

벽체형 매스콘크리트구조물의 온도 및 온도응력측정에 관한 실험적 연구

(An Experimental Study on the Measurement of Temperature and
Thermal Stress of Wall Type Mass Concrete Structure)

강석화*

이용호**

정한중***

박칠림****

Kang, Suck Hwa

Lee, Yong Ho

Jeong, Han Jung

Park, Chil Lim

ABSTRACT

Thermal cracks are occurred when thermal stress due to the hydration of cement exceeds the tensile strength of concrete. Since cracking causes poor durability of concrete, the effect of thermal cracking should be included for the design and construction of massive concrete structures.

In this study, an experiments are performed for the investigation of time dependent temperature and thermal stress of massive concrete structure at early ages. In order to measure temperatures and thermal stresses, concrete stress meter, embedded strain meter, non-stress meter, and thermocouples are used.

Based on the analyses of measured thermal stress data, measured values by concrete stress meter are more reliable than those by embedded strain meter and non-stress meter..

And measured values by concrete stress meter are compared with the calculated values by FEM program developed by DICT (DWTS2D). Calculated values by DWTS2D show good agreement with measured values.

1. 서론

최근 매스콘크리트 구조물의 대형화, 고강도화 추세에 따라 매스콘크리트 구조물이 시공되는 빈도가 크게 늘고 있다. 매스콘크리트 구조물에서는 콘크리트의 경화단계에서 시멘트의 수화현상에 의해 내부에는 높은 온도가 발생하게 되며, 이 온도분포에 의해 발생한 온도응력이 콘크리트의 인장강도보다 크게 될 경우 온도균열이 발생한다.

한편, 당연구소의 대형구조실험동에 시공된 반력벽 구조물은 부재 최소두께가 2.5m인 매스콘크리트 구조물로서, 본 실험에서는 실구조물에 콘크리트 유효응력계 및 배립형 변형계등을 설치하여 구조물 내부에서 발생하는 온도응력을 실측하여 내부의 온도응력 상태를 검토하고, 아울러 당연구소에서 개발한 수화열 및 온도응력해석 프로그램의 해석 정확도를 검증하는 것을 주요 목적으로 하고 있다.

2. 실험개요

2.1 실험체의 제원 및 형상

실험대상인 반력벽 구조물은 3층 높이의 실대형구조물에 대한 가력실험이 가능하도록 설계된 구조물로서, 그 크기는 $14m^L \times 12m^B \times 2.5m^H$ 이며, 구조물 내부에는 프리스트레싱용 텐던 및 가력시에 jacking

* 정희원, (주)대우건설기술연구소, 책임연구원

** 정희원, (주)대우건설기술연구소, 연구원

*** 정희원, (주)대우건설기술연구소, 선임연구원

**** 정희원, (주)대우건설기술연구소 소장, 전무이사

system을 설치하기 위한 anchor sleeve, 그리고 H형 철골등이 가로,세로방향으로 조밀하게 배치되어 있다.

2.2 사용재료 및 콘크리트

본 구조물의 시공에 사용한 콘크리트는 실세강도가 350kg/cm²인 고강도콘크리트로서, 사용 시멘트는 보통포틀랜드시멘트(비중 : 3.15)이며, 콘크리트의 수화열을 억제하기 위하여 플라이에쉬(비중 : 2.16)를 전체 결합재량의 20%를 시멘트량과 대체시키 혼입하였다.

시공에 사용한 콘크리트의 배합은 표-1과 같다.

표-1 콘크리트의 배합

W/B (%)	S/A (%)	S.P (%)	W (kg/m ³)	Binder(kg/m ³)		slump (cm)	air (%)
				cement	fly ash		
37.0	42.5	1.5	175	378.38	94.7	23.5	1.7

2.3 게이지 설치

실험은 구조물내의 온도 및 온도응력을 측정할 목적으로 총 3회에 걸쳐서 실시하였다.

1차실험은 10일 0.5m 타설된 2층 높이(EL. 0.25m)에, 그리고 2차, 3차 실험은 1.0m씩 타설된 9층과 10층 높이(EL. 4.25m, 5.25m)에 각각 실시되었다.

