대기 습도변화에 따른 콘크리트 보수체의 비정상적인 습도응력 조사

Non-Stationary Stress Analysis of Repaired Concrete Structures due to Hygral Transient Condition

윤우현*

Yoon, Woo-Hyun

요 약

본 연구에서는 대기 습도변화에 의한 콘크리트 보수체(기층 콘크리트/보수 모르터)의 파괴현상을 조사하기 위해서 보수체내의 비 정상적인 습도분포 및 습도응력을 계산하였다. 이러한 계산은 시멘트 모르터로 보수된 접촉면이 없는 보수체에서 보수층 두께(Do=0.5-2.5cm)와 보수 작업전 기층 콘크리트 표면의 습윤처리 시간(tc=1-5days) 및 대기습도(Ho=50-80%)를 주요 변수로 하여 수행되었다. 계산 및 조사 결과에 의하면 접합면의 응력이 압축상태를 유지하기 위해서는 각 대기 습도마다 일정값 이상의 보수층 두께와 습윤처리 시간이 필요함을 알 수 있다.

Abstract

The object of this study was investigating the failure phenomenon in the contact zone of repaired concrete structures due to the external climate change(hygral transient condition). This study was carried out by calculating the non-stationary moisture and

* 정회원, 대전대학교 토목공학과 조교수

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 8월 30일까지 학회로 보내주시면 1997년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

stress distribution in the repaired concrete structures with the cement mortar. In this analysis, main variables were the overlay thickness (Do=0.5-2.5cm), and the pre-wetting time(tc=1-5days), and the external relative humidity(Ho=50-80%). The results show that the minimum overlay thickness and the minimum pre-wetting time are necessary to keep compressive stresses in the contact zone for a relative humidity.

Keywords : failure phenomenon, repaired concrete structures, external climate change, cement mortar, hygral transient condition, non-stationary moisture and stress distribution, minimum overlay thickness, minimum pre-wetting time

1. 서 론

콘크리트 구조물은 설계와 시공이 시방서에 따라 제대로 이루어 졌다고 하더라도 환경오염의 영향으로 설계 당시의 구조물 수명이전에 성능 저하 현상이 나타나게 된다. 이 경우 구조물의 사용성 및 안전성 확보를 위하여 성능 저하 부위를 보수해야 하고, 보수할 부위의 규모와 환경 조건에 따라서 보수 재료 및 공법이 다르게 선택된다. 보수 재료는 일반적으로 경제성,내구성을 고려하여 cement계 재료가 현재 많이 사용되고 있으나, 수경성인 cement 재료의 특성상 대기의 습도 변화 및 이에 의한 습도 응력은 보수체(기층 콘크리트+보수 Mortar)의 내구성 또는 수명에 영향을 준다. 따라서 본 연구에서는 대기 습도 변화에 따른 보수체의 비 정상적인 습도 분포 및 응력 상태를 계산하여 기층 콘크리트와 보수 mortar 접합면 파괴 현상을 보수층 두께, 기층 콘크리트의 습윤 처리 시간 및 대기 습도 변화에 따라 조사·분석되었다. 보수 mortar는 cement mortar를 사용하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 손상된 기층 콘크리트와 보수 Mortar 덧씌우기층으로 구성되는 연속 보수체의 단부에서 대기의 습도가 변함에 따라서 형성되는 보수체 내의 비정상적인 습도분포 및 습도 응력 계산을 유한요소법에 의해서 수행하였다. 여기서 보수 mortar는 수경성인 cement mortar를 선택하였고 보수층 두께 D_o는 0.5~2.5cm, 보수전 기층 콘크리트의 습윤처리 시간 tc는 1~5일, 그리고 대기 습도 Ho는 50-80%까지 변화시켰고, 총 두께와 폭 L은 7.5cm로 고정시켰다. 이와 같이 비교적 단면 치수가 작은 것은 콘크리트내에서 습도 확산이 매우 느리기 때문이다[3,8]

2.1 매질내의 습도 확산

등방성 매질내의 정상적인 습도 확산(humidity diffusion)해석은, 즉 매질내의 습도가 시간에 따라서 변하지 않는 경우에는 단위 단면적을 통한 습도 전달율이 단면 방향의 습도경사에 비례한다는 가정(Fick의 제 1법칙[18]) 하에 다음과 같은 수식으로 표시할 수 있다.

$$J = -k_H \cdot \text{grad}\, H \tag{1}$$

여기서, J=총 습도 이동량

k_H=습도 전도율

H=등방성 매질내의 상대 습도

그러나 매질내의 습도가 시간에 따라 변화하는 비정상적인 습도 확산은 다음과 같은 Fick의 제 2 법칙[18]을 적용해야 한다.

$$C_H \frac{\partial H}{\partial t} - div(k_H \cdot grad\, H) - S = 0 \tag{2}$$

여기서, C_H=습도 용량

$$= \frac{dW}{dH} = (\text{비 습도용량 } c_H) \cdot (\text{밀도 } \rho)$$

$$= 1[1/\text{sec}] \tag{3}$$

W= 수분 함량, H = 상대습도[%]

S = 습도 원(source)

