

교량교대구조물의 수화열 및 온도응력에 대한 실험적 연구

An Experimental study on the Thermal Stresses in the Massive Abutment of Bridge

권 기 준* / 김 동 백**
Kwon, Ki Jun / Kim, Dong Baek

Abstract

Recently, the massive concrete structures have been increasingly built in Korea. Many reinforced concrete structures have been reported to suffer from cracking in construction stages due to heat of hydration arising from mass concrete. This cracking may cause some serious durability problems and thus reduces the safety and service life of the structures. In this study, the stresses, strains, and temperatures were measured and the crack widths and crack patterns were also observed in the footing and abutment structures. And the causes and mechanism in thermal cracking in the footing and abutment structures are thoroughly analysed. The comparisons of test results with analysis have been made. Efficient crack control techniques were developed form the experimental and analytical studies.

key words : Massive concrete, Thermal stress, Heat of hydration, Abutment

요 지

콘크리트 댐, 원자력발전소 및 항만구조물등의 대형구조물을 시공하기 위해서는 짧은 기간에 막대한 양의 콘크리트를 타설하게 된다. 매스콘크리트 구조물을 시공하는 단계에서 발생하는 수화열은 심각한 온도균열을 발생시켜 본래의 기능수행능력과 사용수명에 있어서 심각한 저하를 초래할 수 있다. 본 연구에서는 매스콘크리트 구조물의 대표적인 예라고 할 수 있는 교대구조물에 대하여 수화열 및 온도응력을 사전해석하고 그 결과를 바탕으로 구조물 성능확보를 위한 온도균열제어대책을 제시하였으며, 제시된 대책을 바탕으로 이루어진 시공현장에서 교대기초부 및 본체부에서의 온도분포와 응력을 계측하고 온도균열 발생양상을 관찰하여 제시된 대책의 타당성을 단계별로 확인하였다.

핵심용어 : 시험유역, GIUH, 지형학적차수, 특성속도

1. 서 론

최근 들어 경제 발전을 위한 국가 기반의 확충으로 고속도로, 신 국제공항, 고속철도, 대규모 해양 구조물, 지하공간 구조물, 항만 구조물 등 초대형 구조물

의 건설이 급격히 증가하고 있는 추세이다. 이러한 초대형 구조물을 건설하기 위해서는 단면이 큰 콘크리트 구조물의 건설이 수반되며 대량의 매스콘크리트 시공이 필연적으로 따르게 된다.

장대교량의 기초 구조물과 교각 구조물을 비롯하여

* 정희원 · 환경대학교 안전공학과 부교수 (e-mail : kjkwon@hknu.ac.kr)
** 정희원 · 환경대학교 토목공학과 교수

콘크리트 댐 구조물, 원자력 발전소의 대규모 기초 구조물, 해양 항만의 구조물, 지하공간의 기초 구조물의 시공을 위해서는 짧은 기간 안에 막대한 양의 콘크리트를 타설하게 되므로 수화열의 발생은 필연적이며 이렇게 내부에 발생된 큰 수화열은 단면이 크므로 인해서 외부로의 열전달이 잘 이루어지지 않고 내부에 구속되어 심각한 열응력을 유발하게 된다. 이때의 문제는 이 과도한 열응력으로 인하여 시공 초기 단계에서 수화열로 인한 심각한 균열이 발생하는 것이다. 이러한 수화열로 인해 발생하는 온도균열은 보통 그 폭이 크고 구조물을 관통하는 경우가 많으며, 구조물의 시공초기에 발생하여 구조물의 내력, 수밀성 및 미관 등과 특히 장기적인 내구성능의 저하를 초래하므로 설계, 시공 및 관리 단계에서 면밀한 검토를 하여야 한다(건설교통부 2003; ACI Committee 207, 1994).

따라서, 본 연구에서는 매스콘크리트의 대표적인 예가 되는 교량의 교대구조물을 대상으로 현장수화열과 온도응력의 계측실험을 수행하고, 이와 병행한 유한요소해석을 통하여 온도균열발생양상을 확인하고 구조물 성능확보를 위한 균열제어대책을 실제현장에 적용하여 그에 따른 타당성을 검토하고자 한다.

