

대기 습도변화에 따른 콘크리트 보수체의 비정상적인 습도분포

Non-Stationary Moisture Distribution 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 비정상적인 습도분포를 계산하였다. 계산된 습도분포에 의해서 기층과 보수층 경계면 부위의 습도차이가 보수층 두께(0.5~2.5cm)와 보수작업전 기층 콘크리트 표면의 습윤처리시간(0~72hr)을 주요 변수로 하여 조사되었고, 이는 주로 시멘트 모르터로 보수된 접촉면이 없는 보수체에서 수행되었다. 계산 및 조사결과 보수층 두께가 감소하고 습윤 처리시간이 증가할 수록 경계면 부위의 습도차이는 감소하는 경향을 보였고, 특히 보수후 습도차이가 음수값이 될때의 시간을 하나의 수식으로 표시하였다.

Abstract

The object of this study was investigating the failure phenomenon of repaired concrete structures due to the external climate change(hygral transient condition). This study was carried out by calculating the non-stationary moisture distribution in the bonded system(mortar layer /substratum concrete). In the computation of moisture difference between substratum and overlay(mortar layer), main variables were the one cement mortar, and the overlay thickness(0.5~2.5cm), and the pre-wetting time(0~72hr). Normally, the computations were performed on the bonded system without the adhesive area. The results show that the moisture difference between overlay and substratum was decreased with decreasing the overlay thickness, and with increasing the pre-wetting time. Especially, the required time for which the moisture difference become a negative value was described as a function of the overlay thickness and the pre-wetting time.

Keywords : failure phenomenon, repaired concrete structures, external climate change, hygral transient condition, non-stationary moisture distribution, bonded system, overlay, substratum, cement mortar, adhesive area, pre-wetting time,

* 정회원, 대전대학교 토목공학과 조교수, 공박

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 1996년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트 구조물은 설계와 시공이 시방서에 따라 제대로 이루어졌다고 하더라도 환경오염의 영향으로 설계 당시의 구조물 수명이전에 성능저하 현상이 나타나게 된다. 이 경우 구조물의 사용성 및 안전성 확보를 위하여 성능저하 부위를 보수해야 하고, 보수할 부위의 규모와 환경조건에 따라서 보수재료 및 공법이 다르게 선택된다. 보수재료는 일반적으로 경제성, 내구성을 고려하여 시멘트계 재료가 현재 많이 사용되고 있으나, 수정성인 시멘트계 재료의 특성상 대기의 습도변화에 의해서 보수체(기층 콘크리트+보수 모르터)의 내구성 또는 수명에 영향을 준다. 지금까지 수정성 재료로 보수된 보수체의 습도변화에 따른 파괴거동은 주로 습도응력을 계산하여 조사되었고^(9,10,11,17) 이것 또한 일정한 습도경사 및 보수체의 크기에 대하여 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 대기 습도변화에 따른 보수체의 경계면 파괴현상을 시간에 따라서 변하는 비정상적인 습도분포, 보수층 두께 및 보수 모르터 타설전 기층 콘크리트 표면의 습윤처리시간에 따라 조사·분석하는 것을 연구의 목적으로 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 손상된 기층 콘크리트와 보수 모르터 덧씌우기층으로 구성되는 연속 보수체의 단부(Fig.1)에서 대기의 습도가 변함에 따라서 형성되는 보수체내의 비정상적인 습도분포 계산을 유효요소법에 의해서 수행하였다. 여기서 보수 모르

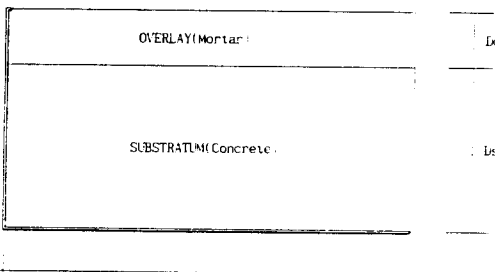


Fig.1 Repaired concrete structure(Bonded system)

터는 수정성인 시멘트 모르터를 선택하였고 보수층 두께 D_0 는 0.5~2.5 cm, 보수전 기층 콘크리트의 습윤처리 기간은 6~72 시간으로 변화시켰고, 층 두께와 폭 L 은 7.5cm 로 고정시켰다. 그리고 기층의 표면은 접착제를 바르지 않고 덧씌우기한 접촉면이 없는 보수체이다. 이와 같이 비교적 단면척수가 작은 것은 콘크리트내에서 습도확산이 매우 느리기 때문이다⁽¹⁴⁾.

