

지하철 콘크리트 BOX 구조물의 수화열에 의한 균열저감 대책 연구

A Study on Minimizing for Hydration Heat Cracks of a Subway Concrete Box Structure

김은겸^{*} 윤석구^{**} 배상일^{***} 정재용^{****} 김현철^{*****} 허정옥^{*****}
Kim, Eun Kyum Youn, seok Goo Bae, Sang Il Jeong, Jae Yong Kim, Hyeon Cheol Heo, Jeong Ok

ABSTRACT

The bigger of concrete structures by a construct technique improvement, and the increase of the cement quantity which is caused by with use of the high-strength concrete for the load-carrying-capacity and a durability cause temperature cracks by a heat of hydration. The temperature crack due to the heat of hydration classified a nonstructural crack. but it has a bad effect on durability of concrete structures. especially, in case of a subway concrete box structure, when a water-proof facilities is beaked on an outer-wall, the water leakage occurs through a penetration crack generated from a wall of the concrete structure too.

This paper, for the subway concrete box structure, the use of blended cement, the temperature of air and concrete, control joint, was considered and analysed by a three dimensional finite element method.

1. 서론

시공기술의 진보에 따른 콘크리트 구조물의 대형화 및 슬랜더한 단면의 필요성이 대두되면서 고강도 콘크리트의 사용이 증가되어가고 있는 추세에 있다. 고강도콘크리트를 제조하기 위해서는 단위수량을 줄이고 단위시멘트량을 증대시키는 결과를 초래하여 이로 인해 수화열에 의한 온도균열 발생 사례가 증가하고 있다. 수화열에 의한 온도균열은 비구조 균열이지만, 장기 내구성 확보를 위해서는 적극적으로 억제할 필요가 있다. 특히, 지하철 콘크리트 BOX 구조물과 같은 경우 벽체에서 관통균열에 의한 누수가 발생하여 구조물의 외관은 물론, 시멘트 경화체의 수화물 용출, 철근부식 등으로 구조물의 내구성 저하에 의한 내구수명 감소를 초래함으로써 유지관리에 많은 보수 비용이 들어가게 된다.

본 논문에서는 지하철 콘크리트 BOX 구조물의 수화열에 의한 균열을 제어할 목적으로 시멘트의 종류, 균열유발줄눈의 도입, 대기온도와 타설온도 등을 변수로 하여 온도해석 및 응력해석을 실시하였다. 또한, 이 결과는 서울지하철 9호선 콘크리트 BOX 구조물에 적용하여 시험시공을 거쳐 최적의 온도균열 제어를 위한 시공 방법을 제시한 것이다.

- * 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수
- ** 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수
- *** 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 석사과정
- **** 정회원, GS건설 지하철 904공구 현장소장
- ***** 정회원, GS건설 기술본부 토목구조팀 부장
- ***** 정회원, GS건설 기술본부 토목구조팀 과장

2. 구조물의 단면형상과 해석조건

2.1 구조물의 단면형상

대상 구조물은 지하철 콘크리트 BOX 구조물로서 가장 대표적인 단면으로서 그 형상은 길이 18m, 폭 10.6m, 높이 7.6m이며, 벽체의 두께는 1.0m이다. 그림 1은 해석단면의 형상을 나타낸 것이다. 그림 2는 해석에 사용된 유한요소 mesh를 나타낸 것이며, 좌우 대칭 구조물이므로 1/2해석을 전제로 모델링하였다. 전체 Node수는 11609개, Element수는 9325개로 구성하였다.

