

금당교 교대기초 수화열 계측 및 해석

In-Site Measurement and Analysis of Heat of Hydration for Kumdang Bridge

안 상 구* 이 필 구** 차 수 원***
Ahn, Sang Ku Lee, Pil Goo Cha, Soo Won

ABSTRACT

Abutments in Kumdang bridge are massive concrete structures of which total height is 10m, length is 30m, and width is 7m. Therefore, there is every probability that early age thermal cracking such as hydration heat occur. We measure heat of hydration, strains of rebar, and stresses of concrete abutment during construction. Using analysis of measuring data, we examine thermal stresses, and make use of results as method which control thermal cracking. Finally, we develop thermal stress analysis program which have pre/post processor to be easy of accessing and the usefulness of that is estimated through comparison of results.

1. 서론

대형 콘크리트 구조물이나 고강도 및 고내구성 콘크리트의 필요성이 증가함에 따라 수화열에 의한 온도균열의 발생위험이 증가하고 있는 실정이다. 수화열로 인해 발생하는 온도균열은 보통 그 폭이 크고 구조물을 관통하는 경우가 많으며, 구조물의 시공초기에 발생하여 구조물의 내력, 수밀성, 미관 및 장기적인 내구성능의 저하를 초래하므로 설계, 시공 및 관리단계에서 면밀한 검토를 하여야 한다.

포스코개발에서 시공중인 광양 금당교는 길이 640m의 6차선 강상판형 교량이고, 이중 검토한 교대 구조물은 폭 7m, 길이 30m, 전체높이가 10m인 대규모의 교대이다. 금당교 교대부는 기초부의 높이가 1.6m, 교대 본체부는 3.8m 이고 교대뒤편의 높이가 4.6m에 달하는 콘크리트 구조물로서, 하부 벽체 부분의 두께가 1.6m로 수화열에 의한 균열발생의 가능성이 높은 매스 콘크리트 구조물이다. 따라서 금당교 교대부에 대한 예비해석을 통해 시공 방법과 순서 및 시공재료를 결정하였다. 결정된 타설 순서에 의해 기초부와 벽체부의 수화열 계측을 실시하고 계측결과를 분석을 통해 매스 콘크리트의 온도응력을 규명하여 온도균열 제어방안을 수립하였다. 또한 사용자의 편의 도모를 위하여 전후처리 시스템을 추가하여 자체 개발한 수화열 전용해석프로그램을 사용하여 계측자료를 분석하고 그 효용성을 평가하였다.

* 정회원, 포스코개발 기술연구소 건설기술연구팀 연구원

** 정회원, 포항산업과학연구원 토목구조연구팀 선임연구원

*** 정회원, 한경대학교 강사

2. 온도 및 응력 계측

2.1. 수화열 계측 계획

금당교 교대는 매스콘크리트의 온도균열을 제어할 목적으로 당초 예정된 보통시멘트 배합에서 3성분계 저발열시멘트를 사용한 저발열 콘크리트배합으로 변경하여 시공하였다. 다음 표 1은 사용된 저발열콘크리트의 배합표를 나타낸 것이다. 또한 금당교에 적용한 저발열 콘크리트 배합에 대한 단열은 도상승시험 결과는 다음 그림 1과 같다.

표 1 금당교 교대부 저발열 콘크리트 배합 특성

시멘트 종류	W/C (%)	S/A (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	G _{max} (mm)	슬럼프 (cm)
3성분계 저발열 시멘트	38.5	46.0	180	468	742	912	25	15

