

파이프 쿨링을 이용한 도심 교량 기초 매스 콘크리트의 수화열 제어에 관한 연구

Study on Thermal Crack Control Using Pipe-Cooling in Massive Concrete Foundation of Urban Bridge

이 주 호* 배 한 옥** 우 승 민*** 우 종 일**** 하 봉 태***** 김 지 상*****
Lee, Joo Ho Hae, Han Ug Woo, Seung Min Woo, Jong Il Ha, Bong Tae Kim, Jee Sang

ABSTRACT

Recently, the design and construction of massive concrete structures are increased, But, the temperature rise within a large concrete mass makes the construction of massive concrete structures be very difficult. Therefore, various techniques of the thermal stress control of the mass concrete have been widely used. One of them is pipe-cooling which reduces the temperature of concrete with flowing water.

It was shown to be possible to construct the massive concrete foundation of urban bridge successfully by application of pipe-cooling system with steel pipe and water circulation. It was also found to expected to make it possible to reduce the probability of thermal crack development in a massive concrete foundation of urban bridge by pipe-cooling system

1. 서론

최근 교량의 하부 구조 및 지하 구조물 등과 같은 매스콘크리트 구조물을 많이 시공함에 따라 초기 재령 콘크리트의 균열 발생 사례가 자주 발생하고 있으며, 이로 인해 이 분야의 관심이 증가하고 있다. 콘크리트의 경우 초기 재령에서의 균열 발생원인은 매우 다양하지만, 일반적인 매스콘크리트 구조물일 경우에는 수화열에 의한 것이 가장 큰 원인이다. 따라서, 이에 대한 대책 방안으로 프리쿨링, 파이프쿨링, 저발열시멘트 사용 등에 의한 수화열 저감 및 그로 인한 온도균열 발생 확률의 저감 대책이 시행되고 있다.

본 논문은 여러 수화열 제어 대책 방안 중, 파이프쿨링에 관한 시공 및 해석을 수행하였으며, 기존

* 정회원, 롯데건설(주) 기술연구소 수석 연구원

** 정회원, 롯데건설(주) 기술연구소 선임 연구원

*** 정회원, 롯데건설(주) 기술연구소 연구원

**** 정회원, 롯데건설(주) 서울외곽순환도로 현장소장

***** 정회원, (주)동성 엔지니어링 서울외곽순환도로 감리단 전무

***** 정회원, 서경대학교 토목공학과 교수

파이프 쿨링에 의한 수화열 제어가 수행된 타 구조물과는 달리 도심지내 교각 기초 구조물에 대해 시공이 수행되었으며, 제반 여건의 제한성으로 일정량의 수량을 이용한 유입수와 유출수의 순환 시스템을 통해 파이프쿨링을 수행하였다. 또한 해석을 통한 비교, 분석으로 파이프 쿨링에 의한 최적의 온도 균열 제어 대책을 수립하고자 하였다.

2. 시공 현황 및 사용 재료

2.1 시공 현황

본 대상 구조물은 서울외곽순환(일산-퇴계원) 고속도로 5공구 현장 교각 P5 기초 구조물이다. 대상 구조물의 기초 형식은 강관 파일이며, 단면의 제원은 길이 36.2m, 폭 10.5m, 높이 3m로써 전형적인 매스콘크리트 구조물이다. 따라서, 수화열에 의한 온도균열의 발생 확률이 높으므로 이에 대한 대책이 필요하였다.

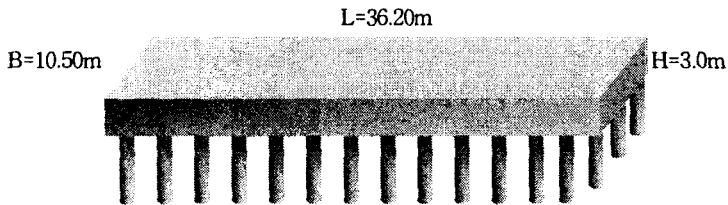


그림 1 대상구조물의 단면 제원

기초 구조물의 수화열에 대한 제어 대책으로 파이프 쿨링의 시공이 제안되어 높이 3m에 대해 2단으로 파이프를 설치하여 수화열에 대한 제어를 수행하였다. 파이프는 일반적인 파이프 쿨링 시공에 사용되는 X-L 파이프나 주름관 대신 강관 파이프를 사용하였으며, 내경 32mm, 두께 1.5mm의 파이프를 사용하여 기존 파이프(1inch = 2.54cm)보다 파이프 쿨링 효과를 높였다. 파이프의 배치도는 그림 2와 같다.

