

## 계측에 의한 지하철 박스구조물 벽체부의 균열 및 구조거동 예측

# Pre-estimate on Structural Behavior and Cracks of Subway Wall Structures Using Gage Measurement

김상철\* · 김영진\*

Sang-Chel Kim · Young-Jin Kim

### Abstract

By measuring concrete temperature and strains of concrete and reinforcing bars throughout gages embedded and also by observing the crack occurrence, this study aims at the characteristics of structural behavior of subway wall structure in associate with concrete ages. The length of 23.5m, thickness of 2.0m of real subway custody line was selected as a representative structure and 7 thermocouples and 6 strain gages were installed to measure the behavior of wall structure. The results were compared and verified with analytical results using MIDAS in order to show their usefulness. It was found that only attachment of strain gages on the surface of reinforcing bars can figure out the timing of crack occurrence and hydration heat program is useful to estimate comparatively exact magnitudes of temperature. Since estimated time of crack occurrence throughout thermal stress analysis depends on the period of transferred thermal stress from concrete to reinforcing bars, however, cracks from naked eyes were identified later than analytical results. Cracks were observed first at the center of wall line and then to the end of line symmetrically.

**Keywords** : Subway wall(지하철 벽체부), Gage(게이지), Hydration heat(수화열), Crack occurrence(균열발생)

## 1. 서론

최근 도시 교통문제의 해결을 위한 대안으로 국내에서는 대도시를 중심으로 지하철 건설이 적극적으로 추진되고 있다. 일반적으로 지하철 박스구조물의 설계는 극도로 정형화된 조건하에서 지하에 설치되는 최종단계만을 고려하고 있지만, 실제 건설공사는 토공사, 가시설공사, 구조물공사, 방수공사 등 일련의 복합공정으로 이루어져 있어 시공 중에는 지상에 노출되고 시공 완료 후에는 뒤채움 및 성토를 하여 지중으로 매설되는 단계적 시공특성을 갖고 있다.

이 과정에서 시공순서나 환경조건이 설계조건과 상이함으로 인해 실제 박스 구조물에는 균열이 다수 관찰되고 있으며, 균열의 보수를 위해 추가 공사비가 투입되는 등 적지 않은 경제적 손실이 발생되고 있다. 그 중에서도 지하철 개착구간의 철근콘크리트 구조물 공사에서 발생하는 초기재령 균열은

당초 그 크기가 작아도 준공 후 상부에서 전달되는 상재 및 토피하중과 측벽에서 작용하는 횡토압 및 지하수압으로 인해 균열의 폭이 증가되고, 누수를 동반하여 점차 사용성을 저감시키고 장기적으로는 구조물의 내구성을 저감시키게 된다. 이러한 균열을 줄이기 위하여 지하구조물을 위한 수밀콘크리트 개발[1], 수화열에 매스콘크리트 박스 라멘 구조물의 구조거동 연구[2], 콘크리트 건조수축 제어를 위한 합리적인 최소 철근량 산정에 관한 연구[3] 등이 수행되어 왔으나 주로 일부 요인에 대한 재료 및 부재 수준의 실내실험이나 이론적 연구에 집중되었으며, 지하철 실물구조물의 균열 및 역학적 거동을 규명하기 위한 구조물 수준에서의 연구는 다소 부족하였다.

따라서 본 연구에서는 실제 시공현장의 실대 구조물인 지하철 유치선 벽체에 계측기를 매설하여 재령에 따른 콘크리트의 수화열 발생량, 콘크리트와 철근의 변형률, 균열폭의 변화 등을 계측하고 그 거동특성을 이론적 해석결과와 함께 비교, 분석하고자 하였다.

