

## 습도 변화에 따른 콘크리트 덧씌우기 보수체의 손상분석

윤우현<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>경원대학교 환경정보대학원

(2002년 5월 7일 원고접수, 2002년 8월 2일 심사완료)

### Damage of Overlaid Concrete Structures Subjected to Humidity Changes in the Atmosphere

Woo-Hyun Yoon<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> Graduate School of Environmental Study & Information Science, Kyungwon University, Seongnam, 461-701, Korea

(Received May 7, 2002, Accepted August 2, 2002)

#### ABSTRACT

The failure phenomenon of overlaid concrete structures, such as surface crack, and peel-off failure, shear bond failure in the end contact zone, was investigated due to humidity changes. To investigate this failure phenomenon, the surface tensile stress, and the shear stress, the vertical tensile stress in the contact zone were analysed using the non-linear stress-strain relationship of material such as strain-hardening- and strain-softening diagrams. Overlay thickness and overlay material were the main variables in the analyses. It is assumed that the initial surface humidity of overlaid concrete structures was 100 % r.H. With a atmospheric humidity of 55 % r.H. and two load cases for drying(LC1), curing and drying(LC2), the stress states of overlaid concrete structures were calculated. The result shows that only fictitious cracks occurred in the overlay surface of CM20, ECM25, and no shear bond failure occurred in the contact zone without CM20. The peel-off failure was proved to be the main cause of the damage in the overlaid concrete structures. Only for overlay thickness of 1cm occurred no peel-off failure in the case of drying after a long-term public use(LC1). In the case of curing and drying during overlay work(LC2) occurred the peel-off failure within 1.5days for all the overlaid concrete structures.

**Keywords:** overlaid concrete structures, humidity changes, non linear stress-strain relationship, strain-softening, peel-off

#### 1. 서 론

콘크리트 구조물은 설계, 시공, 환경 변화 및 유지 관리상의 문제로 인하여 사용 수명 기간 전에 성능저하 현상이 나타나게 된다. 성능 저하 현상이 발생된 구조물은 그 정도와 규모, 환경 조건 및 잔류 수명 기간에 따라서 적절한 공법 및 재료로서 사용성, 안전성 확보를 위한 보수가 이루어져야 한다. 이렇게 보수된 콘크리트 구조물은 외부 영향에 의한 역학적 거동에 의해서 표면 균열 및 기층과 보수층 경계면의 부착 파괴 등의 손상을 입을 수 있다. 보수, 보강된 콘크리트 구조물의 역학적 거동에 영향을 주는 인자는 참고 문헌<sup>1)</sup>의 경우에 의한 온도 변화 이외에는 참고 문헌<sup>2-5)</sup>과 같이 활하중, 사하중 및 지진 하중 등의 외

부하중이 대부분이다.

특히 수경성인 시멘트계 보수 재료는 그 특성상 대기의 습도 변화에 민감하다. 따라서 본 연구에서 다루어질 주요 내용은 시멘트계 재료로 덧씌운 콘크리트 구조물(보수체=기층 콘크리트 +보수 모르타르)에서 습도 변화와 같은 물리적인 원인에 의한 손상 발생 과정을 조사하는 것이다. 이러한 습도 변화에 의한 영향은 보수체가 장기간 공용된 후 수위 하강으로 인해 나타나는 현상(콘크리트 댐)과 보수 후 일정한 양생 기간 후에 거푸집을 제거했을 때 나타나는 현상의 두가지 경우에 대해서 조사되었다. 습도 변화에 의한 보수체의 손상 문제를 비교적 실제 상태와 근접하게 조사하기 위해서는 사용 재료의 비 선형 물성치, 즉 변형률 경화 및 변형률 연화 특성이 고려된 응력-변형률 곡선을 이용한 응력 해석이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 덧씌우기 보수체에서 습도 변화에 의해 발생하는 원력 상태를 보수 층의 두께와 보수 재료를

\* Corresponding author  
Tel : 031-750-5560  
E-mail : ywh@kyungwon.ac.kr

변수로 하여 해석적 방법을 통해 조사하였다.

## 2. 연구 방법

본 연구에서는 손상된 기층 콘크리트와 보수 모르타르 덧씌우기층으로 구성되는 연속 보수체(예: 댐, 도로, 슬래브, 및 포장)에서 습도 변화에 따라 형성되는 보수체 단부에서의 습도 분포 및 습도 응력 계산을 범용 FE-프로그램 (ABAQUS)을 이용하여 수행하였다. 보수 모르타르로는 시멘트 모르타르(CM)와 에폭시 시멘트 모르타르(ECM)를 사용하였고, 보수층의 두께는 1, 2, 4, 10 cm로 변화 시켰으며, 연속 구조체에서 분리되어지는 기층 콘크리트 단부 단면의 폭, 두께는 습도의 확산이 열 확산보다 매우 느린 점을 고려하여 참고 문헌<sup>1)</sup>과 같이 각각 20 cm로 결정하였다.

