

메스콘크리트의 온도 균열 제어대책

메스콘크리트 온도균열의 평가 방법과 해석 방법

Analysis and Evaluation Method of Thermal Crack Resistance for Mass Concrete Structures



石川雅美*

Ishikawa Masami



강석화**

1. 머리말

콘크리트 구조물을 시공할 때, 가능한 한 균열을 줄이고, 안전하고 우수한 품질의 구조물을 만들고 싶어하는 것은 콘크리트에 종사하는 기술자라면 누구라도 바라는 바일 것이다. 메스콘크리트에 생기는 온도 균열도 예전에는 중력식 콘크리트 댐 혹은, 장대 교량의 기초 등, 대형 콘크리트 구조물의 시공에 있어서만 대책이 검토되어 왔던 문제였다.

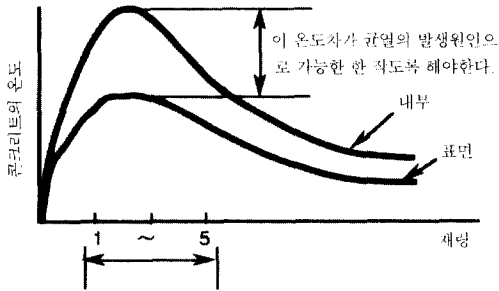
그러나, 최근에는 이러한 구조물 뿐만 아니라, 박스컬버터나 옹벽과 같은 일반적인 토목 구조물에 대해서도 온도균열에 대한 대책이 필요하게되었다. 우선 그 이유중의 하나는, 콘크리트 구조물의 안전성이나 내구성, 또 외관 등의 품질에 대한 인식이 높아졌다는 점을 들 수 있다. 다시 말해 콘크리트의 시공 과정에서 생기는 온도응력이나 온도균열은 설계단계에

서는 고려되고 있지 않고, 콘크리트 구조물의 초기 결함으로서 인식되어왔기 때문이다. 또 다른 하나는 온도응력을 개인용 PC 등을 사용한 수치 해석에 의해서도 비교적 용이하게 산출할 수 있다는 점을 들 수 있다. 따라서, 임의의 구조물에 대해서, 각종의 균열 대책이 어떤 정도 효과가 있는지를 사전에 평가하는 것이 가능하게 되었다.

그렇지만, 균열대책의 유효성을 사전에 확인할 수 있다고 해도, 일반 콘크리트 구조물에 있어서 균열을 완전히 방지한다는 것은 기술적으로는 가능하기는 하지만, 현실적으로는 대단히 비경제적인 것이 되기 때문에, 그 실시는 불가능한 경우가 적지 않다. 따라서, 구조물에 요구되는 기능이나 내구성 등과 대책에 따른 공사비 증가 등을 고려하여, 균열을 어느 정도 허용하면서, 균열의 발생 위치나 폭을 조절하는 것이 합리적이고 현실적인 대책이 된다.

* 東急建設株式會社 土木設計部, 工學博士

** 정희원, 동양 중앙 연구소 건설재료연구실 실장



이시기에 균열발생가능성이 높음

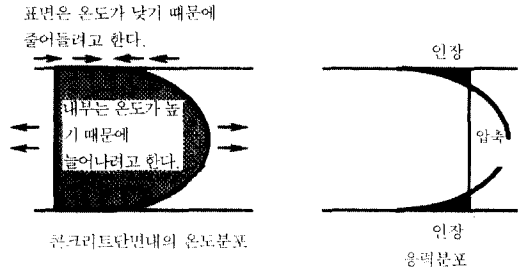


그림 1 내부구축응력의 발생기구

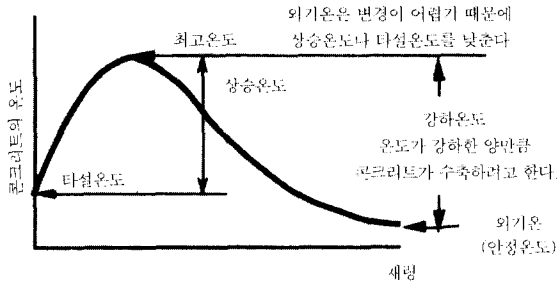
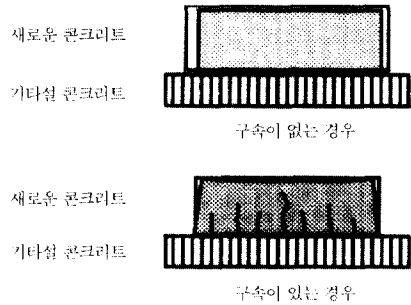


그림 2 외부구축응력의 발생기구



본고는, 일본에서의 온도 균열의 제어대책에 관한 최근의 현황을 정리한 것으로, 우선 온도균열의 발생 원인에 대해서 간단한 설명을 하고, 일본의 토목학회 콘크리트 표준시방서에 있어서 나타나 있는 매스콘크리트의 온도균열에 관한 평가방법 등을 소개한다. 그리고, 일본에 있어서 폭넓게 사용되어 있는 온도응력 해석방법 및 해석 순서에 대해서 기술하고, 끝으로 온도균열에 대한 대표적인 제어대책을 몇가지 소개하고자 한다.

