

FRP 판용 썬기형 정착구의 개발

Development of Wedge-Type Mechanical Anchor for FRP Plate

조 정 래* 박 영 환** 박 종 섭* 유 영 준*** 정 우 태*** 김철영****

Cho, Jeong Rae Park, Young Hwan Park, Jong Sup Yoo, Young Jun Jung, Woo Tae Kim, Chul Young

ABSTRACT

The FRP plate or sheet bonding technology was widely used for strengthening deficient RC structures. The strengthened structure using FRP bonding scheme, however, experience the complex interfacial behaviour which is difficult to predict. Therefore, the unbonded scheme using some anchorage device can be is an alternative for more reliable design. In this study, wedge-type anchor for FRP plate is developed for the unbonded flexural strengthening scheme. Some parameter study using 2D finite element method is performed. The analysis parameters are taken as wedge-guide friction coefficients, wedge-FRP friction coefficient and wedge inclination angle. Based on the parameter study, more efficient anchors are designed and tested. The test result show that the developed anchor assure about 80 % FRP strength, which is higher performance than typical bonding scheme. Last, 3D finite element analysis is performed.

1. 서론

노후화된 구조물의 성능을 향상시키기 위해 주로 사용되는 시공법은 FRP 쉬트 또는 판을 에폭시 등으로 부착시키는 공법이 주로 사용되고 있다. 외부 보강재 부착에 의해 보강된 구조물은 보강재와 콘크리트 계면 사이에서의 거동 특성에 따라 부착파괴나 저장도에서 보강재 파단 등 예기치 못한 조기파괴가 발생하여 보강재가 지닌 성능이 미처 발휘되기 전에 파괴에 도달하는 양상을 나타낸다. 부착 공법의 불확실한 조기 파괴 가능성을 배제하고 신뢰성 있는 보강설계와 보강성능 확보를 위해서 최근 비부착 공법이 대안으로 제안되고 있다. 이 연구에서는 비부착 공법에서 활용할 수 있도록 보강재의 인장강도까지 보강재를 지지할 수 있는 FRP 판용 썬기형 정착장치를 개발하였다.

본 연구에서는 썬기-FRP, 가이드-썬기 사이의 마찰계수, 썬기 형상을 매개변수로 2차원 유한요소를 수행하여 썬기형 앵커의 거동 특성을 분석하고, 썬기의 성능을 좌우하는 조건을 도출하였다. 매개변수 해석 결과에 기초하여 3가지 썬기 형태에 대한 실험체를 제작하여 실험하였다. 실험 결과 개발된 썬기는 보강재의 인장강도의 약 80% 까지 지지할 수 있다. 마지막으로 실험에서 나타난 가이드의 휨 변형에 의한 국부적인 응력집중 현상을 3차원 유한요소를 이용하여 수치적으로 검증하고, 실험값과 비교 분석하였다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

*** 정회원, 명지대학교 토목공학과 정교수

2. 2차원 유한요소를 통한 매개변수 해석

여기에서는 2차원 유한요소를 적용하여 개발중인 판용 썬기형 정착구의 거동특성에 대한 매개변수 해석을 수행하였다. 해석은 대칭을 고려하여 그림 1과 같이 모델링하였으며, 평면 응력 조건을 적용하였다. 표 1은 앵커 구성 요소의 물성치를 나타낸 것으로 탄소섬유판은 직교이방 탄성 재료로, 썬기 및 가이드는 등방 탄성 재료로 모델링하였다. 해석에 사용된 매개변수는 그림에서 표현한 것과 같이 썬기와 가이드 사이의 기울기($\theta = 2.86^\circ, 8.53^\circ, 13.13^\circ$), 두 접촉면의 마찰 계수이다. 해석에 사용된 프로그램은 범용 유한요소프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 썬기와 가이드, FRP와 썬기간의 접촉부는 ABAQUS의 접촉해석(contact analysis) 기능을 이용하여 모델링하였다. 해석은 하중 상태에 따라 단계별로 수행하였으며, 최종적으로 FRP에 가해진 하중은 FRP 판의 과단하중(P_u)이다.

