도시철도 교각의 시공중 균열발생 원인과 제어방안을 위한 매개변수 연구

A Parametric Study on the Reason and Control of Crack during the Construction of Pier in Urban Transit

박성규[†]

Seong-Kyu Park

Abstract This paper is designed to propose methods to both analyze and control the reasons for cracks appearing during the construction of piers. For this aim, a numerical analysis was performed to identify the properties of crack which resulted from heat of hydration and differential drying shrinkage with the key influence factors considered. The results show that the thermal cracks occurred within a few days, and the drying shrinkage cracks within a few weeks. Meanwhile, settlement shrinkage cracks occurred within a few hours. Discussing the control methods based on the time of the cracks appearing, quality control, reduction of the unit quantity of cement, and the preservation of moisture on the surface are proposed as the realistic and effective methods for preventing settlement cracks, thermal cracks, and drying shrinkage cracks respectively.

Keywords : Pier, Heat of hydration, Thermal cracks, Diffusion coefficient, Drying shrinkage

초 록 최근 들어 모노레일과 같은 도시철도의 지상화로 콘크리트 교각구조물의 시공이 많아 지고 있다. 이 경우 품질관리 및 재료특성 등의 복합적인 원인으로 교각의 시공중에도 균열이 다수 관찰되고 있다. 본 연구에서는 교각의 시공중 균열발생원인을 분석하고 제어할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위해 수화열 및 부등건조수축에 의한 균열특성을 파악하기 위해 주요영향인자를 고려한 수치해석을 수행하였다. 해석결과 수일 내에 온도균열이 수십일 내에 부등건조수축에 의한 균열이 발생하였으며 수시간 내에는 침하수축균열로 분석되었다. 균열발생 시기적으로 제어방안은 침하균열의 경우 품질관리, 온도균열의 경우 단위시멘트량 감소, 건조수축 균열의 경우 표면보습 상태유지가 현실적이고 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

주요어 : 교각, 수화열, 온도균열, 수분확산계수, 건조수축

1. 서 론

최근 도시여건 변화에 따른 도시교통문제 개선과 신교통 시스템 도입에 따른 기술력 및 경제성 향상과 국제경쟁력 확보 등의 목적으로 도시철도를 모노레일형식의 지상구조로 건설하거나 계획하는 일이 많아 지고 있다. 이 경우 노출되는 콘크리트의 교각 구조물은 수백여개에 달하고 설계는 정형화된 물성치나 하중조건하에서 최종단계에서만 균열을 검토하고 있다. 실제 시공중에도 품질관리, 시공방법, 환경조건 등 복합적인 원인으로 지상에 노출되는 교각 구조물에 균열이 다수 관찰되고 있다. 시공중 균열발생은 미관상의 우려와 주행 및 보행자에게 심리적 불안감을 유발할 수도 있다. 콘크리트 구조물의 대형화에 따른 마스콘크리트의 수화열에 의한 온도균열 제어에 관한 연구는 주로 박스구조물을 대상으로 수행되어 왔다[1,2]. 수분확산에 의한 건조수축은 주로 슬래브 또는 교량 상부구조물을 대상으로 하였다[5,11]. 교각 구조물의 경우도 기초부에 대한 수화열 해석만을 대상

하였다[3]. 지상에 노출부 교각의 수화열과 건조수축을 동시에 고려한 균열원인 분석과 제어에 대한 연구는 다소 부족한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 실제 시공중인 도시철도 교각 구조물에 대해 현장 균열조사를 실시하고, 균열 발생원인을 규명하기 위하여 현재 시공조건과 동일하게 모델링하여 3차원 입체 유한요소해석을 수행하였다. 그리고 해석결과를 실제 발생균열과 비교 분석하였다. 또한 교각 시공시 시공단계별 타설높이, 시멘트종류, 단위시멘트량, 외기 습도 등의 매개변수 변화에 따른 해석을 수행하여 온도균열 및 건조수축균열의 제어방안을 제안하고자 한다.