† 책임저자 : 정희원, 한서대학교 토목공학과 교수  
E-mail : schkim@hanseo.ac.kr  
TEL : (041)688-0182 FAX : (041)660-1052

\* 대우건설기술연구원 토목연구팀 수석연구원

## 2. 기존 지하철 벽체 구조물의 균열특성

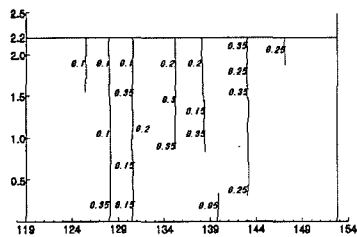
Fig. 1은 지하철 박스구조물 벽체부에 발생한 균열의 발생 추이를 재령별로 나타낸 사례이고, Table 1은 조사 구조물의 시공조건을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 지하철 벽체에는 수직균열이 주로 관찰되고 있는데, 초기 재령 7일 이내에 전체 균열개소의 55%가 발생된 것으로 관찰되고 있다[4].

관찰된 균열형태, 균열발생시기 등에 근거할 때 초기재령에서의 건조수축수화열에 의한 재료적 요인과 수축온도 철근 등에 의한 설계상의 요인, 줄눈의 설치, 콘크리트의 타설 다짐양생불량 등의 시공상의 문제 등 복합적인 요인이 그 원인으로 추정되지만, 그 중에서도 초기재령에서 수화열과 건조수축에 의한 체적변화가 주된 요인이라고 판단된다.

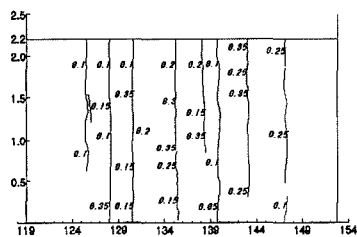
## 3. 실대 구조물 계측계획

### 3.1 대상구조물

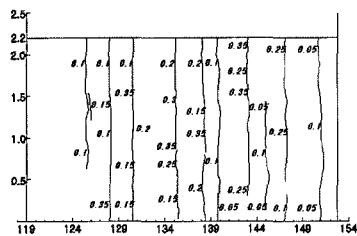
실물 구조물에서의 균열 및 구조거동을 계측하기 위해 대상구조물은 실 지하철 유치선 박스구조물의 벽체 일부분을



(a) 7 days



(b) 9 days



(c) 15 days

Fig. 1. Phenomenon of crack propagation on wall according to concrete age

선정하였다. 유치선의 단면 형상은 Fig. 2와 같다. 대상 벽체는 1회 타설길이 23.5m, 두께 2.0m의 박스구조물로서 하부 현치부 위에 타설되는 1.5m 높이의 1단 타설 벽체 구조물을 대상으로 하였다.

계측 대상인 벽체 구조물의 콘크리트 타설은 슈트를 이용하였다. 시공순서는 길이 방향으로 대상 벽체의 중심을 기준으로 우측부분을 먼저 타설하고 연속하여 나머지 절반을 타설하였으며 전체 타설시간은 약 1시간정도 소요되었다. 타설에 사용된 콘크리트는 설계기준강도는 24MPa이고, 배합표는 Table 2와 같다.

### 3.2 계측계획

계측기는 벽체 길이 방향 중앙을 기준으로 대칭 조건에서 처음 시점에서 중간 지점인 11.75(23.5/2)m 구간까지 매설하

Table 1. Construction and survey conditions of subway wall

구분	내용	비고
설계기준강도	24MPa	
제원	타설길이 33m 타설높이 2.2m 벽체두께 1.0m	
시공조건	콘크리트타설 거푸집탈형	4월 17일 4월 22일(재령 5일)
균열조사	1차 조사 2차 조사 3차 조사	4월 24일(재령 7일) 4월 26일(재령 9일) 5월 2일(재령15일)

Table 2. Mixture proportion of concrete

Gmax (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	s/a (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	AD
25	12	4.5	46.0	46.5	169	367	828	970	1.84

