

매스 콘크리트 구조물의 연속 분할타설시 타설블록의 크기 및 타설순서를 고려한 합리적인 수화열 해석

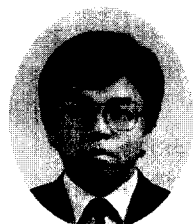
Realistic Analysis Method for Continuously Block-Placed Mass Concrete Structures Considering Block Size and Sequence of Concrete Placement



오병환*
Oh, Byung-Hwan



전세진**
Jeon, Se-Jin



유성원**
Yoo Sung-Won

ABSTRACT

The mass concrete structures are generally constructed in an incremental manner by deviding the whole structures by a series of many blocks. The temperature and stress distributions of any specific block are continuously affected by the blocks placed before and after the specific block. For an accurate analysis of mass concrete structures, the sequence of all the blocks must be accordingly considered including the change of material properties with time for those blocks considered.

The purpose of this study is to propose a realistic analysis method which can take into account not only the influence of the sequence, time interval and size of concrete block placement on the temperatures and stresses, but also the change of material properties with time. It is seen from this study that the conventional simplified analysis, which neglects material property changes of some blocks with time and does not consider the effect of adjacent blocks in the analysis, may yield large discrepancies in the temperature and stress distributions of mass concrete structures. This study gives a method to choose the minimum number of blocks required to obtain reasonably accurate results in analysis. The study provides a realistic method which can determine the appropriate size and time interval of block placement, and can be efficiently used in the design and construction of mass concrete structures.

keywords : mass concrete structures, thermal stress, thermal cracking, early ages, temperature rise, block size, placement sequence

* 정희원, 서울대학교 토목공학과 교수
** 정희원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

·본 논문에 대한 토의를 1999년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

매스 콘크리트 구조물은 과도한 수화열을 방지하기 위하여 일정한 타설간격 및 타설치수를 가지고 단계적으로 시공되는 경우가 많다. 이때 타설간격 및 타설치수는 시공전 구조검토단계에서 미리 결정되어야 하며, 따라서 매스 콘크리트 구조물의 경우 하중에 대한 해석외에도 시공초기단계의 수화열 및 열응력에 대한 해석이 필수적이다.

그러나 지금까지의 많은 매스 콘크리트 구조물들은 다양한 타설간격 및 타설치수에 대한 엄밀한 해석 없이, 간이해석이나 시방서에 의한 간단한 수계산만을 거친후 시공되어 왔으며, 또는 기존의 시공설적이나 경험에 의존하여 시공된 경우도 많았다.

분할되어 연속적으로 타설되는 매스 콘크리트 구조물의 온도나 응력값은 검토대상블록보다 먼저 또는 나중에 타설되는 블록들에 의해 계속적으로 영향을 받으며 따라서 엄밀한 온도 및 열응력해석에서는 매스 콘크리트 구조물을 이루고 있는 모든 타설블록들을 해석상에 포함시켜야 한다. 이때 각 타설블록들은 타설시간의 차이로 인하여 모두 다른 재료물성의 변화를 겪고 있는 점을 해석시 면밀히 고려하여야 한다.

이러한 점을 고려하기 위해서는 첫째, 그러한 물성변화의 차이를 해석상에서 모두 고려할수 있고 둘째, 새로 타설되는 부분을 연속적으로 구조해석모델링에 포함시킬수 있는 기능을 가진 온도 및 열응력해석 프로그램이 사용되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 기능을 가지고 있으며 또한 범용구조해석프로그램과의 비교검증을 거친 온도 및 열응력해석 프로그램⁽¹⁾을 사용하여 연속적으로 분할타설되는 해석예를 분석하여 합리적인 해석의 필요성을 제시하고 또한 좀 더 정확하고 효율적인 해석방안을 제시하고자 하였다.

2. 기존의 해석법에 대한 고찰

기존의 매스 콘크리트의 온도 및 열응력해석은 타설간격이 짧은 관계로 신타설 콘크리트의 저면이 덜 경화되어 있고 또한 계속적으로 온도분포

및 물성이 변화하고 있는 경우에도 편의상 저면은 28일 강도가 발현되어 더 이상의 물성변화가 없고 온도분포도 일정하다고 가정하고 해석을 수행하는 경우가 많았다. 또한 상부에 계속적으로 타설되는 블록도 검토대상블록에 적지 않은 영향을 미치는데 이를 무시하고 검토대상블록 자체만을 가지고 해석하는 경우도 많았다.

