

コンクリートの凍害に関する劣化外力の評価方法

藤原忠司*

岩手県内に存在する道路橋を対象として、コンクリートの凍害を調査した。被害の形態と面積から、被害の程度を数値評価し、それと気象条件との関連を求めた。その結果、凍結融解日数に湿潤の程度を表わす係数を乗じた指標が、被害の程度と優れた相関関係にあることを見いだした。本文では、この指標を凍害サイクルと呼び、これを劣化外力として、耐凍害性を旨とした設計に組み込む方法を提案している。

Keywords : frost damage, road bridges, climatic conditions, durability design

1. ま え が き

アルカリ骨材反応や塩害等に引続き、最近では酸性雨の問題も加わって、コンクリート構造物に対する信頼感が一挙に崩れ去ったかの感がある。コンクリート構造物は半永久的と自負していた技術者にとって、信頼性の回復は急を要する重大な課題といえる。

この案件に対し、土木学会は試案の形で「コンクリート構造物の耐久設計指針⁽¹⁾」(以下、耐久設計指針と略称)を公表し、耐久性を確保するための体系的かつ具体的な方法を示した。その基本概念は、安全性に対する検討方法と同様であり、耐力に対応する耐久指数が断面力に対応する環境指数以上となるように設計する。新しい発想に基づいたこの設計手法は、たしかにコンクリート構造物の信頼性回復の有力な武器となる可能性を秘めている。しかしながら、「試案」とせざるを得ないことが端的に示しているように、この指針は確立されたものではなく、検討すべき余地が数多く残されていると思われる。

寒冷地においては、凍結融解作用による劣化、すなわち凍害がコンクリート構造物の耐久性を損なう主因のひとつであると認識されてきた。耐久設計指針でも、凍害は塩害と並び、重要な検討項目に位置付けられている。いま、凍害をもたらす気象作用等を劣化外力と呼ぶことにすれば、この外力がコンクリートの耐久性能を上回ったときに、凍害は発生する。これまで、凍害防止を目的とした研究は数多く行われ、それらの成果は各種の規準類に集約されてきた。たとえば、土木学会「コンクリート標準示方書・施工編⁽²⁾」では、耐凍害性に大きな影響を及ぼす水セメント比の最大値を、凍結融解がしばしば繰返される場合とそうでない場合とに区分して、規定している。これは、劣化外力を考慮して、それに応じた耐

久性能を要求する措置に外ならない。

しかしながら、気象作用等の劣化外力は、地域の特性にきわめて強く依存するため、これを単に2つに区分するのみでは、往々にして粗略の感を免れず、凍害発生に結びつきかねない。劣化外力を各地域の気象特性に応じて細分化し、しかも数値表示したのが、耐久設計指針のいう環境指数であると解釈できよう。この環境指数は、標準的な環境条件における環境指数値と環境条件の厳しさを考慮した増分値の和として算定される。問題は、増分値の設定であり、耐久設計指針では、セメント協会の「耐久性を阻害する要因マップ⁽³⁾」に示されている凍害日数を参考にする方法が推奨されている。しかし、この凍害日数が凍害の危険性を示す指標として、妥当であるかどうかは確認されておらず、実用に供するには、検討の余地がある。

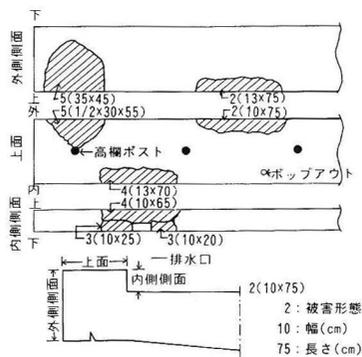
上述のように、凍害は劣化外力が耐久性能を上回ったときに発生する。既設コンクリート構造物に見られる凍害も、この条件のもとに発生したのは疑いなく、もし各構造物のコンクリートが同一の品質を有するとすれば、被害の程度は構造物が受ける気象作用の厳しき、すなわち劣化外力の大きさに対応する。本研究では、この考えのもとに、実構造物の凍害を調査して被害の程度を数値化し、それと気象条件との関連から、凍害に関する劣化外力の評価方法を検討した。すなわち、実際に生じている凍害に着目した点に本研究の特色があり、評価方法の検討は、このような手法によって、はじめて可能になると思われる。

2. 調査概要

(1) 調査の方針

調査の対象としたのは、岩手県に存在する道路橋であり、地覆部分に着目して、被害の程度を数値評価した。すべての道路橋に設けられている地覆は、融雪や日射等

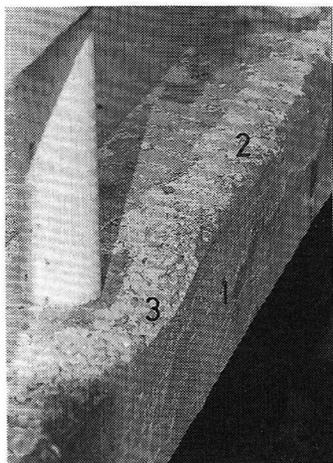
*正会員 工博 岩手大学教授 工学部土木学科
(〒020 盛岡市上田 4-3-5)



