

수화열에 의한 온도균열 방지를 위한 매스콘크리트 구조물의 콘크리트 배합과 온도응력 제어방안

Concrete Mixture and Thermal Stress of Preventing Thermal Cracking by Hydration Heat in Mass Concrete Structure

홍 성 현* 김 옥 종** 김 효 락***
Hong, Seong Heon Kim, Ook Jong Kim, Hyo Rak

ABSTRACT

The method for preventing thermal cracks is necessary in mass concrete structures. So various experiments were carried out for the controls of thermal cracks and we substituted fly ash for a quarter of cement quantity in order to decrease hydration heat. The maximum block size is determined by numerical analysis as well.

Hydration heat and thermal stress were measured through various gauges and analysis considering the steps of concrete placement were carried out. It was found from this study that the appropriate block size was able to be determined properly by numerical analysis.

1. 서 론

대형의 콘크리트 구조물 시공시 수화열에 의한 온도균열을 방지하기 위한 시공 및 품질관리가 필요하다. 이러한 온도균열을 제어하기 위한 방법으로 재료의 사전냉각, 야간타설, Pipe Cooling방법 등의 시공적인 접근방법과 배합비를 고려한 재료적 접근방법으로 나눌 수 있다.

본 대상구조물에서는 현장의 제한 조건으로 인하여 재료적인 접근방법으로서의 플라이애쉬 치환을 이용하여 수화열을 낮추는 방법을 채택하였다. 또한 시공계획의 수립을 위해 실내 및 트럭 탑재배합실험에 단열온도 상승실험을 통하여 적정 품질기준을 만족하는 배합비를 제시하였고, 1:1 실물대 실험과 해석을 통해 콘크리트의 열적특성과 경계조건을 규명한 후 수치해석을 통하여 수화열 분포를 구하고 간단한 수식을 이용해 균열지수를 이용하여 1회 시공 블록 크기를 산정하였다. 이러한 시공계획에 대한 검증과 10일 이내의 연속적인 타설을 할 경우 상부 타설 블록에 의한 하부 기타설 콘크리트의 영향을 예측과 범용 유한요소 해석프로그램인 ANSYS를 이용하여 분석하였다.

* 정회원, 대림산업 기술연구소, 연구원

** 정회원, 대림산업 기술연구소, 주임연구원

*** 정회원, 대림산업 기술연구소, 선임연구원

2. 대상구조물 및 배합

2.1 구조물개요

본 연구의 대상구조물은 대림산업에서 시공하는 ○○현장으로, 표 1과 같은 매스콘크리트 구조물로서 벽체와 슬래브 철근비는 0.55와 0.57%이고, 콘크리트 설계기준강도는 280kgf/cm²이다.

항목	규모	비고
콘크리트 총물량	약 50,000m ³	
벽체 두께	3.7m	
벽체 길이	총 300m 정도	건물 외벽길이 : 약 80m×75m
슬래브 두께	3.6m	
타설주기	약 7일	거푸집 및 철근 작업고려
1회 타설 가능량	약 1,500m ³	타설장비, 콘크리트 조달물량 고려

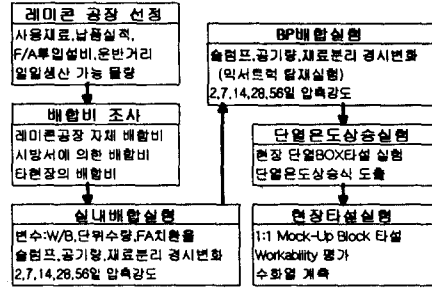


그림 1 배합설계 결정을 위한 흐름도

2.2 배합비 결정

2.2.1 배합설계 선정 방법

현장조건에 적합한 배합비를 결정하기 위해 요구되는 조건을 만족하면서 혼화재(플라이애쉬) 취환율에 따른 수화열 및 강도발현 이력을 분석하여 결정하였다. 그림 1에 그 흐름도를 나타내었다.

2.2.2 실내배합실험

시공성을 고려한 소요품질수준(슬럼프: 18±2.5cm, 공기량: 4.5±1.0%, 설계기준강도: 280kgf/cm² 이상)을 만족하는 적정배합을 도출하기 위해 실내 및 애지테이터 트럭탑재실험을 실시하였다. 실내배합 실험 변수로는 W/C, 혼화재 치환율, 잔골재율, 혼화재 함량을 선정하였고, 트럭탑재실험 변수로는 혼화재 및 부순모래 치환율, 회수수 사용 여부로 실내배합실험에서 유동성, 강도, 공기량 등 소요품질을 만족하는 배합을 기본으로 하여 표 2와 같이 6개 타입에 대해 실행하였다.

