

사용중 보강되는 부재의 보강설계법 연구

A Study for Numerical Procedure of Strengthening Capacity in Field

한 만 업* 이 원 창**

Han, Man Yop Lee, Won Chang

ABSTRACT

This study is numerical procedure of strengthening capacity in a field structure and compare analysis data with test data. Recently, many strengthening methods are developed and used to rehabilitate existing structure. However, both theoretical background and applying techniques are not established yet. One of the most popular method is plate bonding method using either steel plate or carbon plate. This theoretical background and applying techniques are very important and those applications are differed when applied in field strengthening cases.

Based on analysis out come, strengthening capacity has variated depending on the condition of the object member and nominal strength has lowered on increasing damages.

Also depending on the analysis out come, displacement increased based on the condition of members while reaching ultimate load or failure load.

1. 서 론

구조물의 내구성과 내하력을 높여주기 위한 보수·보강에 관련된 다양한 기술이 개발, 적용되고 있으나 아직 보강설계방법이 정립되어 있지 않은 상황이다. 특히 감소된 내구성을 회복시켜주거나, 내구성의 증가를 꾀할 때 가장 많이 사용되는 방법이 부착형 보강공법이나, 현재 사용되고 있는 부착형 보수공법의 설계법이 체계적으로 이루어져 있지도 않은 상태이며 또한 현장 실구조물에 부착형 보수공법을 적용하는 경우에 구조물과 보강재료의 초기 변형률의 차이도 고려되지 않은 상태이므로 기존의 보강물량 산정식을 이용하여 보강물량을 산정할 때 적절하지 않은 산정량을 제시하는 경우가 일반적이다. 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 비교분석 하였다

*정회원, 아주대학교 토목공학과 교수

**아주대학교 토목공학과 석사과정

2. 보강설계 이론

2.1 손상된 보의 보강

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

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

M_n^D : 보강후 원 부재의 저하된 공칭모멘트

M_{rep} : 보강후 보강재에 의한 모멘트 증가분

2.2 내하력 증가를 위한 보강

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

$$\phi(M_n' + M_{rep}) \geq M_u \quad (2)$$

M_n' : 보강후 원 부재의 공칭모멘트

2.3 구성요소의 모델

압축 콘크리트의 모델은 Fig.3에 제시된 바대로 현재 가장 널리 사용되고 있는 Hognestad⁴⁾에 의해 제시된 모델식을 사용하였다. 파괴시 변형률 ϵ_{cu} 는 0.003로 가정하였다. 응력곡선은 응력 증가시 곡선과 감소시 곡선으로 구분하여 다음과 같은 2가지의 모델식으로 가정하였다.

$$\text{구간 I : } f_c = f_{ck} \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\text{구간 II : } f_c = f_{ck} \left(1 - \frac{0.15}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0} (\epsilon_c - \epsilon_0) \right) \quad (4)$$

콘크리트의 인장응력 변형률 관계는 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 Scordelis⁵⁾가 제안한 응력 변형률 선도를 사용하였다. 이 모델역시 응력이 증가, 감소에 따라 2개 구간으로 나뉘어 다음과 같은 두 개의 모델식으로 가정하였다.

$$\text{구간 I : } f_t = E_c \epsilon_c \quad (5)$$

$$\text{구간 II : } f_t = \frac{f_t' \epsilon_{tf}}{\epsilon_{tf} - \epsilon_{tp}} \epsilon_c - \frac{f_t' \epsilon_{tf}}{\epsilon_{tf} - \epsilon_{tp}} \quad (6)$$

철근의 구성 모델은 Fig. 5에 제시되어 있다. 하중

제거시 철근 재료의 응력 변형률 선도의 거동도 같은 그림에 설명하였다. 철근이 항복응력 f_y 에 도달하기 전에 하중이 제거된 경우에는 잔류변형을 남기지 않고 A점으로 되돌아간다. 그러나 항복

