

매스콘크리트 구조물의 수화열 저감을 위한 매개변수 연구

Parametric Study for Reduction of Heat of Hydration in Mass Concrete

심 종 성*
Sim, Jong Sung

문 도 영**
Moon, Do Young

최 광 민***
Choi, Kwang Min

ABSTRACT

The heat of hydration of cement causes the internal temperature rise at early age, particular in massive concrete structures. As the results of the temperature rise and restraint condition, the thermal stress may induce cracks in concrete. The prediction of the thermal stress is important in design and construction stages in order to control the cracks in mass concrete. It is poor economy to analysis for prediction of the thermal stress on each design or construction.

In this study, the hydration heat and thermal stress analysis is performed by ABAQUS program, as a results of thermal analysis, the formula of size-placing depth relationship is proposed

1. 서론

최근 콘크리트 구조물의 대형화 및 시공방법의 발전에 의한 대량 급속 시공의 증가에 의해 수화열에 의한 온도 응력이 콘크리트 구조물에 균열을 발생시키는 등 무시할 수 없는 영향을 미친다. 매스콘크리트에서는 온도상승시 단면내의 온도차에 의해 발생하는 내부 구속 응력이 주로 문제가 되지만, 최대온도에 도달한 후 온도 강하 시에는 외부구속과 내부구속에 의한 복합적인 응력이 문제가 되며, 구속작용의 대소에 따라 온도균열의 발생시기 및 발생양상도 달라진다^{(3),(4)}. 이러한 온도균열은 설계 및 시공단계에서 충분한 검토가 이루어 져야 한다. 하지만, 설계나 시공 시마다 수화열을 검토하는 것은 매우 비경제적이다.

따라서 본 연구에서는 대표적인 매스콘크리트인 교량의 교각 기초 구조물의, 단면크기와 타설 높이를 변수로 FEM해석을 수행하고, 그 결과를 통하여 단면크기와 타설 높이의 관계식을 제안함으로써 설계나 시공 시 수화열을 저감하기 위한 방안을 도출하는데 보조적인 자료로 제시하고자 한다.

* 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

** 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

2. 수화열 해석

본 연구에서는 Lean 콘크리트 위에 시공한 교각 기초 구조물의 단면크기와 1회 타설 높이의 관계식을 제안하기 위하여 단면크기(B)와 1회 타설 높이(H)를 매개변수로 선정하여 유한요소해석을 수행하였으며, 해석은 ABAQUS를 사용하였다⁽¹⁾. 해석결과를 분석하여, 기초의 단면크기-타설높이 관계식을 제안하였다.

2.1 해석에 사용된 재료특성 및 일반사항

2.1.1 열 전달 해석

해석에 사용된 시멘트는 제1종 보통 포틀랜드 시멘트이며, 단위 시멘트량은 $390\text{kg}/\text{m}^3$, 콘크리트의 28일 압축강도는 $270\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 고려하였고, 하부의 Lean 콘크리트는 28일 압축강도 $130\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 고려하였다. 최대 상승온도(K)값과 반응속도(a)는 콘크리트 표준시방서⁽²⁾에 의해 구하였으며, 재료적 특성은 표 1.에 나타나있다. 거푸집은 합판을 사용하였으며, 상부는 담수양생으로 고려하였고 거푸집과 담수양생의 대류계수는 표 1.에 나타내었다. 외기 및 타설온도는 20°C 로 고려하였고, 6시간 간격으로 해석을 수행하였다.

2.1.2 열 응력 해석

모델은 절점과 요소수를 줄이기 위하여 1/4만 모델링 하였으며, 대칭에 대하여 구속하였으며, Lean 콘크리트와 암반을 모델링 하고 구속조건은 암반의 하면을 3방향에 대하여 구속하였다. 유한요소 모델링은 $0.25\text{m}\times 0.25\text{m}\times 0.25\text{m}$ 로 mesh의 크기는 동일하게 나누었으며, 하부의 Lean 콘크리트 및 암반의 경우 사용된 요소는 3200개, 절점은 3969개이며, 교각 기초의 경우 단면의 크기와 타설 높이에 따라 다르다.

