

조립식 영구 쏘일네일링 공법의 개발을 위한 FRP평판의 휨해석에 관한 연구

최훈* · 주형중** · 남정훈** · 윤순중***

A Study on the Flexural Analysis of FRP Plate to Develop Fabricated Permanent Soil Nailing System

H. Choi*, H. J. Joo**, J. H. Nam**, and S. J. Yoon***

Key Words: Fabricated Permanent Soil Nailing System, FRP Plate, Soil Nail, Curved FRP Plate, Prestress

Abstract

Application of the soil nailing system is continuously extended to stabilize excavations and slopes. Although there are many applications in the construction site, the system is still needed to improve its mechanical performance and durability. So, the use of FRP for this system can be an alternative for the conventional system. Recently, there has been a greatly increased demand for the use of FRP (fiber reinforced plastic) in civil engineering applications due to their superior mechanical and physical properties. This paper presents an experimental and theoretical study on the flexural behavior of FRP plate to develop fabricated permanent soil nailing system. In this study, mechanical properties of FRP plate have been investigated. Rectangular FRP plates that is simply supported and uniformly loaded over the area of a circle at the center of plate are analyzed by experiment, classical plate theory, and finite element method. From the results of analysis we can determine the shape of curved FRP plate which will exert certain amount of prestressing force in soil nail.

1. 서론

현재 절토사면의 보강, 자연사면의 보강, 기존 석축의 보강, 기존구조물의 기초보강 등에 적용되고 있는 쏘일네일링 공법은 강제 쏘일네일을 주로 사용하여 전면벽체 전체를 일체로 시공하고 있다. 이러한 공법은 시간이 경과함에 따라 강재가 부식하여 시스템 전체의 기능을 저하시킬 뿐만 아니라, 시공면적의 제약 및 공사기간을 연장시키는 요인이 된다. 따라서, 부식에 대한 저항성과 공사기간을 단축시킬 수 있는 쏘일네일링 공법 개발의 필요성이 대두되고 있는 실정이다.

본 연구는 이러한 단점들을 보완하기 위해 제안된

조립식 영구 쏘일네일링 공법 개발의 일부이다. 제안된 공법은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 부식에 저항성이 큰 Tube형태의 FRP쏘일네일과 공장에서 제작한 콘크리트 패널을 전면벽체로 사용한다.

본 연구는 콘크리트 패널과 사면을 밀착시켜 추가 사면구속력을 얻을 수 있도록 FRP쏘일네일에 약간의 프리텐션을 가할 수 있는 FRP판의 탄성복원력을 이용한 새로운 네일 두부정착 시스템을 개발하는데 목적을 두고 있다.

Fig. 2에 보여 지는 바와 같이 곡면 FRP판에 쏘일네일의 두부를 정착시킨 후 FRP판에 탄성범위 내의 하중을 가하면 곡면 FRP판은 힘을 받아 변형을 일으켜 평평한 상태가 되며, 이때 볼트 등을 이용하여 고정시키면 곡면 FRP판의 휨탄성복원력 때문에 쏘일네일은 인장력을 받게 되어 콘크리트 패널을 사면에 밀착시켜주는 효과를 얻게 된다.

본 연구는 곡면 FRP판의 개발 초기단계로서, FRP평판의 휨거동을 조사하기 위해 네 변이 단순

* 홍익대학교 토목공학과 대학원 석사과정
** 홍익대학교 토목공학과 대학원 박사과정
*** 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수

지지되어 있고 중앙에 원형 등분포하중을 받는 FRP평판의 휨거동을 이론 및 휨실험을 수행하여 조사하였다. 또한, FRP평판의 해석결과를 사용하여 곡면 FRP판을 모델링한 후 유한요소해석을 수행하였다.

