

## 초속경 라텍스개질 콘크리트의 초기수축 및 구속건조수축

### Early-Age and Restrained Shrinkage of Very-Early Strength Latex Modified Concrete

최 판 길\*      김 용 곤\*\*      심 도 식\*\*\*      이 봉 학\*\*\*\*  
Choi, Pan-Gil      Kim, Young-Gon      Sim, Do-Sic      Lee, Bong-Hak

#### Abstract

Recently, very-early strength latex-modified concrete(below ; VES-LMC) has been developed for repairing and overlaying the old concrete bridge deck. VES-LMC provides the advantage of very-early-strength, as well as high flexural strength, bond strength, durability, resistance to corrosion, reduced water permeability and resistance to damage from freeze-thaw cycles. The compressive and flexural strength of VES-LMC are 21 MPa and 4.5 MPa at 3 hours after concrete placing, respectively. However, VES-LMC would have a relatively large shrinkage at early-age because of reduced water-cement ratio, big water self-dissipation, and rapid hydration reaction. Therefore, the purpose of this study was to evaluate the early-age and restrained shrinkage of VES-LMC, having an experimental variables such as latex contents and cement types. The latex contents included 0%, 5%, 10%, 15% and 20%, and the cement types included ordinary portland cement and very-early strength cement.

키워드 : 초속경 라텍스개질 콘크리트, 초기수축, 구속건조수축

Keywords : *very-early strength latex modified concrete, early-age shrinkage, restrained shrinkage*

#### 1. 서론

콘크리트포장체 및 콘크리트 구조물은 타설 후 경화과정에서 자기수축, 건조수축 등으로 인해 필연적으로 체적변화가 수반되며, 과도한 체적변화는 콘크리트 균열발생에 주요한 원인이 될 수 있다 [1],[2]. 이러한 균열은 구조물의 내구성을 저하시켜 내구연한을 단축시키는 직접적인 요인으로 작

용하게 된다. 최근에 고속도로와 국도를 중심으로 교량상판용 긴급보수재료로써 초속경라텍스개질콘크리트(Very Early Strength Latex Modified Concrete ; 이하 VES-LMC)가 개발되어 사용되고 있다[3],[6]. VES-LMC의 장점으로서는 보수 후 3시간 만에 교통개방이 가능하다는 점과 라텍스의 첨가로 인해 부착성이 증가되어 기존 콘크리트슬래브 상판과 일체거동을 하는 것이다. 더불어 기존의 보수재료가 갖는 장기 내구성의 문제를 해결하여 일반콘크리트보다 투수저항성 및 동결융해저항성 등이 월등히 우수한 특성도 가지고 있다. 이러한 장점으로 장시간 교통차단이 어려운 경우, 보수 후 조기개방이 요구되는 경우, 기존 구조물과 동질성을 가진 보수재료가 요구되어지는 경우 등에 사

\* 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정  
\*\* 대상엔지니어링(주) 대표이사 공학석사  
\*\*\* 강원도립대학 건설시스템과 교수, 공학박사  
\*\*\*\* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

용될 수 있다. 또한 현재 유지보수시장이 급격히 증가하고 있는 추세에서 그 활용범위가 크게 증가하게 되리라 예상된다. 그러나 초기의 급격한 수화 반응에 따른 수분소산, 초기건조 등으로 초기자기 수축 및 건조수축이 발생하여 초기균열이 일어날 수 있는 가능성을 내포하고 있다[4]. 그러나 현재까지 VES-LMC의 초기수축 및 건조수축균열에 대한 연구는 상당히 미흡한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 VES-LMC의 초기수축특성과 구속건조수축 특성에 대해 고찰하여 기초 자료를 확보하고자 한다.

