

매스콘크리트에서 타설블럭의 크기(L/H)와 구속체의 탄성계수가 온도응력에 미치는 영향에 관한 검토

(Evaluation on the Effect of the Size of Placing Block(L/H) and
Elastic Modulus of Base Structure on the Thermal Stress in Mass Concrete)

강석화* 이용호** 박칠림***
Kang, Suck Hwa Lee, Yong Ho Park Chil Lim

ABSTRACT

In this study, the effect of external restraint on the thermal stresses and thermal cracking mode in mass concrete are analysed using the two major factors affecting external restraint such as the ratio of width to height of the placed structure (L/H) and the elastic modulus of base structure (E_r). For this parametric study, many cases with different values of L/H and E_r are analysed by the FEM program and the co-relationship of the those major factors is examined. To evaluate the effect of external restraint on the thermal behavior of placing structure, internal restraint stress caused by temperature difference is subtracted from total thermal stress.

In the case of small value of L/H or E_r , it shows an internally restricted mode indicating maximum tensile stress in surface at early age, and the external restraint makes the possibility of thermal cracking higher. However, in the case of the large values of L/H and E_r the crack index at center is smaller than at surface due to the effect of external restraint. Thus, the initial location of the thermal crack is shifted from the surface to the center and the resulting crack is formed at later age.

1. 서론

콘크리트는 경화과정에서 수화현상에 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_i)(통상 이것을 내부구속응력이라고 부름)과 체적의 팽창 또는 수축이 외부의 구속에 의해서 발생하는 응력(σ_e)의 합으로 나타내진다(그림-1 참조).

$$\sigma = \sigma_i + \sigma_e \quad (1)$$

* 정회원 : (주)대우건설기술연구소 책임연구원, 공박

** 정회원 : (주)대우건설기술연구소 연구원

*** 정회원 : (주)대우건설기술연구소 소장, 공박

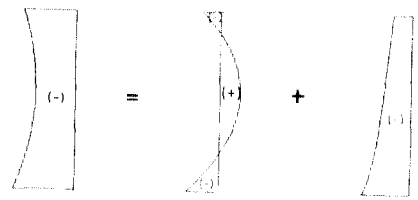


그림-1 온도응력의 발생기구

이 때에 내부구속 응력성분이 커서 전체의 온도응력 크기를 지배할 경우에는 온도응력의 양상이 온도분포형상에 크게 의존하기 때문에, 단위시멘트량이나 타설온도 그리고 타설높이 등 콘크리트 타설계획에 의해 주로 정해지는 값만 정해지면 온도분포로부터 온도응력을 어느 정도 용이하게 파악할 수가

있다¹⁾. 그러나 경암위에 콘크리트를 타설하는 경우나 기타 외부구속의 영향이 큰 경우에는 구조물의 크기나 하부의 압반상태에 따라 온도응력의 발생양상이 크게 달라지기 때문에 균열의 발생시기나 위치 등에 대한 추정이 매우 곤란하다²⁾.

외부구속효과를 포함한 온도응력 추정방법으로 예전부터 사용되어온 대표적인 방법은 ACI 207위원 회법으로서³⁾, 이 방법에서는 외부구속계수를 밑면길이와 타설높이와의 비(이하 L/H로 약칭)로 나타내어 응력을 계산한 후, 수정계수를 이용해 구속체 탄성계수의 영향을 간접적으로 고려하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 구조물내의 온도분포가 일정하지 않을 경우에는 적용이 곤란하고, L/H가 작을 경우에는 실제와 맞지 않는 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 관점에서 매스콘크리트의 온도응력 중 특히 외부구속 응력에 영향을 미치는 인자에 대한 영향도를 검토하기 위하여, L/H와 하부 구속체의 탄성계수(E_r)를 인위적으로 바꾼 16개의 해석모델에 대한 parameter study를 실시하여 각 인자의 변화에 따른 외부구속도의 변화를 검토하였다.

