

매스콘크리트에서 온도응력에 영향을 주는 인자에 대한 연구

Study on the Parameters affecting Thermal Stress in Mass Concrete

이 대 근* 김 종 우** 하 재 담** 김 기 수** 차 수 원*** 오 병 환****

Lee, Dae Keun Kim, Jong Woo Ha, Jae Dam Kim, Ki Soo Cha, Su Won, Oh, Byung Hwan

ABSTRACT

Parameter analysis of mass concrete structures of two types subjected to heat of hydration and surface heat transfer is presented. Thermal stress analysis is conducted through the 3D FEM program. Thermal and mechanical properties of concrete, for example, conductivity, heat capacity, density, thermal expansion coefficient are varied from 80% to 120% of a reference value, and the change of thermal stress against the parameter is achieved respectively. As a result of the analysis, the parameter affecting thermal stress most significantly is an adiabatic temperature rise in the case of wall-type structure, and an initial temperature of concrete in the case of slab-type structure, respectively.

1. 서론

1.1 개요

근래에 경부고속철도사업, 영종도 신공항, 서해대교, 광안대로 및 LNG 인수기지 건설사업 등 대형 SOC 사업이 많이 추진되고 있는 가운데, 대형매트기초, 교량기초, 교대, PS 장경간보 등 매스콘크리트 구조물에서의 온도응력 검토가 많이 요구되고 있는 실정이다.

콘크리트가 경화함에 따라서 시멘트는 물과 반응하여 수화열을 발생시키는데, 콘크리트의 열전도율은 낮기 때문에 콘크리트 부재 내·외부에 온도차이가 발생한다. 이러한 온도차와 구속조건으로 인하여 콘크리트부재에 온도응력이 발생하게 된다. 이 응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하면 균열이 발생하게 되고 구조물은 치명적인 피해를 입게된다. 따라서, 콘크리트 타설 전에 온도균열을 피하기 위해 사전에 충분한 대비책을 세워야 한다. 그러기 위해서는 온도응력을 야기시키는 각종 인자에 대해 어떤 변수들이 얼마나 민감하게 영향을 미치는지를 파악하는 것이 매우 중요하다. 온도응력에 영향을 미치는 인자로는 시멘트·콘크리트의 열적, 화학적, 물리적 특성을 비롯하여 구조물의 형상, 구속조건, 시공조건 등 여러가지에서 찾을 수 있겠지만, 본 논문에서는 콘크리트의 열적, 물리적 특성과 구조물의 형상에 따라서 온도응력이 얼마나 영향을 받는지를 해석적으로 검토하고자 한다.

*쌍용중앙연구소 연구원

**정회원, 쌍용중앙연구소 연구원, 선임연구원, 책임연구원(순서대로)

정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정, *정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

1.2 해석변수

해석변수로는 우선 콘크리트의 열적 특성치로써, 단열온도상승실험으로부터 얻는 ①최종단열온도상승량과 ②반응속도를 변수로 삼았다. 콘크리트 타설 후 부재내의 온도분포를 구하기 위해서는 단열상태의 콘크리트의 시간에 따른 온도변화를 구해야 하는데, 이 값을 구하는 근사식으로써 일반적으로 식 (1)을 가장 많이 사용한다.

$$T = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

K : 최종단열온도상승량, α : 반응속도, t : 재령(day)

다음으로 콘크리트의 ③열전도율, ④비열, ⑤밀도를 변수로 삼았다. 일반적으로 콘크리트의 열적 특성치는 콘크리트의 70~80%를 점유하는 골재의 종류와 단위량에 의해 크게 변화되며, 시멘트 종류, W/C비 또는 재령에 의한 변화는 비교적 작은 것으로 알려져 있다. 이중 열전도율은 콘크리트의 함수량에 따라서도 영향을 받으며, 콘크리트의 함수량이 증가할수록 열전도율이 증가하는 경향이 있다. 콘크리트의 비열이란 콘크리트 단위무게(kg)당 단위온도(°C)를 변화시키는데 필요한 열량(kcal)으로써, 시멘트, 배합수, 세골재, 조골재의 비열에 영향을 받는다. 또한, 콘크리트의 밀도는 열확산율에 영향을 주며, 열확산율은 식 (2)에 의해 결정된다.

