

매스콘크리트구조물의 온도응력평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Thermal Stress of Massive Concrete Structure

강석화*

정철현**

Kang, Suck Hwa Chung, Chul Hun

정한중**

이용호***

박철림****

Jeong, Han Jung Lee, Yong Ho Park, Chil Lim

요 약

온도균열은 시멘트의 수화열에 의한 온도응력이 콘크리트의 인장강도보다 커질 경우에 발생하는 균열로서, 구조물의 수밀성과 기밀성등에 중대한 영향을 미치기 때문에 매스콘크리트와 같이 단면이 큰 구조물의 설계 및 시공시에는 반드시 온도균열에 대한 배려가 필요하다. 본 연구에서는 모의실험체를 대상으로 하여 매스콘크리트의 경화시 발생하는 온도응력을 측정할 목적으로 콘크리트변형계와 부응력계 그리고 유효응력계등을 설치하여 구조물 내부의 온도응력의 경시변화를 검토하고 콘크리트변형계를 이용한 온도응력 산정방법 및 문제점등에 대하여 검토하였다.

연구결과 콘크리트변형계와 부응력계를 이용한 새로운 온도응력 산정법을 제시하였으며, 그 결과 유효응력계의 측정치와 거의 일치하는 값을 얻을 수 있었다. 이를 위해서는 부응력계 또는 이와 동일하게 초기재령시의 콘크리트 자기수축변형률을 측정할 수 있는 게이지의 설치가 전제가 되어야 하며, 초기재령시의 건조수축량에 대한 정량화가 가능하다면 콘크리트변형계를 이용한 온도응력의 산정도 충분히 가능하다는 것을 알 수 있었다.

Abstract

Thermal cracks are occurred when thermal stress due to the hydration of cement exceeds the tensile strength of concrete. Since cracking causes poor durability of concrete, the effect of thermal cracking should be included for the design and construction of massive concrete structures.

In this study, an experiment is performed for the investigation of time dependent thermal stress history. In order to evaluate thermal stress, two methods are employed. One is the evaluation method of thermal stress based on the measurement from embedment strain gauge with non-stress strain gauge and the other is based on the measurement from concrete stress gauge.

As a result of this study, the value corrected by the former shows good agreement with the latter. The validity of the proposed method for the evaluation of thermal stress is explored.

Keywords : mass concrete, thermal stress, concrete stress gauge, hydration heat

* 정회원, (주)대우건설기술연구소, 책임연구원

** 정회원, (주)대우건설기술연구소, 선임연구원

*** 정회원, (주)대우건설기술연구소, 연구원

**** 정회원, (주)대우건설기술연구소 소장, 직무이사

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 1995년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

예전에는 매스콘크리트라 하면 그 대표적인 예가 댐 구조물이었다. 최근 콘크리트구조물의 대형화 및 다양화추세에 따라 장대교량의 하부구조물, 원자로 격납용기나 LNG탱크와 같은 격납용기 초고층건축의 지중보와 같은 지중구조물등이 많이 건설되고 있으며, 이러한 대형구조물의 시공시 수화열에 기인하는 온도응력이 문제가 되고 있다.

매스콘크리트에서 온도응력은 구조물 내외부의 온도차에 의해 발생하는 응력과 외부의 구속에 의해 발생하는 응력이 복합되어 발생하는 응력으로서 온도균열은 이러한 온도응력이 콘크리트의 인장강도보다 커질 경우에 발생한다. 이 때에 발생한 온도균열은 구조물의 수밀성과 기밀성등에 중대한 영향을 미치고 온도응력은 일부가 균열발생에 의해 소멸되는 경우도 있지만, 구조물 내부에 그대로 잔존하여 사용상태의 구조물의 내력에도 영향을 미치는 경우가 있다. 따라서 매스콘크리트 구조물 시공시에는 온도응력의 크기 및 균열발생 유무를 정확히 밝혀 이에 따른 적절한 시공대책을 세우는 것이 매우 중요하다.

한편, 매스콘크리트의 온도응력을 추정하는 방법에는 온도응력의 발생 메카니즘에 의거하여 응력을 해석적으로 평가하는 방법⁽¹⁾과 실구조물에 직접 매립형 콘크리트변형계(이하 콘크리트변형계라 약칭)나 유효응력계를 설치하여 측정하는 실험적인 방법⁽²⁾이 있다.

필자들은 실구조물 내부의 수화열분포 및 온도응력의 분포양상을 파악하기 위하여 실구조물의 최소치수를 고려한 모의실험체를 제작하여, 전보⁽³⁾에서 수화열분포에 영향을 미치는 인자들에 대해서 이미 보고한 바 있다.

본 연구에서는 모의실험체를 대상으로 하여 매스콘크리트의 경화시 발생하는 온도응력을 측정할 목적으로 콘크리트변형계와 부응력계 그리고 유효응력계등을 설치하여 구조물 내부의 온도응력의 경시변화를 검토하고 콘크리트변형계를 이용한 온도응력 측정방법 및 문제점등에 대하여 검토하였다.

2. 현행의 온도응력 평가방식의 문제점

2.1 해석적인 방법

해석적인 방법에는 수화열해석과 온도응력해석 모두를 유한요소법과 같은 수치해석법을 이용하여 추정하는 방법⁽⁴⁾과 구조물내의 온도분포로부터 간단히 온도응력을 계산하는 간이법⁽⁵⁾ 그리고 수화열의 분포는 수치해석 또는 간이법을 통해 구하고 온도응력은 계산을 하지 않고 그 대신 간단한 수식을 이용해 균열발생여부를 평가하는 방법⁽⁶⁾ 등이 있다. 이 중에서 유한요소법을 이용한 방법이 콘크리트 타설시 콘크리트의 1회 타설량, 타설간격, 그리고 타설온도등을 다양하게 변화시켜 최적의 시공조건을 찾는 데 매우 효과적이기 때문에 현실적으로 가장 많이 사용되고 있다.

