

報告 コンクリートの凍害劣化を対象とした劣化予測手法および気象データの違いによる耐用年数の比較

長谷川 拓哉*1・千歩 修*2・福山 智子*3

要旨：凍害劣化の予測手法として代表的な4つの手法を対象とし、気象データとして観測期間が1961～1990年、1971～2000年、1981～2010年の3つの平年値を用いて劣化予測を行い、劣化予測手法と気象データの違いが耐用年数の算出結果に及ぼす影響について検討した。本検討で対象とした4つの予測手法は、最近の観測期間の気象データによるものは、一般に凍結融解サイクル数が少なくなる傾向にあること、各予測手法の耐用年数は条件が同じであればほぼ同様の耐用年数の算出結果となる等の知見を得た。

キーワード：凍害、劣化予測、平年値、耐用年数

1. はじめに

コンクリートの凍害における内部膨張劣化の劣化予測手法として、これまで、日本建築学会編『鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計指針(案)・解説』のASTM相当サイクル数¹⁾、濱らのASTM相当サイクル数²⁾、石井らの基準化凍結融解サイクル³⁾、本学会「コンクリート構造物の長期耐久性シミュレーションソフト作成委員会」の指導の下作成されたコンクリート構造物の長期性能シミュレーションプログラム「LECCA2」におけるJIS相当サイクル数⁴⁾等が提案されている。いずれの方法も、実環境における凍結融解回数が、JIS A 1148 (ASTM C 666) A法(以下「A法」)の凍結融解サイクルで何サイクルに相当するか(以下「促進凍結融解試験相当サイクル数」)を算出し、対象とするコンクリートのA法の試験結果より、内部膨張劣化の指標としての相対動弾性係数の低下を予測するものである。基本的なコンセプトは同様であるが、促進凍結融解試験相当サイクル数の算出方法に違いがあり、予測結果が異なることが考えられるが、比較検討した例は少ない。また、これらは対象地点の気象データが必要であるが、同地点でも観測期間等が異なると予測結果が違ふことが考えられるが、その影響は明らかではない。

本報告では、『鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計指針(案)・解説』のASTM相当サイクル数¹⁾(以下「ASTM相当サイクル数 C_{eq} 」)、濱らのASTM相当サイクル数²⁾(以下「ASTM相当サイクル数 Ra_{60} 」)、基準化凍結融解サイクル³⁾、JIS相当サイクル数⁴⁾の4つの予測手法を対象として、気象データとして観測期間が1961～1990年、1971～2000年、1981～2010年の3つの平年値を用いて凍害劣化の予測を行い、劣化予測手法と気象データの違いが予測結果に及ぼす影響について検討したものである。

2. 検討の概要

凍害劣化の予測手法として次の4つを対象とし、気象データとして平年値を用いて、促進凍結融解試験相当サイクル数と耐用年数を算出した。なお、耐用年数は、一般に設計上の限界状態と考えられている相対動弾性係数60%となる時の年数¹⁾を算出することとした。

(a)ASTM相当サイクル数 C_{eq} ¹⁾

式(1)により算出した。

$$E = (100 - C_{eq} \cdot t / 25) \cdot AIR \cdot WC \cdot Q \quad (1)$$

ここで、 E ：コンクリートの相対動弾性係数(%), C_{eq} ：年間のASTM相当サイクル数(サイクル/年), t ：竣工後の年数(年), AIR ：目標空気量による係数, WC ：水セメント比による係数, Q ：粗骨材吸水率による係数

(b)ASTM相当サイクル数 Ra_{60} ²⁾

気温によるASTM相当サイクル数 Ra_{90} および Ra_{60} を次により算出した。

$$T = T_a \min(1 - D_f / D_w) \quad (2)$$

$$Ra_{90} = 4.2T - 5.4 \quad (3)$$

$$Ra_{60} = 1.64Ra_{90} \quad (4)$$

ここで、 Ra_{90} 、 Ra_{60} ：相対動弾性係数が90%、60%となる時のASTM相当サイクル数(回/年), T_{amin} ：日最低気温の年間極値(°C), D_f ：凍結持続日数(日), D_w ：凍結融解総日数(日)

