

気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測

ESTIMATION OF FROST DAMAGE OF CONCRETE BASED ON METEOROLOGICAL FACTORS

浜 幸雄*1, 松村 光太郎*2, 田畑 雅幸*3, 富板 崇*4, 鎌田 英治*5

Yukio HAMA, Kotaro MATSUMURA, Masayuki TABATA,

Takashi TOMIITA and Eiji KAMADA

This study is aimed to estimate the frost damage of concrete under natural weatering conditions. An empirical formula based on the meteorological factors was obtained by means of multiple regression analysis of the results of freezing-and-thawing tests which were carried out under several experimental conditions to evaluate the effects of the freezing-and-thawing conditions (lowest temperature, keeping time of lowest temperature, cooling rate) and the curing conditions of concrete (water content). The formula describes the number of equivalent freezing-and-thawing cycles to ASTM C666 A. Applying meteorological data in some cities of Japan to this formula, the number of equivalent cycles in one year and the length of service life were calculated. The correspondence of estimated value to the results of exposure test for 15 years was investigated.

keywords : Concrete, Frost damage, Meteorological factors, Length of service life, Exposure test

コンクリート, 凍害, 気象因子, 耐用年数, 暴露試験

1. はじめに

コンクリートの凍害は、寒冷地におけるコンクリート構造物にとって重大な問題であり、わが国でも数多くの研究が行われている。現在、コンクリートの耐凍害性を判定するための試験方法として、ASTM C-666 A 法に基づく水中凍結水中融解試験が世界的に広範に採用され、わが国における JIS A 6204 附属書 2 の凍結融解試験方法も同法を基礎としている。しかし、この実験室における促進試験結果が自然環境のもとでどのように対応するかについての知見は得られておらず、自然環境下における構造体コンクリートの凍害劣化予測にはその結果を用いることができないのが現状である。このため、コンクリートの耐凍害性に及ぼす外的要因、環境条件の影響に関する研究が種々行なわれている。

長谷川¹⁾は、気温、日射量、降水量に関するデータを用いて全国各地の凍害危険度を算出し、凍害危険度マップとして分類している。

田畑²⁾は、凍結融解試験の条件を種々に変化させた実験を行い、模擬的な自然環境を実験室で再現することにより、ASTM C-666 A 法による試験結果との対応を定量的に評価する試みを行っている。

大和ら³⁾は、単位水量、単位セメント量、空気量の内的要因による耐久性指数の影響を示す回帰式を導き、これを基に凍結最低温度、

飽水度、塩分量の外的要因の影響を補正する考え方を示している。

桜井ら⁴⁾は、RC モデル化供試体の促進試験と暴露試験の結果から、凍害と鉄筋腐食等の劣化の進行および複合の影響の程度を定量的に把握し、RC 部材の経年劣化推定のための各劣化指標と性能の関係のモデル化を検討している。

山下ら⁵⁾は、耐凍害指標値と凍結融解回数、相対動弾性係数の関係を示す劣化特性曲線を提案し、総合的にコンクリートの凍害劣化を表現することを試みている。

成田ら⁶⁾は、コンクリートの相対動弾性係数の低下に関して凍害劣化確率モデルを提案し、その構成要素である凍結温度、含有水分、組織構造の影響について検討している。

しかしながら、これらの研究においても、ASTM C-666 A 法の結果と自然環境下でのコンクリートの凍害劣化との対応は十分に明らかになっていないとはいえず、自然環境下での気象因子を考慮した上で実験室での凍結融解試験結果を評価し、構造物の耐久性と関連づけることが実用上の課題となっている。そこで、本研究では気象因子を考慮してコンクリートの凍害劣化を予測することを目的として、既往の実験結果²⁾をもとに、試験時の温度条件、養生条件などが促進凍結融解試験の結果に及ぼす影響について統計的な解析を行

*1 北海道大学大学院材料性能学分野 助手・博士(工学)

*2 北海道大学大学院工学研究科建築工学専攻 大学院生・工修

*3 北海道職業能力開発短期大学校建築科 教授・工博

*4 ウェザリングワークショップ 工博

*5 北海道大学大学院材料性能学分野 教授・工博

Research Assoc., Div. of Building Materials, Graduate School of Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Div. of Building Materials, Graduate School of Hokkaido Univ., M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Hokkaido Polytechnic College, Dr. Eng.

Weathering Workshop, Dr. Eng.

Prof., Div. of Building Materials, Graduate School of Hokkaido Univ., Dr. Eng.

い、各種要因の影響程度を定量化した。さらに、屋外暴露試験の結果から気象要素とコンクリート温度との関係を明らかにするとともに、全国各地の気象データをあてはめ、自然環境下において凍結融解作用を受けるコンクリートの凍害劣化を推定する実験式を誘導し、その実験式を用いた推定結果と15年間の暴露試験結果との対応について検討した。

2. 凍害環境作用の定量化

2.1 凍害劣化に及ぼす環境要因の影響に関する実験

(1) 実験の概要²⁾

本研究で用いたデータは、実験上の経験に基づいて作製された、耐凍害性の劣るコンクリート3種(Iグループ)と耐凍害性に優れたコンクリート3種(IIグループ)のものである。使用したコンクリートの条件を一覧として表1に示す。

コンクリートの耐凍害性に影響する環境要因は、ASTM C-666 A法の水中凍結水中融解の条件を基本とし、凍結最低温度、最低温度の持続時間、冷却速度(温度勾配)、これに凍結融解開始以前の環境が養生条件として加えられている。これらの因子と水準を表2に、割付表を表3に示す。表1の6種のコンクリートについて、表3の実験計画法によるL16実験を実施し、Iグループの3種については、-30℃に対応させた-2℃、-18℃に対応させた気中凍結水中融解試験(最低温度-18℃)を追加実験として行っている。コンクリートの養生は、凍結融解開始以前の試験体の条件に対応させ、水和および乾燥の程度を変化させる目的で、以下に示す4条件としている。