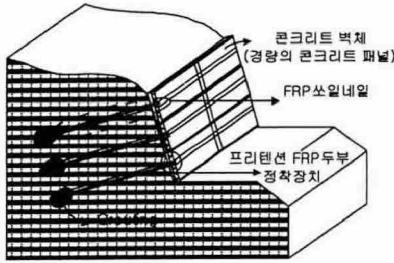


Fig. 1 조립식 영구 쏘일네일링 공법

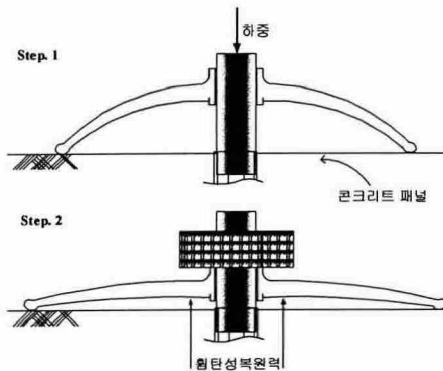


Fig. 2 프리텐션 FRP두부 정착장치

2. 재료의 역학적 성질

본 연구에서 실험에 사용된 FRP평판의 보강섬유는 Chopped Strand Mat 형태의 유리섬유(glass fiber)이며, 매트릭스는 폴리에스터이다. 섬유함유율은 중량비 70%이고, Hand Lay-up으로 제작되었다. FRP평판의 두께는 5 mm, 8 mm, 12 mm이고, 한 층의 두께는 1 mm이다. FRP평판 제작에 사용된 보강섬유는 일정한 방향성이 없으므로 FRP평판을 등방성 재료로 간주하였고, 인장시험을 통하여 재료의 역학적 성질을 조사하였다. 인장시험 시편의 폭은 50 mm이며, 각 두께에 대하여 6개씩 총 18개를 제작하였다. 인장시험을 통하여 결정된 인장강도, 인장탄성계수 및 피아송비는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 인장실험 결과

Specimen	Tensile Strength	Modulus of Elasticity	Poisson's Ratio
5 mm	881.60 kgf/cm ²	74,534 kgf/cm ²	0.335
8 mm	1029.17 kgf/cm ²	84,504 kgf/cm ²	0.340
12 mm	968.05 kgf/cm ²	79,592 kgf/cm ²	0.340

3. FRP평판의 휨해석

본 연구에서는 쏘일네일의 정착단의 크기 및 형태를 고려하여 네 변이 단순지지되어 있고, 중앙에 직경 6 cm인 원형 등분포하중을 받는 20 cm × 20 cm 사각판을 대상으로 휨해석을 수행하여 그 결과를 실험결과와 비교, 분석하였다.

네변이 단순지지되어 있고, 판의 중앙에 원형 등분포하중을 받는 일반적인 직교이방성 사각판의 처짐식⁽¹⁾은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w = \frac{1}{\pi^4 D_{mn}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (1)$$

식 (1)에서, a_{mn} 는 처짐량을 나타내는 임의의 상수로서 하중의 크기와 경계조건에 따라 달라지고 D_{mn} 는 FRP평판의 휨강성 및 비틀림강성을 나타내는 상수이다. a, b 는 각각 FRP평판의 가로와 세로 길이이고, m 과 n 은 x 축과 y 축 방향의 half-sine곡선수를 나타내는 정수이다.

본 연구에서 대상으로 한 FRP평판을 등방성으로 가정하였기 때문에 섬유배치방향의 탄성계수인 E_{11} 과 섬유배치직각방향의 탄성계수인 E_{22} 를 동일하게 적용하면 식 (1)로부터 중앙에 원형 등분포하중의 크기에 따른 중앙부의 변형상태를 파악할 수 있으며 GTSTRUDL를 사용한 유한요소 해석 결과와 유사함을 확인하였다.

4. FRP평판의 휨실험

FRP평판의 휨실험을 수행하기 위한 시편은 Fig. 3에서 보여주고 있는 바와 같이 두께별로 3개씩 총 9개의 시편을 제작하였다.

휨실험에서 각 변의 경계조건은 Fig. 4에서 보여주고 있는 바와 같이 강재 사각 틀을 제작하여 네 변이

지지되도록 하였고, 하중은 FRP평판의 중앙에 직경 6 cm의 원통형 강재를 사용하여 재하하였다.

FRP평판 중앙부 아래에 LVDT를 설치하여 하중 변화에 따른 FRP평판의 중앙부 처짐을 측정하였고, 데이터 수집은 컴퓨터와 연결된 TDS-302를 사용하였다.

