

접착공법에 의해 전단보강된 RC보의 전단강도 예측

Shear Strength Prediction of RC Beams Strengthened by Externally Bonding Method

박 성 민* 변 근 주** 송 하 원***
Park, Sung Min Byun, Keun Joo Song, Ha Won

ABSTRACT

Steel plate or fiber composite plate are mainly used in externally bonding method. Shear strengthening by externally bonding method is to confirm shear safety and to avoid brittle failure. In case of strengthening by externally bonding method, a failure of structure occurs frequently due to delamination between strengthening plate and concrete. Therefore, it is important to consider the delamination in the strengthening design. The objective of this study is to propose a modified shear strength evaluation by considering the delamination. The delamination criteria of strengthening plate is established by the ultimate strain and shear stress. And shear strength of RC beams is proposed in terms of the delamination criteria. The proposed shear strength is compared with test results and verified through the comparison.

1. 서 론

최근 들어 유지관리의 측면에서 콘크리트구조물의 보강이 주목받아왔고, 보강사례도 급증하고 있다. 콘크리트 휨부재의 휨내력을 증가시키기 위해서 보강을 하는 경우에 휨보강에 사용된 보강재료가 가지고 있는 성능을 충분히 발휘하기 전에 전단에 의한 취성파괴가 일어나지 않도록 하여야 한다. 그러므로 부재를 보강하는 경우 전단에 대한 보강도 같이 하게 되는데 이때의 전단보강은 휨에 의한 파괴가 일어날 때까지 취성파괴인 전단파괴가 일어나지 않도록 함으로써 부재의 연성을 확보하는 의미가 있다.

접착공법에 의한 콘크리트구조물의 전단보강은 보강재를 에폭시 등을 이용하여 보의 복부에 접착시키는 방법이 많이 사용되고 있다. 이러한 보강을 실시할 때에는 에폭시 등에 의해 보강재를 부재에 접착시키는 방법이 많이 사용되고 있으며, 보강재를 대상 부재에 완전히 부착시키기 위해서 앵커 등의 특별한 조치를 하지 않는 경우에는 보강재가 그 성능을 발휘하기 전에 부재와 박리가 일어남으로써 파괴에 도달하는 경우가 많다. 이것은 휨보강이나 전단보강 모두에서 나타나고 있는 현상이고 이는 보강설계시에 기대되는 보강효과를 충분히 나타낼 수 없는 원인이 된다. 그러므로 보강설계시에 보강재의 박리를 반드시 고려해야 한다. 본 논문에서는 전단보강된 보에 관해서 기존에 제시되었던 이론적인 전단강도식을 수정하여 보강재의 박리에 의한 파괴까지 고려할 수 있는 전단강도 산정식을 제시한다.

* 정회원, (주) 용마엔지니어링, 사원

** 정회원, 연세대학교 토목공학과, 교수

*** 정회원, 연세대학교 토목공학과, 교수

2. RC보의 전단거동에 관한 이론

하중이 작용하는 부재에 발생하는 사압축응력을 트러스의 경사재가 저항하는 것으로 보고, 스티럽이 부담하는 수직방향으로 발생하는 응력에는 수직방향의 트러스부재로 보아서 해석한 것이 트러스이론이다. 또, 대칭적으로 보강된 철근콘크리트보에 대해서 주어진 전단력이 작용할 때 생기는 미지수는 주철근에 작용하는 응력, 스티럽에 발생하는 응력, 콘크리트에서의 사압축응력, 사압축응력이 작용하는 기울어진 각이 있으며, 이것은 평형방정식, 적합방정식, 구성방정식을 이용해서 구하게 된다. 이러한 접근방법은 압축장이론(CFT)으로 알려져 있다. 이 경우, CFT는 균열이 발생한 콘크리트가 인장응력을 부담하는 것을 무시하기 때문에 전단강도에 대해서 안전측의 값을 나타내고 있다. 수정압축장이론(MCFT)은 균열이 발생한 콘크리트에서 균열 사이의 인장응력의 전달을 고려한 것이다. MCFT에서의 평형조건은 사압축응력과 사인장응력이 전단력에 함께 저항한다.