- ①水中3週：脱型(材齢2日)から材齢3週まで20±2℃の標準水中養生
 - ②気中3週：脱型から材齢19日まで温度20℃・湿度80~90%の気中養生
 - ③20℃乾燥：脱型から材齢2週まで標準水中養生後、温度20℃・湿度80~90%の条件で5日間の乾燥
 - ④30℃乾燥：③の条件で乾燥温度を30℃とした養生
- (乾燥行程のある②③④の条件では、養生終了後2日間水中に浸せきして凍結融解試験を行っており、凍結融解の開始材齢はすべて材齢3週である。)

(2) 各種要因の影響程度の数値化⁸⁾

a) 解析に用いた指標

凍結融解試験におけるコンクリートの劣化の過程を表す指標として相対動弾性係数を用いた。ここでは全ての試験結果において、図1に示すように、凍害劣化の過程を相対動弾性係数90%を境に、劣化の兆候が現れる過程とそれ以降の劣化が明確に現れる過程の2つの段階に分けて考え、それぞれの過程における凍結融解1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量を求めた。

$$\Delta E = \delta Ed / \delta Cy \quad (1)$$

ここに、 ΔE ：凍結融解1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量(%)
 δEd ：相対動弾性係数の変化量(%)
 δCy ：サイクル数の変化量(回)

さらに、Iグループ、IIグループそれぞれについて、コンクリートの種類による耐凍害性の差を除き、環境条件による差のみを記述した指標とするために、グループ内の各種類のコンクリートの1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量の平均値(Ai)を、グループ

表1 使用コンクリート一覧

グループ	記号	使用材料			調査			フレッシュ性状	
		細骨材	粗骨材	混和剤	W/C %	S/a %	単位水量 kg/m ³	スラブ厚 cm	空気量 %
耐凍害性の劣るコンクリート (Iグループ)	5N	広島**	広島**	なし	50	43.9	181	17.5	1.0
	5V*	広島**	広島**	なし	50	43.9	190	20.0	0.3
	7N	広島**	広島**	なし	70	48.2	189	18.5	1.6
耐凍害性に優れたコンクリート (IIグループ)	5T	福岡	当別	なし	50	45.5	170	18.5	3.1
	5A	広島**	広島**	AE剤	50	43.5	170	19.5	3.5
	7A	広島**	広島**	AE剤	70	47.7	178	18.5	4.0

*減圧下で混練してエントラップエアを減じたコンクリート
 **北海道広島産

表2 実験の因子と水準(水中凍結水中融解)

因子	凍結融解試験条件			養生条件
	最低温度	最低温度の継続	温度勾配	
水準	-2℃* -5℃ -10℃ -18℃ -30℃	無 有(4~4.5時間)	3 Cy / day (1.4~5.9℃/時間) 6 Cy / day (4.9~10.3℃/時間)	水中3週 気中3週 20℃乾燥 30℃乾燥

*耐凍害性の劣るコンクリート(Iグループ)についての追加実験

表3 直交表による割付け

実験	試験条件	要因			
		養生条件	凍結融解試験		
			最低温度 (℃)	最低温度の持続	温度勾配 (Cy/day)
L16実験	1	水中3週	-30	無	3
	2	水中3週	-5	無	6
	3	水中3週	-10	有	6
	4	水中3週	-18	有	3
	5	気中3週	-30	有	6
	6	気中3週	-5	有	3
	7	気中3週	-10	無	3
	8	気中3週	-18	無	6
	9	20℃乾燥	-30	有	6
	10	20℃乾燥	-5	有	3
	11	20℃乾燥	-10	無	3
	12	20℃乾燥	-18	無	6
	13	30℃乾燥	-30	無	3
	14	30℃乾燥	-5	無	6
	15	30℃乾燥	-10	有	6
	16	30℃乾燥	-18	有	3
追加実験* (-2℃)	17(1')	水中3週	-2	無	3
	18(5')	気中3週	-2	有	6
	19(9')	20℃乾燥	-2	有	6
	20(13')	30℃乾燥	-2	無	3
追加実験* (気中凍結水中融解)	21(4')	水中3週	-18	有	3
	22(8')	気中3週	-18	無	6
	23(12')	20℃乾燥	-18	無	6
	24(16')	30℃乾燥	-18	有	3

*耐凍害性の劣るコンクリート(Iグループ)についての追加実験

全体の1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量の平均値(A0)に移動することにより、1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量(ΔE)を標準化した。

$$\Delta Es = \Delta E \times A0 / Ai \quad (2)$$

ここに、 ΔEs ：標準化した1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量(%)
 b) 重回帰分析

標準化した1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量(ΔEs)を目的変数とし、実験の因子である最低温度、最低温度の持続時間、温度勾配、養生方法、凍結融解試験方法およびコンクリートのグループを説明変数として重回帰分析を行った。ここで、養生条件、凍結融解試験方法、コンクリートのグループについては表4に示すように数値化した。解析は、目的変数であるΔEsを常数とした場合[(3)式]と対数変換した場合について行った。ただし、図2に示すように、1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量と凍結最低

温度とは線形の関係があることから、対数変換した場合については最低温度も対数変換して解析を行った [(4)式]。

$$\Delta Es = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \dots + a_8X_8 \quad (3)$$

$$\ln(\Delta Es) = a_0 + a_1X_1 + \dots + a_6 \cdot \ln X_6 + \dots + a_8X_8 \quad (4)$$

- ここに、 $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_8$: 回帰係数
 X_1, X_2, X_3 : 養生条件
 X_4 : 凍結融解試験条件
 X_5 : コンクリートのグループ
 X_6 : 凍結最低温度(°C)
 X_7 : 最低温度の持続時間(時間)
 X_8 : 温度勾配(°C/時間)

表5に重回帰分析結果を示す。目的変数を ΔEs とした場合に比べ、 $\ln(\Delta Es)$ を指標とした方が相関が高くなった。また、各回帰係数の重要性を表す t 値の小さな最低温度の持続時間 X_7 , 温度勾配 X_8 の項を削除して重回帰分析を繰り返したが、全変数を説明変数として解析した場合に最も相関性は高くなっているものの、最低温度の持続時間 X_7 , 温度勾配 X_8 の項を削除しても重相関係数および自由度調整済み重相関係数には大きな差は認められなかった。目的変数を $\ln(\Delta Es)$ とし、説明変数の最低温度の持続時間 X_7 , 温度勾配 X_8 の項を削除した回帰式 [(4)'式, (4)''式]の分散分析結果(表6)から、この回帰式は十分実用に供することができると判断される。したがって、凍結融解1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量は、気象条件の要素としては最低温度のみで、それに加えてコンクリート条件としての耐凍害性の程度(コンクリートのグループ)、養生条件および凍結融解条件の4要素で説明できるものといえる。