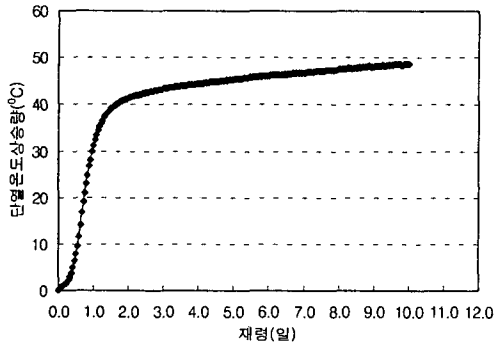


그림 1 금당교 저발열 콘크리트의 단열온도상승시험 결과

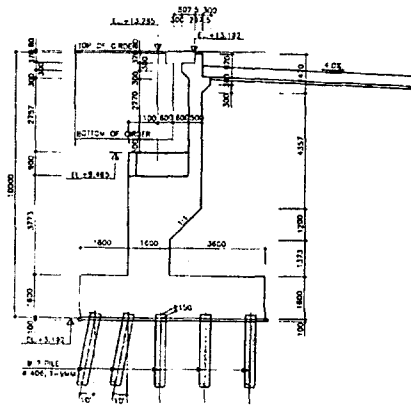


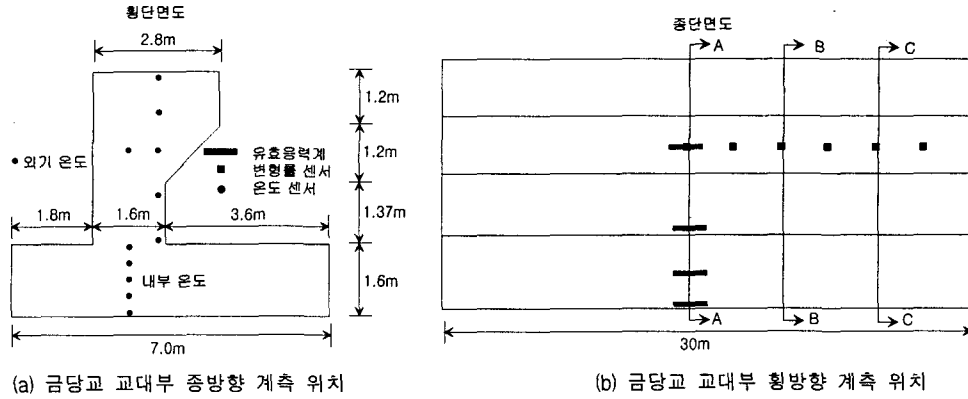
그림 2 금당교 교대부 단면

금당교 교대는 기초부의 경우 1.6m 일괄타설되고, 벽체부의 경우 2회에 걸쳐 분할 타설되었고, 기초부와 그 위에 타설되는 벽체부 3.77m를 대상으로 2회에 걸쳐 현장계측을 실시하였다. 수화열 계측은 크게 온도계측과 응력계측으로 구성되었고, 온도계측은 높이방향으로 5개소에 thermocouple를, 응력계측은 바닥과 중심부에 유효응력계를 매설하였다. 길이방향으로는 대칭성을 이용하여 중앙에서부터 한쪽 방향으로 상부철근에 1m 간격으로 변형률계를 설치하였다. 콘크리트의 초기재령에서 온도응력은 급격한 역학적 특성의 변동으로 변형률의 측정을 통해서 단면내 응력을 산정하기 매우 어렵다. 따라서 금당교 교대부의 하부 및 중앙부에 응력을 직접 측정할 수 있는 유효응력계를 매설하였다.

2.2. 수화열 계측결과

금당교 교대 기초부 높이방향으로 5개소의 온도를 측정하였고 이를 도시하면 다음 그림 4와 같다. 금당교 기초부는 콘크리트 타설 54시간이 경과한 후 최대온도 54°C에 도달하였고, 타설 후 20일이 경과한 후 중심부 온도가 모두 발산한 것으로 나타났다. 기초의 중앙부 응력은 최대 압축응력 13.5kgf/cm²에 도달한 후 하강 곡선을 보이다가 외기온도의 상승으로 다시 압축응력이 상승하는 경향을 보였다. 또한 하부 응력계는 최대 35kgf/cm²의 압축응력을 보였다. 기초부의 응력은 표면부를 제외하고 내부 응력이 모두 압축상태로 균열이 발생하지 않는 결과를 보인다. 금당교 교대 벽체부는 콘크리트 타설 52시간이 경과한 후 최대온도 66°C에 도달하였다. 벽체의 중앙부 응력은 최대 압축응력이 30kgf/cm²,

하부 응력은 최대 22kgf/cm²의 압축응력을 나타낸다.