2. 현장 균열 조사

본 연구대상 구조물은 OO도시철도 O호선을 대상으로 하였다. 총 교각 수는 700여 개이지만 현재는 기둥이 미시공 또는 부분시공, 코핑부가 아직 시공되지 않았거나 일부 시공완료 되었으나 접근하여 관찰할 수 없는 등 현장조사는 제한 적이었다. 이에 따라 기둥부 시공이 완료되어 코핑부의 시공을 위한 워킹타워가 설치되어 있는 교각을 대상으로 하였고, 인접 교각에 대해서는 관찰 가능한 높이에서만 균열

[†]교신저자 : 대구대학교 토목공학과
E-mail : psk292@naver.com

Fig. 1 Crack picture of pier corner

Fig. 2 General Map of Pier

Fig. 3 Crack Sketch

조사를 실시하였다. 대상 교각 구조물의 일반적 현황은 Fig. 2와 같고, Fig. 1과 Fig. 3은 실제 대상구조물에 발생한 균열의 형태와 발생 현황을 나타낸 것이다. 여기서 지상으로 부터 2m이하 높이에서는 기둥둘레 모두 관찰 가능하지만 그 이상은 워킹타워가 전면부에만 설치된 관계로 전면부만 조사하였다. 그리고 현재 대상 교각 구조물의 코핑부는 미시공 상태이다. 또한 워킹타워가 설치되어 있더라도 기둥전면 모두를 근접 조사할 수는 없었고 확인한 균열만을 표시하였다.

연구대상 구조물에 발생한 균열은 일정한 형상이 없고, 균열 폭은 0.1mm의 크기로 불규칙한 미세균열이 대부분이었다. 그리고 교각 모서리 부분에 수평방향으로 발생한 균열의 폭은 0.1mm~0.2mm의 균열이 대부분이나, 일부 모서리에 발생한 V자 형태의 균열은 폭이 최대 0.3mm 크기로 발생되었다. 인접 교각들에도 조사 가능한 위치에서 상기와 같은 균열이 유사하게 발생된 상태이다. 모든 대상 교각 구조물의 재료특성 및 단면형태, 시공방법 등이 동일하거나 유사함을 고려해 볼 때 다소 차이는 있지만 모든 교각에 상기와 같은 형태의 균열이 발생되었거나 발생될 것으로 추정된다. 또한 대부분의 균열은 콘크리트 현장 타설한 뒤 거푸집 탈형 직후 또는 수주 내에 발견된 초기균열로 확인되

었다. 그러나 박리 및 백태 등의 이상 결함은 관찰되지 않았다. 콘크리트 구조물의 시공중 발생하는 대부분의 균열은 타설 후 수일에 해당한다[4,5]. 현장조사된 균열의 경우 수시간 내에 발생하는 침하수축균열을 포함하여 복합적이고 여러 가지 원인이 있을 것이나 수화열과 건조수축에 의한 균열일 가능성이 높은 것으로 판단된다.

3. 콘크리트 열특성 및 수분확산 특성

본 연구에서는 콘크리트 부재의 온도 및 건조수축 응력의 해석을 위해 MIDAS/FEA프로그램에 의한 유한요소해석 기법을 사용하였다[6,7]. 해석에 사용되는 주요개념과 고려되는 사항은 다음과 같다.

3.1 열전달 및 열응력 해석

3.1.1 온도와 시간에 의한 등가재령과 적산온도

콘크리트의 경화과정에서 발생하는 재질특성의 변화는 온도와 시간의 함수형태로 나타내게 된다. 이러한 현상을 반영하기 위해 등가재령과 적산온도라는 개념을 사용하였다. 등가재령은 식(1)과 같이 CEB-FIP MODEL CODE를 사용하였고, 숙성도 이론에 근거한 적산온도는 식(2)의 Ohzagi 식을 사용하였다[8].

$$t_{eq} = \sum_{i=0}^n t_i \left\{ 13.56 - \frac{4000}{273 + T(t_i)/T_o} \right\} \quad (1)$$

여기서, t_{eq} = 등가재령(day), t_i = 각 해석단계에서의 시간 간격(day), $T(t_i)$ = 각 해석단계에서의 온도(°C), T_o = 1이다.

$$M = \sum_{i=1}^n t_i \cdot \beta \cdot [T(t_i) + 10] \quad (2)$$

여기서, $\beta = 0.0003 \cdot [T(t_i) + 10]^2 + 0.006 \cdot [T(t_i) + 10] + 0.55$, M = 적산온도(°C-day)이다.

