



## 콘크리트구조물의 반복적 동결융해에 대한 수치 해석적 열화 예측 및 신뢰성 모델 개발

조태준<sup>1)</sup> · 김이현<sup>2)\*</sup> · 조효남<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한국철도시설공단 KR기술연구소 <sup>2)</sup>한양대학교 토목공학과

## Development of Deterioration Prediction Model and Reliability Model for the Cyclic Freeze-Thaw of Concrete Structures

Tae-Jun Cho<sup>1)</sup>, Lee-Hyeon Kim<sup>2)\*</sup>, and Hyo-Nam Cho<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Engineering Div., Korea Rail Network Authority, Daejeon 301-803, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

**ABSTRACT** The initiation and growth processes of cyclic ice body in porous systems are affected by the thermo-physical and mass transport properties, as well as gradients of temperature and chemical potentials. Furthermore, the diffusivity of deicing chemicals shows significantly higher value under cyclic freeze-thaw conditions. Consequently, the disintegration of concrete structures is aggravated at marine environments, higher altitudes, and northern areas. However, the properties of cyclic freeze-thaw with crack growth and the deterioration by the accumulated damages are hard to identify in tests. In order to predict the accumulated damages by cyclic freeze-thaw, a regression analysis by the response surface method (RSM) is used. The important parameters for cyclic freeze-thaw-deterioration of concrete structures, such as water to cement ratio, entrained air pores, and the number of cycles of freezing and thawing, are used to compose the limit state function. The regression equation fitted to the important deterioration criteria, such as accumulated plastic deformation, relative dynamic modulus, or equivalent plastic deformations, were used as the probabilistic evaluations of performance for the degraded structural resistance. The predicted results of relative dynamic modulus and residual strains after 300 cycles of freeze-thaw show very good agreements with the experimental results. The RSM result can be used to predict the probability of occurrence for designer specified critical values. Therefore, it is possible to evaluate the life cycle management of concrete structures considering the accumulated damages due to the cyclic freeze-thaw using the proposed prediction method.

**Keywords :** life cycle management, cyclic freeze-thaw, probabilistic prediction, damage

### 1. 연구 배경

해안기후와 고산기후, 또한 비교적 긴 동결 가능 기후를 가지는 우리나라의 콘크리트구조물은 반복적인 동결융해(cyclic freeze-thaw)에 의한 열화현상이 다수 발견되고 있다. 이와 관련해서 많은 실험 연구<sup>1-7)</sup>가 국내외에서 발표되었으나 대부분의 연구는 표면 스케일링이나 정성적 평가, 또는 실험 결과의 회귀분석식에 관한 내용으로, 압력-온도-부피의 3상 평형을 고려한 이론적 연구나 정량적 접근은 매우 드물다.

미세한 다공극 구조인 콘크리트 복합체가 반복적 동결융해를 받을 때, 재료 구성의 변화(물-시멘트 비<sup>7,8)</sup>, 포화도<sup>9)</sup>, 바닷물 등의 염화이온<sup>7,8)</sup>, 연행공기량<sup>3,10,11,12)</sup>, 겔-케필러리 공극 구조<sup>6,8)</sup>, 혼화재료<sup>2)</sup>, 골재의 종류 및 비율<sup>16)</sup>

와 외부 조건의 영향(포화도<sup>3,4)</sup>, 상대습도<sup>13)</sup>, 외부온도, 온도 반복 주기 및 진폭<sup>1,7)</sup> 등)을 설계수명 동안 받게 된다. 이와 같은 영향으로 손상된 콘크리트의 누적된 변형률은 비선형거동을 보이며 파괴에 이르게 된다. 실험을 통해서 위와 관련된 많은 변수의 변화량을 제어하고 예측하여 분석하기에는 실질적으로 많은 한계성을 가지고 있기 때문에 이를 보완할 수 있는 수치 해석적 모델을 구성하여 이론적인 예측 및 비교 평가 기법이 필요하다.

콘크리트의 동결융해에서 위에서 언급한 변수들은 서로 연계되어 있으며, 이러한 손상에 대한 과거 연구의 대부분이 콘크리트 구조 손상에 대한 결정적 평가에 초점을 맞추었다. 이러한 확정적인 연구 방법은 재료 및 하중 그리고 환경 특성을 포함한 불확실성을 고려하면 실제 설계나 시공 현장에서 이론값과 실제값 사이에 커다란 오차를 발생시키는 원인이 될 수 있으며 확률적인 접근을 필요로 한다.

동결융해의 저항에 중요한 요소로 알려진 연행 공기량

\*Corresponding author E-mail : ihkim@krii.re.kr  
Received January 15, 2007, Accepted August 27, 2007  
©2008 by Korea Concrete Institute

의 경우, 압축강도의 저하의 원인이 되기도 한다. 그러므로 배합비의 결정 등의 재료적 설계는 구조적 강성 및 구조물 시스템의 안전성 평가가 동시에 요구된다. 이와 같이 재료 및 구조적 설계 검토는 콘크리트 구조물의 시간 의존적 특성을 고려한 설계수명 기간 동안의 예측 모델을 구성하고 각 설계 변수들의 분포 특성을 고려하는 확률론적인 검토가 필요하다.

나노미터 크기까지의 공극 구조를 예측할 수 없는 실험적 연구에서 가질 수 있는 현실적인 한계성 때문에 각 설계 변수를 종합적으로 고려할 수 있는 확률적 수치해석 모델 개발은 콘크리트 구조물의 정량적 평가와 과학적 설계, 시공 및 유지관리를 위해서 매우 효율적이고 실용적일 수 있다.

## 2. 연구 목적

본 연구의 목적은 반복적 동결융해 피해를 받는 콘크리트 구조물의 설계수명과 잔존수명을 예측하기 위한 합리적 기법을 개발하는 것이다. 반복적 동결융해로 인한 강성 저하 현상에 대한 해석적 기법이나 형식은 아직 정립되지 않았다.

비선형 구성 방정식을 비선형-파괴 구성 법칙<sup>14)</sup>과 결합시켜서, 확률론적 파괴 (손상)지수를 구하고, 이를 계산된 각 미세공극에서의 균열 성장 값과 비교하여 반복적 동결융해 하에서의 감소되는 강성, 강도 및 열화 모델을 구명하고자 한다.

이를 위하여 미세공극에서의 균열 생성 및 성장의 파괴역학적인 방법과 재료 및 하중 변수들의 확률적 분포를 고려한 모델을 이용하는 강도 저하 예측 모델링 방법의 두 가지 방법을 사용하고자 한다. 동결융해에 의한 누적 소성변형에 영향이 큰 변수들의 확률적 분포 함수를 고려한 한계 상태 방정식의 평가에는 응답면 예측 기법을 사용하였다.

그러므로 본 연구의 구체적인 목표는 아래와 같다.

첫째, 반복 동결융해에 의한 누적 손상을 일으키는 구체적인 변수들과 특성들을 조사한다.

둘째, 반복 동결융해 작용에 대한 중요 설계 변수들의 입력으로 구성된 응답면을 사용한 발생 확률과 신뢰성 지수로 누적 손상을 예측한다.

## 3. 반복적 동결융해 모델

### 3.1 반복적 동결융해

반복 온도 하중 하에서의 다공극 구조인 콘크리트 복합체의 동결융해와 누적 손상에 대한 모델은 지금까지 실험 결과에 대한 회귀분석 방법으로만 이루어져 왔다. 이러한 연구 방법은 제한된 실험 조건 하에서는 좋은 예측 결과를 얻을 수 있으나, 재료-하중의 확률적 분포를 고려하면 실제 설계나 시공 현장에서는 많은 제약 조건

이 발생하게 된다.

