



## 실부재에 있어서의 팽창콘크리트의 수축거동 및 응력에측

최형길<sup>1)</sup> · 김규용<sup>2)\*</sup> · 노구치 타카후미<sup>3)</sup> · 하마 유키오<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>무로란공업대학 대학원 공학연구과 <sup>2)</sup>충남대학교 대학원 건축공학과 <sup>3)</sup>동경대학 대학원 공학계연구과

### Estimation of Shrinkage Behavior and Stress of Expansive Concrete on Buildings

Hyeong-Gil Choi,<sup>1)</sup> Gyu-Yong Kim,<sup>2)\*</sup> Takafumi Noguchi,<sup>3)</sup> and Yukio Hama<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology, Hokkaido, 050-8585, Japan

<sup>2)</sup>Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Rep. of Korea

<sup>3)</sup>Department of Architecture, The University of Tokyo, Tokyo, 113-8656, Japan

**ABSTRACT** In this study, Based on the constructed model in advance, we suggested the macro prediction method of shrinkage cracking reduction in concrete using expansive additives, and the method was verified. In addition, extended application of model to building, the strain of walls and slabs on building was estimated by model and the generated stress was estimated thereby comparing this with the result by existing method to verify the model's applicability and the validation of our model. From examination of theoretical model for concrete using expansive additives to examination for building levels, furthermore suggests the macro prediction method for shrinkage reduction and cracking control effects was can be supply practical data in application of expansive concrete and utility in the future.

**Keywords** : expansive additive, modeling, spring constant, cracking, shrinkage

## 1. 서 론

일반적으로 콘크리트는 재료, 시공, 환경 및 구조 등의 여러 가지 요인에 의해서 균열이 발생하기 쉬운 재료이다. 이러한 콘크리트의 균열을 방지하기 위해, 균열 발생 요인에 대한 기초적인 연구나 균열을 가능한 한 줄이기 위한 기술개발이 활발하게 행해지고 있다.<sup>1,2)</sup> 그 결과, 균열을 어느 정도 제어할 수 있는 체제가 갖추어지고 있지만, 실제 콘크리트 구조물에 있어서의 유해한 균열을 모두 제어하는데까지는 도달하지 않은 것이 현실이다. 이러한 상황에서 콘크리트의 수축저감 및 균열저항성을 높이기 위해 팽창재의 적용은 유효한 것으로 알려져 있어, 최근에는 건설현장에 있어서 그 적용실적이 점점 증가하고 있다.

본 저자는 수축 균열의 저감 대책으로서 팽창재를 적용한 콘크리트의 모델화에 관한 연구로서 “팽창콘크리트의 ① 압축강도 및 탄성계수,<sup>3)</sup> ② 체적변화,<sup>4)</sup> ③ 크리프<sup>5)</sup>”에

대한 모델을 구축하고 실험실 레벨로의 검증을 실시했다.

본 연구에서는 실구조물 레벨에 있어서의 팽창재 효과의 정량적인 평가와 더불어 선행하여 구축한 모델을 실부재에 적용하여, 실부재에 발생하는 변형을 예측하였다. 또한, 외벽 및 슬래브에 발생하는 응력을 예측하여, 팽창재에 의한 콘크리트의 수축저감 및 균열억제 효과를 평가하고, 모델의 타당성을 검증하였다.

## 2. 모델의 적용

### 2.1 팽창재를 혼입한 콘크리트의 수축저감 매크로 예측모델

팽창재를 혼입한 시멘트 경화체는 시멘트와 팽창재의 수화반응에 의해 생성된 수화물이 시멘트 경화체의 공극을 채워 팽창재 입자와 시멘트 입자, 혹은 시멘트 및 팽창재 입자 상호간의 치밀한 조직구조를 형성해 강도나 탄성계수를 발현한다. 압축강도의 발현은 각 입자간 결합의 정도나 입자간 구조형성과 관계가 크기 때문에 입자 상호간의 접촉면적에 착안한 컨셉을 이용해 모델화를 실시했다. 탄성계수는 응력을 전달하는 입자간의 공극구

\*Corresponding author E-mail : gyuyongkim@cnu.ac.kr

Received April 30, 2015, Revised August 7, 2015,

Accepted September 14, 2015

©2016 by Korea Concrete Institute

조를 고려해 수화 생성물이 치밀화 되는 상태를 유효반경계수에 의해서 표현하는 것으로 각각에 있어서 모델을 구성하였다.<sup>3)</sup> 체적변화 모델은 시멘트에 의한 수축현상과 팽창재에 의한 팽창현상의 균형에 의해서 결정되는 것으로, 시멘트와 팽창재의 균형법칙을 이용해 모델화 하였다. 시멘트의 수축현상은 모세관 장력에 의해서 수축을 일으킨다고 가정해 공극지름분포와 세공구조내의 수분상태의 열역학적 평형을 고려하여 세공구조내의 수분의 거동으로부터 모델화했다. 또한, 팽창재의 팽창현상은 유효반경계수의 개념을 이용해 재령초기에 생성되는 수화 생성물의 최외입자반경의 증가에 따른 팽창재 입자의 체적팽창을 고려해 모델화했다.<sup>4)</sup> 크리프 현상은 시멘트 및 팽창재의 수화생성물을 고정된 특성으로 가정해 시멘트 및 팽창재의 수화생성물의 크리프 성능을 고려하는 것으로 팽창재를 혼입한 시멘트 경화체의 크리프 현상을 모델화했다. 한편, 수화의 진행에 의해서 새롭게 생성되는 수화생성물의 응력의 재분배 현상과 시멘트 및 팽창재의 수화생성물의 균형을 고려해, 콘크리트 복합체 모델을 제안했다.<sup>5)</sup>

이상 선행해서 실시한 모델을 바탕으로 팽창재를 혼입한 콘크리트의 균열발생 매크로 예측 플로우를 Fig. 1에 나타낸다. 콘크리트에 발생하는 균열은 그림에 나타내는 것과 같이 여러 가지 요인이 서로 영향을 주어 그 경시변화의 결과로서 발생한다. 이러한 것으로부터 콘크리트에 발생하는 균열을 예측하기 위해서 재령의 진행에 수

반해 순서대로 변화하는 콘크리트의 특성을 정확하게 파악하고 평가한 다음 각각의 현상에 대한 상호관계를 고려한 예측수법이 필요하다. 한편, 콘크리트의 균열 발생 위험성을 평가하는 지표로서 동일 재령의 구속 인장응력에 대한 균열발생 강도비(균열발생 강도 / 구속인장 응력)를 들 수 있어, 그것은 여러 가지 실험 요인의 영향에 의해 광범위하게 적용되고 있다.<sup>6,7)</sup> 따라서, 여기에서는 선행하여 실시한 이론적인 모델<sup>3-5)</sup>을 적용해 팽창재를 혼입한 콘크리트의 초기물성 발현과 거기에 기초한 콘크리트의 구속인장 응력의 예측 및 예측한 응력과 콘크리트의 인장강도 혹은 균열 발생 강도의 대소 관계로부터 실구조물에 있어서의 팽창재에 의한 콘크리트의 수축저감 및 균열억제 효과에 대한 매크로 예측을 시도했다.