2. 매스콘크리트의 수화발열

매스콘크리트는 부재단면의 넓이가 넓은 슬래브 두께가 80cm 이상인 구조물, 하단이 구속된 벽체 두께 50cm 이상인 구조물로서 수화열에 의한 온도균열의 발생이 예상되는 콘크리트 또는 부재단면의 최소치수가 80cm 이상이고 수화열에 의한 콘크리트의 내부최고온도와 외기온도와의 차가 25℃ 이상이 될 것으로 예상되는 콘크리트로 정의 된다(건설교통부 2003; ACI Committee 207, 1994).

매스콘크리트의 수화발열에 영향을 미치는 요인은 다양한데 크게 분류하면 재료특성, 배합, 그리고 온도 등으로 나누어지며 각각에 해당하는 사항은 표 1 과 같이 정리된다. 이 중에서 시멘트의 종류, 단위시멘트량, 그리고 타설온도 세 가지가 가장 지배적인 영향을 미친다.

시멘트를 구성하는 화학성분 및 함유량에 의해 발열량이 달라질 뿐만 아니라 시멘트의 사용량에 따라서 발열반응을 일으키는 성분포함량이 증가하므로 시멘트종류와 사용량이 수화발열에 큰 영향을 미치게 되며, 타설온도에 따라서 발생하는 수화열이 달라진다. 실제해석에 적용하기 위해서는 위에 주어진 조건을 최대온도 상승량과 반응속도지수로 나타내지는 콘크리트 단열상승곡선을 사용한다.

표 1. 매스콘크리트 수화발열에 미치는 요인

| 특성 | 영향인자 | 세부내용 |
|----|--------|---------------|
| 재료 | 시멘트종류 | 화학성분, 분말도 |
| | 골재 | 열특성, 물성, 화학특성 |
| | 혼화재료 | 혼화제, 혼화제 |
| 배합 | 단위시멘트량 | |
| | 단위골재량 | 실적율, 입경 |
| | 기타 | W/C, S/A, 슬럼프 |
| 온도 | 타설온도 | 재료온도, 기온 |
| | 기타 | 운반방법, 타설방법 |

3. 수화열에 의한 온도균열발생기구

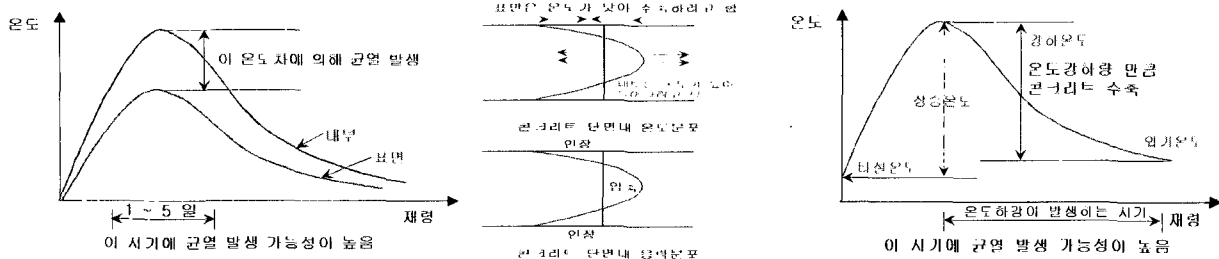
양 시간이 고정된 콘크리트 구조물을 타설한 시점에서 시간에 따른 온도 변화는, 온도의 상승기에는 콘크리트가 팽창하여 단면내에는 일방향으로의 압축응력이 도입되나 온도의 하강기에는 다시 수축하게 되고 이때 단면은 인장응력을 받는다. 온도의 하강량이 클수록 인장응력의 크기는 크고, 이 값이 콘크리트의 인장강도를 초과하는 경우 부재의 균열이 발생한다.

일방향응력과 달리 매스콘크리트인 경우 단면의 응력 분포는 다음의 두 가지 발생기구로 이해할 수 있다. 먼저 매스콘크리트의 온도균열에는 구조체의 내부와 외부의 온도분포 차이에 의해 발생하는 균열과 온도상승에 의해 팽창되었던 콘크리트가 온도강하 시에 수축이 일어나면서 기 타설된 구조물에 의하여 수축이 방해될 받아 발생하는 균열 등 두 가지가 있다.