$$h = \frac{k}{\rho c} \quad (2)$$

h:콘크리트의 열확산율, k:콘크리트의 열전도율, ρ :콘크리트의 밀도, c:콘크리트의 비열

콘크리트의 물리적 특성치로써 온도응력에 영향을 미치는 인자로는 열팽창계수, 구속정도, 탄성계수, 28일 압축강도, 크리이프, 건조수축, 자기수축 등을 들 수가 있는데, 이중 구속정도는 지반암이나 기타 설 콘크리트의 탄성계수에 따른 영향을 말하는 것으로써 그 영향은 이미 콘크리트학회 논문으로 발표된 바 있고, 크리이프, 건조수축, 자기수축에 의한 영향도 이미 본 학회에 발표된 바 있어 본 논문에서는 다루지 않기로 하겠다. 한편, 콘크리트의 탄성계수는 온도응력의 크기나 양상에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서 시멘트 종류에 따라 발현양상이 다르고, 그 양상에 따라 재령 후기 온도응력에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이에 대한 평가 자체가 또 하나의 커다란 범주이기 때문에 차후에 따로 검토하여 발표하기로 하겠다. 따라서, 여기서는 시멘트를 1종 보통시멘트로 한정하여 콘크리트의 물리적 특성치를 반영하는 변수로 ⑥열팽창계수와 ⑦28일 압축강도를 선택하여 그 영향을 검토해 보았다.

그 밖에 콘크리트의 시공조건과 관련된 인자로는 ⑧계절에 따른 영향, ⑨pre-cooling에 따른 콘크리트 타설온도 조절에 따른 영향 등을 해석 변수로 삼았다. 이 밖에 인자로는 콘크리트를 이어칠 때 이 어치는 시간간격이라든가 온도철근의 배근에 대한 영향이 있지만 여기서는 다루지 않았다.

또한, 위에서 선택된 모든 변수에 대한 영향을 특성이 다른 벽체형 구조물과 슬라브형 구조물에 대해서 분석하였다.

2. 해석

2.1 해석모델

해석모델은 벽체형과 슬라브형 구조물 두종류이며, 각각의 제원은 표 1과 같다.

표 1. 해석 대상 구조물의 제원

	길이(m)	폭(m)	높이(m)	콘크리트 타설물량(m ³)
벽체형구조물	10	1	2	20
슬라브형구조물	10	10	2	200

수화열해석 및 수화열응력해석 프로그램으로는 서울대 토목공학과와 쌍용중앙연구소가 공동 연구개발한 FEM 프로그램을 이용하였고, 해석을 위한 구조물의 모델링은 대칭조건을 이용하여 구조물의 1/4 부분을 모델링 하였고, 그림 1처럼 3차원 8절점 요소를 이용하였다.

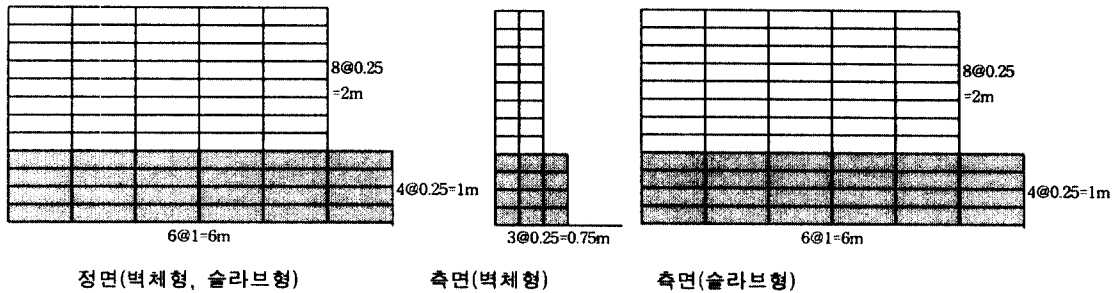


그림 1. 구조물의 유한요소 모델링

2.2 해석변수

해석을 위한 콘크리트의 기준데이터로는 표와 같이 벽체형과 슬라브형 똑같이 맞추었고, 변수의 변화범위는 기준데이터의 80%에서 120%까지 10%씩 변화시켜보았다.

