

지하철 박스 구조물에서의 온도균열제어

Temperature Crack Control in Subway Box Structures

구본창 김동석 하재담 김기수 최 롱 오병환

Koo, Bon-Chang Kim, Dong-Seuk Ha, Jae-Dam Kim, Ki-Soo Choi, Long Oh, Byung-Hwan

ABSTRACT

The crack of concrete induced by the heat of hydration is a serious problem, particularly in concrete structures such as underground box structure, mat-slab of nuclear reactor buildings, dams or large footings, foundations of high rise buildings, etc.. As a result of the temperature rise and restriction condition of foundation, the thermal stress which may induce the cracks can occur. Therefore the various techniques of the thermal stress control in massive concrete have been widely used. One of them is prediction of the thermal stress, besides low-heat cement which mitigates the temperature rise, pre-cooling which lowers the initial temperature of fresh concrete with ice flake, pipe cooling which cools the temperature of concrete with flowing water, design change which considers steel bar reinforcement, operation control and so on.

The objective of this paper is largely two-folded. Firstly we introduce the cracks control technique by employing low-heat cement mix and thermal stress analysis. Secondly it show the application condition of the cracks control technique like the subway structure in Seoul.

1. 서론

1.1 배경

최근 구조물의 대형화·특수화·고강도화 추세로 인해 수화열에 의한 균열 피해가 시공현장의 주요 문제점으로 대두되고 있으며 수화열에 의한 온도영향을 충분히 고려하지 않고 시공이 이루어질 경우 취약부에 균열이 예상되기 때문에 이의 예방에 많은 관심을 기울이고 있는 실정이다.

한편 콘크리트는 경화과정에서 수화발열에 의해 온도상승이 발생되는데, 콘크리트 열전도율이 낮아 부재 내·외부 온도차를 발생한다. 이러한 온도차와 구조물 하부구속에 의해 콘크리트 인장강도를 초과하는 온도응력이 발생되면 구조물에 균열을 유발시킨다.

이러한 문제를 해결하기 위해 수화열에 의한 온도증가를 억제시킬 수 있는 방안으로 수화열이 낮은 저발열 콘크리트를 사용하거나 원재료를 냉각시키는 Pre-cooling 공법과 파이프관에 냉각수를 유입시키는 Pipe-cooling 공법 그리고, 적절한 온도철근을 배근하여 인장강도를 강화하는 방법 등이 사용되고 있다.

* 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 연구원

** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 주임연구원

*** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 선임연구원

**** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실장

***** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소장

***** 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

여기서는 서울시 지하철 지하박스구조물에서 온도해석 검토를 통해 매스 콘크리트의 온도제어 방법으로 저열콘크리트로 시공하였을 때의 균열저감 효과 검토하고자 하였다.

1.2 개요

서울시 지하철에 있는 지하 박스구조물은 벽체 및 슬래브의 두께가 평균 1.0m 이상이고 통상 30m 길이를 단위로 연속적으로 시공하는 매스콘크리트로 수화열로 인한 균열문제가 모든 공구에서 대두되는바 수화열을 낮추어 온도응력을 제어하는 방법을 모색 중이다.

매스콘크리트의 시공시 발생하는 온도균열을 제어하기 위해서 최근까지 수화발열의 주원인이 되는 결합재의 수화발열특성을 파악하여 구조물내의 수화열을 예측하는 해석기술의 개발과 더불어 저열포틀랜드(4종)시멘트와 같이 수화열이 적은 시멘트의 사용과 플라이애쉬(이하 F/A) 등의 포졸란 물질을 치환하여 수화발열량을 낮추는 매스콘크리트 제조기술 개발이 활발히 진행되어 오고 있다.

