

---

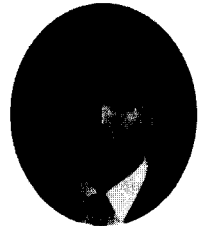
## 사용중 보강되는 부재의 보강설계법 연구

A Study for Numerical Procedure of Strengthening  
Capacity in Field Structure



한만엽\*

Han, Man-Yop



이원창\*\*

Lee, Won-Chang

---

### ABSTRACT

Recently, many strengthening methods are developed to repair damaged structures, especially, steel plate or carbon fiber sheet bonding methods are widely used. For the bonding methods, the strengthening materials are bonded when the original structure is under loading, which causes the difference of initial stresses between original member and bonded material. However, current design method or theory, which mostly depends on ultimately strength design, cannot account the difference of initial stresses between members, and it disregards the reduction of nominal strength.

In this study, a new strengthening design theory and program which can account the difference of initial stresses are developed, and applied to the case when a structure in service is repaired. In order to verify the validity of the theory and the program, a test result is referred and compared with the results and it is showed that the calculated values are almost same as the referred data and finally proved that the program is reliable. The results showed that the amount of strengthening material depends on the status of damages of structure, and the nominal strength is reduced depending on the degree of damages.

Keywords : strengthening, concrete, repair, design, structure

---

\* 정회원, 아주대 토목공학과 교수

\*\* 아주대 토목공학과 석사과정

·본 논문에 대한 토의를 1999년 10월 30일까지 학회로  
보내 주시면 1999년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서 론

콘크리트 구조물의 경우 균열발생 및 시간경과에 따른 콘크리트의 노후화는 피할 수 없다. 또한 1979년 시방서 개정에 따라 DB-24라는 새로운 설계하중이 규정되어 1등급 교량과 DB-18의 2등급 교량으로 구분하여 설계하도록 규정이 바뀌었는데, 이에 따라 시방서 개정 이전에 설계하중 DB-18로 설계, 건설되었던 교량들은 불가피하게 내하력이 부족한 상태로 계속 사용되고 있는 실정이며 외부의 기후 변화나 온도변화에 따른 예폭시층의 손상이 교량보다는 적게 발생하는 건축물의 경우엔 부착형 보강공법이 빈번하게 사용되고 있다. 이런 이유로 구조물의 내구성과 내하력을 높여주기 위한 보수·보강에 관련된 다양한 기술이 개발, 적용되고 있으나 아직 보강설계기법이 정립되어 있지 않은 상황이다.<sup>1),2)</sup>

특히 감소된 내구성을 회복시켜주거나, 내구성의 증가를 꾀할 때 가장 많이 사용되는 방법이 부착형 보강공법이나, 현재 사용되고 있는 부착형 보수공법의 설계법이 체계적으로 이루어져 있지 않은 상태이며 또한 현장 실구조물에 부착형 보수공법을 적용하는 경우에 구조물과 보강재료의 초기 변형률의 차이도 고려되지 않은 상태이므로 기존의 보강물량 설계식을 이용하여 보강물량을 설계할 때 적절하지 않은 설계량을 제시하는 경우가 일반적이다. 이는 구조물의 안전도 측면에서 매우 우려되는 문제이며 경제적으로도 상당한 손실을 발생시킬 수 있는 요인이다.

그러므로 본 연구에서는 사용전 보강한 경우와 사용 중 보강한 경우에 대한 정밀 해석을 실시하여 그 차이를 규명하고 정량화 함으로써 부착식 보강공법의 해석이론과 설계식을 개발하였고 이 결과를 실험자료와 비교 분석하였다.

## 2. 소요보강 모멘트

### 2.1 사용전 보의 보강

설계의 오류나 시공상의 오차에 의해서 내하력이 부족하게 된 경우의 보강일 때는 다음식에 의해서 소요 보강모멘트를 구할 수 있다.

$$\phi(M_n' - M_{rep}) \geq M_u \quad (1)$$

$M_n'$  : 보강후 원 부재의 공칭모멘트

$M_{rep}$  : 보강후 보강재에 의한 모멘트 증가분

### 2.2 손상된 보의 보강

콘크리트 구조물이 손상되어 내하력이 저하된 경우에 저하된 내하력을 회복시키는 것을 목적으로 보강을 하는 경우는 소요보강모멘트를 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\phi(M_n^D - M_{rep}) \geq M_u \quad (2)$$

$M_n^D$  : 보강후 원 부재의 저하된 공칭모멘트

### 2.3 내하력 증가를 위한 보강

보강된 보의 공칭모멘트는 보강하기전 보의 구성요소에 보강후의 재산정된 중립축을 적용하여 산정한 모멘트 분량과 보강재가 가지고 있는 추가 모멘트 분량을 더한 것으로 그 모멘트 분량의 합이 극한모멘트보다 커야 하므로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\phi(M_n' + M_{rep}) \geq M_u \quad (3)$$

