

論文 コンクリートの凍害を対象とした限界飽水度法と JIS A 1148 A 法の試験結果に基づく耐用年数の比較

長谷川 拓哉*1・千歩 修*2・福山 智子*3

要旨 : 2012年に定められた ISO 16204 では、凍害を対象に限界飽水度による耐用年数設計方法が規定されている。この方法と、従来の JIS A 1148 A 法に基づく耐用年数は、考え方が異なり同じ条件で比較ができない。そこで本研究では両方の試験を行ったコンクリートの実験結果に基づき、両方の方法に基づく耐用年数の比較検討を行った。その結果から、A 法に基づく耐用年数の限界状態を限界飽水度法の凍害発生確率として表現する方法を提案した。

キーワード : 凍害, 限界飽水度, JIS A 1148, 耐用年数

1. はじめに

2012年に ISO 16204「Durability - Service life design of concrete structures」¹⁾が定められた。この ISO では、中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリ骨材反応などの劣化要因ごとにコンクリート系構造物の「Service life design (耐用年数設計)」の手法が示されている。凍害に対する耐用年数設計では、限界飽水度法に基づく手法が示されている。ここで、限界飽水度法とは、材料が凍結融解で劣化する限界の飽水度 (Scr) を求め、材料の吸水性状 (Sact) とを比較し、耐凍害性を評価するものである。ISO 16204 では、確率論的方法が採用されており、Sact が Scr を超えない確率が、目標とする確率を超えないことを、耐用年数を決定する限界状態としている。

一方、日本においては、ASTM C 666 をベースにした JIS A 1148 A 法によって、コンクリートの耐凍害性が評価されていることが多い。この試験方法に基づく耐用年数予測手法として、ASTM 相当サイクル数²⁾、基準化凍結融解サイクル数³⁾などの方法が提案されている。これらの方法の限界状態は、コンクリートの相対動弾性係数の低下 (例えば 60%) によって規定されている。

このように ISO 16204 と JIS A 1148 の試験結果に基づく耐用年数では、手法と考え方が異なり、同じ条件で比較ができない。そこで、本検討では、限界飽水度法と JIS A 1148 の試験結果に基づく耐用年数の比較検討を行い、両者の耐用年数の位置づけを明らかにすることを目的としている。

2. 検討の前提条件

2.1 JIS A 1148 A 法の試験結果を耐用年数予測に用いるにあたっての仮定

JIS A 1148 A 法 (以下「A 法」)) の結果は、実環境下で

の劣化との対応が明らかではなく、実環境に比べ厳しすぎるという意見がある。Fagerlund は、従来の促進凍結融解試験 (ASTM C 666 など) の結果からは、実構造物の耐用年数予測が困難であると指摘している⁴⁾。理由として、試験条件のわずかな違いによって結果が大きく異なることがあげられている。ASTM, JIS の適用範囲では、これらはコンクリートの相互比較のための試験として位置づけられている。また、別の理由として、これらの試験方法は、含水状態によって劣化に偏りが生じることも問題としている。

ここでは、これらの指摘に対し、検討の前提として、以下の仮定をおくこととした。

- (1)規格に従い、厳密な試験条件の管理の下で注意深く試験が行われるのであれば、結果は一定の範囲内におさまリ、十分な再現性を有している。
- (2)促進凍結融解試験では、相対動弾性係数として、試験体全体を平均化して評価していることから、「ポテンシャルとしての耐凍害性」を評価する上では、均質と考える。
- (3)「ポテンシャルとしての耐凍害性」によって、実構造物のコンクリートの耐凍害性を評価できる。

「ポテンシャルとしての耐凍害性」とは、コンクリートが潜在的に有する凍害に対する抵抗性を意味しており、A 法は、最も厳しい条件での凍結融解作用で評価していることになり、この「ポテンシャルとしての耐凍害性」を評価していると考えられることができる。

これらの仮定を証明する上では、多くのデータが必要であり、今後の課題と考えられる。

2.2 本検討で対象とする限界飽水度法

ISO 16204 では、塩分が存在する場合としない場合において、確率論的手法と、部分係数法、見なし規定 (仕様規定) 等が規定されているが、ここでは塩分がない場

*1 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 博士 (工学) (正会員)

*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 工学博士 (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・助教 博士 (工学) (正会員)