2. 온도균열의 발생 원인과 그 특징

2.1 내부구축응력에 의한 균열

매스콘크리트의 온도균열 발생 원인은, 내부 구속에 의한 것과 외부 구속에 의한 것 등 두가지로 나눌 수가 있다. 아래에 각각에 대해서 그 발생 원인과 균열의 특징에 대해서 간단히 소개한다.

우선, 내부구축균열은 콘크리트의 내부와 표면과의 온도가 다른 것에 의해 생기는 것이다. 그림 1에 보는 바와 같이 시멘트의 수화열에 의해 콘크리트의

내부는 온도가 높아지지만, 표면은 바깥 공기에 의해서 식혀 지고, 이 온도차가 균열의 발생 원인이 된다. 즉, 상대적으로 온도가 낮은 표면 부분의 콘크리트가 수축하려고 하는 것을 상대적으로 온도가 높은 내부의 콘크리트가 구속하여 표면부에 인장 응력이 작용하고, 균열이 발생하게 되는 것이다. 표면과 내부의 온도차는, 재령 1~5일 정도의 콘크리트 내부 온도가 peak에 달했을 때 최대가 되는 경우가 많으며, 균열은 콘크리트의 온도가 최대가 되는 재령 1일 ~5일 또는 거푸집의 탈형직후에 생기기 쉽고, 균열의 폭은 0.1~0.3mm 정도에서 규칙성은 없고, 또 단면을 관통하지도 않는다. 그러나, 내부 구속에 의해 표면에 발생한 균열이 건조 수축이나 외부 구속에 의해 커다란 관통 균열로 진전하기도 하기 때문에 주의가 필요하다.

2.2 외부구축응력에 의한 균열

외부구축에 의한 균열은 타설한 콘크리트의 열변형이 지반 또는 기타설한 콘크리트에 의해 구속되어 발생한다. 그림 2에 나타난 바와 같이 타설된 콘크리트

트는 온도가 최고치에 도달한 후에 최종적으로 외기 온과 같을 때 까지 온도가 내려간다. 이 온도강하에 의해, 콘크리트의 체적은 수축하지만, 이것이 하층의 콘크리트 혹은 지반에 구속되어, 외부구속균열이 발생하게 되는 것이다. 실제의 온도균열 제어대책으로서는, 이러한 외부구속균열을 어떻게 제어할 것인가가 중요한 과제가 된다.

외부구속균열은 균열의 폭이 0.2mm ~ 0.5mm, 혹은 그 이상이 되고, 많은 경우에는, 세로로 곧장 뻗은 관통균열이 되기도 한다.

3. 콘크리트 표준시방서에서의 매스콘크리트에 대한 개념

3.1 매스콘크리트의 정의

매스콘크리트라고 하는 말이 일본토목학회의 콘크리트 표준시방서(이하, 시방서라고 부른다)에 처음 등장한 것은 1949년경으로, 이것을 계기로 댐 등의 대형에 특수한 콘크리트 구조물뿐만 아니라, 일반 콘크리트 구조물에 있어서도 매스콘크리트로서 다뤄야 할 필요성이 인식되기 시작했다²⁾. 이 시점에서는 아직 시방서의 기술 중에 매스콘크리트로서 정의해야 할 단면 치수에 관한 구체적인 기술은 없었고, 그 해설 중에 1m정도의 단면 치수를 판단기준으로 한다는 기술에 그쳐 있었다. 그 후, 1977년에 행해진 시방서의 개정에서 단면 치수 80cm이상인 것을 매스콘크리트라고 한다는 명확한 기술이 이루어졌고, 1989년부터는 다음과 같이 더욱 더 구체적인 기술이 이루어졌다. 즉(그림 3참조)

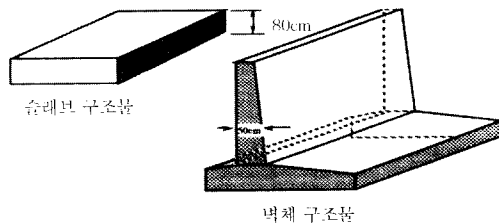


그림 3 매스콘크리트의 정의

- 1) 넓은 슬래브에서는 두께가 80cm~100cm이상.
- 2) 하단이 구속된 구조물에서는 두께가 50cm이상
- 3) 기타 프리스트레스트 콘크리트 등 부배합 콘크리트에서는, 단면이 얇은 경우에서도 적용 대상으로 하고 있다.

3.2 온도균열지수

시방서에서는 온도균열에 대한 위험도를 나타내기 위한 구체적인 지표로서 온도균열지수를 도입하고, 이 값을 기준으로 하여 구조물의 중요도에 따른 균열의 판단기준을 정하였다. 온도균열지수는 콘크리트의 인장강도를 온도응력으로 나눈 값, 즉 다음 식으로 정의되어 있다.

$$\text{온도균열지수 } I_{cr} = f_t(t) / \sigma_t(t) \quad (1)$$

여기서,

$\sigma_t(t)$: 재령 t일에서의 수화열에 의해 발생한 부재중의 온도응력의 최대치.

$f_t(t)$: 재령 t일에서의 콘크리트의 인장강도로서 양생온도를 고려하여 구한다.

