

Strain Wedge Model을 이용한 지반-네일의 상호작용에 대한 연구

A Study on Interaction between Soil and Nail using SW Model

김홍택¹⁾, Kim, Hong-Taek, 강인규²⁾, Kang, In-Kyu, 김진홍³⁾, Kim, Jin-Hong
전찬우⁴⁾, Jeon, Chan-Woo

¹⁾ 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept' of Civil Eng., Hong-Ik University

²⁾ (주)브니엘 컨설턴트 책임기술자, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

³⁾ (주)한석 엔지니어링 상무이사, Director/P.E. Geotechnical Div. Hansuk Eng. Co., Ltd.

⁴⁾ 홍익대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Dept' of Civil Eng., Hong-Ik University

SYNOPSIS : In the design and analysis of soil nailed slope, interaction between soil and nail is one of important problems. In the present analysis approaches for the interactions have developed a elastic analysis approach or a plastic analysis approach. However these approaches are not able to estimate the general interaction between soil and nail. In this study the general interaction between soil and nail using the strain wedge model is proposed. Also results of comparison between the proposed method and full scale test results by Gassler(1976) and large scale experimental results at Oxford University are shown in good agreements.

Key Words : Strain wedge model, Soil-nail interaction, Stress level

1. 서론

지반-네일의 상호작용은 쏘일네일 보강사면의 설계 및 해석에 있어서 중요한 부분이며, 이에 대한 지금까지의 연구로는 탄성해석을 기초로 한 Schlosser 등(1983)의 연구와 소성해석을 기초로 한 Pedley 등(1990)의 연구가 있다. 그러나 이러한 해석은 지반과 네일이 모두 탄성영역 내에 존재하거나, 또는 지반과 네일이 모두 소성영역 내에 존재할 경우에 대한 이론적인 접근으로 일반적인 지반-네일의 상호작용은 해석할 수 없는 한계가 있었다.

본 연구에서는 변형률 썩기(Strain Wedge)모델을 적용하여 지반의 변형정도에 따라 발휘되는 지반-네일의 3차원적인 상호작용을 평가할 수 있는 일반적인 지반-네일의 상호작용에 대한 이론적인 접근방법을 제시하였다. 즉 변형률 썩기모델을 적용할 경우 지반의 변형정도를 고려함으로써 지반은 소성상태이나 네일이 탄성영역 내에 있을 경우 또는 그 반대의 경우 등에 대한 일반적인 지반-네일의 상호작용을 평가할 수 있다.

본 연구에서 소개된 변형률 썩기모델은 횡하중을 받는 말뚝의 3차원적인 거동을 탄성보법(beam on elastic foundations)과 연관시켜 해석함으로써, 지반-말뚝 사이의 복잡한 3차원적인 상호작용을 1차원적으로 단순화시키기 위해 개발된 모델이다. 본 연구에서는 지반의 변형정도에 따라 발휘될 수 있는 지반의 수동저항으로부터 쏘일네일에 작용하는 휨모멘트를 Gassler(1987)의 현장실험결과 및 Oxford 대학(1990)의 실내모형실험결과와 비교하여 변형률 썩기모델의 적용성을 평가하였다.

2. 변형률 썩기(Strain Wedge) 모델

변형률 썩기모델 이론은 Norris(1986)가 횡하중을 받는 연성 말뚝의 반응을 예측하기 위해 제시한 것으로, 말뚝이 횡하중을 받을 때 아주 복잡한 3차원적 지반-말뚝 상호작용을 1차원적 Beam on Elastic Foundation 해석방법에 이론적으로 연관시켜 해석을 간단히 수행할 수 있다. 여기서, Strain Wedge model이론의 개념을 개략적으로 정리하면 다음과 같다.

