

# ASTM相当サイクルを用いた鉄筋コンクリート造建築物の凍害劣化予測手法の提案

# A PROPOSAL OF PREDICTION METHOD FOR FROST DETERIORATION OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS USING EQUIVALENT CYCLES TO ASTM TEST

千歩 修 —\*1 松村光太郎 —\*2  
 浜 幸雄 —\*3 友澤史紀 —\*4

Osamu SENBU —\*1 Kotarou MATSUMURA —\*2  
 Yukio HAMA —\*3 Fuminori TOMOSAWA —\*4

キーワード：  
 耐久設計, 凍結融解試験, ASTM相当サイクル, 地域条件

Keywords:  
 Service life design, Freezing and thawing test, Equivalent cycle to ASTM, Regional condition

A new prediction method for frost deteriorations of reinforced concrete buildings using equivalent cycles to the ASTM test is proposed. In the method, severity of the freezing and thawing is expressed by the equivalent cycles to the ASTM test. The equivalent cycles to the ASTM test for some members of buildings means that the members receive same deterioration as cycles of freezing and thawing test of ASTM C666 A method. Effects of curing conditions and freezing conditions and so on are determined by results of data analyses of freezing and thawing tests. The equivalent cycles to the ASTM test for regions are determined by the extremal value of minimum temperature of the region, and the result is achieved by exposure tests and analyses of weather data. An easy method for determining the regional condition using the post code and altitude is proposed.

## 1. はじめに

合理的に耐久性の高い建築物をつくるためには、地域条件・部位条件等に応じて耐久設計を行う必要がある。凍害による劣化は、地域条件の影響が大きいものであり、地域条件に対応した対策の選定方法や耐久設計法も提案<sup>1) 2)</sup>されている。しかしながら、実用的なレベルで合理的に機能していると考えられるものは少なく、ある程度一般化されているものでもその根拠等が不明確である。

ここでは、気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測<sup>3)</sup>およびモデル部材の温度測定結果<sup>4)</sup>をもとに、凍結融解作用を受ける鉄筋コンクリート造建築物を対象とした実用的で合理的な耐久設計を行うための部材の劣化予測手法を提案する。

## 2. 劣化予測の基本的な考え方

### 2.1 劣化予測に用いる試験方法

コンクリートの耐凍害性は凍結融解試験によって評価され、わが国で最も一般的なものとしてASTM C666 A法(JIS A1148)に規定される水中凍結水中融解試験がある。この試験における劣化の指標として主に相対動弾性係数等が用いられ、試験結果は一般的に材料相互あるいは基準値との比較のために使用されているものである。

### 2.2 ASTM相当サイクル

ASTM相当サイクル<sup>5)</sup>とは、ある地域のある部材の凍結融解のきびしさを表すものであり、その部材の条件がASTM C666 A法で何サイクル分に相当するかを示したものである。このASTM相当サイクルを用い

ることにより、ASTM C666 A法の凍結融解試験結果と実際の部材の劣化を結び付けることができる。例えば、ある地域のある部材が1年に15サイクルのASTM相当サイクルを受けるとすると、この部材に300サイクルで相対動弾性係数が80%となるようなコンクリートを使用すると、300/15=20年でこの部材の相対動弾性係数が80%となると考えることができる。

試験条件を変えた各種の凍結融解試験結果<sup>3)</sup>を用いた解析<sup>6)</sup>から、凍結融解試験の各種要因が劣化におよぼす影響が明確となっている。これによると凍結融解試験における標準化した1サイクル当たりの相対動弾性係数の変化量( $\Delta Es$ )は(1)式のように表現することができる。

$$\Delta Es = \alpha \times C \times G \times F \times (-t)^\beta \quad (1)$$

ここで、 $\alpha, \beta$ : 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)