온도균열지수는 적을 수록 균열이 발생하기 쉽고, 균열수도 많아지며 균열의 폭도 커지는 경향이 있다. 또한, 재령에 따라 변화하기 때문에, 재령을 변화시켜 가장 작아지는 값을 구해야 한다

간이적으로 온도계산 결과만을 사용해 온도균열지수를 구하는 방법도 제시되어 있다. 즉, 내부구속이 탁월하는 경우에는,

$$\text{온도균열지수} = 15 / \Delta T_i \quad (2)$$

한편, 암반이나 매시브인 콘크리트에 직접 타설한 슬래브와 같이 외부 구속 응력이 탁월한 경우에는,

$$\text{온도균열지수} = 10 / (R \cdot \Delta T_0) \quad (3)$$

여기서,

ΔT_i : 내부 최고 온도시의 내부와 표면의 온도차

ΔT_0 : 부재평균 최고 온도와 외기온 평형시 온도차의 차

R : 외부구속의 구속도로서, 연한 암반의 경우에는 0.5, 중정도의 단단한 암반의 경우에는 0.65, 단단한 암반의 경우에는 0.8을 사용한다. 기타설

한 콘크리트위에 타설하는 경우에는, 일반적으로 0.6으로 한다.

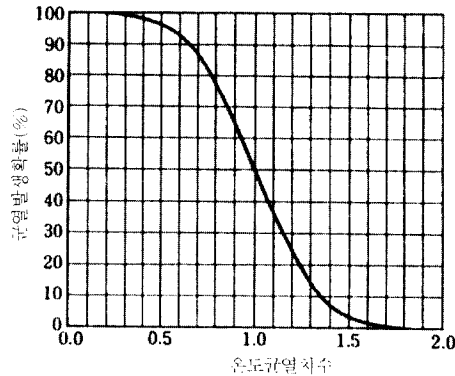


그림 4 온도균열지수와 균열발생확률의 관계

그림-4는 균열지수와, 균열이 발생하는 확률의 개략적인 관계를 나타낸 그림이다. 이 관계는 실제로 시공한 100개가 넘는 구조물에 대해, 온도응력 해석을 실시해 균열지수를 산정하여, 그 결과와 실제 균열조사 결과와의 비교를 통해 작성된 것이다. 시방서에서는, 일반적인 배근의 구조물에서의 표준적인 온도균열지수의 참고치를 다음과 같이 정하고 있다.

- i) 균열발생을 방지하고 싶은 경우 : 1.5이상
- ii) 균열발생을 가능한 한 제한하고 싶은 경우 : 1.2이상
- iii) 균열발생을 허용하지만, 균열폭이 과대하게 되지 않도록 제한하고 싶은 경우 : 0.7이상

실제의 검토에 있어서는, 대상이 되는 구조물에 요구되는 기능과 내구성 등을 고려하여, 목표로 하는 균열지수를 정하고, 그 값을 만족할 수 있도록 가장 유효한 균열제어대책을 결정하는 방법이 행해지고 있다.

4. 온도응력을 예측하기 위한 해석 수법

4.1 온도응력해석의 특징

앞에서 설명한 온도균열지수를 산출하기 위해서는 수치해석을 실시해 검토대상이 되는 콘크리트의 온도응력을 구할 필요가 있다. 매스콘크리트의 온도응력을 산출하기 위해서는, 온도해석과 온도응력해석

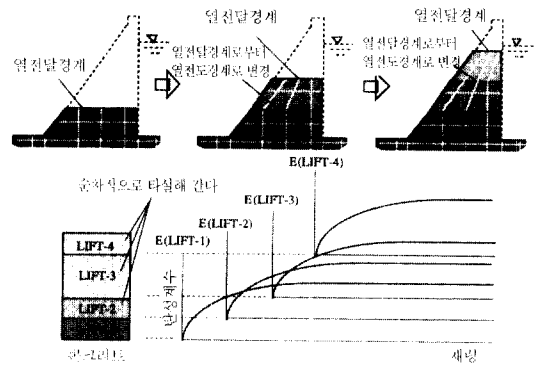


그림 5 리프트의 상승과 탄성계수의 변화

등 두개의 단계를 거쳐야 한다.

일반적으로 온도해석은 시멘트의 수화열에 기인하는 콘크리트의 발열 특성, 타설온도, 외기온, 그리고 양생조건 등을 입력데이터로 해서 비정상 열전도해석을 통해 타설한 콘크리트 각위치에서의 온도를 구하는 것이다. 온도응력해석은 온도해석을 통해 구해진 온도분포에 선팽창계수를 곱해 이것을 변형률로 환산하고, 또 탄성계수를 곱해 응력을 구하는 것이다.

매스콘크리트의 온도응력해석의 최대의 특징은 그림 5에 나타난 바와 같이 콘크리트가 점차로 타설되어 나가기 때문에, 해석 대상이 되는 구조체가 순차적으로 변화하는 것이다. 또 시공 과정에서 생기는 응력을 구하기 위해 콘크리트 경화에 따라 탄성계수가 변화하는 것을 고려할 필요가 있어 해석적으로는 꽤 복잡하다고 할 수 있다. 또한 벽체구조물 등과 같은 경우에는, 그림 6에 나타난 바와 같이 온도 경사는 벽의 두께 방향으로 탁월하지만, 응력은 벽의 직각방향으로 커지기 때문에 온도가 탁월한 면과 응력이 탁월한 면이 서로 다르기 때문에, 취급 방법이 더욱 더 복잡해진다.

