

구조실험동 반력구조체의 수화열 제어 및 시공기법

Hydration heat control for mass concrete of reaction structure

조인성*

Cho, In Sung

ABSTRACT

Mass concrete of reaction structure was investigated to minimize cracks generated by the heat of hydration. Suggestions are noted in this paper through the experiences of planning, technical study, computational analysis and field instrumentation.

1. 서론

매스콘크리트란 일반적으로 콘크리트의 초기 경화시 발생하는 수화열 및 이에 따른 체적변화 때문에 균열에 대한 대책이 필요한 커다란 크기의 콘크리트 구조체를 말한다. 본고에서는 포스코개발(주) 기술연구소 구조실험동의 건설시 반력상 및 반력벽으로 구성되는 대형 반력구조체의 매스콘크리트 타설을 위하여 사전 계획, 기술 검토, 전산 해석, 시공 및 계측 등을 실시했던 일련의 과정과 경험을 기술한다.

포스코개발(주) 구조실험동의 반력상 및 반력벽은 1000t 가력장치에 의한 정적 또는 동적 실험시 반력지지를 위한 구조물이며, 구조물 전경을 그림1, 개요적인 형상을 그림2에 나타내었다. 반력구조체의 크기는 하부 37m(L)x20m(W)x4.7m(H), 상부 20m(L)x3m(W)x12.0m(H)이다. 반력상 및 반력벽은 대가력에 의한 고정도의 구조실험을 수행하여야 하기 때문에 구조물의 균열이나 손상은 치명적이다. 따라서 단면치수가 두꺼운 매스콘크리트 타설시 온도균열을 최소화시키기 위해 연구가 수행되었다.



그림1. 반력상 및 반력벽

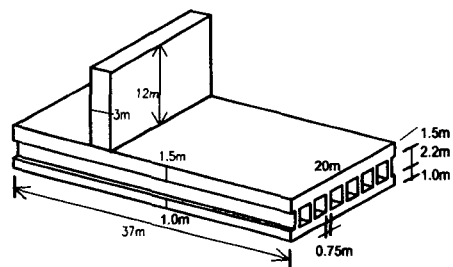


그림2. 기본 형상 및 치수

*정회원, 포스코개발(주) 토건사업본부 토건사업팀 차장

2. 최적 배합의 선정

반력구조체의 콘크리트 설계기준강도는 350kg/cm²이며, 콘크리트 품질 변동성을 고려하여 증가계수 1.2를 적용함으로써 수중양생 28일 배합강도는 420kg/cm²으로 결정하였다.

온도균열은 시멘트의 수화열에 의한 콘크리트의 온도상승에 기인하는 것으로, 매스콘크리트의 배합 선정시에는 온도상승량을 가능한 한 작게 하는데 주안점을 두어야 한다. 반력상 및 반력벽의 시공 배합을 결정하기 위하여 먼저 타사의 유사구조물의 콘크리트 배합 실적을 조사하였고, 이를 참고하여 온도 상승량을 줄일 수 있는 최적 배합을 결정하였다.

표1. 반력구조체의 시공배합표

단위:kg/m³

시멘트	플라이애쉬	물	물시멘트비	잔골재	굵은골재	지연제
354	88	161	36.5%	773	925	7.51

3. 콘크리트 물성 시험

온도해석이나 열응력의 유한요소해석을 수행함에 있어 예비해석 단계에서는 시방서의 식에 의하여 재령에 따른 강도발현 및 탄성계수의 변화를 구하여 적용하였으며, 단열온도상승식 또한 혼입율 20%의 플라이애쉬 시멘트에 대한 시방서 식을 적용하여 해석을 수행하였다.

그러나 이론적인 가정보다는 물성실험을 통하여 검증된 값을 사용하는 것이 타당하므로 해석에 중요한 영향을 미친다고 판단되는 강도발현곡선 및 단열온도상승곡선을 실험을 통하여 구하여 본 해석 단계에서 적용함으로써 좀 더 실제의 거동에 가까운 온도 및 응력값을 얻고자 하였다.