지반에 설치되어 있는 말뚝이 횡하중을 받아 회전하게 되면 말뚝전면에 그림 1과 같이 수동토압썩기(passive pressure wedge)가 형성되면서 수평변형률 ϵ 이 wedge의 내부에 발생되고 이 변형률은 그 발생깊이에서 wedge의 외부선단 전면에서 수평응력변화 $\Delta\sigma_h$ 를 일으키게 된다. 이 수평응력변화와 더불어 말뚝측면을 따라 발생하는 전단응력은 그 깊이에서의 말뚝의 단위길이당 반력 P_0 에 상응한다. 이러한 원리로부터 Beam on Elastic Foundation 해석방법으로 구할 수 있는 지반반력계수 $E_s(=P/y)$ 와 wedge 내부 흙의 응력-변형률 거동관계로부터 얻을 수 있는 체적탄성계수 $E(=\Delta\sigma_h/\epsilon)$ 의 상호연관성을 얻게 된다. 따라서 얻어진 지반반력계수에 탄성보법을 적용할 경우 발생된 변형률에 따른 말뚝의 회전정도 ($y = A_y P_0 T^3/EI + B_y M_0 T^2/EI$)와 모멘트 변화($M = A_m P_0 T + B_m M_0$) 등을 추정할 수 있다.