콘크리트의 온도는 T-type 열전대를 이용하여 측정하였고, 온도응력은 유효응력계와 매립형 변형계 그리고 무응력계를 이용하여 측정하였다.

그리고 타설구조체는 길이방향으로 14m이기 때문에 길이방향으로는 단열이 되었다고 판단되어, 균열

표-2 각 실험별 게이지 설치 위치

실험단계	측정게이지	설치위치
1차실험	유효응력계	중앙부
	매립형변형계	중앙부
	무응력계	중앙부
	열전대	중앙부, 대기온
2차실험	유효응력계	상부, 중앙부, 하부
	매립형변형계	상부, 중앙부, 하부
	무응력계	상부, 중앙부, 하부
	열전대	상부(2), 중앙부(2), 하부(2), 외기온
3차실험	유효응력계	중앙부
	매립형변형계	상부, 중앙부
	무응력계	중앙부
	열전대	상부, 중앙부(2), 외기온

발생 가능성이 가장 높은 구조물의 중앙부에만 집중적으로 게이지를 설치하였고, 측정은 매 1시간간격으로 실시하였다.

각 실험별 게이지 설치위치는 그림-1과 같다.

3. 재료시험

온도응력의 계측과 더불어 콘크리트의 재료적 물성을 파악하기 위하여 단열온도상승시험과 콘크리트 압축인장시험 그리고 프록터 관입저항시험을 실시하였다.

3.1 단열온도 상승시험

본 실험에서는 매스콘크리트의 온도해석시 입력데이터로서 필요한 단열온도상승식의 계수를 추출하기 위하여 당연구소에서 보유하고 있는 단열온도상승시험기를 이용하여 단열온도상승시험을 실시하였다(표-3 참조).

단열온도상승식은 시방서¹⁾에 제시되어 있는 two-parameter식을 사용하지 않고 온도상승을 실제의 값에 보다 가깝게 묘사하고 있는 three-parameter식을 사용하였다.

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

표-3 단열온도상승시험 결과

실험계수	1차 실험	2차 실험
K	46.55	49.00
α	1.337	1.630
β	1.250	1.310

3.2 압축강도 시험 및 활렬인장강도 시험

본 실험에서는 타설한 콘크리트의 강도발현 추이를 파악하기 위하여 압축 및 활렬인장강도시험을 실시하였다. 시험결과는 표-4와 같다.

표-4 압축강도 및 활렬인장강도 시험결과 (kg/cm²)

항목		시간		
		3일	7일	28일
1차	압축강도	263	352	457
	활렬인장강도	15	21	29
2차	압축강도	319	303	442
	활렬인장강도	21	22	28
3차	압축강도	268	320	438
	활렬인장강도	18	22	27

3.3 프록터 관입저항 시험

본 실험에서는 기 실시한 모의실험체 실험²⁾에서 확인이 되지 않은 콘크리트변형계의 0점 조정 문제를 해결하기 위하여 프록터 관입저항시험을 실시하였다.

프록터 관입저항시험은 ASTM에도 규정되어 있는 시험법으로서, 관입저항치가 500psi(35kg/cm²)에 도달한 시점을 콘크리트의 응결개시로 규정하고, 4,000psi(280kg/cm²)에 도달한 시점을 응결종료로 규정하고 있다. 시험을 위해서는 콘크리트를 5mm체로 wet screening한 모르터를 시료로 사용하였다. 시험 결과는 그림-1과 같다.

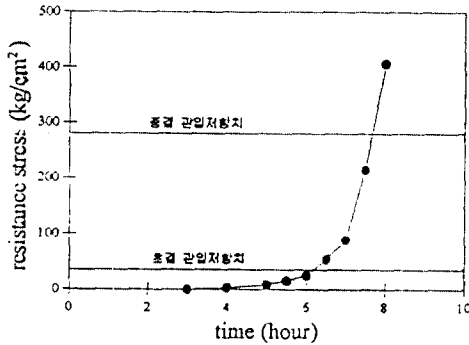


그림-1 프록터 관입저항시험 결과

시험결과로부터, 본 실험에서 사용한 콘크리트의 초기응결시간은 타설후 6~7시간이 경과한 시점으로 판단되어, 콘크리트 변형계의 측정치로부터 온도응력 산정시, 이 값을 기준으로 하여 0점 조정을 실시하였다.

