論文　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

成田　玲生奈[*1]・千歩　修[*2]・長谷川　拓哉[*3]・福山　智子[*4]

要旨：コンクリートの耐凍害性の評価方法は，JIS　A 1148 A 法に基づく促進凍結融解試験と RILEM CDC3 に規定される限界飽水度法がある。これらの試験方法は，同性状のコンクリートの場合でも試験条件が異なっており，耐凍害性に対する評価結果が異なる場合が考えられるが，実態は明らかになっていない。本研究では，水セメント比および空気量を変えたコンクリートを用いて，促進凍結融解試験と限界飽水度法を行うことにより，両者の評価結果を比較し評価結果を気泡組織，細孔構造，吸水性状との影響について検討した。その結果，促進凍結融解試験と限界飽水度法では，評価結果が一致しない場合があることなどを確認した。

キーワード：耐凍害性，凍結融解，吸水性状，細孔構造，限界飽水度

1. はじめに

寒冷地では，凍害がコンクリート構造物の耐久性上の重大な問題となる。現在，我が国では，コンクリートの耐凍害性評価に JIS A 1148 A 法に基づく促進凍結融解試験が広く用いられており，これまでにも多くの研究結果が報告されている。

また，2012 年に ISO 16204「Durability - Service life design of concrete structures」[1)]が制定され，凍害に対する耐用年数設計として，限界飽水度法に基づく手法が示されている。この 2 つの試験方法は，方法や考え方が異なっている。既往の研究[2)]では，2 つの試験方法による耐凍害性評価の比較が行われ，両者には異なる場合があることが示唆された。

本研究は，2 つの方法による耐凍害性評価に及ぼす影響要因を明らかとすることを目的としてセメント比，空気量を変えたコンクリート試験体を対象として，促進凍結融解試験（JIS A 1148 A 法）および限界飽水度法による耐凍害性評価を実施し比較検討した。

2. 実験概要

表-1 に実験計画，**表-2** に調合と基礎性状を示す。水セメント比，空気量の異なる 8 種類（W/C40%，W/C60%：目標空気量 2%，4%の各 2 調合。W/C50：目標空気量 2%，3%，4%，5%の 4 調合）のコンクリート試験体に対して

表-1　実験概要

W/C (%)	Air (%)	評価手法	評価項目	試験概要 (供試体形状)	測定項目
40 50 60	2 3※ 4 5※	促進凍結融解試験	耐久性指数 その他	JIS A 1148 A法 (75□400mm)	長さ変化・質量変化・動弾性係数・光沢度[2)]
		限界飽水度法	耐凍害性 Tpl （Scap=Scrとなる時間）	RILEM CDC3 Scr：含水状態を8段階に調整 (100φ200mm)	凍結融解による相対動弾性係数の変化
				Scap：吸水性状 (100φ30mm)	吸水曲線 (質量変化)
		その他の試験	細孔構造	JIS R 1655 (5mm角)	細孔径分布・積算細孔容積
			気泡組織	ASTM C-457 (100φ30mm)	空気量・気泡間隔係数

※W/C50%のみ作製

表-2　調合と基礎性状

種別	W/C (%)	目標空気量 (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m³)	絶対容積 (L/m³)			単位質量 (kg/m³)			混和剤 (C*%)			実測			
					C	S	G	C	S	G	AE	減水剤	助剤	sl	Air	温度	質量
5-2	50	2	47.5	180	114	326	360	360	877	961	0	0	0	19.0	2.1	25.4	19.380
5-3	50	3	46.8	180	114	316	360	360	850	961	0	0	0.0030	21.5	3.4	24.5	19.135
5-4	50	4	46.0	180	114	306	360	360	823	961	0	0	0.0075	22.0	4.4	25.0	18.865
5-5	50	5	45.1	180	114	296	360	360	796	961	0	0	0.0095	22.5	5.2	25.2	18.760
4-2	40	2	45.3	180	142	298	360	450	801	961	0	0	0	15.5	1.3	25.4	19.893
4-4	40	4	43.5	180	142	278	360	450	747	961	0	0	0.0075	19.5	4.9	25.2	18.855
6-2	60	2	48.9	180	95	345	360	300	928	961	0	0	0	24.4	2.0	24.4	19.340
6-4	60	4	47.5	180	95	325	360	300	874	961	0	0	0.0060	22.0	4.1	24.4	18.865