## 3. 보강설계 이론

### 3.1 구성요소의 모델

#### 3.1.1 콘크리트 압축모델

본 연구에서 사용된 압축 콘크리트의 모델은 Fig. 1에 제시된 바대로 현재 가장 널리 사용되고 있는 Hognestad<sup>3)</sup>에 의해 제시된 모델식을 사용하였다. 파괴시의 응력은 최대응력으로부터  $0.15f_{ck}$ 가 감소되었을 때 파괴되는 것으로 가정하였으며, 파괴시 변형률  $\epsilon_{cu}$ 는 0.003로 가정하였다. 응력곡선은 응력 증가시 곡선과 감소시 곡선으로 구분하여 다음과 같은 2가지의 모델식으로 가정하였다.

$$\text{Range I : } f_c = f_{ck} \left[ \frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\text{Range II : } f_c = f_{ck} \left( 1 - \frac{0.15}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0} (\epsilon_c - \epsilon_0) \right) \quad (5)$$

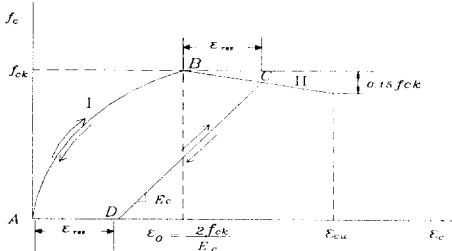


Fig. 1 Compressive model of concrete material

### 3.1.2 콘크리트 인장모델

콘크리트의 인장응력 변형을 관계는 Fig. 2 에 나타낸 것과 같이 Scordelis<sup>4)</sup>가 제안한 응력 변형을 선도를 사용하였다. 이 모델 역시 응력이 증가, 감소에 따라 2개구간으로 나뉘어 다음과 같은 두 개의 모델식으로 가정하였다.

$$\text{Range I: } f_t = E_c \varepsilon_c \quad (6)$$

$$\text{Range II: } f_t = \frac{f'_t}{\varepsilon_{tf} - \varepsilon_{tp}} \varepsilon_c - \frac{f'_t \varepsilon_{tp}}{\varepsilon_{tf} - \varepsilon_{tp}} \quad (7)$$

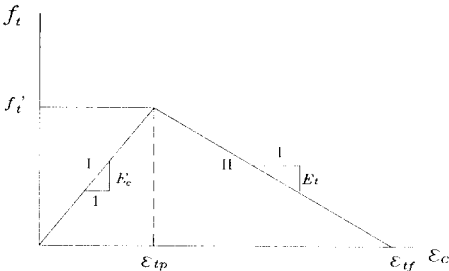


Fig. 2 Tensile model of concrete material

### 3.1.3 철근 인장모델

철근의 구성 모델은 Fig. 3에 제시되어 있다. 하중 제거시 철근 재료의 응력 변형을 선도의 거동도 같은 그림에 설명하였다. 철근이 항복응력  $f_y$ 에 도달하기 전에 하중이 제거된 경우에는 잔류변형을 남기지 않고 A점으로 되돌아간다. 그러나 항복응력  $f_y$ 를 지난 후 임의의 지점 C에서 하중이 제거가 된 경우에는 잔류변형  $\varepsilon_{res}$ 을 남기며 D점으로 이동하는 것으로 가정하였다. A점과 D점사이의 잔류변형  $\varepsilon_{res}$ 은 항복점 B를 지나서 하중이 제거되기 시작할 때까지 발생된 추가

적인 변형을  $\varepsilon_{res}$ 과 같은 것으로 가정하였다.

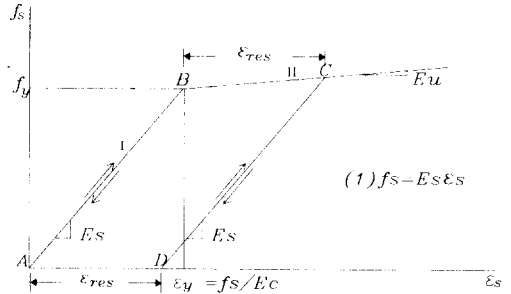


Fig. 3 Modeling of steel rebar

본 연구에서는  $\varepsilon_u = 0.001E_s$ 로 가정하였다. 하중이 증가하다가 하중이 B점을 지나서 증가하다가 임의의 C점에서 하중이 제거가 된다면 철근은 잔류변형  $\varepsilon_{res}$ 를 남기고 기울기  $E_s$ 인 직선 CD를 따라 D점으로 되돌아오는 것으로 가정하였다. 또한, D점에서 다시 하중을 가하게 된다면 철근탄성계수와 같은 기울기로 증가한후 다시 C점에 도달한 후 하중이 증가함에 따라서 (2)번 구간과 같이 거동하는 것으로 가정하였다.

