

매스콘크리트 교각의 수화열에 의한 온도 및 응력 거동에 대한 3차원 유한요소 해석

A 3-Dimensional Finite Element Analysis of the Temperature and
Stress Development in Mass Concrete Pier due to Heat of Hydration

주영춘* 김은겸** 신치범***
Ju, Young Chun Kim, Eun Kyum Shin, Chee Burm

Abstract

The temperature and stress behaviour of mass concrete pier at early ages was analysed based on the finite element method. The pier investigated is a three-dimensional structure of which the cross-sectional shape varies from a circle to an ellipsoid along the longitudinal axis. In order to obtain the transient temperature and stress distributions in the structure, a three dimensional method was adopted, because the structure of this type cannot be modeled accurately by a two-dimensional method. Temperature analysis was performed by taking into consideration of the cement type and content, boundary and environment conditions including the variations of atmospheric temperature and wind velocity. The results of this study may be useful for the temperature control to restrain thermal cracking and the construction management to design the reasonable curing method of mass concrete structure.

1. 서 론

매스콘크리트 구조물을 건설할 때 콘크리트 시공시 발생하는 수화열에 의한 온도응력발생에 영향을 주는 주된 요인으로는 시멘트의 단열온도상승량, 콘크리트 치기온도, 단위시멘트량, 양생방법 및 대기온도의 영향 등을 들 수 있다.

이와 같은 수화열에 의해 발생하는 온도응력에 의한 온도균열발생 제어대책을 수립하기 위하여는 해당 구조물에 대한 정확한 온도해석 및 응력해석이 이루어져야 한다. 응벽과 같은 벽체 구조물이나 특히 3차원 해석이 요구되는 콘크리트구조물 등의 경우 정밀한 온도해석을 실시하기 위하여는 3차원 온도해석 및 응력해석 프로그램의 개발이 요구된다.

* 정희원, 서울산업대학교 토목공학과 석사과정

** 정희원, 서울산업대학교 토목공학과 교수

*** 정희원, 아주대학교 화학공학과 부교수

본 연구 대상 구조물인 교각은 하부단면이 원형이고 상부가 타원형을 가지는 구조로서 정밀한 해석을 위하여는 3차원 해석이 필요하다. 필자들은 이와 같은 교각의 정밀한 해석을 위하여 기존에 개발한 2차원 해석 프로그램을 3차원 해석 프로그램으로 확장하였으며, 그 결과 다양한 단면형상을 가지는 구조물에 대하여도 정확한 온도해석 및 응력해석이 가능하게 되었다.

본 교각의 해석에는 실제로 그 교각이 건설되는 지역의 기후조건 및 콘크리트 치기계획 시기에 부합되는 열전달계수 등을 고려하여 해석을 실시하였으며, 이 결과는 교각 시공시 수화열에 의한 온도균열제어 대책에 대한 시공계획을 수립하는데 직접 활용할 수 있도록 하였다.

2. 수화열해석 모델

2.1 해석대상 모델의 선정

해석 대상 교각은 그림 1에 나타낸 바와 같이 9.3m×9.3m 크기의 교각기초 위에 놓여 이것과 일체를 이루는 구조체로서 높이 2m인 1단 콘크리트(5종 시멘트 사용)를 먼저 치고 10일 이 경과 후에 타원체인 높이 8m인 2단 콘크리트(1종 시멘트 사용)를 치는 것으로 계획되어 있다. 1단 교각의 단면형상은 지름이 2.2m인 원형이며, 2단 교각은 하단부 지름이 2.2m인 원형이고 상부로 향하면서 타원형상을 가지는 구조로서 상단부는 장변 3.8m, 단변 2.2m인 타원을 이루고 있다