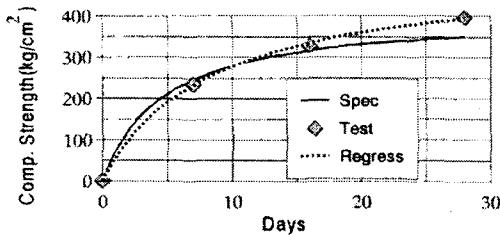


그림3. 현장 양생 시편의 강도시험 결과

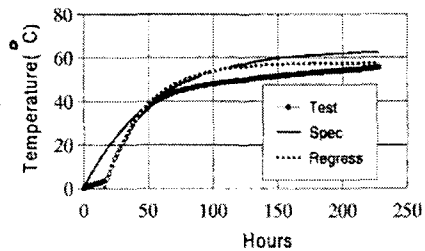


그림4. 단열온도상승시험 결과

회귀분석 결과 얻어진 강도발현곡선 및 단열온도상승곡선식은 각각 식1, 식2와 같다.

$$f_c(t) = \frac{t}{0.0164 + 0.00197t} \quad \text{식(1)}$$

$$\text{if } t < 16\text{hr } Q(t) = 5^\circ\text{C} \text{ , else } Q(t) = 57.5(1 - e^{-0.787(t-16)}) \quad \text{식(2)}$$

강도발현 측면에서 시공배합인 플라이애쉬 콘크리트는 7일강도는 시방서식보다 3.7% 떨어지나 28일강도에서는 12.9% 높은 값을 나타내었다. 현장시편의 28일강도는 395kg/cm²로서 배합강도 420kg/cm²에는 약간 못 미치나 최적의 양생조건이 아닌 동결기 현장양생조건임을 고려하면 양호한 것으로 판단된다.

온도상승 측면에서 초반부는 발열량이 미미하고 타설후 약 16시간후부터 온도가 상승하고 있으므로 초반 16시간까지는 5℃로 일정한 것으로 하고, 그 이후에는 실험결과에 근사한 회귀식을 따르도록 결정하였다.

4. 유한요소해석 및 최적 타설높이

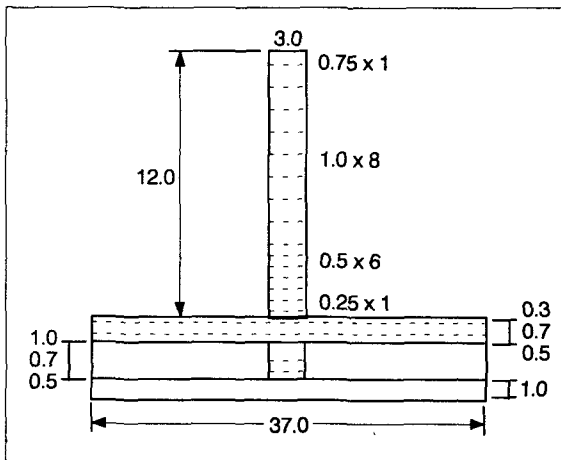


그림5. 당초 계획

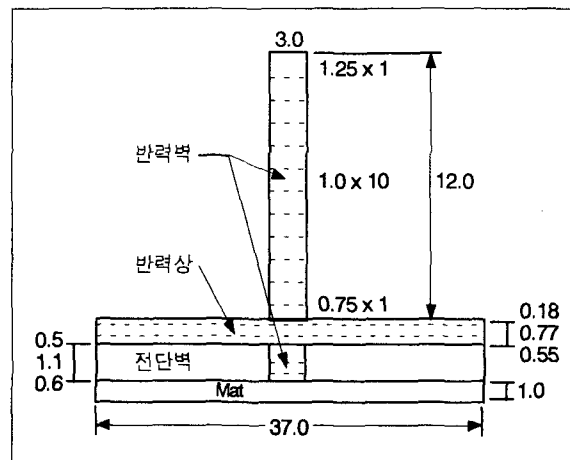


그림6. 실제 시공

반력상 및 반력벽 매스콘크리트의 최초 시공 계획시에는 국내 유사한 구조실험동의 시공사례 및 외국 건설사의 경험을 자문받아 1회 타설높이를 50cm로 제한하고, 그 이상의 높이에 대해서는 Pipe Cooling System을 채택하는 것으로 계획하였다.

