

형산큰다리 교각기초 콘크리트의 수화열 해석 및 적용

Analysis of Heat of Hydration for Hyungsan Bridge

안 동 근* 김 명 모**
Ahn, Dong Keun Kim, Myoung Mo

ABSTRACT

The main purpose of this study is to evaluate early age thermal stresses and to estimate the risk of thermal cracking in the footings of Hyungsan bridge. In this study, stress analyses are performed for several construction stages using the computation of temperature distributions. The stress analysis results show that, not using the embedded pipe cooling, placing the concrete at once for each footings may cause sever thermal cracking. So, the structures should be constructed with one horizontal construction joint. Then the height of each lifts were determined to be 1.50 meters. Using various time intervals between lifts, temperature and stress analyses were performed and the 3-day time interval was selected.

1. 서 론

본 연구에서는 형산큰다리 교각기초에 대하여 현장의 시공 여건을 고려하여 분할 타설에 초점을 맞추어 1회 타설 높이와 분할타설 시기를 조절하기 위한 전산해석을 수행하였다. 현장의 여건상 상세한 실험을 수행할 수 없으므로 기존 연구 및 시공사례 등을 참고로 하여 사용된 콘크리트의 열특성치를 선택하여 예비해석을 수행하여 가장 먼저 시공되는 교각기초 P1에 대한 시공방법을 선정하였다. 예비 해석 결과로부터 3m높이의 기초콘크리트를 1.5m씩 3일 간격으로 타설하는 방법을 선택하였으며 온도를 계측하여 예비해석 결과와 비교하였다. 온도계측 결과가 예비해석의 결과와 큰 차이를 보임에 따라서 선택된 열특성 계수들을 수정할 필요가 있었다.

온도곡선의 형상에 영향을 주는 각 입력변수들을 특성에 따라서 조절하여 반복해석을 수행하였으며 계측 결과와 유사한 온도분포를 구할 수 있는 최종적인 입력계수들의 값을 도출하였다. 수정된 계수에 의하여 재해석을 수행하여 주요 부위에 대한 균열지수를 평가하였고 균열에 대한 외관조사를 실시하였다. 수정된 계수에 의한 해석 결과에 따르면 부분적으로 온도균열지수가 1.0 이하인 곳이 있었으나 외관조사 결과 유해한 온도균열은 발견되지 않았다. 따라서 후속 공사에서도 최종 선정된 계수값들을 적용하였다.

* 정회원, 포스코개발주식회사 토건사업본부 차장, 시공기술사

** 정회원, 위덕대학교 건축공학과 전임강사

2. 예비해석

2.1 기본조건

구형산교 교각기초는 두께가 3.0m인 매스콘크리트 구조물이며 길이는 28.5m이고 폭은 6.0m이다. 38개의 강관 PILE($\phi 812.8\text{mm} \times 14\text{T}$)에 의해 지지되고 있으며 일반도면은 그림 1과 같다. 사용된 콘크리트는 관급 레미콘이었으며 배합표는 표 1과 같다. 기초콘크리트는 지반에 기 타설된 100mm두께의 버림 콘크리트 위에 타설하도록 되어 있다.