## 2.2 적용대상 실구조물의 개요

적용대상 실구조물은 지상 7층 건물의 RC조 건축물이며, 팽창콘크리트 및 보통콘크리트를 이용한 3층 외벽 및 4층 슬래브, 4층 외벽 및 5층 슬래브를 대상으로 했다. 1층에서 4층 슬래브까지는 팽창콘크리트를, 4층 외벽의 상부부터는 보통콘크리트를 적용했다.

측정부의 평면도를 Fig. 2에 나타낸다. 계측대상 외벽은 좌우에는 기둥이 없고 위·아래의 보에 의해 지지되고 있으며, 외벽 중앙부에는 유발줄눈이 설치되어 있다. 한편, 슬래브는 주변의 보에 의해 4변이 구속되고 있다. 매

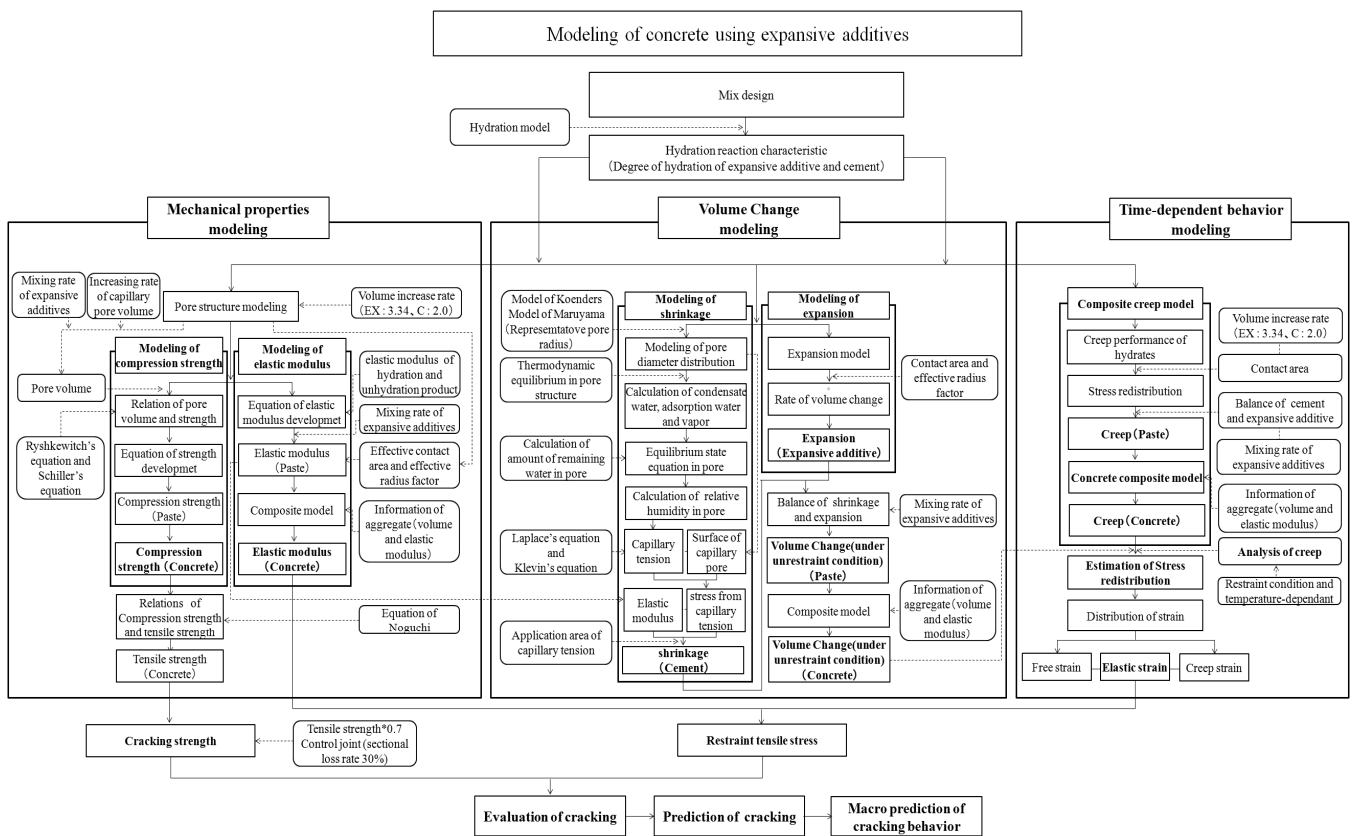


Fig. 1 Flow of macro prediction of cracking in concrete using expansive additives<sup>3)</sup>

### 3. 실험

입형 변위계에 의해 각 측정부의 변위 및 온도를 측정했으며, 더불어 실구조물에 이용한 동일한 콘크리트로부터 시료를 채취해 무구속 상태의 기준 폭로시험체를 제작해 팽창수축변위 및 온도를 계속했다.

더불어 기준 폭로시험체는 실구조물과 같은 시기에 탈형하여 외벽 및 슬래브와 같은 건조 상황을 모의하기 위해서 외벽의 경우는 양 측면 이외의 4면을, 슬래브의 경우는 표면 이외의 5면을 알루미늄 테이프로 봉합했다. 그 후 실부재와 동일기간 살수양생을 실시해 측정했다.

