

지하철 콘크리트 BOX 구조물의 수화열에 의한 온도균열 제어 방안 연구

A Study for Control of Thermal Cracking by Heat of Hydration in Subway Concrete Box Structure

송석준[†] · 유상건* · 박지웅** · 김은경***

Suk Jun Song · Sang Geon Yoo · Ji Woong Park · Eun Kyum Kim

Abstract According to increase of massive concrete structures, Thermal crack done by heat of hydration have been increased in a process of the execution. In case of a subway concrete box structure, thickness of structures are almost over 1 meter, and penetrating crack by external restraint takes a bad effect on the durability with a water leakage and deterioration in especially concrete wall. A try of shortening a constructing period often occurs as subway is generally constructed according to a road to decrease a traffic jam. The research proposes executing method by skipping one block as a plan of shortening a constructing period and investigate an influence on thermal cracking control. Additionally, sensitivity analysis is accomplished by changing a height of a concrete wall, and concrete placing and air temperature met with a field condition.

Keywords : heat of hydration, thermal cracking, external restraint, subway concrete box structure, skipping one block of executing method

요 지 콘크리트 구조물의 대형화에 따라 시공 중 수화열에 의한 온도 균열 발생 사례가 증가하고 있다. 지하철 콘크리트 BOX 구조물의 경우, 부재 두께가 1m 이상 되는 경우가 대부분이며, 특히 벽체는 외부구속에 의한 관통균열 발생으로 누수 및 조직 열화가 발생하여 내구성에 나쁜 영향을 주고 있다. 지하철은 일반적으로 도로를 따라 건설되므로 교통체증을 줄이기 위한 공사기간 단축 시도가 종종 발생하게 된다. 본 연구에서는 공사시간 단축 방안으로서 한 시간씩 건너뛰면서 콘크리트를 타설하는 시공방법을 제안하였으며, 이에 대한 온도균열제어에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 벽체 높이, 타설온도, 대기온도 등을 현장조건에 따라 변화시켜 온도균열에 대한 민감도 분석을 실시하였다.

주 요 어 : 수화열, 온도균열, 외부구속, 지하철 콘크리트 BOX, 건너뛰기 시공방법

1. 서 론

콘크리트 구조물의 대형화 및 장대화에 따른 시공방법의 진보는 대량의 콘크리트를 일시에 타설하는 매스콘크리트의 시공을 가능하게 하였으나, 이러한 매스콘크리트의 시공증가는 시멘트의 수화열에 의한 온도응력이 발생하는 균열 문제를 해결해야 하는 새로운 과제를 제기하였다.

콘크리트는 경화하는 과정에서 온도변화에 따라 콘크

리트의 팽창, 수축이 발생하며, 이것을 구속하면 콘크리트에 온도응력이 발생한다. 지하철 콘크리트 BOX 구조물은 일반적으로 바닥슬래브를 타설한 후 측벽, 슬래브 순서로 시공한다. 슬래브는 내부구속의 영향이 크기 때문에 불규칙적인 표면균열이 발생하지만, 측벽에 경우 바닥 슬래브에 의한 외부구속이 크기 때문에 관통균열이 발생한다.

콘크리트표준시방서에서는 슬래브와 같이 넓이가 넓은 평판구조의 경우 두께가 0.8m 이상, 하단이 구속된 벽체의 경우 두께가 0.5m 이상인 경우 매스콘크리트로 다루도록 규정하고 있다. 지하철 BOX 구조물은 슬래브나 벽체의 두께가 보통 1m 이상이며, 2m 정도로 매우 두꺼운 경우도 있다. 따라서 지하철 구조물의 100년 내구성을 확보하기 위

[†] 책임저자 : 정희원, 서울산업대학교 철도건설공학과 박사과정
E-mail : rwpe@hanmail.net

TEL : (02)970-6507 FAX : (02)948-0043

* 정희원, 서울산업대학교 철도건설공학과 박사과정

** 서울산업대학교 토목공학과 석사과정

*** 정희원, 서울산업대 건설공학부 교수

해서는 수화열에 의한 균열발생을 최대한 억제할 필요가 있으며, 특히 벽체의 경우에는 관통균열로 인해 누수 및 조직열화가 가속화될 수 있어 이에 대한 적극적인 대책이 요구된다[1].