2.1 매질내의 습도확산

등방성 매질내의 정상적인 습도확산(humidity diffusion) 해석은, 즉 매질내의 습도가 시간에 따라서 변하지 않는 경우에는 단위 단면적을 통한 습도 전달율이 단면 방향의 습도경사에 비례한다는 가정(Fick의 제 1법칙⁽¹⁴⁾) 하에 다음과 같은 수식으로 표시할 수 있다.

$$J = -k_H \cdot \text{grad } H \quad (1)$$

여기서, J = 총 습도 이동량
 k_H = 습도 전도율
 H = 등방성 매질내의 상대습도

그러나 매질내의 습도가 시간에 따라 변화하는 비정상적인 습도확산은 다음과 같은 Fick의 제 2법칙⁽¹⁴⁾을 적용해야 한다.

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

여기서, C_H = 습도 용량

$$= \frac{dW}{dH}$$

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

$$= 1[\text{1/sec}] \quad (3)$$

W = 수분 함량, H = 상대습도[%]

S = 습도 원(source)

그리고 매질내 임의의 습도값에서 C_H 와 k_H 로부터 정의되는 습도확산계수 $D_H = k_H / C_H$ 는 다음과 같이 표시된다⁽³⁾.

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

여기서 α_0 와 n 은 상수로서 각각 0.025~0.10 및 6~16 범위의 값을 가진다. 그리고 H_c 는 매질내의 상대습도에 따라서 변하는 습도확산계수가 중간 값을 가질 때의 상대습도로서 $H_c=0.75\sim 0.90$ 정도이고, D_0 는 온도 $T=20^\circ\text{C}$, 습도 $H=100\%$ 일때의 습도 확산 계수로서 $D_0=(2.0\sim 4.5) \cdot 10^{-10}[\text{m}^2/\text{s}]$ 의 값을 가진다. 본 연구에서는 기층 콘크리트와 보수 모르타에 대해서 $\alpha_0=0.05$, $H_c=0.75$, $n=6$ 그리고 D_0 는 배합비에 관계없이 기층 콘크리트에 대해 $5 \cdot 10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$, 수경성인 시멘트모르타에 대해 $1 \cdot 10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$ 로 결정하여 계산을 수행하였다.^(1,14)

2.2 경계면의 습도전달

대기와 매질 경계면에서의 습도전달 방정식은 Newton의 법칙에 의해서 다음과 같이 표시된다.⁽¹⁴⁾

$$J = -k_H \cdot \text{grad } H = h_H \cdot (H - H_t) \quad (5)$$

여기서, H =매질내의 초기 습도

H_t =대기의 습도

h_H =경계면에서의 습도 전달 계수

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

$$h_{H0} = 23.2 \cdot 10^{-10} [\text{m}/\text{s}]$$

at $T=20^\circ\text{C}$, $r.H=100\%$

2.3 습도 확산 해석

3차원(x,y,z축)에서 습도확산계수 D_H 또는 k_H 가 일정하고 습도 원(source)을 무시하면, 다차원 시간의 함수인 습도 확산 방정식(2)과 경계면의 습도 전달 방정식(5)의 적분은 다음과 같이 할 수 있다.^(2,12,13,15,16)

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

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

(Ω : domain, Γ : boundary)

식(7)은 유한요소법에 의해서 해석할 수 있고, 각 element i 에서의 습도 H_i 및 δH_i , $\partial H / \partial t$ 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, H_i =요소 i 에서의 습도장(field)

$\{A\}_i$ =형상 함수 벡터

$\{H_n\}_i$ =절점 습도 벡터

따라서 식(7)은 다음과 같이 변환된다.

$$\int_{\Omega} C_H \{A\}_i^t \{A\} d\Omega \left\{ \frac{\partial H_n}{\partial t} \right\}_i + \int_{\Omega} k_H [B]^t [B] d\Omega \{H_n\}_i + \int_{\Gamma} h_H \{A\}_i^t d\Gamma \{H_n\}_i = \int_{\Gamma} h_H \{A\}_i^t H_t d\Gamma \quad (11)$$

$$\text{여기서 } [B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \{A\}$$

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

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

$$\text{여기서, } [C] = \int_{\Omega} C_H \{A\}_i^t \{A\} d\Omega$$

(capacity matrix)

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

$$[K] = \int_{\Omega} k_H [B]^t [B] d\Omega$$

$$+ \int_{\Gamma} h_H \{A\}_i^t \{A\} d\Gamma$$

(conductivity matrix)

$$\{Q\} = \int_{\Gamma} h_H \{A\}_i^t H_t d\Gamma$$

식(12)의 적분은 각 시간구간에서 Crank Nicolson 방법^(1,6,7)에 의해 다음과 같이 수행된다.