그리고 매질내 임의의 습도값에서 C_H 와 k_H로부터 정의되는 습도 확산 계수 DH=kH/CH 는 다음과 같이 표시된다[5].

$$D_H = \{\alpha_0 + \frac{(1-\alpha_0)}{1+\left(\frac{1-H}{1-H_c}\right)^n}\} \cdot D_0 \quad (4)$$

여기서 α_0와 n은 상수로서 각각 0.025~0.10 및 6~16 범위의 값을 가진다. 그리고 H_c는 매질내의 상대 습도에 따라서 변하는 습도 확산 계수가 중간값을 가질때의 상대 습도로서 H_c=0.75~0.90정도이고, D_0는 온도 T=20℃, 습도 H=100%일때의 습도 확산 계수로서 D_0=(2.0~4.5) · 10^{-10}[m^2/s]의 값을 가진다. 본 연구에서는 기층 콘크리트와 보수 mortar에 대해서 α_0=0.05, H_c=0.75, n=6 그리고 D_0는 배합비에 관계없이 기층 콘크리트에 대해 5 · $10^{-10}$$m^2$/s, 수경성인 cement mortar에 대해 1 · $10^{-10}$$m^2$/s로 결정하여 계산을 수행하였다[13,15].

2.2 경계면의 습도 전달

대기와 매질 경계면에서의 습도 전달 방정식은 Newton의 법칙에 의해서 다음과 같이 표시된다[16,18] :

$$J = -k_H \cdot grad H = h_H \cdot (H - H_i) \quad (5)$$

여기서, H=매질내의 초기 습도

H_i=대기의 습도

h_H=경계면에서의 습도 전달 계수

$$= h_{H0} \cdot \{0.005 + \frac{0.995}{1+\left(\frac{1-H}{0.3}\right)^2}\} \quad (6)$$

h_{H0}=23.2 · 10^{-10}[m/s] at T=20℃, r.H=100%

2.3 습도 확산 해석

3차원(x,y,z축)에서 습도 확산 계수 D_H 또는 k_H가 일정하고 습도 원(source)을 무시하면, 다차원 시간의 함수인 습도 확산 방정식(2)와 경계면의 습도 전달 방정식(5)의 적분은 다음과 같이 할 수 있다[4,16,17,22,23].

$$\int_\Omega \delta H\left\{C_H \frac{\partial H}{\partial t} - div(k_H \cdot grad\, H)\right\} d\Omega +$$

$$\int_\Gamma \delta H\{-J + h_H \cdot (H - H_i)\} d\Gamma = 0 \quad (7)$$

(Ω : domain, Γ : boundary)

식(7)은 유한 요소법에 의해서 해석할 수 있고, 각 element i에서의 습도 H_i 및 δH_i, $\partial H_i/\partial t$는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$H_i = \{A\}_i \{H_n\}_i \quad (8)$$

$$\delta H_i = \{A\}_i \{\delta H_n\}_i \quad (9)$$

$$\frac{\partial H_i}{\partial t} = \{A\}_i \left\{\frac{\partial H_n}{\partial t}\right\}_i \quad (10)$$

여기서, Hi=요소 i에서의 습도장(field)

$\{A\}_i$=형상 함수 벡터

$\{H_n\}_i$=절점 습도 벡터

따라서 식(7)은 다음과 같이 변환된다.

$$\int_{\Omega i} C_H \{A\}^t \{A\}\, d\Omega \left\{\frac{\partial H_n}{\partial t}\right\}_i + \int_{\Omega i} k_H [B]^t [B]\, d\Omega \{H_n\}_i$$

$$+ \int_{\Gamma i} h_H \{A\}^t d\Gamma \{H_n\}_i = \int_{\Gamma i} h_H \{A\}^t H_i\, d\Gamma$$

여기서, $[B]$ $\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}$ $\{A\}$

유한 요소법 해석을 위한 식(11)의 매트릭스 변환 형태는 다음과 같다.

$$[C]\{\dot{H}\} + [K]\{H\} = \{Q\} \quad (12)$$

여기서, $[C] = \int_\Omega C_H \{A\}^t \{A\} d\Omega$ (capacity matrix)

$\dot{H} = \partial H / \partial t$

$$[K] = \int_\Omega k_H \{B\}^t \{B\} d\Omega + \int_\Gamma h_H \{A\}^t \{A\} d\Gamma$$

(conductivity matrix)

$$\{Q\} = \int_\Gamma h_H \{A\}^t H_i\, d\Gamma$$

식(12)의 적분은 각 시간 구간에서 Crank Nicolson 방법[3,8,10]에 의해 다음과 같이 수행된다.

$$\left[\frac{2C}{\Delta t} + K\right]\{H\}_{n+1} = \left[\frac{2C}{\Delta t} - K\right]\{H\}_n + \{Q\}_{n+1} + \{Q\}_n \quad (13)$$

여기서 n, $n+1$=시점, Δt=시간 간격=$t_{n+1}-t_n$을 뜻한다.

