
보강재의 변형 부착에 따른 보의 구조적 거동

A Study for Structural Behavior of R/C beams Strengthened
with New Bonding Methods



한만엽*

Han, Man-Yop



송병표**

Song, Byeong-Pyo

ABSTRACT

Recently, many strengthening methods are developed and used to rehabilitate existing structures. However, both theoretical background and applying techniques are not established yet. One of the most popular methods is plate bonding method using either steel plate or carbon plate.

For plate bonding method, bonding strength at the end of the plate is one of the most important properties for strengthening effect. To improve the bonding strength at the end of the steel plate, the end of the plate was strengthened with additional plate. For the carbon sheet, the way to reduce the amount of carbon sheet was tested. To study the effects of end anchoring of steel plate and economic design of carbon plate strengthening, twelve reinforced concrete beams were cast and tested. A method to reduce the stress distribution at the end of bonded plate is suggested and tested. The results showed that the proposed end anchoring method is effective and the amount of carbon sheet can be reduced.

* 정회원, 아주대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 아주대학교 토목공학과 석사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 10월 30일까지 학회로 보내주
시면 1998년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

현재 국내에서는 급속한 근대화 과정 중에서 시공 시부터 부실하게 건설된 콘크리트 구조물이 사용기간이 길어짐에 따라 구조물의 노후화가 심각하게 진행되고 있는 실정으로서 특히 교량의 경우에는 교통량과 교통하중의 증가 등으로 인한 손상이 가속화되어, 심각한 균열이나 처짐이 발생하는 등, 교량의 안전성에 심각한 문제가 발생되고 있다. 이에 따라 최근에는 구조물에 손상을 주지 않고도 시공이 가능한 강판이나 탄소섬유등을 이용한 부착식 보강공법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 이에 따라 이들 보강공법의 현장 적용 사례도 대폭적으로 증가하고 있다.

기존의 연구에 의하면 이러한 보강재를 부착하게 되면 활하중에 의한 처짐이나 휨균열의 폭이 줄어드는 등 상당한 개선 효과를 기대할 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 이러한 부착식 보강공법을 내하력이 부족한 실 구조물에 적용하게 되면 실 구조물의 안전성과 사용성을 개선할 수 있는 편리하고 효과적인 공법으로 인식되어 널리 사용되고 있다.

그러나 기존 연구 결과에 의하면 부착식 보강공법의 경우 보강된 시편의 최후 파괴 양상을 보면 강판 보강의 경우는 보강재 단부에서 시작된 수평균열이 급작히 중앙부로 진전되어 최종적인 파괴에 도달하고, 탄소섬유 등의 섬유류를 이용한 보강공법은 중앙부에서 발생한 수평균열이 보강재의 단부로 이동하여 최종적으로 보강재가 분리되는 파괴가 발생하거나, 중앙부에서 보강재가 파단되는 가장 대표적인 최종파괴 형태가 발생하는 것이다.

강판보강의 경우 급작스런 파괴를 일으키는 주된 원인은 단부에서 발생한 균열의 전진에 따른 것이므로 본 연구에서는 이러한 단부에서의 균열 발생을 억제하거나 완화할 수 있는 방법을 제시하였고, 탄소섬유 보강의 경우는 단부에서 발생한 균열에 의하여 파괴에 이르는 경우가 거의 없으므로 여러점으로 보강하는 경우 설계 보강량을 필요 보강량에 따라 보강길이를 조절함으로써 재료비가 매우 비싼 탄소섬유를 절감할 수 있는 방법을 평가하고자 하였다.

보강공법은 보강재의 부착 방법, 두께, 길이 등의 영향을 받으므로, 본 실험에서는 탄소섬유로 보강된

시험체의 경우는 부착된 탄소섬유의 길이를 변수로 하여 유형별로 5개의 시험체를 제작하였고, 강판보강의 경우에는 단부에서의 응력집중을 완화시키고자 단부의 부착면적을 증가시키는 단부확대판을 사용하는 방법과 보강재의 단부에 단부보강재를 추후에 부착하여 강성을 증가시키는 방법을 검증하기 위한 6개의 시험체를 제작하여 기존의 보강방법과 비교 분석하였다.

본 연구에서는 보강된 보의 거동특성, 보강성능, 파괴형상과 하중-변위관계, 균열하중, 극한하중, 균열분포 등을 측정, 비교, 분석하였으며, 재하하중의 증가에 따른 인장철근의 변형율과 보강재에서의 길이방향에 따른 인장변형율의 분포를 측정하였으며, 보의 깊이에 따른 콘크리트 변형율의 분포도 측정하였다. 이러한 측정결과를 이론적으로 계산된 보강된 보의 균열하중이나 극한하중과 비교, 분석하였으며, 보강재의 경우 부착된 게이지로부터 변형율을 측정하여 부착면의 전단응력을 분석하였다.

2. 실험계획

2.1 시험체 제작

본 실험에서 사용된 보강재의 물성 및 시험체 제원은 Fig. 1과 Table 1에 제시되어 있다. 콘크리트의 타설은 재료가 밀실하게 채워지도록 다짐봉을 사용하여 충분히 다졌으며, 시험체의 끝부분에 시험체 운반고리를 만들고 표면은 계획된 높이에서 표면 처리하였다. 철근 콘크리트 기준시험체의 단면치수 및 배근현황은 Fig. 1과 같이 단면 15×25cm, 유효깊이 22cm, 순지간 길이 200cm, 총길이 240cm이며, 철근은 이형철근으로서 인장철근 2-D13($A_s=2.54\text{ cm}^2$), 압축철근 2-D10($A_s'=1.43\text{ cm}^2$)을 사용하였으며, 에폭시의 배합비는 주체와 경화제가 무게비로 2:1인 외국의 T사 제품을 이용하였다. 하중은 중앙에서의 일점 재하이며 본 실험의 보는 전단지간이 4.5이나 충분한 전단보강으로 휨 지배를 받는 보로 설계되었다.