그후 시공성 검토 및 수화열 예비해석을 거쳐 타설높이를 조정하였고, 초기 시공시 매트 콘크리트, 매트위 반력벽 콘크리트에 대한 해석치와 계측치를 비교분석하여 목표온도균열지수를 설정하고 열팽창계수를 하향 조정하여 유한요소해석으로 검증한 뒤 최적 타설높이를 그림6과 같이 결정하였다.

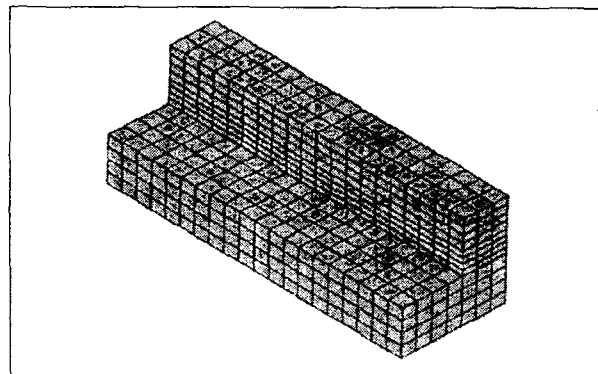
4.1 수화열해석 입력자료 및 모델링

유한요소해석을 위한 프로그램으로는 ABAQUS를 사용하였으며, 온도해석의 결과는 열응력해석의 결과에 의존하지 않는다고 가정하고 해석하였다. 각 시공단계별로 모두 해석하였으나 여기서는 대표적인 해석결과에 대해서만 기술한다.

그림7. 반력벽의 유한요소모델 (제1단:75cm)

표2. 해석 입력자료

구분	적용값
압축강도	식1
인장강도	$f_t(t) = 1.4 \sqrt{f'_c(t)}$
탄성계수	$E_c(t) = \phi(t)15000 \sqrt{f'_c(t)}$
단열온도상승곡선	식2
대류계수	4.60 J/(cm ² h ² °C)
밀도	2,300 kg/m ³
열전도도	96.2 J/(cm h ² °C)
비열	1150.6 J/(kg °C)
열팽창계수	10 x 10 ⁻⁶ /°C



4.2 반력벽 제1단 콘크리트 해석 결과

시공시기가 5월이므로 평균외기온도 17℃, 타설온도 25℃를 가정하였다. 제1단 타설높이 75cm는 예비해석 결과 및 매트위 반력벽의 시공실적, 그리고 슬리브가 50cm 간격으로 배치되기 때문에 시공 위치상 25cm 또는 75cm만이 선택가능한 점을 고려하여 결정된 것이다. 하위 블록은 항상 상위블록의 타설에 의하여 온도나 응력이 영향을 받게 되므로 상위 블록의 타설 전과 후의 두가지 상황을 고려한 2단계 해석을 실시하였다.

콘크리트 타설후 탈형, 양생, 철근배근 등을 고려한 최소 콘크리트 타설주기는 5일이므로 5일 간격 타설과 7일 간격 타설을 각각 해석하고 비교하였다.

그림8에는 블록 중심부의 상,중 위치에서의 온도이력을 나타내었다. 그림9에는 블록 중심부의 상,중,하와 측표면의 응력을 인장강도와 비교하여 나타내었다. 온도나 응력이 5일후 타설한 상위 블록의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 온도균열지수는 0.76정도로 산정되었다. 온도균열지수가 0.7~1.2 범위이면 유해한 균열은 발생하지 않을 것으로 시방서에서는 예측하고 있으나 타설후 면밀한 거동의 관찰이 필요하다고 볼 수 있다.

