

매스콘크리트의 외부구속응력에 관한 검토

Evaluation on the External Restraint Stress in Mass Concrete



강석화*

Kang, Suck Hwa



정한중**

Jeong, Han Jung



박철림***

Park, Chil Lim

요 약

본 연구에서는 매스콘크리트의 외부구속도의 특성을 검토하기 위하여, 타설높이를 1.0m로 고정시킨 상태에서 타설블럭의 밑면길이와 타설높이와의 비(L/H), 하부 구속체의 탄성계수(E_c) 등 매스콘크리트 구조물에서 특히 외부구속에 영향을 미치는 인자를 대상으로 parameter study를 실시하여 각 인자가 온도응력에 미치는 영향을 검토하고, 각 인자간의 상호 영향도에 대해서도 검토하였다.

검토결과, 외부구속에 의해 발생하는 응력은 단면 높이방향으로 거의 직선분포를 이루고 있으며, L/H나 구속체 탄성계수의 크기에 따라서도 다르고 타설한 콘크리트의 강도발현에 따른 탄성계수의 증가 및 체적변화로 인해서 재령별로도 그 영향이 각각 다르다는 것을 알았다.

또한, 외부구속은 축방향구속과 횡방향구속으로 나누어 평가할 수 있으며, 외부구속이 약한 경우는 횡방향구속이 탁월하고, 외부구속이 강한 경우는 축방향구속이 탁월하다는 것을 알았다. 그리고 타설높이 H를 1.0m로 제한시킨 경우에 ACI 207 위원회법으로 계산한 결과를 본 해석결과와 비교한 결과, ACI위원회법은 외부구속이 약한 경우에는 본 해석결과보다 큰 값으로 평가하고, 외부구속이 강한 경우에는 작게 평가하고 있음을 알았다.

* 정회원, 동양중앙연구소, 건설재료연구실장, 공박
** 정회원, (주)대우건설기술연구소, 토목연구실장
*** 정회원, (주)대우건설기술연구소 소장, 공박

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 1997년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

Abstract

The effects of external restraint on the thermal stresses in mass concrete are investigated through a series of parametric study. Two major factors affecting the degree of external restraint such as the ratio of length to height of the placed structure (L/H) and the elastic modulus of base structure (E_1) are employed as the parameters in a condition which a placing height H is 1.0m. Various conditions of L/H and E_1 are analysed by a FEM program and the relationship between these two parameters is examined.

The shape of stress distribution due to the external restraint is shown as linearity on the height direction of the section, and is influenced by L/H, E_1 , and strength development of placed concrete.

The external restraint can be divided by two part. One is an axial restraint and the other is a flexural restraint. When the level of external restraint is low, the structure behavior is mainly governed by flexural restraint, otherwise it is dependent on axial restraint. Comparing the calculated stress by the method of the ACI 207 committee with a finite element analysis, the former overestimates the external restraint stress when the degree of external restraint is weak, and underestimates when it is strong.

Keyword : mass concrete, thermal stress, external restraint, elastic modulus, L/H, heat of hydration

1. 서 론

콘크리트는 경화과정에서 수화반응에 의해 수화열이 발생하게 되는데, 매스콘크리트와 같이 크기가 큰 경우는 외부로의 열 방출이 늦어져 내부온도가 크게 상승하고, 이에 따른 체적변화가 내부적 또는 외부적으로 구속을 받게 되면 구조물 내에는 온도응력이 발생한다. 이 때 발생하는 온도응력(σ)은 식(1)과 같이 단면내의 불균일한 온도차에 의해서 발생하는 응력(σ_1)(통상 이것을 내부구속응력이라고 부름)과 체적의 팽창 또는 수축이 외부의 구속에 의해서 발생하는 응력(σ_0)의 합으로 나타내진다.

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_0 \quad (1)$$

매스콘크리트에서 온도응력은 근본적으로 구조물 내부의 온도변화에 의해 발생하는 것이기 때문에 온도변화량과 응력과의 상관성을 규명하기 위하여

그 동안 실험적 또는 해석적으로 많은 연구가 시도되었다.

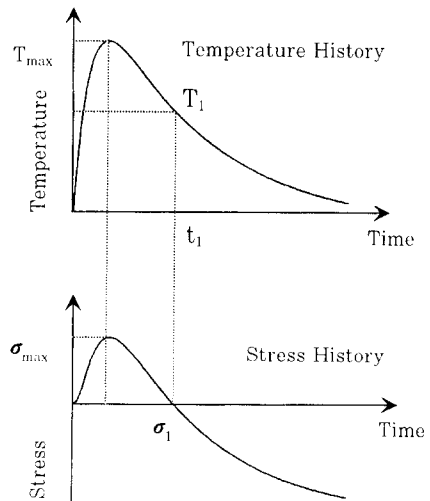


Fig. 1 Schematic diagram of relationship between temperature and thermal stress history

그 결과 슬래브구조물과 같이 비교적 내부구속이 강한 구조물의 경우에 있어서는 내부온도가 peak에 도달하는 시기와 온도균열이 발생하는 시기가 서로 상관성이 있어 온도변화량과 응력변화량 사이에는 Fig. 1과 같이 어느 정도 밀접한 관계가 성립하고 있는 것으로 알려졌다¹⁾ 따라서 개략적으로 단위시멘트량이나 타설온도 등 콘크리트 타설계획을 통해 정해지는 물성치 정도만 알게 되면 구조물 내부의 온도분포 및 온도응력분포도 추정할 수가 있고, 나아가서는 온도균열의 발생위치나 발생시기 등에 대해서도 어느 정도 추정이 가능하게 되었다.

그러나, 외부구속이 강한 경우는 구조물 내부의 응력상태가 내부의 온도상태보다는 오히려 타설블럭의 크기나 구속체와 피구속체간의 부착상태의 영향을 더 많이 받기 때문에 비록 내부온도분포를 정확하게 측정한다 해도 온도응력의 분포를 예측하기는 매우 곤란하다. 따라서 외부구속이 강한 매스콘크리트와 관련한 기존의 연구는 주로 측정된 온도 변화량으로부터 온도응력을 예측하는 연구에 집중되었다. 그 결과 온도변화량과 온도응력과의 관계를 맺어주는 외부구속도라는 변수를 실험적으로 구해 온도응력을 추정하는 여러가지 방법들이 제안되었으며, 온도응력의 크기에 크게 영향을 미치는 인자들의 특성도 어느정도 규명되었다. 그 중 대표적인 방법이 ACI 207 위원회법²⁾(이하 ACI207법으로 약칭)으로서 현재에도 외부구속응력을 계산하는데 가장 보편적으로 사용하는 방법이기도 하다. 그러나, 이 방법에서는 온도상승시에 팽창을 구속하여 일어나는 외부구속응력은 전혀 무시하고 있기 때문에 제시된 값들에 대해서 여러가지의 많은 의문점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 관점에서 매스콘크리트의 외부구속도의 특성을 검토하기 위하여 외부구속응력에 영향을 미치는 인자를 선정하여 각 인자를 인위적으로 바꾼 16개의 해석모델에 대하여 parameter study를 실시하여 각 해석결과로부터 외부구속도의 연직방향의 분포와 경시변화 등 각 인자의 변화에 따른 외부구속도의 특성을 검토하고 그 결과를 ACI207법에서 제시하고 있는 방법으로 계산한 외부구속응력과 비교·검토하였다.