시험체는 전단파괴를 방지하기 위하여 D10의 스티럽을 10cm간격으로 배근하였으며, 시험체 제작은 두께 12mm의 양면코팅 처리된 합판을 이용하였고 탈형이 용이하도록 거푸집 내부는 박리제를 도포하

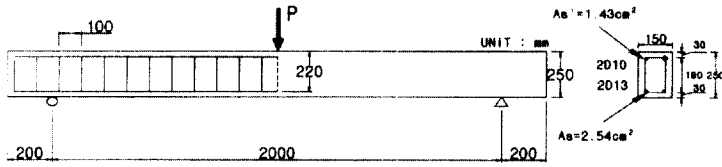


Fig. 1 Specimen detail

Table 1 Physical Properties of materials

구분	강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (kg/cm ²)	탄성 계수비	치 수	비 고	
시 험 체	콘크리트	280	251,000	-	b = 15cm h = 25cm d = 22cm l = 200cm	
	철근	3,500	2.04 × 10 ⁴	8	φ = 10mm φ = 13mm	
보 강 재	강판	2,500	2.0 × 10 ⁴	8	b = 13cm d = 0.3cm	2종(SS 41)
	탄소 섬유 슈트	35,400	2.36 × 10 ⁴	9	b = 13cm d = 0.0167cm	과단신율 = 1.5%
에폭시	840~910	3.56 × 10 ⁴	-	b = 10cm d = 0.3cm	EPX-3	

여 25 ± 2°C의 항온항습실에서 양생하였다.

양생시에는 시험체에 젖은 모포를 덮었으며, 하루에 한번씩 물을 뿌려 젖은 상태를 유지함으로써 수분을 지속적으로 공급하였다.

2.2 실험 변수

시험은 1개의 무보강 시험체를 기준으로하여 Fig. 2에서와 같이 탄소섬유슈트로 보강된 5개의 시험체와 강판으로 휨 보강된 6개의 시험체, 총 12개의 시험체를 제작하였으며 단부 변형에 따른 시험체의 자세한 제원은 Table 2와 같다.

탄소섬유 보강의 경우, 기존의 보강 방법(A1C1)인 보의 길이방향에 대해 지간의 0.9L

Table 2 Summary of test beams

보강 종류	시험체명	보강 구분	보강재 제원		시험체 수
			두께 (mm)	폭 (cm)	
무보강	A1N0				1
탄소 섬유 슈트	A1C1	기존 방법	0.167	13	1
	A1C2	단부 변형1			2
	A1C3	단부 변형2			2
강 판	A1S1	기존 방법	3	13	2
	A1S2	단부 보강1			2
	A1S3	단부 보강2			2
총 시험체 개수					12

인 180cm의 탄소섬유를 폭 13cm로, 2겹을 부착하여 1개의 시험체를 제작하였고, 단부 변형1과 2에서는 보강길이를 단계적으로 감소시켜, 단부에서의 보강단면량이 적어지도록 하여, 단부 변형1(A1C2)에서는 180cm(1겹)

의 슈트를 부착한 후 140cm(1겹)의 슈트를 추가로 부착하였으며, 단부 변형2(A1C3)에서는 180cm(1겹)의 슈트를 부착한 후, 120cm(1겹)를 부착하여 각각 2개의 시험체를 제작하였다. 부착은 우선 시험체의 하면을 그라인더로 표면처리 후 접착성능의 증가를 위해 프라이머를 도포하였으며, 탄소섬유의 부착은 에폭시 수지로 표면에 접착시킨 후 추가로 에폭시 수지가 도포되어 에폭시가 탄소섬유 내부까지 함침되도록 하였다.

강판보강 시험체는 우선 기존의 보강 방법(A1S1)에서는 두께 3mm로 된 에폭시층 위에 두께 3mm, 폭 13cm의 강판을 지간길이의 0.9L인 180cm길이를, 부착(주입공법)하였고, 단부보강1(A1S2)에서는 13×30cm 강판의 모서리를 라운딩 처리한 후 에폭시 압착법으로 부착한 다음, 180cm의 강판을 주입법

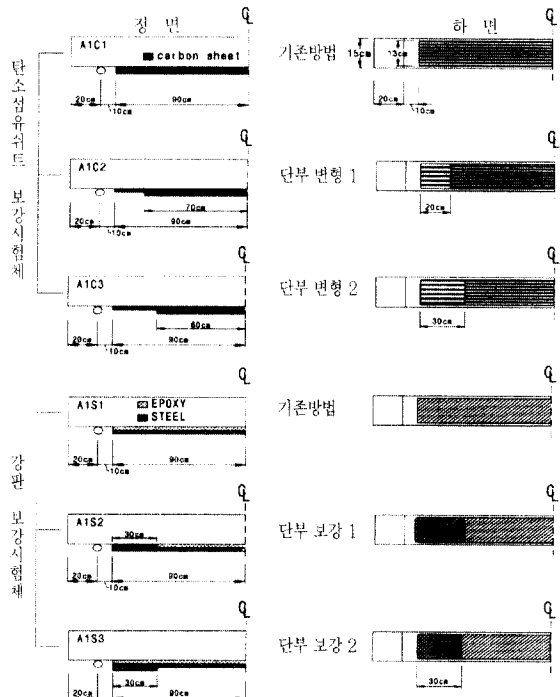


Fig. 2 Detail of strengthened beams

으로 부착하여 단부에서의 부착면적을 확대시켰다. 단부보강2(A1S3)에서는 길이 180cm의 강관을 주입법으로 부착한 다음, 13×30cm의 강관의 모서리를 라운딩 처리 후 양쪽 단부에 부착하여 보강재 단부의 강성을 증가시키는 공법을 시행하였다. Fig. 2에서는 본 실험에서의 시험체별 보강재 부착 형상을 도시한 것이다.

2.3 재하 및 측정방법

보강재의 부착 이전에 시험체에 대한 선행 하중재하는 없었으며, 하중의 재하는 항복하중에 도달할 때까지는 배 100kg마다, 그 이후에는 처짐이 2mm초과시 마다 데이터를 측정하였으며, 보강재의 분리나 파단으로 인한 시험체의 파괴시까지 재하하였다. 하중재하시에는 하중값을 도출하기 위해 20t용량의 로드셀을 사용하였고 재하시 균열발전 상황을 관측하였으며, 가압은 30t의 유압잭을 사용하였다.

시험체의 중앙하단에는 하중재하시의 처짐을 측정하기 위하여 변위측정계를 설치하였고, 보강재 하부에는 보강재부착 유형별로 7개의 게이지를, 콘크리트 면에는 총 8개의 게이지를 부착하였다. Fig. 3에 각 시험체별로 게이지 부착위치를 도시하였다.