注) C:普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)　S:勇払産陸砂(密度2.68g/cm³,吸水率1.35%,粗粒率2.43)
S:常盤産砕石(密度2.67g/cm³,吸水率2.69%,粗粒率6.74)
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　大学院生　（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　教授・工博　（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　准教授・博（工）　（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）

実験を行った（記号例 4-2：W/C40%，空気量 2%）。

促進凍結融解試験は，JIS A 1148 A 法（水中凍結融解）に従い試験を行った。試験開始材齢は 14 日とし，試験開始材齢まで水中養生を行った。試験は， 300 サイクルまたは相対動弾性係数が 60%になるまで，約 30 サイクル毎に一次共鳴振動数，質量および試験体の長さ変化を測定した。また，銀紙光沢度法 [3]により，推定質量減少量の測定も併せて行った。

限界飽水度法では,RILEM CDC3 に従い試験を行った。限界飽水度法とは，**図-1** に示す通り，凍害が発生する限界飽水度 Scr を求め，別途行う吸水試験から得られた Scap を比較し，耐凍害性を評価する方法である。本試験では,Scr の測定のため 50℃乾燥後,真空吸水し，飽水度を 8 段階に調整した試験体を用いて，封緘状態で，凍結 18 時間（試験体中心温度-20℃以下），融解 6 時間（試験体中心温度 5℃）を 1 サイクルとして，6 サイクル後，動弾性係数の測定を行い，劣化が生じていない限界の飽水度を Scr とした。Scap は，恒温恒湿室中（20℃，60%RH）において，下面吸水試験を 14 日行い，吸水性状を測定した。ここでは，Scr-Scap=0 となる時間を Tpl（$h^{1/2}$）とし，この値を耐凍害性評価の指標とした。試験体の細孔構造を把握するため，JIS R 1655 に基づいた水銀圧入法により細孔径分布の測定を行った。材齢 101 日でモルタル部分を 5mm 角に成形し，アセトンで水和反応を停止させたものを用い，細孔分布および積算細孔容積を測定した。

また，ASTM C-457-98 に基づいたリニアトラバース法により気泡組織の観察を行い，硬化後の空気量と気泡間隔係数を求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 水セメント比が耐凍害性評価に及ぼす影響

表-3 に試験結果の概要，**図-2** に Tpl と DF（耐久性指数。以下同じ）の関係を示す。2 つの方法による耐凍害性の評価結果は，必ずしも一致していないことがわかる。特に 6-2，6-4 の評価結果は一致しなかった。

