

현장실험을 통한 VES-LMC 균열발생 원인분석

Diagnosis of Crack Occurrence of Very-Early Strength Latex-Modified Concretes through Field Tests

최 판 길* 이 봉 학**
Choi, Pan-Gil Lee, Bong-Hak

Abstract

Many concrete bridge decks develop transverse cracking shortly after construction. These cracks accelerate corrosion of reinforcing steel and lead to concrete deterioration, damage to components beneath the deck, unsightly appearance. These cracks shorten the service life and increase maintenance costs of bridge structures.

In this study, VES-LMC overlay, which provides the same benefits as a conventional overlay, is designed to cure very quickly. Although the materials for VES overlays are more expensive, the cost is more than offset by the savings on traffic control and work zone safety measures. Otherwise, reaction of hydration occurs very rapidly in beginning step(concrete placing). As a results, thermal cracking can be occur by thermal stress in accordance with hydration-heat

The purpose of this study was to estimate diagnosis of crack occurrence of VES-LMC through field tests at early-age.

키워드 : 초속경 라텍스계질 콘크리트, 온도균열, 현장실험

Keywords : *very-early strength latex modified concrete, thermal cracking, field tests*

1. 서론

콘크리트 구조물에 균열이 발생하면, 구조적 결함, 내구성 저하, 외관손상 및 철근부식 및 방수성능 저하 등으로 치명적인 손실을 초래할 수 있기 때문에, 설계초기 단계부터 콘크리트의 재료선정, 배합설계, 시공 및 구조물 평가에 주의를 기울여야 한다. 특히, 콘크리트 균열발생에 따른 클레임 문제도 많이 제기되고 있기 때문에, 콘크리트의 균열 발생 메커니즘을 명확하게 이해하고 각각의 균열 발생 원인을 분석하고 이에 따른 방지대책을 검토하여 최대한 억제할 수 있는 방안이 필요하다[2].

콘크리트의 균열은 설계하중, 외적환경의 원인, 재료특성, 배합조건 및 시공적인 요인에 의하여 많이 발생한다. 실제로 균열은 크게 구조적인 균열(structural crack)과 비구조적 균열(nonstructural crack)의 두 가지로 분류할 수 있다[3][4].

구조적인 균열은 구조물이나 구조부재가 사용하중에 대해 구조적으로 지지하지 못할 때 발생하는 균열을 의미한다. 이러한 균열은 설계오류·설계하중을 초과한 외부하중의 작용, 시공불량, 물리적인 손상·폭발·충격, 철근부식으로 인한 성능저하 등에 의해서 발생한다.

균열발생의 메커니즘은 일반적으로 미세균열(microscopic level)의 측면에서 접근하는 것이 바람직하다. 콘크리트 구조물에 하중이 증가하면 모르타르와 골재의 부착계면에 미세균열이 발생되어

* 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

서서히 진행된다. 또한, 하중이 작용되기 전에도 건조수축 과정의 체적변화로 인하여 모르타르와 골재사이의 부착균열이 발생될 수 있다. 콘크리트는 복합재료로 구성되기 때문에 비선형 성질로 인하여 이러한 부착균열이 발생하며, 특히 시멘트-페이스트가 콘크리트의 균열 및 응력-변형곡선을 결정하는 주요 요인이 된다. 이러한 균열발생의 메커니즘을 가장 쉽게 이해할 수 있는 것은 구조물에 작용하는 주응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하는 순간에 균열이 발생한다고 보는 것이다. 즉, 콘크리트 구조물에 어떠한 형태의 하중이 작용하더라도 균열은 콘크리트 부재의 인장변형도에 의해서 발생한다. 따라서 인장응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하지 않도록 재료선정, 배합설계, 현장 시공 및 품질관리를 하는 것이 중요하다.

최근에 와서 고강도·고유동·고성능 콘크리트가 개발되고 실용화되면서 콘크리트 분야의 기술이 선진화·합리화되고 있는 것은 주지의 사실이지만, 콘크리트의 균열발생에 대한 문제는 아직도 숙제로 남아있다. 지금까지 현장에서 균열이 발생하면 정확한 원인규명 및 재발방지를 위한 노력이 선행되어야 하는데, 사실은 책임전가 또는 임기응변적인 대책으로 소홀히 넘어가는 경우가 많았다. 이러한 문제는 콘크리트 산업과 관련된 모든 엔지니어에게 해결해야 할 과제로 남아있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 먼저 콘크리트의 재료에 대한 이해가 필요하다. 특히, 매스콘크리트·고강도 콘크리트·고유동 콘크리트와 같이 재료적 특성을 먼저 이해해야 하는 구조물들이 많이 건설되고 있기 때문에, 시멘트의 종류·사용량, 배합조건에 대한 최적성, 환경조건(한중 콘크리트 및 서중 콘크리트)에 대한 시공적 측면의 접근이 필요한 실정이다.