본 연구에서는 선행 연구에서 결정론적으로만 접근하여 실제 설계나 시공 시 발생할 수 있는 재료 및 하중의 확률적 변동성을 고려하여 시방서에 규정된 또는 설계자가 원하는 제약 조건에 대한 중요한 설계 변수만으로 이루어진 한계상태방정식을 구성하여 장, 단기 반복적 동결융해 현상에 대한 열화 현상을 합리적으로 모사하였다.

반복적 동결 온도 하중에 대한 가장 중요한 설계 변수는 공극의 분포 및 포화도에 따른 동결압력 크기의 온도별 함수로써, 이는 선행 연구<sup>8)</sup>에서 컴퓨터 프로그래밍하였다. 선행 연구에서 살펴본 주요 설계 및 시공 변수들은 동결압력 이외에도 물-시멘트 비<sup>7,8)</sup>, 포화도<sup>3)</sup>, 이물질 (바닷물의 염화이온<sup>1,8,13)</sup> 등), 연행공기량<sup>3,8,10)</sup>, 겔-케필러리 공극구조<sup>6,8)</sup>, 혼화제<sup>2)</sup> 등이 있다. 이들은 본 연구의 기본 변수들로서, 반복적 동결온도 하중 하에서 열화의 진행에 따라서 연계되어 영향을 주고받게 된다.

재료적 변수는 재령시간에 따른 공극 구조의 수치해석 모델링<sup>14)</sup>을 사용할 수 있다. 공극 구조 내의 포화도는 상대습도 또는 외부 수분 공급량에 비례적이며<sup>15)</sup>, 포화도가 91%를 초과하면 동결 시 팽창 현상이 발생하게 된다<sup>4)</sup>. Fig. 1에서 물-시멘트비와 콘크리트의 마이크로 공극 구조 (초기 재료 특성)에 따른 시편의 반복적 동결융해 시험 중의 팽창 정도의 차이를 알 수 있다. 이와 같은 현상은 마이크로 공극 구조와 얼음팽창 압력에 의한 동결 가능수 (freezable water)의 이동에 영향을 미치는 연행공기량의 차이에 의해서도 발생한다 (Fig. 2).

또한 두 실험에서 공통적으로 겔 공극과 케필러리 공극의 분포비율과 동결압력의 변화의 차이에 의해서 C에서 동결 중 팽창압력을 보여주고 있다 (Figs. 1, 2의 원형표시). 이는 마이크로 공극 구조에서 포화도가 얼음-물-수증기의 3상 평형 상태와 얼음-물의 2상 평형 상태 및 천이 과정의 차이로써, 약 10배의 동결압력이 발생한다<sup>13)</sup>.

반복적 동결융해에 의해서 열화현상이 누적해서 증대됨은 많은 실험과 현장에서 발견되고 있으며, Ueda<sup>7)</sup>는 등가 소성변형지수를 제안하여 발표한 바 있다 (Fig. 3).

이상의 영향 변수들을 도식적으로 표현하면 Fig. 4와 같다. Penttala의 실험 결과와 같이 매회 동결시 변형률

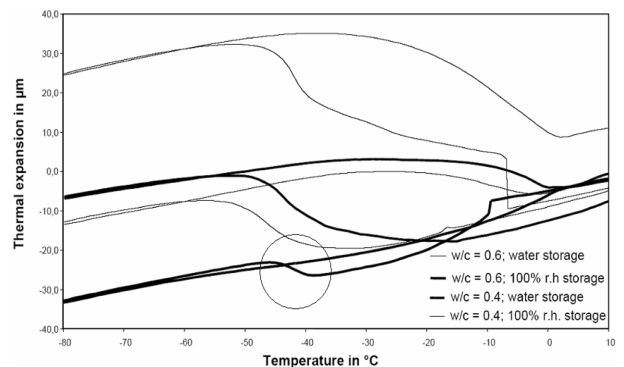


Fig. 1 Strain deformation of the test specimen as a function of water to cement ratio, relative humidity, and cyclic freeze-thaw<sup>9)</sup>

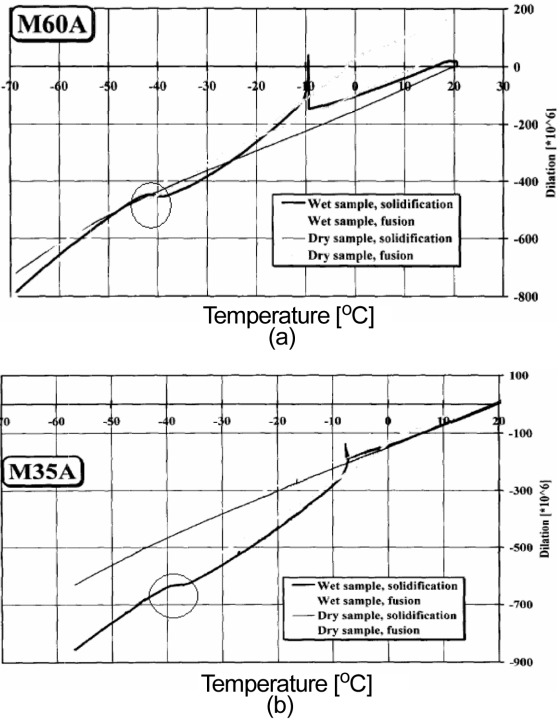


Fig. 2 Strain deformation of the test specimen for different entrained air and water to cement ratio<sup>(3)</sup>

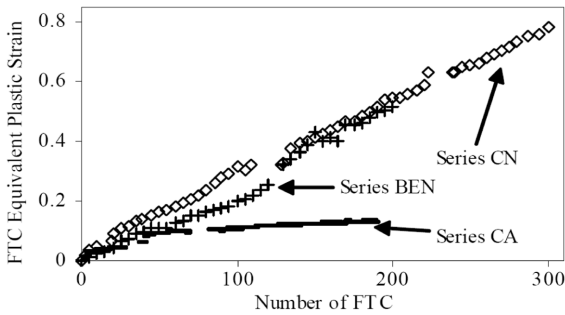


Fig. 3 Experimental results of equivalent plastic strain under the accumulated cycles of freeze-thaw<sup>(7)</sup>

의 기울기는 연행공기량의 영향을 받으며, 반복 횟수가 증가됨에 따라서 Setzer<sup>(9)</sup>와 Bishnoi<sup>(16)</sup>의 실험 결과와 같이 외부 공급 수분량에 의한 내부 습도 (포화도)에 의해서 커다란 팽창이 발생하는 결과를 보여준다. 이때 포화도가 91%를 넘어서면 시편은 동결시에도 수축보다는 팽창이 크게 나타나게 되며<sup>(3)</sup>, 동결 반복 횟수가 누적 될수록 물리적 특성치 (열팽창계수, 탄성계수 등)와 재료 저항강성 (소성 변형률)은 미세균열의 증가로 인해서 변화될 것이다. Fig. 4에서의 융해시 변형률은 부(-)의 부호를 갖는 동결압력의 작용과 물-얼음-수증기의 열팽창계수 차이가 고려되었다.