(a) 금당교 교대부 종방향 계측 위치

(b) 금당교 교대부 횡방향 계측 위치

그림 3 금당교 교대의 단면 및 계측 위치

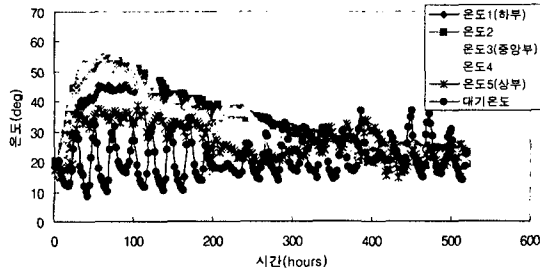


그림 4 금당교 기초부 온도계측결과

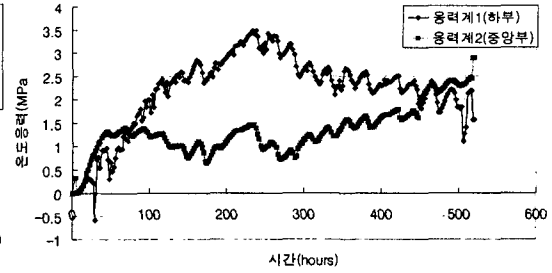


그림 5 금당교 기초부 응력계측결과

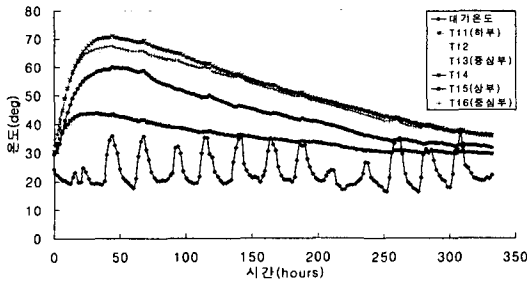


그림 6 금당교 교대 벽체부 온도계측결과

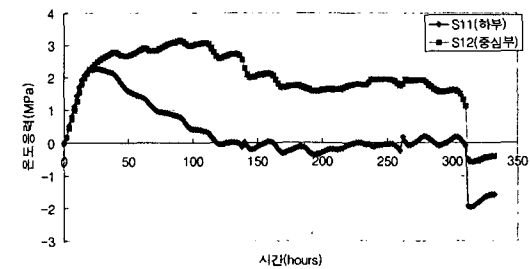


그림 7 금당교 교대 벽체부 응력계측결과

2.3. 수화열 온도균열 발생 현황

금당교 교대기초부는 1.6m 일괄 타설을 실시하였고, 3절에서의 해석결과와 같이 표면 일부에서 온도 균열 가능성이 예상되었으나, 기초부는 온도균열이 전혀 발생하지 않았다.

또한 금당교 교대 벽체부의 경우 단면두께가 1.6~2.8m이고 타설길이가 30m로, 예비 해석결과 저발열 콘크리트 배합의 적용과 온도철근 배근만으로 온도균열을 완전히 제어할 수 없을 것으로 예상되었다. 교대부 콘크리트 타설 결과 약 1.5m간격으로 20개소에서 예상균열이 관찰되었으나, 그 균열폭이 0.1mm 내외의 미미한 균열로 허용균열폭 이내로 제어되었다.

3. 구조해석

3.1. 해석개요

해석의 대상구조물은 교대구조물의 기초부와 벽체부의 시공단계별 수화열 및 온도응력 해석을 통하여 균열발생여부를 검토하였고, 해석프로그램은 온도 및 응력 전용해석을 위해 자체 개발된 프로그램을 사용하였다. 단열온도 상승곡선은 설계강도 300kg/cm² 과 단위시멘트량 468kg/m³을 고려하여 저발열 콘크리트에 대한 식($T = K(1 - e^{-at}) = 47.95(1 - e^{-1.0375t})$)을 사용하였고, 압축강도 및 인장강도 발현곡선은 등가재령을 이용한 성숙도 개념을 적용하였다. 해석시 사용한 해석모델의 재료상수는 표 2와 같다.

표 2 해석모델의 재료상수

물 성	사용재료	콘크리트	지반
비열(kcal/kg · °C)		0.25	0.2
밀도(kg/m ³)		2300	1800
열전도율(kcal/m · hr · °C)		2.3	1.7
대류계수 (kcal/m ² · hr · °C)	대기노출면	20	-
	철제거푸집	12	-
외기온도(°C)		20	20
타설온도(°C)		20	-
압축강도(kgf/cm ²)		300	-
탄성계수(kgf/cm ²)		260000	50000
인장강도(kgf/cm ²)		24.2	-
열팽창계수(/°C)		8.0E-6	8.0E-6
포아송비		0.2	0.2

3.2. 유한요소모델

교대의 콘크리트는 3차원 solid 요소로 모델링하였고, 해석모델의 외곽면은 외기와 대류에 의한 열전달이 발생할 수 있는 조건을 사용하였다. 기초 하면은 흙과 접하고 열전달이 발생하는 것으로 가정하고, 수직변위는 구속하였다. 또한 기초의 파일이 위치하는 점들에서 수평이동을 구속하였다. 기초부의 모델링을 먼저 수행하고, 시공단계에 따라 벽체부를 모델링하였다.