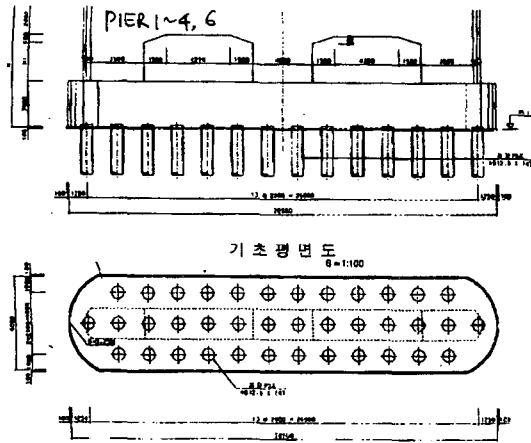


그림 1 교각기초의 형상

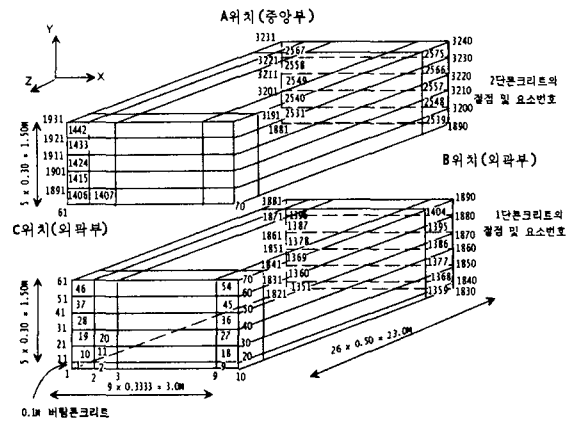


그림 2 교각기초의 1/4 모델

표 1 콘크리트의 배합표

설계기준강도 (kg/cm^2)	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/A (%)	단위량(kg/m^3)				
						물	시멘트	잔골재	굵은골재	혼화제
240	25	12	4.5 ± 1.5	44	46	167	379	813	970	-

2.2 교각기초 P1에 대한 예비해석

수화열에 의한 온도와 응력 해석을 위해서 KAIST에서 개발한 전용 해석프로그램을 사용하여 3차원 해석을 수행하였으며, 가장 먼저 시공되는 기초 P1의 시공을 위하여 다음과 같은 경우에 대한 예비해석을 수행하여 온도균열지수를 산정하여 평가하였다.

- ① 타설고를 3.0m로 하여 1회에 타설하는 경우
- ② 타설고를 1.5m로 하여 2회 분할 타설하는 경우(5일 간격)
- ③ 타설고를 1.5m로 하여 2회 분할 타설하는 경우(3일 간격)

2.2.1 구조 모델링 및 경계조건

교각기초를 직육면체로 가정하고 1/4에 대하여 그림 2와 같은 유한요소망을 구성하였다. 기초 콘크리트는 3차원 solid 요소로 모델링 하였고 두께 10cm의 버림콘크리트층도 모델링하였다.

온도해석을 위하여 그림 2의 해석 모델에서 좌측면 및 후면은 대칭면으로 열전달이 없는 것으로 가정하였으며, 상면과 전면 및 우측면에서 외기와 대류에 의한 열전달이 발생하는 것으로 하였다. 하면

은 버림콘크리트층의 하면에서 흙과 접하며 열전달이 발생하는 것으로 가정하였다.

응력해석을 위한 경계조건은 대칭면에서의 대칭 경계조건 이외에 하면에서는 수직변위가 발생하지 않는 것으로 하였고 수평이동에 대한 구속은 하면의 pile위치에서 수평이동을 구속하였다.

2.2.2 예비해석을 위한 입력자료의 선택

수화열 해석을 위해서는 표 1의 기본물성 이외에도 여러 가지 콘크리트의 열특성을 입력해야 하며, 각 특성을 매번 실험에 의하여 결정할 수 없으므로 기존의 연구자료를 분석하여 일반적인 것으로 예상되는 값을 선택하였다.

(1) 콘크리트의 단열온도 상승식

$$T = K(1 - e^{-\alpha t})$$

여기서, T : 단열온도 상승값(°C), K : 최대 온도 상승값, α : 반응속도

보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우에 대한 기존의 연구 결과 자료(표 2)를 참고하였으며 塚山의 단위시멘트량 400kg/cm³에 해당하는 단열온도 상승값과 반응속도값을 사용하여 예비해석을 하였다.

표 2 단열온도 상승값에 대한 기존 연구 결과의 비교

단위시멘트량 (kg/m ³)	塚山		일본 콘크리트공학 협회		국내(KAIST) 실험결과	
	K	α	K	α	K	α
300	37.30	0.97	42.10	0.97	46.22	0.89
400	48.00	1.15	53.18	1.39	56.81	1.21
500	58.70	1.33	64.26	1.80	62.18	2.31

(2) 콘크리트의 비열 및 열전도계수

콘크리트의 비열과 열전도율도 일반적인 경우에 해당하는 다음 값을 사용하였다.

