論文 乾湿繰返し・凍結融解を受けるコンクリートの含水状態および長さ変化

酒井 正樹*1·千歩 修*2·長谷川 拓哉*3

要旨:non-AE 高強度コンクリートが,乾湿繰返しを受けると凍結融解抵抗性が大きく低下 する機構を検討するため,乾湿繰返し・凍結融解時の含水状態およびその経時変化を電極法 により,同時に,内部の長さ変化を埋込型歪ゲージにより,連続的に測定した。その結果, 水セメント比の違いや乾湿繰返しにより,凍結融解時の劣化過程において,異なった比抵抗 の変化がみられた。また,本実験での埋込型歪ゲージによる長さ変化率と,従来から用いら れているダイヤルゲージによる長さ変化率に相関がみられた。

キーワード:凍結融解,乾湿繰返し,含水状態,比抵抗,長さ変化,埋込型歪ゲージ

1. はじめに

non-AE高強度コンクリートは、2週水中養生直後に凍結融解試験を行うと、高い凍結融解抵抗性を示すが、屋内放置または屋外暴露によって乾燥または乾湿繰返しの作用を受けると、凍結融解抵抗性が大きく低下するものがあることがわかっている¹⁾。この理由として、乾燥過程におけるコンクリート内部の水分移動・水分逸散の影響や、微細ひび割れの発生などが考えられる。

本研究は、乾湿繰返し・凍結融解時の含水状 態および長さ変化から、コンクリートの凍結融 解抵抗性が乾燥などにより低下する機構を検討 したものである。含水状態の経時変化は、コン クリートの表層と内部について電極法²⁾による 比抵抗の変化を測定・考察した。また、長さ変 化については、ダイヤルゲージの他に、埋込型 歪ゲージによる連続的な測定も行った。

2. 実験の概要

2.1 実験計画

実験の概要を表-1 に示す。本実験では,W/C 25%と45%の non-AE コンクリートを対象とする。

試験体は,乾湿繰返しが凍結融解抵抗性に与 える影響を検討するため,水中養生直後に凍結 融解試験を始める標準試験体[S]と,水中養生後 に乾湿繰返しを7サイクル行った後凍結融解試 験を始める乾湿繰返し試験体[d]の2種類とした。

乾湿繰返しの条件は,実環境を考慮に入れた ものとして,乾燥40℃・42時間,水中浸漬6時 間¹⁾を採用し,これを7サイクル行った。

含水状態の検討は、乾湿繰返しにより含水率 分布が生じると考えて、表層(表層より 1cm)と、 内部(試験体中心,表層より 3.25cm)に電極を埋め 込み、乾湿繰返し時および凍結融解時の比抵抗 の変化を電極法により測定して行った。

	W/C (%)	AIR (%)	凍結融解試験 開始条件[記号]	試験方法	測定事項							
	25 45	1.0	標準[S] 乾湿繰返し[d]	・乾湿繰返し (乾燥40℃・42h, 水中浸漬6h×7c) ・凍結融解試験(JIS A 1148 A法) ・コンクリートの基礎性状試験 圧縮強度・ヤング係数(JIS A 1108))	 ・比抵抗(電極法(表層・1cm/内部・3.25cm)) ・長さ変化率(埋込型歪ゲージ/ダイヤルゲージ) ・内部温度(熱電対) ・質量変化率 ・相対動弾性係数 							
※試験体記号 : []内の記号を用い,「W/C」+「凍結融解試験開始条件」とする。25S, 25d, 45S, 45dの4種となる。												
	*1 北	·海道	[大学 大学院]	工学研究科 空間性能システム専攻	文 (正会員)							

*2 北海道大学 大学院工学研究科 空間性能システム専攻教授 工博 (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学研究科 空間性能システム専攻准教授 博(工) (正会員)

長さ変化の検討は,埋込型歪ゲージを試験体 中心に設置し,乾湿繰返し時および凍結融解時 の長さ変化率を測定し,乾湿繰返しが凍結融解 抵抗性に与える影響を検討した。また,長さ変 化は従来から用いられているダイヤルゲージで も測定し,その相関性も併せて検討した。

2.2 試験体の作製

コンクリートの調合および基礎性状を表-2 に 示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密 度 3.16g/cm³),細骨材は勇払産陸砂(表乾密度 2.65g/cm³,吸水率1.26%),粗骨材は常盤産砕石 (表乾密度 2.66g/cm³,吸水率 2.69%)を用いた。 高性能 AE 減水剤(SP8S)はW/C25%ではフローが 60cm, W/C45%ではスランプが18cm になるよう に調整して添加した。