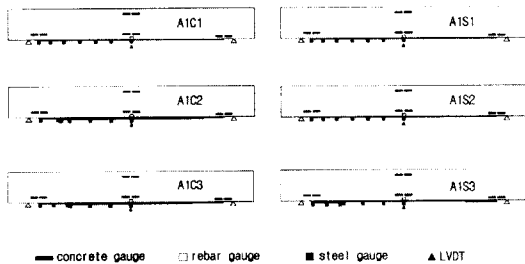


Fig. 3 Measurement schemes

3. 하중의 계산 및 탄소섬유의 정착 길이 산정

3.1 균열하중 및 항복하중

시험체에 대한 균열하중과 항복하중의 산출시 실험재료의 물성과 특성은 설계기준 수치를 적용하였으며, 보강시험체의 거동은 콘크리트와 에폭시, 보강재 계면이 완전히 부착되어 합성 거동을 한다는 가정하에 철근 콘크리트 보의 휨 이론에 의해 해석하였다. 단, 균열이 발생한 후에는 보강재와 인장철근이

하중을 부담하는 것으로 가정하였다. Fig. 4에는 보강재에 의한 하중변형도와 하중의 계산시 사용된 기호에 대해 도시하였다.

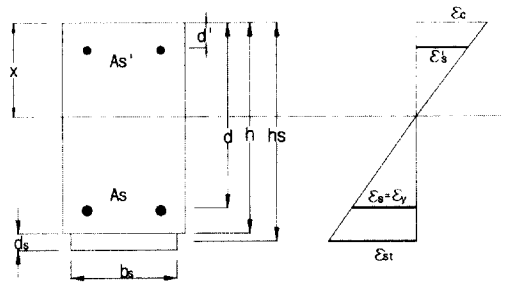


Fig. 4 Strain and neutral axis diagrams across depth of rectangular section

균열하중의 경우에는 인장측 콘크리트에 균열이 발생하기 전이므로 전단면이 유효하다는 가정하에 중립축을 구하면 다음과 같다.

$$x = \frac{bh \times \frac{h}{2} + (n-1)A_s' d' + (n-1)A_s d + n_s b_s d_s (h + \frac{d_s}{2})}{bh + (n-1)A_s' + (n-1)A_s + n_s b_s d_s} \quad (1)$$

따라서 보강된 단면의 단면2차 모멘트는 다음과 같다.

$$I_g = \frac{bh^3}{12} + bh(\frac{h}{2} - x)^2 + (n-1)A_s'(x - d')^2 + (n-1)A_s(d - x)^2 + n_s b_s d_s (x - h + \frac{d_s}{2})^2 \quad (2)$$

여기서 $n_s = \frac{E_s}{E_c}$ 로서 보강재의 탄성계수비이다.

따라서 균열 모멘트는 다음과 같다.

$$M_{cr} = \frac{I_g f_r}{y_i} \quad (3)$$

여기서, f_r 은 콘크리트 휨 인장강도로서 콘크리트 표준시방서에 규정되어 있는 값을 적용하였으며, y_i 는 중립축에서 보강재까지의 거리이다.

결국, 균열하중 P_{cr} 은 다음과 같이 계산되어진다.

$$P_{cr} = \frac{4I_g f_r}{L y_i} \quad (4)$$

항복하중은 시험체의 인장철근이 항복응력에 도달하였을 때 강도 설계법에 근거한 공칭모멘트에 의해 산출하였다. 콘크리트와 철근 및 보강재는 완전일체

거동을 하고 각각의 재료에 발생하는 변형도는 모두 중립축으로부터 떨어진 거리에 비례한다고 가정하였다. 또한, 초과하중을 고려한 하중계수와 강도의 결함을 고려한 강도감소계수는 고려하지 않았다. 이 경우 항복하중은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$M_y = \sigma_s(A_s - A'_s)(d - \frac{a}{2}) + \sigma_s A'_s(d - d') + \sigma_w A_w(h - \frac{a}{2}) \quad (5)$$

여기서 σ_s 는 철근의 항복강도이며, σ_w 와 A_w 는 보 강재의 항복강도와 단면적이다.

따라서, 항복하중은 다음과 같이 된다.

$$P_y = \frac{4 \times M_y}{L} \quad (6)$$

3.2 탄소섬유의 정착길이

Fig. 5는 탄소섬유 부착시의 정착길이를 구하기 위하여 탄소섬유 부착시 외부하중으로 인한 모멘트도를 A1C2시험체와 A1C3시험체로 구분하여 도시하였다. 3.1절에서의 방법으로 계산한 결과, 무보강 시험체의 항복모멘트는 1.78t m, 탄소섬유를 부착한 경우는 한겹을 부착한 경우 2.08t m로, 두겹을 부착한 경우는 2.36t m로 각각 내하력이 계산되었다.

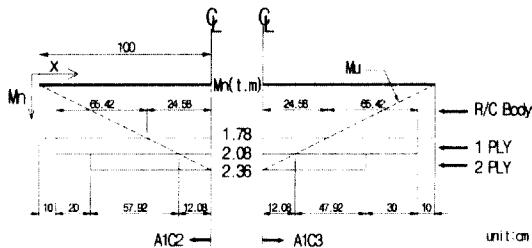


Fig. 5 Moment with carbon sheet

본 실험의 경우 탄소섬유를 두겹으로 부착했을 경우, 모멘트의 보강을 위하여 필요한 길이는 1번층의 경우 49.16cm이나 탄소섬유의 정착을 위하여 65.42cm를 더 연장하였고, 2번층의 경우는 24.16cm길이의 보강이 필요하나 마찬가지로 이유로 47.92cm과 57.92cm를 더 연장하여 부착하였다. 따라서 본 실험에서 확보한 최소 정착길이는 47.92cm이다. 이 값을 현 시방서의 철근 정착 규정과 비교하면 유효높이 d 이상되어야 하는 규정만 적용 가능하고, 부착길이의 계산은 보강재의 부착 물성에 대한

실험자료가 없어서 계산이 불가능하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 하중-처짐 측정결과

Fig. 6에서는 본 실험에서 측정된 하중-처짐의 결과를 종합적으로 도시한 것이며, 자세한 분석을 위하여 탄소보강과 강관보강의 경우로 나누어 Fig. 7과 8에 나타내었다.

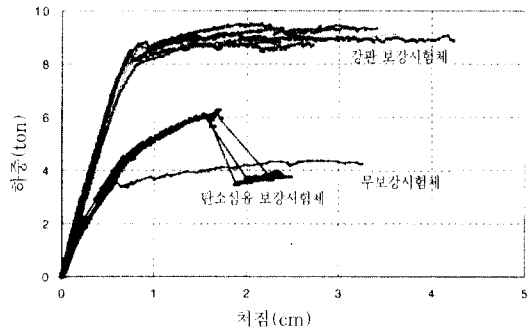


Fig. 6 Load-deflections curves at midspan (total)

Fig. 7에는 탄소섬유시트 보강시험체에 대한 하중-처짐 측정 결과를 무보강 시험체와 비교하여 나타낸 것이다. 무보강 시험체(A1N0)에서는 계산된 균열하중 근처에서 약간의 강성의 저하가 관측되었고 외관조사에서도 이 하중에서 균열이 관측되어 계산된 값과 일치하는 결과를 얻었다. 또한 항복하중도 계산치와 거의 일치하고 있으며 항복하중 이후에는 항복처짐의 6배 이상의 큰 처짐을 동반한 약 20% 정도의 하중 증가가 관측되었다. 이 그림에서는 2.5cm 처짐까지만 제시되었으나, 실제 실험에서는 이보다 더 큰 처짐이 발생할 때까지 재하실험을 계속하였다.