그러나, 일반적인 구조해석에 많이 사용되고 있는 ADINA등과 같은 범용유한요소해석 프로그램은 온도응력을 해석하는 데는 적절하지 못하다. 그것은 콘크리트의 초기재령시에는 탄성계수가 재령과 더불어 계속 증대하지만, 일반 구조해석 프로그램에서는 시간경과에 따른 재료의 물성변화를 고려할 수가 없으며, 또한 시간경과에 따른 크리프의 영향을 적절히 고려할 수 없기 때문이다. 따라서 범용프로그램을 사용하여 해석하고자 할 경우에는 사용자가 탄성계수를 정의하여 각시간 스텝마다 그 시점에서의 탄성계수를 계산하여 응력의 증분량을 산출하여 그 시점까지의 응력값에 더해 가는 이른바 Step by Step Method로 계산하지 않으면 안된다.^(7,8)

또한 위와 같은 해석기법에 관한 문제가 해결되었다 하더라도 근본적으로 해석적인 방법은 해석상의 그 한계를 가지고 있다. 다시 말해서 해석적인 방법은 실제의 상황에 대한 재현성이 있어야 하지만 콘크리트의 모든 물성이 시간에 따라 변하기 때문에 실제의 상황을 표현하기에 매우 어렵다. 예를 들어 타설높이가 높은 슬래브콘크리트를 한번에 타설하려 할 경우, 구조체의 콘크리트 타설시간은 최하부의 콘크리트가 타설된 시점을 기준으로 하여 입력하고 있지만, 타설면적이 상당히 넓게 되면 바닥면의 콘크리트를 타설하는 시점과

보일의 콘크리트를 타설하는 시점사이에는 타설량에 따라서는 12시간 이상의 상당한 시간차가 발생할 수도 있다.

이와 같은 해석시의 입력자료와 실제시공과의 불일치에 따른 문제점 외에도 암반의 탄성계수나 새롭게 타설한 콘크리트의 경계면의 접착강도 등 온도응력에 크게 영향을 미치는 인자들에 대해서는 아직 정량적인 평가가 되어 있지 않은 상태이다.¹⁹⁾ 따라서 현실적으로는 콘크리트 타설을 전적으로 해석결과에 의존하기에는 많은 문제점을 내포하고 있기 때문에 아직까지는 참고자료로서 많이 활용되고 있는 상황이다.

2.2 실험적인 방법

실험적인 방법은 실구조물 또는 실구조물의 최소치수를 고려한 모의실험체를 제작하여 실제로 발생하는 온도응력을 측정하는 방법이다. 실구조물에 측정게이지를 직접 설치하여 온도응력을 측정하는 방법은 동일한 형상의 구조물을 다수 건설할 경우에는 매우 효과적이지만, 단일 구조물의 건설시에는 온도균열의 제어 보다는 발생양상을 파악하는데 그치기 때문에 그다지 바람직하지 않다.

한편, 경화된 콘크리트 구조물에서는 단지 변형률만 측정하면 그 값에 탄성계수를 곱하여 간단히 응력을 산출해 낼 수가 있다. 그러나 콘크리트의 수화열에 의한 온도응력은 콘크리트의 초기경화상태부터 완전경화에 이르기까지 재료의 물성이 변하기 때문에 콘크리트변형계를 설치하여 변형률을 측정할 경우에는 재령에 따른 탄성계수의 값을 측정 또는 산정하여 변형률값에 곱해야만 실제의 응력을 산출해 낼 수 있다.

그러나, 최근에는 이와 같은 문제점을 보완하여 콘크리트의 온도응력을 직접 측정하는 유효응력계(Photo. 1 참조)가 개발되어 많이 사용되고 있다. 기존의 콘크리트변형계는 변형률을 측정하여 응력으로 환산하도록 되어 있는데 반해, 유효응력계는 게이지에 설치된 로드 셀로 콘크리트에 작용하는 하중을 측정하여 단면적으로 나누어 곧바로 응력이 출력되도록 되어 있는 것이 특징이다. 또한, 온도변화에 따른 발생응력과 외부의 구속에

의해 발생하는 응력이 동시에 작용하는 경우에도 그 합계의 절대량을 그대로 측정할 수가 있고 출력값이 탄성계수의 영향을 전혀 받지 않기 때문에 매스콘크리트와 같이 초기재령시 탄성계수의 변화가 큰 경우에 주로 사용이 된다.