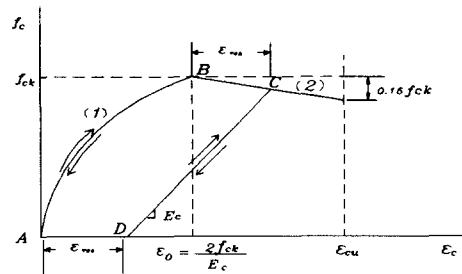


그림 1 콘크리트 압축모델

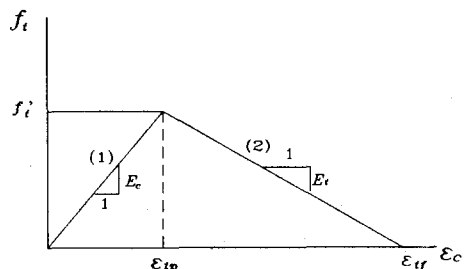


그림 2 콘크리트 인장모델

응력 f_y 를 지난 후 임의의 지점 C에서 하중이 제거가 된 경우에는 잔류변형 ϵ_{res} 을 남기며 D점으로 이동하는 것으로 가정하였다.

본 연구에서는 $E_u = 0.001E_s$ 로 가정하였다.

또한, D점에서 다시 하중을 가하게 된다면 철근 탄성계수와 같은 기울기로 증가한 후 다시 C점에 도달한 후 하중이 증가함에 따라서 (2)번 구간과 같이 거동하는 것으로 가정하였다.

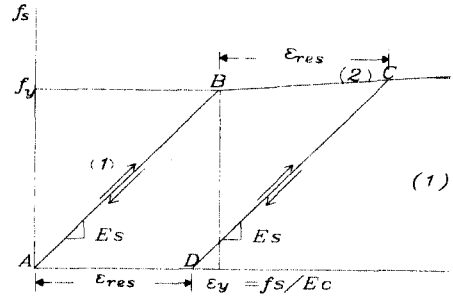


그림 3 철근 인장모델

2.4 무보강보의 해석

인장력과 압축력은 서로 평형을 이루며 평형 조건식과 삼각형 닳은비를 이용하여 구한 압축 콘크리트의 변형률과 인장철근의 변형률의 관계를 c 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$(\alpha f_{ck} b + k_3 f'_s b) c^2 + (E_s A_s \epsilon_{cf} - k_3 f'_s b) c - E_s A_s \epsilon_{cf} d = 0 \quad (7)$$

내부힘의 모멘트합이 외력모멘트 M_l 과 같아으므로 다음식이 성립한다.

$$\epsilon_{cf} = c \left[\frac{M_l - k_3 f'_s b (h-c)(h - (\gamma c + k_4 (h-c)))}{E_s A_s (d-c)(d - \gamma c)} \right] \quad (8)$$

위의 관계를 이용하여 반복법을 이용하여 풀면 다음식을 이용하여 처짐을 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{l}{3} \phi \left(\phi - \frac{\epsilon_{cf}}{c} \right) \quad (9)$$

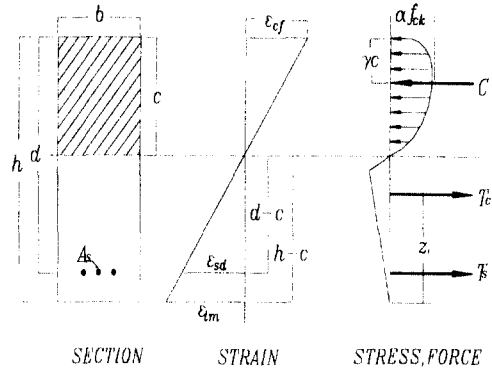


그림 3 무보강보의 단면과 변형률도

2.5 사용전 보강한 경우의 해석

단면의 평형조건을 고려하면 다음의 식이 성립한다.

$$\alpha f_{ck} b c^L - f_{sA} + k_3 f'_s b (h - c^L) + f_{rep} A_{rep} \quad (10)$$

적합조건을 이용하여 압축측 콘크리트의 변형률과 보강재의 변형률의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{rep} = \epsilon_{cf} \left(\frac{h}{c^L} - 1 \right) \quad (11)$$

또한, Fig. 7 에서 삼각형 닳은비를 이용하여 인장측 철근의 응력을 구한 후 식 (10)에 대입하여 정리하면 중립축 c^L 에 대한 다음과 같은 식을 유도할 수 있으며, 이 이차식을 풀어 양의 해를 취하면, 중립축 c 를 구할 수 있다.