비열 : 0.235 kcal/kg · °C, 열전도율 : 2.3 kcal/m · hr · °C

(3) 콘크리트의 열팽창계수

응력 해석시 사용되는 콘크리트의 열팽창계수는 일반적으로 7.5×10⁻⁶/°C ~ 10.0×10⁻⁶/°C 정도의 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 예비해석 시에는 열팽창계수를 10.0×10⁻⁶/°C를 사용하였다.

(4) 대류계수

외기대류계수(h_a)와 유수대류계수(h_w)에 대하여 小澤은 다음과 같은 식을 제안한 바 있다.

$$h_a = 9.60 + 1.12v, \quad v : \text{풍속(m/sec)}, \quad h_w = 43.0 + 4.75v, \quad v : \text{유속(m/sec)}$$

교각기초 P1의 예비해석에서는 콘크리트 기초의 상면과 측면은 외기에 노출되지만 풍속의 영향을 직접 받지 않는 경우로 가정하여 10.0kcal/m² · hr · °C를 적용하였고 지반과 접하는 하면의 열전달 조건은 대류계수 3.0kcal/m² · hr · °C를 적용하여 수화열의 방출 면에서 다소 불리하도록 하였다.

(5) 외기온도 및 콘크리트의 초기온도

기상자료를 참고로 하여 외기온도와 타설시 콘크리트의 초기온도를 15°C로 가정하였으며 버림콘크리트층의 초기온도도 15°C로 가정하였다.

2.2.3 예비해석 결과

예비해석 결과로부터 기초의 주요 부위에 대한 온도균열지수를 계산한 결과는 표 3과 같다. 3m를 1회에 타설할 경우 기초의 표면과 내부에서의 온도균열지수의 최소치가 전반적으로 0.7~0.91 정도로 평가되어 온도균열 제어 측면에서 바람직하지 않은 것으로 나타났으며 1.5m 높이로 2회에 타설할 경우에는 온도균열지수가 1.0 이상을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 가장 먼저 시공되는 교각

기초 P1에 대하여 균열지수 1.0을 확보할 수 있는 방법(1.5m씩 3일 간격으로 타설)으로 시공하면서 실제의 온도계측을 실시하였다.

표 3 타설 방법에 따른 균열지수 평가 결과

구 분	외곽부		중양부	
	표면층	내부	표면층	내부
3m 1회타설	0.70	0.73	0.87	0.91
1.5m+1.5m(5일간격)	1단(1.5m)	1.0이상	0.94	1.0이상
	2단(1.5m)	1.0이상	1.0이상	1.0이상
1.5m+1.5m(3일간격)	1단(1.5m)	1.0이상의 온도균열지수 확보		
	2단(1.5m)			

3. 온도계측 및 분석

3.1 계측방법

계측위치는 기초의 중양부와 장변측 외곽부에 위치한 단면으로 선정하였으며 Thermocouple(T Type)을 콘크리트에 매립하였고 DATA LOGGER(TDS 601A)를 사용하여 온도변화를 기록하였다. 해석시의 유한요소망과 계측 위치는 그림 3과 같다. 총 13일동안 계측을 실시하였다.