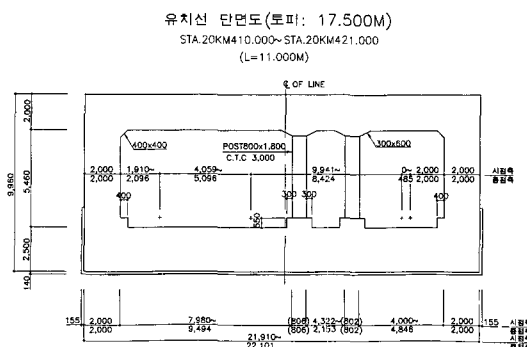


Fig. 2. Section of custody line

였다. Fig. 3은 계측항목과 각 계측기의 매설 위치를 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 온도계는 벽체의 상단, 중간 및 하단의 3개소에 벽체의 중심부와 표면부로 나누어 6개소와 외기온도 측정을 위해 외부에 노출된 상태로 1개소로 하여 총 7개소를 설치하였다. 또한, 타설 블록의 길이방향으로의 변형을 및 응력 측정을 위해 변형률계를 벽체하단에 설치하였다. 균열발생현황은 콘크리트 재령 3일에 거푸집을 제거한 직후부터 재령별 균열도를 작성하였고, 중간단면에서의 최대 균열폭을

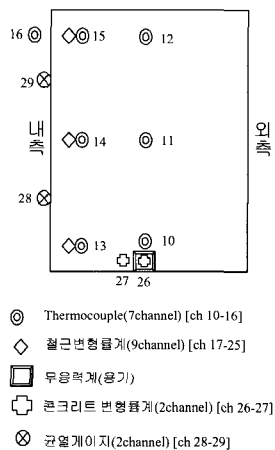
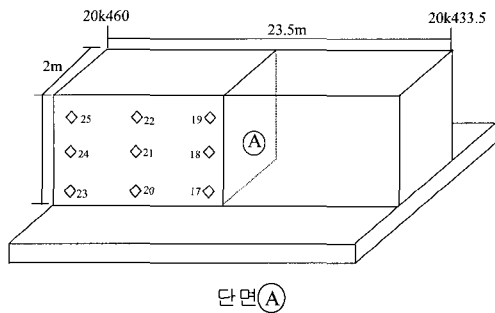


Fig. 3. Gage locations

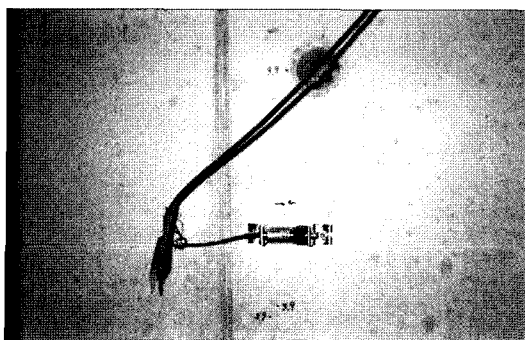


Fig. 4. Configuration of crack gage installation

맞는 균열에는 파이형 균열게이지를 부착하여 재령별 균열폭 변화를 측정하였다. Fig. 4는 균열게이지 부착 전경을 나타낸 것이다.

각 계측기의 계측간격은 벽체 콘크리트 타설 직전부터 시작하여 30분 간격으로 7일간 측정하였고, 그 후 재령부터 30일까지는 4시간 간격으로 측정하여 총 재령 30일까지 측정하였다. 또한, 현장에서 벽체 콘크리트 타설시 동시에 제작한 원주형 공시체를 이용하여 압축강도를 측정하고 이를 바탕으로 인장강도 및 탄성계수를 추정하였다.

균열발생의 모니터링은 5일간의 양생을 실시한 후 거푸집 탈형과 동시에 시작하였으며 재령별로 균열발생 빈도, 길이 및 균열폭 등을 조사하여 기록하였다. RC 박스의 상부슬래브에서는 균열이 전혀 발견되지 않았으므로 벽체에서 발견되는 균열만을 위주로 조사하였다. 균열 조사는 콘크리트 타설 후 뒤채움 및 성토 이전까지 약 3개월간 실시하였다.