그림 2는 썬기 각 θ , 마찰계수 μ_1, μ_2 에 따른 매개변수 해석결과의 일부를 도시한 것으로, FRP 판에 발생하는 횡방향 응력을 나타낸 것이다. 좋은 앵커가 되기 위해서는 슬립과파괴가 일어나지 않아야 하며, 앵커에 구속된 부재에 작은 슬립과 응력이 발생해야 한다. 매개 변수 해석을 통해 썬기의 각이 클수록 작은 응력이 발생하고 슬립이 작지만, 너무 크게 되면 슬립과파괴가 일어날 수 있음을 알 수 있다. 가이드-썬기 마찰계수는 클수록 변위가 많이 발생해 불리하지만, FRP에 발생하는 응력은 작기 때문에 유리하다. 썬기-FRP 마찰계수는 클수록 변위가 작아 유리하다. 이 경우 썬기-FRP 마찰계수의 크기와 관계없이 횡방향 응력은 비슷하며, 종방향 응력은 마찰계수가 클수록 썬기 압급에 집중된다.

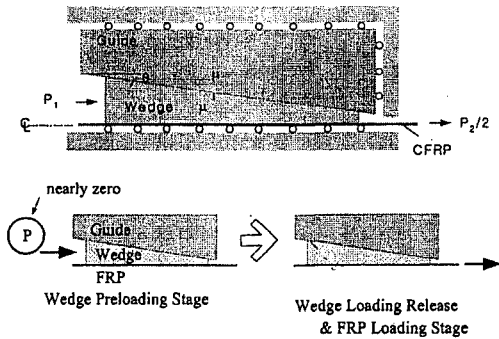


그림 1. 해석 모델 및 하중 가력 절차

표 1. 재료 물성

Component	Plate	Wedge	Guide
Material	CFRP Orthotropic	Steel Isotropic	Steel Isotropic
Elastic Modulus		200 GPa	200 GPa
- Longitudinal direction	165 GPa		
- Transverse direction	10.3 GPa		
Shear modulus			
- Longitudinal direction	7.2 GPa		
- Transverse direction	7.2 GPa		
Poisson's ratio		0.2	0.2
- Major Poisson's ratio	0.27		
- Minor Poisson's ratio	0.02		

Note. 1 GPa = 1 kN/mm²

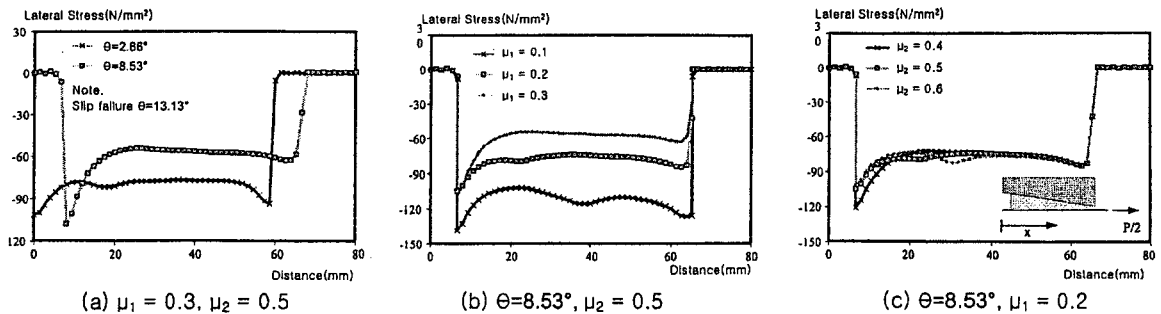


그림 2. 극한하중($P = P_u$) 상태에서의 FRP의 횡방향 응력 분포

3. 정착구 제작 및 실험

썩기의 각도를 실험 변수로 하여 제안된 판용 정착구를 제작하였다. 제작된 정착구 실험체(표 2)는 그림 3에 나타난 바와 같이 25톤 용량의 가력기와 고정용 치구를 이용하여 실험을 실시하였다. 하중 재하 방법은 2mm/min 속도의 변위제어로 하였으며, 보강재 중앙에 변형률 게이지를 보강재 축방향으로 3개 부착하여 보강판의 인장변형률을 측정하였다.