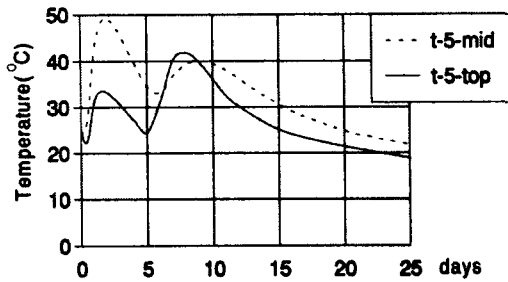


그림8. 온도이력곡선

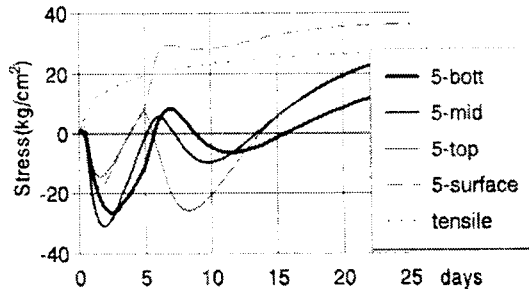


그림9. 응력이력곡선

5일 간격과 7일 간격 타설시 블록 중심부에서의 중앙부의 응력을 그림10, 측표면에서의 응력을 그림11에 각각 비교하여 나타내었다. 중앙부에서의 응력은 비록 형태 차이가 있어도 수렴하는 값은 비슷하였으나, 측표면에서의 응력은 7일 간격 타설시가 더 작은 것을 알 수 있다.

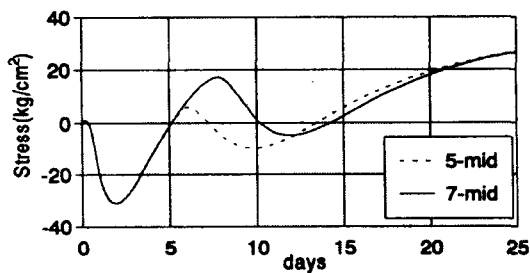


그림10. 5일,7일 간격 타설시 응력비교 (중앙부)

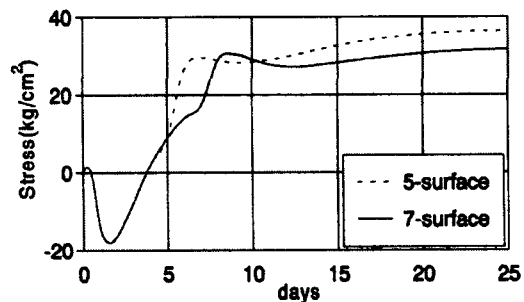


그림11. 5일,7일 간격타설시 응력비교 (측표면)

5. 계측 및 해석 결과 비교

해석시 적용한 입력치의 검증 및 초기 하부층의 시공결과를 상부층에 반영하여 온도균열을 방지할 수 있도록 하기 위하여 계측을 실시하고, 해석 결과와 비교 분석하였다.

5.1 매트 콘크리트

매트 콘크리트는 11월 말에 타설되었으며 타설높이는 1m이다. 타설전 중심부에 온도측정계 및 스트레인 게이지를 매설하여 온도 및 변형도를 측정하였다. 계측위치는 그림12와 같다.

그림13은 A위치에서의 온도변화를 나타낸 것이다. 최대온도 측면에서 실측치가 해석치보다 5℃정도 낮게 측정되었다. 이는 해석시 매트 표면의 보양포 양생조건을 대류계수를 적절히 설정하여 모사했지만 실제와는 약간 차이가 있기 때문으로 분석된다.

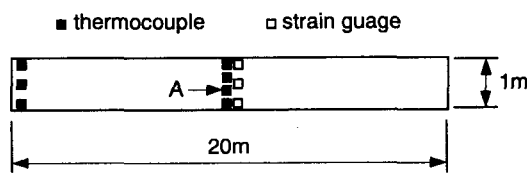


그림12. 매트 콘크리트 계측위치

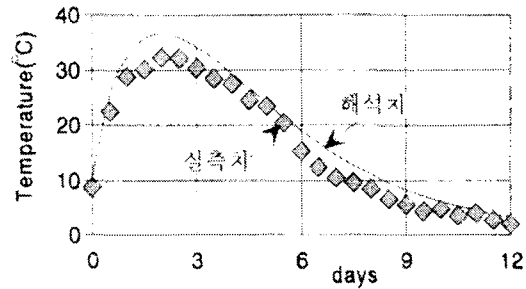


그림13. A위치에서의 온도변화

5.2 매트 위의 반력벽 제1단 콘크리트

매트 위의 반력벽 제1단은 1월초에 타설되었다. 그림14는 제1단 타설높이인 60cm에 대한 계측위치를 나타낸다. 그림15는 t-1위치에서의 온도 실측치와 해석치를 비교한 것이다. t-1(spec)은 시방서의 단열온도상승식을 사용하였을때의 값이며, t-1(anal)은 물성시험에 의한 단열온도상승식을 적용한 값이다. 실제의 물성을 고려했을 때의 값이 실측치와 더욱 근접한 형태를 보임을 알 수 있다.