한편, 지하철은 도로를 따라 건설되며, 심도가 얕거나 지반상태가 토사로서 좋지 않거나 정거장 및 정거장 접속부 등에서는 개착식 BOX 구조물을 설치한다. 개착식 BOX 구조물은 공사기간 중 교통을 방해하여 교통체증을 일으키므로 공사기간을 단축시키는 것이 매우 중요하다. 그러나 콘크리트는 경화하는데 최소한의 양생기간이 소요되므로 공사기간을 단축시키는 것이 쉽지 않다.

본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 지금까지 하나의 기간을 완성하면 이어서 다음기간으로 콘크리트를 타설해가는 순차적인 시공방법 대신에 한 기간씩 건너뛰면서 콘크리트를 타설해가는 건너뛰기식 시공방법을 제안하고자 한다. 이러한 시공방법을 적용할 경우 후타설되는 콘크리트 구조물이 수화열에 의해 팽창, 수축을 일으킬 경우 먼저 타설된 콘크리트 구조물의 구속으로 온도균열 발생 가능성이 높아질 수도 있다. 이러한 수화열에 의한 온도균열 발생 현상을 검토하기 위해 수화열 및 온도해석을 수행하였으며, 해석결과의 검증에 위해 기 실시된 mock-up 시험체의 온도 및 응력계측 결과를 이용하였다. 해석에는 결합재의 종류, 외기온도, 타설시 콘크리트 온도, 벽체 높이 등을 변수로 사용하였으며, 특히 벽체의 관통균열 제어를 위해 건너뛰기 시공방법을 중점으로 다양한 조건 검토를 동시에 수행하여 최적의 수화열에 의한 온도균열 억제 방법을 제안하고자 한다.

2. 온도균열평가 방법

2.1 온도균열지수

수화열에 의한 콘크리트의 온도균열 발생 가능성을 예측하는 방법은 콘크리트표준시방서에 제시되어 있으며, 온도균열지수로서 평가하도록 규정하고 있다. 온도균열지수는 온도해석 및 온도응력 해석을 수행하고, 이 결과를 식 (1)에 적용하여 온도균열지수를 계산하도록 하고 있다[2].

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_t(t)} \quad (1)$$

여기서 $f_t(t)$ 는 재령 t일에서의 수화열에 의해 발생한 부재중의 온도응력 최대치이고, $f_{sp}(t)$ 는 재령 t일에서의 콘크리트의 쪼갬인장강도로서 양생온도를 고려하여 구한 값이다.

2.2 온도균열 발생 확률

매스 콘크리트의 온도균열 발생에 대한 평가는 일반적으로 콘크리트 표준시방서에서 규정하고 있는 온도 균열지수와 온도균열발생확률에 의거하여 평가하도록 규정하고 있다. Table 1은 콘크리트 시방서에서 규정하고 있는 온도균열지수와 온도균열발생확률과의 관계를 나타낸 것이다[3].

Table 1. Thermal cracking index and crack probability

균열제어 조건	온도균열지수	온도균열발생확률
균열발생을 방지하고 싶은 경우	1.5 이상	5% 이하
균열발생을 제한하고 싶은 경우	1.2 ~ 1.5	10~25%
유해한 균열발생을 제한하고 싶은 경우	0.7 ~ 1.2	25~85%

3. 수화열 및 응력해석 방법

3.1 Mock up 실험체에 의한 해석 방법의 검증

Fig. 1은 수화열에 의한 온도 및 응력 해석 방법을 검증하기 위해 사용한 mock up 시험체를 나타낸 것이다. 이 시험은 인천국제공항 철도 BOX 구조물 벽체의 수화열에 의한 온도균열제어 목적으로 수행한 것으로서 온도계측 및 응력계측이 정확하게 측정된 것으로 판단하여 본 해석 방법의 정확성을 검토하는데 사용하는 것으로 하였다.

