

해사를 사용한 초기재령 콘크리트의 일축 구속 거동 해석

박상순^{1)*} · 송하원¹⁾ · 조호진¹⁾ · 변근주¹⁾

¹⁾연세대학교 토목공학과

(2001년 10월 26일 원고접수, 2002년 3월 5일 심사완료)

Analysis of Axial Restrained Behavior of Early-Age Concrete Using Sea-Sand

Sang-Soon Park^{1)*}, Ha-Won Song¹⁾, Ho-Jin Cho¹⁾, and Keun-Joo Byun¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749, Korea

(Received October 26, 2001, Accepted March 5, 2002)

ABSTRACT

In this paper, finite element analysis is applied for simulation of cracks due to restraining autogenous and drying shrinkage at early-age concrete. A micro-level heat hydration model and a shrinkage prediction model along with a moisture diffusion model are adopted for the finite element analysis. Then, an axial restraint test is carried out for concrete specimens containing different amounts of chloride ions to evaluate stress development and cracking due to the restraining shrinkages at early ages. Test results show that the increase of contents of chloride ions increases restrained stress, but does not increase strength. By this increase of shrinkage strain at early-age, time to occur the crack is accelerated. Finally, stress development and cracking of concrete specimens containing different amount of chloride ions are simulated using the finite element analysis. Results of the analysis using the proposed model are verified by comparison with test results.

Keywords: early-age concrete, sea sand, restrained stress, shrinkage, cracking

1. 서 론

일반적으로 콘크리트는 타설되고 경화해서 소정의 강도를 발휘하기까지 시멘트 수화반응에 의한 발열 및 수분발산에 의한 건조과정이 동시에 진행되며 이에 동반한 초기 변형 및 초기응력이 발생한다. 초기 재령 콘크리트에서의 건조수축의 구속은 때때로 콘크리트 구조물 표면부에 높은 인장응력을 야기시켜 균열을 초래하는데 이러한 균열은 구조물의 역학적 성능을 즉시 저하시키지는 않지만 환경조건에 따라서 콘크리트 내부로 유해한 물질이 침입하므로 장기적인 구조물의 내구성능에 큰 영향을 미친다. 초기재령 콘크리트에서의 균열은 콘크리트의 재령경과에 따른 온도와 수축의 시간적 변화, 변형의 구속도, 콘크리트의 탄성계수 및 크리프에 의해서 결정되는 구속응력이 콘크리트 인장강도에 도달하는지에 따라서 그 발생여부가 결정된다.

그러나 경화 콘크리트의 인장강도가 높다고 하더라도 그에 따른 탄성계수가 조기에 증대하면 구속응력은 초기 재령에서 급속하게 증가하고 크리프에 의한 완화 효과가

발휘되기 전에 인장강도를 상회할 가능성이 높다. 또한 초기재령에서의 급속한 콘크리트 물성변화로 인해 구속응력을 정확히 평가하는 것조차 간단하지 않은 것이 현실이다¹⁾.

한편, 근래에 건설물량의 증가에 따른 잔골재의 수급량 부족으로 해사의 사용이 증가되었고 콘크리트내에 해사를 사용하는 경우 염화물 이온(Cl⁻)의 존재에 따른 철근부식 등의 장기적인 내구성문제에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔으나 염화물의 존재에 따른 초기재령 콘크리트의 구속거동을 분석하는 연구는 매우 드문 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 고려하여 염분 함유량이 다른 콘크리트를 대상으로 수화발열, 건조수축, 압축강도 및 탄성계수 등의 콘크리트 물성 변화에 미치는 염분량의 영향을 실험적으로 규명하고 초기 재령에서 자기수축 및 건조수축의 구속에 의해서 발생하는 구속응력의 변화를 해석적으로 재현하고자 한다. 이를 위해 미시 역학적 관점에서 열역학적 평형관계를 토대로 시멘트 수화반응에 의한 온도변화를 시멘트 구성광물의 수화반응특성을 기초로 예측할 수 있는 복합수화발열 모델, 시멘트의 수화도에 기초한 세공구조 형성모델, 내부 공극압 구배에 의한 수분 확산으로 발생하는 수분 손실을 예측할 수 있는 수분이동 모델과 자기 및 건조수축 모델 등의 재료 모

* Corresponding author

Tel : 02-2123-2806 Fax : 02-364-5300

E-mail : parkss87@cmme.yonsei.ac.kr

델을 사용한다. 또한 일축 변형 구속을 받는 해사를 사용한 콘크리트 시험체를 대상으로 재료모델로부터 도출한 비구속 수축 변형률 및 강도를 초기 입력값으로 해서 수축이 구속된 조건 하에서 콘크리트 시험체의 균열 거동을 구명하며, 재료거동과 응력발현의 통합해석을 실시하여 부재내부에 도입된 건조수축 응력에 의한 균열의 발생 및 시간 의존적 변화를 해석적으로 재현하며 실험결과와 비교하여 해석기법의 타당성을 검증한다.

2. 실 험

2.1 실험방법

본 연구에서는 콘크리트의 염화물 첨가량을 주요한 실험변수로 해서 일축 변형 구속실험을 실시하였다. 실험장치는 JIS²⁾에서 제안한 콘크리트의 건조수축 균열 시험방법을 기초로 Fig. 1과 같이 구속판과 단판으로 구성되며 일반 강재로 제작하였다. 시험시편은 Table 1과 같이 염화물 첨가 비율을 시멘트 중량비 0, 0.07, 0.6, 1.2 %로 변화시킨 배합으로 제작하고 1일 기중양생 후 탈형하여 온도 25 °C, 상대습도 60 %인 항온항습실에서 양생하면서 균열 발생여부를 측정하였다. 균열 발생 여부는 육안으로 판단하고 시험체에 콘크리트 매립게이지를 매설하여 4시간 간격으로 시험체의 구속 변형률을 측정한다. 또한 동일한 배합으로 10×10×40 cm의 무구속 시편을 제작하여 동일한 양생조건에서의 자유 건조수축 변형률을 콘크리트 게이지를 통해 측정하였으며, 동일한 실험조건에서 10×10×10 cm의 정방형 시편을 제작해 0.01 g 단위로 측정 가능한 정밀 저울을 이용해서 1일 간격으로 중량변화를 측정하였다. 염분 함유량의 변화가 수화 발열 특성에 미치는 영향을 보기 위해 단일 온도 상승곡선과 발열 속도 곡선을 측정하였고, 재령 3일, 7일, 28일에서 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 시험을 실시해 재령에 따른 콘크리트의 강도 및 강성도 발현과정을 측정하였다.