표 1 재료의 물성

물 성		사용재료		
		콘크리트	Lean 콘크리트	암반
비열(kcal/kgf. c)		0.27	0.27	0.2
밀도(kgf/m ³)		2500	2300	2600
열전도율(kcal/mh. c)		2.3	2.3	1.7
대류계수	대기노출면(담수양생)	4.5	-	-
	합판거푸집	7.5	-	-
외기온도		20	20	20
타설온도		20	-	-
28일 탄성계수(kg/cm ²)		246,000	171,000	10,000
열팽창계수		10e-6	10-e6	10-e6
포아송의 비		0.18	0.18	0.2
최대 상승 온도(K)		55.9	-	-
반응 속도(a)		1.446	-	-

2.2 해석결과

해석결과 그림 1은 열 전달 해석결과이며, 중심부와 표면부에 대한 온도변화 그래프는 그림 2에 나타나 있다. 그림 3은 응력 해석 결과이며, 기존 문헌의 결과를 비추어볼 때, 적절한 해석이 수행된 것으로 나타났다.

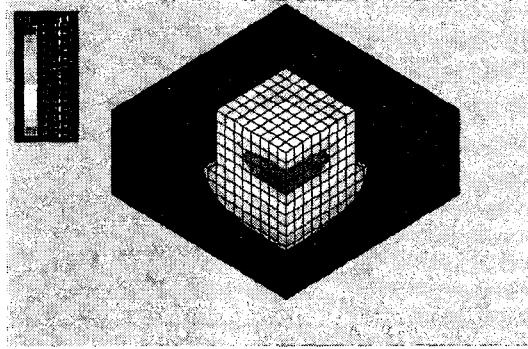


그림 1 S4H1.5의 온도분포(48hr)

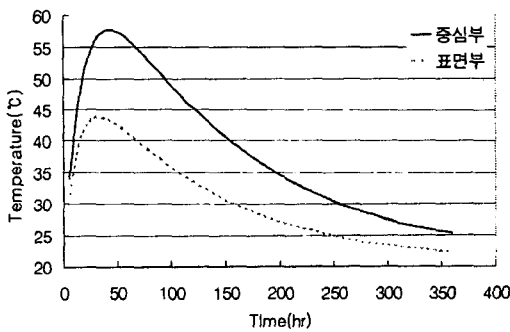


그림 2 표면부와 중심부의 온도이력

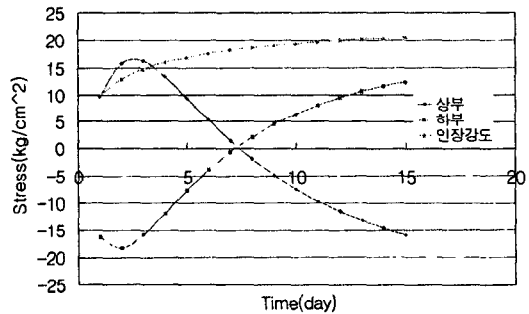


그림 3 S4H1.5의 응력분포

3. 변수 해석결과

3.1 해석 변수

메스콘크리트 구조물의 온도상승에 영향을 미치는 인자에는 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 타설온도, 외기온도, 지반의 구속도, 시멘트 종류, 단위 시멘트량 등을 하나로 고정하고, 단면의 크기(B)와 타설 높이(H)만을 매개변수로 선정하였다. 본 연구에서 선정한 변수는 표 2.와 같다.

3.2 타설 높이에 따른 비교

해석결과를 살펴보면, 그림 4, 5, 6에서 3m, 4m, 5m의 단면크기에 대해서 타설 높이가 증가하면 균열지수가 작아지는 것으로 나타났다. H/B비에 대해 살펴보면, H/B비가 0.25보다 작으면 최대응력은 외부구속이 지배적인 후기에 발생하는 것으로 나타났으며, 0.25보다 큰 경우는 내부구속이 지배적인 것으로 나타났다. 그림에서 H/B비가 0.25전후의 균열발생확률의 거동이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. H/B비가 0.25보다 작을 때는 타설 높이에 따라 균열지수의 변화가 크지 않은 반면 H/B비가

0.25보다 클 때는 높이에 따라 균열지수의 변화가 큰 것으로 나타났다.

