

# 인천대교 파일캡 구조물의 수화열 해석 및 계측

## Analysis and Measurements of Hydration Heat of Pile Cap in Incheon Bridge

박경래\*      윤만근\*\*      신현양\*\*\*      김영선\*\*\*\*      이광명\*\*\*\*\*

Park, Kyoung-Lae Yun, Man-Guen Shin, Hyun-Yang Kim, Young-Seon Lee, Kwang-Myung

---

### ABSTRACT

In massive hardening concrete structures, early age thermal cracking due to the heat of hydration may occur. There are many massive structures in Incheon bridge project and they have to be carefully treated to prevent thermal cracking. In this paper, an example of analyzed and measured results of hydration heat of pile caps in the Incheon bridge project was represented. Finite element simulations were carried out before casting and curing method was determined using the analyzed result. Sensors were installed before casting and temperature and strain of concrete was measured during curing. Gathered data were compared with the analyzed data and selected control method to prevent cracking was verified. Analyzed result gave good agreement and very few cracking could be found.

---

### 1. 서론

인천대교 프로젝트는 한국의 동북아시아 경제전략의 거점인 인천시 송도경제자유구역(송도신도시)과 국제허브공항인 인천공항의 영종IC를 직결하는 수송로로서 인천항로를 건너 약 12km의 해상고속도로교량(왕복6차선)과 영종도에 위치한 통행료 징수광장으로 계획되었다. 인천대교는 주항로부에 위치한 사장교와 동,서측 양측으로 각각 연결되는 프리캐스트 세그먼트 FCM(Free Cantilever Method) 공법으로 가설되는 접속교 및 Lanching Girder를 이용하여 FSLM(Full Span Launching Method)공법으로 가설되는 고가교로 구성된다. 그림 1 은 인천대교의 현황을 나타낸다.

일반적으로 파일캡과 같은 매스콘크리트 구조물은 타설시 초기 양생과정에서 발생하는 수화열에 의해서 균열이 발생할 가능성이 높으므로 여러 가지 균열 제어를 위해서 여러 가지 방법이 적용된다. 본 연구에서는 인천대교 고가교 구간 파일캡의 균열제어를 위한 방법 선정을 위해서 유한요소법을 이용한 수화열 해석을 실시하였다. 이후 타설 후 구조물 내부의 온도 및 변형률 계측을 통해서 해석결과의 검증 및 균열 발생 가능성에 대한 검토를 수행하였다.

---

\* 정회원, 삼성건설 인천대교현장 과장

\*\* 정회원, 삼성건설 인천대교현장 소장

\*\*\* 정회원, 삼성건설 인천대교현장 부장

\*\*\*\* 정회원, 삼성건설 인천대교현장 차장

\*\*\*\*\* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수

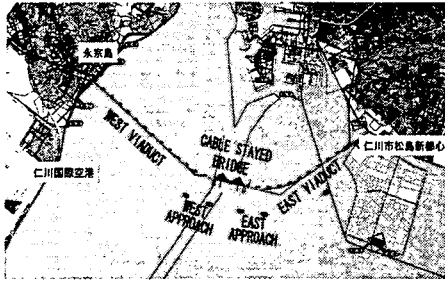


그림 1. 인천대교 현황

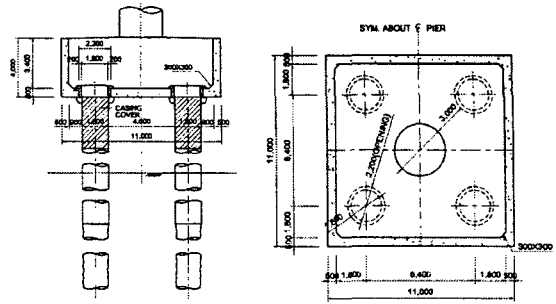


그림 2. 대상구조물의 제원

그림 2는 본 연구의 대상구조물인 고가교 파일캡 구조물의 제원을 나타낸다. 구조물은 4개의 직경 1800mm의 현장타설말뚝으로 지지되며 PC-HOUSE(PCH)를 설치한 이후에 콘크리트를 타설하게 된다.

## 2. 수화열 해석

표 1. 사용 배합

구분	1종+슬래그	3성분계		
W/B(%)	38	38		
S/a(%)	46	46		
Air(%)	4.5	4.5		
Unit content (kg/m <sup>3</sup> )	W	164	164	
	B	C	216	432
		slag	216	
	S	767	754	
	G	916	903	
Ad.	SP	3.89	4.87	

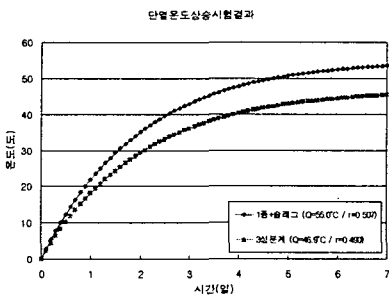


그림 3. 단열온도상승시험 결과

시공하는 경우를 고려하여 별도의 온도 조건에 대한 해석도 수행하였다. 또한 파일캡 타설 일주일 후에는 교각부의 후속작업이 가능한지 여부를 검토하기 위하여 일주일 후에 교각부의 양생조건은 제거하는 것으로 가정하였다. 그림 4.는 해석 모델 및 검토 위치를 나타낸다.