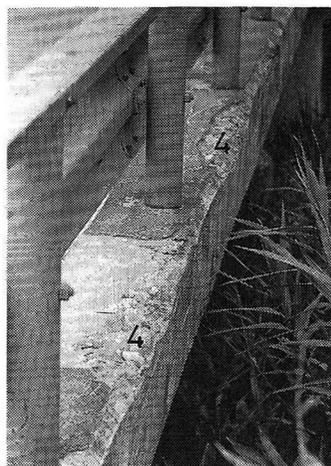
図—1 地覆の劣化状況図

表—1 被害形態の分類

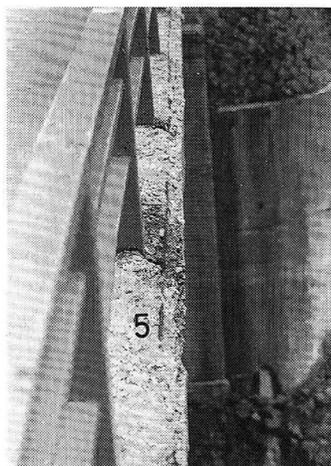
被害形態	
1	ひびわれ
2	軽度の剥離 (表面のモルタル部分が損失。深さ 5mm 程度以下)
3	中度の剥離 (粗骨材間のモルタルも損失。深さ 5~20mm 程度)
4	重度の剥離 (粗骨材も損失。深さ 20~50mm 程度)
5	崩壊 (粗骨材とモルタルが容易に剥落。深さ 50mm 程度以上)



写真—1 劣化の形態



写真—2 劣化の形態



写真—3 劣化の形態

の気象作用の影響を受けやすく、凍害の発生に敏感な部位であり、しかも観察が容易であるなど、本調査の目的にかなう条件を備えている。しかし、構造的に重要でないと考えられがちであるため、地覆コンクリートの品質は、施工の良否の影響を強く受け、ばらつきが大きいと予想される。すなわち、それぞれの耐久性能は異なり、観察される被害の程度には、この影響が反映される。被害の程度を劣化外力と関連付けるためには、この点を考慮する必要がある。しかしながら、実構造物の耐久性能を特定するのはきわめて難しく、耐久性能の違いを補正する操作は不可能に近い。

また、各道路橋が受ける気象作用はそれぞれ異なり、被害の程度と劣化外力の関係を各個毎に求めるには、それぞれが位置する場所の気象条件を知る必要があるが、

これも本調査では入手不可能の資料となる。そこで、気象資料としては、気象月報を利用することとし、各気象観測所の資料をもとに、県内を地域分けして、各地域内の道路橋は同一の気象作用を受けると仮定した。さらに、各地域内の地覆コンクリートの平均的な耐久性能は、すべての地域で等しいと仮定する。すなわち、後者の仮定によって、耐久性能の違いの影響を消去することになるが、この仮定が成立するためには、調査の対象とする道路橋の数を多くとる必要がある。本調査で観察した道路橋は 564 に達しており、この仮定に耐え得ると考えた。これらの道路橋を同一気象作用を受けると仮定した地域に振り分け、地域内の被害の平均とその地域の気象作用との関係を求めて、劣化外力の評価方法を検討するのが本文の内容である。

(2) 被害値の算定

道路橋の地覆コンクリートを対象とし、目視観察に

表-2 被害値

形態	1	2	3	4	5	被害値
面積 %	0.1~5.0					1
	5.1~15.0	0.1~5.0	0.1~1.0			2
	15.1~	5.1~15.0	1.1~10.0	0.1~5.0	0.1~1.0	3
		15.1~	10.1~	5.1~15.0	1.1~10.0	4
			15.1~	10.1~		5

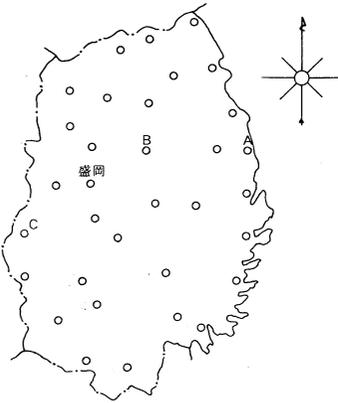


図-2 気象観測所

よって、図-1のような劣化状況図を作成する。観察は、両側地覆の上面および内側・外側側面の計6面で行った。

図中の被害形態は、表-1に従って分類している。形態は5つに分類され、数字の大きいほど被害が重いと考える。写真-1~3に各形態の例を示す。

次に、各被害形態の面積を地覆6面にわたって集計し、それぞれの面積を6面全体の面積に対する割合(%)で表示する。これら被害形態と面積割合との組合せによって、それぞれの被害値を表-2のように定める。

たとえば、中程度の剝離(形態3)が地覆6面合計で全体に対し2%の面積割合であったとすれば、表中の1.1~10.0%に該当し、被害値は3となる。写真-1の例のように、多くの場合、ひとつの道路橋の地覆には、いくつかの被害形態が混在する。これらの被害形態について、それぞれの被害値を求め、その合計を当該道路橋の被害値とした。この方法によれば、被害値は最大で21となる可能性がある。

(3) 気象資料

気象資料としては、気象月報の1985~1989年の5か年間を用い、凍結融解サイクル等の1年間の平均を求めた。図-2に示すように、岩手県内には、33の気象観測所が存在する。これらの資料を用い、岩手県内を気象条件によって地域区分することになる。

3. 被害程度の評価

凍害を受けた構造物を目視観察し、その被害の程度を数値評価する方法は種々試みられている⁽⁴⁾。しかしなが

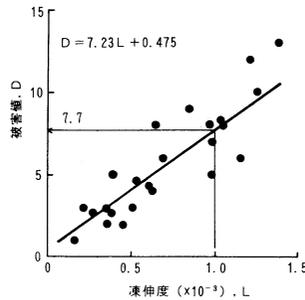
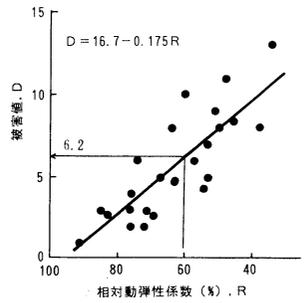


