

凍害劣化を受けるダムコンクリートの劣化予測手法

東京電力（株）電力技術研究所土木グループ 堤 知明
東電設計（株）水力土木部 野口 博章

1. まえがき

本報告は、長野県西部（標高855.5m, 北緯36°8'）に位置し、凍結融解作用を受ける気象条件としては、比較的厳しい環境下にある水殿ダム調整池内に設置した暴露供試体の30年間に亘る試験結果と試験結果に基づいて筆者らが提案した凍害劣化予測手法の実ダムへの適用結果についてまとめたものである。

2. 試験方法

2.1 コンクリート配合

試験対象とした配合は、水殿ダム本体の配合の他、水セメント比を広範囲に変化させると共にAE剤の添加の有無、フライアッシュの混和の有無がダムコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響について検討するために合計10配合を選定した。試験配合を表-1に示す。なお、本暴露試験は、1m立方の大型供試体と15×30cmの小型供試体を暴露してあるが、ここでは小型供試体の結果について述べる。大型供試体の暴露試験結果については別報を参照されたい¹⁾。また、表中に示したそれぞれの記号は、アルファベットの最初の文字がAE剤添加の有無（A：添加、N：無添加）を、次の文字がフライアッシュ混和の有無（F：混和、N：無混和）を、次の文字が水セメント比を示す。たとえば、AF49は、AE剤およびフライアッシュを共に用いた水セメント比49%の配合で、これは水殿ダム本体と同一の配合である。このときのフレッシュコンクリートの品質試験結果も合わせて同表に示す。

表-1 コンクリート配合及びフレッシュコンクリートの品質

配合の 種類	コンクリート配合									フレッシュコンクリートの測定値			
	粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント比 W/(C+F) (%)	フライアッシュ 置換率 F/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ [°] (cm)	空気量 (%)	温度	
					水 W	セメント+ フライアッシュ C+F	細骨材 S	粗骨材 G	AE剤 ガインゾル (g/m ³)			外気温 (℃)	コンクリート (℃)
AF49	150	49	25	22	98	200	467	1654	54	3.3	3.0	28.0	23.0
AF54	150	54	25	23	95	175	492	1649	48	3.2	3.1	26.0	23.0
AF71	150	71	25	24	92.5	130	519	1643	34	3.0	2.8	28.0	23.0
AF91	150	91	25	24.5	90	100	532	1640	23	2.9	2.6	18.5	19.0
AF110	150	110	25	25	88	80	546	1636	16	2.6	3.1	19.0	14.0
AN71	150	71	0	24	92.5	130	519	1643	34	3.2	3.1	23.0	21.5
AN82	150	82	0	24	106	130	510	1614	34	14.0	3.1	22.0	18.5
AN91	150	91	0	24.5	90	100	532	1640	23	3.3	3.0	24.0	22.0
NF78	150	78	25	24.5	101	130	554	1661	0	3.1	1.1	19.0	18.5
NN78	150	78	0	25	101	130	554	1661	0	3.0	1.3	19.0	20.0

2.2 暴露条件

(1) 設置場所

暴露供試体は、長野県梓川の水殿調整池内の右岸（北緯36度8分、標高850mおよび855.5m）に設置されている。

(2) 気温、日射および湿潤条件

30年間における、暴露地点周辺の月平均最低気温は毎年12月頃から翌年3月頃まで月平均最低気温が0℃以下となるうえ、年最低気温は月平均で氷点下10℃近傍まで下がり、コンクリートに対して厳しい環境下である。また、調整池内に暴露した供試体は、調整池の運転水位（EL.853.5m～EL.845.5m）の間に設置してあるため、水位の変動によって12月から3月の間に平均約11回水没した。

2.3 経年変化測定項目

経年変化測定項目は、以下の通りである。

- ・動弾性係数：2回／年（共鳴振動法、超音波法の2種）
- ・質量：2回／年（秤による）

3. 暴露試験結果

3.1 小型供試体の相対動弾性係数の経時変化

小型供試体の相対動弾性係数の経時変化を図－1(a)～(c)に示す。同図には超音波法による測定結果と共鳴振動法による測定結果を合わせて示した。測定結果を概観すると以下のとおりである。