合の確率論的手法を対象とする。凍害の限界状態は、コンクリートの部分（温度及び含水率の勾配ができない大きさの要素。以下「セル」と呼称）を対象に、式(1)のように規定されている。

$$p\{t\} = p\{T(t < t_{SL}), Scr - Sact(t < t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad (1)$$

ここに、 $p\{t\}$ ：凍害発生確率、 Scr ：限界飽水度、 $Sact(t)$ ：その時点の飽水度、 $T(t)$ ：その時点のコンクリート温度（℃）、 t_{SL} ：設計耐用年数（年）、 p_0 ：目標とする凍害発生確率

具体的な方法については、fib のモデルコード「Model Code of Service Life Design」⁵⁾などを参考とすることとされており、本検討でもその方法によることとした。このモデルコードでは、 Scr は、RILEM CDC3 と同じ方法が想定されており、真空飽水させたコンクリートを乾燥により飽水度を調整し、封緘状態で凍結融解を行い、その劣化の有無から限界飽水度を決定するものである。 $Sact$ は、吸水試験の結果から式(2)により記述されるとしている。

$$Sact(t < t_{SL}) = S_n + e \times t_{eq}^d \quad (2)$$

ここに、 t_{eq} ：等価吸水時間（日）、 S_n ：Nick-point（図-3 参照）の飽水度、 e, d ：実験から求まる定数（ d は短期間の吸水試験では 0.5、長期間では $d < 0.5$ となる）

等価吸水時間（Equivalent time of wetness）とは、実環境における飽水度が吸水試験から得られる式(2)で表される吸水曲線の何日に相当するかを表したものである。

これらの結果から、 $Scr, Sact$ が正規分布などに従うとして、 $Sact$ が Scr を超える確率を求めることとされている。ただし、目標とする凍害発生確率については、明確な定めはなく、その設定は設計者などに委ねられていると考えられる。

なお、以下の記号として、実環境における吸水性状の場合を $Sact$ 、実験室の吸水試験による吸水性状は $Scap$ と呼称する。

3. 実験の概要

実験計画を表-1 に示す。本実験では $Scr, Scap$ を求める試験を行うとともに、A 法による凍結融解試験を行った。表-2 にコンクリートの調合及び基礎性状を示す。W/C50%とし、nonAE と AE の 2 調合とした。全ての試験体は 2 週水中養生後に試験に供した。 Scr 決定のための限界飽水度試験では、 $10\phi \times 20cm$ の円柱試験体を $50^\circ C$ 乾燥後真空吸水し、その後飽水度を 15 段階に調節し、封緘状態で 6 サイクルの気中凍結融解($-18^\circ C \sim 5^\circ C$, 1 日 1

サイクル)を行った。 Scr は凍結融解後の動弾性係数から劣化の有無を判断し定めた。 $Scap$ 決定のための吸水性状試験は、 $10\phi \times 3cm$ の試験体を 3 日間 $50^\circ C$ 乾燥後、RILEM CDC3 に基づいて 14 日間の下面吸水試験を行った。水中凍結水中融解試験は、JIS A 1148 A 法に従い、 $7.5 \times 7.5 \times 40cm$ 試験体を用いて、相対動弾性係数、質量変化率、長さ変化率の測定を行った。なお、nonAE は、プレーンコンクリートであるが、空気量は 2.5%と多い結果となった。これは細骨材などの影響により、巻き込んだ空気量が多かったものと考えられる

4. 実験結果および考察

4.1 JIS A 1148 A 法試験結果

図-1 に A 法による凍結融解試験結果を示す。nonAE よりも AE の方が耐凍害性が高く、それぞれ耐久性指数は 29.1, 83.5 となった。

4.2 Scr および Scap の算定結果

限界飽水度法に関する各試験結果の一覧を表-3 に示す。図-2 に Scr 決定のための凍結融解試験結果を示す。 Scr は nonAE で 0.93, AE で 0.90 となり、AE の Scr が低

表-1 実験計画

W/C(%)	空気量(%)	試験項目	試験の概要(試験体形状)
50	1 4.5	Scr	含水率調整後、凍結融解を実施し、相対動弾性係数の測定結果から限界飽水度を算定($10\phi \times 20cm$)
		Scap	RILEM CDC3に規定された吸水性状試験により、飽水度の測定($10\phi \times 3cm$)
		JIS A 1148 A法による耐凍害性	JIS A 1148 A法により、質量減少率、動弾性係数、長さ変化率の測定($7.5 \times 7.5 \times 40cm$)

