

## 식물뿌리의 극한 횡방향 저항력에 관한 수치해석적 연구

이승현<sup>1</sup>, 권오순<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>선문대학교 토목공학과, <sup>2</sup>한국해양연구원 연안개발에너지연구부

# Numerical Study on Ultimate Lateral Resistance of Roots of Vegetation

Seung-Hyun Lee<sup>1</sup> and Oh-Soon Kwon<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Civil Engineering, Sunmoon University

<sup>2</sup>Korea Ocean Research and Development Institute

**요약** 식물 뿌리의 극한 횡방향 저항력을 알아보고자 수치해석을 수행하였다. 수치해석으로 모사한 식물뿌리의 극한 횡방향 저항력은 해석에서 가정한 점착력값들에 따라 기존의 공동팽창이론에 의한 연구결과값과 지지력해에 의한 값 사이에 분포하였으며 비교적 지지력해에 의한 값에 가까웠다. 또한, 수치해석결과를 회귀분석하여 얻은 지지력계수  $N_c$ 는 33이었다. 수치해석 결과에 따르면 극한 횡방향 저항력에 대응하는 항복변위는 점착력값에 따라 뿌리 지름의 0.08~0.29배 범위의 값을 보여주는데 작은 점착력값에 대한 항복변위는 큰 말뚝 지름에 대한 기존의 연구결과에 근접한 값을 보여주었으며 점착력이 증가함에 따라 작은 말뚝지름(=1cm)에 대한 연구결과에 근접한 값을 보여주었다.

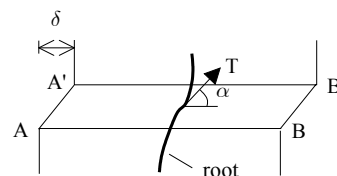
**Abstract** Numerical analysis were executed in order to investigate ultimate lateral resistance of roots of vegetation. Ultimate lateral resistances of roots obtained from the assumed values of cohesions were distributed between the values of the two kinds of the existing studies. The ultimate lateral resistance values were more close to those by the bearing capacity solution than those by the cavity expansion theory. Coefficient of bearing capacity determined by the numerical analysis was 33. Yielding displacements obtained from the numerical analysis were 0.08~0.29 times of the diameter of the root and those were overall close to the value of the existing study which was undertaken for the pile diameter of 1 cm.

**Key words** : Numerical analysis, Roots of vegetation, Ultimate lateral resistance, Yielding displacement

### 1. 서론

경사면에 있는 식물의 뿌리는 뿌리와 흙 사이의 상호 작용에 의해 보강효과를 발휘하게 된다. Lizzi (1982)는 이러한 점에 착안하여 뿌리말뚝 (root pile)을 개발하였으며 현재 넓은 범주의 소구경말뚝이 지반보강 목적으로 많이 쓰이고 있다. 식물이 식재되어 있는 사면의 미끄러짐면은 뿌리부분을 자르는 면을 따라 형성되거나 뿌리 끝단을 따르는 면을 따라 형성되는데 미끄러짐면을 따르는 전단파괴가 일어나기 위해서는 뿌리에 인장파괴 또는

인발파괴가 발생해야 한다. 그림 1은 뿌리가 있는 지반의 전단변형양상을 보여주고 있다.



[그림 1] 전단변형양상

[Fig. 1] Shape of shear deformation

\*교신저자 : 권오순(oskwon@kordi.re.kr)

접수일 11년 07월 04일

수정일 11년 08월 02일

게재확정일 11년 09월 08일

그림 1은 얇은 띠, AB-A'B'에 대해  $\delta$ 의 전단변위가 발생한 양상을 보여주고 있는데 전단저항력에 대해서 뿌리가 기여하는 부분( $s_r$ )은 다음과 같이 표현된다 (Waldron, 1977; Wu et al., 1979).

$$s_r = \sin \alpha (T/A) \tan \phi + \cos \alpha (T/A) \quad (1)$$

따라서 전체 전단강도는 다음과 같다.