표 2. 콘크리트 재료특성데이터

		벽체형 (기준)	슬라브형 (기준)	변화범위 (min.80%~max.120%)	기초
비열(kcal/kg·℃)		0.25	0.25	0.200~0.300	0.25
밀도(kg/m ³)		2300	2300	1840~2760	2300
열전도율(kcal/m·hr·℃)		2.2	2.2	1.76~2.64	2.2
K(℃)		50.4	50.4	40.3~60.5	-
α		1.256	1.256	1.005~1.507	-
대류계수 (kcal/m ² ·hr·℃)	상부	9	9	9	9
	측면	5	5	5	5
타설온도(℃)		20	20	16~24	-
외기온도(℃)		20	20	16~24	20
28일 압축강도(kg/cm ²)		350	350	280~420	400
열팽창계수(/℃)		10.3E-6	10.3E-6	8.24E-6~12.4E-6	10.3E-6
프아송비		0.167	0.167	0.167	0.167

3. 해석결과 및 고찰

3.1 벽체형과 슬라브형 구조물의 응력 패턴

일반적으로 벽체형 부재의 온도응력은 부재의 길이방향으로 중앙부의 응력이 가장 문제가 된다. 중앙부의 경우, 재령 초기 온도상승시에는 압축응력을 받다가 온도하강시 인장응력으로 바뀌게 된다. 이러한 인장응력은 어느정도 재령이 지나면 잔류응력으로 남게되고, 이것이 콘크리트의 인장강도를 넘게 되면 구조물에 치명적인 균열이 발생하게 된다. 한편, 슬라브형 부재에서는 중앙부 뿐만아니라 측면의 온도응력도 문제가 된다. 온도하강시의 온도응력이 중앙부만큼 큰 값을 나타낸다.

본 해석에서 다루고 있는 벽체형 구조물과 슬라브형 구조물의 기준 데이터를 이용하여 해석한 결과는 아래의 그림 2와 같다.

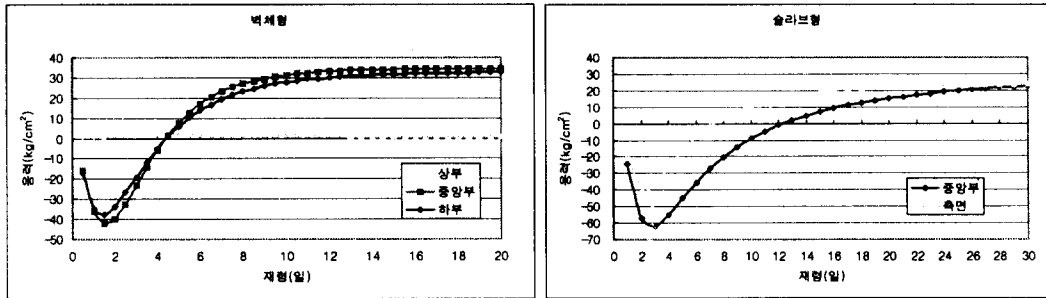


그림 2. 구조물의 온도응력

3.2 각 변수가 온도응력에 미치는 영향

각 변수가 온도응력에 미치는 영향을 다음의 방법으로 알아보았다.

- (1) 압축강도나 탄성계수의 발현양상을 결정짓는 시멘트의 종류는 1종시멘트 한종류로 가정한다.
- (2) 각 변수의 기준값을 이용해 온도응력 해석을 실시한다.
- (3) 각 변수의 기준값을 100%로 가정하고, 80%, 90%, 100%, 110%, 120% 5가지 값에 대하여 나머지 변수는 고정한 채 온도응력을 구한다.
- (4) 이 때의 온도응력은 응력이 일정하게 나타나는 때를 선정하고, 벽체형의 경우 재령 20일, 슬라브형의 경우 재령 30일을 기준으로 한다.
- (5) 각 변수가 10% 증가할 때, 온도응력의 증감을 평균 백분율로 나타낸다.

해석결과 각 변수가 온도응력에 미치는 영향은 표 3 및 그림 3과 같다.