3.1.2 콘크리트의 압축 및 인장강도

본 연구의 수치해석에서는 콘크리트 표준시방서 제안식을 사용하였다[9].

$$F_{cu}(t) = \frac{t}{a + b \cdot t_{eq}} F_{cu}(91) \quad (3)$$

$$F_{sp}(t) = c \sqrt{F_{cu}(t)} \quad (4)$$

여기서, $F_{cu}(t)$: 재령 t 에서 압축강도(kN/m²), $F_{sp}(t)$: 재령 t 에서 인장강도(kN/m²), $F_{cu}(91)$: 재령 91에서 압축강도(kN/m²), a, b : 시멘트종류에 따른 계수이다.

3.1.3 탄성계수 및 단열온도 상승곡선

탄성계수는 콘크리트 표준시방서 제안식인 식(5)를 사용하였다.

$$E_c(t) = \phi(t) \times 15,000 \sqrt{F_{cu}(t)} \quad (5)$$

여기서, $E_e(t)$: 재령 t 에서 유효탄성계수(kN/m²), $\phi(t)$: 온도상승시 크리프영향이 커짐에 따른 탄성계수에 대한 보정계수, $F_{cu}(t)$: 재령 t 에서 압축강도 추정(kN/m²)이다.

콘크리트 단열온도 상승특성은 콘크리타설 후 콘크리트 내부의 온도변화를 해석하기 위한 기본적인 정수이며 일반적으로 식(6)를 사용하여 구한다.

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (6)$$

여기서, Q_{∞} : 최종단열온도 상승량, r : 온도상승속도에 관한 계수, t : 재령(일), $Q(t)$: 재령 t 일에서의 상승량(°C)이다.

3.1.4 균열지수 및 온도균열 발생확률

수화열에 의한 온도균열지수와 온도균열 발생확률에 의거하여 평가하도록 규정하고 있으며 Table 1 및 Fig. 4는 온도균열지수와 온도균열 발생확률과의 관계를 나타낸 것이다.

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_t(t)} \quad (7)$$

여기서, $I_{cr}(t)$: 온도균열지수, $f_{sp}(t)$: 재령 t 일에서의 콘크리트 인장강도, $f_t(t)$: 재령 t 일에서의 수화열에 의한 발생응력이다.

Table 1 Thermal cracking index and crack probability

Cracking index	Crack Probability
1.5 이상	5% 이하
1.2 ~ 1.5	10 ~ 25%
0.7 ~ 1.2	25 ~ 85%
0.7 이하	85% 이상

Fig. 4 Thermal cracking index and crack probability

3.2 콘크리트의 수분확산 특성

건조수축 해석을 수행하기 위해서는 우선 콘크리트 내의 수분확산의 거동을 해석해야 한다. 이러한 수분 확산의 경우 열전달 해석과 동일하게 포텐셜 문제로 귀결된다. 따라서 수분이동에 대한 지배방정식은 열전달에 대한 지배방정식과 유사한 형태를 나타낸다[5]. 식(8)은 수분 확산 지배방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial w_e} \nabla \cdot (D_h \nabla h) + \frac{\partial h_s}{\partial t} \quad (8)$$

여기서, $\partial h / \partial w_e$: 수축 등온선의 기울기, D_h : 수분확산계수 (m²/day), h_s : 자기건조에 의한 습도감소이다.

수분확산이론에서의 수분확산계수는 상대습도와 온도의 영향을 주로 받지만, 물-시멘트비, 골재의 양과 질 등 콘크리트의 재료적 특성에도 영향을 받는다 따라서 콘크리트 내의 수분이동은 고차의 비선형성을 가진다.