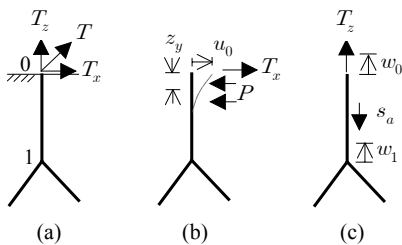
$$s = c + [\sigma + \sin \alpha (T/A)] \tan \phi + \cos \alpha (T/A) \quad (2)$$

식 (1), (2)에서  $\sigma$ 는 뿌리가 없는 경우 미끄러짐면에 작용하는 수직응력을 의미하고  $c$ 는 점착력을 의미하며  $\phi$ 는 전단저항각을 의미한다. 또한  $A$ 는 그림 1에서 AB단면의 단면적을 의미하고  $T$ 는 뿌리에 작용하는 힘을 의미한다. 식 (1)과 식 (2)에 나타나 있듯이 식물뿌리에 의한 전단강도를 평가하기 위해서는  $T$  값을 평가해야 하며 구체적으로는 극한 횡방향 저항력과 연직 방향 저항력을 알아야 하는데 이에 관해 식물뿌리와 같은 미소지름을 갖는 부재에 대한 연구는 많지 않다.

본 연구에서는 흙-뿌리 사이의 상호작용에 의한 뿌리의 횡방향 저항력에 대해 살펴보고 수치해석적으로 그 값을 평가하여 기존의 연구결과와 비교하여 보았다.

## 2. 흙-뿌리 사이의 상호작용

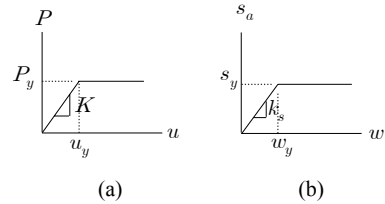
흙-뿌리 사이의 상호작용을 살펴보기 위해 그림 2와 같은 뿌리요소를 고려한다 (Wu et al., 1988).



[그림 2] 뿌리요소에 대한 하중과 변위  
[Fig. 2] Load and displacement of the root

그림 2(a)에 나타난 뿌리요소에 대해 절점 1은 고정되어 있는 것으로 가정하고 부재 0-1과 그에 인접한 지반에 그림 1에서와 같은 전단변위가 발생한 것으로 본다. 하중  $T$  ( $T_x, T_z$ )에 의한 뿌리요소의 변위는 그림 2(b)와 그림

2(c)에 나타나 있다.  $X$ 방향으로의 변위,  $u$ 에 대한 횡방향 저항력은  $P$ 이며 그림 3(a)와 같이 표현된다.



[그림 3] 저항력-변위 관계  
[Fig. 3] Resistance-displacement relationship

그림 3(a)에서 점  $(u_y, P_y)$ 는 항복점 즉, 극한 횡방향 저항력과 그에 대응하는 변위를 나타낸다. 뿌리요소의 횡방향 탄성거동에 대해서는 식 (3)이 만족된다.

$$EI \frac{d^4 u}{dz^4} + Ku = 0 \quad (3)$$

식 (3)에 대해서 그림 2(b)에 나타나 있는  $u_0$ 는 식 (4)와 같이 표현된다 (Scott, 1981).

$$u_0 = \frac{2T_x \lambda}{K} f(\lambda L) \quad (4)$$

식 (4)에서  $\lambda$ 는 말뚝 특성값이며 식 (5)에서와 같다.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}} \quad (5)$$

식 (3)~(5)에서  $K$ 는 지반반력계수,  $E$ 는 뿌리의 탄성계수,  $I$ 는 뿌리의 단면 2차모멘트,  $L$ 은 뿌리의 길이 그리고  $f(\lambda L)$ 은 무차원해를 의미한다. 그림 2(b)를 참조하여 깊이  $z_y$ 까지 소성상태가 되면 식 (6)이 성립된다.