이러한 해석법은 첫째, 기타설과 신타설 콘크리트의 타설간격이 매우 커서 기타설 콘크리트가 추가의 물성변화가 크지 않을 정도로 완전히 경화되어 있고 온도분포도 거의 일정한 경우와 둘째, 신타설 콘크리트에 접하여 더 이상 타설되는 블록이 없는 경우에만 어느 정도 실제상황과 비슷하다고 할 수 있다.

실제로는 그리 큰 시간간격을 두지 않고 연속적으로 분할타설되어 매스 콘크리트 구조물이 시공되는 경우가 많은데 이때에는 그러한 기존의 간이해석법이 실제의 온도 및 응력값과 큰 차이를 보일 수 있다.

3. 연속적인 분할타설에 대한 해석

3.1 재료물성

(1) 탄성계수

초기 재령 콘크리트의 역학적 성질은 재령에 따른 경화정도 즉, 탄성계수값에 크게 좌우된다. 본 해석에서는 다음과 같이 CEB-FIP의 탄성계수 모델을 사용하였다.⁽²⁾

$$E_c(t) = \exp\left[\frac{s}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right] E_{c,28} \quad (MPa)$$
$$E_{c,28} = 10,000(f_{cm})^{1/3} \quad (1)$$

여기에서,

t : 재령(일)

s : 시멘트 종류에 따른 계수

$E_{c,28}$: 재령 28일에서의 콘크리트 탄성계수(MPa)

f_{cm} : 재령 28일에서의 콘크리트 평균 압축강도 (MPa)

윗식에서 탄성계수는 재령의 함수이지만 이는 일정한 온도와 양생조건으로부터 결정된 것이므로 엄밀히 말하여 매스 콘크리트와 같이 온도이력이 단면의 위치에 따라 변화하는 구조물의 경우 미소한 오차를 발생시킨다. 따라서 구조물 각 부분의 온도이력을 함께 고려하여 해석의 정도를 높일 수 있으며 본 해석에서는 다음과 같이 윗식의 t 값 대신 온도와 재령을 함께 고려한 등가재령 t_{eq} 의 개념을 사용하였다.⁽³⁾ (Byfors, 1980; Jonasson, 1994)

$$t_{eq} = \int_0^t \beta_T dt$$

$$\beta_T = \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273}\right)\right) \quad (2)$$

$$\frac{E}{R} = \theta = \theta_{ref}\left(\frac{30}{T+10}\right)^{\kappa_3}$$

여기서 E는 활성화에너지, R은 기체상수로서 E/R는 활성화온도이며, 기준온도는 20℃로 설정하였다. 또한 기존의 실험결과에 의하면 보통 포틀랜드 시멘트에 대한 $\theta_{ref}=5700K$, $\kappa_3=0.54$ 정도이다.

(2) 인장강도

인장강도는 해석상에 직접적으로 쓰이지는 않으나 해석상의 열응력값과 비교하는 과정에서 사용되었다. 보통 포틀랜드 시멘트를 사용했을 때 재령에 따른 압축강도발현곡선은 콘크리트 표준시방서에 의하면 다음과 같다.

$$\sigma'_c = \frac{t}{4.5 + 0.95t} \sigma'_{c(91)} \quad (3)$$

여기에서 t 는 재령(일)이며 $\sigma'_{c(91)}$ 은 91일 재령에서의 콘크리트의 압축강도이다. 만약 28일 재령에서의 압축강도를 기준으로 한다면 28일과 91일에서의 압축강도의 비를 적용하면 된다. 본 해석에서 사용한 구조물의 28일 설계기준강도는 $350kg/cm^2$ 이다.

한편 콘크리트의 압축강도와 인장강도의 관계식은 여러 가지가 있으나 시방서의 매스 콘크리트편의 식을 사용하면 다음과 같다.

$$\sigma_t = 1.4\sqrt{\sigma'_c} \quad (4)$$

(3) 단열온도상승곡선

본 해석에서는 가장 일반적으로 쓰이는 아래와 같은 단열온도상승식을 사용하였다.

$$Q(t) = Q_\infty(1 - e^{-rt}) \quad (5)$$

t 는 재령(일), $Q(t)$ 는 재령 t 일에서의 단열온도상승량(℃)이다. 본 해석에서 가정한 타설온도는 20℃, 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트로서 시멘트량은 $350kg/m^3$ 이다. 이때 콘크리트 표준시방서에 의하면 $Q_\infty=51.5℃$, $r=1.294$ 로 계산되어진다.