2.2 실험결과

2.2.1 압축강도 및 탄성계수

15×30 cm의 원통형 콘크리트 시편으로 구한 압축강도

및 압축탄성계수를 Table 2에 나타내었다. 각 경우별로 3개씩의 시편에 대한 실험결과를 평균한 결과이며 실험결과와 콘크리트내 염분 함유량과 압축강도 및 탄성계수와는 별다른 상관 관계가 없는 것으로 판명되었다. 본 연구에서는 CEB-FIP(MC90)³⁾에서 정의하고 있는 압축강도 및 탄성계수 예측식을 응용하여 Fig. 2, 3에서와 같이 실험값과 가장 잘 일치하는 재령에 따른 압축강도 및 탄성계수 예측식을 도출하여 일축 변형 구속 해석시 사용하였다.

2.2.2 수화발열 특성

일반적으로 배합중에 존재하는 가용성 염화물은 용액의 pH를 저하시켜 수화반응을 촉진시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 현상이 모든 염화물에 공통적인 것은 아니며 염화물을 형성하는 양이온의 종류에 따라서 각기 다른 양상을 보이고, 동일한 염화물에서도 염화물의 농도에 따라서 일반적으로 시멘트의 수화반응에 미치는 영향이 각기 달라진다. 최근에 Brown 등⁴⁾은 동일한 몰농도를 가지는 여러 가지 염화물의 용액내에서 C₃S의 수화반응특성을 미소열량계와 수용액분석을 통하여 연구하였다. 수화반응속도의 증가를 야기하는 용액의 pH저하는 용액내에서 칼슘이온(Ca²⁺)의 농도증가로 인하여 Ca(OH)₂의 생성이 활발해 지면서 수산화이온(OH⁻)이 감소되기 때문이며, 수화반응의 가속시키는 수화초기 증가되는 칼슘이온의 농도

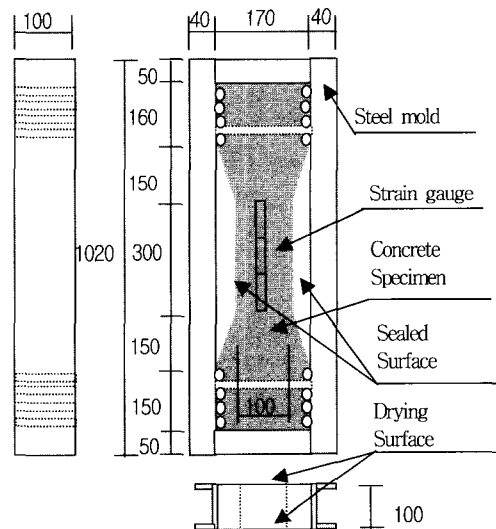


Fig. 1 Test equipment (unit:mm)

Table 1 Mixture proportions

No	W/C (%)	S/a (%)	Slump (cm)	Max. agg. size (mm)	Unit weight (kg/m ³)				Admixture (ml)		Chloride contents	
					W	C	S	G	AE	Water reducing	NaCl (kg)	% of cement wt.
1	44	44.5	10	25	179.0	406.9	787.8	982.9	17.3	1951.0	-	0.00
2	44	44.5	10	25	179.0	406.9	787.8	982.9	17.3	1951.0	0.285	0.07
3	44	44.5	10	25	179.0	406.9	787.8	982.9	17.3	1951.0	2.436	0.60
4	44	44.5	10	25	179.0	406.9	787.8	982.9	17.3	1951.0	4.872	1.20

Table 2 Compressive strength and elastic modulus

	Age (days)	Cl ⁻ content (% of cement wt.)			
		0.00	0.07	0.60	1.20
Compressive strength, $f_c'(t)$ (kgf/cm ²)	3	157	160	144	152
	7	208	217	212	216
	28	237	239	256	227
Elastic modulus, $E_c(t)$ (kgf/cm ²)	3	150,000	151,000	141,000	139,500
	7	165,500	174,000	170,000	163,500
	28	199,000	204,500	215,000	196,000

가 감소되기 시작하는 것과 동일한 시기에 발생됨을 보였다. 이 때, 염화나트륨의 경우는 이러한 칼슘이온의 농도 감소현상이 발생되지 않음을 수용액분석을 통하여 관찰하였고, 미소열량계의 시험에서도 염화나트륨용액에서의 시험결과는 순수한 물에서의 결과와 거의 동일함을 보고하였다. 본 연구에서는 해사에 존재하는 염분 중 80% 정도를 차지하는 염화나트륨이 콘크리트의 수화발열반응에 미치는 영향을 분석하기 위하여 염화나트륨 첨가량을 변화시킨 콘크리트 시편에 대한 단일온도상승시험을 실시하였다. Fig. 4와 5는 각각 단일온도상승곡선과 시간에 따

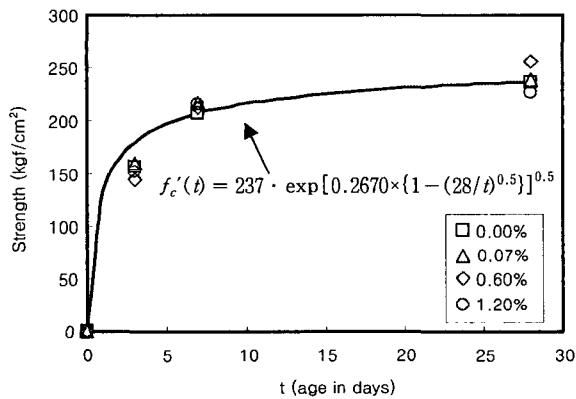


Fig. 2 Compressive strength development for different chloride ion contents

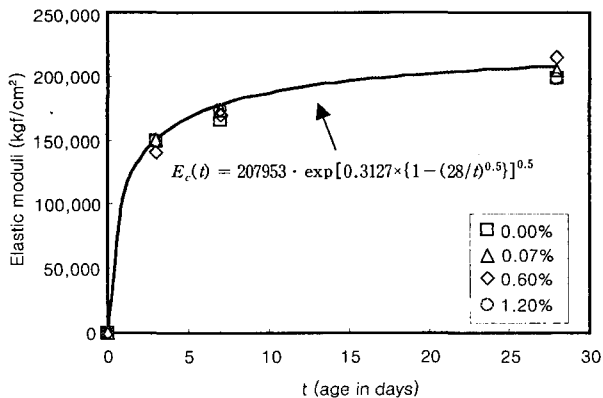


Fig. 3 Elastic modulus development for different chloride ion contents

른 발열속도의 변화를 도시한 것으로 염분 함유량의 증가가 수화발열특성에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

2.2.3 자유 건조수축률

Fig. 6에는 10×10×10 cm 시편으로 측정된 중량변화 경시 변화율을 나타내었으며, Fig. 7에는 배합시 염분 첨가량을 달리한 일축 변형구속 시험체와 동일한 조건에서 양생한 무구속 시편의 자유 건조수축률을 몰드에서 탈형후 콘크리트 게이지로 측정된 결과를 나타내었다. 실험결과 첨가된 염분량과 수분손실률은 별다른 상관관계가 없는 것으로 나타났으며, 무구속 시편의 자유 건조 수축률은 염분량이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다.