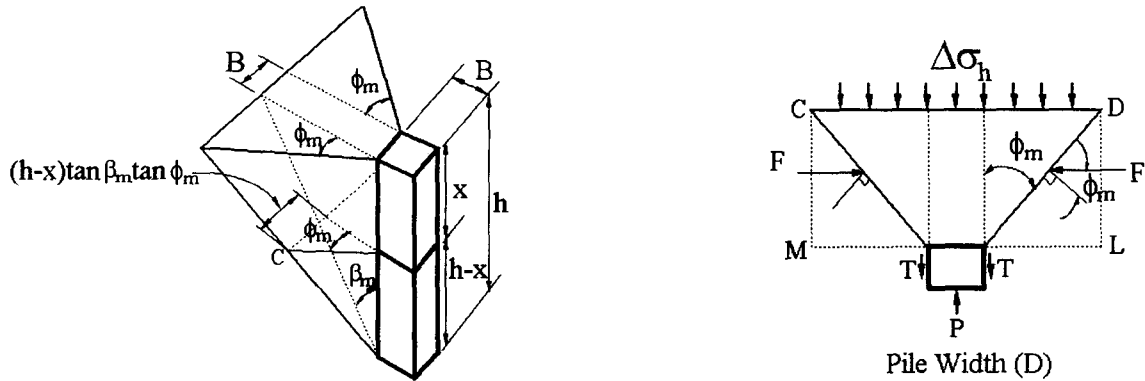


그림 1. Strain Wedge model의 개요도

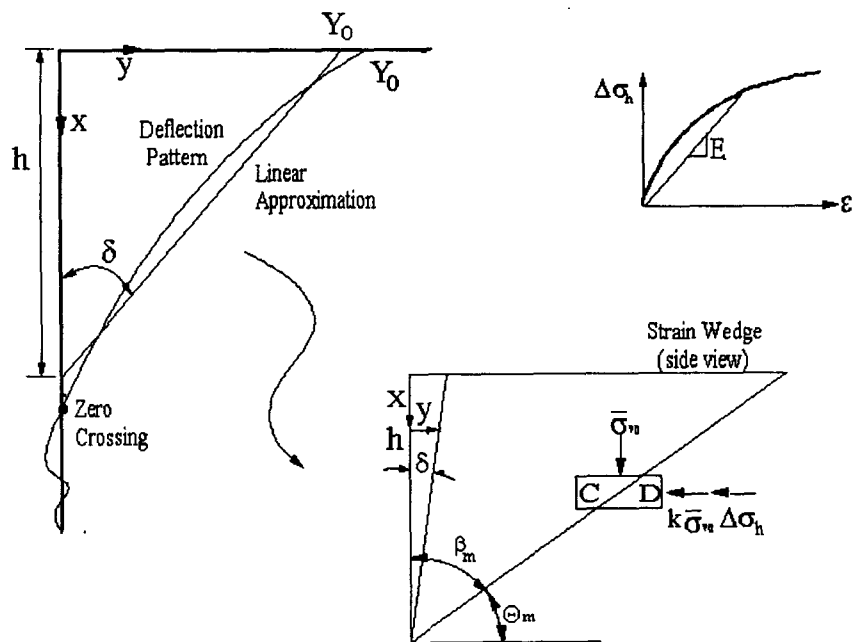


그림 2. 말뚝의 회전정도와 변형률 썩기의 상관관계

Strain Wedge model은 썩기경사각, $\beta_m (=45+ \phi_m/2)$, 썩기깊이, h , 썩기각 ϕ_m , 그리고 말뚝측면을 따라 발생하는 측면전단저항으로 정의되며 임의의 하중에 대한 썩기의 비틀림은 전단변형을 Mohr'circle를 이용하여 식(1)과 같이 나타낸다.

$$\frac{\gamma}{2} = \delta = (1 + \nu) \frac{1}{2} \sin 2\theta_m \cdot \epsilon = \frac{3}{5} \epsilon \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{5}{3} \delta \quad (\delta \approx y_0/h)$$

또한, 말뚝이 움직이는 방향으로의 수평방향 힘의 평형을 고려하면 식(2)와 같다.

$$p = \Delta\sigma_h \overline{CDS}_1 + 2\tau BS_2 \quad (2)$$

여기서, S_1 과 S_2 는 형상계수로 사각형말뚝에서는 1이고 원형말뚝에서는 각각 0.75와 0.5이며 P/B 비가 $\Delta\sigma_h$ 에 어떤 인자, A 를 곱하여 얻은 값에 상응하는 썩기전면부 평균응력으로 취해질 수 있다.

$$p/B = A\Delta\sigma_h \quad (3)$$

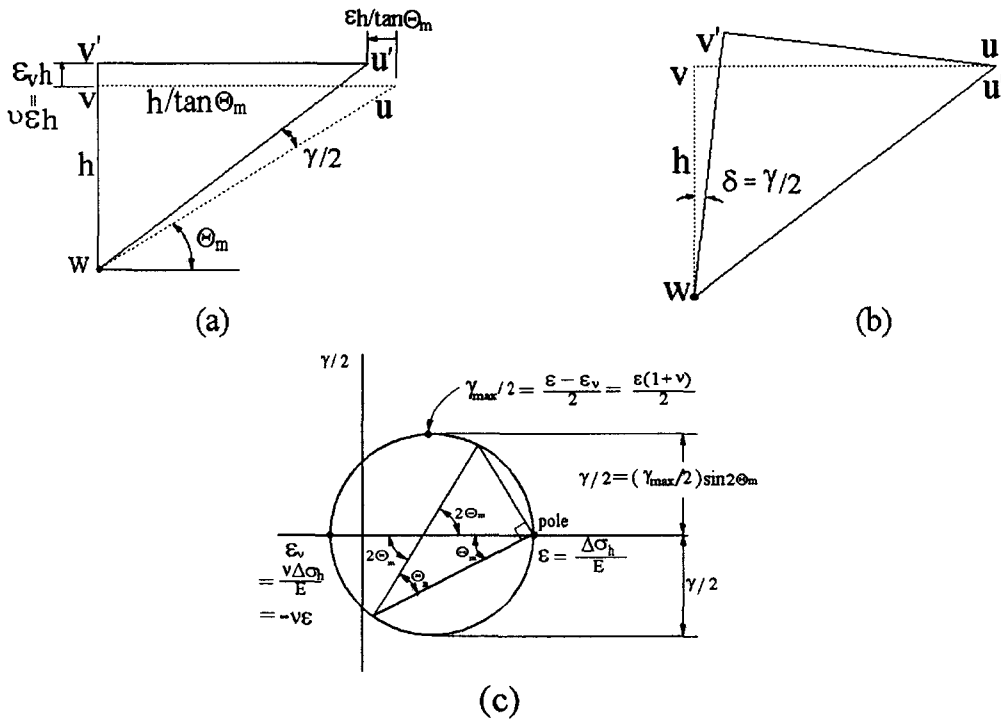


그림 3. 수동썩기의 비틀림

탄성보법으로부터 나온 관계식, $p = E_s y$ 와 응력-변형을 거동으로부터 나온 관계식, $\Delta\sigma_h = E\epsilon$ 이 식(3)에 대입되면 $E_s y/B = AE\epsilon$ 의 관계가 성립되며 말뚝의 편향이 선형이라 가정하면 다음과 같이 변형률, ϵ 가 제거된 식(4)가 얻어진다.