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

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

3. 이론결과 분석 및 고찰

본 절에서는 우선 2 절에서의 이론적인 습도분포 해석방법에 의해서 보수전의 기층 콘크리트의 습도분포를 계산하였고, 6~72시간 범위에서 기층을 습윤처리하여 보수 모르타르 덧씌운 후 각 보수층의 두께(0.5~2.5 cm)별로 보수체의 습도분포를 조사하였다.

3.1 기층 콘크리트의 습도분포

콘크리트의 습도분포는 구조물이 놓여있는 대기의 습도 H_t 에 의해서 변화한다. 대기의 습도분포는 년중 일정하지 않고 4 계절 주기적으로 변한다고 보면 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$H_t = H_m + a \cdot \sin(bt) : t(\text{day}) \quad (14)$$

여기서 H_m 은 년중 평균습도이고 a, b 는 주기함수에 필요한 계수이다. 본 연구에서는 $H_m=60\%$, $a=20\%$, $b=0.017$ 로 정하였으며 기층 콘크리트

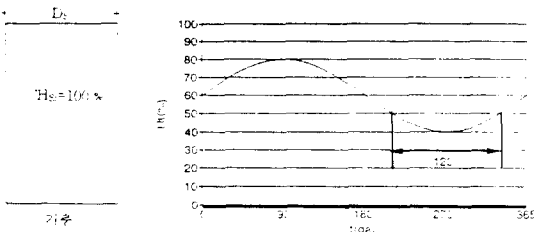


Fig.2 Annual moisture change at the substratum concrete surface

의 노출기간 또는 타설후 보수시점은 H_t 가 50% 이하인 기간, 즉 Fig.2에서 표시한 바와 같이 120일중 90일 정도로 가정하여 습도계산을 수행하였다.

다음 그림(Fig.3)에는 Fig.2와 같은 대기 습도 조건에서의 기층 콘크리트 타설후 $t=2$ 일, 9일, 28일 및 본 연구에서의 보수 시점인 $t=90$ 일의 습도분포가 도시되어 있다. Fig.3에서 알 수 있는 바와 같이 보수체 표면에서 7.5cm 깊이(그림에서는 0.0cm 위치)의 습도는 $t=2$ 일에서 100%, $t=9$ 일에서 96.2%, $t=28$ 일에서 83.7% 그리고 $t=90$ 일에서 71.5%로 시간이 지남에 따라서 감소한다.

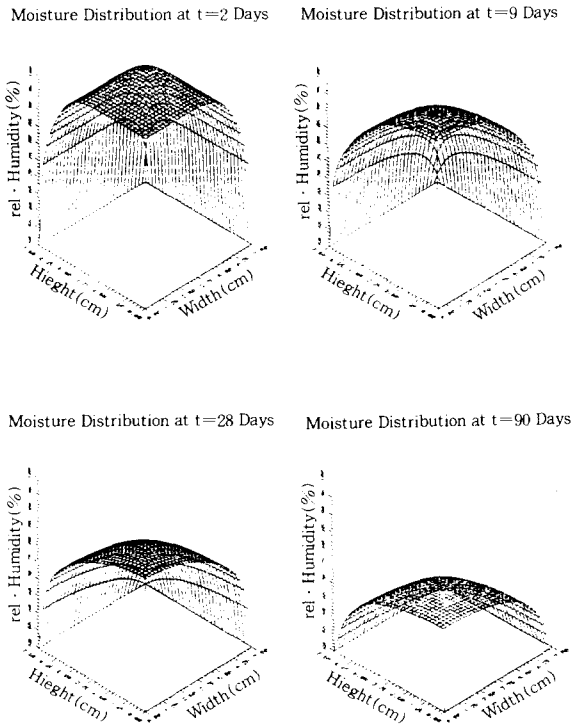


Fig.3 Moisture distribution of the substratum concrete at $t=2, 9, 28$ and 90 days