### 2.1 습도 분포 및 점-탄성 응력 계산에 필요한 물성치

Fick의 제2법칙<sup>6)</sup>에 의한 비정상적인 습도 분포 계산을 위해서는 습도 확산 계수  $D_H$ 의 물성치가 필요하다. 한편 습도 응력 계산에서는 습도 확산이 열 확산에 비해서 1/10000정도로 매우 느리게 진행되므로 참고 문헌<sup>1)</sup>의 경우와 따른 온도 변화시 응력 조사와는 달리 각 재료의 크리프 특성이 고려된 점-탄성 응력 계산이 수행되어야 한다. 이를 위해서는 탄성 계수  $E$ , 습도 변형 계수  $\alpha_H$ , 포아손비  $\nu$  및 크리프 함수가 기본적으로 필요하다. 우선 기층 콘크리트 및 보수용 모르타르들(시멘트 모르타르 CM, 에폭시 시멘트 모르타르 ECM)에 대한 크리프 함수는 다음 식(1)과 같이 시간  $t$ 에 대해 power function으로 표시하였으며, 계수  $a$ 와  $n$ 은 참고 문헌<sup>7)</sup>에서 분석한 결과를 인용하였고, Table 1에 그 값이 정리되었다.

$$\epsilon_{cr} = a \cdot f \cdot t^n \quad (1)$$

여기서,  $t$ : day,  $a$ :  $10^{-6}$ ,  $f$ :  $N/mm^2$

탄성 계수  $E$ , 습도 변형 계수  $\alpha_H$  및 포아손비  $\nu$ 는 참고 문헌<sup>6-13)</sup>을 참조하여 Table 2와 같이 결정하였다. 한편 습도  $H$ 의 함수인  $D_H$ 는  $H=100\%$ 일 때의 확산 계수  $D_0$ 에 의해서 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$D_H = \left[ \alpha_0 + \frac{(1 - \alpha_0)}{1 + \left(\frac{1-H}{1-H_C}\right)^n} \right] \cdot D_0 \quad (2)$$

여기서,  $\alpha_0 = 0.05$ ,  $H_C = 0.75$ ,  $n = 6$ 을 택하였다<sup>4)</sup>.

## 2.2 기층과 보수층 경계면의 부착 강도

보수체의 손상은 보수체 표면에서의 균열 발생 및 기층과 보수층 경계면의 부착 파괴 등으로 나타날 수 있다. 이중 경계면 부착 파괴는 부착 인장 파괴(Peel-Off)와 부착 전단 파괴로 구분된다. 본 절에서는 부착 파괴에 영향을 주는 경계면 및 기층 콘크리트의 부착 인장 강도( $f_{bt}'$ ) 및 부착 전단 강도( $f_{bs}'$ )를 참고 문헌<sup>1)</sup>을 참조하여 Table 3과 같이 결정하였다.

## 2.3 비 선형 물성치

보수체의 습도 변화에 의하여 발생하는 응력 상태를 실제와 근접하게 해석하기 위해서는 재료의 비선형 물성치가 필요하다. 즉, 탄성 응력이 재료의 인장 강도( $f_t'$ )에 접근하는 단계에서는 변형률 경화, 그리고 인장 강도를 넘어서는 단계에서는 변형률 연화특성이 고려된 응력-변형률 곡선을 이용하여 응력 해석을 수행해야 한다. 이러한 비선형 응력-변형률 곡선을 결정하기 위해서는 Hillerborg<sup>14)</sup>의 가상 균열 이론에 의한 파괴 에너지( $G_F$ )가 중요한 역할을 한다. 여기서 파괴 에너지란 부재가 인장강도에 도달한 후 응력이 "0"이 될 때까지 단위 면적당 소모된 에너지의 크기를 말한다.

본 연구 대상인 보수체의 각 재료에 대한 파괴 에너지

Table 1 Values of the coefficient  $a$ ,  $n$  in the eq. (1)

Materials	H=100 %		H=76 %		H=55 %	
	$a$	$n$	$a$	$n$	$a$	$n$
Concrete	3.7	0.26	1.4	0.35	0.7	0.38
CM	6.1	0.36	4.3	0.40	2.1	0.44
ECM	8.8	0.38	5.5	0.42	2.9	0.45

Table 2 Material properties of concrete and mortars

Materials	$D_0$	$E$	$\alpha_H$	$\nu$
	[ $10^{10} m^2/s$ ]	[ $N/mm^2$ ]	[ $10^{-6}/\%$ ]	[-]
Concrete	5.0	25000	15	0.15
CM15	1.0	25000	15	0.15
CM20			20	
ECM15	1.0	20000	15	0.20
ECM20			20	
ECM25			25	

Table 3 Adhesive tensile and shear strength  $f_{bt}'$ ,  $f_{bs}'$

Materials	Concrete	CM	ECM
Tensile strength $f_{bt}'$ [ $N/mm^2$ ]	3.5	2.0	2.0
Shear strength $f_{bs}'$ [ $N/mm^2$ ]	12.5	4.0	4.0

는 Wedge-Splitting-Test<sup>15)</sup>에 의한 하중-균열폭-곡선으로부터 결정되며, 파괴 에너지 값  $G_F$ 에 의한 비선형 응력-변형률 곡선의 변형률 연화 특성 결정은 스위스 로잔느 연방공대(EPFL)에서 개발한 전문FE-Program인 SOFTFIT에 의해서 수행된다<sup>11)</sup>. 한편 Fig. 1의 변형률 경화 단계에서의 응력  $f_2$ 와  $\epsilon_p$ 는 참고 문헌<sup>16)</sup>에 의해서  $f_2=0.75f'_1$ ,  $\epsilon_p=f'_1/E$ 로 결정하였다. 본 연구에서 사용될 각 재료의 응력-변형률 곡선은 Fig. 1과 같다.