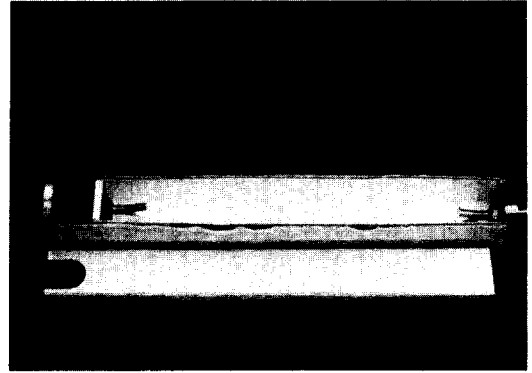


Photo. 1 Concrete stress gauge

이 응력계는 현재 일본의 東横ELMES사에서 특허로 등록, 매스콘크리트용과 쏫크리트용 등 두 가지를 독점 생산판매하고 있기 때문에 가격이 매우 비싸다는 단점이 있으며, 또한 ① 양측에 붙인 판과 앵커때문에 부분적으로 응력집중현상이 일어나고 ② 한쪽 판에 고정시킨 로드 셀이 축력이 외의 응력이나 변형을 받기 쉬우며 ③ 수분의 투과성이 불충분하며, ④ 내부의 콘크리트면을 싸고 있는 철망구조가 응력전달에 좋지 않은 영향을 미치며, ⑤ 사전에 콘크리트를 채워야 하고, 크기(5cm×5cm×50cm)가 매우 크기 때문에 설치상에 제약을 받는다는 점도 문제점으로 지적되고 있다.

3. 실험개요

3.1 공시체의 제원 및 형상

본 연구에서는 반력벽 구조물을 주요 검토대상으로 하여, 실구조물의 중앙부분과 내부온도분포가 유사하도록 크기 및 주변조건을 맞추어 모의실험체를 제작하였다. 모의실험체의 크기는 실구조물의 최소치수를 고려하여 2.5m×2.5m×1.0m로

정하였으며, 모의실험체의 좌우편은 길이방향으로 내부의 온도변화가 거의 없도록 하기 위하여 기존의 연구결과⁽¹⁰⁾를 토대로 하여 공기체의 좌우에 40cm두께의 스티로폼을 설치, 거의 단열에 가까운 상태를 유지시켰다. 또한 본 실험에서는 모의실험체의 제작에 앞서 하부에 3.5m×3.5m×0.3m의 크기로 콘크리트 기초를 제작하였다.

모의실험체의 자세한 형상은 Fig. 1과 같다.

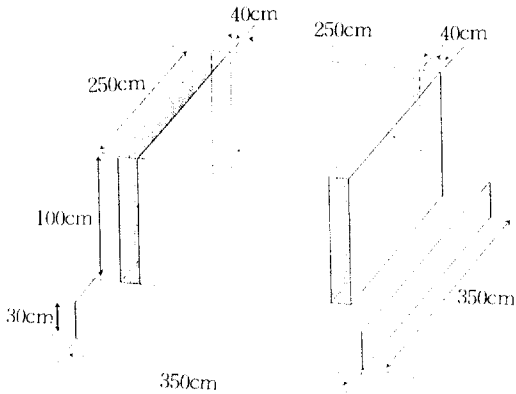


Fig. 1 Test specimen

3.2 사용재료

본 연구에서 모의실험체 제작에 사용한 콘크리트는 실구조물 타설에 사용하는 것과 동일한 재료로서, 설계기준강도가 350kg/cm²인 콘크리트이고, 37%의 낮은 물/결합재비를 만족시키기 위하여 고성능감수제 Darex super-20을 1.5% 혼입시켰다. 또한 콘크리트 경화시 콘크리트의 수화열에 의한 온도균열 발생을 억제하기 위하여 플라이애쉬(비중 : 2.16)를 전체 결합재량의 20%를 시멘트량과 대체시켜 혼입하였다.

실험체 제작에 사용한 콘크리트의 배합표는 Table 1과 같다.

Table 1 콘크리트의 시방배합표

W/B (%)	S/A (%)	SP (%)	W (kg/m ³)	Binder (kg/m ³)		Air Content (%)
				Cement	Fly Ash	
37.0	42.5	1.5	175	378.4	94.6	1.7

3.3 측정계이지의 설치 및 측정방법

모의실험체에 대한 주요한 측정 항목은 콘크리트의 변형률 및 자기수축변형률, 그리고 온도응력이며, 콘크리트변형계를 이용한 온도응력산정을 위해 콘크리트온도도 동일한 곳에서 측정하였다. 측정계이지는 실험체가 좌우대칭형이기 때문에 우측 1/4부분에 집중적으로 배치하였다.

(1) 콘크리트변형계의 설치

초기경화시의 실험체의 표면부와 중앙부의 변형률의 경시변화를 검토하기 위하여 콘크리트변형계(東京測器 : KM-100B)를 Fig. 2와 같이 총 8개를 설치하였다.

(2) 무응력계의 설치

콘크리트는 경화가 일어나면서 건조수축 및 온도변화에 의해 자기수축변형률이 발생하게 된다. 이 값을 측정하기 위해서 무응력계라는 특수한 계이지가 사용되는데, 이 계이지는 콘크리트변형계를 무응력통(東京測器 : KMF-51)에 집어넣어 외부로부터 힘이 작용하지 않고 건조수축변형률과 온도변화에 의한 변형률만 측정하도록 되어 있는 것이다. 본 실험에서는 콘크리트의 자기수축변형률을 측정하기 위하여 실험체의 표면 및 중앙부에 각각 1개씩 무응력계를 설치하였다.

(3) 유효응력계의 설치

본실험에서는 콘크리트내부에서 실제로 발생하는 응력을 측정하기 위하여 콘크리트 유효응력계(東横ELMES : GK-200-505)를 실험체의 상부와 중앙에 각각 하나씩 2개 설치하여 콘크리트변형계에 의한 측정치와 비교검토를 실시하였다.

변형률 및 온도응력의 측정을 위하여 모의실험체에 배치한 측정계이지의 설치위치는 Fig. 2와 같다.