탄소섬유 보강시험체에서는 계산된 균열하중인 1.24톤 보다 약간 큰 1.5톤의 하중에서 강성의 변화가 관측되었으며, 외관조사에서는 이보다 더 큰 1.95톤의 하중에서 균열이 관측되었다. 이론적 항복하중의 크기는 4.72톤이나, 측정된 값은 약 4.5톤 내외로서 약간 작은값이 관측되었다. 그 이유는 탄소섬유의 경우 부착후 보강재의 표면이 인장력 방향으로 완벽한 직선을 이루지 못하여 보강재에 작용하는 인장력을 100% 효율적으로 받아주지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

시험체는 이 하중에서 인장철근이 항복강도에 도달하였음을 나타내는 것이며, 항복하중 이후 최대하중까지 하중의 증가는 약 35%에 달하고 있다. 이는 부재내의 인장 철근이 항복응력 이후에 더 이상의 하중을 받아주지 못하지만 보강재인 탄소섬유가 지속적으로 하중을 받아들일 수 있으므로 무보강보 보다 훨씬 더 큰 하중의 증가를 보이고 있는 것이다.

그러나 최대하중 작용시 처짐이 무보강보 보다 작아 파괴의 징후가 실 구조물에서는 잘 관측되지 않을 수도 있으므로, 구조물의 붕괴에 대한 안전성의 확보 측면에서는 불리한 것으로 판단된다. 또한 최대 하중에 도달했을 때 처짐은 기존 보강 방법이 가장 크며, 단계적 부착을 한 새로운 보강방법의 경우는 줄어든 길이에 비례하여 처짐량이 감소하였다. 최대하중에 도달한 후에는 급격히 내하력이 감소되어 3.77~3.87톤으로 떨어졌으며 동시에 처짐이 0.3cm~0.6cm 정도 급격히 증가하는 것을 관측할 수 있었다. 그러나 이 시점에서는 외관상으로는 탄소섬유의 탈락이나 파손이 관측되지 않았으며, 이후 변형량이 약간 증가한 후에 탄소섬유의 파단에 의한 시험체의 파괴가 발생하였다.

본 실험을 통하여 탄소섬유를 이용한 기존의 보강 방법과 새로운 보강방법을 비교, 분석한 결과 설계하중에 해당되는 항복하중이나 파괴전의 최대하중의 크기에서는 거의 차이가 없다는 것을 발견하였다. 따라서 본 연구에서 제시된 바와 같이 보강재의 길이를 단계적으로 감소시켜 정착길이를 최소 47.92cm 까지 확보한 경우에는 사용 재료의 양을 감소시켜도 보의 보강효과와 파괴거동에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

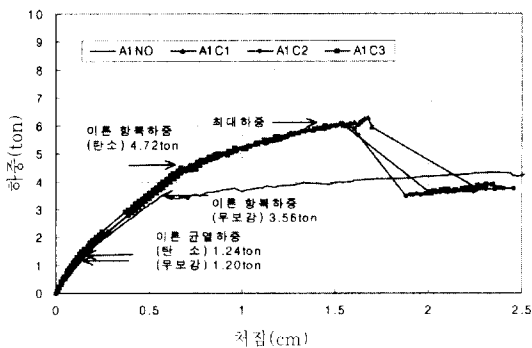


Fig. 7 Load-deflections curves at midspan(carbon sheet)

Fig. 8에서는 강판보강 시험체에 대한 하중-처짐 측정 결과를 무보강 시험체와 비교하여 나타내었다.

강판보강 시험체에서는 계산된 균열하중인 1.54톤 근처에는 명확한 강성의 변화를 관측하지 못하였으나, 외관조사에서는 이보다 훨씬 더 큰 4.0톤의 하중에서 균열이 관측되기 시작하였다. 이론적 항복하중의 크기는 7.96톤이나, 측정된 값은 약 8.0~8.86톤 내외로서 기존 보강방법의 경우에는 거의 차이가 없으나, 단부 확대판을 사용한 단부부착 방법의 경우에는 약 5% 정도, 단부 보강판을 사용한 경우에는 약 10% 까지 내하력이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 보강재의 단부에 부착된 보강판 등이 보강재의 강성을 증가시켜서 나타난 현상으로 판단된다. 본 시험체는 항복하중 이후 최대하중까지 평균 7%에 달하는 하중의 증가가 측정되었다. 이는 보강재와 철근이 모두 항복응력 이후에 더 이상의 하중을 받아주지 못하기 때문에, 증가량은 무보강보와 비슷하나 항복하중이 더 크기 때문에 증가율은 작아진 것이다.

파괴시 처짐을 비교 분석한 결과 기존보강 방법은 무보강보 보다 파괴변형율이 작으나 단부의 부착이 개선된 보강 방법의 경우는 모두 파괴시까지 더욱 큰 처짐을 견딜수 있는 것으로 나타났다. 특히 단부 확대판을 사용한 경우에는 파괴시 변형량이 기존의 보강방법에 비하여 30%이상 증가한 것으로 나타났다.

본 실험을 통하여 기존의 강판보강방법과 단부의 부착방법을 개선한 새로운 보강방법을 비교, 분석한 결과 설계하중에 해당되는 항복하중과 파괴전의 최대하중의 크기에서는 약 5%~10% 정도의 내하력의 증가가 측정되었으며, 파괴에 도달할때까지의 처짐도 기존의 보강방법에 비하여 단부의 부착력을 개선

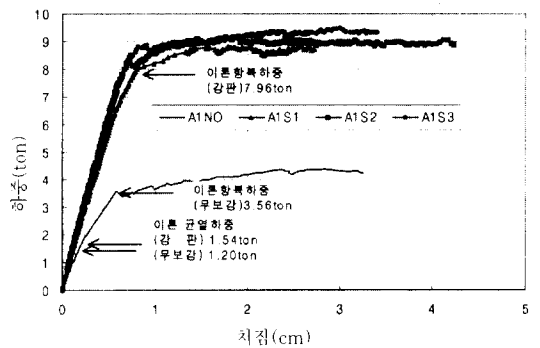


Fig. 8 Load-deflections curves at midspan(steel plate)

한 새로운 방법이 크게 증가한다는 것을 알 수 있고, 이는 구조물의 안전성을 증가시키는 유리한 성질인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제시된 바와 같은 단부보강 방법은 보강재의 단부에서의 부착력을 증가시켜, 보강에 따른 보강효과와 파괴거동에 매우 효과가 좋은 것으로 나타났다.