表-2 使用したコンクリートの調合および基礎性状

種別	W/C (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)			絶対容積 (L/m ³)			AE剤 (C×%)	空気量 (%)	スランプ (cm)	圧縮強度 (N/mm ²)	
			C	S	G	C	S	G					
nonAE	50	47.7	185	370	882	961	117	328	360	0	2.5	19	36.7
AE		44.9	185	370	788	961	117	293	360	0.0055	4.2	20.5	28.6

注) C: 普通ポルトランドセメント(密度 $3.16g/cm^3$)
S: 錫岡産陸砂(表乾密度 $2.69g/cm^3$, 吸水率 1.25% , 粗粒率 2.30)
G: 常盤産砕石(表乾密度 $2.67g/cm^3$, 吸水率 2.43%)
AE剤: 変性ロジン酸化合物系

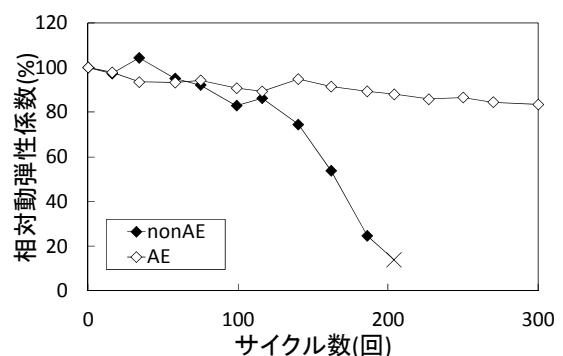


図-1 凍結融解試験 (A 法) 結果

い結果となった。Scap の試験結果を図-3 に示す。本実験においては、Scap は nonAE と AE では大きな違いはなかった。限界飽水度との関係を図-3 中に示す。限界飽水度に早く到達する方が耐凍害性は低いという評価となる。今回の結果では AE の耐凍害性の方が低い評価となり、A 法による評価とは異なる結果となった。真空吸水が不十分であったこと等の実験の不備が原因とも考えられるが、評価している凍害のメカニズムが異なることも考えられ、今後の詳細な検討が必要と考えられる。以下、この実験結果に基づくため、限界飽水度法に基づき算定した耐用年数は AE の方が nonAE よりも短い結果となり、一般的な知見と異なっている。以下、コンクリート種類ごとに耐用年数の比較を行うものとする。

4.3 A 法による耐用年数評価

A 法による耐用年数として ASTM 相当サイクル数²⁾を算定した。ここでは気象庁が発表している平年値（統計期間：1980～2010 年）を用いて、各地点の ASTM 相当サイクル数を算定するとともに、前節で示したコンクリートの耐用年数を算定した。なお、算定にあたっては次の条件とした。

- ①対象とする部材は水平部材、日射があたり、常に水と接した条件で凍結融解作用を受ける（水中凍結水中融解の条件）。
- ②1回の凍結融解の条件を、凍結：日最低気温が-1.0℃以下、融解：日最高気温が0℃以上、とする。
- ③真冬日が連続する期間の最低温度は、その期間の最も低い日最低気温を用いる。

結果を表-4 に示す。あわせて日最低気温の平滑平年値の極値も示している。なお、ASTM 相当サイクル数が0と算定された地点はここでは示していない。この結果より、今回の nonAE は寒冷地では10年～20年程度、AE では30～40年度で明確な劣化を示すと考えられる。

4.4 限界飽水度法による耐用年数評価

限界飽水度による耐用年数評価を行う上で、地域による差をどのように考慮するかが問題となる。ここでは、Scr は温度に依存していることから、温度による Scr の違いによって表現することとした。温度による Scr の変化は、データが不足しており明らかではないが、凍結水量が影響することが指摘されている⁴⁾。ここでは本実験で Scr 決定時の凍結融解時の最低温度（-20℃）と他の温度との飽水状態における凍結水量の差分だけ Scr が変化すると仮定した。桂ら⁶⁾が算定した凍結水量の算定手法を用い、Scr と最低温度の関係を計算した結果を図-4 に示す。Scr は、0℃から-15℃までで0.03程度低下しており、既往の文献⁴⁾において、実環境において0.03程度の変化が想定されていることから、概ね妥当な値と考えられる。