각 온도조건에 대한 해석결과의 예를 그림 5.에 수록하였다. 각 해석결과를 요약하면 표 3.과 같다. 응력의 형상에서 알 수 있듯이 대상 구조물은 내부구속에 의한 표면균열이 발생할 가능성이 있는 것으로 예상되지만 각 계절별 해석결과 최소균열지수가 모두 1.0이상으로써 균열발생가능성은 낮을 것으로 판단된다.

파일캡 구조물의 수화열에 의한 영향을 검토하기 위해서 구조 해석 프로그램인 MIDAS-CIVIL을 이용하여 열전달 해석 및 열 응력 해석을 실시하였다. 당 현장에서는 결합재로써 1종시멘트 50% 와 고로슬래그 미분말 50%를 사용하는 것으로 배합설계를 수행하였다. 고로슬래그 사용으로 인해서 1종만을 사용한 경우보다 발열량은 저감되지만 추가적인 수화열 저감과 내구성 향상을 위해서 3성분계시멘트의 사용도 고려되었다. (표 1. 참조) 이에 따라서 실제 현장의 재료를 사용하여 각 배합에 대한 단열온도 상승시험을 실시하였으며 결과를 그림 2.에 수록하였다.

해석시 사용한 재료 및 온도조건은 표 2.와 같다. 기본적으로 재료특성은 콘크리트표준시방서의 값에 준해서 해석을 수행하였으며 초기 크립의 영향은 수처리 콘크리트 구조물의 균열저감을 위한 설계/시공 지침<sup>1)</sup>에 준해서 해석을 수행하였다. 콘크리트 타설은 모두 분할 없이 일체타설을 하는 것을 원칙으로 하였다. 여러 번의 조건별 해석을 수행하여서 양생 조건에 대해서 결정하였으며 최종적으로 파일캡 표면을 발포스티롤 50mm + 양생포로 덮어서 양생하는 것으로 하였다. 온도조건은 경우 기본적으로 봄/가을, 여름, 겨울의 조건에 대해서 해석을 실시하였으며 혹한 기에도 파일캡의 시공을 위해서 구조물에 양생덮개를 설치한 후

표 2. 수화열 해석 조건

입력변수		파일럿	
온도조건(°C) (외기온도 /타설온도)	봄/가을	15/17	
	여름	24/28	
	겨울	10/12	
	한중	-2/12	
단열온도특성	Q <sub>∞</sub> (°C)	1종+슬래그	55.0
		3성분계	46.9
	r	1종+슬래그	0.507
		3성분계	0.590
열적상수	열전도율(W/m°C)	2.7	
	비열(KJ/Kg°C)	1.15	
	외기대류계수 (W/m <sup>2</sup> °C)	노출 : 14.0 양생(발포스티롤 + 양생포) : 2.0	
	압축강도(MPa)	$\frac{t}{a+bt} \times f_c'(91)$ a = 16.2 / b = 0.82 / d = 1.40 / f'c(91) = 4	
재료특성	인장강도(MPa)	$0.44 \times \sqrt{f_c'(t)}$	
	유효탄성계수(MPa)	$\phi(t) \times 4700 \times \sqrt{f_c'(t)}$ φ(t) : 탄성계수의 보정 계수재령 2일까지 φ = 0.5, 재령 5일 이후 φ = 0.66	
	프아송비	0.167	
	열팽창계수(μ/°C)	10	
	단위중량(kgf/m <sup>3</sup> )	2500	

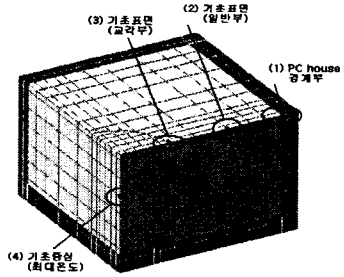
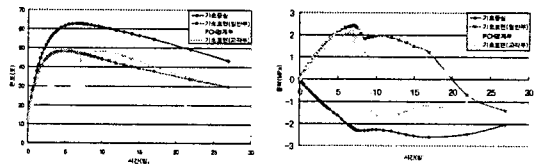
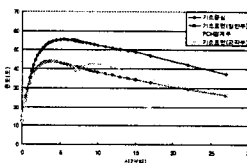


그림 4. 모델링 및 검토 위치



(a) 온도 (1종+슬래그)

(b) 응력 (1종+슬래그)



(a) 온도 (3성분계시멘트)