<劣化の兆候が現れる過程>

$$\ln(\Delta Es) = -1.00 - 0.41X_1 - 1.36X_2 - 1.98X_3 - 2.77X_4 - 1.57X_5 + 1.15 \ln X_6 \quad (4)'$$

<劣化が明確に現れる過程>

$$\ln(\Delta Es) = -0.28 + 0.35X_1 - 0.22X_2 - 0.80X_3 - 2.73X_4 - 1.47X_5 + 0.69 \ln X_6 \quad (4)''$$

以上の解析結果から、凍結融解時の条件と1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量の間に(5)式に示す実験式を得た。表7に各回帰係数を示す。

$$\Delta Es = \alpha \times C \times G \times F \times (-t)^\beta \quad (5)$$

- ここに、 α, β : 定数
 C : 養生条件に関する係数
 G : コンクリートの耐凍害性の程度に関する係数
 F : 凍結融解条件に関する係数
 t : 凍結最低温度(°C)

2.2 暴露試験による気象要素とコンクリート温度の測定¹⁰⁾

(1) 実験の概要

温度測定用コンクリート供試体は、10×10×40cmの形状で、茨城県つくば市の建設省建築研究所・屋外暴露試験場内(36° 07' 38" N, 140° 04' 39" E)の芝生上の高さ1.0mの架台上に水平に置き、供試体中心部および上面の深さ1.0cmの位置に、銅-コンスタンタン熱電対を埋め込み、コンクリート温度を測定した。それと同時に、暴露場所での気象因子として、気温、風速、日射量、降水量などの測定も行った。観測機器の仕様は、気象庁で使用しているものに基づいている。測定期間は、1993年3月1日から11月30日までとした。

凍結融解サイクル数

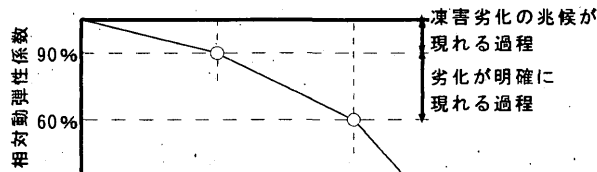


図1 凍害劣化過程の模式図

表4 説明変数の数値化

養生条件	X1	X2	X3	凍結融解試験条件	X4	コンクリートのグループ	X5
水中3週	0	0	0	水中凍結	0	Iグループ	0
気中3週	1	0	0	水中融解	0	IIグループ	1
20°C乾燥	0	1	0	気中凍結	0		
30°C乾燥	0	0	1	水中融解	1		

表5 重回帰分析結果

劣化過程	目的変数	説明変数	決定変数	重相関件数	修正済み重相関係数
劣化の兆候	ΔEs	全変数	0.6073	0.7793	0.7584
		全変数	0.8782	0.9371	0.9318
		X7X8削除	0.8641	0.9296	0.9252
明確な劣化	$\ln \Delta Es$	全変数	0.6578	0.8110	0.7918
		全変数	0.8266	0.9092	0.9005
		X7X8削除	0.8203	0.9057	0.8992

表6 分散分析表

劣化過程	要因	偏差平方和	自由度	不偏分散	F値	P値	判定
劣化の兆候	回帰	168.20	6	28.033	69.248	0.000	**
	偏差	36.838	91	0.4048			
	全体	205.04	97				
明確な劣化	回帰	287.12	6	47.853	105.99	0.000	**
	偏差	45.149	100	0.4515			
	全体	332.27	106				

** : 1%有意

表7 回帰係数

係数	凍害劣化の過程	
	劣化の兆候 (100% ≥ Ed > 90%)	明確な劣化 (90% ≥ Ed > 60%)
α	0.37	0.76
β	1.15	0.69
G	Iグループ(劣)	1.00
	IIグループ(優)	0.06
C	水中養生	1.00
	気中養生	0.66
	20°C乾燥	0.26
	30°C乾燥	0.14
F	水中凍結水中融解	1.00
	気中凍結水中融解	0.21

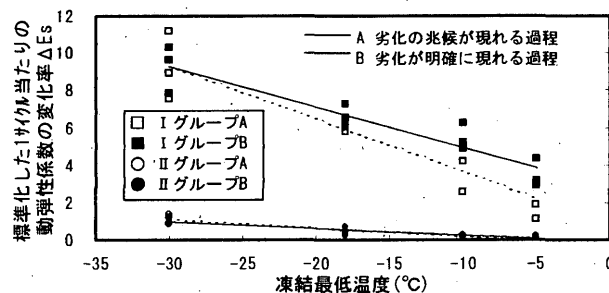


図2 凍結最低温度と標準化した1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量 ΔEs

(2) 気象要素とコンクリート温度の関係

測定されたコンクリート温度から日最高温度と日最低温度を抽出し、気温のほか、昼間の日射による温度上昇、早朝の放射冷却現象、風による影響を考慮して、コンクリート温度と気象要素との関係を表す(6)式および(7)式を導いた。なお、風速は放物線則により地上1.0mの位置での値に補正した。また、降水量も加えた重回帰分析でも検討しているが、誤差の減少、相関係数の増加はわずかであり、簡便性の観点から採用しなかった。図3にコンクリートの日最高温度および日最低温度の測定値と推定値の対応を示す。

<日最高温度>

$$t_{c \max} = 1.016 t_{\max} - 0.915W_d + 0.402S_d + 0.937 \quad (6)$$

ここに、 $t_{c \max}$: コンクリートの日最高温度(°C)
 t_{\max} : 日最高気温(°C)
 W_d : 昼間平均風速(m/s)
 S_d : 日積算日射量(MJ/m²)
 [データ数 n = 265, Δ $t_{c \max}$ = 1.368]

<日最低温度>

$$t_{c \min} = 1.101 t_{\min} + 0.417W_n - 1.412C_i - 1.498 \quad (7)$$

ここに、 $t_{c \min}$: コンクリートの日最低温度(°C)
 t_{\min} : 日最低気温(°C)
 W_n : 夜間平均風速(m/s)
 C_i : 晴天指数(=日積算日射量/大気外日積算日射量)
 [データ数 n = 265, Δ $t_{c \min}$ = 0.558]