日最低気温の平滑平年値の極値と図-4 の関係から、そ

表-3 限界飽水度法の試験結果

コンクリートの種類	吸水性試験				限界飽水度試験 Scr
	初期吸水速度 (1/h ^{1/2})	14日後飽水度	Nick point 飽水度 時間(h ^{1/2})		
nonAE	0.092	0.85	0.80	4.18	0.93
AE	0.090	0.85	0.82	4.51	0.90

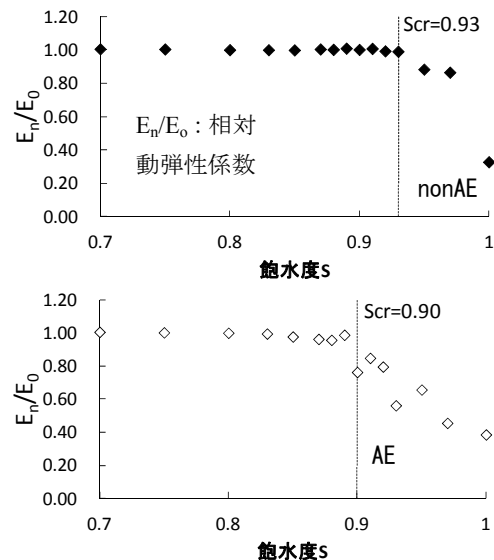


図-2 限界飽水度 Scr の算定結果

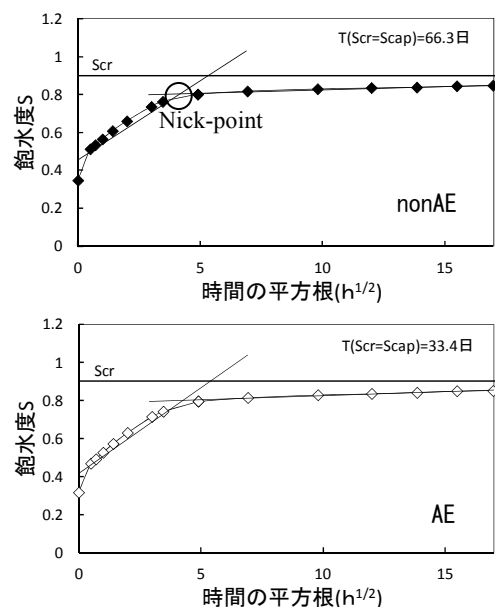


図-3 吸水試験結果 (Scap)