표 2 트럭 탑재실험 배합변수

No	F/B (%)	W/C (%)	W/B (%)	S/a (%)	C			ad/B (%)	비고
					FA	W	(kgf/m ³)		
K1	0	45.4	45.5	43.6	421	0	191	0.2	·청수 ·강사: 100%
K2	20	48.8	39.0	49.0	328	82	160	1.65	
K3	30	57.0	39.9	49.0	277	119	158	1.65	
D1	0	47.1	47.0	47.4	391	0	184	0.42	·회수수 ·채사: 30%
D2	20	48.8	39.0	49.5	328	82	160	1.2	
D3	30	57.8	40.4	49.5	277	119	160	1.2	

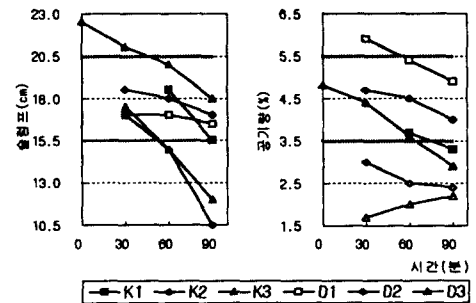


그림 2 유동성 및 공기량 실험결과

실험 결과는 그림 2에서 보는 바와 같이 유동특성을 비교하기 위해 슬럼프치를 비교해 보면 회수수를 사용한 D2와 D3 시편은 60분후에 기준치 이하로 급격히 감소하였다. 공기량은 대체로 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 감소하였으며, D2와 D3 시편을 제외하고 품질기준을 만족하였다. 이는 슬러지가 섞인 강알칼리의 회수수가 혼화제의 성능을 감소시키면서 수화반응을 촉진함으로써 유동성에 나쁜영

취 치환율이 20%(D2)~30%(K3) 사이인 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 적용현장에 타설될 콘크리트 배합은 레미콘사의 생산설비, 압축강도 및 경제성 등을 고려하고, 시공상 품질기준(슬럼프 및 공기량)에 따라 표 5에서 보는 바와 같이 플라이애쉬 치환율을 25%로 결정하였다.

표 3 배합설계표

FA/B (%)	W/C (%)	W/B (%)	S/A (%)	W	C	FA	S	G	ad	ad/B (%)
				kgf/m ³						
25	39.9	53.2	49	158	297	99	832	913	6.75	1.7

3. 수화열 및 온도응력 평가

3.1 개요

실내배합시험 및 단일온도상승시험을 통하여 배합비와 계수를 결정하여 수치해석을 통하여 수화열을 구하고 간략식^{2),3)}을 이용하여 균열지수를 산정하여 그림 5와 같이 4블록 3단으로 계획을 하였다. 이러한 시공계획에 대해 계측과 해석에 의한 방법으로 나누어 평가하였다.⁴⁾ C Block의 중앙부에 그림 6과 같이 2단에 변형계, 열전대와 무응력계를 설치하여 그림 7과 같은 절차에 의해 온도응력을 계산하는 방법과 유효응력계를 설치하여 직접 온도응력을 측정하는 두가지 방법으로 계측하였고, 또한 유한요소법을 이용하여 두 결과값을 비교·분석하여 연속타설에 대한 영향을 평가하고자 한다.

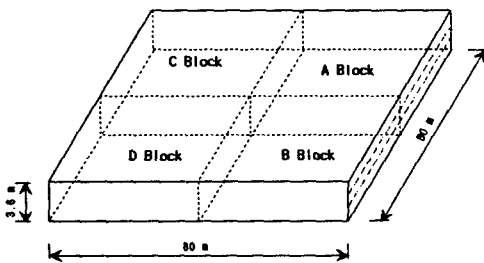


그림 5 슬래브 블록 계획

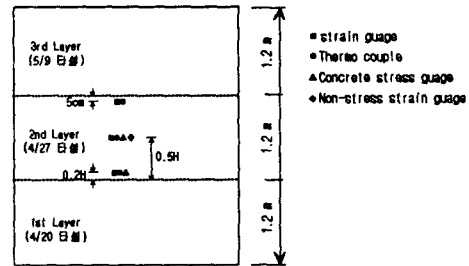


그림 6 측정센서 설치

해석모델은 C Block의 중앙부에 30cm×40cm에 대하여 대칭성을 이용하여 1/2로 모델링을 하였다. 양측면과 대칭면에는 단일효과를 유발하기 위하여 열전도율을 0으로하였고, 거푸집면에는 표면열전달율을 사용하여 나타내었다.