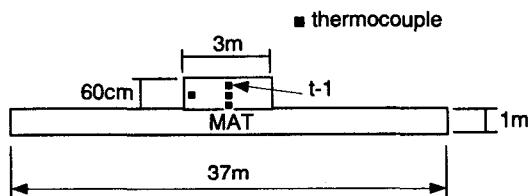


그림14. 매트위 반력벽 제1단 계측위치

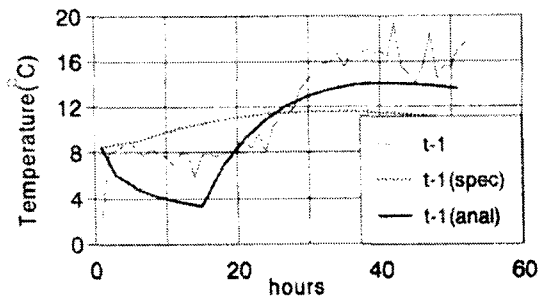


그림15. t-1위치에서의 온도변화

5.3 반력상 제1단 콘크리트

반력상 제1단은 3월말에 타설되었다. 그림16은 제1단 타설높이인 55cm에 대한 계측위치를 나타낸다. 그림17은 중심부 t-0위치에서의 온도 실측치와 해석치를 비교한 것이다. 3일까지는 비교적 근사한 모양을 보이고 있으나, 3일 이후 해석치는 계속해서 하강하고 있는데 반해 실측치는 하강속도에 변화가 생겨 차이를 보여주고 있다. t-1, t-2에서도 마찬가지로의 현상을 보여주었는데, 이런 현상은 타설 3일째 이후 어떤 외부 조건의 변화에 기인한 것이라고 보여진다.

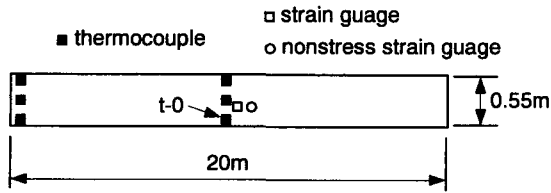


그림16. 반력상 제1단 계측위치

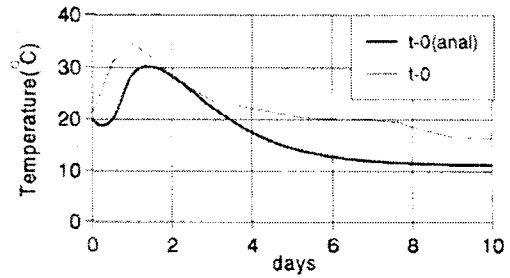


그림17. t-0위치에서의 온도변화

5.4 반력벽 제5단 콘크리트

반력벽 제5단은 6월말에 타설되었다. 그림18은 제5단 타설높이인 100cm에 대한 온도 계측위치를 나타낸다. 그림19는 중심부 t-2위치에서의 온도 실측치와 해석치를 비교한 것이다. 중심부의 최대 온도는 63°C 정도로서 실측치와 해석치가 비슷하게 나타나고 있지만, 실측치가 최대온도에 도달한 후 하강하는 시점이 빠르다. 이는 해석과는 달리 실제로는 슬리브, 철골, 철근, 텐돈 등이 배치되어 있어 영향을 주기 때문인 것으로 분석된다. 7일후 상위 블록의 타설에 의한 온도 상승 영향도 실측치에서는 보다 뚜렷이 관찰된다.

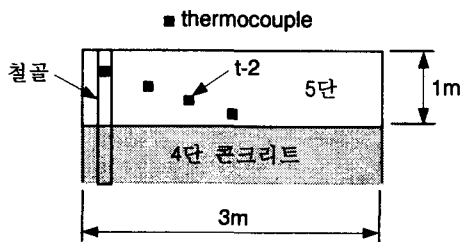


그림18. 반력벽 제5단 온도 계측위치

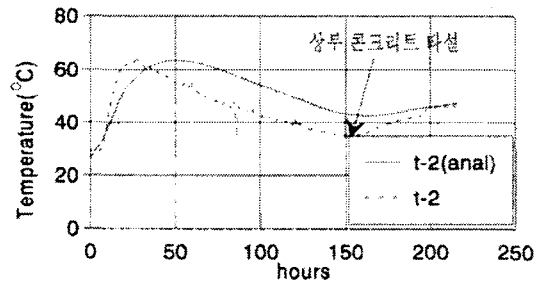


그림19. t-2위치에서의 온도변화

그림20은 제5단의 응력 계측위치를 나타낸다. 그림21은 S-1위치에서의 응력 실측치와 해석치를 비교한 것이다.