지하 박스 구조물의 단면특성에 기인한 온도균열이 예상됨에 따라 현재 타설되고 있는 시방배합과 온도균열을 제어할 목적으로 수화열이 적게 발현되는 저열포틀랜드(4종)시멘트를 사용한 배합을 비교할 목적으로 먼저 대상 구조물에 대한 수화열 및 온도응력 해석과 아울러 실제 현장 시험타설을 통해 응력센서와 온도센서를 매설하여 응력과 온도를 계측하여 타당성을 검증하여 서울시 지하철 지하 박스구조물에 적합한 최적배합 및 시공대책을 제시하고자 하였다.

2. 배합선정을 위한 실내시험

2.1 배합실험

대상구조물의 적절한 배합선정을 다음의 표에 나타난 것과 같이 현재 사용되고 있는 시방배합과 저열배합을 기준으로 하였다.

표 1 배합표

Mix	시멘트 종류	W/C (%)	S/A (%)	단위재료량(kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE감수제
시방배합	1종	47.9	42.8	181	378	744	1,014	0.567
저열배합	4종	48.2	45.0	174	361	799	996	0.541

위의 배합에 따라 시험한 결과 다음의 표에 나타난 것과 같이 저열배합은 작업성 및 강도를 만족하였다.

표 2 배합별 특성

Mix	시멘트 종류	Slump (cm)	Air Content (%)	재령별 압축강도(kgf/cm ²)	
				7d	28d
시방배합	1종	15.0	5.5	245	305
저열배합	4종	15.5	5.6	160	294

2.2 단열온도상승 실험

서울시 지하철 지하 박스구조물의 기존 시방배합과 저열배합에 대해 온도상승량을 파악하기 위해서 단열온도상승 실험을 수행하여 비교하였다. 콘크리트 배합조건은 표1에 나타난 시방배합과 저열배

합이며, 콘크리트의 초기온도가 20℃시 단열온도 상승특성을 비교하였다.

단열온도상승 실험을 7일간 수행하여 비교한 결과 아래의 그림 및 표에 나타난것과 같다.

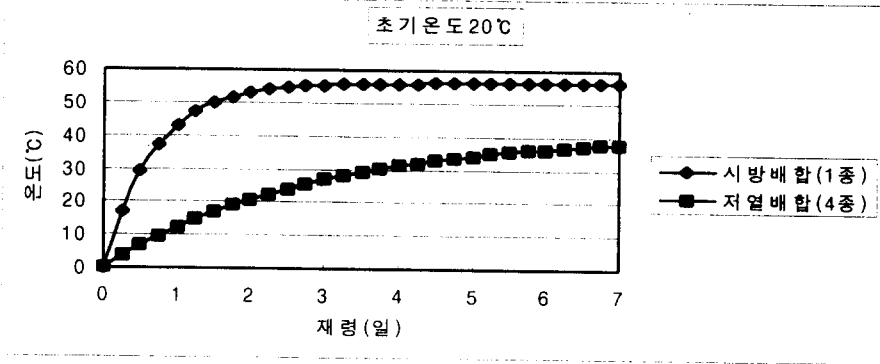


그림 1 배합별 단열온도상승 실험결과

표 3 배합별 열적특성(용량50ℓ)