해사를 사용한 콘크리트의 경우 함유된 염화물 이온량에 따라 수축 변형률이 증가하였다. 이러한 현상에 대한 원인은 여러 가지 측면에서 유추할 수 있는데 염화물 이온량의 증가가 탈수량의 증가를 초래하지는 않으며, 수화반응을 뚜렷하게 촉진시키지 않는다는 실험결과를 통해 염화물 이온으로 인한 수분의 점성력 변화나 화학적 결합수량의 증가가 결정적인 이유는 아니라고 판단된다.

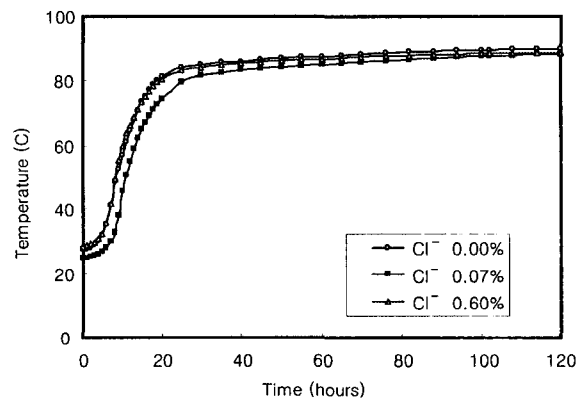


Fig. 4 Adiabatic temperature raise curves for different chloride ion contents

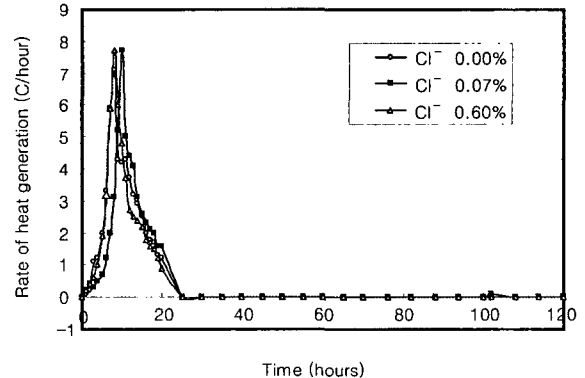


Fig. 5 Hydration heat generation rates for different chloride ion contents

그 외 기존의 연구결과에서는 염화물 이온이 공극구조의 특성을 변화시켜 보다 작은 공극경을 갖는 공극의 비율이 높은 것으로 보고되었다⁵⁾. 이는 염화물 이온이 콘크리트의 C₃S 성분과 결합하여 공극벽면에 고정화됨으로써 공극경의 평균 크기를 줄였기 때문인 것으로 평가된다. 즉, 공극내의 동일한 상대습도 조건에서 평형공극반경이 줄어들게 되면 수축거동을 야기하는 공극내의 모세관 장력이 증가하며 이것이 수축량의 증가를 초래한다고 판단된다. 그러나 명확한 원인을 밝혀내기 위해서는 향후 보다 많은 연구가 요구된다.

2.2.4 구속시험체의 변형률과 구속률

본 연구에서는 구속시험체의 구속률을 무구속 시편의 자유건조수축 변형률과 구속시험체의 변형률의 차로 정의한다. 구속시험체 표면에 부착된 3지점의 콘크리트 게이지로 측정된 구속시험체 변형률 평균값의 경시 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 측정곡선의 개시점은 콘크리트 시편의 탈형시이고 중점은 시편에 균열이 발생하여 구속이 해방한 시점이다. 실제 탈형개시전에 이미 수화열 및 자기수축에 의한 변형이 발생하지만 이러한 변형률을 정확하게 측정하기 쉽지 않고, 타설 후 탈형완료까지의 기간이 짧아 그 영향이 크지 않기 때문에 이를 무시하여, 본 실험에서는 탈형이 완료된 이후부터 변형률을 측정하였다.

2.2.5 콘크리트 구속응력의 경시 변화 및 균열 평가

콘크리트 구속응력의 경시적 변화량은 탈형직후부터 측정된 무구속 시험체의 자유 수축 변형률과 세 지점의 구속시험체 표면에서 측정된 변형률의 차로 정의한 구속률을 기초로 식(1)과 같이 구하였다.

$$\sigma(t) = E_c(t) \cdot \epsilon_{ef}(t) \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_{ef}(t)$ 는 콘크리트 구속시험체의 구속률로서 무구속 시편의 건조수축과 구속시험체의 측정 변형률의 차이이며, $E_c(t)$ 는 콘크리트의 인장 탄성계수로서 압축 탄성계수와 동일하다고 가정한다. 식(1)을 통해 구한 염분량에 따른 콘크리트의 응력 경시변화는 Fig. 9와 같다. 균열은 재령에 따라 증가하는 구속응력이 콘크리트의 인장 강도에 도달할 시에 발생하는데 시험체에 균열이 발생한 시기는 염분량이 0%인 콘크리트에서는 재령 19일이었으며, 염분량이 0.07%인 경우는 재령 10일, 0.6%인 경우에는 재령 9일, 1.2%인 경우는 재령 7일로서 염분 함유량의 증가에 따라 발생시점이 앞당겨지는 것을 알 수 있다. 이는 염분량의 증가가 콘크리트 시편의 건조 수축량을 증가시켜 동일재령에서 구속응력을 증가시키는 역할을 하지만 강도발현에는 별다른 영향을 미치지 못하기 때문이다.