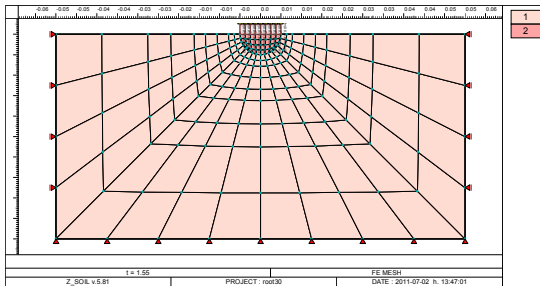
$$EI \frac{d^4 u}{dz^4} + P_y = 0 \quad (6)$$

뿌리의 횡방향 항복거동을 나타내는 식 (6)의 해를 구하기 위해서는 항복값,  $P_y$ 를 알아야 하는데  $P_y$ 를 지지력 개념으로 표현하면  $p_y = P_y/D$ 로 되고 여기서  $D$ 는 뿌리의 지름을 의미한다. 이후 극한 횡방향 저항력이라 함은  $p_y$ 를 의미한다. 그림 2(c)에 나타나 있는 연직력,  $T_z$ 에 대한 저항력을 고려함에 있어 절점 0과 1에서의 변위는  $w_0$

와  $w_1$ 으로 나타나 있다. 흙과 뿌리 사이의 전단저항력,  $s_n$ 는 미끄러짐량,  $w$ 의 함수로 그림 3(b)에 나타나 있다. 그림 3(b)에서  $k_s$ 는 뿌리를 따르는 미끄러짐에 대한 지반 반력계수를 나타낸다. Scott (1981)은 이러한 문제에 있어 유연말뚝에 대한 해를 구한 바 있다.

### 3. 수치해석 및 결과분석

식 (6)에 나타난 뿌리의 횡방향 항복값 즉, 극한 횡방향 저항력( $p_y$ )을 알아보기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 해석 프로그램은 상용 프로그램인 ZSOIL (2001)을 이용하였는데 그림 4에는 해석에 사용된 메쉬가 나타나 있다. 그림 4에서 1번 재료는 흙을 나타내고 2번 재료는 뿌리의 반단면을 나타낸다.



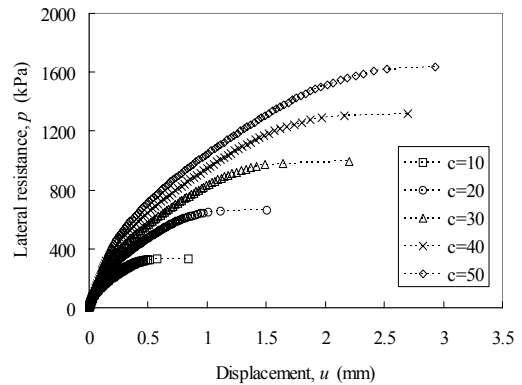
[그림 4] 유한요소 메쉬  
[Fig. 4] FEM mesh

해석시 뿌리의 지름은 1 cm로 고려하였으며 수평 및 연직방향으로의 경계조건으로는 뿌리 반경의 10배씩 되도록 하여 충분한 여유를 두었다. 해석에 적용한 흙과 뿌리에 대한 해석자료는 표 1에서와 같다. 표 1에서  $E_s$ ,  $\nu$ ,  $\gamma$ ,  $\phi$  그리고  $c$ 는 각각 탄성계수, 포아송비, 단위중량, 내부마찰각 그리고 점착력을 나타낸다.