$$E_s = \frac{A}{(h-x)} \phi BE \quad \text{또는} \quad E_s = NE \quad (4)$$

이로부터, 지반반력계수, $E_s (= P/y)$ 와 썩기내부 지반의 응력-변형을 거동으로부터 얻은 체적탄성계수, $E (= \Delta\sigma_h/\epsilon)$ 의 상호연관성을 구할 수 있다.

3. 실측치와의 비교

3.1 Gassler(1976)의 현장실험결과와의 비교

본 연구에서 제시된 변형을 썬기모델의 적용성을 검증하기 위해 파괴시 쏘일네일의 휨에 의한 휨모멘트의 현장계측결과(Jewell, 1990)와 비교·분석하였다. Gassler가 수행한 현장실험결과는 그림 4와 같으며, 변형을 썬기모델에 의한 지반-네일의 상호작용을 평가하기 위한 입력자료는 표 1과 같다.

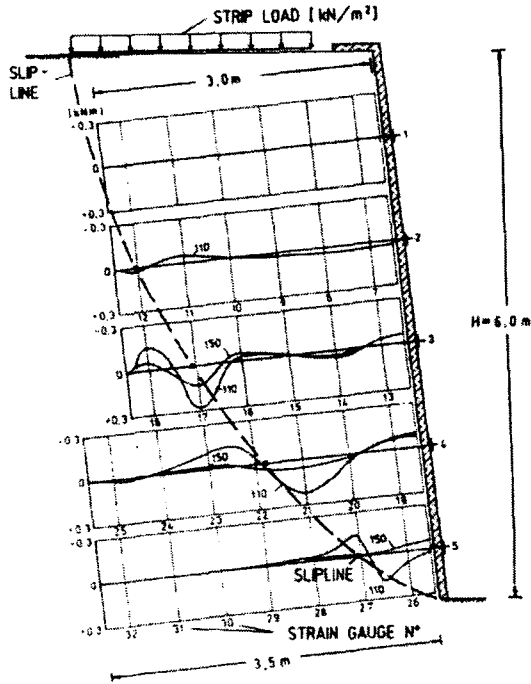
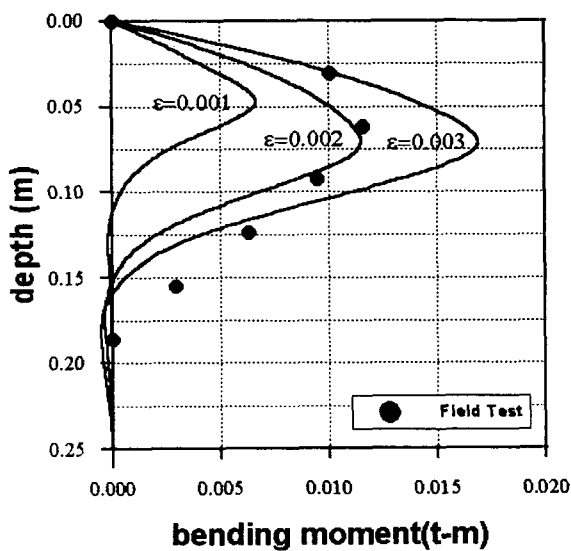