試験体は、埋込型歪ゲージ・比抵抗測定電極・ 熱電対を埋込んだ試験体と、ダイヤルゲージ用 標点ボルトのみ埋込んだ試験体の2体を作製し た。試験体寸法は7.5cm×7.5cm×40cmとし、打込 み翌日に脱型し、その後14日水中養生を行った。

2.3 試験方法

乾湿繰返しでは、14 日水中養生後の値を基準 として、ダイヤルゲージでの長さ変化率 Ld、質 量変化率、相対動弾性係数を乾燥・湿潤の各過 程ごとに、埋込型歪ゲージでの長さ変化率 Lu、 電極法による比抵抗の変化を連続的に測定した。

凍結融解試験は JISA 1148A 法(水中凍結融解) に準じて行い,乾湿繰返しを行った試験体は,2 日間の水中浸漬後に凍結融解試験を開始した。

凍結融解試験結果は水中浸漬後の値を基準と し,乾湿繰返しと同様に,ダイヤルゲージでの

表-2 コンクリートの調合と基礎性状

W/C	Air (%)	Slump	単位量 (kg/m ³)					SP8S	
(%)		(cm)	水	セメント	細骨材	粗骨	材	(Cx%)	
25	1.0	[60.0]	175	700	634	931	L	1.25	
45	1.0	18.0	185	411	846	931		0.70	
W/C (%)	実測Air (%)		実測Slump(cm) [実測flow(cm)]		σ] (MI	σ _{max} (MPa)		E (GPa)	
25	1.9		[51.0]		95.	95.0		33.6	
45 1.7		22.0		50.	50.9		27.7		

*SP8S:高性能AE減水剤(セメント質量×%)

E:ヤング係数 σ max:最大圧縮強度

長さ変化率 Ld, 質量, 相対動弾性係数を所定の サイクルごとに, 埋込型歪ゲージでの長さ変化 率 Lu, 電極法による比抵抗の変化を連続的に測 定した。なお, 凍結融解試験での測定の終了は, 相対動弾性係数が 60%を切った時点とした。

また、コンクリートの基礎性状として、28日 水中養生後の圧縮強度とヤング係数を測定した。

2.4 比抵抗測定システム

比抵抗測定システムおよび電極の形状を図-1 に示す。試験体の表層および内部に熱電対と電 極を埋込み,データロガーにより測定位置の温 度を,LCRメータにより電気抵抗を,コンピュ ータ制御して連続的に測定した。

3. 実験結果

3.1 乾湿繰返し結果

図-2 に乾湿繰返し時およびその後の2日間の 水中浸漬時の長さ変化を示す。

ダイヤルゲージでの長さ変化率 Ld は, 埋め込 み型歪ゲージでの長さ変化率 Lu に比べ, 乾燥時 と湿潤時の長さ変化率の変動量が小さい。その 理由として, ゲージの精度の違い, また, ダイ ヤルゲージでは, 測定を行った実験室内の温湿 度変化の影響が考えられる。

W/C25%は、W/C45%に比べて、乾湿繰返しでの乾燥時と湿潤時の長さ変化率の変動量が小さく、試験体内部の水分の出入りが少ないものと考えられる。また、今回の実験条件では、乾燥を受けると、湿潤過程で長さ変化率は元の水準



図-1 比抵抗測定システムおよび電極形状

まで戻らなくなっている。同様に、含水状態も、 乾燥を受けると、湿潤過程で元の水準まで戻っ ておらず、含水状態の変化が、歪の変化に影響 しているものと思われる。

埋込型歪ゲージでの長さ変化率 Lu をみると, 乾湿繰返し後の2日間の水中浸漬では,W/C45% は元の水準程度まで長さが戻る傾向が見られる が,W/C25%は長さの戻りがかなり遅いことがわ かる。ダイヤルゲージでの長さ変化率 Ld からは 明確な傾向がみられなかった。

図-3 に乾湿繰返し時およびその後の2日間の 水中浸漬時の比抵抗の変化を示す。比抵抗が急 激に上昇している部分が、湿潤過程であるが、 これは乾燥過程との温度差による影響である。 実際の含水状態の変化は急激な低下以降の変化 に対応し、変化は小さいものと考えられる。