본 시험체의 벽체의 크기는 높이 1.5m, 벽두께 1.2m인 매스콘크리트이며, 콘크리트의 압축강도는 $f_{cu} = 40MPa$, 시멘트는 1종에 고로슬래그 미분말 25%를 첨가한 것이다. 수화열에 의한 온도분포는 Thermo-couple를 설치하여 7일간 계측하였으며, 응력계측은 콘크리트의 유효응력계지지를 매립하여 9~10일간 측정하였다. Fig. 1의 [E]는 유효응력계지, T는 Thermo-couple를 각각 매립한 위치이다. 그위치 지하철 BOX 구조물에서 온도 균열 제어에 가장 불리한 벽체 중앙에 설치 하였다.

Fig. 2는 수화열 계측값과 본 연구에서 사용하는 온도해석 프로그램에 의한 해석값을 나타낸 것이다. 해석결과는 계측결과와 전 재령 동안 잘 일치하고 있으며, 최고온도 및 최고온도 발생 재령도 거의 일치하는 경향을 보였다.

Fig. 3은 온도응력 계측값과 해석값을 나타낸 것이다. 타설 초기에 발생하는 압축응력은 계측값에 비해 해석값이 크게 평가된 반면, 인장응력이 발생하는 구간에서는 해석값이 계측값의 최대점을 추종하고는 있는 것으로 나타났다. 수화열에 의한 응력계측은 크리프, 건조수축, 수화열의 영향 등 다양한 인자가 복합되어 계측이 매우 어렵다는 점을

감안하면 해석값과 계측값이 잘 일치하고 있다. 특히 외부 구속이 큰 벽체의 경우 재령 초기에 압축상태에 있다가 나중에 인장상태로 응력이 반전되는 경향을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 수치해석 방법으로서 본 해석 프로그램을 사용하여 수화열에 의한 온도균열 제어방법을 제안하고자 한다[4].

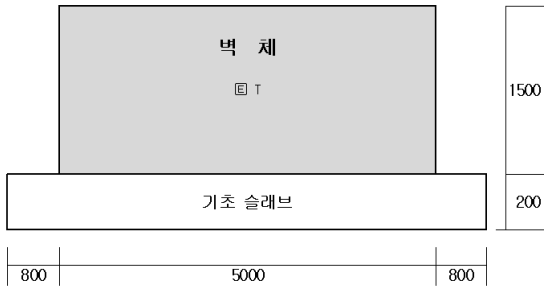


Fig. 1. Mock-up specimen

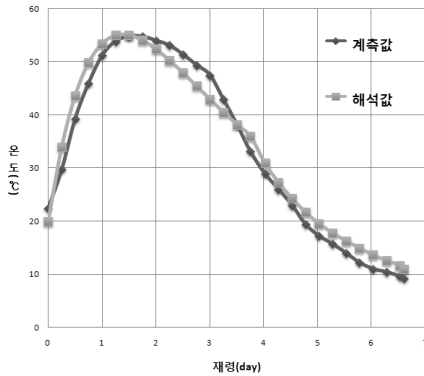


Fig. 2. The thermal history of concrete specimen with type I cement

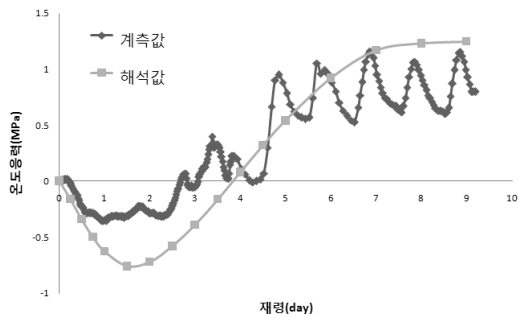


Fig. 3. The thermal stress history of concrete specimen with type I cement

3.2 해석 대상 단면 및 조건

3.2.1 해석 단면 제원 및 배합

Fig. 4의 해석 단면은 지하철 콘크리트 BOX 구조물로서 그 형상은 가장 일반적으로 적용하고 있는 표준적인 단면으로서 길이 18m, 폭 10.6m, 높이 7.61m이고, 바닥슬래브,

벽체 및 상부슬래브의 두께는 모두 1m이다.

