

## 근모량에 따른 식생호안의 전단강도와 침식특성 분석

# Analyses of Shear Stress and Erosion Characteristic in a Vegetated Levee Revetment with Root Fiber Quantity

최흥식<sup>1</sup> · 이웅희<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수

<sup>2</sup>정회원, 상지대학교 대학원 토목공학과 박사과정

Choi, Heung Sik<sup>1</sup> and Lee, Woong Hee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Department of Civil Engineering, Sangji University, Professor

<sup>2</sup>Member, Department of Civil Engineering, Graduate School, Sangji University, Ph.D. Course

**ABSTRACT:** This study analyzed shear stress and erosion characteristic of a vegetated levee embankment with root fiber quantity, which is an important factor for evaluating the stability of it. The averaged root fiber quantity in a vegetated levee revetment was measured by the sampler manufactured by this research. The *Phragmites Japonica Steud* which is somewhat dominant species in a vegetated levee embankment was selected as an experimental vegetation. As a result of experiment of each flow regime, the shear stress was increased while root fiber quantity was increased and the erosion rate was exponentially decreased as the root fiber quantity was increased. The erosion rate was exponentially decreased as the shear stress was increased which is shown that the increase of shear stress by root fiber quantity results in the increase of erosion resistance in a vegetated soil. The relationship between shear stress and erosion rate with root fiber quantity were analyzed and their regression equations were suggested with high determination coefficients. The hydraulic stability is governed by the increase of shear stress by root fiber quantity and the Froude number of flow characteristic in a vegetated levee revetment

**KEYWORDS:** Root fiber quantity, Vegetated levee revetment, Stability, Shear stress, Erosion rate

**요 약:** 본 연구는 식생호안의 안정성 평가에 중요한 인자인 식생 근모량에 따른 식생호안의 전단강도와 침식특성을 분석하였다. 식생호안의 평균근모량은 자체 제작한 채취기를 이용하여 측정하였다. 본 연구에서 사용된 식생은 식생호안에서 다소 우점종인 갈뽕리풀이다. 흐름 특성별 실험결과 근모량이 증가함에 따라 토양의 전단강도가 증가함을 확인하였고, 아울러 근모량의 증가에 따라 침식율은 지수함수적으로 감소함을 확인하였다. 식생토양의 전단강도가 증가함에 따라 침식율이 지수함수적으로 감소되어 근모량에 기인한 전단강도의 증가는 침식 저항능력의 증가를 가져왔다. 아울러 근모량에 따른 전단강도와 침식율의 상관분을 실시하여 높은 상관계수를 가진 식을 제시하였다. 식생을 가진 호안의 수리적 안정성에는 근모량의 증가에 의한 전단강도와 유수의 특성인 Froude수에 지배적임을 확인하였다.

**키워드:** 근모량, 식생호안, 안정성, 전단강도, 침식율

\*Corresponding author: yuki68024@sangji.ac.kr

## 서론

최근의 하천의 정비는 생태성이 강조된 자연형 하천으로의 복원이 많이 진행되고 있다. 자연형 하천으로의 복원을 위해서는 호안에 다양한 식생의 활착을 유도하고 있다. 그러나 이러한 식생호안은 친환경적 하천관리 공법으로 자주 사용하지만, 안정성의 측면에서 취약할 수 있다. 식생호안의 안정성은 토양 종류, 식생 활착 정도, 식생 밀도, 식생의 뿌리량, 길이 등 다양한 요소들에 의해서 지배되어 정확한 평가가 어렵다. 또한 식생호안은 식생뿌리에 의한 토양응집력과 그에 따른 호안 전단강도와 유수에 의한 호안침식의 관계에 지배되기 때문에 안정성 평가를 위해서는 식생과 토양의 응집력을 나타내는 근모량의 산정과 이에 따른 전단과 침식특성이 중요하다.