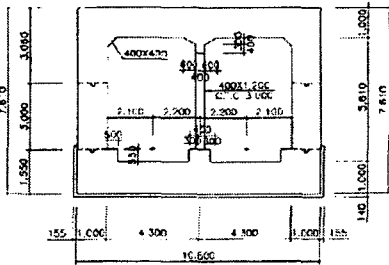


그림 1 구조물의 형상 및 열전달 해석모델

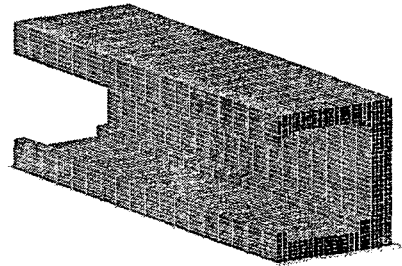
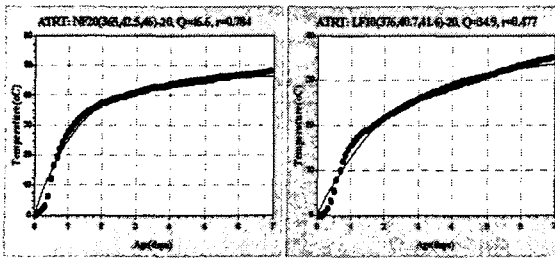


그림 2 구조물의 유한요소 mesh

2.2 콘크리트의 열적특성

그림 3은 본 연구에 적용된 혼합시멘트의 단열온도상승곡선 시험값을 나타낸 것이며, 표 1은 콘크리트의 열적 특성치를 나타낸 것이다.



1종+FA20% 4종+FA10%
그림 3 해석에 사용된 단열온도상승곡선

표 1 구조물의 열적특성

설계기준강도(MPa)		27	
단열온도상승 특성치	Q_{∞}	1종+FA20%	46.6
		4종+FA10%	34.9
	r (day ⁻¹)	1종+FA20%	0.784
		4종+FA10%	0.477
밀도	ρ (kg/m ³)	2400	
열전도율	k (W/m ² °C)	2.1	
비열	C_p (J/kg°C)	0.25	

2.3 해석조건

콘크리트는 시공성을 감안하여 바닥슬래브, 벽체, 상부슬래브 순서로 3회 분할하며 타설하는 것으로 하였으며, 특히 벽체부의 경우는 균열유발기준에 의한 균열유발 효과를 평가하기 위해 1개소 또는 2개소 설치하는 것으로 하였다. 시멘트는 플라이애시가 각각 20% 및 10%가 혼합된 1종 및 4종 시멘트를 사용하였으며, 콘크리트를 타설할 때 굳지 않은 콘크리트의 온도는 각각 20, 25, 30°C 등 3가지 수준으로 하였다. 대기온도는 5~25°C의 범위로 정하였으며, 보온양생에는 일반적으로 사용하고 있는 보온양생시트 1장 사용하는 것으로 하였다.

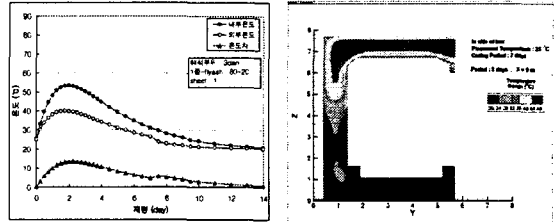
표 2 적용시멘트 및 균열유발기준

부재 위치	적용시멘트	균열유발기준
바닥슬래브	1종+FA20%	-
벽체부	1종+FA20%	1개소 혹은 2개소
	4종+FA10%	-
상부슬래브	1종+FA20%	-
	4종+FA10%	-