#### 4. 계측결과 및 분석

##### 4.1 콘크리트의 역학적 특성

콘크리트의 재령별 강도특성을 분석하기 위하여 대상 구조물을 타설할 때와 동일한 배치에서  $\Phi 10 \times 20\text{cm}$  공시체를 제작하고 재령 2, 3, 7, 14, 28, 91일에서 압축강도를 측정하였다. Fig. 5는 각 재령별 콘크리트의 압축강도변화를 나타낸 것으로 콘크리트표준시방서의 매스콘크리트편에서 제시하고 있는 강도추정식과 비교한 결과, 그림에 나타난 바와 같이 실험값과 거의 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

압축강도에서 얻은 결과를 토대로 하여 온도응력 해석에 사용될 재령별 인장강도와 탄성계수의 추정식을 나타내면 다음 식 (1), (2)와 같다.

$$f_{sp}(t) = 2.95 \sqrt{\frac{t}{4.5 + 0.95t}} \quad (1)$$

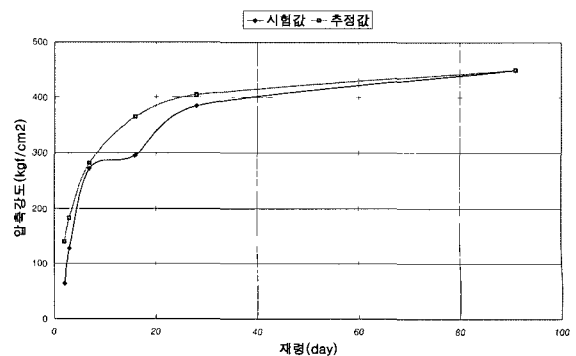


Fig. 5. Compressive strengths vs. elapsed time

$$E_c(t) = \psi(t) \times 31,529 \times \sqrt{\frac{t}{4.5 + 0.95t}} \quad (2)$$

여기서,

$f_{sp}(t)$  : 재령 t일의 콘크리트 인장강도(MPa)

$\psi(t)$  : 온도상승시 크리프 영향을 고려한 탄성계수 보정계수

$E_c(t)$  : 재령 t일에서의 유효탄성계수(MPa)

#### 4.2 콘크리트의 수화열

Fig. 6은 벽체 각 부분에서의 수화열 제측결과를 나타낸 것으로, 콘크리트 수화열은 타설시의 반죽온도 18.5℃로부터 상승하기 시작하여 약 40시간(약 1.7일)이 경과한 후에 최대 값에 도달하고 그 이후부터는 강하되어 약 400시간(약 17일) 경과한 후에 외기온도에 거의 근접하는 거동을 나타내었다. 벽체 중앙부의 하단, 중간, 상단에서의 최고 온도는 각각 50.1℃, 62.7℃, 45.4℃이었고, 수화열은 내부의 중간 부분이 가장 높았으며 외부기온의 영향을 가장 많이 받는 상단의 온도가 가장 낮게 나타났다.

실측 결과와의 비교를 위해 실 구조물과 동일한 조건으로 범용 프로그램(MIDAS)을 이용하여 수화열 해석을 수행하였다. Fig. 7은 수화열 해석을 위해 적용한 수치해석모형을 나타낸 것이고, Fig. 7 상에 나타난 각 표식점에 대해 수화열 발생

결과를 Fig. 8에 도시하였다. 본 해석에서는 먼저 바닥 슬래브를 타설한 후 7일(168시간)이 경과하였을 때 벽체를 타설하는 것으로 타설 단계별 해석을 수행하였기 때문에 실측 결과곡선과 다른 형상이 나타나고 있다. 즉, 벽체 하부(바닥슬래브의 상부)는 최고 온도에 도달한 후 온도가 강하되는 시점에서 다시 벽체를 타설하였기 때문에 그 후부터는 그 영향으로 인해 다시 온도가 상승되는 형상이 나타나게 된다. 따라서 해석상에서 나타난 7일이 실측치에서는 계측시점이 되는 것으로 최대온도 발생시기를 서로 비교하여 보면, 해석상에서는 측정 위치에 따라 차이가 있지만 32~52시간에서 발생되고 있어 실측값과 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다. 또한, 최대온도 크기에 있어서도 측정위치에 따라 다르지만 1~5℃의 차이가 나타나고 있어 필요에 따라 실측을 수행하지 않고 수화열 해석만을 통해 평가하여도 무방하다는 것을 알 수 있다. 다만, 타설을 고려한 단계별 해석을 수행하지 않고 바닥슬래브와 벽체를 전체 일괄타설로 해석한 경우에는 벽체 하단부에서 10℃ 이상의 실측치와의 오차가 발생되므로 수화열의 과대 평가를 방지하기 위해서는 현장의 타설 순서를 고려한 단계별 해석이 필요하다. Fig. 9는 해석을 통한 온도분포도를 예상한 바와 같이 벽체 내부 중앙부에서 가장 높은 온도분포가 나타나고 있다.