현재, 일본에 있어서 가장 잘 사용되고 있는 해석 방법은, 유한요소법(FEM)과, Compensation Plane(CP법), 또는 Compensation·Line법(CL법) 등 두가지이다. 유한요소법에 관해서는 이미 잘 알려진 바와 같이 구조 해석을 비롯해 여러 분야에서 널리 사용되고 있고, 이미 일반적인 해석 수법이 되어있기 때문에 여기서는 주로 Compensation법에 대해서 간단히 설명을 추가하고자 한다. Compensa

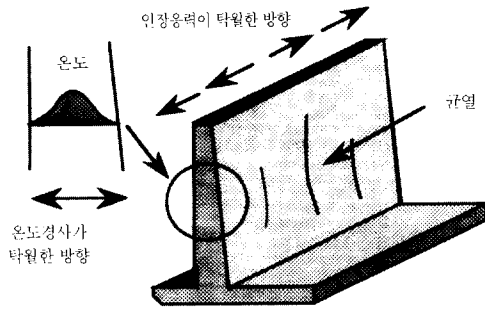


그림 6 온도경사가 탁월한 면과 균열의 방향

tion법은 평면유지법칙을 가정으로 한 보 이론에 기초한 간이해석수법으로서 ACI²⁾법 등과 같은 비교적 단순한 이론이나 경험에 의거한 기존의 방법과 비교하여 해석 정확도도 좋고 이론적으로도 완성도가 높은 방법이라고 할 수 있다.

4.2 Compensation Plane법(일본 콘크리트 공학 협회법)

Compensation Plane법, 또는 Compensation Line법은 1985년 11월에 일본콘크리트공학협회(JCI)에서 제안된 온도응력 산정방법으로³⁾, 현재 동 협회부터 PC용 컴퓨터 프로그램의 형태로 판매 되고 있다. 이 방법에는 1차원 모델을 해석하는 Compensation Line법(CL법)과 2차원 모델을 대상으로 하는 Compensation Plane법(CP법) 등 2종류가 있다. 2종류 모두 기본적인 개념은 같지만, 일차원적인 온도 분포를 생각할 것인가, 2차원적인 온도 분포를 생각할 것인가 하는 정도가 다르다.

CL법 혹은 CP법은 콘크리트의 탄성계수 지반이나 기타설 콘크리트에 의한 구속 정도, 리프트의 타설일정, 온도 분포 등의 데이터를 입력하여 콘크리트 내에 발생하는 온도응력을 산정한다. 따라서, 콘크리트의 온도 분포에 관해서는 유한요소법등을 통해 사전에 구해 놓을 필요가 있다. CP법 또는 CL법은 유한요소법에 비해 계산이 용이하고 프로그램도 단순하기 때문에, 개인용 PC로도 해석이 가능하다. 또 계산 시간도 짧고, 그 해석 정확도는 유한요소법에 의한 것과 거의 같은 정도라고 생각해도 좋다. 다만, 해석 결과 얻어지는 것은 단면과 직각을 이루는 방향의 응력 만으로, 따라서 주응력 방향이나 모델의 절

점변위는 출력되지 않는다.

CL법은, 1차원의 해석 모델을 대상으로 하고 있기 때문에, 댐이나 기초 등 횡방향으로 충분히 넓은 구조물의 중앙 부근에 발생하는 응력의 해석에 적합하다. 한편, CP법은 단면내의 온도 경사를 고려하여 단면과 직교하는 방향의 응력을 산출하기 때문에, 벽이나 박스형의 구조물을 해석하는데 적합하다.

이하에서는 높이방향으로만 온도가 변화하고, 깊이방향의 온도는 일정하다고 가정한 Compensation Line법에 대해서 문헌[3]의 기술을 인용하여 설명하고자 한다.

Compensation Line은 평면유지법칙을 가정한 보 이론을 매스콘크리트에 적용한 것으로, 이 방법의 큰 특징은 구속 계수를 축방향과 횡으로 2개로 분리해서 온도응력의 계산 중에 휨변형에 의한 응력을 생각한 것이다. 덧붙여서 말하면, ACI법에서는 구속 계수가 하나이고 이 값이 온도응력을 구하는 위치(높이)에 따라 변화하도록 되어있어 이것을 도표에서 구하도록 되어있다.

Compensation Line이라는 것은 그림 7에 나타난 바와 같이 전혀 외부 구속이 없는 구조체에 있어서, 실선으로 나타내지는 온도 분포에 대응하는 변형률이 존재하는 경우, 임의의 직선($\epsilon = \bar{\epsilon} + \phi_G y$)을 긋고 이 직선과 온도변형률분포곡선으로 둘러싸인 면적의 차이가 같도록하여(압축변형률과 인장변형률이 같다) 이것에 탄성계수를 곱해 평형을 이루도록 하고 있다.