図-3 に水セメント比と DF の関係，**図-4** に水セメン

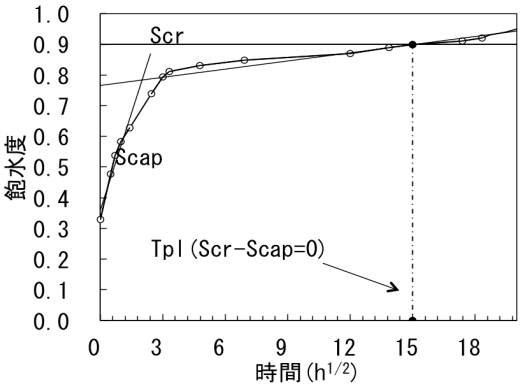

図-1　限界飽水度法の概要

表-3　試験結果概要

記号	JIS A1148			限界飽水度法				水銀圧入試験	リニアトラバース試験		推定耐久性指数
	DF	W117 (%)	Sms177 (%)	Scr	初期吸水速度 (/h1/2)	14日飽水度	Tpl(h1/2)	PV (×10-2mL/g)	気泡間隔係数 (μm)	空気量 (硬化後)(%)	DF`
5-2	41	4.8	2.6	0.88	0.229	0.95	11.1	4.38	546	2.6	31
5-3	73	4.0	2.2	0.91	0.212	0.88	22.0	5.10	365	3.4	28
5-4	64	3.9	3.3	0.94	0.216	0.84	28.3	5.45	354	3.1	25
5-5	51	5.8	3.6	0.93	0.271	0.89	24.4	5.86	374	5.2	31
4-2	51	1.8	1.3	0.95	0.246	0.96	17.5	2.84	441	2.0	46
4-4	72	1.6	1.3	0.92	0.225	0.85	27.7	4.68	478	3.9	32
6-2	20	7.2	3.2	0.93	0.334	0.92	22.1	5.53	358	2.6	24
6-4	16	10.9	12.1	0.92	0.358	0.87	28.8	5.99	374	3.5	25

DF：耐久性指数　W117：177サイクル時の質量減少率　Sms117：側面の177サイクルでの推定質量減少率
Tpl：Scr-Scap=0となるまでに要する時間　PV：178~10000Åの細孔量*100(10-2ml/g)
DF`：推定耐久性指数(式(1)による)

