

論文 コンクリート構造物の凍害に関する環境要因と劣化予測の適用性に関する検討

林田 宏*1・田口 史雄*1・遠藤 裕丈*1・草間 祥吾*1

要旨：本研究では、凍害に影響を及ぼす膨大な因子の中から比較的重要と思われる外部環境因子の絞り込みを行い、7つの因子を抽出した。次に、既に提案がなされている劣化予測手法の中から代表的な手法を選定し、実構造物の劣化状況との比較を行い、その適用性について検討を試みた。その結果、ASTM 相当サイクルでは算出年が実際の供用年数をすべて下回っているが、基準化凍結融解サイクルでは算出年が実際の供用年数を上回るものがあった。

キーワード：凍害, 外部環境因子, 劣化予測, 実構造物

1. はじめに

寒冷地のコンクリート構造物が受ける被害の一つに、凍害の単独劣化と、凍害と塩害による複合劣化（以下、「複合劣化」という。）がある。凍害による被害は、温度変化が大きく、水の供給を受けやすいコンクリート構造物の表層や端部に集中しやすい。そのため、外部から供給される水や塩化物イオンなど劣化因子の浸透速度の増加に伴う鋼材腐食の助長が強く懸念される。

一方、コンクリート構造物の設計体系は、供用期間内における構造物の耐久性を設計段階から照査する性能照査型設計法へ移行しつつある。照査を合理的に行うには、凍害の進行を予測できるモデルが必要となる。凍害は、凍結融解サイクルに加え、温度、飽水度、塩分など数多くの要因が複雑に組み合わさって発生する。

そこで、本研究では精度の高い劣化予測手法および耐久設計法を確立するために、凍害に影響を及ぼす膨大な因子の中から比較的重要と思われる外部環境因子の絞り込みを行った。

次に、既に提案がなされている劣化予測手法の中から代表的な手法を選定し、実構造物の劣化状況との比較を行い、その適用性について検討を試みた。

文集より、凍害および複合劣化に及ぼす影響因子ならびに劣化度の評価方法を扱った論文を収集した。収集に当たっては、できるだけ広範囲かつ最新の情報を把握するため、1980年以降に発表されたものを検討の対象とした。

2.2 調査結果

はじめに、凍害、複合劣化に関する国内発表論文を約540編選定した。ただし、軽量コンクリートなど特殊コンクリートを扱ったものなどは対象外とし、最終的に約370編に絞り込んだ。これらの論文について、実験変数として採用されている環境要因について調べた結果を図-1に示す。ただし、併記している数値は論文数の割合であって、重要度を表すバロメータではない。なお、一編の論文で因子が重複している場合は、それぞれの因子に対して1編ずつカウントしている。

採用されている環境要因の中で最も多いものは凍結融解回数で97編（全体の26%）、次いで最低温度が71編（19%）、海水作用が66編（18%）、水分乾燥が62編（17%）、凍結防止剤が41編（11%）、日射・方位が14編（4%）で、その他として積算温度、温度保持、風速、雪、標高などが数編あった。

2. 外部環境因子に関する検討

2.1 調査方法

凍害、複合劣化の進行に影響を与える重要な因子の絞り込みを図ることを目的に、過去20年間に発表された凍害、複合劣化を扱った論文・著書を収集し、それらの調査・分析を行った。一般に、凍害に及ぼす影響因子は、材料因子（水セメント比など）、外部環境因子の二種に大別されるが、今回は外部環境因子に着目して調査を行った。

論文調査では、コンクリートに関する学術・技術上の代表的な学協会から発刊されている年次講演概要集・論

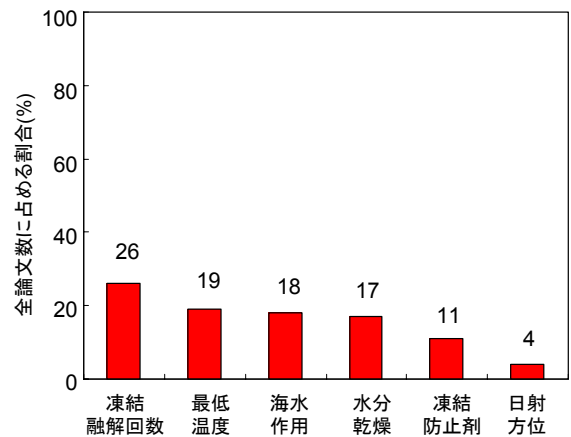


図-1 論文で採用されている環境要因

*1 (独)土木研究所寒地土木研究所

一方、著書調査では、環境要因のことが述べられている代表的な著書を調査した結果、表-1 に示すとおり、論文調査での傾向と同様に凍結融解回数、最低温度、水分については全ての著書で取り上げられていた。また、その他の環境要因として日射、凍結持続日数、凍結速度、乾燥、風が取り上げられていた。