$$(\alpha f_{ck} b + k_3 f'_s b) (c^L)^2 + (E_s A_s \epsilon_{cf} + E_{rep} A_{rep} \epsilon_{cf} - k_3 f'_s b h) c^L - (E_s A_s \epsilon_{cf} d + E_{rep} A_{rep} \epsilon_{cf} h) = 0 \quad (12)$$

또한, 대한 내부힘에 의한 모멘트합이 외력모멘트 M_l 과 같아야 하므로 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$\epsilon_{cf} c^L \left\{ \frac{M_l - k_3 f'_s b (h - c^L) [h - (\gamma c^L + k_4 (h - c^L))]}{E_s A_s (d - c^L) (d - \gamma c^L) + E_{rep} A_{rep} (h - \gamma c^L + \frac{1}{2} t_r)} \right\} \quad (13)$$

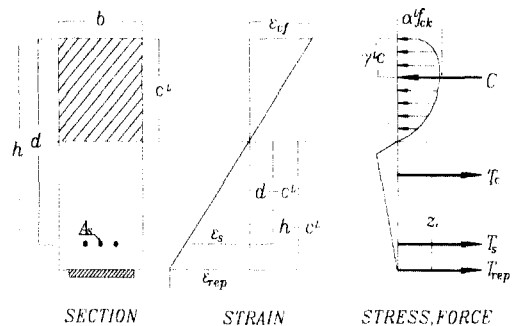


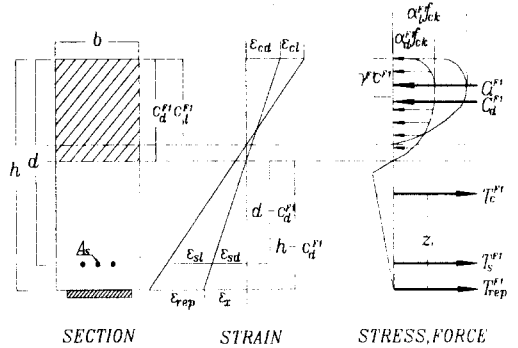
그림 4 사용전 보강보의 단면과 변형률도

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

2.6 사용중 보강한 경우의 보강설계식

2.6.1 보강된 보의 공칭모멘트

실구조물에서 보강을 할 경우에는 기존구조물에 사하중이 작용하는 상태에서 부착식 보강이 이루어 지므로 보강재 부착시에 원 부재는 사하중에 의한 응력이 작용하는 상태이며 보강재는 응력이 "0"인 상태이다. 따라서 보강재에 작용하는 응력은 활하중의 크기에 해당하는 만큼만 발생하게된다. 보강재를 부착할때 내부철근은 사하중에 의하여 발생된 ϵ_{sd} 만큼의 변형률이 작용하는 상태이므로, 보강재가 부착된 부재의 내하력을 계산할 때는 보강재의 변형률이 ϵ_x 만큼 감소된 상태인 점이 고려되어야 한다. 그러므로 변형률 삼각형의 닮음비를 이용하여 ϵ_x 를 기지수인 ϵ_{sd} 으로 표시한 뒤 전체 변형률과의 차이를 구하면 다음과 같은 ϵ_{rep} 을 구할 수 있다. 여기서 c_d^{F1} 은 사하중만을 받을 때의 중립축이며 c_i^{F1} 은 내부철근 항복시의 중립축이다.



$$\epsilon_{rep} = \frac{\epsilon_{st}(h - c_i^{F1})}{c_i^{F1}} - \frac{\epsilon_{sd}(h - c_d^{F1})}{(d - c_d^{F1})} \quad (14)$$

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

$$c_i^{F1} = \frac{f_y A_s + f_{rep} A_{rep} + k_3 f'_t b h}{a_1^{F1} f_{ck} b + k_3 f'_t b} \quad (15)$$

사용중 보강한 경우의 보강후 공칭휨강도는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$M_n^{F1} = M_n' + M_{rep} - T_1 z_1 + T_2 z_2 \quad (16)$$

