

論文 凍結融解による劣化への初期ひび割れの影響

岡本修一^{*1}・魚本健人^{*2}

要旨: 本研究では、凍結融解と他の要因との複合劣化作用を明らかとすることを目的に、要因として「初期のひび割れ程度」に着目し、劣化進行への影響について実験的に検討を行った。その結果、凍結融解による劣化は、微視的には細孔容量の増大、マクロ的には微細ひび割れの増大として捉えることが可能であり、凍結融解前に連続性の高いひび割れが多い場合ほど劣化が早いことが明らかとなった。また、AEコンクリートでは、相対動弾性係数と質量変化率の関係から、初期のひび割れの増大にともない、劣化形態はスケーリングの影響が卓越する形態から、ひび割れの増進の影響が卓越する形態へと移行することが明らかとなった。

キーワード: 凍結融解、初期ひび割れ、劣化形態の推移、相対動弾性係数－質量変化率の関係

1. はじめに

寒冷地において、コンクリート構造物が凍結融解の繰返しにより生ずる劣化、いわゆる凍害は、コンクリート構造物の耐久性を検討する場合、重要な課題の一つである。

この凍結融解の繰返しによる劣化機構に関しては、T.C.Powers の研究^{1), 2)}を始め、我が国においても、洪・鎌田両氏の研究成果³⁾等に代表されるように、コンクリート内部の細孔の構造・分布状況、ならびに毛細管空隙中に存在する水の挙動（相変化に伴う体積膨張や水圧、毛細管空隙中の水の過冷却、未凍結水の移動 等）が重要であることが明らかにされている。

つまり、凍結融解による劣化は、コンクリートの微細構造を考えた場合、内部の水分が氷に相変化することに起因する、コンクリートの組織の緩みが原因と考えることができる。この組織の緩みは、細孔構造の変化することに対応するものと考えられ、細孔構造の変化に着目した凍結融解による劣化に関する研究が、著者ら⁴⁾も含め広く行われている。

また、実構造物の劣化を考える場合、他の劣化と同様、凍結融解による劣化も他の劣化要因との

複合作用が重要となってくる。例えば、凍結融解による劣化は、コンクリートが凍結融解の繰返しを受け劣化して行く過程、あるいは凍結融解の繰返しを受ける以前に作用する他の要因により促進されることが考えられる。しかしながら、このような凍結融解による劣化と他の要因との複合作用に関する研究⁵⁾は非常に少ないので現状である。

そこで本研究では、凍結融解機構のモデル化を目標に、劣化進行促進の要因として「初期のひび割れ程度」に着目し、凍結融解劣化進行への、負荷圧縮応力レベルを変化させることで発生させた初期ひび割れの影響について実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料として、セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には富士川産の川砂（比重：2.63、吸水率：2.01%）、粗骨材には両神産の砕石（比重：2.70、吸水率：0.51%）を使用した。

また AEコンクリートでは、ポリカルボン酸系の AE減水剤を使用した。

*1 大成建設（株）技術研究所 工修（正会員）

*2 東京大学生産技術研究所 第5部 工博（正会員）

コンクリートの配合を表-1に、フレッシュコンクリートの性状を表-2に示す。なお、nonAEコンクリートの配合は、AE剤を抜いたAEコンクリートの配合で練混ぜを行い、測定された空気量に合せ修正したものである。

表-1 コンクリートの配合

コンクリート の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
nonAE	60	45.1	177	296	841	1051	-
AE	60	44.8	172	287	816	1020	0.574

表-2 フレッシュコンクリートの性状

コンクリート の種類	スランプ (cm)	空気量 (%)
nonAE	7.5	2.0
AE	10.0	5.5

2.2 供試体の作製

凍結融解試験用供試体には、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を各応力レベルにおいて4本作製した。供試体は、凍結融解試験中でのセメントの水和反応進行による細孔構造の変化の影響を少なくするため、前養生として材齢約60日まで水中養生を行った。

今回の実験では、圧縮強度に対する載荷応力の割合（載荷応力度）を0, 50, 70, 80, 90, 100%の6段階とし、凍結融解試験開始前の供試体の初期ひび割れ程度を変化させた。載荷方法は、1000kN万能試験機を用い、所定の荷重レベルに達した時点で30秒間荷重を保持し、その後、除荷を行った。ここで、載荷応力のレベル0%は無載荷供試体、100%は供試体が最大荷重に達した直後に崩壊させることなく除荷した供試体である。なお、載荷時点での供試体圧縮強度は41.6MPaであった。