각 변수가 10%증가할 때, 온도응력이 5%이상 변하는 변수를 큰 순서대로 살펴보면, 벽체형의 경우 최종단열온도상승량, 열팽창계수, 타설온도, 28일 압축강도의 순서이고, 슬라브형의 경우 중앙부는 타설온도, 열팽창계수, 최종단열온도상승량, 28일 압축강도, 측면은 타설온도, 최종단열온도상승량, 열팽창계수, 28일 압축강도의 순서이다.

구조물의 형식에 상관없이 최종단열온도상승량, 열팽창계수, 타설온도, 28일 압축강도가 온도응력을 좌우하며, 단열온도상승의 반응속도나 외기온도에 따라서는 온도응력이 별로 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 그 밖에 콘크리트의 열특성치인 열전도율, 비열, 밀도에 대해서는 반응속도나 외기온도보다 좀더 민감하게 반응을 보이는 것으로 나타났지만, 실제로 이들 값은 콘크리트에 따라 크게 변하는 값이 아니므로 실제로는 이들 값의 변화에 따른 온도응력의 변화는 그리 크지 않을 것으로 판단된다.

벽체형의 경우는 단일온도상승곡선의 최종단열온도상승량이, 슬라브형의 경우는 타설시 콘크리트의 온도가 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 바꾸어 말하면, 벽체형의 구조물을 시공할 때는 저발열형시멘트를 쓰는 것이 온도용력을 낮추는데 가장 효과적이지만, 슬라브형의 구조물을 시공할 때는 pre-cooling을 통하여 콘크리트의 초기온도를 외기온도보다 낮추어 주는 것이 가장 큰 효과를 낼 수 있다는 말이 된다.

그리고, 일반적으로 저발열형시멘트가 보통시멘트보다 반응속도가 작은 경향을 나타내는데, 반응속도가 온도용력에 미치는 영향을 살펴보면, 벽체형의 경우는 반응속도가 증가할수록 온도용력이 증가하였지만, 슬라브형의 경우는 반대로 중앙부와 측면부 모두 온도용력이 감소하였다. 따라서, 반응속도가 작은 콘크리트가 매스콘크리트용으로 언제나 좋다고는 말할 수 없다.

그 밖에 콘크리트의 열팽창계수는 온도용력에 직접적으로 영향을 미치고, 그 영향도 상당히 크므로 온도용력해석시 열팽창계수의 정확한 평가가 이루어져야 하겠다.

표 3. 변수값 10%증가시 용력의 변화량(%)

		최종단열 온도상승량	반응속도	열전도율	비열	밀도	열팽창계수	28일 압축강도	외기 및 초기온도	타설온도
벽체형	중앙부	10.7	1.3	-2.3	4.8	4.8	10.1	5.0	-0.6	9.5
	우선순위	(1)	(8)	(7)	(5)	(5)	(2)	(4)	(9)	(3)
슬라브형	중앙부	9.3	-2.8	1.0	-2.5	-2.5	10.1	5.0	-3.0	13.4
	우선순위	(3)	(6)	(9)	(7)	(7)	(2)	(4)	(5)	(1)
	측면부	10.2	-4.1	-2.3	3.8	3.8	10.1	5.0	-1.3	13.8
	우선순위	(2)	(5)	(8)	(6)	(6)	(3)	(4)	(9)	(1)