수분확산계수 D_h 는 온도와 습도 등의 함수이며, 따라서 이들의 변화로 인해 상당한 영향을 받는다. CEB-FIP('90)에서는 등온조건(isothermal condition)인 경우에 수분확산계수를 공극의 상대습도의 함수로 식(9)와 같이 제시하고 있다[10].

$$D(h) = D_1 \left\{ \alpha + \frac{1 - \alpha}{1 + [(1 - h)/(1 - h_c)]^n} \right\} \quad (9)$$

여기서, D_1 는 $h = 1.0$ 인 경우의 수분확산계수(최대수분확산계수) (m²/hr), D_0 는 $h = 0$ 인 경우의 수분확산계수(최소수분확산계수) (m²/hr), α 는 D_0/D_1 , h_c 는 $D(h) = 0.5D_1$ 에서 공극의 상대습도, n 은 지수, h 는 공극의 상대습도이다.

CEB-FIP('90)에서는 근사적으로 $\alpha = 0.05$, $h = 0.8$, $n = 15$ 를 제시하고 있다. 그리고 최대 수분확산계수 D_1 은 식(10)과 같이 압축강도의 함수로 나타냈다.

$$D_1 = \frac{D_{1.0}}{f_{ck}/f_{ck0}} \quad (10)$$

여기서, $D_{1.0} = 3.6 \times 10^{-6}$ (m²/hr), $f_{ck0} = 10$ MPa, 설계기준압축강도 f_{ck} = 콘크리트의 평균압축강도(f_{cm}) -10MPa이다.

수분대류계수는 물-시멘트비(w/c)의 함수로 다음과 같은 식(11)로 나타내었다[11].

$$f = 2.17 \times 10^{-3} \left(\frac{w}{c} \right) - 8.56 \times 10^{-4} \quad (11)$$

4. 교각의 수화열 및 건조수축 해석

유한요소해석 대상구조물은 시공 중 균열이 발생한 교각을 모델로 하여 타설온도, 외기온도, 사용 시멘트량, 물-시멘트비 등 재료 및 시공조건과 동일한 상태에서 시공단계별 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 콘크리트 부재의 온도분포 및 온도응력의 해석을 위해 MIDAS/FEA프로그램에 의한 유한요소해석 기법을 사용하였다. 해석은 시공방법과 재료 등의 변화에 따른 수화열 해석과 외기습도변화에 따른 부등건조수축 해석을 수행하였다. 상기와 같은 방법으로 해석한 결과는 외관조사 결과와 비교분석 하였고, 이를 바탕으로 균열제어 대책 방안을 도출하였다. 유한요소해석 모델은 곡선부를 고려하여 교각은 4절점 Solid요소로 지반은 8절점 육면체 Solid요소로 하고 대상구조물의 대칭성을 고려하여 1/4모델을 사용하였다. 그리고 기초부 및 현장타설 말뚝의 경우는 재료적 특성을 반영하였지만, 수화열 및 수분특성은

Fig. 5 Analytical model

고려하지 않고 지상 노출부인 교각 기둥부 타설부터 시공단계별 해석을 수행하였다.

4.1 수화열 해석

4.1.1 CASE-1 : 시공과 동일 조건

유한요소 해석에 적용된 시공조건 및 재료적 특성은 현장의 시공관리 기록자료와 기후조건을 고려하여 적용하였으며, 재료와 열특성은 Table 2과 같다. 그리고 대상구조물의 시공 단계는 Table 3과 같으며 각 시공 Stage는 7Step, 7Step, 33Step의 총 47Step으로 시간을 세분화 하였다.

본 연구에서는 해석시 수화열의 영향인자인 Solid요소의 크기를 도출하기 위하여 요소크기를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4m로 모델링하여 해석을 수행하였다. 각 조건에 따른 해석결과 지상 노출부 교각의 온도분포도는 Fig. 6과 같고 균열지수도 는 Fig. 7과 같다. 여기서, 각 step에 대해 해석을 수행하고 모든 Step을 통틀어 각 요소에서 온도분포도는 최대값을 균열지수는 최소값을 도시한 것이다. 이때 균열지수는 0.7