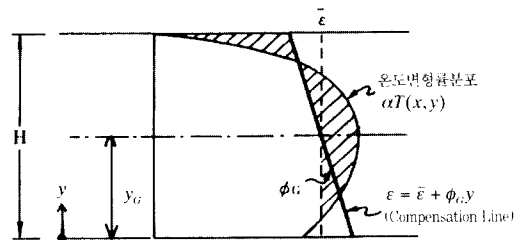


그림-7 온도변형률의 분포와 Compensation Line

$$\int_0^H bE(t)\{\alpha T(y) - \bar{\epsilon} - \phi_G y\} dy = 0 \quad (4-1)$$

$$\int_0^H bE(t)\{\alpha T(y) - \bar{\epsilon} - \phi_G y\}(y - y_G) dy = 0 \quad (4-2)$$

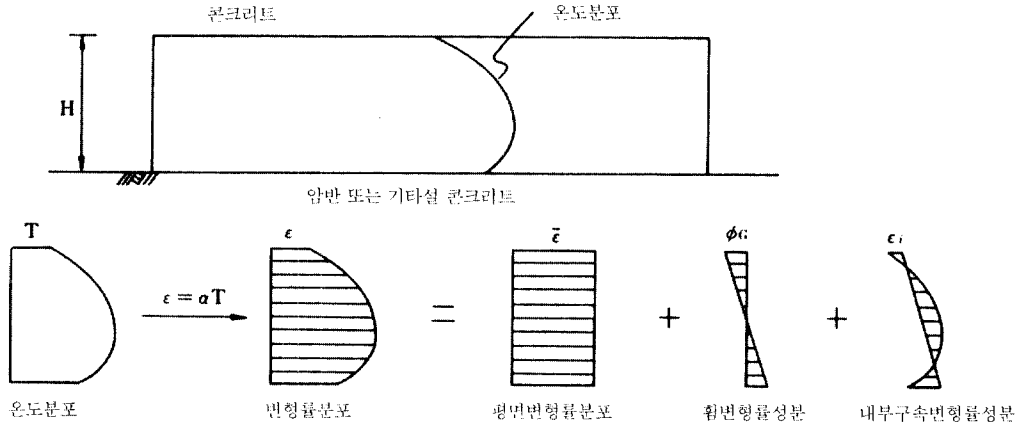


그림 8 변형률분포의 분해

- 단, $T(y)$: 좌표(y)에서의 온도
- b : 단면의 깊이
- $E(t)$: 재령 t일의 탄성계수
- α : 콘크리트의 선팽창계수
- Φ_G : compensation Line의 경사
- y : 단면의 높이

또한, $\bar{\epsilon}$ 는 단면내 평균변형률로서 다음 식에서 구해진다.

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{h} \int_0^h \alpha T(y) dy \quad (5)$$

이 때에 (4)식을 만족시키는 직선을 Compensation Line이라고 한다. 이 compensation Line에 의해 그림 8에 나타난 바와 같이 콘크리트내의 온도 변형률을, 축방향 성분과 휨 성분, 그리고 내부 구속 성분의 3개의 성분에 분해할 수 있다. 다만, Compensation Line은, 대상이 되는 콘크리트의 중심 y_G 를 통한다고 가정하고 있다.

$$y_G = \frac{\int_0^h bE(t)y dy}{\int_0^h bE(t) dy} \quad (6)$$

Compensation Line의 기울기 Φ_G 는 다음 식으로 계산이 가능하다.

$$\Phi_G = \frac{\int_A \{(\alpha T(x, y) - \bar{\epsilon})(y - y_G)\} dA}{H^3 / 12} \quad (7)$$

실제로는 콘크리트의 온도 분포 및 탄성계수가 재령에 따라서 변화하기 때문에, 계산은 증분형태로 한다. 그림 9에 나타난 바와 같이, 재령 t_1 과 t_2 의 온도에 대한 변형률과 Compensation Line의 경사를

각각 $\epsilon(t_1)$, $\epsilon(t_2)$ 및 $\Phi_G(t_1)$, $\Phi_G(t_2)$ 라고 하면, 외부 구속에 의해 발생하는 축방향 응력증분 ΔN_R 과 휨응력증분 ΔM_R 은 다음식을 이용해 구할 수 있다.

$$\Delta N_R = R_N E \left(\frac{t_1 + t_2}{2} \right) A (\bar{\epsilon}(t_2) - \bar{\epsilon}(t_1)) \quad (8-1)$$

$$\Delta M_R = R_M E \left(\frac{t_1 + t_2}{2} \right) I (\bar{\Phi}(t_2) - \bar{\Phi}(t_1)) \quad (8-2)$$

단, R_M , R_N 은 자유로운 열변형을 구속하는 비율을 나타내는 계수로서 완전 구속일 때 1, 완전 자유일 때 0이 된다. 이러한 값은 콘크리트 형상, 즉 길이 L과 높이 H의 비(L/H), 및 타설된 콘크리트와 구속체가 되는 기설 콘크리트 혹은 암반과의 탄성계수의 비로부터 구해진다. 또 일반적으로 휨 구속 R_M 은 온도 상승시와 온도 강하시에 각각의 다른 값을 사용하고 있다. R_M , R_N 의 구체적인 값은 시방서에 나타나 있다.