한편 각 재료의  $G_F$ 값 및 상기 Fig. 1의 응력-변형률 곡선 결정에 필요한 각 변수들은 참고문헌<sup>11)</sup>과 같이 결정하여 Table 4에 정리하였다.

### 3. 습도 변화

본 연구에서는 보수체에서 나타나는 습도 변화를 다음의 두 가지 경우에 대해서 조사하였다.

- 1) LC1: 장기간 공용 후 수위 하강으로 인한 습도 변화
- 2) LC2: 보수체 양생 후 거푸집 제거로 인한 습도 변화

상기 각 경우 대기 습도  $H_0$ 는 봄과 같은 건조한 기후에는 30%까지 하강하나 참고 문헌<sup>11)</sup>의 온도 하중과 비교하여 55%로 결정하였다. 이 경우  $\Delta H=45\%$ 로서  $\Delta T=45K$ 와 같은 수치이다.

Fig. 2에는 LC1 및 LC2를 도식화하였으며, 그림과 같이 LC1의 경우 수위 강하 전 기층 콘크리트와 보수층의 습도는 장기간 수중 공용으로 인하여 100%까지 도달하였다고 가정하였다. 한편 LC2의 경우 기층 콘크리트의 습도 분포는 단면 깊이에 따라서 변한다. 이는 덧씌우기 보수 전 기층 콘크리트가 장기간 대기에 노출되어 어느 정도 건

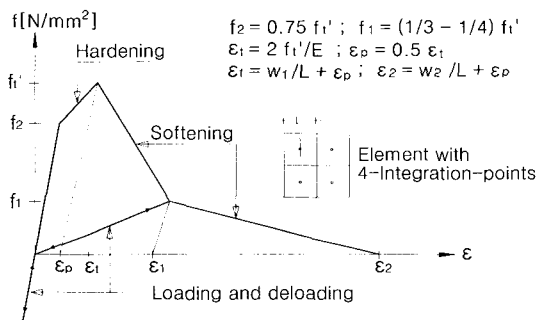


Fig. 1 Definition of the  $f$ - $\epsilon$  curve (Strain-Hardening, Strain-Softening model)

Table 4  $G_F$  and  $f'_1$ ,  $w_1$ ,  $w_2$  in Fig. 1

Materials	$G_F$ [N/m]	$f'_1$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$w_1$ [mm]	$w_2$ [mm]
Concrete	120	3.0	0.029	0.200
CM	70	5.0	0.010	0.075
ECM	55	5.0	0.009	0.065

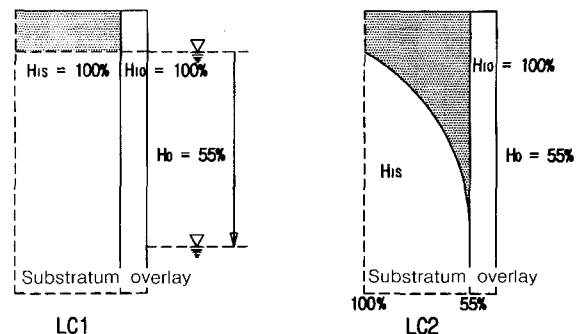
조되었다는 가정에 기인한다.

Fig. 3 및 Fig. 4에는 이들 각 경우 기층 콘크리트 및 보수층에 작용하는 주변 습도가 시간 변화에 따라서 도시되었다.

Fig. 3은 LC1에 대한 시간에 따른 습도 변화로서, 보수체의 건조에 따른 습도 및 응력 계산기간은 수위가 급격히 하강하는 순간부터 30일간으로 하였다. 한편 Fig. 4는 LC2에 대한 시간에 따른 습도 변화로서, 보수 작업 전 기층 콘크리트가 약 30일 간 대기에 노출되었고, 이 상태에서 덧씌우기 보수 작업이 수행되었다. 습도 및 응력 계산기간은 보수 작업 후 7일간의 양생 기간과 양생 후 거푸집 제거로 인한 건조기간을 포함하여 총 30일로 하였다.

본 연구에서 다루어진 습도 변화(LC1, LC2)는 강우에 의한 온도 변화<sup>11)</sup>와는 달리 급격하게 감소하지 않으나, 매질 내에서의 전달이 열 전달보다는 매우 낮은 속도로 진행되기 때문에 열 충격과 같이 일시적으로 급격하게 감소한다고 가정하여 계산을 수행하였다.

Fig. 5에는 Fig. 3 및 Fig. 4에 의해서 계산된 보수체 내부의 습도 분포가 각 경우별로 도시되었다. LC1은 콘크리트 탬의 경우와 같이 보수후 장기간 수중 공용 후 수위



$H_{is}$ =Initial humidity of the substratum,  
 $H_{io}$ =Initial humidity of the overlay  
 $H_0$ =External atmospheric humidity