3. 습도 응력 해석

2장에서 계산된 습도 분포로 부터 습도 응력 계산은 다음과 같은 응력-변형율 관계식을 이용하여 수행하였다.

$$\begin{pmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\end{pmatrix} = 1/E\begin{bmatrix}1 & -\nu & -\nu\\ -\nu & 1 & -\nu\\ -\nu & -\nu & 1\end{bmatrix}\begin{pmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\end{pmatrix} + \varepsilon_0 + \begin{pmatrix}\varepsilon_{cx}\\ \varepsilon_{cy}\\ \varepsilon_{cz}\end{pmatrix} \quad (14)$$

여기서 ε_{cx},ε_{cy},ε_{cz}는 creep 변형율, ε_H는 2장에서 계산된 시간 변화에 따른 콘크리트의 습도 변형율이고 이것은 $\varepsilon_H=\alpha_H \cdot \Delta H$로 표시된다. 대상 구조물을 일차원으로 간략하면 한 방향에서만 변형이 발생하므로 x,z 축을 고정하면 $\varepsilon_x=\varepsilon_z=0$이다. 따라서 (14)식은 다음과 같이 응력식으로 변환할 수 있다.

$$\sigma_y = \left(\left(\frac{1-\nu}{1+\nu}\right)\varepsilon_y - \alpha_H \cdot \Delta H - \varepsilon_{cy}\right)\frac{E}{1-2\nu} \quad (15)$$

$$\sigma_{x,z} = \frac{\varepsilon_y \cdot E \cdot \nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} - \frac{E \cdot \alpha_H \cdot \Delta H + \varepsilon_{cx,z}}{1-2\nu} \quad (16)$$

여기서 α_H는 콘크리트의 습도 변형 계수[1/%]

4. 습도 응력 계산에 필요한 물성치

기층 콘크리트의 손상 및 보수 시기는 구조물의 시공 조건, 환경 조건에 따라서 일정하지 않다. 본 연구에서는 콘크리트 구조물이 시공상의 오류 및 열악한 환경 조건에 노출되어 있다고 가정하여 손상 및 보수 시점을 콘크리트가 타설된 후 약 3달(90일)로 결정하여 계산을 수행하였다. 그리고 mortar로 보수된 보수체에서의 습도 응력 조사에 필요한 역학적인 물성치, 즉 탄성 계수,압축 강도 등은 재령에 따라서 일정치 않으나[35] 계산 편의상 28일 값으로 고정하여 계산을 수행하였다.

습도 응력 계산에 필요한 물성치는 다음과 같다:

- 탄성 계수 E
- poisson 비 μ
- 습도 변형 계수 α_H
- creep 변형율 ε_{cr}

상기의 물성치는 습도에 관한 함수로서 습도 변화에 따라 각각 다르게 정해서 응력을 계산해야 하나 탄성계수 E, poisson 비 μ 및 습도 변형 계수 α_H는 습도 변화에 따른 값의 변동이 거의 없기 때문에 T=20℃, H=100%에서의 값으로 응력 계산을 수행하였다[29].

4.1 탄성 계수 E

4.1.1 기층 콘크리트

탄성 계수는 압축 강도의 함수, 즉 $E=15000\sqrt{\sigma_{ck}}$ kg/cm^{2}으로 표시할 수 있다. 재령 28일 이후에서의 콘크리트 압축강도 증가분은 콘크리트의 강도 크기에 따라서 다르다. 본 연구에서는 콘크리트 설계기준강도 σ_{ck}를 교량의 교각,교대 및 벽체등에서 흔히 사용하는 210kg/cm^{2}으로 가정하였고, 재령 90일에서의 압축강도를 Wesche(26)에 의해서 28일 강도의 약 118%로 하여 기층 콘크리트의 탄성 계수를 236125kg/cm^2 (23613 N/mm^2)로 결정하였다.

4.1.2 보수 Mortar

보수 mortar로는 cement mortar를 사용하였고 탄성 계수는 실제 실험을 통하여 결정하였다[29]. 본 연구에서 사용한 보수 Mortar의 배합비 및 재령 28일 에서의 탄성 계수는 다음 Table 1과 같다.

Table 1 Mix proportions and the elastic modulus E of the cement mortar at T=20℃, H=100%

Components	Unit	Cement Mortar
Cement	[kg]	525
W/C	[-]	0.40
Super Plasticizer	[kg]	7.8
Sand	[kg]	1575
Density	[kg/m^3]	2318
E-Modulus	[N/mm^2]	33400

4.2 Poisson 비 μ

4.2.1 기층 콘크리트

콘크리트의 poisson 비 μ는 시험 방법, 혼합비 및 W/C 비에 좌우되고[21] 수식으로는 다음과 같이 cement matrix의 체적비 V_M 및 poisson 비 μ_M, 그

리고 골재의 체적비 V_G 및 poisson 비 μ_i로 표시할 수 있다[1].

$$stat \cdot \mu = V_M \cdot \mu_M \left(1 + 0.2\frac{\mu_G}{\mu_M + \mu_G}\right) + V_G \cdot \mu_G \left(1 - \frac{\mu_M}{\mu_M + \mu_G}\right) \quad (17)$$

여기서 기층 콘크리트의 cement matrix의 체적비와 골재의 체적비를 각각 V_M=0.25, V_G=0.75로 가정하고 poisson 비를 각각 μ_M=0.25, μ_G=0.22[1,20]로 볼때 기층 콘크리트의 μ=0.15가 된다.

