

# 수화열에 의한 매스콘크리트 박스 라멘 구조물의 구조거동 연구

## A Study on the Structural Behavior in Mass Concrete Box Rahmen due to Hydration Heat

조 병 완<sup>\*</sup>      김 영 진<sup>\*\*</sup>      허 민 회<sup>\*\*\*</sup>  
Jo, Byung Wan    Kim, Young Jin    Hur, Min Hoi

### ABSTRACT

Concrete cracks due to hydration heat are a serious problem, particularly in mass concrete structures such as box rahmen, dam or footing of pier, etc.. As a result of the temperature rise and restriction condition of foundation, the thermal stress which may induce the cracks can occur.

In this study, ABAQUS program package was used to calculate the temperature distributions generated by hydration heat and the thermal stress in box rahmen structure which have thickness of 1.7~2.2m, and applied for various equations of adiabatic temperature rise such as korean code, japanese code, convection coefficient and low heat cement code.

### 1. 서론

최근 콘크리트 구조물이 특수화, 대형화됨에 따라 중요 콘크리트 구조물이 매스콘크리트로 타설되고, 일반 구조물에서도 점차 고강도 콘크리트화되는 경향을 보임에 따라 초기재령 콘크리트의 균열 발생 사례가 자주 발생하고 있다. 초기에 수화열에 의하여 발생한 균열은 구조물의 안전성, 내구성 및 특히 지하구조물의 경우, 방수성에 악영향을 미칠 뿐 아니라 부실공사의 근본적 원인을 제공하게 된다. 일반적으로 수화열에 의한 균열은 콘크리트의 열특성을 제대로 파악하지 못하고 시공단계에서부터 철저한 수화열제어계획이 없이 발생하는 경우가 많으므로 수화열에 의한 균열을 시공 전에 미리 예측하기 위한 기초적 연구와 균열발생을 최소화하기 위한 타설방법, 시멘트 종류 등에 대한 많은 연구가 있어야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 단면두께가 1.7~2.2m인 개착식 박스 라멘 구조물을 대상으로 수화열 예측 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 대류계수, 시멘트 종류 및 구속조건 등에 대한 시공단계별 수화열해석을 통해 매스콘크리트 박스 구조물의 시공단계별 온도응력특성, 균열발생여부 및 균열발생 위치를 예측하고 나아가 저발열 시멘트의 수화열 저감효과 및 균열억제 유무를 확인하는데 목적이 있다.

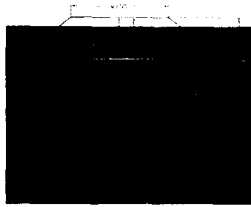
### 2. 해석 방법 및 콘크리트의 열적특성

#### 2.1 박스 라멘 구조물의 형상 및 콘크리트의 열적 특성

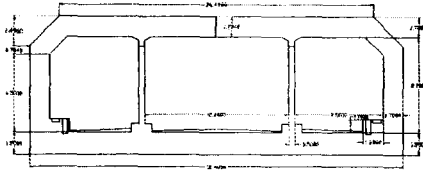
##### (1) 박스 라멘 구조물의 형상

그림 1에 보여진 바와 같이 단면두께가 1.7~2.2m, 신축이음이 15m인 매스콘크리트 박스 라멘 구조물의 수화열에 의한 온도균열발생 여부의 검토를 위해 ABAQUS 프로그램을 이용하여 표 1에 나타난 바와 같이 일반적인 박스구조물의 타설순서(bottom⇒wall⇒top slab)를 고려하여 1련과 3련 박스 라멘에 대하여 온도응력해석을 실시하였다.

\* 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정희원, 한양대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\* 정희원, 한양대학교 토목공학과 석사과정



(a) 1련 Box



(b) 3련 Box

그림 1 해석 대상 구조물 형상

(2) 콘크리트 배합 및 열적 특성

시멘트의 종류에 따른 온도응력 저감효과를 확인하기 위해 보통포틀랜드시멘트(OPC)와 국내 D사의 저발열시멘트(LHC)를 사용하였으며, 해석에 사용된 콘크리트의 배합설계는 표 2와 같다.