(4) 데이터 측정

변형률 및 온도응력의 측정을 위해서 UCAM-10A(日本 共和電業社), 및 50A를 사용하였고 온도측정을 위해서는 50AT를 사용하였다. 데이터 측정은 수화현상이 가장 활발하게 일어나는 타설 후 3일간은 1시간 간격으로, 그 후 7일간은 3시간 간격, 그리고 그 이후는 6시간 간격으로 측정을 하였고, 측정은 타설일로부터 1개월간 실시하였다.

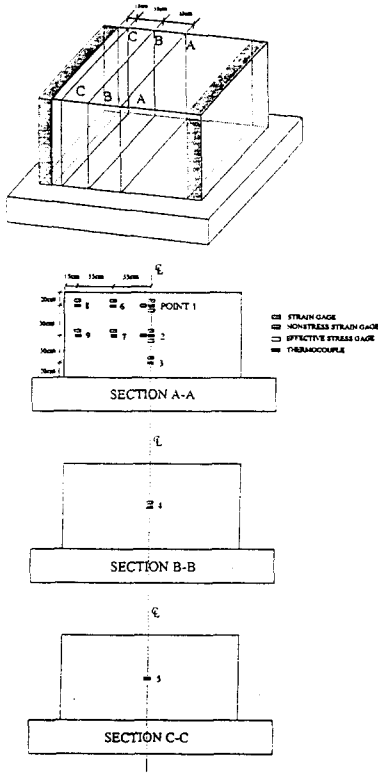


Fig. 2 Position of strain gauge

4. 실험결과 및 고찰

4.1 콘크리트 변형계에 의한 측정결과

Fig. 3은 8개의 측정데이터중 무응력계와 유효 응력계가 동시에 설치되어 있는 표면부(POINT 1)와 중앙부(POINT 2)등 두 곳의 값만 콘크리트 타설시점을 초기치로 잡아 그림으로 나타낸 것이다. 측정값의 변화양상을 보면 표면부와 중앙부 모두 타설후 6~7시간이 경과하기 전까지는 급격한 변형률의 증가 및 감소현상을 나타내고 있다. 이것은 콘크리트가 경화하기 이전의 유동변형에 의한 값으로서 온도응력을 유발시키는 변형률이 아니므로 온도응력으로 환산하기 위해서는 적절한 보정을 실시하여야 한다.

1) 콘크리트변형계의 측정치에 대한 보정

① 초기치 설정 시기에 따른 보정

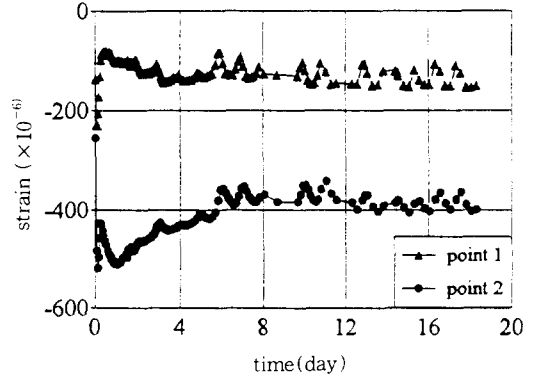


Fig. 3 Measured value of embedment strain gauge

매스콘크리트의 온도응력은 내외부의 온도차나 외부구속의 영향을 받아 발생한 변형률(일반적으로 유효변형률이라 부름)이 응력의 형태로 나타나는 것이다. 그러나 이 변형률은 콘크리트의 경화가 시작된 이후에만 나타나기 때문에 경화가 일어나기 이전의 상태에서는 전혀 응력을 유발시키지 않는다. Fig. 3에서의 콘크리트의 타설시점부터 경화가 막 일어나는 시점까지의 측정된 값을 보아도 초기의 수화작용에 의한 급격한 온도변화로 인해 상당히 불안정한 변형률이 측정되고 있음을 알 수 있다. 이 기간동안에 측정된 값은 응력을 유발시키는 변형률이 아니며 콘크리트의 탄성계수보다 게이지의 탄성계수(약 400kg/cm^2 정도)가 크기 때문에 응력의 감지가 곤란하다.

따라서 변형률 측정시에는 타설후 곧바로 초기치를 잡아서는 안되고 콘크리트의 경화가 일어나 변형계에서 콘크리트의 변형률을 감지할 수 있는 시점을 초기치로 잡아 변형률을 측정하여야 한다. 또한 타설시점을 초기치로 잡아 측정할 경우에는 이에 대한 적절한 보정이 필요하다.

이상과 같이 초기치 설정 문제는 측정된 변형률 값에 절대적인 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 초기치 설정 시기, 즉 콘크리트의 탄성계수가 대략 400kg/cm^2 정도에 도달하는 시점은 연구자들에 따라 각각 다르지만, 초기재령시의 콘크리트에 대한 시험을 통하여 타설후 6~12시간이 경과한 시점을 초기치로 잡아 계측을 실시하고 있다.

(1, 11)

본 연구에서는 콘크리트변형계와 동시에 유효응력계를 설치하였기 때문에 유효응력계에서 응력이 감지되는 시점(타설후 7시간이 경과한 시점)을 초기치로 삼아 보정을 실시하였다.

② 온도변화에 따른 변형계의 영점이동량 보정 또한 현재 시판중인 콘크리트변형계는 주변의 콘크리트가 온도가 상승하게 되면 제품생산시에 설정하여 놓았던 값들이 바뀌는 것으로 알려져 있다. 따라서 단시간의 재하시험과 같이 온도변화를 무시할 수 있는 경우를 제외하고는 온도변화에 따른 영점보정을 해 주어야 한다. 이것을 간단하게 그림으로 나타내면 Fig. 4와 같다.