4. 실험치와 해석치의 비교

4.1 해석상의 가정사항

본 구조물은 벽체형 구조물 형태로서 본래 온도장과 응력장이 직교를 하기 때문에 수화열 해석시와 온도응력 해석시의 모델을 달리 하여야 하나 단변방향의 두께가 2.5m로 어느 정도 단열이 가정되었다고 가정하여 두 해석시의 유한요소 분할도를 동일하게 하여 해석을 실시하였다.

해석에 사용한 계정수는 표-5와 같으며, 콘크리트

의 탄성계수 산정을 위해서는 岡田의 적산온도식³⁾을 사용하였다. 또한 온도응력 해석시는 하부에 이미 타설한 콘크리트위에 새롭게 타설되기 때문에 구속체의 탄성계수는 경화된 콘크리트의 탄성계수값인 300,000 kg/cm²을 사용하였다.

표-5 해석 입력치

입력치	콘크리트
열전도율(kcal/mh℃)	1.94
열전달률(kcal/m ² h℃)	10.0
비열(kcal/kg℃)	0.24
열팽창률(/℃)	10×10 ⁻⁶
밀도(kg/m ³)	2300
포아송비	0.167

4.2 실험치와 해석치의 비교

본 논문에서는 지면관계상 각 실험에서의 중앙부 실측치만을 대상으로 해서 온도는 실측치 및 해석치, 응력은 유효응력계에 의한 실측치, 매립형 변형계에 의한 측정치를 온도응력으로 환산한 수정치 및 해석에 의한 결과치와의 비교에 대하여 기술하기로 한다.

1) 1차실험

50cm 높이의 중앙부에 설치한 온도 및 온도응력의 측정치와 해석결과는 그림-2, 그림-3과 같다.

수화열 해석 결과와 실측치를 비교해 보면 실측치는 타설높이가 0.5m인 관계로 외부기온의 영향을 많이 받아 부분적으로 해석치와 일치하지 않는 부분도 있지만, 전체적으로 해석치는 실측치를 잘 평가하고 있는 것으로 나타났다.

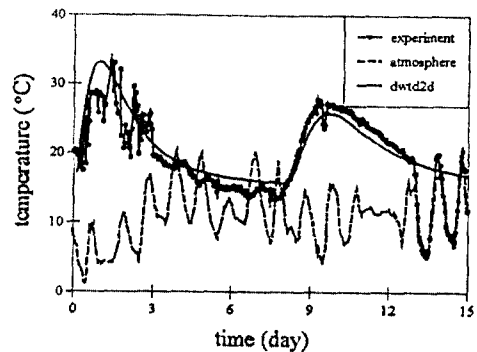


그림-2 수화열 해석결과와 실측치의 비교(1차)

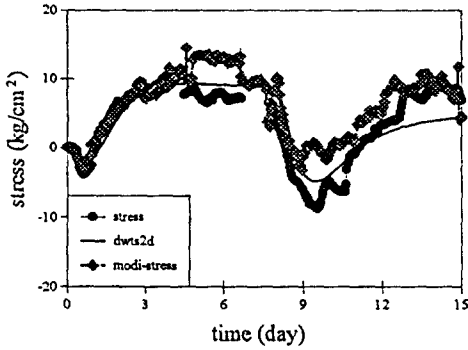


그림-3 온도응력해석결과와 실측치의 비교(1차)

그림-3을 보면 구조물 내부의 온도응력은 기타설 콘크리트에 의한 외부구속의 영향으로 초기에 압축 응력 상태를 나타내다가 내외부온도차에 의해서 인장응력 성분이 증가하면서 온도응력도 증분량이 인장응력으로 바뀌었다. 그러나 타설후 8일이 경과한 시점에서 윗부분에 새로운 콘크리트를 타설하였기 때문에 열원이 상부에 있는 경우와 동일한 상태를 나타내 그림-4와 같이 실제의 변형상태를 나타내는 이른바 compensation line에 의해 온도응력의 증분이 압축응력을 나타냈다가 다시 인장응력으로 바뀌는 상태를 나타내었다.

