

대형 기초 콘크리트의 분할타설 방법을 고려한 수화열에 의한 온도균열 제어 대책

Thermal Crack Control Using Optimized Steps of Concrete Placement in Massive Concrete Foundation

김 동 규^{*} 조 선 규^{**} 김 은 검^{***}
Kim, Dong Kyu Cho, Sun Kyu Kim, Eun Kyum

ABSTRACT

Since the cement-water reaction in exothermic by nature, the temperature rise within a large concrete mass. Significant tensile stresses may develop from the volume change associated with the increase and decrease of the temperature with the mass concrete. There thermal stresses will cause temperature-related cracking in mass concrete structures. These typical type of mass concrete include mat foundation, bridge piers, thick wall, box type walls, tunnel linings, etc. Crack control methods can be considered at such stages as designing, selecting the materials, and detailing the construction method. Temperature and analysis was performed by taking into consideration of the cement type and content, boundary and environment conditions including the variations of atmospheric temperature and wind velocity.

This is paper, the effect of separate placement of thermal crack control footing was analysed by a three dimensional finite element method. As a result, using this method, thermal crack control can be easily performed for structures such as mat structures.

1. 서론

최근 대형 콘크리트 교량 건설의 증가로 인하여 시공시 교각 기초 콘크리트의 수화열에 의한 온도 균열 발생 위험성이 증가되고 있다. 매스콘크리트 구조물은 수화열에 의한 온도균열이 발생하게 되면 벽체식 구조인 경우에는 관통균열이 발생하게 되며, 슬래브식 구조의 경우에는 표면균열이 발생하게 되어 구조물의 내구성, 방수성, 미관은 물론 궁극에 가서는 내하력을 감소시킬 수 있는 요인이 될 수 있다. 이에 대한 대책공법으로서 프리쿨링 방법, 분할타설 공법, 파이프쿨링 방법, 저발열시멘트의 사용을 비롯하여 혼합시멘트의 사용 등에 의한 수화열 저감 또는 수화열에 의한 온도균열 저감 대책이 주목을 받고 있다.

본 논문에서는 대형 교각 기초에 대하여 분할 타설 높이의 적정성, 보온양생 방법 및 재령, 사용시멘트 등을 변수로 해석을 실시하였으며, 그 결과를 분석하여 수화열에 의한 최적 온도균열 저감대책을 수립하는데 목적을 두었다.

* 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 석사과정
** 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수
*** 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수

2. 구조물의 단면형상과 해석조건

2.1 구조물의 단면형상

구조물은 대형 콘크리트기초 단면으로서 그 형상은 길이 20m, 폭 14.4m, 높이 5m이며, 그림 1에 나타난 바와 같다. 그림 2는 해석에 사용된 유한요소 mesh를 나타낸 것이며, 전체 Node수는 4465개, Element수는 3600개로 구성하였다.

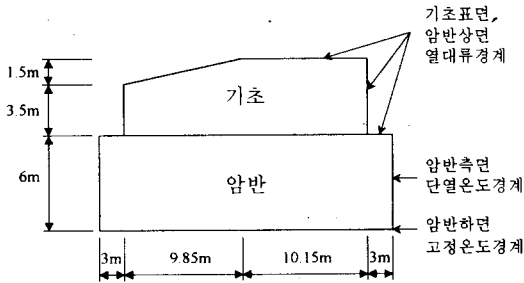


그림 1 구조물의 형상 및 열전달 해석모델

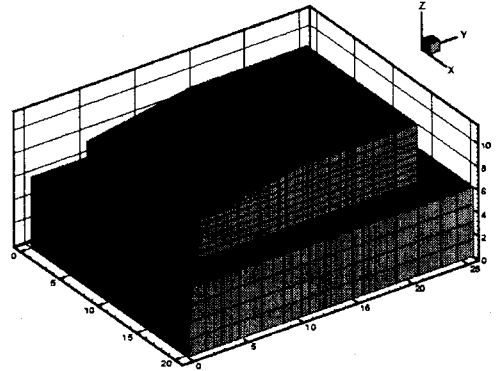


그림 2 구조물의 유한요소 mesh

2.2 콘크리트의 열적특성

그림 3은 구조물의 해석에 사용된 단열온도상승곡선을 나타낸 것이며, 표 1은 해석에 사용된 콘크리트의 열적 특성치를 나타낸 것이다. 여기서, FA시멘트는 1종시멘트 대신에 플라이애시를 20% 치환한 것이다.