### 3.2 응답면기법을 이용한 중요 설계변수로 구성된 동결 융해-열화 예측 식 (한계상태방정식)

동결융해-열화 예측 제안식의 검증 및 보정, 그리고 파괴확률 해석을 위하여 한계상태방정식을 구성하였다. 선

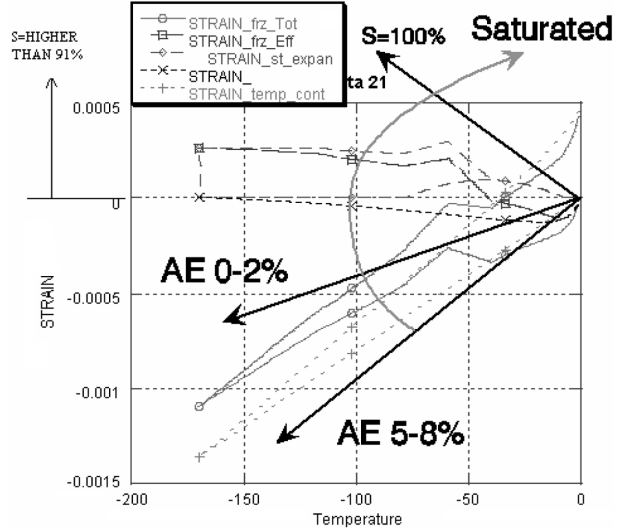


Fig. 4 Structural degradation by the cyclic freeze-thaw, with the increase of saturation and degradation of entrained air pores (strain\_frz\_tot: total strain, strain\_temp\_cont: thermal expansion strain, strain\_frz\_eff: total strain-strain\_temp\_cont, strain\_frz\_st\_expan: freezing expansion strain)

행 연구에서는 사용되는 모든 재료의 특성값과 하중 (온도, 습도, 온도진폭 등)에 대하여 평균값 또는 임의의 값이 사용되어왔다. 그러나 이 값들은 같은 구조물 내부에서도 공간적, 시간적으로 다른 확률적 분포를 갖게 되며, 이는 확률적 분포 특성을 고려하여 보다 합리적으로 또한 확률적으로 평가될 수 있다.

동결융해 반복에 따라서 누적되는 손상 및 열화에 대한 확률론적 평가를 위해서 동결융해 저항에 대한 연행 공기 효과의 증명에 효율적인 상대동탄성계수의 변화<sup>(9)</sup>, 그리고 기존 실험 결과들과의 비교를 위한 누적 변형률과 등가소성지수에 대해서 각각 설정된 한계값에 대한 초과확률을 계산하여, 반복적 동결융해를 받는 콘크리트 구조물의 설계수명 간 파괴 확률과 신뢰성지수의 변화를 평가한다. 여기서 결정된 한계 값은 아직 표준화되지 않은 값으로 향후 열화 예측 실험 및 평가가 계속 이루어지면 좀 더 객관적인 값으로 업데이트할 수 있다.

응답면 기법은 구조물 응답의 변동 특성을 파악하거나 음함수적인 한계상태식에 대한 파괴 확률을 산정하는데 유용하게 이용될 수 있다. 유한요소해석이나 대형 구조물과 같이 자유도가 큰 해석의 경우 한계상태방정식이 변수들의 음함수 형태로 표현되는 경우, 일반적인 신뢰성 해석 (몬테카를로 시뮬레이션: Monte-Carlo simulation, MCS 또는 first order second moment method 등)에서는 각 변수에 의한 편미분이 불가능하거나, 충분한 모사를 위한 해석 시간이 길어지거나, 위반 확률이 너무 작아서 구할 수 없는 경우가 발생한다. 그러나 응답면기법을 이용하면 많은 대상 입력변수 중 중요한 설계 변수만으로도 이루어진 한계상태방정식을 구성하여 보다 효율적이고 정확한 변수관리 및 시스템의 확률적 평가가 가능해진다<sup>(17)</sup>.

최적화 회귀분석법인 RSM은 화학공장 관리 및 분석

을 위해 Box와 Wilson<sup>18)</sup>에 의해 개발되었고 지금은 물리학, 엔지니어링, 의료 과학, 사회학 같은 넓은 영역에서 사용되어지고 있다. 확률변수의 입력에 의해서 구조적 응답을 예측함으로써 응답면기법은 안전성의 신뢰도와 확률을 평가하는데 사용된다.

응답면기법은 아래와 같은 장점을 가지고 있다.

- 중요한 또는 민감한 극한 한계상태함수와 시스템 응답은 사용자가 결정한 입력 변수들로 구성되어 진다. 민감도는 한계상태함수를 사용함으로써 계산될 수 있다.
- 구성 후에 한계상태함수는 성능에 대한 초과 발생 확률을 쉽게 계산할 수 있다. 그러므로 MCS와는 달리 큰 자유도를 갖는 아주 복잡한 구조물 또는 극히 작은 파괴확률을 평가하는 것이 가능하다.
- 한계상태함수에서 시간 또는 공간 종속 입력 변수를 선택함으로써 추계학적 평가가 가능하다.
- 입력과 출력 확률 변수에 대하여 최소 자승법을 사용하여 누적 반복 동결응해 작용에 의해 열화된 콘크리트 시스템의 확률 예측에 사용할 수 있다.

응답면기법의 적용은 근사화의 정확도, 근사화를 위해 필요한 구조 해석의 횟수, 그리고 구조 해석을 수행하여야 할 표본점의 선정이 중요하며, 표본점의 선정은 각 확률 변수의 중심점을 정하여 그 주변으로 일정 거리 만큼 떨어져 있는 점을 취하는 방법 등이 제안되었다. 응답면기법 중 중심합성계획법 (central composite design)은 응답면을 연성항 (cross-coupled term)이 포함된 2차 다항식으로 표현함으로써 회귀방정식이 직교성, 회전성, 정도의 균일성이라는 통계적 성질을 갖도록 하는 방법이며, Bucher-Bourgund법은 연성항이 없는 이차 다항식으로 근사식을 표현하여 표본점의 수를 줄일 수 있도록 하였다<sup>17)</sup>(Fig. 5).

본 연구에서는 Bucher-Bourgund법을 이용하여 중심점 (무작위 변량의 평균값)과 중심점에서  $\pm \sigma$  (표준편차) 만큼 떨어진 3개의 축 점을 선정하여 응답함수를 구성한다.

예로써 캔틸레버보의 균열폭에 대한 사용한계상태의 위험성 검토에 대한 응답면 분석기법을 MCS방법과 advanced first order second moment method (AFOSM)<sup>19)</sup>와 비교하여 검증해보면 다음과 같다.

RSM기법에 의해서 최대 균열폭에 대한 설계기준 값의 초과 확률을 평가하고, AFOSM과 MCS에 의한 결과와 비교하였다. 최대 균열폭의 산정을 위해서 식 (1)과

같이 사용성 한계상태방정식을 구성하였다.

$$g(\bullet) = w_{allow} - w_{max} \quad (1)$$

여기서 한계상태방정식에서의 공급 (저항)항은 허용 최대균열폭 ( $w_{allow}$ )으로 고부식성 환경으로 가정 시 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며 수요 (하중)항은 예측되는 인장철근의 항복강도가 294.3 MPa 이상일 경우 최대 균열폭 ( $w_{max}$ )으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다<sup>20)</sup>.

$$w_{allow} = 0.035 \times t_c \quad (2)$$

$$w_{max} = 1.08 \beta_c f_s \sqrt[3]{d_c A} \times 10^{-5} \quad (3)$$

여기서  $t_c$ : 최외단 철근 표면과 콘크리트 표면 사이의 콘크리트 최소 피복두께 (mm),  $\beta_c = (H - k \cdot D) / (D - k \cdot D)$ , H는 보의 높이,  $k = -np + \sqrt{(np)^2 + 2np}$ , n: 강재와 콘크리트의 탄성계수비 =  $E_s/E_c$ , p는 철근비, D는 보의 상단에서 철근까지의 깊이,  $f_s$  = 사용하중에 의해 계산된 철근의 인장응력,  $d_c$  = 인장축 연단에 가장 가까운 인장철근의 도심으로부터 인장축 연단까지의 거리, A = 콘크리트의 유효단면적을 철근의 수로 나눈 값을 나타낸다.