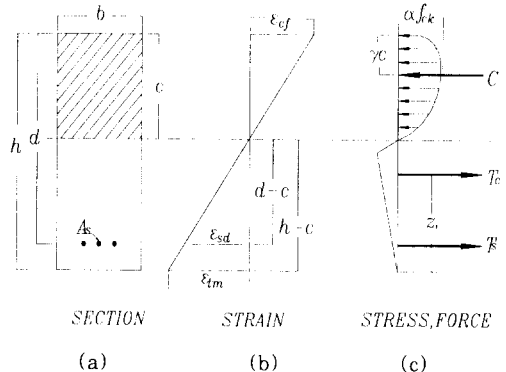


Fig. 4 Distribution of stress and strain in concrete section

## 3.2 무보강보의 해석

부재의 단면에 작용하는 단면력이 평형을 이룬다는 조건을 이용하려면 우선 콘크리트의 압축력과 인장력, 그리고 철근의 인장력을 구하여야 한다. 압축측 콘크리트에 작용하는 총 압축력 C는 다음과 같다.<sup>5),6)</sup>

$$C = \alpha f_{ck} b c \quad (8)$$

여기서  $\alpha$ 는 평균응력상수이며 콘크리트의 응력과 변형율의 함수로 표시하면 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{\int_c^{\epsilon_{cf}} f_c d\epsilon_c}{f_{ck} \epsilon_{cf}} \quad (9)$$

콘크리트의 압축력  $C$ 의 작용점은 보의 상단으로부터  $\gamma c$  만큼 떨어진 위치에 작용한다. 여기서  $\gamma$ 는 작용점을 계산하는 중립축까지의 거리와의 비로서 압축력의 중심에 해당되는 위치이며 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_{cf}} \epsilon_{cf} f_c d\epsilon_c}{\epsilon_{cf} \int_0^{\epsilon_{cf}} f_c d\epsilon_c} \quad (10)$$

콘크리트의 인장력  $T_c$ 는 다음과 같다.

$$T_c = k_3 f_t' b (h - c) \quad (11)$$

인장 콘크리트의 합력이 작용하는 위치  $z_1$ 은 다음과 같다.

$$z_1 = k_4 (h - c) \quad (12)$$

여기서  $k_3$ 는 콘크리트 인장력의 등가직사각형 단면으로 환산된 평균 인장응력계수이며,  $k_4$ 는 콘크리트 인장응력의 인장도심계수로서 다음 식으로 구할 수 있다.

$$k_3 = \frac{\int_0^{\epsilon_{tm}} f_c d\epsilon_c}{f_t' \epsilon_{tm}} \quad (13)$$

$$k_4 = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_{tm}} \epsilon_{cf} f_c d\epsilon_c}{\epsilon_{tm} \int_0^{\epsilon_{tm}} f_c d\epsilon_c} \quad (14)$$

철근의 인장력은 다음과 같다.

$$T_s = A_s f_s \quad (15)$$

이들 인장력과 압축력은 서로 평형을 이루며 이 평형 조건식을 평균응력상수  $\alpha$ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{f_s A_s + k_3 f_t' b (h - c)}{c f_{ck} b} \quad (16)$$

Fig. 4 (b)의 변형률도에서 삼각형 닳은비를 이용하여 압축 콘크리트의 변형률과 인장철근의 변형률의 관계를 구하여  $c$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$( \alpha f_{ck} b + k_3 f_t' b ) c^2 + ( E_s a_s \epsilon_{cf} - k_3 f_t' b ) c - E_s A_s \epsilon_{cf} d = 0 \quad (17)$$

이 이차식을 풀어 양의 해를 취하면 중립축의 위치  $c$ 를 구할 수 있다.

또한, 내부힘의 모멘트합이 외력모멘트  $M_l$ 과 같아야 하므로 다음식이 성립한다.

$$\begin{aligned} M_l &= T \cdot z + C_t \cdot (z - z_1) \\ &= E_s A_s \frac{d - c}{c} (d - \gamma c) \epsilon_{cf} \\ &\quad + k_3 f_t' b (h - c) [h - (\gamma c + k_4 (h - c))] \end{aligned} \quad (18)$$

위의 식 (18)을  $\epsilon_{cf}$ 의 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{cf} = c \left[ \frac{M - k_3 f_t' b (h - c) (h - (\gamma c + k_4 (h - c)))}{E_s A_s (d - c) (d - \gamma c)} \right] \quad (19)$$

위에서 제시한 식을 이용하여 시산법으로 해석하는 방법은 다음과 같다.

Step 1  $\epsilon_{cf}$ 를 가정한다.

Step 2 가정한  $\epsilon_{cf}$ 를 식(9)과 식 (10)에대입하여  $\alpha$ 와  $\gamma$ 를 구하고 식(13)와 식 (14)에서부터  $k_3$ 과  $k_4$ 를 계산한다.

Step 3 계산된 변수들을 식 (17)에 대입하여 2차식의 양의 근을 구하면 중립축  $c$ 를 구할 수 있다.

Step 4 식 (19)을 이용하여  $\epsilon_{cf}$ 를 계산한다.

Step 5 계산된  $\epsilon_{cf}$ 를 이용하여 가정한  $\epsilon_{cf}$ 와 비교하여 그 차이가 지정된 오차범위에 들 때까지 앞의 과정을 반복한다.