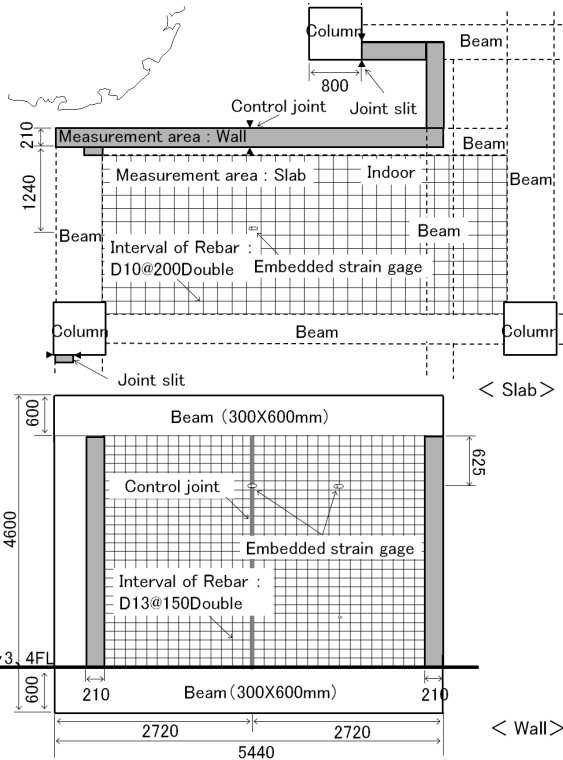


Fig. 2 Diagram of measurement area

Table 1 Materials Used

Type	
C	Ordinary portland cement, Density:3.16g/cm <sup>3</sup>
S	Pit sand, Density:2.60g/cm <sup>3</sup> , Absorption ratio:2.18%
	Limestone, Density:2.66g/cm <sup>3</sup> , Absorption ratio:1.06%
G	Limestone, Density:2.71g/cm <sup>3</sup> , Absorption ratio:0.55%
EXP	Ettringite-gypsum type, Density:3.05g/cm <sup>3</sup>

Table 2 Mix Designs

Type	f <sub>ck</sub>	W/B (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )					Ad (B×%)	
				W	C	EXP	S	G		
EX	39	41.5	48.0	170	390	20	533	293	921	1.15
N	36	45.5	49.5	170	374	0	556	309	910	1.15

※ EX:Expansive concrete, N:Normal concrete, EXP:Expansive additive, P:Pit sand, L:Limestone, Ad:Superplasticizer

#### 3.1 적용한 콘크리트의 기초물성

실구조물에의 적용에 앞서 레미콘 공장의 플랜트로 콘크리트를 타설해 콘크리트의 굳지않은 성상 및 압축강도를 평가했다. 사용재료는 Table 1에, 콘크리트 배합을 Table 2에 나타낸다. 콘크리트는 에트링가이트석회 복합계 저침가형 팽창재를 20 kg/m<sup>3</sup>를 혼합한 설계기준강도 39 MPa의 팽창콘크리트와 설계기준강도 36 MPa의 보통콘크리트였다. 잔골재는 산사 및 석회암 쇄사를 65:35의 비율로 혼합 적용했으며, 굵은골재는 전량 석회암 쇄석을, 화학혼화제는 고성능 AE감수제를 사용했다.

콘크리트의 굳지않은 성상 및 압축강도의 측정결과를 Table 3에 나타낸다. 각 특성 모두 요구 성능을 만족했다. 특히, 압축강도는 재령 7일의 시점에서 이미 목표 강도를 만족하는 것을 알 수 있었다.

#### 3.2 실구조물의 계측결과

Fig. 3에 무구속 상태 기준 폭로시험체의 자유팽창수축 변위(온도변위 제외)를 나타낸다. 더불어 콘크리트 선팽창 계수는 기존연구<sup>8)</sup>를 참고로 7.0×10<sup>-6</sup>/°C로 일정하게 했다. 재령 180일의 시점에서 팽창콘크리트의 경우, 팽창 피크시부터 외벽은 210×10<sup>-6</sup>, 슬래브는 255×10<sup>-6</sup>수축하고 있다. 한편, 보통콘크리트의 경우, 외벽은 275×10<sup>-6</sup>, 슬래브는 310×10<sup>-6</sup>수축하고 있어 측정 장소에 관계없이 팽창

Table 3 Fresh properties and compressive strength

Type	Fresh properties			Compressive strength	
	Slump (cm)	Air content (%)	Temperature (°C)	7 days (MPa)	28 days (MPa)
EX	22.0	5.2	31.5	42.0	53.9
N	22.5	4.4	30.5	36.7	51.3

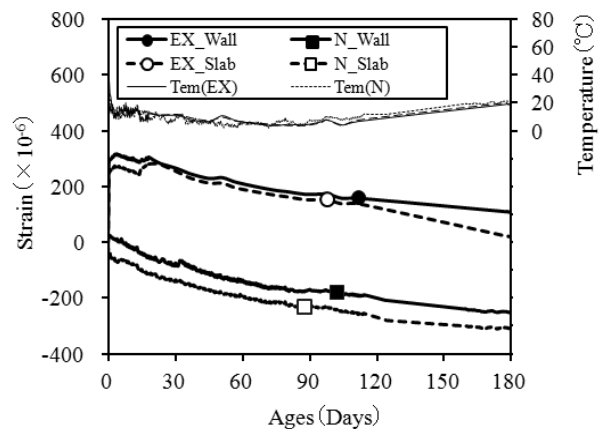


Fig. 3 Free expansion-contraction deformation

콘크리트에 비해 보통콘크리트가 보다 수축하고 있다고 판단된다. Fig. 4 및 Fig. 5에 외벽 및 슬래브의 실부재 변위(온도변위 제외)를 나타낸다. 실부재에 있어, 수화열에 의한 온도피크로부터의 온도강하는 외벽의 경우, 약 25~30°C, 슬래브의 경우에는 약 15~20°C로 외벽의 온도변화가 큰 경향을 확인할 수 있었다. 이것은 외벽의 경우, 양면의 거푸집 및 주위의 부재에 둘러싸여, 외부로의 수화열 손

실이 어렵고, 초기의 온도상승이 큰 것에 기인하고 있다고 판단된다. 실부재로의 팽창콘크리트의 최대 팽창변위는 외벽의 경우  $152 \times 10^{-6}$  (재령 2.08일), 슬래브의 경우  $217 \times 10^{-6}$  (재령 0.77일)이며, 한편, 보통콘크리트는 살수양생 이후에 명확하게 수축하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