3.1 내부구속에 의한 응력

내부구속에 의한 균열은 콘크리트의 내부와 표면과의 온도차이에 의해 발생한다. 그림 1에서와 같이 콘크리트의 수화열에 의해 콘크리트의 내부는 온도가 상승하지만 표면은 대기공기에 의해 온도가 낮아지므로, 이 온도차에 의해 균열이 발생한다. 즉, 상대적으로 온도가 낮은 부분의 콘크리트는 수축하려는 것을 상대적으로 온도가 높은 내부의 콘크리트가 구속하여 표면부에 인장응력이 작용하고, 이 응력이 동일재령에서의 인장강도를 초과하면 균열이 발생한다.

표면과 내부의 온도차는 재령 1~5일 정도에서 콘크리트 내부온도가 최고점에 도달할 때 최대가 되는 경우가 많으며, 균열은 콘크리트 온도가 최대가 되는 시점 또는 거푸집 탈형직후에 생기기 쉬우며, 균열은 0.1~0.3mm 정도의 폭을 가지고 그 발생양상은 규칙성이 없으며, 또 단면을 관통하지는 않는다. 그러나 내부구속에 의해 표면에 발생한 균열은 건조수축이나 외



(a) 콘크리트의 온도 분포 (b) 온도변화에 따른 응력 발생
그림 1. 내부구속응력의 발생기구

그림 2. 외부구속응력의 발생기구

부 구속에 의해 커다란 관통균열로 진전하기도 하므로 주의가 요망된다.

3.2 외부구속에 의한 응력

외부구속에 의한 균열은 타설된 콘크리트의 열변형이 지반 또는 기타설한 콘크리트에 의해 구속되어 발생한다. 그림 2에 나타난 바와 같이 타설된 콘크리트는 온도가 최고점에 도달한 후에 최종적으로 외기온도와 같을 때까지 온도가 하강한다. 이 온도강하에 의해 콘크리트의 체적은 수축하지만, 이것이 하층의 콘크리트 또는 지반에 의해 구속되어, 외부구속 균열이 발생하는 것이다. 실제의 온도균열제어 대책으로는 이러한 외부구속균열을 어떻게 제어하는가가 중요한 과제가 된다. 외부구속에 의한 균열은 균열폭이 0.2~0.5mm, 혹은 그 이상이 되는 경우가 많고, 세로로 곧장 뻗은 관통 균열이 되기도 한다.

콘크리트내부의 온도차에 의해 발생하는 응력보다 타설블럭의 크기와 구속도의 영향을 더 크게 받아 내부의 온도응력이 외부구속응력의 크기에 지배받는 경우는 구조물 내부의 응력이 초기에는 단면전체에 걸쳐서 압축응력을 나타내다가 재령이 경과함에 따라 단면전체가 인장응력으로 바뀌게 된다. 따라서 균열발생시 주로 구속면에 대하여 직각방향으로 발생하며 구조물을 관통하는 경우가 많으면 구조물의 내력에도 커다란 영향을 미치게 된다.

3.3 온도균열 저감 대책

수화열에 의한 온도응력 및 균열폭은 구조형식, 경제조건, 재료, 배합, 시공, 양생, 기상조건 등 복합적인 요인의 영향을 받는다. 현재까지의 온도균열 제어대책으로는 재료, 배합, 시공을 적절하게 선택하여 실시함으로써 균열발생을 방지하려는 것이 주를 이루었다. 그러나 균열발생을 완전히 방지하려고 하면 오히려 불합리 또는 비경제적인 설계, 시공이 이루어지는 경우도 있게 된다. 따라서 줄눈부의 간격, 배근 등을 통

하여 온도균열을 제어한다는 관점에서 발생온도, 응력, 균열폭 등을 사전에 예측 계산하여 이에 따른 적절한 제어대책을 수립하는 것이 바람직하다(van Breugel, 1991).