また、(1)式の各係数の回帰係数を表1に示す。この表で動弾性係数が90%を境として劣化の兆候と明確な劣化に分けてあるが、これは図1のように一般に凍結融解試験の結果が2段階となるため、同じ凍結融解作用でも相対動弾性係数の変化が異なるためである。(1)式のようにEsには養生条件や凍結融解条件も影響し、特に、凍結最低温度が大きく影響する。また、文献<sup>7)</sup>の実験では様々な要因の検討が行われているが、これらの要因のうち凍結持続時間や凍結温度勾配等の影

\*1 北海道大学大学院工学研究科材料性能学研究室 教授・工博  
 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)

\*2 小山工業高等専門学校建築学科 助手・博士(工学)

\*3 室蘭工業大学建設システム工学科 助教授・博士(工学)

\*4 日本大学理工学部 教授・工博

\*1 Prof., Hokkaido Univ., Building Material Div., Dr. Eng.

\*2 Research Assoc., Oyama National College of Technology, Dr. Eng.

\*3 Assoc. Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

\*4 Prof., Nihon Univ., College of Science and Technology, Dr. Eng.

響は小さく、(1)式の中にはこれらに関連する係数は入っていない。

次に、ASTM C666 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℃を標準として、温度条件だけから決まるASTM相当サイクルを(2)式のように表すこととする。なお、この値は地域条件を表すものとなる。また、βは(1)式のΔEsに及ぼす最低温度の影響と同様と考え、同じ値を用いるものとする。

$$Rsp = \Sigma(-ts/18)^\beta \quad (2)$$

ここで、Rsp：温度条件によるASTM相当サイクル数(回/年)

また、温度以外に養生・凍結融解条件によって劣化の程度が異なるため、これらを考慮したASTM相当サイクル(Cy<sub>ASTM</sub>)を以下のように表現する。なお、実際の条件では、Cはコンクリートの初期養生条件、Fは凍結時の水分の供給条件(部位条件の一部)と考えることができる。

$$Cy_{ASTM} = C \times F \times Rsp \quad (3)$$

ここで、C、Fは表1のΔEsに与える養生・凍結融解条件の影響と同様と考え、「劣化の兆候」の欄と同じ値で評価できるものとする。これは、「劣化の兆候」と「明確な劣化」を分けると劣化に応じて作用するASTM相当サイクルが変わってしまうこと、および劣化予測ではいつ劣化するかが重要であり、初期の条件である「劣化の兆候」の値を用いることとした。

このように表現すると、部材の温度データが得られれば、図2のように温度が変化する場合、ASTM相当サイクル(Rsp)を計算できることとなる。なお、温度変化1サイクルの最高温度がマイナスの場合、部材は凍ったままであり、氷点下の温度変化を数サイクル繰り返してもその中の最低温度によってその最低温度に対応する1回分のASTM相当サイクルが決まることになる。

### 2.3 地域・部位条件を考慮したASTM相当サイクル

部位によって凍害の劣化状況が異なる理由のひとつは部位によって温度に差があることであり、各部位の温度がどのようになっているかをとらえる必要がある。温度と気象因子の関係を明らかにするため、図3のようなモデル部材の暴露試験を行い、この結果に基づいて、コンクリート各部位の日最低・日最高温度を気象因子を用いて下式で表現できることが報告<sup>5)</sup>されている。

$$Th* = Ah + Bh \cdot tah + Ch \cdot Wd + Dh \cdot Sd \quad (4-1)$$

$$Tl* = Al + Bl \cdot tal + Cl \cdot Wn + Dl \cdot Ci \quad (4-1)$$

表1 凍害劣化に対する影響要因の定量化結果(回帰係数)<sup>4)</sup>

係数	凍害劣化の過程	
	劣化の兆候 (100% ≥ Ed > 90%)	明確な劣化 (90% ≥ Ed > 61%)
α	3.73	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℃乾燥	0.26
	30℃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
		0.23