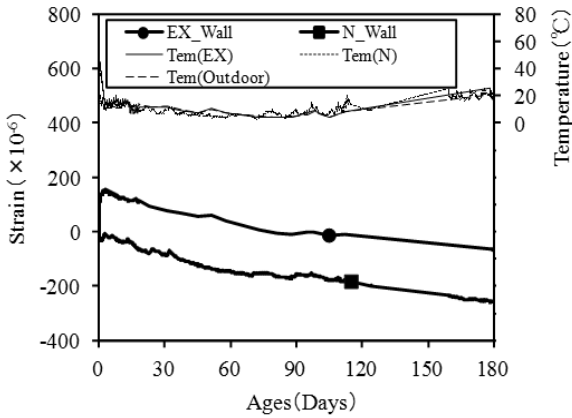


Fig. 4 Actual deformation of walls

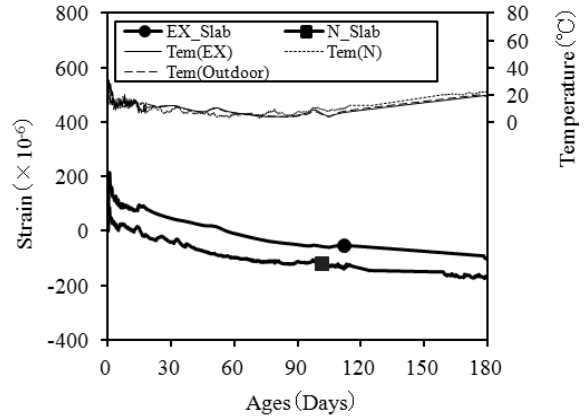


Fig. 5 Actual deformation of slabs

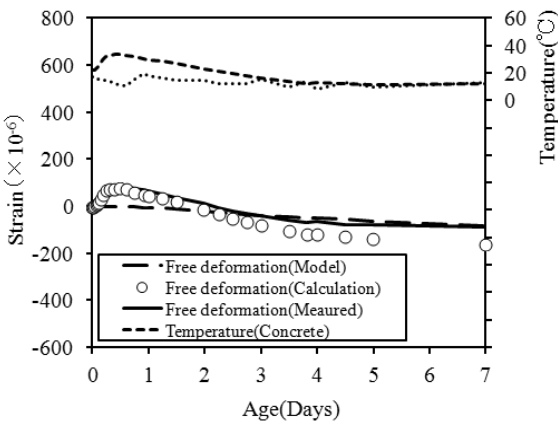


Fig. 6 Prediction of free expansion-contraction deformation in the walls (Normal concrete)

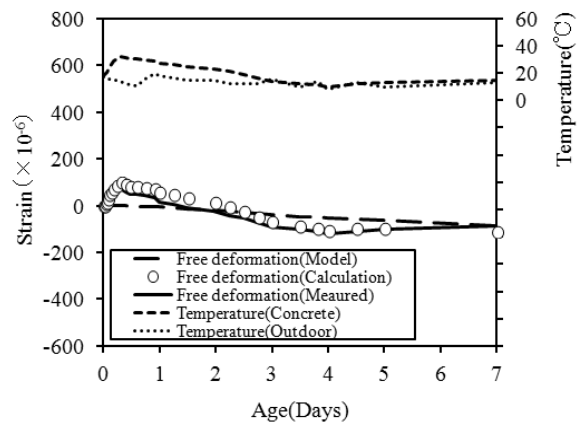


Fig. 7 Prediction of free expansion-contraction deformation in the slabs (Normal concrete)

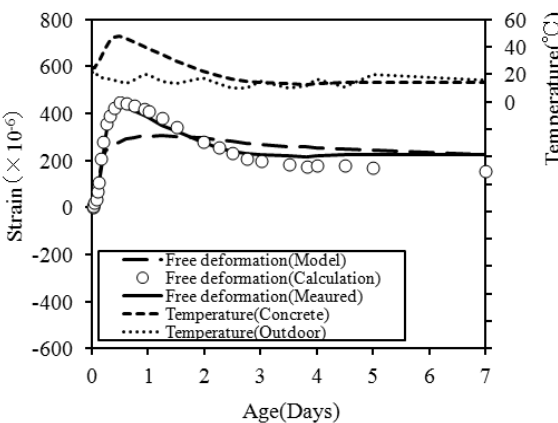


Fig. 8 Prediction of free expansion-contraction deformation in the walls (Expansive concrete)

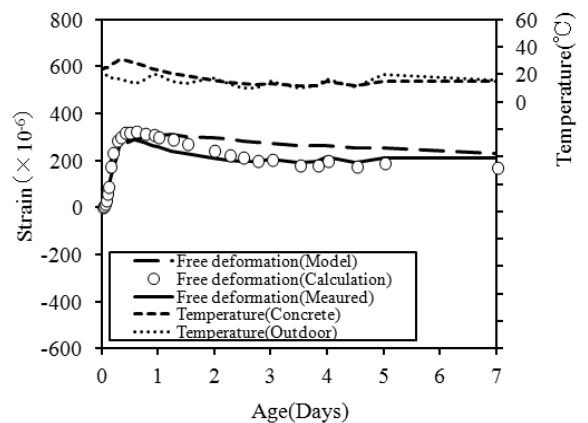


Fig. 9 Prediction of free expansion-contraction deformation in the slabs (Expansive concrete)

## 4. 모델에 의한 예측

### 4.1 자유팽창수축 변형의 예측

실구조물에 있어서의 무구속 상태의 자유팽창수축 변위를 예측했다. 변위는 거푸집 탈형 후 살수양생을 실시한 재령 7일까지의 초기재령에 있어서의 변위를 예측했다. 자유팽창수축 변위는 체적변화 모델<sup>4)</sup>로부터 요구한 자유팽창수축 변위에 실부재의 온도 이력을 고려하여 온도변위를 보정해서 요구했다. 한편, 자유팽창수축 변위의 실측치는 구조물에 적용한 콘크리트를 이용해 실구조물의 외벽 및 슬래브와 동일한 체적 표면적비(V/S)를 가지는 무구 속상태의 기준 폭로시험체로부터 계측한 값에 기준 폭로시험체와 실부재의 온도차를 고려해 보정했다. 계산에 있어서의 타임스텝은 재령초기 수화에 수반하는 팽창발생 및 온도 상승시에는 세세하게 설정하고 그 후에는 적당한 간격으로 분류했다. 한편, 콘크리트의 선팽창 계수는  $7.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 를 적용했다.<sup>8)</sup> Fig. 6, 7, 8, 9에 자유팽창수축 변위의 예측결과를 나타낸다. 체적변화 모델로부터 요구한 자유팽창수축 변위(Free deformation (Model))에 실구조물의 외벽 및 슬래브의 실부재 온도이력을 고려해 요구한 자유팽창수축 변위(Free deformation (Calculation))는 무구속 상태의 기준 폭로시험체의 실측치로부터 기준 폭로시험체와 실부재의 온도차를 고려해 요구한 자유팽창수축 변위(Free deformation (Measured))와 상당한 근사범위에서 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