3. 凍結融解環境の ASTM 相当サイクル数による表示

3.1 ASTM 相当サイクル数

自然環境下においてコンクリート構造物が受ける凍結融解作用を ASTM C-666 A 法に相当するサイクル数で表すことは、凍結融解試験の結果からコンクリート構造物の凍害劣化を予測する上で極めて有効な指標となる。ある地域の気象条件および部材条件下でコンクリートが1年間に受ける凍結融解作用は、(5)式をもとに、ASTM C-666 A 法の標準条件である水中養生(C=1.00)、水中凍結水中融解(F=1.00)、凍結最低温度-18°Cを基準とした ASTM 相当サイクル数として(8)式で表すことができる。

$$C_{y \text{ ASTM-sp}} = C \times F \times \sum (-t_s / 18)^p$$

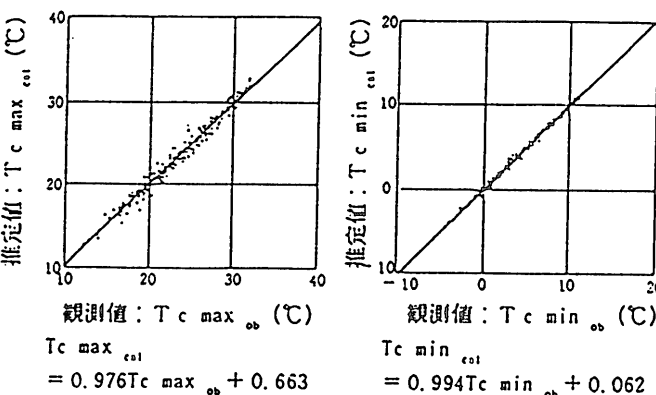


図3 コンクリートの日最高温度および最低温度の観測値と推定値

$$= C \times F \times R_{sp} \quad (8)$$

ここに、 $C_{y \text{ ASTM-sp}}$: ASTM 相当サイクル数(回/年)
 C, F, β : 表7による係数
 t_s : 凍結最低温度(°C)
 $R_{sp} = \sum (-t_s / 18)^p$

注1) 添字 s は a または c で、温度の種類を示し、a は気温、c はコンクリート温度を意味する。
 注2) 添字 p は 90 または 60 で、凍害劣化の過程を示し、90 は劣化の兆候が現れる過程、60 は劣化が明確に現れる過程を意味する。

なお、C および F はそれぞれ構造物の条件を表す係数(部材係数)であり、C は凍結融解作用を受けるまで、すなわち夏期の乾燥の影響を表わし、F は凍結融解時のコンクリート周囲の水分状態を表すものと考えられる。また、 R_{sp} は温度条件による凍結融解作用の厳しさを表すもので、気温による場合(Ra)は北面の部材、コンクリート温度による場合(Rc)は水平面および南面の部材に相当するものと考えられる。

3.2 平滑年値による ASTM 相当サイクル数の試算

日本気候表¹⁰⁾による日最低気温および日最高気温の日別平滑年値を用いて、凍結融解のある全国67地点における年間の気温による ASTM 相当サイクル数(Rap)を試算し、そのうち風速および日射量の資料のある26地点では、コンクリート温度による ASTM 相当サイクル数(Rcp)も算出した。なお、コンクリートの凍結温度は一般に0°Cよりもやや低く、日最低気温が-0.1~-0.9°Cまでは凍害に対する影響が少ないことから、日最低気温が-1.0°C以下で日最高気温が0°C以上になるまでを1回の凍結融解とし、真冬日が連続する場合の最低気温は、その期間の最も低い日最低気温を用いることとした。また、構造物の条件は、凍結融解開始まで乾燥の影響を受けない水中養生とし、常時水と接した状態で凍結融解作用をうけるものとし、部材係数CおよびFは1.0として算出した。したがって、 $C_{y \text{ ASTM-sp}}$ は R_{sp} と等しくなる。

表8に風速および日射量の資料のある26地点における日最低温度の年間極値($t_{a \min}$)、凍結融解の開始日から終了日までの総日数(Dw)、凍結持続日数(Df)および ASTM 相当サイクル数(Rap および Rcp)の算出結果を示す。コンクリート温度による解析では、気温による場合と比較して、一般に ASTM 相当サイクル数は増加する傾向にある。特に、札幌、帯広、函館などの日最高気温が比較的高く、風速が小さく、日射量の多い地域では凍結持続日数が大幅に減少し、ASTM 相当サイクル数の増加も多い。一方、稚内、寿都、室蘭、浦河などの沿岸地域で、風速が大きく日射量の少ない地域では、逆に凍結持続日数が増加する傾向にあり、ASTM 相当サイクル数の増加が少ないか、あるいは減少している地域も見られる。

図4に日最低気温の年間極値($t_{a \min}$)と劣化の兆候が現れる過程の気温による ASTM 相当サイクル数($R_{a \circ}$)の関係を示す。凍結持続日のない本州の各地では、両者は非常に良い直線関係を示しているが、凍結持続日数の長い北海道の各地では両者の対応は悪い。しかし、日最低気温の年間極値と劣化の兆候が現れる過程のコンクリート温度による ASTM 相当サイクル数($R_{c \circ}$)の関係を示した図5では、コンクリートの凍結持続日数が大幅に減少する札幌、帯広、函館の各地での両者の対応は本州の各地と同じ直線上にあることがわかる。また、日最低気温の年間極値($t_{a \min}$)と長谷川による凍害危険度¹¹⁾の関係も、図6に示すように直線的な関係にあ

表8 全国各地の気象データと年間ASTM相当サイクル数算出結果(風速・日射量データのある26地点)