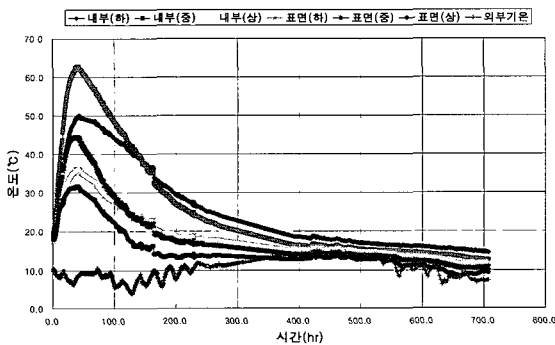


Fig. 6. Results of hydration heat measured on each position of wall

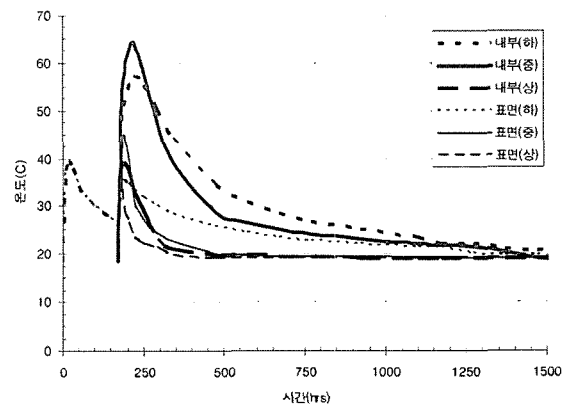


Fig. 8. Results of hydration heat analysis

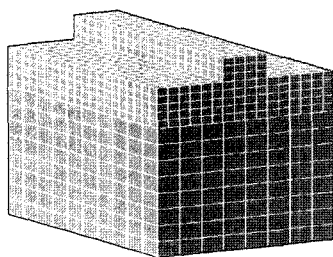


Fig. 7. Modelling configuration of hydration heat analysis

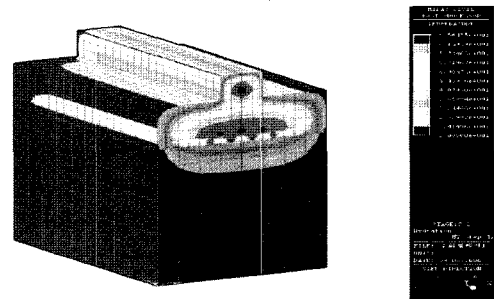


Fig. 9. Contour of hydration heat distribution(after 220hrs)

### 4.3 콘크리트의 변형률

벽체 단면의 중앙 하단부에 매설한 콘크리트 변형률 게이지를 이용한 재령별 변형률을 도시하면 Fig. 10과 같다. 콘크리트 변형률은 초기 4시간까지는 증가하다 20 $\mu$ 에 이른 후에는 감소하기 시작하여 48시간 후 최저점(-259 $\mu$ )에 도달하였다. 최저점에 이른 콘크리트의 변형은 다시 증가하다가 240시간에서 갑작스런 감소를 보였다. 1 step(30분)당 평균 1~2 $\mu$  정도 변화가 나타났지만, 이 시점에서는 갑자기 30 $\mu$ 정도 감소한 후 다시 증가하기 시작하여 최종적으로는 약 -50 $\mu$  정도의 변형률에 수렴하고 있다. 변형률의 갑작스런 감소 시점은 계측기 설치위치까지 균열이 발생되었다는 것을 의미하는 것으로, 철근의 변형률도 비슷한 시간에 급격히 증가(25 $\mu$ )하는 것으로 보아 균열과의 연관성이 더욱 확실해진다. 즉, 경화 중 콘크리트 내부에 인장력이 발생하고 점점 증가하여 콘크리트 인장강도를 넘어서는 순간 변형률이 급격히 증가하고 이러한 인장력을 한동안(17시간) 철근이 유지하고 있다가 어느 순간 철근에도 인장력이 미치면서 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