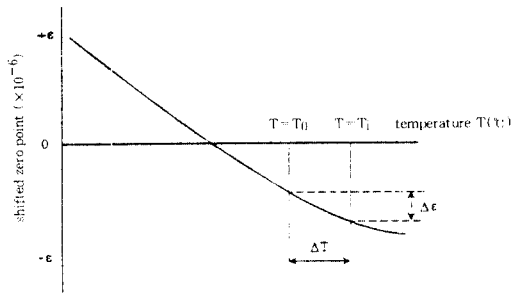


Fig. 4 Time dependent value of initial setting point

변형계의 영점이동량은 제품에 따라 약간의 차이는 있지만, 본 실험에서 사용한 게이지의 영점 이동량 $\Delta\epsilon$ 은 다음 식과 같이 주어져 있다.

$$\Delta\epsilon = \epsilon(T_1) - \epsilon(T_0) \quad (1)$$

$$\epsilon(T_1) = (-0.000052T_1^3 + 0.0142T_1^2 + 0.15T_1 - 10)$$

T_0 = 초기치 설정시의 측정온도

T_1 = 임의의 시간의 측정온도

또한 콘크리트변형률 측정시 식(1)과 같은 영점 이동량을 보정한 실제의 변형률값은 게이지 생산 회사에 의해 다음과 같은 식으로 주어져 있다.

$$\epsilon = \frac{K_m}{K_g} \{ (\epsilon_i - \epsilon_0) - \Delta\epsilon \} + \beta(T_1 - T_0) \quad (2)$$

여기서 ϵ ; 실제의 변형률

K_m ; 변형률측정기의 gauge factor

K_g ; 변형계의 gauge factor

ϵ_i ; 임의의 시간의 변형률측정기의 측정값

ϵ_0 ; 초기치 설정시의 변형률측정기의 측정값

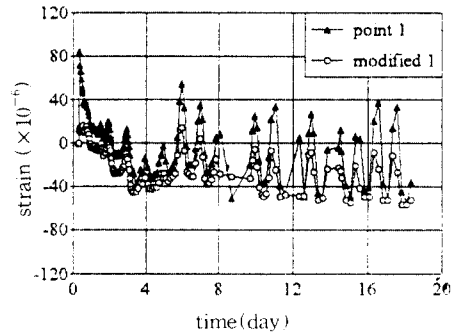
$\Delta\epsilon$; 변형계의 영점이동량

β ; 변형계의 열팽창률 ($\approx 11.7 \times 10^{-6}$)

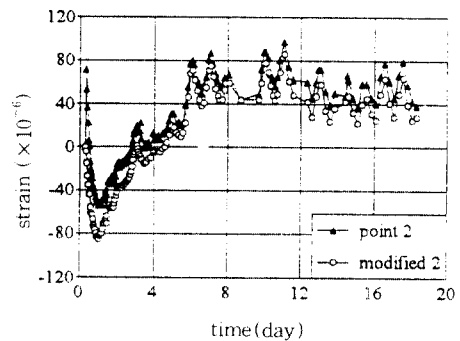
3) 보정된 콘크리트 변형률

Fig. 5는 측정된 변형률을 보정한 것으로, 삼각형모양(▲)으로 그려진 값이 7시간이 경과한 시점을 초기치로 정하여 초기치 보정을 한 값이고 원모양(○)으로 나타낸 것이 그 값에 영점보정한 값이다.

4.2 무응력계에 의한 측정결과



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig. 5 Modified measured value of embedment strain gauge

4.1절에서 기술한 보정방법에 따라 무응력계에 의해 측정된 자기신축변형률값에 대해서도 보정을 실시하였다(Fig. 6 참조)

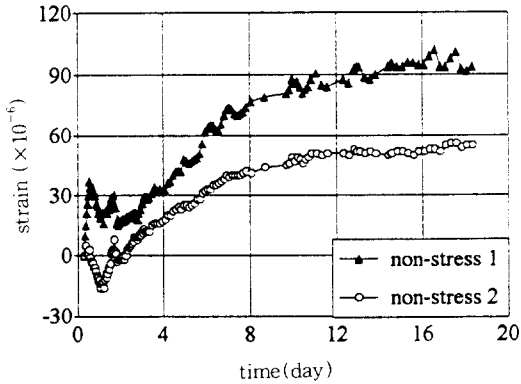


Fig. 6 Measured value of non-stress strain gauge

무응력계에 의한 측정치에는 건조수축변형률과 온도변화에 의한 신축변형률이 포함되어 있다. 측정결과를 보면 초기재령시에는 약간의 불안정한 변형률이 측정되었지만 타설후 2일정도가 경과한 이후에는 완만하게 변형률값이 증가하는 것으로 나타났다. 온도측정 결과에 의하면 타설후 약 1주일정도 경과한 이후에는 콘크리트의 내부온도가 거의 외부기온까지 떨어져 온도변화에 의한 신축 변형률이 거의 없어졌는데도 무응력계의 측정치가 $60\sim 90 \times 10^{-6}$ 정도의 변형률을 나타내 건조수축 변형률이 매우 큰 것으로 나타났다.

4.3 유효응력계에 의한 온도응력 측정결과

유효응력계에 대해서는 타설후 7시간이 경과하기 까지는 응력 발생이 없었기 때문에 0으로 측정이 되었으며 따라서 초기치보정이 필요없었다. 그리고 변형계를 사용하지 않으므로 영점보정이 필요없다. Fig. 7은 유효응력계에서 측정한 콘크리트의 응력을 나타낸 그림이다.