注)\*: I(II)グループとは、耐凍害性に劣る(優れる)コンクリートのグループ  
 C: 養生条件  
 ・水中養生: 脱型(材齢2日)から材齢3週まで20℃水中  
 ・気中養生: 脱型から材齢19日まで温度20℃・湿度80-90%  
 ・20℃乾燥: 脱型から材齢2週まで水中養生後、20℃湿度80-90%  
 ・30℃乾燥: 同上(ただし、温度を30℃)  
 F: 凍結融解時の条件

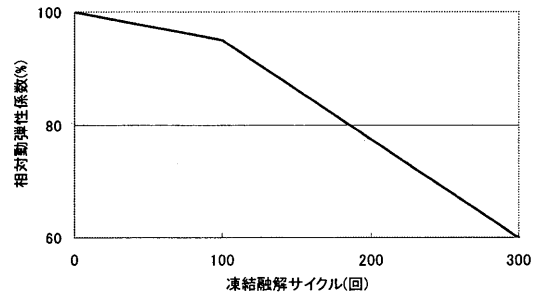


図1 凍結融解試験結果の概念図

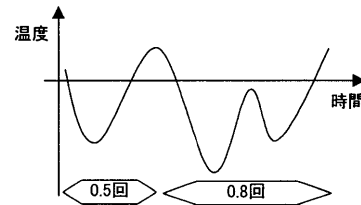


図2 ASTM相当サイクル算定の概念図

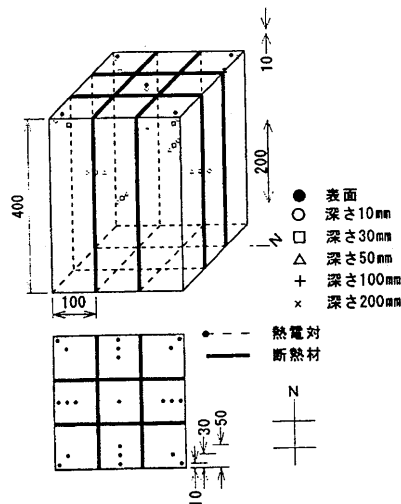


図3 屋外暴露試験体の形状<sup>5)</sup>

表2 凍害劣化に対する影響要因の定量化結果(回帰係数)<sup>5)</sup>

a) コンクリート日最高温度						
部位(記号)	回帰係数				標準偏差	観測数
	Ah	Bh	Ch	Dh		
水平面 (Thh)	1.591	1.026	-0.113	0.062	2.13	23
東西面 (Thx)	1.185	0.732	-0.467	0.514	1.93	142
南面 (Ths)	3.372	0.767	-1.049	0.979	3.17	71
北面 (Thn)	-1.926	0.792	-0.006	0.488	2.71	71
北隅角部 (Thy)	1.486	1.044	-0.477	0.306	1.78	142
南隅角部 (Thz)	2.962	1.007	-0.848	0.742	2.52	142

b) コンクリート日最低温度						
部位(記号)	回帰係数				標準偏差	観測数
	Al	Bl	Cl	Dl		
水平面 (Tlh)	1.601	0.790	-0.188	-1.727	1.88	23
東西面 (Tlx)	-0.630	0.805	-0.121	1.551	1.14	142
南面 (Tls)	-0.251	0.790	-0.187	1.652	1.26	71
北面 (Tln)	-0.799	0.762	-0.206	1.621	2.71	71
北隅角部 (Tly)	-0.753	0.943	-0.268	1.098	1.42	142
南隅角部 (Tlz)	-0.728	0.943	-0.109	0.754	1.43	142

注)観測数とは、データ解析に用いたデータ数である。

ここで、tah(tal) : 日最高(最低)気温(°C)

Wd(Wn) : 昼間(夜間)平均風速(m/s)

Sd : 日積算日射量(W/m<sup>2</sup>)

Ci : 晴天指数(=Sd/大気日外積算日射量)

Ah,Bh,Ch,Dh,Al,BI,Cl,DI : 回帰係数(表2参照)