図-3 相対動弾性係数および凍伸度と被害値との関係

ら、その妥当性を検証している例は見られず、ここで用いた上述の評価方法も、感覚的なものに過ぎない恐れが充分にある。そこで、凍結融解試験によって、供試体に凍害を発生させ、目視観察による本方法に従って劣化の判定を行うとともに、力学的・物理的性質の変化も測定して、両者の関連を求めることにより、本評価方法の妥当性を確認してみた。供試体は10×10×40cmの角柱であり、水セメント比(50~100%)や使用骨材(砂利、碎石)等を様々に変えて、計13種類とした。

図-3は、相対動弾性係数および凍伸度と被害値との関係を示している。相対動弾性係数の低下が著しいほど、また長さ変化における膨張量(凍伸度)が大きいほど、凍害による力学的・物理的劣化が激しいと判定されるが、被害値はこれらの指標と比較的よく対応しており、いずれに対しても直線的な関係が成立している。この結果により、本方法で算定する被害値は、目でみた感覚的な劣化の状況を表示するにとどまらず、実質的な劣化の程度をも表現できると考えることにした。

一般に、相対動弾性係数が60%、凍伸度が 1×10^{-3} 程度に達すれば、そのコンクリートは凍害によって崩壊したとみなしている。図のように、これらの限界値に達したとき、対応する被害値はほぼ7となる。表-2で、被害値7となるのは、たとえば重度の剝離が15%以上の面積を占める場合(被害値:5)よりもさらに著しい被害であり、補修を要する段階であるのは疑いなく、これを崩壊とみなすことに異存はなからう。この点からも、本方法の被害値による評価はほぼ妥当であると思われる。

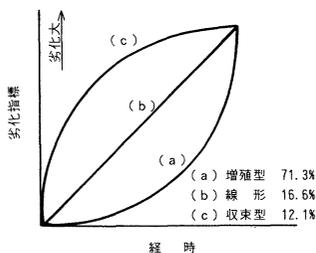


図-4 劣化の経時変化

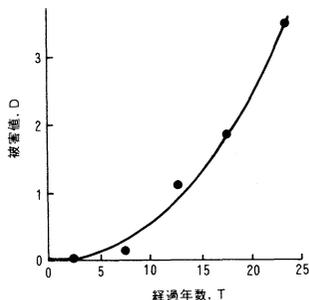


図-6 経過年数と被害値との関係

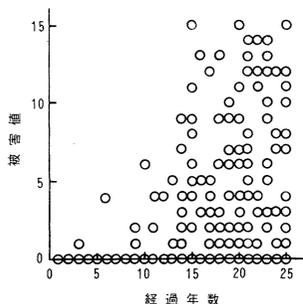


図-5 経過年数と被害値との関係

値を劣化外力とのみ関連付けるためには、この経過年数の影響も消去しておく必要がある。ここでは、経過年数を同一とする操作により、その影響を相殺することにした。

一般に、劣化の経時変化は、図-4のような、3つのタイプのいずれかに属すると考えられる。問題はコンクリートの凍害がどのような劣化の経過をたどるかであり、実構造物を対象としたこの種の調査は見当らない。そこで、凍結融解の実験結果を報告している文献⁽⁵⁾を収集し、凍結融解サイクルの増加にともなう動弾性係数や凍伸度のような劣化指標の変化を、図のタイプに分類してみた。収集した文献数は46であり、分類した件数は553に及ぶ。その結果、図中に示すように、初期の劣化は僅かで、その後急激に加速する増殖型が圧倒的に多く、これに線形も加えれば、9割に近い。そこで、本調査で観察した被害も、増殖型の経過をたどった結果であると考えたことにした。

次に問題となるのは、増殖型の曲線形の決定である。図-5は、調査した道路橋の架設後の経過年数と被害値との関係を示している。経過年数25年を超える道路橋は除外しているが、これは施工方法やAE剤に対する認識等が今日と異なるであろうことを考慮したためであり、これに該当する58の道路橋は、以下の解析で対象外とする。

図より、経過年数の多い道路橋ほど、被害の大きい傾向が認められる。しかしながら、同一経過年数でも、被害値が大きく異なる例は数多く存在し、ここにコンクリートの耐久性能や受ける気象作用の違いが反映されていると考えられる。ただし、調査対象の数が多いため、各経過年数に属する道路橋の耐久性能や気象作用を平均すれば、それらは経過年数毎にほぼ等しくなると仮定できよう。ここでは、さらに平均化するため、道路橋を経過年数5年毎に分類し、その平均の被害値を求めてみた。その結果が図-6に示されており、経過年数による被害の変化は、増殖型の曲線となっているのが認められる。この曲線を次のような指数関数型と仮定する。

$$D = aT^b \dots \dots \dots (1)$$

る。

なお、この実験では、塩水中に供試体を設置して凍結融解作用を与える条件も加えてみた。その結果、著しい剝離が速やかに進行し、全面積に及ぶ例もみられた。この場合、被害の形態が5で、面積割合が100%であるから、被害値は5となる。すなわち、被害が極限であるにもかかわらず、被害値は5にとどまるため、被害の程度が過小評価されることになり、この点は本算出方法の欠陥となる可能性がある。しかしながら、調査した範囲では、地覆の劣化が全面にわたって甚大な被害を受けている例は皆無であり、重度な被害形態の面積割合は最大でも数10%にとどまっていた。表-2の面積区分はこの観察結果に基づいており、ひとつの被害形態が広範囲にわたる場合を考慮に入れていない。したがって、このような場合に本方法を適用するには問題があるが、通常の被害状態では、本方法によっても、過小評価の恐れは少ないと言える。