(c)基準化凍結融解サイクル³⁾

W/C55%のコンクリートを対象として、次により基準化凍結融解サイクルを算出した。

*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)

$$Ni=10(A\theta+B) \quad (5)$$

ここで、 Ni :破壊サイクル数、 θ :最低温度(°C)、
 A 、 B :回帰係数で次式による

$$A=0.14\ln(C/W)+0.04 \quad B=3.15\ln(C/W)+1.43 \quad (6)$$

$$\phi=Nd([C/W]_{st},[\theta]_{st})/Nd([C/W],[\theta]) \quad (7)$$

$$Ni'=\phi \cdot Ni \quad (8)$$

ここで、 ϕ :重み係数、 C/W :セメント水比、 Ni' :基準化凍結融解サイクル(回)

(d)JIS相当サイクル数⁴⁾

次により算出した。なお、文献⁴⁾では100サイクルで相対動弾性係数60%となるよう基準化した凍結融解サイクルで求められているため、ここでは300サイクルで相対動弾性係数60%となるよう式を変換(3倍)した。

$$Cy=\sum Raf \quad (9)$$

$$Raf=0.284(\exp(-0.136T)-1) \quad (10)$$

ここで、 Cy :1年間の凍結融解自然環境下でのJIS相当サイクル数(回/年)、 Raf :自然環境下における1回の凍結融解に対するA法の凍結融解回数比、 T :凍結最低温度(°C)

劣化予測に用いた気象データは、気象庁の地上観測所において観測された観測期間が1961~1990年(以下「1990年版」)、1971~2000年(以下「2000年版」)、1981~2010年(以下「2010年版」)の3つの平年値とした。観測所が廃止になる等によって3つの観測期間全てでデータが得られない地点を除いた155地点を対象とした。

各予測手法により求めた耐用年数を比較するにあたって、凍害の地域指標を比較した既往の研究⁵⁾と同様に、条件を揃えるため、次の条件を仮定した。ただし、ASTM相当サイクル数 C_{eq} は、各地点のサイクル数が提示されているため、そのまま用いることとした。

①対象とする部材は水平部材とし、日射があたるとともに、常に水と接した条件で凍結融解作用を受ける最も厳しい条件とする。(すなわち水中凍結水中融解の条件に近いものとする。)