### 4.4 수축 및 온도철근의 변형률

Fig. 11(a)는 Fig. 3의 17, 20, 23번 철근 변형률 게이지에 의한 재령별 변형률 계측결과를 나타낸 것이고, Fig. 11(b)는 벽체 외측부에 있는 23, 24, 25번 철근 변형률 게이지의 재령별 변형률 계측결과이다.

그림에서 철근 변형률의 전체적인 거동이 재령 약 20~40시간까지는 압축거동을 보이다가, 재령 약 100시간까지는 인장거동을, 다시 재령 약 250시간까지는 압축거동을 그 이후에는 안정된 값에 도달하는 것으로 나타나고 있다. 이는 첫 번째 압축→인장거동의 변화는 외적요인으로 작용되는 수화열과 관계된 것으로 판단되는데, Fig. 4를 참조하면 수화열이 최대로 되는 재령 약 40시간과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그 이후의 두 번째 압축→인장 거동의 변화는 균열발생에 따른 철근 변형률의 변화와 관계가 있는 것으로 판단된다.

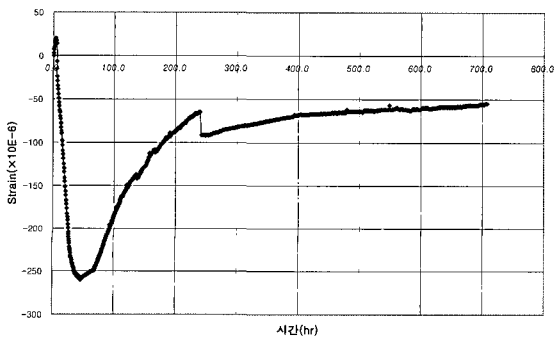
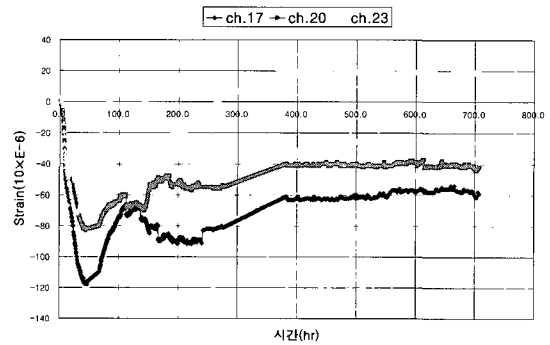


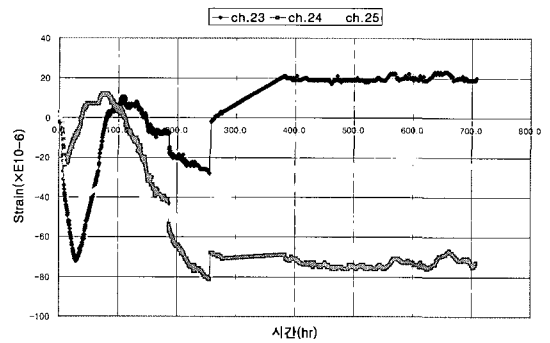
Fig. 10. Result of measured strains in concrete

### 4.5 균열발생 거동 분석

앞서 수화열 해석으로부터 재령별 구조물의 각 위치에 발생하는 인장응력을 구하고 콘크리트표준시방서에서 제시하고 있는 온도균열지수를 통해 제시된 실 지하철 박스 구조물의 균열발생 여부를 평가하여 보았다. Figs. 12와 13은 온도응력해석을 통해 각각 바닥슬래브의 상부와 벽체부에서의 인장응력의 이력을 나타낸 것으로 전체적으로 최대인장응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하고 있어 균열발생 가능성이 매우 높다는 것을 알 수 있다. Fig. 12의 경우 재령 20시간이