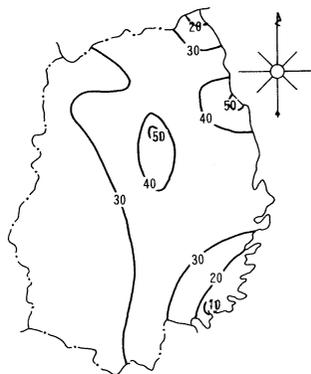
図-3に示した供試体の場合、重度の被害形態が広範囲にわたる例はなく、多くは複数の被害形態が混在していて、地覆で観察した実際の被害状態に近い。換言すれば、この実験は実際の被害をよく再現していると思われ、供試体を対象として算出した被害値が劣化の尺度と比例的に対応するとの結果は、実際の劣化をこの方法で合理的に判定できることを示している。

凍害は徐々に進行する。一方、調査した道路橋の架設年次はそれぞれに異なり、現時点で評価した被害値には、この経過年数の影響が当然含まれる。したがって、被害

表一三 セメント協会による劣化外力

No.	温度条件		凍結融解数のとり方
	最高	最低	
(1)	> 0°C	≤ -5°C	凍害日数
(2)	> 0°C	≤ -10°C	凍害日数
(3)	> 0°C	≤ -15°C	凍害日数
(4)	> 0°C	≤ -10°C	凍害回数
(5)	> 0°C	≤ -15°C	凍害回数

凍害日数：1日の外気温がその温度条件となる年間日数
 凍害回数：1日に限らず、その温度条件となる年間回数



図一七 セメント協会方式(1)の凍害日数
 Max>0°C, Min≤-5°C

ここで、 D ：被害値、 T ：経過年数、 a 、 b ：定数
 最小自乗法により、定数 a 、 b を求めたところ、次のようになった。

$$a=0.0030, b=2.5829$$

ここでは、個々の道路橋における被害の経時変化が、上式と同一の指数 b をもつ指数関数型の曲線であると仮定し、その傾き a がコンクリートの耐久性能や気象作用の影響を受けると考える。この傾き a は、該当する被害値と経過年数を上式に代入することによって、個々の道路橋毎に算出される。このようにして、各道路橋の曲線形を決定し、それから $T=25$ 年として、再び上式により被害値 D を求めた。すなわち、この被害値は、経過年数 25 年に換算した値であり、すべての道路橋の被害値を同一の経過年数に換算することで、経過年数の影響を消去できる。以下の解析では、この経過年数 25 年に換算したものを被害値と再定義し、この値を被害の程度とする。

4. 劣化外力の指標

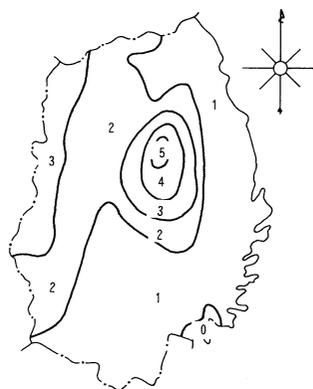
前述のように、耐久設計指針では、劣化外力として、環境指数を設定し、凍結融解作用の厳しさに応じた環境指数の増分値は、セメント協会の「耐久性を阻害する要因マップ」を参考にして決定できるとしている。この方式では、日最高気温が 0°C 以上で、日最低気温が -5°C 未満となる年間の日数を凍害日数とする。セメント協会では、この外に、最低気温および凍結融解繰り返し数のとり方を変えた表一三のような方法も提案している。

一方、凍害に関連すると思われるあらゆる要因を考慮し、凍害発生の地域的な危険性を示したものとして、長谷川の方法⁽⁶⁾がある。この方法では、凍害危険値を次式から算出して、これを凍害発生危険性の指標とする。

$$V_f = [\sum \{(FT + F \times u) \times \beta\} + I] \times c \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 V_f ：凍害危険値、 FT ：外気温上の年間の凍結融解日数、 F ：外気温上の年間の凍結日数、 u ：日射による融解率、 t ：氷点下の温度差による凍害重み係数、 I ：凍結日の最低気温を考慮した算出上の補正值、 c ：湿潤程度による凍害軽減係数

上式の FT は、外気温上の -1°C で凍結し、-0.9°C で融解するとした場合の凍結融解日数であると定義さ



図一八 凍害危険度

れ、セメント協会のいずれの方式とも異なる。算出された凍害危険値は、6段階に分けられ、改めて凍害危険度として表示される。

前述のように、気象月報の5か年分を用い、岩手県内の33の気象観測所について、セメント協会方式および長谷川方式による劣化外力の指標を求めた。この資料をもとに、劣化外力の大きさに応じて、岩手県内を区域分けしたマップを作成する。この際、地形の変化等を考慮して、線引きを行った。

図一七は、セメント協会方式のうち、耐久設計指針が推奨する日最高気温 0°C 以上、日最低気温 -5°C 未満となる年間の凍害日数の分布を示している。セメント協会によれば、全国的にこの凍害日数が最も多い地域は 60 日程度とされているが、岩手県の場合、最高値は観測所 A (図二参照) の 54 日で、全国的にみても、凍害日数の多い地域が存在する。

長谷川方式による凍害危険度の分布を示したのが図一八である。凍害危険度は 0~5 の 6段階に分けられ、そのすべてのランクが岩手県内に分布している。長谷川による全国の凍害危険度の分布図を参照しても、すべての