\* = h,x,s,n,y,z : 部位を表現する添字、表2参照

これらの式を用いて各地域の気象因子を代入することにより地域ごとに各部材のASTM相当サイクルを算定できる。このようにして稚内から奈良までの35都市について気象因子からASTM相当サイクルを算出し、求めたASTM相当サイクルと最低気温の年間極値(正確には、「日本気候表」における日最低気温の平滑年値の年間極値)の関係を図4に示す。水平面や北面では、最低温度が低くなると凍結状態のままのことが多くなるためASTM相当サイクルが小さくなる傾向があるが、日射の当たる部分(南面、東西面、南隅角部)では、日射により融解するため、最低気温が低くなるほどASTM相当サイクルが大きくなっている。地域にもよるが、最もASTM相当サイクルが大きくなる部分は南隅角部であり、最も小さくなる部分は北面となっており、これらの部分の最低気温の年間極値とASTM相当サイクルの関係は、比較的よい相関を示している。このため、ここではこれらの図の直線回帰式から各部のASTM相当サイクル(EC\*)を、以下のように表現することとする。なお、水平面等は直線近似が適切でないことも考えられるが、南隅角部と北面の近似式の間に入ること、また、ここではできるだけ単純に凍結融解作用のきびしさを表すことを考えたため、水平面等についても下式を用いることとする。

$$ECh = -1.60 \times T_{min} \quad (5-1)$$

$$ECx = -2.99 \times T_{min} - 3.02 \quad (5-2)$$

$$ECs = -3.18 \times T_{min} - 4.22 \quad (5-3)$$

$$ECn = -0.31 \times T_{min} + 2.87 \quad (5-4)$$

$$ECy = -4.22 \times T_{min} - 3.84 \quad (5-5)$$

$$ECz = -2.62 \times T_{min} - 2.10 \quad (5-6)$$

ここで、Tmin : 最低気温の年間極値(°C)

ECの添字 h : 水平、x : 東西、s : 南、n : 北

y : 南隅各部、z : 北隅各部

これらの式から各地域のコンクリート各部位の凍結融解作用のきびしさは、基本的に日最低気温の年間極値という簡単な気象因子だけで表されることになる。よって、養生・凍結融解条件を考慮したASTM相当サイクル数は、ECを用いて、以下のように表現できる。

$$C_{y_{ASTM}} = C \times F \times EC* \quad (6)$$

ここで、\*=h, x, s, n, y または z

### 3. 劣化予測結果と暴露試験結果の関係

(6)式を用いると、凍結融解試験結果があれば、劣化予測を行うことができる。ここでの仮定を以下に示す。

- 1) ある部材のASTM相当サイクル(Cy<sub>ASTM</sub>)がn回/年となる部材の場合、劣化は毎年累加される。
  - 2) 夏季の乾燥等の影響は考慮しない。
- すなわち、Cy<sub>ASTM</sub>がn回/年の場合、凍結融解試験の劣化曲線を毎年、