Fig. 2 Load case LC1, LC2 for the relative humidity

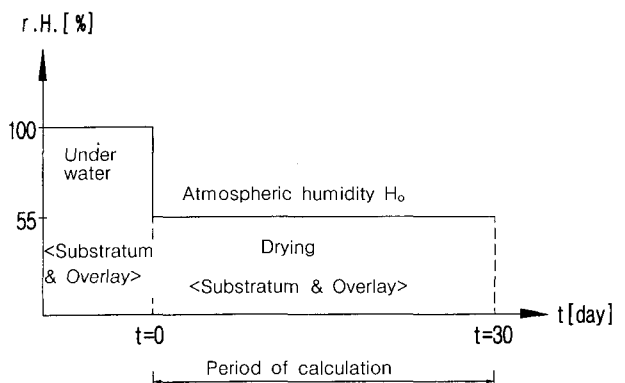


Fig. 3 Scheme of the rel. humidity change for LC1

하강으로 인한 건조 때문에 표면 부위만 습도 변화가 나타났고, LC2는 일반 슬래브 및 콘크리트 도로와 같이 기층 콘크리트에 덧씌우기 보수 후 일정 양생 기간을 거쳐 대기에 노출되면서 나타나는 습도 변화이므로 표면의 습도는 덧씌우기 보수 작업 직후부터 습윤 상태인 보수 모르타르의 영향으로 시간에 따라서 감소하고, 기층 콘크리트 표면의 습도는 이와는 반대로 양생 기간 중에는 변화가 없고, 그 이후에는 시간에 따라서 증가하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 응력 계산 결과 분석 및 고찰

##### 4.1 표면 균열 발생 응력

보수체 손상 형태의 하나인 표면 균열은 습도 변화에 의한 인장 응력이 재료의 인장 강도에 도달하면서 발생하기 시작하고(가상 균열), 균열폭의 증가에 따라서 응력은 감소한다(Fig. 1참조). 이때 인장 강도와 동일한 값인 최대 인장 응력은 가상 균열 발생시의 위치인 표면으로부터 건조가 지속되면서 보수층 내부로 이동하고, 표면의 인장

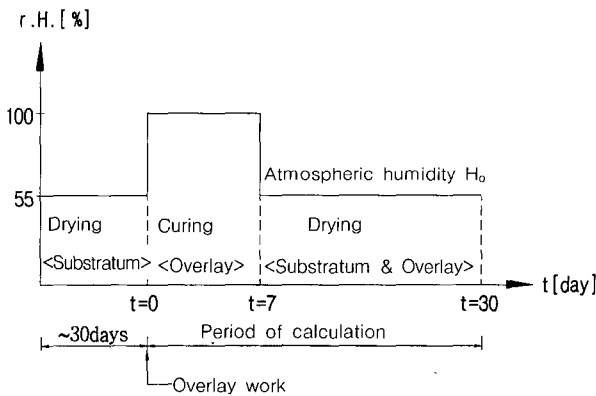


Fig. 4 Scheme of the rel. humidity change for LC2

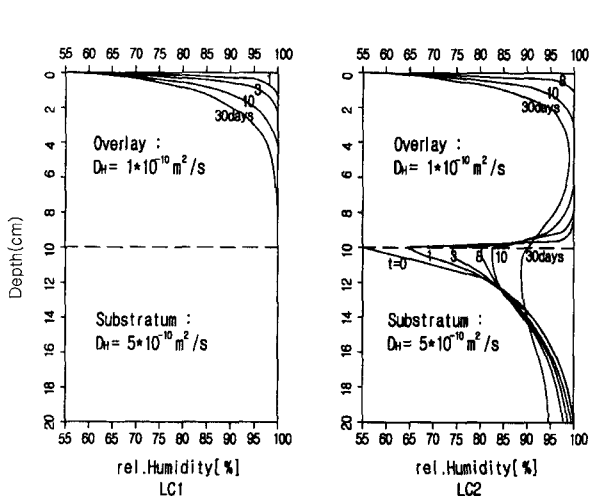


Fig. 5 Distribution of the rel. humidity for LC1, LC2

응력값은 최종적으로는 "0"이 되면서 실제 균열이 발생하게 된다<sup>4)</sup>. 본 연구에서는 우선 참고 문헌<sup>1)</sup>에서와 같이 LC1에 대하여 보수 재료별로 건조 종료 시점에서 보수체 표면 응력( $f_s$ )과 가상 균열이 발생한 깊이(=손상 깊이  $d_s$ )를 조사하였다(Table 5 참조).

Table 5에서 알 수 있는 바와 같이 30일 동안의 건조 기간동안 실제 균열은 발생하지 않는다. 즉, 보수체 표면의 인장 응력이 "0"이 되는 경우는 없다. 손상 깊이 역시 최대 0.5 cm 정도로 참고 문헌<sup>1)</sup>의 경우에 비하여 상당히 낮게 나타났다. 이는 습도 변화가 매우 천천히 진행되고 응력 계산에 크리프 특성이 고려됐기 때문이다. Table 5로 미루어 보면 LC2에 대한 계산 역시 실제 표면의 건조 기간이 양생기간 7일을 제하면 23일 정도이므로 LC1보다 더 양호한 결과를 줄 것으로 판단된다.

Fig. 6에는 시멘트 모르타르(CM20)로 덧씌운 보수체가 대기에 노출되면서 건조되는 과정에 발생하는 인장 응력이 깊이에 따라서 도시되었다. LC1인 경우 인장 응력이 표면부에서 최대값을 보이다가 깊이에 따라서 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 수위가 강하하면서 보수체의 습도가 초기의 100%에서 표면부부터 서서히 감소하기 때문인 것으로 판단된다. LC2의 경우는 약 5 cm까지는 양생 기간(7일)에 습도 변화가 없으므로 응력이 발생되지 않고, 그 이하 경계면 부근까지는 건조한 기층 콘크리트 때문에 양생 중에도 습도 변화가 나타나므로 응력이 발생된다. 즉, 보수 모르타르의 초기 습도 100%가 건조한 기층 콘크리트의 영향으로 서서히 감소하기 때문이다. 이 응력