(1) AF49～AF110（図－1(a)）

超音波法による測定結果ではいずれの供試体も相対動弾性係数が100%以上を保っており、劣化は認められない。共鳴振動法では、相対動弾性係数の低下傾向が認められAF49～AF71供試体が暴露12～14年程度から100%を切っている。AF91およびAF110では、低下傾向が現れるのはより速く、100%を切る時期は暴露8年程度となっている。

(2) AN71～AN91（図－1(b)）

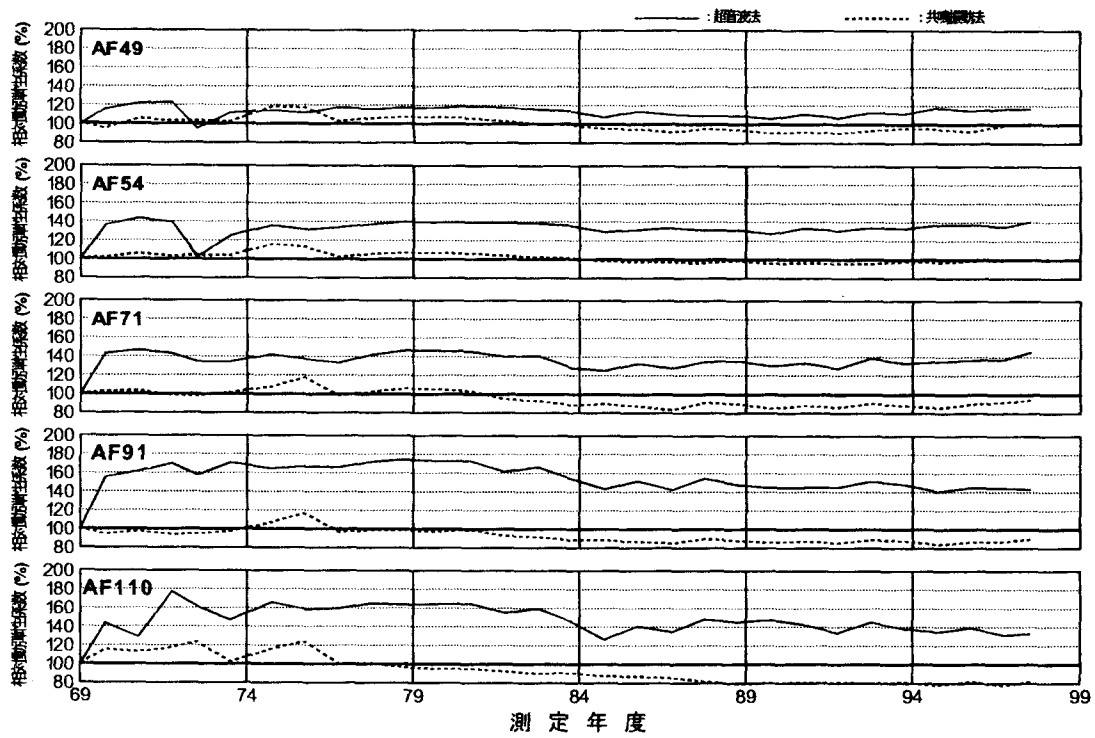
超音波法はAFシリーズと同様いずれの供試体も相対動弾性係数が100%を保っており、劣化傾向は認められない。共鳴振動法では、AF71が暴露10年程度から100%を切るようになっているが、そのほかの供試体は100%以上を保っている。