식생 및 근모에 의한 침식과 전단특성에 대한 연구로는 Wu et al. (1979)이 실험에 의한 민감도 해석으로 뿌리의 전단강도와 내부마찰각에 대한 연구를 통하여 뿌리에 의한 전단강도식을 제시하였다. Gray and Ohashi (1983)는 식생근모에 따른 보강토에 대한 이론과 힘의 평형과의 비교를 통해 보강토는 최대 전단력의 증가를 가져오며, 전단저항은 감소함을 확인하였다. 아울러 토양내부 근모의 경사각, 면적비, 길이 등에 따른 전단강도의 변화를 제시하였다. Ikeda and Izumi (1990)는 식생밀도가 높아질수록 호안경사가 증가할 수 있음을 이론적으로 증명하였다. Scholand et al. (1991)은 초본류 식생의 근모에 따른 침식방어 능력에 대하여 연구를 진행하였다. Milar and Quick (1993)은 사면 안정성에 관한 식에 호안의 식생, 압밀 (consolidation), 그리고 호안재료의 고착화 (cementation)를 고려한 수정식을 제안하고, 현장에 적용을 통하여 호안의 안정성이 증가됨을 확인하였다. 또한 일본의 건설성 (MOC, 2000)은 하천제방설계지침 (河川堤防設計指針)을 통하여 호안 침식 방지공으로 많이 사용되는 돌망태공, 식생블록공, 식생공에 대하여 외력·내력 산정에 의해 호안의 안정과 불안정 판단식을 제시하였다. Easson and Yarbrough (2002)는 RAR (Root Area Ratio) 방법을 이용하여 격자망을 이용한 근모의 개수를 파악하여 일정 면적 내 근모량 값을 산정하였다. 아울러 근모에 의해 강화된 토양과 근모가 없는 토양의 전단강도 비교를 통해 근모량에 따른 토양 전단강도를 분석

하였다. Micheli and Kirchner (2002)는 제외지 식생 구간의 침식에 대한 연구로 임의 영역안의 근모량의 개수와 전단강도와 상관관계를 분석하였다. 근모량 (g)/토양 (g)의 무차원 값과 전단강도의 상관관계를 분석하여 근모량의 증가가 전단강도의 증가함을 실험을 통하여 규명하였다. Pollen (2007)은 현장 실험을 통하여 토양의 뿌리보강 측면에서 수분조건과 전단응력과의 관계를 규명하였고, 식생 사면과 무식생 사면의 안정성을 비교하여 뿌리보강에 의한 안정성은 토양의 전단강도에 의해 결정되며, 식생이 있는 경우가 식생이 없는 경우보다 안전율이 더 크게 나타남을 확인하였다. Mafian et al. (2009)은 식생의 인장강도를 측정하여 인장강도의 증가에 따른 토양의 강화를 근모의 직경과의 관계로 규명하였다.

국내의 연구로 Yang and Lee (1998)는 실험을 통하여 하천 내 식생이 토양의 밀도를 증가시킴에 따른 세굴 영향과 침식저항을 분석하였다. Cho and Ahn (1998)은 식생뿌리에 의한 비탈면의 안정성 보강을 위하여 비탈면에서 생육이 가능한 참싸리 (*Lespedeza Cytrobotrya*)와 조릿대 (*Sasamprpha Purpurascens*), 참억새 (*Miscanthus Sinensis*)를 대상으로 뿌리의 인발실험을 실시하여 전단강도의 증가를 측정하였다. 뿌리의 직경이 커짐에 따라 인발강도가 커짐을 확인하였으며, 식생 종류에 따른 전단 저항력을 분석하였다. 또한 건설교통부 (MOCT, 2004)에서는 하천 호안관련 선진기술 개발을 위한 연구를 통하여 일본의 건설성에서 제시한 방법과 동일한 호안의 안정성 판단 방안을 제시하였다. 이를 토대로 Choi and Kim (2009) 우리나라의 대표적인 호안공법인 식생호안, 돌망태공, 호안블록공의 수리적 안정성 평가를 위한 Menu-driven 방식의 안정성평가 프로그램을 개발하였다.

식생의 근모에 따른 토양의 전단력 증가는 많은 연구가 있으나, 식생 근모량에 따른 토양의 전단강도와 식생 주변의 흙입자의 탈락에서 오는 침식특성과 식생호안의 안정성 평가기법에 대한 연구는 부족하다. 또한 식생호안의 안정성 판단을 위해 중요한 요소인 근모량의 채취방법과 산정에 대한 정확한 기준이 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 식생호안의 안정성 판단을 위하여 사용되는 식생 근모량의 중요성 확인과 평균근모량 측정 방법을 제시하고, 식생호안에서의 근모량에 따른 전단강도와 침식특성의 상관성을 실험을 통하여 규명하고자 한다.

## 근모량 채취 및 실험조건

본 연구에서는 하천의 식생호안에서 초본류 중 최우점종인 달뿌리풀을 실험대상으로 선정하였다 (Photo 1). 식생 근모량의 채취 방법은 일본 건설성 (MOC, 2000)에서 제시한 근모량 채취방법으로 지름 3 cm, 깊이 5 cm의 채취기를 자체적으로 제작하여 사용하였고, 토양 및 근모만의 채취를 위하여 토양 표면의 식생 줄기는 채취 시 제외하여 평균근모량을 산정하였다. 근모량 측정기와 채취 모습은 Photo 1과 같으며, 평균근모량의 산정방법은 다음과 같다.