表-1 著書で取り上げられていた環境要因

	文献1)	文献2)	文献3)	文献4)
凍結融解回数	○	○	○	○
最低温度	○	○	○	○
日射			○	
凍結持続日数			×	
凍結速度	×		×	
乾燥		○		
水分	○	○	○	○
風			○	

×)影響が小さいと記述されているもの

また、収集した論文・著書の中で各種環境要因がコンクリートの凍害に及ぼす影響について述べられていた主な知見を整理した結果を以下に示す。

(1) 凍結融解回数

凍結融解試験では、配合によって相対動弾性係数が300サイクル終了時に80%以上でも凍結融解回数2000回では60%以下になる場合がある⁵⁾等が報告されており、凍結融解回数は凍害劣化に大きく影響する要因である。なお、このように初期に劣化の兆候をみせず、ある段階から劣化を示すものがあることから、凍結融解繰返しは劣化を蓄積させる以外にも試験体の含水率を上昇させることがある⁶⁾と考えられる。

実環境においても、竣工後から数年は健全なものでも年月を経て凍害が発生・進行していくこと、冬季に日射の影響で融解する南面の凍害劣化が多いこと³⁾等は、凍結融解回数の影響と考えることができる。しかしながら、実環境における凍結融解回数の影響について定量的に明らかにしている研究は少ない。

(2) 最低温度

最低温度を変えた凍結融解試験がいくつかの研究^{たとえ7),8)}の中で行われており、最低温度が低いほど劣化の進行は顕著という認識が共通していた。これは、最低温度が低くなるとコンクリート中の凍結水量が多くなる⁹⁾ことが考えられる。また、耐凍害性の良いコンクリートでは最低温度の影響が小さいという結果¹⁰⁾も報告されており、コンクリート種別によって影響程度が異なることも考えられる。

実環境においても地域の最低気温が低い地域の凍害劣化が著しい³⁾ことは、最低温度が凍害劣化に大きく影響していることを示すものといえる。

(3) 風

風の影響として雪を付着させて湿潤状態とすること、部材の表面を急激に冷やすこと等が考えられる。なお、気温の低下とともに、風作用によりコンクリートの温度がさらに低下する³⁾可能性もある。

(4) 凍結持続時間

凍結持続時間については、最低気温が -4.5°C の状態が433分、 -5.0°C が306分、 -5.5°C が233分、 -6.0°C が220分、 -6.5°C が193分持続すると、コンクリート中の水溶液は凍結する可能性がある⁹⁾という指摘を行っている研究があったものの、全体としては、凍結持続時間が凍害劣化に与える影響は小さいとされており、実構造物においても同様に影響は小さいとされていた。

(5) 凍結速度

凍結速度を変えた凍結融解試験では、いくつかの研究^{たとえば1),11)}で、凍結速度が大きい程、劣化程度が大きいとされていた。これは、凍結時間が短く氷の形成に伴って発生する水圧が緩和されにくいこと、冷却速度が大きいものは表面付近と内部の温度差が常にあったことなどが原因と考えられている。また、凍結速度とセメント種類に着目した研究¹²⁾では、普通ポルトランドセメントでは、凍結速度による相対動弾性係数の低下の差は小さく、高炉セメントでは、凍結速度が遅いほど相対動弾性係数の低下が小さいとされていた。これは高炉セメントでは、微粉末により粗大経側の割合が減ったこととポズラン反応による強度増進のためと考えられている。

一方、実構造物においては室内試験ほど冷却速度が大きくないため、凍結速度の影響は小さい^{1),3)}とされていた。

(6) 水分

水分の影響に関しては、コンクリートの飽水度が85~90%以上になると耐凍害性が得られなくなる¹³⁾が、飽水度が低い条件となる空気中においては凍結融解作用を1500サイクル与えても、劣化の進行は緩慢で、相対動弾性係数はわずかしか低下しない¹⁴⁾とされており、凍害劣化においては凍結融解回数などよりも水分の影響が大きいことを強調する論文が多かった。