## 2. 콘크리트 수축과 균열

콘크리트 구조물은 콘크리트 타설 직후부터 여러 가지 요인으로 인해 수축, 팽창 거동을 하게 되고 체적변화를 일으킨다. 체적변화 과정에서 콘크리트내부에 발생하는 수축으로 인한 수축압이 재료 자체가 가지는 인장응력 범위를 벗어나게 되면, 콘크리트 내부 중 가장 취약한 부분에서 균열이 발생하게 되고, 이렇게 발생한 균열은 발생부위의 단면 감소 영향으로 응력집중현상이 유발되어 균열이 진전하게 된다. 본 논문에서 소개하고자 하는 내용은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 균열발생의 원인이 되는 초기수축과 수축으로 인해 나타나는 균열의 특성이다. VES-LMC는 초속경 시멘트의 특성으로 일반 OPC의 7일 강도를 3시간에 발현시킨다. 즉, 콘크리트타설 초기에 수축으로 인한 균열이 발생할 우려를 내포하고 있는 것이다. VES-LMC의 초기수축 발생원인은 자기수축, 건조수축 및 열수축 등의 복합작용에 의해 발생한다고 할 수 있고, 각각의 수축량을 정량적으로 평가하기란 상당히 어렵다. 특히 콘크리트의 고강도·고성능화는 구조물의 내구성, 안정성 등을 증가시키는 반면에 초기단계의 자기수축을 증가시키는 현상을 가져왔다.

따라서 본 장에서는 콘크리트 수축의 종류 및 특성, 균열발생 원인 및 균열조사방법 등을 고찰하고, VES-LMC의 초기수축의 원인과 균열특성에 대한 연구를 수행하고자 한다.

### 2.1 수축의 종류

시멘트 경화체의 수축형태는 경화전 콘크리트의 표면수분의 급격한 손실로 인한 소성수축(plastic shrinkage), 시멘트 수화에 의한 자기수축(autogenous shrinkage), 공극수의 증발에 의한 건조수축(dry shrinkage) 및 공기중 이산화탄소의 유입에 의한 중성화수축(carbonation shrinkage)으로 분류된다. 이러한 수축형태에서 자기수축 및 건조수축은 시멘트 경화체중에 존재하는 수분의 상변화에 의해 일어나며, 중성화에 의한 수축은 시

멘트 경화체 중의 수산화칼슘과 공기중 이산화탄소의 반응에 의하여 생성된 수분의 증발에 의하여 발생한다[8],[9].

수축에 관계되는 시멘트 경화체 중 수분의 상변화는 공극중의 수분이 시멘트의 수화에 의해 수화물로 고착되는 고체로의 상변화와 외부 환경에 노출되었을 때 공극수의 증발에 의한 기체로의 상변화로써 분류된다. 수화물 형성에 의한 고체로의 상변화를 자기수축, 공극수의 증발에 의한 기체로의 상변화를 건조수축이라 하며, 시멘트 경화체에서 이러한 수축이 중요시되는 것은 재료적인 특성상 압축강도에 비하여 인장강도가 상대적으로 낮아 수축에 의한 균열의 발생가능성이 증가하기 때문이다.

### 2.2 자기수축(Autogenous Shrinkage)

시멘트 경화체의 자기수축은 내부에 존재하는 수분이 수화물을 형성하면서 고체로 상변화하기 때문에 수화에 의한 내부 수분의 손실 즉, 자기건조(self-desiccation)에 의하여 발생된다. 포틀랜드 시멘트의 수화 반응에서 생성된 수화에 의해 경화체의 거시적인 골격이 형성되면서 대부분이 발생된다. 시멘트의 자기수축은 시멘트의 광물조성, 광물과 함께 화학반응 및 반응물이 정해지면 화학양론적으로 계산할 수 있다[11].

시멘트의 자기수축에 의한 실험은 ASTM C 827의 의하여 측정할 수 있으며, 화학 양론적으로 계산된 이론적 수축률과 실험에 의한 측정값을 비교하여 결보기 수축률을 정할 수 있다. 이 방법은 수화 반응에 의한 자기수축률을 예측할 수 있고, 동일 시멘트의 환경요인에 따른 반응속도의 추정 에 유용한 자료로 활용할 수 있다[10].

### 2.3 균열 발생

콘크리트 구조물에 발생한 균열(龜裂)은 구조물의 내력, 내구성, 방수성 및 미관 등에 악영향을 미치기 때문에 균열은 콘크리트 구조물을 건설할 때 가장 중요한 문제이다. 콘크리트의 역학적 성질의 결점은 파괴시 변형이 압축에서  $2 \sim 4 \times 10^{-3}$ , 인장에서  $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ 정도로 작으며, 인장강도가 작고 체적변화(건조수축, 온도신축, 습도신축 등)가 큰 점 등이다. 이러한 결점은 바로 균열에 영향을 미친다[5].