地域	気象データ (日別平滑平年値による)			地域係数 T	ASTM相当サイクル数(回/年)				
	日最低気温 の年間極値 ta min (°C)	凍結融解 総日数 Dw(日)	凍結持続 日数 Df(日)		気温による解析		コンクリート温度による解析		
					劣化の兆候 Ra _g	明確な劣化 Ra _o	劣化の兆候 Rc _g	明確な劣化 Rc _o	
北海道	稚内	-8.7	128	86	2.9	5.6	12.3	6.4	12.4
	北見枝幸	-11.7	143	91	4.3	9.1	17.8	19.2	31.3
	旭川	-14.4	151	85	6.3	15.4	26.4	39.1	54.0
	網走	-12.1	142	82	5.1	11.3	21.2	20.8	33.2
	札幌	-9.0	128	52	5.3	15.7	28.6	46.7	68.9
	帯広	-15.5	153	65	8.9	26.4	40.7	86.3	103.8
	根室	-9.5	130	70	4.4	10.3	20.4	13.3	23.4
	寿都	-5.6	114	47	3.3	9.3	20.1	2.2	5.6
	室蘭	-5.1	103	36	3.3	9.0	19.8	8.1	17.4
	浦河	-7.0	120	23	5.7	19.2	35.7	18.8	33.8
函館	-7.8	124	16	6.8	25.7	44.4	38.4	60.4	
本州	青森	-5.7	110	0	5.7	20.5	39.3	24.9	44.9
	八戸	-5.2	105	0	5.2	17.9	35.5	20.5	38.9
	秋田	-3.8	86	0	3.8	10.7	24.4	11.3	25.2
	盛岡	-6.8	118	0	6.8	25.6	45.8	32.3	54.0
	宮古	-4.4	97	0	4.4	13.9	29.7	19.8	38.1
	酒田	-2.9	65	0	2.9	5.3	14.2	4.5	12.5
	山形	-4.5	97	0	4.5	14.3	30.1	22.2	41.4
	仙台	-2.9	75	0	2.9	7.2	18.2	11.1	25.0
	福岡	-2.9	76	0	2.9	7.1	18.1	10.4	24.0
	富山	-1.3	25	0	1.3	1.0	3.7	3.1	9.1
	高田	-1.6	52	0	1.6	2.7	8.7	5.2	14.9
	宇都宮	-4.9	96	0	4.9	13.7	29.1	20.2	38.2
	松本	-6.6	117	0	6.6	24.1	44.2	32.8	54.7
	前橋	-2.1	47	0	2.1	3.0	8.9	4.1	11.4
	甲府	-3.9	76	0	3.9	9.0	20.7	14.0	28.8

る。これらから、凍結融解作用の厳しさの地域性は、基本的には日最低気温の年間極値という簡単な気象因子で表せることがわかる。

さらに、凍結持続日数の長い地域では凍結融解回数が少なく、またコンクリートの凍害劣化に対する凍結持続の影響は小さいことから、日最低気温の年間極値が同じであっても ASTM 相当サイクル数が少なくなることは説明がつく。そこで、凍結持続日数の影響を考慮した地域の凍結融解作用の厳しさを表す指標(地域係数)として、凍結融解の開始日から終了日までの総日数に対する凍結持続日数の割合で日最低気温の年間極値を低減する(9)式を用いることにより、図7に示すように凍結持続日数の影響を補正することができ、地域係数 T と劣化の兆候が現れる過程の気温による ASTM 相当サイクル数(Ra_g)の関係は(10)式で表される。

$$T = -ta \min (1 - Df / Dw) \quad (9)$$

$$Ra_{g} = 4.2T - 5.4 \quad (10)$$

また、気温による ASTM 相当サイクル数 Ra(Ra_gおよび Ra_o)とコンクリート温度による ASTM 相当サイクル数 Rc(Rc_gおよび Rc_o)との関係を図8に、劣化の兆候が現れる過程の ASTM 相当サイクル数 R_g(Ra_gおよび Rc_g)と劣化の兆候が現れる過程の ASTM 相当サイクル数 R_o(Ra_oおよび Rc_o)との関係を図9に示す。それぞれの関係は、(11)式および(12)式で表わされる。

$$Rc = 1.45Ra \quad (11)$$

$$R_{o} = 1.64R_{g} \quad (12)$$

なお、ここで得られた値はすべての凍結融解が A 法に相当する厳しい条件で行われた場合のサイクル数を示しており、実際の構造物の場合には、夏期における乾燥の影響や凍結融解時の表面水の状