두 번째로 콘크리트의 균열이 발생하면 무조건 재료 또는 배합설계의 원인으로 간주하려는 시공자의 마인드가 문제이다. 양질의 콘크리트도 타설·다짐·양생의 불량으로 인하여 균열이 발생하는 경우가 많기 때문에, 면밀한 시공계획과 충분한 다짐, 철저한 양생계획도 콘크리트의 균열을 방지하는 방안이 될 수 있다는 것을 간과해서는 안 될 것이다.

2. 열응력 및 온도균열(Cracking)

2.1 수화열에 의한 온도균열

시멘트와 물이 만나면 수화반응을 하게 되는데, 이때 반응열인 수화열이 발생하게 된다. 특히, 콘크리트는 열전도율이 낮기 때문에 경화되면서 발생하는 수화열이 외부의 노출부위로 발산되는데 많은 시간이 필요하다. 수화열에 의한 균열은 담, 교량의 하부구조, 도로포장, 옹벽, 원자력 발전소

구조물과 같은 매스콘크리트 구조물에서 발생될 가능성이 높으며, 최근에 많이 건설되는 LNG 저장탱크의 지하연속벽, 본체 구조물 및 건축물의 고층화 추세에 따른 하부의 매트부분에서도 수화열에 의한 균열이 문제시되고 있다[4].

일반적으로 콘크리트에서 발생한 열이 외부로 발산하는데 필요한 시간은 구조물의 최소치수의 계급에 비례하며, 동일구조물에서 수화열에 의해 발생한 콘크리트의 온도차가 25~30℃ 정도에 도달하면 열응력에 의한 온도균열이 발생한다. 특히, 수화열에 의해 발생한 인장응력은 경화후에도 잔류응력으로 남기 때문에, 주변의 콘크리트에 구속조건으로 작용하게 되어 구조물의 균열, 안전성, 내구성 및 방수성에 영향을 미치게 된다.

2.2 열응력에 의한 균열

시멘트의 수화는 발열을 수반하는 화학반응이기 때문에 콘크리트는 경화과정에서 온도상승을 일으킨다. 온도상승은 강도발현을 비롯해서 콘크리트의 제 성질에 영향을 미치며 또한 균열발생의 원인이 된다. 온도상승에 의한 균열을 온도균열이라고 하며 온도 강하시에 발생하는 수축이 구속되어 발생하는 인장응력, 단면내의 온도차에 의한 인장응력 등이 원인이 되어 생기는 것이며 온도상승 외에 구속의 정도에 큰 영향을 받는다.

2.3 온도균열

2.3.1 내부구속응력에 의한 균열

내부구속응력은 콘크리트의 내부와 표면과의 온도가 다른 것에 의해 생기는 것이다. Figure 2.6에서 보는 바와 같이 상대적으로 온도가 낮은 표면부분의 콘크리트가 수축하려고 하는 것을 온도가 높은 내부의 콘크리트가 구속하여 표면부에 인장응력이 작용하고, 균열이 발생하게 되는 것이다. 표면과 내부의 온도차는 콘크리트 내부온도가 피크에 달하였을 때 최대가 되는 경우가 많으며, 균열은 콘크리트 온도가 최대가 되는 재령 1~5일 또는 거푸집의 해체 직후에 생기기 쉽다. 균열폭은 0.1~0.3mm 정도로서 규칙성은 없고, 또 단면을 관통하지 않는다. 그러나 내부구속에 의해 표면에 발생한 균열이 건조수축이나 외부구속에 의해 커다란 관통 균열로 진전되기도 하기 때문에 주의가 필요하다.