2. 외부구속도와 관련한 기존의 연구동향

매스콘크리트의 외부구속과 관련해서 처음으로 연구되었고 또한 현재까지 가장 많이 사용되는 방법이 ACI법이다. 이 방법은 1940년대에 Hoover댐 건설시 측정하였던 실측한 데이터를 근거로 하여 만들어진 것으로 외부구속도라는 것은 식(2)와 같이 내부의 최고온도로 부터의 온도강하량과 온도응력과의 관계를 맺어주는 매개변수의 역할을 주로 하고, Fig. 2와 같은 그림을 이용하여 외부구속도를 결정하도록 되어 있다.

$$\sigma_t = R \cdot E_c \alpha \Delta T_t \quad (2)$$

여기서 R : 외부구속도

E_c : $\alpha \Delta T_t$ 의 변형률이 발생할 때의 콘크리트의 탄성계수

α : 콘크리트의 열팽창계수(통상 10×10^{-6} 값 사용)

ΔT_t : 최고온도로 부터의 온도강하량의 평균치

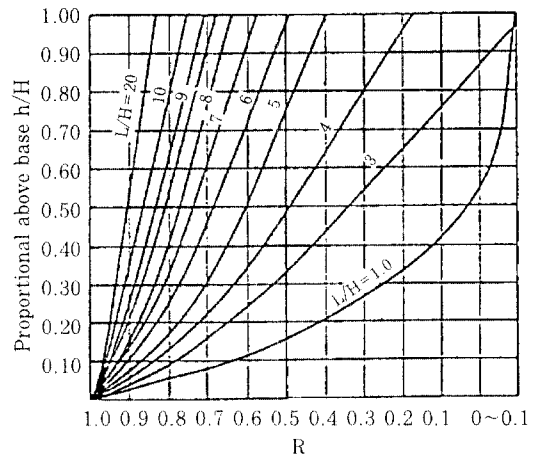


Fig. 2 External restraint proposed by ACI 207 Committee

이 방법에서는 Fig. 2와 같이 외부구속도를 L/H (타설블럭의 길이와 높이의 비)와 h/H (지반으로부터의 비레높이)의 함수로 나타내 구조물의 크기와 높이에 따라 구속도가 바뀌도록 하고 있으며 구속체 탄성계수의 영향은 그다지 중요하게 평가하

지 않고, 단지 두 재질간의 강성비의 영향만은 할중 계수 M을 이용하여 보정하도록 되어 있다.

$$M = \frac{1}{1 + \frac{A_g E_c}{A_s E_s}} \quad (3)$$

여기서 A_g, E_c : 새로 타설하는 콘크리트의 단면적 및 탄성계수
 A_s, E_s : 구속체의 단면적 및 탄성계수

그러나 이 방법에서는 구조물 내부의 온도변화량이 모두 일정하다는 기본가정하에 이론을 전개하고 있기 때문에 실제의 열적 거동을 정확하게 평가하지 못한다는 지적을 받고 있으며, 온도상승시의 팽창을 구속하여 발생하는 구속응력은 무시하여 외부 구속이 약한 경우에는 적용이 곤란하다는 단점을 가지고 있다.

또한, 永山³⁾은 ACI법과 마찬가지로 구조물 내부의 온도변화량은 일정하다는 기본가정을 사용하고 있으나, 이 방법에서는 외부 구속체의 탄성계수의

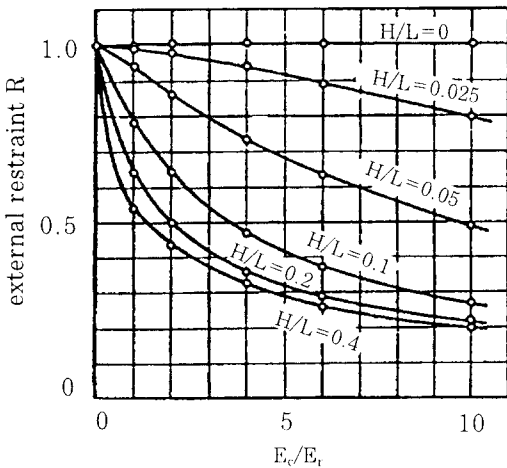


Fig. 3 External restraint proposed by Nagayama

영향을 크게 평가하여 외부구속도를 L/H 와 E_c/E_s (피구속체와 구속체간의 탄성계수비)의 함수로 나타내 주어진 그림상에서 외부구속도를 찾도록 되어 있다. 그러나 이 방법 역시 외부구속은 온도하강시만 발생한다고 가정하여 온도상승시의 외부구속은 무시하고 있다(Fig. 3 참조).

한편, 일본에서는 구조물의 실제 변형상태를 고려한 소위 상쇄선(Compensation Line)을 작도해 구조물의 온도응력을 계산하는 방법이 많이 사용되고 있다. 본래 이 방법은 내부구속이 작용하는 경우에만 적용하도록 되어 있었으나, 최근 외부구속이 작용하는 경우에도 확장 적용할 수 있도록 이론을 전개하였다. 이 방법에서는 외부구속응력 계산시 통상 사용하는 외부구속도의 개념을 사용하지 않고 그 대신 외부구속의 영향을 축변형 구속과 휨변형 구속으로 나누어 평가하고, 또한 최고온도 도달 이전과 도달 이후로 나누어 온도상승시의 구속영향도 고려할 수 있도록 되어 있다. 따라서 현재로서는 외부구속의 영향을 가장 합리적으로 평가하고 있다는 평가를 받고 있으며, JCI(일본콘크리트공학협회)에서도 공인을 하여 일반화되어 있는 상태이다.⁴⁾ 그러나 이 방법에서는 온도응력을 증분법의 형태로 계산해야 하기 때문에 각 재령시의 구속계수를 사전에 정의해야 하고, 유한요소법을 이용하지 않는 간편법이라고는 하지만 여전히 계산이 복잡하여 역시 컴퓨터 프로그램을 이용하지 않고서는 적용이 곤란하다는 단점을 가지고 있어 현재도 꾸준히 재검토가 진행되고 있는 실정이다.^{5, 6)}