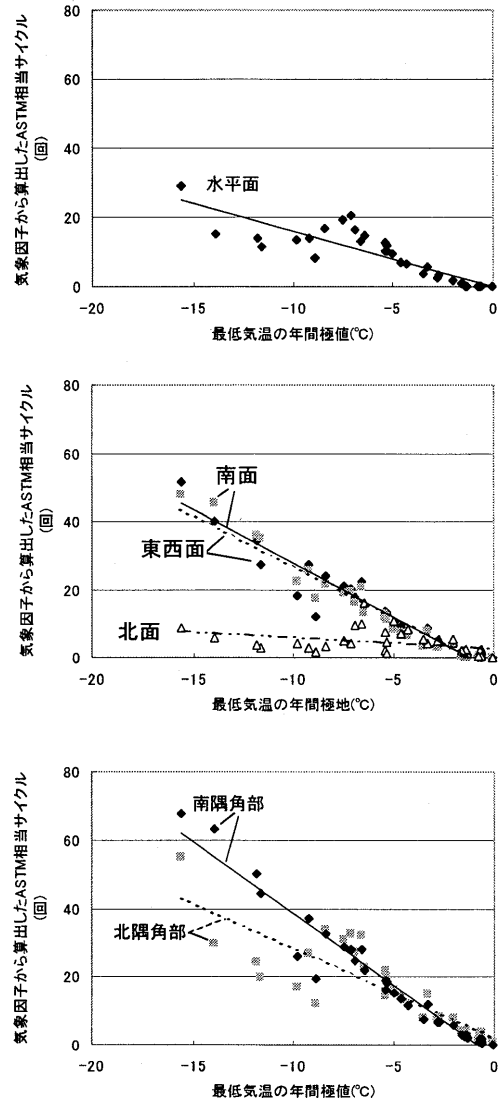


図4 最低気温とASTM相当サイクルの関係

表3 凍結融解試験および暴露試験の試験体概要<sup>3)</sup>

グループ#	記号	W/C(%)	空気量(%)	細骨材	粗骨材
I. 耐凍害性に劣る コンクリート	5N	50	1.0	h	H
	5V*	50	0.3	h	H
	7N	70	1.6	h	H
II. 耐凍害性に優れる コンクリート	5T	50	3.1	n	T
	5A	50	3.5	h	H
	7A	70	4	h	H

注) h : 耐凍害性に劣る細骨材(d=2.58, Q=2.54)  
n : 耐凍害性に優れる細骨材(d=2.75, Q=1.30)  
H : 耐凍害性に劣る粗骨材(d=2.55, Q=3.31)  
T : 耐凍害性に優れる粗骨材(d=2.63, Q=1.79)  
d:表乾密度(g/cm<sup>3</sup>), Q:吸水率(%)

\*: 減圧下で混練し、エンラップエアを減じたもの

#: 耐凍害性に劣る/優れるは、文献中の表現であり、暴露での結果とは関係しない。

表4 凍結融解試験結果の概要<sup>3)</sup>

グループ	記号	N90(回)	N60(回)
I. 耐凍害性に劣る コンクリート	5N	1.8	6.9
	5V	0.8	3.2
	7N	0.8	3.3
II. 耐凍害性に優れる コンクリート	5T	48.9	161.0
	5A	20.3	138.8
	7A	12.3	101.6

注) N90(N60) : 相対動弾性係数が90%(60%)となるサイクル数

n回進むように劣化すると考えるものである。また、2)の仮定は、夏季の乾燥が凍結融解によって押し込まれた水分をキャンセルする効果や乾湿繰り返し等がコンクリートに微細なひびわれを発生させ、耐凍害性が低下する<sup>6)</sup>可能性も考えられるためである。

次に、この方法による劣化予測と札幌における暴露試験の対応を検討する。使用したデータは文献<sup>9)</sup>のものであり、試験体および凍結融解試験結果の概要を表3および表4に示す。なお、この実験では、耐凍害性に劣る・優れるのふたつのグループの試験体を作製しており、凍害性の劣るコンクリートをつくるために、耐凍害性に劣る骨材の使用や減圧下での混練等を行っている。また、ここで凍結融解試験の結果としては、90%と60%となる凍結融解サイクル数を用い、0年(サイクル)で相対動弾性100%の点からこの2点を通る折れ線として簡単にとらえることとした。

札幌における各部材条件と促進凍結融解試験結果を用いた劣化予測と暴露試験結果の関係を図5に示す。これらの図からここで用いた方法は劣化の傾向を予測しているものと考えられる。耐久性に劣るグループでは5Vの劣化が予測値に比べ、早くなっているが、これはこのコンクリートが弱すぎるため、促進試験で初期の劣化を把握できなかったことによるものである。また、5N、7Nについては最もきびしい南隅角部の予測値に近い劣化を示しており、暴露条件とも対応するものと考えられる。耐久性のよいグループでは5Tは劣化の傾向を示さず、5A、7Aは予測値よりも早く劣化している。5A、7Aでは、耐凍害性に劣る骨材を用いたため劣化の進行が大きくなっているものと考えられる。また、5Tのように耐凍害性に優れる骨材を用いた場合には夏季の乾燥の耐凍害性改善効果が現れているものと考えられる。