선택된 확률변수들의 통계값들은 Table 1과 같이 가정한다.

대상 구조물의 성능은 다음 한계상태방정식 식 (4)와 (5)를 이용하여 계산된다.

RSM을 사용한 한계상태방정식 :

$$g(\bullet) = w_{allow} - \left( a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_i x_i^2 \right) \quad (4)$$

MCS와 FOSM을 사용한 한계상태방정식 :

$$g(\bullet) = w_{allow} - 1.08 \beta_c f_s \sqrt[3]{d_c A} \times 10^{-5} \quad (5)$$

여기서  $g(\bullet)$ 는 한계상태방정식을,  $a_i$ 는 응답면함수의 계수를 나타낸다. 허용최대균열폭 ( $w_{allow}$ )은 0.037 mm,  $f_s$ 는 14.518 MPa ( $= M / (A_s \cdot (D - x / 3))$ ),  $A_s$ 는 8,000 mm<sup>2</sup>,  $d_c$ 는 20 mm,  $\beta_c = (H - k \cdot D) / (D - k \cdot D) = 1.068$ , H = 420 mm,  $k = -np + \sqrt{(np)^2 + 2np} = 0.229$ , n =  $E_s / E_c = 200000 / (4700 \sqrt{f_{ck}}) = 9$ , p =  $A_s / (B \cdot D) = 0.00377$ , D = 400 mm,  $w_{allow}$ 에 대한 변동계수는 0.1로 적용하였다.

여기서 X6는 식 (3)으로 계산된 균열폭이다.

최소자승법으로 구해진 응답면의 계수는 철근면적 (X2)

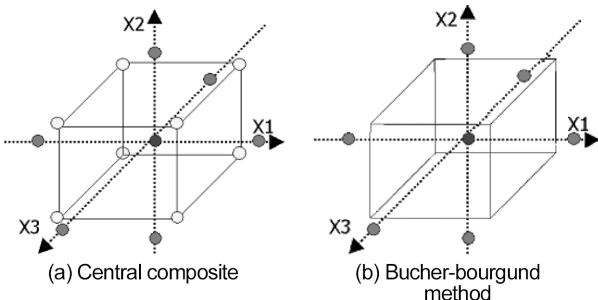


Fig. 5 Center, axis and factorial points<sup>17)</sup>

Table 1 Random variables and statistical values (N · mm)

Random variables	Notation for the random variables	Mean value	COV	Distribution
M	x1	7.30E+06	0.12	Normal
A <sub>s</sub>	x2	87.972 ~175.944	0.015	Normal
D	x3	400	0.015	Normal
f <sub>ck</sub>	x4	24	0.119	Normal
d <sub>c</sub>	x5	20	0.015	Normal

Note) M is unfactored external moment,  $f_{ck}$  is a 28th days compressive strength, and  $d_c$  is the minimum cover depth

**Table 2** Coefficients of RSM for three cases (N · mm)

Analysis cases	Random variables (In case of $x_2 = A_s = 175.944 \text{ mm}^2$ )					$A_s =$	$A_s =$
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X6
CASE1	7.30E+06	175.9	400	24	20	1.39E-01	6.97E-02
CASE2	8.18E+06	175.9	400	24	20	1.56E-01	7.69E-02
CASE3	6.42E+06	175.9	400	24	20	1.23E-01	6.22E-02
CASE4	7.30E+06	173.4	400	24	20	1.37E-01	6.86E-02
CASE5	7.30E+06	178.4	400	24	20	1.41E-01	7.07E-02
CASE6	7.30E+06	175.9	406	24	20	1.37E-01	6.86E-02
CASE7	7.30E+06	175.9	394	24	20	1.42E-01	7.08E-02
CASE8	7.30E+06	175.9	400	26.9	20	0.139	0.06965
CASE9	7.30E+06	175.9	400	21.1	20	0.139	0.06965
CASE10	7.30E+06	175.9	400	24	20.3	0.140	0.07000
CASE11	7.30E+06	175.9	400	24	19.7	0.139	0.06930

이 변화할 때 Table 2와 식 (6), (7)과 같이 변화된다. 식 (6), (7)에서의 팔호안의 응답면함수는 한계상태방정식에서 수요 (하중)항으로 작용한다. 허용균열폭이 초과 확률과 신뢰성지수는 식 (5)의 한계상태방정식으로 이용하여 AFOSM으로 구하였다. 철근 단면적이 증가하면 RSM과 비교된 AFOSM의 결과값은 Table 3과 같이 나타내었다.

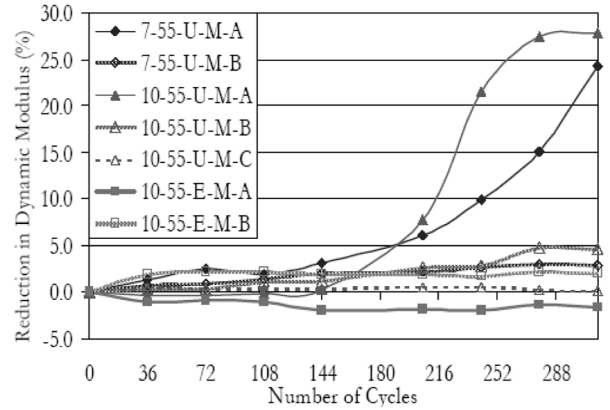
$$g(\bullet) = w_{\max} - (0.0238 + 10.38 \times 10^{-8} x_1 + 1.498 \times 10^{-3} x_2 + 5.772 \times 10^{-4} x_3 + 9.038 \times 10^{-11} x_4 + 1.935 \times 10^{-3} x_5 + 1.417 \times 10^{-16} x_1^2 + 5.326 \times 10^{-6} x_2^2 + 4.885 \times 10^{-7} x_3^2 + 1.883 \times 10^{-12} x_4^2 + 1.935 \times 10^{-5} x_5^2) \quad (6)$$

$$g(\bullet) = w_{\max} - (0.188 + 4.749 \times 10^{-9} x_1 - 6.197 \times 10^{-4} x_2 - 2.878 \times 10^{-4} x_3 - 1.540 \times 10^{-11} x_4 + 9.675 \times 10^{-4} x_5 - 6.424 \times 10^{-22} x_1^2 + 7.318 \times 10^{-5} x_2^2 + 2.442 \times 10^{-7} x_3^2 + 3.209 \times 10^{-13} x_4^2 - 9.678 \times 10^{-6} x_5^2) \quad (7)$$