기존의 온도균열 제어대책으로서는 적절한 재료, 배합설계, 배합온도 및 양생을 선정함으로써 균열발생을 방지하려고 하는 입장이 주였지만, 균열발생을 완전히 방지하려고 하면 오히려 불합리 또는 비경제적인 설계 및 시공이 되는 것도 있다. 따라서 적절한 온도균열 제어대책을 마련하려면 재료 및 배합, 시공방법 뿐만 아니라 적절한 이음간격이나 배근으로 온도균열을 제어하려는 관점에서 온도해석, 응력해석 및 균열 폭의 예측계산과 함께 그 예측대로 온도나 응력이 시간 경과에 따른 변화를 보이는가를 관리, 종합적인 판단이 이루어져야 한다.

4. 대상구조물 및 해석모델

대상구조물은 광양시에서 시공되는 제철소 진입로에 위치한 교량으로 폭이 30m이고 전체높이가 10m인 대규모의 교대이며 기초부의 높이가 1.6m, 교대 본체부는 3.77m 이고 교대뒤틀벽의 높이가 4.63m에 달하는 콘크리트 구조물로서, 하부 벽체부분의 두께가 1.6m이고 상부벽체부의 두께가 2.8m인 수화열에 의한 균열발생의 가능성이 높은 매스콘크리트구조물이다.

4.1 계측 센서의 설치

수화열 계측은 그림 3에 보인바와 같이 크게 온도 계측 및 응력계측으로 구성되었다.

기초부에는 높이방향으로 5개소에 Thermo-couple을 매설하여 온도를 계측하였고, 응력계측은 바닥과 중심부 2곳에서 실시하였다. 교대 본체부에서는 6곳의 온도계측과 2곳에서의 응력계측이 이루어졌다. 그림 4는 응력계측을 위한 유효응력계 설치장면을 보여준다.

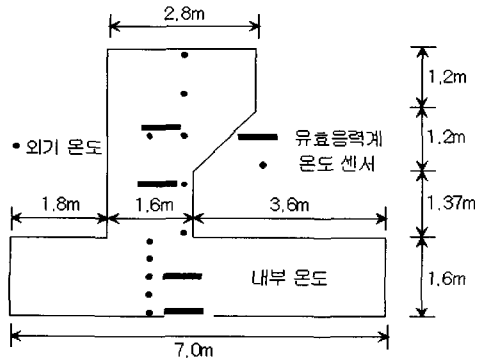


그림 3. 계측 센서의 배치도

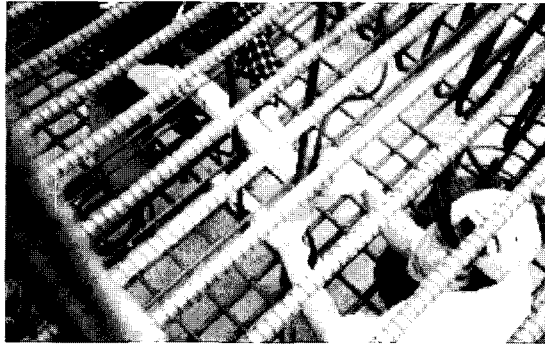


그림 4. 유효응력계 설치장면

4.2 재료물성치

시공에 사용한 콘크리트는 다음 표 2 와 같은 3성분계 저발열시멘트의 배합표를 사용하였다.

표 2. 콘크리트배합표

| 시멘트종류 | 설계강도 MPa | W/C (%) | S/A (%) | W (kg) | C (kg) | S (kg) | G (kg) | G _{max} (mm) | 슬럼프 (cm) |
|-------------|-------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------|-------------|
| 3성분계 저발열시멘트 | 30 | 38.5 | 46.0 | 180 | 468 | 742 | 912 | 25 | 15 |

콘크리트의 압축강도 및 인장강도발현에 대한 해석은 콘크리트시방서상의 모델을 사용하여 해석하였으며 자세한 사항은 표 3 과 같다. 해석을 위한 방법은 POSCO 건설에서 개발한 수화열해석 전용프로그램을 이용하였다.