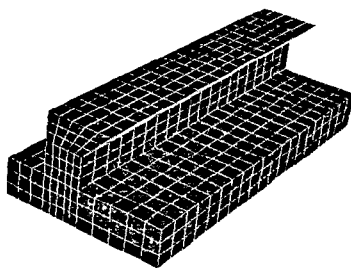


그림 8 온도응력 해석모델

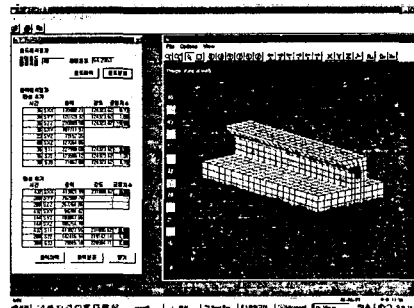


그림 9 금당교 교대부의 온도분포

3.3. 해석 결과

교대부를 타설높이와 타설온도 그리고 시멘트의 종류에 따라 각각 예비해석을 수행하여 온도균열 발생여부를 검토하여 적절한 시공방안을 결정하였다. 본 논문에서는 교대부의 해석결과 중 저발열 콘크

리트를 사용하여 1차 타설높이 2.6m로 분할타설 시공한 경우의 결과를 수록하였다.

온도해석결과 타설 48시간 후에 최대온도 54.3°C의 최대온도가 발현되었으며, 이 결과를 가지고 응력 해석을 수행하였다. 그림 10에서 보여지는 것처럼 응력해석 결과는 타설 후 36시간이 지난 후에 상부 표면부 모서리에 17.09 kg/cm²의 인장응력을 나타내었으며 이때의 균열지수는 0.73으로 균열의 가능성이 존재하였다. 그림 11에서는 교대부 중심부의 X방향 응력 이력을 보여주며, 타설 초기에는 압축상태로 균열이 발생하지 않는다. 그림 12와 13에서는 벽체부 중심부의 온도와 응력이력을 나타내었다. 벽체 중심 응력의 경우 12일 이후에 인장응력이 인장강도를 초과하여 균열가능성이 있다. 따라서 이에 대해 ACI 207.2R에 의거하여 H19@125mm의 온도철근량을 산정하여 허용균열폭 이내로 제어하였다.

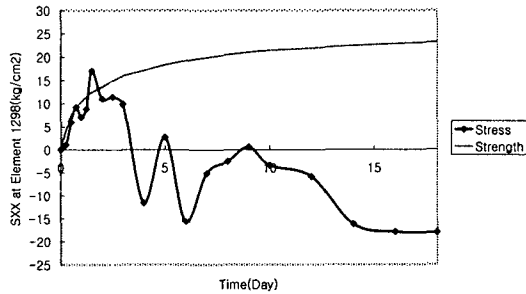


그림 10 교대부 상부표면 모서리의 X방향응력 이력

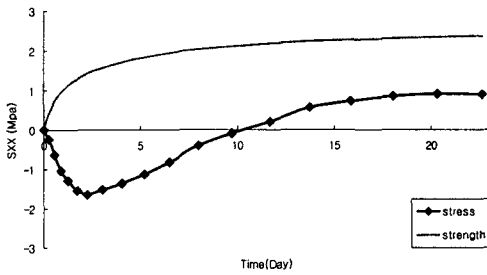


그림 11 기초부 중심부의 X방향응력 이력

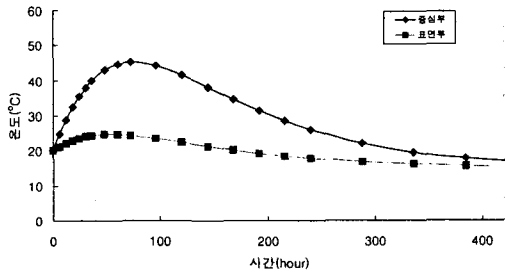


그림 12 벽체부 중심부의 온도이력

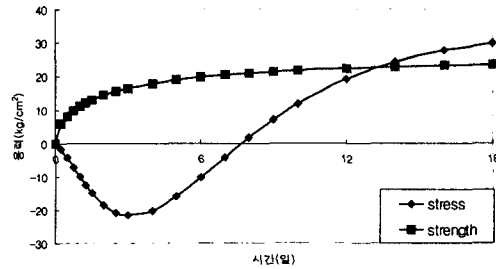


그림 13 벽체부 중심부의 응력이력

4. 결과 분석

그림 14에서 최대온도 발생지점의 시간에 대한 온도이력의 해석 값과 측정 값을 비교하였다. 중심부에서 최대온도가 발생하였고, 측정온도와 해석온도가 거의 일치함을 볼 수 있다. 200시간 이후의 하강 곡선의 차이는 수화반응이 끝나고 외기온도에 의한 영향으로 판단된다. 교대 기초부의 중앙에 매설한 응력계와 해석결과를 비교하면 그림 15와 같다. 중앙부 응력은 초기에 내부구속에 의해 압축응력을 보이고 측정결과와 유사한 값을 보였다. 또한 내부응력은 압축상태로 균열 위험성이 발생하지 않는 결과를 보인다. 교대 기초부의 하부에 매설한 응력계의 측정값과 해석결과를 비교하면 하부 응력은 초기 및 후기 모두 압축응력을 보이고 안전측의 값을 보인다. 시간이력곡선의 경향은 비슷하나 5일 이후에는 1.5MPa의 압축력이 추가로 발생하였다. 이는 추가 타설 또는 시공과정 중의 구조물에 작용하는 하중의 변화에 의한 것으로 판단되어진다.