이때 처짐은 다음 식으로 계산하였다. 단순 지지된 보에서 처짐은 중앙 일점 재하일 때를 기준으로 구하였으며 다음 식 (20)으로 계산이 가능하다.

$$\delta = \frac{l}{3} \phi \left( \phi = \frac{\epsilon_{cf}}{c} \right) \quad (20)$$

### 3.3 사용전 보강한 경우의 해석

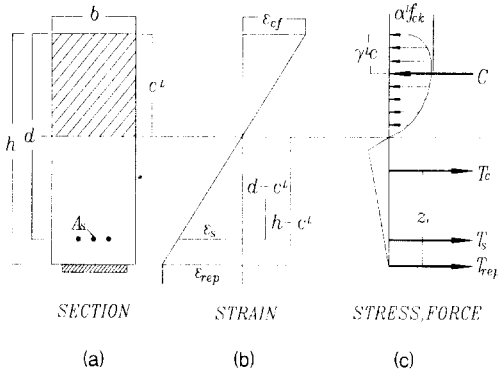


Fig. 5 Stress-strain relationship for repair before use

구조물을 사용하기 전에 보강하였을 경우에는 보강재와 철근이 모두 변형률이 "0"인 상태에서 변형률의 증가가 시작하는 것으로 가정할 수 있다. 위의 Fig. 5 (b)에서 보듯  $\epsilon_s$ 와  $\epsilon_{rep}$ 는 초기부터 같이 거동을 하며 그 비는 닳은꼴 삼각형비를 이용하면 구할 수 있다. 사용전 부착인 경우에는 초기에 보강재량이 결정된 경우가 대부분이기 때문에 보강재량 설계식을 적용하지 않았다.

이 단면의 평형조건을 고려하려면 보강재가 받는 인장력을 먼저 계산해야 한다.

$$T_{rep} = f_{rep} A_{rep} \quad (21)$$

콘크리트의 인장력과 철근의 인장력 그리고 보강재의 인장력을 합친 총인장력은 다음과 같다.

$$T = T_s + T_c + T_{rep} = f_s A_s + k_3 f_t b (h - c^L) + f_{rep} A_{rep} \quad (22)$$

이 인장력은 콘크리트의 압축력과 서로 평형을 이루므로 식 (8)을 식 (22)과 같다고 놓으면 다음과 같다.

$$\alpha^L f_{ck} b c^L = f_s A_s + k_3 f_t b (h - c^L) + f_{rep} A_{rep} \quad (23)$$

Fig. 5 (b)의 변형률 선도에서 적합조건을 이용하여 압축측 콘크리트의 변형률과 보강재의 변형률의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{rep} = \epsilon_c \left( \frac{h}{c^L} - 1 \right) \quad (24)$$

또한, Fig. 5 (b)에서 삼각형 닳은꼴비를 이용하여 인장측 철근의 응력을 구한 식 (24)에 대입하면 중립축  $c^L$ 에 대한 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$(\alpha f_{ck} b + k_3 f_t b) (c^L)^2 + (E_s A_s \epsilon_c + E_{rep} A_{rep} \epsilon_c - k_3 f_t b h) c^L$$

$$- (E_s A_s \epsilon_c d + E_{rep} A_{rep} \epsilon_c h) = 0 \quad (25)$$

이 이차식을 풀어 양의 해를 취하면, 중립축  $c$ 를 구할 수 있다.

또한, 대한 내부힘에 의한 모멘트합이 외력모멘트  $M_l$ 과 같아야 하므로 다음식이 성립한다.

$$\begin{aligned} M_l &= T \cdot z + C_t \cdot (z - z_1) \\ &= E_s A_s \frac{d - c^L}{c^L} (d - \gamma c^L) \epsilon_c \\ &\quad + A_{rep} f_{rep} (h - \gamma c^L + \frac{1}{2} t_r) \end{aligned} \quad (26)$$

이 식 (26)을  $\epsilon_c$ 의 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\epsilon_c = c^L \left\{ \frac{M_l - k_3 f_t b (h - c^L) [h - (\gamma c^L + k_4 (h - c^L))]}{E_s A_s (d - c^L) (d - \gamma c^L) + E_{rep} A_{rep} (h - \gamma c^L + \frac{1}{2} t_r)} \right\} \quad (27)$$

위에서 제시한 식을 이용하여 무보강보의 해를 구한 방법과 같은 과정을 거치는 시산법을 적용하면 해를 구할 수 있다.

일단 해를 구하게 되면 식(27)로부터 유도된 다음과 같은 보강설계식을 이용하여 보강량을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_{rep} &= \frac{1}{\epsilon_c f_{rep} (h - \gamma c^L + \frac{1}{2} t_r)} \{ M_l c^L - k_3 f_t b (h - c^L) [h \\ &\quad - (\gamma c^L + k_4 (h - c^L)) c^L] - \epsilon_c E_s A_s (d - c^L) (d - \gamma c^L) \} \end{aligned} \quad (28)$$

