

현장 시험시공을 통한 대나무 쏘일네일링공법의 적용성에 관한 연구

A Study on the Application of Bamboo Soil Nailing System through Experimental Construction

방 윤 경¹⁾ · 양 영 훈²⁾ · 서 지 원³⁾ · 유 남 재³⁾ · 김 흥 택[†]

Yoonkyung Bang · Younghoon Yang · Jeeveon Suh · Namjae Yoo · Hongtaek Kim

Received: November 18th, 2014; Revised: December 2nd, 2014; Accepted: January 26th, 2015

ABSTRACT : In this study, a newly modified soil nailing technology using bamboo is developed. And field tests were performed to confirm applicability of bamboo soil nailing system. For the practical use of bamboo soil nailing system, laboratory tests, field instrumentations and pullout tests were also performed to investigate the applicability. The results of field measurement through field tests were compared with the results of numerical analyses for verifying the field construction. As a result, the results of comparing with the field measurement and numerical analyses shows the similar behavior characteristics. Based on this study, applicability for bamboo soil nailing systems were confirmed for the case of comparatively low scale nailed-soil excavation wall. And it is expected that the bamboo soil nailing system can be used as satisfactory reinforcement technique taking the place of existing steel reinforcement soil nailing system. Hereafter, it needed the research for the applicability for the various types of excavation condition, also the active practical application of bamboo soil nailing system is needed.

Keywords : Bamboo soil nailing, Field construction, Field instrumentation, Field pullout test, Numerical analyses

요 지 : 본 연구에서는 대나무 쏘일네일링공법(Bamboo Soil Nailing System)을 개발하고, 이를 검증하기 위한 현장 시험시공 및 실내시험을 실시하였다. 대나무의 공학적 특성 시험과 현장계측 및 현장 인발시험 등을 수행하여 제안된 공법의 실용화를 위한 적용성을 분석하였다. 시험시공의 적정성 판단을 위해 실험조건을 반영한 수치해석을 통해 현장시험 계측결과와 비교·검증을 수행하였다. 현장계측 및 유한요소해석결과, 정량적 수치에서 차이를 보였지만 발생변위의 형태와 쏘일네일링공법간의 발생 변위량 차이가 크지 않다는 점에서 일치하는 결과를 나타내었다. 본 연구결과를 토대로 비교적 높지 않은 굴착지반에서 대나무 쏘일네일링공법의 적용성을 검증하였으며, 설계 예를 통해 대나무의 직경 변화에 따라 소요의 안전율을 만족하는 대나무 쏘일네일링의 설계 및 시공이 가능할 것으로 판단되었다.

주요어 : 대나무 쏘일네일링, 시험시공, 현장계측, 현장인발시험, 수치해석

1. 서 론

쏘일네일링(Soil Nailing)공법은 가시설 흙막이벽체, 사면 보강 및 지반굴착 등 다양한 지반구조물에 적용되고 있는 지반보강공법으로서, 전통적인 방식에서 진일보한 다양한 형태의 쏘일네일링공법에 대한 이론적 연구 및 실무적 응용 기술들이 국내·외적으로 지속해서 개발되고 있다. 특히 쏘일네일링 설치 시 인접 지반에 물리적, 환경적 영향을 최소화할 필요성이 있는 도심지 가시설 흙막이 굴착 시에는 굴착 인근 지역에서의 추가 굴착 시 기존 쏘일네일링의 보강재인 철근에 의한 시공장애가 종종 발생되며, 지중에 장기간 설치되는 철근의 환경적인 영향 또한 해결해야 할 과제

로 대두된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 가시설의 일정 소요기간이 경과한 후 네일링 보강재를 제거하는 이른바 제거식 네일링 기술들이 다양한 형태로 개발된 바 있다(김흥택과 이정인, 2000; (주)포스코건설 등, 2012; 지에스건설(주) 등, 2014).

본 연구에서는 기존 쏘일네일링 및 제거식 쏘일네일링을 대체할 수 있는 대나무 쏘일네일링공법(Bamboo Soil Nailing System)을 개발하고, 이를 실제 적용하기 위한 현장 시험시공을 실시하였다. 실내시험과 현장계측 및 현장 인발시험 등을 수행하여 제안된 공법의 실용화를 위한 적용성을 분석하였다. 개발된 쏘일네일링공법과 기존의 쏘일네일링공법의 시험시공이 적절히 이루어졌는지 여부를 파악하기 위하여

1) ILSHIN Engineers & Consultants Co., Ltd.

2) Kangan Co., Ltd.