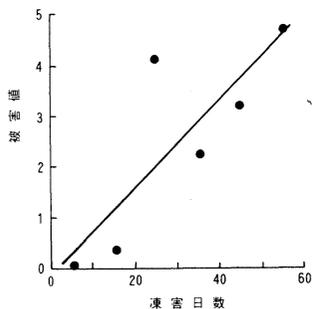


図-9 セメント協会方式(1)の検討(全橋梁)
Max>0°C, Min≤-5°C

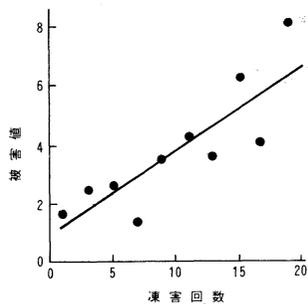


図-12 セメント協会方式(4)の検討(全橋梁)
Max>0°C, Min≤-10°C

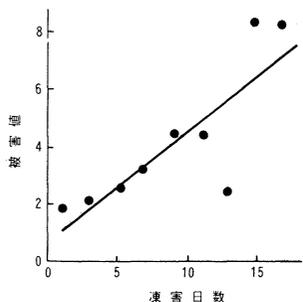


図-10 セメント協会方式(2)の検討(全橋梁)
Max>0°C, Min≤-10°C

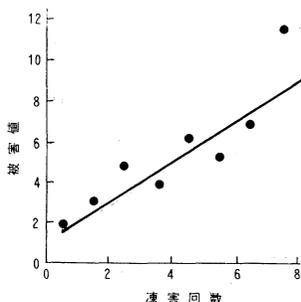


図-13 セメント協会方式(5)の検討(全橋梁)
Max>0°C, Min≤-15°C

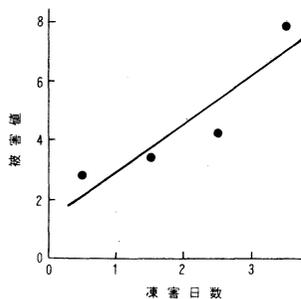


図-11 セメント協会方式(3)の検討(全橋梁)
Max>0°C, Min≤-15°C

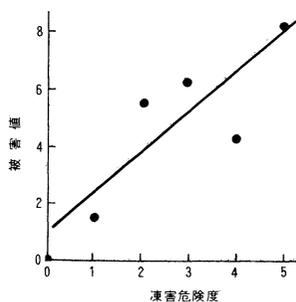


図-14 凍害危険度の検討(全橋梁)

ランクを含む都道府県は、岩手県以外に存在しない。

このように、岩手県の気象条件は場所によって、実に多様であることが認められる。したがって、岩手県は劣化外力と実際の被害との関連を求めようとする本研究の目的にならなかった地域と言えよう。

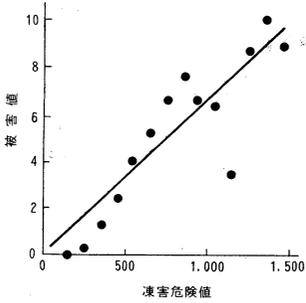
5. 劣化外力評価方法の検討

(1) 劣化外力マップによる検討

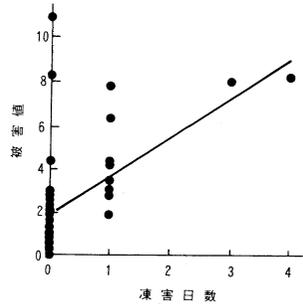
被害値を評価した道路橋の位置を図-7や図-8のような劣化外力図にプロットし、それぞれが受ける劣化外力の範囲を定めた。さらに、同一の範囲内にある道路橋の被害値を平均し、それと劣化外力との関係を求めた。その結果が図-9～15に示されており、横軸の各指標は凍害危険度を除き、範囲の代表値(中央値)である。

いずれの劣化外力指標も、被害値との間に、相関係数0.80以上の直線関係を有しており、この結果からすれば、どの指標によっても、劣化外力を妥当に評価できることになる。耐久設計指針が推奨するセメント協会方式(図-9)も、比較的ばらつきは大きいですが、劣化外力の指標として、充分有用であると考えられよう。

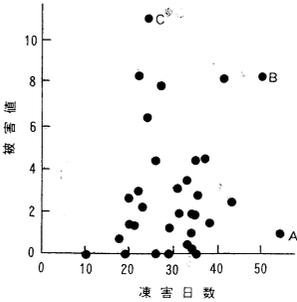
しかしながら、この検討には、重大な陥弊がある。たとえば、図-9の劣化指標の場合、図-7に示されるように凍害日数が50～60日の範囲にあるのは、観測所AとB(図-2参照)を中心にした2つの地域となっている。これらの地域の被害値に着目すれば、観測所Bを中心にした地域は、凍害日数の多さに応じて、被害値も大きいのにに対し、観測所Aを中心にした地域の被害値はさきわめて小さいのである。図-9で、この凍害日数と



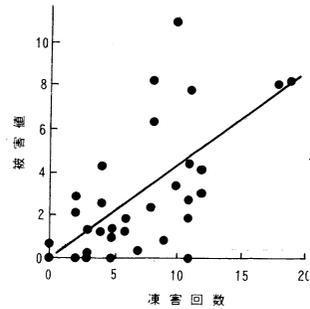
図一15 凍害危険値の検討 (全橋梁)



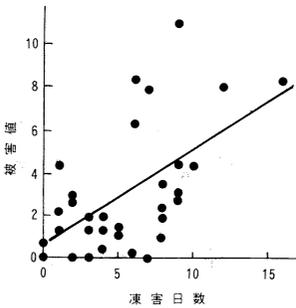
図一18 セメント協会方式 (3) の検討 (気象観測所)
Max>0°C, Min≤-15°C