3.2 보수체의 습도분포

보수체의 습도분포는 3.1항에서 계산한 바와 같이 재령 90일의 건조한 기층 콘크리트 표면위에 보수 모르타르 덧씌우기 작업 직후부터 28일 까지

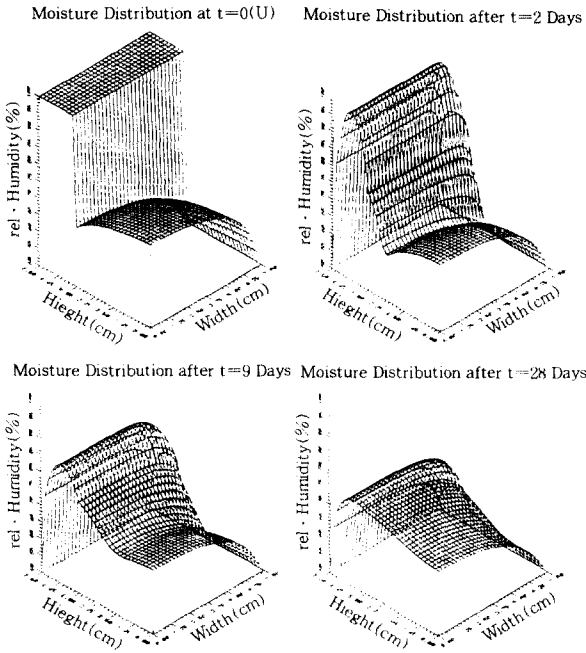


Fig.4 Moisture distribution of a bonded system without pre-wetting work at $t=0, 2, 9$ and 28 days ($D_o=2.5\text{cm}$, $D_s=5\text{cm}$, $B=7.5\text{cm}$ in Fig.1)

계산되었다. Fig.4에는 보수작업 후 $t=0$ 일, 2일, 9일 및 28일에서 보수체(보수층 두께 $D_o=2.5\text{cm}$, 기층 두께 $D_s=5\text{cm}$, 폭 $B=7.5\text{cm}$)의 2차원 습도 분포가 도시되었다. Fig.4에서 알 수 있는 바와 같이 보수체의 최대 습도차이 경사는 보수층과 기층의 경계면 부근에서 발생하며, 이 값은 덧씌우기 직후 아주 가파른 최대값을 보이다가 시간이 지남에 따라서 완만하게 감소한다. 이러한 습도차이 경사에 의해서 보수체에는 균열을 유발할 수 있는 크기의 고유응력이 발생하게 된다^(4,5,8).

다음 그림 Fig.5에는 보수층 두께 $D_o=0.5\text{cm}$, 1.5cm 그리고 2.5cm 를 가진 보수체의 습도분포가 각 보수체의 깊이에 대하여 보수작업 후 $t=1, 3, 7, 14, 28$ 일 별로 각각 도시되었다. Fig.5로부터 보수체 경계면 부근의 최대 습도차이·경사는 각 보수층 두께의 $1/2$ 지점과 기층깊이 약 7.5mm 의 2지점 사이임을 알 수 있다. 그리고 이들 습도차이·경사는 시간이 지남에 따라서 감소하는 현상외에도 보수층 깊이 D_o 가 작을수록 역시 감소하는데,