3. 접착공법에 의해 전단보강된 RC보의 전단강도 평가

전단보강된 보에 대한 해석에 대해서 Gendron등(1999)이 제안한 이론적인 방법에 기초하여 보강재의 박리에 의한 파괴와 보강재의 방향성을 고려할 수 있도록 수정된 새로운 전단강도 산정방법을 제안하고 이를 이용한 해석을 통해서 전단보강된 보의 극한하중을 계산한다.

3.1 접착공법에 전단보강된 RC보의 거동해석

첫 번째 단계는 보강되기 전 상태의 전단강도를 평가하는 것으로 CFT 혹은 MCFT가 주로 사용된다. 본 논문에서는 MCFT를 이용하여 계산하였다.

3.2 접착공법에 의해 전단보강된 RC보의 전단강도산정법

기존에 제시되었던 전단보강된 보의 전단강도산정법은 보강재의 박리를 고려하지 않았기 때문에 박리에 의해 파괴가 일어날 경우에 대해서는 적용할 수가 없다. 그러나 실제의 실험결과를 보면 박리에 의한 전단파괴가 보의 파괴를 지배하는 경우가 많이 발생하고 있다. Gendron등(1999)의 산정법에서는 보강재에는 오직 보강재 축방향의 응력만이 작용하며 보강재와 콘크리트와의 완전한 부착을 가정하고 있기 때문에 실제의 상황과는 다르므로 보강재의 박리기준으로서 한계변형률과 한계응력을 산정하고 계산과정에서 부착면에 발생하는 변형률과 응력이 한계값에 도달하면 파괴가 일어나는 것으로 설정하였다. 한계변형률의 경우, 出雲등(1998)이 실험을 통해서 제안한 보강재의 부착강도를 산정하는 식을 적용하였다. 즉, 탄소섬유와 아라미드섬유슈트를 대상으로 콘크리트시편에 부착하고 일축인장시험을 해서 접착된 슈트가 박리되도록 하는 실험을 통하여 슈트에 발생하는 변형률과 박리시의 응력의 관계를 회귀분석을 함으로써 실험식을 제안하고 있다. 실험결과를 보면 부착길이가 충분히 확보된 경우에는 보강재의 종류보다도 콘크리트의 압축강도에 더 영향을 받으며, 부착길이가 100mm 이하인 경우에는 부착길이에 더욱 영향을 받는다. 한계응력은 부착면에 작용하는 전단응력을 산정하는 식으로 유병석(1998)이 제시한 이론식을 적용하였다. 보강재와 콘크리트면 사이의 에폭시에 작용하는 전단응력을 계산하여 이 응력값이 에폭시가 가지고 있는 전단응력의 범위를 넘어갈 때 박리가 일어나는 것으로 보고 있다.

전단보강된 보의 전단강도 산정을 위해서는 보강이 이루어지기 전에 부재에 작용하는 전단력으로 부터 얻어지는 값들을 이용하고 계산에 필요한 값들은 가정해야한다. 이 가정한 값들은 반복계산을 통해서 정확한 값을 찾게 된다. 다음 그림 1에 외부보강된 RC보의 개략도를 나타내었고, 그림 2에는 두 번째 단계인 보강된 RC보의 전단강도 산정의 흐름도를 나타내었다.

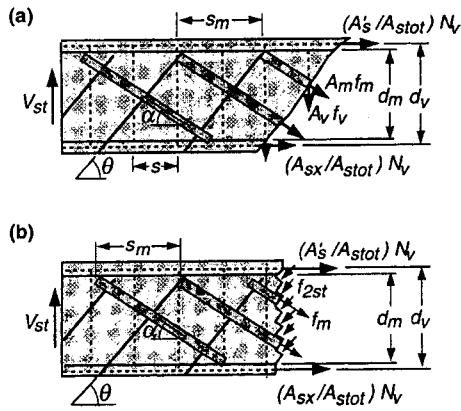


그림 1 외부보강된 RC보

단계 1 : 보강재 축방향의 변형률 ϵ_a 를 계산한다. 이 값에서 보강되기 전의 보강재 축방향으로의 변형률과의 차이를 계산함으로써 보강재의 변형률 ϵ_m 과 f_m 을 계산할 수 있다. 여기서 계산된 f_m 이 f_{um} 보다 크면 보강판이 부담할 수 있는 최대응력을 넘어서는 것이므로 단계 8로 이동한다. 또, ϵ_m 이 박리가 일어날 때의 변형률보다 크거나 보강재와의 접착면에 작용하는 전단응력을 계산하고 그 값이 극한전단응력값보다 크다면 박리가 일어나는 것으로 보고 단계8로 이동한다.