3) Department of Civil Engineering, Kangwon National University

† Department of Civil Engineering, Hongik University (Corresponding Author : htaek@hongik.ac.kr)

실험조건을 반영한 수치해석을 통해 현장시험 예측결과와 비교·검증을 수행하였다. 대나무는 취성재료(brittle material)이므로 인접 구조물 신축으로 인한 지반의 추가 굴착 시 가벼운 타격만으로도 신속한 제거가 가능하고, 굴삭 부산물이 친환경적이며 지중이나 시멘트 그라우팅 내부에서 장기간 부식되지 않으며, 인장강도 등 공학적 특성이 매우 우수한 것으로 알려져 있다(Bang et al., 2005; (주)한국향만기술단, 2001; Kim, 2002).

2. 대나무 및 대나무 네일링의 개요

2.1 대나무의 재료특성

대나무는 보속생산(Sustained yield management)이 가능하고 매우 잘 자라며 경제적이고 가공하기 쉬우면서도 매우 우수한 물리, 기계적 성질을 갖고 있는 장점 때문에 예로부터 구조재를 포함한 다양한 재료로 활용되어왔다. 국내 대나무 재배면적은 약 70km² 정도로 종류별로는 왕대가 56%, 분죽(솨대)이 43%, 맹종죽이 1% 정도이다(Korea Forest Research Institute, 2010). 대나무는 성장 속도가 가장 빠른 식물로서 왕죽은 20~40일, 분죽은 24~45일이 되면 최대 성장높이에 도달하며, 더 이상 자라지 않고 재질이 치밀해지는 3년생을 주로 벌채하여 사용하고 있다. 대나무 조직은 단면의 외부로부터 마디와 표피부, 중심주 및 수층의 3부분으로 구성되는데 섬유조직은 대나무 외측일수록 양이 많다. 공학적으로는 이러한 단면 중심부로부터의 조직변화는 큰 의미가 없으며, 지상고에 따른 직경 변화가 공학적 특성에 영향을 주게 된다. 대나무는 취성재료(brittle material)로서 섬유조직에 의해 매우 큰 인장강도를 발휘한다. Bang et al. (2005)이 수행한 대나무 시편의 실내인장시험 결과, 대나무의 인장력-변형률 거동은 거의 직선에 가까우며 탄성계수는 약 31,000~39,800MPa 범위로 철근(210,000MPa)의 약 1/5~

1/7 수준으로 나타난 바 있다. 국내산 대나무의 개략적인 재료 특성은 Table 1과 같다(Bang et al., 2005).

2.2 대나무 네일링의 구조

본 연구에서 개발한 대나무 네일링의 형태는 크게 1) 내부 격벽을 제거한 대나무에 두부 고정용 클램프를 결합한 단순한 형태의 대나무 네일링과 2) 내부 격벽을 제거한 대나무 내부에 강연선을 삽입하여 프리스트레싱이 가능하도록 한 제거식 대나무 네일링(이하 PS대나무 네일링) 등의 2가지 형태로 구분된다(Fig. 1). 두 번째 형태는 대나무 내부에 강연선을 삽입하고 대나무 네일링 선단에 제거식 정착구와 두부의 고정장치에 강연선을 체결하여 강연선에 프리스트레싱을 가할 수 있으며, 사용 후 두부 고정장치를 해체하여 강연선을 회수, 제거할 수 있도록 고안하였다. 시험시공 등에 사용한 대나무는 재료성질이 비교적 균질한 3년생의 길이 10m, 직경 5cm 내외의 왕죽으로 목체에 다수의 구멍을 천공하여 그라우팅액이 천공구멍을 통하여 대나무 내외부로 원활하게 주입될 수 있도록 하였다.

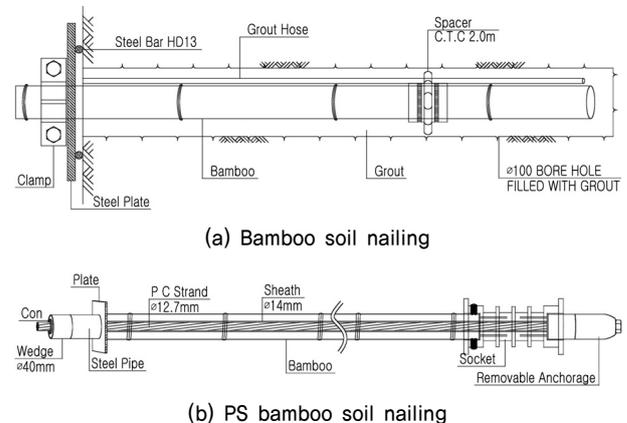


Fig. 1. Schematics of bamboo soil nailing

Table 1. Material characteristics of bamboo in Korea (Korea Forest Research Institute, 2010)

	<i>Phyllostachys bambusoides siebold</i>	<i>Phyllostachys nigra var.</i>
Height (m)	10~20	6~15
Diameter (cm)	5~15	3~10
Joint space (cm)	30~45	10~35
Air-dried specific gravity	0.8	0.85
Uniaxial strength (kPa)	67,273	71,980
Tensile strength (kPa)	274,390	279,881
Flexural strength (kPa)	149,551	168,576
Shear strength (kPa)	16,671	18,632
Impact strength (kJm ²)	190.25	223.59
Hardness (MPa)	13.533~26.184	16.867~31.675