Mix	콘크리트의 열적특성	
	K(℃)	α
시방배합(1종)	54.6	1.400
저열배합(4종)	38.3	0.341

3. 온도해석

3.1 대상구조물

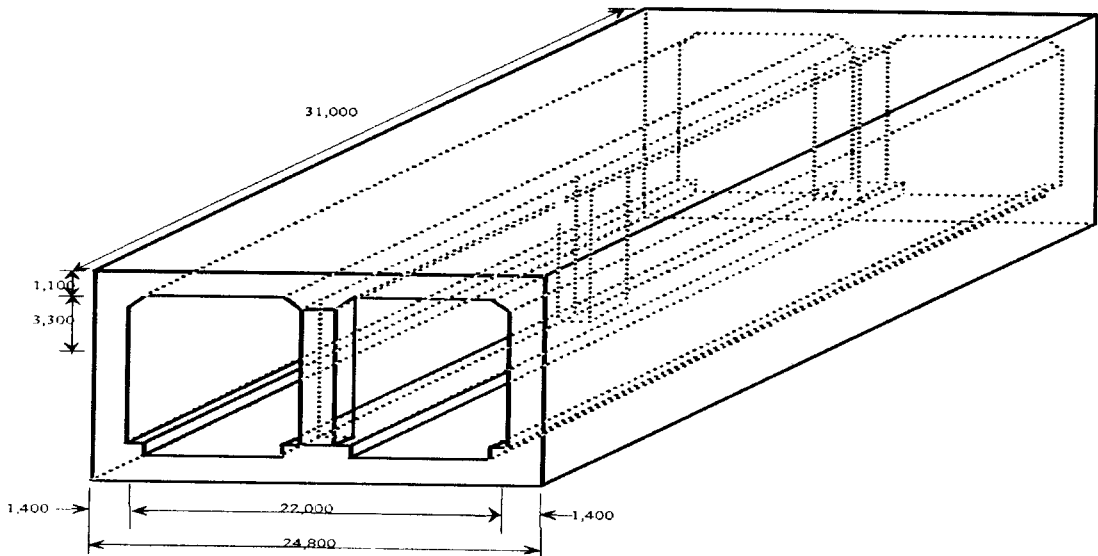


그림 2 온도해석을 위한 구조물

온도해석은 그림에 있는 박스 구조물에 시방배합(1종) 및 저열배합(4종) 2가지 배합에 대하여 온도 해석을 수행하였다.

3.2 온도해석을 위한 입력데이터

온도해석을 수행하기 위하여 다음의 표에 나타난 것과 같이 최대온도상승량 및 반응속도는 단일 온도상승 실험을 통하여 구하였고 열전도율 등의 열적 특성은 일반 콘크리트 값이며 콘크리트의 타설 온도 및 외기온도는 각각 매스 구조물 타설시 가장 취약한 겨울철의 온도를 적용하였다.

표 4 입력 데이터

특 성	단 위	시방배합(1종)	저열배합(4종)
단위시멘트량	(kg/m ³)	378	361
최대온도상승량(K)	(℃)	54.58	38.28
반응속도(α)	-	1.400	0.341
열전도율	(Kcal/m · hr · ℃)	2.2	
비열	(Kcal/kg · ℃)	0.25	
밀도	(kg/m ³)	2.300	
콘크리트 타설온도	(℃)	15	
외기온도	(℃)	10	
대류계수	상부	(Kcal/m ² · hr · ℃)	9
	측면	(Kcal/m ² · hr · ℃)	5

3.3 온도해석결과

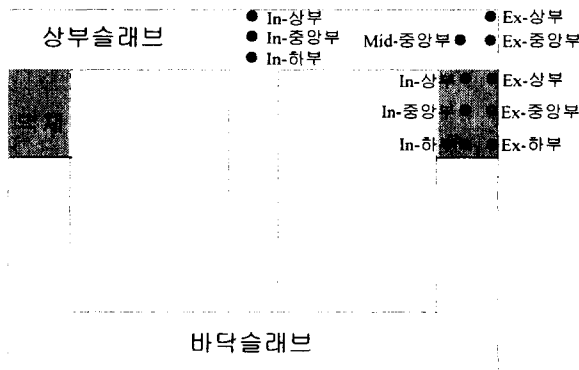


표 5 수화열 해석결과

수화열		시방배합 (1종)	저열배합 (4종)
벽체 (In-상부)	최대온도 (℃)	63.0	37.0
	도달시간 (시간)	48	84
상부슬래브 (Mid-중앙부)	최대온도 (℃)	57.9	32.6
	도달시간 (시간)	24	60

수화열 해석을 통해 시방배합은 벽체부의 In-상부에서 63.0℃인데 비해 저열배합은 최대온도가 37.0℃으로 수화열 저감 효과가 탁월하다.