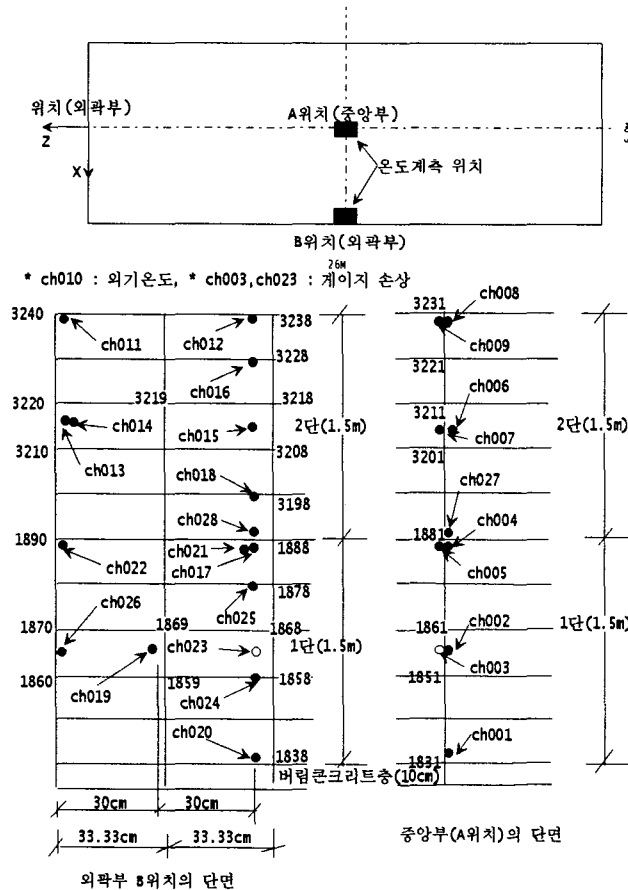


그림 3 유한요소망과 계측점의 위치

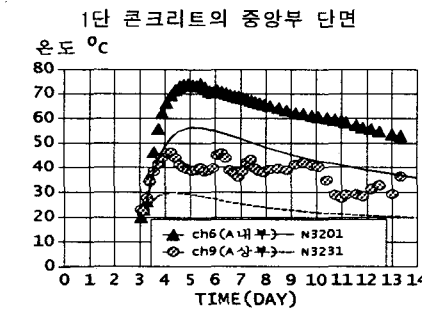
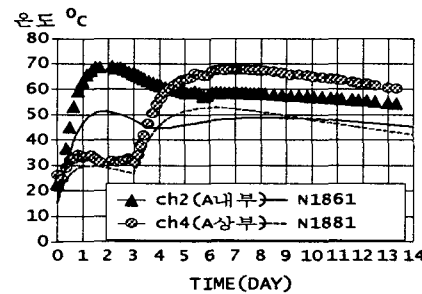
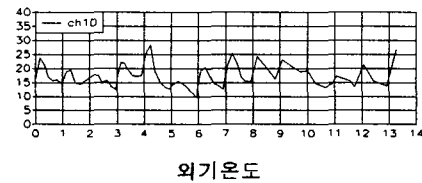


그림 4 온도계측 결과와 예비해석 결과의 비교

3.2 온도계측결과 및 문제점 분석

계측기간 동안의 외기온도는 예년의 월평균기온을 5℃정도 상회한 18℃정도인 것으로 나타났으며 일교차는 최대 15℃까지 기록되었다. 그림 4는 외기온도 계측 결과와 1단콘크리트와 2단콘크리트의 중앙부 단면 내부와 표면부의 온도계측 결과를 예비해석 결과와 비교한 것이다. 그림에서 기호로 표시된 것은 온도계측 결과이며 실선과 점선은 각각 내부와 표면부에 대한 예비해석 결과이다.