콘크리트 균열은 콘크리트 타설 후부터 응결이 종료할 때까지 발생하는 초기균열과 경화 후에 발생하는 균열로 대별할 수 있다. 초기균열은 콘크리트 내에서의 불균등한 침하, 콘크리트 표면에서의 급격한 수분손실, 콘크리트 표면의 경화가 진행되는 동안 내부 콘크리트의 침하가 동시에 이루어짐에 의한 균열, 거푸집 변형에 따른 균열 및 진동, 제하에 의한 균열 등으로 나눌 수 있다.

콘크리트가 경화한 후에 발생하는 균열의 종류는 건조수축에 의한 균열, 알칼리골재반응, 이상물질의 혼입, 철근의 녹 등의 화학반응에 의하여 일어나는 균열, 열응력 등 콘크리트 내외의 온도차에 의하여 생기는 균열, 구조물의 형상, 배근상의 응력집중에 기인하는 균열, 하중과파 또는 과격한 기계진동에 의한 균열, 지진 충격 등의 우발사고에 의한 균열 등으로 구분할 수 있다[7].

### 3. 콘크리트배합 및 수축실험

#### 3.1 콘크리트 배합

본 실험에서는 라텍스첨가(0, 5, 10, 15, 20%)에 따른 물시멘트비 변화가 초기수축에 미치는 영향을 파악하고, 구속조건에 따라 균열특성을 고찰하였다[6]. 더불어 비교분석을 위해 교량상판용 OPC-Slab의 건조수축 및 균열특성을 분석하였으며, 이를 위하여 표 1과 같이 VES-LMC와 OPC-Slab를 배합하였다.

VES-LMC 배합순서는 보통콘크리트 제조방법과 동일하게 하였으며, VES-LMC는 굵은 골재와 잔골재를 혼합하여 약 30초간 건비빔을 실시한 후 시멘트를 혼합하여 다시 30초간 모든 재료가 잘 섞이도록 비빔을 실시하였다. 다음으로 소포제가 첨가된 라텍스와 지연제가 희석된 물을 투입한 후 30초간 모든 재료가 잘 섞이도록 배합하였다.

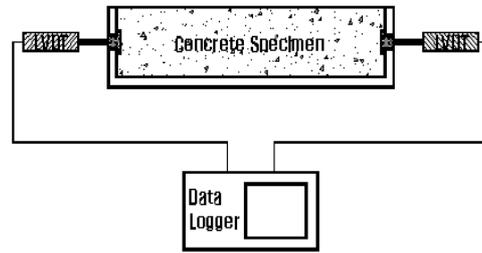
#### 3.2 자유수축시험

자유수축 실험은 그림 1 모식도에 나타난 바와 같이 일본의 Ohama 교수가 고안한 방법으로 0.001mm 정밀도를 가진 10mm LVDT를 사용하여 시편의 길이변화를 측정하였다. 콘크리트 타설 후 LVDT를 통해 획득된 길이변화량은 데이터 로거(Data Logger)로 자동전송 된다. 콘크리트 시편과 폴리에틸렌 형틀과의 분리를 위하여 일차적으로 0.5mm 두께의 테플론 쉬트를 도포하고, 이차적으로 형틀 내부를 폴리머 콘크리트용 박리제로 도포한 후 타설을 실시하여, 형틀로부터의 마찰 영향을 최소화 하였다. 실험에 사용된 시편의 규격은  $70 \times 70 \times 320 \text{mm}^3$ 의 콘크리트 빔을 사용하였다. 실험은 온도 20℃, 상대습도 50%로 일정하게 유지되는 항온항습실에서 수행하였고, 초기수축 규명을 위하여 초기재령 3일까지의 수축데이터를 획득하였다. 실험의 측정은 콘크리트의 초결이 지난 후 센서의 유동이 없는 시기부터 시작하였다.

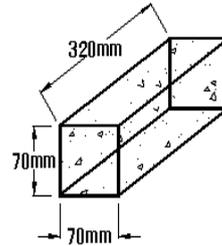
#### 3.3 구속건조수축시험

구속건조수축실험은 그림 2와 같이 내부를 스틸링(Steel Ring)으로 고정하고 외부를 강철 틀로 고정시킨 후 두 링 사이에 콘크리트를 타설하여 수행하였다. 외부 몰드는 초속경 시멘트를 사용한 경