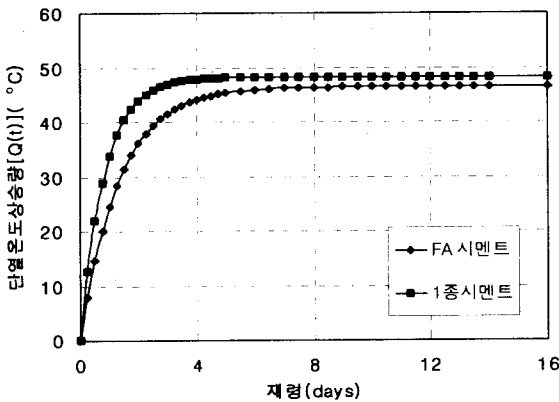


그림 3 해석에 사용된 단열온도상승곡선

표 1 구조물의 열적특성

콘크리트 열적 특성		기초		암반
		1종	FA시멘트	
단열온도	Q_{∞}	48.2	46.4	-
상승 특성치	$r(day^{-1})$	1.212	0.753	-
밀도	$\rho(kg/m^3)$	2400		2600
열전도율	$k(kcal/mh^{\circ}C)$	2.1		1.9
비열	$C_p(kcal/kg^{\circ}C)$	0.25		0.21
탄성계수	kgf/cm^2	-		18×10^9
콘크리트 타설온도	$^{\circ}C$	20		-
대기온도	$^{\circ}C$	23.9		-

2.3 해석조건

온도해석에 있어서 대기온도는 구조물이 위치하는 지역의 20년간 8월 평균기온인 23.9°C를 사용하였으며, 콘크리트의 타설온도는 20°C로 설정하였다. 또한 해석은 표 2에 제시한 바와 같이 구조물을

일체로 타설하는 경우와 2단 또는 3단으로 나누어 분리 타설하는 경우의 3가지 방법을 적용하였으며, 2단 분할 타설인 경우에는 플라이애시를 20% 치환하는 경우를 포함하였다. 또한 해석시 보온양생 방법으로는 양생시트를 3장 덮는 경우와 스티로폴 50mm 1장을 덮는 경우로 하였다. 따라서, 이상과 같은 경우를 조합할 경우 해석은 모두 14 케이스로 구성되며, 각각 이들 케이스에 대하여 온도해석 및 온도응력해석을 실시하였다.