예비해석 결과와 계측결과는 큰 차이가 있었다. 예비해석에서는 최고온도 상승량이 37℃~39℃정도로 예측되었으나 계측결과는 47℃~52℃로써 10℃~13℃의 차이를 보이고 있다. 따라서 콘크리트의 열특성값 중에서 온도상승량과 밀접한 관계가 있는 단열온도 상승값(K값)이 예비해석시의 값보다 실제 사용된 콘크리트에서 훨씬 더 클 것임을 알 수 있다. 또한 내·외부 온도차도 예비해석의 경우에는 외기온도가 일정한 것으로 가정되어 평균적으로 25℃정도인 것으로 나타났으나 실제의 경우에는 예비해석 결과보다 더 큰 30℃ ~ 42.3℃인 것으로 나타났다(42.3℃의 온도차는 외기온도가 일일 최저값 일 때의 국부적인 온도차로 평가됨). 일교차의 영향을 고려하더라도 평균적으로 30℃ 이상의 온도차가 발생하고 있는 것으로 평가되었다. 따라서 실제의 대류계수, 콘크리트의 비열, 열전달계수 등 수화열에 영향을 미치는 계수값들이 예비해석에서 사용되었던 값과는 상당한 차이가 있는 것으로 판단된다. 결국, 계측 결과는 예비해석 결과보다도 응력 발생의 측면에서는 불리하게 되는 온도분포인 것으로 나타났으므로 계측 결과에 근접한 온도분포에 의한 응력해석을 재수행 하여 검토해야 할 필요가 있다.

4. 입력자료의 수정 및 재해석

4.1 입력자료의 조절

예비해석 결과가 온도계측 결과와는 큰 차이를 보임에 따라서 수화열에 의한 온도분포에 영향을 주는 각 입력자료를 표 4와 같은 일반적인 특성을 참고하여 다음과 같은 절차에 따라서 수정하였다.

표 4 온도곡선에 영향을 주는 변수들의 특성

입력변수	온도곡선에 미치는 영향
콘크리트의 비열	콘크리트의 비열이 커질수록 내부의 최고온도 값은 상승하고 표면부의 최고온도 값도 커진다. 또한 최고온도 도달 후 온도 하강 속도가 완만하게 된다.
콘크리트 열전도계수	콘크리트의 열전도계수가 커질수록 내부 최고온도는 작아지고 표면부의 최고온도는 상승한다. 따라서 내부와 표면부의 온도차는 작아진다. 또한 최고온도 도달 후 온도하강 속도가 더 빨라진다.
단열온도 상승값(K)	단열온도 상승 값이 커질 경우 내부최고온도 값이 커지며 내부와 표면부의 온도차가 커진다.
반응속도(α)	반응속도 값이 커질 경우 최고온도 도달 시점이 빨라진다.
대류계수	경계면에서의 대류계수가 커질 경우 내부 최고온도 값은 작아지고 표면부의 온도 값이 더욱 작아진다. 따라서 내부와 표면부의 온도차가 커진다. 그리고 최고온도 도달후 온도 하강속도가 빨라진다.
외기온도	외기온도가 높아질수록 수화발열 속도와 최종 발열량이 증가하는 경향이 있으므로 내부 최고온도는 상승할 것이다.
콘크리트 타설온도	타설시의 콘크리트의 온도의 영향에 대한 연구는 미진하지만 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우 타설온도가 높아질수록 상승온도는 낮아지고 반응속도는 빨라지는 경향이 있는 것으로 알려져 있다.

- ① 콘크리트의 타설온도를 계측값으로 수정한다.
- ② 외기온도를 계측된 평균온도를 적용한다.
- ③ 내부 최고온도에 가장 큰 영향을 미치는 단열온도 상승값(K)을 조절하여 내부 최고온도를

계측결과와 비슷하도록 수정한다.

- ④ 최대온도 발생 시기를 비교하여 반응속도값(α)을 조절한다.
 - ⑤ 온도 하강부의 곡선 형태를 비교하여 비열과 열전도계수를 조절한다.
 - ⑥ 표면부의 온도곡선을 비교하여 대류계수를 조절한다.
- 이러한 절차를 반복하여 해석을 수행한 결과 최종 선정된 계수의 값은 표 5와 같다.