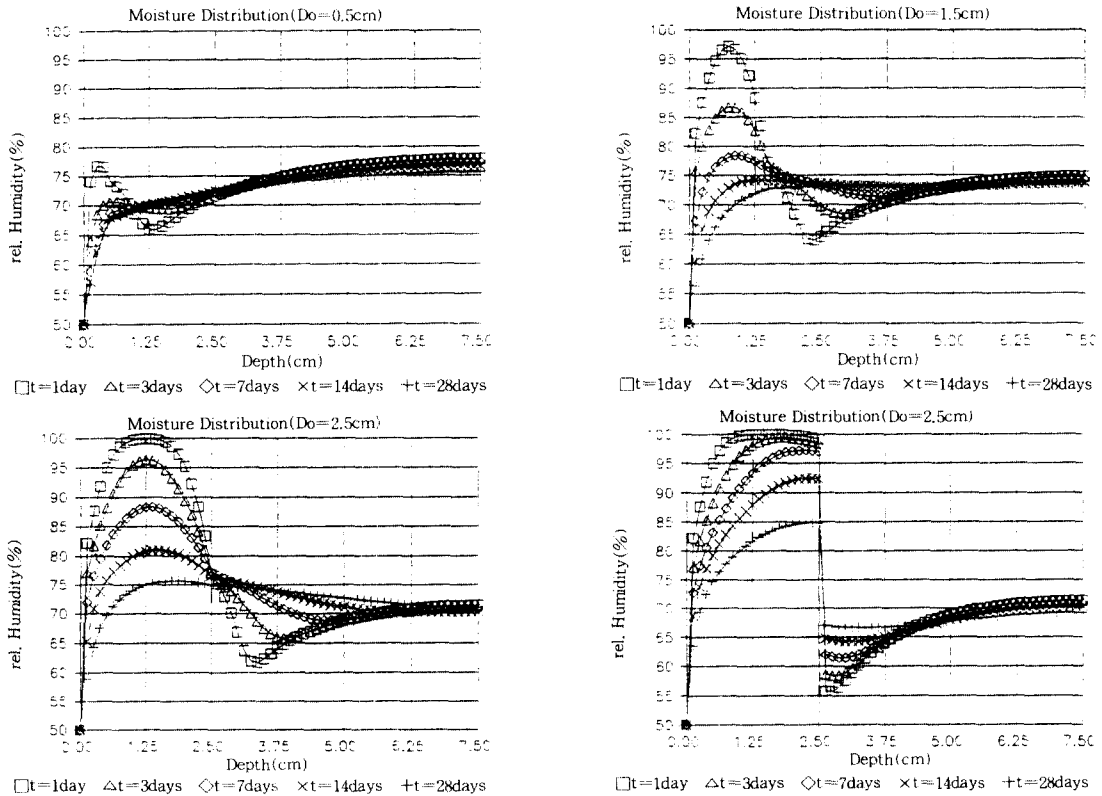


Fig.5 Moisture distribution of the bonded system without pre-wetting work during $t=28$ days ($D_o=0.5, 1.5, 2.5\text{cm}$)

이는 보수 모르터의 습도가 대기로 발산하는 거리가 짧기 때문이다. 그리고 만일 보수체 경계면을 에폭시 수지로 접촉면을 형성한 후 시멘트 모르터를 덧씌우기한 보수체의 습도분포(마지막 그림)는 접촉면이 없는 같은 보수층 두께의 보수체(3번째 그림)의 습도분포에 비하여 경계면 부근의 습도경사가 매우 가파름을 알 수 있고, 이에 따라서 경계면에 삼투압이 발생하여 보수층의 내구성에 영향을 주는 박리현상이 나타날 수 있다. 이는 에폭시 수지의 습도 확산계수가 $D_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 로서 시멘트 모르터보다 약 100배 작은 값으로서⁽¹¹⁾ 보수층 및 기층의 습도확산을 억제하기 때문이다. 따라서 수경성인 시멘트 모르터로 보수할 경우 보수층과 기층의 경계면을 습도확산 계수가 작은 재료, 즉 플라스틱 재료로 처리하는 것은 보수체의 내구성을 감소시키기 때문에 가급적 피해야 한다.

다음 그림 Fig.6 에는 지금까지 조사된 내용 이외에도 경계면 부근의 습도차이를 줄이기 위해 기층 콘크리트 표면을 일정시간 습윤처리한 보수체 경계면 부위의 습도차이를 정량적으로 얻을 수 있게 도시되었다. 이것은 습윤처리시간 $T_w = 0, 6, 12, 24, 48$ 그리고 72hr의 6가지 변수와 5가지의 보수층 두께($D_0 = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 \text{cm}$)에 따른 습도 차이 ΔH 의 변화를 보수후 28일 동안 보여준다. 일반적으로 ΔH 는 시간이 지남에 따라, D_0 가 감소함에 따라 또한 T_w 가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 그리고 ΔH 가 “+”값인 경우에는 보수체의 균열을 유발하는 인장응력이 발생하기 때문에 이 인장응력이 압축응력으로 변하는 음수값에 도달하는 시간(T_n)의 조사가 필요하다. 이 값 역시 Fig.6에서 보면 D_0 가 감소함에 따라 또한 T_w 가 증가함에 따라서 감소함을 알 수 있다. 즉, 습윤처리를 하지않고 보수했을 때($T_w = 0$) ΔH 가 음수값이 되는 시간과 습윤처리시간 $T_w = 72 \text{hr}$ (3days)일때 ΔH 가 음수값이 되는 시간 및 이 시간의 감소율은 $D_0 = 0.5 \text{cm}$ 에서 2.6일 \rightarrow 0.6일(77%), $D_0 = 1.0 \text{cm}$ 에서 6.5일 \rightarrow 2.3일(65%), $D_0 = 1.5 \text{cm}$ 에서 12일 \rightarrow 5.6일(53%), $D_0 = 2.0 \text{cm}$ 에서 20일 \rightarrow 10.6일(47%), $D_0 = 2.5 \text{cm}$ 에서 30일 \rightarrow 17.9일(40%) 정도로서 보수층의 깊이 D_0 가 증가할수록 T_n 이 증가하고 T_n 의 감소율은 낮