また、実環境においても、耐凍害性に劣るコンクリートを架台に12年暴露しても、相対動弾性係数の低下はほとんど認められなかったとする報告²⁾や気象観測所の凍結融解サイクル数がほぼ同値でも、実構造物の被害は場所によって異なる¹⁵⁾とされており、自然環境下での劣化は、最低気温や凍結融解回数以上に水分の供給・保持条件の影響が大きいとされていた。

(7) 乾燥

乾燥や乾湿繰返しについては、乾燥温度が高いほど限界飽水度が低くなり耐凍害性は低下するという報告¹⁶⁾

や 20℃程度の軽微な乾湿繰り返しであっても耐凍害性は低下するなどの報告¹⁷⁾がなされており、乾燥や乾湿繰り返しが耐凍害性にマイナスの作用を与えることが主に述べられていた。このメカニズムについて、コンクリートが乾燥を受けると、ペーストのシリケートアニオンの配列に異変が生じ、その結果、細孔構造が粗くなるためとする報告¹⁸⁾があった。

(8) 日射

日射についてはコンクリートの温度変化に影響を及ぼし、凍結融解回数の増加につながるため、その影響は大きい¹⁹⁾とされていた。このように、環境要因として日射の重要性を指摘する報告があるものの、凍結融解回数や最低温度に比べて日射に関する報告は少ない。これは、室内試験で日射を再現させることが難しいことが理由として考えられる。

以上の結果から、凍害に影響を及ぼす比較的重要と思われる外部環境因子は下記のようにまとめられる。

- (1) 凍結融解回数
- (2) 最低温度
- (3) 水の供給
- (4) 乾燥（乾湿）
- (5) 日射（方位）
- (6) 風

3. 劣化予測に関する検討

3.1 劣化予測手法についての概要

凍害劣化に関して、既に提案がなされている代表的な劣化予測手法の中から前章で絞り込みを行った外部環境因子を比較的多く考慮している「ASTM 相当サイクル」²⁰⁾および「基準化凍結融解サイクル」²¹⁾を選定し、実構造物の劣化状況との比較を行い、その適用性について検討を試みた。

なお、それぞれの劣化予測手法の概要は以下のとおりである。

(1) ASTM 相当サイクル数

ある地域の気象条件下でコンクリートが1年間に受ける凍結融解作用を、ASTM C-666 A法の標準条件の凍結最低温度である-18℃を基準とした ASTM 相当サイクル数として表す実験式(1)を導出し、耐用年数を推定する手法である。

$$\begin{aligned} Cy_{ASTM-sp} &= C \times F \times Rsp \\ &= C \times F \times s \times p \times Ra_{90} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $Cy_{ASTM-sp}$ ：ASTM 相当サイクル数（回/年）、 C ：養生条件に関する係数、 F ：凍結融解条件に関する係数、 Rsp ： $\sum(-ts/18)^\beta$ 、 ts ：凍結最低温度(℃)、 β ：定数、 s ：日照条件に関する係数、 p ：劣化過程係数、 Ra_{90} ：気温による ASTM 相当サイクル数

(2) 基準化凍結融解サイクル

最低温度と水セメント比の関係である凍結細孔量比（全細孔量に対する凍結細孔量の比）と破壊サイクル数（相対動弾性係数が60%を下回る凍結融解回数）の対数との間に線形関係を見出している。さらに、簡単に測定できない凍結細孔量比を最低温度およびセメント水比で表し、それと破壊サイクル数の関係を見出している。次に、式(2)、式(3)に示すように、基準となる水セメント比および最低温度に対して、他の水セメント比、最低温度における破壊サイクル数との比をとり、これを重み係数として水セメント比、最低温度別の凍結融解サイクル数に掛け合わせた「基準化凍結融解サイクル」を用いることにより、最低気温が不規則な自然環境下においても最低温度の影響を考慮することができ、任意の最低温度下における劣化曲線が推定でき、室内促進試験結果と自然暴露試験結果の対比を可能としている。

$$\phi = Nd([C/W]_{st}, [0]_{st}) / Nd([C/W]_t, [0]_t) \quad (2)$$

$$Ni' = \phi \cdot Ni \quad (3)$$

ここに、 ϕ ：重み係数、 $Nd([C/W]_t, [0]_t)$ ：目的とするコンクリートのセメント水比および最低温度の破壊サイクル数、 $Nd([C/W]_{st}, [0]_{st})$ ：基準とするコンクリートのセメント水比および最低温度の破壊サイクル数、 Ni' ：基準化凍結融解サイクル数、 Ni ：凍結融解サイクル数