Table 2 Properties of Materials and Thermal

Properties	Pier	Pile	Soil
비열(J/kg °C)	1155	1155	760
비중(kgf/m ³)	2500	2500	1900
열전도(W/m °C)	2.7	2.7	1.7
대류계수	외기노출	-	-
(W/m °C)	철재거푸집	-	-
외기온도(°C) (월평균)	15.6	-	-
타설온도(°C)	18.1	-	-
설계강도(MPa)	27	-	-
압축강도	a	4.5	-
발현계수	b	0.95	-
탄성계수(N/m ²)	2.4645e+10	2.7277e+10	1.0e+10
열팽창계수	1.0e-5	1.0e-5	1.0e-5
프와송비	0.18	0.18	0.2
단위시멘트량(kg/m ³)	378	-	-
발열함수	k	54.58	-
계수	a	1.4004	-

Table 3 Construction Stage

Construction Stage	Placement Height	Deposition Time	Remark
Stage 1	6.0m (기둥)	14 day	11월 시공
Stage 2	4.2m (기둥)	14 day	코핑 미시공
Stage 3	2.8m (코핑)	100 day	가정

이하 이고 균열 발생확률이 85%이상인 경우만을 추출하여 도시하였다.

Solid 요소크기에 따른 해석결과 Table 4와 같이 요소크기가 작을수록 균열지수가 감소하는 반면에 온도해석결과는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 요소크기 0.1m인 경우를 기준으로 할 경우 오차가 5%이내이고, 해석시간의 지배인자인 요소수를 고려할 때 요소크기는 0.2m가 적절한 것으로 판단 된다. 요소크기 0.2m는 대상 교각 모델의 최소 단면 치수인

Fig. 6 Temperature contour

Fig. 7 Temperature crack index contour (≤ 0.7)

Table 4 Result by Element Size

Element Size	Element Number	Crack Index	Temperature	Ratio	
		Min.	Max.	Crack Index	Temperature
0.1 m	99482	0.236	72.82	1	1
0.2 m	12747	0.248	73.12	1.05	1.00
0.3 m	3560	0.251	73.63	1.06	1.01
0.4m	1721	0.293	74.36	1.24	1.02

0.7m의 0.29배에 해당하며 Solid요소에 의한 수화열해석시 요소크기는 최소 단면치수에 약 30%가 적당할 것이라 예상된다. 이에 따라 수화열 매개변수 해석이나 건조수축해석은 0.2m요소 크기를 적용하였다.

4.1.2 수화열 매개변수 해석

온도균열지수는 시멘트의 종류, 타설온도, 타설높이, 양생 방법 등 여러가지 요인에 영향을 받는다. 균열지수의 변화를 알아보기 위해 2m높이로 분할 타설(CASE-2), 저발열 시멘트 사용(CASE-3), 단위시멘트량 20kg/m^3 (CASE-4) 및 40kg/m^3 (CASE-5) 감소의 조건으로 해석하였다. 해석결과 부위별로 기둥부와 코핑부의 최소균열지수는 Table 5와 같고 CASE-1과 마찬가지로 각 조건별 균열발생확률 85%이상으로 균열지수 0.7이하만 도시한 것은 Fig. 8과 같다.

타설높이를 2m로 가정한 CASE-2의 경우 기둥부에서 최소 균열지수는 0.302로 CASE-1의 0.314보다 낮게 나타났다.

Table 5 Minimum Crack Index in Each Case

CSAE	Min. Crack Index		Max. Temperature
	Coping	Column	
CASE-1	0.248	0.314	73.12
CASE-2	0.034	0.302	68.37
CASE-3	0.472	0.643	43.61
CASE-4	0.266	0.337	70.18
CASE-5	0.287	0.362	67.25

균열발생확률 95%이상에 해당하는 균열지수 0.48이하의 분포면적도 CASE-2는 20.9%이고 CASE-1의 경우는 16.2%로 나타나 타설높이 감소에 따른 온도균열제어의 효과가 없는 것으로 나타났다. 기둥부의 온도균열은 내외부 온도차이에 의한 내부구속응력이 지배적이며 일정 타설높이 이상에서는 동일할 것으로 예상된다. 더욱이 타설 블록길이가 긴 코핑

Fig. 8 Temperature crack index contour (≤ 0.7)