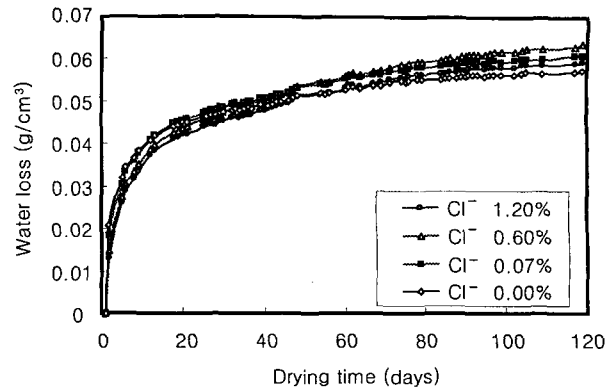


Fig. 6 Water loss for different chloride ion contents

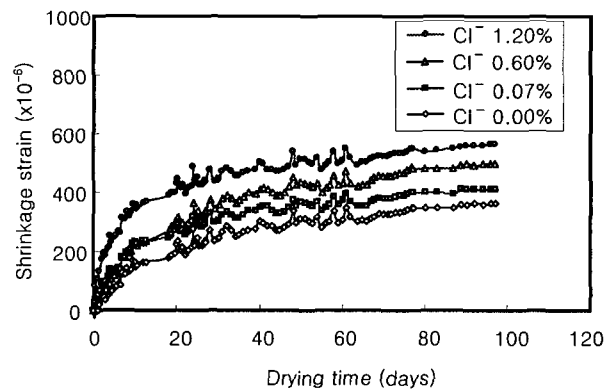


Fig. 7 Shrinkage strain for different chloride ion contents

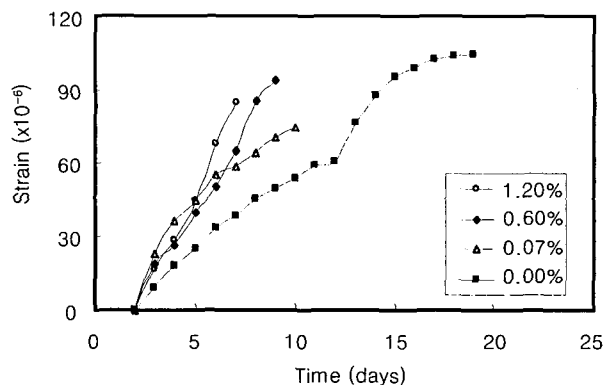


Fig. 8 Shrinkage strain development of restrained specimen for different chloride ion contents

3. 수치해석 모델

콘크리트 부재의 자유수축이 구속됨으로써 초기재령에서부터 발생하는 구속응력의 경시변화 및 건조수축 균열 발생시기를 예측하기 위해서는 콘크리트 중의 수분이동 및 수화발열 등 초기재령 콘크리트의 거동 특성을 합리적으로 표현한 수치해석 모델이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 10에서 나타낸 바와 같이 일축 구속된 해사를 사용

한 초기재령 콘크리트의 거동을 열전도 및 수분확산을 포함한 재료 거동과 구조 및 역학적 거동으로 대별한다. 수화발열, 세공구조 형성, 수분이동, 자유수축 등의 재료거동은 기존의 열역학 연성 해석프로그램 DuCOM[®]에 기초하여 연분효과를 고려하도록 수정하였고, 이러한 수정 DuCOM에 역학적 거동을 나타내는 응력해석 모델을 연결시킨 통합해석 시스템을 구축하였다. 이러한 통합해석 시스템을 통한 해석결과를 실험결과와 비교함으로써 해석 시스템의 타당성을 검증하였다.

3.1 열전도 거동특성 모델

초기재령 콘크리트의 열전도 거동은 여러 가지 인자의 영향을 받는다. 대표적인 영향인자로써는 콘크리트의 수화발열 특성과 더불어 내부에서 열의 이동을 지배하는 열전도율, 표면에서 열의 방출정도를 결정짓는 대류계수, 콘크리트의 열적용량을 결정하는 비열 그리고 열발생량에 따른 변형정도를 나타내는 열팽창률 등이 있다. 이러한 영향인자 중 가장 지배적인 인자는 콘크리트 자체의 수화발열 특성을 나타내는 수화발열속도이다. 콘크리트의 수화발열 특성은 수화반응의 온도의존성으로 인하여 초기배합온도 및 외기온도 조건의 영향을 받으며, 동일 조건으로 타설된 구조물 내에서도 위치별 온도이력의 차이로 인하여 각각 다른 발열특성을 나타낸다. 또한 시멘트는 다양한 크기의 여러가지 광물질로 구성된 복합체이므로 시멘트종류 및 분말도에 따라서 발열특성이 영향을 받고, 그 외 콘크리트 배합비, 혼화재료의 첨가 등에도 발열특성은 영향을 받으므로 이들 조건의 변화를 복합적으로 고려할 수 있는 수화발열모델의 수립이 필요하다. 더구나 수화발열특성은 구조물의 열전도 거동의 해석뿐 아니라 초기재령 콘크리트의 대부분의 특성에 영향을 미치는 수화도의 산출에 사용되므로 정확한 수화발열모델을 수립하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 이상의 영향인자들을 고려할 수 있도록 식(2)~(5)와 같이 Kishi와 Maekawa⁹⁾가 제안한 수화발열 모델을 사용하였고, 단일온도 상승시험결과 염분량이 수화발열 특성에 미치는 별다른 영향이 없으므로 염분량에 따른 변화는 고려하지 않았다. 다른 영향인자들은 기존의 시방서 등에서 제시한 값을 사용하여 열전도 거동특성을 모델링 하였다.

$$\overline{H}_i = \beta_i \gamma \mu s_i \overline{H}_{i, T_0}(\overline{Q}_i) \exp\left\{-\frac{E_i(\overline{Q}_i)}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right\} \quad (2)$$

$$\overline{Q}_i = \int \overline{H}_i dt \quad (3)$$

$$Q_c = \sum b_i \cdot \overline{Q}_i \quad (4)$$

$$Q = C \cdot Q_c \quad (5)$$

여기서, \overline{H}_i 는 열발생률이며, $\overline{H}_{i, T_0}(\overline{Q}_i)$ 와 $E_i(\overline{Q}_i)$ 는 각각 구성광물의 누적발열량 \overline{Q}_i 에 따른 기준열발생률(기준온도 $T_0=20^\circ\text{C}$)과 활성화에너지를 나타내는 재료상수이다. T 는 온도, β_i 는 가용수량의 감소 및 수화생성물의 침전에 의한 반응감소효과를 고려하고 있으며, γ 는 플라이애쉬와 유기혼화제의 첨가로 인하여 초기 반응지연효과를 고려하기 위한 계수이다. μ 는 보통포틀랜드시멘트의 광물조성의 변화를 고려하기 위한 계수이며, s_i 는 분말도 변화에 따른 열발생률의 차이를 고려하는 계수이다. b_i 는 각 구성광물의 전체에 대한 중량비, C 는 배합