Table 5  $f_s$ [N/mm<sup>2</sup>],  $d_s$ [cm] for LC1

Mortars	CM15	CM20	ECM15	ECM20	ECM25
$f_s$	4.7	4.5	4.3	4.7	4.2
$d_s$	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5

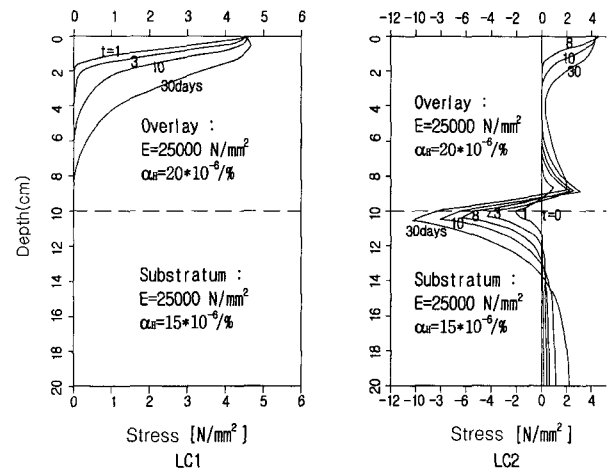


Fig. 6 Stress distribution of a overlaid concrete structure during t=30 days for LC1, LC2

은 인장 응력으로서 경계면 부근까지는 증가하다가 경계면을 지나 기층 콘크리트에서는 압축 응력으로 변하고 시간이 지날수록 그 경사가 증가한다. 따라서 LC2의 경우는 LC1의 경우와는 달리 경계면 부근에서 높은 전단 응력을 발생시킨다.

#### 4.2 경계면에서의 전단 응력

단부 경계면에서의 전단 응력은 각 습도가 변화하는 경우(LC1, LC2)로 나누어서 조사되었다. Fig. 7은 LC1, Fig. 8은 LC2에 대한 그림이고, LC1은 보수층의 두께( $d_0$ ), LC2는 시간에 따른 전단 응력이 도시되었다. LC1의 경우 30일간 건조 후의 전단 응력은 Fig. 7과 같이 보수층의 두께  $d_0=2$  cm에서 최대값( $v_{max}$ ),  $d_0=10$  cm에서 최소값( $v_{min}$ )을 보인다. Table 6 에는 각 보수 재료별로  $v_{max}$  와  $v_{min}$ 이 정리되었다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 각 보수 재료별 경계면의 전단 응력은 부착 전단 강도( $f_{bs}'=4.0$  N/mm<sup>2</sup>) 미만으로서 보수체 경계면의 부착 전단 파괴는 발생치 않는다.

한편 LC2의 경우는 양생 기간 전 후에 걸쳐서 응력을 조사하였고, 보수 재료의 시간에 따른 응력 발생은 Fig. 8과 같이 도시된다. 7일 간의 양생 기간 동안 발생하는 최대 전단 응력  $v_3$ 는 양생 시작 1-2일( $t_3$ ) 후에 보수층 두께  $d_0=10$  cm에서 발생하였고, 양생 후의 최대 전단 응력  $v_1$ 은 양생 종료 1-4일( $t_1$ =총 8-11일) 후에  $d_0=2$  cm에서 발생하였다. Table 7에는  $v_3$ ,  $t_3$ ,  $v_1$ ,  $t_1$  및 안전율  $\zeta(t)=f_{bs}'(t)/v$ 이 정리되었다. 시간에 따른  $f_{bs}'(t)$ 는 참고 문헌<sup>17-20)</sup>에 의해 다음 식으로 구할 수 있다.

$$f_{bs}'(t)=0.25 \cdot t^{0.416} \cdot f_{bs}'(28) \quad (3)$$

Table 7에서와 같이 양생 후의  $\zeta$ 값은 1.2-1.9의 범위에 있다. 그러나 양생 중의  $\zeta$ 값은 일부 모르타르에서 1.0미만

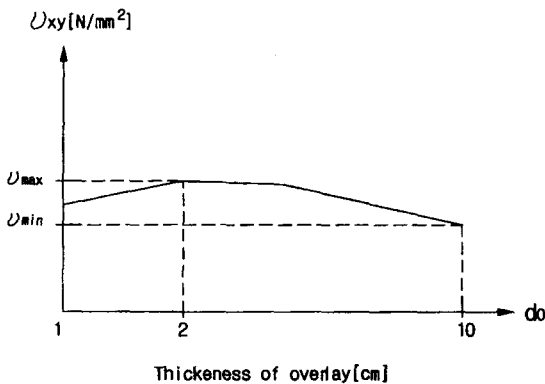


Fig. 7 Definition of the max. shear stress  $v_{max}$  at  $d_0=2$  cm, and the min. shear stress  $v_{min}$  at  $d_0=10$  cm(LC1)

이다. 어느 경우든 ECM15가 가장 높은 안전율을 보인다. 이는 낮은 탄성계수와 낮은 습도변형계수에 기인하는 것으로 판단된다.