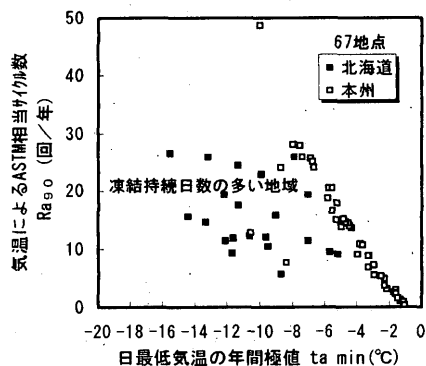


図4 日最低気温の年間極値 ta min と気温によるASTM相当サイクル数 Ra_g との関係

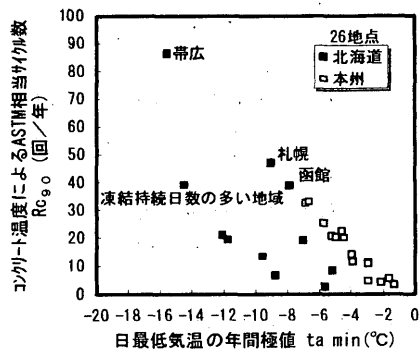


図5 日最低気温の年間極値 ta min とコンクリート温度によるASTM相当サイクル数 Rc_o との関係

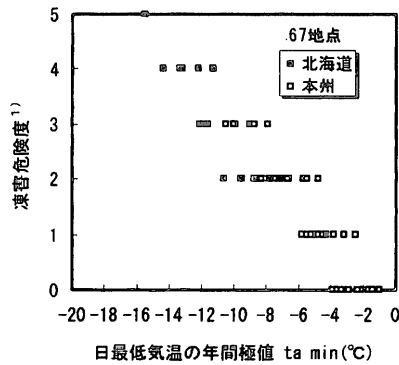


図6 日最低気温の年間極値 $t_{a \min}$ と凍害危険度¹⁾との関係

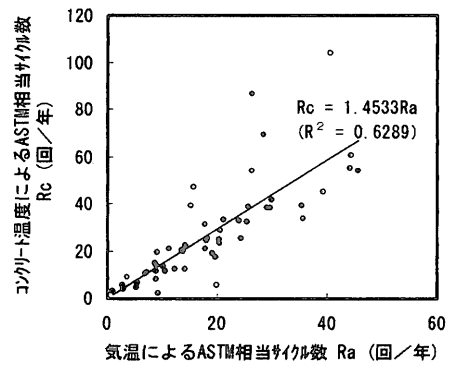


図8 気温によるASTM相当サイクル数 R_a と
コンクリート温度によるASTM相当サイクル数 R_c との関係

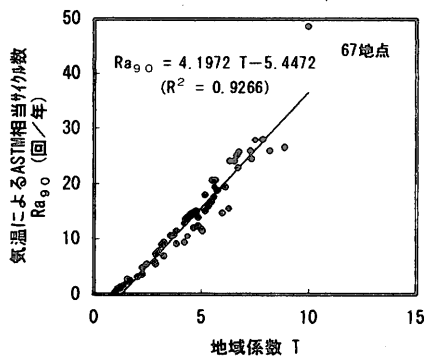


図7 地域係数 I と気温によるASTM相当サイクル数 R_{a90} との関係

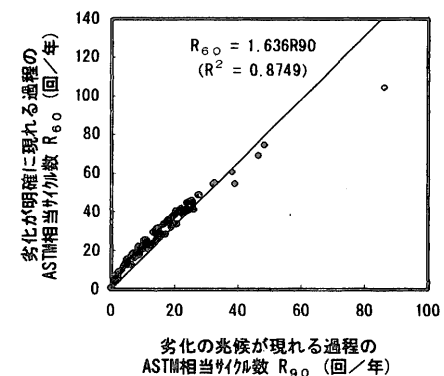


図9 凍害劣化過程によるASTM相当サイクル数の比較

態を考慮する必要がある。また、劣化過程および温度の種類の変化する R_{sp} はすべて R_{a90} を用いて表すことができ、(8)式の ASTM 相当サイクル数は(8)'式に書き換えることができる。表9に(8)'式の諸係数を示す。

$$C_{y \text{ ASTM-sp}} = C \times F \times R_{sp} = C \times F \times s \times p \times R_{a90} \quad (8)'$$

4. コンクリートの凍害劣化予測

4.1 凍害劣化による耐用年数の推定方法

対象とするコンクリートの耐凍害性が既知であれば、(8)'式に示した ASTM 相当サイクル数を用いることにより、自然環境下におけるコンクリートの耐用年数を推定することが可能となる。ここでは、コンクリートの崩壊につながる劣化程度を表す指標として、一般に相対動弾性係数60%が用いられていることから、凍結融解作用を受けるコンクリートの耐用年数(X年)を、相対動弾性係数が60%となるまでの期間と定義する。

対象とするコンクリートの耐凍害性は ASTM C-666 A 法による試験結果で表すこととし、相対動弾性係数が90%となるサイクル数が N_{90} (回)、60%となるサイクル数が N_{60} (回)であった場合、その試験結果と自然環境下における ASTM 相当サイクル数および年数との間に(13)式および(14)式の関係が得られる。

$$N_{90} = C_{y \text{ ASTM-S}_{90}} \cdot X_{90} \quad (13)$$

$$N_{60} - N_{90} = C_{y \text{ ASTM-S}_{60}} \cdot X_{60} \quad (14)$$

よって、自然環境下において、相対動弾性係数が90%となる年数 X_{90} および90%から60%となるまでの年数 X_{60} が、(13)'式および

表9 ASTM相当サイクル数算定式の諸係数

ASTM 相当サイクル数算定式 $C_{y \text{ ASTM}} = C \cdot F \cdot s \cdot p \cdot R_{a90}$		凍害劣化の過程	
		劣化の兆候 (100% ≥ Ed > 90%)	明確な劣化 (90% ≥ Ed > 60%)
劣化過程係数 p		1.00	1.64
部材係数	日射条件 s	北面	1.00
		水平・南面	1.45
	養生・乾燥条件 C*	水中	1.00
		気中	0.66
		20℃乾燥	0.26
		30℃乾燥	0.14
凍結融解条件 F*	水中凍結水中融解	1.00	
	気中凍結水中融解	0.21	

*: 表7による係数

び(14)'式により求め、耐用年数は(15)式により得られることとなる。

$$X_{90} = N_{90} / C_{y \text{ ASTM-S}_{90}} \quad (13)'$$

$$X_{60} = (N_{60} - N_{90}) / C_{y \text{ ASTM-S}_{60}} \quad (14)'$$

$$X = X_{90} + X_{60} \quad (15)$$

なお、ここで示した耐用年数の推定方法では、コンクリートの耐凍害性を表す指標として一般に用いられている耐久性指数が同じ(相対動弾性係数が60%になるまでのサイクル数が同じ)であっても、相対動弾性係数が90%となるまでの劣化過程が異なると耐用年数は異なるものとなる。

4.2 耐用年数の算出例

以下の仮定のもとに、凍害劣化によるコンクリートの耐用年数を算出する。

- ①地域は札幌市(地域係数 T=5.3)とする。
- ②日射の影響を受ける水平面・南面の部材とする (s=1.45)。
- ③凍結融解開始までの養生条件を表す係数 C として、夏期の乾燥の影響を考慮して20℃乾燥の条件とする。ただし、夏期の劣化の回復は考慮しない。(劣化の兆候が現れる過程: C=0.26, 劣化が明確に現れる過程: C=0.80)
- ④凍結融解時の条件 F は、気中凍結水中融解試験に相当するものとする。(劣化の兆候が現れる過程: F=0.21, 劣化が明確に現れる過程: F=0.23)
- ⑤対象とするコンクリートの ASTM C-666 A 法による試験結果は、直線的に劣化が進行するものとし、相対動弾性係数が90%となるサイクル数 N_{90} が75サイクル、60%となるサイクル数 N_{60} が300サイクルとする。