모든 시험체는 그림 4와 같이 모두 썩기 압입에서 FRP 판의 양단이 파괴되면 전체적인 파괴로 연결되었다. 이것은 그림과 같이 가이드의 휨 변형에 의해 FRP 판의 양단으로 응력집중이 일어나기 때문이다. WA03P 실험체의 경우 초기하중 단계에서 비선형 거동을 나타냈다. 하중이 커짐에 따라 썩기의 미끄러짐과 맞물림이 반복되어 일어나 하중-변위 곡선이 진동하는 듯한 현상을 보였으며, 상대적으로 낮은 하중 단계에서 파괴에 도달하였다. 이것은 가이드의 휨 강성이 작아 과도한 응력 집중이 발생하기 때문이다. WAP08P, WA13P는 초기하중 단계부터 거의 선형 거동하였으며, 거의 유사한 최대 하중을 발현하였다. 가이드의 휨강성이 일정 수준이상 확보될 경우 초기 하중 단계에서 FRP 판이 썩기에 의해 정착되며, 상대적으로 높은 최대하중을 발현하는 것을 확인할 수 있다. 표 2는 보강재 자체의 파단하중과 정착구 이용시 파단하중을 나타낸 것이다. 일반적으로 부착공법에서 탄소판 보강재의 변형률은 10000 $\mu\epsilon$ 정도인 것으로 나타나 부착공법에서는 보강재의 35~60% 성능만을 사용되고 있다. 하지만 개발된 썩기형 정착구는 썩기 빗면의 각도에 따라 보강재 성능의 최대 약 80%를 발현하는 것으로 나타났다. 따라서, 구조물에 대한 보강시 썩기형 정착구는 보강재의 성능을 충분히 활용할 수 있는 대안이 될 수 있다.

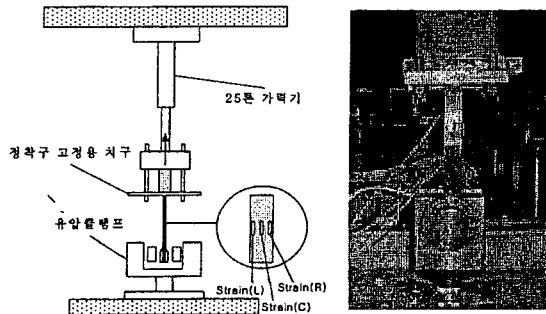


그림 3. 시험체 설정

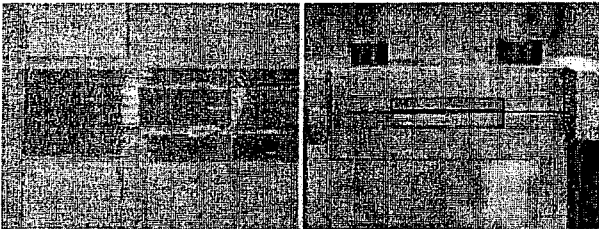


그림 4. FRP 시편의 파단 및 앵커의 휨변형

표 2. 시험체별 최대 하중 전달 능력

시편	썩기 각도	최대 하중 (tonf)	파단 하중 (tonf)	(1)/(2) (%)	최대 변형률 ($\times 10^{-6}$)
WA03P	2.86°	11.53		67.27	11207
WA08P	8.63°	14.07	17.14	82.09	13819
WA13P	13.13°	13.64		79.58	13146