2.3.2 외부구속응력에 의한 균열

외부구속에 의한 균열은 타설한 콘크리트의 열변형이 지반 또는 기타설한 콘크리트에 의해 구속되어 발생한다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 타설된

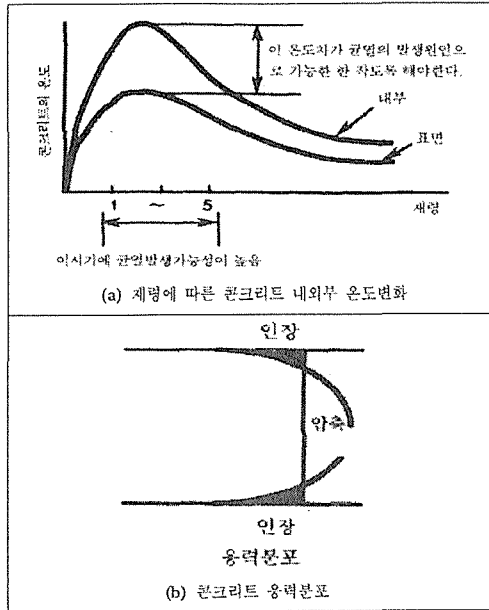


그림 1 내부구축응력 발생기구[5]

콘크리트는 온도가 최고치에 도달한 후에 최종적으로 외기온과 같을 때까지 온도가 내려간다. 표면에는 인장응력이 발생하고 중앙에는 압축응력이 발생하게 되고, 이 온도강하에 의해 콘크리트의 체적은 수축하지만, 이것이 하층의 콘크리트 혹은 지반에 구속되어; 외부구축균열이 발생하게 되는 것이다.

외부구축균열은 균열의 폭이 0.2~0.5mm, 혹은 그 이상이 되고 많은 경우에는 세로로 곧게 뻗은 관통균열이 되기도 한다.

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 경화된 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, 하중과다 또는 과격한 기계진동에 의한 균열, 지진 충격 등의 우발사고에 의한 균열 등으로 구분할 수 있다[4].

3. 실험개요

3.1 개요

콘크리트의 균열발생 원인으로서는 여러 가지가 있겠으나, 콘크리트 타설 초기에 발생하는 균열의 대부분은 초기 수화열과 건조수축에 기인한다. 특히나 속경성의 특성을 갖는 VES-LMC와 같은 경우 수화발열로 인한 온도균열이 일어날 가능성이 상당히 농후하다. 따라서 현장에서의 온도이력은 해석적 관점에서 간과되어서는 안 될 인자이다.

수화발열 온도변화로 인한 균열발생 메커니즘은 온도변화, 열팽창계수, 탄성계수를 고려한 열응력과 해당 제형에 따른 콘크리트 인장강도의 관계에서 시작한다. 수화발열로 인해 발생하는 열응력이 콘크리트의 인장강도보다 크게 되면 균열이 발생하게 되고, 그렇지 않은 경우에는 균열에 안전하게 된다. 그러나 이러한 영향은 초기수축과 크리프의 영향에 지배받기 때문에 정량적으로 평가하기에는 약간의 문제점을 안고 있다. 그러나 총체적인 평가에 앞서 수행되어야 할 항목들은 항상 작은 것에서 시작한다는 것을 잊어서는 안 될 것이다. 열팽창계수, 탄성계수 및 인장강도와 같은 항목은 재료의 고유한 성질이므로 이미 알고 있는 값에 해당한다. 온도변화의 경우는 많은 경우의 수가 존재하게 되므로, 먼저 온도변화로 명명되는 온도차의 정의를 설정하는 것이 중요하다. 보수체를 기준으로 발생할 수 있는 온도차는 콘크리트 내부 층간의 온도차, 내부 콘크리트와 외부 대기온도(슬래브 최하층 온도)와의 온도차, 모체 콘크리트와 보수층과의 온도차 등 크게 3가지로 나눌 수 있다. 이 중 가장 최악의 온도경사를 나타내는 경우는 보수 콘크리트와 대기온도와 유사한 슬래브 최하층의 온도차이다. 따라서 본 장에 사용되는 온도차는 최악의 경우를 고려하여 보수 콘크리트의 내부 수화발열온도와 당시의 외기온도와의 차를 온도경사로 사용하였다.

3.2 해석상 가정

열응력과 콘크리트 인장강도와의 단순비교를 통하여 균열발생 가능성을 판단하기 위해서는 몇 가지 가정이 필요하다.

a. VES-LMC의 탄성계수는 일반식을 적용하여 산

- 출 가능하다.
- b. 열팽창계수는 재령에 관계없이 일정한 것으로 가정한다.
- c. 콘크리트 인장강도의 실험치의 비를 적용한다.
- d. 초기 변형인 자기변형과 건조수축으로 인한 영향을 무시한다.
- e. 크리프의 영향은 무시한다.