Table 2는 해석에 적용된 콘크리트 배합을 나타낸 것이다. 콘크리트 설계기준강도는 27MPa이며, 배합에 사용된 결합재는 1종 시멘트에 플라이 애쉬 20%를 치환한 것, 4종 시멘트에 플라이 애쉬 10%를 치환한 것, 3성분계 시멘트(1종 시멘트 + 고로슬래그 30% + 플라이 애쉬 20%)를 사용한 것 등 3종류로 하였다. 결합재의 양은 동일한 압축강도가 얻어지도록 정하였다.

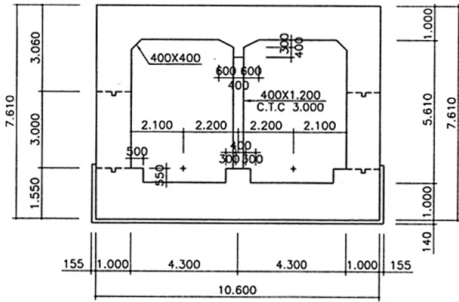


Fig. 4. Typical section of concrete box structures in subway

Table 2. Mix proportions of concrete (kg/m³)

type	W	Binder			S	G	W/C (%)	S/A (%)
		C	FA	BFS				
1종 + FA20	163	298	75	0	844	952	43.7	47.2
4종 + FA10	163	337	37	0	857	955	43.5	47.5
3성분계	169	200	40	160	825	983	42.3	46

3.2.2 해석 변수

Table 3은 수화열 및 응력해석을 수행하기 위해 사용되는 해석 변수를 나타낸 것이다. 해석 변수로는 재료, 설계 및 시공 측면에서 수화열에 의한 온도균열을 제어하는데 가장 민감한 영향을 준다고 판단되는 변수로 구성하였다. 특히 본 연구에서는 시공 측면에서 1블록씩 건너뛰면서 콘크리트를 타설하는 경우를 추가하였다[5].

Table 3. Parameter of thermal analysis

구분	세부항목	세부 항목
재료	시멘트 종류	1종 시멘트 + 플라이애쉬 20% 4종 시멘트 + 플라이애쉬 10% 3성분계 시멘트
설계	벽체 타설높이	2m, 3m, 4m
시공	타설 순서	연속시공 1 블록 건너뛰기 시공
	온도 조건	타설온도, 대기온도

수화열 해석에 사용된 콘크리트의 온도 및 대기온도는

각각 20°C 및 14°C로 하였으며, 콘크리트 표면은 보온양생시트 1장을 사용하여 양생하는 것으로 하였다.

3.2.3 콘크리트의 열적 특성

Table 4는 해석에 사용되는 열적 특성치를 나타낸 것이다. 단열온도상승 특성치는 단열온도상승시험을 수행하여 얻은 결과이며, 나머지 변수들은 콘크리트표준방서의 값을 적용하였다.

Table 4. Thermal and physical properties

열특성치		1종 + FA20	4종 + FA10	3성분계
단열온도 상승특성치	Q_{∞}	46.6	39.6	48.6
	r	0.784	0.345	0.278
밀도	$\rho(kg/m^3)$	2400		
열전도율	$k(W/m^{\circ}C)$	2.4		
비열	$C_p(KJ/kg^{\circ}C)$	1.05		

3.3 모델링

Fig. 5 및 Fig. 6은 각각 순차적으로 콘크리트를 타설하는 시공방법 및 한 블록씩 건너뛰면서 콘크리트를 타설하는 시공방법에 대한 수치해석 유한요소 모델을 나타낸 것이다.

건너뛰기 시공에서는 한 경간을 건너뛰어 바닥슬래브 콘크리트를 두 곳에서 동시에 타설하고, 바닥 슬래브 경화 후 벽체 콘크리트도 두 곳에서 동시에 타설하는 방법으로 모델링을 구성한 것이다.