우 타설 후 2시간이 경과한 후에 탈형하였고, 1종 시멘트를 사용한 OPC-Slab는 타설 5일후 거푸집을 해체하였다. 변수에 관계없이 단위체적당 수분증발로 인한 변형률 데이터 획득을 목적으로 콘크리트 시편의 상부, 하부 및 옆면 모두에서 수분증발이 이루어 질 수 있도록 하였다. 시험편의 탈형 후 시험편을 온도  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ , 상대습도  $50\% \pm 2\%$ 의 항온항습 조건에서 건조가 지속되도록 하였다. 균열조사는 재령 60일까지 실시하였다.



a. Configuration for free-shrinkage test



b. Specimen Geometry

그림 1 자유수축시험 모식도

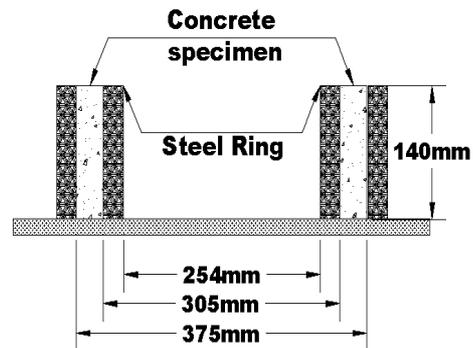


그림 2 Ring-Test 모식도

표 1 VES-LMC & OPC-Slab 배합표

Concrete	Latex Contents (%)	W/C (%)	S/a (%)	Mix Proportion ( kg/m <sup>3</sup> )					Antifom er Content	AE Water Reducer
				C	Latex	W	S	G		
VES-LMC	0	49	58	390	0	191	957	719	1.0%	-
	5	46	58	390	41	157	947	712		
	10	42	58	390	81	119	925	722		
	15	38	58	390	122	82	940	707		
	20	34	58	390	162	44	918	717		
OPC-Slab	-	45	41	392	0	177	1072	714	-	0.3%

#### 4. 실험결과

##### 4.1 개요

본 연구의 목적은 초속경라텍스계질 콘크리트의 초기수축으로 인한 균열특성을 파악하기 위함이다. 이러한 특성을 파악하기 위하여 2가지 실험을 실시하였고, 아래와 같이 결과를 요약하여 정리하였다.

첫 째로 자유수축 실험이다. 자유수축 실험은 위 실험방법에서 언급했듯이, 타설 직후부터 시편의 길이변화를 측정할 수 있어, 초기수분증발로 인한 수축 특성을 파악하는데 상당히 편리하고도 유용한 방법이다. 라텍스 함량변화에 따른 VES-LMC의 초기 길이변화특성을 제시하였다.

두 번째로 구속건조수축실험이다. 이 실험은 초기수축으로 인한 콘크리트의 변형률과 스틸링의 변형률을 측정하여, 시간에 따른 재료의 변형률 변화를 측정할 수 있는 실험방법으로 Ring-Test를 선정하였다. 균열과 동시에 콘크리트의 변형률이 증가하고, 스틸링의 변형률이 감소하여, 변형률 변화로 인한 재료의 균열특성 규명이 가능한 방법이라 할 수 있다.

##### 4.2 초기자유수축

라텍스를 첨가하지 VES L0의 수축량은 초기 4시간에 58 $\mu$ m, 12시간에 64 $\mu$ m로 측정되었으며 타설 19.5시간이 경과한 후 65 $\mu$ m로 최대치를 나타내었다. 즉, 초기 4시간 동안의 수축이 전체 수축의 90%가량을 차지하고, 12시간에는 99%로 나타났다. 이를 통해 초속경콘크리트는 타설 후 12시간 내에 거의 모든 초기수축이 일어남을 알 수 있다.

라텍스를 10%첨가한 VES-LMC L10의 수축은 다섯 가지 변수 중 가장 작은 길이변화를 나타내었다. 최대 길이변화는 타설 21시간 경과 후, 54 $\mu$ m로 측정되었다. 이는 라텍스함량 증가에 따른 물시멘트비 감소가 수축저감에 영향을 미친 것으로 판단된다.