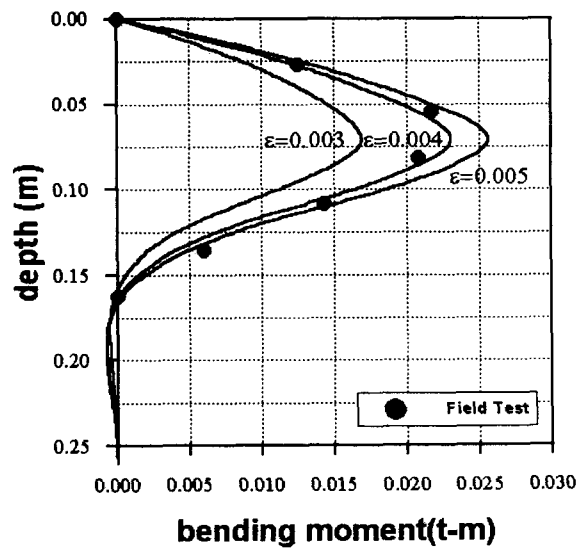
그림 4. 파괴시의 쏘일네일에 작용하는 휨모멘트

표 1. 해석에 필요한 입력변수

네 일		지 반	
철근의 직경	22mm	단위중량	1.6t/m ³
천공직경	55mm	내부마찰각	40.5°
철근의 항복강도	4200kg/cm ²	상재하중	11t/m ² 15t/m ²
SW Model 입력변수			
$\epsilon_{50} = 0.003, EI = 5.43 \times 10^7 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$			



(a) 파괴초기시



(b) 파괴진행시

그림 5. 현장실험결과와의 비교

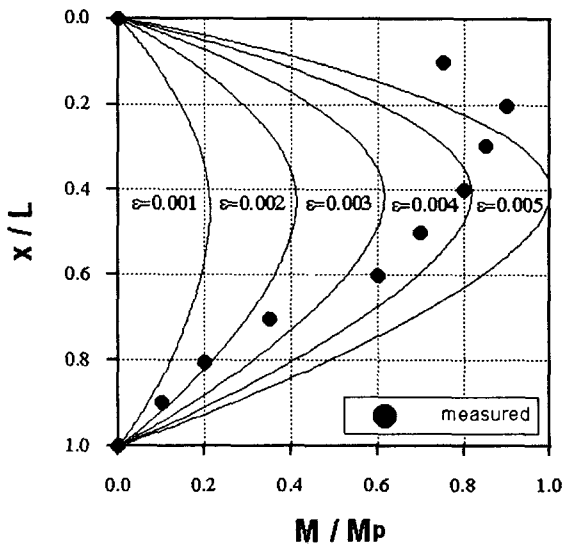
No. 4 네일의 경우에 대하여 쏘일네일 벽체의 파괴초기시와 파괴진행시 현장에서 측정된 네일의 길이에 따른 휨모멘트의 분포와 본 연구에서 제시한 변형을 썩기이론으로부터 계산된 네일의 휨모멘트를 비교한 결과 그림 5와 같았다. 그림 5(a) 쏘일네일 벽체의 파괴초기시 No. 4 네일에 작용하는 휨모멘트는 본 연구에서 제시된 변형을 썩기모델에서 지반변형률 $\epsilon=0.002$ 일 때 거의 일치하는 경향을 나타냈으며, 그림 5(b) 쏘일네일 벽체의 파괴진행시의 경우에는 지반변형률 $\epsilon=0.004$ 일 때와 거의 일치하는 경향을 나타냈다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 제시한 변형을 썩기모델은 파괴가 진행되면서 변화되는 지반-네일의 상호작용을 기존의 방법과는 달리 지반의 변형정도에 따라 일반적으로 모델링할 수 있는 것을 알 수 있었다.