4.2 하중 비교 및 보강재의 파괴양상

Table 3에서는 시험체별로 균열하중, 항복하중의 이론값과 측정값 및 최대하중의 측정값 등을 요약 정리하였다.

균열하중의 경우, 무보강 시험체에서는 이론값과 측정값이 일치하였으나, 탄소보강 시험체는 약 0.73톤, 강관보강시험체에서는 약 2.44톤의 차이를 보이고 있다. 또한 무보강 시험체에 비하여 탄소섬유 보강 시험체의 균열하중은 약 60%, 강관보강 시험체는 약 230%의 증가가 관측되었으나, 초기 균열발생의 억제 효과는 기존의 보강방법과 새로 제시된 탄소섬유 보강방법이나 강관보강 방법들이 거의 같은 것으로 나타났다.

탄소섬유 보강의 경우는 보강후 항복하중이 약 25% 증가하였으며, 보강 길이를 조절한 방법에 따라 다른 항복하중에는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 적절한 설계를 통하여 탄소섬유의 보강 길이를 줄이면, 보강공사에서 보다 경제적인 설계와 시공이 가능한 것으로 판단된다. 그렇지만, 탄소섬유 시험체의 경우, 일부 측정결과는 계산값과 차이가 발

생하여 보강작업에 문제가 있었던 것으로 판단되어, 보강 작업시 더욱 철저한 품질관리를 시행하여야 할 것이다.

강관보강의 경우는 보강 후 항복하중이 약 140% 증가한 8.20~8.76톤으로 측정되었으며, 새로운 강관 보강방법의 평균 항복하중은 각각 8.61톤과 8.76톤으로, 기존의 강관보강 방법에 비하여 5%와 7%씩 증가한 것으로 나타났으며, 이는 보강재의 단부보강이 항복하중의 증가에 효과가 있는 것을 의미한다.

보강 시험체에서의 최대하중은 시험체 내의 철근이 항복한 후에도 부착된 보강재로 인하여 내력이 계속 증가하여 보강재가 파단되거나 분리할때까지 측정된 하중중 최대값으로서, 탄소섬유보강의 경우 6.05~6.30톤이며 강관보강의 경우에는 8.82~9.37톤의 범위를 나타내었다.

보강된 콘크리트 시험체의 최종적인 파괴 형태는 모두 8가지로 구분 할 수 있으며 이를 유형별로 Fig. 9에 제시하였다. 우선 1) 콘크리트 본체에 전단응력에 의한 사인장 균열(DT)이 발생하여 파괴되는 경우, 2) 보강재 단부에서 시작하여 보강재의 계면 방향으로 전단응력(SF)에 의하여 인접 콘크리트내에 수평균열이 발생하여 파괴되는 경우, 3) 콘크리트와 에폭시층의 계면(CI)이 전단에 의하여 파괴되는 경우, 4) 에폭시층(EL)이 전단에 의하여 파괴되는 경우, 5) 에폭시와 보강재의 계면(SI)이 전단에 의하여 파괴되는 경우, 6) 보강재가 전단에 의하여 수평균열(SL)이 발생하여 파괴되는 경우, 7) 보강재가 인장

Table 3 Experimental and theoretical load and mode of failure

주: *은 이상파괴

보강재	시험체명	균열하중(톤)						균열하중(톤)						균열하중(톤)						보강재 파괴 양상
		이론치	측정치		증감(%)		치위 (cm)	이론치	측정치		증감(%)		치위 (cm)	측정치		증감(%)				
			평균	증	감	증			감	평균	증	감		평균	증	감				
무보강	A1N0	1.20	1.20	1.20	100	감	0.140	3.56	3.58	3.58	100	감	0.585	4.34	4.34	100	감	휨파괴		
	A1C1		2.00	2.00	167	100	0.245		4.40	4.40	123	100	0.692	6.30	6.30	145	100	7)+2)		
탄소 섬유 슈트	A1C2-1		1.20	1.90	158	95	0.162		3.50	4.52	126	103	0.500	5.31	6.05	139	96	7)+2)		
	A1C2-2	1.21	1.90				0.233	4.72	4.52			0.708	6.05				7)+2)			
	A1C3-1		2.00	2.00	167	100	0.284		3.79	4.49	125	102	0.601	4.89	6.08	140	97	7)+2)		
	A1C3-2		2.00				0.216		4.49			0.668	6.08				7)+2)			
	A1S1-1		4.90	3.95	329	100	0.369		8.40	8.20	229	100	0.733	8.86	8.84	204	100	5)		
강관	A1S1-2		3.00				0.251		8.00			0.808	8.82				5)			
	A1S2-1		4.40	3.95	329	100	0.383	7.96	8.71	8.61	241	105	0.841	9.00	9.09	200	103	5)		
	A1S2-2		3.50				0.261		8.51			0.735	9.17				5)			
	A1S3-1		4.90	4.05	338	103	0.401		8.69	8.76	245	107	0.813	9.52	9.45	218	107	5)		
	A1S3-2		3.20				0.258		8.86			0.906	9.37				2)			

응력을 견디지 못하고 파단(SM)되는 경우, 8) 보강재 중앙에서 에폭시와 보강재의 계면에서 파괴되는 경우, 등 총 8가지를 고려할 수 있다. 또한 2번에서 6번의 파괴는 섬유보강의 경우에는 중앙부에서부터 균열이 시작될 수도 있다.

만약 사용된 보강재와 에폭시의 품질 및 시공이 적절하다면, 원콘크리트가 보강재보다 약한 것이 대부분이기 때문에 원 콘크리트가 파괴되는 2번(SF)과 같은 파괴가 발생할 가능성이 가장 높으며, 실제로도 현장에서는 가장 흔하게 관측된다. 1번(DT)의 파괴는 원 콘크리트에 전단 보강이 적절치 못할 때 발생하며, 대개의 경우는 충분한 전단력을 갖고있는 경우가 많으므로 이런 파괴는 드물게 관측된다. 그리고 만약 3번(CI), 4번(EL), 5번(SI), 8번(SIC)등의 파괴가 발생하였다면, 이는 에폭시의 품질에 이상이 있거나, 시공시 계면처리가 불완전했다는 것을 의미하므로 철저한 품질 및 시공관리를 통하여 이런 종류의 파괴가 발생하지 않도록 모든 조치를 취해야 할 것이다. 6번(SL)과 같은 형태의 파괴는 섬유 보강재를 여러 겹으로 겹쳐서 보강했을 때 발생할 수 있는 파괴형태이나, 시공이 적절히 시행되었다면 실제로는 거의 발생되지 않는다.