라텍스를 15%첨가한 VES-LMC L15에 대한 길이변화결과는 초기 4시간에 67 $\mu$ m, 12시간에 74 $\mu$ m로 측정되었으며, 타설 20시간이 경과한 후 75 $\mu$ m로 최대치를 나타내었다. 각 시간에 따른 최대길이 변화 대비 수축 정도는 초기 4시간에 90%, 12시간에는 99%로 나타났다. 최대 길이변화량이 VESC에서 65 $\mu$ m, VES-LMC L5에서 62 $\mu$ m인데 반해 VES-LMC에서는 75 $\mu$ m로 다소 크게 측정되었다. 그러나 수축률이 0.023%로 타 보수재료와의 절대적인 비교에 있어서는 상당히 작은 값이라 할 수 있다. 라텍스를 20%첨가한 VES-LMC L20에서 최대 길이변화는 타설 19.5시간 경과 후 발생하였고, 그 크기는 88 $\mu$ m로 다섯 가지 변수 중 최대값을 나타내었다. 라텍스함량이 과다하게 증가하면서 결합재비율도 증가하게 되고, 더불어 물시멘트비가 현저하게 줄어들게 되어 고성능·고강도 콘크리트에서 나타나는 자기수축증가 현상이 뚜렷이 나타나고 있는 것으로 사료된다. 즉, 라텍스의 과다한 첨가는 자기수축의 영향을 증가시켜 초기수축을 증가시킬 수 있음을 알 수 있었다.

그림 3은 재령 3일 동안의 각 변수별 초기수축을 시편전체길이 대비 길이변화율로 나타낸 그래프이다. 그림 4는 최대길이변화가 발생한 시간을 100%로 보았을 때, 이전 시간까지의 수축량을 백분율로 표시한 그래프이다. 모든 변수에서 타설 12시간 후 초기 수축의 대부분이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 양상은 초속경 시멘트의 급결성으로 인한 결과라 사료되고, 경화과정에서 발생하는 급격한 수분소산 및 증발에 기인하는 것으로 판단된다. 그림 5는 각 변수별 최대길이변화율을 나타낸 그래프로써 라텍스함량 10%를 전후해서 수축이 증가하는 경향을 보이고 있다.

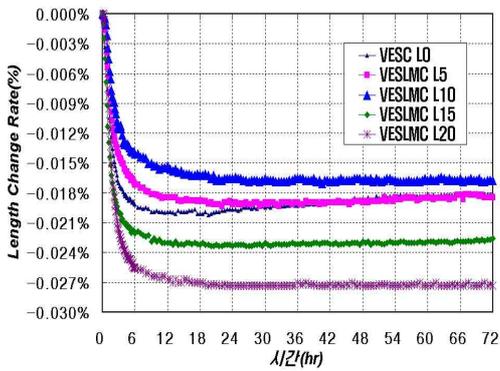


그림 3 시간에 따른 길이변화율

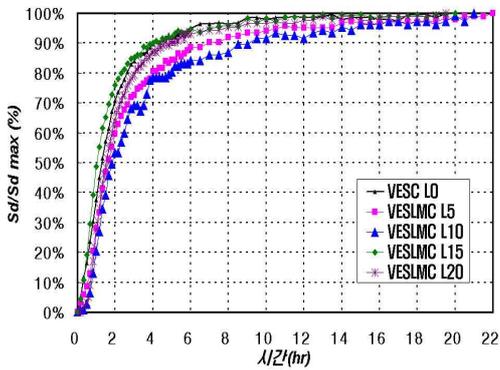


그림 4  $S_d/S_{d_{max}}$

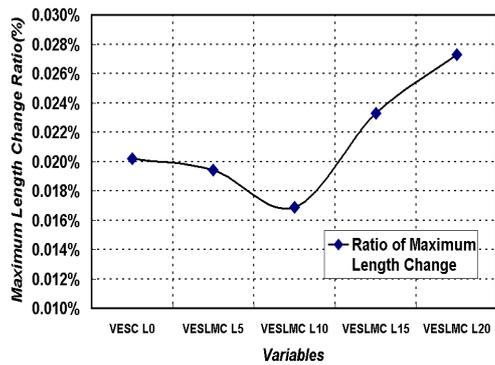


그림 5 최대길이변화율 비교

#### 4.3 구속건조수축 결과

##### (1) VESC와 VES-LMC 구속건조수축

라텍스를 첨가하지 않은 VESC L0 변수에서는 재령 49일째 첫 번째 균열이 발생하였고, 재령 50,

51일째 각각 두 번째, 세 번째 균열이 발생하였다. 첫 번째 균열은 하부에서 상부로 균열이 진전되었으며 관통하지는 않았다. 재령 60일에서 균열폭은 50 $\mu$ m, 균열길이는 63mm로 측정되었다. 두 번째 균열의 균열폭은 25 $\mu$ m, 균열길이는 63mm로 측정되었다. 세 번째 균열은 그 폭이 25 $\mu$ m, 길이는 53mm로 측정되었다. 이러한 균열은 시간이 경과함에 따라 최초 발생한 균열이 나중에 발생한 균열보다 균열폭과 길이가 더 빨리 진전되는 양상을 나타냈었다. 즉 최초균열발생 부위의 단면감소영향으로 인해 응력집중현상이 두드러지게 나타난 결과라 할 수 있다. 그림6은 VESC 링 시편에 발생한 균열을 어느 한 쪽을 기점으로 끝까지 펼쳤을 때의 균열형태를 나타낸 그림이고, 그림 7은 균열발생시기, 균열폭, 균열길이를 하나의 그래프로 표현한 그래프이다.