표 3. 해석모델의 재료물성

| 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) | 측정데이터 | 측정데이터 |
| 타설온도(°C) | 16.8 | |
| 압축강도(MPa) | 30 | - |
| 탄성계수(MPa) | 26000 | 7000 |
| 인장강도(MPa) | 2.42 | - |
| 열팽창계수(/°C) | 8.0×10 ⁻⁶ | 8.0×10 ⁻⁶ |
| 포아송비 | 0.2 | 0.2 |

단열온도 상승곡선은 설계강도 30MPa과 단위시멘트량 468 kg/m³을 기준으로 실험을 통하여 결정하였으며 저발열 콘크리트와 보통콘크리트에 대해 각각

식(1)과 식(2)와 같이 결정하였다. 저발열 콘크리트에 대한 단열온도 상승곡선을 그림으로 나타내면 그림 5와 같다.

$$T = K(1 - e^{-\alpha t}) = 47.95(1 - e^{-1.0375t}) \quad (1)$$

$$T = K(1 - e^{-\alpha t}) = 59.2(1 - e^{-1.56t}) \quad (2)$$

여기서 K는 최대상승온도, α는 반응속도, 그리고 t는 재령(일)을 나타낸다.

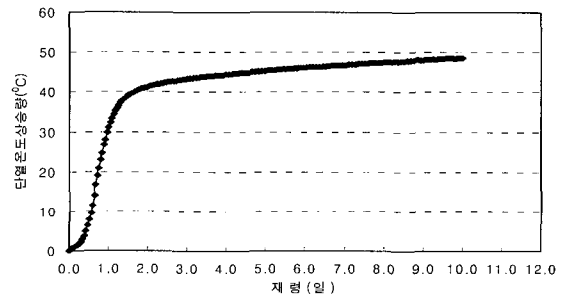


그림 5. 저발열 콘크리트 단열온도 상승곡선

5. 교대구조물의 수화열 및 응력

5.1 교대기초부 계측결과

교대기초부에서의 온도분포는 그림 6에 나타난 바와 같이 단열상승곡선과 비슷한 형태를 가지고 변하고 있으며 상부측은 대기온도에 가까운 분포를 나타내고 하부측은 하부면의 매질이 콘크리트에서 전달되는 열을 식혀주지 못하여 대기면에 접한 상부측의 온도보다 높은 값을 나타내었다. 내부에서는 최고온도가 중앙부에서 계측되었으나 대기면으로 열전달이 하부면 보다 잘 이루어져 최고온도이후에서의 온도는 중앙부 아래에서 대체로 높은 온도특성을 나타내었다.