地域係数に対応する Ra_{90} は、仮定①および(10)式より、

$$Ra_{90} = 4.2T - 5.4$$

$$= 4.2 \times 5.3 - 5.4 = 16.9(\text{回/年})$$

となる。したがって、年間の ASTM 相当サイクル数は劣化の過程に応じて、仮定②, ③, ④および(8)' 式より以下のように求まる。

$$Cy_{ASTM-C90} = C \times F \times s \times p \times Ra_{90}$$

$$= 0.26 \times 0.21 \times 1.45 \times 1.00 \times 16.9$$

$$= 1.34(\text{回/年})$$

$$Cy_{ASTM-C60} = 0.80 \times 0.23 \times 1.45 \times 1.64 \times 16.9$$

$$= 7.40(\text{回/年})$$

相対動弾性係数が90%になるまでの年数 X_{90} および90%から60%となるまでの年数 X_{60} は、仮定⑤および(13)' 式・(14)' 式より、

$$X_{90} = N_{90} / Cy_{ASTM-C90}$$

$$= 75 / 1.34 = 56(\text{年})$$

$$X_{60} = (N_{60} - N_{90}) / Cy_{ASTM-C60}$$

$$= (300 - 75) / 7.40 = 30(\text{年})$$

で、耐用年数 X(相対動弾性係数が60となる年数)は、(11)式より、

$$X = X_{90} + X_{60} = 56 + 30 = 86(\text{年})$$

となる。

図10に、地域係数および日射条件の異なる場合について、同様に算出した耐用年数と地域係数との関係を示す。

4.3 暴露試験結果との対応

ここでは、4.1に示した方法で推定した耐用年数と暴露試験結果との対応の検討を行なう。対象とするコンクリートは、2.1の実験と同時に作製されたものであり、ASTM C-666 A 法による試験結果と推定耐用年数を表10に示す。なお、耐用年数の推定に当たり、地域係数 T=5.6(札幌)、日射係数 s=1.45(水平面・南面)とし、部材係数 C は20℃乾燥、F は気中凍結水中融解の条件とした。暴露試験は、札幌市の北海道大学建築棟屋上のスラブ上80cmの台上に放置して行なったもので、暴露後14~15年経過している。暴露試験では、春(3~4月)と秋(10~11月)の年2回を目標に質量、長さ変化および動弾性係数の測定を行なった。なお、測定日の供試体の乾湿状態の影響を除去する目的で、測定日の前日に供試体を室内に搬入し、20時間前後放置して第1回目の測定(乾試験)を行い、その後20~24時間水中に浸せきして第2回目の測定(湿試験)を行った。

図11に暴露供試体の相対動弾性係数(湿試験)の経年変化と推定値

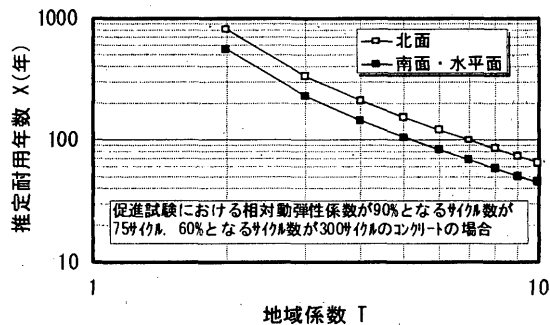


図10 地域係数 T と推定耐用年数 X との関係

表10 暴露供試体の ASTM C-666 A 法による試験結果と推定耐用年数

供試体	凍結融解試験結果 (ASTM C-666 A 法)		推定耐用年数(年)			
	N_{90} (回)	N_{60} (回)	X_{90}	X_{60}	X	
I グループ	5 N	1.8	6.9	1.3	1.0	2.3
	5 V	0.8	3.2	0.6	0.4	1.0
	7 N	0.8	3.3	0.6	0.4	1.0
II グループ	5 T	48.9	161.0	37	35	72
	5 A	20.3	138.8	15	19	34
	7 A	12.3	101.6	9	14	23

をあわせて示す。耐凍害性の劣るコンクリート(I グループ)では、最も劣化の大きな 5 V の推定値と暴露試験結果はほぼ対応しているものの、その他の種類では推定値に比べ暴露供試体の劣化程度はかなり小さくなっている。一方、耐凍害性に優れるコンクリート(II グループ)では、両者は比較的良く対応している。

図12に暴露供試体の長さ増加比の経年変化を示す。一般に促進試験では、長さ増加比 1.0×10^{-3} は相対動弾性係数60%に対応するといわれている¹³⁾。しかし、暴露試験では図11に示すように、相対動弾性係数は低下と回復を繰り返すのに対して、膨張による組織の緩みを示す長さ変化は累加されるため、劣化の目安である長さ増加比 1.0×10^{-3} を超えても相対動弾性係数が60%を下回らない傾向にある。よって、暴露供試体の凍害劣化を評価する場合、相対動弾性係数と長さ変化を併せて考えるべきであり、各年の気候の変動、コンクリートの含水状態の変化、乾湿の繰り返しなど凍結融解以外の作用によつての影響も考慮する必要がある。

なお、ここではコンクリートの凍害を凍結融解の繰返しによる疲労の蓄積としてとらえ、促進試験結果から耐用年数の推定を行った。しかし、促進試験において劣化が顕在化するまでの凍結融解作用の役割は、コンクリートに疲労を蓄積させる過程としてではなく、劣化を引き起こすのに必要な水分をコンクリート中に押し込む過程と考えることもできる¹³⁾。また、促進試験では常に水分が供給される条件で、連続して凍結融解を繰り返すことにより劣化が進行するのに対して、実際の環境では水分の供給条件が異なること、夏期に相対動弾性係数が回復することも考慮しなければならない。今後、推定結果を実環境下の構造物の劣化現象とより対応させるためには、劣化が顕在化するまでの凍結融解作用の役割を明らかにし、部位による水分状態の違いや夏期の乾燥の影響について検討を加える必要がある。