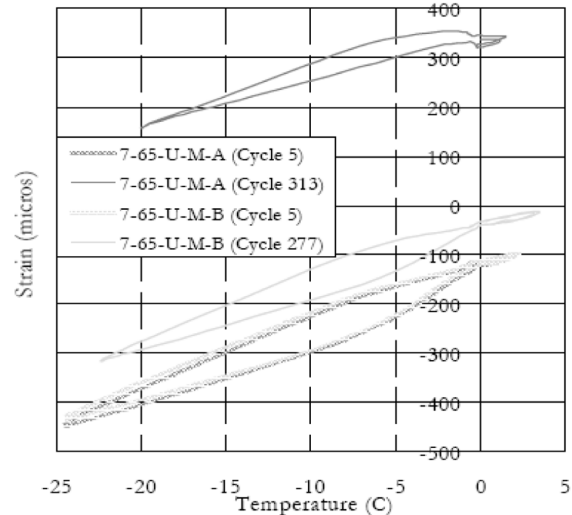
위의 계산 결과를 비교하면, 사용 주철근이 늘어나면 응답면기법으로 계산된 신뢰성지수가 약간 작은 값을 나타내고  $A_s$ 가  $87.972 \text{ mm}^2$ 와  $175.94 \text{ mm}^2$ 인 경우 각각, 오차율은 각각 6.9% 및 10.8%로 음함수인 한계상태방정식의 파괴확률을 비교적 정확하게 평가할 수 있음이 검증되었다. 예제 해석과 같이 응답면기법은 해석 도구나 방법에 무관하게 선택한 입력변수만으로 최소의 오차를 갖도록 회귀식의 조정(fitting)이 가능하다. 이 방법은 열화 예측식, 최적화나 신뢰성 해석에 쉽게 응용이 가능하다. 본 연구에서는 반복적 동결융해 실험 결과<sup>10)</sup>인 Figs. 6, 7에서 수화도, 배합비, 공극 구조, 연행공기량 등의 초기 재료 조건과 수분 공급량과 포화도, 동결온도 이하의 반

**Table 3** Reliability indices by three evaluation methods

Amount of reinforcement ( $A_s, \text{ mm}^2$ )	RSM	AFOSM	$\frac{RSM}{AFOSM}$
87.972	-6.043	-6.489	0.931
175.94	-4.137	-4.637	0.892



**Fig. 6** The reduction of relative dynamic modulus with increased number of cycles of freeze-thaw<sup>27)</sup>, where 7-55-U-M:  $70 \times 70 \times 150 \text{ mm}$ ,  $w/c=55\%$ ,  $AE=1.2\%$ , M=Mix, 10-55-E-M:  $100 \times 100 \times 380 \text{ mm}$ ,  $w/c=55\%$ ,  $AE=7\%$ , A: wet throughout, B: alternating wet and dry



**Fig. 7** The accumulated strain with increased number of cycles of freeze-thaw for 1% and 7% entrained air pore specimens, where, 7-65-U-M:  $70 \times 70 \times 150 \text{ mm}$ ,  $w/c = 65\%$ ,  $AE = 1.2\%$ , M = Mix, 10-65-E-M:  $100 \times 100 \times 380 \text{ mm}$ ,  $w/c = 65\%$ ,  $AE = 7\%$ , A: wet throughout, B: alternating wet and dry

복적 동결압력의 반복 횟수 및 지속시간을 입력 변수로 하고, 동결융해 반복 횟수에 따라서 누적되는 상대동탄성계수, 탄성계수, 균열 진전과 공극 증가 등의 강성도 저하를 출력 변수로 시스템의 응답면을 구성하고, 사용성 및 강도 한계상태에 대한 위반확률을 계산하여, 반복적 동결융해를 받는 콘크리트구조물의 설계수명 간 파괴확률과 신뢰성지수의 변화를 평가하고자 한다.

#### 4. 반복적 동결융해 작용에 의한 손상 예측

선택된 입력 설계 변수로 구성된 반복적 동결융해 작용에 의한 누적 손상 모델링에 대해 앞절에서 언급한 응답면기법을 사용하였다. 응답면으로 구성된 한계 상태 (성능) 함수는 설계자가 설계 후에 구조물의 성능을 예측하기 원하는 결과의 초과 확률을 구하는데 사용된다.

누적 잔류 변형에 대한 확률 발생을 결정하기 위해서 응답면 계수를 최소 자승법에 의해 결정한다. 누적 잔류 변형이 300 마이크로 변형보다 더 크게 증가될 확률은 AFOSM (advanced first order second moment<sup>19)</sup>의 반복 과정에 의해 계산하였다. RSM에 대한 한계 상태 함수는 아래 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(\bullet) = 300 - \left( a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_i x_i^2 \right) \quad (8)$$

여기서  $a_i$  항들은 응답함수 (중심과 축 점들로 된 랜덤 입력 변수들에 대한 답의 회귀식)의 계수들이다.

확률 변수들의 응답 함수는 임의 변동량에 대한 평균과 세 축 점들에 대한 Bucher-Bourgund 기법을 사용한다. 선택된 확률 변수는 시멘트와 물의 비율, 연행공기, 잔류 변형율, 동결융해의 반복 수 이다. Bucher-Bourgund 기법이 사용될 때 3축 점들은 중심과 축점들 사이에  $\pm \sigma$  (표준 편차)의 거리를 갖고 있다. Figs. 8과 9에서 추출한 응답면 함수를 구성한 입력 데이터는 Table 4에 나타내었다.

잔류 변형률에 대한 응답면의 결정 계수들은 다음 한계 상태 함수를 구성한다.

$$g(\bullet) = 300 - (5632.71 + 4957.77x_1 - 2300x_2 + 6.64x_3 - 4411.99x_1^2 + 163.27x_2^2 - 88.88 \times 10^{-3}x_3^2) \quad (9)$$

식 (9)의 한계 상태 함수는 잔류 변형의 임계값 (여기서 임의로 300이라 가정)을 초과하는 확률계산에 쓰인다. 초과확률은 AFOSM으로 0.00802로 계산되었다.

등가소성변형에 대한 확률적 예측은 등가소성변형의 초기값이 1.0 보다 더 적게 감소할 확률을 반복 처리 과정을 가진 AFOSM으로 계산한다. RSM에 대한 한계 상태 함수는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(\bullet) = 1.0 - \left( a_0 + \sum_{i=0}^n a_i x_i + \sum_{i=0}^n a_i x_i^2 \right) \quad (10)$$

여기서 저항항은 1.0, 하중항은 누적소성변형이며,  $a_i$  항은 응답함수의 계수들이다 (Fig. 10의 실험값에서 선택된 Table 5의 중앙점과 축점들로 구성된 랜덤 입력 변수의 변동입력에 대한 응답 회귀식).

확률 분포는 정규분포로 가정하였다.

$$g(\bullet) = 1.0 - (-1.403 + 1.553x_1 - 0.662x_2 + 0.000717x_3 + 6.798x_1^3 + 0.044x_2^2 + 4.50 \times 10^{-6}x_3^2) \quad (11)$$

식 (11)의 한계상태함수는 등가소성변형의 임계 값 (여기서는 임의로 가정)을 초과하는 확률 계산에 사용된다.