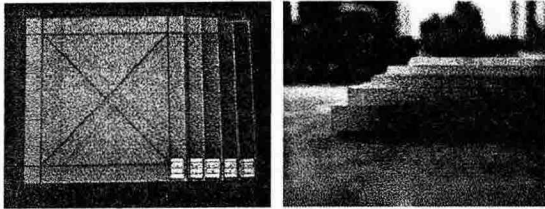


Fig. 3 FRP평판

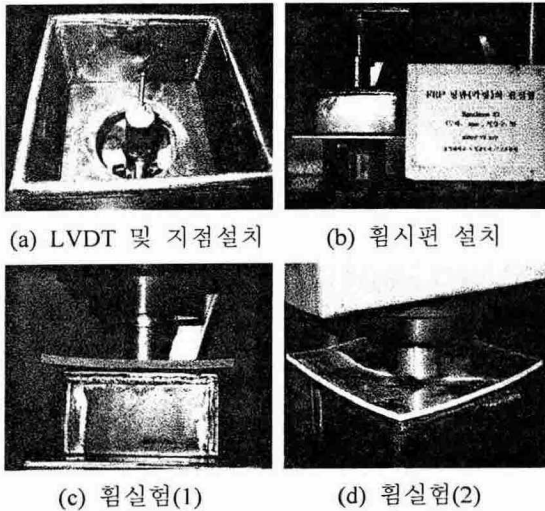


Fig. 4 FRP평판의 휨 실험

5 mm 평판은 하중재하 초기단계인 0.1 tonf 이하에서 대각선 방향으로 균열이 발생하였고, 균열 폭이 증가하면서 파괴되는 현상을 나타내었다. 8 mm, 12 mm 평판은 하중이 증가함에 따라 FRP평판 중앙부에서 매트릭스에 균열이 발생하다가 판 표면에서 층간 박리현상이 일어나면서 파괴되었다. 휨실험 결과로부터 5 mm 이하의 얇은 FRP판을 쏘일네일링 시스템에 사용하면 0.1 tonf 미만의 하중에서 파괴되므로 실제 쏘일네일에 작용하는 긴장력은 미소하다. 따라서, 쏘일네일 두부정착장치에서 FRP판의 두께는 실제 쏘일네일에 적용할

8 mm, 12 mm FRP판을 대상으로 하였고, 해석결과를 FRP평판의 휨해석 및 휨실험결과와 비교, 분석하였다.

5. 곡면 FRP판의 유한요소해석

Fig. 2에서 보여준 곡면 FRP판의 모양은 FRP평판의 휨해석 결과로부터 하중이 작용했을 때 처진 모양과 동일한 모양으로 모델링하였다. 즉, 하중을 단계별로 증가시켜 각 하중단계에서 평판의 처진모양을 모델링한 것이다. 이와 같이 모델링한 판의 모양은 Fig. 5에 나타내었고, 사용된 유한요소는 GTSTRUDL의 SBHQ6이며, 각 변의 경계조건은 단순지지이다.

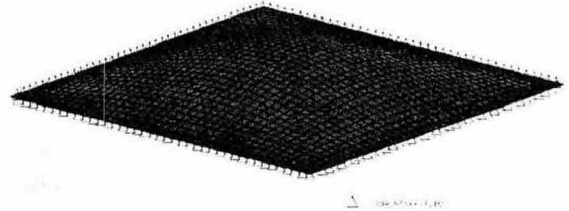


Fig. 5 곡면 FRP판의 모델링

유한요소해석은 두께가 각각 8 mm, 12 mm인 곡면 FRP판을 모델링하여 수행하였다. 단순지지된 사각판의 중앙에 원형 분포하중을 가하면 하중의 크기에 따라 처진모양은 달라지게 되므로 본 연구에서는 하중을 8단계로 구분하여 각 하중단계에서의 처진모양과 동일한 곡면판을 모델링하였고, 하중은 각각의 하중단계별로 처짐을 발생하게 하는 크기의 하중을 재하하였다. 즉, 1 tonf의 원형분포하중을 재하했을 때 처진모양과 동일하게 Fig. 5와 같이 모델링한 후 1 tonf의 하중을 Fig. 5에 나타난 유한요소모델의 상부 중앙에서 직경 6 cm의 원형 분포하중으로 재하하였다.