3.2 実構造物の凍害劣化状況調査

(1) 調査構造物の概要

調査は図-2に示すA、B、C橋の橋台堅壁側面およびウイングの凍害劣化部（以下、「劣化部」という。）を対象として行った。A、B橋は昭和47年、C橋は昭和33年に架設され、調査時点で34～48年が経過しており、冬季には最低気温が約-20℃となる地域に架設されている。この地域においては、コンクリートの凍結温度を-2℃²²⁾とした場合の凍結融解回数は、時間毎の気温のみでの判断ではあるが、1年で約80回、経過年数で換算すると約2700～3800回程度となる。いずれの劣化部も写真-1に示すように凍害劣化を受け、表面は粗骨材がいくつかに露出している状態であった。また、比較のためにA橋の橋台堅壁前面の健全部についても調査を行った。



図-2 位置図

写真-1 A橋堅壁側面

(2) 調査方法

劣化部および健全部から採取したコア（ $\phi=10\text{cm}$, $L=10\text{cm}$,）について直径方向の超音波伝播速度測定を行った。なお、後で比較を行う劣化予測手法の算出結果がコンクリート表層部分を想定していることから、測定は深触子の径（ $\phi=2\text{cm}$ ）を考慮し、コア表面から深さ1.3cmのところまで測定を行った。

(3) 調査結果

超音波伝播速度測定結果を表-2に示す。超音波伝播速度の絶対値による評価基準として健全なコンクリートの一般的な超音波伝播速度は4000m/s以上とされており²³⁾、健全部であるA橋のNo.3および比較的供用年数の短いC橋のNo.1を除く、全ての部分で4000m/sを下回っていることから、これらの部分は、凍害劣化を受け、超音波伝播速度の低下を生じているものと考えられる。

表-2 超音波伝播速度測定結果

橋名	コア番号	架設年度	供用年数	採取位置	方位	VL (m/s)	空気量 (%)
A橋	No.1	47	34	A1ウイングL側	北西	3659	-
	No.2	47	34	A1堅壁L側	北西	3684	0.35
	No.3	47	34	A1堅壁正面	桁下	4203	-
B橋	No.1	47	34	A1ウイングR側	南	3711	1.01
	No.2	47	34	A2ウイングL側	北	3485	-
C橋	No.1	52	29	A1ウイングL側	北	4012	0.41
	No.2	33	48	A1ウイングR側	南	3671	0.24

※VL(m/s)はコア深さ1.3cmの超音波伝播速度測定結果。
なお、A橋のNo.3は健全部である。

3.3 実構造物と劣化予測の比較

(1) 比較方法の概要

実構造物と劣化予測の比較は以下のように行った。

- 実構造物の架設環境および配合等を加味して、3.1の劣化予測手法毎の相対動弾性係数と時間（供用年数）の関係を求める。
- 実構造物における超音波伝播速度測定値の相対動弾性係数への換算を行う。
- b.で求めた相対動弾性係数に達する年数を劣化予測手法毎に求める。
- c.で求めた年数と実構造物の経過年数を比較した。

(2) 室内促進試験

予測に当たり実構造物（橋台）に使用されたコンクリートに対する室内促進試験データが必要なことから、橋台に使用されている標準的な配合で供試体を作成した。

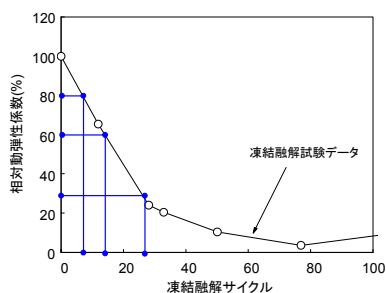


図-3 凍結融解試験結果

配合は、北海道開発局道路橋設計要領²⁴⁾のRC-1に準じ、水セメント比55%、単位セメント量280kg/m³とした。なお、事前に行った実構造物コアの空気量等に関する調査結果（表-2）から、供試体の作成に当たりAE剤は使用しなかった。