3.3 단면 크기에 따른 비교

그림 4, 5, 6을 살펴보면, 단면의 크기가 커질수록 H/B비에 대해 균열지수가 작게 나타나는 것으로 나타났다. 즉, H/B비가 0.25인 경우 단면크기가 3m일때 보다 4m, 5m일때가 작은 것을 알 수 있다. 표 2에서 B3H1과 B5H1을 비교해 보면, 같은 타설 높이일 때 단면의 크기가 3m로 작은 경우의 균열지수가 작은 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 단면의 크기 3m의 콘크리트량이 5m인 경우보다 작기 때문에 균열지수가 크다는 예상과는 다른 결과이며, 이는 매스콘크리트가 수화반응을 할 때 단열을 유지할 수 있는 일정한 발열 영향범위가 있기 때문이다. 타설 높이가 낮아 영향범위가 크기 방향보다 높이 방향이 지배적일 때 단면의 크기가 작을수록 균열지수가 작아지는 경향이 있는 것으로 판단된다. 따라서 타설 높이에 따른 균열지수 평가보다는 H/B에 따른 균열지수를 평가하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

표 2 변수별 해석결과

변수명	단면크기	타설높이	H/B	최대온도균열지수	
				발생시기(day)	균열지수
B3H0.75	3m	0.75m	0.25	15	1.56
B3H1	3m	1m	0.33	2	1.21
B3H1.25	3m	1.25m	0.42	2	0.89
B3H1.5	3m	1.5m	0.50	2	0.71
B3H1.75	3m	1.75m	0.58	2	0.65
B4H0.5	4m	0.5m	0.13	15	1.46
B4H0.75	4m	0.75m	0.19	15	1.41
B4H1	4m	1m	0.25	15	1.37
B4H1.25	4m	1.25m	0.31	2	1.06
B4H1.5	4m	1.5m	0.38	2	0.81
B5H0.5	5m	0.5m	0.10	15	1.27
B5H0.75	5m	0.75m	0.15	15	1.18
B5H1	5m	1m	0.20	15	1.14
B5H1.25	5m	1.25m	0.25	15	1.10
B5H1.5	5m	1.5m	0.30	2	0.93
B5H2	5m	2m	0.40	2	0.67

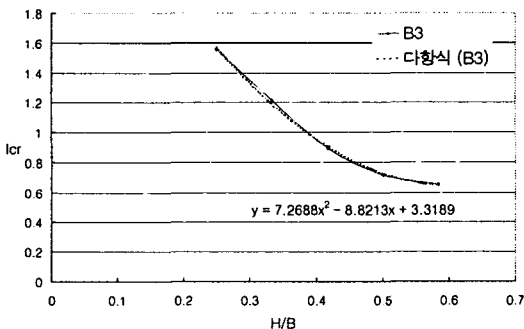


그림 4 단면크기 3m일 때 H/B비-균열지수 선도

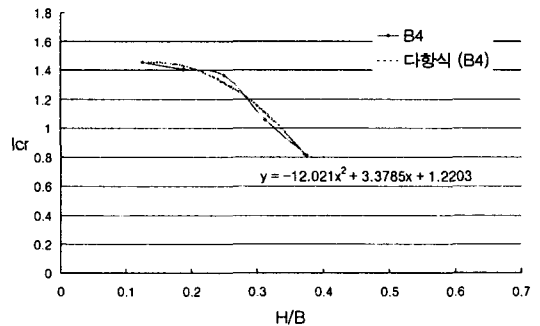


그림 5 단면크기 4m일 때 H/B비-균열지수 선도

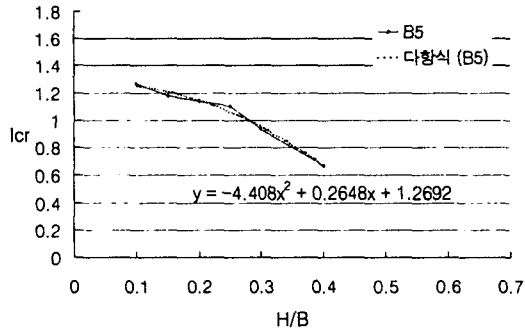


그림 6 단면크기 5m일 때 H/B비-균열지수 선도

3.4 H/B비에 따른 균열지수 관계식

교각 기초 구조물의 경우 일반적으로 기초의 단면이 3~5m정도인 것에 착안하여, 3~5m의 단면크기에 대해서 수화열 해석을 수행하지 않고, 온도균열지수를 구할 수 있는 식을 제안하기 위하여 3~5m의 단면크기에 대해서 여러 타설 높이별로 해석을 수행하였다. 해석결과 각각의 단면크기에 대한 H/B비-균열지수 선도에 의한 회귀 분석식은 다음과 같다.