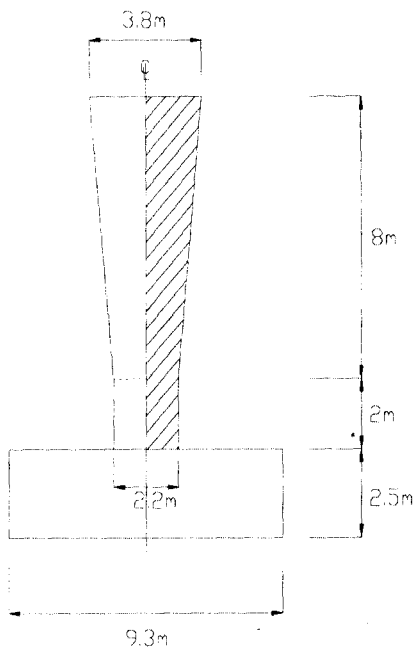


그림 1. 해석대상 구조물

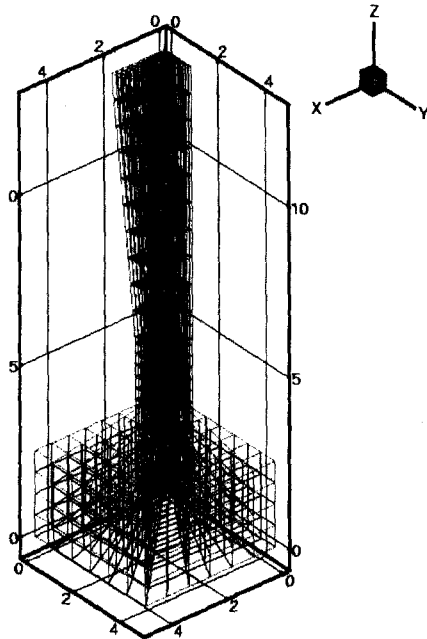


그림 2. 해석 대상 구조물의 유한요소 mesh

2.2 비정상열전도기본식

해석 대상 구조물은 3차원 해석이 요구되는 구조체로서 3차원 구조물의 온도분포 및 경계에서의 열전달 흐름은 다음과 같은 Fourier's Law의 비정상 열전도 방정식(transient heat-conduction equation)을 사용한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{dQ(t)}{dt} \quad (1)$$

$$Q(t) = K(1 - e^{-at}) \quad (2)$$

여기서, T 는 온도, t 는 시간, k, ρ, C_p 는 각각 콘크리트의 열전도율, 단위중량, 비열이며, x, y, z 는 직교좌표계의 축이고, $Q(t)$ 는 단열온도상승량을 나타내며, K 와 a 는 실험정수이다. 이 때 $\frac{dQ(t)}{dt}$ 는 수화열에 의한 단위체적당 발열량을 의미한다.

교각 해석에 사용된 경계조건은 다음과 같다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{air}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

$$T = T_F \quad (5)$$

식(3)은 대기와 접하고 있는 경계에서의 열대류경계조건을, 식(4)는 대칭면에 적용시키는 단열경계조건을 나타낸 것이며, 식(5)는 교각기초와 지반과의 경계에서의 고정온도경계조건을 나타낸 것이다.

또한, 여기서 T_{air} 와 T_F 는 각각 대기온도와 교각기초의 온도를 나타낸 것이며, h 는 공기와 접하는 경계에서의 열전달계수이다.

교각 해석에 사용된 초기조건은 다음 식과 같다.

$$T = T_0(x, y, z) \quad (t=0) \quad (6)$$

여기서, $T_0(x, y, z)$ 는 초기온도분포를 나타낸 것이다.

2.3 콘크리트의 열적특성

교각에 대한 수화열에 의한 온도해석에 사용된 콘크리트의 열적특성치는 표 1에 나타낸 바와 같다. 교각 1단 콘크리트는 기초로부터의 염분침투 등을 고려하여 5종 시멘트(내황산염시멘트)를 사용하며, 2단 콘크리트의 경우는 이에 대한 영향이 적다고 판단되어 1종 시멘트(보통포틀랜드시멘트)를 사용하여 시공하는 것으로 계획되었다.