2. 검토방법

1) 해석 인자

외부구속의 영향도 검토를 위해서는 L/H와 E_r 을 기본 해석인자로 하여 내부구속이 강한 경우 부터 외부구속이 강한 경우에 이르기까지의 가장 일반적인 경우를 대상으로 하기 위하여, 표-1과 같이 L/H를 4 수준(편의상 본문에서는 L₁, 2, 3, 4 시리즈라고 분류), 그리고 E_r 은 암반의 종류를 연암부터 경암까지, 그리고 기타설한 콘크리트 위에 추가적으로 콘크리트를 타설할 경우를 가정하여 500kg/cm² 부터 300,000kg/cm²까지 4 수준(편의상 E₁, 2, 3, 4 시리즈라고 분류)으로 변화시킨 16개의 해석모델에 대하여 실시하였다.

그리고 외부구속에 의한 영향을 검토하기 위해서는 식(1)과 같이 전체 온도응력으로 부터 별도로 계산한 내부구속만에 의한 응력을 빼서 외부구속만에 의한 응력을 계산하였다.

표-1 해석모델명

변동 인자		구속체 탄성계수 E_r (kg/cm ²)			
		500	10,000	50,000	300,000
L/H	2	L ₁ E ₁	L ₁ E ₂	L ₁ E ₃	L ₁ E ₄
	4	L ₂ E ₁	L ₂ E ₂	L ₂ E ₃	L ₂ E ₄
	6	L ₃ E ₁	L ₃ E ₂	L ₃ E ₃	L ₃ E ₄
	10	L ₄ E ₁	L ₄ E ₂	L ₄ E ₃	L ₄ E ₄

2) 대상구조물 및 가정사항

본 해석수행을 위해서는 자체적으로 개발한 2차원 수화열 및 온도응력 해석 프로그램을 사용하였으며, 해석은 3시간 간격으로 하여 총 30일 경과시까지의 응력변화를 검토하였다. 대상구조물은 편의상 대상구조물을 온도장과 응력장이 일치하는 슬래브구조물로 정하여⁴⁾ 수화열해석과 온도응력 해석을 동일한 유한요소 분할도에 대해서 실시하였다.

또한 해석시 단위시멘트량과 타설온도는 전체 해석모델에 대하여 모두 동일하게 400kg/m³, 20°C로 가정하여 사용하였다.

3. 내부구속응력과 외부구속응력

1) 내부구속응력

본 연구에서 외부구속응력의 영향을 검토하기 위하여 사용한 내부구속응력은 외부구속의 영향을 없애기 위하여 외부구속체의 탄성계수를 거의 0에 가깝게 입력하여(실제로는 1.0kg/cm² 입력) 계산한 응력값을 내부구속만에 의한 응력으로 간주하여 사용하였다.

내부구속에 의한 온도응력 이력곡선은 그림-2와 같다.

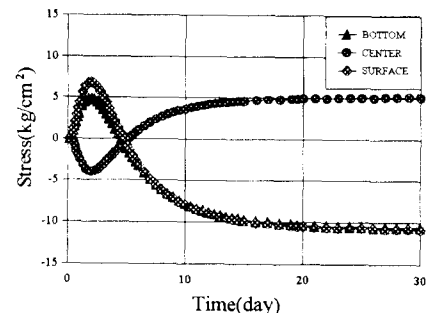


그림-2 내부구속에 의한 온도응력 이력곡선

그림-2을 보면 내부구속에 의한 온도응력은 초기에 표면부가 인장응력을 나타내다가 약 1~3일 경과시에 peak를 나타내다가 서서히 압축응력성분이 증가하면서 압축응력으로 바뀌고, 중앙부는 그 반대로 압축응력을 나타내다가 표면부의 인장응력이 peak에 도달하는 시점을 기점으로 인장응력성분이 증가하여 인장응력으로 바뀌는 응력상태를 나타내었

다.

2) 외부구속응력

먼저 재형변화에 따른 각 위치별 외부구속응력의 크기를 검토하기 위하여 전체응력으로부터 그림-2의 내부구속응력을 빼서 그림-3과 같이 정리하였다(편의상 E₁ 시리즈의 경우는 내부구속응력과 거의 크기 차이가 없었기 때문에 생략하였다).