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

$$M_n' = \epsilon_y E_s A_s (d - \gamma_i^{F1} c_i^{F1}) \quad (17)$$

$$M_{rep} = \epsilon_{rep} E_{rep} A_{rep} (h - \gamma_i^{F1} c_i^{F1}) \quad (18)$$

2.6.2 손상된 보의 보강설계식

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.

$$DF = 1 - 2.15(1 - RF) \frac{M_i}{M_u} \quad (19)$$

그러므로 손상된 보의 소요보강량 A_{rep} 를 계산하는 보강설계식을 유도할 수 있다.

$$A_{rep} = \frac{M_u - \Phi(\epsilon_y E_s A_s (d - \gamma_l^{F1} c_l^{F1}))}{\Phi \epsilon_{rep} E_{rep} (h - \gamma_l^{F1} c_l^{F1})} DF \quad (20)$$

2.6.3 내하력 증가를 위한 보강설계식

내하력을 증가시키기 위한 보강일 경우의 소요보강량은 A_{rep} 는 식(2)와 식(17), 식(18)을 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_{rep} = \frac{M_u - \Phi(\epsilon_{sy} E_s A_s (d - \gamma_l^{F1} c_l^{F1}))}{\Phi \epsilon_{rep} E_{rep} (h - \gamma_l^{F1} c_l^{F1})} \quad (21)$$

3. 해석 결과의 비교분석

그림 6은 무보강보에 대한 해석치와 실험 시편에서 측정된 하중변위 곡선을 동시에 제시하였다. 실험결과에서는 균열발생하중이 1.28t이며 해석결과는 1.35t으로 나타났다. 실험체의 극한하중은 3.41t이며 그때의 처짐은 4.03mm가 발생하였고 해석결과에서는 극한하중이 3.12t, 처짐이 3.88mm가 발생하는 것으로 나타났다.

그림 7은 강판을 사용한 사용 전 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 항복할 때의 하중과 처짐량은 실험치가 5.45t, 3.65mm이며 해석치가 5.37t, 3.51mm으로 나타났다. 내부의 철근이 항복하는 극한하중과 그때의 처짐량은 실험치가 6.85t, 4.95mm이며 해석치는 6.75t, 4.82mm으로 나타났다. Fig. 12에서도 알 수 있듯이 사용 중 보강부재에 대해서는 상당히 실재와 근사한 해석결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 강판을 사용한 사용중 보강부재에 대한 실험치와 해석치의 하중변위곡선을 나타낸 것이다. 해석에서는 무보강부재가 사하중 2t을 받고있는 상태에서 강판을 보강한 것으로 가정하였으며 그때의 처짐량은 2.05mm이다. 그후에 부재의 거동은 활하중에 대해 보강재와 내부의 철근이 동시에 작용하는 것으로 해석이 되었으며 사용전 보강부재와 보강재 부착후의 사용 후 보강부재의 강성이 일치함을 알 수 있다. 그러나 내부의 철근이 항복하는 극한

