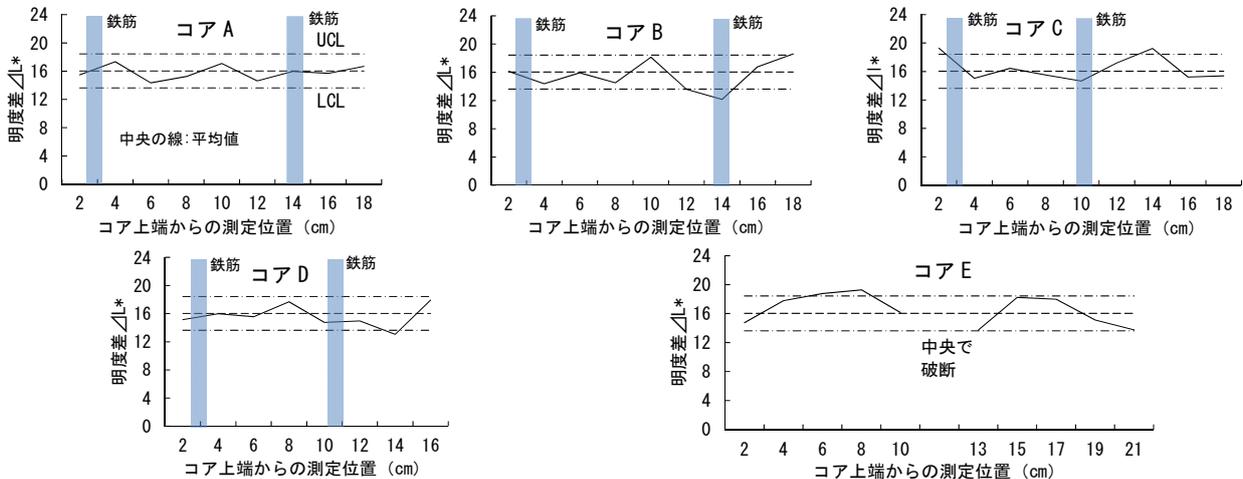


図-12 既存壁高欄から採取したコア試験体の明度差測定結果

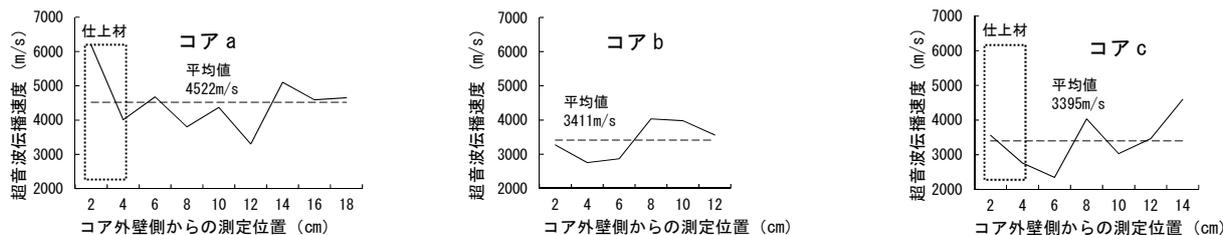


図-13 既存RC建築物から採取したコア試験体の超音波伝播速度結果

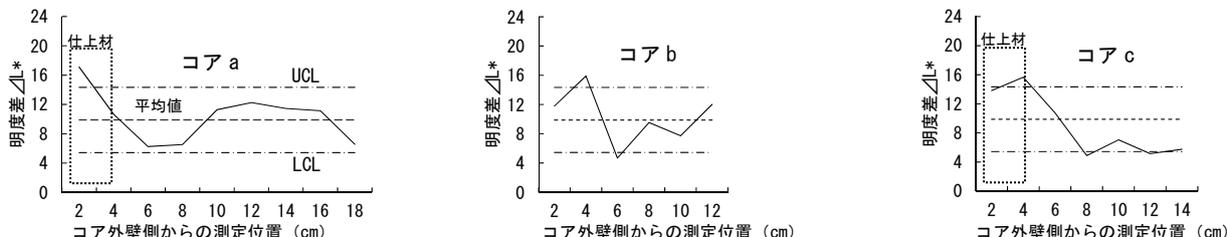


図-14 既存RC建築物から採取したコア試験体の明度差測定結果

の明度差について、平均値、UCL、LCLを算定した。結果を図中に示す。コアaでは、仕上げ部分を除いてUCLを超えた箇所がなく、超音波伝播速度が比較的大きいため健全であると判断できる。を超えた箇所があり、超音波伝播速度の低下がみられ、凍害劣化の可能性が考えられる。コアcでは外壁側から深さ4.5cm程度のコンクリート部分にUCLを超えた箇所がみられ、劣化を示唆しているが、仕上材の影響により明度差が増加した可能性も考えられる。このように実建築物から採取したコアにおいても、明度差から凍害劣化の範囲を推定できる可能性が示されたが、仕上材や骨材等が明度差測定に及ぼす影響について考慮する必要があるといえる。

4. まとめ

- (1) 染色浸透探傷剤による明度差は、コンクリートのひび割れ密度と相関があり、ひび割れ密度と相関がある凍害劣化程度、圧縮強度および静弾性係数の低下を推定できる可能性がある。
- (2) 実建築物から採取したコアにおいて染色浸透探傷剤による明度差によって、凍害劣化を受けた範囲を推定できる可能性が示唆された。しかし、仕上材や骨材等の影響について考慮する必要がある。

謝辞

本研究による壁高欄の調査は、(公社)日本コンクリート工学会北海道支部「積雪寒冷地の既存コンクリート構造物に適用する非破壊・微破壊試験方法研究委員会」の研究の一部として実施され、(国研)土木研究所寒地土木研究所、東日本高速道路株式会社に試験体をご提供いただきました。本研究の一部は、科研費基盤研究(C)(課題番号:26420541)の助成を得ました。実験にあたり、本研

究室の大学院生各位の協力を得ました。また、本研究によるRC建築物の調査は、NHKの協力の下、日本建築学会・既存鉄筋コンクリート造建築物の構造・材料調査WG(主査:野口貴文(東京大学))の活動の一環として行われました。調査にあたり、東京大学、東京理科大学および北海道大学の方々の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松村 宇, 桂 修, 吉野利幸: 凍害を受けたコンクリートの性状と劣化度評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.563, pp.9-13, 2003.1
- 2) 長谷川拓哉, 千歩 修: 明度差によるコンクリートのひび割れ本数簡易評価方法の検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.86, pp.7-10, 2013.6
- 3) 成田玲於奈, 千歩 修, 長谷川拓哉, 福山智子: 空気量および水セメント比の異なるコンクリートが促進凍結融解試験方法と限界飽水度法の耐凍害性評価に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.37, No.1, pp.699-700, 2015.9
- 4) 南 正樹, 清田雄介, 千歩 修, 長谷川拓哉: コンクリートのひび割れ状況の簡易把握手法の検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.80, pp.393-396, 2007.7
- 5) 田畑雅幸, 洪 悦郎, 鎌田英治: コンクリートの凍害におけるひび割れの役割の考察, 日本建築学会構造系論文報告集, No.366, pp.11-16, 1986.8
- 6) 長谷川拓哉, 千歩 修, 福山智子: 明度差によるコンクリートのひび割れ本数簡易評価手法の実構造物への適用, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.88, pp.29-32, 2015.6