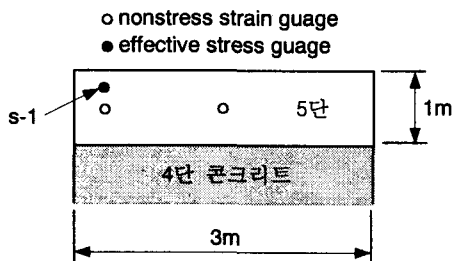


그림20. 반력벽 제5단 응력 계측위치

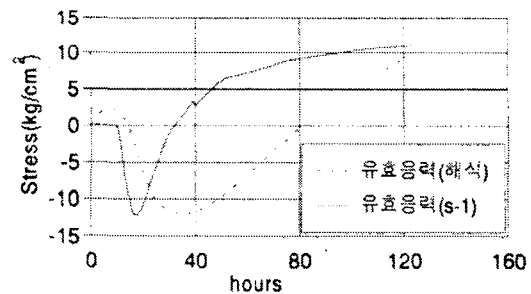
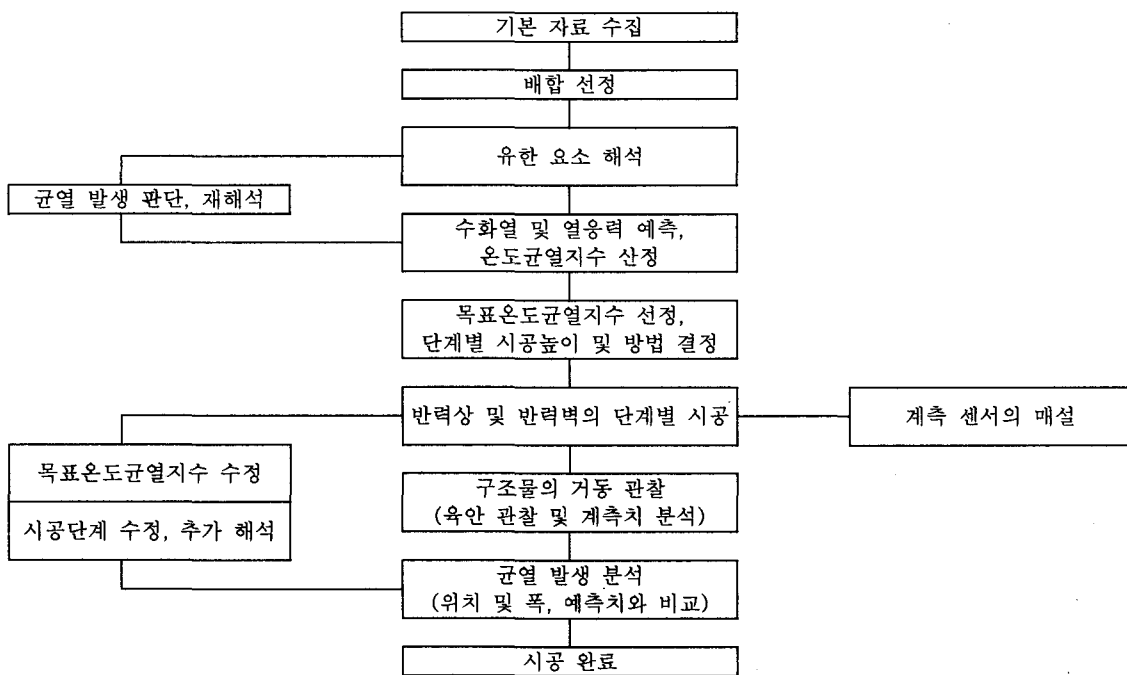


그림21. S-1위치에서의 응력변화

온도 계측 결과나 응력 계측 결과에서 보여 주듯이 압축에서 인장으로 돌아서는 시점이 실측치가 해석치보다 빠르다. 콘크리트의 강도가 어느 정도 확보되기 전에 인장응력이 발현되는 것은 불리한 것으로 분석되며, 최대온도에 도달한 이후부터는 보온을 실시하여 온도의 하강속도를 늦춤으로서 인장응력의 증가 속도 또한 줄여 주는 대책이 필요한 것으로 분석되었다.