(4) 기타물성

전산구조해석시 사용된 기타 재료물성은 다음과 같다. 열팽창계수의 경우 열응력에 직접적인 비례관계가 있으므로 선택에 신중을 기해야 한다. 실험에 의하면 열팽창계수값보다 열수축계수값이 약간 작은 경우도 있는 것으로 알려져 있으나 이들의 정확한 근거가 없으므로 본 해석에서는 같은 값을 사용하였다.

해석시 가정한 타설온도는 20℃, 평균외기온도는 15℃로서 타설온도와 외기온도의 차이는 5℃이다.

Table 1 Material properties of concrete used in the analysis

density	2300kg/m ³
conductivity	2.2kcal/(mh℃)
convection coefficient	9.0kcal/(m ² h℃)
specific heat	0.25kcal/(kg℃)
thermal expansion coefficient	10×10 ⁻⁶ /℃

3.2 요소의 크기에 대한 고려

온도해석시 해의 수치적인 안정성과 수렴성을 보장받기 위해서는 요소의 크기 및 해석시간간격에 대한 제한사항이 있다. 한 예로서 무조건적으로 해가 안정하기 위하여 범용구조해석프로그램 ABAQUS에서 제안하는 식은 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$\Delta t > \left(\frac{\rho C}{6k}\right)\Delta L^2 \quad (6)$$

위에서 Δt 는 해석시간간격, ΔL 은 요소의 크기, ρ 는 밀도, k 는 열전도도, 그리고 C 는 비열이다. 본 해석에서 해석시간간격은 4시간으로 택하였으므로 Table 1의 물성값들을 대입하면 요소의 크기는 약 30cm이하로 되어야 함을 알 수 있다. 그러나 온도의 변화가 크지 않은 방향으로서는 위의 요소 크기보다 커도 해석값에 큰 영향이 없다는 연구결과가 있으므로^{(5),(6)} 본 해석에서는 요소의 크기를 기본적으로 25cm로 하되 Fig. 1에서 10m 길이방향으로는 50cm로 하였다.

3.3 해석예제 및 결과분석

3.3.1 해석예제 및 유한요소모델링

본 해석에서 채택한 매스 콘크리트 구조물의 형상은 Fig. 1과 같으며 시방서에 의한 매스 콘크리트의 범주에 들고 있다. 이미 강도발현이 되어있는 높이 1m의 기타설 콘크리트 층위에 5일 간격으로 각 1m 높이의 5개 층이 추가로 타설되는 경우를 고려하기로 한다. 가장 아래의 기타설 콘크리트는 이미 타설시간이 상당히 경과되었으므로 외기온도와 같은 초기온도를 갖는 것으로 고려하였다.

온도해석시 기타설 콘크리트의 하면은 고정온도 경계조건으로 두었으며, 그 외의 기타설 또는 신타설 콘크리트의 모든 면은 대류경계조건으로 처리하였다. 열응력해석시 기타설 콘크리트의 하면은 구속하였다. 또한 구조물에 대칭성이 있으므로 온도 및 열응력의 유한요소해석시 경계조건을 적절히 설정하여 전체구조물의 1/4만을 모델링에 포함시켰다.

3.3.2 온도해석결과

해석결과 각 신타설 콘크리트 블록의 중심부 요소의 온도변화는 Fig. 2와 같다. 각 곡선이 처음 시작되는 점이 각각의 새로운 콘크리트 블록이 타설되는 시점이다.

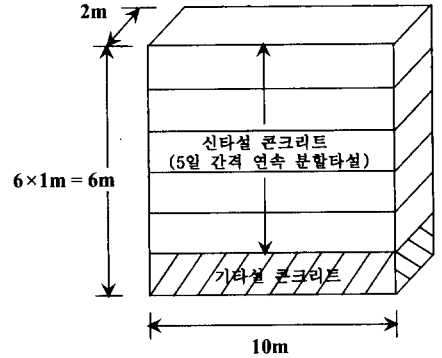


Fig. 1 Analysis example of incremental placing

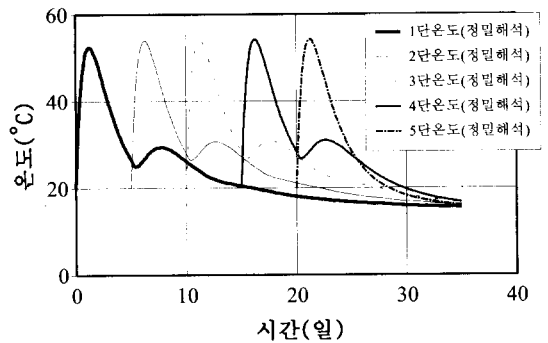


Fig. 2 Development of temperature in each block

Fig. 2에서 다음과 같은 점들을 관찰해 볼 수 있다. 아래에서 언급한 점들은 본 예제에 관련된 것이며 해석시 설정한 재료물성, 타설간격 및 타설높이 등에 따라 차이를 보일 수 있으나 전체적인 경향은 비슷할 것으로 사료된다.