### 평균근모량 산정

- ① 현장시료 채취: 근모량 채취기를 이용하여 하천 호안 비탈면에 수직된 상태로 시료를 채취.
- ② 시료중량 및 부피 측정: 1/1,000 g 이상의 정확도를 가진 balance에서 채취 시료의 중량측정과 부피측정.
- ③ 건조시료 중량 및 함수량 측정: 건조로를 이용

하여 채취시료의 건조중량을 측정. 함수량은 현장시료 중량에서 건조시료 중량을 뺀 값.

- ④ 근모중량 측정: 굵은 근모를 제거 후 남아 있는 잔 근모를 제거하기 위해 건조된 시료를 넓게 편 후 남은 잔 근모를 소각하여 흙 시료만의 중량 측정. 근모량은 건조중량에서 흙만의 중량을 뺀 값으로 근모중량 산정.
- ⑤ 근모량 산정: 측정된 근모중량을 초기시료 부피로 나누어 근모량을 측정.
- ⑥ 평균근모량 산정: 상기 방법을 3회 이상 반복하고, 그 평균치를 조사지점의 평균근모량으로 채택.

현장시료의 채취는 샘플이 교란되지 않도록 제작한 채취기를 사용하였다. Fig 1과 같이 침식특성을 실험하기 위하여 0.4 m × 0.4 m의 침식시료 주변 8개 지점에서 근모량을 채취하여 평균근모량을 산정하였고, 전단강도 실험을 위한 시료는 4개 지점에서 지름 6 cm의 시료를 채취하였다.



(a) *Phragmites Japonica Steud*



(b) Sampling of root fiber



Photo 1. *Phragmites Japonica Steud* and its sampling of root fiber

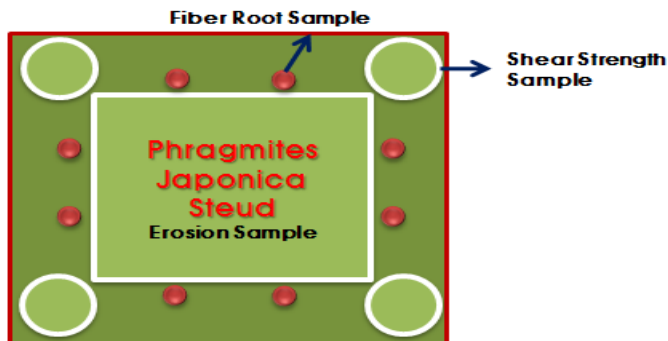


Fig. 1. Sampling for experiments

현장에서 채취된 시료들은 토양의 종류에 따른 침식과 전단강도의 차이를 가져올 수 있기에 체분석 시험을 실시하여 KS F2324 (흙의 공학적 분류방법)에 의해 분류하였다. 실험에 사용된 흙은 SW인 입도분포가 좋은 모래 또는 자갈질의 모래로 균등계수는 2.83이다 (Table 1).

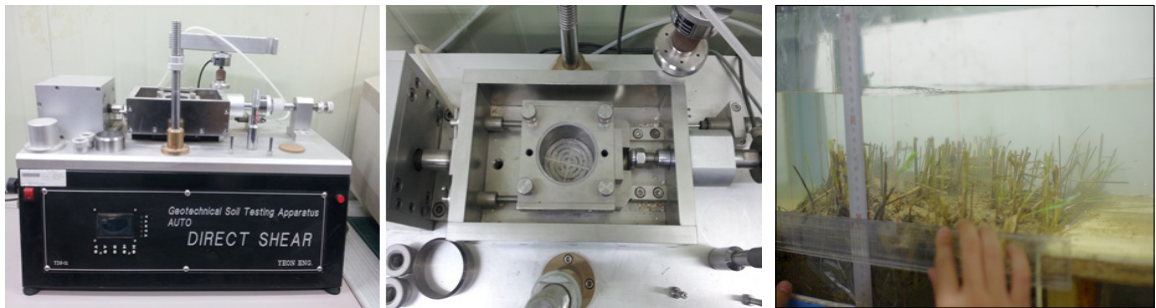
현장에서 채취한 근모양에 따른 식생토양의 전단강도를 측정하기 위하여 직접전단시험을 KS F2343 시험규정에 따라 실시하였다. Photo 2 (a)는 사용된 직접전단기기이다.