凍結融解試験はASTM C666（A法）に準じて行った。結果を図-3に示す。この結果から相対動弾性係数が90および60%に達するのは、それぞれ3.4cycおよび13.8cycである。

(3) ASTM相当サイクルの算出

橋梁架設位置に近い北見枝幸の1971～2000年までの30年間のアメダスデータを用い、係数Cについては養生時の温度より「30℃乾燥」、係数Fについては劣化部が橋台の鉛直面であり、水中凍結を生じる状況でないことを考慮し「気中凍結水中融解」の値を用いると北面、南面のASTM相当サイクルはそれぞれ以下のとおりとなる。

1) 北面の場合

30℃ 気中 北 気象データから求めた Ra90

$$\begin{aligned} \text{CyASTMc90} &= C \times F \times S \times p \times \text{Ra90} \\ &= 0.14 \times 0.21 \times 1.0 \times 1.0 \times 8.4 \\ &= 0.25 \text{ 回/年} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CyASTMc60} &= C \times F \times S \times p \times \text{Ra90} \\ &= 0.45 \times 0.23 \times 1.0 \times 1.64 \times 8.4 \\ &= 1.43 \text{ 回/年} \end{aligned}$$

2) 南面の場合

30℃ 気中 南

$$\begin{aligned} \text{CyASTMc90} &= C \times F \times S \times p \times \text{Ra90} \\ &= 0.14 \times 0.21 \times 1.45 \times 1.0 \times 8.4 \\ &= 0.36 \text{ 回/年} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CyASTMc60} &= C \times F \times S \times p \times \text{Ra90} \\ &= 0.45 \times 0.23 \times 1.45 \times 1.64 \times 8.4 \\ &= 2.08 \text{ 回/年} \end{aligned}$$

室内促進試験の結果とこれらの結果から相対動弾性係数が90および60%に達する年数を算出すると、以下のようなになる。

1) 北面の場合

$$X90 = 3.4 \div 0.25 = 13.9 \text{ 年}$$

$$X60 = X90 + 13.8 \div 0.25 = 21.1 \text{ 年}$$

2) 南面の場合

$$X90 = 3.4 \div 0.36 = 9.6 \text{ 年}$$

$$X60 = X90 + 13.8 \div 2.08 = 14.6 \text{ 年}$$

(4) 基準化凍結融解サイクルの算出

ASTM相当サイクルと同様に、北見枝幸の1971～2000年までのアメダスデータを用いて、水セメント比W/C=55%、最低温度-18℃の基準化凍結融解サイクル数

N' を算出すると $N' = 0.97$ 回/年となり、北面、南面の基準化凍結融解サイクル数はそれぞれ以下のとおりとなる。

1) 北面の場合

$$NN = 1 / 1.45 \times 1 / 2.4 \times 0.97 = 0.28 \text{ 回/年}$$

2) 南面の場合

$$NS = 1 / 1.00 \times 1 / 2.4 \times 0.97 = 0.40 \text{ 回/年}$$

また、室内促進試験の結果とこれらの結果から相対動弾性係数が 90 および 60% に達する年数を算出すると、以下のようになる。

1) 北面の場合

$$X90 = 3.4 / 0.28 = 12.4 \text{ 年}$$

$$X60 = 13.8 / 0.28 = 49.5 \text{ 年}$$

2) 南面の場合

$$X90 = 3.4 / 0.40 = 8.5 \text{ 年}$$

$$X60 = 13.8 / 0.40 = 34.1 \text{ 年}$$

(5) 超音波伝播速度の相対動弾性係数への換算

緒方ら²⁵⁾は実験式である式(4)を用いて動弾性係数を求め、式(5)から相対動弾性係数を求める方法を提案している。本報においてもこの方法を用いて相対動弾性係数を求めた。なお、 E_{d0} の算出では健全とみなせる箇所の超音波伝播速度として A 橋の No.3 のデータを用いた。算出結果を表-3 に示す。

$$E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \quad (4)$$

$$\text{相対動弾性係数 (\%)} = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \quad (5)$$