첫째, 각 타설블록은 상부에 타설되는 블록들의 수화열의 발현에 의한 영향으로 주기적인 온도의 상승 및 하강의 형태를 보인다. 본 예제에서는 주로 검토대상블록의 상부에 타설되는 1개 단까지가 지배적인 영향을 미치며 그 이상의 블록은 온도에 있어서 미미한 영향을 보이고 있다.

둘째, 상부타설블록의 영향으로 최대온도가 외기온도까지 떨어지는 시점은 상부타설블록이 없을 때보다 상당히 늦추어진다. 상부타설블록이 존재하는 1~4단의 온도이력과 상부타설블록이 없는 5단의 온도이력을 비교해보면 이러한 경향이 확인해진다.

셋째, 바로 전 타설블록에 잔여온도가 있는 상태에서 새로운 블록을 타설할 경우 최대온도의

상승효과가 있다. 본 예제에서는 수화열에 의한 대부분의 온도가 이미 빠져나간 시점에서 상부에 새로운 콘크리트가 타설되므로 최대온도의 상승 효과는 최대 2°C 정도로 미미한 편이다.

3.3.3 열응력해석결과

각 신타설 콘크리트 블록 측면의 10m길이방향 표면응력이 최대로 발생하는 높이에서 응력의 변화는 Fig. 3와 같다. 이는 매스 콘크리트 벽체구조물에서 흔히 발견되는 수직균열에 관계된 응력이다. 역시 각 곡선이 처음 시작되는 점이 각각의 새로운 콘크리트 블록이 타설되는 시점이다. 온도균열의 가능성을 평가하기 위하여 각 곡선마다 인장강도와 비교해야 하며 Fig. 3에서는 1단에 타설된 콘크리트 응력값에 대하여서 인장강도 발현곡선을 나타내었다.

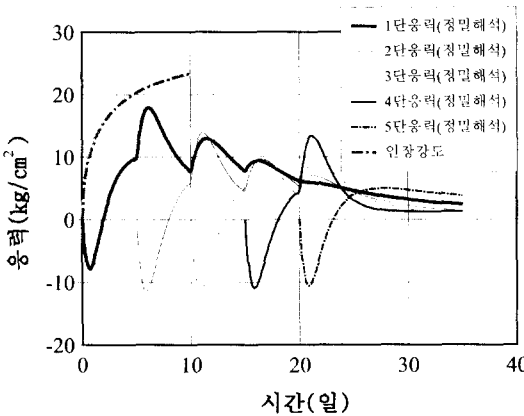


Fig. 3 Development of thermal stress in each block at the surface

Fig. 3에서 다음과 같은 응력이력의 특성들을 규명할 수 있다. 아래에서 언급한 점은 역시 본 예제의 해석에 관련된 것이며 해석시 설정한 인자들에 따라 차이를 보일 수 있다.

첫째, 온도와 마찬가지로 각 타설블록은 상부에 타설되는 블록들의 영향으로 주기적인 응력의 상승 및 하강의 경향을 보인다. 본 예제의 경우 검토대상블록으로부터 상부의 3개단까지는 검토대상블록의 응력변화에 지배적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 형태상으로 볼 때 2~4단까지의 응력이 비슷한 경향을 보이고 있다. 즉, 기타설 콘크리트에 시공되는 1단 이후의 연속타

설 과정에 있는 블록들은 비슷한 응력이력을 가지는 것으로 나타나고 있다. 이는 본 예제에서 만약 신타설블록을 5개 이상 취했다라도 처음과 마지막 타설블록을 제외한 연속타설과정에 있는 블록들은 응력면에서 비슷한 경향을 보였을 것임을 시사하고 있다.

둘째, 각 타설블록의 응력이력곡선의 형태는 다음과 같이 설명되어질 수 있다. 검토대상블록이 타설된 후 저면 구속의 영향으로 초기압축응력의 단계를 거쳐 인장응력상태로 전환된다. 특정시점에서 상부에 새로운 블록이 타설되어 수화열이 발현되면서 팽창하려는 경향을 검토대상블록이 구속하고 있으므로 검토대상블록에 추가의 인장응력이 발생한다. 이후 검토대상블록에도 상부의 온도가 전달되어 오면서 열에 의해 팽창하려는 경향을 보이므로 저면 구속의 효과에 의해 다시 압축응력이 도입된다. 이러한 과정이 상부에 새로운 콘크리트를 타설할 때마다 반복되어 주기적인 형태를 보이지만 그 영향은 차차 감소되므로 Fig. 3와 같은 응력이력곡선의 형태를 가지게 된다.