Fig. 9 Moisture diffusion coefficient $D(h)$

부의 CASE-2와 같은 분할 타설은 기타설된 콘크리트에 의한 구속도에 의해 외부구속응력이 발생하여 최소 균열지수는 0.034로 균열발생확률에 있어서 매우 불리하였다. 따라서 코핑부는 일괄시공이 온도균열 제어에 적절함을 알 수 있다. 저발열 시멘트를 사용한 CASE-3경우는 Fig. 8(b)와 같이 코핑부의 일부분을 제외하면 시공조건의 CASE-1에 비해 온도균열 제어효과가 확실하였다. 단위시멘트량을 감소시킨 CASE-4 및 CASE-5의 경우 기둥부 최소 균열지수는 각각 0.337 및 0.362로, 균열지수 0.48이하의 상대 분포면적은 각각 11.9% 및 9.4%로 나타나 다소 균열제어 효과가 있음을 알 수 있었다. 저발열 시멘트의 사용은 경제성이 큰 문제이고 건조수축 및 기타 균열의 발생까지 억제할 수는 없으므로 강도를 포함한 소요품질범위 내에서 단위시멘트량을 감소시키는 것이 현실적이라 판단된다.

4.2 교각의 건조수축 해석

콘크리트 내의 수분 거동 특성을 나타내는 물리량으로 배합설계를 근거로 물-시멘트비(w/c)가 0.472로 식(11)에 의해 수분대류계수는 0.0001682m/hr , 식(10)에 의해 최대수분확산계수 $D_1=0.0000018947\text{m}^2/\text{hr}$ 이며, 수분확산계수의 경우 식(9)에 따라 상대습도에 따른 비선형성의 값으로 Fig. 9와 같다. 상대습도가 0.7에서 0.8사이에서 확산계수가 급격히 변화하므로 시공과 동일조건으로 평균 외기습도 0.703의 경우와 표면보습상태로 가정한 0.85의 경우에 대해 각각 해석하였다. 각 경우에 대해 시공단계별 최대응력 발생시점에서 콘크리트 인장강도 이상의 응력분포만을 도시한 것은 Fig. 10과 같다. 이때 건조수축 균열에 대한 평가기준은 없으므로 온도균열 평가와 동일한 개념으로 건조수축에 의한 응력을 인장강도/ $0.7 = 2.0804 \times 10^6 / 0.7 = 2.972 \times 10^6 \text{N/m}^2$ 이상만 도시하였다. 수화열의 경우 인장강도와 발생응력의 비가 0.7일 때 균열발생확률은 85%이다. 이와 같은 온도균열지수의 개념으로 건조수축에 의한 균열 발생확률도 85%이상을 도시하고자 하였다. 시공조건을 고려한 Fig. 7(b)의 온도균열은 모서리로 부분으로 갈수록 발생확률 85%이상으로 나타났고 Fig. 10의 건조수축 응력분포도에 의한 균열발생확률

(a) $h = 0.703$ (b) $h = 0.85$ Fig. 10 Stress contour ($\geq 2.972 \times 10^6 \text{N/m}^2$)

↓ Zomm in

Fig. 11 Temperature and shrinkage stress history

은 모서리 및 일부표면에 불규칙하게 높게 나타났다. 현장조사에 의한 교각의 모서리부 및 표면균열도 해석과 유사한 위치에서 관찰되었다. 교각 기둥의 모서리부에는 주로 온도 및 건조수축 균열이 표면부에는 건조수축 균열의 발생소지가 높음을 알 수 있다.

Fig. 11은 교각기둥부 1단계 시공부분의 최대 응력발생 위치에서 수화열 및 건조수축 응력의 시간이력이다. 온도응력의 경우 타설후 2일경에 인장강도를 초과하는 최대응력이 발

생되었고 건조수축의 경우 약 14일 경에 최대응력이 발생되었다. 온도균열의 경우 3일 내에 발생하며 건조수축에 의한 균열의 경우는 2~90일 사이에 발생 확률이 높은 것으로 나타났다. 외기 습도 0.85로 가정한 경우는 최대응력 발생 지점에서도 인장강도 이하로 나타나 콘크리트 표면부를 보습조치하여 외기습도를 85%이상으로 100일 이상 유지한다면 건조수축 균열을 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 논문은 도시철도 지상노출부 콘크리트 교각구조물의 시공중 균열의 원인과 제어를 위한 방안을 고찰하기 위해 해석적인 방법으로 연구를 수행한 것이다. 현재 시공중에 있는 교각을 대상으로 현장조사와 수화열 및 건조수축 해석을 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 시공중에 있는 교각 구조물의 외관조사 결과 일부 표면과 대부분 모서리에서 0.1~0.3mm 균열이 발생되었다. 다소 차이는 있지만 거의 모든 교각에 균열이 발견되었다.