단계 2 : 스티럽에 작용하는 전단응력 f_v 를 가정하고, 전단력 V_{st} 를 계산한다.

$$V_{st} = \frac{A_v f_v d_v}{s \tan \theta_{st}} + \frac{A_m f_m d_m}{s_m} \left(\frac{1}{\tan \theta_{st}} + \frac{1}{\tan \alpha} \right) \sin \alpha \quad (1)$$

단계 3 : 사압축응력 f_2 와 f_{2max} 를 계산한다. 여기서 계산된 f_2 의 값이 f_{2max} 의 값보다 크면 복부의 콘크리트가 사압축응력에 의해 파괴가 일어나는 것이므로 단계 8로 이동한다.

$$f_2 = f_{2max} \left[2 \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_c'} \right) - \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_c'} \right)^2 \right], \quad f_{2max} = \frac{f_c'}{0.8 + 170 \epsilon_1} \leq f_c' \quad (2)$$

단계 4 : f_2 를 f_{2st} 와 같다고 놓고 ϵ_2 를 계산한다. 그리고, 모어의 원으로부터 부재 축방향의 변형률 ϵ_x 를 계산한다. 이 단계에서 계산된 ϵ_x 의 값이 계산 시작단계에서 가정된 값과 다르다면 새로 가정 후 단계 1로 이동한다

단계 5 : 모어의 원으로부터 부재축방향에 수직인 방향으로의 콘크리트의 변형률 ϵ_t 를 계산한다. 그리고 이 값으로부터 f_v 를 계산한다. 만약 계산된 f_v 가 단계 2에서 가정한 f_v 와 다르다면 다시 f_v 를 가정한 후 단계 2로 이동한다.

단계 6 : $f_{sx} (= E_s \epsilon_x)$ 를 계산하고 축력(N)을 계산한다.

$$N = A_{sx} f_{sx} - \frac{V_{st}}{\tan \theta_{st}} + \frac{A_m f_m d_m}{s_m} \left(\frac{1}{\tan \theta_{st}} + \frac{1}{\tan \alpha} \right) \quad (3)$$

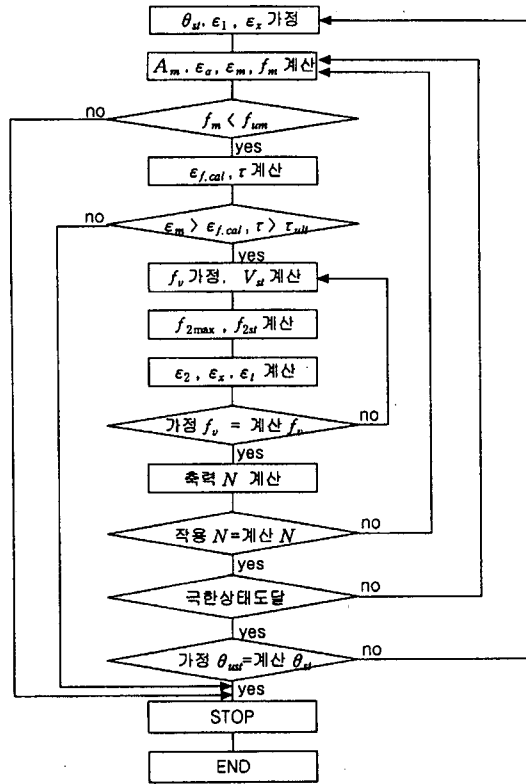


그림 2 전단강도 산정의 흐름도

식(3)은 보에 작용하는 힘의 축방향 성분을 고려한 것으로 보강재가 복부 전체에 부착되어 있는 경우에는 보강재에 의한 영향도 고려해야 한다. 보강재로 강판이 사용되는 경우는 강판이 방향성이 없는 재료이기 때문에 모든방향에 대해서 동일한 물성값을 부여할 수 있다. 그러나 섬유쉴트가 사용되는 경우에는 섬유쉴트의 방향성을 고려해서 그에 맞는 물성값을 사용해야 한다. 즉, 보강재에 작용하는 수평방향의 성분이 식(3)에 고려되어야 한다. 만약 계산된 N 값이 작용하는 축력과 같지 않으면 θ_{st} 를 새로 가정한 후 단계 1로 이동한다.