7번(SM)과 같은 파괴 형태는 보강량이 적거나, 보강재의 부착력이 인장강도보다 더 큰 경우에 발생하는데, 이러한 형태의 파괴가 가장 바람직한 형태의

파괴로서, 이러한 파괴가 유도되어야 보강량의 설계가 가능해진다.

탄소섬유 보강의 경우, 기존의 보강 방법으로 보강된 시험체는 보강재에 인접한 원콘크리트에 수평 균열이 발생하여 파괴되는 2번 형태의 파괴가 발생하였다. 보강길이를 조정한 새로운 부착방식의 보강 방법의 경우에는 2번층중의 단부 부근에서 발생한 1번층중의 7번 파괴와, 나머지 구간에서 발생한 2개층이 모두 원콘크리트를 물고 떨어지는 2번 파괴가 발생하는 복합적인 파괴 양상을 보이고 있다. 약간 예외적인 파괴가 관측된 것은 A1C3-1시험체의 경우로서 탄소섬유가 단부 근처에서 파단하면서 탈락된 것은 마찬가지이나, 중앙부분에서 인장철근 깊이까지의 두께와 상당한 길이의 콘크리트를 물고 떨어지는 파괴가 관측되었다.

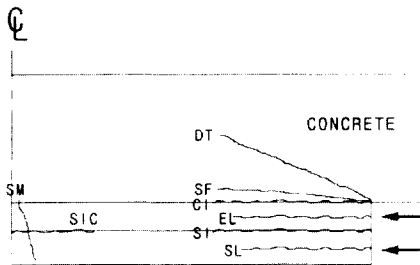
강판 보강의 경우는, 대부분의 시험체가 거의 유사한 파괴 양상을 보이고 있는데, 보강재가 평음과 함께 갑자기 탈락, 파괴되는 양상을 보이고 있으며 항복하중이나 최대하중이 작용할때까지는 외관상 아무런 이상을 발견할 수 없다. 파괴 형태는 5)번 파괴가 주를 이루었는데, 이는 바람직하지 못한 파괴 형태로서 보강강판의 표면 가공을 더욱 거칠게 하여 에폭시와의 부착성능을 더욱 향상시킬 필요가 있다는 것을 시사하고 있다. 강판보강의 경우에도 예외적인 파괴가 1개 관측되었는데, A1S3-2시험체의 경우 단부에서 약간의 콘크리트를 물고 탈락하는 2번파괴가 발생하였다.

4.3 하중-변형도와 전단응력

Fig. 10에서는 보강재의 길이 방향으로의 전단응력의 변화를 분석하기 위하여 보강재의 표면에 부착된 철근게이지의 측정값을 하중 단계별로 정리하였다. 전단응력은 측정된 인장 변형률로부터 인장응력을 산출한 뒤,

$\tau = \frac{dT}{dx}$ 에 의하여 도출하였다. 측정된

결과, 보강재의 중앙으로 갈수록 모멘트에 의한 인장응력이 증가하기 때문에 인장변형률도 증가하는 경향을 보이고 있다. 강판보강 시험체에서는 보강재의 단부 보강을 한 경우, 최대 전단응력 발생지점에서의 인장응력이 감소한 것으로 나타나고 있다. 따라서 전단 응력이 감소하여 단부의 부착 성능이 개선된 것으



파괴 유형 명칭	
1)	콘크리트 사인장 파괴 Diagonal Tensile Failure (DT)
2)	콘크리트 전단 파괴 Shear Failure(SF)
3)	콘크리트 계면 파괴 Concrete Interlayer Failure(CI)
4)	에폭시층 파괴 Epoxy Layer Failure(EL)
5)	보강재 계면 파괴 Strengthening Interlayer Failure(SI)
6)	보강재층 파괴 Strengthening Layer Failure(SL)
7)	보강재 파단 Strengthening Material Rupture(SM)
8)	보강재 계면 파괴(중앙) Strengthening Interlayer of Center(SIC)

Fig. 9 Failure modes of test beams

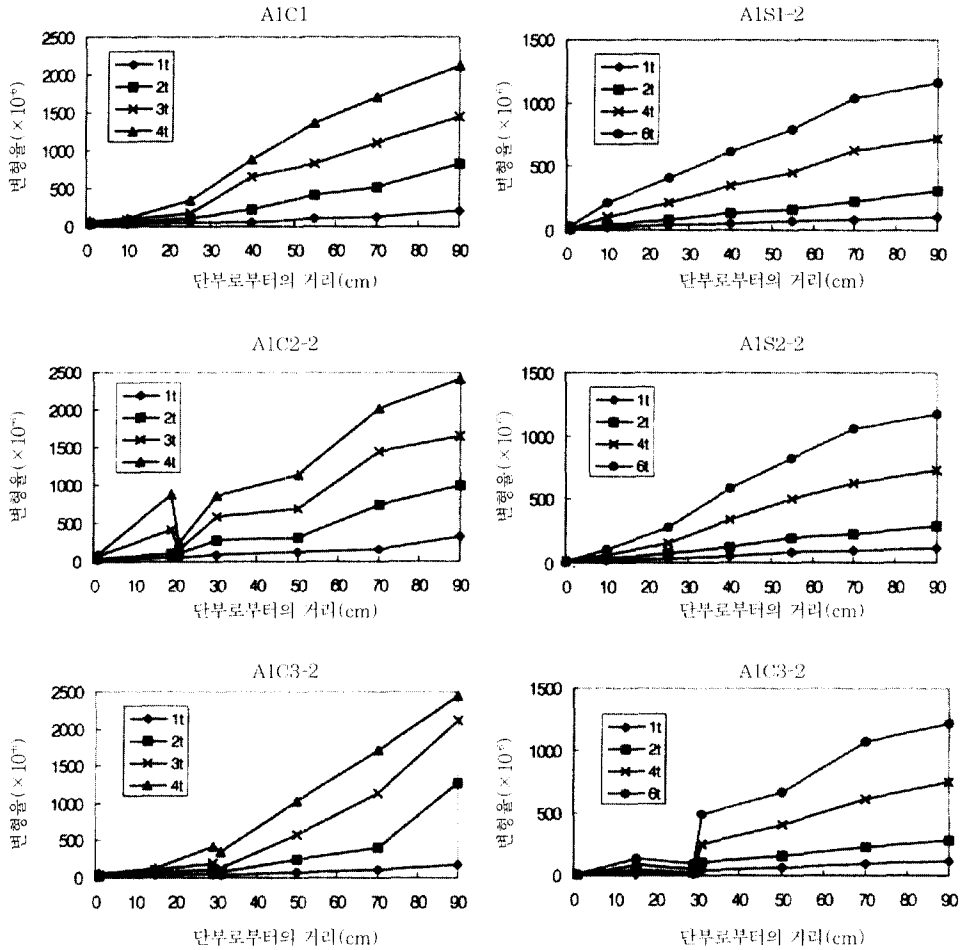


Fig. 10 Tensile strain of steel plate and carbon sheet at surface

로 판단된다.