(3) NF78（図－1(c)）

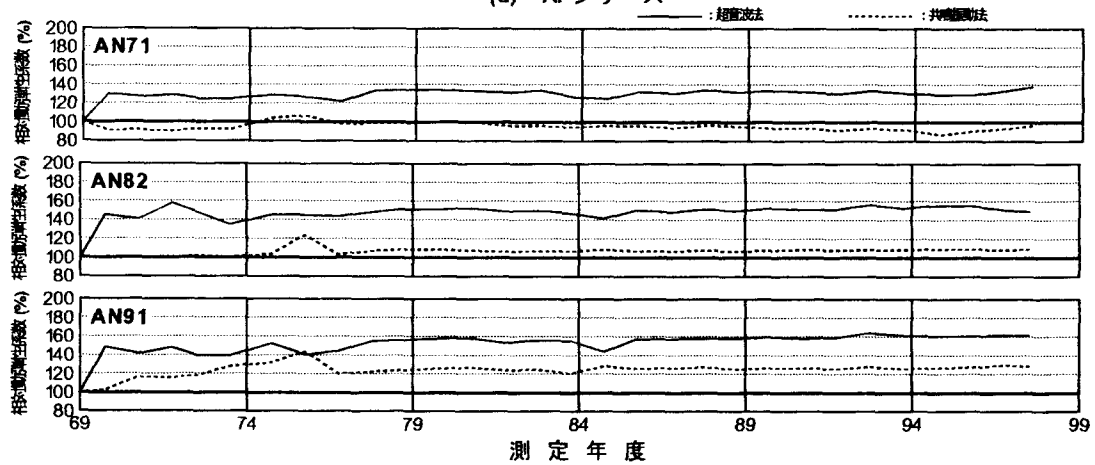
超音波法ではやや低下傾向が認められるが相対動弾性係数は100%以上を保っている。共鳴振動法では、暴露11年程度から100%を切るようになる。

(4) NN78（図－1(c)）

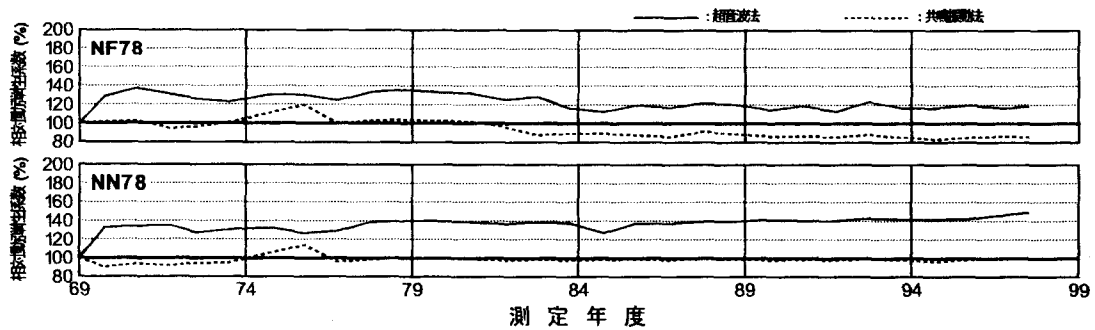
超音波法では劣化は認められず100%以上を保っている。共鳴振動法でも100%程度を保ったまま推移している。



(a) AFシリーズ



(b) ANシリーズ



(c) FN, NNシリーズ

図-1 相対動弾性係数の経年変化 (小型供試体)

3.2 超音波法と共鳴振動法の測定結果の違いについて

小型供試体における超音波法と共鳴振動法の測定結果の違いは、両者の測定原理ならびに測定位置の違いによるものと考えられる。共鳴振動法は供試体全体に振動を与え、1次固有振動数を測定して動弾性係数を求める方法である。これに対し、超音波法は供試体の周辺に比べ劣化の比較的少ない供試体端面（片側キャッピング）に端子を当て、供試体中央部を伝播する超音波速度から動弾性係数を算出している。前者の方法では、表面損傷箇所も含めた供試体全体の動弾性係数が表現できるのに対し、後者では表面損傷の影響が少ない。このため、水セメント比の増加とともに相対動弾性係数が高くなり、その傾向が超音波法で顕著に現れたものと考えられる。

4. 凍害劣化評価

4.1 基準化凍結融解サイクル

上記の暴露試験結果並びに室内の促進試験結果を基に筆者らが提案した²⁾、任意の最低温度及び水セメント比と破壊サイクル数から求まる基準化凍結融解サイクルを用いて、ダムコンクリートの凍害による劣化深さを評価した結果について述べる。

任意の最低温度及び水セメント比と破壊サイクル数との関係は図-2で示される。同図は、破壊サイクル数（促進試験において相対動弾性係数が60%を切った時点でのサイクル数）に及ぼす任意の最低温度及び水セメント比の影響を示したものである。したがって、式(1)、(2)に示すように、基準となる水セメント比および最低温度の破壊サイクル数と任意の水セメント比、最低温度の破壊サイクル数との比をとりこれを重み係数として、任意の水セメント比、最低温度別の凍結融解サイクル数に掛け合わせて評価すれば、任意の水セメント比および最低温度の影響を同時に表現することができる。筆者らは、このようにして求めた凍結融解サイクルを「基準化凍結融解サイクル」と定義した。