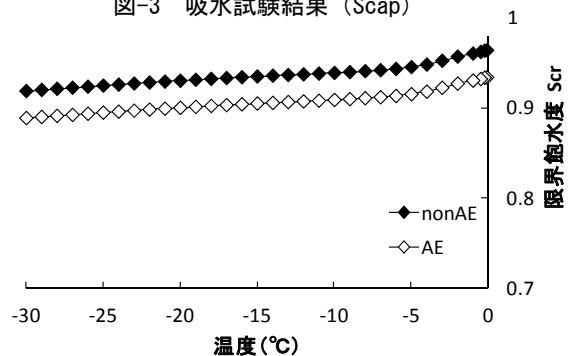


図-4 温度と算定した限界飽水度 Scr の関係

表-4 ASTM相当サイクル数および限界飽水度に基づく耐用年数

地点番号・名	日最低気温の平滑年値の極値	ASTM相当サイクル数 (回/年)		ASTM相当サイクル数による耐用年数(年)				限界飽水度法によるポテンシャルの耐用年数(日)	
		Ra ₉₀	Ra ₆₀	nonAE		AE		nonAE	AE
				劣化の兆候	明確な劣化	劣化の兆候	明確な劣化		
47401 稚内	-7.8	4.6	10.5	12.0	15.4	6.1	49.5	76.9	39.8
47402 北見枝幸	-10.4	8.4	16.7	6.6	12.7	11.2	35.0	74.4	38.3
47404 羽幌	-10.0	14.6	26.7	3.8	14.3	19.4	33.1	74.6	38.5
47405 雄武	-12.8	13.3	24.3	4.2	13.7	17.7	32.7	72.3	37.2
47406 留萌	-8.8	13.7	25.8	4.1	13.9	18.1	32.8	75.5	39.2
47407 旭川	-13.5	15.2	26.6	3.7	14.6	20.2	33.4	71.6	36.8
47409 網走	-10.8	10.6	20.3	5.2	12.9	14.1	33.0	73.6	38.1
47411 小樽	-6.7	12.7	25.6	4.4	13.5	16.9	32.7	77.4	40.7
47412 札幌	-7.5	15.9	29.7	3.5	14.9	21.1	33.7	76.4	40.1
47413 岩見沢	-10.3	13.8	25.0	4.0	13.9	18.3	32.9	73.8	38.4
47417 帯広	-14.5	26.4	40.5	2.1	21.0	35.0	42.6	70.4	36.4
47418 釧路	-11.4	27.7	44.7	2.0	21.9	36.9	44.1	72.8	37.8
47420 根室	-8.3	10.8	21.8	5.1	12.9	14.4	32.9	75.2	39.5
47421 寿都	-5.4	10.3	22.5	5.4	12.8	13.7	33.1	78.3	42.1
47423 室蘭	-4.8	11.0	24.3	5.0	13.0	14.7	32.8	79.0	43.0
47424 苫小牧	-9.0	30.0	50.0	1.9	23.4	39.9	46.6	74.4	39.1
47426 浦河	-6.7	24.2	44.4	2.3	19.6	32.1	40.4	76.4	40.7
47428 江差	-4.0	10.6	24.6	5.3	12.9	14.1	33.0	79.9	44.4
47430 函館	-6.8	25.2	45.8	2.2	20.3	33.5	41.4	76.1	40.6
47433 倶知安	-10.9	16.8	29.2	3.3	15.3	22.3	34.2	72.6	38.1
47435 紋別	-10.5	10.2	19.8	5.4	12.8	13.6	33.2	72.8	38.3
47440 広尾	-10.8	24.2	40.1	2.3	19.6	32.1	40.4	72.5	38.1
47512 大船渡	-3.2	7.6	19.1	7.3	12.8	10.1	36.5	80.5	46.7
47520 新庄	-4.7	14.7	31.4	3.8	14.3	19.5	33.2	77.9	43.1
47570 若松	-4.1	11.6	25.9	4.8	13.1	15.4	32.7	78.6	44.2
47574 深浦	-3.1	7.0	18.0	8.0	13.0	9.3	38.0	80.1	47.0
47575 青森	-4.5	13.1	28.9	4.2	13.7	17.5	32.7	77.7	43.5
47576 むつ	-5.9	20.4	39.5	2.7	17.4	27.1	36.9	76.1	41.4
47581 八戸	-4.8	14.4	30.5	3.9	14.2	19.1	33.0	77.2	43.0
47582 秋田	-2.9	6.4	16.9	8.6	13.3	8.6	39.7	79.7	47.6
47584 盛岡	-6.2	20.8	39.8	2.7	17.6	27.7	37.3	75.5	41.1
47585 宮古	-4.5	12.7	27.9	4.4	13.5	16.8	32.7	77.2	43.5
47587 酒田	-1.5	1.8	5.9	31.5	32.8	2.3	115.9	82.3	51.7
47588 山形	-3.9	10.4	24.1	5.3	12.8	13.8	33.1	77.6	44.7
47590 仙台	-2.2	3.4	9.9	16.5	18.9	4.5	63.8	80.1	49.9
47592 石巻	-3.0	6.3	16.4	8.8	13.3	8.4	40.1	78.6	47.3
47595 福島	-2.2	3.6	10.4	15.5	18.1	4.8	60.6	79.7	49.9
47597 白河	-4.1	11.6	26.2	4.8	13.1	15.3	32.7	76.9	44.2
47610 長野	-4.8	13.3	28.5	4.2	13.7	17.7	32.7	75.4	43.0
47612 高田	-1.3	1.1	4.0	49.2	50.1	1.5	178.9	79.5	52.2
47617 高山	-6.0	19.0	37.0	2.9	16.6	25.3	35.8	74.0	41.3
47618 松本	-5.9	18.9	37.0	2.9	16.5	25.1	35.7	74.0	41.4
47620 諏訪	-6.8	21.4	39.7	2.6	18.0	28.5	37.8	73.3	40.6
47622 軽井沢	-9.6	43.0	67.7	1.3	32.1	57.1	61.8	71.0	38.8
47624 前橋	-1.2	0.7	2.5	80.5	80.9	0.9	290.7	78.6	52.4
47629 水戸	-2.5	4.5	12.4	12.4	15.6	6.0	50.7	76.7	48.9
47637 飯田	-4.2	10.5	24.0	5.3	12.8	14.0	33.0	74.7	44.1
47638 甲府	-2.6	4.5	12.2	12.4	15.6	6.0	50.5	76.1	48.6
47639 富士山	-22.7	8.0	15.3	7.0	12.7	10.6	35.8	57.2	31.8
47640 河口湖	-6.8	22.7	41.8	2.5	18.7	30.1	39.0	72.4	40.6
47641 秩父	-4.4	12.5	27.0	4.4	13.4	16.6	32.6	74.2	43.7
47646 館野	-3.5	7.9	19.1	7.0	12.7	10.5	35.9	74.9	45.9
47649 上野	-1.5	1.2	4.3	44.6	45.5	1.7	162.3	76.6	51.7
47690 日光	-8.7	25.5	44.0	2.2	20.5	33.8	41.7	68.9	39.3
47756 津山	-2.2	3.4	10.1	16.3	18.7	4.5	63.2	73.4	49.9
47814 日田	-1.0	0.2	0.8	257.6	257.7	0.3	928.2	72.7	52.9
47818 雲仙岳	-1.6	1.1	3.5	53.0	53.7	1.4	192.3	72.0	51.5
47821 阿蘇山	-5.3	14.3	30.0	3.9	14.2	19.0	33.0	68.7	42.2