셋째, 본 예제에서는 1단에서 가장 큰 인장응력이 발생하고 있으므로 5개의 타설블록 중 가장 온도균열이 발생할 확률이 크다 할 수 있다. 이는 근본적으로 본격적인 5일 간격 연속타설과정에 들어갔을 때의 각 블록들간의 물성의 차이보다 기타설 콘크리트와 1단과의 물성차이가 크므로 저면구속의 효과도 더 커지기 때문이다.

넷째, Fig. 3에서 1단의 응력값과 인장강도를 비교한다면, 온도균열지수를 '인장강도/인장응력'으로 정의할 때 최소 온도균열지수값은 1단 타설 후 6일이 경과한 시점 또는 2단 타설 후 1일이 경과한 시점에서의 1.19로서 콘크리트 표준시방서에 따르면 1단 블록에서는 측면에 수직균열이 발생할 가능성이 있으나 유해하지는 않은 균열폭을 가질 것으로 예측된다. 한편 2단에서 4단까지의 최소 온도균열지수는 1.55~1.60 정도로서 본격적인 연속타설과정에 있어서의 온도균열 발생 가능성은 1단보다 더 낮게 나타났다.

다섯째, 연속타설의 과정에서 최종적인 인장응력값은 감소하면서 수렴하는 경향을 보이고 있다. 열응력해석시 내부의 인장응력은 점점 증가하면

서 수렴하는 것이 전형적인 형태이나 표면응력의 경우 최대 인장응력에 도달한 이후에 미소한 감소현상을 보이기도 한다. 이는 중심부의 온도가 표면보다 나중에 내려가므로 내부구속작용에 의해 표면에 추가의 압축응력을 발생시키기 때문이다. 물론 본 연속타설해석에서도 이러한 영향이 있으나 다음과 같은 이유로 인해 감소폭이 더욱 증가한 것으로 사료된다.

즉, 표면의 인장응력은 내부구속의 효과 및 외부구속의 효과에 모두 관계되나 외부구속의 효과를 두고 볼 때 이는 저면과의 물성차이 즉, 저면이 얼마나 경화되어 있는가에 기인하는 바 크다. 그런데 Fig. 3와 같이 인장응력영역에서 주기적인 상승과 하강을 반복하는 과정에서 인장응력이 발전되는 시점이 늦추어 지면서 검토대상블록을 구속하고 있는 하단 블록과의 물성차이가 차차 감소하게 된다. 탄성계수는 초반부에 변화가 심하며 일정 재령이후에는 어느정도 유사한 값을 갖기 때문이다. 따라서 최종적으로 수렴하는 인장응력값은 그리 크지 않으며 또한 다른 타설블록들과 응력을 분배하는 과정에서 인장응력값이 감소하는 경향을 보이는 것이다.

4. 연속타설되는 구조물의 부분모델링

앞서 언급하였듯이 분할되어 연속적으로 타설되는 매스 콘크리트 구조물의 검토대상블록의 온도나 응력값은 먼저 또는 나중에 타설되는 타설블록들에 의해 계속적으로 영향을 받으며, 따라서 엄밀한 해석에서는 구조물을 이루고 있는 모든 타설블록들을 해석상에 포함시켜야 한다. 그러나 타설되는 블록의 갯수가 많을 경우 해석에 소요되는 비용 및 시간이 증가되는 어려움이 있다.

만약 일정한 타설높이 및 타설간격을 가지고 연속타설되는 경우 거동상의 규칙성이 있다면 전체 모델링이 아닌 부분모델링을 통하여서도 전체 구조물의 거동을 비교적 정확히 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 관점에서 본 해석예제를 연속타설되는 많은 수의 블록들로 이루어진 매스 콘크리트 구조물 중 부분모델링의 범위를 파악하기 위해 5개의 타설블록만을 가지고 예비적으로 해석한 것으로 간주한다면 다음과 같은 점들을

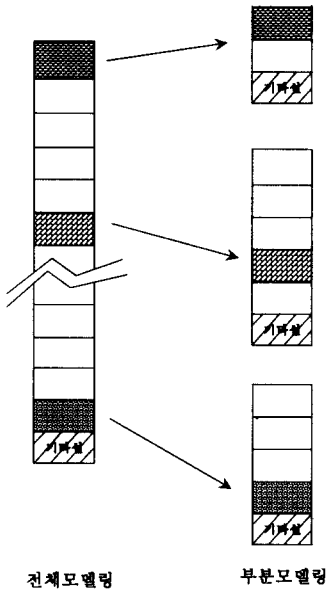
고찰해 볼 수 있다.