#### 4.3 경계면에서의 연직 인장 응력

단부 경계면에서 발생하는 연직 인장 응력  $f$ 는 일반적으로 Fig. 9, Fig. 10과 같이 도시될 수 있다. Fig. 9는 LC1에 대해 시간에 따른 응력 발생을 도시한 것으로서 응력  $f$ 는 초기에 급격히 증가하면서 부착 인장 강도( $f_{bt}'$ )를 초과하여 최대 응력  $f_1$ 에 도달한다. 이후 응력은 완만하게 감소하여 계산 완료 시점 30일에는  $f_2$ 에 달한다. 한편 Fig. 10은 LC2에 대한 것으로서 LC1과는 다른 양상을 보인다. 우선 양생 초기의 인장 응력은 증가하는 경향을 보이다가 최대값  $f_3$ 에 도달한 후에는 점차 감소하여 양생 종료 시점(7일)에 인접하면서 압축 응력으로 변한다. 양생 후 대기에 노출된 보수체의 단부 경계면에는 다시 인장 응력이 발생하면서 LC1과 같이 급격히 증가하여 최대값  $f_1$ 에 도달한 후 완만하게 감소하여 계산 완료 시점 30일에는  $f_2$ 에 달한다. 본 연구에서는 LC1인 경우는 부착 인장

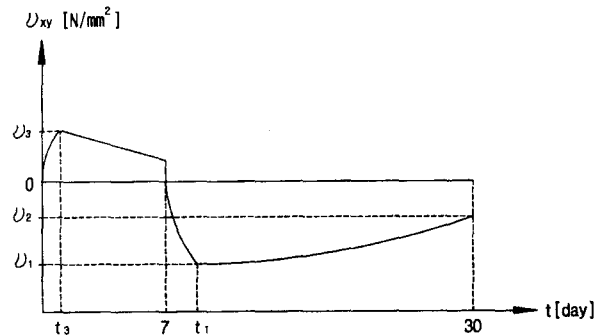


Fig. 8 Development of the shear stress  $u_{xy}$  in the contact zone during and after curing work

Table 6  $v_{max}, v_{min}$  [N/mm<sup>2</sup>] in Fig. 7

Mortars	CM15	CM20	ECM15	ECM20	ECM25
$v_{max}$	1.4	1.7	1.2	1.4	1.8
$v_{min}$	1.0	0.8	0.8	1.0	0.8

Table 7  $v_3, v_1$  [N/mm<sup>2</sup>],  $t_3, t_1$  [day] in Fig. 8 and  $\zeta(t)$

Mortars	$d_0=10$ cm(during curing)			$d_0=2$ cm(after curing)		
	$v_3$	$t_3$	$\zeta(t)$	$v_1$	$t_1$	$\zeta(t)$
CM15	1.0	1.0	1.0	1.8	9.0	1.4
CM20	1.2	1.0	0.8	2.0	8.0	1.2
ECM15	0.5	2.0	2.7	1.4	11.0	1.9
ECM20	0.8	2.0	1.7	1.6	10.0	1.6
ECM25	0.8	1.0	1.3	1.8	9.0	1.4

강도( $f_{br}'$ )에 도달하는 시점  $t_0$ , 최대 응력  $f_1$ 과 이때의 시간  $t_1$ 을 조사하였다(Table 8).

보수층 두께  $d_0=1$  cm에서는 계산기간(30일)동안 발생 응력이 부착 인장 강도  $f_{br}'=2$  N/mm<sup>2</sup> 이하이므로  $t_0$ 를 표에서 생략하였다. Table 8에서와 같이  $d_0=1$  cm에서만 최대 발생 응력  $f_1$ 이 부착 인장 강도 이하이고, 시점은 불규칙하나 14.1일~21.5일 사이로 나타났다. 표에서 알 수 있는 바와 같이  $d_0=1$  cm와 2 cm사이의 약 1.5 cm에서 최대 발생 응력이 부착 강도를 초과한다.  $d_0 \geq 2$  cm에서는 건조기간 동안 부착 강도를 초과하는 시점은 2~19시간( $t_0=0.1 \sim 0.8$ 일)정도이고, 이것은  $d_0$ 가 증가할수록 더욱 빨라진다. 최대 응력은 표에서와 같이 보수층의 두께가 증가할수록 커지고, 각 모르타르 별로 응력 크기는  $ECM15 \leq ECM20 \leq CMI5 \leq ECM25 \leq CM20$  순이다.

한편 LC2의 경우, 7일 간의 양생이 끝난 후 거푸집을 제거하면서 나타나는 응력은 급격히 증가하여  $t_0=7.5 \sim 8.5$  일에서 식(3)에 준하여 계산된 부착 강도 약 1.2 N/mm<sup>2</sup>을 초과한다. 대표적인 경우로서 가장 낮은 응력을 보이는 ECM15에 대한 계산 결과를 정리하면 Table 9와 같다. 이와 같이 이리 공용 중인 LC1의 경우는 부착강도  $f_{br}'=2$  N/mm<sup>2</sup>를 확보하고 있으므로 보수 작업 후 부착강도가 발

Table 8  $f_1$ [N/mm<sup>2</sup>],  $t_0$ ,  $t_1$ [day] in Fig. 9

Mortars	$d_0=1$ cm		$d_0=2$ cm		$d_0=4$ cm		$d_0=10$ cm				
	$f_1$	$t_1$	$t_0$	$f_1$	$t_1$	$t_0$	$f_1$	$t_1$			
CM15	1.2	20.8	0.2	2.5	0.9	0.2	3.5	6.0	0.2	4.0	3.1
CM20	1.4	15.8	0.1	2.7	0.9	0.1	4.0	6.2	0.1	4.2	8.3
ECM15	1.1	21.5	0.8	2.3	1.1	0.4	3.1	3.1	0.3	3.6	9.2
ECM20	1.1	16.7	0.2	2.3	1.0	0.2	3.3	6.2	0.2	3.8	3.2
ECM25	1.3	14.1	0.1	2.6	0.8	0.1	3.7	6.4	0.1	4.1	2.8