표 5 예비해석에 사용된 계수값과 수정된 최종 계수값의 비교

구	분	예비해석	재해석
콘크리트의 열특성계수	비열(kcal/kg·°C)	0.235	0.30
	열전도계수(kcal/hr·°C)	2.3	2.0
	단열온도상승값(°C)	48.0	58.0
	반응속도	1.15	1.20
경계면의 대류계수 (kcal/m ² ·hr·°C)	상면	10.0	15.2(1단), 8.0(2단)
	측면	10.0	15.2
	하면	3.0	43.0
콘크리트 타설환경	콘크리트 타설온도	15.0	22.0
	외기온도	15.0	18.0

표 5에서 대류계수는 1단 상부의 경우 외기에 노출된 상태였으므로 小擇의 실험식에 풍속 5m/sec를 적용하여 결정하였으며 2단 상부의 경우 양생포를 사용하였으므로 콘크리트 표준시방서를 참조하여 8.0을 적용하였다. 측면도 상면과 같은 조건을 적용하였다. 또한 하면의 경우 지반에 접하고 있어 당초에는 지반의 특성을 고려하여 대류계수의 값을 3.0으로 낮게 사용하였으나 계측결과 하면으로 열의 방출이 큰 것으로 나타났다. 이 같은 현상은 하면 지반에 있는 지하수의 영향일 것으로 판단하여 기초 하부에 물의 특성(비열 1.0kcal/kg·°C, 열전도율 0.527kcal/m·°C)을 갖는 요소를 추가하였고 대류계수는 小擇의 실험식에 유속 0m/sec를 고려하여 적용하였다.

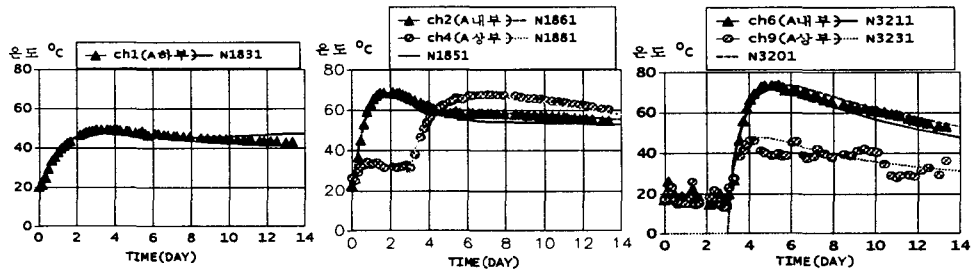


그림 5 수정된 계수를 적용한 온도해석 결과 비교-중앙부 단면(A위치)

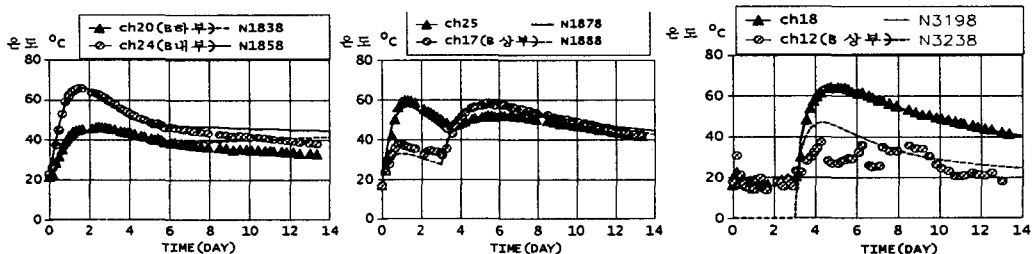


그림 6 수정된 계수를 적용한 온도해석 결과 비교-외곽부 단면(B위치)

4.2 수정된 계수를 적용한 해석 결과

4.2.1 온도해석 결과

수정된 계수 값의 타당성을 검증하기 위해 여러 위치에 대하여 온도해석을 수행한 결과를 계측 결과와 비교하여 그래프로 나타내었다. 그림 5는 중앙부 단면에서의 결과이며 그림 6은 외곽부 단면에서의 결과이다. 각 절점에서의 해석결과는 선으로 나타내었으며 계측결과는 도형으로 나타내었다. 그림의 온도곡선이 계측 값과 정확히 일치하지는 않지만 온도곡선의 경향과 내·외부 온도차 등 기초 단면의 온도분포가 유사하므로 응력해석을 위한 온도입력자료로 사용할 수 있을 것으로 판단하였다.