6. 결과비교

본 연구에서 수행한 쏘일네일 FRP두부정착에 사용할 FRP평판의 휨해석 및 실험결과는 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6(a), (b)에 나타낸 것과 같이 FRP평판의 두

께가 8 mm, 12 mm인 경우는 이론식, 유한요소해석, 실험에 의한 결과가 서로 근접함을 알 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 FRP평판의 휨해석을 통해서 프리스트레스를 도입하기 위한 곡면 FRP판을 개발하기 위한 그 초기 단계로서 직사각형 FRP평판과 곡면 FRP판의 휨거동을 조사하였다. FRP평판의 이론적 해석결과와 휨실험 결과 및 곡면 FRP판의 해석결과가 서로 일치하는 경향을 나타내는 범위는 FRP판의 두께가 각각 8 mm, 12 mm일 때 하중이 0.5 tonf, 1.0 tonf 이하이다. 따라서, FRP판의 두께에 따라 하중초기 단계에서는 FRP평판의 휨거동을 통해 곡면을 가진 FRP판의 거동을 예측할 수 있고, 쏘일네일에 도입 가능한 프리텐션 하중의 크기도 예측하여 결정할 수 있다. 즉, 프리텐션 크기가 결정되면 판의 곡률과 두께를 결정할 수 있게 된다.

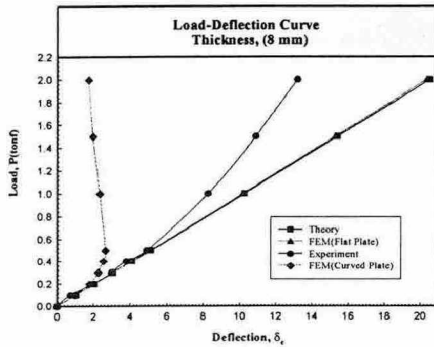
쏘일네일링 시스템의 두부정착장치인 곡면 FRP판의 설계를 위해서는 다양한 두께 및 재료의 역학적 성질을 가지는 판에 대한 휨거동 및 실험에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

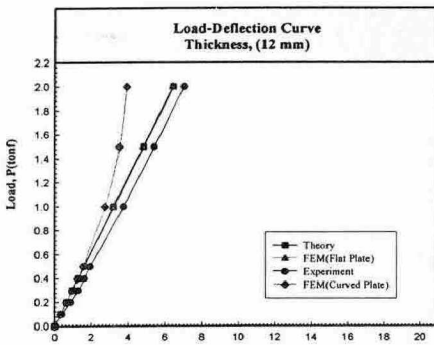
본 연구는 한라건설(주)의 "조립식 Soil Nailing 공법 개발"과제와 한국과학재단의 특정기초연구(No. R01-2002-000-00308-0)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Gibson, R. F. (1994). *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill, New York.
- (2) GTSTRUDL (2002). *GTSTRUDL User's Manual*, Latest Revision, K, May, GTICS Systems Laboratory, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
- (3) Timoshenko, S. P. and Woinowsky-Krieger, S. (1976). *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill, New York.
- (4) Ugural, A. C. (1999). *Stresses in Plates and Shells*, McGraw-Hill, New York.
- (5) 남정훈 (2000). "적층판이론을 적용한 Radiata Pine 거푸집용 합판의 휨해석," 석사학위논문, 홍익대학교 대학원 토목공학과.



(a) 하중-처짐 관계(두께 8 mm)



(b) 하중-처짐 관계(두께 12 mm)

Fig. 6 FRP평판 및 곡면 FRP판의 하중-처짐 관계

곡면 FRP판의 휨실험 결과 두께 8 mm의 FRP판의 경우 Fig. 6(a)와 같이 0.5 tonf 이하의 하중에서는 평판일 때와 유사한 거동을 나타내었으나, 0.5 tonf 이상의 하중에서는 하중이 증가해도 처짐은 증가하지 않았다. 이러한 현상은 곡면 FRP판의 곡률이 증가할수록 곡면 FRP판에 작용하는 면내력(in-plane force)이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 12 mm판의 경우에는 Fig. 6(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 작용하중이 1.5 tonf 이하에서는 FRP평판의 처짐과 곡면 FRP판의 처짐은 거의 일치함을 알 수 있다. Fig. 6(a), (b)에서 8mm 곡면 FRP판과 비교하여 12 mm 곡면 FRP판의 유한요소해석 결과와 FRP평판의 이론적 해석 및 실험결과가 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있으며, 이는 8 mm 곡면 FRP판 보다 12 mm 곡면 FRP판의 곡률이 작기 때문인 것으로 생각된다.