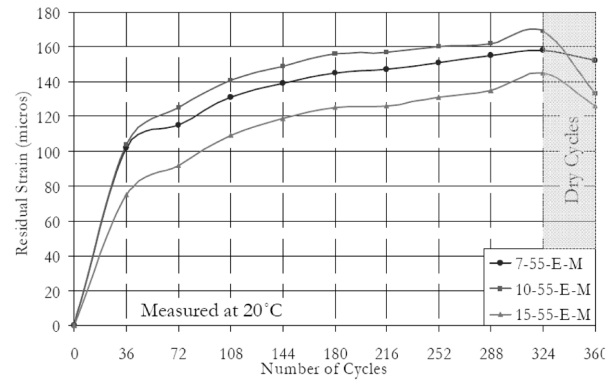


Fig. 8 Residual strain of different size specimens (un-entrained cases), where 7-65-U-M: 70×70×150 mm, w/c = 65%, AE = 1.2%, M = Mix, 10-65-E-M: 100×100×380 mm, w/c = 65%, AE = 7%, M = mix<sup>16)</sup>

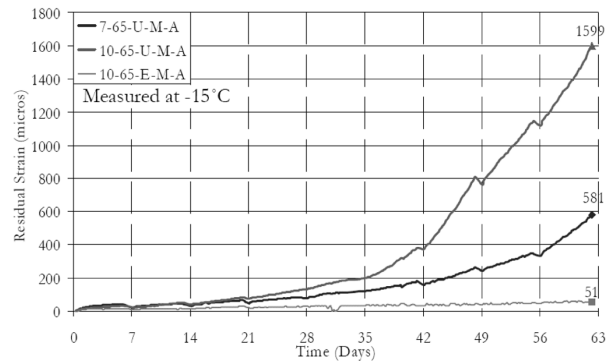


Fig. 9 The accumulated residual strain under cyclic freeze-thaw (entrained air pore of 0%)<sup>16)</sup>

Table 4 Axial points as the input values of RSM for fitting to the residual strain

Run number	Water to cement ratio	Entrained air pores (%)	Number of cycles	Residual strain
1	0.55	7	324	145
2	0.55	7.35	324	160
3	0.55	6.65	324	170
4	0.65	7	313	150
5	0.65	7	277	50
6	0.65	7	313	51
7	0.55	7	287	100
Mean	0.592857	7	308.8571	118
Standard deviation	0.053452	0.202073	19.21309	51.0849
COV	0.09016	0.028868	0.062207	0.432923

연행공기를 사용한 경우 초과 확률은 AFOSM으로 0.265로 계산되었다. 식 (9), (11)에서 입력 확률 변수들이 변하면, w/c, 연행공기, 그리고 반복 동결융해 수가 변하는 손상된 시스템의 응답을 예상할 수 있다. Fig. 11에 보여준 바와 같이 x축 하단 w/c ( $g_1$ )를 0.55로 고정한 연행공기 효과는, x축 상단의 등가소성변형 ( $g_2$ ) 감소를 보여준다. Fig. 12는 x축 하단의 연행공기를 2%로 고정시킨 경

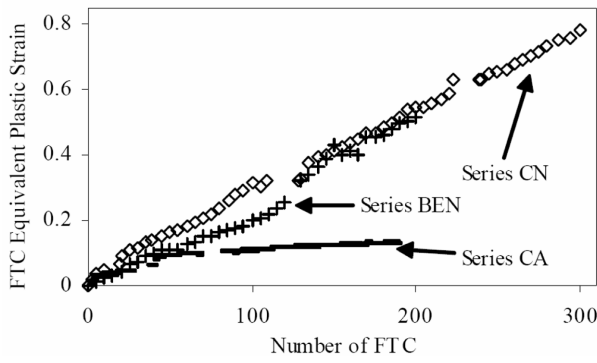


Fig. 10 Experimental results of equivalent plastic strain under the accumulated cycles of freeze-thaw<sup>7)</sup>

Table 5 Axial points as the input values of RSM for fitting to the equivalent plastic strain

Run number	Water to cement ratio	Entrained air pores (%)	Number of cycles	Equivalent plastic strain
1	0.6	4.5	100	0.1
2	0.6	4.5	200	0.12
3	0.5	1.5	100	0.2
4	0.5	1.5	200	0.5
5	0.5	1.5	100	0.3
6	0.5	1.5	200	0.6
7	0.5	1.5	300	0.8
Mean	0.528571	2.357143	171.4286	0.374286
Standard deviation	0.048795	1.46385	75.59289	0.26576
COV	0.092315	0.621027	0.440959	0.710047

우 ( $g_1$ ), x축 상단과 같이 반복 동결융해 수의 증가에 따른 증가소성변형 ( $g_2$ )을 보여준다.

Fig. 13은 연행공기를 사용한 경우 (E)와 사용하지 않은 경우 (U)에 대한 동결융해의 반복 실험에 따른 상대적 동탄성계수의 감소를 나타내고 있다. 열화된 상대적 동탄성 계수에 대한 확률 예측을 위해서, 실험 결과로부터 Table 6<sup>10)</sup>과 같이 입력데이터를 추출하여 응답면을 구성하는데 사용되었다. 실험 결과는 100% 상대습도의 경우 (A: 침전)가 반복 습윤상태 (B)의 경우보다 커다란 RDM의 감소를 보여주며, 연행공기를 사용한 경우는 RDM의 감소량이 매우 저하됨을 알 수 있다.

$$g(\bullet) = 60 - (-265 - 90.91x_1 + 700.0x_2 - 0.167x_3 + 1.81 \times 10^{-5}x_1^2 - 277.78x_2^2 + 5.40 \times 10^{-12}x_3^2) \quad (12)$$

식 (12)의 한계 상태 함수는 RDM의 한계값 (여기서는 초기값의 60%로 임의로 가정)을 초과하는 확률을 계산하는데 사용된다. 연행공기를 사용한 경우 초과확률인  $P_f$ 는 AFOSM으로 0.004295로 계산되었다.

식 (12)와 일치한 결과는 Fig. 14와 같이 MCS로 모사하였다.

한계상태함수에서 저항항을 변화시키서 민감도 분석을

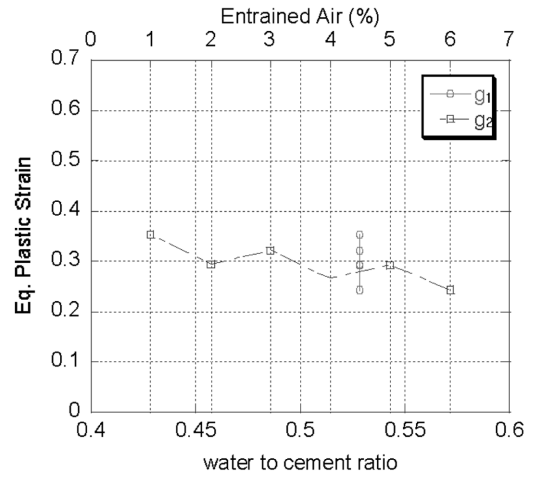


Fig. 11 The predicted plastic strain by response surface method with the fixed water-cement ratio and the variation of entrained air pores, where  $g_1$  and  $g_2$  indicate limit state function for the constant input of water to cement ratio, and for the varying input value of entrained air.

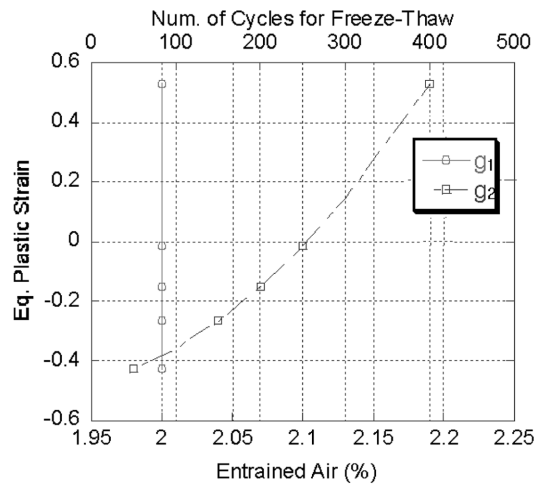


Fig. 12 The predicted equivalent plastic strain by response surface method with the fixed entrained air pores and the variation of number of cyclic freeze-thaw, where  $g_1$  and  $g_2$  indicate limit state function for the constant input of entrained air, and for the varying input value of the number of cycles.