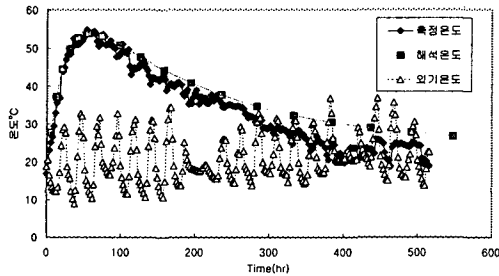


그림 14 금당교 기초 중심부의 온도이력

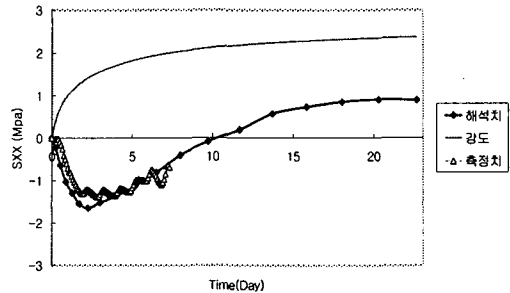


그림 15 기초 중심부의 X방향 응력이력

5. 결론

금당교의 교대구조물의 기초부는 하부 지반의 구속도가 작은 관계로 내·외부 온도차가 가장 클 때 최대 인장응력을 유발하는 내부구속을 받는 구조물이다. 따라서 콘크리트 타설 후 2일 경과시 표면부에서 내·외부 온도차이에 의해 균열이 발생할 가능성이 가장 크고, 또한 최대 인장응력이 발생하는 표면부에서 건조수축 및 소성수축 등으로 인하여 인장응력이 수화열 해석결과보다 클 수 있으므로, 습윤양생 및 콘크리트 온도관리에 주의를 기울여야 한다. 벽체부는 기타설한 하부 기초 슬래브구조의 외부구속에 의하여 온도하강이 완료될 때 단면중상부에서 장변방향으로 최대 인장응력을 유발한다.

기초부 위에 타설되는 벽체하부 단면이 외부구속이 가장 크므로 이 때 수화열에 의한 온도응력이 가장 크다. 금당교 교대구조에 대한 해석과 계측을 통한 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 해석결과 기초부의 적정 시공방안으로는 본 구조물에 적용되는 저발열 콘크리트 배합인 경우 재료의 온도관리를 병행하여 전체 높이 1.6m를 일괄 타설하는 것을 채택하였다. 이러한 시공 중의 계측값은 사전에 수행된 해석 값과 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

(2) 타설 높이의 감소에 따른 수화열의 저감효과는 매우 미미하며, 타설 높이가 감소할 때 L/H비가 커지고 따라서 기타설한 구조체에 의한 외부 구속도가 증가하여 오히려 최대인장응력은 커지는 경향을 보이므로, 벽체하부의 적정 타설높이는 시공성 등을 고려하여 2.6m로 시공하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다.

(3) 예비 해석결과 금당교 교대 벽체부의 경우 단면두께가 1.6~2.8m이고 타설길이가 30m로 저발열 콘크리트 배합의 적용과 온도철근 배근으로 온도균열을 완전히 제어하지는 못할 것으로 예상되었다. 따라서 ACI 207.2R에 의거하여 H19@125mm의 온도철근량을 산정하여 허용균열폭 이내로 제어하도록 하였다. 교대부 콘크리트 타설 결과 약 1.5m간격으로 20개소에서 온도균열이 관찰되었으나, 그 균열폭이 0.1mm 내외로 허용균열폭 이내로 제어된 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. "건설교통부제정 콘크리트 표준시방서", 사단법인 대한토목학회 1999.
2. "광안대로 교각기초 콘크리트의 수화열 제어 연구", 포항산업과학연구원 연구보고서, 1997, 8.
3. "구형산교 재가설공사를 위한 교각기초 콘크리트의 수화열 해석", 포항산업과학연구원 연구보고서, 1999, 5.
4. "합성강교량 적용성 확대를 위한 콘크리트 거동 연구", 포항산업과학연구원 연구보고서, 2001, 6.