4.2.2 보수 Mortar

cement mortar의 poisson 비 역시 식(17)를 이용하여 계산할 수 있다. 즉, 보수 mortar의 체적비 V_G/V_M=0.38/0.62 이므로 μ_M=0.15로 계산된다.

4.3 습도 변형 계수 α_H

습도 변형 계수 α_H는 다음 식(18)과 같이 측정된 최종 수축 변형율 $\varepsilon_{s\infty}$와 대기와 시료의 습도차이 Δ_H의 비로서 구할 수 있다[1,23].

$$\alpha_H = \frac{\text{최종 수축 변형율 } \varepsilon_{s\infty}}{\text{대기와 시료의 습도 차이 } \Delta H} \quad (18)$$

4.3.1 기층 콘크리트

기층 콘크리트의 습도 변형 계수는 식(18)과 참고문헌[11,19,31]의 값에 의해서 결정하였다. 그러나 문헌의 값 $\varepsilon_{s\infty}$은 대부분 cement matrix에 대한 것이므로 다음 식(19)과 골재 함량을 고려하여 콘크리트의 값으로 환산하였다[19].

$$\frac{\varepsilon s\infty(C)}{\varepsilon s\infty(M)} = \frac{1 - V_{GC}}{1 + V_{GC}} \quad (C:\text{Concrete}, M:\text{Cement Matrix}) \quad (19)$$

기층 콘크리트의 골재 체적비 V_{GC}=0.75 그리고 cement matrix의 최종 수축 변형율을 참고문헌[11,19,23]의 값 $\varepsilon_{s\infty}(M)$=3000 · 10^{-6}(ΔH=60%), 3500.10^{-6}(ΔH=35%),5870 · 10^{-6}(ΔH=50%)을 식(19) 및 식(18)에 대입하여 계산하면 $\alpha_H \cong (7 \sim 17) \cdot 10^{-6}$/% 정도의 범위에 있으므로 본 연구에서는 기층 콘크리트의 습도 변형 계수를 α_H=15 · 10^{-6}/% 로 결정하였다.

4.3.2 보수 Mortar

보수 mortar의 습도 변형 계수는 실험[28]에 의해서 구한 최종 수축 변형율과 식(18)에 의해서 결정하였다. 각 시료가 수축 변형이 완료되기 위해서는 시료 습도와 주변 대기 습도가 동일할 때까지 시험을 계속해야 한다. 이때의 습도를 균등 습도라고 정의한다. 균등습도 도달 시간은 시료의 두께 또는 직경의 제곱에 비례하고, 시료의 습도 확산 계수에 반비례한다[7,8]. 따라서 가능한 시료의 크기가 작아야 짧은 기간내에 실험을 완료할 수 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 시료를 직경φ=16mm, 길이l=30cm로 제작하였고, 실험은 수중 양생 28일후 T=20℃, H=55%(질산 마그네슘 용액),76%(염화 나트륨 용액)로 유지된 dessicator에서 수행하였다. 각 시료의 균등 습도는 H=55%인 경우 재령 162일에 도달하였고, 이에 따른 보수 mortar의 최종 수축 변형율 및 습도 변형 계수는 다음 Table 2와 같다.

Table 2 The end shrinkage deformations and the hygral deformation coefficients of the cement mortar

	r · H(%)	$\varepsilon s\infty$	ΔH(%)	α_H(1/%)
Cement Mortar	55	780 · 10^{-6}	45	17.3 · 10^{-6}
	76	455 · 10^{-6}	24	19.0 · 10^{-6}

본 연구에서는 습도 응력 계산에 필요한 습도 변형 계수를 cement mortar에 대해서 α_H=20 · 10^{-6}/% 를 적용하였다.

4.4 Creep 변형율 ε_{cr}

습도가 감소함에 따라서 보수체내에는 인장 응력이 발생하며 습도의 확산(diffusion)은 온도 변화 보다 매우 느리게 진행하므로 응력 계산에는 인장 creep특성이 고려되어야 한다. 균등 습도 상태에서 인장 creep에 대한 실험이 지금까지 거의 없는 관계로 보수 mortar의 creep은 실험에 의해서 결정하였고, 기층 콘크리트는 문헌 조사에 의해서 수행하였다.

4.4.1 기층 콘크리트

콘크리트의 creep은 주로 cement paste의 visco-elastic특성에 좌우된다. cement paste의 creep에 대한 지금까지의 연구는 대부분 압축 creep에 대한 것이었고 인장 creep은 그리 흔한 실험 대상이 되지 않았다[27]. 인장 creep과 압축 creep의 관계는 각 연구자에 따라 상반된 결과를 보였다. 즉, Illston[15]의 실험 결과에 의하면 인장 creep 변형율은 압축 creep 변형율 보다 훨씬 크게 나타난 반면, Ruetz[24]는 거의 비슷한 결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서는 기층 콘크리트의 creep 변형율이 압축과 인장 응력에서 동일하다고 가정하여 조사된 cement paste의 creep 변형율을 근거로 다음과 같은 식으로 계산되었다[20].

$$\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{cr,p}} = \frac{E_p - E_a}{E - E_a} \times (1-g) \qquad (20)$$

여기서, ε_{cr}=콘크리트의 Creep변형율, $\varepsilon_{cr,p}$=Cement Paste의 Creep변형율[28]

E=콘크리트의 탄성 계수(4.1.1참조),

g=골재의 체적비=0.75

F_p=Cement Paste의 탄성계수≒28000 N/mm² for W/C=0.5[26]

E_a=골재의 탄성 계수≒40000N/mm² for Sandstone[26]

상기의 식으로 계산한 기층 콘크리트의 creep 변형율은 다음과 같은 power function으로 표시하여 습도 응력 계산을 계산하였다.