### 3.4 사용중 보강한 경우의 보강설계식

#### 3.4.1 보강된 보의 공칭모멘트

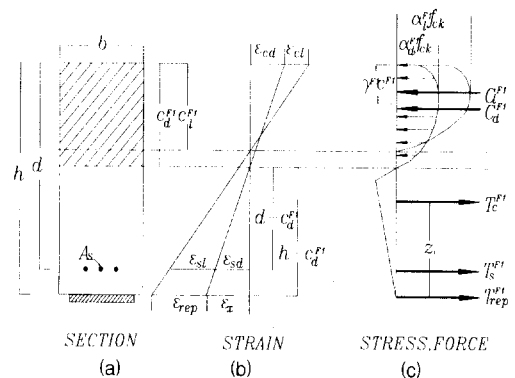


Fig. 6 Stress-strain relationship for field case

실구조물에서 보강을 할 경우에는 기존구조물

에 고정하중이 작용하는 상태에서 부착식 보강이 이루어지므로 보강재 부착시에 원 부재는 고정하중에 의한 응력이 작용하는 상태이며 보강재는 응력이 "0"인 상태이다. 따라서 보강재에 작용하는 응력은 적재하중의 크기에 해당하는 만큼만 발생하게 된다.

따라서, 중립축  $c_d^{F1}$ 는 보강재를 부착하기 전에 고정하중만을 받고 있는 상태에서의 중립축이며, 중립축  $c_i^{F1}$ 는 보강재가 부착된 후 하중이 증가하여 인장철근이 항복할 때의 중립축이다. 또한 Fig. 6 (c)에서와 같이 초기에 고정하중만을 받고 있을 때의 압축력과 그 작용위치를 각각  $C_d^{F1}$ 와  $\gamma_d^{F1} c_i^{F1}$ , 그리고 철근이 항복할때의 압축력과 작용위치를 각각  $C_i^{F1}$ 와  $\gamma_i^{F1} c_i^{F1}$ 로 나타내었다. 또한 보강전후에 철근이 받는 응력을 각각  $T_d^{F1}$ ,  $T_i^{F1}$ 으로 나타냈으며, 보강재의 경우에는 초기에 하중을 받지 않으므로  $T_{rep}^{F1}$ 만이 존재한다. 또한 Fig. 6에서  $a_d^{F1}$ 와  $a_i^{F1}$ 는 각각 보강전후의 평균응력상수이며,  $\gamma_d^{F1}$ 와  $\gamma_i^{F1}$ 는 압축도심계수이다.

보강재를 부착할때 내부철근은 고정하중에 의하여 발생된  $\epsilon_{sd}$ 만큼의 변형률이 작용하는 상태이므로, 보강재가 부착된 부재의 내하력을 계산할 때는 보강재의 변형률이  $\epsilon_x$  만큼 감소된 상태인 점이 고려되어야 한다.

그러므로 변형을 삼각형의 닳음비를 이용하여  $\epsilon_x$  를 기지수인  $\epsilon_{sd}$ 으로 표시한 뒤 전체 변형률과의 차이를 구하면 다음과 같은  $\epsilon_{rep}$ 를 구할 수 있다.

$$\epsilon_{rep} = \frac{\epsilon_{sy}(h - c_i^{F1})}{c_i^{F1}} - \frac{\epsilon_{sd}(h - c_d^{F1})}{(d - c_d^{F1})} \quad (29)$$

변형률의 크기를 알면 보강재가 받는 인장력은 다음과 같다.

$$T_{rep} = f_{rep} A_{rep} = \epsilon_{rep} E_{rep} A_{rep} \quad (30)$$

이 인장력과 철근의 인장력 그리고 콘크리트의 압축력이 서로 평형을 이루는 평형조건을 이용하여 중립축  $c_i^{F1}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$c_i^{F1} = \frac{f_y A_s + f_{rep} A_{rep} + k_3 f_c b h}{\alpha_i^{F1} f_{ck} b + k_3 f_c b} \quad (31)$$

변형을 삼각형의 닳음비를 이용하여  $\epsilon_{cf}$ 를  $\epsilon_{sy}$ 로 표시하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{cf} = \epsilon_{sy} \frac{c_i^{F1}}{(d - c_i^{F1})} \quad (32)$$

따라서 사용중 보강한 경우의 보강후 공칭휨강도는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$M_n^{F1} = M_n' + M_{rep} = T_1 z_1 + T_2 z_2 \quad (33)$$

여기서 보강된 뒤 원부재의 공칭모멘트인  $M_n'$ 와 보강재에 의한 모멘트의 증가량인  $M_{rep}$ 는 다음과 같다.

$$M_n' = \epsilon_y E_s A_s (d - \gamma_i^{F1} c_i^{F1}) \quad (34)$$

$$M_{rep} = \epsilon_{rep} E_{rep} A_{rep} (h - \gamma_i^{F1} c_i^{F1}) \quad (35)$$

### 3.4.2 손상된 보의 보강설계식

손상된 보를 보강하여 내하력을 회복시키고자 하는 경우에는 먼저 안전진단인 수행되어 내하력 계수(RF)가 결정된 상태인 것을 의미한다. 따라서 주어진 단면으로 계산이 가능한 공칭모멘트  $M_n$ 과 손상된 뒤의 모멘트  $M_n^D$ 는 다음식과 같은 관계가 있다.