평균 근모양의 변화에 따른 침식특성 분석을 위한

실험은 가변식 경사 개수로 실험장치로 길이는 12 m, 폭과 높이는 각각 0.4 m의 직사각형이다. 채취한 식생을 포함한 시료는 수로의 4~5 m 지점에 0.4 m 길이의 시료 설치통에 고정시켰다. 이는 정상류 상태를 유지하기 위하여 실험장치의 바닥을 시료통 높이와 일치시켜 수로 바닥에 시료를 넣을 수 있도록 제작한 것이다. 수심과 침식깊이의 측정은 개수로 레일 위의 이동장치에 부착된 포인트 게이지를 이용하여 측정하였으며, 유속의 측정은 마그네틱 유속계 (LP1100)로 측정하였다. 설계된 실험수로는 Fig. 2와 같으며, Photo 2 (b)는 수로에서의 실험장면을 나타내고 있다.

**Table 1.** Sieve analysis and classification of sampled soil

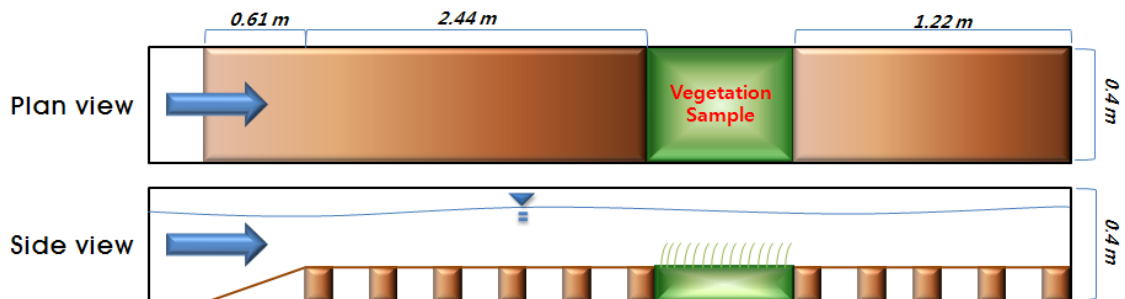
Sieve Number	Transmission rate (%)	Uniformity coefficient	SW (particle size distribution is a good sand or sand of gravel quality)
No. 4	96.90	$C_u = 2.83$	
No. 10	93.28		
No. 20	77.80		
No. 40	64.16		
No. 60	24.60		
No. 140	8.42		
No. 200	2.86		



(a) Direct shear test

(b) Experiment for erosion

**Photo 2.** Direct shear test and experiment for erosion



**Fig. 2.** Experimental setup for erosion

침식특성의 분석을 위한 실험유속은 0.296, 0.485, 0.843 m/s로 변화를 주었으며, 그에 따른 Froude 수는 0.196, 0.400, 0.952이다. 실험 시 유량은 일정하게 고정하였으며, 하류단의 수위조절용 위어를 이용하여 유속 및 수심의 변화를 주었다. 흐름지속시간은 침식의 상황이 시간에 따라 지수함수적으로 감소함을 보여 침식의 양상이 현저하게 줄어드는 시간인 15분으로 하였다. 아울러 식생의 줄기에 따른 유속저감 효과를 일정하게 유지시키기 위하여 0.08 m로 절단하였다 (Table 2).

근모량 채취 시료의 평균근모량은 보다 폭넓은 실

험을 위하여 임의로 근모량이 많은 범위에서 적은 범위까지 8가지 cases를 선정하였으며, 산정된 평균근모량 값은 0.0379, 0.0557, 0.0584, 0.0766, 0.0803, 0.0109, 0.01277, 0.1333 g/cm<sup>3</sup>이다 (Table 3).

## 실험 결과 및 분석

### 근모량과 전단강도 상관

흙의 전단강도는 수직압과 축압을 받는 공시체의

**Table 2.** Experimental conditions for erosion

Velocity (m/s)	Depth (m)	Froude number	Flow duration (min)	Height of vegetation (m)
0.296	0.233	0.196	15	0.08
0.485	0.150	0.400		
0.843	0.080	0.952		

**Table 3.** Averaged root fiber quantities for experiment

Sample	Averaged sample weight (g)	Averaged dry weight (g)	Averaged moisture weight (g)	Averaged root fiber weight (g)	Averaged root fiber quantity (g/cm <sup>3</sup> )	
Phragmites japonica steud	1	106.80	90.49	16.31	1.34	0.0379
	2	105.43	93.32	12.11	2.06	0.0557
	3	107.34	85.16	22.18	2.06	0.0584
	4	91.82	72.60	19.22	2.71	0.0766
	5	86.86	69.31	17.55	2.84	0.0803
	6	96.74	81.01	15.73	3.85	0.1090
	7	101.53	71.88	29.65	4.51	0.1277
	8	96.83	71.86	24.97	4.71	0.1333