2.3 凍結融解試験

凍結融解試験は、供試体に $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用いたこと以外は、「コンクリートの凍結融解試験方法（JSCE-G501）」に準拠し行った。

なお、動弾性係数の測定は、縦振動の一次共鳴振動（JIS A 1127）により測定し、本文中の相対動弾性係数は縦振動によるものである。

2.4 測定項目

(1) ひび割れの定量化

ひび割れ測定用供試体作製は、次のような手順で行った。まず、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 供試体の中央部から、 $\phi 10 \times 5\text{cm}$ の部分を切り出し、切り出した供試体の両端面を#220のダイヤモンド研磨紙で研磨整形した。次に、表面に蛍光材料を含んだアルファシアノアクリレート系瞬間接着剤を研磨表面に塗布し、接着剤が浸透・硬化した後に空隙およびひび割れ部分のみに蛍光材料が残るように#80の耐水研磨紙で再び研磨し測定に供した。

ひびわれ測定は、研磨面上を、長さ5.0cm、間隔2.5mm、合計21本のトラバースで区切り、トラバース上に現れるひび割れを測定した。この方法は、硬化コンクリートの空気量測定で行われるリニアトラバース法と同様の測定法である。

(2) 細孔径分布

細孔径分布測定には、供試体中の粗骨材を取り除きながら2.5~5.0mmに粗粉碎し、アセトンに浸し水和を停止したものを使用した。測定は、水銀圧入式のポロシメータにより、圧入圧力0.4~420Pa（細孔直径で約400~0.0035μm）の範囲で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 初期ひび割れの状況

凍結融解試験を開始する前のAEコンクリート供試体における、載荷応力と横断ひび割れ総延長の

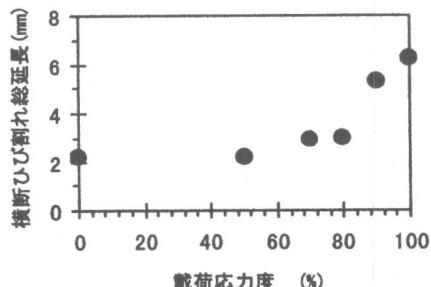


図-1 載荷応力とひび割れ総延長の関係

関係を図-1に、載荷応力と動弾性係数の関係を図-2に示す。ここで言う「横断ひび割れ総延長」とは、トラバース上を横断したひび割れの幅の総

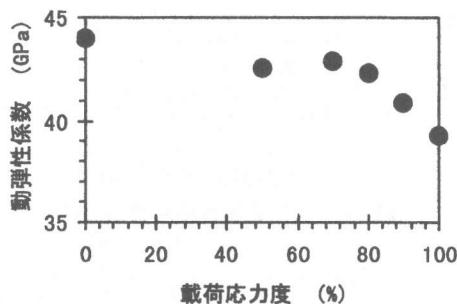


図-2 載荷応力と動弾性係数の関係

和、つまり、トラバース全長あたりの全ひび割れ幅である。これらからわかるように、載荷応力度が増大するとともに、横断ひび割れ総延長は増大し、逆に動弾性係数は減少する傾向にある。特に、載荷応力度が破壊強度の80%を超えた付近より急激に変化し、最終的には無載荷の供試体に対し、横断ひび割れ総延長は約3倍増大し、動弾性係数は約10%低下した。