3.3 현장실험

VES-LMC의 균열발생 원인을 규명하기 위하여 현장에서 직접 온도데이터를 획득하였다. 데이터 수집 방법으로는 아이버튼(i-button)을 사용하였고, 초기 온도는 5분에 한 번씩, 장기온도는 2시간에 한 번씩 각각 측정하였다.

수화열 온도 조절을 위하여 타설 시기를 야간과 오전으로 나누어 측정하였다. 콘크리트의 압축강도를 평가하기 위한 방법으로는 슈미트해머를 이용한 반발경도를 이용하여 강도를 산출하였다. 초음파를 이용한 방법도 병행하였으나 차량 하중에 의한 진동 등의 영향으로 정확한 데이터가 습득되지는 않았다.

대상 교량은 영동고속도로 상행선에 위치한 진부교를 선정하였고, 실험은 2005년 11월 8일 22시와 11월 9일 10시 두 차례에 걸쳐 실시하였다.

4. 실험결과

4.1 초기 및 일간 온도변화

그림 2는 콘크리트의 온도를 측정하기 위해 준비된 i-button 매립전경을 나타내는 사진이다.

콘크리트 층간 온도변화를 확인하기 위해 모체 콘크리트는 보수 바닥면으로부터 하층(-5cm)에 설치하였고, 보수 VES-LMC의 온도는 바닥면(0cm), 중앙(4cm), 표면(8cm)에서 각각 측정하였다. 대기 온도는 팽창조인트 부분과 방호벽에서 측정하였다.

VES-LMC의 일간온도변화(야간타설)를 그림 2에 나타내었다. 초기 수화발열온도와 콘크리트 온도는 재령 약 8시간에서 일치하는 것으로 나타났다. 그래프에서 알 수 있듯이 콘크리트의 온도는 재령 6시간이 지나면서부터 거의 유사한 온도분포를 나타내고 있다. 더불어 예상했던 바와 같이 재령 6시간까지의 온도차가 가장 크게 발생 하였다.

최고 온도차는 콘크리타설 약 2.5시간이 경과한 시점에서 발생하였다. 콘크리트 타설 약 12시간 후에는 더 이상의 수화열이 발생하지 않아 콘크리트의 온도는 대기온도에 지배받음을 알 수 있다.

그림 4는 오전에 타설된 VES-LMC의 온도이력을 나타내는 그래프이다. 콘크리트의 온도는 야간 타설 경우와 유사한 경향을 보이고 있다.

4.2 슈미트해머를 이용한 강도추정

VES-LMC 보수체의 시간에 따른 강도변화를 효율적으로 평가하기 위해 비파괴 기법을 이용하였다. 대상지점을 선정된 후 25회에서 30회 가량 타격하여 반발경도를 측정하였고, 강도계산식은 일본 동경도를 사용하였다. 그림 5는 야간 및 오전에 타설된 VES-LMC의 압축강도를 나타내는 그래프이다.

4.3 수화열을 고려한 균열발생여부 판단

4.3.1 온도균열지수를 고려한 균열발생가능성 판단
수화열에서 비롯된 온도분포로 인해 발생하는 온도응력과 해당재령에서의 콘크리트 인장강도와 비교를 통해 균열발생여부를 판단할 수 있다. 콘크리트에서 발생하는 온도균열은 온도균열지수로써 평가하는 것을 원칙으로 하며, 이 때 자기수축과 건조수축의 영향도 고려하여야 하지만, 본 연구에서는 생략하기로 한다. 온도균열지수는 콘크리트 인장강도와 수화열에 의한 온도응력의 비로서 구한다[5].

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_t(t)} \quad (1)$$

여기서,

$I_{cr}(t)$: 재령 t일에서의 온도균열지수

$f_{sp}(t)$: 재령 t일에서의 콘크리트 인장강도

$f_t(t)$: 재령 t일에서의 수화열에 의하여 생긴 부재의 온도응력 최대값

표 1 온도균열지수와 온도균열 발생

분 류	온도균열지수
균열을 방지하고 싶은 경우	1.5 이상
균열발생을 가능한 한 제한하고 싶은 경우	1.2 이상 1.5 미만
균열 발생을 허용하지만, 균열폭이 과대하게 되지 않도록 제한하고 싶은 경우	0.7 이상 1.2 미만
유해한 균열 발생	0.7 미만

온도응력 산정을 위해서는 외부의 구속 조건과 초기 조건을 고려하여 유한요소해석을 실시하여야 하나, 본 장에서는 간편식(열 변형률 × 탄성계수 = 열응력)을 사용하여 응력을 산출하였다.