W/C25%, W/C45%ともに, 乾湿繰返しサイク ル数の増加に伴い, 表層・内部とも緩やかに比 抵抗が増加し, 含水率の減少が考えられる。

乾湿繰返し1 サイクルに着目すると,乾燥過 程において,表層のみで大きな比抵抗の増加が 見られ,乾湿繰返しでの水分の出入りの多くは, 表層で行われると考えられる。乾燥過程で増加 した比抵抗は,湿潤過程で元に戻る傾向にある が元の水準までは戻らず,比抵抗の残留,つま り乾燥の影響が残って累積されると考えられる。

乾湿繰返し後の2日間の水中浸漬では,含水 率上昇により,表層では大きな,内部では小さ な比抵抗の低下がみられる。しかし,表層・内 部とも含水率は元の水準まで戻らず,乾燥の影 響を残した状態で凍結融解試験が始まっている。

3.2 凍結融解試験結果

図-4に相対動弾性係数の変化を示す。

W/C25%では、乾湿繰返しにより大幅に凍結融 解抵抗性が低下したが、W/C45%では変化は見ら れなかった。高水セメント比のコンクリートは、 軽微な乾燥を受けると凍結融解抵抗性が増加す るという報告³⁾があるが、本実験ではこのような 傾向が見られなかった。また、標準[S]と乾湿繰



返し[d]で,凍結融解試験開始時の材齢が異なり, 水和の状況などが異なると考えられるが,本研 究ではそれらの影響も含めて,乾湿繰返しの影 響と考えることとした。

図-5 に埋込型歪ゲージによる長さ変化率 Lu を示す。25S は、凍結融解試験中に埋込型歪ゲー ジが壊れ、データが得られなかった。

25d, 45S, 45d ともに、サイクル初期の組織が 健全な状態では、凍結時・融解時とも際立った 膨張収縮挙動は見られないが、少しずつ膨張が 蓄積されていることがわかる。

凍結時に膨張量の増加が開始すると、相対動 弾性係数の低下も始まっている。組織の破壊が 進むにつれて、1 サイクルでの凍結時の膨張、融 解時の残留膨張ともに大きくなっていき、破壊 時にはほとんど同形のループとなっている。

図-6 に埋込型歪ゲージによる、1 サイクルでの凍結時の膨張と残留膨張の関係を示す。

鎌田らは,高水セメント比のコンクリートに ついて,凍結時の膨張の約半分が,残留膨張と なると報告している⁴⁾。本実験でも凍結時の膨張 が大きいほど,残留膨張は増加する傾向はみら れたが,残留膨張は凍結時の膨張の1/5程度とな っている。これは,コンクリートが低水セメン ト比であることによるものと考えられる。

図-7 に埋込型歪ゲージでの長さ変化率 Lu と, 従来からのダイヤルゲージでの長さ変化率 Ld の 関係を示す。この結果, Lu と Ld には高い相関 が見られ,埋込型歪ゲージによって凍結融解時 の劣化の評価が可能であると考えられる。

図-8に凍結融解時の比抵抗の変化を示す。

融解時比抵抗は,サイクル数の増加に伴って 減少している。この理由として,組織の緩みや ひび割れ発生により,コンクリート内部へ水分 が浸透していくためと考えられる。

25S はサイクル数の増加に伴い,内部・表層と もに融解時比抵抗は緩やかに減少した。これは, 凍結融解により組織が緩み,徐々に含水状態が 上がっていくためと考えられる。

25d は, 凍結融解開始直後に表層の融解時比抵



抗,遅れて内部の融解時比抵抗が急激に低下し, 高含水状態となった。乾湿繰返しで含水率が低 下した状態から,表層に生じた微細ひび割れを 介し,表層から内部への水分移動が考えられる。

45S, 45d はともに, 凍結融解初期から融解時 比抵抗が低下していき, 早いサイクルで一定と なり, 高含水状態となっていると考えられる。

凍結時比抵抗は、サイクル数の増加に伴って 増加している。この理由として、組織の緩みや ひび割れ発生に伴う水分の増加が、凍結する水 分の増加につながるためと考えられる。

25S はサイクル数の増加に伴い,内部・表層と もに凍結時比抵抗は緩やかに上昇し,含水率の 上昇を示しているものと考えられる。

25dは、凍結融解開始直後から、内部の凍結時 比抵抗が増加、表層の凍結時比抵抗が低下する 挙動が見られ、凍結融解が進むにつれて、その 増加と低下の傾向が逆転している。この理由の 一つとして、表層と内部での水分の移動が考え られる。内部は、始めは水分が押し込まれ凍結 時比抵抗が上がっていくが、表層の破壊にとも ない表層へと水分が移動することが考えられる。