$$M_n = \gamma_d M_d + \gamma_l M_l = M_u \quad (36)$$

$$M_n^D = \gamma_d M_d + \gamma_l M_l \cdot RF$$

손상되지 않은 보의 보강 전후의 모멘트의 증가율은 손상된 보의 보강 전후의 모멘트의 증가율과 서로 비례하므로, 보강후 손상된 원 부재의 공칭모멘트와 손상되지 않은 원부재의 공칭모멘트의 비인 손상계수(DF)는 다음과 같다.

$$DF = \frac{M_n^D}{M_n} = \frac{M_n^D}{M_n} \quad (37)$$

식 (35)를 식(36)에 대입하여 정리하면 DF는 다음과 같다.

$$DF = 1 - 2.15(1 - RF) \frac{M_l}{M_u} \quad (38)$$

식(37)과 식(33), 9+식(34)를 식(1)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 소요보강량  $A_{rep}$ 를 계산하는 보강설계식을 유도할 수 있다.

$$A_{rep} = \frac{M_u - \Phi[\epsilon_y E_s A_s (d - \gamma_i^{F1} c_i^{F1})] DF}{\Phi \epsilon_{rep} E_{rep} (h - \gamma_i^{F1} c_i^{F1})} \quad (39)$$

3.4.3 내하력 증가를 위한 보강설계식  
 손상되지 않는 한 부하를 증가시키기 위한 보강일 경우의 소요보강량은  $A_{rep}$ 는 식(33)과 식(34)를 식(2)에 대입하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_{rep} = \frac{M_u - \Phi(\epsilon_{sy} E_s A_s (d - \gamma_l^F c_l^F))}{\Phi \epsilon_{rep} E_{rep} (h - \gamma_l^F c_l^F)} \quad (40)$$

앞절에서 제시된 식들을 이용하여 시산법으로 정밀해를 구하는 방법은 다음과 같다.

- Step 1 중립축  $c_l^F$ 을 가정한다.
- Step 2 식(31)을 이용하여  $\epsilon_{cf}$ 를 산정후  $\epsilon_{cf}$ 를 식(8)과 식(9)에 대입하여  $a$ 와  $\gamma$ 를 구하고 식(12)와 식(13)에서부터  $k_3$ 과  $k_4$ 를 계산한다.
- Step 3 식 (28)에서  $\epsilon_{rep}$ 를 구한다
- Step 4 구해진 값들을 식(30)에 대입하여  $c_l^F$ 를 산정한다.
- Step 5 계산된  $c_l^F$ 를 이용하여 가정 한  $c_l^F$ 와 비교하여 그 차이가 지정된 오차범위 내에 들때까지 앞의 과정을 반복한다.
- Step 6 구해진 변수들을 식(38) 또는 식(39)에 대입하여  $A_{rep}$ 를 구한다.

## 4. 해석 결과의 비교분석

### 4.1 비교실험체의 제원

개발된 이론을 검증하기 위하여 기존에 발표된 실험결과를 비교 분석하였다. 분석에 사용된 시험체의 제원은 Fig. 7에 제시되어 있다. 콘크리트의 강도는  $210 \text{ kg/cm}^2$ 의 설계강도를 가지며, 시험체내의 철근의 강도는  $2,400 \text{ kg/cm}^2$ 을 사용하였다.<sup>7),8)</sup>

사용전 보강의 해석은 강판으로 보강된 시험체의 실험결과와 위의 해석 방법으로 극한하중에 도달할 때까지 해석된 결과를 비교하였으며, 사용중 보강의 각 단계를 해석한 그래프는 동일한 보강량을 사용하였을 경우에 사용 전 보강과 사용 중 보강의 극한하중에 도달할 때까지의 해석치를 비교한 것이다.

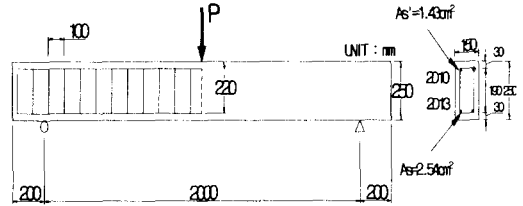


Fig. 7 Section and form of beam

### 4.2 무보강보의 해석결과

Fig. 8은 무보강보에 대한 해석치와 실험 시편에서 측정된 하중변위 곡선을 동시에 제시하였다. 실험결과에서는 균열발생하중이 1.28t이며 해석결과는 1.35t으로 나타났다. 실험체의 극한하중은 3.41t 이며 그때의 처짐은 4.03mm가 발생하였고 해석결과에서는 극한하중이 3.12t, 처짐이 3.88mm가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 해석모델에서 처짐의 발생시 모멘트의 영향만을 고려하였고 전단의 영향은 고려하지 않음으로 인해 실험치의 처짐량보다 해석치의 처짐량이 작게 나오는 것으로 사료된다.