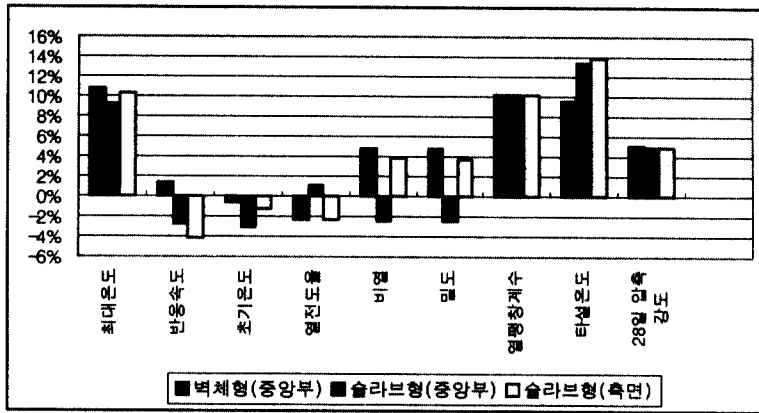


그림 3. 변수값 10%증가시 용력의 변화량

또한, 외기온도의 변화가 온도용력에 미치는 영향은 상대적으로 적지만, 그 경향을 살펴보면 그림 4처럼 외기온도가 증가할수록 온도용력이 작아지므로, 같은 조건이라면 겨울에 시공하는 것보다 여름에 시공하는 편이 온도용력감소에 더 좋은 결과를 가져올 수 있으리라 판단된다.

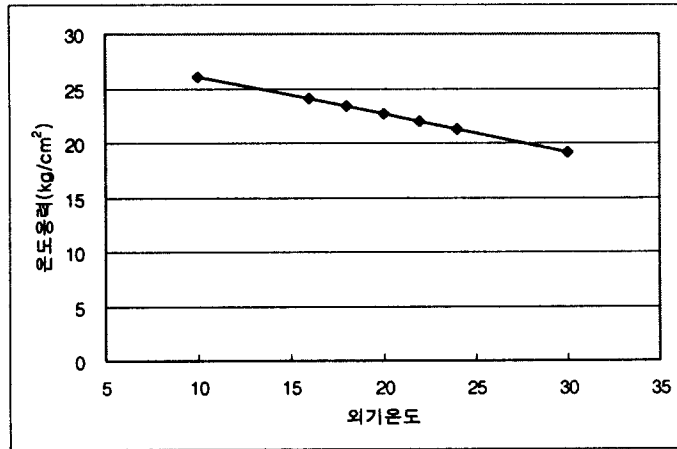


그림 4. 외기온도에 따른 온도응력의 변화(슬라브형 중앙부)

4. 결론

이상과 같은 해석을 통하여 각각의 변수의 변화가 온도응력에 미치는 영향을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 온도응력에 주로 영향을 미치는 인자는 최종단열온도상승량, 타설온도, 열팽창계수, 28일 압축강도이다.
- (2) 벽체형의 경우는 단열온도상승곡선의 최종단열온도상승량이, 슬라브형의 경우는 타설시 콘크리트의 온도가 가장 큰 영향을 끼치며, 이는 벽체형의 구조물을 시공할 때는 저발열형시멘트를 쓰는 것이 온도응력을 낮추는데 가장 효과적이고, 슬라브형의 구조물을 시공할 때는 pre-cooling을 통하여 콘크리트의 초기온도를 외기온도보다 낮추어 주는 것이 가장 큰 효과를 낼 수 있다.
- (3) 반응속도가 작다고 해서 반드시 온도응력을 감소시켜 주는 것은 아니다.
- (4) 같은 조건이면 겨울에 시공하는 것보다 여름에 시공하는 편이 온도응력감소에 더 좋은 영향을 미친다.

본 논문에서는 수화열해석시 변수로 들어가는 각종 변수들의 온도응력에 대한 영향을 검토하여, 실제 구조물에 적용시 해석에서 발생할 수 있는 오차를 가능하면 줄일 수 있게 하였으며, 또한 매스콘크리트 시공시 온도응력 저감에 상대적으로 보다 효과적인 방법을 제시하였다. 향후, 콘크리트의 크리프와 건조수축이 온도응력에 미치는 영향을 여기서 검토한 변수들과 비교하여 검토할 필요가 있다.

참고문헌

1. K. Matsui, N. Nishida, Y. Dobashi and Ushioda, "Sensitivity Analysis and Reliability Evaluation of Thermal Cracking in Mass Concrete", 1994
2. 강석화, "매스콘크리트의 온도균열제어를 위한 시공방법", 1997. 6, 콘크리트학회지
3. 김진근, 양은익, "매스콘크리트의 수화열 및 온도응력에 대한 영향요인", 1997. 6, 콘크리트학회지
4. 건교부, "콘크리트 표준시방서", 1996
5. 日本コンクリート工學協會, マスコンクリート溫度應力研究委員會報告書, 1985