단계 7 : 한계상태에 도달하였는지 검토한다. 만약 도달하지 않았다면 ϵ_1 을 증가시켜서 가정한 후 단계 1으로 이동한다. 여기서 한계상태는 보강재의 파단, 사압축응력에 의한 콘크리트의 압축파괴, 보강재의 박리이다.

단계 8 : 계산시작단계에서 가졌던 θ_{ust} 가 단계 6에서의 θ_{st} 와 비슷하다면 계산된 V_{ust} 가 그 부재에 작용하는 전단력이다. 만약 비슷하지 않다면 새로운 θ_{ust} 를 가정한 후 단계 1로 이동한다.

3.3 전단과 휨의 상호작용

세 번째 단계에서는 전단력과 휨모멘트의 상호작용에 관해서 평가한다. 이 단계에서는 변형후의 단면이 평면이라는 가정하에 다음 두가지 극한상태가 고려된다. 하나는 축방향 철근의 항복이며, 다른 한가지는 압축응력을 받는 콘크리트의 파괴이다. 단면에 축력 N 과 휨모멘트 M 이 작용하면 다음의 식을 만족해야 한다.

$$N = N_p + N_v \quad , \quad M = M_p + N_v y_v \quad (4)$$

여기서, N_p 와 M_p 는 외력에 저항하는 축방향의 철근과 콘크리트에 발생하는 응력에 의해 발생하는 것이다. 세 번째 단계에서는 곡률을 가정하게 된다. 반복계산을 통해서 정확한 곡률을 알게 되고 이로부터 극한하중시의 보의 처짐을 알 수 있으며 이것으로부터 보강된 보의 전단강도 및 처짐에 대한 검토가 가능해진다.

4. 접착공법에 의해 전단보강된 RC보의 전단강도산정 및 검증

4.1 전단강도 산정식

기존의 연구에서 수행된 실험결과를 참고하여 여기서 제안한 수정된 전단강도 산정방법을 이용해서 전단보강된 RC보의 전단강도를 산정·비교한다. 기존의 전단강도 산정식을 이용한 계산값과의 비교를 통해서 새롭게 제안된 전단강도 산정방법의 타당성을 검증한다. 검증에 사용하는 전단강도 산정식은 일본토목학회에서 제안한 식(1999)과 Al-Sulaimani등(1994)이 제안한 식을 사용한다. 우선, 섬유쉴트를 사용하는 보강에 대해서 Al-Sulaimani등(1994)은 보강방법에 따라 보강재와 콘크리트면 사이에 발생하는 전단응력을 이용해서 전단강도를 예측하는 식을 제안하였다. 즉, shear strip과 shear wing의 형태에 따라 다음 식(5)에 의해 전단강도를 산정하였다.

$$V_f = \frac{2F_f d}{s_f} = \frac{2\left[\tau_{ave}\left(\frac{t_s h_s}{2}\right)\right]}{s_f}, \quad V_f = 2F_f = 2\left[\tau_{ave}\left(\frac{d h_w}{2}\right)\right] \quad (5)$$

여기서, t_s :각각의 strip의 폭, h_s :각각의 strip의 높이, d :유효높이, s_f :strip의 간격, τ_{ave} :보강섬유와 콘크리트 사이에 작용하는 평균전단응력, h_w :shear wing의 높이를 나타낸다. 또, 전단응력의 분포를 평균적으로 나타낸 값이 τ_{avg} 이며, Al-Sulaimani등(1994)의 논문에서는 1.2MPa의 값을 사용하고 있다. 한편, 일본토목학회는 콘크리트구조물의 보강지침(안)(1999)에서 보강재료의 종류에 따라 전단강도의 산정식을 제안하고 있으며, 이 식들은 트러스모델을 기초한 형태를 띠고 있고, 보강계수와 부재계수를 사용하여 전단강도를 산정하고 있다.

$$V_{CFd} = K \cdot \frac{A_{CF} \cdot f_{CFud} \cdot (\sin \alpha_{CF} + \cos \alpha_{CF})}{S_{CF}} \cdot \frac{z}{\gamma_{bcf}} \quad (6)$$

여기서, V_{CFd} 는 탄소섬유쉬트가 부담하는 전단력이며, 다른 재료에 대해서는 이와 유사한 형태의 식을 사용하며, 식에 사용되는 K 와 γ 는 보강재의 종류에 따라 달라지는 계수이다.