대기온도 25℃에서의 시멘트의 종류, 콘크리트시방서 및 일본콘크리트 공학협회 수화열 위원회의 단일온도상승식에 따른 콘크리트의 열적특성은 표 3과 같다.

2.2 해석조건

시공단계를 고려하여 1련 박스 라멘은 bottom, bottom(기타설 : 타설 후 720시간 경과)+wall(후타설), 1, 3련 박스는 bottom(기타설)+wall(기타설)+top slab(후타설)에 대하여 온도응력해석을 실시하였다.

단열온도 상승식은 OPC의 경우, 일본 콘크리트 공학 협회식과 콘크리트 시방서 제안식을 비교·검토하였으며, 균열지감 대책 제시를 위해 LHC의 수화열 해석을 병행하였다. 또한, 콘크리트 표면 대류계수(convection

coefficient)는 P. KUMAR MEHTA의 "Concrete Structure, Properties, and Materials"의 값과 콘크리트 시방서의 대류계수 및 바닥콘크리트의 전도계수를 대류계수로 치환할 경우의 영향을 살펴보기 위하여 바닥부분 대류계수를 변수로 선택하였으며, 기초암 바닥부위의 방수시트로 인한 구조물의 구속여부에 따른 응력변화를 살펴보기 위해 바닥경계조건에 따른 온도응력해석을 실시하였으며, 각 변수에 따른 온도응력 해석변수를 표 4에 나타내었다.

2.3 구조해석 모델링

박스 라멘 구조물의 횡·종방향 대칭성을 이용하여 구조물의 1/4을 모델링에 대하여 경계조건을 적용하였으며, 시공단계에 따른 거푸집 유무를 고려하여 기타설콘크리트의 경우, 거푸집을 제거한 상태, 후타설의 경우는 거푸집을 준치하는 경우로 가정하여 대류계수를 적용하였다.

표 1 개착식 Box 라멘 시공순서

시공 단계	구 분	두께(cm)	비 고
Step 1	기초암위에 Lean 콘크리트 타설	15	
Step 2	방수시트설치	0.3	
Step 3	Bottom 콘크리트 타설	1.7~2.2	
Step 4	Wall 콘크리트 타설	Bottom 상부로부터 400	
Step 5	Top Slab 콘크리트 타설	Wall부터 상부	

표 3 콘크리트의 열적특성 (대기온도 : 25℃)

기 준	콘크리트 시방서	일본콘크리트공학협회	저발열콘크리트
단열온도 상승식 K(℃)	51.330	45.972	37.500
$\alpha$ (h <sup>-1</sup> )	1.527	1.449	0.689
밀도 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2350	2350	2350
열전도율 k(kcal/mh℃)	2.3	2.3	2.3
비열 C <sub>p</sub> (kcal/kg℃)	0.275	0.275	0.275

표 2 배합설계표

구 분	설계기준 강도 ( $\sigma_{28}$ )	굵은골재 최대치수 (G <sub>max</sub> )	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위 시멘트량 C (kg/m <sup>3</sup> )	물-시멘트비 W/C (%)	잔골재율 S/A (%)	굵은골재량 G (kg/m <sup>3</sup> )	AE 감수제 (kg)
OPC	240	25	12	4.5	353	51	47	924	1.77
LHC	240	25	12.5	4.5	354	48.3	39	1125.7	1.88

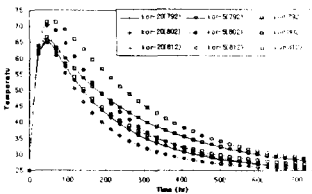
표 4 구조형식에 따른 해석조건

형식	대상			시멘트 종류	단열온도상승식		대류계수			Bottom 구속 조건	구분
	Bottom	Wall	Top		콘크리트학회	일본콘크리트학회	Mehta	콘크리트학회	Bottom 대류계수		
1련 Box	○	○	○	OPC	○	○	○	○	5	free	b-kor
				OPC	○	○	○	○	5	free	w-kor
					○	○	○	○	5	fix	w-kor-fix
					○	○	○	○	5	free	w-kor5
					○	○	○	○	20	free	w-kor20
					○	○	○	○	5	free	w-jpn
LHC	○	○	○	○	5	free	w-lhc				
3련 Box	○	○	○	OPC	○	○	○	○	5	free	t1-kor
				LHC	○	○	○	○	5	free	t1-lhc
				OPC	○	○	○	○	5	free	t3-kor
				LHC	○	○	○	○	5	free	t3-lhc