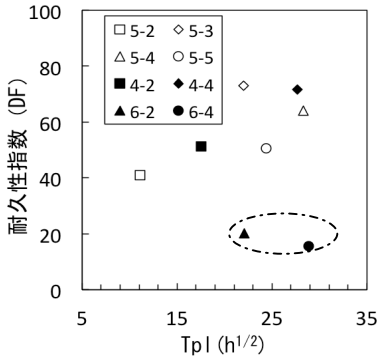

図-2 Tpl と耐久性指数の関係

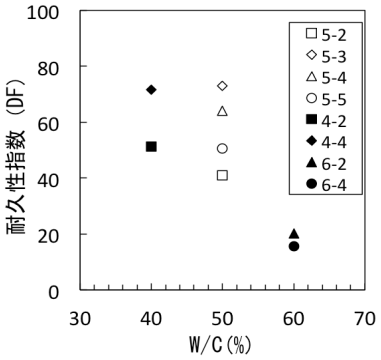

図-3　W/C と耐久性指数の関係

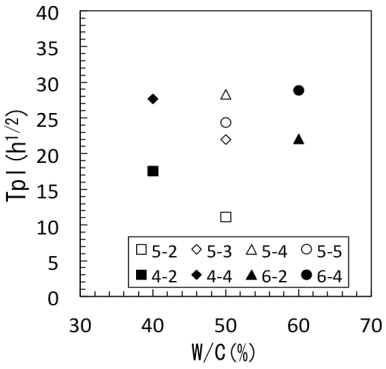

図-4 W/C と Tpl の関係

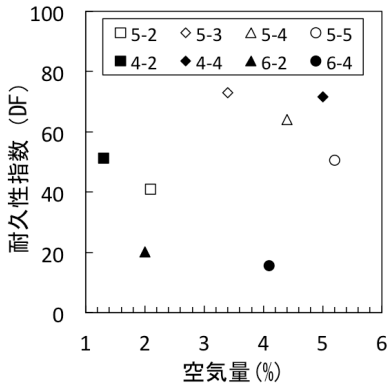

図-5　空気量と耐久性指数の関係

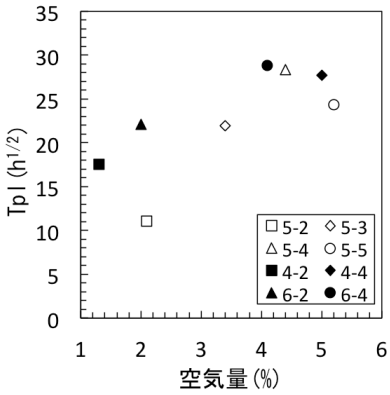

図-6　空気量と Tpl の関係

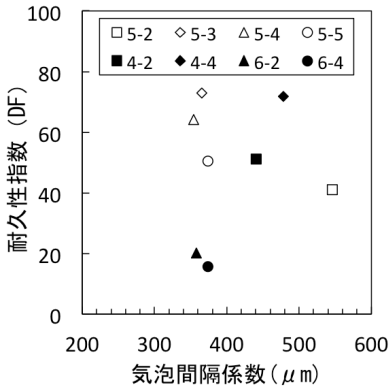

図-7　気泡間隔係数と耐久性指数の関係

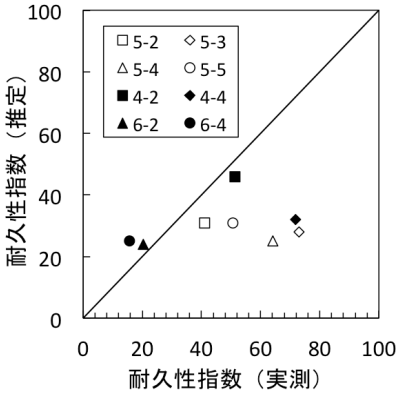

図-8　耐久性指数の推定値および実測値の関係

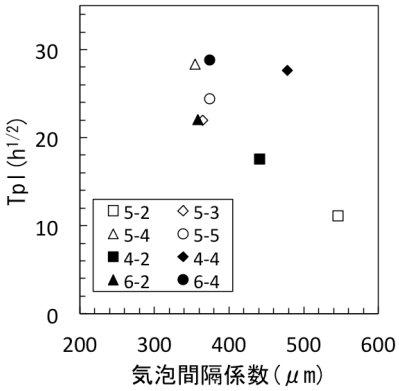

図-9　気泡間隔係数と Tpl の関係

ト比と Tpl の関係を示す。促進凍結融解試験では，一般に，水セメント比が小さく，空気量が増加するに伴い DF が大きくなる傾向を示すことが知られている[4]が,本実験でも水セメント比が小さくなると DF が増加する傾向が確認できた。また，水セメント比と Tpl は明確な傾向がみられなかった。

3.2 気泡組織・細孔構造が耐凍害性評価に及ぼす影響

図-5 に空気量（圧力法による。以下同じ）と DF の関係，**図-6** に空気量と Tpl の関係を示す。空気量と DF の関係は明確な傾向がみられなかった。空気量 3%付近は耐久性指数が変化する推移域とされ[5]，空気量の差による耐久性指数の変化が大きい範囲だったことが一因と考えられる。一方，空気量と Tpl の関係では，ばらつきはあるが，空気量が大きくなると，Tpl が大きくなる傾向がみられた。このことから，Tpl は空気量の影響を大きく受けると考えられる。

ここで，一般にコンクリートの耐凍害性は，導入された空気泡の影響が大きいとされている。**図-7** に気泡間隔係数と DF の関係を示す。両者には明確な傾向がみられなかった。耐凍害性が高いとされる気泡間隔係数は250μm程度以下[4]とされているが,今回の結果では,全ての調合において 350μm 以上となった。この原因として， DF が全般的に低いことから，今回の試験体では耐凍害性に有効な空気泡が十分でなかったと考えられる。

鎌田ら[6]は半径 178～10000Å（17.8nm～1000nm）の細孔量が nonAE コンクリートの耐凍害性との相関性が高いとしており，これを用いた耐久性指数の推定式として式(1)を提案している。ここで，式（1）の推定値が実測値に近ければ耐凍害性は細孔構造に依存していると考えられる。