注) Ra₉₀: 気象データから求めた相対動弾性係数が90%になる時の ASTM 相当サイクル数。Ra₆₀: 同じく60%となる時の ASTM 相当サイクル数

の地点で使用する限界飽水度 Sc_r を算定し、図-3 の Scap からこの Sc_r に到達する期間を求めた結果を表-4 中に示す。この期間は、そのコンクリートが常に水と接している条件で、Scap 算定のための吸水試験と同じ条件で吸水

が続いた場合に Sc_r に到達する期間を意味しており、その条件でのポテンシャルの耐用年数 (Potential service life) ⁴⁾ として定義されるものである。

限界飽水度法によるポテンシャルの耐用年数と ASTM

相当サイクル数の劣化の徴候が現れる年数（相対動弾性係数が90%となる年数）の関係を図-5に示す。温度が比較的高いところでは両者の評価は一致しているといえるが、低くなると評価が異なる傾向が伺える。これは、ASTM相当サイクル数が、温度が低い場合は凍結持続時間が長くなるため凍結融解回数が少なくなるため、小さく評価されることが原因と考えられる^{2),7)}。

5. 限界飽水度法における A 法による耐用年数の位置づけの検討

限界飽水度法と A 法による耐用年数算定の違いは、その耐用年数とする限界状態が異なることがあげられる。限界飽水度法による耐用年数は、コンクリートの飽水度が限界飽水度に到達する時点限界状態ととらえており、劣化開始時点限界状態としている。一方、A 法による耐用年数は、劣化開始時点からはじまり、相対動弾性係数がある値（例えば60%）となる時点限界状態としている。その意味で、限界飽水度法の耐用年数は、A 法による耐用年数の前段階を評価していると考えられる。

ここで、式(1)では目標とする凍害発生確率 p は定められていない。限界飽水度による評価は、A 法による評価の前段階と考えると、A 法による評価の限界状態（劣化の徴候、明確な劣化）は、凍害発生確率の違いとして表現が可能といえる。

概念図を図-6に示す。Scr と Sact は正規分布に従う分布をもって推移すると仮定すると、Scr に Sact が経年によって近づくことでその凍害発生確率は上がっていくことになる。Scr と Sact がちょうど重なった時点は、凍害発生確率が50%となることを意味している。Sact が Scr を超えると、劣化が進行し、ある時点で劣化の徴候（＝