②常に水と接しているため、乾燥の影響を受けないものとする。

③水セメント比は55%以下とする。

④1回の凍結融解の条件を、凍結:日最低気温が-1.0°C以下、融解:日最高気温が0°C以上、とする。

⑤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。

ここで、基準化凍結融解サイクルおよびJIS相当サイクル数ではコンクリート温度を用いる必要があるため、

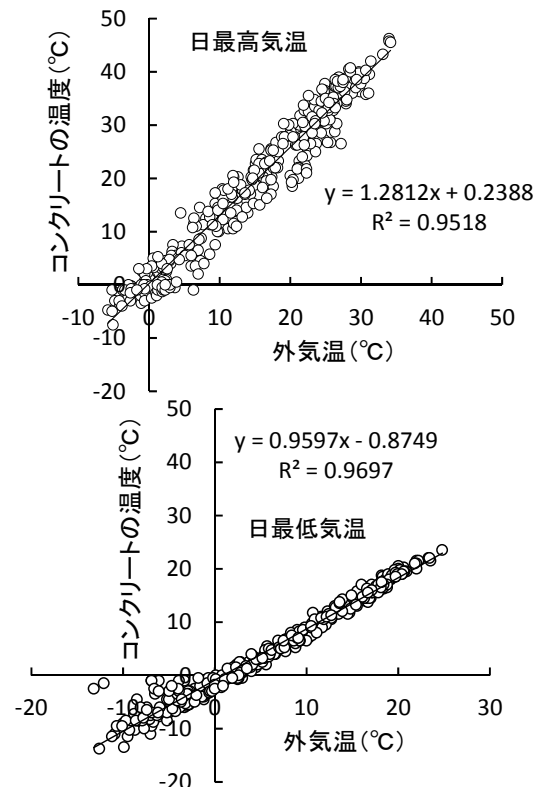


図-1 屋外暴露条件における気温とコンクリート温度の関係

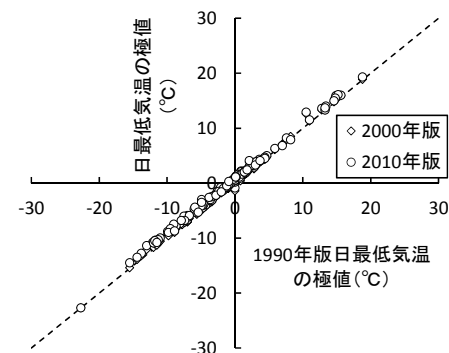


図-2 観測期間の違いによる日最低気温の平年値の比較

気象データからコンクリート温度を推定する必要がある。既往の研究において、精度の高いコンクリート温度の予測式が提案されているが^{6),7)}、特別の気象データが必要となる。ここでは日別のデータから推定するため、日別の気温データと札幌市で屋外暴露した7.5×7.5×40cmのコンクリート表面から1.5cmの位置で計測した温度⁸⁾との関係から予測式を求め、簡易に推定することとした。図-1に日最高気温および日最低気温の日別の外気温とコンクリート温度の実測値の関係を示す。両者は比較的良好な相関が認められたため、図中の式からコンクリート温度を推定することとした。