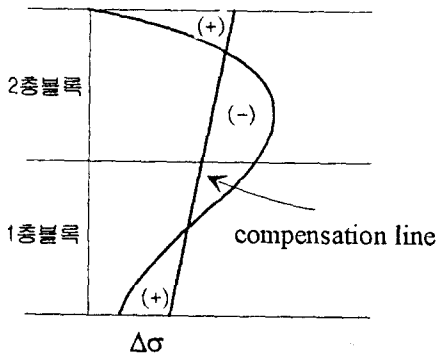


그림-4 연속타설시의 온도증분에 따른 온도응력 발생의 개념도(온도 상승시)

또한, 유효응력계의 측정결과와 변형계 및 무응력계에 의해 측정된 결과를 비교한 그림을 보면 두 값은 거의 일치하고 있어, 기 제안한 변형계의 측정치로부터 온도응력을 산출하는 방법²⁾은 매우 합리적

이었던 것으로 사료된다.

2) 2차실험

1m 높이의 구조체에 대해서 실시한 2차실험에 대한 실험치와 해석치를 비교하면 그림-5, 그림-6과 같다.

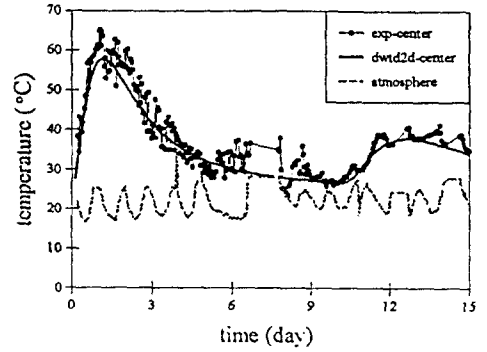


그림-5 수화열 해석결과와 실측치의 비교(2차)

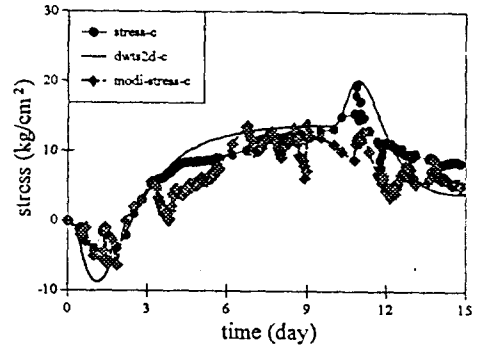


그림-6 온도응력해석결과와 실측치의 비교(2차)

측정결과를 보면 0.5m를 타설하였을 때의 측정결과와 비교할 때, 타설 온도가 약 10°C 높고 타설높이도 두배로 차이가 나기 때문에 최대온도는 약 30°C 정도의 차이가 났고, 온도상승량은 12°C의 차이가 났다. 그러나 온도응력의 실측치 및 해석치를 보면 0.5m를 타설했을 경우 보다 약간의 응력증가에만 그쳐 온도상승량이 발생응력에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알았다. 또한, 연속타설에 의한 응력변화를 보면 0.5m 타설시와는 달리 윗부분에 타설한 콘크리트의 영향으로 응력증분량이 초기에 인장성분을 나타냈다. 이것은 1m 타설시 0.5m의 경우 보다는

발열량이 커져서 부분적으로 내부구속 응력상태를 나타냈기 때문으로 사료된다.

3) 3차실험

3차실험은 2차실험의 측정결과에 대한 확인 및 내부구속상태의 영향을 검토하기 위하여 실시하였다. 온도와 온도응력의 측정결과 및 해석결과는 각각 그림-7, 그림-8과 같다.