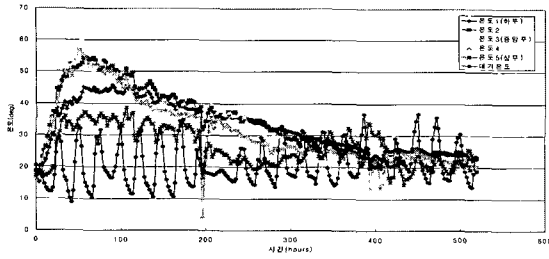


그림 6. 기초부 온도계측결과

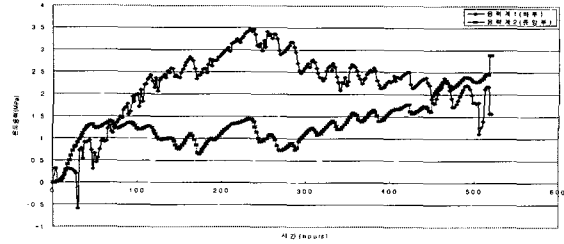


그림 7. 기초부 응력계측결과

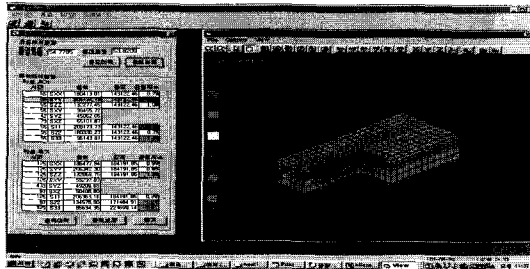


그림 8. 기초부의 최대온도 발생시점의 온도분포

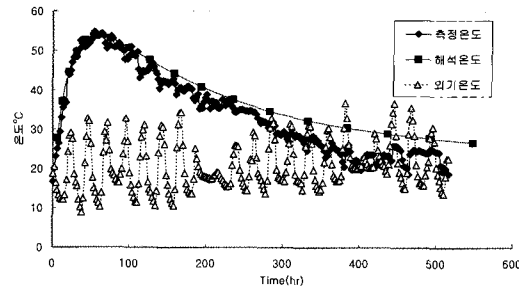


그림 9. 기초 중심부의 온도이력

초기의 응력분포는 그림 7과 같으며 중앙부의 최고 온도에 이르는 시기까지 상승한 이후에 외부온도와 내부온도차이에 의한 영향에 따라 조금씩의 변화는 있으나 비슷한 크기의 분포를 나타내었고 하부에서의 응력분포는 중앙부의 응력상승이 멈춘 이후에도 수화열에 의한 콘크리트의 온도상승의 영향이 미약해져 대기온도와 비슷해지는 시기까지 지속적으로 증가하다가 서서히 감소하는 분포를 나타내었다.

5.2 교대 기초부 해석결과

기초부를 저발열 콘크리트를 사용하여 1.6m 높이로 타설하여 시공한 경우에 대해 해석한 결과에서 타설 54시간 후에 53.82°C의 최대온도를 나타내었으며 그림 8에 최대온도발생시점에서의 온도분포를 나타내었다. 보통콘크리트에서는 타설 이후 42시간에 최대온도가 66.9°C까지 나타났다. 최대온도가 발생하는 지점은 그림에서와 같이 중심부이며 이곳에서 나타나는 수화열에 대한 이력은 그림 9에 계측결과와 함께 나타내었다. 중심부에서 최대온도가 발생하는 것이 시험계측결과와 해석결과가 잘 일치하게 나타나는 것을 그림으로 알 수 있다.

응력해석결과 저발열 콘크리트에서 타설 후 55시간이 지난 후에 1.79MPa의 인장응력이 발현되었으며 이때의 수화열에 의한 온도응력에 대한 인장응력의 비인 균열지수값은 0.69 이다. 보통콘크리트에서는 타설 후 46시간 이후에 2.43MPa의 응력이 발현되어

저발열 콘크리트와 상당히 큰 응력이 빨리 발생되어 균열발생을 유발 할 가능성이 증가하였다. 최대온도가 발생하는 지점에서의 응력이력을 그림 10에 콘크리트의 재령별 인장강도와 비교하여 나타내었다. 해석결과 최대값이 발생하는 시점에서는 응력이 강도를 짧은 기간동안 상회하는 형태를 보이다가 강도가 응력보다 커지는 양상을 나타낸다.

기초부 최대응력발생 지점에서의 해석값이 주어진 재령에서 인장강도를 초과하는 결과를 보이고 있으나 실제 균열은 발생하지 않았다. 이는 콘크리트 타설 이후 초기재령의 낮은 강도발현시기에 계산되는 실제응력이 강도를 초과하는 값을 나타내는 경우가 있으나, 콘크리트 요소가 구축되면 콘크리트의 점탄성효과가 시간에 따른 점진적인 응력의 감소를 유발하게 되어 실제로는 탄성인장응력의 이론적 해석에 의해 예상되는 강도와 일치하지는 않는 현상을 나타나게 된다 (Metha and Monteiro, 1993).