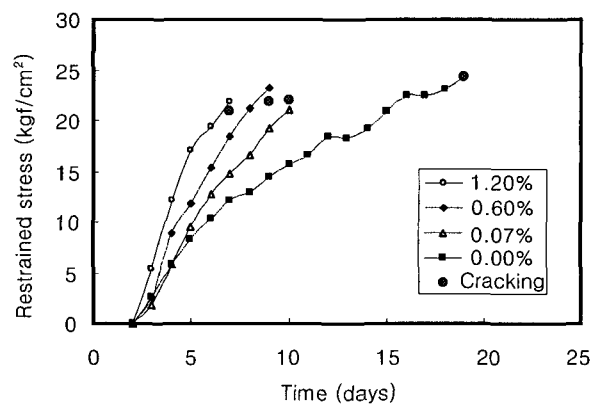


Fig. 9 Restrainted stress development for different chloride ion contents

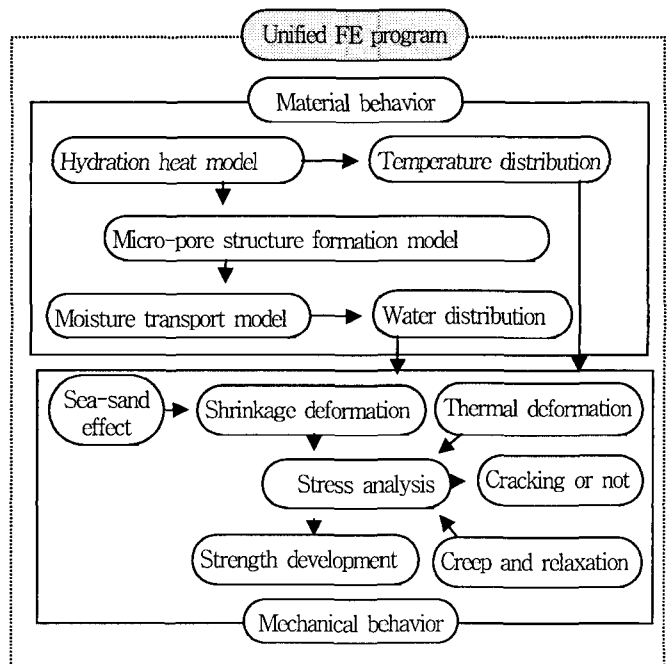


Fig. 10 Schematic view of unified FE analysis

에 사용된 단위시멘트량이다.

3.2 세공구조 형성특성 모델

초기재령 콘크리트에서의 세공구조 형성특성은 수분확산거동에서 가장 중요한 확산계수의 산출을 지배하는 특성이며, 역학적 거동에서 지배적인 탄성계수 및 강도의 산정에도 중요한 변수로 사용된다. 콘크리트내의 세공구조는 시멘트의 수화에 따라 진행되며 물-시멘트비, 시멘트의 종류, 비표면적, 혼화제의 첨가여부 등에 영향을 받으므로 이들 영향을 고려하여 세공구조를 나타낼 수 있는 해석적 모델의 수립이 필요하다. 본 연구에서는 수화도에 기초한 세공구조형성 모델⁶⁾을 이용하였고, 수화발열모델로부터 구한 평균 수화도와 화학적 결합수량에 기초하여 식(6)과 같은 공극분포함수로 나타낼 수 있으며 해사를 사용하여 염분이 함유된 경우에도 수화 발열 특성에 변화가 없으므로 동일한 모델식을 사용한다.

$$\phi(r) = \phi_{lr} + \phi_{gl}\{1 - \exp(-B_{gl}r)\} + \phi_{cp}\{1 - \exp(-B_{cp}r)\} \quad (6)$$

여기서, r 는 공극반경을 나타내고, ϕ_{lr} , ϕ_{gl} , ϕ_{cp} 는 각각 충전공극률, 겔공극률, 그리고 모세관공극률을 나타낸다. B_{cp} , B_{gl} 는 각각 모세관공극과 겔공극의 공극분포계수로서 각 공극의 단위체적에 대한 표면적을 구함으로써 얻을 수 있다.

3.3 수분 이동 모델

콘크리트의 세공 내에 존재하는 수분은 흡착수, 응축수 및 충전수로 분류하며 세공내의 수분이동현상은 간극 압력 및 온도구배를 구동력으로 하는 수분 확산 및 발산 등의 열역학적 과정에 기초한다⁷⁾. 낮은 상대습도에서의 수분이동은 주로 수증기의 확산을 통해 발생하며 높은 상대습도에서는 모세관 현상이 주요한 수분이동기구로 작용한다. 흡착 및 응축의 형태로 세공 내에 존재하는 수분량은 열역학적 평형을 기초로 세공분포곡선 및 세공벽면의 흡착수를 표현하는 수정 B.E.T.식을 이용해서 구한 세공의 포화도 총합으로 구한다. 또한 C-S-H 겔의 단단한 고체 벽면에 구속된 충전수는 통상 압력구배하에서는 용이하게 제거되지 않는 수분으로 별도 고려한다. 건조, 습윤의 경로에 의해서 함수량이 다른 이력거동은 세공의 기하학적 구조를 고려해서 표현하는 모델을 이용한다. 염화물이 콘크리트내 수분이동에 미치는 영향은 Fig. 6의 염분량에 따른 콘크리트 시편의 중량 경시 변화비를 통해 알 수 있듯 크지 않기 때문에 고려하지 않으며 수화에 의한 수분소비량을 포함해서 콘크리트 전체의 수분에 관한

질량보존식⁸⁾은 식(7)로 나타낸다.

$$\rho_l \left(\sum \phi_i \frac{\partial S_i}{\partial P} \right) - \text{div}(K(P, T) \nabla P) + \rho_l \sum S_i \frac{\partial \phi_i}{\partial t} - W_p \frac{\partial \beta}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

여기서, ϕ_i 는 모세관, 겔, 충전공극 각각의 공극률, S_i 는 모세관, 겔, 충전공극 각각의 포화도, P 는 액상수의 평형압력[Pa], ρ_l 은 공극중에 존재하는 액상수의 밀도 [kg/m^3]이며, K 는 액상수 이동계수 [$\text{kg/Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}$]이다.