$\varepsilon_{cr}=0.7 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma \cdot t^{0.38}$ at H=55%

$\varepsilon_{cr}=1.4 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma \cdot t^{0.35}$ at H=76%

$\varepsilon_{cr}=3.7 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma \cdot t^{0.26}$ at H=100%

여기서 t[일], σ[N/mm²]

4.4.2 보수 Mortar

보수 mortar의 인장 creep 변형율은 각 시료의 습도가 dessicator에서 균등한 상태(균등 습도)에 도달한 후에 plexi-glass 로 제작한 원통에 넣고, 콘크리트 블럭을 달아 인장력을 가하여 측정하였고, 균등 습도 H=55%는 질산 마그네슘 용액, H=76%는 염화 나트륨 용액 그리고 H=100%는 증류수로서 유지시켰다. 측정 기간은 재령 162일 부터 재령 290일 까지 128일간 지속하였다[29]. cement mortar에 대한 실험 결과는 다음과 같이 power function 으로 표시하여 습도 응력을 계산하였다.

$\varepsilon_{cr}=2.09 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma \cdot t^{0.44}$ at H=55%

$\varepsilon_{cr}=4.25 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma \cdot t^{0.30}$ at H=76%

$\varepsilon_{cr}=6.12 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma \cdot t^{0.36}$ at H=100%

여기서 t[일], σ[N/mm²]

5. 이론 결과 분석 및 고찰

본 장에서는 우선 2장의 이론적인 습도 분포 해석 방법으로 기층 및 보수체의 습도 분포를 계산한 후, 3장의 습도 응력 해석 방법으로 습도 응력 분포를 조사하였다.

5.1 습도 분포

2장의 습도 분포 해석 방법에 의한 보수체의 습도 분포는 다음과 같은 단계별로 계산하였다[30].

- 기층 콘크리트의 습도 분포 계산(대기 습도 Ho=50-80%, 평균 65%, 계산 기간=90일)
- 기층 표면 습윤처리 기간중 습도 분포 계산(습윤처리 기간 tc=1~5일)
- 보수후의 습도 분포 계산(대기 습도 Ho=50-80%, 계산 기간=28일)

다음 그림 Fig.1은 대기 습도 Ho=50%에서 90일 동안 노출된 기층 콘크리트의 습도 분포를 나타낸 것이고, Fig.2는 Fig.1의 습도 분포를 가진 기층 콘크리트 표면을 tc=1일 동안 습윤 처리 한 후 Do=2.5cm 높이의 cement mortar로 보수된 보수체를 대기 습도 Ho=50%에서 28일 동안 노출시킨 후의 습도 분포를 나타낸 것이다.

5.2 응력 분포

보수체에서 발생하는 습도 응력은 5.1절의 습도 분

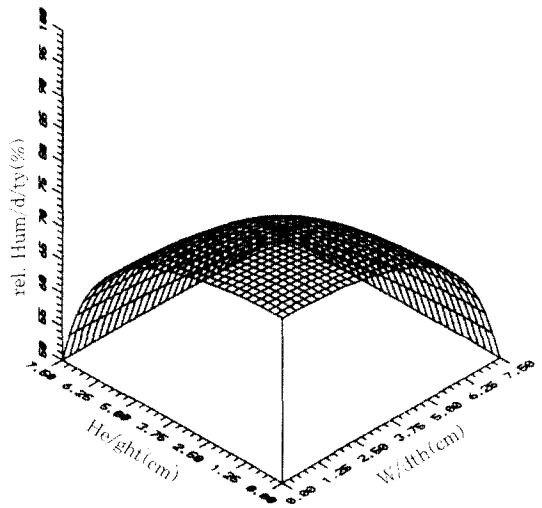

Fig.1 Moisture distribution of the substratum concrete at t=90 days(Ho=50%)

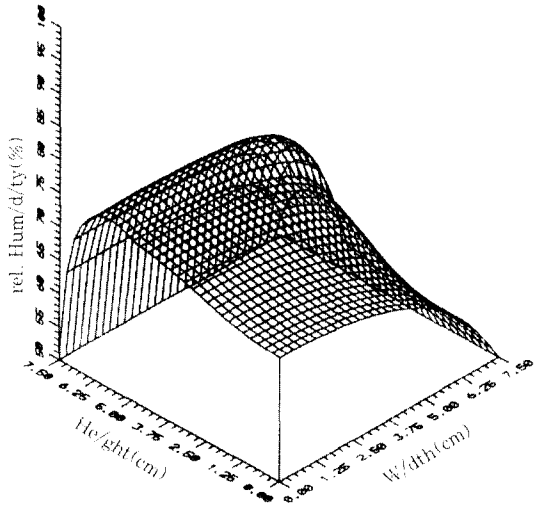

Fig.2 Moisture distribution of a repaired concrete structure at t=28 days after a repair work (tc=1day, Do=2.5cm, Ho=50%)

포 결과에 의해서 계산하였고, 기층 콘크리트와 보수층 접합면의 파괴 현상 조사를 위해서 접합면이 어느 경우에서 인장 또는 압축 응력을 갖게 되는지를 분석하였다.