이를 살펴보면, 라텍스를 5%, 15% 첨가한 VES-LMC L5, L15 에서는 모두 재령 60일까지 균열이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 라텍스 첨가로 인한 콘크리트 내부 구속효과 와 더불어 물시멘트비 저감효과로 설명될 수 있다. 즉, 라텍스가 첨가되지 않은 VESC L0 변수와 비교해서 상대적인 물시멘트비 저감효과로 건조로 인한 수축의 영향을 덜 받은 결과라 할 수 있고, 라텍스 첨가로 인한 건조수축저감효과가 확인된 결과라 할 수 있다.

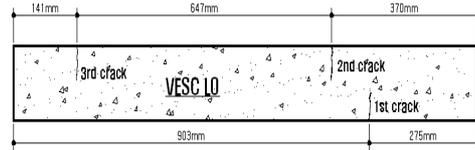


그림 6 VESC L0 균열양상

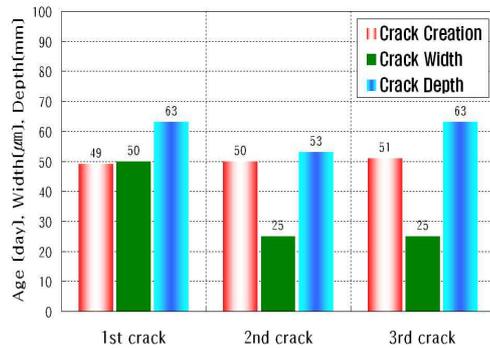


그림 7 VESC 균열조사

(2) OPC-Slab 구속건조수축

교량상판 슬라브용 콘크리트로 묘사되는 OPC-Slab 배합에서 구속건조수축 시험결과, 첫 균열은 재령 20일에 발생하였고 그 후 21일, 22일에 각각 발생하였으며 최종적인 균열은 재령 24일째 발생하였다. 아래 그림 8은 균열조사 전경을 나타내는 사진이고, 그림 9는 재령 60일에서 균열형상과 균열발생 순서를 나타낸 그림이다.

이는 VES-LMC에서와 마찬가지로 최초로 발생한 균열이 균열폭도 넓고, 가장 빨리 링 시편을 관통하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 건조수축으로 인해 초기미세균열이 발생하면서, 균열부위에 응력집중현상이 두드러지게 나타나 균열이 진전된 것으로 판단된다. 이상의 결과에서 최초로 발생하는 균열이 후속균열보다 구조체에 미치는 영향이 더 클 수 있다는 결론을 유추할 수 있었다.

OPC의 경우, 물시멘트비가 49%인 VESC L0의 경우보다 4%나 작은 물시멘트비를 가짐에도 불구하고 VESC L0보다 균열이 더 빨리, 더 많이 발생하였다. 이를 통해 라텍스의 구속효과를 확인할 수 있었다.

그림 10은 균열발생에 따른 응력집중 현상을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 첫 번째로 발생한 균열이 그 폭도 가장 크고 균열길이도 가장 긴 것으로 나타났으며, 균열발생 순서에 따라 이러한 양상은 점점 감소하는 경향을 나타내었다.