Fig. 11에서는 앞에서 제시된 인장변형을 측정결과를 전단응력으로 변환한 결과를 보여주고 있다. 제시된 그림은 A1C1, A1S2-2 시험체의 길이방향의

전단응력의 분포이다.

측정결과는 탄소섬유 보강의 경우, 보강재 단부에서 내측으로 약 30cm정도, 강판보강의 경우는 보강재 단부에서 내측으로 약 50cm정도 들어간곳에 최

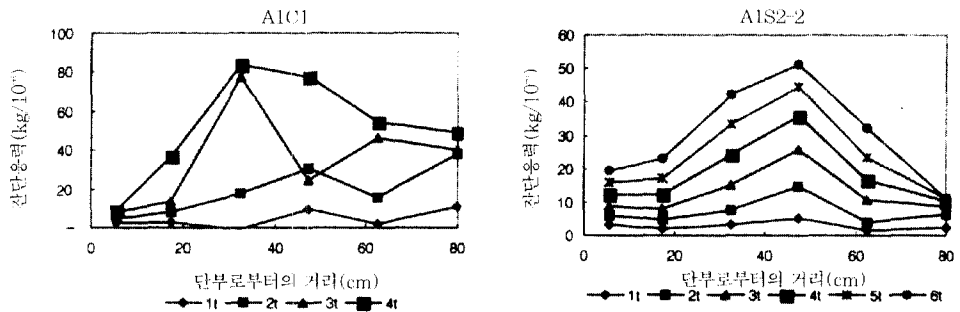


Fig. 11 Shear stress of steel plate and carbon sheet at surface

대 전단응력이 발생하였는데, 이는 이론적인 예측치인 13cm에 비하여 상당히 중앙측으로 이동된 것이다. 이는 인장변형율이 보강재의 외측 표면에서 측정되었기 때문에 실제 전단파괴가 발생하는 내측 경계면과는 상당한 거리가 있으며, 따라서 최고 전단응력 발생지점이 경계면에서 보다는 약간 중앙부쪽으로 이동하게 된다. 따라서 보강재의 주된 파괴 형태가 2변형 파괴인 점을 고려하면, 보다 정확한 측정을 위해서는 보강재를 부착하기전에 게이지를 부착하는 방향과 단부쪽에 보다 많은 게이지를 조밀하게 부착하여야 할 것이다

4.4 파괴 균열양상

Fig. 12에 파괴후 최종 균열 상태를 도시하였다. 모든 시험체는 하중이 증가함에 따라 시험체 중앙 하단 부근에서 처음 휨균열이 발생한 뒤 그 갯수가 늘어나 균열발생 위치가 점차 지점쪽으로 이동하였다. 본 실험에서는 전단보강을 충분히 하였기 때문에 사인장 균열로 발전된 휨균열은 거의 없는 것으로 나타났다. 다만 강판보강의 경우에는 탄소섬유보강의 경

우와 달리 보강재의 단부에서 사인장 균열이 발생하는 경우가 많은 것을 알 수 있다. 이는 강판보강의 경우 단부보강을 통하여 단부 부착력이 개선되므로 사인장균열이 발생된 뒤에 전단파괴가 발생되어 내하력이 개선된 것으로 판단된다.

무보강 시험체의 경우는 일반적인 휨균열 양상을 보이고 있다. 탄소섬유 보강 시험체는 균열이 보의 지간 전체에 분산되어 있는 경향을 보이고 있으며, 강판보강된 경우는 소수의 균열이 중앙부에 집중되어 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 보강재 물성의 차이에서 기인된 것으로 탄소섬유의 경우는 탄성계수가 크고 항복점이 없는 직선적인 거동을 하므로, 내부 철근이 항복한 후에도 항복한 지점에서 계속 내하력을 증가시킬 수 있으나, 강판보강의 경우는 내부 철근과 보강재가 거의 동시에 항복함으로써 균열이 발생된 지점에서 일단 소성변형이 생기기 시작하면 더 이상 내하력의 증가를 기대할 수 없기 때문에 이미 발생된 소수의 균열이 큰 균열로 발전하여 파괴에 이르기 때문인 것으로 판단된다.