[표 1] 해석재료의 물성값  
[Table 1] Analysis data

Material	Soil	Root
Model	EPP (Mohr-Coulomb)	Elastic
$E_s$ (kPa)	25,000	2,500,000
$\nu$	0.35	0.1
$\gamma$ ( $kN/m^3$ )	18	10
$\phi$ (degree)	30	-
$c$ ( $kN/m^2$ )	10,20,30,40,50	-

해석은 그림 4에 나타난 바와 같이 뿌리의 반단면에 항복이 발생할 정도의 크기를 갖는 등분포하중을 가하여 이루어지도록 하였고 해석결과로부터 얻은 횡방향 저항력-변위 관계로부터 극한 횡방향 저항력값을 결정하도록 하였다. 해석시에는 표 1에도 나타나 있지만 흙의 점착력을 10, 20, 30, 40, 50kPa로 변화시켜가며 점착력에 따른 극한 횡방향 저항력을 구하고자 하였다. 가정한 점착력에 대해 해석을 통해 구한 횡방향 저항력-변위 곡선은 그림 5와 같다.



[그림 5] 횡방향 저항력-변위 곡선  
[Fig. 5] Lateral resistance-displacement curve

그림 5에 나타난 횡방향 저항력-변위 곡선을 통해 볼 때 항복(횡방향 저항 발현)이 잘 나타남을 알 수 있다. 또한, 점착력이 증가할수록 횡방향 저항력과 그에 대응하는 변위가 증가함을 알 수 있다.

횡방향 저항력을 일반적인 지지력공식의 형태로 나타내면 식 (7)과 같다.

$$p_y = \frac{P_y}{D} = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma DN_\gamma \quad (7)$$

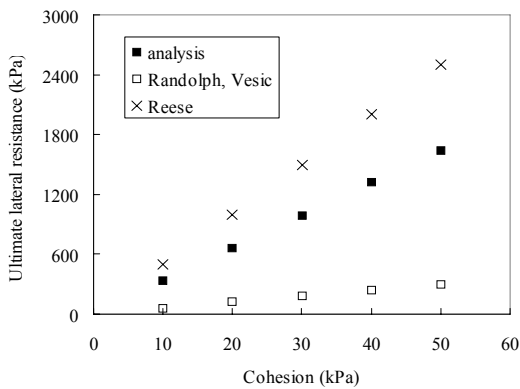
식물의 뿌리가 깊게 근입되어 있지 않고 뿌리의 지름이 작은 경우 식 (7)에서 우변의 두 번째항과 세 번째항은 첫 번째 항에 비해 상대적으로 무시할 수 있다. 따라서 지지력계수,  $N_c$ 만 고려할 수 있다. 그림 5로부터 점착력에 따른 극한 횡방향 저항력( $p_y$ )과 변위( $u$ )를 요약하여 나타내면 표 2에서와 같다. 표 2에는 뿌리의 지름에 대한 항복변위의 비( $u_y/D$ )가 함께 나타나 있다.

[표 2] 극한 횡방향 저항력과 항복변위

[Table 2] Ultimate lateral resistance and yielding displacement

$c$ (kPa)	10	20	30	40	50
$p_y$ (kPa)	333	660	990	1320	1635
$u_y$ (mm)	0.8	1.5	2.2	2.7	2.9
$u_y/D$	0.08	0.15	0.22	0.27	0.29

공동팽창이론 (Randolph and Houlsby, 1984; Vesic, 1972)에 따르면  $\phi = 30^\circ$  인 경우  $N_c$ 는 5~7 범위에 있으며 Reese 등 (1971)의 지지력 해에 따르면  $N_c$ 는 50정도의 값을 갖는다. 이상에서 나타난 바와 같이 기존의 연구결과와 수치해석결과를 비교하여 점착력에 따른 극한 횡방향 저항력을 나타내면 그림 6과 같다.



[그림 6] 극한 횡방향 저항력의 비교

[Fig. 6] Comparison of ultimate lateral resistance

그림 6을 통해 알 수 있듯이 수치해석에 의한 극한 횡방향 저항력은 Randolph와 Vesic에 의한 값들과 Reese 등에 의한 값들 사이에 있는데 비교적 Reese 등에 의한 값들에 가깝다. 수치해석 결과값의 회귀분석에 의하면  $N_c$ 는 33 정도이다. 몇몇 연구자들 (Reese and Welch, 1975; Reese, 1977)의 말뚝재하시험결과에 따르면 항복변위는 말뚝지름의 0.02~0.07배이었는데 시험에 사용된 말뚝지름은 35cm~75cm 이었다.