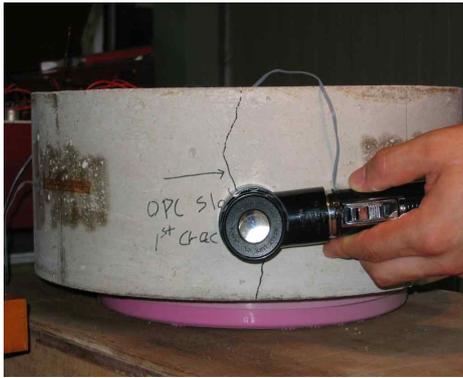


그림 8 균열측정 사진

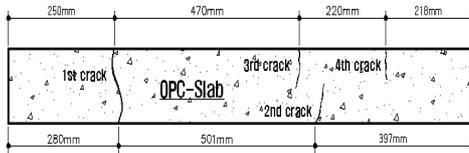


그림 9 VESC L0 균열양상

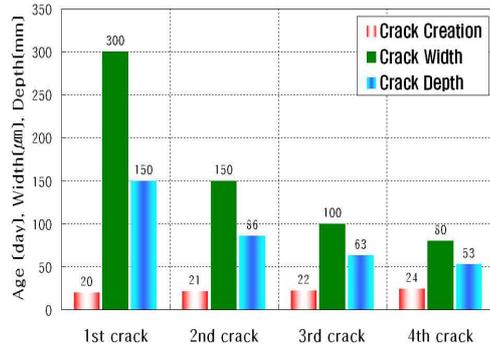


그림 10 OPC-Slab 균열조사

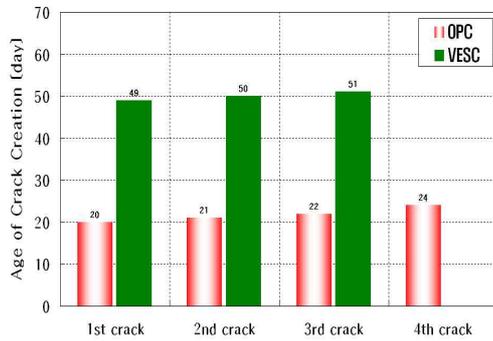


그림 11 시멘트종류에 따른 균열발생시기

(3) 결과비교

가. 시멘트종류에 따른 비교

그림 11~13은 1종 포틀랜드 시멘트를 사용한 OPC-Slab 콘크리트와 초속경 시멘트를 사용한 VESC L0의 균열발생시기, 균열폭 및 균열길이를 각각 발생한 순서에 따라 비교한 그래프이다.

균열발생시기에 있어서는 1종 시멘트를 사용한 경우 재령 20~24일에 모든 균열이 발생하였고, 초속경 시멘트를 사용한 경우 재령 49~51일 사이에 균열이 발생하였다. 균열폭은 그래프에서 알 수 있듯이 1종 시멘트를 사용한 경우 육안 관찰이 가능할 정도의 크기 및 형상을 나타내었고, 초속경 시멘트를 사용한 경우는 자세히 관찰을 해야 찾을 수 있는 크기의 균열 및 형상을 나타내었다. 균열 길이에 있어서도 1종 시멘트를 사용한 경우 첫 번째 균열은 링 시편을 관통하였고, 나머지의 경우도 초속경 시멘트를 사용한 경우보다 더 짧게 측정되었다. 따라서 균열발생시기, 균열폭 및 균열길이 모든 측면에서 초속경 시멘트의 성능이 1종 시멘트보다 월등히 뛰어난이 증명되었다.

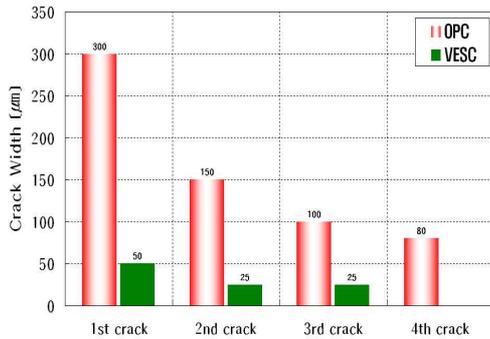


그림 12. 시멘트종류에 따른 균열폭

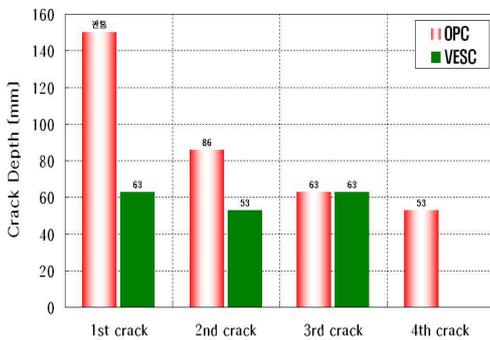


그림 13. 시멘트종류에 따른 균열깊이

나. 라텍스함량에 따른 비교

라텍스가 첨가되지 않은 VESC L0의 경우 균열이 3개소에서 발생하였고, 라텍스가 5, 15% 첨가된 VES-LMC L5, VES-LMC L15의 경우 재령 60일까지 균열이 발생하지 않았다. 이를 통해 라텍스의 첨가가 콘크리트의 건조수축에 미치는 영향이 매우 효과적인 것으로 판단되었다.