실험결과에서 나타난 온도응력의 발생상황을 보면, L/H(피구속체의 길이와 높이와의 비)가 비교적 작은 매스콘크리트 구조물에서 전형적으로 나타나는 형태를 나타냈다. 모의실험체의

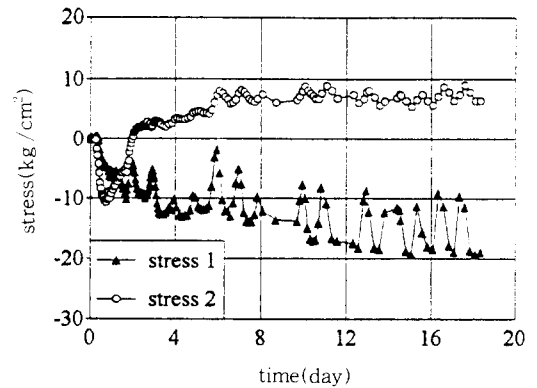


Fig. 7 Measured value of concrete stress gauge

POINT 2는 온도상승시에는 내부의 온도상승량이 표면부의 온도상승보다 크기 때문에 상대적으로 내부가 압축을 받게 되어 초기에는 압축응력이 발생하게 된다. 이 압축응력은 최고온도에 도달하는 시점에서 최대에 이르고, 그 이후에는 온도하강과 더불어 압축응력이 감소하여 인장영역까지 도달하였다. 한편, POINT 1은 초기에 약간의 인장응력이 발생하다가 시간이 경과함에 따라 압축 응력으로 변하였으며, 이 때 표면부의 응력이 외부기온의 영향을 크게 받고 있는 것을 알 수 있다.

5. 콘크리트변형계 측정치를 이용한 온도응력 산정

5.1 산정방법

콘크리트변형계의 측정치로부터 온도응력을 산정하기 위해서는 측정된 변형률에 단순히 경화된 콘크리트의 탄성계수를 곱해서는 안되고, 변형률에 대하여 적절한 보정을 한 후에 시간의 경과에 따른 탄성계수를 곱해야 비로서 유효응력을 산출할 수 있다.

콘크리트변형계에 의해 측정되는 값은 응력을 유발시키는 변형률외에 크리프변형률과 건조수축 변형률 그리고 온도변화에 따른 신축변형률이 포함된 상태에서 측정되게 된다. 즉,

$$\epsilon_t(t) = \epsilon_e(t) + \epsilon_{cr}(t) + \epsilon_{sh}(t) + \epsilon_T(t) \quad (3)$$

- 여기서 $\epsilon_r(t)$: 콘크리트변형계의 실제측정값
- $\epsilon_e(t)$: 응력을 유발시키는 변형률
- $\epsilon_{cr}(t)$: 크리프 변형률
- $\epsilon_{sh}(t)$: 건조수축변형률
- $\epsilon_T(t)$: 온도변화에 따른 신축변형률

식(3)에서 ϵ_{sh} 와 ϵ_T 는 무응력계에 의해 측정이 가능하기 때문에 변형계의 측정치로부터 유효변형률 $\epsilon_e(t)$ 를 산정하기 위해서는 $\epsilon_r(t)$ 에서 무응력계의 측정치와 $\epsilon_{cr}(t)$ 을 빼 주어야 한다. 여기서 크리프변형률 $\epsilon_{cr}(t)$ 은 크리프계수 $\phi(t)$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{cr}(t) = \phi(t) \epsilon_e(t) \quad (4)$$

따라서 유효변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_e(t) = \frac{1}{1+\phi(t)} \{ \epsilon_r(t) - \epsilon_{sh}(t) - \epsilon_T(t) \} \quad (5)$$

유효변형률로부터 유효응력을 산정하기 위해서는 탄성계수를 곱해야 한다.

$$\sigma_{eff}(t) = \frac{E_c(t)}{1+\phi(t)} \{ \epsilon_r(t) - \epsilon_{sh}(t) - \epsilon_T(t) \} \quad (6)$$

5.2 크리프에 의한 응력 완화 평가

경시변화에 따른 콘크리트의 탄성계수 산정은 해석적으로는 적산온도계산법에 의해 쉽게 계산이 가능하지만, 실험적으로는 각 재령별로 탄성계수를 구해야 한다. 본 연구에서도 모의실험체제작과 병행하여 원주공시체를 제작, 재령별 탄성계수를 측정하여 측정값을 회귀분석하여 사용하였다.

또한 크리프의 영향을 고려하기 위해서는 본래 유효요소법을 이용해서 크리프해석을 하기 위해서는 크리프모델을 이용한 소위 초기변형률법이 사용되지만⁽¹²⁾, 크리프해석에 의해 응력패턴이 크게 변화하는 것이 아니기 때문에, 본 연구에서는 간편하게 크리프에 의한 응력완화현상을 고려하기 위하여 유효탄성계수법을 사용하였다.