3. L/H와 구속체 탄성계수의 변화에 따른 외부구속응력의 변화

3.1 검토방법

본 검토에서는 L/H 와 구속체 탄성계수의 변화에 따른 외부구속응력의 변화를 검토하기 위하여 L/H 와 하부 구속체의 탄성계수(E_s)를 해석변수로 한 parameter study를 실시하였다. 해석범위는 내부구속이 강한 경우부터 외부구속이 강한 경우에 이르기까지의 모든 경우를 포함시키기 위하여, Table 1과 같이 L/H 를 4 수준(본 논문에서는 $L_{1, 2, 3, 4}$ 시리즈라고 분류), 그리고 E_s 은 암반의 종류를 연암부터 경암까지, 그리고 기 타설한 콘크리트 위에 추가적으로 콘크리트를 타설할 경우를 가정하여⁷⁾ 500kg/cm^2 부터 $300,000\text{kg/cm}^2$ 까지 4 수준(본 논문에서는 $E_{1, 2, 3, 4}$ 시리즈라고 분류)으로 변화시킨 16개의 해석모델에 대하여 검토를 실시하였다. 또

Table 1 Model case

Parameter	E_1				
	500	10,000	50,000	300,000	
L/H	2	L_1E_1	L_1E_2	L_1E_3	L_1E_4
	4	L_2E_1	L_2E_2	L_2E_3	L_2E_4
	6	L_3E_1	L_3E_2	L_3E_3	L_3E_4
	10	L_4E_1	L_4E_2	L_4E_3	L_4E_4

한, 동일한 L/H라도 L과 H의 절대치도 실질적으로 구조물의 내부응력상태에 상당한 영향을 미치지 만, 해석의 편의를 위해 본 검토에서는 부득이 타설 높이를 H를 1.0m로 고정시킨 상태에서 해석을 실시하였다. 각 변수의 절대값이 온도응력의 성장에도 큰 영향을 미치지 만, 편의상 타설높이만을 고정시켜 해석모델 모두 1.0m로 가정하여 해석을 실시하였다.

본 해석수행을 위해서는 자체적으로 개발한 2차원 수화열 및 온도응력 해석 프로그램을 사용하였으며, 해석은 3시간 간격으로 총 30일 경과시 까지 수행하여 온도변화 및 온도응력변화를 검토하였다. 또한 해석시 온도장과 응력장이 직교하는 경우에는 수화열해석시와 온도응력 해석시의 유한요소 분할도가 달라져 각 인자들의 영향 파악이 어렵기 때문에 해석편의상 온도장과 응력장이 일치하는 구

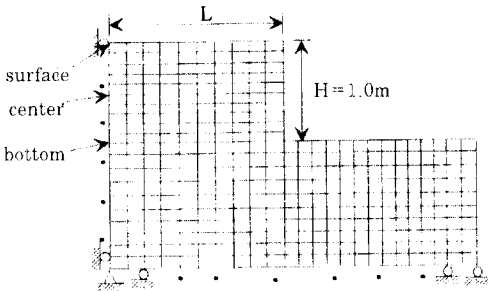


Fig. 4 Finite element mesh

조물로 정하여 수화열해석과 온도응력 해석을 동일한 유한요소 분할도에 대해서 실시하였다(Fig. 4 참조). 해석시 단위시멘트량과 타설온도는 전체 해석모델에 대하여 모두 동일하게 400kg/m^3 , 20°C 로 가정하여 사용하였다.

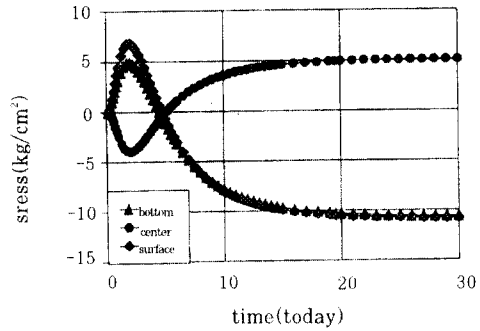


Fig. 5 Internal restraint stress history

3.2 내부구속응력

본 연구에서는 전체의 온도응력으로 부터 내부구속응력을 빼서 임의의 재령에서의 외부구속응력의 분포를 평가하였다. 이 때 내부구속응력은 해석시 외부구속체의 탄성계수를 거의 0에 가깝게 입력(실제로는 1.0kg/cm^2 입력)하여 계산한 응력값을 내부구속만에 의한 응력으로 간주하여 사용하였다.

내부구속에 의한 온도응력 이력곡선은 Fig. 5와 같다.

Fig. 5를 보면 내부구속에 의한 온도응력은 내부온도가 최고온도에 도달하는 약 1~3일 경과시에 표면부에서 최고인장응력을 나타내다가 그 이후 온도가 강하함에 따라 서서히 압축응력성분이 증가하면서 압축응력으로 바뀌는 형태를 나타내고, 중앙부는 그 반대로 초기에 압축응력을 나타내다가 부재온도가 최고에 도달하는 시점부터 인장응력성분이 증가하여 인장응력으로 바뀌는 응력상태를 나타내었다.

3.3 외부구속응력의 경시변화

각 해석모델에 대한 계산값으로 부터 Fig. 5의 내부구속응력에 의한 값을 빼면 Fig. 6과 같다. 편의상 구속체 탄성계수가 매우 작은 E_1 시리즈의 경우는 외부구속응력값이 매우 작은 값을 나타냈기 때문에 생략하였다.