各試験法で細孔構造と気泡組織の影響を検討するため，全ての試験体について式（1）を適用し，推定した耐久性指数を求めた。

$$\log(DF^{`})=-0.317-1.209\log(PV)+1.799A/P \qquad (1)$$

$DF^{`}, PV$：表-3 と同じ

A/P：空気量ペースト比

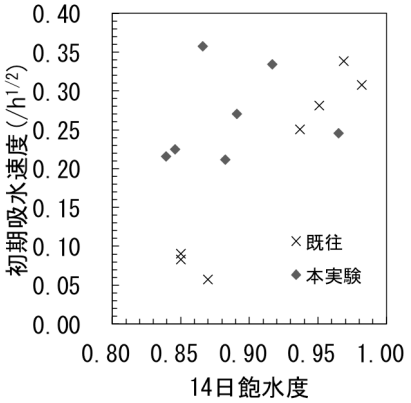

図-10　14 日飽水度と初期吸水速度の関係

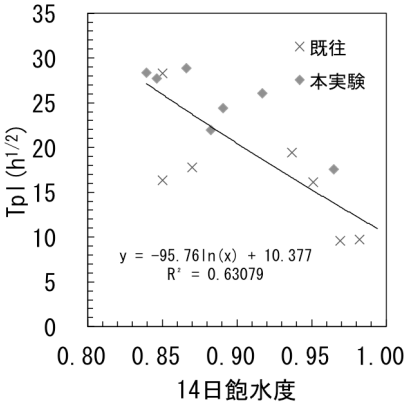

図-11　14 日飽水度と Tpl の関係

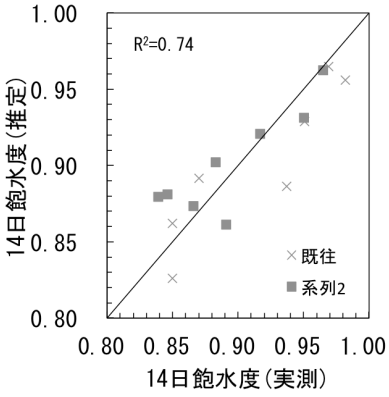

図-12　14 日飽水度の実測値と推定値の関係

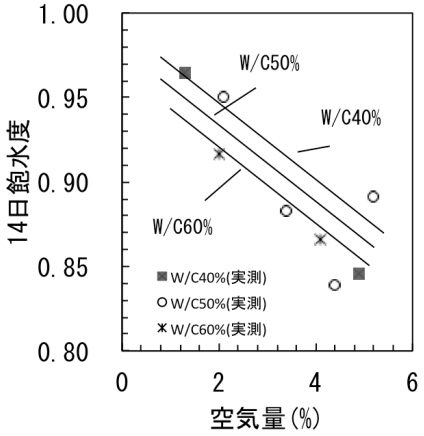

図-13　水セメント比別の 14 日飽水度の実測値と推定値の比較

式 (1) を用いて求めた耐久性指数の推定値と今回の実測値との関係を**図-8** に示す。5-3, 5-4, 4-4 を除き，概ね両者は一致する傾向を示した。一致した試験体の耐凍害性は，細孔構造に依存していると考えられる。推定値よりも実測値の方が大きかった 5-3，5-4，4-4 は，気泡組織の影響が大きかったと考えられる。6-2, 6-4 は細孔構造に依存し気泡組織の影響が小さく，耐凍害性に有効な気泡が十分でなかったため，DF が小さかったと考えられる。

図-9 に気泡間隔係数と Tpl の関係を示す。気泡間隔係数が大きくなると Tpl が小さくなる傾向があるように思われる。気泡間隔係数が 360μm 前後のものが多い結果となっており，これらは空気量の多い試験体（**図-6** 参照）となっている。このことから，空気量の多い試験体で Tpl が大きくなったものと考えられる。

3.3 限界飽水度法における吸水性状に及ぼす空気量の影響

前節から，空気量の多い試験体で Tpl が大きい傾向がみられた。ここでは空気量が吸水性状に及ぼす影響について検討する。

表-4　14 日飽水度の重回帰分析結果

	変数			
	切片	W/C	空気量(%)	初期吸水速度(/h$^{1/2}$)
説明変数の係数	0.9542	0.34521	-0.02238	-0.00129
t値	12.53876	3.30253	-3.76758	-0.85773

図-10 に 14 日飽水度と初期吸水速度の関係を，**図-11** に 14 日飽水度と Tpl の関係を示す。ここでは，本実験で得たデータに加えて，既往の実験[7)8)]で得られたデータもあわせて用いている。**図-10** より，ばらつきが大きいが，初期吸水速度が大きくなると 14 日飽水度も大きくなる傾向があると考えられる。14 日飽水度が大きいものは吸水しやすいと考えられる。また，**図-11** より 14 日飽水度が大きくなると Tpl は小さくなる傾向がみられた。これは，14 日飽水度が大きくなると，限界飽水度に到達するまでの時間が短くなることを示している。