Fig. 2와 3에서 검토대상블록의 온도 및 응력의 변화를 살펴볼 때 검토대상블록의 온도 및 응력에 큰 영향을 미치는 상, 하의 타설블록들의 범위를 설정할 수 있음을 알 수 있다. 본 예제의 경우 특히 Fig. 3의 응력이력곡선의 형태를 주목하여 살펴볼 때 앞서 언급하였듯 상부의 영향범위를 3개의 블록으로 설정할 수 있다. 또한 2단부터는 어느정도 비슷한 곡선형태를 가지므로 마지막 블록을 제외한다면 2단이상의 블록을 2단처럼 해석하더라도 충분한 정확성을 확보할 수 있을 것으로 예측된다. 즉, 이는 2단과 같이 하부의 영향범위를 2개의 블록으로 설정하되 2개중 아래의 블록은 기타설로, 위의 블록은 타설간격에 해당하는 물성변화를 겪고 있는 것으로 모델링하여도 됨을 의미한다. 요약하자면, 검토대상블록의 상부로는 3개의 블록, 하부로는 2개의 블록만을 모델링에 포함시키더라도 결과값은 크게 달라지지 않음을 알 수 있다. 이러한 식으로 예비해석결과를 분석하여 부분모델링의 범위를 설정해 볼 수 있다.

Fig. 4에 본 예제의 전체모델링 및 가능한 부분모델링이 나타나 있다. 부분모델링은 첫타설블록과 마지막 타설블록, 그리고 내부의 타설블록에 대하여 각각 나타내었다. 그림에서 기타설이라 표현한 것은 28일 강도가 발현된 상태로 더 이상의 탄성계수의 증가는 거의 없는 상태를 의미한다.

물론 부분모델링의 범위를 파악하기 위한 예비해석에 포함되어야 할 블록 갯수는 타설높이, 타설간격, 재료물성, 타설온도 및 외기온도 등에 따라 달라질 수 있으나 블록들간의 영향이 지배적으로 나타나는 범위를 포함하고 있어야 한다.

또한 앞서 언급하였듯 연속타설과정에서 표면의 인장응력은 최대값으로 수렴하기보다는 어느 시점에서 최대값이 발생한 후 차차 감소하는 경향을 보이므로 최대값만을 파악할 목적이라면 부분모델링에 포함시켜야 상부 블록의 갯수를 다소 줄여도 될 것으로 사료된다.



전체모델링 부분모델링

Fig. 4 Full and partial modellings of the present example

5. 해석결과와 비교고찰

본 연구에서는 또한 다음과 같이 연속타설을 합리적으로 해석한 경우와 몇몇 고려사항을 생략한 기존의 간이해석결과를 비교하여 연속적인 분할타설시 합리적인 해석의 필요성을 강조하였다. 앞서 언급하였듯이 2~4단은 비슷한 경향을 보이고 있음을 고려하여 다음과 같이 비교예제를 설정하였다.

(1) 1단 해석시 상부타설블록의 영향을 고려하지 않았을 때

이때에는 Fig. 5 중 응력값의 비교에서 정밀해석시 2단타설후 이의 영향으로 1단 콘크리트에서 일시적으로 인장응력이 급격히 증가하여 온도균열의 위험성이 있는데, 간이해석에서는 이러한 점이 나타나지 않고 있다.

(2) 5단 해석시 하부타설블록을 기타설처럼 해석했을 때

5단 해석시 하부타설블록의 물성변화를 고려하지 않는 기존 방법으로 해석하였을 때에는 저면구속의 영향으로 인장응력이 실제보다 크게 평가

되게 된다. 즉, 연속타설시 실제로는 저면이 덜 굳어 있어 응력이 작게 발생하고 있다. 한편 온도 상승량은 잔여온도의 영향으로 합리적인 연속타설 해석시가 다소 높게 나타났다. (Fig. 6)