ここに、 E_{dn} ：供用中のコンクリート構造物における動弾性係数(GPa)、 E_{d0} ：供用開始直後のコンクリート構造物における動弾性係数、もしくは供用開始直後の測定値がない場合は供用中のコンクリート構造物において健全とみなせる箇所の動弾性係数(GPa)、 V 超音波伝播速度(km/s)である。

(6) 実構造物データと予測結果の比較と考察

(5)で求めた相対動弾性係数に達する年数を前述の予測手法毎に算出した結果を表-3 に示す。なお、A 橋の No.1, 2 の方位は「北西」であるが、年数の算出に当たっては、便宜的に北面とした。また、この算出した年数と実際の供用年数の関係をグラフ化したものを図-4 に示す。

実構造物の劣化程度については、A 橋の No.1, 2 は同方位であるため、ともに同程度である。B 橋の No.1, 2 は同部位であるが、方位が南と北である。一般的に日射の影響により凍結融解回数が増加するため南面の方が劣化は進みやすいとされているが、南面の No.1 よりも北面の No.2 の方が劣化は進んでいる。A 橋と B 橋の供用

年数はほぼ同じであるが、同じ北面のウイングである A 橋の No.1 と B 橋の No.2 を比べると B 橋の方が劣化程度は大きい。これは A 橋の No.1 は車道側、B 橋の No.2 は歩道側であり、ウイング上部の耐雪状況が除雪などによって異なり、水分供給の程度が異なる可能性が考えられるが、今後検討が必要である。C 橋は L 側 (No.1 側) を S52 に歩道拡幅したため、No.1 と No.2 で供用年数が異なる。No.1 は供用年数が今回調査の中で最も短く、劣化の程度も最も小さい。一方、No.2 は供用年数 48 年と今回調査の中で最も長く、南面であるが、その相対動弾性係数は約 70%程度と A 橋の No.1, 2 (供用年数 34 年、北面) とほとんど変わらない。

ASTM 相当サイクルと基準化凍結融解サイクルの比較では、ASTM 相当サイクルは相対動弾性係数が 90%を下回ると劣化速度が速くなると仮定しているのに対して、基準化凍結融解サイクルでは一定速度で劣化していくことから、一定の相対動弾性係数に達するまでの算出年は ASTM 相当サイクルの方が基準化凍結融解サイクルの方よりも短くなる。

上記のようなことから、予測手法による算出年と実際の供用年数を比較すると、ASTM 相当サイクルの方は算出年が実際の供用年数をすべて下回っているが、基準化凍結融解サイクルの中には算出年が実際の供用年数を上回るものもある。しかし、実構造物の劣化程度そのものにはばらつきがあり、比較データもばらついたため、今後

表-3 供用年数と劣化予測による算出年

橋名	コア番号	採取位置	方位	VL (m/s)	相対動弾性係数	供用年数	ASTM 相当 (年)	基準化凍結融解 (年)
A橋	No.1	A1ウイングL側	北西	3659	70.0%	34	18.7	37.2
	No.2	A1堅壁L側	北西	3684	71.2%	34	18.4	35.7
	No.3	A1堅壁正面	桁下	4203	100.0%	34	-	-
B橋	No.1	A1ウイングR側	南	3711	72.5%	34	12.5	23.5
	No.2	A2ウイングL側	北	3485	62.0%	34	20.6	47.0
C橋	No.1	A1ウイングL側	北	4012	88.6%	29	14.2	14.1
	No.2	A1ウイングR側	南	3671	70.6%	48	12.8	25.1

※VL(m/s)はコア深さ1.3cmの超音波伝播速度測定結果。

なお、A橋のNo.3は健全部である。

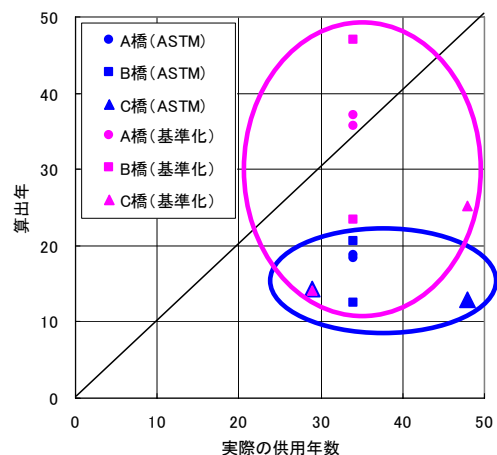


図-4 供用年数と劣化予測による算出年

は、実構造物データを増やすなどして、精度向上を図りたい。

4. まとめ

今回の調査では、これまでにストックされた貴重な情報を分析し、その結果、凍害に影響を及ぼす比較的重要な因子を抽出することができた。凍害の劣化予測技術は実環境下のコンクリート構造物の適切な維持管理や耐久性評価に不可欠な技術である。