ここで，14 日飽水度に及ぼす影響要因として，水セメント比，空気量および初期吸水速度をとりあげ，これらを説明変数とした重回帰分析を行った。結果を**表-4** に示す。t 値より，14 日飽水度には，空気量の影響が大きく，次に水セメント比の影響が大きいことがわかる。重回帰分析から 14 日飽水度の予測式として式 (2) が求められる。

$$S_{14}=0.345W/C-0.0224AIR-0.00129D+0.9542 \qquad (2)$$

ここで，S_{14}：14 日飽水度

W/C：水セメント比(%)

AIR：空気量(%)

D：初期吸水速度（/h$^{1/2}$）

14 日飽水度の実測値と式(2)による推定値の関係を**図-12** に示す。両者には比較的高い相関が見られたこ

とから,これらの変数を用いて 14 日飽水度の予測ができる可能性があるといえる。

水セメント比毎に空気量が変化した場合の 14 日飽水度の実測値と推定値の関係を**図-13** に示す。ばらつきが大きいものもあるが、概ね推定値は実測値に近いものとなった。また、全ての水セメント比で空気量が大きくなると 14 日飽水度が小さくなる傾向が確認できた。このことから，限界飽水度法においては，空気量が大きくなると 14 日飽水度が小さくなり,限界飽水度に到達するまでの時間 Tpl が長くなり，耐凍害性が高いという評価となるといえる。

図-2 で評価が異なる結果となった 6-2，6-4 では，DF においては耐凍害性に有効な気泡が十分でなかったことが考えられるが，Tpl においては空気量が確保されていると，耐凍害性が高いという評価となったと考えられる。このことから、限界飽水度法では気泡組織よりも空気の量の影響が大きい可能性が考えられる。このため，気泡組織の影響が大きい凍害メカニズムが作用する場合は，限界飽水度法による耐凍害性評価は適切でない場合も考えられる。

本検討では，実験室実験での耐凍害性評価について検討したが，実環境下での耐凍害性評価は実験室実験とは異なることが考えられる。実環境下における長期的なデータを蓄積し，促進凍結融解試験と限界飽水度法による耐凍害性評価の違いについて検討する必要があると思われる。

4. まとめ

促進凍結融解試験（JIS A 1148 A 法）および限界飽水度法による耐凍害性評価を実施し，2 つの方法による評価を検討した結果，以下の知見を得た。

(1) 促進凍結融解試験で低い耐凍害性と評価された場合でも，限界飽水度試験では高い耐凍害性と評価される場合がある。

(2) 促進凍結融解試験では、空気量による違いはあるが,W/C が小さくなると高い耐凍害性を示す傾向が確認できた，限界飽水度法では W/C の影響は明確でなかった。

(3) 限界飽水度試験における 14 日飽水度は空気量の影響が大きい。

謝辞

本研究に際して，実験にご協力頂いた本研究室の岩井氏，鯉江氏へ心から謝意を表します。

参考文献

1) International Organization for Standardization:ISO 16204 Durability－Service life design of concrete structures, 2012

2) 長谷川　拓哉ほか：コンクリートの凍害を対象とした限界飽水度法と JIS A1148A 法の試験結果に基づく耐用年数の比較，コンクリート工学年次論文集，No.36，pp.1018-1023，2014.7

3) 長谷川　拓哉ほか：骨材種類が光沢度計によるスケーリング量推定結果に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1175-1176，2014.10

4) 長谷川　寿夫，藤原　忠司ほか：コンクリート構造物の耐久性シリーズ・凍害，技報堂出版，1988

5) W. A. Corden, D. Merrill：Requirements for Freezing － and － Thawing Durability for Concrete, Proc.ACI, Vol.63, pp.1026-1036, 1963

6) 鎌田 英治ほか:コンクリートの耐凍害性に及ぼす細孔構造の役割についての統計的解析，日本建築学会構造系論文集，第 487 号，pp.1-9，1996.9

7) 浜　幸雄ほか：乾燥の影響と吸水性状を考慮したコンクリートの耐凍害性の評価方法，セメント・コンクリート論文，No.57，pp.266-272，2003

8) 満渕　えりほか：限界飽水度法を用いたコンクリートの凍害予測手法の検討，セメント・コンクリート論文，No.59，pp.272-277，2005