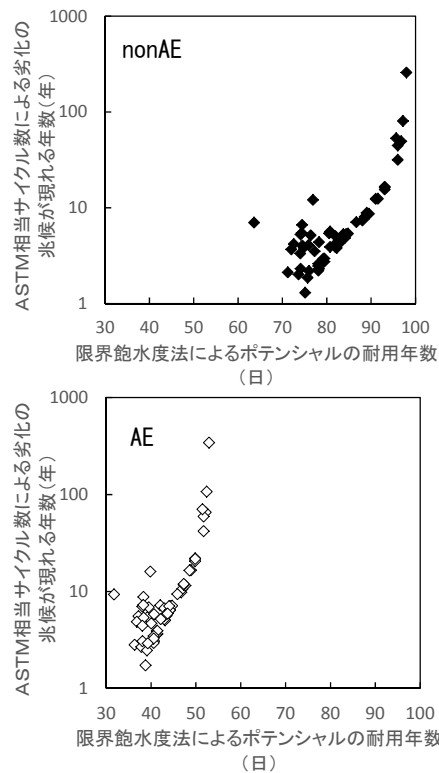


図-5 限界飽水度法による耐用年数と ASTM 相当サイクル数による劣化の徴候が現れる年数の関係

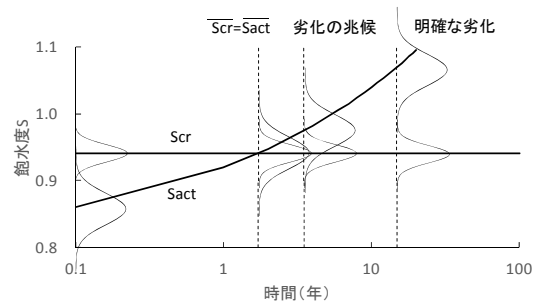


図-6 限界飽水度法の耐用年数における A 法による耐用年数の限界状態に関する概念図

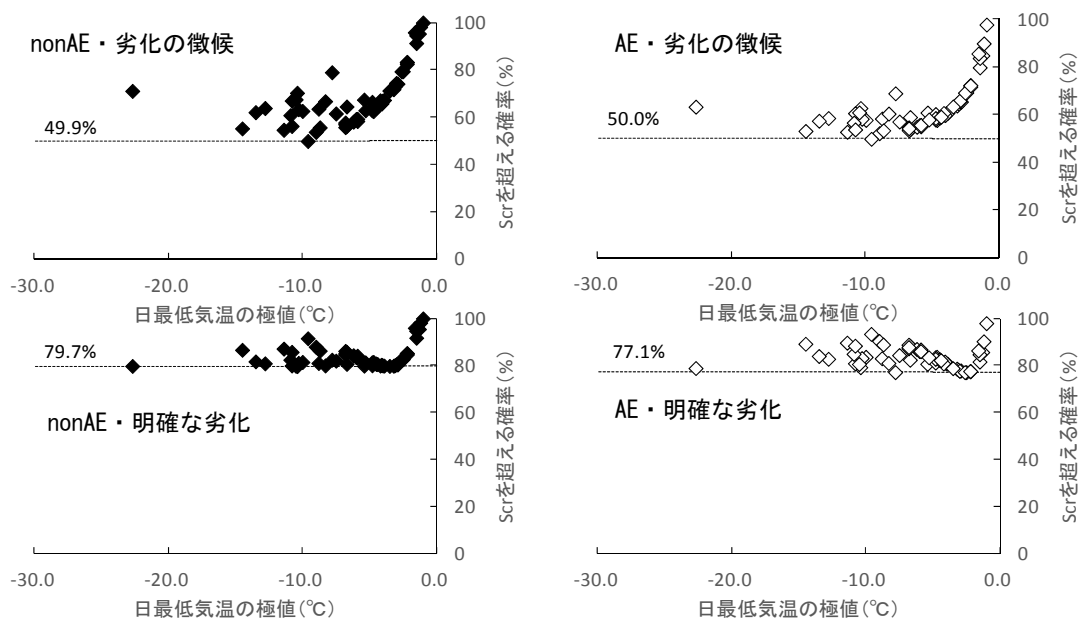


図-7 劣化の徴候および明確な劣化を示す年数における Scr を超える確率

相対動弾性係数 90%) を示し、さらに進行すると明確な劣化 (=相対動弾性係数 60%) を示すことになる。ASTM 相当サイクル数によって求めた劣化の徴候と明確な劣化を示す時点の凍害発生確率を算定することで、劣化状況と凍害発生確率を結びつけることが可能となる。