Table 3에는 보수후 t=28일에서 접합면의 습도 응력이 보수층 두께(Do=5-25mm), 습윤 처리 기간(tc=1-5일) 및 대기 습도(Ho=50-80%)변화에

Table 3 The hygral stresses in the contact zone of repaired concrete structures at t=28 days after repair works for Do=5-25mm

Stress[N/mm²]

Ho	50%					60%	70%	80%
Do \ tc	1day	2day	3day	4day	5day	5day	5day	5day
5mm	4.7	4.2	4.6	5.1	5.5	4.3	2.7	0.9
10mm	−0.1	−0.2	−0.4	−0.5	−0.6	−0.7	−0.8	−1.0
15mm	−0.5	−0.6	−0.5	−0.5	−0.5	−0.5	−0.5	−0.5
20mm	−0.4	−0.5	−0.5	−0.4	−0.4	−0.4	−0.4	−0.4
25mm	−0.2	−0.4	−0.4	−0.3	−0.3	−0.3	−0.3	−0.3

따라서 정리되었다. 이 표와 같이 보수후 t=28일에서 접합면의 응력은 대기 습도와 습윤 처리 기간에 관계없이 Do=5mm에서는 모두 인장 응력이고, Do=10mm이상에서는 압축 응력을 보인다.

Fig.3은 tc=5일, Ho=50%에서 보수후 시간에 따른 접합면 응력 변화를 보수층 두께별로 도시한 것인데 Do=5mm이외에는 모두 t=28일 동안 압축 응력 상태이고, Do=5mm에서는 초기의 압축 응력이 어느 시점에서 인장 응력으로 변하는 것을 보여준다. 또한 Fig.4에는 Do=5mm, Ho=50%에서 보수후 시간에 따른 응력 변화가 기층 콘크리트 표면의 습윤 처리 기간별로 도시되었으며, 여기서는 초기의 압축 응력이 t=8-11일 후에는 모든 경우에서 인장 응력으로 변함을 알 수 있다. Fig.5에는 tc=5일, Do=5mm에서 보수후 시간에 따른 응력 변화를 대기 습도별로 도시하였고, 이 그림에서 압축 응력이

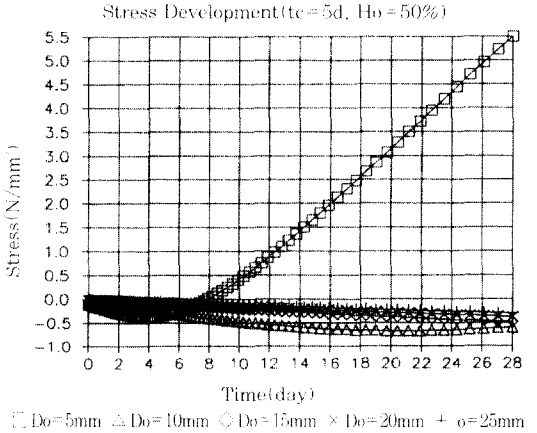

Fig.3 Stress development in the contact zone during t=28days after repair works as a function of Do for tc=5days and Ho=50%

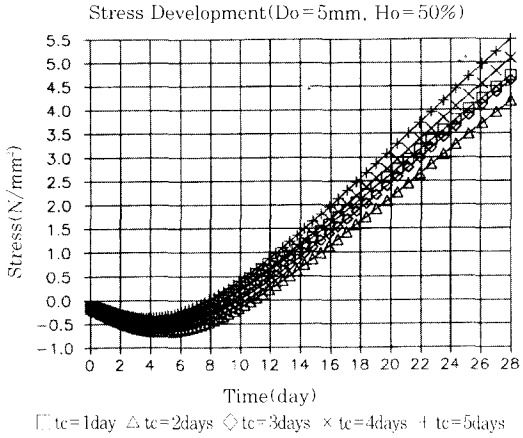

Fig.4 Stress development in the contact zone during t=28days after repair works as a function of tc for Do=5mm and Ho=50%

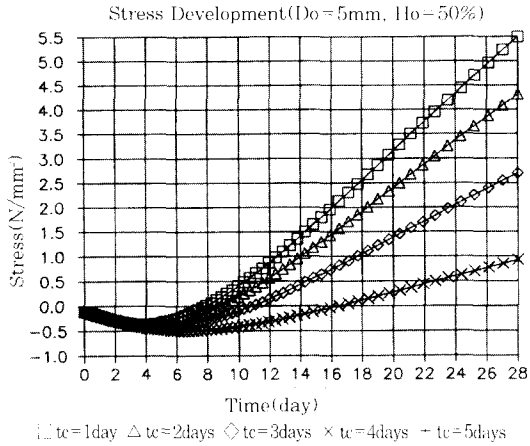

Fig.5 Stress development in the contact zone during t=28days after repair works as a function of Ho for tc=5days and Do=5mm

인장 응력으로 변하는 시점이 Ho=50%에서 8일, Ho=60%에서 9일, Ho=70%에서 11일, Ho=80%에서 16.5일로서 대기 습도가 증가함에 따라서 늦춰짐을 알 수 있다.