(3) 3단 해석시 상부타설블록의 영향을 고려하지 않고 하부타설블록도 기타설처럼 해석했을 때

연속타설과정에 있는 3단을 상부와 하부의 영향을 고려하지 않고 위와 같이 해석하는 것은 가장 전형적으로 행하여 왔던 간이해석방법이다. Fig. 7의 해석결과를 보면 간이해석시 온도는 하부의 잔여온도를 고려하지 않아 실제보다 다소 낮게 평가되고 있으며 상부타설블록의 영향을 무시하고 있으므로 다시 상승하는 부분없이 그대로 하강하고 있다. 또한 간이해석시 응력은 저면을 실제보다 더욱 경화된 것으로 평가하고 있어 응력을 전반적으로 크게 평가하고 있으며, 또한 상부타설블록에 의해 응력이 주기적으로 변화하고 있는 현상을 모델링하지 못하고 있음을 알 수 있다.

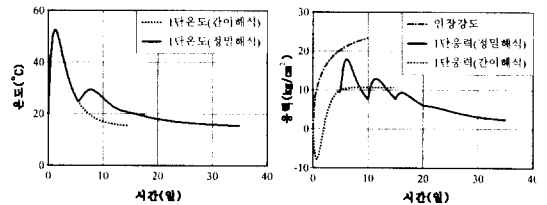


Fig. 5 Comparison of analysis results for 1st block

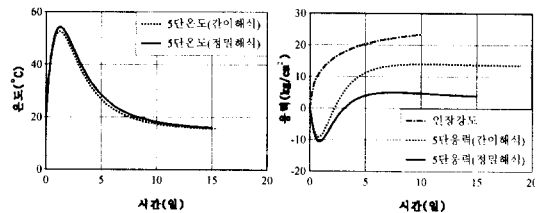


Fig. 6 Comparison of analysis results for 5th block

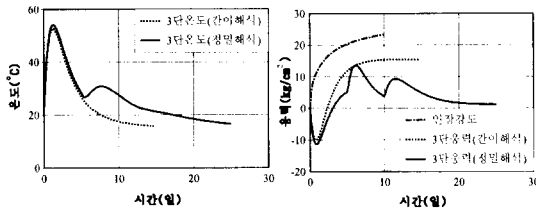


Fig. 7 Comparison of analysis results for 3rd block

6. 결론

본 연구에서는 최근들어 많이 시공되고 있는 매스 콘크리트 구조물의 타설순서와 시공과정을 합리적으로 반영하여 해석할 수 있는 절차 및 과정을 연구 제시하였으며, 이러한 영향을 고려한 경우의 온도 및 응력의 변화양상을 분석규명하였다. 본 연구로부터 얻어진 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 매스 콘크리트 구조물의 연속적인 분할타설시 각 타설블록들의 영향을 모두 고려한 합리적인 해석은 검토대상블록의 상부와 하부 블록들의 영향을 고려하지 않거나 근사적으로 고려한 기존의 간이해석과 비교해 볼 때 온도 및 응력값에서 많은 차이를 보이고 있다. 따라서 구조물의 온도균열에 대한 안전도를 확보하면서도 능률적이고 적극적인 타설간격 및 타설높이를 결정하는데 있어 연속타설에 대한 합리적인 해석은 필수적인 사항으로 나타나고 있다.

(2) 매스 콘크리트의 연속적인 분할타설시 사전 해석을 통하여 검토대상블록에 영향을 미치는 상, 하의 블록들의 범위를 적절히 선정한다면 전체모델링이 아닌 부분적인 해석모델링을 사용하여도 비교적 정확하게 온도나 열응력을 산정하면서 모델링 및 해석에 소요되는 시간 및 비용을 줄일 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구에서는 해석예제를 통하여 이러한 해석절차를 제시하였다.

(3) 연속적인 타설주기 하에서 검토대상블록 표면의 인장응력은 그 위 블록의 콘크리트 타설에 따라 주기적인 변화양상을 보이며 최종적으로

수렴하는 응력보다 더 큰 인장응력이 중간단계에서도 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 본 해석예제에서는 인장응력이 발현되는 시점에서 상부에 접하여서 신콘크리트가 타설될 경우 추가적으로 인장응력이 증가하여 최대값에 도달하며, 이때가 온도균열지수면에서 볼 때 온도균열이 발생하기 쉬운 시점으로 나타나고 있다.