**Table 4.** Averaged shear stress according to averaged root fiber quantity

Averaged root fiber quantity (g/cm <sup>3</sup> )	Experimental averaged time duration (s)	Averaged horizontal load (kg)	Averaged shear stress (kg/cm <sup>2</sup> )
0	209	26.40	0.9339
0.0379	294	28.90	1.0223
0.0557	250	31.65	1.1197
0.0584	305	32.47	1.1484
0.0766	280	34.65	1.2257
0.0803	300	35.40	1.2522
0.1090	250	38.70	1.3689
0.1277	237	38.50	1.3619
0.1333	251	39.25	1.3884

최대 전단응력을 말하는 것이다. 이는 교란되지 않은 시료를 급속전단, 변형제어에 의한 직접 전단시험을 실시하여 전단강도를 구하는 동시에 흙의 내부 마찰 각과 점착력을 결정하는 방법이다.

근모량에 따른 직접전단시험 결과는 8가지 경우로 Table 4와 같다. 이때 8가지 경우에 대한 실험시료의 평균 근모량은 Fig. 1에서와 같이 실험시료 주변 8개 지점에서 채취한 시료의 평균값이다. 직접전단시험에 의한 전단강도는 Fig. 1에서와 같이 실험시료의 주변 4개 지점에서 채취한 시료에 대해 각각 직접전단시험을 실시하여 얻은 값의 평균이다. 그에 상응하는 전단파괴 하중 평균 지속시간과 평균 수평하중은 4개 시료에 대한 평균값이다. 식생이 없는 시료에 대한 평균 전단강도는 약  $0.934 \text{ kg/cm}^2$ 이고 그에 상응하는 전단파괴 하중 지속시간은 209초이며, 평균 수평하중은 26.4 kg이다. 식생이 없는 시료를 포함한 9가지 cases에 대한 직접전단시험의 전단파괴 발생

시 하중의 평균 지속시간은 209초에서 305초로 나타났고, 그에 상응하는 평균 횡하중은 26.4 kg에서 39.5 kg로 나타났다. 일반적으로 근모량이 증가함에 따라 전단파괴 평균 지속시간의 증가와 평균 횡하중의 증가로 평균 전단강도가 증가하였다.

Fig. 3은 평균근모량에 따른 평균 전단강도를 나타낸 곡선으로 멱함수의 형태로 나타났으나 실험의 범위에서는 거의 선형적으로 변하며, 평균근모량의 증가에 따라 식생을 포함한 시료의 평균 전단강도는 증가함을 보여준다. 평균근모량과 평균 전단강도의 관계곡선식은  $\tau = 2.306 \sigma_0^{0.246}$ 이고 결정계수는 0.980으로 매우 높게 나타나 근모량과 전단강도는 매우 상관성이 높은 것을 알 수 있었다. 여기서  $\tau$ 는 전단강도 ( $\text{kg/cm}^2$ )이고,  $\sigma_0$ 는 평균 근모량 ( $\text{g/cm}^3$ )이다. 실험 범위에서 근모량의 증가는  $0.13 \text{ g/cm}^3$ 으로 나타났고 그에 따른 전단강도의 증가는  $0.45 \text{ kg/cm}^2$ 으로 나타났다.

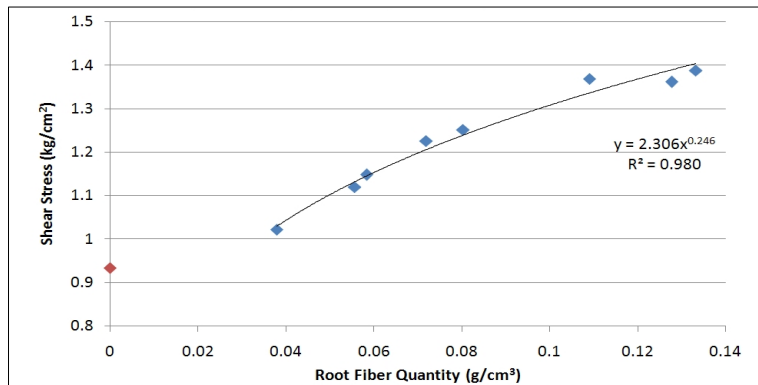


Fig. 3. Shear stress according to averaged root fiber quantity

Table 5. Erosion rate according to averaged root fiber quantity

Averaged root fiber quantity ( $\text{g/cm}^3$ )	Initial volume ( $\text{cm}^3$ )	Froude number 0.196		Froude number 0.400		Froude number 0.952	
		Volume remained ( $\text{cm}^3$ )	Erosion rate (%)	Volume remained ( $\text{cm}^3$ )	Erosion rate (%)	Volume remained ( $\text{cm}^3$ )	Erosion rate (%)
0	11059.2	10508.8	4.98	9734.4	11.98	7449.6	32.64
0.0379	14035.2	13580.8	3.24	13228.8	5.75	12524.8	10.76
0.0557	13286.4	13088.0	1.49	12595.2	5.20	11974.4	9.87
0.0584	15334.4	15091.2	1.59	14604.8	4.76	14054.4	8.35
0.0719	14284.8	14124.8	1.12	13894.4	2.73	13299.2	6.90
0.0803	14905.6	14739.2	1.12	14451.2	3.05	13971.2	6.27
0.0998	15142.4	15001.6	0.93	14726.4	2.75	14470.4	4.44