4.2.2 응력해석 결과

1.5m씩 3일 간격으로 2회 타설된 교각기초 P1에 대한 온도균열지수의 평가를 위하여 수정된 계수를 사용한 온도해석 결과를 사용하여 응력해석을 수행하였다. 구조해석 모델은 예비해석과 동일하게 하였다. 그림 7에 주요 응력해석 결과를 재령에 따라 계산된 강도곡선과 비교하여 나타내었다.

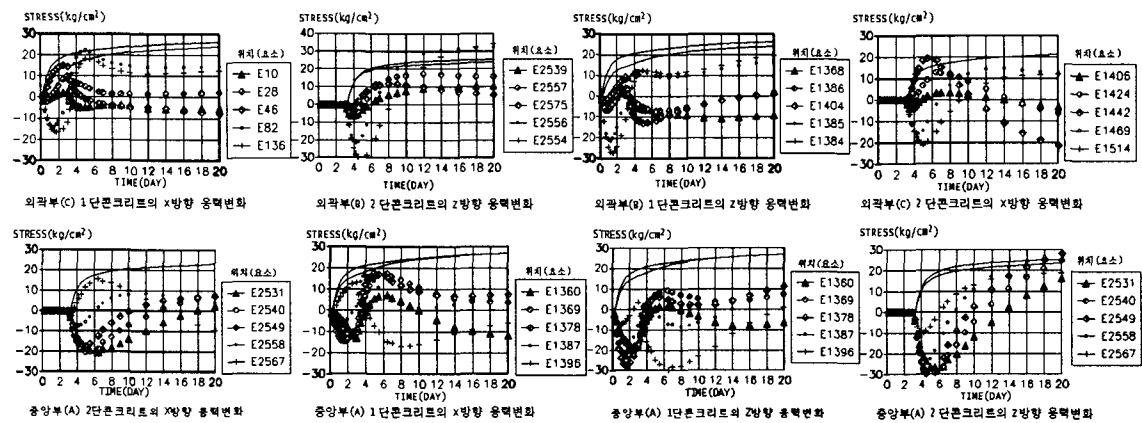


그림 7 수정된 계수를 적용한 응력해석 결과

기초 단변쪽의 외곽부(C위치)에서의 응력의 경우 1단콘크리트의 표면부에서 1단콘크리트 타설 후 1.5 ~ 3일경에 초기 인장응력이 인장강도보다 약간 큰 정도로 나타났으며 최소 온도균열지수는 0.93정도로 평가되었다. 1단콘크리트 내부에서는 타설 후 5일 경과시점에서 응력이 강도보다 약간 큰 것으로 나타났으나 이 때의 온도균열지수는 0.98정도로 평가할 수 있다. 2단콘크리트의 경우 2단 타설 후 1일 ~ 4일 경과시점에서 표면부의 인장응력이 인장강도보다 크게 나타났으며 균열지수의 최소치는 0.74 정도였다.

기초 장변쪽의 외곽부 단면에서의 응력의 경우 표면부에서는 인장응력이 인장강도보다 낮게 나타났다. 그러나 2단콘크리트의 내부응력이 강도를 초과하여 최소 온도균열지수가 0.76 정도가 되는 것으로 나타났다.

기초 중앙부에서는 1단콘크리트와 2단콘크리트 모두 표면에서의 인장응력은 인장강도보다 작은 것으로 나타났으며 온도균열지수는 1.15이상으로 평가되었다. 그러나 내부의 z방향 인장응력이 강도보다 커서 균열지수가 1.0 이하로 되는 것으로 나타났다.(최소온도균열지수 0.80).

4.3 균열의 관찰 및 분석

거푸집 제거 후 교각기초에 대한 균열 조사를 실시한 결과 다음과 같은 두 가지 유형의 균열이 발견되었다.