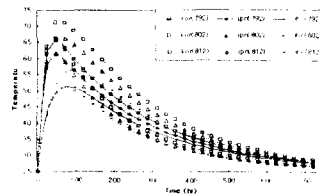
여기서, OPC : 보통포틀랜드시멘트, LHC : 저발열시멘트, 구속조건 free : z 방향 변위 구속, fix : 모든 변위, 모멘트 구속

### 3. 온도 및 온도응력해석 결과 및 고찰

#### 3.1 온도해석결과



(a) 대류계수에 따른 수화열 비교



(b) 단열온도상승식 및 시멘트종류에 따른 수화열

그림 2 수화열-재령 곡선

의 최대온도가 각각 71.27, 70.17℃로 거의 동일하나, 최대온도 발생 이후 수화열감소가 급격히 일어남을 알 수 있다.

#### (2) 단열온도상승식 및 시멘트 종류에 따른 온도(1련 박스의 wall)

그림 2 (b)에 보여진 바와 같이 일본콘크리트 수화열 위원회의 단열온도상승식을 적용한 경우 (w-jpn), 최고온도는 66.28℃로서 콘크리트 시방서의 단열온도상승식을 적용한 경우보다 약 5℃정도 낮은 온도를 보였으며, LHC 경우, 56.51℃로 OPC와 비교하여 약 15℃의 온도저감효과를 나타내었다.

#### (3) 시공단계별 온도해석 결과

1련 박스의 시공단계별 온도해석을 실시한 결과, OPC는 시공단계에 상관없이 대부분 최고온도가 70℃전후를 나타내었으며, 3련 박스의 경우도 거의 동일한 결과를 나타내었다. 또한, 분리타설시 후타설 콘크리트의 수화열의 영향은 기타설콘크리트의 일부영역에서만 영향이 있음을 알 수 있다.

#### 3.2 온도응력해석결과

##### (1) 대류계수에 따른 온도응력(1련 box wall)

대류계수를 변수로 온도응력 해석결과, 응력검토 위치 및 재령에 따라 상이하나, 일반적으로 대류계수를 크게 한 경우 내·외부 온도차에 의해 최대온도 도달 이후 다소 큰 응력이 발생하였으며, 대류계수가 작은 경우, 초기재령에서 최대온도가 크게 발생하여 큰 응력이 발생하였으나, 대류계수에 대해 큰 응력차이를 나타내지 않았다.

##### (2) 단열온도상승식 및 시멘트 종류에 따른 응력(1련 box wall)

그림 3 (b)에 보여진 바와 같이 w-kor의 최대응력이 19.3 kg/cm<sup>2</sup>(2축 응력)으로 w-jpn의 응력보다 약 2 kg/cm<sup>2</sup> 정도 크게 나타났으며, w-lhc의 경우, 온도분포에 따른 국부적인 응력이 19.4 kg/cm<sup>2</sup>(3축 응력)으로 크게 나타났으나 대부분 응력은 크게 저감되었다.

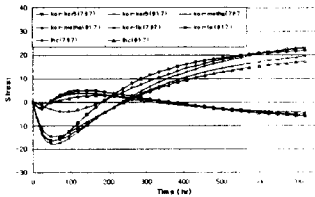
표 5 변수에 따른 해석결과

구분	최대온도 ℃	재령 hr	위치 Node	최대응력 kg/cm <sup>2</sup>	재령 hr	위치 Node	균열 지수		
1련 Box	bottom	b-kor	70.46	48	545	11.1 (2축)	72	1105	1.31
	wall	w-kor	71.27	48	802	19.3 (2축)	720	797	1.13
		w-kor-fix	71.27	48	802	22.9 (2축)	720	797	0.95
		w-kor5	70.17	48	802	13.3 (2축)	720	797	1.00
		w-kor20	70.17	48	802	21.7 (2축)	720	797	1.01
		w-jpn	66.28	72	802	17.2 (2축)	720	797	1.27
		w-lhc	56.51	96	802	19.4 (3축)	720	797	1.06
top slab	t1-kor	71.56	72	1852	22.1 (3축)	48	1810	0.99	
t1-lhc	56.98	96	1852	8.5 (3축)	96	1810	2.91		
3련 Box	top slab	t3-kor	70.42	48	6128	36.8 (3축)	48	6061	0.59
	t3-lhc	55.18	96	6128	14.3 (3축)	72	6066	1.72	