참고문헌

1. 초저발열콘크리트의 개발 및 대형매스콘크리트구조물의 수화열제어 시공기술, 서울대학교, 쌍용양회공업(주), 1998
2. CEB-FIP Model Code, Comite Euro International du Beton, 1993
3. J. E. Jonasson, "Modelling of Temperature, Moisture and Stresses in Young Concrete", PhD thesis, Div. of Struct. Engrg., Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, No.153D, 1994
4. ABAQUS - User's Manual, Ver 5.2, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, 1992
5. K. Z. Truman, et al., "Nonlinear, Incremental Analysis of Mass-Concrete Lock Monolith", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.117, No.6, June, pp.1834~1851, 1991
6. K. Z. Truman, et al., "Creep, Shrinkage, and Thermal Effects on Mass Concrete Structure", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.117, No.6, June, pp.1274~1288, 1991
7. 콘크리트 표준시방서 '매스콘크리트편', 건설교통부, 1996
8. 매스 콘크리트의 균열제어지침, 일본 콘크리트 공학협회, 1986
9. 백신원, "매스콘크리트 구조의 온도분포 및 열응력 해석에 관한 이론 및 실험 연구", 서울대학교 공학박사학위 논문, 1994
10. 정철희, 정영수, 전환석, "대형 콘크리트 구조물의 타설순서에 따른 수화열 해석", 대한토목학회 논문집, Vol.18, No.1-1, pp.49~58, 1998.1
11. 강석화 외 4인, "매스콘크리트 구조물의 온도응력 평가에 관한 연구", 콘크리트학회논문집, 제7권 2호, pp.126~135, 1995
12. 정철현 외 4인, "매스콘크리트의 온도분포에 영향을 주는 주요 변수에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, 제6권 5호, pp.203~212, 1994

13. 강석화 외 3인, "유한요소법을 이용한 매스콘크리트 구조물의 수화열 및 온도응력해석에 관한 연구", 콘크리트학회논문집, 제7권 4호, pp.137~148, 1995
14. 김진근 외 1인, "크리이프와 건조수축 영향을 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력 해석", 콘크리트학회논문집, 제4권 3호, pp.101~111, 1992
15. 오 병환, 이 명규, "원자로 격납건물의 열응력 해석연구", 1993년도 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제5권 1호, pp. 219~224, 1993.5
16. 오 병환, 백 신원, 장 봉석, "매스콘크리트 구조물의 온도분포 예측을 위한 실험적 연구", 1993년도 대한토목학회 학술발표회 개요집, pp. 311~314, 1993.10
17. 오 병환, 백 신원, 엄 주용, 임 동환, "현장조건을 고려한 콘크리트 기초 및 교각구조의 온도 및 열응력에 관한 실험적 연구", 1994년도 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제6권 1호, pp.233~237, 1994.5
18. 오 병환, 이 명규, 양 인환, 한 승환, 장 봉석, "원자력 발전소 두꺼운 슬래브콘크리트의 수화열 발생 및 온도응력분포에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집 1권, pp. 583~586, 1995.10
19. 정진호, "대형 콘크리트 구조물의 수화열에 기인한 온도응력 제어에 관한 실용적 연구", 중앙대학교 건설대학원 석사학위논문(22회)
20. ACI Manual of Concrete Practice, "Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete", 207.2R, 1996
21. "Concrete - Structure, Properties and Materials", 2nd Ed., P. K. Metha, Prentice-Hall, 1993

요 약

분할되어 연속적으로 타설되는 매스 콘크리트 구조물의 온도나 응력값은 관심대상블록보다 먼저 또는 나중에 타설되는 타설블록들에 의해 계속적으로 영향을 받으며 따라서 엄밀한 온도 및 열응력해석에서는 매스 콘크리트 구조물을 이루고 있는 모든 타설블록들을 해석상에 포함시켜야 한다. 이때 각 타설블록들은 타설시간의 차이로 인하여 모두 다른 재료물성의 변화를 겪고 있는 점을 해석시 면밀히 고려하여야 한다.

본 연구에서는 이러한 합리적인 해석법과 일부 모델링을 생략하거나 근사적으로 재료물성을 고려한 기존의 간이해석법의 결과를 비교하여 온도 및 응력거동의 차이를 분석하여 규명하였다. 또한 본 연구결과 매스 콘크리트의 연속적인 분할타설시 사전 해석을 통하여 관심대상블록에 영향을 미치는 상, 하의 블록들의 크기 및 범위를 적절히 선정할 경우 전체모델링이 아닌 부분적인 해석모델링을 사용하더라도 비교적 정확하게 온도나 열응력을 산정할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 부분모델링 기법은 실제 매스 콘크리트 구조물의 설계 및 시공시 타설블록의 크기 및 규모, 타설시간간격 등을 결정할 때 유효하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

(접수일자 : 1998. 12. 28)