$$\text{단면크기 3m일때의 온도균열지수}(I_{cr}) = 7.2688 (H/B)^2 - 8.8213 (H/B) + 3.3189$$

$$\text{단면크기 4m일때의 온도균열지수}(I_{cr}) = -12.021 (H/B)^2 + 3.3785 (H/B) + 1.2203$$

$$\text{단면크기 5m일때의 온도균열지수}(I_{cr}) = -4.408 (H/B)^2 + 0.2648 (H/B) + 1.2692$$

위의 회귀 분석식을 이용하여 일정한 균열지수를 만족하는 H/B비를 구할 수 있다. 시방서에서 규정하는 균열지수 1.2를 만족하는 H/B를 구해보면 다음 표. 3과 같다.

표 3 단면크기별 H/B비(균열지수 1.2)

단면크기	H/B	타설 높이
3m	0.33	0.99m
4m	0.29	1.15m
5m	0.16	0.79m

위의 표 3의 값을 이용하여 단면 크기와 H/B비에 따른 그래프를 그려보면 그림 6.와 같다. 이 선도에 의한 회귀 분석식은 다음과 같다.

$$\text{단면 크기}(B) = -90.312 (H/B)^2 + 32.448 (H/B) + 2.1242$$

위 식을 이용하면 3~5m의 단면크기를 가지는 교각 기초 구조물의 경우 설계나 시공 시 해석을 수행하지 않고 1.2의 균열지수를 만족하는 적절한 타설 높이를 구할 수 있으므로 시공자에게 수화열에 유의할 수 있는 시공높이를 결정하는데 도움을 줄뿐 아니라 구조물의 수화열에 대한 균열예측 및 거동에 대해 미리 예측하게 함으로써 설계 및 시공 시 도움이 될 것으로 판단된다.

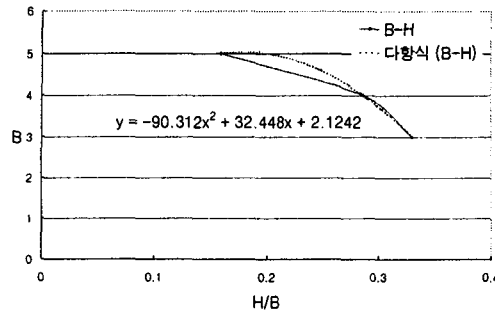


그림 7 H/B비- 단면크기 선도(균열지수 1.2)

4. 결론

본 연구에서는 매스콘크리트 구조물의 수화열을 예측하기 위하여 3~5m의 정사각형 단면크기를 가지는 구조물에 대해 각 타설 높이별로 수화열 해석을 수행하였으며, 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 타설 높이가 낮아 구조물의 크기방향보다 높이방향이 발열 영향범위에 지배적일 때 단면의 크기가 작을수록 균열지수가 작아지는 경향이 있어 균열지수-타설 높이가 아닌 균열지수-H/B비로써 균열지수를 평가하는 것이 바람직 한 것으로 판단된다.
- (2) H/B비가 0.25보다 작을 경우 최대 온도균열지수는 외부구속이 지배적이고, 0.25보다 클 경우에는 구조물이 내부구속이 지배적 것으로 나타났으나, 이 값은 외부구속 정도에 따라 다르다.
- (3) 본 연구에서 제안한 식에 의해 3~5m의 정사각형 단면에 대해서는 해석을 수행하지 않고도 균열지수, 단면크기 또는 타설 높이를 얻을 수 있어 설계나 시공 시 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구에 영향을 미치는 인자는 정사각형의 단면크기, 하부 구속, 타설 및 외기온도가, 시멘트 종류, 단위 시멘트량 등이 있으므로 보다 더 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. ABAQUS/Standard USER'S Manual Volume I, II, III, HKS Korea, 1997
2. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 1996
3. 장동일 외 1명, "매스콘크리트 구조물의 열거동에 미치는 영향요소 분석", 한양대 건설연구소 논문집, 제4권, 1998, PP 21~31
4. 김진근 외 3명, "매스콘크리트에서 최적의 타설 단면 결정을 위한 해석적 연구", 한국 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 1997, PP422~429