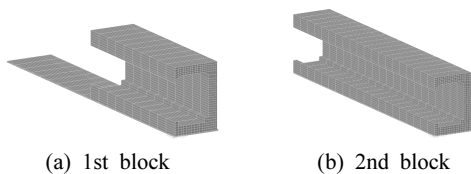


Fig. 5. Mesh of FEM in continuous executing method

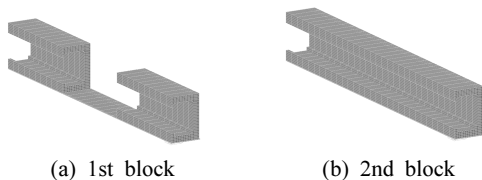


Fig. 6. Mesh of FEM in executing method by skipping one block

4. 수화열 및 응력해석 결과 검토

4.1 결합재 특성별 수화열 억제 효과

Fig. 7은 벽체에 대하여 3종의 결합재를 사용한 각각의 콘크리트에 대한 수화열 해석 결과를 나타낸 것이다. 수화

열에 의한 최고 온도 상승치는 1종 배합의 경우 47°C, 4종 배합의 경우는 35°C로서 4종 배합이 12°C 정도 온도 저감 효과가 있으며, 3성분계 배합의 경우에도 4종 배합과 거의 비슷한 정도의 온도 저감효과 있는 것으로 해석되었다. 바닥슬래브의 경우는 단면 두께가 벽체와 동일하기 때문에 열대류 경계조건이 일부 다르지만 거의 유사한 수화발열 현상을 보였다.

Fig. 8은 Fig. 7의 수화열 해석 결과를 적용하여 온도응력 해석을 실시하고, 식 (1)에 의해 온도균열지수를 계산한 것이다.

4종 배합 및 3성분계 배합의 경우, 온도균열지수는 거의 비슷한 값을 가지며, 1종 배합에 비해 바닥 슬래브에서는 1.0, 벽체에서는 0.65 정도 큰 값을 나타내었다. 온도균열지수가 1.0에서 0.2정도 증감하면 온도균열발생 확률은 50%에서 25% 정도 증감한다는 사실을 고려할 때 결합재의 선택은 온도균열 발생을 억제하는데 큰 영향을 미치게 된다.

그러나, 균열발생 가능성이 높은 벽체의 경우, 1종 시멘트를 사용해도 플라이애쉬를 치환하면 온도균열지수가 1.5 정도에 근접하여 균열발생을 억제하는데 도움이 된다. 다만, 이 경우는 대기온도 14°C(봄, 가을 평균기온, 서울지역), 콘크리트 타설온도 20°C로 고정된 경우이며, 이 조건이 달라질 경우 온도균열지수는 감소하여 균열발생 가능성이 높아질 수도 있다.

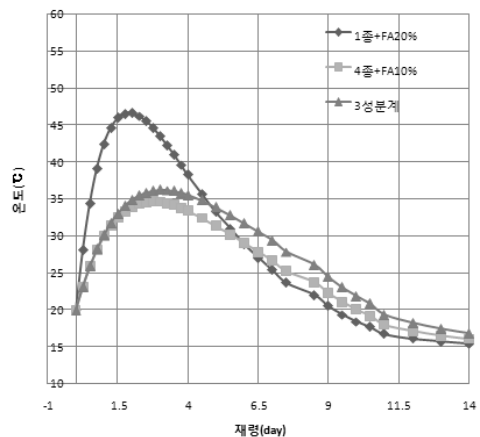


Fig. 7. The temperature history of concrete wall

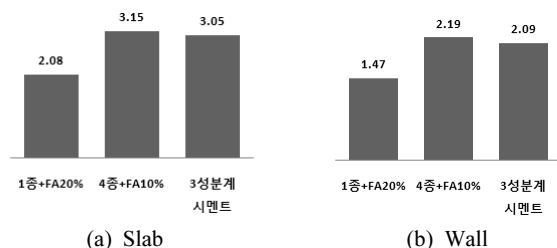
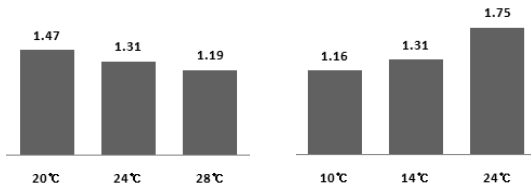