1) 외부구속이 작은 경우

통상 L/H가 작거나 구속체 탄성계수가 작은 경

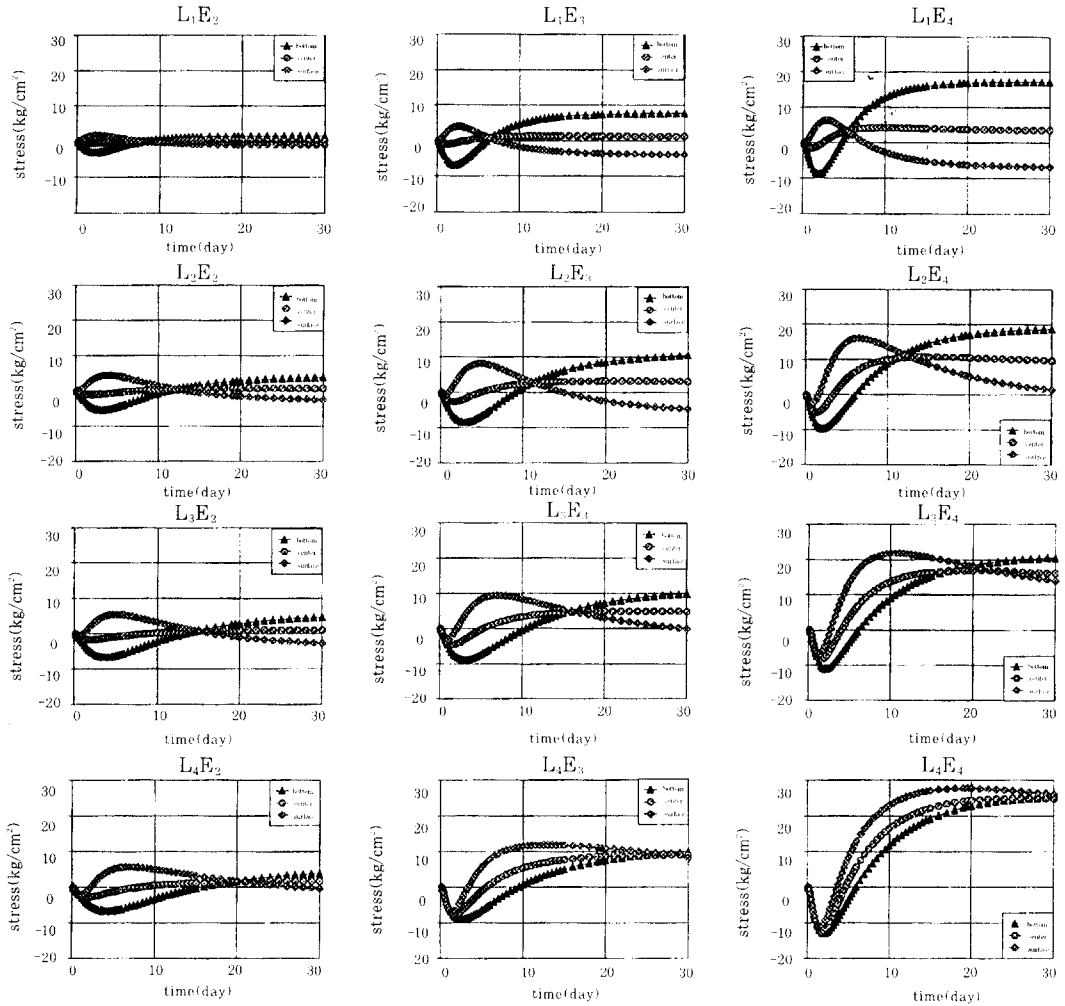


Fig. 6 Variation of external restraint stress for elapsed time

우가 외부구속이 작은 경우로 분류된다. Fig. 6에서 L/H가 작은 상태에서 구속체 탄성계수가 커지는 L_1 시리즈의 응력변화를 보면, 초기에 내부온도가 최고온도에 도달할 때 까지는 표면부는 인장응력을 나타내고 바닥부는 압축응력을 나타내다가, 온도가 하강하게 되면 그 반대로 작용하고 있다. 이때에 외부구속응력은 구속체 탄성계수 크기의 증가에 따라 점진적으로 커지고 있어 구속체 탄성계수의 증가가 구조물 전체의 응력상태에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 즉 외부구속에 의한 응력이 Fig. 5의 내부구속에 의한 응력과 중첩될 경우, 표면부는 구조물 탄성계수가 커질 수록 초기

의 인장응력이 더욱 커지고 바닥부는 압축응력쪽으로 가까와 가게 된다(Fig. 7 참조). 따라서 L/H가 작은 상태에서는 구속체의 탄성계수가 증가하게 되면 표면부의 인장응력이 더욱 증가하여 온도균열의 발생가능성이 높아진다는 것을 알았다.

한편, 구속체 탄성계수가 작은 상태에서 L/H가 증가하는 E_2 시리즈의 경우를 보면 전체적인 응력변화는 L_1 시리즈의 경우와 유사한 형태를 보이고 있지만, 표면부의 경우 L/H가 커질 수록 초기에도 압축응력이 발생하게 되어 인장응력이 최대에 도달하는 시점이 점차 늦어지는 것으로 나타났다. 따라서 구속체 탄성계수가 작은 상태에서는 L/H가 증

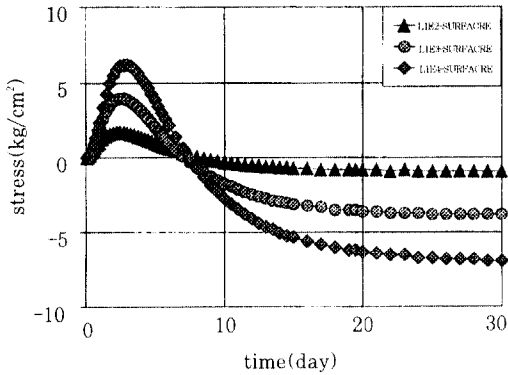


Fig. 7 Thermal stress in surface for L₁ series

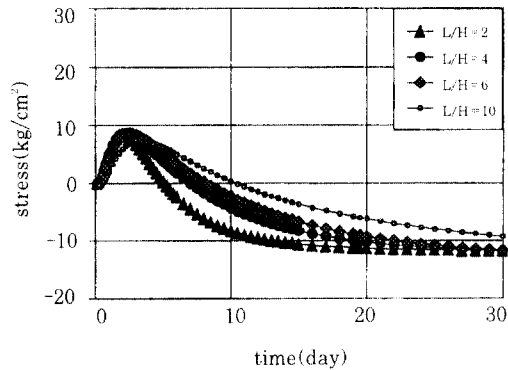


Fig. 8 Thermal stress in surface for E₂ series

가하여도 표면부의 균열발생에는 그다지 영향을 주지 않음을 알았다(Fig. 8 참조).