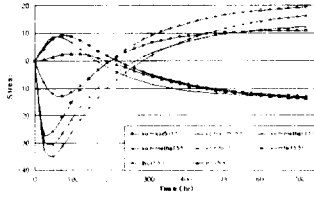
(4) 시공단계별 온도응력해석 결과

1련 박스의 시공단계를 고려한 온도응력 해석 결과, top slab 타설시 초기 온도상승으로 인해 후타설콘크리트가 횡방향(2축 방향)으로 팽창하므로, 기타설 콘크리트의 벽체 하단부위에 모멘트가 발생하여 타설 후 48시간이 경과하여 가장 큰 응력(22.1 kg/cm<sup>2</sup>, 3축 응력, 균열지수:0.99)이 발생하였다.

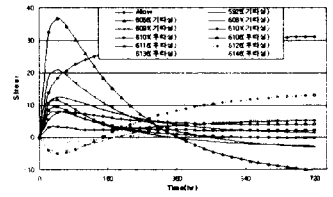
3련 박스의 경우, 1련 박스와 동일하게 top slab 타설 후 48시간이 경과하여 벽체 하단에서 최대응력(36.8 kg/cm<sup>2</sup>, 3축 응력, 균열지수 : 0.59)이 발생하였으며, 3련 박스의 횡방향(2축 방향)의 길이가 크므로 1련 박스응력보다 약 15 kg/cm<sup>2</sup> 정도 더 크게 받는 것으로 나타났다. 따라서, OPC를 사용하여 3련 박스 시공시 균열발생확률이 매우 크며, 균열억제를 위하여 LHC를 타설한 결과, 최대응력은 벽체 하단에서 14.3 kg/cm<sup>2</sup>(3축 응력, 균열지수 : 1.72)으로 약 3배의 큰 균열지수를 나타내었다.



(a) 2축 응력 (1련 box wall)



(b) 3축 응력 (1련 box wall)



(c) 3축 응력 (3련 box top)

그림 3 박스 형식 및 시공단계에 따른 구조해석 모델링

4. 결론

- (1) 대류계수에 따라 최대응력 발생시기가 최대온도(약 71℃) 발생시점(48~72hr)을 기준으로 상이한 결과를 나타내었으며, 매스콘크리트 박스 라멘의 경우, 분리타설시 바닥부분의 대류계수(전도계수)의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.
- (2) OPC를 사용한 경우, 시공단계에 무관하게 약 70℃의 최대온도가 발생하는 것으로 나타났으며, 저발열 시멘트를 사용한 경우, 최대온도가 약 15℃ 감소하였다.
- (3) 대류계수의 변수에 따른 1련 박스 wall에 발생하는 최대응력은 17.2~19.3 kg/cm<sup>2</sup>로 큰 차이를 나타내지 않았으나, 지반경계조건을 완전 구속한 경우, 22.9 kg/cm<sup>2</sup>으로 다소 크게 나타났다.
- (4) w-kor의 최대응력이 19.3 kg/cm<sup>2</sup>(2축 응력)으로 w-jpn의 응력보다 약 2 kg/cm<sup>2</sup> 정도 크게 나타났으며, w-lhc의 경우, 온도분포에 따른 국부적인 응력이 19.4 kg/cm<sup>2</sup>(3축 응력)으로 크게 나타났으나 대부분 응력은 크게 저감되었다.
- (5) top slab 타설시 기타설 콘크리트의 벽체 하단부위에 모멘트가 발생하여 타설 후 72시간이 경과하여 가장 큰 응력(3련 박스:36.8 kg/cm<sup>2</sup>, 3축 응력, 균열지수:0.59)이 발생하였으며, LHC를 사용한 경우, 최대응력은 14.3 kg/cm<sup>2</sup>(3축응력, 균열지수:1.72)으로 균열억제에 효과적인 것으로 나타났다.