4. 郵便番号を用いた地域条件の入力

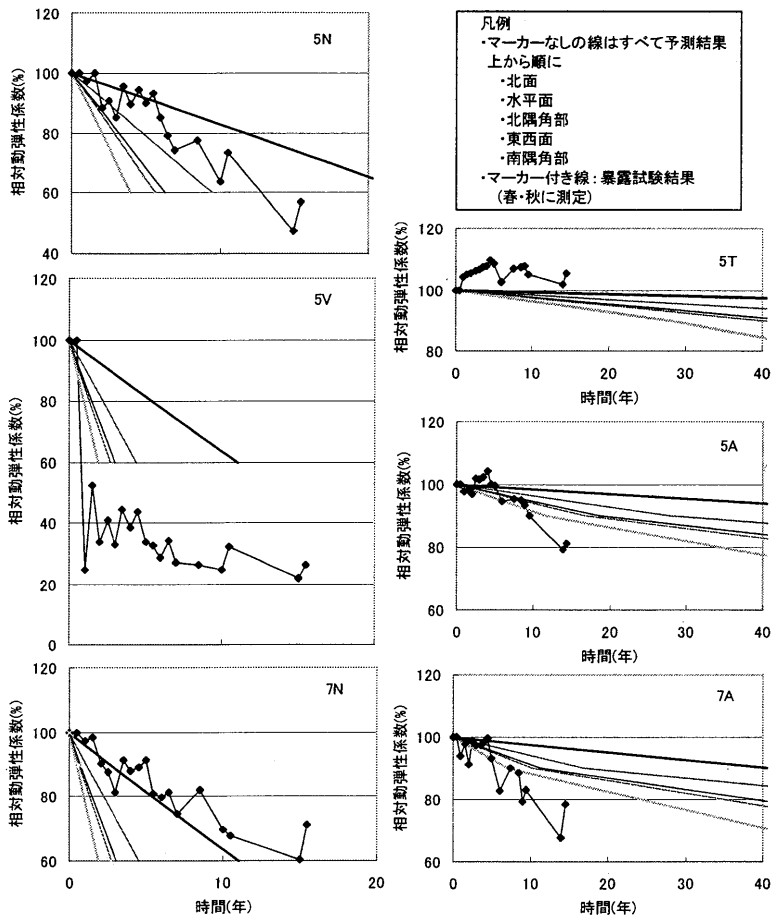
(2)式を用いて、ある地域のある部位のASTM相当サイクルを算定するためには日本気候表等で日最低気温の平滑年平均値の年間極値のデータを得る必要がある。ここでは、より簡単に地域条件を確定する方法として郵便番号を用いた地域条件の入力方法<sup>7)</sup>も併用することを考える。

気象データとしてはアメダスデータ(全国843点、北海道内162点、ほぼ21km四方に1箇所)があり、ここでは郵便番号の上から5桁を用い、この5桁で表される地域とアメダスポイントに対処させることができる。一例を表5に示す。このように表現すると、郵便番号を入力することにより地域条件を容易に確定できることとなる。

しかしながら、郵便番号5桁で表される地域は、面積の大きいところもあり、場所によっては平地と山岳地帯を含むものもある。このため、気温に影響の大きな標高でその地域の値(Tmin')を以下のように補正することとした。

$$Tmin' = Tmin_a - (0.6 / 100) \times (P - Pa) \quad (6)$$

ここで、Tmin\_a : 想定するアメダスポイントの最低気温の年間極値(°C)