3.4 미시적 기구에 기초한 자기 및 건조수축 모델

외부환경과 시멘트 경화체 공극내 상대습도차에 의한 건조뿐만 아니라 외기와 수분교환이 없는 상태에서도 수화반응으로 인한 자유수의 소비로 인해 공극내 상대습도는 저하된다. 공극내 국소적인 평형에 관해서 고려해 보면 기액계면이 평면인 경우 기상중의 수증기 분압은 포화수증기압과 같지만, 시멘트 페이스트의 모세관공극 또는 겔공극과 같은 벽간거리가 작은 공간에서는 Fig. 11과 같이 기액계면은 곡면이 되고 곡률에 의해서 평형증기압이 변화하게 된다. 계면이 구상의 일부와 같은 원구형 모관인 경우 이 관계는 Kelvin의 식에 의해서 식(8)과 같이 나타낸다.

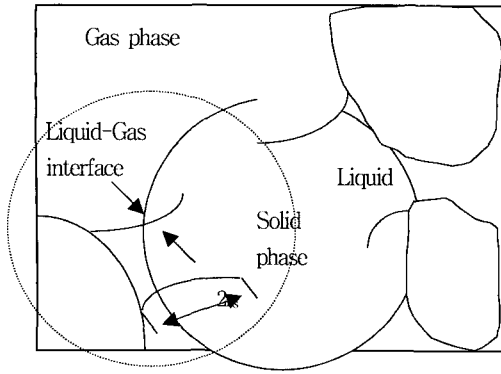
$$\ln \frac{P_v}{P_{v_0}} = - \frac{2\gamma M_w}{RT \rho_l r_s} \quad (8)$$

여기서, P_v 는 수증기 분압[Pa], P_{v_0} 는 포화수증기압[Pa], γ 는 액체의 표면장력[N/m], M_w 는 물의 분자량 [kg/mol], R 은 기체정수 [$\text{J/mol} \cdot \text{K}$], T 는 절대온도[K], ρ_l 은 액상수의 밀도 [kg/m^3], r_s 는 기액계면에 형성된 모세관의 반경[m]이다.

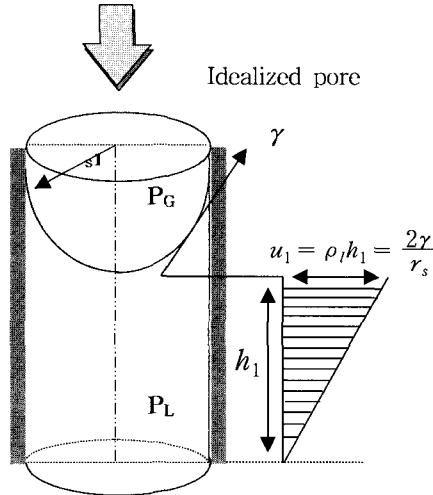
이 때 표면장력 γ 의 작용으로 액상과 기상의 압력은 같아진다. 이 압력차 ΔP 는 식(9)와 같은 Laplace의 식으로 표현된다고 가정한다.

$$\Delta P = P_G - P_L = \frac{2\gamma}{r_s} = - \frac{\rho_l RT}{M_w} \ln \frac{P_v}{P_{v_0}} \quad (9)$$

여기서, P_G 는 기상의 압력[Pa], P_L 은 액상의 압력[Pa]이다. 각각의 압력은 열역학에 기초한 수분이동 모델을 통해 산출된다. 세공중의 액상수의 압력은 기상의 압력과 비교해서 낮기 때문에 액상수에 접한 세공벽은 액상수로 인해 인장응력을 받게 된다. 이러한 인장응력에 의



(a) Vapour and liquid water in pores



(b) Tensile stresses in capillary water

Fig. 11 Idealized structure of pores

한 개개의 미세조직의 수축을 거시적으로 자기 및 건조수축 거동을 일으키는 주된 기구로 이해할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 모세관에 기인한 응력을 기상과 액상의 압력차 ΔP 와 모세관 장력의 작용면적 A_s 의 곱으로 식(10)과 같이 정의한다.

$$\sigma_s = -A_s \frac{\rho_l RT}{M_w} \ln \frac{P_v}{P_{v_0}} \quad (10)$$

여기서 σ_s 는 모세관장력에 기인한 응력[Pa], A_s 는 모세관장력의 작용면적을 표현한 계수로서 본 연구에서는 수분이동 모델에서 구한 콘크리트 단위체적중에 존재하는 액상수의 체적[m³/m³]으로 나타낸다. 이러한 모세관장력에 기인한 시멘트페이스트 조직의 미소변형을 기술하는 응력-변형률 관계는 비선형성일 것으로 예측되지만 미시적 레벨의 C-S-H 다공체의 비선형 변형성에 관해서는 아직 밝혀지지 않은 부분이 많으므로 본 연구에서는 단순하게 선형으로 가정한다. 해사를 사용한 콘크리트의 경우 함유된 염분량에 따라 수축 변형률이 증가하였는데 이는 염화물 이온이 콘크리트의 C₃S 성분과 결합하여 공극벽면에

고정화됨으로써 공극경의 평균 크기를 줄였기 때문인 것으로 평가된다. 즉, 공극내의 동일한 상대습도 조건에서 평형공극반경 r_s 가 줄어들게 되면, 식(9)와 식(10)의 구조상 공극내의 모세관 장력 σ_s 는 증가시킨다고 판단된다. 그러나 아직 명확하지 않은 부분이 많으므로 본 연구에서는 실험결과를 해석 모델에 반영하기 위해 경험적인 방법을 사용하였다. 즉, 모세관 장력에 기초한 식(10)에서 염분함유량에 따른 변화를 반영할 수 있는 실험상수를 도입해서 식(11)과 같이 효과적으로 건조수축 증가현상을 표현할 수 있다⁶⁾.

$$\epsilon_{sh} = \frac{\sigma_s}{E_s} (1 + 0.6C_{cl}^{0.4}) \quad (11)$$

여기서 ϵ_{sh} 는 수축변형률, E_s 는 모세관장력에 기인한 응력 σ_s 에 대한 변형계수[Pa]로서 많은 해석결과를 통해 경험적으로 탄성계수의 40% 값으로 가정하며, C_{cl} 는 염화물의 시멘트 중량비[%]이다.