4.2 수정된 전단강도 산정법에 의한 평가

出雲등(2000)은 전단보강철근을 배근하고, 연속섬유쉬트를 보의 복부에 부착하여 전단보강효과를 검증하기 위해 실험을 하였다(그림 3). 보강재는 보의 양측에 대칭으로 접착되었으며 중앙 1점재하시험을 하였다. 전단보강에 사용된 섬유쉬트는 탄소섬유와 아라미드섬유가 사용되었다. 다음 표 1은 실험값과 기존의 전단강도식, 수정된 전단강도 산정법에 의한 계산값의 비교를 나타낸 것이다.

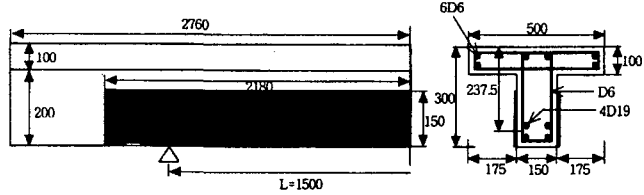


그림 3 시험체의 개략도 (단위:mm)

표 1 섬유쉬트의 종류에 따른 전단강도 실험결과와 계산값의 비교 (단위 : kN)

공시체번호	실험값 (出雲등, 2000)	전단강도식 (日本土木学会)	전단강도식 (Al-Sulaimani)	수정된 전단강도 산정법	Gendron(1999) 전단강도 산정법
96-C-0	129.2	151.7	91.1	123.24	240.0
96-A-0	128.4	102.7	94.4	108.84	175.2

坂本등(1998)은 연속섬유쉬트의 접착공법에 의해 전단보강된 보의 보강효과를 검토하기 위해서 섬유 종류, 보강방법을 변화시키면서 보의 전단강도를 측정하는 실험을 하였다(그림 4). 공시체번호 5번은 1방향 탄소섬유쉬트를 접착한 것이고, 6번은 2방향 탄소섬유쉬트를 접착한 것이다. 다음 표 2에 실험값과 계산값의 비교를 나타내었다.

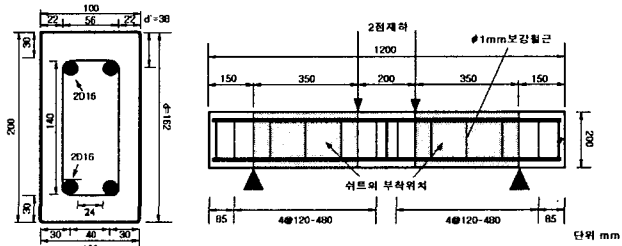


그림 4 공시체의 제원

표 2 섬유쉬트의 방향성에 따른 전단강도 실험결과와 계산값의 비교 (단위 : kN)

공시체번호	실험값 (坂本등, 1998)	전단강도식 (日本土木学会)	전단강도식 (Al-Sulaimani)	수정된 전단강도 산정법	Gendron(1999) 전단강도 산정법
5	111.4	75.8	42.0	99.53	178.71
6	117.7	75.8	42.0	101.94	178.71

Al-Sulaimani 등(1994)은 유리섬유쉬트를 사용하여 전단보강된 보의 거동을 실험을 통해서 분석하였으며(그림 5), 여기서 사용하는 실험자료는 보의 측면에 strip의 형태로 보강된 것과 shear wing의 형태로 보강된 것을 사용하였다(그림 6). 다음 표 3에 실험값과 계산값과의 비교를 나타내었다.