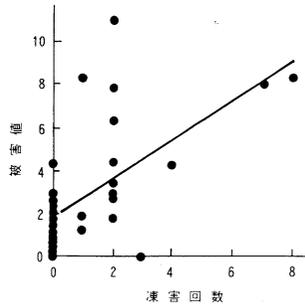
図一16 セメント協会方式 (1) の検討 (気象観測所)
Max>0°C, Min≤-5°C



図一19 セメント協会方式 (4) の検討 (気象観測所)
Max>0°C, Min≤-10°C



図一17 セメント協会方式 (2) の検討 (気象観測所)
Max>0°C, Min≤-10°C



図一20 セメント協会方式 (5) の検討 (気象観測所)
Max>0°C, Min≤-15°C

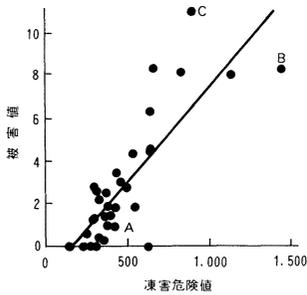
被害値の関係が、全体の傾向によく収まっているのは、これらの被害値が平均化された結果に外ならない。すなわち、全体的には一定の傾向を示しているとしても、その中には、例外が存在することになり、このような例外を含むようでは、劣化外力の妥当な指標とは言い難い。具体的には、この凍害日数を劣化外力の指標とした場合、同じ凍害日数でも、観測所 A を中心とした地域の劣化外力は過大に評価されることになり、B の劣化外力はその逆になってしまう。

同様の問題点は、図-9に限らず、図-10~15にも存在すると思われ、妥当な劣化外力の指標を見出すためには、別途検討する必要がある。

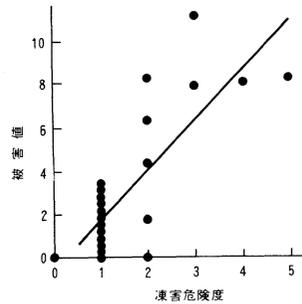
(2) 気象観測所を中心とした地域区分による検討

気象観測所の資料から算出された劣化外力の各指標を被害値とより密接に関連付ける目的で、各気象観測所を中心にした33の地域を設定し、調査した道路橋を各地域に分類した。各地域内に存在する道路橋は、中心となるその観測所と同一の気象作用を受けると仮定するが、距離や地形等による気象の違いを考慮し、該当する観測所から距離で10 km以内、標高差で50 m以内にある道路橋のみを対象とすることにした。調査した道路橋のうち、対象となるのは半数以下(208)で、その分、各地域内で平均した被害値の信頼性は劣ることになるものの、定量的検討に充分耐え得る数であると思われる。

図-16は、耐久設計指針に示されているセメント協会方式の凍害日数と被害値との関係を示している。



図—21 凍害危険値の検討（気象観測所）



図—22 凍害危険度の検討（気象観測所）

何らの傾向も見られず、この凍害日数は劣化外力の指標として全く用をなさないと言える。このことは、既に指摘したように、気象観測所 A および B を中心とした両地域を比較すれば、さらに明瞭であろう。すなわち、両地域の凍害日数がほぼ同じであるにもかかわらず、被害値の差はきわめて大きい。また、被害の最も大きい気象観測所 C（図—2 参照）を中心とした地域の凍害日数が 20 日程度と小さい点も特徴的である。耐久設計指針によれば、環境指数の増分値をこの凍害日数によって決定し、凍害日数が 10～20 日程度の場合は、10 の増分値とすることが考えられるとしている。増分値の最大値は 40 であり、凍害日数の少ない地域 C は劣化外力が相対的に小さいと評価される。ところが、実際に地域 C の被害値は大きく、その値からして、我国でも最も被害の大きい地域のひとつと推察される。ここでは、被害値が劣化外力の大きさに対応すると考えている。したがって、たとえば地域 C は相対的に最も劣化外力が大きいと評価されなければならない。このように対応しない凍害日数は劣化外力の指標として、妥当性を大いに欠くと言わざるを得ない。

図—17～20 では、セメント協会が提唱する外の 4 つの指標を検討している。最低気温や凍結融解繰返し数のとり方により、被害値との対応に違いがみられ、最低気温を -10°C にした場合および凍結融解を回数で算出した場合に、劣化外力の指標が大きくなるほど、被害値も大きい傾向がみられる。しかし、その傾向も明瞭とは言えず、いずれのセメント協会方式も、劣化外力の評価指標として適当ではないと考えられる。

長谷川による凍害危険値および凍害危険度を検討したのが図—21 および図—22 である。

凍害危険値は、被害値に対し、比較的相関の高い直線関係にあり、これを劣化外力の指標とすることの有用性が認められる。図—16 で、凍害日数が多いにもかかわらず、被害の軽微である地域 A も、全体の傾向に収まっており、凍害日数に比し、凍害危険値の有用性を際立たせている。この凍害危険値を段階分けした凍害危険度の場合は、ばらつきの大い印象を与える。凍害危険度を

求めるためには、凍害危険値を算出する必要があり、しかも凍害危険値の方が被害値との対応に優れていることからすれば、凍害危険値そのものを劣化外力の指標とするのが、より適切であると言えよう。