이 때에 탄성계수의 저감률(E_{eff}/E_c)은 타설후 1일까지는 크리프현상이 전혀 안 일어나는 것을

가정하여 1로 가정했고 5일 이후는 0.6으로 했으며 그 사이는 보간한 값을 사용하였다.^{(2), (4), (7)} 따라서 이에 따른 크리프계수는 식(7)과 같이 나타내진다.

$$\phi(t) = \frac{E_c}{E_{eff}} - 1 \quad (7)$$

- 여기서 E_{eff} : 유효탄성계수
- $\phi(t)$: 크리프계수

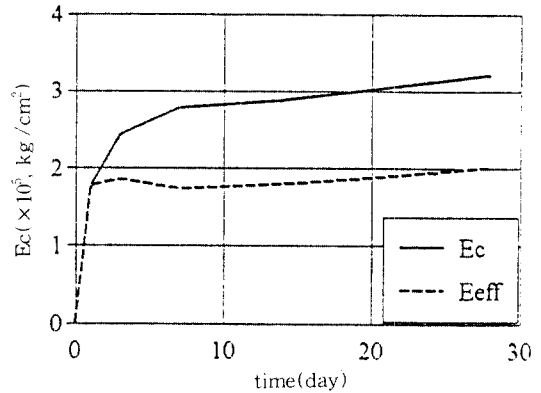


Fig. 8 Effective elastic modulus of concrete

Fig. 8은 제작한 원주공시체에 대한 탄성계수시험을 통해 얻어진 값과 이것을 크리프계수로 보정한 유효탄성계수의 경시변화를 그림으로 나타낸 것이다.

5.3 건조수축변형률의 결정

건조수축변형률에 대해서 현행 시방서에서는 경화된 콘크리트를 대상으로 하고 있기 때문에 대부분 건조가 일어나는 시기를 7일 이후로 하고 있다. 그러나 이러한 규정은 비교적 크기가 작은 구조물의 장기거동에 초점을 맞춘 규정으로, 해석적으로는 콘크리트내부의 수분이동에 대한 확산방정식의 적용을 통해 어느 정도 정량화하려는 시도가 행해지고 있다.^(13,14) 그러나 실험적으로는 온도변화에 따른 신축량과 건조수축량이 복합적으로 발생하기 때문에 각각의 양을 분리해서 정량화시키는 것이 매우 어렵다. 다행히 무응력계가 개발되어 응력을 유발시키는 변형률을 배제시킨 변형

를 측정할 수 있게 되었다.

따라서 본 연구에서는 무응력계의 측정치로부터 온도변화에 의한 콘크리트의 신축변형량을 빼서 초기의 건조수축량에 대한 정량화를 꾀하였다.

이것을 식으로 나타내면 식(8)과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{sh} = \text{무응력계의 측정치} - \alpha\Delta T \quad (8)$$

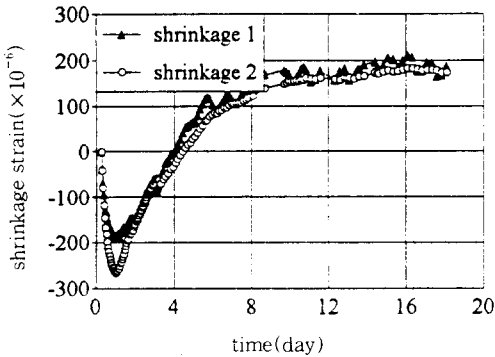


Fig. 9 Shrinkage strain at early age

여기서 ΔT 는 임의의 시간에서의 온도와 초기치 설정시의 온도차로서, 표면부와 중앙부에 대해서 계산한 ϵ_{sh} 를 그림으로 나타내면 Fig. 9와 같다.

두 값의 크기를 비교해 보면 약 1일정도 경과한 시점에서 Point 2(표면으로부터 55cm 떨어진 부분)의 변형률이 Point 1(표면으로부터 25cm 떨어진 부분)보다 약간 큰 값을 나타냈다. 그러나 이와 같이 초기에도 건조수축변형량이 큰 값을 나타내고 또한 Point 2가 Point 1보다 큰 값을 나타내고 있는 것은 일반적으로 알려져 있는 양상과는 전혀 다른 현상으로, 그 원인으로서 식(8)에서 초기 재령시의 열팽창계수 α 의 불확실성⁽¹⁾ 및 콘크리트 변형계의 측정 불안전⁽¹⁵⁾ 등을 들 수 있지만, 보다 많은 실험을 거쳐 이에 대한 재검토가 필요할 것으로 사료된다.

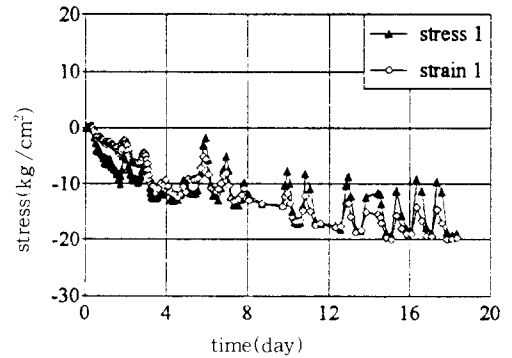
본 연구에서는 무응력계에 의한 측정을 두 곳밖에 실시하지 않았기 때문에, 건조수축량을 정량화 시키기는 데에는 부리가 있을 것으로 사료되지만, 향후 실험데이터의 축적을 통해 매스콘크리트구조물의 건조수축량에 대한 정량화가 이루어진다

면 콘크리트의 변형률과 온도를 동시에 측정할 수 있는 콘크리트변형계(예를 들어 東京測器의 KM 시리즈)를 이용하면 충분히 신뢰할 수 있는 온도응력의 측정도 가능할 것으로 사료된다.

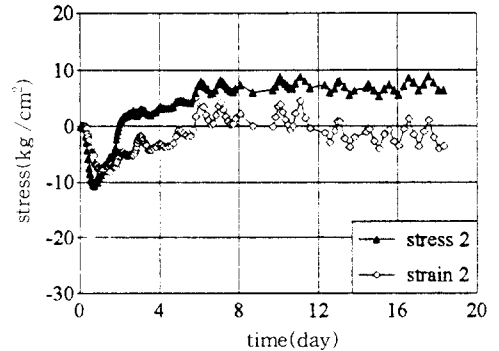
5.3 유효응력계 측정치와의 비교 및 고찰

5.1절의 산정방법에 의해서 시험체 중앙부와 표면부에 대해서 콘크리트변형계에 의한 측정치로부터 환산한 온도응력과 유효응력계로 측정된 응력값을 비교하면 Fig. 10과 같다.