표.1 해석에 사용된 콘크리트의 열적 특성치

| 콘크리트의 열적 특성 | | 1단 콘크리트 (5종 시멘트) | 2단 콘크리트 (1종 시멘트) |
|-------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| 단열온도상승 특성치 | $K(^{\circ}C)$ | 47.0 | 52.6 |
| | $\alpha(h^{-1})$ | 0.70 | 1.332 |
| 밀도 | $\rho(kg/m^3)$ | 2400 | 2400 |
| 열전도율 | $k(kcal/m h^{\circ}C)$ | 2.1 | 2.1 |
| 비열 | $C_p(kcal/kg^{\circ}C)$ | 0.25 | 0.25 |

2.4 수치해석방법

열전달기본식과 적용된 경계조건 및 초기조건을 만족하는 해는 통상의 Galerkin 유한요소법을 사용하여 구한다. 교각 구조물 해석에 사용된 mesh는 그림 2와 같다. 계산의 정확도를 유지하되 전산기 사용시간을 절약하기 위하여 온도경사가 심하게 일어나는 영역은 세밀한 요소를, 그렇지 않은 영역은 큰 요소를 사용하였다. 그림 2에 나타낸 요소는 교각 구조물로서 2556개의 trilinear hexahedral element(3184 nodes)가 사용되었다. 또한, 시간에 따른 온도분포의 변화를 추적하기 위하여 implicit predictor multicorrector 방법이 사용되었다. 계산은 HP workstation 715/50에서 수행하였다.

3. 콘크리트 온도 및 응력해석

3.1 온도해석

온도해석에 사용된 외기온도는 콘크리트 치기시기를 10월로 하여 그 지역의 평균대기온도 $T_{air}=14.3^{\circ}C$ 로 하였으며, 치기시의 콘크리트온도는 $T_i=20^{\circ}C$ 로 설정하였

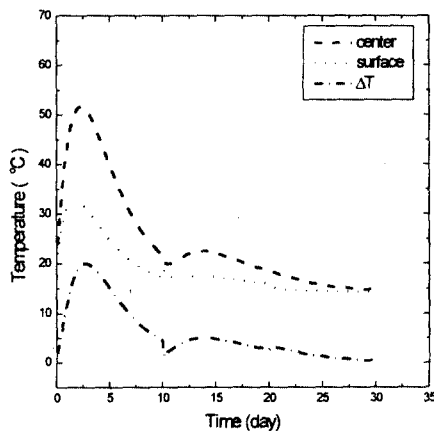


그림 3. 1단 콘크리트 온도해석 결과

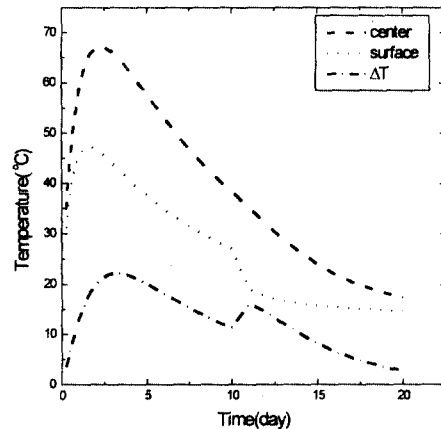


그림 4. 2단 콘크리트 온도해석 결과

다. 치기가 끝난 후에는 양생시트 2장을 덮어 10일간 시트 양생을 실시하는 것으로 하였다.

그림 3 및 그림 4는 각각 교각 1단 및 2단 콘크리트의 온도해석 결과를 나타낸 것이다. 1단 콘크리트의 최고온도시점은 2.4일이고 내외부 최고온도는 각각 52°C 및 32.5°C이며 그 차는 19.5°C이다. 또한 2단 콘크리트의 경우 내부 최대온도는 콘크리트 치기 시점으로부터 약 2.5일이 경과한 후 67.2°C, 콘크리트 표면부의 최고온도는 47.2°C를 나타내고 있어 내외부온도 차는 21.3°C를 나타내고 있다.

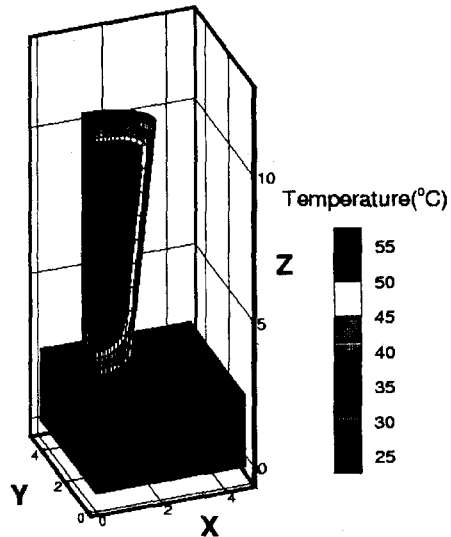


그림 5. 2단 콘크리트 온도해석 결과

1단 및 2단 콘크리트에 대하여 콘크리트표준시방서에서 제시하고 있는 온도균열지수를 계산하면 각각 0.8 및 0.7이 되며, 균열발생확률은 각각 75% 및 90%에 해당되는 것으로 수화열에 의한 온도균열발생이 예상된다.