図-3は、測定されたひび割れ幅の構成比率を示したものである。図において、無載荷の供試体

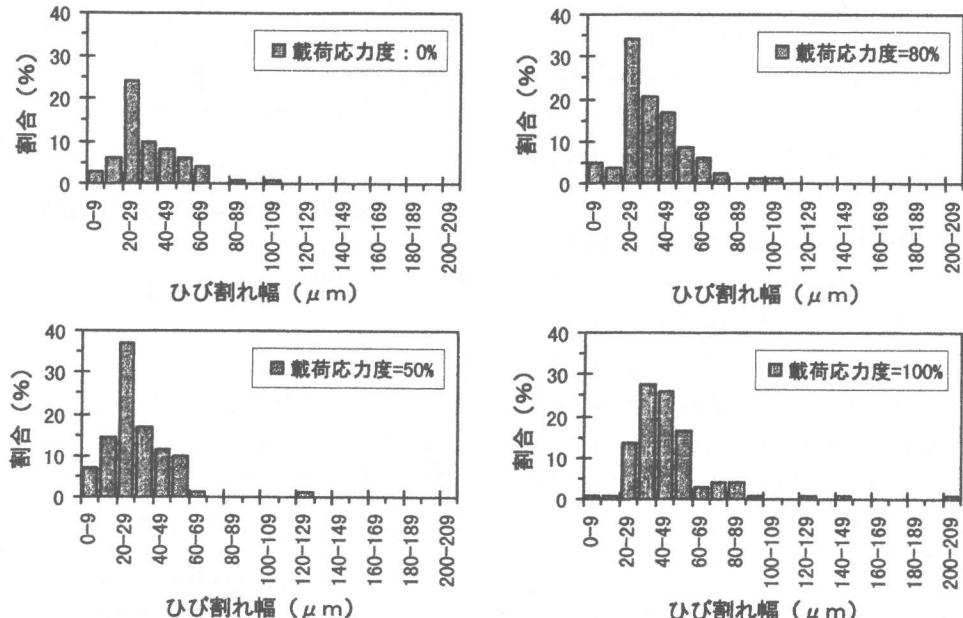


図-3 ひび割れ幅の割合の分布

でもひび割れが存在しているが、これらのひび割れのほとんどは、比較的大きい径の粗骨材周辺に確認されたもので、いわゆる遷移帯に相当するものと思われる。目視の範囲では、載荷応力度が増大するに従い、粗骨材周辺から発生したひび割れが次第に繋がって行く状況が確認された。この状況が、ひび割れ幅30μm以上のひび割れの占める割合の増大という傾向として図に現われているものと考えられる。モルタルおよびセメントペーストを用いて、同じく載荷応力度を変化させ、圧縮応力下の空隙構造の変化を調べた羽原らの研究⁶⁾においても、載荷応力度が圧縮強度の80%を超える当たりから全空隙量が増大して行くことが報告されている。つまり、載荷応力度が80%以上の供試体では多くのひび割れが連続しているものと考えられる。

これら横断ひび割れおよび動弾性係数の傾向は、nonAEコンクリートの場合においても同様に認められた。

以上述べたような、初期ひび割れ状況の異なる供試体について凍結融解試験を行い、劣化状況への影響について検討を行った。

3.2 相対動弾性係数および質量変化率

図-4、図-5にAEコンクリートにおける相対動弾性係数の経時変化と質量変化率の経時変化を示す。まず相対動弾性係数に関しては、載荷応力度が70%から100%へと大きな供試体ほど、早い凍結融解サイクル数で相対動弾性係数が60%を下回る傾向が認められた。一方、質量変化率に関しては、載荷応力度が100%から50%へと小さな供試体ほど、スケーリングによる質量減少率が大きくなる傾向が認められた。

次に、図-6、図-7にnonAEコンクリートにおける相対動弾性係数および質量変化率の経時変化を示す。相対動弾性係数に関しては、AEコンクリートの場合と同様に、載荷応力度が大きな供試体ほど、早い凍結融解サイクル数で相対動弾性係数が60%を下回る傾向にある。しかし、質量変化はほとんど認められない。同一配合条件のコンクリートにより凍結融解試験中のひずみ変化の測定を行った実験⁴⁾においては、初期の凍結融解サイクルから大きな残留ひずみが発生することが明らかとなっており、これらを考え合わせると本実験の劣化は、内部ひび割れの増大の影響が卓越する劣化であることが推察される。

また、AEコンクリートおよびnonAEコンクリートいずれの場合も、載荷を行った供試体においては、最終的な破壊状況が、静的圧縮試験時の破壊形態と酷似しており、この結果は初期のひび割れに起因し、ひび割れが進行したことを示唆するものと考えられる。

3.3 ひび割れ幅および細孔構造の変化

AEコンクリートにおける、供試体のひび割れ幅の度数分布図を、凍結融解を開始する前と100サイクル終了時点での比較結果を図-8に示す。

図より、無載荷あるいは載荷供試体いずれの場合も、凍結融解を受けることで供試体内部に存在するひび割れが増大することがわかる。今回の実験条件では、幅が約20~60μmのひび割れの増大が顕著である。