온도균열지수는 표 1과 같이 균열 발생 여부를 나타내는 지수로 사용되며, 그 값이 클수록 균열이 생기기 어렵고, 그 값이 작을수록 균열이 생기기 쉽다. 일반적으로 온도균열지수가 작으면 발생하는 균열의 수도 많고 균열폭도 커지는 경향이 있다.

콘크리트의 인장강도는 압축강도의 12.65%를 사

용하였다. 사용된 인장강도는 VES-LMC 압축강도에 대한 쪼갬인장강도의 비로서 실험을 통해 획득된 실험치를 적용하였다[1]. 표 2는 개요에서 거론된 가정을 토대로 콘크리트에 발생하는 열응력을 계산한 테이블이며, 각각 재령에서의 인장강도와와의 비교를 통해서 균열발생 가능성을 판단할 수 있는 온도균열지수를 계산하였다. 더불어 실험실에서 수행된 자기수축실험에서 획득된 자기변형률을 고려하여 수축응력을 산출하였고, 수축응력과 콘크리트 인장강도와와의 비교를 통하여 균열발생 가능성을 판단하는 연구도 병행하였다. 이러한 온도경사와 수축으로 인한 영향이 크리프라는 변형률 증가현상으로 인해 응력이 분산되기는 하지만 본 장에서는 앞서 언급된 바와 같이 최악의 조건이 고려된다. 즉 크리프 및 바닥판 구속으로 인한 응력분산의 영향은 무시되는 것이다.

표 2에서 볼 수 있듯이 콘크리트 타설 4시간까지 열응력으로 인해 균열이 발생할 수 있다는 해석결과가 도출되었다. 즉 열에 의한 영향에서 자유롭지 못함을 의미한다. 그러나 현장 균열조사 결과 초기에 육안상 구별 가능한 균열은 전혀 확인되지 않았다. 이러한 결과는 두 가지 경우로 나누어 생각할 수 있는데, 첫 째로는 응력분산, 크리프 및 수축과의 상충작용으로 인해 보수체에 전혀 균열이 발생하지 않은 경우이고, 둘째로는 보수체 내부의 수화발열 온도가 가장 높게 발생한 시기에(온도경사가 가장 큰 시기) 육안상 확인되지 않는 미세균열(Micro-cracking)이 발생한 경우이다.

VES-LMC 보수 후 약 일주일이 경과한 후 횡방향 균열 등이 일부 관찰되는 것으로 보아 후자쪽에 신빙성이 더해지고, 이렇게 발생한 미세균열 부위에 차량하중 및 진동의 영향이 지속적으로 누적되어 매크로균열(Macro-cracking)의 형태로 성장하는 것으로 생각된다.

4.3.2 수축균열지수를 고려한 균열발생가능성 판단

표 2에서 두 번째로 비교대상이 되었던 수축의 영향이다. 수축으로 인해 발생하는 변형률은 앞서 언급하였듯이 크리프 영향에 지배받게 되므로 수축응력과 콘크리트 인장강도와와의 단순비교는 무의미할 수 있다. 그러나 수축균열발생 가능성 평가 측면에서는 상당히 유용한 정보로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 단순 초기수축만을 고려하여 산출된 수축응력과 콘크리트 인장강도와와의 비를 아래 식 (2)와 같이 계산하여 수축균열지수개념을 도입하여 균열발생 가능성을 판단하였다.

$$I_s(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_s(t)} \quad (2)$$

여기서,

$I_s(t)$: 재령 t일에서의 수축균열지수

$f_{sp}(t)$: 재령 t일에서의 콘크리트 인장강도

$f_s(t)$: 재령 t일에서의 수축으로 인해

발생하는 수축응력 최대값

수축으로 인한 수축응력은 콘크리트타설 약 19시간이 경과하면서부터 콘크리트 인장강도 범위를 넘어서는 것으로 평가되었다. 그러나 미국의 경우 보수재료로써 팽창제가 투입된 콘크리트의 최대수축률을 0.04% 범위로 규정하는 것에 비추어 볼 때 [6], VES-LMC의 초기 수축률 0.04% 이내인 것으로 평가되어 안전측이라 할 수 있다.