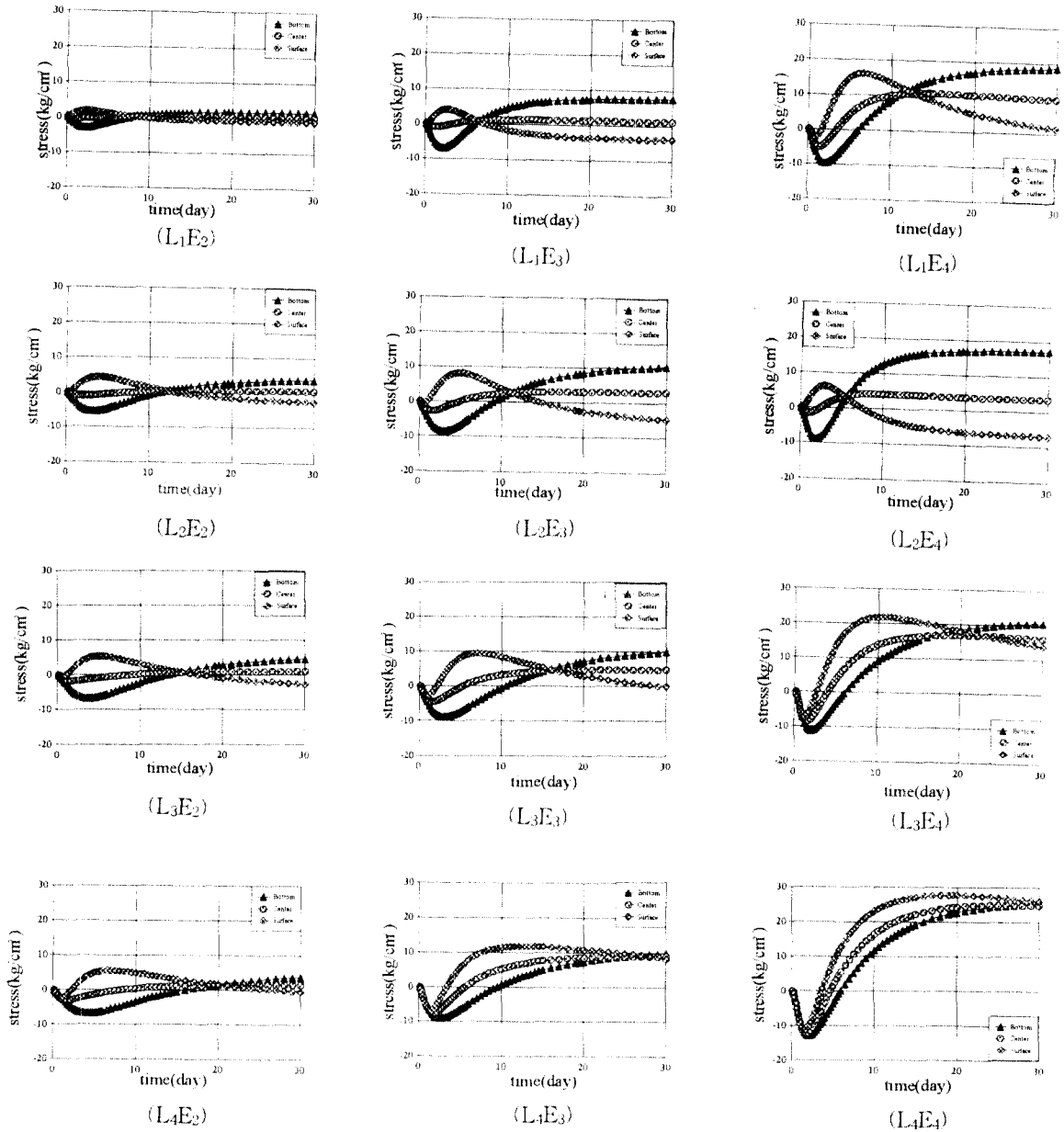


그림-3 외부구속응력

그림-3을 보면 L_1 시리즈나 E_2 시리즈와 같이 L/H 나 E_r 중 어느 한 쪽이 작은 경우에는 초기 온도상승시에는 바닥부는 압축력, 표면부는 인장력으로 작용하고, 온도 하강시에는 그 반대로 작용하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 응력상태는 그림-2의 내부구속만에 의한 응력분포와 비슷한 유형으로서, 외부구속응력은 표면부의 경우는 인장응력을 더욱 증가시키고 중앙부는 압축응력을 더욱 크게 하는 역할을 하게 된다. 따라서 L/H 가 작은 상태에서 구속체의 탄성계수가 증가하거나 또는 구속체 탄성계수가 작은 상태에서 L/H 가 증가하게 되면 균열의 발생가능성 높아지는 것을 알 수 있다.