2) 외부구속이 큰 경우

외부구속이 강한 경우는 해석모델중에는 L₃E₄나 L₄E₃, 그리고 L₄E₄ 등 L/H와 구속체 탄성계수가 모두 큰 경우가 이에 해당된다. 이 경우를 보면 외부구속응력은 내부온도가 최대온도에 도달하는 시점에 전체 위치에서 모두 최대의 압축응력을 나타내다가 인장응력으로 바뀌는 응력형태를 나타내고 있다. 또한, Fig. 4와 비교해 볼 때 외부구속응력의 크기가 내부구속응력에 비해 월등히 크기 때문에 구조물 전체의 응력상태가 전적으로 외부구속응력의 영향을 받아 균열의 발생시거나 위치 등이 외부구속응력의 지배를 받음을 알 수 있다. 따라서, 벽체구조물과 같이 외부구속이 강한 구조물의 경우는

콘크리트의 1회 타설크기와 하부구속체의 구속상태가 온도균열제어의 중요한 변수가 됨을 알았다.

3.4 외부구속응력의 연직방향 분포

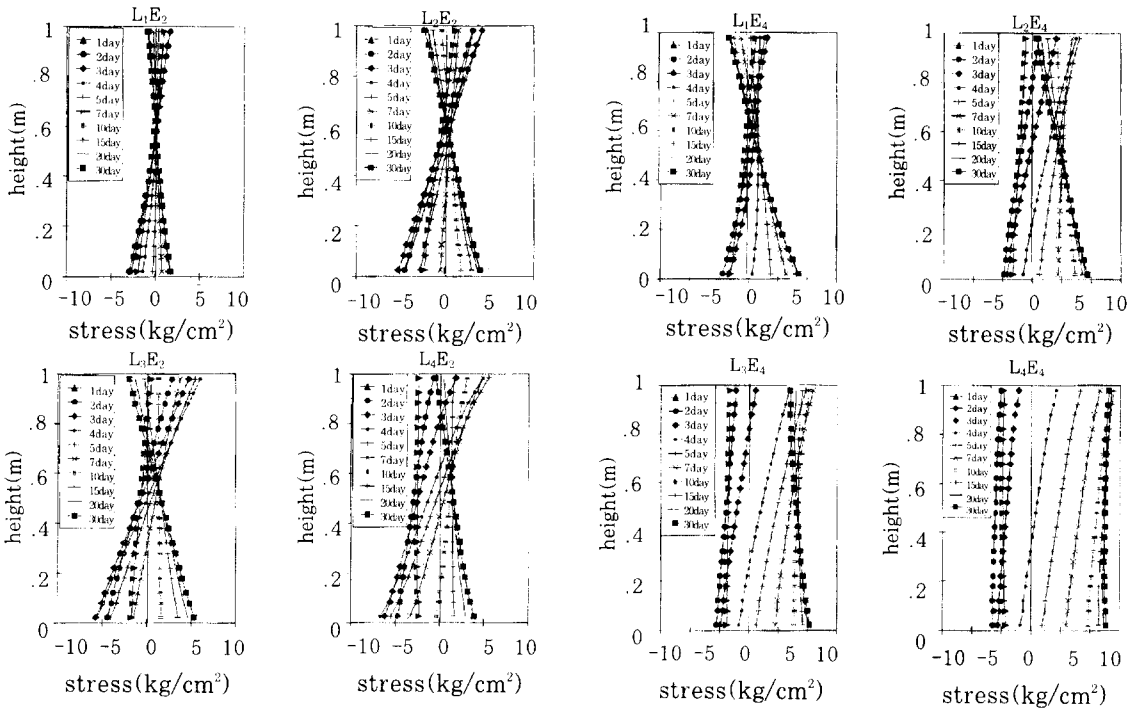
본 검토에서는 시간경과에 따른 외부구속응력의 연직방향 분포의 변화를 검토하기 위하여 수행되었다. 계산을 실시한 재령 중 10개 재령에 대하여 시간경과에 따른 응력분포를 검토하였다.

재령변화에 따른 연직방향의 외부구속응력 분포는 Fig. 9와 같다

Fig. 9를 보면 외부구속의 영향은 연직방향으로 높이별로 구속정도가 다르며 타설한 콘크리트의 강도발현에 따른 탄성계수의 증가 및 체적변화로 인해서 재령별로도 그 영향이 각각 다르며 L/H와 구속체 탄성계수의 크기에 따라서도 각각 다른 것으로 나타났다.

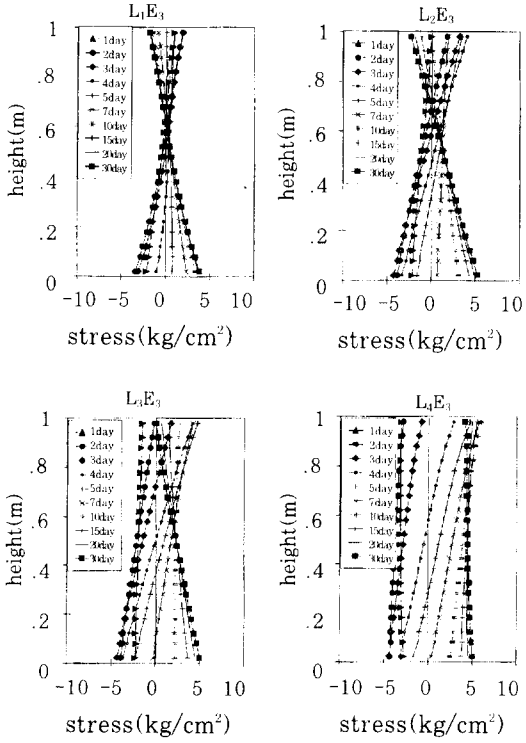
외부구속에 의한 응력의 연직방향 분포를 보면 거의 직선형태를 이루고 있으며, 이러한 응력분포의 직선성은 L/H가 커질 수록 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 a/d가 큰 휨부재의 경우는 응력분포가 명확히 직선성을 나타내는데 반해, a/d가 매우 작은 deep beam의 경우 응력분포가 불균일하게 일어나는 것과 마찬가지로 현상으로 이해할 수 있다. 또한, Fig. 9를 보면 외부구속에 의한 응력은 축력과 휨을 받고 있는 휨부재의 응력분포와 유사한 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 연직방향의 응력분포를 직선으로 가정한다면 외부구속에 의한 응력은 CL법에서와 마찬가지로 휨변형 구속에 의한 응력성분과 축변형 구속에 의한 성분의 조합으로도 설명이 가능하다.

즉, L1 시리즈나 E2 시리즈와 같이 비교적 외부구속의 영향이 작은 경우에는 초기 온도상승시에는 바닥부는 압축력, 표면부는 인장력으로 작용하고, 온도하강시에는 그 반대로 작용하여 축변형 구속보다 휨변형 구속이 탁월한 형태가 되는 것을 알았다. 그리고 L4 시리즈나 E4 시리즈와 같이 L/H나 구속체 탄성계수가 큰 경우는 구속체 탄성계수가 커질 수록 그리고 L/H가 커질 수록 휨변형구속이 탁월한 형태에서 점차로 축변형구속이 탁월한 형태로 바뀌어 간다고 말할 수 있다.