### 4.2 실부재변형 및 유효팽창수축변형

실구조물의 콘크리트에 발생하는 변위의 개념도를 Fig. 10에 나타낸다. 통상의 콘크리트 구조물은 철근에 의한 내부구속과 주변부재의 강성에 의한 외부구속을 받는다. 실구조물에 있어서의 콘크리트의 변위거동을 예측하기 위해서는 이러한 구속조건을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 하지만, 실구조물에 있어서의 구속조건은 다양한 형태로서 작용하고 있기 때문에 그것을 정확하게 파악하는 것은 어려운 것이 현상이다. 여기에서는 실구조물에 있어서 내부철근에 의한 구속을 내부구속 용수철정수( $K_{r1}$ ), 외부 부재 강성에 의한 구속을 외부구속 용수

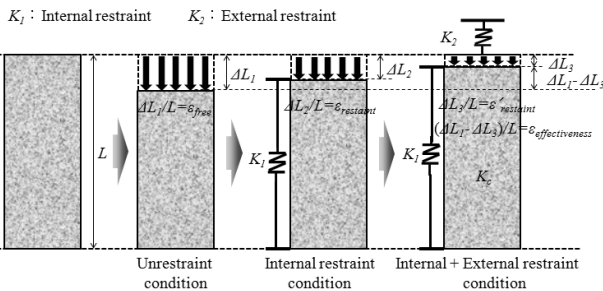


Fig. 10 Strain on Concrete by restraint conditions

철정수( $K_{r2}$ ), 경화하는 콘크리트의 강성변화를 콘크리트의 용수철정수( $K_c$ )로 가정해 실구조물에 발생하는 실부재 변위를 예측하기로 한다.

우선, 내부구속 용수철정수( $K_{r1}$ )에 의한 구속변위는 내부의 구속철근과 콘크리트의 힘의 균형 및 변형의 적합조건으로부터 차식으로 구할 수 있다.

$$E_c \cdot (\varepsilon_{free} - \varepsilon_{restraint}) = \frac{A_s}{A_c} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{restraint}$$

$$\varepsilon_{restraint} = \frac{E_c \cdot \varepsilon_{free}}{\frac{A_s}{A_c} \cdot E_s + E_c} \quad (1)$$

여기서,  $\varepsilon_{free}$ 는 무구속 상태의 자유팽창수축 변위,  $\varepsilon_{restraint}$ 는 내부구속 용수철정수( $K_{r1}$ )에 의한 내부구속 변위,  $A_c$ 는 콘크리트의 단면적,  $A_s$ 는 내부철근의 단면적,  $E_c$ 는 콘크리트의 탄성계수,  $E_s$ 는 철근의 탄성계수를 나타낸다.

한편, 실구조물에 발생하는 실부재 변위는 식 1에서 요구한 내부구속 변위에 더욱이 외부구속 용수철정수( $K_{r2}$ )를 고려하는 것으로, 힘의균형 및 변형의 적합조건을 이용하고 각각의 외부구속 용수철정수( $K_{r2}$ ) 및 콘크리트의 용수철정수( $K_c$ )는 부재의 단면적 및 구속체의 단면적을 고려해 차식으로부터 요구하기로 한다.

$$E_c \cdot (\varepsilon_{restraint} - \varepsilon'_{restraint}) \cdot A_c = K_{r2} \cdot \Delta L$$

$$K_{r2} = \frac{E_c \cdot (\varepsilon_{restraint} - \varepsilon'_{restraint}) \cdot A_c}{\Delta L} \quad (2)$$

$$E_c \cdot (\varepsilon_{free} - \varepsilon'_{restraint}) \cdot A_c = K_c \cdot \Delta L$$

$$K_c = \frac{E_c \cdot (\varepsilon_{free} - \varepsilon'_{restraint}) \cdot A_c}{\Delta L} \quad (3)$$

여기서,  $\varepsilon_{restraint}$ 는 내부구속 용수철정수( $K_{r1}$ )에 의한 내부구속 변위,  $\varepsilon'_{restraint}$ 는 내부구속 용수철정수( $K_{r1}$ ) 및 외부구속 용수철정수( $K_{r2}$ )에 의한 구속변위,  $A_c$ 는 부재의 단면적 및 구속체의 단면적,  $\Delta L$ 은 변위의 변화를 나타낸다.

한편, 구속을 받는 실구조물에 발생하는 실부재 변위는 식 (2) 및 식 (3)으로부터 요구한 각각의 용수철정수( $K_{r2}$ )와 ( $K_c$ )에 의한 용수철정수 비를 이용해 차식으로부터 요구한다.

$$\varepsilon'_{restraint} = \left(1 - \frac{K_c}{K_c + K_{r2}}\right) \cdot \varepsilon_{restraint} \quad (4)$$

Fig. 11 및 Fig. 12에 보통콘크리트, 팽창콘크리트의 외벽 및 슬래브에 있어서의 외부구속 강성의 변화 및 콘크리트 강성의 변화를 나타낸다. 재령에 의해서 콘크리트가 강성을 확보해 나가기 때문에 부재에 발생하는 외부

구속 강성은 재령이 지남에 따라 커지는 경향을 나타냈다. 한편, 용수철 정수 비는 외벽의 경우 0.6, 슬래브의 경우 0.8로 슬래브가 외벽과 비교해 큰 경향이였다. 이것은 슬래브의 경우 주변의 빔에 의해 4변이 구속되고 있지만, 외벽의 경우는 위아래의 빔에 의해 2변이 구속된 상태로 외벽의 경우 슬래브에 비해 주변의 구속체의 영향이 작은 것이 원인으로 생각할 수 있다.