그림 5는 교각 2단 콘크리트의 온도해석결과를 3차원적으로 나타낸 것으로서 수화열에 의한 온도분포가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.2 응력해석

그림 6과 그림 7은 1단 및 2단 콘크리트의 응력해석 결과를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 교각 표면에 발생하는 최대인장응력은 각각 4일 및 3.5일에서 발생되

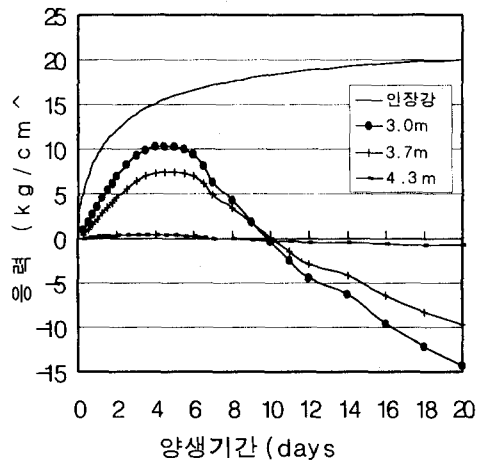


그림 6. 1단 콘크리트 온도응력 해석결과

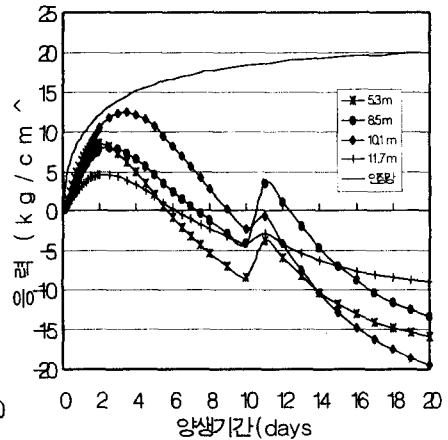


그림 7. 2단 콘크리트 온도응력 해석결과

고 있으며, 그 값은 각각 10.5 kgf/cm^2 및 12.4 kgf/cm^2 를 나타내고 있다.

이들 콘크리트 표면에서 발생하고 있는 최대인장응력은 그 시점에서의 콘크리트 인장강도 14.5 kgf/cm^2 이하로서 온도균열지수는 각각 1.38 및 1.19가 된다.

그림 8은 응력해석결과를 3차원 그래프로 나타낸 것으로서 구조물 전체의 온도응력에 대한 거동을 쉽게 알 수 있다. 이 그림으로부터 콘크리트 표면온도가 최대가 되는 시점에서 콘크리트 내부에는 압축응력의 발생으로 내부구속에 의하여 표면부에 온도균열이 발생한다는 이론을 뒷받침 해주고 있음을 알 수 있다.

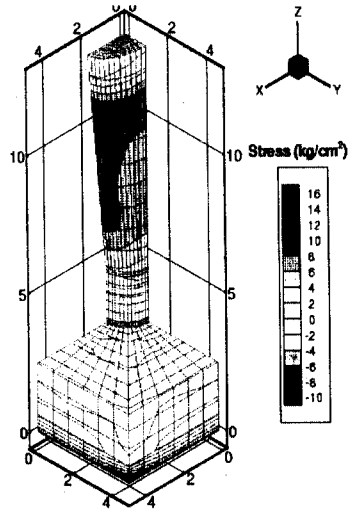


그림 8. 2단 콘크리트 온도응력 해석 결과

참고문헌

1. 김은겸, 김래현, 신치범, 「유한요소법에 의한 매스콘크리트 구조물의 온도해석 프로그램 개발」, 한국콘크리트학회 논문집, 제7권 6호 1995, 12, p.p.167~175
2. 일본콘크리트공학협회, 「매스콘크리트 온도응력 연구위원회 보고서」, 1998년 4월