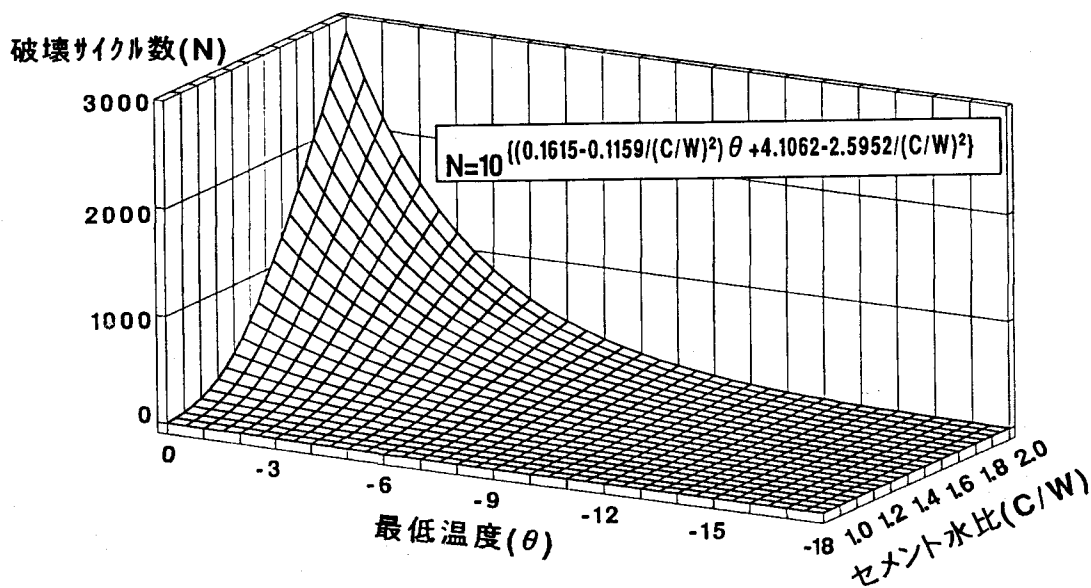


図-2 破壊サイクル数に及ぼす最低温度及び水セメント比の影響

$$\phi = N_d([C/W]_{st}, [\theta]_{st}) / N_d([C/W]_t, [\theta]_t) \quad (1)$$

$$N_i' = \phi \cdot N_i \quad (2)$$

ここで、 ϕ : 重み係数、

$N_d([C/W]_t, [\theta]_t)$: 任意のセメント水比および最低温度の破壊サイクル数

$N_d([C/W]_{st}, [\theta]_{st})$: 基準のセメント水比および最低温度の破壊サイクル数
(ともに図-2より算出)

N_i' : 基準化凍結融解サイクル数

N_i : 任意の凍結融解サイクル数

である。

また、自然環境下における暴露期間中の凍結融解回数については、凍結融解温度を0℃と仮定することにより、次式から求められる。

$$N' = \sum_{i=1}^n \{N'_i\} = [N_{ij}] \{\phi_j\} \quad (3)$$

$$\{N'_i\} = \begin{pmatrix} N'_i(1) \\ N'_i(2) \\ \vdots \\ N'_i(n) \end{pmatrix}, \quad \{\phi_j\} = \begin{pmatrix} \phi(0) \\ \phi(-0.5) \\ \vdots \\ \phi(m) \end{pmatrix}$$

$$[N_{ij}] = \begin{pmatrix} N(1, 0) & N(1, -0.5) & \cdots & N(1, m) \\ N(2, 0) & N(2, -0.5) & \cdots & N(2, m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & N(i, j) & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ N(n, 0) & N(n, -0.5) & \cdots & N(n, m) \end{pmatrix}$$

ここで、 N' : 基準化凍結融解サイクル(累計値)、

$\{N'_i\}$: 材齢*i*における基準化凍結融解サイクル、

$[N_{ij}]$: 材齢*i*における最低温度*j*に対する凍結融解回数、 $\{\phi_j\}$: ある水セメント比、最低温度*j*0を基準とした時の破壊サイクルに及ぼす最低温度*j*の重み(図-2をもとに算出)、*n*: 評価材齢、*m*: 現地の最低温度の最小値である。