I. 耐久性に劣るコンクリート II. 耐久性に優れるコンクリート  
図5 劣化予測と暴露試験結果の関係

表5 最低気温の年間極値・標高と郵便番号の対応

観測所	年間極値	標高(m)	郵便番号
旭川	-13.9	111.9	070-00, 070-08, 070-09, 070-80
釧路	-13.2	31.7	084-09, 085-00, 085-08, 088-06, 088-21
帯広	-15.6	38.6	080-00, 080-08, 080-22, 080-24, 089-11, 089-12
札幌	-8.4	17.2	001-00, 001-08, 001-09, 002-80, 003-00, 005-00, 005-08, 006-00, 006-08, 007-08, 060-00, 060-09, 061-01, 061-02, 061-21, 061-22, 061-23, 062-00, 063-00, 063-08, 064-08, 064-09, 065-00
室蘭	-5.3	42.6	050-00, 051-00

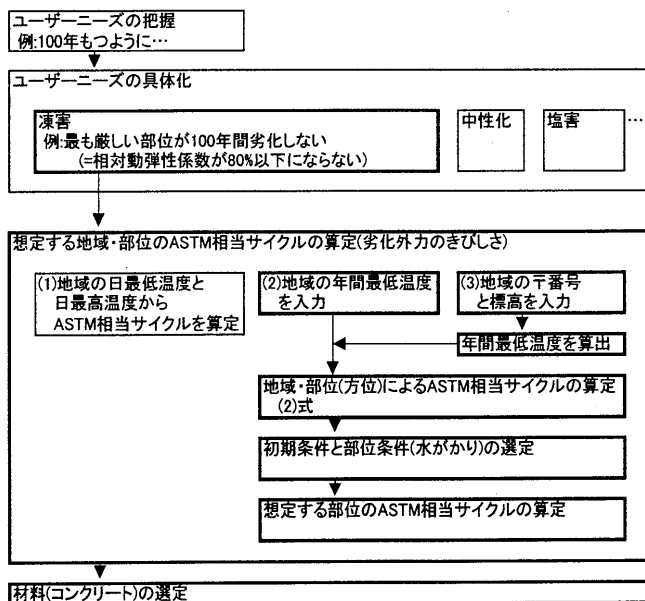


図6 劣化予測のフローチャート

P : 想定する敷地の標高(m)

Pa : 郵便番号で確定するアメダスポイントの標高(m)

## 5. 劣化予測手法の提案

### 5.1 劣化予測のフロー

ここで提案する劣化予測手法のフローチャートを図6に示す。耐久設計を行うためにはユーザーニーズの把握が重要で、ここで何年もつようにつくりたいといった目標ができることになる。しかしながら、ここで与えられる目標は抽象的なものであり、実際に実現可能な目標とするためにはユーザーニーズの具体化が必要になる。「100年もつように」といった目標は、劣化現象ごとに具体的な目標に置き換える必要があり、凍害の場合、例えば「20年間は、メンテナンスフリー→最もきびしい部位が20年後に相対動弾性係数が80%以下にならない」とし、その後、局部的な劣化は補修し、「100年後まで大改修が不要→100年後に相対動弾性係数が60%以下にならない」といったものを設定する。なお、この設定はここでの計算例のためのものであり、実際に使用するためには、検討が必要である。

### 5.2 想定される地域・部材のASTM相当サイクルの算定

図6の(1)のように地域の気象データを収集し、図2のように気温の変動からASTM相当サイクルを求めることもできるが、かなり大変な作業となる。また、温度データとしてはコンクリートの温度データが必要であり、同じ建物でも部材条件によってコンクリート温度が異なることになる。このため、ここでは2.3で説明した方法でASTM相当サイクルを算定する(図6の(2))。さらに、2.3の方法では、必要なデータは地域の最低気温の年間極値であり、より簡単に郵便番号と地域の気象データを対応させることにより、より簡単に地域条件を入力することもできる(図6の(3))。