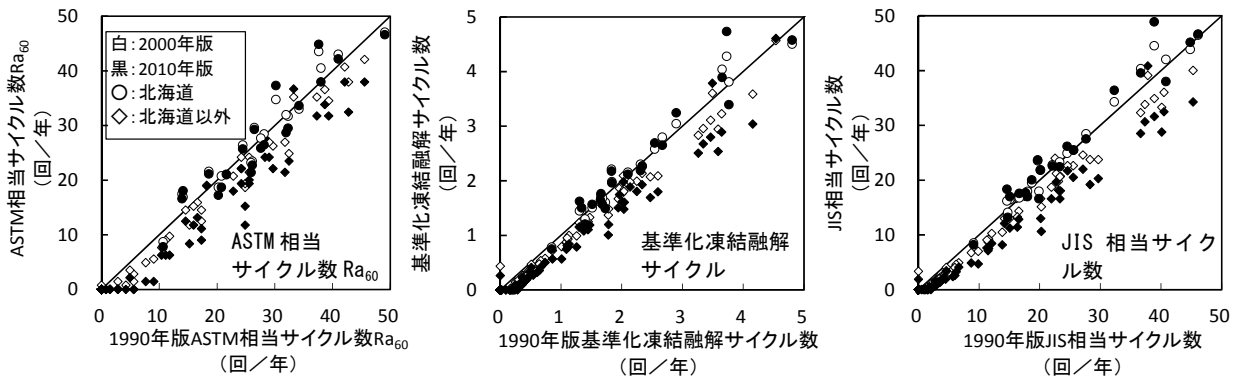


図-3 観測期間の違いによる各予測手法の促進凍結融解試験相当サイクル数の比較

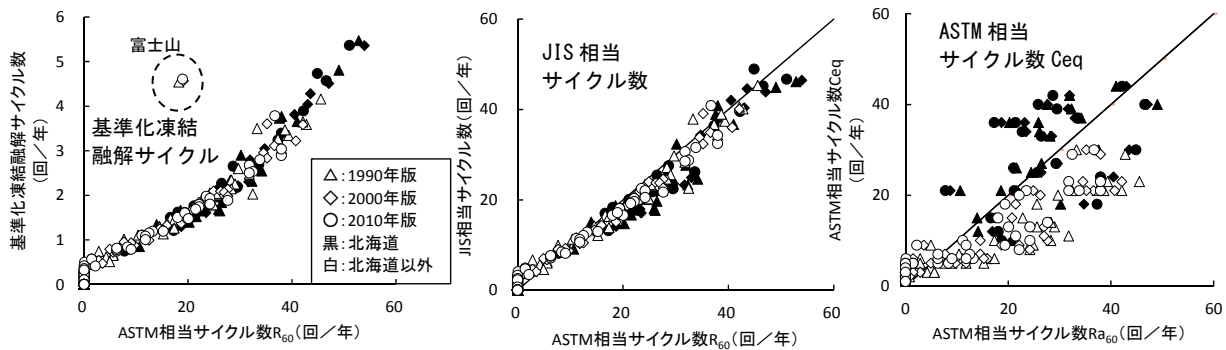


図-4 ASTM相当サイクル数 Ra_{60} と各促進凍結融解試験相当サイクル数の比較

3. 検討結果および考察

3.1 促進凍結融解試験相当サイクル数の算出結果

3つの観測期間の平均値を用いて(a)~(d)の各予測手法により算出した促進凍結融解試験相当サイクル数の結果を表-1に示す。表中に日最低気温の平滑平均値の極値と長谷川による凍害危険度⁹⁾をあわせて示す。紙面の都合で、検討した155地点のうち、各予測手法の算出結果が全て0となった地点を省いた77地点を示している。

日最低気温の平滑平均値の極値について、1990年版と2000年版および2010年版の関係を図-2に示す。大きな差はみられないが、最近の観測期間になるにつれ、日最低気温が若干高くなっている傾向がみられた。

ASTM相当サイクル数 Ra_{60} 、基準化凍結融解サイクル、JIS相当サイクル数における1990年版を用いて算出した値と2000年版および2010年版を用いて算出した値の関係を図-3に示す。いずれの算出結果でも、一般に1990年版より2000年版および2010年版を用いた方が、凍結融解試験相当サイクル数が少なくなる傾向がみられた。北海道の一部の地点では、1990年版より2000年版および2010年版を用いた方が逆にサイクルが増加する傾向が伺えた。1990年版では低温のため凍結が持続していた期間でコンクリート温度が上昇したため融解が生じ、凍結融解回数が増えたことが一因と考えられる。これらの結果より、今回対象とした手法で凍害劣化の予測を行う場合、使用する気象データの観測期間によって予測結果

が異なることが考えられる。

ASTM相当サイクル数 Ra_{60} と各促進凍結融解サイクル数との比較を図-4に示す。基準化凍結融解サイクルおよびJIS相当サイクル数との関係では、ばらつきがあるものの、両者に相関がみられた。基準化凍結融解サイクルとの関係において、他から大きく外れた値がみられた。これは富士山のデータであるが、凍結持続期間中の最低温度が約-22℃とかなり低い気温であったことが原因で大きな値となったと考えられる。基準化凍結融解サイクルでは1回の凍結融解の最低温度が低い場合、促進凍結融解試験相当サイクル数に大きく影響すると考えられる。

ASTM相当サイクル数 Ceq との関係では、ASTM相当サイクル数 Ceq の方が少ないサイクル数となる傾向がみられたが、ばらつきが大きかった。特に北海道の各地点のばらつきが大きく、これは、算出に使用された気象データが異なる(1965~1970年の観測値)とともに、日射による凍結融解の回数増加の考慮⁸⁾等が原因と考えられる。

3.2 耐用年数の算出結果

各予測手法による耐用年数の予測結果の比較を行うため、相対動弾性係数が60%となる年数を耐用年数として算出した。ASTM相当サイクル数 Ceq では、W/C55%、空気量4.5%、粗骨材吸水率3.0%の条件とし、他の予測手法ではA法の試験結果が300サイクルで相対動弾性係数60%となる条件で算出した。ASTM相当サイクル数