Table 1 The time after overlay work for negative delta H in the boundary zone from Fig.6(T_n)

Do \ Tw	0 hr	6 hr	12 hr	24 hr	48 hr	72 hr
0.5 cm	2.6 days	1.9 days	1.5 days	1.1 days	0.7 days	0.6 days
1.0 cm	6.5 *	5.0 *	4.4 *	3.6 *	2.7 *	2.3 *
1.5 cm	12.0 *	9.8 *	8.7 *	7.7 *	6.4 *	5.6 *
2.0 cm	20.0 *	16.7 *	15.3 *	13.9 *	11.9 *	10.6 *
2.5 cm	30.0 *	26.7 *	25.0 *	22.4 *	19.7 *	17.9 *

아짐을 알 수 있는데 이는 보수층의 두께가 증가함에 따라서 습도변화에 의한 경계면 부위의 고유인장응력이 커지고 인장응력이 오래 지속된다는 것을 의미한다. 따라서 수경성 재료로 보수할 경우에는 가급적 기층의 습윤처리 시간을 길게 하는 것이 보수체 내구성 향상에 유효하다는 결론을 얻을 수 있다. 다음 Table 1 및 Fig.7에는 Fig.6으로 부터 조사된 경계면의 ΔH 가 음수값이 되는 시점 T_n 을 습윤처리시간 T_w 및 보수층 두께 D_0 에 대하여 자세히 정리하였다.

Table 1 및 Fig.7로 부터 ΔH 가 음수값이 되는 시간 T_n 을 각 보수층 깊이 D_0 별로 수식으로 표시하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$D_0 = 0.5 \text{cm}: T_n = 2.09e^{-0.02T_w} \quad (14)$$

$$D_0 = 1.0 \text{cm}: T_n = 5.52e^{-0.01T_w} \quad (15)$$

$$D_0 = 1.5 \text{cm}: T_n = 10.49e^{-0.01T_w} \quad (16)$$

$$D_0 = 2.0 \text{cm}: T_n = 17.84e^{-0.01T_w} \quad (17)$$

$$D_0 = 2.5 \text{cm}: T_n = 27.60e^{-0.01T_w} \quad (18)$$

여기서 T_w 는 시간, T_n 은 일의 단위이다. 또한 $D_0 = 0.5 \text{cm}$ 에 대한 식(14)를 제외한 식(15)~(18)은 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$T_n = 5.37D_0^{1.75}e^{-0.01T_w} \\ \text{with } T_n(\text{day}), D_0(\text{cm}), T_w(\text{hr}) \quad (19)$$

따라서 식(19)로 부터 보수층의 두께 D_0 와 보수전 기층의 습윤처리시간 T_w 가 결정되면 경계면 부위의 고유응력이 압축응력이 되는 시점을 알 수 있다.