## 근모량과 침식율 상관

침식율 산정을 위한 실험은 식생이 없는 시료와 식생이 있어 근모량이 있는 6가지에 대해서 실험을 수행하였다. 아울러 유속을 점차 증가시키면서 그에 따른 침식율을 산정하였다. 침식의 진행은 시간에 따라 커지나 침식율은 지수 함수적으로 침식진행속도가 감소하여 약 15분이 경과하면서 침식의 양상은 현저히 줄어들어 각 실험의 경우 15분후에 실험을 종료하고 침식율을 산정하였다. 침식량의 계산은 시료  $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 의 시료를  $0.08 \text{ m}$  간격의 16 지점에서의 침식깊이를 측정 후 그 량을 각주 계산법으로 산정하였다.

평균 근모량에 따른 침식특성 분석을 위한 실험결과는 Table 5와 같고, 침식율 산정을 위한 계산식은 (1)과 같다. 실험결과 유속이 증가함에 따라 침식율은 커지는 것을 확인하였다. 이는 Froude 수에 따른 침식율의 상관관계를 확인하고자 함이다. 아울러 평균

근모량이 증가함에 따라 침식율은 현저하게 감소하는 것을 확인하였다 (Fig. 4). 식생이 없는 경우의 Froude수가 0.952인 경우 침식율은 약 32.6%로 크게 나타나 침식에 대한 안정성이 현저하게 떨어짐을 알 수 있었다. 반면에 식생에 의한 근모량이 약  $0.10 \text{ g/cm}^3$ 인 경우 침식율은 약 4.4%로 현저하게 감소함을 볼 수 있다. 따라서 식생에 의한 근모량은 식생이 있는 토양에서의 침식방지에 큰 효과를 가질 수 있음을 확인할 수 있다. Table 5에 의한 결과 실험범위에서 약 8배까지로 나타났다.

$$erosion\ rate(e_r) = \frac{initial\ volume - volume\ remained}{initial\ volume} \times 100(\%) \quad (1)$$

Fig. 4는 Froude수 별 평균 근모량에 따른 침식율의 산정결과로 근모량이 커짐에 따라 침식율은 지수 함수적으로 감소함을 보여준다. 그에 따른 유속별 평

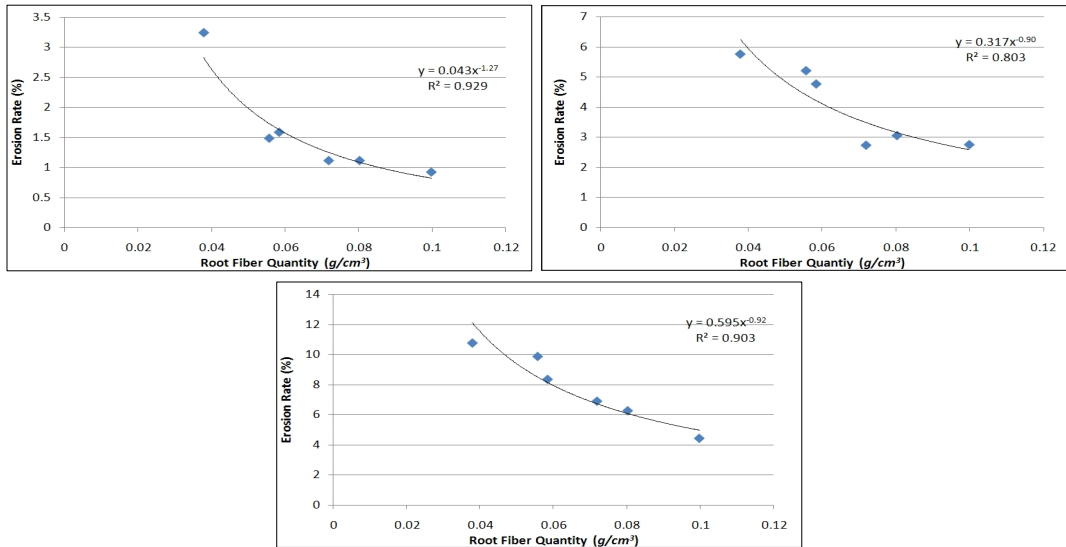


Fig. 4. Erosion rate according to averaged root fiber quantity

Table 6. Regression equations for erosion rate

Froude number	Regression equation	Determination coefficient
0.195	$e_r = 0.043\sigma_0^{-1.27}$	$R^2 = 0.929$
0.400	$e_r = 0.317\sigma_0^{-0.90}$	$R^2 = 0.803$
0.952	$e_r = 0.595\sigma_0^{-0.92}$	$R^2 = 0.903$