해석순서는 먼저, 온도해석을 수행한 후에 재령에 따른 단면온도 분포 데이터를 응력해석에 외력으로 처리하여 온도응력을 산출하였다. 응력해석시 본 연구에서 사용한 해석프로그램에서는 재령에 따른 물성변화를 고려하지 않으므로 각 Step마다 유효탄성계수를 직접 입력하는 증분법의 방법으로 해석을 수행하였다. 해석시간간격은 4시간으로 하였고 해석에 입력한 데이터는 표 4에 나타내었다.

3.2 수화열 평가

그림 8에 해석결과와 2단에 설치한 센서로부터 얻은 수화열을 나타내었다. 2단에서의 계측값과 실험값을 비교하여 보면 수화열해석에서 중요한 인자로 작용하고 있는 최대온도 크기 및 발생시점은 해석 결과치와 거의 일치하고 있어 이론적해석을 통해 매스콘크리트의 온도를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 연속타설에 따른 3단 콘크리트의 타설이후 2단부의 수화열분포는 약간 차이가 나고 있음을 알 수 있다.

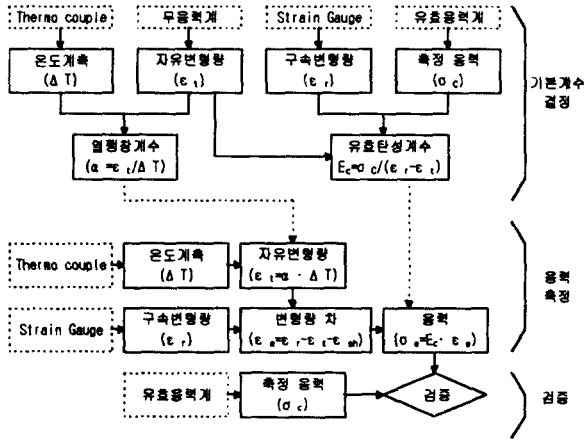


그림 7 응력측정 Flow Chart

표 4 해석 입력 데이터

		타설 콘크리트	
단열온도 상승량(°C)	Q_{max}	41.96	
$Q(1 - e^{-(t-t_0)})$	γ	타설온도 20°C	1.32
	t_0	0.583	
열전도율 (kcal/mh°C)		2.5	
비열 (kcal/kg°C)		0.3	
밀도(kg/m³)		2300	
열전달율 (kcal/m²h°C)	노출면	7.0	
	거푸집면	3.5	
열팽창계수 (1/°C)		11.8×10^{-6}	
포아송비		1/6	
재령별 압축강도 (kgf/cm²)	425t(4.251+0.848t) : 1단		
	409t(3.722+0.866t) : 2단		
	447t(5.164+0.815t) : 3단		

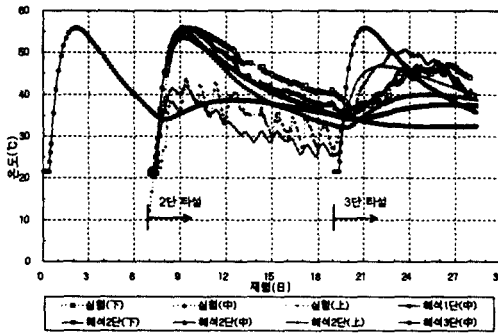


그림 8 수화열 계속 및 해석

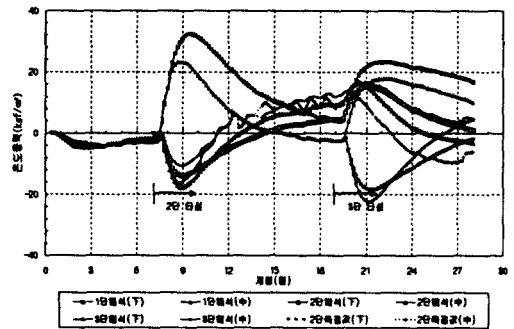


그림 9 온도응력 계속 및 해석

3.3 온도응력 평가

재령별 온도응력을 그림 9에 나타내었다. 수화열에 의한 온도응력은 초기에는 표면과 내부의 온도차로 인한 내부구속응력이 발생하여 내부에는 압축응력의 상태를 보이다가, 시간이 지남에 따라 저면구속효과에 의해 인장응력이 발생되어 잔류응력으로 누적되어 시간이 지남에 따라 일정한 인장응력의 값으로 수렴하게 되지만, 연속타설의 경우 상부에 새로운 콘크리트가 타설되어 수화열이 발현되면서 그 온도의 영향으로 초기의 하부단에는 추가의 인장응력이 발생되었다가 시간이 지남에 압축응력이 발생하는 것을 알 수 있다.