이러한 결과는 기존의 연구자(3,4)들에 의해 이미 밝혀진 바로, 바인더 역할을 하는 라텍스 고형분이 콘크리트 내부를 충전 하고, 라텍스의 필름막형성에 따라 내부 구속력을 증가시킴으로 인해 건조로 인한 콘크리트의 수축 영향을 저감시키는 것으로 사료된다.

5. 결론

VES-LMC의 동일슬럼프 대비 초기수축 특성과 구속건조수축실험을 통한 균열조사에서 라텍스의 효과, 물시멘트비의 영향 및 시멘트 종류 등이 수축 및 균열에 미치는 영향을 확인할 수 있었으며,

본 연구에서 수행된 초기수축실험 및 구속건조수축 실험에 대한 결과는 다음과 같다.

1. 각 변수에 대한 초기 3일 재령까지의 최대길이 변화율은 VESC L0에서 0.020%, VES-LMC L5에서 0.019%, L10에서 0.017%, L15에서 0.023%, L20 0.027%로 각각 측정되었다.
2. 자유수축 시험결과 모든 변수에서 콘크리트 타설 19~22시간 후 최대수축을 일으키는 것으로 나타났고, VES-LMC L15의 경우 최대수축량의 약 90%에 달하는 수축이 타설 4시간 후에 일어나는 것으로 나타났으며, 현장적용에 있어 적절한 교통개방시기에 중요한 참고 자료가 되리라 사료된다.
3. 40% 이상의 비교적 큰 물시멘트비에서는 물시멘트비 감소에 따른 일반적인 수축저감효과를 확인할 수 있었고, 40%미만의 비교적 작은 물시멘트비에서는 고성능·고강도 콘크리트에서 나타나는 비교적 큰 자기수축의 영향이 확인되었다. 낮은 물시멘트비에서 자기수축은 결합재 양과 물시멘트비에 반비례하여 결합재양이 많을수록, 물시멘트비가 작을수록 전체수축이 증가하는 경향을 나타내었다.
4. 수축균열조사결과 최초 균열은 OPC-Slab에서 재령 20일에, VESC L0에서 재령 49일째 첫 번째 균열이 발생하였고, VES-LMC L5, VES-LMC L15에 있어서는 재령 60일까지 균열이 발생하지 않았다. 또한 시멘트종류에 따른 균열특성에서는 초속경 시멘트를 사용한 콘크리트가 1종 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트보다 수축균열의 영향을 덜 받는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- [1] 구봉근, 라재웅, 이재범, 류연중, 이현석 (2003), "재생골재 콘크리트의 수축균열 특성에 관한 연구" 건설기술연구소 논문집 제 22권 제2호, p.p. 153~166
- [2] 김철철(2003), "콘크리트의 건조수축 메커니즘과 예측모델" 도로포장공학회지 제5권 3호 p.p. 32~41
- [3] 이주형(2000), "폴리프로필렌 섬유보강 조강형 콘크리트의 구속건조수축 및 표면마리 저항특성" 공학박사학위 논문, 강원대학교 대학원
- [4] 이회근, 이광명, 김병기 (2001), "고성능 콘크리트의 자기수축" 대한토목학회 2001학술발표회 논문집
- [5] 추영수 역(1996), 콘크리트의 균열조사, 보수보강지침, 건설도서

- [6] 최상룡(2002), “초속경 SB 라텍스개질 콘크리트의 개발” 공학박사학위 논문, 강원대학교 대학원
- [7] ACI Committee 209R-92, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures", *ACI Practice Manual*
- [8] Carrier, R.E., Cardy, P.D.(1970), "Evaluating Effectiveness of Concrete Curing Compounds", *Journal of Materials*, JMLSA, Vol. 5, No.2, pp.294~302
- [9] Mindess, S., Young, J. F.(1981), "*Concrete*", Prentice-Hall, pp.485~500
- [10] Neville, A.M(1995), "*Properties of Concrete*, 4th Ed", Longman, pp.423~449
- [11] Patricia M. Buchanan(2002), "Shrinkage of Latex-Modified and Microsilica Concrete Overlay Mixtures" M. S Thesis in *Virginia Polytechnic Institute and State University*