이와 같이 초기수축으로 인해 발생하는 초기 수축응력 요인에 의해 균열이 발생하지 않을 것이라 유추할 수는 있으나, 초기 수화발열온도와 대기온도와의 온도경사에 의해 콘크리트 내부에 미세균열이 발생하였다고 가정할 때, 재령 19시간 즈음에 발생하는 최대수축응력은 미세균열 발생부위를 따라 응력집중 현상을 가져와 메조단계의 균열(Meso-Cracking)로 성장하게 하는 원인을 제공하게 된다.

따라서 궁극적으로 균열발생 원인을 제거하기 위해서는 초결이후 발생하는 초기팽창량을 최소화 하면서(구조물에 유해한 팽창으로 사료됨) 수축을 최소화 할 수 있는 방법이 강구되어야 할 것이다. 최종적으로는 무수축 VES-LMC 생산에 초점이 맞춰줘야 할 것이고, 이는 VES-Cement의 개량으로 실현가능하리라 예상된다.

5. 균열저항성 증진대책

미세균열 발생을 최소화하기 위해서는 초기 6시간 동안의 양생관리를 철저히 하고 수화발열 온도를 낮추는 방법이 있을 수 있다. 천막을 설치하여 대기온도를 상승시키는 방법을 고려해 볼 수 있으나, 이러한 방법은 콘크리트의 수화발열 온도를 동시에 상승시키는 결과를 초래하므로 추천할 만한 방법은 아니라 하겠다.

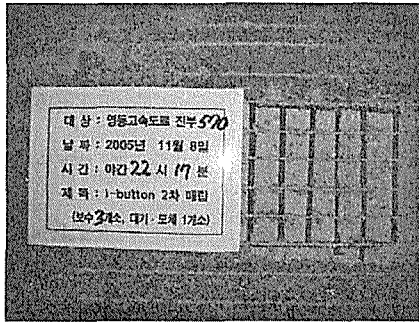
그림 6은 해당재령에서의 콘크리트의 인장강도, 열응력 및 수축응력을 한 눈에 알아볼 수 있도록 표현한 그래프이며, 온도로 인한 온도응력은 초기 조건에 상당한 영향을 미치고, 수축으로 인한 수축응력은 20시간 이후의 재령에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

VES-LMC의 초기균열발생 원인이 수화열과 수축으로 인한 미세균열에 있다고 가정할 때, 그림 6에서 얻을 수 있는 항목은 현장에서의 콘크리트 타설 후 중점관리시기 결정할 수 있다는 것이다.

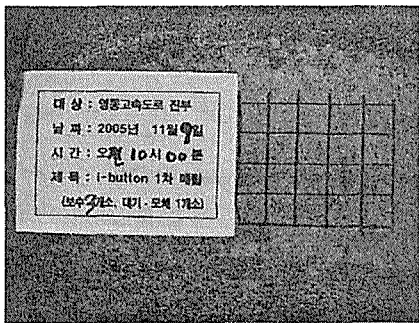
초기양생관리는 이미 언급하였고, 보다 긴 습윤양생을 통한 건조수축 발생을 억제하기 위해 교통개방 직전까지도 습윤 양생을 실시하는 방법을 모색하여야 할 것이다.

표 2 VES-LMC 수축·온도균열지수(최악의 경우)