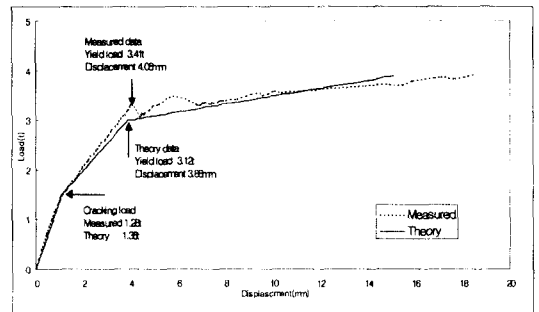


Fig. 8 Load-deflection curves for no strengthened beam

### 4.3 사용전 보강한 경우의 해석결과

아래 Fig. 9는 강판을 사용한 사용전 보강부재에 대한 실험치와 해석치의 하중변위곡선을 나타낸 것이다. 실험결과에서는 균열발생하중이 1.46t이며 해석결과는 1.44t으로 나타났다. 또한 그때의 처짐 발생량도 실험치에서는 0.85mm이며, 해석치에서는 1.02mm이다. 강판이 항복할때의 하중과 처짐량은 실험치가 5.45t, 3.65mm이며 해석치가 5.37t, 3.51mm으로 나

타났다. 내부의 철근이 항복하는 항복하중과 그때의 처짐량은 실험치가 6.85t, 4.95mm이며 해석치는 6.75t, 4.82mm으로 나타났다. 앞서 언급한 전단 처짐량을 고려하지 않아서 실험치보다 해석치의 처짐량이 작게 나오는 것으로 사료된다. 사용중 보강부재에 대해서는 상당히 실제와 근사한 해석결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

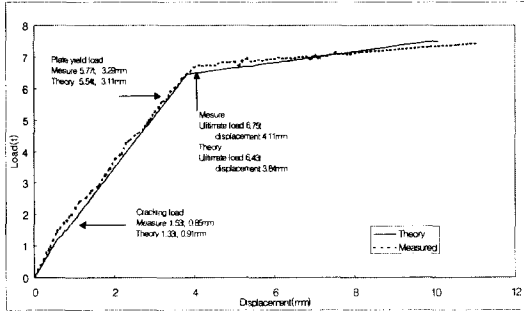


Fig. 9 Load-deflection curves for steel plate strengthened beam

#### 4.4 사용중 보강한 경우의 결과

Fig. 10은 강판을 사용한 사용전 보강부재와 사용후 보강부재에 대한 해석치의 하중변위곡선을 나타낸 것이며, Table 1은 사용전후 보강된 부재의 공칭하중에 대한 해석치를 비교한 것이다. 해석에서는 무보강부재가 고정하중 2t을 받고있는 상태에서 강판을 보강한 것으로 가정하였으며 그때의 처짐량은 2.05mm이다. 그후에 부재의 거동은 적재하중에 대해 보강재와 내부의 철근이 동시에 작용하는 것으로 해석이 되었으며 사용전 보강부재와 보강재 부착후의 사용후 보강부재의 강성이 일치함을 알 수 있다. 그러나 내부의 철근이 항복하는 항복하중에서는 사용전 보강부재가 6.45t이며 사용후 보강부재가 5.87t으로 나타나 약 9%의 극한하중의 감소가 일어남을 알 수 있다. 또한, 그때 발생하는 처짐량도 사용전 보강부재는 3.84mm이며 사용후 보강부재는 4.61mm로 나타나 약 17%의 증가를 보였다. 만약 사용중 보강부재의 해석에서 고정하중을 증가시켜 해석을 하였다면 처짐량의 증가는 더욱 커졌을 것으로 사료된다. 해석결과 극한하중일 때 사용중 보강부재에서는 철근의 항복이 발생한 것

으로 나타났으며 강판의 항복은 철근이 항복한 후 6.94t에서 발생하는 것으로 나타났다. 사용전 보강부재에서는 강판이 먼저 항복한후 철근이 항복하는 거동을 보이지만 사용중 보강 보재에서는 보강전 작용하고있는 고정하중의 크기에 따라 철근의 초기 변형률이 변하기 때문에 생기는 것으로 사료된다.

따라서 고정하중이 작용하는 기존 구조물을 보강

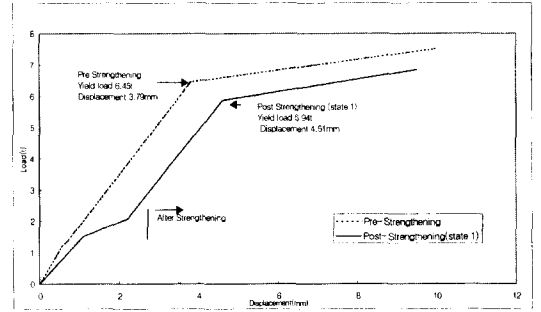


Fig. 10 Comparisons for strengthened beam

하는 경우에는 기존 방법으로 계산된 내하력보다 내하력이 감소하므로 적절한 정도의 과보강이 되어야만 필요한 보강량을 확보할 수 있게된다.