本実験結果による表-4 の各地点における算定例を図-7 に示す。なお、Scr は経年によって変化しないものと仮定した。Sact は、式(2)における係数 d は既往の文献⁴⁾より 0.3 とし、図-3 の結果を最小自乗法によって係数 e を求めた。標準偏差は既往の研究⁴⁾から Scr は 0.03, Sact は屋外暴露試験による飽水度の変化⁸⁾から 0.15 と設定した。図から、地点によって異なるが、その最低の確率をみると、AE, nonAE とともに、劣化の徴候を示す場合は 50%, すなわち Sact が Scr に到達した段階で劣化の徴候を示すことを意味している。また、明確な劣化を示す時点での最低の確率は nonAE で 79.7%, AE で 77.1% となっており、最も条件が悪い場合は、凍害発生確率が 80% 弱の時点で明確な劣化を示すといえる。

図-7 はあくまで一例であり、コンクリートの条件や環境条件によって異なることが考えられる。今後、さらに様々な条件での検討とデータ蓄積を行うことで、限界飽水度法と A 法による方法の関係を明確にする必要があるといえる。また、限界飽水度法による耐用年数の評価にあたっては、凍結融解による含水率上昇効果や乾燥・乾湿繰返しによる材料性状の変化なども考慮に入れる必要がある⁸⁾。特に ISO 16204 で想定されている限界飽水度法は、吸水性状は実験室の吸水試験結果に基づくことが想定されているが⁴⁾、凍結融解による含水率上昇効果を考慮するとより早くに限界状態に達することとなるため、危険側の評価になる可能性がある。今後、より詳細な検討を行う必要がある。それとともに、コンクリートの凍害劣化について、どのような限界状態が適切かについては、まだ議論が十分になされているとはいえず、今後さらなる議論が必要と考えられる。

6. まとめ

- (1) JIS A 1148 A 法に基づく耐凍害性の評価と限界飽水度法に基づく耐凍害性の評価は、異なる場合があることが示唆され、今後の詳細な検討が必要である。
- (2) 各地域における JIS A 1148 A 法に基づいた耐用年数による評価と限界飽水度法による耐用年数の評価は、コンクリートごとに概ね一致する。

(3) JIS A 1148 A 法に基づいた耐用年数の限界状態を限界飽水度法の凍害発生確率として表現する方法を提案した。今回使用したコンクリートの条件では、最も条件が悪い場合は、Sact が Scr に到達した段階で劣化の徴候を示し、凍害発生確率が 80% 弱の時点で明確な劣化を示す。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究(C) (課題番号：2356065701, 代表：長谷川拓哉) の研究の一部として実施しました。また、実験の実施にあたっては、本研究室の波田野仁氏をはじめとする卒論生・大学院生各位の協力を得ました。ここに記して心よりの謝意を表します。

参考文献

- 1) ISO 16204 Durability -Service life design of concrete structures, 2012.9
- 2) 浜幸雄, 松村光太郎, 田畑雅幸, 富板崇, 鎌田英治: 気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 523 号, pp.9-16, 1999.9
- 3) 石井清, 江川顕一郎, 堤知明, 野口博章: 凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.221-232, 1997.5
- 4) Fagerlund, G.: A service life model for internal frost damage in concrete, report TVBM-3119, Div of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 2004
- 5) fib bulletin no. 34, Model Code for Service Life Design (MC-SLD), International Federation for Structural Concrete (fib), Case Postale 88, CH-1015 Lausanne, Switzerland, 2006
- 6) 桂修, 吉野利幸, 鎌田英治: 交流 2 電極法によるセメント硬化体中の凍結水量そくていと水分凍結の細孔依存性, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.1, pp.57-66, 1996.1
- 7) 長谷川拓哉, 千歩修, 長谷川寿夫: 地域の凍害危険性評価指標の比較, 日本建築学会技術報告集, 第 24 号, pp.23-27, 2007.6
- 8) 千歩修, 満淵えり, 平井雄太郎, 長谷川拓哉: 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・コンクリート論文集, No.59, pp.272-277, 2005