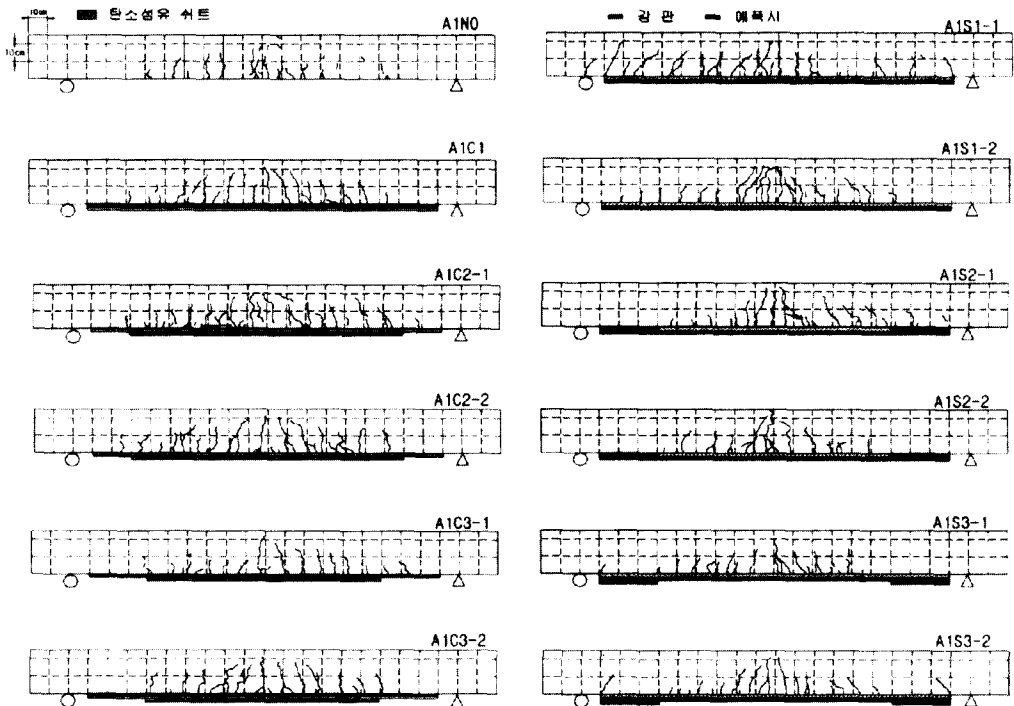


Fig. 12 Crack patterns after failure

5. 결론

현재 널리 사용되고 있는 부착식 보강 공법의 성능을 향상 시키기 위하여 보강재 단부에서의 새로운 부착 방법을 제시, 검증하였고, 탄소섬유 보강공법에서는 보강재의 보강 길이를 조절하는 방법을 제시하여 그 보강효과와 단부에서의 부착 성능에 대한 평가를 하는 실험적인 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1. 탄소섬유 보강 시험체는 계산된 항복하중과 거의 비슷한 항복하중이 관측되었고, 보강 길이를 조절한 방법의 차이에 따른 항복하중의 크기에는 차이가 없는 것으로 나타나 적절한 설계를 통하여 탄소섬유의 보강 길이를 조절하면 보다 경제적인 설계와 시공이 가능할 것이다.
2. 강판 보강시험체의 항복하중은 기존의 방법으로 보강한 경우는 계산된 값과 거의 일치하는 결과가 나타났으며, 단부 보강을 한 시험체의 경우는 약 5%~10%정도 항복하중의 증가가 측정되어, 단부에 부착한 확대판과 보강판이 보강재의 단부 부착력 향상과 이에 따른 내하력 증가에 효과가 있는 것으로 나타났다.
3. 탄소섬유 보강시험체에서는 파괴시 치짐이 무보강 시험체보다 약간 작아졌으나, 철근의 항복후에도 약 30%에 달하는 하중의 증가가 있어서 궁극적으로 안전성 확보 측면에서 유리해진 것으로 판단된다. 강판 보강시험체의 경우는 항복하중 이후에 최대 하중까지 약 7%의 하중증가를 보이면서 무보강 시험체보다 큰 치짐에서 파괴되어 내하력증가와 치짐의 조절 측면에서 모두 유리한 것으로 판명되었다.
4. 보강시험체의 최종 파괴양상의 비교에서는 탄소섬유 보강의 경우, 보강재의 파단과 콘크리트를 붙고 떨어지는 복합적인 파괴 양상을 보이고 있으며, 강판 보강의 경우는 파단직하지 못한 파괴인 보강재 계면에서의 파괴가 주종을 이루고 있는데 이는, 보강 강판의 표면가공을 더욱 거칠게 하여 부착성능을 향상시켜야 할 것으로 나타났다.
5. 최종 균열상태를 관찰한 결과 탄소섬유 보강시

험체가 강판보강 시험체보다 균열이 보의 지간 전체에 분산되었는데 이러한 차이는 보강재 물성의 차이에서 기인된 것으로서 탄소섬유의 경우, 강판에 비해 강성이 높고 항복점이 없어 균열발생 지점에서 큰 인장력을 받아 주기 때문에 균열 조절 측면에서는 유리한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 송병표, 한만엽, 황의승, 홍영관, "보수·보강재료의 공법 개발연구", 한국 콘크리트 학회, 1997년도 봄 학술 발표회 논문집, pp.592~597
2. 최완철, "예폭시집작 강판보강 철근콘크리트보의 역학적 거동에 관한 연구", 숭실대학교 생산기술 연구소, 1994, pp.117
3. 박찬민, 이일용, "노후 콘크리트 구조물의 보강 및 보수대책 연구(1)", 한국도로공사, 1995년도 연구보고서, pp.142
4. 심종성의 "철근콘크리트 구조물의 보수보강 신기술 개발", 건설교통부, 1995.10 pp.37~62
5. 대한토목학회, "콘크리트 표준 사양서", 1996, pp.144
6. Robert T.M and Haji-Kazemi H, "Theoretical Study of the Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates" The Structural Engineering, March 1989, pp.39~55
7. Ansel C, Ugural.Saul K, Fenster, "Advanced Strength and Applied Elasticity" pp.207~213
8. Marco Arduini and Antonio Di Leo, "Composite Behavior of Partially Plated Beams in the Linear Elastic Range, "Repair and Strengthening of Concrete Members with Adhesive Bonded Plates", "ACI, SP-165, pp.43~54
9. Philip A. Ritchie, David A. Thomas, Le-Wu Lu, and Guy M. Connelly, "External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics" ACI STRUCTURAL JOURNAL, Title no. 88-S52 pp.490~499
10. Deric John Oehlers, " Reinforced Concrete Beams with Plates Glued to Their Soffits", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 8, August 1992, pp.2023~2038
11. 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
12. R. N. Swamy, R. Jones, J. W. Bloxham.
"Structural behavior of reinforced concrete beams
strengthened by epoxy-bonded steel plates." The
Structural Engineer., Vol. 65A, No.2, February
1987 pp.59~87
13. 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.978~993

요 약

최근들어 손상된 실구조물의 보강공법들이 적용, 발전되어왔다. 가장 보편적으로 사용된 공법이 강판과 탄소섬유를 이용한 공법이지만, 이론적인 배경과 적용기술이 아직은 정립되어 있지 않은 상태이다. 강판 보강의 경우 단부에서의 응력집중이 보강 효과를 결정짓는 가장 중요한 변수이므로, 본 연구에서는 이러한 응력집중을 완화하기 위하여 단부에 보강판과 확대판을 부착하여 실험을 하였고, 탄소섬유 보강 실험에서는 다층 시공시 보강량을 조절하여 실험하였다. 실험 결과는 하중-처짐, 항복하중, 최대하중, 보강재의 전단응력의 분포와 보강재의 파괴양상을 분류하여 정리하였다. 실험을 통하여 강판 보강의 경우 본 연구에서 제안된 단부에서의 보강방법이 보강효과가 향상된 것을 확인하였고 탄소섬유 보강시에는 탄소섬유의 보강량을 조절함으로써 경제적인 설계와 시공이 가능한 것으로 나타났다.

(접수일자 : 1998. 3. 14)