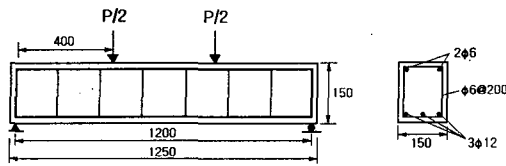


그림 5 공시체의 제원 (단위:mm)

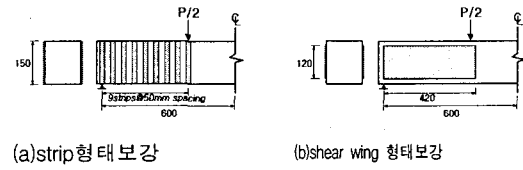


그림 6 대상이 되는 공시체

표 3 스트립과 복부전체보강에 대한 전단강도 실험값과 계산값의 비교 (단위 : kN)

공시체번호	실험값	전단강도식 (日本土木学会)	전단강도식 (Al-Sulaimani)	수정된 전단강도 산정법	Gendron(1999) 전단강도 산정법
strip	41.2	38.1	39.8	37.4	86.50
shear wing	45.2	48.5	42.5	46.3	92.13

각 실험결과와 계산값의 비교에서 알 수 있는 것처럼, 본 논문에서 제안한 방법으로 보강재와 보강방법에 따른 변화에 대해서 기존의 식에 비해 비교적 정확한 값을 계산할 수 있다. Gendron등(1999)의 방법을 적용하게 되면 보강재의 파단이나 콘크리트의 압축파괴가 일어날 때까지 계산이 계속 되기 때문에 실험값보다 큰 값을 나타내고 있다. 또, 보강재의 방향성이 고려되어 있지 않기 때문에 보강재의 방향성에 상관없이 같은 계산결과를 보이고 있다. 보강재의 박리에 의한 보의 파괴는 보강재의 파단이나 콘크리트의 압축부의 파괴가 일어나는 하중보다 적은 하중에서 일어나게 된다. 이러한 박리를 고려하기 위해서 박리기준을 설정하고 계산과정에서 박리기준에 도달하였을 때 보의 파괴가 일어나는 것으로 설정함으로써 접촉공법에 의해 전단보강된 보의 전단강도를 예측할 수 있음을 보였다.

5. 결 론

본 논문에서는 접촉공법에 의해 전단보강된 보의 전단강도를 산정하기 위하여 콘크리트와 보강재의 박리기준을 한계변형률과 한계전단응력으로 설정하고 이를 적용시킨 수정 전단강도 산정법을 제안하였다. 수정된 전단강도 산정법의 타당성을 검증하기 위하여, 기존의 실험자료에 제시된 실험값과 수정된 전단강도 산정법을 이용한 계산값, 그리고 기존의 전단강도 산정식에 의한 값들과의 비교분석을 통하여 본 연구의 수정방법이 기존의 전단강도 식들에 비해 비교적 정확하게 보의 전단강도를 예측할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

1. Al-Sulaimani, G.J., Sharif, A., Basunbul, A., Baluch, M. H., and Ghaleb, B. N. (1994), "Shear Repair of Reinforced Concrete by Fiberglass Plate Bonding", ACI Structural Journal, Vol. 91, No.3, July-August 1994, pp.458-464
2. Collins, M.P. and Mitchell, D. (1991), Prestressed Concrete Structures, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, pp.343-374
3. Gendron, G., Picard, A., and Guérin, M.C. (1999), "A Theoretical Study on Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Composite Plates", Composite Structures, Vol.45, pp.303-309.
4. 유병석(1998), 섬유쉬트의 전단보강내력산정을 위한 이론식 제안, 석사학위논문, 연세대학교
5. 坂本佳理, 田村悟士, 末岡英二, 真嶋光保(1998), "連続繊維シート接着によるRC部材のせん断補強効果に関する研究", 콘크리트工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, 1998, pp.1279-1284
6. 出雲健司, 浅水俊博, 佐伯 昇, 志村和紀 (1998), "アラミドおよび炭素繊維シートの付着特性", 콘크리트工学年次論文報告集, Vol.9, No.2, 1998.7, pp.1-7
7. 日本土木学会(1999), 콘크리트구조물의補強指針(案), pp.6-36, pp.121
8. 出雲健司, 佐伯 昇, 大沼博志(2000), "連続繊維シートで補強したRCおよびPRC部材のせん断耐力評価", 日本土木学会論文集, No.655, Vol.48, 2000.8, pp.23-33