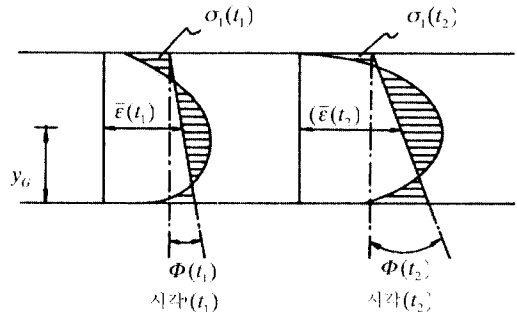


그림 9 시각 t_1 과 t_2 에 있어서의 ϵ 과 Φ_G

이러한 값들로 부터 외부구속응력의 증분 $\Delta\sigma_n$ 은 다음 식과 같이 나타내진다.

$$\Delta\sigma_R(y) = \frac{\Delta N_R}{A} + \frac{\Delta M_R}{A}(y - y_G) \quad (9)$$

또 내부구속응력증분 $\Delta\sigma_I$ 는 그림 8의 내부구속성분변형률에 탄성계수를 곱해 식(10)과 같이 용이하게 산출할 수 있으므로,

$$\Delta\sigma_I(y) = E(t)\{\alpha T(y) - \bar{\epsilon} - \Phi_G(y - y_G)\} \quad (10)$$

각 재령에서의 온도응력은 식(11)과 같이 응력증분의 합으로서 나타내진다.

$$\Delta\sigma(y) = \Delta\sigma_I(y) + \Delta\sigma_R(y) \quad (11)$$

이상 Compensation Line법에 대해서 그 원리를 개략적으로 설명하였지만, 콘크리트가 순차적으로 타설되어져 가는 경우나 2차원 문제에 대한 Compensation Plane을 생각하는 경우 등에 관해서는 문헌[3]을 참조하기 바란다.

5. 온도응력 해석 순서

5.1 콘크리트의 열정수 및 발열 특성

온도응력해석을 하기 위해서는 콘크리트의 열적 물성치, 발열 특성, 강도 등 콘크리트의 물성에 관한 데이터가 필요하게 된다.

여기서는, 온도응력해석을 실시함에 있어서, 어떠한 해석 수법에 있어서도 공통으로 사용되는 물성이나 균열 발생에 대한 위험도의 평가 방법에 대해서 간단히 소개하고자 한다.

우선, 콘크리트의 열적 성질을 나타내는 정수로서는 표 1의 값이 사용된다. 여기서, 열전달계수는 양생방법에 따라 다소 다르다. 표 2에 각각의 양생방법에 대한 열전달율의 참고치¹⁾를 나타내었다.

표 1 콘크리트 열정수의 일반적인 수치

정수명	단위	일반적인 값	비
비열	kJ/kg°C	1.05 - 1.26	1kg의 물체를 1°C 상승시키는 데에 필요한 열량
열전도율	W/m°C	2.6 - 2.8	물체내의 열전달
열전달율	W/m°C	표 2 참조	물체 표면으로부터 유체(공기)로의 열전달

콘크리트의 발열 특성은, 단일온도상승식이라고

불리는 다음 식을 사용해 표현한다.

$$Q(t) = Q_x(1 - e^{-t}) \quad (12)$$

여기서, t : age (일)

Q(t) : 재령 t일에서의 단열 온도 상승량(°C)

γ : 발열 속도를 나타내는 계수

Q_x : 종국 온도 상승량

표 2 열전달율의 참고치(시방서(1)로 부터)

No.	양생방법	η(W/m²°C)
1	강제기주립	14
	담수(담수깊이 10mm미만)	
2	담수(담수깊이 10mm이상 50mm미만), 가마니양생 포함	8
	담수(담수깊이 50mm이상 100mm미만)	
4	합판	8
5	시트	6
6	양생매트	5
	담수+양생매트, 담수+시트 포함	
7	발포스티폼(두께 50mm)+시트	2

이 식은, 콘크리트가 단열상태로 있을때, 콘크리트의 온도가 시간에 따라 어느 정도 상승하는지를 나타내고 있다. 또 γ, Q_x의 값은 단위 시멘트량, 타설온도, 시멘트의 종류에 따라 다르도록 되어 있다. 이러한 값은, 본래는 각 배합마다 단열온도상승 시험을 행해 구하는 것이 바람직하지만, 편의상 표 3에 나타난 시방서의 값으로도 추정이 가능하다.

표 3 콘크리트 단일온도상승식의 참고치(시방서(1)로부터)

시멘트의 종류	타설온도 (°C)	Q(t) = Q_x(1 - e^{-t})			
		Q_x = aC + b ¹⁾		Q_x = aC + b ¹⁾	
		a	b	g	h
보통	10	0.12	11.0	0.0015	0.135
	20	0.11	13.0	0.0038	-0.036
	30	0.11	12.0	0.0040	0.337
중용열	10	0.11	6.0	0.0003	0.303
	20	0.10	9.0	0.0015	0.279
	30	0.11	9.0	0.0021	0.299
조강	10	0.13	15.0	0.0016	0.478
	20	0.13	12.0	0.0025	0.650
	30	0.13	10.0	0.0014	1.720
고모	10	0.11	14.0	0.0014	0.073
	20	0.10	15.0	0.0025	0.207
	30	0.10	15.0	0.0035	0.332
클라이	10	0.15	-3.0	0.0007	0.141
	20	0.12	8.0	0.0028	0.143
	30	0.11	11.0	0.0030	0.059

주1) C : 단위시멘트량(kg/m³)

주2) 슬래그의 혼입률이 40%인 경우, 혼입률이 40% 이하인 경우에 대해서는 이전의 데이터 또는 시험을 통해 구하는 것이 좋다.