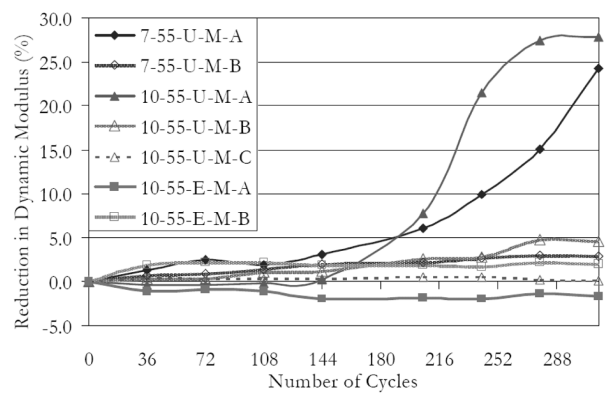
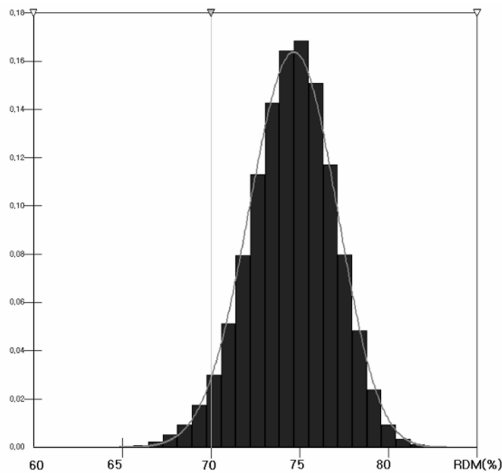


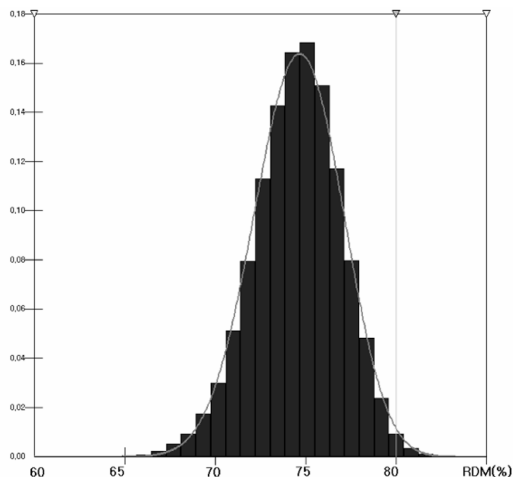
Fig. 13 The reduction of relative dynamic modulus with increased number of cycles of freeze-thaw, where 7-55-U-M: 70×70×150 mm, w/c = 55%, AE = 1.2%, M = mix, 10-55-E-M: 100×100×380 mm, w/c = 55%, AE = 7%, A: wet throughout, B: alternating wet and dry<sup>10)</sup>

**Table 6** Axial points as the input values of RSM for fitting to the RDM

Run number	Water to cement ratio	Entrained air pores (%)	Number of cycles of freeze-thaw	Relative dynamic modulus (RDM, %)
1	0.55	1.2	144	100.948
2	0.5775	1.2	200	89.0963
3	0.5225	1.2	200	94.096
4	0.55	1.26	245	85.081
5	0.55	1.14	245	81.082
6	0.55	1.2	280	78.236
7	0.55	1.2	280	78.236
Mean	0.55	1.2	227.714	86.682
Standard deviation	0.0159	0.0346	49.345	8.572
COV	0.0289	0.0289	0.217	0.0989



(a) Probability of exceeding for the 70% of initial RDM,  $P_r = 3.1\%$



(b) Probability of exceeding for the 80% of initial RDM,  $P_r = 99.1\%$

**Fig. 14** Probability density functions and the probabilities of exceeding, by the reduction of relative dynamic modulus with increased number of cycles of freeze-thaw, simulated by 200,000 stages of Monte-Carlo simulations (mean value of 74.558 (RDM in %), fitted by beta general distribution)

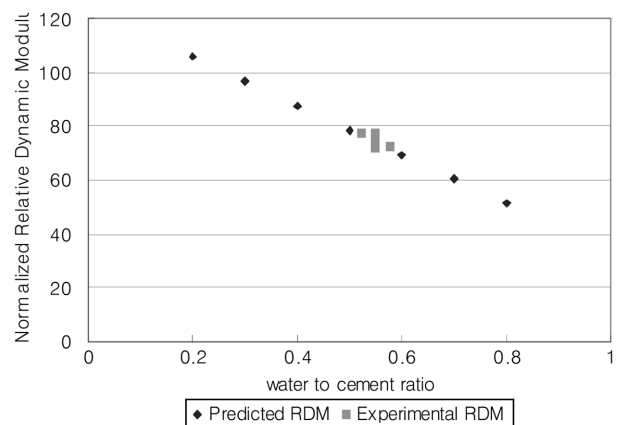
수행하였다. AFOSM과 MCS에 의한 신뢰성 지수와 파괴 확률은 Table 7과 같이, 반복적 동결융해로 인한 누적 손상의 확률적 예측을 통해서 입력 설계 변수들의 민감도를 보여주고 있다.

Table 7에서 보이는 구성된 응답면식 중 상대동탄성 계수에 관한 예측식을 물-시멘트비가 변화하는 경우에 대하여 Bishnoi<sup>16)</sup>의 실험 결과와 비교하였다 (Fig. 15). 그림에서 보이는 바와 같이 응답면기법을 사용하여 상대동탄성계수의 감소로 표현되는 반복적 동결융해에 의한 열화 현상에 대하여 실험 결과와 매우 근접한 예측을 할 수 있었다.

## 5. 결 론

입력 설계 확률 변수들에 대한 응답면기법을 사용하여 콘크리트 표본에 반복적 동결융해에 의한 누적 손상을 예측하였다. 300회의 동결융해 후의 상대적 동탄성 계수와 잔류 변형의 예측 결과는 실험 결과와 근접한 결과를 보였다. 개발된 응답면기법 프로그램의 출력은 파괴 확률의 예측에도 사용될 수 있으며, 입력된 설계 값에 대한 민감도 해석과 성능 예측에 사용될 수 있다. 한계상태함수에서 공급항 (저항값)이 변함에 따라 발생 확률과 신뢰성 지수는 변하게 된다. 이 연구에서 w/c와 연행 공기에 대한 민감도는 반복 동결융해 수가 증가함에 따라 강성의 감소를 보여주었다.

본 연구에서 제시된 응답면기법에 의한 콘크리트구조물의 동결융해로 인한 열화 예측 방법은 실제 구조물의 시간 및 온도, 압력 변화에 따른 열화 과정의 모델링 및 보수, 보강 시점의 결정, 보수보강 효과의 검증과 설계시의 참고 자료 등 실용적인 응용이 가능할 것으로 기대한다. 또한 설계 단계에서 콘크리트구조물의 동결융해 열화 현상에 대한 확률론적 성능 예측을 하여, 극한 안전성과 사용성 한계상태를 설정 및 평가함으로써, 열화의 최소화 및 안전성 최대화를 위한 콘크리트 재료의 민감도 해석 및 설계에 반영하여, 열화 및 유지관리를 고려한 설계시방규정의 발전에 기여할 것으로 기대한다.