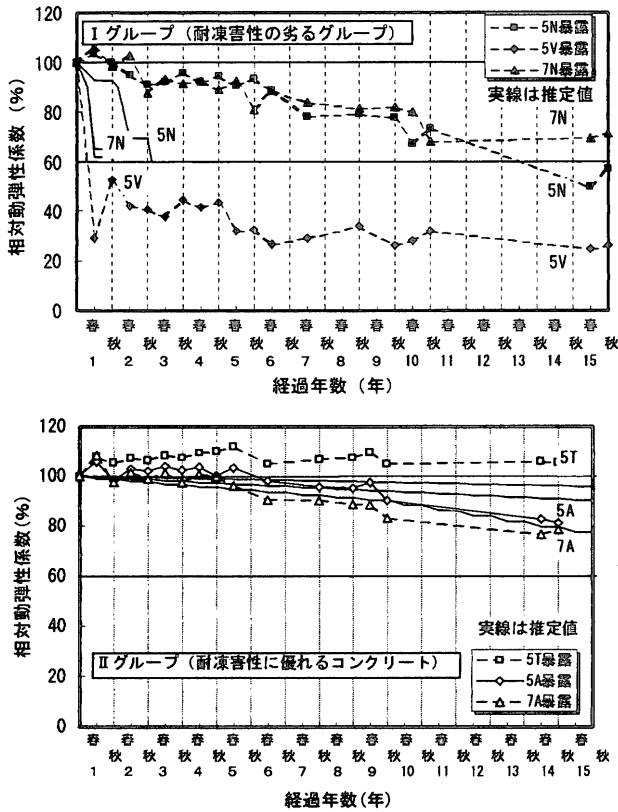


図11 暴露試験における相対動弾性係数の経年変化と推定値との比較

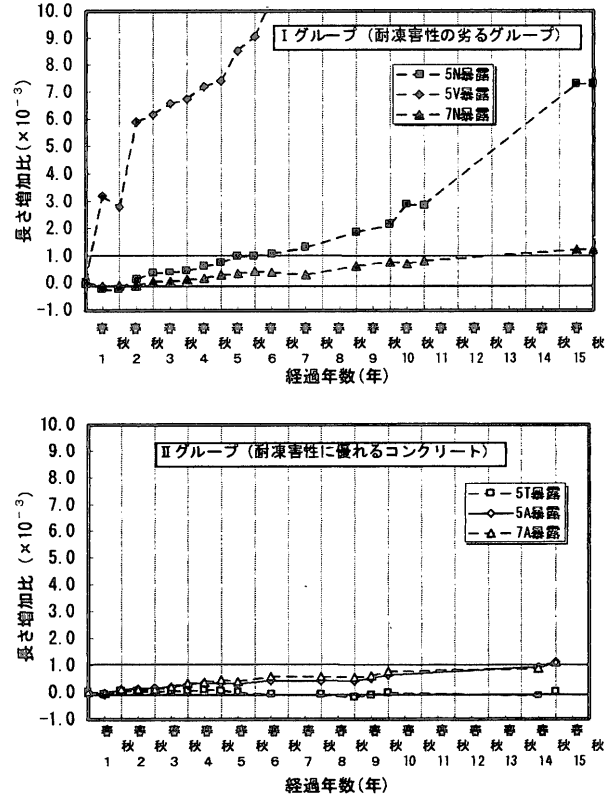


図12 暴露試験における長さ増加比の経年変化

5. まとめ

自然環境下におけるコンクリートの凍害劣化の予測方法について検討を行った。その結果を以下に示す。

- (1)凍結融解1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量は、最低気温とコンクリートの耐凍害性の程度、養生条件および凍結融解条件の4要素で説明できる。
- (2)コンクリートの日最高温度および日最低温度を、気温のほか、昼間の日射による温度上昇、早朝の放射冷却現象、風速の影響を考慮して表現する実験式として(6)式、(7)式を得た。
- (3)凍結融解作用の厳しさの地域性は、基本的には日最低気温の年間極値で表すことができ、凍結持続日数を考慮した地域の凍結融解作用の厳しさを表す指標として、地域係数(9)式を示した。
- (4)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-666A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(8)'式を導き、耐用年数の推定方法を示した。
- (5)暴露供試体の相対動弾性係数は低下と回復を繰り返すのに対して、膨張による長さ変化は累加される。このため、暴露供試体による劣化の評価は、相対動弾性係数と長さ変化をあわせて考えるべきであり、各年の気候の変動、コンクリートの含水状態の変化、乾湿の繰り返しなど凍結融解以外の作用の影響を考慮する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、平成7～9年度文部省科学研究費(総合研究(A):代表友沢史紀)の交付を受けて行なった。記して、謝意を表する。

参考文献

- 1)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年
- 2)田畑雅幸:コンクリートの凍害における環境条件の影響に関する研究,北海道大学学位論文,1986年
- 3)大和竹史,江本幸雄,添田政司:内的および外的要因を考慮したコンクリートの耐凍害性評価方法,セメント・コンクリート論文集No.46, pp.604-609,1992
- 4)桜井 宏,鮎田耕一,藤田嘉夫:RCモデル化供試体による凍害と鉄筋腐食の進行に関する研究,セメント・コンクリート論文集No.46, pp.636-641,1992
- 5)山下英俊,村上祐治,鈴木 篤,吉川弘道:凍結融解を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.1021-1026,1992
- 6)三橋博三,成田 健,平井和喜:コンクリートの凍害劣化確率モデルに関する研究,日本建築学会構造系論文報告集, No.450, pp.1-6,1993.8
- 7)成田 健,三橋博三,平井和喜,田畑雅幸:凍害劣化確率モデルの構成要素に及ぼす影響要因の考察,日本建築学会構造系論文報告集, No.455, pp.1-6,1994.1
- 8)浜 幸雄,田畑雅幸,鎌田英治:コンクリートの凍害に影響する気象条件のASTM相当サイクル数による表示,日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1099-1100,1992年
- 9)浜 幸雄,田畑雅幸,桂 修,鎌田英治:コンクリートの凍害を対象とした北海道の気象条件表示方法の試案,コンクリート構造物の凍害とその対策, pp.145-150,1996.2
- 10)浜 幸雄,富板 崇,田畑雅幸,鎌田英治:コンクリートの凍害劣化に影響する気象因子の解析,日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1115-1116,1995年
- 11)日本気候表その1,その5,気象庁,1982年
- 12)洪 悦郎,鎌田英治:コンクリートの凍害と初期凍害—そのメカニズムについて,コンクリート工学, Vol.16, No.5,1978
- 13)自然環境下のコンクリート性能研究委員会報告:自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集, pp.330-340,日本コンクリート工学協会,1993.5

(1998年10月28日原稿受理,1999年3月26日採用決定)