想定する地域・部材のASTM相当サイクルが求まれば、具体的な目標を満足するコンクリートの条件が明確となり、コンクリートを選定できることになる。

### 5.3 劣化の予測とコンクリートの選定の例

ここでは、「部材は1年間に $Cy_{ASTM}$ サイクルの凍結融解を受け、毎年累加される」と仮定し、コンクリートの凍結融解試験データから想定される部材の劣化予測を行う。一例を以下に示す。

#### ①目標

- ・20年後に相対動弾性係数が80%以下にならない
- ・100年後に動弾性係数が60%以下にならない

#### ②対象とする地域・部位と入力データ

- ・札幌市 : 最低気温の年間極値  $T_{min} = -8.4^{\circ}\text{C}$
- ・部位 : 南隅角部  $ECy(5-5)$ 式 (最もきびしい部分を選定)  
気中凍結水中融解試験と同等の条件が作用  $F=0.21$
- ・養生条件 :  $20^{\circ}\text{C}$ 乾燥と同等の条件が作用  $C=0.26$

#### ③ $Cy_{ASTM}$ の算定

- ・ $ECs = -4.22 \times (-8.4) - 3.84 = 31.61$  (回/年)
- ・ $Cy_{ASTM} = 0.26 \times 0.21 \times 31.61 = 1.73$  (回/年)

#### ④コンクリートに必要な条件

- ・20年 $\times 1.73$ 回/年=34.6回
- ・100年 $\times 1.73$ 回/年=173回

よって、目標を満足するコンクリートは、35サイクルで相対動弾性係数80%以上であり、かつ173サイクルで相対動弾性係数60%以上の条件を満たすものとなる。

## 6. まとめ

ここでは、ASTM相当サイクルを用いた鉄筋コンクリート造部材の劣化予測手法を提案した。この方法の概要を以下に示す。

- 1) 地域・部位の凍結融解作用のきびしさはASTM相当サイクルを用いて表現した。なお、この値は実際の部材がASTM C666 A法で何サイクル分の凍結融解作用にあたる劣化を受けるかを表したものである。
- 2) ASTM相当サイクルに対する地域・部位・養生・凍結融解条件等の各種要因の影響は、凍結融解試験に対する影響要因の解析結果を用い、表現した。
- 3) 実際の地域・部位のASTM相当サイクルは、暴露試験と気象因子の解析結果をもとに地域の最低気温の年間極値で表現した。
- 4) その部材が1年間に受けるASTM相当サイクルが毎年累加されると仮定し、促進試験に対応するように劣化が進むと仮定する劣化予測法を提案した。
- 5) 郵便番号とアメダスポイントを対応させ、標高による補正を行うことにより、より容易に地域条件を入力できる方法を提案した。

ここで提案した方法は、大雑把には暴露試験結果と対応しているが、より精度よく予測するためには夏季の乾燥の影響や骨材の影響等を明らかにする必要がある。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会 : 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 26節 凍結融解作用を受けるコンクリート、1997
- 2) 土木学会 : コンクリート標準示方書 2.4 凍結融解作用に関する照査、2001
- 3) 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
- 4) 浜 幸雄、松村光太郎、田畑雅幸、冨板 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 No.523, 9-16, 1999
- 5) 松村光太郎、浜 幸雄、千歩 修、冨板 崇 : コンクリートの凍害を対象とした自然環境下におけるコンクリート温度に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.22, No.2, 793-798, 2000
- 6) 浜 幸雄、濱田英介、千歩 修、友澤史紀 : 屋外暴露試験前後におけるコンクリートの耐凍害性の変化、日本建築学会2002年度大会(北陸)学術講演梗概集A-1, 789-790, 2002
- 7) 松村光太郎、千歩 修、浜 幸雄、鎌田英治 : 郵便番号区画を用いた地域条件表示の提案 凍結融解作用の強さによる地域区分の検討、日本建築学会学術講演梗概集(中国)A-1, 1075-1076, 1999

[2002年10月16日原稿受理 2003年2月25日採用決定]