Where,  $e_r$  : Erosion rate (%),  $\sigma_0$  : Root fiber quantity ( $\text{g/cm}^3$ )

균근모량에 따른 침식율 관계곡선식은 Table 6과 같으며, 유속별 관계곡선식의 결정계수는 0.929, 0.803, 0.903으로 매우 상관성이 높음을 알 수 있었다.

### 전단강도와 침식율 상관

식생을 가진 토양에서의 평균 근모량의 증가는 전단강도의 증가를 가져온다. Fig. 5는 Froude수 별 평균근모량에 따른 전단강도와 침식율의 상관이다. 전단강도의 증가에 따른 침식율은 지수함수적으로 감소하며 토양의 전단강도가 증가하면 유수에 의한 침식율이 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 전단강도에 따른 침식율에 대한 관계곡선식은 Table 7과 같으며, 결정계수는 0.878, 0.819, 0.952로 토양의 전단강도와 침식율은 근모량 값을 통하여 매우 상관성이 높음을 알 수 있다.

또한 도출된 실험결과를 통해 평균근모량과 Froude number에 따른 침식율 및 전단강도와 Froude number에 따른 침식율을 모든 cases에 대하여 다중 회귀분석을 한 결과 Table 8과 같고, 결정계수는 0.918, 0.921로 매우 높게 나타났다. 아울러 본 회귀식의 분석결과에 따라 토양의 침식은 유속과 전단강도와의 상관에 매우 영향이 있음을 확인할 수 있었으며, 전단강도 및 침식량의 측정은 유수에 따른 호안의 안정성에 있어 매우 중요함을 확인하였다.

따라서 식생호안과 같은 식생을 가진 토양의 경우 안정에 영향을 미치는 침식율을 저하시키기 위해서는 식생의 활착을 통한 근모량의 증가가 필요하다. 실험범위에서의 고찰로는 식생호안의 안정성에 영향을 미치는 침식율은 근모량 증가에 의한 전단강도 그리고 유수의 크기인 Froude수에 의해 지배적임을 확인하였다.

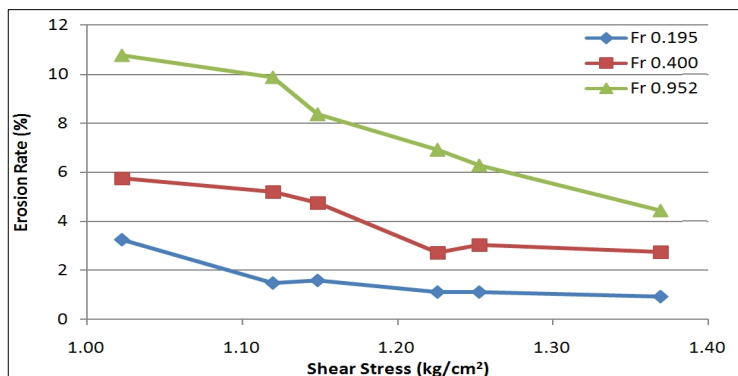


Fig. 5. Shear stress according to erosion rate

Table 7. Regression equations of erosion rate according to shear stress

Froude number	Regression equation	Determination coefficient
0.195	$e_r = 2.895 \tau^{-4.12}$	$R^2 = 0.878$
0.400	$e_r = 6.46 \tau^{-3.05}$	$R^2 = 0.819$
0.952	$e_r = 12.68 \tau^{-3.14}$	$R^2 = 0.952$

Where,  $e_r$  : Erosion rate (%),  $\tau$  : Shear stress (kg/cm<sup>2</sup>)

Table 8. Multiple regression equations for erosion rate

Multiple regression analysis equation	Determination coefficient
$e_r = -65.559 \sigma_0 + 7.872 Fr + 4.817$	$R^2 = 0.918$
$e_r = -11.882 \tau + 7.872 Fr + 14.537$	$R^2 = 0.921$

Where,  $e_r$  : Erosion rate (%),  $\tau$  : Shear stress (kg/cm<sup>2</sup>),  $\sigma_0$  : Root fiber quantity (g/cm<sup>3</sup>)



## 결 론

본 연구는 식생호안과 같은 식생을 가진 토양에서의 수리적 안정성 판단을 위한 근모량 값에 따른 토양의 전단강도와 침식특성의 분석이다. 실험에 사용한 식생은 국내 하천 호안의 최우점종인 달뿌리풀을 이용하였으며, 근모량 측정기기는 자체 제작하여 사용하였다. 본 연구에서의 결론은 다음과 같다.