次に、モルタル部分の細孔径分布の変化について比較した例を図-9に示す。

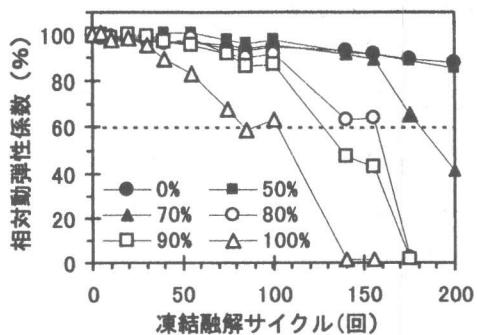


図-4 相対動弾性係数の経時変化
(AEコンクリート)

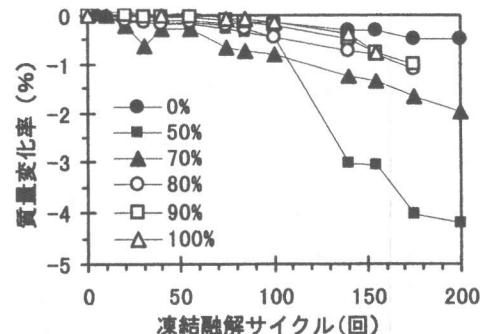


図-5 質量変化率の経時変化
(AEコンクリート)

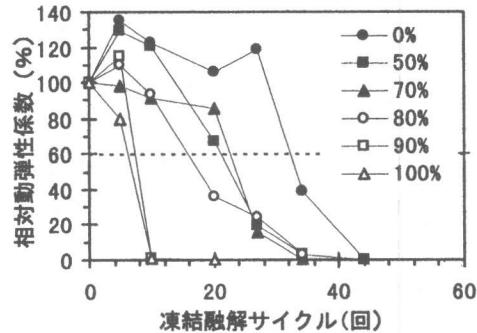


図-6 相対動弾性係数の経時変化
(non-AEコンクリート)

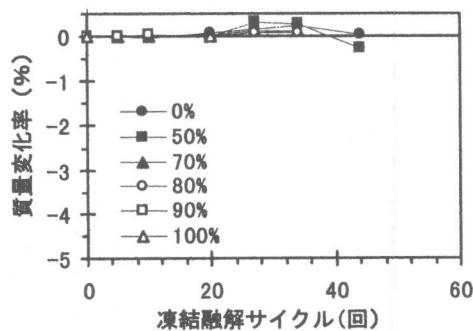


図-7 質量変化率の経時変化
(non-AEコンクリート)

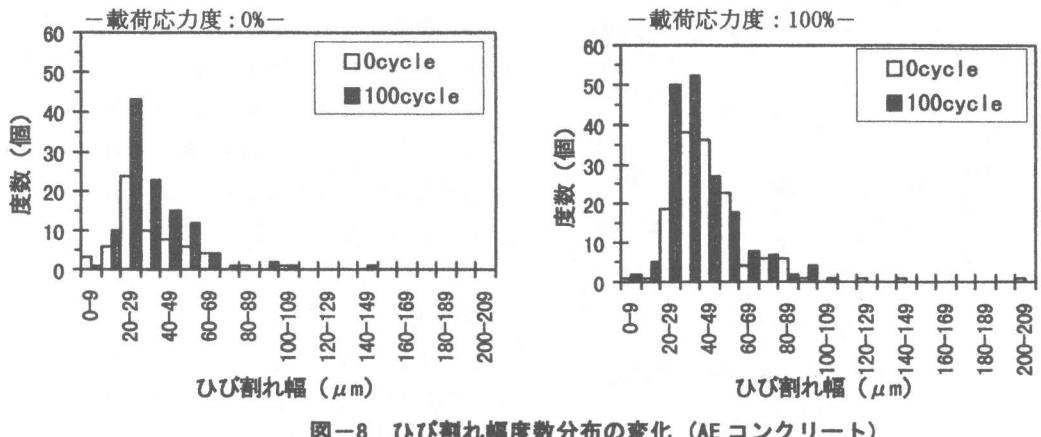


図-8 ひび割れ幅度数分布の変化 (AE コンクリート)