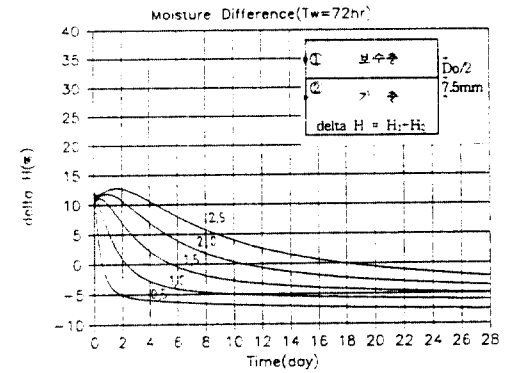
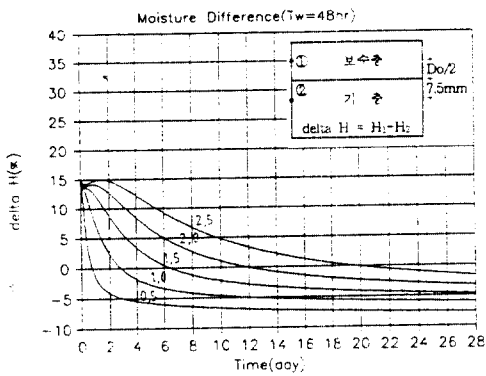
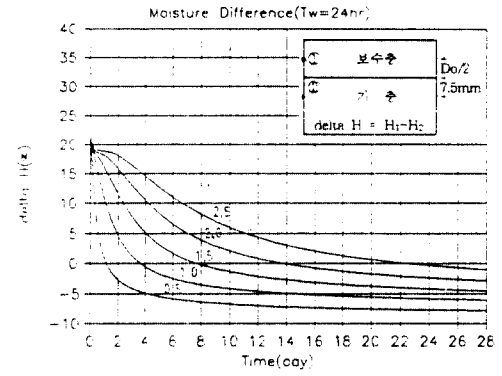
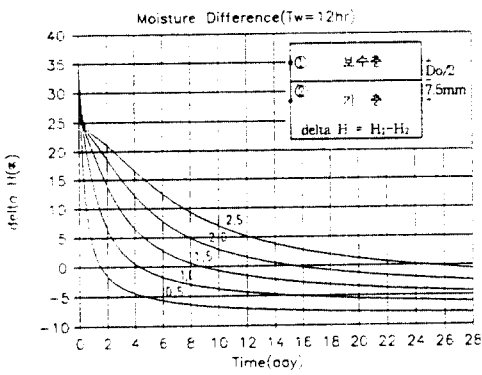
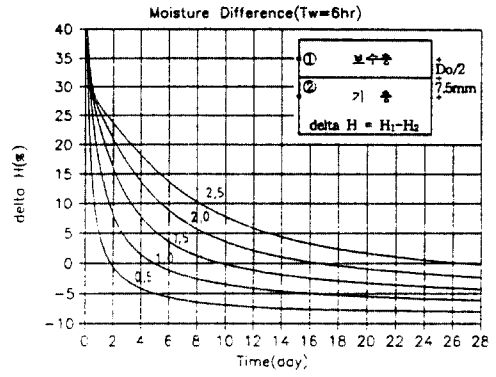
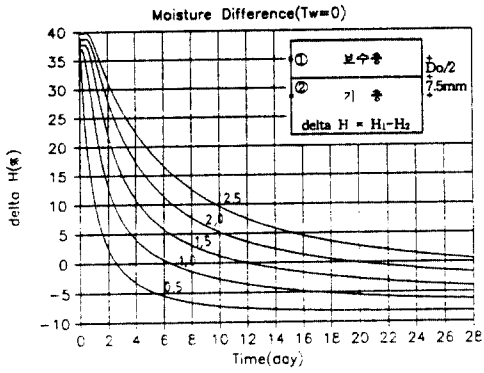


Fig.6 Moisture difference (ΔH) in the boundary zone with pre-wetting work during $t=28\text{days}$ as function of T_w and Do

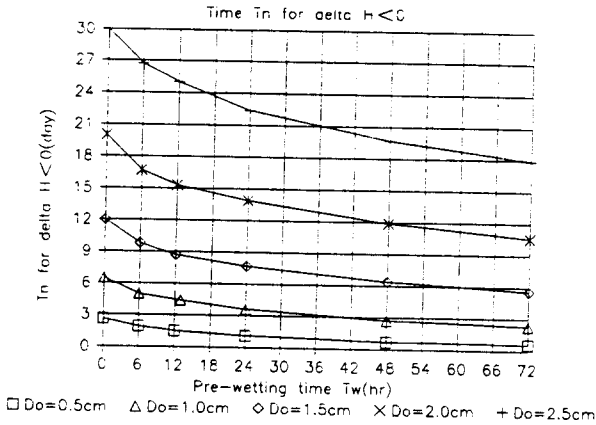


Fig.7 The required time for negative delta H in the boundary zone as function of Tw and Do