주3) 플라이애쉬의 혼입률은 20%

5.2 콘크리트의 강도 특성

온도응력해석에서는 콘크리트의 경화과정을 해석하기 때문에, 재령에 따라서 변화하는 탄성계수나 인장 강도를 연속적으로 계산할 필요가 있다. 시방서 (1)에서는 압축강도, 및 인장강도를 근사적으로 다음 식으로 구할 수 있다고 되어있다.

$$f_c(t) = \frac{t}{a+bt} f_c'(t) \quad (13-1)$$

$$f_c(t) = c \sqrt{f_c'(t)} \quad (13-2)$$

여기에,

$f_c(t)$: 재령 t일의 콘크리트의 압축 강도 (kgf/cm²)

$f_c'(t)$: 재령 t일의 콘크리트의 인장 강도 (kgf/cm²)

$f_c'(91)$: 재령 91일의 콘크리트의 압축 강도 (kgf/cm²)

또한 a, b는 시멘트의 종류에 의해 차이가 있지만, 표 4의 값을 표준으로 하고 있다. c도 콘크리트의 건조 상태에 따라 다르지만, 0.35를 표준적인 값으로 하고 있다.

또, 동시방서에서는 탄성계수에 대해서 다음 근사 식을 사용할 수 있다고 하고 있다.

$$E_c(t) = \Phi(t) \cdot 4.7 \times 10^3 \sqrt{f_c'(t)} \quad (14)$$

여기서,

$E_c(t)$: 재령 t일에서의 유효탄성계수(N/mm²)

$f_c'(t)$: 식(13-1)에 의한 재령 t일의 압축 강도의 추정치(N/mm²)

표 4 a, b의 값

시멘트의 종류	a	b
보통포틀랜드시멘트	4.5	0.95
중용열포틀랜드시멘트	6.2	0.93
조강포틀랜드시멘트	2.9	0.97

5.3 온도응력 해석 순서

실제로 온도균열의 발생 위험성을 사전에 판단하기 위해서는 지금까지 기술했던 바와 같은 콘크리트의 물성값을 가정하고, 어느쪽이든 온도응력 해석 수법을 사용해 온도응력 해석을 실시하게 되지만, 이러한 해석은 콘크리트의 타설 순서나 배합, 그리고 양생조건 등을 해석인자로 하는 case study가 되는 것이 일반적이다. 따라서 온도응력해석부터 그 결과의 판단까지의 일련의 진행순서를 아래에 기술하겠다.

다음은 온도응력 해석 순서를 나타낸 그림 10의 각 실시 단계를 해설한 것이다.

- 1) 우선, 정해진 설계 조건으로부터 토목학회 콘크리트 표준시방서의 매스콘크리트의 규정과 비교하여 균열 발생 가능성의 유무를 판단한다.
- 2) 온도균열의 발생이 염려되는 경우에는, 콘크리트의 시공 순서, 시공 시기(구체적으로는 외기온과 타설온도가 해석 인자가 된다), 양생조건 등을 가정하고, 또 콘크리트의 열적 정수를 정하고 필요에 따라서는 시험을 실시해 콘크리트의 열적불성을 구한다.

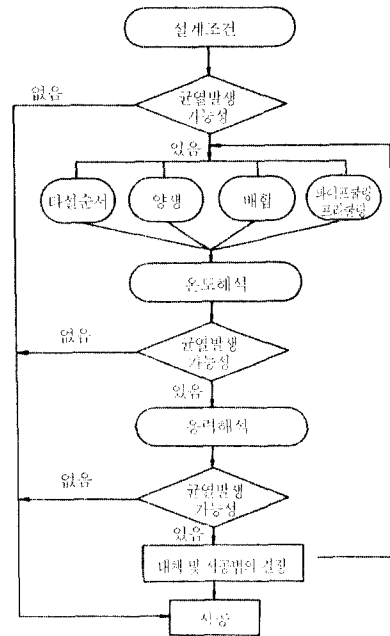
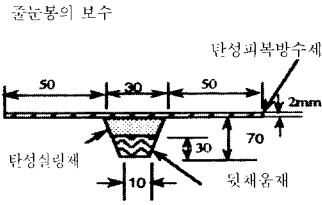
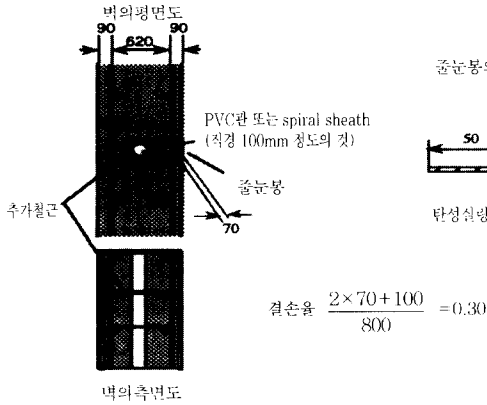


그림 10 온도응력해석의 순서



$$\text{결손율} = \frac{2 \times 70 + 100}{800} = 0.30$$

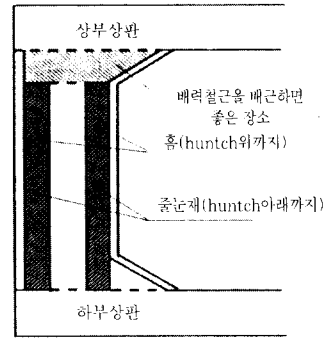


그림 12 균열유발줄눈의 설치예*

- 3) 구조물의 형상, 해석 비용, 요구되는 해석 정밀도 등을 고려해 해석 수법을 선택하고 온도 해석을 한다.
- 4) 온도 해석 결과만으로도, 온도균열 발생 가능성을 판정할 수 있는 경우(극단적으로 발열량이 적은 경우 등)도 있지만, 대부분의 경우 응력 해석까지 실시하는 것이 일반적으로 콘크리트의 선팽창계수, 탄성계수 등을 가정하여 응력 해석을 실시한다.
- 5) 해석 결과, 발생할 것으로 예측되었던 최대인장 응력과 그 시점에서의 인장강도의 비로부터 온도균열지수를 구하여 균열의 위험성을 판단한다.
- 6) 허용할 수 있는 범위 이내로 균열제어가 곤란하다고 판단되는 경우에는 재료 조건, 시공 조건을 재검토하여 재해석을 실시한다.