6. 반력구조체의 수화열 제어 흐름 및 최적 시공기법

지금까지의 반력구조체 수화열 제어 과정을 흐름도로 나타내면 다음과 같다.



시공 경험상 얻은 최적 시공기법은 다음과 같다.

(1) 반력상과 반력벽의 경우 50cm간격으로 슬리브가 매설되어 있어 예측보다 최대온도 도달시점이 빨라서 불리하므로 이를 고려하여 목표온도균열지수를 선정하는 것이 필요하다. 슬리브 고정용 철골은 가능한 한 콘크리트 표면보다는 내측 깊숙이 위치하도록 계획하여 균열을 피하도록 하는 것이 좋다.

(2) 반력상 형태의 구조물은 부피에 비해 표면적이 커서 건조수축에 취약하므로 일정기간 동안 표면에 수분을 공급하거나 양생막을 도포하는 방식의 양생 대책이 필요하다.

(3) 반력상 및 반력벽 모두 수화열 관리 측면에서 최대온도 도달 이후 온도의 하강속도를 늦추기 위한 보온 양생이 필요하며, 특히 콘크리트 표면 노출 상태의 급격한 온도하강은 피하는 것이 좋다.

(4) 5~7일 정도의 타설간격을 유지하여 상부블록이 하부에 주는 열 영향과 하부블록이 상부에 주는 구속 영향을 적절히 조정하는 것이 필요하다.

(5) 새벽~아침에 콘크리트를 타설하여 콘크리트 타설온도를 낮추어 주는 것이 수화열 면에서 유리한 효과를 얻을 수 있다.

7. 결론

포스코개발(주) 구조실험동의 반력구조체인 반력상 및 반력벽의 매스콘크리트 시공에 있어 Pipe Cooling System을 사용하지 않고 적정한 콘크리트 물성실험과 다단계의 반복적인 유한요소해석을 통하여 최적의 타설높이와 관리기준을 설정하고 계측을 병행함으로써 성공적으로 구조물 시공을 완수할 수 있었다. 사전검토, 유한요소해석, 계측 및 분석 등의 과정을 통하여 얻은 경험은 다음과 같다.

(1) 해석시에는 재료의 물성치를 고려한 해석입력조건이 중요하다. 수화열 해석시 초반의 미소발열과 16시간 이후의 본 발열을 구분하여 실험결과에 근접하게 단열온도상승곡선을 적용함으로써 보다 실측치에 근접한 수화열 해석 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 해석을 통한 목표온도균열지수 설정과 시공 실측에 의한 분석을 통하여 목표온도균열지수를 조정하는 Feedback방식의 관리가 중요하다. 본 반력구조체의 시공시에는 계측 결과의 분석을 통하여 콘크리트의 열팽창계수를 하향 조정함으로써 보다 실제 상황에 적합한 목표온도균열지수의 설정과 시공관리가 가능하였다.

(3) 상부 콘크리트의 타설이 하부 콘크리트의 온도 이력 및 응력 이력을 변화시키는 현상이 명확히 확인되었다. 따라서 열응력 해석시에는 관심대상블록을 상하로 확대시켜 현장시공조건을 모사하여야 최종적으로 수렴하는 열응력값에 의한 온도균열지수를 정확히 산정할 수 있다.

(4) 매스콘크리트의 타설후 관리방식으로서, 콘크리트의 내부온도가 최대치에 도달할 때까지는 외기 노출상태로 두어 내부의 열이 빠져나가도록 하고, 최대온도 도달 이후에는 보온조치를 시행하여 온도의 하강속도와 인장응력의 발현속도를 낮춤으로서 콘크리트의 발현 인장강도가 수화열에 의한 인장응력보다 크게 되도록 관리하는 것이 필요하다.

(5) 매스콘크리트의 시공시에는 유해하지 않은 균열이라도 허용하기 보다는 최소화 시키도록 잠재적 문제요인을 찾고 줄여 나가는데 중점을 두어야 할 것이다.