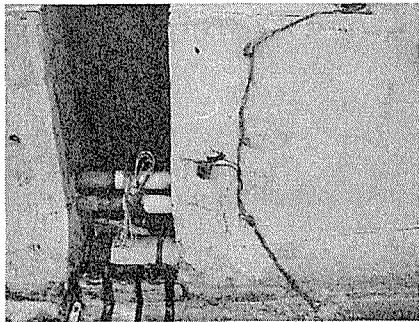
시간(hr)	열변형률 (μs)	수축변형률 (μs)	탄성계수 [MPa]	콘크리트 인장강도	열응력	수축응력	온도균열 지수(I_{cr})	수축균열 지수(I_s)
0.0	0							
0.5	54							
1.0	57							
1.5	61							
2.0	79							
2.5	118							
3.0	168							
3.5	183		26,103	3.93	4.77	0.00	0.8	-
4.0	179	35	26,635	4.17	4.77	0.93	0.9	4.5
4.5	161	76	27,167	4.40	4.38	2.08	1.0	2.1
5.0	150	103	27,399	4.51	4.12	2.82	1.1	1.6
5.5	140	118	27,632	4.62	3.86	3.26	1.2	1.4
6.0	129	131	27,864	4.73	3.59	3.64	1.3	1.3
6.5	125	138	28,096	4.83	3.52	3.88	1.4	1.2
7.0	115	144	28,102	4.84	3.22	4.06	1.5	1.2
7.5	107	149	28,107	4.84	3.02	4.18	1.6	1.2
8.0	100	152	28,113	4.84	2.82	4.27	1.7	1.1
8.5	90	155	28,119	4.84	2.52	4.36	1.9	1.1
9.0	82	157	28,125	4.85	2.32	4.42	2.1	1.1
9.5	39	161	28,130	4.85	1.11	4.54	4.4	1.1
10.0	21	160	28,136	4.85	0.60	4.51	-	1.1
10.5	11	166	28,142	4.85	0.30	4.66	-	1.0
11.0	-4	166	28,147	4.86	-0.10	4.66	-	1.0
11.5	-14	165	28,153	4.86	-0.40	4.63	-	1.0
12.0	-14	167	28,159	4.86	-0.40	4.69	-	1.0
12.5	-21	168	28,165	4.87	-0.60	4.72	-	1.0
13.0	-14	168	28,170	4.87	-0.40	4.72	-	1.0
14.0	-7	170	28,176	4.87	-0.20	4.79	-	1.0
15.0	-11	171	28,282	4.97	-0.30	4.83	-	1.0
16.0	-11	172	28,387	4.92	-0.30	4.88	-	1.0
17.3	50	170	28,493	5.02	1.43	4.84	-	1.0
18.3	47	171	28,493	5.02	1.33	4.87	-	1.0
19.3	47	177	28,493	5.02	1.33	5.05	-	1.0
20.3	43	180	28,493	5.02	1.22	5.14	-	1.0
21.3	39	179	28,493	5.02	1.12	5.11	-	1.0
22.3	36	182	28,493	5.02	1.02	5.17	-	1.0
23.3	32	178	28,493	5.02	0.92	5.08	-	1.0
24.3	36	182	28,493	5.02	1.02	5.17	-	1.0



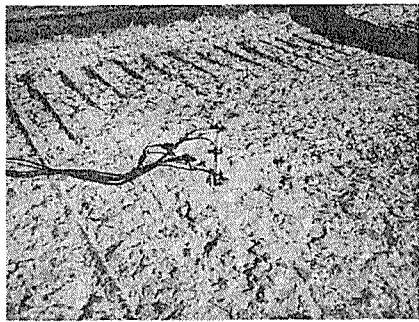
2005년 11월 8일 22시 1차 측정



2005년 11월 9일 10시 2차 측정



i-button 처리 전경



i-button 깊이별 매립 전경

그림 2 진부교 i-button 매립 전경

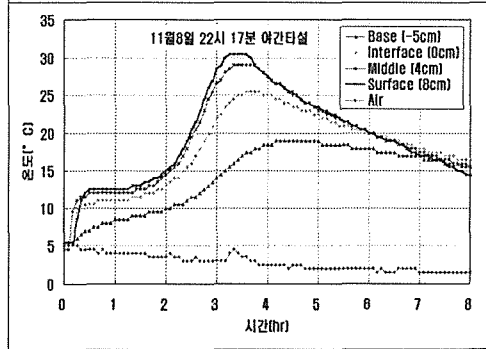
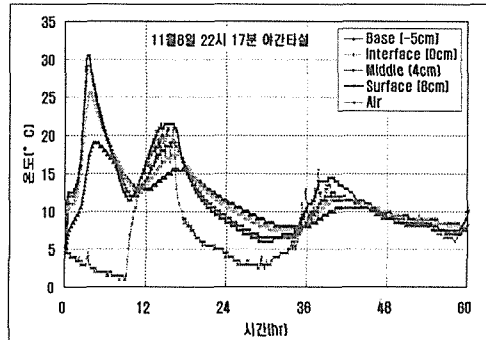


그림 3 야간 시공 온도이력(05.11.08)

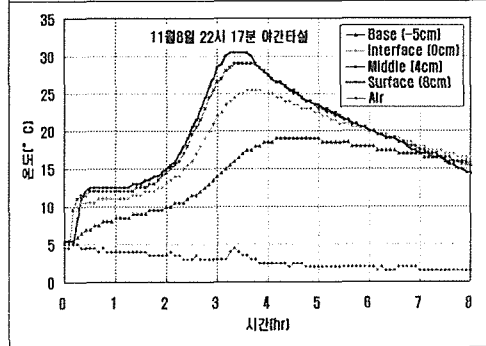
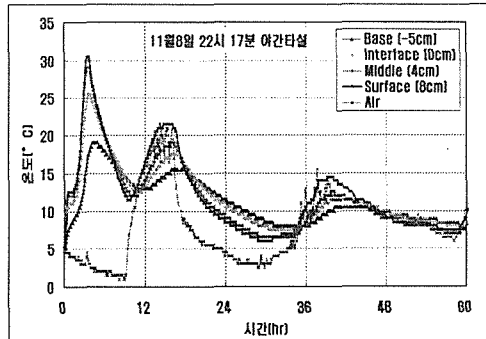