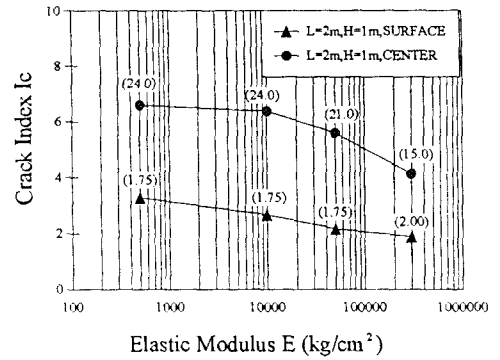
또한, L/H 나 E_r 이 모두 큰 L_4E_4 의 경우를 보면 외부구속에 의한 응력이 연직방향의 전 위치에 걸쳐 초기에는 압축응력 그리고 나중에는 인장응력을 나타내는 응력분포를 나타내고 있으며, 그 크기도 그다지 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 외부구속응력의 크기는 내부구속응력에 비해 월등히 커서 균열의 발생위치 및 발생시기는 전적으로 외부구속도의 지배를 받아, 외부구속이 강한 구조물의 경우는 L/H 와 외부구속체의 종류가 온도균열제어의 중요한 변수가 됨을 알 수 있다.

3) L/H 와 E_r 의 크기에 따른 균열모드 분류

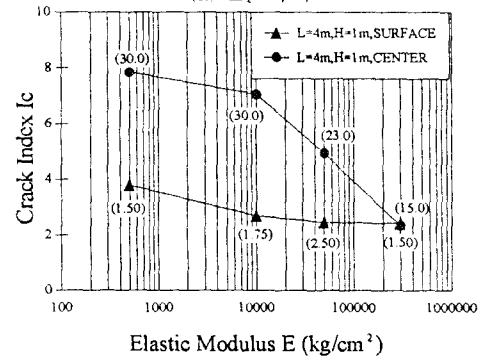
L/H 와 E_r 의 변화에 따른 온도균열의 발생위치 및 발생시기를 검토하여 위하여 각 해석모델에 대하여 표면부와 중앙부에서 최소가 되는 온도균열지수값과 발생재령을 그림-4에 나타내었다.

그림-4를 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 커질 수록 각 위치에서의 온도균열지수는 E_r 의 영향을 크게 받아, 표면부의 경우는 온도균열지수가 점차로 커지고 중앙부의 경우는 점차로 감소하는 것으로 나타나 L_4E_3 이상이 된 경우에는 표면부보다는 오히려 중앙부가 균열발생 가능성이 더 높아지는 것으로 나타났다.

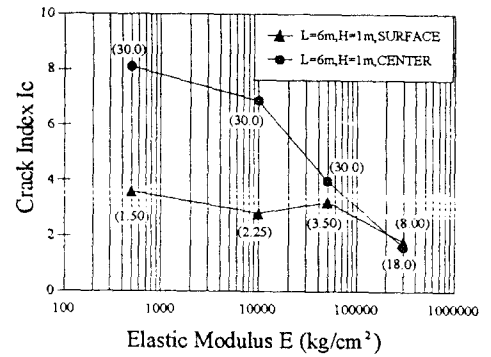
그림-4에서 단면 각 위치에서의 온도균열지수로 부터 L/H 와 E_r 의 크기에 따라 온도균열을 발생모드 별로 분류하면 표-2와 같다.