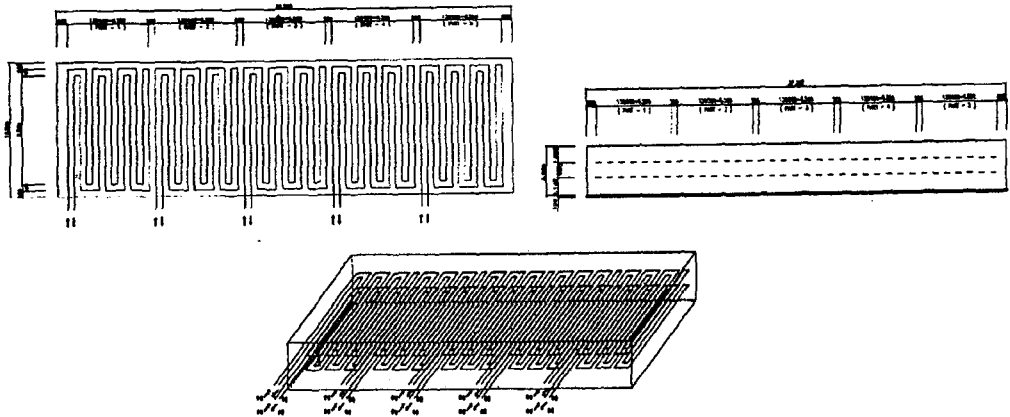


그림 2 파이프 배치도

또한, 본 대상 구조물은 육상구간에 위치한 구조물로서, 파이프 쿨링을 위한 냉각수의 공급이 원활치 않으며, 냉각수의 유입 후 처리가 원활하지 않은 문제점이 있다. 이런 문제점의 해결을 위해 유출

수의 재활용을 위한 순환장치가 설치되었다. 유출수의 온도는 대략 40℃ 정도로 추정되었으며, 실제 계측 결과도 이와 유사하였다. 따라서 유출수가 고온이므로 별도의 유출수의 온도하강 대책없이 유출수의 재활용이 불가하여 냉각기를 설치하였으며, 또한 저온의 지하수를 혼입하여 유입수의 온도가 10~15℃로 일정하게 유지되도록 하였다.

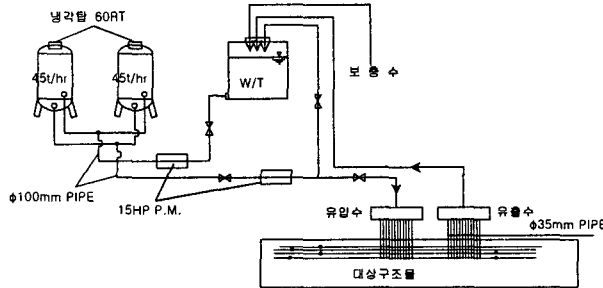


그림 3 파이프 쿨링 냉각 장치 및 순환 장치 개요도

2.2 사용 재료

사용 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(Type 1)을 사용하였으며, 굵은 골재 최대 치수는 25mm를 사용하였다. 기초 구조물에 사용한 콘크리트는 설계기준강도 270kgf/cm²로 시방 배합 및 현장 배합은 표 1과 같다.