材齢*i*における最低温度*j*に対する凍結融解回数 $[N_{ij}]$ は、暴露開始からの外気温を基に計算できる。

4.2 実ダムへの適用

筆者らの提案した基準化凍結融解サイクルの考え方の妥当性を検証するために、実ダムからコンクリートコア(15×*h* cm)を採取し、動弾性係数の深さ方向の測定結果と、基準化凍結融解サイクル数から算定される動弾性係数分布の対比を行った。適用対象としたダムは、水殿ダムの上流に位置するNダムである。Nダムは水殿ダムとともに揚水式発電所を形成している。N

ダムのコングリート配合は水殿ダムと同様である。採取したコアは3本であり、動弾性係数の測定は供試体直径方向とした。測定ピッチはいずれも表面から20cmまでは2cmピッチ、以降は5cmピッチとした。

4.3 調査結果

採取前のコングリート表面は、スケーリングによる軽微な凹凸が認められるものの、ひびわれは認められなかった。また、コングリートコアも密実に充填され、切断面は良好であった。また、極表層部を除いては、ひびわれ等の劣化は認められなかった。

図-3 (a)~(c)に動弾性係数の測定結果を示す。

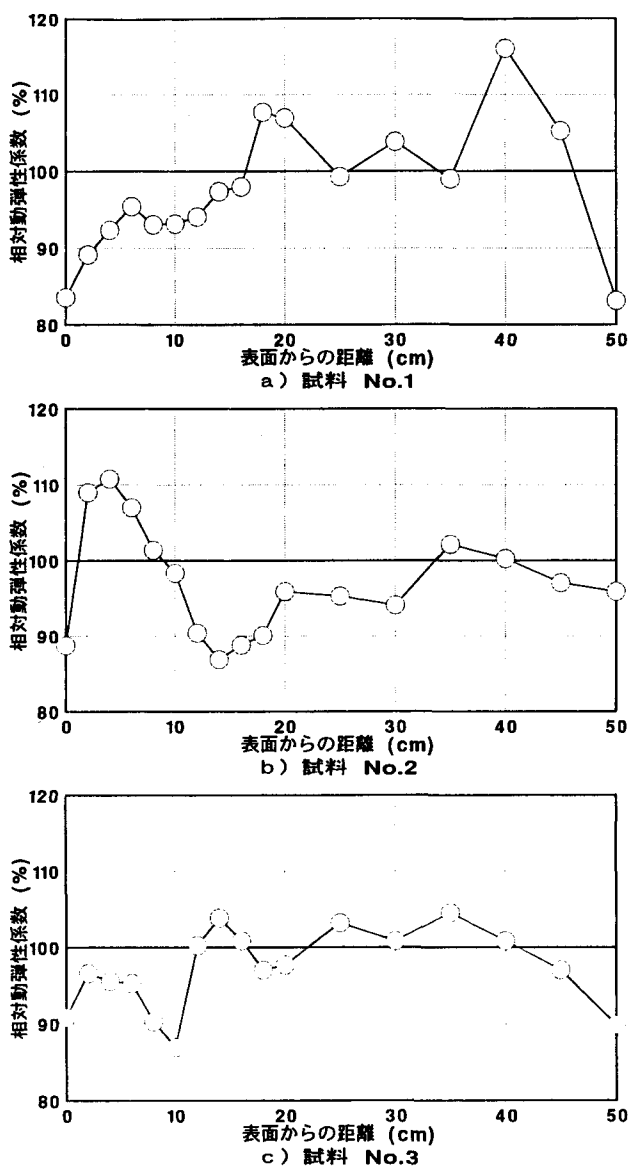


図-3 採取コアの相対動弾性係数測定結果

相対動弾性係数を算出するに際しては、深部のコンクリートは劣化していないものと仮定し、この箇所の動弾性係数に対する比をとって相対動弾性係数を算出することとした。データの整理に当たって、粗骨材最大寸法（150mm）の影響も考慮して、粗骨材径の3倍以上に当たるコアの深さ45cm～50cmの位置の3本の動弾性係数の平均値を基準値とした。図-3に示すように、3本の相対動弾性係数はばらつきが大きいものの、3本とも全ての測点で80%以上の値を示しており、健全性を保っているものと判断される。3本とも、最深部の相対動弾性係数値が低下しているが、これは測定に際し、端部を整形するために、コアカッターで切断したことによる影響と思われる。また、No.1供試体の40cmおよびNo.2供試体の5cm付近で値が高くなっているのは、この付近にある粗骨材の影響と思われる。