(2) 시공조건 및 재료특성을 현장과 동일한 조건으로 모델링하여 시공단계별 수화열 및 건조수축 해석을 수행한 결과 균열발생확률 85%이상 분포도에서 현장조사된 균열과 유사한 패턴을 보였다. 균열의 원인은 복합적이고 여러가지 요인이 있을 것이나 시공중 교각구조물의 모서리부 균열의 주된 원인은 시기적으로 수화열과 건조수축, 표면부는 건조수축으로 판단된다.

(3) 수화열해석시 입체요소의 크기에 따라서도 결과값이 변화하므로 해석모델링시 요소크기는 최소단면 치수의 30%가 적절한 것으로 예상되었다.

(4) 수화열에 의한 온도응력은 콘크리트 재령 2일경에 건조수축에 의한 응력은 재령 14일에 최대로 발생되었다. 온도균열의 경우 3일내, 건조수축의 경우 재령 2~100일 사이에 균열발생확률이 높은 것으로 나타났다.

(5) 온도균열의 경우 경제성을 무시한다면 저발열시멘트 사용이 가장 균열제어에 효과적이긴 하지만 콘크리트 강도를 포함한 소요품질을 유지하는 범위 내에서 단위시멘트량을 감소시키는 것이 현실적인 것으로 판단된다.

(6) 건조수축 균열의 경우는 외기습도를 85%이상으로 콘크리트 표면부를 100일 이상 보습상태를 유지하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

(7) 교각의 시공중 발생 균열은 시기별로 타설 후 수시간 내에 침하수축균열이 수일 내에 수화열, 수십일 내에 건조

수축 균열이 지배적으로 발생하는 것으로 볼 수 있다. 모서리에서 주로 V형태로 나타나는 침하수축균열의 경우 타설 및 다짐 등 품질관리를 통해 균열제어의 효과를 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] S.J. Song, S.G. Yoo, et al. (2009) A Study for Control of Thermal Cracking by Heat of Hydration in Subway Concrete Box Structure, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(6), pp. 1024-1029.
- [2] Y.T. Kim, S.Ch. Kim (2004) Parametric Analysis on Construction Conditions to Control Thermal Cracks in Subway Concrete Structure, *Journal of the Korean Society for Railway*, 7(4), pp.312-318.
- [3] W.T. Park (2006) A Study of the Thermal Analysis for the Crack Control of Underground Pier Footing, *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, 10(2), pp.91-101.
- [4] Dankook University (1997) Evaluation and Control of Cracks in Reinforced Concrete Structures, Ministry of Construction and Transportation.
- [5] S.W. Cha (2008) Assessment of Temperature and Shrinkage Cracks Risk by Computational Analysis, MIDAS Structure Technology Courses.
- [6] Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E. (1988) Concepts and Applications of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, pp. 630.
- [7] S.W. Cha (2008) Thermal Stresses of Roller Compacted Concrete Dam Considering Construction Sequence and Seasonal Temperature, *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, pp. 881-891.
- [8] Y.J. Kang, et al. (2003) Midas Civil User's Manual, MIDAS Information Technology Co., Ltd.
- [9] Korea Concrete Institute (2009) Standards Code for Reinforced Concrete, pp.257-276.
- [10] Comite Euro-International du Beton (1993) CEB-FIP Model Code 1990, pp. 68-69.
- [11] K. Sakata, O. Kuramoto (1983) A study on moisture diffusion in drying shrinkage of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, No. 2, pp. 216-224.

접수일(2011년 8월 31일), 수정일(2011년 10월 31일),
게재확정일(2011년 11월 14일)