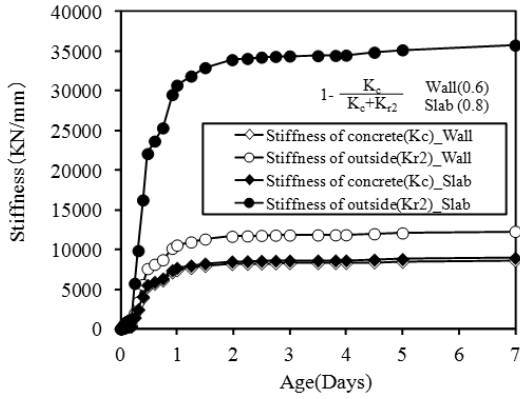


Fig. 11 Chnage of concrete stiffness and outside restraint stiffness (Normal concrete)

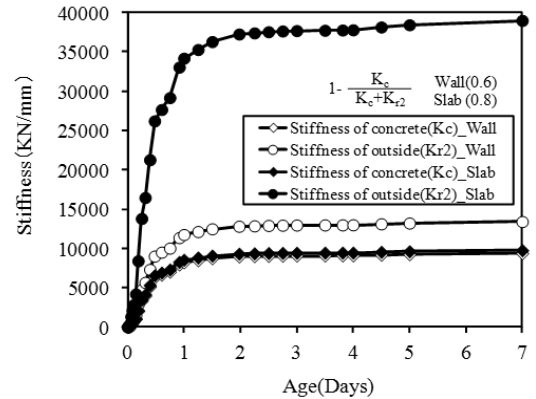


Fig. 12 Chnage of concrete stiffness and outside restraint stiffness (Expansive concrete)

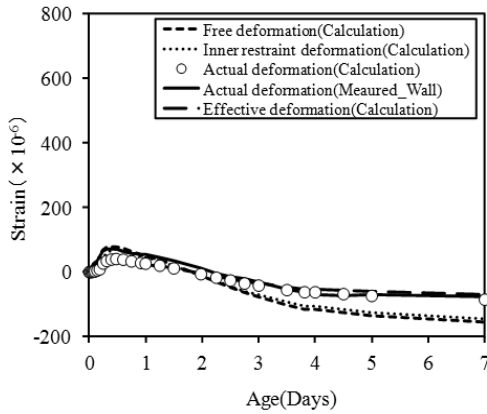


Fig. 13 Prediction of actual deformation in the walls (Normal concrete)

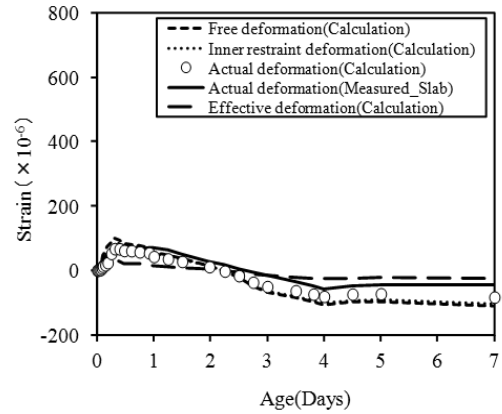


Fig. 14 Prediction of actual deformation in the slabs (Normal concrete)

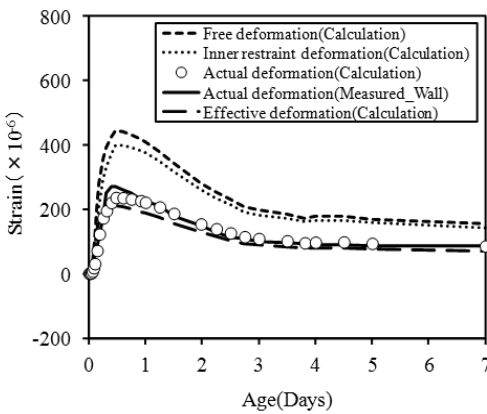


Fig. 15 Prediction of actual deformation in the walls (Expansive concrete)

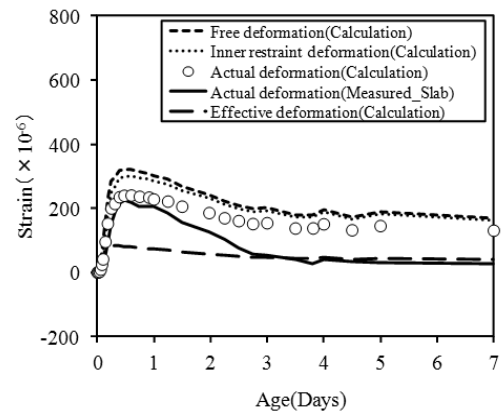


Fig. 16 Prediction of actual deformation in the slabs (Expansive concrete)

연구에서 대상으로 한 외벽 및 슬래브의 철근비는 각각 0.51%, 0.81%이며, 내부철근에 구속된 내부구속 변위(Inner restraint deformation (Calculation))에 더욱이 외부구속을 고려해 요구한 실부재 변위의 예측치(Actual deformation (Calculation))는 팽창콘크리트의 슬래브에서 약간의 차이를 보이지만, 대체로 실측치(Actual deformation (Measured))와 일치하고 있는 것을 알 수 있어, 각각의 용수철정수비를 이용해 실구조물의 구속조건을 고려한 실부재 변형의 예측이 가능하다고 판단된다.

한편, Fig. 13, 14, 15, 16에 더불어 나타내보인 유효팽창수축 변위(Effective deformation (Calculation))는 팽창 및 수축 등의 체적변화를 수반하는 콘크리트에 발생하는 변위 중에 응력의 작용에 의해서 생긴 변위이며, 4.1절로부터 예측한 자유팽창수축 변위로부터 내부구속 및 외부구속을 고려해 예측한 실부재 변위를 차감하는 것으로 요구하고, 이것은 4.3절에서의 응력계산에 이용하기로 한다.

### 4.3 발생응력의 예측

유효팽창수축 변위를 이용해, 실구조물의 외벽 및 슬래브에 있어서 발생하는 응력을 예측했다. 응력의 예측은 모델화한 크리프 현상을 구속상태로의 응력변화의 계산에 적용해 크리프 해석을 실시하는 것으로 요구했다.<sup>5)</sup> 즉, 크

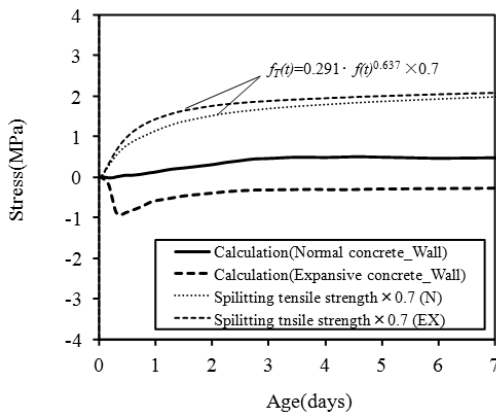


Fig. 17 Results of stress calculations (Walls)