以上の結果より、セメント協会方式と長谷川方式とを比較すれば、凍害には多くの気象要因が関連していることを再認識させられる。すなわち、セメント協会方式では、凍害に関連する要因として、外気温の変化のみに着目しており、そのため被害値との対応に欠けているのは疑いない。凍害には、外気温の変化の外に、日射による融解や降雪による湿潤の程度等も関連する。これらを考慮したのが長谷川方式であり、凍害日数（回数）に比し、凍害危険値が被害値と優れた相関関係にあるのも、ある意味で当然と言える。

しかしながら、この凍害危険値の算出は、やや複雑に過ぎる。しかも、被害値との対応が良好であるとは言え、たとえば凍害危険度の最も大きい地域 B や被害の最も著しい地域 C が回帰直線からかけ離れているなど、要所となる地域で相関に問題があり、凍害の危険性を精度よく表現する指標として、信頼性に欠ける面も見られる。

そこで、簡便性と信頼性とを旨とし、セメント協会方式ならびに長谷川方式で用いられている気象要因を様々な組み合わせた指標を設定し、それらの有用性を検討してみた。その結果、次式に示す長谷川方式の外気温上の凍結融解日数に日射による融解作用を加味した全凍結融解日数 $(FT + F \times u)$ と湿潤の程度を表わす凍害軽減係数 (c) との積が、被害値との対応に最も優れていることを見出した。この積を凍害サイクルと呼び、被害値との関係を示したのが、図—23 である。

$$\text{凍害サイクル} = (FT + F \times u) \times c \dots \dots \dots (3)$$

きわめて良好な直線関係が成立しており、この凍害サイクルは劣化外力の指標として、十分な信頼性を有していると評価できよう。凍害危険値と被害値との関係で、直線から離れていた地域 B も、この図ではほぼ直線上に位置する。この地域 B の凍害危険値が大きい理由のひとつは、式 (2) 中の氷点下の温度差による凍害重み係数 (t) および凍結日の最低気温を考慮した算出上の

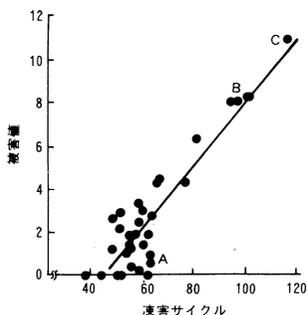


図-23 凍害サイクルの検討 (気象観測所)

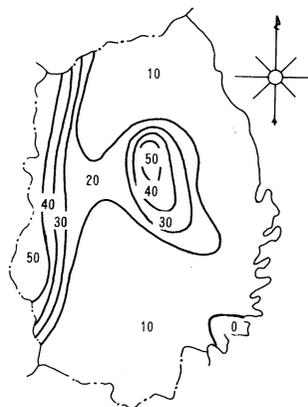


図-24 凍害サイクルによる環境指数増分値の分布

補正值 (I) が大きい点にあり、換言すれば、地域 B は、最低気温がきわめて低い寒冷地であるためとなる。凍害サイクルには、この最低気温の影響が含まれない。そして、この凍害サイクルの場合に、地域 B が全体の傾向によく取まるとの結果は、最低気温の影響を重視する必要のないことを示唆しているように思われる。

また、凍害危険値の検討で、同様に直線から離れていた地域 C が、この図では回帰直線に近接しているのも特徴的である。この地域 C では、被害値が最も大きく、上述のように、本文の考え方からすれば、凍害の危険性を示す指標も、この地域で最大値をもたなければならないが、凍害危険値はそうになっていない。これに対し、地域 C の凍害サイクルは最大値を示しており、この点からも、劣化外力指標としての、凍害サイクルの妥当性がうかがわれる。

地域 C は豪雪地帯に位置する。したがって、冬季間、コンクリートが湿潤状態になる可能性は大きく、そのため凍害発生絶対的な要件である水分供給が、他の地域に比して著しいと推察される。この湿潤の程度は、凍害危険値および凍害サイクルのいずれにおいても、凍害軽減係数として考慮されている。凍害軽減係数との名称からすれば、この値が大きいほど、凍害を免れる可能性が大きいとの印象を受けるが、長谷川の定義は逆であり、最大値の $c=1$ の場合に、湿潤程度による危険性が最も高く、地域 C は、岩手県でただ 1 箇所、この値を有する。

凍害危険値および凍害サイクルの算出においては、地域 C の凍害軽減係数にいずれもこの値を用いた。それにもかかわらず、被害値との対応に差が見られるとの結果は、湿潤程度の影響の評価が両者で異なることを意味し、凍害サイクルの方が相対的にこの影響を大きく見積っていると見える。これには、最低気温の取扱いの違いも関連しているようだが、いずれにせよ、湿潤程度が凍害に大きく関連するのは疑いなく、実際の被害との対応を考慮するならば、凍害サイクルの方がこの影響を正しく捉えていることになる。

表-4 環境指数増分値の提案

凍害サイクル (日)	環境指数増分値
0 ~ 40	0
40 ~ 70	10
70 ~ 80	20
80 ~ 90	30
90 ~ 100	40
100 ~	50

に応じて、環境指数の増分値を決める。その決定にセメント協会方式を適用するには無理があり、また、長谷川方式にも難点が見られるため、ここでは実際の被害との対応に優れている凍害サイクルをもとにする方法を提案したい。これは降雪等による湿潤の程度を考慮した年間の凍結融解日数と言え、凍害危険値に比し、より簡便に求まる。この凍害サイクルに応じ、表-4 に示すような環境指数の増分値を提案する。