今後は、抽出した外部環境因子が実構造物の劣化に及ぼす影響について定量的に明らかにしていくとともに、実構造物データを増やすなどして、精度向上を図り、劣化予測手法の確立に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) Jochen Stark and Bernd Wicht (太田利隆, 佐伯昇訳) : DAUERHAFTIGKEIT VON BETON (コンクリートの耐久性), セメント協会, pp.180, 1995
- 2) 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委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.14, 2005
- 3) 長谷川寿夫, 藤原忠司: コンクリート構造物の耐久性シリーズ「凍害」, 技報堂, 1988
- 4) 2005年制定, 土木学会コンクリート標準示方書維持管理編, 土木学会
- 5) 山下英俊: コンクリート構造物の凍害の劣化評価と予測に関する研究, 北海道大学学位論文, 1999
- 6) 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, コンクリートの試験方法に関するシンポジウム, 日本建築学会, pp.2-11-2-16, 2003. 11
- 7) 袴田豊, 山内茂樹, 宇美方章裕, 藤原忠司: 岩手県及び北海道南部におけるコンクリート構造物の凍害の現状とその原因, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.409-416, 1999
- 8) 村上祐治, 山下英俊, 喜多達夫, 吉川弘道: 最低温度の違いによるコンクリートの変形挙動と AE 特性, 土木学会年次学術講演概要集, pp.438-439, 1992
- 9) 岡本修一, 魚本健人: 細孔構造から見た凍害への凍結最低温度の影響について, 土木学会年次学術講演概要集, pp.634-635, 1998
- 10) 漆崎要, 桂修, 鎌田英治: コンクリートの凍害に及ぼす最低気温の影響に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.919-924, 1998
- 11) 白井和絵, 丹野篤, 三浦尚: 凍結融解作用で劣化したコンクリート内部の強度分布に関する研究, 土木学会年次学術講演概要集, pp. 754-755, 2000
- 12) 山下英俊, 喜多達夫, 堺孝司: コンクリートの耐凍害性に及ぼす凍結速度の影響, 土木学会年次学術講演概要集, pp. 520-521, 1994
- 13) 鮎田耕一: コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策 凍害(その2), コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.72-77, 1994
- 14) 広永道彦, 遠藤孝夫, 服部清一, 高橋幸保: 気中で凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化要因に関する一考察, 土木学会年次学術講演概要集, pp.396-397, 1991
- 15) 藤原忠司, 河村慶次, 帷子國成: 道路橋におけるコンクリートの凍害, コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.553-558, 1988
- 16) 千歩修, 濱田英介, 友澤史紀: 乾湿繰返しコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.731-736, 2003
- 17) 相川葉月, 千歩修, 長谷川拓哉, 酒井正樹: 実環境を考慮した乾湿繰返し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
- 18) 青野義道, 松下文明, 柴田純夫, 浜幸雄: 乾湿繰返しによるセメントペーストの細孔構造変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.731-736, 2006
- 19) 嶋田久俊, 堺孝司: 凍結融解作用を受けるコンクリートの温度特性に及ぼす環境条件の影響, 土木学会年次学術講演概要集, pp.406-407, 1991
- 20) 浜幸雄・松村光太郎・田畑雅幸・富板崇・鎌田英治: 気温要因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
- 21) 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
- 22) コンクリート技術の要点'99, pp.155, 日本コンクリート工学協会, 1999
- 23) コンクリートの診断技術 '02, 基礎編, pp.106, 日本コンクリート工学協会, 2002.1
- 24) 北海道開発局道路設計要領, 第3集橋梁, 第2編コンクリート, p.3-コ 2-4, 2006.4
- 25) 緒方ほか: 超音波法によるコンクリート製水路の凍害診断, コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム, 日本コンクリート工学協会, pp.63-70, 2006.12