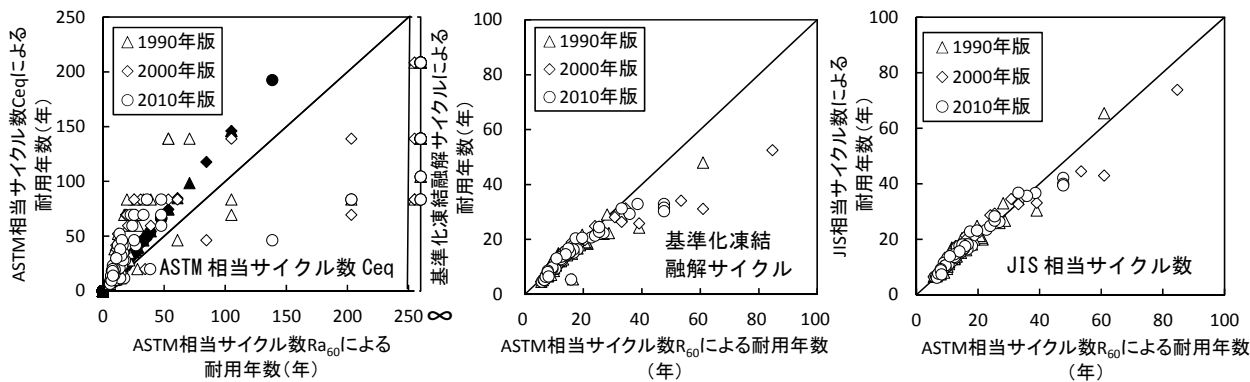


図-5 ASTM相当サイクル数 R_{a60} と C_{eq} 図-6 ASTM相当サイクル数 R_{a60} と基準化凍結融解サイクルおよび JIS相当サイクル数による耐用年数の関係
(白：文献¹⁾のまま，黒： R_{a60} と同じで計算)

C_{eq} では $E=60$ とした式(1)より，他の予測手法では 300 を各促進凍結融解試験相当サイクル数で除すことで耐用年数が得られる。ここでは前述の①の条件から水平部材を対象としているが，ASTM 相当サイクル数 R_{a60} ではこの場合，日射の係数を乗ずるとされている²⁾。しかし，ここでは各予測手法を同条件で比較するため，この日射の影響は考慮せずに算出することとした。

図-5 に，ASTM 相当サイクル数 R_{a60} と C_{eq} による耐用年数の関係を示す。ばらつきが大きい， C_{eq} による耐用年数の方が大きくなる傾向となった。図-4 に示す通り， C_{eq} の方が少ない促進凍結融解試験相当サイクル数だったことが一因と考えられる。ここで，ASTM 相当サイクル数 R_{a60} と C_{eq} が同じ促進凍結融解試験相当サイクル数と仮定して算出した結果を図-5 中にあわせて示す。この場合，両者は比例関係となっており，耐用年数が異なるのは，対象とした条件のコンクリートで想定されている A 法の試験結果が異なるためと考えられる。ここで，ASTM 相当サイクル数 C_{eq} で規定されているコンクリートの各条件において，相対動弾性係数 60%となるサイクルを求めることとした。式(1)を変形すると式(1)'となる。

$$C_{eq} \cdot t = 25 \times (100 - 60) / (AIR \cdot WC \cdot Q) \quad (1)'$$

ここで， $C_{eq} \cdot t$ は A 法の試験サイクルを意味しているので，ここから相対動弾性係数 60%となるサイクルを求めることができる。結果を表-2 に示す。W/C56~60%の条件以外では，300 サイクルを大きく超える結果となり，このため耐用年数が大きくなったと考えられる。

ここで，桂らは A 法における相対動弾性係数 60%となるまでの標準的な劣化曲線を提案している¹⁰⁾。

$$DM = -2.08n^{0.5} + 100 \quad (DM > 85\%) \quad (11)$$

$$DM = -0.520(n - 51.9) + 85 \quad (DM \leq 85\%) \quad (12)$$

表-2 ASTM 相当サイクル数 C_{eq} の各条件が相当する A 法の試験結果の推定値

目標空気量(%)	W/C(%)	粗骨材の吸水率(%)	係数	相対動弾性係数60%となるサイクル	300サイクル時の相対動弾性係数(%)
4.5~6.0	40%以下	2.0%以下	1.00	1000	89
	41~50%		0.95	921	88
	51~55%		0.90	833	88
	56~60%	0.80	625	86	
	40%以下	2.1~2.5%以下	0.90	833	88
	41~50%		0.86	746	87
	51~55%		0.81	648	86
	56~60%	0.72	417	82	
	40%以下	2.6~3.0%以下	0.80	625	86
	41~50%		0.76	526	84
	51~55%		0.72	417	82
	56~60%	0.64	156	-	
4.0	40%以下	2.0%以下	0.95	921	88
	41~50%		0.90	838	88
	51~55%		0.86	746	87
	56~60%	0.76	526	84	
	40%以下	2.1~2.5%以下	0.86	746	87
	41~50%		0.81	653	86
	51~55%		0.77	551	85
	56~60%	0.68	307	61	
	40%以下	2.6~3.0%以下	0.76	526	84
	41~50%		0.72	422	82
	51~55%		0.68	307	61
	56~60%	0.61	33	-	