3. 콘크리트의 온도해석 및 온도응력 해석 결과

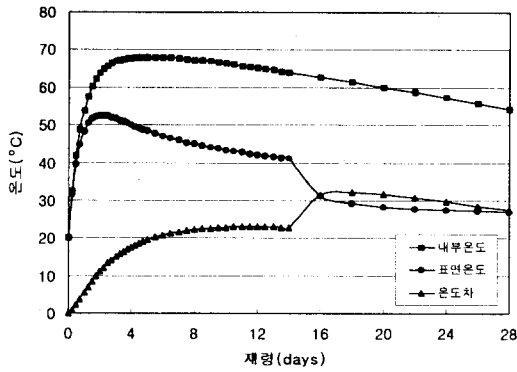
3.1 온도해석 결과

표 2 및 그림 4~그림 5는 각 해석조건별 온도해석 결과를 나타낸 것이다. 콘크리트 구조체 내부의 최대온도는 일체로 타설하는 경우가 68℃로서 가장 높은 값을 가지며, 2단 분리 타설하는 경우에는 66~67℃ 정도로서 일체로 타설하는 경우와 거의 동등한 값을 나타내고 있다. 플라이애시를 20% 치환한 경우에는 62~64℃ 정도로서 1종시멘트만을 사용하는 경우와 비교할 때 대략 3~4℃ 정도의 온도 저감 효과를 보이고 있다. 또한 3단 분리 타설하는 경우 최대온도는 62~64℃ 정도로서 일체로 타설하는 경우에 비하여 4~6℃ 정도의 온도 감소 효과를 나타내고 있다.

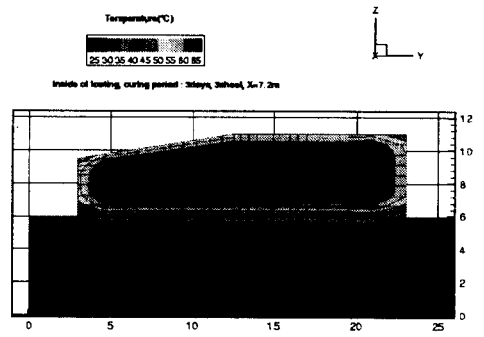
표 2 온도해석 및 온도응력해석 결과

콘크리트 타설방법	사용 시멘트	해석 시험체 구분	보온양생방법	온도해석결과		온도응력해석 결과			
				최고 온도 (℃)	내외부 온도차 (℃)	인장응력 (kgf/cm^2)	온도균열지수	응력최대재량(일)	
일체 타설	1종	OP-3S	5mm시트 3장	68	32	43.2	0.5	18	
2단 분할 타설 (1, 2단 각각 2.5m 등분할)	1단	1종	2O-1st-sh	5mm시트 3장	66	14	7.1/7.8	2.4/2.6	10/28
			2O-1st-sti	스티로폴+시트1장	67	10	6.2/2.6	3.1/7.7	14/28
		FA 시멘트	2F-1st-sh	5mm시트 3장	62	13	7.5/5.6	2.4/3.7	10/28
			2F-1st-sti	스티로폴+시트1장	62	10	6.5/1.3	2.9/15.4	14/28
	2단	1종	2O-2nd-sh	5mm시트 3장	67	22	24/36	0.8/0.6	14/18
			2O-2nd-sti	스티로폴+시트1장	67	23	7.8/26.4	2.5/0.8	14/20
		FA 시멘트	2F-2nd-sh	5mm시트 3장	64	22	22/34.1	0.9/0.6	14/18
			2F-2nd-sti	스티로폴+시트1장	64	23	4.3/22.5	4.5/0.9	14/20
2단 분할 타설 (1단3m, 2단2m)	1단	1종	2O-1st(3)-sh	5mm시트 3장	67	17	10.1/4.4	1.7/1.4	10/14.5
	2단	1종	2O-2nd(2)-sh	5mm시트 3장	66	23	11.1/23.3	1.7/0.9	14/18
3단 분할 타설 (1단 2.0m, 2, 3단 1.5m)	1단	1종	3O-1st-sh	5mm시트 3장	64	11	1.5/7.8	12.7/2.6	14/28
	2단	1종	3O-2nd-sh	5mm시트 3장	62	12	8.8/1.4	2.2/14.6	14/28
	3단	1종	3O-3th-sh	5mm시트 3장	64	16	10.9/26	1.7/0.8	14/24