3.2 Oxford 대학(1990)의 대형실내실험결과와의 비교

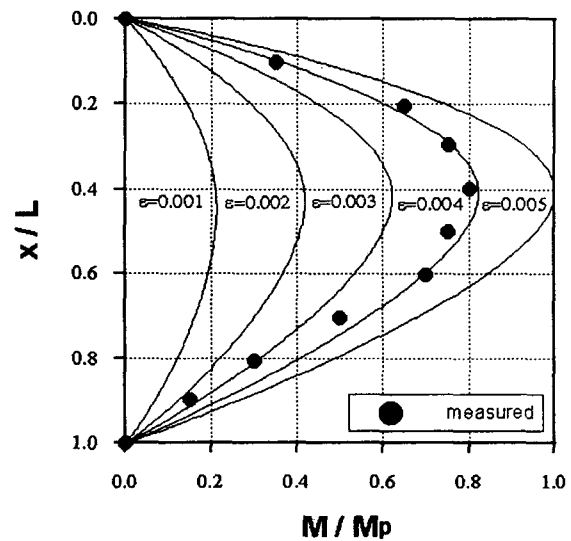
지반-보강재 사이의 상호작용을 규명하기 위해 Oxford 대학에서 1990년에 수행한 대형실내실험결과(Pedley 등, 1990)와 본 연구에서 제시된 변형을 썩기모델의 해석결과를 비교한 결과 그림 6과 같았다. 표 2는 본 비교를 위해 사용된 입력변수이다.

표 2. 해석에 필요한 입력변수

네 일		지 반	
철근의 직경 (D)	15.9mm 25.4mm	단위중량	1.8t/m ³
길이(L)	920mm	내부마찰각	46°
철근의 항복강도	4000kg/cm ²	상재하중	10t/m ²
SW Model 입력변수			
$\epsilon_{50} = 0.003, M_p = 2.06\text{kg} \cdot \text{cm}$			
$EI = 6.2 \times 10^5 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$ (D=15.9mm인 경우)			
$EI = 4.0 \times 10^6 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$ (D=25.4mm인 경우)			



(a) D=15.9mm인 경우



(b) D=25.4mm인 경우

그림 6. 대형실내실험결과와의 비교

네일의 직경 $D=15.9\text{mm}$ 인 경우 대형실내실험결과 측정된 휨모멘트는 본 연구에서 제시된 변형률 썩기모델에서 지반변형률 $\varepsilon=0.005$ 인 상태와 유사한 경향을 나타냈으며(그림 6(a)), 네일의 직경 $D=25.4\text{mm}$ 인 경우에는 지반변형률 $\varepsilon=0.004$ 인 상태와 유사한 경향을 나타냈다. 이상의 결과로부터 보강재의 강성이 증가함에 따라 지반의 변형이 감소함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 변형률 썩기이론을 이용하여 지반-네일의 상호작용을 평가할 수 있는 해석방법을 제시하였으며, 이에 대한 검토자료로 Gassler의 현장실험 결과 및 Oxford 대학의 대형실내실험결과와 서로 비교한 결과 상당히 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 본 연구에서 제시한 변형률 썩기모델은 기존의 방법과는 달리 지반의 변형정도에 따라 지반-네일의 상호작용을 평가할 수 있는 것을 알 수 있었다. 향후 이론적인 부분을 좀더 보완하여 네일에 작용하는 전단력의 예측 및 지반의 변형정도에 따른 전체적인 썩일네일 벽체의 안정성을 평가할 수 있는 해석법의 개발이 진행될 예정이다.

참고문헌

1. Ashour, M., Norris, G. and Pilling, P.(1998), " Lateral loading of a pile in layered soil using the Strain Wedge model", *Jour. of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE*, Vol.124, pp.303-315.
2. Gowda, p.(1991), " Laterally loaded piles analysis for layered soil based on the Strain Wedge model", MS thesis, University of Nevada, Reno, Nev.
3. Jewell, R.A.(1990), " Review of Theoretical Models for Soil Nailing," Proc. of the International Reinforced Soil Conference : Performance of Reinforced Soil Structures, Glasgow, pp.265-275.
4. Norris, G.(1986), " Theoretically based BEF laterally loaded pile analysis", *Proc., Third Int. Conf. on Numerical Methods in Offshore Piling*, Editions Technip, Paris, France, pp.361-386.
5. Pedley, R., Jewell, R and Milligan, G.(1990), " A large scale experimental study of soil-reinforced interaction-Part I", *Ground Engineering*, Vol.23, No.9, pp.44-50.
6. Reese, L.(1977), " Laterally Loaded Piles: Program Documentation", *Jour. of the Geotech. Eng. Division, ASCE*, Vol.103, pp.287-305.