耐久設計指針では、凍害の場合、増分値の最高を 40 としている、これに対し、塩害の最高値は 70 であり、凍害に比し、被害の影響を重大に見積っている。たしかに、塩害とはコンクリートの劣化もさることながら、鉄筋の腐食が主であり、構造的に与える影響は大きい。しかしながら、本調査によれば、凍害によってコンクリートが剥落し、鉄筋が露出して腐食している例も少なからず存在していた。そのような例からすれば、劣化が進んだ状態では、凍害も塩害に劣らない影響をもたらすと考えざるを得ない。そのため、ここでは増分値の最高値を耐久設計指針よりも大きくとり、50 とした。図-23 より、凍害サイクルが 100 以上の地域の被害値は 8 を超えており、前述のように、これは疑いもなく甚大な被害と言える。そのため、凍害サイクル 100 以上の場合に、増分値の最高値 50 を与える。また、同図から凍害サイクル 40 以下では、凍害の懸念がほとんどないと判断できる。そこで、凍害サイクル 40 以下では増分値を 0 とし、最高値との間については、比例配分した。

前述のように、耐久設計指針では、劣化外力の大きさ

このように、環境指数の増分値を凍害サイクルと比例

的に対応させたが、凍害サイクルは被害値と比例的に対応し、また、被害値は劣化の力学的・物理的指標と比例的な関係にあるとの一連の因果関係からすれば、提案する増分値は凍害の危険性を比例的に表示する合理的な指標と言える。

図-24は、このようにして定めた岩手県における環境指数の増分値の分布を示している。本調査で求めた被害値の分布は岩手県に特有であり、他の地域に適用できない。一方、増分値は凍害サイクルによって決定され、凍害サイクルは気温や降雪量等の気象資料によって算出される。気象作用に普遍性があるのは疑いなく、したがって、気象資料をもとに凍害サイクルを全国各地について算出し、表-4に従って環境指数の増分値に置き換えるならば、この図を全国的な分布図に拡大できると考えられる。

6. あとがき

本研究では、岩手県内に存在する道路橋を対象としたコンクリートの凍害調査をもとに、凍害をもたらす劣化外力の評価方法を検討した。得られた結論は以下の通りである。

(1) 本調査では、凍害による被害の程度を形態と面積とにより、被害値として数値評価した。この評価方法の妥当性を実験的に確認しており、目視観察によって被害の程度を判断する際の有用な手段になり得ると考えられる。

(2) 凍害の進行過程は増殖型と思われ、被害が時とともに急速に進展していく恐れのあることに注意を要する。本研究では、この経時変化を考慮し、すべての道路橋の被害値を同一の経過年数に換算する操作により、経過年数の異なる各橋梁の被害を比較可能とした。

(3) 被害値と気象条件との関連を解析し、劣化外力評価方法を検討した。耐久設計指針では、コンクリートの凍害をもたらす劣化外力である気象作用を環境指数として数値表示し、その決定には、セメント協会の凍害日数に基づく方法の適用を推奨している。本解析の結果、この凍害日数は、劣化外力の指標として、妥当と言える。

ことが判明した。これは、この指標が外気温の変化のみに着目しているためであると考えられる。

(4) 外気温の変化に加え、日射による融解や降雪による湿潤の程度など、凍害に関連すると思われるあらゆる気象要因を考慮した長谷川による凍害危険値は、被害値との対応に優れ、劣化外力の指標として、有用であると判断できる。

(5) 全凍結融解日数に湿潤の程度を表わす凍害軽減係数を乗じた指標は、被害値との対応において、凍害危険値よりもさらに優れた相関を示す。ここでは、これを凍害サイクルと呼び、劣化外力の指標として用いるのが妥当であると指摘した。

(6) 凍害サイクルにより、耐久設計指針の言う環境指数の増分値を決定する方法を提案した。ここでは、岩手県についてのみ、この増分値の地域的な分布を示したが、気象資料により、これを全国的に拡大できる。

おわりに、本研究遂行に際し、多大な御援助を賜った岩手県土木部の各位ならびに調査・解析に御尽力戴いた(株)アール・シー構造設計社長 河村廣次氏、岩手大学技官 帷子國成氏、岩手大学卒業研究生 佐藤幸喜氏(現・建設省)、高田健氏(現・戸田建設)、長畑貴士(現・盛岡市)、尾焼津健氏(現・静岡市)に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)、コンクリートライブラリー、第65号、土木学会、1989.8.
- 2) コンクリート標準示方書・施工編：土木学会、p.42、1986.10.
- 3) 耐久性専門委員会報告D-2：耐久性を阻害する要因マップその二、セメント協会、1986.4.
- 4) たとえば、今井益隆：コンクリート構造物の凍害調査、コンクリート工学、Vol.14、No.11、pp.16~22、1976.
- 5) たとえば、永倉正：コンクリートの配合諸条件が凍結抵抗性におよぼす影響に関する基礎的研究、土木学会論文集、No.98、pp.15~25、1963.10.
- 6) 長谷川・藤原：凍害(コンクリート構造物の耐久性シリーズ)、技報堂出版、1988.

(1991.4.16受付)

EVALUATING METHOD OF CLIMATIC CONDITION BRINGING ABOUT FROST DAMAGE OF CONCRETE

Tadashi FUJIWARA

It goes without saying that the frequency and degree of frost damage strongly depends upon climatic conditions. In this investigation, a survey of the frost damage of concrete used in road bridges was made and the degree of damage was classified in accordance with the state and area of damage observed. The relation between this degree of damage and climatic conditions shows that the degree of damage is related not only to the number of freezing and thawing but also to the degree of saturation due to rainfall and snowfall during winter. It is necessary in designing concrete structure to take into consideration these climatic conditions for preventing frost damage. The adequate evaluating method of these climatic conditions is shown here.