표 1 시방 배합 및 현장 배합

구분	설계 강도 (kg/cm ²)	굵은 골재의 최대 치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	공기량의 범위 (%)	W 단위 수량 (kg/m ³)	C 단위 시멘트 량 (kg/m ³)	W / C 물-시멘트 비 (%)	S / A 점대잔재량 (%)	S1 단위 잔골재량 (kg/m ³)	S2 단위 잔골재량 (kg/m ³)	G 단위 굵은 골재량 (kg/m ³)	AE 제 (kg/m ³)
시방 배합	270	25	15 ± 2.5	4.5 ± 1.5	185	409	45.1	45.1	461	307	943	1.23
현장 배합					153	409	45.1	45.1	492	307	923	1.23

3. 수화열 계측

3.1 계측 방법

계측할 항목은 콘크리트 온도, 양생온도, 유입출수 온도, 콘크리트 변형률 등으로써 증기양생 및 파이프 쿨링의 시작 및 종료시점을 결정하고 구조물의 전체적인 수화열 발현하에서의 거동을 분석하기 위하여 계측되었다. 대상 구조물의 계측에 사용된 센서는 온도센서 21개소, 매립형 변형률 센서 6개소, 무응력계 3개소로, 각각의 배치 현황은 그림 4~6과 같다.

3.2 시공 및 파이프 쿨링 수행

대상 구조물의 타설은 1회 일체 타설로 수행하였으며, 타설 완료직 후부터 18℃ 이상의 온도를 유지하면서 100시간까지 증기 양생을 실시하였으며, 파이프 쿨링은 상단 파이프가 매설된 직 후 15시간 경과 시부터 70시간 동안 유입수 온도 10~15℃를 유지하며 유입속도 110cm/sec로 실시하였다. 양생 종료 후 콘크리트의 상면 온도는 증기 양생 및 보온 습윤 양생을 실시하여 5℃ 이상을 유지시켰다.

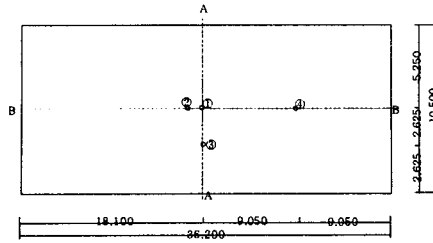


그림 4 대상구조물의 계측위치 평면도

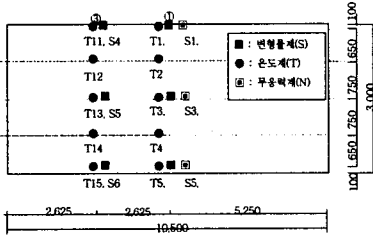


그림 5 단면 A-A의 계측기 배치도

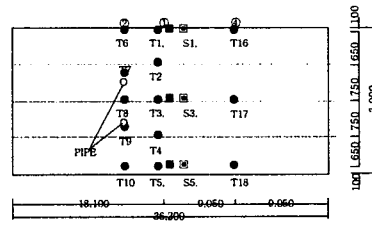


그림 6 단면 B-B의 계측기 배치도

4. 수화열 해석 및 온도응력 해석

4.1 유한요소모델 및 열적 특성

수화열 해석은 범용프로그램인 MIDAS CIVIL을 사용하였으며, 콘크리트 블록은 3차원 solid 요소로 하고, 파이프는 3차원 solid 요소 경계면에 선요소를 사용하여 모델링하였다.

해석 대상 구조물에 사용된 입력치는 표 2와 같으며, 파이프 쿨링 해석을 위한 입력값은 표 3과 같다. 또한, 해석결과값은 계측값과 비교 분석하기 위하여 그림 4~6의 계측기 배치와 동일한 위치에서 온도와 온도응력을 출력하였다.

표 2 해석시 사용된 입력 상수

입력 항목	입력 상수
최종온도 상승량(Q_{∞})	62.6 °C
반응계수(r)	1.598
콘크리트 열전도율	2.4 kcal/mh°C
콘크리트 비열	0.3 kcal/kgf°C
외기 대류계수	12 kcal/m ² h°C (상면) 7 kcal/m ² h°C (측면)
말뚝수평방향 구속조건	K=3081.982(tonf/m/EA)

표 3 파이프 쿨링 해석 입력 상수

입력 항목	입력 상수
냉각수 유량	3.167 m ³ /hr
냉각수 유입속도	1.1 m/sec
유수대류계수	328 kcal/m ² h°C
냉각수 유입온도	10°C
냉각수 비열	1.0 kcal/kgf°C
파이프관의 직경	0.032 m