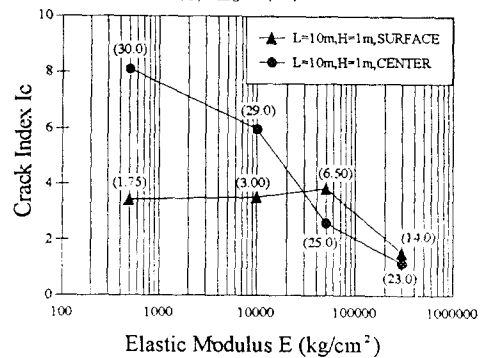
(a) L_1 시리즈



(b) L_2 시리즈



(c) L_3 시리즈



(d) L_4 시리즈

그림-4 표면부와 중앙부의 온도균열지수

표-2 온도균열 발생모드

변동 인자	$E_r(\text{kg/cm}^2)$				
	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

표-2에서 모드(I)의 경우는 중앙부보다는 표면부의 온도균열지수가 작아 표면부의 응력상태가 온도균열의 발생을 지배하는 영역으로서, 내부온도차가 최고치에 도달하는 타설후 약 1~3일이 경과한 시점에서 온도균열의 발생이 예측되는 경우이다. 또한 모드(II)의 경우는 표면부와 중앙부의 온도균열지수가 거의 같은 경우로서, 온도균열의 발생이 (I)의 경우보다 훨씬 늦춰진 3~15일로 예측되는 경우이며, L/H와 구속체 탄성계수의 크기에 따라 각각 균열의 발생시점 및 발생위치가 달라지기 때문에 표면부와 중앙부의 온도균열지수의 대소를 검토하지 않으면 안된다. 그리고 모드(III)의 경우는 표면부 보다 중앙부의 온도균열지수가 작아져서 중앙부의 응력상태가 온도균열의 발생을 지배하는 영역으로서 타설 후 약 14일 이후에 온도균열의 발생이 예측되는 경우이다. 이것을 균열모드별로 정리하면 표-3과 같다.

표-3 온도균열모드의 특성

균열모드	발생위치	발생시기
(I)	표면부에 분산해서 발생	1 ~ 3일 경과후
(II)	표면 또는 중앙부	3 ~ 14 일 경과후
(III)	중앙부	14일 이후

이상과 같이 온도균열의 발생위치와 시기는 L/H와 E_r 의 대소에 따라 크게 달라져 표-3에서 모드 (I), (III)의 경우는 그 각 인자의 크기에 따라 어느 정도 구분이 가능하지만, 모드(II)의 경우는 각 인자의 크기에 따라 균열의 발생위치 및 발생시기가 각각 달라질 수 있기 때문에 구속체 탄성계수의 입력시에 특히 주의하지 않으면 안된다.

4. 결론

본 연구에서는 단위시멘트량과 타설온도 그리고 타설높이를 고정시킨 극히 제한된 범위내에서 해석

을 수행하였기 때문에 외부구속도의 정량화까지는 이르지 못하였지만, 외부구속응력에 영향을 미치는 L/H와 E_r 의 특성은 파악할 수가 있었다.

검토를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 온도균열의 발생모드는 L/H와 구속체 탄성계수의 크기에 따라 세가지로 분류가 가능하다.
- 2) L/H가 작거나 구속체 탄성계수가 작을 경우는 초기에 표면부에서 최대인장응력을 나타내는 내부구속 응력형태를 나타내며, 이때에 외부구속응력의 증가는 표면부의 온도균열 발생가능성을 더 크게 해준다는 것을 알았다.
- 3) 외부구속이 강한 구조물의 경우는 하부구속체의 종류와 콘크리트 1회 타설부분의 크기, 즉 L/H가 온도균열제어의 중요한 변수가 됨을 알았다.

5. 참고문헌

- 1) 森永繁, 桑原隆司, “マスコンクリートの溫度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回マスコンクリートの溫度應力發生メカニズムに関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工學協會, 1982年 9月, pp. 61-68
- 2) 石川雅美, 前田強司, 西岡哲, 田邊忠顯, “マスコンクリートの外部拘束メカニズムに及ぼすL/Hの影響”, 콘크리트工學年次論文報告集, 12-1, 1990, pp. 851-856
- 3) ACI Committee 207, “Effect of Restraint, Volume Change, Reinforcement on Cracking of Massive Concrete”, Concrete Practice of Manual ACI 207.2R-73, 1986, pp. 4-6
- 4) マスコンクリートの溫度應力研究委員會, “マスコンクリートの溫度應力推定に関する既往の研究-その總括(その1)”, 콘크리트工學, Vol. 21, No. 8, 1983年 8月, pp. 4-17