그리고 1단의 해석결과를 보면 1단 타설 후 일정 시점이 지난 이후에도 인장응력이 발생하지 않고 있음을 알 수 있다. 이것은 본 구조물이 슬래브이어서 1단 하부는 거푸집으로 되어있어 저면구속효과에 의한 응력발생효과를 기대할 수 없기 때문이라고 생각된다. 또한, 연속타설에 의한 온도응력에서 3단 타설이후 상부에 의한 영향은 1단에 가장 많은 인장응력을 발생시키고 반대로 시간이 지남에 따라 인장응력의 완화속도는 2단보다 완만함을 알 수 있다. 따라서, 가장 하단부에 최대 인장응력이 발생하므로 블록계획시 균등분할보다 가장 하단부를 작게하고 상부로 올라가면서 블록의 크기를 점진적으로 증가시키는 것이 바람직하다고 생각된다.

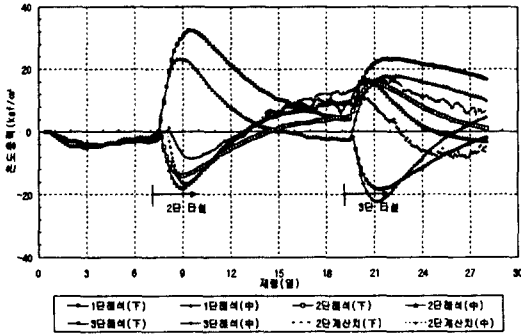


그림 10 계산치와 해석치의 비교

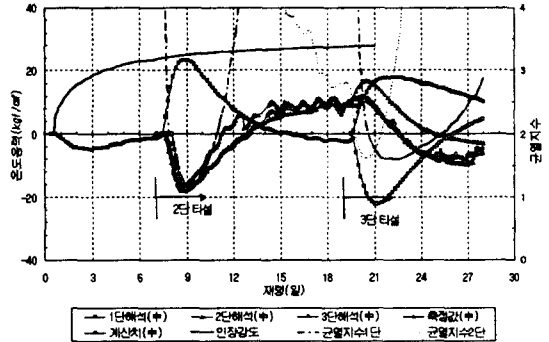


그림 11 재령에 따른 균열지수

그림 10에 열전대, 변형계, 무응력계를 이용한 간접측정에 의한 결과와 해석결과를 나타내었다. 이 결과 또한 직접적인 계측결과와 비슷한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 11에는 재령에 따른 균열지수를 나타내었다. 시방서에서 제시한 균열지수에 의하면 유해한 균열발생을 제한할 경우 그 값은 0.7~1.2로 제안하고 있다. 본 구조물에서의 균열지수는 1단 타설한 후 9일 후 최대 인장응력이 발생되어 그 값이 1.1을 나타내고 나머지는 1.5이상을 상회하여 온도균열에 대해 안전하다고 할 수 있다.

4. 결론

(1) 현장에 타설될 콘크리트는 레미콘사의 생산여건 및 경제성을 고려하고, 유동성, 공기량, 압축강도 및 수화반응열등 제시된 품질기준에 만족하는 플라이애쉬 치환율이 25%인 콘크리트 배합을 결정하였다. 그 결과, 플라이애쉬 치환에 따른 강도발현 지연 및 미달 없이 단열온도 상승량을 9.2℃ 낮출 수 있었다.

(2) 실물대 실험과 수화열 온도해석 검증으로 콘크리트의 발열함수 및 열특성과 대류경계조건 규명하였고, 이를 바탕으로 본체 구조물에 대한 온도해석 결과는 실측 결과와 거의 일치하였다. 이로써 매스콘크리트 구조물에 대한 수화열 해석으로 보다 신뢰성이 높은 시공계획을 수립 할 수가 있었다.

(3) 연속타설의 경우 검토대상블록표면의 인장응력은 그 위 블록의 콘크리트 타설에 따라 주기적인 변화양상을 보이며 최종적으로 수렴하는 응력보다 더 큰 인장응력이 중간단계에서도 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 본 해석에서는 신콘크리트가 타설될 경우 추가적으로 인장응력이 하루에 발생하여 최대값 근처에 도달하여, 이때가 온도균열이 발생하기 쉬운 시점으로 나타나고 있으므로 균등분할보다는 점진적으로 증가시키는 분할이 바람직하다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. R.Springenschmid, Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, E & FN SPON, 1994.
2. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 1999.6
3. 日本コンクリート工學協會, マスコンクリートのひびわれ制御指針, 昭和61年 3月
4. 강석화 외 3인, 유효요소법을 이용한 매스콘크리트구조물의 수화열 및 온도응력 해석에 관한 연구, 콘크리트 학회논문집, 1995.8