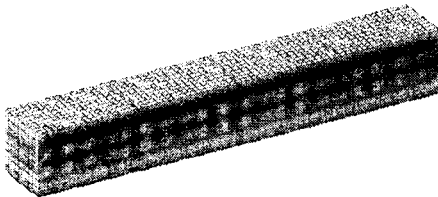


그림 7 온도 해석 결과

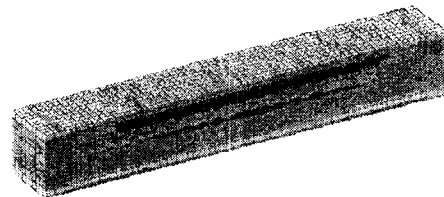


그림 8 응력 해석 결과

그림 7~8은 수화열 해석에 의한 기초 콘크리트 구조물의 온도 분포 및 응력 분포를 나타낸 것으로써, 파이프 부분에서 온도 저감 효과를 확인할 수 있다.

5. 결과 분석

5.1 계측 결과와 해석 결과의 비교 분석

그림 4~6의 파이프 배치도에 따른 위치별 계측 및 해석치를 비교하였다. 그림 9~16은 위치별 온도를 비교한 것이며, 그림 17~20은 응력을 비교한 것이다.

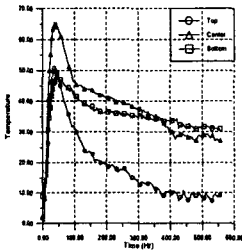


그림 9 위치① 온도계측결과

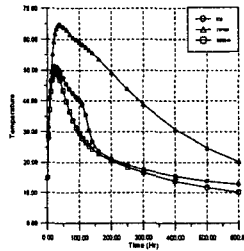


그림 10 위치① 온도해석결과

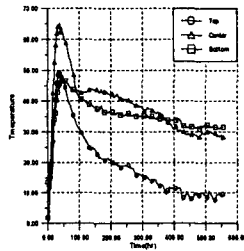


그림 11 위치② 온도계측결과

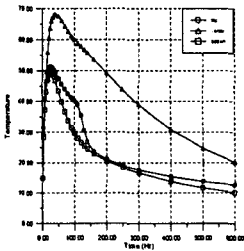


그림 12 위치② 온도해석결과

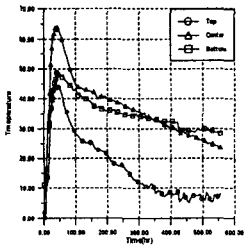


그림 13 위치③ 온도계측결과

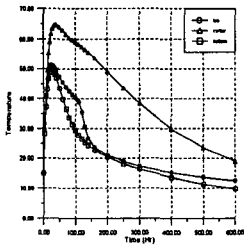


그림 14 위치③ 온도해석결과

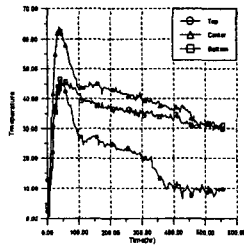


그림 15 위치④ 온도계측결과

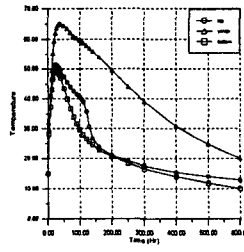


그림 16 위치④ 온도해석결과

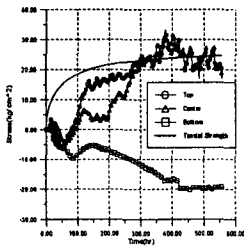


그림 17 위치① 응력계측결과

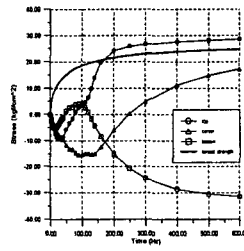


그림 18 위치① 응력해석결과

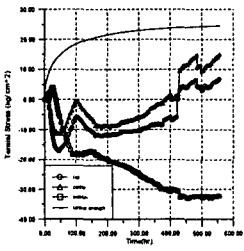


그림 19 위치③ 응력계측결과

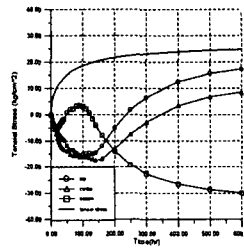


그림 20 위치③ 응력해석결과

계측결과와 해석결과를 비교 분석하면 다음과 같다.