본 연구에서 고려한 뿌리와 같은 크기의 지름 1cm인 말뚝에 대한 기존의 연구결과에 따르면 항복변위는 말뚝지름의 0.4배 이었다 (Prakash and Saran, 1967). 따라서 기존 연구자들에 의한 말뚝의 항복변위는 말뚝지름의 크기에 큰 영향을 받는 것으로 보인다. 표 2에 나타난 수치해석 결과에 따르면 항복변위는 점착력값에 따라 뿌리

지름의 0.08~0.29배 범위에 있는데 점착력이 10kPa일 때의 항복변위는 앞에서 언급한 큰 말뚝 지름에 대한 연구결과에 근접한 값을 보여주며 이후 점착력이 증가함에 따라 작은 말뚝지름의 연구결과에 근접한 값을 보여줌을 알 수 있다.

#### 4. 결론

수치해석으로 모사한 식물뿌리의 극한 횡방향 저항력은 해석에서 가정한 점착력값들에 따라 기존의 공동팽창이론에 의한 연구결과값과 지지력해에 의한 값 사이에 분포하였으며 비교적 지지력해에 의한 값에 가까웠다. 또한, 수치해석결과를 회귀분석하여 얻은 지지력계수  $N_c$ 는 33이었다.

수치해석 결과에 따르면 극한 횡방향 저항력에 대응하는 항복변위는 점착력값에 따라 해석에서 고려한 뿌리의 지름에 대해 0.08~0.29배 범위의 값을 보여주는데 작은 점착력값에 대한 항복변위는 큰 말뚝 지름에 대한 기존의 연구결과에 근접한 값을 보여주었으며 점착력이 증가함에 따라 작은 말뚝지름(=1cm)에 대한 연구결과에 근접한 값을 보여주었다.

#### References

- [1] Lizzi, F., "The 'Pali Racice'(Root Piles)-A state of the art Report", Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, Thailand, 1982.
- [2] Prakash, S., and Saran, D., "Behavior of laterally loaded piles in cohesive soil", Proc. 3rd Asian Regional Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., 1, 235-238, 1967.
- [3] Randolph, M.F., Houlsby, G.T., "The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil", Geotechnique, England, 34, pp. 613-623, 1984.
- [4] Reese, L.C., Welch, R.C., "Lateral loading of deep foundation in stiff clay", J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 101(GT7), pp. 633-650, 1975.
- [5] Reese, L.C., "Laterally loaded piles: Program documentation", J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 103(GT4), pp. 287-385, 1977.
- [6] Scott, R.F., Foundation analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1981.
- [7] Vesic, A.S., "Expansion of cavities in infinite soil

- mass", J. Soil Mech. and Found. Engrg. Div., ASCE, 98(SM3), pp. 265-290, 1972.
- [8] Waldron, L.J., "The Shear Resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil", J. Soil Science Soc. Amer., 41, pp. 843-849, 1977.
- [9] Wu, T.H., McKinnell, W.P., III, and Swanston, D.N., "Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska", Can. Geotech. J., 16, pp. 19-33, 1979.
- [10] Wu, T.H., Ronald, M.M., Ronald, T.E. and Philip, E.B., "Study of Soil-Root Interaction", J. of Geotechnical Engr., Vol. 114, No. 12, ASCE, pp. 1351-1375, 1988.
- [11] ZSOIL user manual, Zace services Ltd., Laussane, Switzerland, 2001.

**이 승 현(Seung-Hyun Lee)**

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학

**권 오 soon(OSoon Kwon)**

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 한국해양연구원 재직

<관심분야>

지반조사, 기초공학