6. 균열대책의 한 예

온도균열대책으로서는 일반적으로 표 5에 나타난 바와 같이 여러 가지가 있다. 이 중 슬래브형태의 구조물에서는 파이프쿨링이나 프리쿨링이 가장 유효한 대책중의 하나로서 생각할 수 있다. 또한 벽체형 구조물에 대해서는 균열유발줄눈이 가장 유효한 대책이라고 생각되어진다. 박스컬버트나 옹벽과 같은 벽체형구조물은 시공빈도가 많고 균열이 발생하기쉬운데, 반드시 완전하게 균열을 방지할 필요는 없다. 이런 경우에는 균열대책의 한 예로서 벽체구조물에서

표 5 온도균열제어대책

대책	구체적인 방법	
배합(발열량의 저감)	1)저발열시멘트 사용	
	2)단위시멘트 양의 저감	a)양질의 혼화제(재)를 사용한다. b)슬립프를 작게 한다. c)골재치수가 큰 것을 사용한다. d)양질의 골재를 이용한다. e)강도판정의 재령을 길게 잡는다.
시공	온도변화를 작게한다	a)보온(시트, 단열재), 가열양생
	시공상 온도 상승을 저감한다.	a)파이프쿨링을 실시한다. b)리프트프를 줄인다. c)재료를 프리쿨링한다.
설계	설계상 대책을 수립한다.	a)가능한 한 부재에는 줄눈을 설치한다. b)철근으로 균열을 분산시킨다. c)별도로 방수처리를 한다.

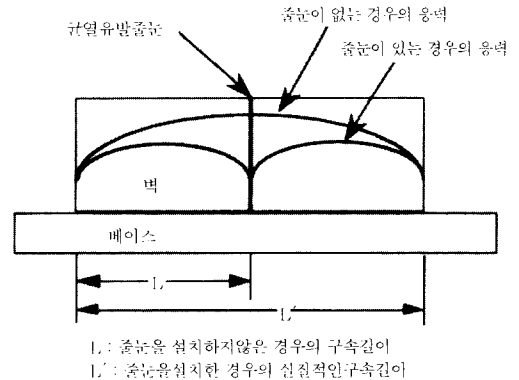


그림 11 벽의 길이방향의 인장응력분포

의 균열유발줄눈에 대해서 소개한다. 균열유발줄눈은 구조물의 길이방향으로 일정간격으로 단면감소부분을 설치하여 그 부분에 균열을 유발시키고 그 이외의 부분에 균열이 발생하는 것을 방지하는 방법이다. 그림 11에 나타난 바와 같이 유발줄눈에 균열이 발생하면 균열위치에서 응력이 해방되기 때문에 길이방향의 인장응력은 줄눈을 설치하지않은 경우에 비해 작아진다. 줄눈을 설치하는 간격은 벽의 높이(타설높이)의 1.5~2배 정도, 또는 4~5m의 간격을 기준으로 하고 있다. 그림 12는 단면을 결손시키는 방법에 대해서 나타낸 것이다. 단면의 결손률은 30%가 적절하다. 결손률이 낮으면 줄눈에 균열이 발생하지않는 경우도 있다.

7. 맺음말

온도로 기인하는 균열은 콘크리트에 발생하는 균열의 한 요인에 지나지 않는다. 그렇지만 온도균열의 위험성은 여기에서 기술한 바와 같이 구조물의 치수나 그 시공방법 등이 정해지면 거기에 어느 정도의 온도응력이 작용하는가를 수치 해석을 통해 정확하게 잘 예측할 수 있다. 구체적으로는 콘크리트의 최

고 온도를 몇도이하로 낮게 유지시키면 균열이 발생할 확률을 어느 정도로 낮출 수 있는 것인지, 혹은, 벽에 유발줄눈을 몇 미터간격으로 설치하면 균열발생을 억제할 수 있는 것인지 등 정량적인 평가가 가능하다. 따라서, 시공 과정 온도응력이 탁월할 것으로 예상되는 구조물에 관해서는, 사전에 충분한 검토를 하여 온도균열이 적은 품질이 좋은 구조물을 만들 수 있도록 해야 할 것이다. 따라서 본보에서 소개한 내용이 콘크리트에 관여하는 기술자들에게 다소나마 도움이 될 수 있기를 바란다.

참 고 문 헌

1. 土木學會, 콘크리트標準示方書 1996年 制定, 施工編
2. ACI Committee 207 Report, "Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Proc. Vol. 70-45, July, 1973.
3. 日本콘크리트工學協會, マスコンクリート溫度應力研究委員會報告書, 1985年 11月
4. 土木學會, 最新のマスコンクリート技術, 콘크리트技術シリーズ14, 1996년 8월