Fig. 8. Temperature crack index in concrete structures

4.2 타설온도 및 대기온도의 영향

Fig. 9(a)는 대기온도를 14°C로 고정할 경우, Fig. 9(b)는 콘크리트 타설온도를 24°C로 고정할 경우, 1종 배합에 대한 벽체의 온도균열지수를 나타낸 것이다. 온도균열지수는 콘크리트 타설온도가 증가할수록 감소하는 반면, 대기온도가 증가할수록 증가하고 있다. 콘크리트의 타설온도가 높으면 수화열에 타설온도가 더해지기 때문에 전체적으로는 단면의 온도가 높아지는 결과를 초래하여 온도균열 억제에 불리하게 작용한다. 그러나, 대기온도가 높으면 보온효과로 균열발생이 억제된다. 그러나, 타설온도와 대기온도는 온도균열지수 증감에 서로 상반되는 결과를 가져오므로 수화열에 의한 균열제어 대책을 수립하는데 주의가 필요하다 [6].



(a) Concrete placing temperature (b) Air temperature
 Fig. 9. Temperature crack index in concrete wall

4.3 벽체 높이 증감에 의한 온도균열 제어 효과

Fig 10은 콘크리트 타설 시, 벽체높이를 2m, 3m, 4m로 각각 변화 시켰을 때의 온도균열지수를 나타낸 것이다. 지하철 콘크리트 BOX 구조물 벽체의 1회 타설 높이는 3m이며, 이렇게 설정한 근거는 명확하지는 않지만, 가시설 등을 고려한 것으로 보인다. 그러나, 벽체 두께가 두꺼워 소정의 온도균열지수 확보가 곤란한 경우에는 벽체 높이를 조절하여 균열제어를 하는 것이 합리적인 경우도 있을 수 있다 [7].

벽체 두께가 1m인 경우, 벽체 높이를 3m에서 2m로 낮추면 온도균열지수는 0.17정도 증가한다. 구속체와 피구속체의 탄성계수비가 4라고 할 때, 벽체 높이가 3m인 경우, 벽체 길이(L)에 대한 콘크리트 1회 타설 높이(H)의 비 $H/L=0.2$ 정도일 때 구속도는 0.35가 되며, 벽체 높이가 2m인 경우 $H/L=0.1$ 정도일 때 구속도는 0.5 정도가 된다. 즉 벽체 높이를 줄이면 구속체와 피구속체간의 구속도가 감소되어

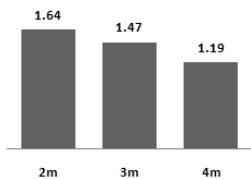


Fig. 10. Temperature crack index in concrete wall

온도균열 발생 가능성은 감소한다[8].

4.4 건너뛰기 시공방법의 효과

Fig. 11은 벽체에 대하여 순차적으로 연속해서 콘크리트를 타설하는 경우와 1블록 건너뛰면서 콘크리트를 타설하는 방법에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. Fig. 11(a)는 연속해서 콘크리트를 타설하는 경우이고, Fig. 11(b)는 한 블록씩 건너뛰면서 콘크리트를 타설하는 경우이다. 이들 두 그림을 비교해 보면 한 블록씩 건너뛰면서 콘크리트를 타설하는 경우, 인장응력이 높게 나타난 영역이 좁아지고 있으며, 인장응력의 최대치도 작게 나타났다. 즉 최대인장응력은 연속타설의 경우 1.69MPa, 한 블록씩 건너뛰면서 타설하는 경우 1.46MPa이며, 이것을 균열지수로 환산하면 각각 1.20 및 1.36으로서 건너뛰기 시공을 하는 경우 온도균열지수는 0.16 정도 증가하였다.

따라서, 공사기간 단축을 위해 한 블록씩 건너뛰면서 콘크리트를 타설하면, 공사기간 단축과 아울러 온도균열 발생가능성을 낮출 수 있어 균열제어에 유리하게 작용하고 있음은 물, 내구성 향상에도 기여할 것으로 생각된다.