첫째, 각 위치별 온도결과를 비교해보면 상부, 하부, 중앙부 모두 최대 온도값이 계측값과 해석값이 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 상부의 경우 온도 저하율도 계측값과 해석값이 거의 일치하지만, 중앙부와 하부는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 중앙부의 경우는 기초 콘크리트 구조물에서 철근

의 사용량이 약 2~4% 정도되므로, 철근에 대한 영향이 커서 이에 대한 고려가 필요하나, 본 해석에서는 콘크리트의 비열 및 열전도계수만을 고려한 결과로 판단된다. 하단부는 지반온도를 5℃로 고려하였으나, 실제 계측결과로는 증기양생의 영향과 지하밀폐구조로 인해 단열상태를 유지하므로 온도하강이 매우 느림을 알 수 있다. 이는 해석시 하단부의 경계조건을 단일경계조건으로 고려해주면 좀더 좋은 결과가 도출될 것으로 판단된다.

둘째, 본 계측 및 해석 결과로 충분한 파이프 쿨링 효과를 확인할 수 있었다. 도심내 옥상공간이라는 지역적 한계성이 있었으나, 유출수를 재활용하는 파이프 쿨링 순환 시스템과 일반적인 파이프보다 시공성이 좋고 열전도 효과가 높은 3.2cm 강관의 사용으로 콘크리트 수화열에 의한 온도균열의 발생을 방지할 수 있었다.

셋째, 본 기초 구조물은 파이프 쿨링의 효과로 수화열에 의한 온도균열이 제어된 것으로 판단된다. 대상 구조물의 계측 및 해석 결과, 최저 온도균열지수는 0.72로 시방서의 유해균열을 제한하는 범위내이다. 타설 후 기초 구조물의 균열 검사 결과, 수화열 균열로 판명되는 균열은 발생하지 않았다. 이는 기초 구조물에서 철근의 영향이 고려되지 않았으므로 철근 배근으로 균열 발생을 억제하는 효과가 있었기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결론

본 대상구조물에 대해 수행한 파이프 쿨링의 시공에 의한 기초 구조물의 온도 및 응력 계측 결과 및 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 대상구조물은 도심내 옥상공간에 시공된 기초 구조물로서 지역적 한계성을 극복하여 유출수를 재활용하는 파이프 쿨링 순환 시스템으로 수화열에 관한 하나의 제어 대책 방안을 제시하였다.
- (2) 일반적인 1inch(=2.54cm)의 X-L 파이프나 주름관을 사용하지 않고, 3.2cm의 강관 파이프를 사용하여 시공성 및 파이프 쿨링 효과를 상승시켰다.
- (3) 계측 결과 및 해석 결과를 비교 분석하였을 때, 위치별 모든 단면의 최고온도값은 거의 일치함을 알 수 있으며, 중앙부와 하단부에 대한 계측 및 해석의 온도 저하율 차이는 철근의 영향과 단일경계조건에 미고려로 판단된다.
- (4) 본 대상구조물의 계측 및 해석으로 파이프 쿨링 효과를 확인할 수 있었으며 수화열에 의한 온도균열의 발생을 방지할 수 있었다.

참고문헌

1. 김진근, 김국한, 양주경, “온도저감 공법을 고려한 콘크리트의 수화열 해석기법에 관한 연구”, 한국콘크리트학회논문집, 제7권, 6호, 1995. 12., pp. 176~185
2. 김진근, 이주호, “방화대교 기초 및 교각 매스콘크리트 수화열 제어에 관한 연구용역 최종 보고서”, 롯데건설(주), 1997. 8.
3. 김진근, 이주호, “광안대교 기초 및 교각 매스콘크리트 수화열 제어에 관한 연구용역 최종 보고서”, 롯데건설(주), 1997. 5.
4. 최계식, 양주경, 최영돈, 최고일, “수화열 계측 및 파이프쿨링 시공 사례”, 한국콘크리트학회 1994년도 가을 학술발표회 논문집(통권 제11집), 1994. 11., pp 381~386
5. 한국콘크리트학회, “콘크리트표준시방서”, 1999.
6. L. C. Thomas, “Heat Transfer”, Prentice Hall International, Inc., New Jersey, 1992, pp. 463~502