ここで， DM ：相対動弾性係数(%)， n ：基準化凍結融解回数(回)

これらの式の n に表-2 に示す相対動弾性係数 60%となるサイクル数を代入することで，A 法 300 サイクル時の相対動弾性係数を求めることができる。求めた結果を表中に示す。これらから，目標空気量 4.5~6.0%で粗骨材吸水率 2.0%以下は，土木学会編『コンクリート標準示方書 設計編』¹¹⁾で凍結融解がしばしば繰り返され，断面が薄く，連続してあるいはしばしば水で飽和される場合で用いられる相対動弾性係数 85%以上を満足するコンクリートと考えられる。これらより，この手法によって凍害劣化を予測する場合は，耐凍害性が高いコンクリートを対象としている点に留意が必要と思われる。

図-6 に，ASTM 相当サイクル数 R_{a60} と基準化凍結融解サイクル，JIS 相当サイクル数による耐用年数の関係を示す。両者はほぼ同様の耐用年数となった。耐用年数

が大きい地点、すなわち促進凍結融解試験相当サイクル数が少ない地点では差が大きくなっている。これは、促進凍結融解試験相当サイクル数が少ない場合、小さな差が耐用年数に大きく影響することが原因と考えられる。これらの結果から、ASTM 相当サイクル数 Ra_{60} 、基準化凍結融解サイクルおよび JIS 相当サイクル数では、同程度の耐用年数の評価となると考えられる。ただし、水中凍結水中融解に近い条件として算出しているが、実際のコンクリートでは日射や夏期などにおける乾燥の影響を受けるとともに、部位条件等によっては含水率が低い状態で凍結融解を受ける場合なども考えられる。これらの影響について、適切に考慮する必要があると思われる。また、自然環境下での凍害劣化の進行については、まだ明らかでない点も多く、劣化予測の上では長期的な性状のデータの蓄積が必要と考えられる。

4. まとめ

- 1) 日最低気温の平滑平年値の極値について最近の観測期間のもの程、気温が高くなっている。
- 2) 本検討で対象とした4つの予測手法では、最近の観測期間の平年値によるものは、凍結融解サイクル数が少なくなる傾向にある。
- 3) ASTM 相当サイクル数 C_{eq} による予測手法は、耐凍害性が高いコンクリートを想定しているため、予測される耐用年数は比較的大きな結果となる。
- 4) コンクリートが水中凍結水中融解の条件で日射の影響を考慮しない場合、ASTM 相当サイクル数 Ra_{60} 、基準化凍結融解サイクルおよび JIS 相当サイクル数より求めた相対動弾性係数が60%となる年数は同程度に算出される。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計指針(案)・解説，2004
- 2) 濱幸雄，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) 計算力学研究センター：LECCA2 理論解説書，2010.2
- 5) 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 25 巻，pp.23-27，2007.6
- 6) 濱幸雄他3名：寒冷環境下に暴露したコンクリート内部の温湿度変化と等価積算温度，コンクリート工学年次論文集 Vol.29 No.1，pp.819-824，2007.7
- 7) 富板崇他2名：コンクリート供試体表面温度の気象因子による推定とその応用，JCI 自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム論文集，pp.203-208，2005.6
- 8) 長谷川拓哉，千歩修：札幌市に屋外暴露したコンクリート内部の温湿度変化，コンクリート工学年次論文集 31 巻第1号，pp.907-912，2009.7
- 9) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害に対する外的要因の研究，北海道大学学位論文，1974
- 10) 桂修，松村宇：コンクリートの凍害劣化度評価と予測法に関する研究，日本建築学会コンクリートの試験法に関するシンポジウム，pp.2-11-16，2003.11.21
- 11) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 設計編，2013.3