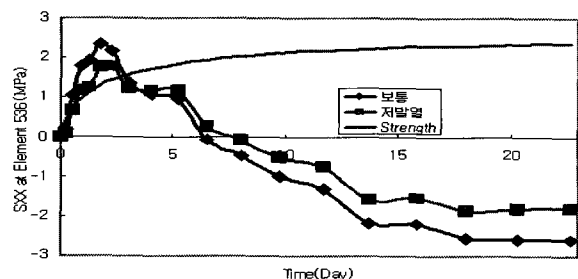


그림 10. 기초부 최대응력 발생지점의 응력이력

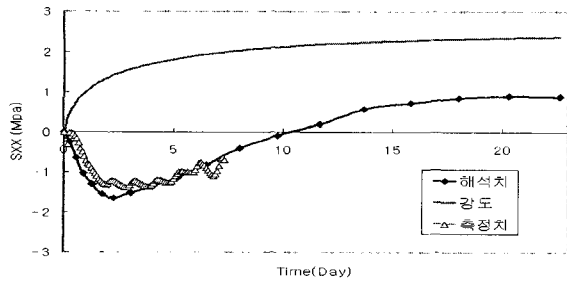


그림 11. 기초중심부의 장변방향 응력이력

그림 11에 나타난 기초 중심부에서의 응력은 강도를 초과하지 않아 온도균열이 발생하지 않았다. 기초 하부에서의 응력이력 계측결과는 그림 12에 제시되어 있는데, 응력계가 묻혀 있는 두 곳에서의 해석결과와 계측치가 기초중심부에서는 거의 일치하는 양상을 보이고 하부에서는 5일 이후부터 편차가 발생하는 결과를 확인할 수 있다.

하부에서의 결과가 해석값과 차이를 보이는 이유는 타설된 곳의 지반특성, 지하수위, 콘크리트와의 접촉에서의 구속정도 등에 대한 값을 정확하게 반영하기 힘든 영향으로 보인다.

5.3 교대부의 수화열 및 응력 계측

교대 벽체부는 기타설한 하부 기초 슬래브구조의 외부구속에 의하여 온도하강이 완료될 때 단면중앙부에서 장변장항으로 최대인장응력을 유발한다. 벽체부 시공전 수화열 해석결과 기초부 위에 타설되는 벽체 하부 단면이 외부구속이 가장 크므로 이 때 수화열에 의한 온도응력이 가장 크다. 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 3.77m로 시공하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다.

교대에서의 온도분포는 그림 13과 같으며 교대하부

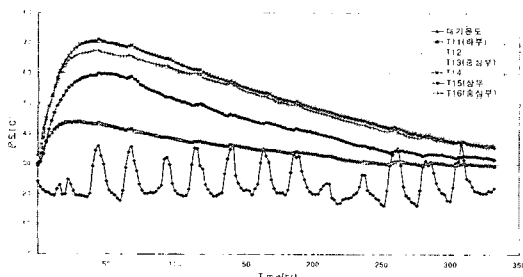


그림 13. 교대부 온도계측결과

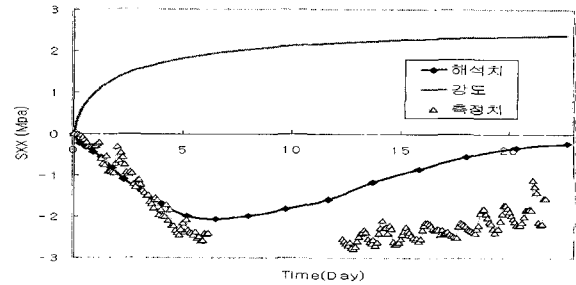


그림 12. 기초하부의 장변방향 응력이력

에서 가장 낮은 값을 보였으며 중앙상부부근에서 가장 높은 온도가 계속되었다. 교대하부의 폭이 1.6m인 데 비해 상부단면은 폭이 2.8m로 넓어져 수화열의 방사가 원활하지 못하였고 하부계측기가 콘크리트 외부면에 가깝게 설치된 결과로 볼 수 있다. 같은 높이의 중앙부 두 곳에 위치한 온도계측기에서는 거의 차이를 보이지 않는 비슷한 결과를 보이므로 온도분포는 높이와 외부면과의 거리가 인자로 작용하는 것을 알 수 있다.

응력계측결과는 그림 14에서와 같이 교대부의 하부에서 초기에 상승하던 응력이 하강하여 잔류응력이 거의 나타나지 않게 되나, 중심부에서는 온도상승과 함께 진행되던 응력곡선이 온도하강시에도 지속적인 증가를 보이다가 하부에서의 응력값이 거의 사라지는 시기에 감소를 보이고 있다. 이러한 응력특성은 크리프의 영향이 작용하여 외부구속조건이 완화되는 결과로 볼 수 있다.

5.4 교대부 해석결과 분석

저발열시멘트를 적용한 경우 해석결과에서 교대중심부에서의 응력이 그림 15에서와 같이 콘크리트 타설 15일 이후까지 점진적으로 증가하여 4.22MPa에 이르렀고 온도균열이 발생할 가능성이 있다고 판단되었다. 이에 따라 온도균열을 허용균열폭 이내로 제어하기 위해 온도철근량을 125mm 간격으로 H19 철근을 배근하는 방안을 도출하였다.