Table 4에는 보수후 t=28일에서 접합면의 습도 응력이 보수층 두께(Do=5~10mm), 습윤 처리 기간(tc=1~5일) 및 대기 습도(Ho=50~80%)변화에 따라서 정리되었다. 이것은 Table 3 및 Fig.3에서 나타난 바와 같이 Do=10mm이상에서는 모든 경우에서 압축 응력이 발생하기 때문에 보수층 두께가 5~10mm 사이에서는 과연 어떠한 응력 상태가 나타나는지를 파악하기 위함이다. Table 4에서와 같이 접합면의 응력이 압축응력이 되는 경우는 대기 습도, 습윤 처리 기간 및 보수층 두께에 따라서 각기 다르나 대체로 상기의 변수가 증가할 수록 많아짐을 알 수 있다. Table 4를 근거로 하여 실제 보수 작업시 다음과 같은 경우에서는 보수후 28일 동안 접합면은 항상 압축 응력 상태라고 말할 수 있다.

Table 4 The hygral stresses in the contact zone of repaired concrete structures at t=28days after repair works and the time for change from compressive stress to tensile stress for Do=5-10mm

Stress in N/mm²(time in day)

Ho	50%					60%				
tc / Do	1day	2day	3day	4day	5day	1day	2day	3day	4day	5day
5.00mm	4.7 (8.9)	4.2 (11.1)	4.6 (9.9)	5.1 (8.9)	5.5 (7.9)	3.5 (10.3)	3.0 (12.8)	3.4 (11.5)	3.9 (10.3)	4.3 (8.9)
6.25mm	2.6 (11.1)	1.6 (17.1)	1.6 (17.1)	1.8 (16.5)	2.0 (14.8)	1.9 (12.4)	1.0 (19.7)	0.9 (20.4)	1.1 (19.0)	1.3 (17.1)
7.50mm	1.3 (14.8)	0.6 (21.9)	0.3 (25.2)	0.3 (25.2)	0.4 (24.4)	0.9 (16.5)	0.2 (25.2)	〃	〃	〃
8.75mm	0.4 (21.2)	0.5 (28)	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
10.00mm	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃

Ho	70%					80%				
tc / Do	1day	2day	3day	4day	5day	1day	2day	3day	4day	5day
5.00mm	1.8 (13.3)	1.3 (17.1)	1.8 (14.8)	2.3 (12.8)	2.7 (11.1)	〃	〃	〃	0.5 (21.2)	0.9 (16.5)
6.25mm	1.0 (15.9)	0.1 (27.0)	0.1 (28.0)	0.3 (25.2)	0.5 (21.9)	〃	〃	〃	〃	〃
7.50mm	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
8.75mm	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
10.00mm	〃	〃	〃	〃	〃				〃	〃

- Ho=50% : Do=8.75mm에서는 tc=3일 이상, Do=10mm이상
- Ho=60% : Do=7.5mm에서는 tc=3일 이상, Do=8.75mm이상
- Ho=70% : Do=7.5mm이상
- Ho=80% : Do=5mm에서는 tc=3일 까지, Do=6.25mm이상

또한 이상의 경우 이외에도 압축 응력이 인장 응력으로 변하는 시점과 28일과의 차이만큼 보수후 습윤 양생을 하면 28일 동안 접합면은 항상 압축 응력을 유지하게 된다.

6. 결 론

본 연구에서는 대기 습도 변화에 의한 cement mortar로 보수된 콘크리트 보수체 접합면의 파괴 현상을 조사하기 위해서 보수체내의 비정상적인 습도 및 응력 분포를 유한 요소법으로 계산하였다. 이는 보수층 두께(5mm~25mm), 습윤 처리 기간(1일~5일), 대기 습도(50%~80%)를 변수로 하여 계산하였다. 본 연구로 부터 얻은 주요 결과는 보수후 28일 동안 접합면이 다음과 같은 조건에서 압축 응력 상태를 유지하게 된다는 것이다. 즉,

1) 대기 습도가 50%일때는 보수층 두께는 8.75mm이상이 되어야 하며 8.75mm에서는 기층 표면을 최소 3일이상 습윤 처리해야 한다.

2) 대기 습도가 60%일때는 보수층 두께는 7.5mm이상이 되어야 하며 7.5mm에서는 기층 표면을 최소 3일이상 습윤 처리해야 한다.

3) 대기 습도가 70% 일때는 보수층 두께는 7.5mm이상이 되어야 한다.

4) 대기 습도가 80%일때는 보수층 두께는 5mm 이상이 되어야 하며 5mm에서는 기층 표면을 3일까지만 습윤 처리해야 한다.

또한 이상의 경우 이외에도 압축 응력이 인장 응력으로 변하는 시점과 28일과의 차이만큼 보수후 습윤 양생을 하면 28일 동안 접합면은 항상 압축 응력을 유지하게 된다.