* 스티로폴은 두께 50mm를 사용하며, 양생시트는 일반적으로 현장에서 사용하고 있는 보온양생시트 3장을 사용함

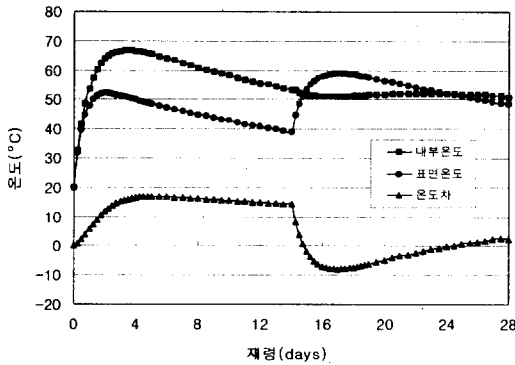


(a) 교각 기초 일체 타설시 온도해석 결과

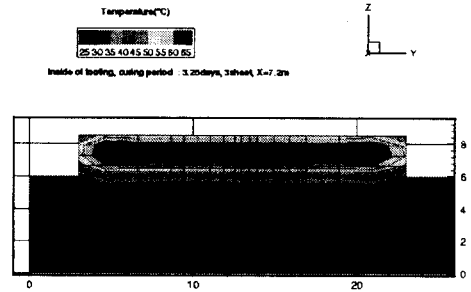


(b) 교각 기초 일체 타설시 중앙단면 온도분포

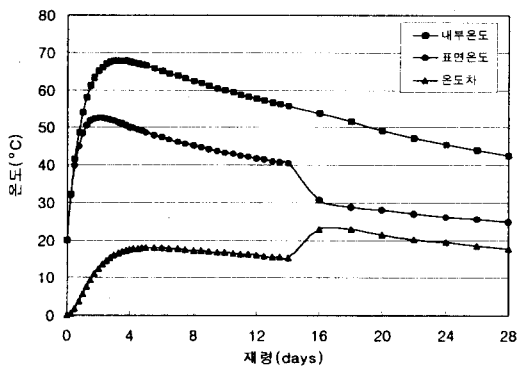
그림 4 교각 기초 일체타설시 온도해석 결과



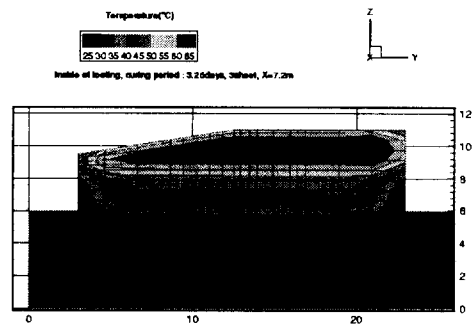
(a) 교각 기초 1단 온도해석 결과



(b) 교각 기초 1단 중앙단면 온도분포



(c) 교각 기초 2단 온도해석 결과



(d) 교각 기초 2단 중앙단면 온도분포

그림 5 교각 기초 2단 분리 타설시 온도해석 결과(1단 : 3.0m, 2단 : 2.0m)

3.2 온도응력해석 결과

표 2 및 그림 6~11은 수화열에 의한 온도응력해석 결과를 나타낸 것이다. 콘크리트를 일체로 타설

하는 경우, 콘크리트 표면의 인장응력은 재령 18일경에서 43.2kgf/cm^2 을 나타내어 온도균열지수가 0.5 정도가 된다.

수화열에 의한 온도저감 또는 균열억제를 위하여 콘크리트를 분리 타설하는 경우, 1단 콘크리트의 인장강도는 어느 경우나 10kgf/cm^2 이하로서 온도균열지수는 1.8 이상의 값을 나타내고 있다. 따라서, 1단 콘크리트 타설두께를 3m 이하로 할 경우, 스티로폼이나 보온양생 시트 또는 플라이애시의 혼합 유무에 관계없이 수화열에 의한 온도균열 발생은 없는 것으로 평가되었다.