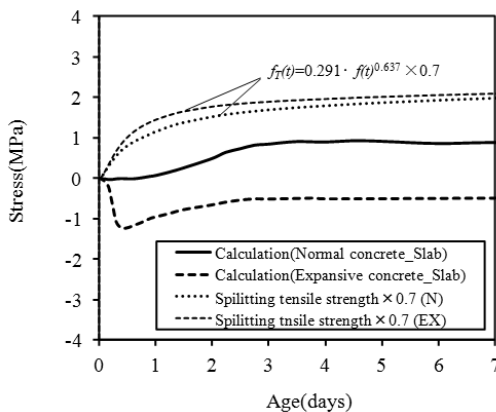


Fig. 18 Results of stress calculations (Slabs)

리프 변형은 응력 및 수화생성물의 체적량에 비례해 증첩의 법칙이 성립된다고 가정해, 순차법<sup>9)</sup>에 의해 각 시간마다 발생하는 응력의 증분량을 요구하여, 실부재에 발생하는 전응력을 계산했다. 한편, 온도 의존성은 크리프 모델에서 이미 고려되고 있어, 외벽 및 슬래브의 온도이력을 고려해 온도보정을 실시하여 실부재에 발생하는 응력을 계산했다.

각 측정 부분에서의 모델에 의한 응력의 예측 결과를 Fig. 17 및 Fig. 18에 나타낸다. 외벽 및 슬래브에 있고, 팽창콘크리트는 초기 팽창시에 0.95~1.10 MPa 정도의 압축응력이 도입되어 이후의 온도강하 및 건조의 진행에 의해서 압축응력은 저하되고 있지만, 처형 7일에 있어도 인장응력은 거의 발생되지 않은 것을 확인할 수 있다. 한편, 보통콘크리트의 경우는 수화에 의한 온도상승으로부터의 온도하강에 의해서 외벽에서 0.6 MPa, 슬래브에서 0.98 MPa 정도의 인장응력이 생기고 있어, 팽창재를 적용하는 것에 의해 인장응력은 저감되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 균열발생의 판정을 위한 균열발생 강도는 할렬인장 강도의 0.7배로 하여, 압축강도 및 탄성계수 모델<sup>3)</sup>로부터 요구한 압축강도 값을 이용해 Noguchi 등<sup>10)</sup>에 의해 제안되고 있는 차식을 이용해 요구했다.

$$f_{T(t)} = 0.291 \cdot f(t)^{0.637} \cdot 0.7 \quad (5)$$

여기서,  $f_{T(t)}$ 는 균열발생 강도(MPa),  $f(t)$ 는 압축강도(MPa)를 나타낸다.

Fig. 14 및 Fig. 15에는 식 5로부터 요구한 균열발생 기준이 되는 할렬인장 강도의 70%의 곡선  $f_{T(t)}$ 도 나타내고 있다. 전체적으로 본 연구에서 대상으로 한 외벽 및 슬래브의 경우, 할렬인장 강도의 70%의 지표를 밑돌고 있어, 균열 발생은 억제되고 있는 것으로 생각되어진다. 특히, 팽창콘크리트의 경우 보통콘크리트에 비해 발생하는 인장응력은 저감되어 있어, 균열발생 가능성은 낮다고 판단된다.

### 4.4 응력예측방법의 타당성 검토

구속 조건하에서 팽창콘크리트의 발생응력의 평가방법은 팽창재에 의한 팽창변위가 큰 초기재령에 있어, 겉보기 유효 영계수를 저감 하는 방법,<sup>11)</sup> 큰 폭으로 크리프 계수를 증대하는 방법,<sup>12)</sup> 혹은 팽창변위 그 자체를 저감 하는 방법<sup>13)</sup> 등이 제안되고 있다. 여기에서는 기존의 방법으로서 팽창변위가 큰 초기재령에서 있어, 크리프 계수, 혹은 유효 영계수를 크게 변화시키는 것은 초기재령의 온도응력을 평가하기에 불합리한 것으로부터 팽창변위를 저감하는 것은 구속 응력하에서 매크로 팽창작용에 의해 내부의 공극을 채우는 현상으로 생각할 수 있어, 구속조건하에서의 팽창콘크리트의 발생응력의 평가방법으로서 Hashida 등에 의해 제안된 구속압에 따른 자유팽창 변위

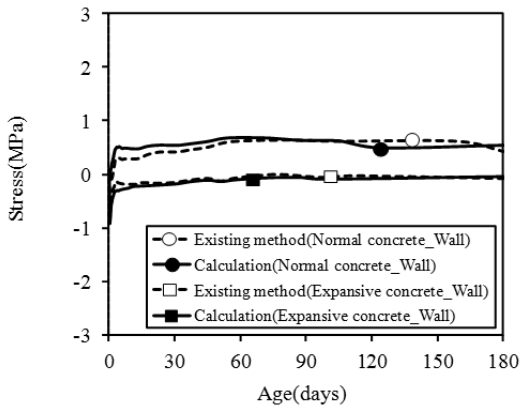


Fig. 19 Comparison of stress calculation results in the Walls

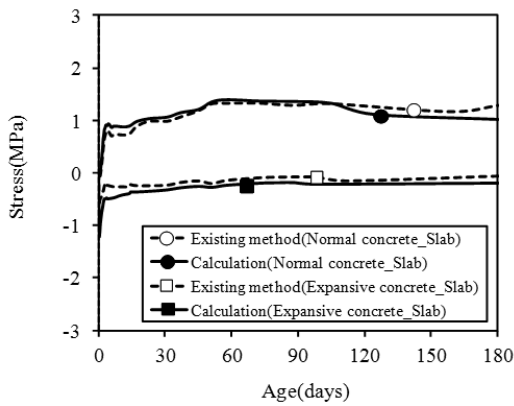


Fig. 20 Comparison of stress calculation results in the slabs

의 증분을 저감하는 방법<sup>13)</sup>을 채용하기로 한다. 따라서, Hashida 등에 의해 제안된 방법에 의해 실구조물의 외벽 및 슬래브에 발생하는 응력을 산정하는 한편, 이것과 본 연구의 모델로부터 예측한 응력결과 비교, 검토하는 것으로 본 연구의 응력예측방법의 타당성을 검증했다. 한편, 응력산정에 있어, 재령 7일 이후의 건조를 받은 자유 팽창수축 변위는 무구속 상태의 기준 폭로시험체의 실측치를 이용했다.