4. 결 론

본 연구에서는 대기 습도변화에 의한 콘크리트 보수체(기층 콘크리트+보수 모르터)의 내구성 또는 파괴현상을 조사하기 위해서 보수체내의 비정상적인 습도분포를 FEM해석에 의해서 계산하였다. 이는 주로 시멘트 모르터로 보수된 구조물에서 수행되었으나 기층과 보수층 경계면을 예측시 수지로 접촉면을 형성한 보수체에서도 습도분포가 계산되었다. 계산된 습도분포로 부터 주요 조사대상은 기층과 보수층 경계면의 습도 경사 차이이며, 이것은 보수층 두께(Do=0.5~2.5cm)와 보수작업전 기층 콘크리트 표면의 습윤 처리시간(Tw=0~72hr)을 변수로 하여 계산되었다. 본 연구로부터 얻은 주요결과는 다음과 같다.

① 최대 습도경사·차이는 보수층 두께 Do의 1/2지점과 기층 깊이 약 7.5 mm의 2지점 사이에서 발생한다.

② 수경성인 시멘트 모르터로 보수할 경우에는 기층과 보수층의 경계면을 플라스틱 수지로 처리하여 접촉면을 형성하면 경계면 부근에 삼투압이 발생하여 보수층의 박리현상이 나타나므로 피해야한다.

③ 최대 습도경사·차이는 보수층 두께 Do가 작을수록 또한 보수작업전 기층 콘크리트 표면의 습윤처리시간 Tw이 길수록 감소한다. 따라서 동

일한 보수층 두께에서는 가능한 습윤처리를 길게 하여 보수체의 내구성을 높여야 할 것이다.

④ 보수체 내의 습도변화에 의해서 발생하는 고유 인장응력은 보수층 두께가 감소함에 따라, 습윤 처리 시간이 길어짐에 따라서 압축응력으로 변하는 시간, 즉 경계면 부위의 최대 습도경사·차이가 음수값으로 변하는 시간 Tn이 감소하며, 이들의 관계를 수식으로 표시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_n = 5.37 D_o^{1.75} e^{0.01 T_w}$$

with Tn=(day), Do(cm), Tw(hr)

참 고 문 헌

- 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 278, 1977, pp.1-42.
- Bathe, K.-J., "Finite-Elemente-Methoden", Springer-Verlag, 1986
- 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.
- Bazant, Z.P., and Raftshol, W.J., "Effect of cracking in drying and shrinkage-specimens", Cement and Concrete Research, 12, 1982, pp. 209-222.
- Bruy, E., "Über den Abbau instationärer Temperaturspannungen in Betonkörpern durch Rißbildung", Schriftenreihe des Otto-Graf-Instituts, Heft 56, 1973
- Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., "Conduction of Heat in Solids," Oxford at the Clarendon Press, 1973.
- Crank, J., "The Mathematics of Diffusion", Oxford University Press, 2nd Edition, 1979
- Eligehausen, R., Kreller, H., "Querschnittsbericht zur Rißbildung in Stahlund Spannbetonkonstruktionen", DAFStb Heft 393, 1988, pp.7-55.
- Grübl, P., Fibier, J.W., "Epoxidharzmodifiz-

- ierter Zementmörtel für die Betoninstandsetzungen-Eigenschaften und Techniken”, Berichtsband zum 2. Internationalen Kolloquium über Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Technische Akademie Esslingen, 1986, pp.199-212.
10. Hartl, G., “Kraftverlauf in Beschichtungen”, Zement und Beton, Heft2, 1983, pp.45-51.
 11. Hilsdorf, H., “Beanspruchung von Ausbesserungsschichten auf Betonoberflächen”, Vorträge Betontag, Deutscher Beton-Verein e.V., 1987, pp.225-238.
 12. 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.
 13. 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. Concrete and Concrete Structures, 1987, pp. 173-179.
 14. Klopfer, H., “Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen”, Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin, 1974
 15. Roelfstra, P.E., Sadouki, H., “Finite Element Modulus for Materials Science and Structural Engineering”, EPFL, 1984
 16. 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.
 17. Springenschmid, R., Letsch, R., “Untersuchungen über das Ablösen von Kunstharzbeschichtungen auf Betondecken”, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 342, Bundesminister für Verkehr, 1981
(접수일자 : 1995. 10. 10)