(a) E₂ series

(c) E₄ series



(b) E₃ series

Fig. 9 Vertical distribution of external restraint stress for elapsed time

한편, Fig. 9에서도 알 수 있는 바와 같이 L/H와 구속체 탄성계수가 외부구속응력에 미치는 영향은 각 인자의 상대적인 크기에 크게 좌우되고 또한 재령에 따라서도 달라지기 때문에 별도로 영향정도를 분리하기가 곤란하다. 그러나 개략적인 경향을 파악하기 위하여 동일 재령에 대하여 L/H가 일정한 경우(a)와 구속체 탄성계수가 일정한 경우(b)를 대상으로 하여 연직방향의 분포를 그림으로 나타내었다(Fig. 10 참조). 재령은 임의로 5일 경과시를 대상으로 선정하였다. Fig. 10을 보면 L/H가 일정한 상태에서 구속체 탄성계수가 커질 경우에는 연직방향의 응력분포를 나타내는 직선의 기울기는 거의 동일한 상태에서 수평으로 이동되는 형태가 되고, 구속체 탄성계수가 일정한 상태에서는 L/H가 증가할 경우 오히려 직선의 기울기가 변하는 것으로 나타났다. 따라서 구속체 탄성계수는 주로 축변형 구속에 영향을 미치고 L/H는 휨변형 구속에 영향을 미친다는 것을 알았다.

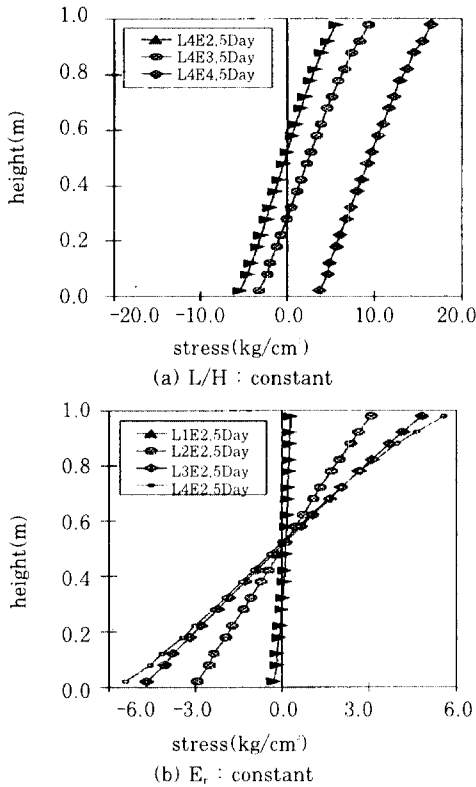


Fig. 10 Effect of E_r and L/H on external restraint

3.5 L/H 와 E_r 이 온도균열의 발생에 미치는 영향

L/H 와 E_r 의 변화에 따른 온도균열의 발생위치 및 발생시기를 검토하기 위하여 각 해석모델에 대하여 표면부와 중앙부에서 최소가 되는 온도균열지수값과 발생재령을 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11을 보면 L/H 가 작을 때는 E_r 의 크기에 관계없이 중앙부보다는 표면부의 온도균열지수가 작아 표면부의 응력상태가 온도균열 발생을 지배하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 L/H 가 점차 커질수록 각 위치에서의 온도균열지수는 구속체 탄성계수의 영향을 크게 받아, 표면부의 경우는 온도균열지수가 점차로 커지고 중앙부의 경우는 점차로 감소하여 $L4E3$ 이상이 된 경우에는 표면부보다는 오히려 중앙부가 균열발생 가능성이 더 높아지는 것으로 나타났다.

Fig. 11에서 단면 각 위치에서의 온도균열지수로

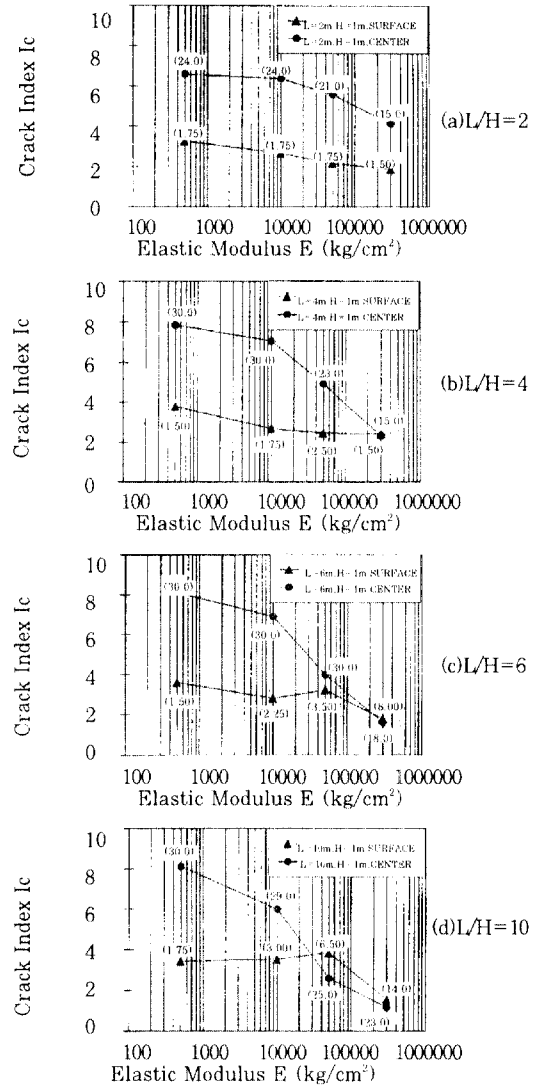


Fig. 11 Crack index in surface and center

부터 L/H 와 E_r 의 크기에 따라 온도균열 발생모드를 분류하면 Table 2와 같다.

Table 2에서의 각 균열모드별 특성을 정리하면 Table 3과 같다.