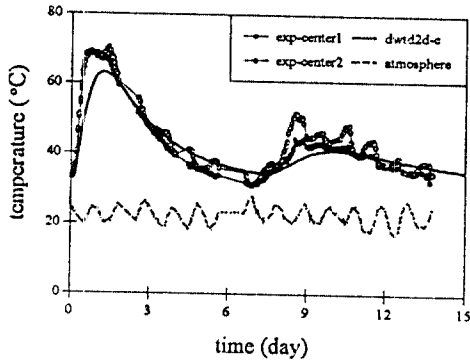


그림-7 수화열 해석결과와 실측치의 비교(3차)

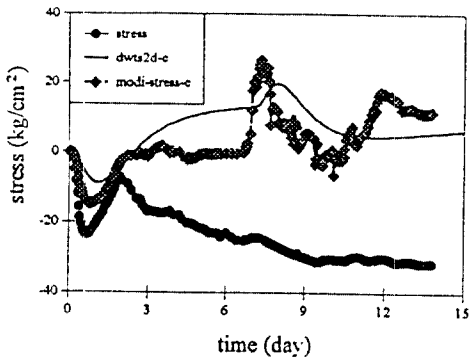


그림-8 온도응력 해석결과와 실측치의 비교(3차)

그림-7의 수화열해석치와 실험치의 비교에 있어서는 실험치가 해석치 보다 다소 높은 것으로 나타났으며, 2차실험시의 측정치와 비교해도 약 6~7°C 정도 높은 값을 나타냈다. 그 이유에 대해서는 명확하지는 않지만, 해석프로그램에서는 주변의 온도조건 및 양생조건 등을 거의 일률적으로 정하고 있는데 실제상황은 해석시의 가정사항과 다소 차이가 있기 때문으로 사료된다.

한편, 온도응력의 비교에 있어서는, 해석치나 실측치 모두 타설후 초기에 압축응력이 증가하다가 약 1일이 경과한 후 인장응력이 증가하는 비슷한 경향을

나타내고 있으나 유효응력계에 의한 측정값은 해석치와는 전혀 다르게 다시 압축응력상태로 바뀌는 응력상태를 나타냈다. 그 이유는 게이지를 설치한 인접부분에 H형강이 설치되어 있는데, H형강이 설치된 부분에서 온도균열이 발생한 것으로 보아 균열 발생에 따른 응력해방에 의한 것으로 것으로 추측된다.

또한, 매립형변형계에 의해 측정된 값도 2차실험시의 측정치와는 달리 해석치와 잘 맞지 않는 것으로 나타났다. 그 이유는 게이지 설치시 장소가 매우 협소하여 무응력계의 설치시 수평으로 설치한 무응력통안에 충분히 콘크리트가 채워지지 않았기 때문에 측정에 다소 문제가 있었던 것으로 추측된다.

5. 결론

본 실험에서는 실구조물에 콘크리트 유효응력계 및 매립형 변형계등을 설치하여 구조물 내부에서 발생하는 온도응력을 실측하였다.

실험을 통하여 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 개발한 수화열 및 온도응력 해석 프로그램은 실제의 응력상태를 잘 평가하고 있음이 확인되었다.
- 2) 본 실험에서 사용한 유효응력계는 실제의 응력상태를 매우 잘 측정하고 있음이 확인되었으나, 매립형 변형계와 무응력계를 이용한 측정법은 측정치의 신뢰도가 다소 떨어지는 문제점이 있었다.
- 3) 매립형 변형계에 의해 측정된 온도응력값은 부분적으로 유효응력계의 측정치와 거의 일치하는 경우도 있지만, 다소 불안정한 측정값을 나타내는 경우도 있어 측정치에 대한 보정방법 뿐만 아니라 게이지의 설치에도 주의를 기울이지 않으면 안된다.

6. 참고문헌

- 1) 콘크리트표준시방서, 건설부제정, 1988년 12월, pp. 598 -600
- 2) 강석화, 정철현, 정한중, 이용호, 박철림, "매스콘크리트구조물의 온도응력평가에 관한 연구, 콘크리트학회지, Vol. 7, No. 2, 1995.4, pp. 126-135
- 3) 岡田清, 小林和夫, 宮川豊章, 村本吉弘, "マスコンクリートの基本的特性に関する考察", セメント技術年譜, Vol. 34, 1980, pp. 230-234.