4.4 基準化凍結融解サイクルの適用

筆者らの提案した手法の有効性を検証した。適用に際して、Nダム周辺の年平均最低気温を-7℃、材齢28年とした。採取したコンクリートコアの配合は、水殿ダム本体配合とほぼ同様である。これらの条件の下で、計算した相対動弾性係数の分布と測定した3本のコアの平均相対動弾性係数の分布の比較を図-4に示す。同図中の相対動弾性係数は、ダム打設時のコンクリートの動弾性係数を基準とするのではなく、採取コア深部のコンクリートの動弾性係数に対する比をとって算出していることから、28年間の強度増進の影響は相殺できるものと考え、強度増加による相対動弾性係数の補正は行っていない。

図に示すように、計算値は、実測値と良く一致しているといえる。この結果は、本手法が実ダムの凍害劣化深さの推定および劣化予測に有効であり、これら进行评估するためにはダム地点の年最低気温とコンクリート配合が既知であれば良いことを示している。

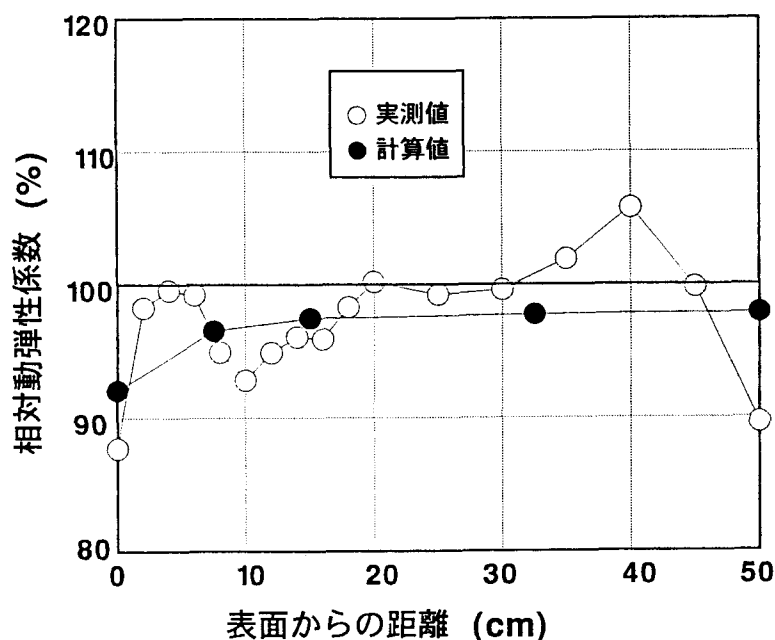


図-4 計算値と実測値の比較

5. 結 論

本研究の結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 小型供試体の試験から超音波法による相対動弾性係数と共鳴振動法による相対動弾性係数と異なり、超音波法による測定結果が常に大きな値を示した。超音波法による測定結果では、いずれの供試体とも測定開始時点以上の相対動弾性係数を保持しており、特にAE剤を用いない供試体でも健全な状態にあった。共鳴振動法による測定結果では、材齢10年目あたりから相対動弾性係数が100%を切るものが現れ、材齢30年目においては、水セメント比の大きなものほど低下傾向が大きかった。
- (2) Nダムの劣化調査を行ったところ、建設後28年経過した時点でも相対動弾性係数は80%以上を示し、十分健全性を保っていることを確認した。さらに、筆者らが提案した基準化凍結融解サイクル数の関係をNダムに適用した結果、劣化深さの推定値は実測値と良い一致を示し、本手法の有効性を確認した。

参考文献

- 1) 江川顕一郎・千代田将明・野本高憲・野口博章：長期現地暴露試験に基づくダムコンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 172, V-20, pp39～48, 1993年8月。
- 2) 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，第564号/V-35, 1997. 5, p. 221-232.