3.5 콘크리트 구조체의 응력해석

일축 구속을 받는 콘크리트의 수축 및 크리프 변형률을 포함한 체적변형률 ϵ_v 와 편차변형률 ϵ_{ij} 의 구성방정식은 평균응력 σ_v , 편차응력 s_{ij} 라 할때 식(12)로 가정한다.

$$\begin{aligned} \epsilon_v &= \frac{1}{3K} \int (1 + \phi) d\sigma_v + \epsilon_t + \epsilon_{sh} - \epsilon_{st} \\ \epsilon_{ij} &= \frac{1}{2G} \int (1 + \phi) ds_{ij} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, K 는 체적탄성계수, G 는 전단탄성계수, ϕ 는 크리프 계수, ϵ_t 는 온도 변형률이며 ϵ_{sh} 는 건조수축 변형률이고 ϵ_{st} 는 구속강재의 변형률이다. 해석대상 구조물의 각 부위 및 각 시간에서의 수축변형률은 자기 및 건조수축 모델로부터 구하며, 구속강재의 변형률은 JIS기준안²⁰⁾에 따라 자유 변형률의 40%로 가정한다. 따라서 이러한 식을 통해 자기수축응력 및 건조수축응력과 그에 따른 크리프 등 여러 가지 응력과 복합효과가 모두 고려된다. 식(12)를 응력 $\{\sigma\}$ 에 관해서 풀고 행렬로 나타내면 식(13)과 같은 기초방정식으로 표현된다.

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} - \left\{ \int \phi d\sigma \right\} - [D]\{\epsilon_t + \epsilon_{sh} - \epsilon_{st}\} \quad (13)$$

여기서, $[D]$ 는 강성도 행렬이다. D 행렬 작성시에 이용한 콘크리트의 탄성계수는 균열이전에서는 수화도에

따라 계산된 각 적분점에서의 탄성계수를 이용한다. 또한 발생하는 인장응력에 의한 균열판정의 기준은 각 적분점에 발생한 인장 주응력이 각 적분점의 인장강도에 도달하는 시점으로 한다. 식(12)의 선형크리프 함수는 CEB-FIP(MC90)³⁾의 크리프 모델을 적용한다. 여기서의 크리프 함수 ϕ 는 식(14)와 같이 정의된다.

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \beta_c(t - t_0)$$

$$\phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (14)$$

여기서, t 는 재령[일], t_0 는 재하재령[일], ϕ_{RH} 는 상대습도와 시편형상에 관한 함수, $\beta(f_{cm})$ 는 28일 평균압축강도에 관한 함수, $\beta(t_0)$ 는 재하재령에 관한 함수이고 $\beta_c(t - t_0)$ 는 재령과 상대습도, 시편형상에 관한 함수이다.

해석에 이용한 CEB-FIP(MC90)³⁾ 크리프 함수는 기본 크리프를 표현하는 함수로서 엄밀하게는 건조에 노출된 수축에 의한 응력해석에는 상기의 크리프 모델을 이용하는 것이 타당하지 않다. 따라서 향후 임의의 환경에서 크리프에 의한 응력완화 현상을 추적할 수 있는 정확한 크리프 모델의 도입이 필요하다.

4. 해석적 균열 검토 및 비교

이상에서 상술한 초기재령 콘크리트의 거동 통합 해석 시스템을 통하여 일축 구속실험을 실시한 구속 시험체에 대한 해석적 균열 검토를 실시한다. 통합해석은 먼저 수화발열모델, 세공구조형성모델 및 수분이동모델을 통하여 외부환경조건에 따른 초기재령에서의 온도변형 및 비구속 건조수축 변형률을 구하고, 이를 하중으로 대입하여 응력 해석 모델에서 구속조건에 따른 시험체내 발생응력을 구한다. 이때 시험체내 각 지점은 수화도의 차이에 의해서 다른 강도 및 강성발현을 보이므로, 강도발현모델로부터 이를 고려하여 구속시험체의 균열발생 여부를 평가한다. 일축 구속 시험체는 Fig. 12와 같은 요소로 모델링 하였고 해석결과 도출점은 대상 모델의 중앙 표면부이다. 응력해석을 위한 구속조건은 실제 실험조건과 같이 양 끝단

의 시험체를 구속하는 횡방향 나사에 접하는 요소의 절점만을 구속시켰다. 기타 해석을 위한 구속 및 초기조건은 Table 3에 보인 바와 같다.

일축 구속시험체에 대한 응력 해석에 앞서 제안한 해석 모델을 통해 무구속 시편의 자유수축 변형률을 구하고, 해석결과를 동일한 조건에서 실시된 실험결과와 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에서와 같이 제안한 해석 모델을 통해 염분량 증가에 따른 자유 수축 변형률의 변화를 재령별로 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 입증하였다. 이런 결과를 기초로 염분량이 0, 0.07, 0.6, 1.2%인 네 가지 경우에 대한 일축 구속 시험체의 구속응력 경시변화를 해석모델을 통해 구하고 동일한 조건에서 얻어진 실험결과와 비교하였다. 건조수축의 구속으로 발생하는 응력값이 발현되는 인장강도에 도달하면 균열이 발생한다고 가정하였으며, 인장강도의 발현은 CEB-FIP(MC90)³⁾ 모델을 기초로 재령에 따른 압축강도 실험으로 도출한 압축강도 발현식을 기초로 식(15)의 형태로 구하였다.

$$\sigma_t = 0.645 \cdot [237 \exp\{0.267 \times (1 - (28/t)^{0.5})\}]^{0.5} \cdot 0.667 \quad (15)$$

여기서, σ_t 는 콘크리트의 인장강도, t 는 재령(일)이다. Table 4에 균열 발생시기와 그 때의 응력값의 해석결과와 실험값을 나타내었다. 또한 Fig. 14에 염분 함유량의 변화에 따른 응력 경시변화와 그에 따른 균열평가 결과와 실험결과를 비교하여 나타내었다. 제안된 해석모델은 염분량의 증가가 구속응력을 증가시켜 균열발생 시기를 앞당기는 실험 결과를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 입증하였다.

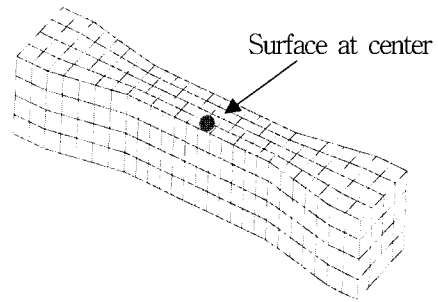


Fig. 12 FE mesh for the specimen

Table 3 Conditions for FE analysis

Boundary condition	Heat conduction	Water transport
	Environmental temperature 20 °C	R.H 60 %
Initial condition	Heat conduction	Water transport
	Environmental temperature 20 °C	R.H. 100 % drying age ; 2 days

Table 4 Cracking age and restrained stress

Cl ⁻ contents (% of cement wt.)	Numerical result		Experimental result	
	Cracking age (days)	Restrained stress (kgf/cm ²)	Cracking age (days)	Restrained stress (kgf/cm ²)
0.00	20	23.5	19	24.5
0.07	11	23.6	10	22.6
0.60	8	23.7	9	22.5
1.20	7	23.5	7	20.3