**Fig. 15** The predicted plastic strain by response surface method with the variation of water to cement ratio



**Table 7** The reliability index and probability of failure with limit state function by RSM for the investigated cases

Cases	Performance function (limit state function)	Reliability index (probability of failure)
Residual strain	$g(\bullet) = 200 - (5632.71 + 4957.77x_1 - 2300x_2 + 6.64x_3 - 4411.99x_1^2 + 163.27x_2^2 - 8.88 \times 10^{-3}x_3^2)$	Reliability index ( $\beta$ ) = 0.8262
		Probability of failure ( $P_f$ ) = 0.2043
Equivalent plastic strain	$g(\bullet) = 600 - (5632.71 + 4957.77x_1 - 2300x_2 + 6.64x_3 - 4411.99x_1^2 + 163.27x_2^2 - 8.88 \times 10^{-3}x_3^2)$	Reliability index ( $\beta$ ) = 2.8499
		Probability of failure ( $P_f$ ) = 0.002186
Equivalent plastic strain	$g(\bullet) = 0.8 - (-1.403 + 1.553x_1 - 0.662x_2 + 0.000717x_3 + 6.798x_1^2 + 0.0440x_2^2 + 4.50 \times 10^{-6}x_3^2)$	Reliability index ( $\beta$ ) = 0.4272
		Probability of failure ( $P_f$ ) = 0.3346
Equivalent plastic strain	$g(\bullet) = 0.4 - (-1.403 + 1.553x_1 - 0.662x_2 + 0.000717x_3 + 6.798x_1^2 + 0.0440x_2^2 + 4.50 \times 10^{-6}x_3^2)$	Reliability index ( $\beta$ ) = 0.08174
		Probability of failure ( $P_f$ ) = 0.4674
Relative dynamic modulus (RDM)	$g(\bullet) = 70 - (-265 - 90.91x_1 + 700.0x_2 - 0.167x_3 + 1.81 \times 10^{-5}x_1^2 - 277.78x_2^2 + 5.40 \times 10^{-12}x_3^2)$	Reliability index ( $\beta$ ) = 2.737
		Probability of failure ( $P_f$ ) = 0.031
Relative dynamic modulus (RDM)	$g(\bullet) = 80 - (-265 - 90.91x_1 + 700.0x_2 - 0.167x_3 + 1.81 \times 10^{-5}x_1^2 - 277.78x_2^2 + 5.40 \times 10^{-12}x_3^2)$	Reliability index ( $\beta$ ) = -2.35
		Probability of failure ( $P_f$ ) = 0.991

### 감사의 글

이 논문은 2006년 한국철도시설공단의 수탁과제 및 2006년 정부 (교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구 (KRF-2006-331-D00575)이며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 고경택, 김도겸, 김성욱, 조명석, 송영철, “동결융해와 염해의 복합작용을 받는 콘크리트의 내구성능 저하 평가”, 콘크리트학회논문집, 13권 4호, 2001, pp.397~405.
- 한천구, 신병철, 김기철, 이상태, “혼화재료가 공장제품용 시멘트 모르타르의 강도 및 동결융해 저항성에 미치는 영향”, 콘크리트학회논문집, 12권 3호, 2000, pp.11~19.
- Powers, T. C., “The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete”, *Proceeding of the Highway Research Board*, Vol.29, 1949, pp.15~23.
- Fagerlund, G., “Equations for Calculating the Mean Free Distance between Aggregate Particles or Air-Pores in Concrete”, *CBI Research 8:77*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1977, pp.22~30.
- 山下, 村上, “凍結融解を受けるコンクリートの劣化豫測に關する研究”, *コンクリート工學年次論文報告集*, Vol.14, No.1, 1992, pp.129~135.
- Mihashi, H. and Zhou, Z. Y., “Micro Mechanics Model to Predict Macroscopic Behavior of Concrete under Frost Action”, *RILEM Proceedings PRO24*, 1997, pp.235~241.
- Ueda, T., Hasan, M., Nagai, K., and Sato, Y., “Prediction of Structural Performance during Service Life from Microstructure”, *Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures*, 2004, pp.39~50.
- Cho, T. J., “A Numerical Model for the Freeze-Thaw Damages in Concrete Structures”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.17, No.5, 2005, pp.857~868.
- Setzer, M., “Modeling and Testing the Freeze-Thaw Attack by Micro-Ice-Lens Model and CDF/CIF Test”, *Micro-Structure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures*, 2004, pp.17~27.
- 김생빈, “고강도 콘크리트의 동결융해저항에 미치는 연행공기의 영향”, 콘크리트학회논문집, 4권 1호, 1992, pp.89~96.
- Philleo, R. E., “A Method for Analyzing Void Distribution in Air-Entrained Concrete”, *Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol.5, No.2, 1983, pp.128~130.
- Snyder, K. A. and Clifton, J. R., “Measures of Air Void Spacing”, in *Proceedings-International Conference on Building Materials*, Weimar, Germany, Vol.1, 1994, pp.155~158.
- Penttala, V., “Freezing-Induced Strains and Pressures in Wet Porous Materials and Especially in Concrete Mortars”, *Advanced Cement Based Materials*, Vol.7, Issue1, 1998, pp.8~19.
- Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T., *Modeling of Concrete Performance*, E&FN SPON, 1998, pp.35~51.
- Setzer M., “Micro-Ice-Lens Formation in Porous Solid”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 243, 2001, pp.39~50, 193~201.
- Shashank Bishnoi, *Strain Variations in Concrete Subjected to Cyclic Freezing and Thawing*, Thesis, University of Tokyo, 2004, pp.79~156.
- 박미연, 조태준, 조효남, “붕괴모드조합 예측과 응답면기법에 의한 PSC 사장교의 위험도 평가”, 대한토목학회 논문집, 26권 4A호, 2006, pp.645~657.
- Box, G. E. P. and Wilson, K. B., “On the Experimental Attainment of Optimum Conditions”, *Journal of Royal Statistical Society*, Series B13, 1951, pp.1~45.
- Rackwitz, R. and Fiessler, B., “Structural Reliability under Combined Random Load Sequences”, *Computers and Structures*, Vol.9, 1978, pp.489~494.
- 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준·해설, 한국콘크리트학회, 2003, pp.80~82.

---

**요 약** 다공성 시스템 내부 동결체의 생성과 성장은 온도경사와 화학적 에너지뿐만 아니라 열 물리학적 영향과 이동 물질에 의해서도 영향을 받는다. 더욱이 용해 화학물질의 확산율은 반복적인 동결용해 환경 하에서 매우 높은 값을 나타낸다. 결과적으로 콘크리트구조물의 열화는 해양환경과, 높은 고도 및 북쪽 지방에서 특히 크게 발생된다. 그러나 균열 성장과 누적된 손상에 의한 열화를 동반한 동결용해의 특성을 실험을 통해서 추정하기가 곤란하다. 이러한 손상을 예측하기 위해서 응답면기법 (RSM)을 이용한 회귀분석법을 사용하였다. 콘크리트구조물에서 반복되는 동결용해로 인한 열화의 주요 변수인 물-시멘트비, 연행공기, 동결용해의 반복 횟수 등은 응답면기법의 한계상태방정식을 구성하는데 중요한 입력 변수로 사용되었다. 누적변형률, 상대동탄성계수, 또는 등가 소성변형과 같은 주요한 열화 변수에 대한 회귀방정식은 열화된 구조물의 성능을 평가할 수 있다. 300번의 동결용해 반복 후의 상대동탄성계수와 잔류변형의 결과는 실험 결과와 매우 유사한 경향을 나타내었다. 응답면기법의 결과는 설계 시 한계값에 대한 초과 확률을 예측하는데 사용되어질 수 있다. 그러므로 개발된 예측 기법을 활용하여 반복적인 동결용해에 의해서 누적 손상을 받는 콘크리트구조물의 생애주기 관리에 사용될 수 있다.

**핵심용어** : 생애주기 관리, 반복적 동결용해, 확률적 예측, 손상