그림 4 오전 시공 온도이력(05.11.09)

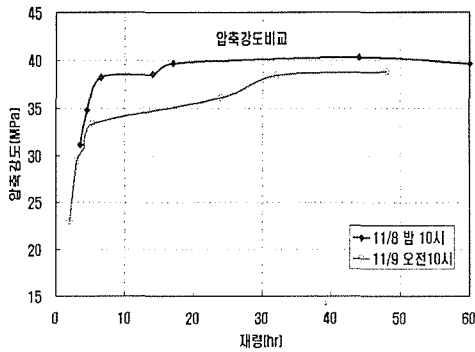


그림 5 타설시기별 압축강도 변화(야간-오전)

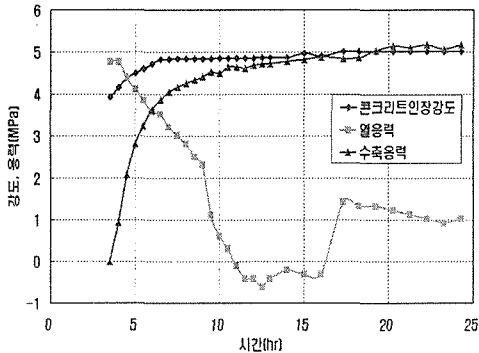


그림 6 VES-LMC 인장강도, 온도응력 및 수축응력 관계비교(최악의 경우)

6. 결 론

본 논문에서는 VES-LMC의 균열발생 원인을 분석하기 위하여 현장에서의 콘크리트 온도데이터와 압축강도를 이용하였다. 실험결과 초기균열의 주원인은 수화열인 것으로 분석되었다. 이상에 대한 결론을 간략히 요약하면 다음과 같다.

- (1) 콘크리트 타설후 최고 온도차는 약 2.5시간이 경과한 시점에서 발생하였고, 12시간 후에는 더 이상의 수화열이 발생하지 않아 콘크리트의 온도는 대기온도에 지배받음을 알 수 있었다.
- (2) 열응력 해석결과 콘크리트 타설 4시간까지 균열이 발생할 수 있는 것으로 나타나 수화열에 의한 온도응력이 초기균열발생의 원인인 것으로 판명되었다.

- (3) 현장 균열조사 결과 초기에 육안상 구별 가능한 균열은 전혀 확인되지 않았고, 이는 육안상 확인되지 않는 미세균열이 발생한 것으로 평가되었다.
- (4) VES-LMC 균열발생 가능성은 타설 초기 단계의 온도응력과 20시간 이후의 재령에서의 수축응력에 기인하는 것으로 평가되었다.
- (5) VES-LMC의 균열발생을 억제하기 위해서는 초기양생관리를 비롯하여, 보다 긴 습윤 양생이 필요하고, 수화발열온도 저감방안이 마련되어야 한다.

참 고 문 헌

- [1] 윤경구 외, “초속경라텍스개질콘크리트를 이용한 공용 중 교량바닥판콘크리트 보수 및 채포장 공법”, 신기술지평 제427호, pp. 43~47, 2004
- [2] 오광진, “콘크리트구조물의 균열평가 및 보수보강”, 시설안전기술공단, pp.5~12, 2002
- [3] 최판길, “초속경 라텍스개질 콘크리트의 초기 및 구속건조수축특성” 공학석사학위 논문, 강원대학교 대학원, pp. 43~53, 2005
- [4] 추영수 역, “콘크리트의 균열조사 보수·보강 지침”, 건설도서, pp. 3~10, 1998
- [5] 한국콘크리트학회, “수처리 콘크리트 구조물의 균열 저감을 위한 설계/시공 지침”, pp. 43~49, 2004
- [6] PAUL D. KRAUSS et al., “Transverse Cracking in Newly Constructed Bridge Decks”, NCHRP Report 380, pp.22~30, 1996

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 CTRM 연구과제, “장수명·친환경 도로포장 재료 및 설계시공기술 개발”의 일환으로 수행되었음