다음은, 1단 콘크리트 치기 완료 후 14일 경과 시점에서 2단 콘크리트를 타설하는 경우에 대하여 검토하였다. 타설두께가 2.5m인 경우에는 보온양생시트를 3장 사용하면 인장응력은 재령 18일 경에서 36kgf/cm^2 을 나타내며, 플라이애시를 혼합한 경우에는 동일한 재령에서 34.1kgf/cm^2 를 나타내어 인장응력 감소가 1.9kgf/cm^2 정도로 큰 효과는 없는 것으로 해석되었다. 특히 온도균열지수는 두 경우 모두 0.6 정도를 나타내어 온도균열발생 가능성이 다소 높은 것으로 나타났다. 그러나 동일한 타설높이를 가지는 경우라도 보온양생을 스티로폼을 사용하는 경우에는 인장응력이 26.4kgf/cm^2 로서 인장응력 감소 효과가 상당히 큼을 알 수 있으며, 온도균열지수는 0.8 정도로서 온도균열제어에 효과가 있음을 알 수 있다. 특히 이 경우 플라이애시를 혼합하면 인장응력이 22.5kgf/cm^2 , 온도균열지수는 0.9 정도로 나타나 플라이애시 사용이 온도균열제어에 효과가 큰 것으로 평가된다.

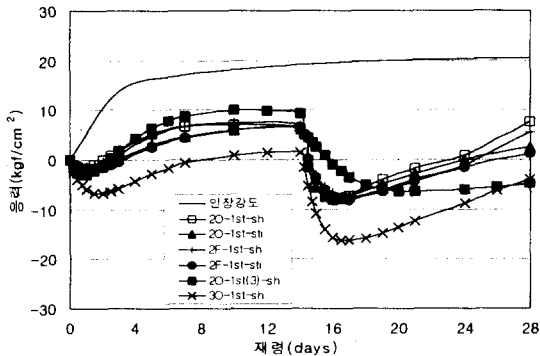


그림 6 1단 콘크리트의 온도응력해석 결과

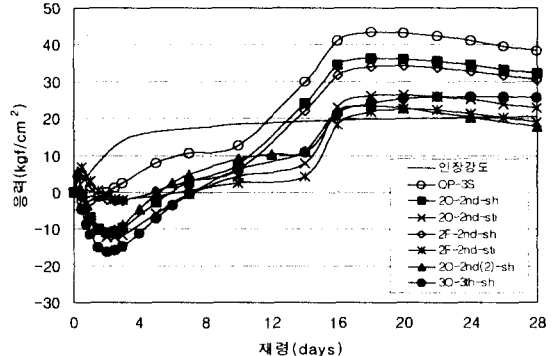


그림 7 일체타설 및 2단, 3단 콘크리트 온도응력해석 결과

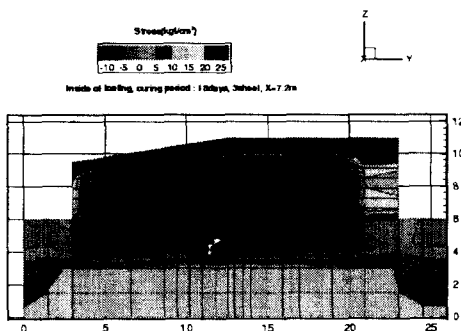


그림 8 일체 타설시 콘크리트 온도응력분포
(양생시트 3장, 재령 18일)

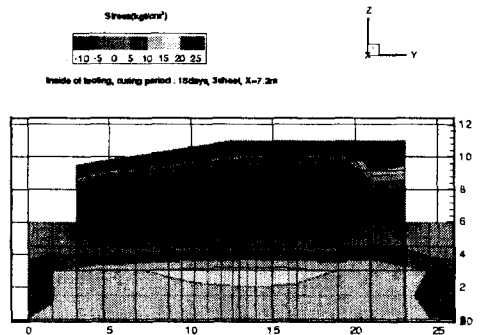


그림 9 2단 분리타설시 2단 콘크리트 온도응력분포
(양생시트 3장, 재령 18일)

한편, 콘크리트 타설두께를 1단 3m, 2단 2m로 변화시킨 경우 2단에서의 인장응력은 재령 18일경 23.3kgf/cm^2 로, 온도균열지수는 0.9를 나타내어 보온양생시트 3장을 사용하더라도 균열제어에 큰 효과가 있는 것으로 나타났다. 즉, 수화열에 의한 온도균열제어를 위해서는 분리 타설 두께를 적절히 조절하는 것이 효과가 있으며, 특히 이는 3단으로 분리 타설하는 경우와 거의 동등한 효과를 나타내어 매스콘크리트 시공시 중요한 관건이 되고 있음을 알 수 있다.