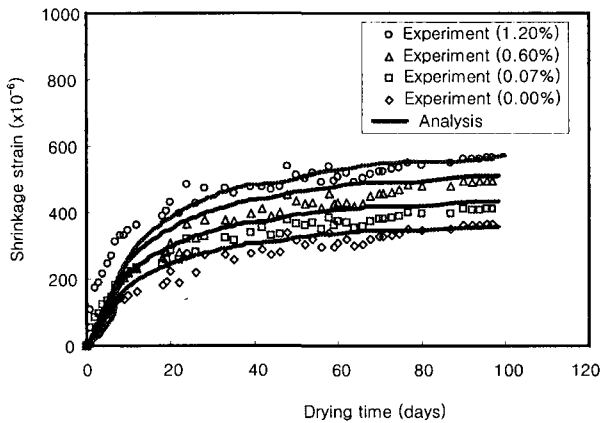


Fig. 13 Comparison of shrinkage development for different chloride ion contents

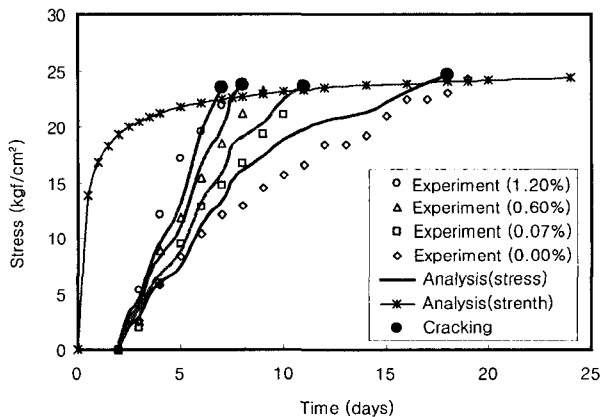


Fig. 14 Comparison of restrained stress development for different chloride ion contents

5. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 배합시 염분 함유량을 달리한 콘크리트의 재령에 따른 압축강도, 탄성계수 및 건조수축 실험결과를 통해 염분 함유량의 증가는 콘크리트의 강도 및 탄성계수의 발현에 큰 영향을 미치지 못하는 반면, 건조수축 변형률의 증가에는 직접적인 비례관계가 성립한다는 사실을 알 수 있다.
- 2) 해사를 사용한 콘크리트의 일축 변형 구속시험을 통

해 염분 함유량의 증가가 균열 발생시기를 앞당긴다는 사실을 밝혔으며, 이는 배합시 염분함유량의 증가가 건조수축률을 증가시키는 반면 강도 및 강성 증진에는 크게 영향을 미치지 못하기 때문이다.

3) 열역학 평형관계에 기초한 초기재령 콘크리트의 복합수화 발달모델, 세공구조 형성모델, 수분이동모델, 자기 및 건조수축 모델과 응력해석 모델을 통합시켜 염분 함유량이 다른 해사를 사용한 콘크리트의 초기응력의 경시변화와 그에 따른 균열 발생을 예측할 수 있는 통합 해석시스템을 구축하였다.

4) 일축 구속 실험과 동일한 조건으로 수치해석을 실시하여 해사를 사용한 콘크리트의 시간의존적 수축변형률, 구속응력 및 균열 발생여부를 해석적으로 재현하였고, 실험결과와의 비교를 통해 통합해석시스템의 타당성을 입증하였다.

참고문헌

1. 楊, 恩翼, 森田, 司郎, “若材齡において軸交形拘束を受けるコンクリートの特性,” *コンクリート工学論文集*, 第7巻, 1号, 1996, pp.169~177.
2. 笠井芳夫, 池田尚治, “コンクリートの試験方法,” 技術書院, 1993, pp.139~144.
3. CEB/FIP(MC1990), *Model Code 1990*, Comité Euro-International du béton.
4. Brown, P. W., Harner, C. L., and Prosen, E. J., “The Effect of Inorganic Salts on Tricalcium Silicate Hydration,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 16, No. 1, 1986, pp.17~23.
5. Suryavanshi, A. K., Scantlebury, J. D., and Lyon, S. B., “Pore Size Distribution of OPC & SRPC Mortars in Presence of Chlorides,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 5, 1995, pp.980~988.
6. Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T., “*Modeling of Concrete Performance: Hydration, Micro structure Formation and Mass Transport*,” Routledge, London and New York, 1999.
7. Song, H. W., Cho, H. J., Park, S. S., Byun, K.

J., and Maekawa, K., "Early-age Cracking Resistance Evaluation of Concrete Structure," *Int. J. Concrete Science and Engineering*, Vol. 3, 2001, pp.62~72.

8. 송하원, 박상순, 변근주, "초기재령에서 균열을 갖는 콘크리트의 염화물 침투해석," 대한토목학회 논문집, 제

21권, 6-A호, 2002, pp.925~935.

9. Kishi, T. and Maekawa, K., "Hydration Heat Model for Blended Cement Including Blast Slag and Fly Ash," *Proceedings of the JCI*, Vol. 15, No. 1, 1993, pp.1211~1216.

요 약

본 연구에서는 해사를 사용한 초기재령 콘크리트의 자기 및 건조 수축의 구속에 의한 균열발생을 재현하기 위해 유한요소 해석을 실시하였다. 이를 위해 미시역학적 관점에서 열역학적 평형관계를 토대로 해사를 사용한 초기재령 콘크리트의 수화발열 모델, 수분이동 모델 및 건조수축 예측 모델 등의 재료 모델을 정립하여 해석알고리즘을 제안하였고 초기재령에서 해사를 사용한 콘크리트의 자기 및 건조수축의 구속에 의해서 발생하는 구속응력의 경시변화와 그에 따른 균열발생 및 시기에 관한 균열 평가를 목적으로 염분 함유량을 변화시킨 콘크리트의 시편에 대하여 일축 방향 변형구속 실험을 실시하였다. 실험결과 초기재령 콘크리트내 염분 함유량의 증가가 강도발현에 큰 영향을 미치지 못하는 반면 건조수축량을 증가시키므로 일축 방향 변형 구속시 동일 재령에서 높은 구속인장력이 발생하고 그로 인해 균열발생시기를 앞당기는 것을 밝혔다. 또한 구속시험과 동일한 조건으로 해사를 사용한 콘크리트 시편에 대한 응력해석을 실시하여 부재내부에 도입된 건조수축 응력 및 균열 발생의 시간 의존적 변화를 재현하여 그 타당성을 실험결과와 비교를 통해 검증하였다.

핵심용어 : 초기재령 콘크리트, 해사, 구속응력, 건조수축, 균열