(b) 응력 (3성분계시멘트)

그림 5. 시간에 따른 해석결과 예 (겨울)

표 3. 해석결과

구분	1종+슬래그				3성분계			
	봄/가을	여름	겨울	한중	봄/가을	여름	겨울	한중
최대온도(°C)	67.4 (156시간)	77.8 (156시간)	62.8 (163시간)	62.37 (156시간)	60.1 (120시간)	71.0 (120시간)	55.1 (122시간)	55.2 (156시간)
인장응력(MPa)	2.64 (168시간)	2.58 (168시간)	2.33 (172시간)	2.83 (174시간)	2.21 (144시간)	2.48 (144시간)	2.11 (144시간)	2.19 (216시간)
인장강도(MPa)	2.85	30.1	28.9	28.9	2.76	2.90	2.67	2.60
최소단열지수	1.08	1.14	1.21	1.00	1.25	1.17	1.27	1.29

### 3. 계측

실제 해석결과와 검증과 균열 발생시의 원인 파악을 위하여 파일럿 구조물에는 타설 전 온도 센서와 매립형 변형률계를 설치하여 시간에 따른 온도와 변형률의 분포를 확인하였다. 그림 6. 은 설치된 계측기의 위치를 나타낸다. 실제 타설시 W12-2는 일반적인 방법으로 양생을 실시하였으나 W12-1과 W11-2의 경우에는 흑한기에 시공하게 되어서 파일럿 표면에 덮개를 덮고 일주일간 열을 공급하여 양생을 실시하였다. 그림 7. 은 실제 계측된 결과를 나타내고 있다.

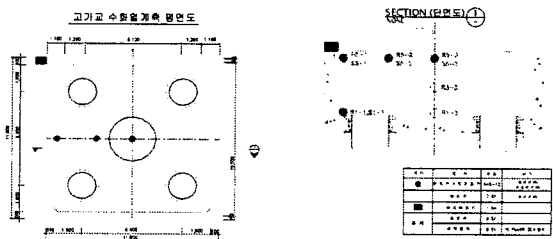
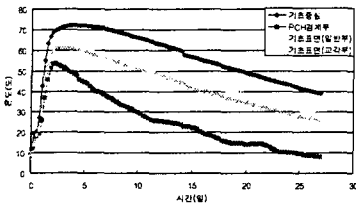
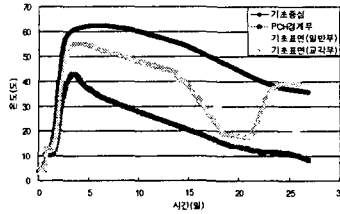


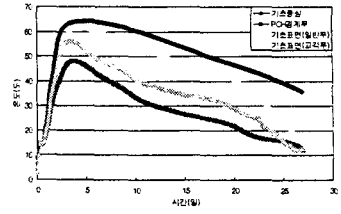
그림 6. 계측기 설치위치



(a) W12-2



(a) W12-1



(a) W11-2

그림 8. 수화열 계측결과

#### 4. 결과 비교

해석의 적용성을 검증하기 위하여 실제 해석결과와 계측결과를 비교하였다. 이를 표로 정리하면 표 4. 와 같다. 실제 타설온도의 차이 때문에 최고 값에 차이가 발생하였으나 온도조건이 비슷한 경우 4도 정도로서 비교적 잘 일치하며 최고 온도 발현시점 역시 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 3성분계 시멘트를 사용하는 경우 해석과 약간의 차이가 발생하였으나 이는 양생조건이 다르게 시공된 경우이므로 직접적인 비교는 어려울 것으로 판단된다.

표 4. 해석과 계측결과의 비교

구분	해석			계측		
	1종+슬래그 1차	1종+슬래그 2차	3성분계	W12-2	W12-1	W11-2
평균외기온도(°C)	10	7	10	7	-0.7	-0.7
평균타설온도(°C)	12	18	12	18	11.5	14.1
중심부최고온도(°C)	62.8	68.3	55.1	72.2	62.5	64.3
최고온도도달일수(일)	6.5	6	5.1	4.5	6.0	4.9
타설온도와최고온도차	52.8	50.3	43.1	54.2	51.0	50.2
비 고			한중조건	1종+슬래그	1종+슬래그 한중조건	3성분계 한중조건

#### 4. 결론

본 연구에서는 파일캡 구조물에 대한 수화열 해석을 실시하고 계측을 실시하여 해석의 적정성을 판단하였다. 해석결과에 따라서 매스콘크리트 구조물을 분할 없이 한 번에 타설 하였다. 실제로 타설된 구조물에는 균열이 발생하지 않아서 제안된 시공방법의 타당성도 검증 되었다. 해석과 계측결과는 비교적 잘 일치하여서 해석결과의 적용은 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 한국콘크리트학회, “수처리 콘크리트 구조물의 균열 저감을 위한 설계/시공 지침”, 2004.