따라서 온도균열의 발생위치와 시기는 L/H 와 E_r 의 대소에 따라 크게 달라져 Table 3에서 모드 (I), (III)의 경우는 그 각 인자의 크기에 따라 어느정도 구분이 가능하지만, 모드(II)의 경우는 각 인자의 크기에 따라 균열의 발생위치 및 발생시기

Table 2 Thermal cracking mode

Parameter	elastic modulus $E_r(\text{kg/cm}^2)$				
	500	10,000	50,000	300,000	
L/H	2	I	I	I	I
	4	I	I	I	II
	6	I	I	I	II
	10	I	I	III	III

Table 3 Characteristics of thermal cracking mode

cracking mode	cracking location	cracking time
(I)	scattering at surface	1~3 day
(II)	surface or center	8~15 day
(III)	center	since 15 day

가 각각 달라질 수 있기 때문에 구속체 탄성계수의 입력시에 특히 주의하지 않으면 안된다는 것을 알았다.

4. ACI 207위원회법에 대한 검토

4.1 ACI 207위원회법

ACI법에서는 식(2)에서의 ΔT_m 를 최고온도로 부터 계산하는 재령까지에 강하된 온도량으로 간주 하고 있지만, 어느 특정한 위치에서의 온도강하량이 아니라 부재 내의 평균온도의 강하량을 의미한다. 따라서 본 해석모델을 대상으로 ACI법에서 가정하고 있는 부재 내의 평균온도 강하량 ΔT_m 를 계산하기 위해서는 식(4)의 木村의 식¹⁰⁾을 사용하였다.

$$\Delta T_m = \frac{1}{3}(2\Delta T_{\max} + \Delta T_s) \quad (4)$$

여기서 ΔT_{\max} : 부재내의 최고온도
 ΔT_s : 표면부의 온도

또한, L/H=2, 4, 6, 10인 경우의 해석 예에 대한 외부구속도는 Fig. 2를 이용하여 계산하였다 (Fig. 12 참조).

Fig. 12를 보면 ACI법에서는 휨변형에 대한 구속은 고려하지 않지만 그 대신 축변형 구속도를 높 이방향으로 다르게 평가하는 방법을 통해 휨변형구 속을 간접적으로 고려하고 있는 것을 알 수 있다.

그리고 식(2)에서의 E_c , 즉 $\alpha \Delta T_m$ 의 변형률이 발생할 때의 콘크리트의 탄성계수는 岡田¹¹⁾의 적산 온도식을 이용하여 계산하였다.

$$M(t) = \sum (\Delta T + 10)\Delta t \quad (5)$$

$$\sigma_c(t) = 487 \log_{10}(24M(t)) - 1300 (M \leq 1000) \quad (6)$$

$$\sigma_c(t) = 244 \log_{10}(24M(t)) - 570 (M > 1000) \quad (7)$$

$$E_c(t) = 15,300 \sqrt{\sigma_c(t)} \quad (8)$$

여기서 M(t) : t재령에서의 적산온도

ΔT : t재령과 그 전재령과의 온도차

Δt : t재령과 그 전재령과의 시간차

$E_c(t)$: t재령이 경과된 콘크리트의 탄성계수

또한, 계산에 사용한 외부구속도 R은 L/H와 기초로 부터의 높이 H를 알기 때문에 Fig. 2로 부터 구해서 사용하였으며, ACI 위원회법에서는 암반위

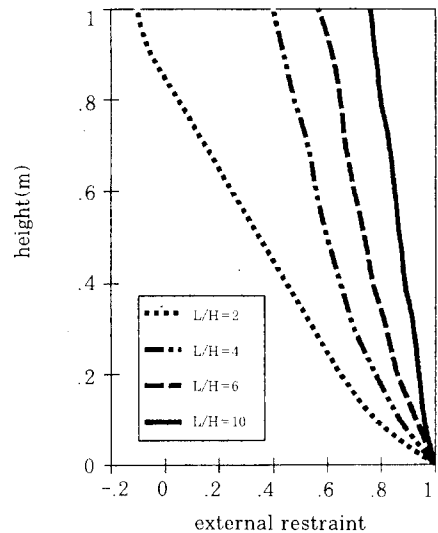


Fig. 12 External restraint calculated by ACI 207 Committee

에 타설한 콘크리트의 경우 구속하고 있는 물체의 최대유효단면적 A_r 를 $2.5A_r$ 로 할수있다고 되어 있어 그 값을 사용하였고, 할증계수 M 은 탄성계수의 비(E_c/E_s)에 따라 달라지기 때문에 전체 재령에 걸쳐 동일한 값을 사용하지 않았고, 각 재령별로 M 을 계산하여 온도응력을 계산하였다.

4.2 본 해석결과와의 비교 및 평가

식(2)에서의 재령 t 는 타설사 부터의 재령이 아니라 구조물의 내부온도가 최고온도에 도달하였다 떨어지기 시작하는 시점부터의 재령으로서 본 해석결과에 대해서도 동일한 방법으로 초기점을 설정하였다.

먼저, 외부구속이 약한 경우로 분류되는 L_1E_2 와 L_2E_2 에 대해서 비교를 하면 Fig. 13과 같다.

Fig. 13을 보면 수화열해석시 내부온도가 최고온도에 도달한 2.5일 재령에 도달하였을 때, 외부구속만에 의한 응력은 이미 구조물의 팽창 구속에 따른 영향이 나타나 표면부는 압축응력을, 그리고 바닥부는 인장응력을 나타내다가 휨구속의 영향으로

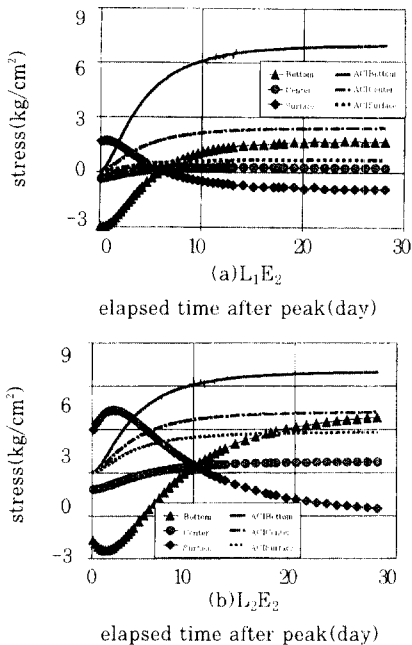


Fig. 13 Comparison of this calculated value and ACI 207 committee for L_1E_2 and L_2E_2

점차 응력이 변화하는 양상을 나타냈다. 그러나, ACI법에서는 온도강하시점을 부터를 외부구속으로 평가하고 있기 때문에 초기치는 0을 나타내다가 온도하강과 더불어 부재 전단면에 걸쳐서 인장응력을 나타내는 응력양상을 보였다. 또한 해석결과를 비교해 보면 ACI법에 의한 계산치는 본 해석결과보다 훨씬 큰 값으로 평가하고 있었다.