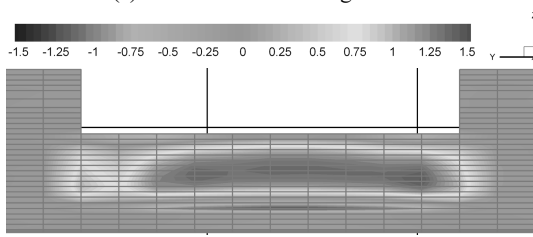
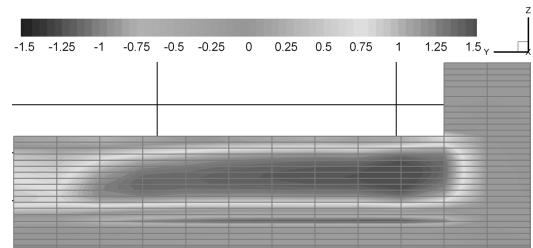


Fig. 11. Thermal stress contour of concrete wall

5. 결론

본 논문은 지하철 콘크리트 BOX 구조물의 수화열에 의한 온도균열 제어를 목적으로 해석적인 방법을 통해 연구를 수행한 것이다. 해석 파라미터로서는 결합재의 종류, 벽체의 높이, 콘크리트 타설온도 및 대기온도, 콘크리트 타설 방법 등을 고려하였으며, 본 연구 범위 내에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 사용하고 있는 해석방법의 타당성을 검증하기 위해 인천국제공항 철도 콘크리트 BOX 구조물의 온도계측 및 응력계측 결과를 사용하였으며, 해석결과와의 검토를 통해 수치해석에 대한 적합성이 확인되었다.
2. 1종 배합에 비하여 4종 배합 및 3성분계 배합의 경우 온도저감 효과가 큰 것으로 나타났으며, 온도균열지수 증가효과도 벽체에서 0.65 정도로서 균열발생 가능성이 매우 낮아지는 것으로 확인되었다.
3. 1종 시멘트에 플라이애쉬를 치환할 경우 온도균열지수는 커져서 균열발생을 억제하는데 도움이 되지만, 대기온도나 콘크리트 타설온도 조건이 변하는 경우 온도균열지수 감소로 인하여 균열발생 가능성이 높아질 수 있다.
4. 온도균열지수는 콘크리트 타설온도가 증가할수록 감소하는 반면, 대기온도가 증가할수록 증가하여 서로 상반되는 결과를 나타내었다. 또한, 온도균열지수에는 콘크리트 타설온도보다는 대기온도가 더욱 민감한 것으로 나타났다.
5. 벽체 높이가 높아질수록 온도균열지수는 감소하며, 1m 증가함에 따라 0.2~0.3 정도 감소하여 온도균열 제어에 불리한 방향으로 작용하였다.
6. 콘크리트를 한 블록씩 건너뛰면서 콘크리트를 타설할 경우 연속타설보다 높은 온도응력 발생 영역이 감소하였으며, 온도균열지수도 0.15 정도 증가하여 온도균열 제어에 효과적인 것으로 평가되었다.

참고 문헌

1. 일본콘크리트공학협회(1986), “매스콘크리트의 균열제어지침,” pp.20-21.
 2. 한국콘크리트학회(2004), “콘크리트표준시방서 해설,” pp.257-276.
 3. 한국콘크리트학회(2005), “최신 콘크리트 공학,” pp.603-634.
 4. 신희범, 김은겸, 김래현, 신치범(1994), “FEM에 의한 매스콘크리트 구조물의 온도해석 소프트웨어 개발,” 대한토목학회 1994년 학술발표회 논문집(구조분과), pp.143-146.
 5. 한국철도학회(2004), “수화열 발생인자가 지하철 콘크리트 구조물의 내구설계에 미치는 영향,” 한국철도학회 2004년도 추계학술대회논문집, pp.264-270.
 6. 한국철도학회(2007), “대기온도를 고려한 지하철 콘크리트 BOX 구조물의 수화열에 의한 온도균열제어 대책,” 한국철도학회 2007년도 추계학술대회논문집, pp.577-580.
 7. M. Ishikawa and T. Tanabe(1994), “Study of external restraint of mass concrete,” Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Proceeding of the International RILEM Symposium, pp.187-194.
 8. T. Mishima, H. Umehara, M. Yamata, and M. Nakamura(1994), “Thermal stress in full size RC box culvert,” Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Proceeding of the International RILEM Symposium, pp.171-178.
- 접수일(2009년 10월 5일), 수정일(2009년 12월 7일),
게재확정일(2009년 12월 24일)