3. 3차원 유한요소 해석

썩기형 앵커는 썩기가 밀려들어감에 따라 가이드 중앙 부분이 휘게 되고 이로 인해 거동에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 2차원 유한요소 해석으로 이 부분을 모사할 수 없고, 3차원 해석이 반드시 필요하다. 여기에서는 썩기 각이 8.56°인 썩기형 앵커에 대해 3차원 유한요소 해석을 수행하여 실험 결

과와 비교 분석하였다. 재료의 물성치는 2차원 해석에서 제시한 물성치와 동일하며, 실제 실험조건과 동일하도록 경계조건을 부과하였다. 가이드-썩기 마찰계수, μ_1 는 0.2로 가정하였으며, 썩기-FRP 마찰계수는 $\mu_2 = 0.6, 0.65, 0.7$ 인 경우에 대해 해석을 수행하였다. 해석은 FRP의 축방향 응력이 극한응력 2.8 GPa에 이를 때까지 수행하였고, 이 상태에 이르면 FRP가 파단되는 것으로 간주하였다.

그림 5는 최종 하중 단계에서의 FRP 판, 가이드의 처짐 형상 및 S11응력 분포를 나타낸 것이다. 가이드의 변형에 따라 썩기의 앞굽 양 끝의 FRP에서 가장 큰 응력을 나타내고, 최종단계에서 2.8 GPa임을 확인할 수 있다. 가이드 중앙부가 위로 휘게 되는 데, 이것은 실험에서 관찰되는 현상과 동일하다. 표 3은 파단하중에 대해 실험 결과와 해석결과를 비교한 것이다. 가정된 마찰 계수에 $\mu_2 = 0.6, 0.65, 0.7$ 에 따라 FRP 극한하중과 썩기 앞굽 양 끝의 응력집중으로 발생하는 파단하중과의 비인 최대 하중비율을 나타냈다. 해석결과가 실험결과에 비해 정착구의 성능을 과소평가 하였는데, 이것은 사용된 FRP 판의 실제 강성과 극한응력이 해석에 사용된 강성과 극한 응력에 비해 크기 때문이다. 이와 같은 입력 물성치의 오류를 감안한다면 3차원 유한요소 해석이 정착구의 파단하중을 계산하는 데 비교적 정밀함을 알 수 있다.

표 3. 최대 하중 전달 능력 비교

구분	μ_2	파단하중	파단하중/FRP 극한하중
실험결과		135.85 kN	80.9 %
해석결과	0.7	121.14 kN	72.1 %
	0.65	114.75 kN	68.3 %
	0.6	114.20 kN	68.0 %

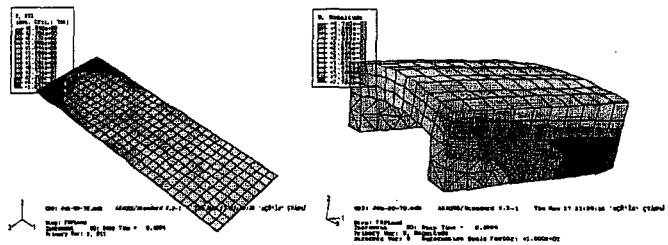


그림 5. FRP 판, 가이드의 처짐 형상 및 S11 응력분포

4. 결론

신뢰성있는 보강설계와 보강성능 확보를 위해서 비부착 공법이 제안되고 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 비부착 공법에서 활용할 수 있는 FRP 판용 썩기형 정착장치를 개발하였다. 개발된 정착장치는 실험 결과 개발된 썩기는 보강재의 인장강도의 약 80% 까지 지지할 수 있어 일반적인 부착공법 보다 보강재의 성능을 효율적으로 이용한다. 향후 정착장치가 설치되는 부분에 대한 국부적인 영향에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 노후 교량의 성능향상 기술 개발의 과제 지원금에 의해 수행된 것입니다.

참고문헌

1. T.I. Campbell, N.G. Shrive, K.A. Soudki, A. Al-Mayah, J.P. Keatley, and M.M. Reda, "Design and evaluation of a wedge-type anchor for fiber reinforced polymer tendons," Can. J. Civ. Eng. Vol. 27. p 285-992. 2000.