또한, 외부구속이 강한 경우로 분류되는 L_4E_4 에 대해서 계산결과를 비교하면 Fig. 14와 같다.

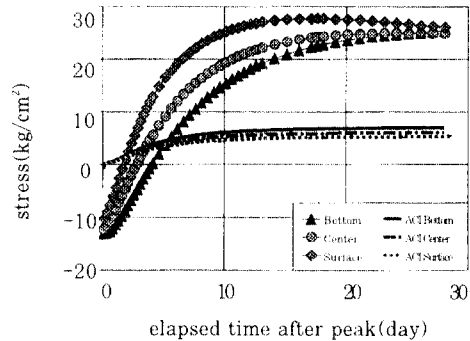


Fig. 14 Comparison of this calculated value and ACI 207 committee for L_4E_4

Fig. 14를 보면 본 해석결과와 초기에는 콘크리트의 팽창을 구속하는 방향으로 외부구속이 작용하기 때문에 이미 전단면에 걸쳐 압축응력상태를 나타내다가 최고온도에 도달하는 재령을 지나면 수축을 구속하는 방향으로 외부구속이 작용하여 점차 인장응력을 나타내는 응력형태를 나타냈다. 그러나 ACI법에서는 수축에 대한 구속작용만 인정하였으며, 해석결과를 비교해 보면 ACI법에 의한 계산치는 본 해석결과보다 훨씬 작은 값으로 평가하고 있음을 알았다.

이와 같은 점을 고려해 볼 때 외부구속응력을 온도강하시점을 기준으로 해서 평가하는 데는 문제가 있으며, 또한 타설높이를 1.0m로 제한시켜 비교한 결과이기 때문에 일률적으로는 논하기 어렵지만 외부구속의 크기에 관계없이 휨변형 구속은 무시하고 축변형 구속만을 고려하여 연직방향으로의 응력분포를 전위치에 대하여 동일한 부호로 평가하고 있는 ACI 207법은 재검토의 여지가 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 매스콘크리트의 외부구속도의 특성을 검토하기 위하여 1회 타설높이가 1.0m인 경우를 대상으로 parameter study를 실시하여 각 해석결과로부터 외부구속도의 연직방향의 분포와 경시변화 등 각 인자의 변화에 따른 외부구속도의 특성을 검토하고 그 결과를 ACI 207법에서 제시하고 있는 방법으로 계산한 외부구속응력과 비교하였다.

검토를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) L/H가 작은 상태에서는 구속체의 탄성계수가 증가하게 되면 표면부의 인장응력이 더욱 증가하여 온도균열의 발생가능성이 높았지만, 구속체 탄성계수가 작은 상태에서는 L/H가 증가하여도 표면부의 균열발생에는 그다지 영향을 주지 않음을 알았다.

2) 외부구속에 의해 발생하는 응력은 단면 높이 방향으로 거의 직선분포를 이루고 있으며, 타설한 콘크리트의 강도발현에 따른 탄성계수의 증가 및 체적변화로 인해서 재령별로도 그 영향이 다르고 L/H나 구속체 탄성계수의 크기에 따라라도 각각 다르다는 것을 알았다.

3) 외부구속의 영향은 횡변형구속과 축변형구속의 조합으로 표현이 가능하며, 외부구속도가 증가할 수록 응력을 지배하는 구속 성분이 횡변형구속에서 축변형 구속으로 바뀌어 가는 것을 알았다.

4) 타설높이 H를 1.0m로 제한시킨 경우에 ACI 위원회법을 이용하여 외부구속응력을 계산한 경우와 본 해석결과를 비교한 결과, ACI위원회법은 외부구속이 약한 경우에는 본 해석결과보다 큰 값으로 평가하고, 외부구속이 강한 경우에는 작게 평가하고 있음을 알았다.

본 연구에서는 단위시멘트량과 타설온도 그리고 타설높이를 고정시킨 극히 제한된 범위내에서 해석을 수행하였기 때문에 각종 인자간의 상호영향 등으로 인하여 외부구속도의 정량화까지는 이르지 못하였지만 그 지배요인은 파악할 수가 있었으며, 3.3절에서 분류한 각 모드별로 특성화시키면 외부구속응력의 정량화도 충분히 가능할 것으로 사료되며, 향후 이 부분에 대한 추가연구를 계속 진행해 나갈 예정이다.

1. 森永繁, 桑原隆司, “마스콘크리트의 수와熱によるきれつ防止を目的とした施工法”, 콘크리트構造物のひびわれに關するシンポジウム發表報告集, 日本콘크리트工學協會, 1977. 3. pp. 113-118
2. Concrete Practice of Manual ACI 207.2R-73, “Effect of Restraint, Volume Change, Reinforcement on Cracking of Massive Concrete”, ACI Committee 207
3. 永山巧, “콘크리트담의溫度應力解析”, 土木技術資料, Vol. 22, No.9, 1980年, pp. 26-32.
4. マスコンクリートの溫度應力研究委員會報告書, “外部拘束係數の同定とそれに基づく溫度應力計算方法の提案”, 1985年11月, pp. 47-93
5. 石川雅美, 今枝靖典, 高邊康, 前田強司, “마스콘크리트의 外部拘束に關する檢討”, 土木學會論文集, No. 460/V-18, 1993年 2月, pp. 13-22
6. 石川雅美, 前田強司, 西岡哲, 田邊忠顯, “마스콘크리트의 外部拘束メカニズムに及ぼすL/Hの影響”, 콘크리트工學年次論文集報告集, 12-1, 1990, pp. 851-856
7. Fujiwara, Y. and S. Hibino, “Evaluation of dynamic properties of rock foundation by cyclic loading test”, Proceeding of the International Symposium on Weak Rock, Vol. 2, 1981, pp. 1229-1234
8. 강석화, 이용호, 정한중, 박철림, “유한요소법을 이용한 매스콘크리트 구조물의 온도 및 온도응력 해석에 관한 연구”, 콘크리트학회지, Vol. 7, No. 4, 1995. 8. pp. 137-148
9. 콘크리트표준시방서, 건설부제정, 1988년 12월, pp. 598-600
10. 木村克彦, 小野定, “마스콘크리트構造物の溫度ひびわれ發生の評價方法に關する研究”, 土木學會論文集, No. 378/V-6, 1987年 2月, pp. 61-70
11. 岡田清, 小林和夫, 宮川豊章, 村本吉弘, “마스콘크리트의 基本的特性に關する考察”, セメント技術年譜, Vol. 34, 1980, pp. 230-234

(접수일자 : 1996. 4. 19)