참 고 문 헌

1. Al-Abdien, H.Z., "Dynamische und statische Querdehnungszahl des Betons in Abh ngigkeit von den verschiedenen Einflu faktoren", Dissertation der RWTH Aachen(1975)
2. Anson, M., and Newman, K., "The effect of mix proportion and method of testing on poisson ratio for mortars and concrete", Magazine of Concrete Research(Sept. 1966), pp.115
3. Argyris, J.H., Warnke, E.P., and Willam, K.J., "Berechnungen von Temperatur-und Feuchtefeldern in Massivbauten nach der Methode der Finiten Elemente", DAfStb Heft 279(1977), pp.1-42.
4. Bathe, K.-J., "Finite-Elemente-Methoden", Springer-Verlag(1986)
5. Bazant, Z.P., and Najjar, L.J., "Nonlinear water diffusion in non saturated concrete", Materials and Structures Vol.5, No.25(1972), pp.1-20.
6. Bazant, Z.P., and Raftshol, W.J., "Effect of cracking in drying and shrinkage-specimens", Cement and Concrete Research,12, 1982, pp.209-222.
7. Bruy, E., "Über den Abbau instation rer Temperaturspannungen in Betonk rpern durch Ri bildung", Schriftenreihe des Otto-Graf-Instituts, Heft 56, 1973
8. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., "Conduction of Heat in Solids," Oxford at the Clarendon Press, 1973.
9. Crank, J., "The Mathematics of Diffusion", Oxford University Press, 2nd Edition(1979)
10. Eligehausen, R., Kreller, H., "Querschnittsbericht zur Ri bildung in Stahl- und Spannbetonkonstruktionen", DAfStb Heft 393, 1988, pp.7-55.
11. Ferraris, C.F., "Mechanismes du retrait de la pate de ciment durcie", Dissertation der Ecole Polytechnique Federale Lausanne(Switzerland), These No.621(1986)
12. Gr bl, P., Fibier, J.W., "Epoxidharzmodifizierter Zementm rtel f r die Betoninstandsetzungen-Eigenschaften und Techniken", Berichtsband zum 2. Internationalen Kolloquium ber Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Technische Akademie Esslingen, 1986, pp.199-212.
13. Hartl, G., "Kraftverlauf in Beschichtungen", Zement und Beton,Heft2 1983, pp.45-51.
14. Hilsdorf, H., "Beanspruchung von Ausbesserungsschichten auf Betonoberfl chen", Vortr ge Betontag, Deutscher Beton-Verein e.V., 1987, pp.225-238.
15. Illston, J.M., "The creep of concrete under uniaxial tension", Magazine of Concrete Research Vol.17, No.51(1965), pp.77~84
16. Kamp, C.L., Roelfstra, P.E., Wittmann, F.H.,

"Mechanisms of moisture transfer through porous materials", Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol.H, Concrete and Concrete Structures, 1987, pp.157-166.

17. Kamp, C.L., Roelfstra, P.E., Wittmann, F.H., "Diffusion mechanisms and drying of concrete at elevated temperatures", Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol.H, Concrete and Concrete Structures, 1987, pp.173-179.
18. Klopfer, H., "Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen", Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin(1974)
19. Mears, A.R., and Hobbs, D.W., "The effect of mix proportions upon the ultimate air-drying shrinkage of mortars", Magazine of Concrete Research Vol.24, No.79(1972), pp.77-84
20. Neville, A.M., "Creep of concrete as a function of its cement paste content", Magazine of Concrete Research Vol.16, No.46(1964), pp.21-30
21. Pickett, G., "Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage", Journal of the ACI(1.1956), pp.581-590
22. Roelfstra, P.E., Sadouki, H., "Finite Element Modulus for Materials Science and Structural Engineering", EPFL, 1984
23. Roelfstra, P.E., "Numerical simulation of time-dependent deformation under hgral and thermal transient conditions," Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol.H, Concrete and Concrete Structures, 1987, pp.83-102.
24. Ruetz, W., "Das Kriechen des Zementsteines im Beton und seine Beeinflussung durch gleichzeitiges Schwinden", DAfStb Heft 183(1966)
25. Springenschmid, R., Letsch, R., "Untersuchungen ber das Abl sen von Kunstharzbeschichtungen auf Betondecken", Forschung Stra enbau und Stra enverkehrstechnik, Heft 342, Bundesminister f r Verkehr, 1981
26. Wesche, K., "Baustoffe f r tragende Bauteile", Teil 2: Beton, Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin(1981)
27. Wittmann, F.H., "Bestimmung physikalischer Eigenschaften des Zementsteines", DAfStb Heft 232(1974)
28. Wittmann, F.H., "Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons", DAfStb Heft 290(1977)
29. 윤우현, "Untersuchung der temperatur-und feuchtebedingten Spannungsverh lt-nisse im Bereich von Instandsetzungen bei massiven Betonbauten", Dissertation der RWTH Aachen(8.1989)
30. 윤우현, "대기 습도 변화에 따른 콘크리트 보수체의 비정상적인 습도분포", 콘크리트학회 논문집 제8권 1호, 1996.2, pp.121-129.

(접수일자 : 1997. 2. 19)