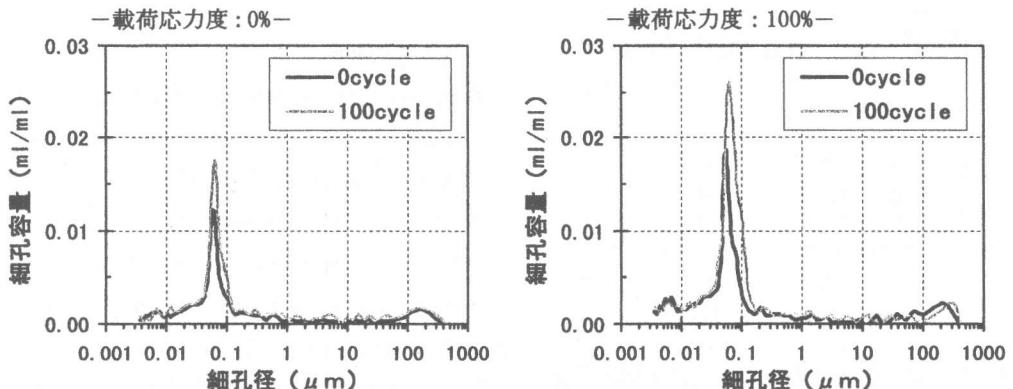


図-9 細孔径分布の変化 (AE コンクリート)

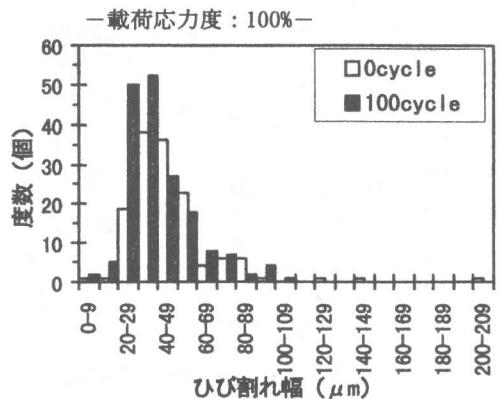
図より、無載荷あるいは載荷供試体いずれの場合も、凍結融解を受けることで、約 0.05~0.5 μm の細孔径が増大することがわかる。

このように、凍結融解による劣化は、微視的には細孔容量の増大、マクロ的には微細なひび割れの増大として捉えることが可能である。

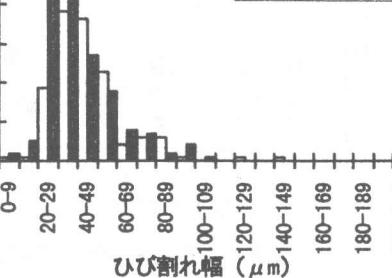
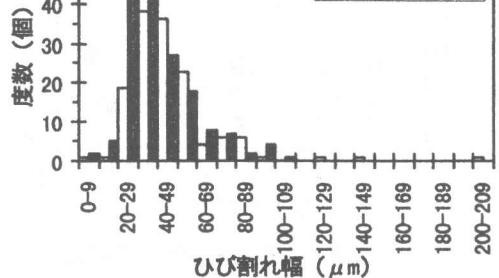
3.4 初期ひび割れの影響に対する評価

凍結融解による劣化に対する初期ひび割れの影響を評価する。図-10 や図-11 に示すように、相対動弾性係数と質量変化率の関係を描くことにより、供試体の破壊性状がより明確となる。つまり、ひび割れは存在するが連続するひび割れが少ないと考えられる載荷応力度が 50% の供試体では、相対動弾性係数の低下よりも質量減少の影響が大きく、スケーリングによる劣化が卓越する。

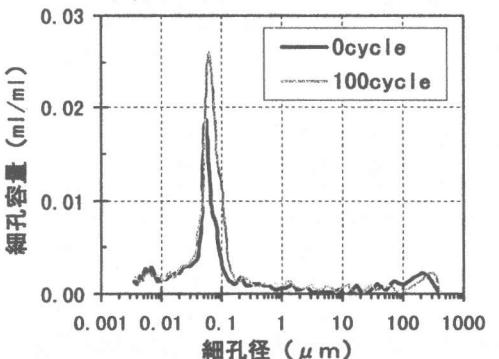
しかし、連続するひび割れが多く存在すると考



-載荷応力度 : 100% -



-載荷応力度 : 100% -



えられる載荷応力度が大きな供試体ほど、質量減少よりも相対動弾性係数の減少の影響が大きくなり、ひび割れの増進による劣化が卓越してくる。

以上の結果から、たとえ AE コンクリートであっても、凍結融解前あるいは凍結融解中に何らかの要因によりコンクリートにひび割れが発生する可能性がある場合には、劣化が促進されるものと考えられ、耐久性を検討する場合には複合劣化を考慮することが重要である。