Hashida 등에 의해 제안된 기존의 방법 및 본 연구의 모델에 의한 응력의 예측 결과를 Fig. 19 및 Fig. 20에 나타낸다. 보통콘크리트 및 팽창콘크리트의 외벽 및 슬래브의 각 측정부에 있어, 본 연구의 모델에 의해서 예측한 응력은 기존의 방법에 따라 산정한 응력과 유사한 정도로 추이하고 있어 본 모델에 의한 응력예측방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

선행하여 구축한 팽창콘크리트의 각 모델을 적용해, 실부재에 있어서의 팽창콘크리트의 수축거동 및 응력을 예측하고, 예측 수법을 타당성을 검증했다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 선행하여 구축한 팽창재를 혼입한 콘크리트의 모델화(압축강도 및 탄성계수, 체적변화, 크리프)<sup>3,4,5)</sup>를 바탕으로 팽창재를 혼입한 콘크리트의 수축저감 매크로 예측 수법을 제안했다. 모델로부터 예측한 자유팽창수축 변위는 무구속 상태의 기준폭로시험체로부터의 실측치와 좋은 정도로 일치하는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 실구조물에 있어서의 구속조건을 각각의 용수철 정수로서 표현하고, 용수철 정수의 비를 이용해 구속 조건하의 실부재 변형을 예측한 결과, 팽창콘크리트의 슬래브에서 약간의 차이를 보이지만, 대체로 실측치와 일치하고 있는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 전체적으로 본 연구에서 대상으로 한 외벽 및 슬래브의 경우, 압축강도 모델을 바탕으로 요구한 할렬 인장 강도의 70%의 지표를 밑돌고 있어, 균열발생은 억제되고 있는 것으로 생각되어진다. 특히, 팽창콘크리트의 경우 보통콘크리트에 비해 발생하는 인장응력은 저감되어 있어, 균열발생 가능성은 낮다고 판단된다.
- 4) 크리프 해석에 의해 예측한 응력은 기존의 방법에 따라 산정한 응력과 유사한 정도로 추이하고 있어, 본 모델에 의한 응력예측방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

이상 본 연구로부터 실시한 팽창재를 혼입한 콘크리트에 대한 이론적인 모델의 검토로부터 팽창콘크리트의 실구조물 레벨로의 검토와 함께 수축저감 및 균열억제 효과에 대한 매크로 예측수법의 제안은 향후, 팽창콘크리트의 적용 및 실용화에 있어, 실증적인 데이터를 제공할 수 있다고 생각한다.

## References

1. Architectural Institute of Japan, "Recommendations for Practice of Crack Control in Reinforced Concrete Buildings (Design and Construction)", *AIJ*, 2006.
2. Japan Concrete Institute, "Research committee report on shrinkage of concrete", 2010.
3. Choi, H. G., "A Study on the Macro Prediction of Shrinkage-Reduction Behavior in Concrete using Expansive Additives", PhD thesis, 2013, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
4. Choi, H. G., Choi, H. S., and Lim, M. K., Noguchi, T., and Kitagaki, R., "Modeling of volume changes of concrete mixed with expansive additives", *Construction and Building Materials*, 2015, 75, pp.266-274.
5. Choi, H. G., Lim, M. K., Choi, H. S., Noguchi, T., and Kitagaki, R., "Modeling of creep of concrete mixed with expansive additives", *Magazine of Concrete Research*, 2015, Vol.67, No.7, pp.335-348.
6. Choi, H. G., Tsujino, M., Kitagaki, R., and Noguchi, T.,



- “Expansion-Contraction Behaviors and Cracking Control Effects of Expansion Concrete in Buildings”, *The 5th International Conference of Asian Concrete Federation*, 2012, ACF2012-0096, Session3-2.
7. Hayano, H., Maruyama, I., Noguchi, T., and Tochigi, T., “Evaluation of cracking potential of high-strength concrete induced by autogeneous shrinkage under the quasi-complete restraint condition”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2008, Vol.73, No.623, pp.19-26.
  8. Shiraishi, R., Nakayama, H., Takao, N., and Gotoh, T., “Effects of type of cement, admixture and aggregate on the thermal expansion coefficient of hardened cement pastes and concretes”, *Research paper of Mitsubishi Materials Corporation Cement Research Institute*, 2010, No.11, pp.33-40.
  9. Neville, A. M., Dilger, W. H., and Brooks, J. J., “Creep of plain and structural concrete”, *Construction Press, Longman*, 1983, pp.246-263.
  10. Noguchi, T., and Tomosawa, F., “Relationship between compressive strength and various mechanical properties of high strength concrete”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 1995, No.472, pp.11-16.
  11. Mitani, Y., Tanimura, M., Matsumoto, K., and Satake, S., “Evaluation Method of Restrained Stress of Expansive Concrete under Mass Curing Temperature Hysteresis and Its Verification : Part2 Modeling of Material Model”, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, 2006, pp.217-218.
  12. Momose, H., Kanda, T., Ishida, M., and Sakuramoto, F., “A study on resistance against cracking of concrete using expansive admixture and shrinkage reducing admixture”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2011, Vol.33, No.1, pp.557-562.
  13. Hashida, H., Kikuchi, T., Mochida, Y., and Hirai, Y., “Evaluation for strain behaviour and stress of reinforced concrete member with expansive concrete”, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 2011, Vol.33, No.1, pp.557-562.

**요 약** 수축 균열의 저감 대책으로서 팽창재를 적용한 콘크리트의 모델화에 관한 연구로서 선행하여 구축한 모델을 바탕으로 팽창재에 의한 콘크리트의 수축저감 및 균열억제 효과에 대한 매크로 예측 수법을 제안하고 타당성을 검증했다. 또한, 모델의 적용을 실무재로 확장해, 실무재에 발생하는 변형을 예측하는 한편, 실무재에 발생하는 응력을 예측하여, 기존의 방법에 따른 결과와 비교 검토함으로써 본 연구에서 제안하는 모델의 타당성을 검증했다. 본 연구로부터 실시한 팽창재를 혼입한 콘크리트에 대한 이론적인 모델의 검토로부터 팽창콘크리트의 실구조물 레벨로의 검토와 함께 수축저감 및 균열억제 효과에 대한 매크로 예측수법의 제안은 향후, 팽창콘크리트의 적용 및 실용화에 있어, 실증적인 데이터를 제공할 수 있다고 생각한다.

**핵심용어** : 팽창재, 모델화, 응수철 정수, 균열, 구속응력, 수축