(a) Strains of reinforcing bars in a horizontal direction



(b) Strains of reinforcing bars in a vertical direction

Fig. 11. Result of measured strains in reinforcing bars

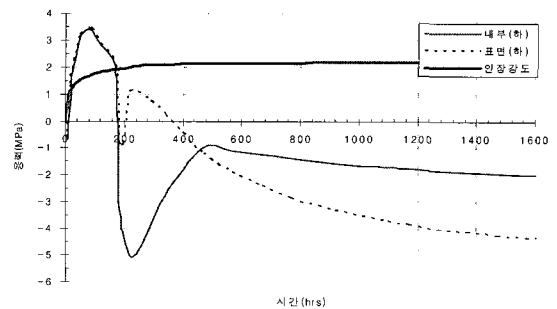


Fig. 12. Analytical results of thermal stresses on the bottom of wall

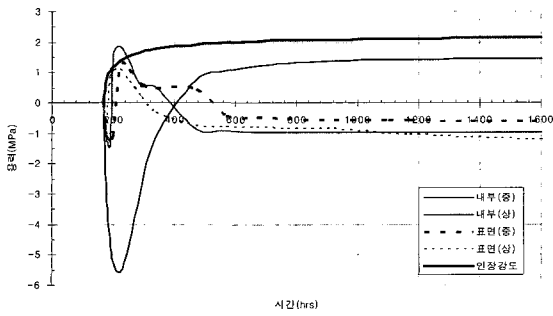


Fig. 13. Analytical results of thermal stresses on the upper and lower parts of wall

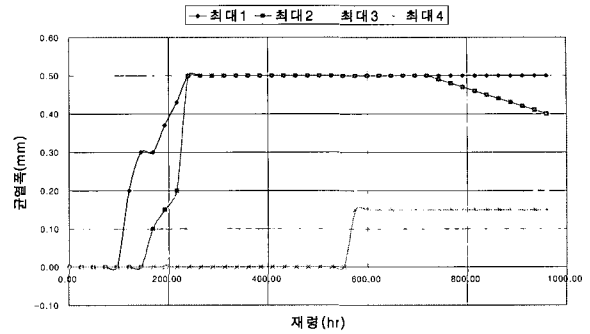


Fig. 15. Max. crack width of wall associated with concrete age

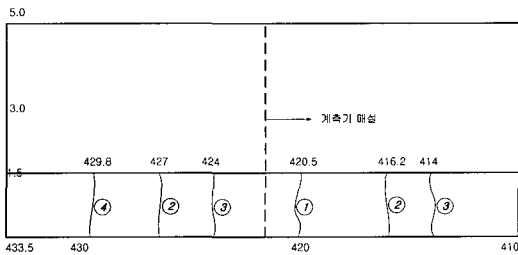


Fig. 14. Configuration of crack pattern

경과되었을 때 이미 온도균열지수가 0.86 및 0.89로써 벽체 하단부에 온도균열이 발생되었을 가능성이 높으며, 최대온도가 발생하는 시점에서는 온도균열지수가 0.48, 0.49로써 이미 균열이 진행된 것으로 분석된다. 또 Fig. 13에서 나타난 바와 같이 벽체의 표면부를 중심으로 벽체를 타설한지 40~52시간이 경과한 후에는 인장응력이 인장강도를 초과하거나 인접하고 있어(온도균열지수 0.74~1.11) 이미 초기 재령에서 균열발생가능성이 높은 것으로 해석되었다.

Fig. 14는 실 벽체 구조물에서 발생한 균열의 발생순서와 위치를 조사하여 나타난 것이고, Fig. 15는 계측기가 매설된 부분의 최대 균열폭의 변화를 도시한 것이다. 균열은 재령 6일에서 ①번 균열(1개소)이 처음 관찰되었고, 재령 7일에서 ②번 균열(2개소), 재령 9일에서 ③번 균열(2개소), 재령 24일에서 ④번 균열(1개소)로 총 6개소가 관찰되었다. 균열간 평균간격은 약 3.2m 정도, 최대 균열폭은 0.5mm까지 발생하는 것으로 나타나고 있었다. 이와 같이 균열의 발생시기가 해석결과와 다르게 나타난 것은 수화열에 의해 발생한 인장응력이 콘크리트의 인장강도를 초과함에 따라 콘크리트에 분담되던 응력이 점차적으로 구조물 내부에 설치된 철근으로 전달되고, 육안으로 구분되는 균열의 크기로 나타나는 데 소요되는 철근 변형의 시간에 기인한 것으로 판단된다.