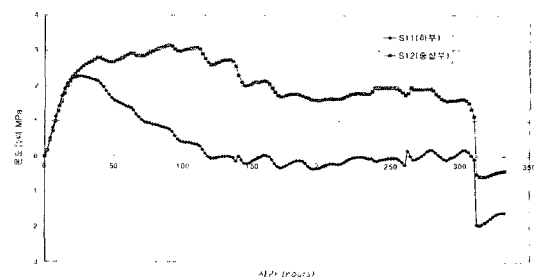


그림 14. 교대부 응력계측결과

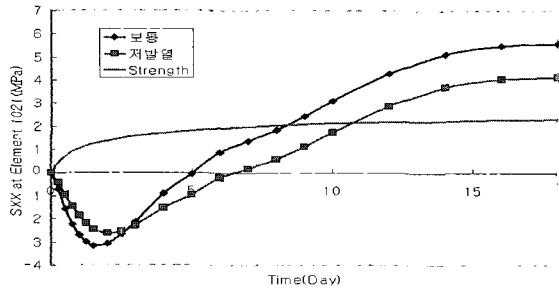


그림 15. 교대 중앙부에서의 응력이력

타설 후 36시간이 지난 후에 상부 표면부 모서리에 1.71MPa의 인장응력을 나타내었으며 이때의 균열지수는 0.73 이다. 장변방향 응력이력그래프를 그림 16에 나타내었다.

교대부 콘크리트 타설 결과 약 1.5m간격으로 20개소에서 온도균열이 관찰되었으나 그 균열폭이 0.1mm 내외로 분포되어 허용균열폭 이내로 제어된 것으로 관측되었다.

6. 결론

본 논문에서는 매스콘크리트 구조물의 한 예로서 교량의 교대구조물에서 시공시에 발생하는 수화열에 의해 야기되는 온도균열문제를 해결하기 위해 사전해석을 실시하여 균열제어대책을 제시하고, 실제 시공현장에서 계측을 수행하였다.

사전 해석결과에서 교대 기초부의 시공은 전체 높이가 1.6m에 대해 콘크리트를 일괄 타설하였으며 예상대로 온도균열발생이 관측되지 않았다. 또 교대 본체부에서는 타설높이를 제안하고 균열제어를 위해 온도철근을 배근하였으며 그 결과 균열이 허용균열폭 이내로 제어된 결과를 보였다.

교대 각부분에 대해 시공 중 이루어진 계측값은 온

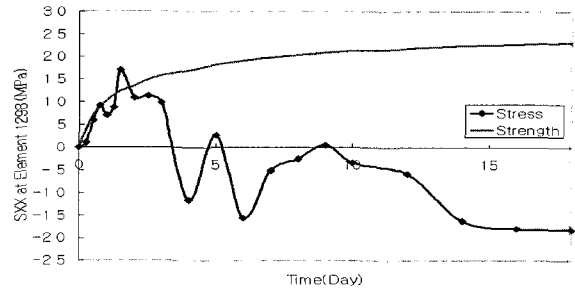


그림 16. 교대부 모서리의 장변방향 응력이력

도분포와 응력발생양상에서 사전에 수행된 해석값과 잘 일치하고 있으며, 이러한 관측을 통하여 제시된 균열제어 대책의 타당성을 확인하였다.

참고 문헌

- 건설교통부(2003), '콘크리트표준시방서', pp. 228-250.
- ACI Committee 207(1994), "Effect of concrete for dams and other massive structures", ACI Manual of Concrete Practice, 207.1R.
- Metha, P. Kumar and Paulo Monteiro(1993), Concrete Structure, and Properties, and Materials, 2nd Ed., Prentice Hall.
- van Breugel, K.(1991), "Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement based materials," PhD dissertation, Delft Univ. of Tech., Delft, The Netherlands.

© 논문접수일 : 2006년 03월 07일

© 심사의뢰일 : 2006년 03월 08일

© 심사완료일 : 2006년 03월 28일