4. 현장시험 타설 및 현장계측

4.1 현장계측

온도해석 결과를 토대로 실구조물에 유효응력계는 다음그림과 같이 응력이 크게 발생되는 상부슬래브의 Mid-중앙부에 가까운 ⑥번위치에 설치하고, 온도센서는 상부슬래브의 5곳에 설치하여 현장계

측을 실시하였다.

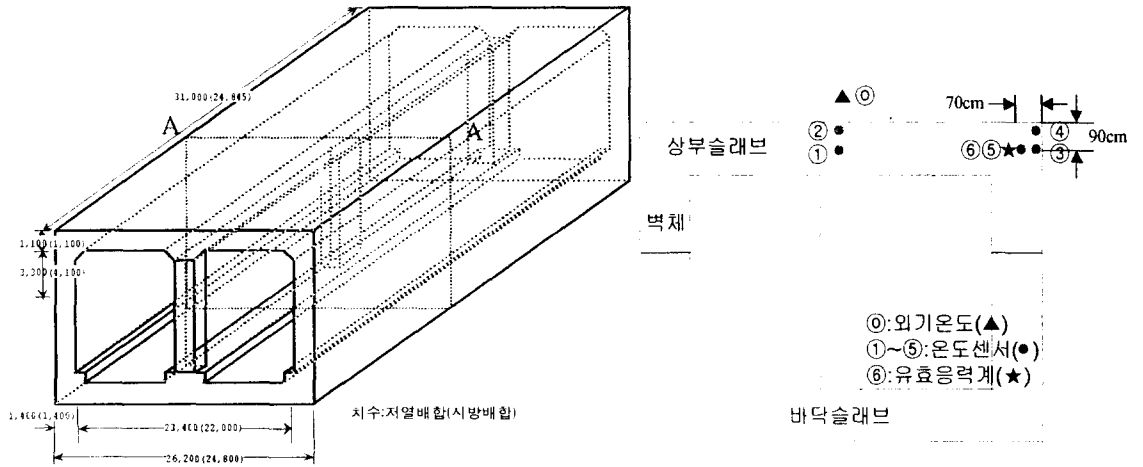


그림 4 유효응력계 및 온도센서 계측위치

4.2 실구조물 계측결과

유효응력계와 온도센서는 수화열 및 온도응력이 큰 1회타설 길이의 중앙부인 section A-A(센터)에 설치하였다. 센서에 의해 측정된 부재별 온도와 응력은 다음과 같다. 여기서 인장강도는 각재령별 실제강도를 기준으로 콘크리트 시방서에 규정된 적으로 Fitting하여 구하였다.