また,組織の破壊が,水分の存在する空隙径 の大きさを変えることも考えられる。凍結融解 初期は,表層で凍結しない小さい細孔に水分が 多く浸透すると思われる。表層から組織の破壊 が始まると,微細ひび割れなどにより空隙径は 粗大化し,凍結できる水分が増える。そうして 内部の水分は凍結できる場所に移動していく。

45S,45dはともに、サイクル数の増加に伴い、 凍結時比抵抗が増加し続けている。組織の破壊 に伴い、凍結水量が増大していると考えられる。

図-9に W/C25%の融解時・凍結時比抵抗と相対動弾性係数の関係を示す。

25Sは、表層・内部ともにサイクル数の増加に 伴い、相対動弾性係数が変化せずに融解時比抵 抗が低下し、含水率が上昇しているものと考え られる。相対動弾性係数が低下し始める前から、 内部で含水状態が徐々に変化しているものと思 われる。その後、ある融解時比抵抗に達したと ころで,その値が一定のまま,相対動弾性係数 が低下している。同様に,凍結時比抵抗は増加 し,ある値に達した時点で,相対動弾性係数が 低下している。これらのことは,凍結融解作用 が初期には含水率を上昇させる効果として働き, ある限界の含水率以上になると劣化が進行する



ことを示しており,限界飽水度法の考え方に対応するものと考えられる。

25d は, 表層の融解時比抵抗の方が小さい値を 示しているが, この値がある値に低下した時点 で相対動弾性係数が低下し始めていると思われ る。内部は融解時比抵抗が大きな時点から相対 動弾性係数が低下しているが, これは表層の劣 化によるものと思われる。劣化が進むにつれて 内部の融解時比抵抗も小さくなり, 含水率が上 昇し, 劣化が進行しているものと思われる。

また,凍結時比抵抗は,先に述べた内部から 表層へ水分の移動が生じ,均一な含水状態にな って,相対動弾性係数の低下が見られる。

図-10にW/C45%の融解時・凍結時比抵抗と相 対動弾性係数の関係を示す。45dは、融解時比抵 抗が低下し、ある値に達したところで相対動弾 性係数の低下がみられる。一方、45Sは、はじめ から限界値に達していたと考えられ、融解時比 抵抗が一定のまま動弾性係数が低下している。 凍結時比抵抗は、相対動弾性係数の低下に伴い 増加しており、劣化が進行するに従って凍結で きる水分が増加していることが考えられる。ま た、45dでは、表層の凍結時比抵抗の方が内部よ



りも大きな値となっており,値に差のある状態 で相対動弾性係数が低下している。これは乾湿 繰返しで生じた含水率分布を保持したまま含水 率が上昇しているものと考えられ,乾燥で水の 抜けた細孔以外での含水率の上昇が考えられる。

4. まとめ

本研究では、以下のことが明らかとなった。 (1)本実験の乾湿繰返しでは、表層の含水状態の 変化が大きく、内部ではほとんど変化しない。 (2)組織が健全であれば、凍結時・融解時ともに、 長さ変化はほとんど生じない。組織の破壊に伴 って、凍結時の膨張および残留膨張が増加する。 (3)埋込型歪ゲージとダイヤルゲージの長さ変化 率に相関が見られ、埋め込み型歪ゲージの長さ 変化率による耐凍害性評価の可能性を得た。 (4)乾湿繰返しを行った W/C25%の non-AE コン クリートは、凍結融解時に内部から表層へ水分 移動が生じ、劣化も表層から内部へと進行する。 (5)W/C45%の non-AE コンクリートは、凍結融解 時に、乾湿繰返しで生じた含水率分布を保持し たまま、劣化が進行する。

今後は,凍結融解時のコンクリート内部の水 分移動について,更に研究を進める予定である。

参考文献

- 相川葉月ほか:実環境を考慮した乾湿繰り返しが高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No. 1, pp.899-905,2006
- 3) 鎌田英治ほか:コンクリート内部の含水率の 測定,セメント技術年報, No.30, 1976
- 3) 田畑雅幸,鎌田英治,宮崎重宗:コンク リートの耐凍害性に及ぼす乾燥の影響,セ メント技術年報, No.32, pp.365-368, 1978
- 4) 鎌田英治ほか:硬化セメントペーストの凍結 水量と凍結挙動の測定,セメント技術年報, No.33, pp.298-301, 1979

謝辞 本研究の一部は、財団法人トステム建材 産業振興財団の助成による。記して謝意を表す。