계측된 전체적인 균열의 양상은 대체로 벽체 길이 방향의 중앙에서부터 발생하여 차차 양 단부쪽으로 발생위치가 이동되었으며, 벽체 길이의 반을 중심으로 좌우에 각각 3개소씩 발생하여 대칭적인 형상을 나타내었다.

### 5. 결론

본 연구는 두께 2.0m, 타설길이 26.5m, 타설높이 1.5m의 지하철 시공현장의 실대 벽체 구조물을 대상으로 계측기를 매설하여 재령에 따른 콘크리트 구조물의 수화열, 콘크리트와 철근의 변형률 및 균열발생 양상을 측정함으로써 지하철 구조물의 거동특성을 파악하고자 하였다. 본 구조물에 대한 계측과 수화열 해석을 통해 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 대상구조물의 수화열은 타설시의 반죽온도 18.5℃로부터 상승하기 시작하여 약 40시간 경과 후에 최대값에 도달하고 그 후에는 강하되어 약 17일 경과한 후에 외기온의 변동에 거의 근접하는 거동을 나타내었다. 수화열 해석을 통한 결과와 비교하였을 때 실 계측결과와 최대온도 및 발생시기가 거의 일치하고 있어 번거로운 계측기 설치를 하지 않더라도 현장 배합비와 콘크리트 타설 순서를 고려하여 수화열 해석을 수행한다면 근사한 값을 얻을 수 있다.
- (2) 철근 변형률은 수화열과 균열발생의 영향으로 압축→인장→압축→인장의 변화를 나타내었으며, 갑작스런 변형률의 변화는 균열로 인해 발생된 것으로 이를 통해 균열 발생시기의 추정이 가능하다.
- (3) 벽체부에 있어 균열은 재령 6일에서 처음 관찰되었고, 재령 24일까지의 초기재령에서 전체 균열 6개소가 전부 발생되었으며, 균열은 점진적 형태로써 대칭적인 형상을 나타내었다.

## 참고 문헌

1. 백상현, 박성수 외 4인 (1999), “지하구조물을 위한 수밀콘크리트의 개발 및 실용화”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제11권, 제2호, pp.259-262.
2. 허민희 외 2인 (1999), “수화열에 의한 매스콘크리트 박스 라멘 구조물의 구조거동 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제11권, 제2호, pp.349-352.
3. 김수만, 오민호 (1999), “콘크리트 건조수축 균열제어를 위한 합리적인 최소철근량”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제11권, 제2호, pp.441-444.
4. 김영진, 이순환 (2000) “지하철 벽체형 구조물의 균열제어기술 개발”, 서울2기 지하철 완공기념 도시철도기술자료집, pp.359-366.
5. 김영진, 이순환, 이상수 (2000), “플라이애쉬 혼입 저발열 콘크리트를 활용한 철근콘크리트 구조물의 균열 제어”, 콘크리트학회지, 제12권, 제2호, pp.41-47.
6. 김진근, 김상철 외 2인 (1997), “매스콘크리트 벽체구조물의 타설 개선을 위한 해석적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제9권, 제2호, pp.539-545.
7. 이장화, 변근주 (1997), “매스콘크리트의 주변환경조건에 대한 수치실험”, 콘크리트학회논문집, 제9권, 제5호, pp.217-224.
8. 오병환, 백신원 (1995), “대형매스콘크리트구조물의 수화열 예측 및 균열제어 연구”, 콘크리트학회논문집, 제7권, 제1호, pp.97-108.
9. 下田 努 外 2인 (1990), “壁狀構造物におけるひびわれ幅制御效果の比較”, コンクリート構造物の體積 變化によるひびわれ幅制御に關するJCIコロキウム論文集, pp.37-44.