- 1) 근모량 채취 및 근모량 산정 방법의 제시와 그에 따른 전단강도 시험결과와 평균근모량 값이 증가함에 따라 토양의 전단강도가 증가함을 알 수 있었으며, 그에 따라 식생호안에서 흐름에 대한 안정성 평가에 있어 식생의 근모량 측정이 매우 중요함을 확인하였다.
- 2) Froude수 별 평균근모량에 따른 침식특성 분석결과와 평균근모량이 증가함에 따라 토양의 침식율은 지수함수적으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서 호안에서의 평균근모량은 토양의 침식저항 능력을 증가시킴을 알 수 있었다.
- 3) 전단강도와 침식율의 상관성 분석 결과 토양의 전단강도가 증가함에 따라 유수에 의한 침식율은 지수함수적으로 감소하며, 전단강도의 증가는 침식저항 능력과 관계가 있음을 알 수 있었다. 아울러 평균근모량과 전단응력, 평균근모량과 침식특성, 전단강도와 침식율의 관계곡선식을 제시하였으며, 관계곡선식의 결정계수는 모두 매우 높게 나타났다. 따라서 근모량의 증가에 의한 전단강도의 증가는 침식저항을 가져옴을 확인하였으며, 식생호안에서의 유수에 따른 침식에 대한 안정성 평가에 있어 근모량 측정은 매우 중요한 요소임을 확인하였다.
- 4) 아울러 평균근모량과 Froude수, 전단강도와 Froude수에 의한 침식율의 산정을 위한 다중 회귀식을 제시하였으며, 결정계수는 0.918, 0.921로 매우 높게 나타났다. 따라서 식생의 근모량의 측정과 이에 관계되는 전단강도와 유수의 특성인 Froude수는 식생호안의 안정성 평가에 중요한 인자이고 개발한 식은 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비 지원 (12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Cho, J. H. and Ahn, B. W. (1998). "An experimental study on the reinforcement and stabilization of slope by vegetation roots." *J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech.*, Vol. 1, No. 1, pp. 54-62 (in Korean).
- Choi, H. S. and Kim, S. M. (2009). "Development of revetment safety evaluation program and introduction of manual." *Water and Future, Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 9, pp. 52-58 (in Korean).
- Easson, G. and Yarbrough, L. D. (2002). "The effects of riparian vegetation on bank stability" *Environmental and Engineering Geoscience*, Vol. 8, No. 4, pp. 247-260.
- Gray, D. and Ohashi, H. (1983). "Mechanics of fiber reinforcement in sand." *J. Geotech. Engrg.*, Vol. 109, No. 3, pp. 335-353.
- Ikeda, S. and Izumi, N. (1990). "Width and depth of self-formed straight gravel rivers with bank vegetation." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 10, pp. 2353-2364.
- Mafian, S., Ghaiasi, V. and Bujang, B. K. H. (2009). "Evaluation of root theories and root strength properties in slope stability." *European Journal of Scientific Research*, Vol. 30, pp. 594-607.
- Micheli, E. R. and Kirchner, J. W. (2002). "Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion. 2. Measurements of vegetated bank strength and consequences for failure mechanics." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 27, pp. 687-697.
- Millar, R. G. and Quick, M. C. (1993). "Effect of bank stability on geometry of gravel rivers." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 12, pp. 1343-1363.
- Ministry of Construction (2000). *Design Guideline for River Levee Embankment* (in Japanese).
- Ministry of Construction and Transportation (2004). *Development of advanced technologies for levees* (in Korean).
- Pollen, N. (2007). "Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: accounting for soil shear strength and moisture." *Catena of Elsevier*. Vol. 69, pp. 197-205.
- Scholand, M., Austenfeld, F. A. and Willert, D. J. (1991). "Underground biomass and its influence on soil shear strength in a grazed and ungrazed German coastal marsh." *Plant Root Growth: an ecological perspective*, pp. 341-348.

Wu, T. H., McKinnell, W. P. and Swanston, D. N. (1979). "Strength of tree roots and slides on Prince of Wales Island." Canadian Geotechnical J., Vol. 16, pp. 19-33.

Yang, S. R. and Lee, C. S. (1998). "Theoretical investigation on vegetation's effect made on bank safety." Korea Institute of Construction Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 231-241 (in Korean).