그림에서 보면 중앙부의 측정치에 대해서는 두 값 모두 거의 완벽하게 일치하는 것을 보여주었고 특히 외부기온의 변화에 따른 온도응력의 변화를 두 측정치 모두 잘 묘사해 주고 있다. 그러나 표면부에 대한 측정치는 콘크리트변형계에 의한 측정



(a) Point 1



(b) Point 2

Fig. 10 Comparison of measurement by embedment strain gauge and concrete stress gauge

치가 유효응력계의 측정치보다 약간 작은 값을 나타냈다. 이것은 표면부가 외부기온의 영향등을 맡아 중앙부보다는 불안정하기 때문인 것으로 평가되며, 앞으로 이부분에 대한 보다 많은 연구가 필요하다 하겠다.

6. 결 론

본 연구는 실구조물에 있어서 발생이 예상되는 온도균열의 제어대책을 수립하기 위하여 실구조물과 동일한 조건을 가진 모의실험체를 제작하여 수행된 것으로, 연구를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 콘크리트변형계를 이용한 새로운 온도응력 산정법을 제시하여 유효응력계를 이용하지 않고도 변형계만으로 유효응력을 산정할 수 있음을 알았다.

2) 이를 위해서는 무응력계나 이와 동일한 특성을 가진 게이지를 동시에 설치하여 초기재령시의 콘크리트 자기수축변형률의 측정이 전제가 되어야 한다.

3) 초기재령시의 건조수축량에 대한 정량화가 가능하다면 콘크리트변형계(예를 들어 東京測器의 KM시리즈)만을 설치하여도 충분히 신뢰할 수 있는 온도응력을 측정할 수 있음을 알았다.

참 고 문 헌

1. 大崎幸雄, 吉川弘道, 河田秋澄, “마스콘크리트의 온도응력해석에適用する構成方程式의檢討”, 第1回마스콘크리트의 온도응력發生 메카니즘에關するコロキウム論文集, 日本콘크리트工學協會, 1982. 9, pp.49-56
2. 井上元, 內藤英晴, 小堀光憲, 安藤雅彦, “ボックス칼바트의콘크리트硬化時における溫度應力と物性値について”, 콘크리트工學年次論文報告集, 13-2, 1988, pp.187-192
3. 정철현, 강석화, 정한중, 박칠립, 오병환, “매스콘크리트의 온도변화에 영향을 주는 주요 변수에 관한 연구”, 콘크리트학회지, Vol.6, No.5, 1994. 10, pp.203-212
4. C. E. Majorana, G. Zavarise, M. Boresetto,

- M. Giuseppetti, “Nonlinear Analysis of Thermal Stresses in Mass Concrete Castings”, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, 20, 1990, pp.559-578
5. 吉岡保彦, 米澤敏男, 丹原利夫, “マッシュなコンクリート部材に生じる拘束應力とひびわれに關する研究(その1)”, 竹中技術研究報告, 제21호, 1979. 4, pp.72 -80
6. 森永繁, 桑原隆司, “마스콘크리트의 온도應力によるひびわれ發生條件とひびわれ發生の危險性評價方法”, 第1回마스콘크리트의 온도應力發生 메카니즘에關するコロキウム論文集, 日本콘크리트工學協會, 1982. 9, pp.61-68
7. Nobuhiro Machida and Kazuo Uehara, “Nonlinear Thermal Stress Analysis of a Massive Concrete Structure,” Computer & Structures, Vol.26, No.1/2, 1987, pp.287-296
8. M. Ishikawa, “Thermal Stress Analysis of a Concrete Dam”, Computer & Structures, Vol. 40, No.2. 1991, pp.347-352
9. 今枝靖典, 石川雅美, 西岡哲, 田邊忠顯, “溫度應力による마스콘크리트의力學的舉動”, 콘크리트工學年次論文報告集, 13-1, 1988, pp. 175-180.
10. 山川秀次, 野池悅雄, 東側豊二, 川原場博美, “콘크리트의現場斷熱溫度上昇試驗方法に關する提案”, 콘크리트工學年次論文報告集, 13-1, 1988, pp.815-820
11. 竹下治之, 淺沼潔, 橫田季彦, “마스콘크리트計器特性”, 第2回마스콘크리트의 온도應力發生 메카니즘에關するコロキウム論文集, 日本콘크리트工學協會, 1984.3. pp.1-8.
12. 橫山博司, “クリーブを考慮した溫度應力の檢討他”, 第2回마스콘크리트의 온도應力發生 메카니즘에關するコロキウム論文集, 日本콘크리트工學協會, 1984.3. pp.41-44
13. 阪田憲次, 硬化콘크리트中の水分の移動, 콘크리트工學, Vol.32, No.9, 1994. 7, pp.16-19
14. 김진근, 김효범, “콘크리트의 부등건조수축으로 인한 응력의 해석”, 콘크리트학회지, 제 6권 4호, 1994. 8, pp.102-112
15. 十何茂幸, 新開千弘, 山際浩二, “콘크리트埋めこみ型ひずみ計の形狀が測定程度に及ぼす影響”, 土木學會第44回年次學術講演會, 1989. 10, pp.328-329

(접수일자 : 1995. 1. 12)