3. 콘크리트의 온도해석 및 온도응력 해석 결과

3.1 온도해석 결과

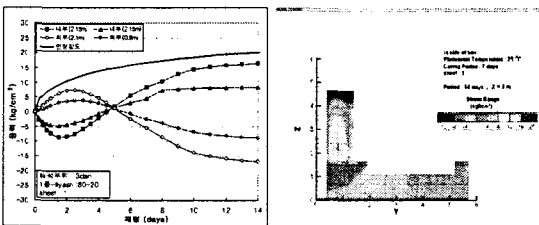
바닥슬래브에 대한 온도해석 결과, 대기온도 20℃, 콘크리트 타설온도 25℃인 경우 수화열 상승온도 최고치 53.3℃이며, 이 때의 콘크리트 내외부 온도차 최대치는 15.1℃를 나타내었다. 벽체부에 대한 온도해석 결과, 1종+FA20%를 사용할 경우 타설길이 및 균열유발줄눈 수에 관계없이 최고온도는 51.6℃까지 상승하였으며, 내외부 온도차는 11.4℃를 나타내었다. 또한 4종+FA10%를 사용할 경우 최고온도는 40.4℃이며, 내외부 온도차는 7.4℃를 나타내었다. 상부슬래브에 대한 온도해석 결과, 1종+FA20%를 사용한 경우(그림 4) 최고온도는 53.3℃, 내외부 온도차는 13.5℃를 나타내고 있는 반면, 4종+FA10%를 사용할 경우 최고온도는 41.5℃, 내외부 온도차는 8.8℃로서 저발열시멘트의 사용에 의해 수화열이 대폭적으로 감소되고 있음을 알 수 있다.



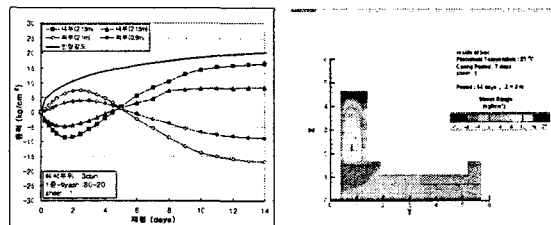
(a) 온도해석 결과 (b) 중앙단면의 온도분포
그림 4 상부슬래브의 수화열 해석 결과

3.2 온도응력해석 결과

바닥슬래브의 수화열에 의한 응력해석 결과, 온도균열지수는 1.78로서 설계목표치 1.2를 훨씬 초과하여 시공시 수화열에 의한 온도균열발생은 없을 것으로 예상된다. 벽체부의 응력해석 결과, 1종+FA20%(균열유발줄눈 2개소)를 사용할 경우(그림 5)에는 온도균열지수가 1.22이며, 4종+FA10%를 사용할 경우(그림 6)에는 1.33을 나타내어 모두 목표온도균열지수 1.2를 초과하였다. 반면에 1종+FA20%를 사용하면서 균열유발줄눈을 설치하지 않을 경우에는 온도균열지수가 0.89로서 설계치에 훨씬 미치지 못한 것으로 해석되었다. 따라서, 온도균열지수를 1.2이상 확보하면서 유해한 균열발생을 억제하기 위해서는 저발열시멘트를 사용하던가 1종+FA20%를 사용할 경우에는 적어도 1개 지간당 2개소에 균열유발줄눈을 설치해야 하는 것으로 평가된다.



(a) 온도응력해석 결과 (b) 중앙단면의 응력분포
그림 5 벽체의 수화열에 의한 응력해석 결과



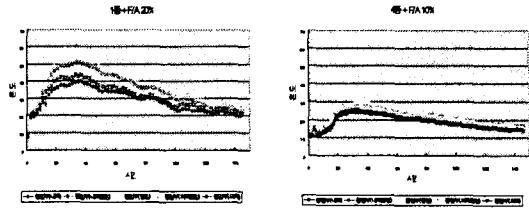
(a) 온도응력해석 결과 (b) 중앙단면의 응력분포
그림 6 벽체의 수화열에 의한 응력해석 결과

3.3 수화열 계측 결과 검토

그림7은 벽체 콘크리트의 수화열 계측치를 나타낸 것이다. 1종시멘트를 사용하는 경우 해석치와 계측치 사이에는 4.5℃ 정도의 다소 큰 온도차를 보이고 있으며, 4종시멘트를 사용한 경우에 있어서는 해석치와 계측치는 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 시험 시공 결과의 검토