- 균열유형 1 : 2단 콘크리트의 상면에 발생한 장변 방향의 균열
- 균열유형 2 : 2단콘크리트 측면에 발생한 수직균열

2단 콘크리트의 상면에서 발견된 장변 방향의 균열이 발생한 위치는 최소 온도균열지수가 0.74였던 곳과 일치하는 부위였다. 이 균열은 내부구속조건에 의해 발생된 것으로 추정되었다. 그러나 내부로 갈수록 응력은 감소하게 되므로 균열 깊이는 깊지 않을 것으로 판단되었으며 균열폭도 0.08mm정도이며 구조적으로 유해한 것이 아닌 것으로 판단되어 단순보수 하였다.

균열 유형 2와 같은 균열은 균열폭이 0.1mm 정도로 관찰되었다. 기초 장변의 외곽측 내부에서 최소 온도균열지수가 0.76 정도였던 것을 고려하면 단순한 표면균열이 아니고 내부로부터 전파되어 나온 것일 수 있고 그러한 경우에는 구조적으로 유해하게 되므로 균열의 진전상태를 관찰하였다. 그러나 균열 길이와 폭의 변화가 없었고 균열폭을 고려할 때 외부구속조건에 의한 관통균열이 아닌 것으로 판단할 수 있었다.

교각기초의 응력 해석에서 기초 저면의 수평이동에 대한 강한 구속조건을 적용하였고 특히 콘크리트의 수축시에 대한 열팽창계수를 10×10^{-6} 으로 적용한 점을 고려할 때 외부구속 조건의 지배를 받는 기초 내부의 온도균열 지수는 보수적으로 평가되었다고 판단할 수 있었다.

5. 결 론

(1) 1회 타설 높이의 결정을 위한 예비해석 결과로부터 3.0m를 1회에 타설하는 것은 표면과 내부의 균열 발생 확률이 매우 큰 것으로 평가되었고 1.5m씩 3일 ~ 5일 간격으로 콘크리트를 타설하는 방안이 적절할 것으로 평가되었다.

(2) 교각기초 P1에 대하여 사용된 콘크리트에 대한 열특성을 일반적인 것으로 가정한 예비해석 결과와 실제 계측한 결과와는 온도 상승량에 있어서 10℃ 이상의 차이를 보였으며 반복수행에 의한 열특성계수를 추정된 결과 사용된 콘크리트의 단열온도상승값(K)은 58℃정도인 것으로 평가되었다.

(3) 교각기초 P1의 해석과 온도계측 결과 표면부 균열의 발생을 지배하는 단면 내·외부의 온도차는 30℃ 정도였으며, 이로 인하여 기초 상면의 중앙부와 측면에 일부 표면균열이 발견되었다. 그러나 균열폭은 0.1mm를 넘지 않는 것으로 구조적으로 유해하지는 않을 것으로 평가되었다.

(4) 수화열 제어를 위한 재료에 대해 별도의 대책을 세울 수 없는 포항 지역의 레미콘(관급) 특성을 감안하고, 비용과 시공성 측면에서 불리한 파이프 쿨링을 실시하지 않으면서 분할 타설하는 방법을 통해 공기지연 및 추가비용의 지출을 방지하였다.

참 고 문 헌

1. 김진근, 김국한, "크리이프와 건조수축을 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 의한 온도응력 해석", 대한토목학회 논문집, 제14권, 제4호, 1994. 7.
2. 최계식, 양주경, 최영돈, 최고일, "수화열 계측 및 파이프쿨링 시공사례", 한국 콘크리트학회 1994년도 가을 학술발표회 논문집, 1994.11.
3. ACI Committee 207, "Mass Concrete", ACI Manual of concrete Practice Part 1, 207.1, 1994.
4. "건설교통부제정 콘크리트 표준시방서", 사단법인 대한토목학회 1996.
5. "광안대로 교각기초 콘크리트의 수화열 제어 연구", 포항산업과학연구원 연구보고서, 1997. 8.
6. "구형산교 재가설공사를 위한 교각기초 콘크리트의 수화열 해석", 포항산업과학연구원 연구보고서, 1999.5.