Table 9  $f_1$ [N/mm<sup>2</sup>],  $t_0$ ,  $t_1$ [day] for ECM15 in Fig. 10

$d_0=1$ cm			$d_0=2$ cm			$d_0=4$ cm			$d_0=10$ cm		
$t_0$	$f_1$	$t_1$	$t_0$	$f_1$	$t_1$	$t_0$	$f_1$	$t_1$	$t_0$	$f_1$	$t_1$
8.5	1.8	15.8	7.9	3.5	10.5	7.6	3.4	12.1	7.5	3.2	8.9

현 중인 상태에서 건조 중인 LC2의 경우보다는 단부 경계면의 연직 들뜸(Peel-Off)가능성이 비교적 낮다고 할 수 있다. 그러나  $t=30$ 일에서의 최대 인장 응력  $f_1$ 에 대해 안전한 보수층의 두께는 LC1의 경우는 1.5 cm, LC2의 경우는 1.0 cm 정도로서 2 cm를 초과하지 못한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 대기의 건조로 인해 보수체의 내부에서 시간에 따른 습도 변화로 인하여 발생하는 응력 상태에서 보수체의 손상에 영향을 미치는 표면에서의 균열 원인인 표면 인장 응력, 보수층과 기층 단부 경계면에서는 들뜸(Peel-Off)과파 원인인 연직 인장 응력과 전단 파괴를 유발하는 전단 응력이 조사되었다. 이러한 응력 조사는 공용 중 수위 하강과 보수체 양생 후 대기 노출로 인한 건조의 두가지 경우로 나누어 수행되었고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 건조되는 동안 보수체 표면의 균열은 발생치 않고, 또한 변형을 연화 단계에서의 가장 균열 깊이도 0.5cm 정도로서 매우 낮다. 이는 습도 확산이 매우 느린 속도로 진행되고, 응력 계산에 재료의 크리프 특성이 고려되었기 때문이다.

2) 단부 경계면에서의 전단 응력은 두가지 경우의 대기 건조 과정에서 대체로 부착강도 미만으로 나타났고, 일부 보수체(CM20)에서 양생 중에 부착 강도를 약간 상회한다. 가장 안전율이 높은 경우는 낮은 탄성계수와 낮은 습도 변형계수를 가진 모르타르(ECM15)로 된 보수체이다.

3) 단부 경계면에서의 연직 인장 응력은 습도 변화시 보수체에 손상을 유발하는 주요 원인이므로, 그 형태는 경

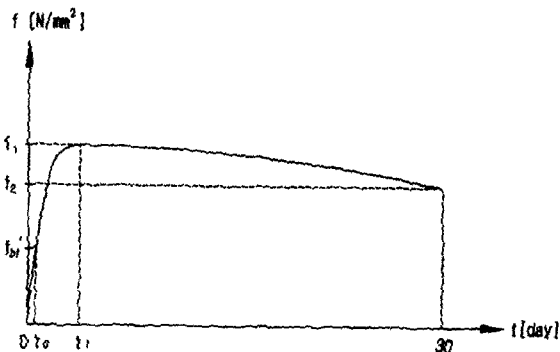


Fig. 9 Development of the vertical tensile stress  $f_y$  in the contact zone(LC1)

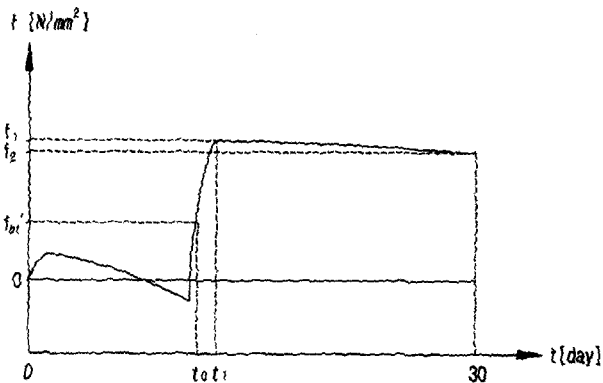


Fig. 10 Development of the vertical tensile stress  $f_y$  in the contact zone during and after curing work

계면의 들뜸(Peel-Off)현상이다. 본 연구에서 수행된 응력 조사에서도 경계면의 연직 인장 응력이 가장 중요한 요소로 나타났다. 응력 계산 결과 공용 중에 건조되는 경우에는 보수층 두께  $d_0=1$  cm에서만 부착 강도보다 낮은 값을 유지하고, 보수 작업시 양생 후 대기에 노출되는 경우에는 1.5일 이내에 발현된 부착 강도를 초과한다.