시험시공은 표1에 제시된 경우에 대해 모두 실시하였으며, 시험시공 구간도 충분히 긴 구간에 대해 설정하였다. 1종+FA20%의 콘크리트를 적용한 경우로서 균열유발줄눈을 두지 않았을 때 발생한 균열간격은 거의 1m 정도로서 균열발생빈도가 높은 것으로 나타났다. 또한 균열유발줄눈을 설치한 경우, 균열간격은 균열유발줄눈을 설치하지 않은 경우와 거의 동등하며, 이것은 균열유발줄눈 2개소를 설치한 경우와도 차이가 없는 것으로 나타났다. 본 시험시공에서 균열유발줄눈 설치에 의한 균열유발 효과가 나타나고 있지 않는 것은 배력철근을 전혀 절단하지 않았으며, 전부신일 등의 연구를 참고할 때 단면감소율이 다소 부족하였기 때문인 것으로 보인다. 동일본여객철도주식회사 전부신일 등의 연구에 의하면 온도균열유발줄눈이 본래의 기능을 발휘하기 위해서는 단면결손율을 37.5% 이상 확보할 필요가 있다는 연구결과를 제시하고 있다. 이에 대해 본 연구에서는 균열을 유발시키기 위한 단면결손율을 콘크리트표준시방서에서 제시하고 있는 값 30%를 적용하였다. 이와 같은 문제에 대해서는 향후 보다 심도 있는 연구가 필요할 것으로 생각된다.



(a) 1종+FA20% (b) 4종+FA10%
그림 7 벽체의 수화열에 계속 결과

표 3 균열제어 조건

시험 대상 부재	균열제어 조건	
	벽체	1종+FA20%
균열유발줄눈 1개소		
4종+FA10%		무설치

한편, 4종+FA10%의 콘크리트를 적용한 경우, 균열간격은 2.25m로서 1종+FA20%의 콘크리트를 적용한 경우 균열간격 1.06m에 비해 상당히 커짐으로서 저발열시멘트의 사용에 의한 균열제어효과가 있는 것으로 나타났다. 균열폭에 있어서도 4종+FA10%의 콘크리트를 적용한 경우 0.1mm이하의 미세한 균열이 주를 이루고 있는 반면, 1종+FA20%의 콘크리트를 적용한 경우에는 0.2mm정도의 균열이 주로 발생된 상태이다.

5. 결론

본 연구는 서울지하철 9호선 콘크리트 BOX 구조물의 수화열에 의한 온도균열을 제어할 목적으로 수행하였으며, 해석 및 시험시공을 통해 최적의 시공방법을 제안한 것으로서 그 결과를 요약하면 다음과 같다. (1) 온도해석 결과, 바닥슬래브 및 상부슬래브는 1종시멘트에 플라이애쉬 20%를 치환하여 사용하여도 온도균열지수가 목표치 1.2 이상 확보되어 유해한 균열을 억제할 수 있는 정도의 균열제어 효과가 있는 것으로 나타났다. (2) 벽체에 있어서 1종시멘트에 플라이애쉬 20%를 치환하여 사용할 경우, 배력철근을 절단하지 않거나 균열유발부 단면결손율 30% 정도 감소시키는 것만으로는 효과적인 균열제어가 가능하지 않는 것으로 보인다. (3) 현 시점에서 벽체의 온도균열지수를 1.2이상 확보하면서 유해한 균열발생을 억제하기 위해서는 저발열시멘트를 사용하는 것이 효과적이며, 균열유발줄눈을 설치하여 균열을 유발시키기 위해서는 배력철근의 절단, 콘크리트표준시방서에서 제시하고 있는 값보다 단면결손율을 더욱 증대시키는 등의 조치가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김은겸, 김래현, 신치범, “유한요소법에 의한 매스콘크리트 구조물의 온도해석 프로그램 개발”, 한국 콘크리트학회 논문집, 제7권 6호, 1995. 12.