Table 1 Comparison of yield and failure load between strengthening state

Classification		Pre-strengthenin	Post-strengthenin
yield load	load(t)	6.45(100%)	5.87(91%)
	displacement (mm)	3.84(100%)	4.61(120%)
Ultimate load	load(t)	7.62(100%)	6.94(91%)
	displacement (mm)	9.84(100%)	7.61(77%)

#### 5. 결론

본 연구에서는 부착식 보강공법의 보강설계 이론을 개발하고 그 계산결과를 실험자료와 비교 분석하였고, 사용전후의 보강시기에 따른 내하력의 차이와 보강량의 산정방법, 그리고 공칭 휨강도의 차이를 계산, 검토한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1. 손상에 의하여 내하력이 저하된 구조물의 보강과 설계상 결함이 있거나 내하력을 증가시킬 필요가 있는 부재의 보강 등, 보의 보강 목적을



구분하여 소요보강모멘트를 계산하는 방법을 제시하였다.

2. 사용전 보강한 경우의 보강설계식과 사용중 보강한 경우의 보강설계식을 개발하여 그 차이를 분석한 결과, 보강재의 보강 시점과 보강 대상부재가 받고 있는 고정하중의 크기에 따라서 보강 설계결과가 달라지는 것을 규명하였다.

3. 본 연구에서 개발된 보강 설계 이론을 검증하기 위하여 기존의 극한강도 설계법으로 계산이 가능한 무보강보와 사용전 보강된 보에 대한 해석결과를 실험값등과 비교한 결과, 균열발생 하중이나 항복하중 등의 오차가 5% 미만으로 나타나 해석이론이 신뢰성이 있음을 검증하였다. 또한, 처짐의 경우도 해석값과 실험치가 거의 일치하는 결과를 나타내었다.

4. 동일한 보강량을 부착하였을 경우, 실험실 시편의 경우처럼 하중이 작용하기 전에 보강된 보의 내하력에 비하여, 기존 구조물을 보강하는 경우처럼 항복하중의 약 2/3인 2t 의 고정하중이 작용하는 상태에서 보강된 보의 내하력인 공칭휨강도가 약 9%정도 감소하는 것으로 나타났다.

따라서 현재 널리 사용되고 있는 보강설계식은 사용전 보강하는 경우에는 보강량을 적절히 계산할 수 있지만 기존 구조물과 같이 사용중인 구조물을 보강하는 경우에는 이미 작용하고 있는 고정하중의 크기에 따라 보강량을 약 10% 정도 늘려주어야 기대하는 보강효과를 나타낼 수 있는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. Deric John Oehlers, John Paul Moran, "Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams." *Journal of Structural Engineering, Asce*, Vol.116, No.4, April 1990, pp.987-993
2. R. N. Swamy, R. Johns, J. W. Bloxham, "Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates." *The Structural Engineering*, Vol.65A, No.2, February 1987, pp.59-87
3. Eivind Hognestad, Norman W. Hanson, "Concrete stress Distribution in Ultimate Strength Design", *ACI Journal*, Vol.52, No.4, December 1955, pp475-479
4. Scordelis, Alexander C., and Lin, C.S., "Nonlinear Analysis of RC Shells of General Form", *Proceeding, ASCE*, Vol.101, DT3, Mar. 1975, pp.523-538
5. Ansel C. Ugural, Saul K. Fenster, "Advanced Strength and Applied Elasticity", *ACI Journal*, Vol. 57 No.6, December 1960, pp.207-213
6. Swamy R. N., B. Hobbs and M. Roberts, "Structural Behavior of Externally Bonded, Steel Plated RC Beams after Long-Term Exposure", *The Structural Engineering*, Vol.73, No.12 August, 1995, pp.255~261
7. 송병표, 한만엽, 황의승, 홍영균, "보수 보강재료의 공법개발연구", 한국 콘크리트 학회, 1997년도, 봄 학술 발표회 논문집, pp.592~597
8. 송병표, 한만엽 "보강재의 변형부착에 따른 보의 구조적 거동", 한국 콘크리트 학회지, Vol.10 No.3, 1998년 6월, pp.197~208

## 요 약

최근에는 손상된 구조물을 보강하는 다양한 보강공법들이 연구, 개발되고 있으며, 특히 강판이나 탄소섬유 등을 이용한 부착식 보강공법이 널리 사용되고 있다. 이러한 부착식 보강공법에서는 원부재가 하중을 받는 상태에서 보강재가 부착되므로 원부재와 보강재의 초기 응력에 차이가 나게 된다. 그러나 현재의 보강 설계식이나 이론은 기존의 설계법에 의존하여 이러한 각 구조요소의 초기 응력의 차이를 고려하지 못하는 동시에 이러한 초기 응력의 차이에 따른 공칭 내하력의 감소를 무시한 설계를 하고 있다. 본 논문에서는 이렇게 사용중인 구조물을 보강하는 경우, 발생하는 초기 응력의 차이를 고려한 보강 설계식을 개발하고 이를 계산하는 프로그램을 개발하였다. 이러한 설계식과 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 실험자료를 인용하여 비교, 분석한 결과, 측정값과 거의 일치하는 것으로 나타나 해석결과가 신뢰성이 있음이 증명되었다. 이러한 연구결과와 보강량은 보강시 구조물의 손상상태에 따라 달라지며, 공칭내하력도 손상정도에 따라 감소되는 것으로 나타났다.

(접수일자 : 1998. 11. 11)