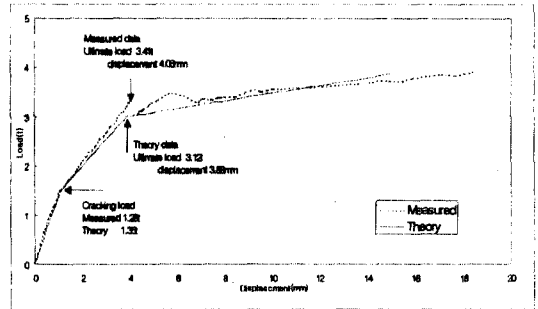


그림 6 무보강보의 해석치와 실험치

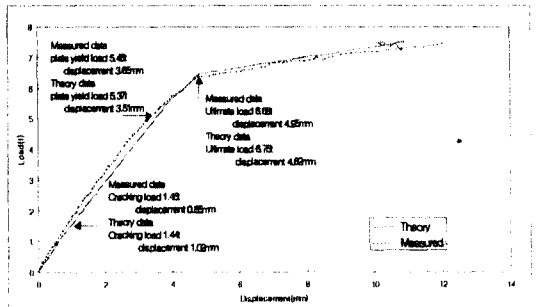


그림 7 사용전 보강보의 해석치와 실험치

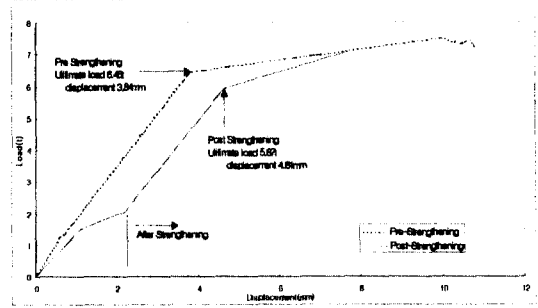


그림 8 사용중 보강보의 해석치와 실험치

강도에서는 사용전 보강부재가 6.45t이며 사용후 보강부재가 5.87t으로 나타나 약 9%의 극한하중의 감소가 일어남을 알 수 있다. 또한, 그때 발생하는 처짐량도 사용전 보강 부재는 3.84mm이며 사용후 보강부재는 4.61mm로 나타나 약 17%의 증가를 보였다. 만약 사용중 보강부재의 해석에서 사하중을 증가시켜 해석을 하였다면 처짐량의 증가는 더욱 커졌을 것으로 사료된다. 해석결과 극한하중일 때 사용중 보강부재에서는 철근의 항복이 발생한 것으로 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 사하중의 크기에 따라 철근의 초기 변형률이 변하기 때문에 생기는 것으로 사료된다.

4. 결론

1. 손상에 의해 저하된 콘크리트 구조물의 내력을 회복시킴을 목적으로 하는 손상된 보와 설계상 결함이 있거나 내하력을 증가시킬 필요가 있는 부재의 보강시 보강설계 개념과 방법을 정리한 결과 보강대상부재의 실정과 필요성에 따라 보강설계 방법이 달라져야 하는 것으로 나타났다.
2. 비선형 해석기법을 도입한 결과 무보강보나 사용전 보강보에서 만족스러운 결과를 얻어낼수 있었다. 특히, 균열발생 하중이나 강판 항복하중등은 오차가 5% 미만으로 나타났으며 극한강도 해석도 만족스러운 결과를 나타내었다. 그러나 처짐 해석시 실험치보다 작은 결과를 얻어냈는데 이는 전단에 의해 발생하는 처짐은 고려하지 않아서 생긴 것으로 사료 된다.
3. 해석결과 우선 동일한 보강량을 부착하였을 경우에는 각 단계별로 약 9%정도 공칭휨강도가 감소하는 것으로 나타났다. 또한 극한하중이나 파괴하중에 도달할 때 발생하는 처짐량은 약 20% 증 가하는 것으로 해석 되어 극한강도의 감소와 그때의 처짐 발생 증가가 나타났다. 사용전 보강하는 경우와 같은 공칭 휨강도를 유지하기 위해서는 보강 단계에 따라서 보강량을 5-10% 늘려야 하는 것으로 나타나 일정한 내하력을 유지하여야 하는 보강대상 부재에 대해서는 각 단계별로 보강량의 차이를 두는 것이 타당함을 나타내었으며, 보강량을 늘려도 극한하중이나 파괴하중에 도달하였을때의 처짐량은 사용전 보강부재보다 약 25%-30%정도 늘어나는 것으로 해석되어 사용중보강 3단계와 같이 심각한 손상을 입은 부재에 대해서는 처짐에 대해서 조치가 요구될것으로 해석 되었다.

참 고 문 헌

1. 송병표, 한만엽, 황의승, 홍영균, “보수 보강재료의 공법개발연구”, 한국 콘크리트 학회, 1997년도, 봄 학술 발표회 논문집, pp.592~597
2. 송병표, 한만엽 “보강재의 변형부착에 따른 보의 구조적 거동”, 한국 콘크리트 학회지, 1998년 6월, pp.197~208
3. Ansel C. Ugral.Saul K. Fenster, “Advanced Strength and Applied Elasticity”, pp.207~213
4. Eivind Hognestad, “A Study Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members” November, 1951, pp128
5. Scordelis, Alexander C., and Lin, C.S., “Nonlinear Analysis of RC Shells of General Form”, Proceeding, ASCE, V.101,DT3, Mar. 1975, pp.523-538
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, August, 1995, pp.255~261