また、図-10 の結果は、凍結融解による劣化進行に置き換えて考えることもできる。まず、劣化初期の段階においては微細なひび割れの進展によるスケーリングによる劣化が進行していく。さらに劣化が進み徐々にひび割れが連続していくと、ひび割れ増進の影響が大きくなり一気に破壊へと進むという、凍結融解によるコンクリート

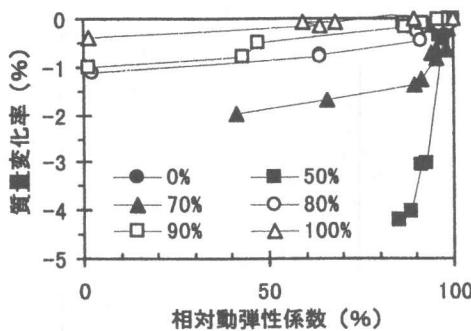


図-10 相対動弾性係数と質量変化率の関係
(AEコンクリート)

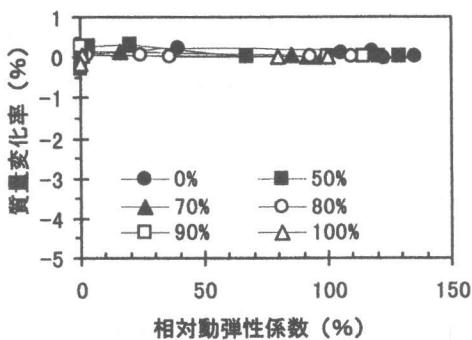


図-11 相対動弾性係数と質量変化率の関係
(nonAEコンクリート)

の劣化進行状況を表していると思われる。

4. まとめ

異なる圧縮応力レベルを載荷することでひび割れの程度を変化させた供試体を使用し、初期ひびわれがコンクリートの凍結融解劣化進行におよぼす影響に関して、実験的に検討を行った。その結果得られた知見を以下に示す。

- (1) AEコンクリートにおいて、凍結融解開始前の初期のひび割れが多いものほど、劣化形態はスケーリングの影響が卓越する劣化形態から、ひび割れの増進の影響が卓越する劣化形態へと移行する。
- (2) nonAEコンクリートの劣化形態は、ひび割れの増進の影響が大きく現れる。
- (3) 凍結融解による劣化は、微視的には細孔容量の増大、マクロ的には微細なひび割れの増大と

して捉えることが可能である。

- (4) たとえAEコンクリートであっても、凍結融解前あるいは凍結融解中に何らかの要因によりコンクリートにひび割れが発生する可能性がある場合には、それらが複合して劣化が促進されるものと考えられる。

[謝 辞]

本研究を実施するにあたり多大なご協力を頂いた東京大学生産技術研究所・魚本研究室の皆様方に感謝の意を表します。

《参考文献》

- 1) Powers, T.C. : A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, Proc. of ACI, Vol.41, pp.245-272, 1945
- 2) Powers, T.C. and Helmuth, R.H. : Theory of Volume Changes in Hardened Portland-Cement Paste During Freezing, Proc. of Highway Research Board, Vol.32, pp.285-297, 1953
- 3) 洪 悅郎, 鎌田英治 : コンクリートの凍害と初期凍害, コンクリート工学, Vol.16, No.5, pp. 1-11, 1978
- 4) 岡本修一, 魚本健人 : 凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化メカニズムに関する実験的研究, 第52回土木学会年次学術講演概要集第5部門, pp.1460-1461, 1997
- 5) 例えば, 鎌田英治ほか : コンクリートの耐凍害性におよぼすひびわれ要因の研究, セメント技術年報, 29, pp. 254-258, 1975
長谷川寿夫 : コンクリートの凍害に及ぼす外的要因の影響と凍害危険度の表示法, セメント技術年報, 29, pp. 245-248, 1975 など
- 6) 羽原俊祐, 平尾 宇, 内川 浩 : 圧縮応力下における硬化モルタルおよび硬化セメントペーストの組織および空隙構造の変化, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.134-139, 1996