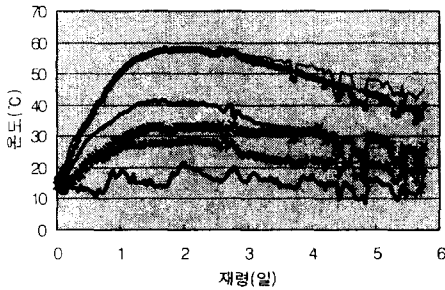


그림 5 시방배합(1종)의 온도이력

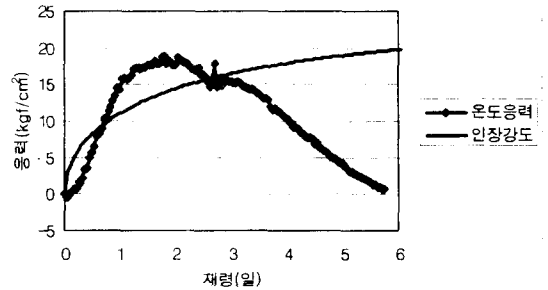


그림 6 시방배합(1종) ⑥번 온도응력

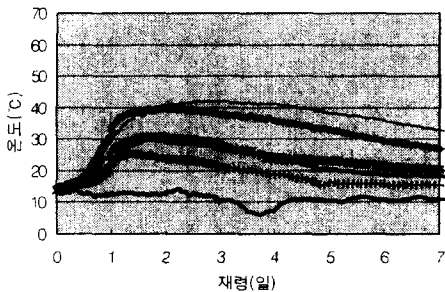


그림 7 저열배합(4종)의 온도이력

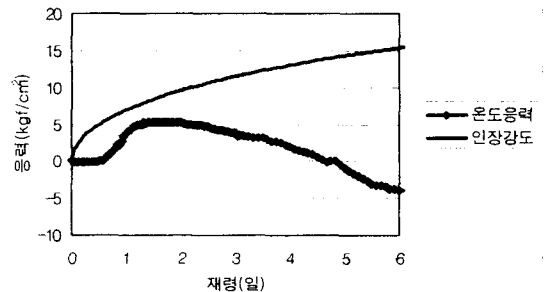


그림 8 저열배합(4종) ⑥번 온도응력

시험시공결과를 통해 저열배합은 콘크리트의 최대온도를 15.9°C 이상 낮추고 최고온도 도달시간을 시

방배합에 비해 20시간정도 지연시켜 온도균열제어에 탁월한 효과를 발휘한다.

표 6 수화열 계측결과

수화열		시방배합 (1종)	저열배합 (4종)
①	최대온도 (℃)	57.9	42.0
	도달시간 (시간)	46	68
⑤	최대온도 (℃)	57.8	39.4
	도달시간 (시간)	44	56

표 7 온도균열지수

최소 온도균열지수		시방배합 (1종)	저열배합 (4종)
⑥	균열지수	0.70	1.52
	도달시간 (일)	1.25	1.33

온도응력계측 결과에 의하여 온도균열지수를 구한 결과 위의 표와 같이 나타나며 시방배합은 균열이 발생하며 저열배합을 사용하면 온도균열지수가 0.5정도 높아져 온도균열을 억제하는 효과를 나타내었다.

5. 결론

최근 대형 SOC 사업이 많이 추진됨으로써 구조물의 중요도와 내구년한이 한층 높아지고 있으나 대형 매스구조물들은 콘크리트의 온도특성 및 환경변화에 의한 영향으로 균열이 자주 발생되고 있다. 이러한 대형 매스구조물중의 하나인 서울시 지하철 지하막스구조물에 수화열이 낮은 저열포틀랜드(4종)시멘트를 사용한 저발열 콘크리트의 시험시공을 통해 온도균열을 제어할 수 있었다. 또한 콘크리트 타설 전 실측치에 근접한 온도해석이 수행되어 타설온도, 배합조건, 거푸집 탈형시기, 양생조건 등을 선정하여 온도균열제어에 도움을 주었다.

후기

시험시공을 위하여 협조하여 주신 발주처인 서울시 지하철 건설본부, 7-18공구 시공사 코오롱건설(주), 감리단 (주)신성엔지니어링 관계자 여러분께 깊은 감사드리고, 레미콘 생산에 협조해 주신 쌍용양회 성수동 공장 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 김기수 외5인, "매스콘크리트에서 온도응력에 영향을 주는 인자에 관한 연구", KCI 1998년도 봄 학술발표회, 1998.
- 2) U.S. Bureau of Reclamation. "Cooling of Concrete dam final reports. boulder canyon project. part VII-cement concrete investigations, bulletin 3" . U.S. Bureau of Reclamation. 1949. pp.236.
- 3) K. Matsui, N. Nishida, Y. Dobashi and Ushioda, "Sensitivity Analysis and Reliability Evaluation of Thermal Cracking in Mass Concrete", 1994.
- 4) 오병환 외3인, "지하막스구조물 온도균열제어를 위한 시공방안연구", 콘크리트 봄 학술발표회, 1998.
- 5) 김진근 외1인, "매스콘크리트의 수화열 및 온도응력에 대한 영향요인", 콘크리트학회지, 1997. 6.
- 6) 콘크리트 표준시방서, 건설부, 1999.
- 7) 日本コンクリート工學協會, マスコンクリート溫度應力研究委員會報告書, 1985.