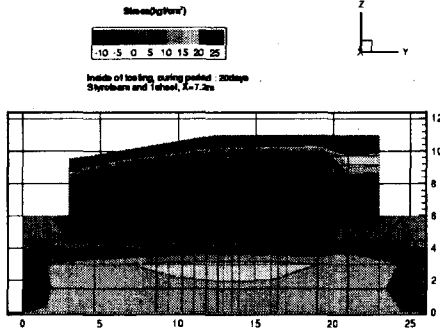


그림 10 2단 분리타설시 2단 콘크리트 온도응력분포
(2단 타설두께 2.5m, 스티로폼, 1중, 재령20일)

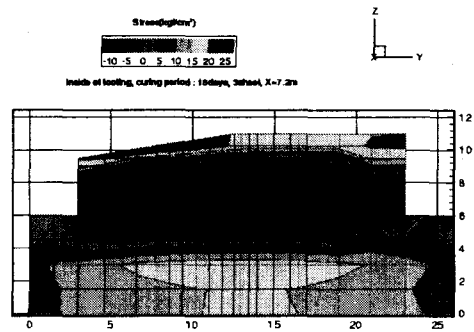


그림 11 2단 분리타설시 2단 콘크리트 온도응력분포
(2단 타설두께 2m, 양생시트 3장, 1중, 재령18일)

4. 결론

본 해석대상 구조물에 대한 수치해석을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 구조물을 일체로 타설하는 경우에는 스티로폼과 같은 보온성이 뛰어난 재료를 사용하여 보온양생을 실시하더라도 온도균열지수가 0.5 정도로 평가되어 유해한 온도균열발생이 우려된다.
- (2) 콘크리트를 2단으로 분할하여 타설하는 경우, 1단 콘크리트의 보온양생재료로서 양생시트 3장이거나, 또는 스티로폼을 사용하면 온도균열지수가 1.8 이상 확보되어 온도균열발생 가능성은 거의 없는 것으로 판단된다. 특히, 플라이애시를 혼합하는 경우에도 동등한 결과를 얻었다.
- (3) 1단 콘크리트 치기 완료 후 14일 경과 시점에서 2단 콘크리트를 타설하는 경우, 타설두께를 2.5m로하여 양생시트 3장으로 보온양생을 실시하면 온도균열지수가 모두 0.6 정도를 나타내어 온도균열발생 가능성이 다소 높은 것으로 나타났다.
- (4) 그러나, 동일한 타설높이를 가지는 경우라도 보온양생을 스티로폼을 사용하는 경우, 온도균열지수는 0.7 정도로서 온도균열제어에 효과가 있음을 알 수 있다. 특히, 이 경우 플라이애시를 혼합하면 온도균열지수가 0.9 정도를 나타내어 온도균열제어에 효과가 큰 것으로 평가된다.
- (5) 콘크리트 타설두께를 1단 3m, 2단 2m로 변화시킨 경우, 2단 콘크리트의 온도균열지수는 0.9를 나타내어 보온양생시트 3장을 사용하는 것만으로도 균열제어에 큰 효과가 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김은겸, 김래현, 신치범, “유한요소법에 의한 매스콘크리트 구조물의 온도해석 프로그램 개발”, 한국콘크리트학회 논문집, 제7권 6호, 1995. 12
2. 주영춘, 김은겸, 신치범, “매스콘크리트 교각의 수화열에 의한 온도 및 응력 거동에 대한 3차원 유한요소 해석”, 한국콘크리트학회 1998년도 가을학술발표회 논문집, 제10권 2호, 1998. 11