따라서 덧씌우기 보수 작업 전 건조한 기층 콘크리트 표면은 충분한 습윤 처리를 하여 경계면에서 완전한 습도 경사가 유지되어 인장 응력 발생이 억제되어야 하고, 보수층 두께  $d_0 \geq 2$  cm에서 부착 강도 초과로 인한 들뜸 방지를 위해서는 기층 콘크리트에 강재에 의한 앵커처리 후 덧씌우기 작업이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Yoon, W. H., "Damage of Overlaid Concrete Structures Subjected to Thermally Transient Condition by Rainfall," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 13, No. 5, pp.491-498, October 2001.
2. Sim, J. S., Oh, H. S., and Yu, J. M., "A Study on the Prediction Model of Shear Strength of RC Beams Strengthened for Shear by FRP," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 12, No. 5, pp.35~46, October 2000.
3. Park, T. H., Bu, J. S., and Cho, B. S., "Flexural Behavior of Dual Concrete Beams Using Fiber Reinforced Concrete at Tensile Parts," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 13, No. 6, pp.584~592, December 2001.
4. Chung, Y. S., Park, J. H., Park, H. S., and Cho, C. B., "Pseudo Dynamic Test for the Seismic Performance Enhancement of Circular RC Bridge Piers Retrofitted with Fibers," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 14, No. 2, pp.180~189, April 2000.
5. Sim, J. S. and Oh, H. S., "Semi-Empirical Prediction of Crack Width of the Strengthened Bridge Deck with External Bonding Plastic," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 14, No. 2, pp.231~238, April 2000.
6. Klopfer, H., "Wassertransport Durch Diffusion in Feststoffen." Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin, 1974.
7. Yoon, W. H., "Untersuchung der Temperaturund Feuchtebedingten Spannungsverhältnisse im Bereich von Instandsetzungen bei Massiven Betonbauten," Dissertation der RWTH Aachen, 8. 1989.
8. Bazant, Z. P. and Najjar, L. J., "Nonlinear Water Diffusion in Non Saturated Concrete," *Materials and Structures*, Vol. 5, No. 25, pp.1~20, 1972.
9. Argyris, J. H., Warnke, E. P., and Willam, K. J., "Berechnungen von Temperaturund Feuchtefeldern in Massivbauten Nach der Methode der Finiten Elemente," DAFStb Heft 279, 1977, pp.1~42.
10. Weber, J. W., "Empirischer Formeln zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung und der Entwicklung des E-Moduls von Betons," *Betonwerk+Fertigteile-Technik*, 1979, pp.753~756.
11. Brühwiler, E., "Bruchmechanik von Stauwandbeton Unter Quasi-Statistischer und Erdbebedynamischer Belastung," Dissertation EPF Lausanne, July, 1988.
12. Ferraris, C. F., "Mechanismes du Retrait de Lapate de Ciment Durcie," Dissertation der EPFL, These No. 621, 1986.
13. 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, pp.77~84, 1972.
14. Hillerborg, A., "Analysis of one Simple Crack, *Fracture Mechanics of Concrete*," Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1983, pp.223~249.
15. Brühwiler, E. and Wittmann, F. H., "The Wedge Splitting Test, a Method of Performing Stable Fracture Mechanics Tests," *Proceedings of the International Conference on Fracture and Damage of Concrete and Rock*, Contribution VIII-5, Vienna, July, 1988.
16. Huges, B. P. and Chapman, G. P., "The Complete Stress-Strain Curve for Concrete in Direct Tension," RILEM Bulletin No.30, 1966, pp.95~97.
17. Cleland, D. J., Naderi, M., and Long, A. E., "Bond Strength of Patch Repair Concrete," *Adhesion between Polymers and Concrete (ISAP)*, 1986, pp.235~244.
18. Hilsdorf, H. K. and Belli, H. W., "Einfluß der Haft-brücken auf die Haltbarkeit von Ausbesserungen mit Zementmörtel," *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 342, 1981, pp.45~90.
19. Judge, A. I., Cheriton, L. W., and Lambe, R. W., "Bonding Systems for Concrete Repair -An Assessment of Commonly Used Materials," *Adhesion Between Polymers and Concrete*

---

## 요 약

본 연구에서는 습도 변화와 같은 물리적인 원인으로 보수체의 손상(표면 균열, 경계면 파괴)을 유발하는 표면 인장 응력과 기층과 보수층 단부 경계면의 연직 인장 응력 및 전단 응력이 해석적으로 조사되었다. 응력 계산 시에는 사용 재료의 비선형 응력-변형률 곡선이 사용되었고, 특히 변형률 경화, 변형률 연화 특성이 고려되었다. 응력 계산은 보수층의 두께와 보수 재료를 변수로 하였다. 습도 변화에 의한 영향은 보수체가 장기간 공용된 후 수위 하강으로 인해 나타나는 현상(콘크리트 댐)과 보수 후 일정한 양생 기간 후에 거푸집을 제거했을 때 나타나는 현상의 두 가지 경우에 대해서 조사되었다. 건조되기 전 보수체 표면의 초기 습도는 100%, 대기 습도는 55%로 가정하였고, 계산기간(양생+건조기간)은 30일간으로 하였다. 상기 두 가지 경우에 대해서 응력을 계산한 결과, 보수체 표면에서는 일부 보수체(CM20, ECM25)에서 단지 변형률 연화 단계의 가상 균열이 발생되었다. 한편 단부 경계면에서는 양생 중에 부착 강도를 약간 상회하는 일부 보수체(CM20)를 제외하고는 부착 전단 파괴는 발생치 않았다. 습도 변화에서도 단부 경계면의 들뜸현상(Peel-Off)이 보수체 손상의 주요원인으로 나타났고, 이를 유발하는 연직 인장 응력은 공용 중에 건조되는 경우에는 보수층 두께  $d_0=1$  cm에서만 부착 강도보다 낮은 값을 유지하고, 보수 작업시 양생 후 대기에 노출되는 경우에는 1.5일 이내에 발현된 부착 강도를 초과하였다.

**핵심용어 :** 보수체, 습도 변화, 비선형 응력-변형률 곡선, 변형률 연화특성, 경계면의 들뜸 현상

---