3. 대나무의 공학적 특성

3.1 인장강도

본 연구에서 사용한 시험용 대나무 시편은 쏘일네일링에 적용이 가능한 직경 5cm 내외, 두께 약 1.0cm 내외의 3년생 시료 34개와 장기간 방치한 대나무 6개 등 총 40개를 대상으로 하였다. 장기간 방치한 시료는 공기 중 보편 시 인장강도 변화를 알아보기 위하여 벌채 후 3년간 실내에서 보관한 시료를 대상으로 하였다. 지상고에 따른 인장강도 차이를 알아보기 위하여 대나무의 상단부(최대직경 55mm), 중간부, 하단부(최소직경 40mm)로 구분하여 각각 실내인장시험을 수행하였다. 실내인장시험은 신뢰성을 확보하기 위하여 국가공인인증 시험기관인 한국화학융합시험연구원에 위탁하여, 목재의 인장시험방법(KSF 2207)에 의해 실시하였다. 인장시험용 시료는 전체길이 70cm의 대나무 양 끝단 30cm를 규격 2×3cm의 Steel box 내부에 고정한 후, 노출된 중앙부 10cm 길이의 공시체를 대상으로 인장시험을 수행하였다(Fig. 2). Steel box 내부는 에폭시 수지를 충전하여 대나무를 고정, 양생하여 인장시험 시 클램프가 재료시험기의 그립력을 충분히 유지하는 동시에 변형되지 않도록 하였다.

대나무 시편에 대한 인장시험 결과는 Table 2와 같다. Table 2로부터 본 연구에서 수행된 대나무의 인장강도는 206.0~332.9MPa의 범위로 Korea Forest Research Institute(2010)의 제시 값(Table 1에서 약 274MPa) 및 Bang et al.(2005)의 연구결과(약 200~280MPa)와 유사한 값을 나타내었다. Fig. 3에는 대나무의 직경 및 두께가 대나무 인장강도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 시험결과를 도시하였다. Fig. 3으로부터 대나무 두께와 직경은 시험 시편의 인장강도와 상관성이 없는 것으로 나타났다(Bang et al., 2005).

Fig. 4에는 본 연구의 인장강도시험 결과 40개 대나무시료의 인장강도 정규분포곡선을 도시하였다. Fig. 4의 정규분

Table 2. Laboratory tensile strength test result

No. of specimen	Tensile strength (MPa)	Location	Note
1	323.2	High	
	271.9	Mid	
	206.0	Low	
2	279.0	High	
	316.1	Mid	
3	284.8	Low	
	238.9	High	
	263.0	Mid	
4	214.3	Low	
	280.0	High	
	315.2	Mid	
5	271.5	Low	
	297.6	High	
	286.6	Mid	
6	242.9	Low	
	224.9	High	
	303.0	Mid	
7	239.8	Low	
	221.9	High	
	238.8	Mid	
8	261.9	Low	
	291.0	High	
	282.5	Mid	
9	332.9	Low	
	274.7	High	
	289.1	Mid	
10	251.4	Low	
	273.1	High	
	238.3	Mid	
11	250.4	Mid	
	240.4	Low	
	275.0	High	
12	277.4	Mid	
	279.6	Low	
	284.5	-	3year storage
238.7	-		
276.4	-		
277.5	-		
247.9	-		
271.6	-		

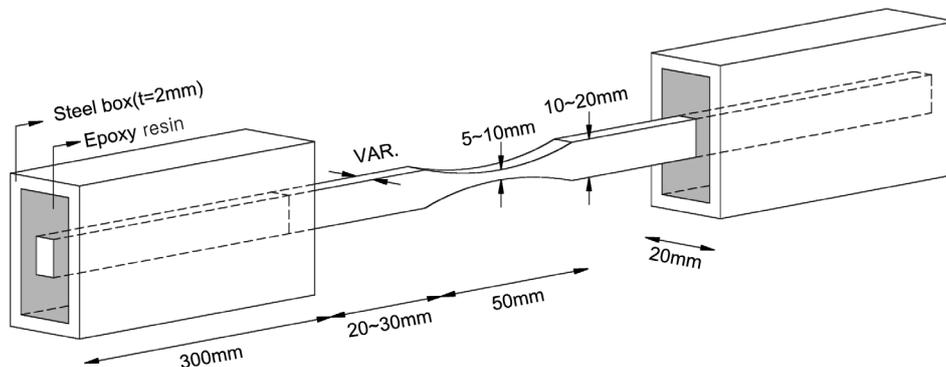


Fig. 2. Tensile strength test specimen

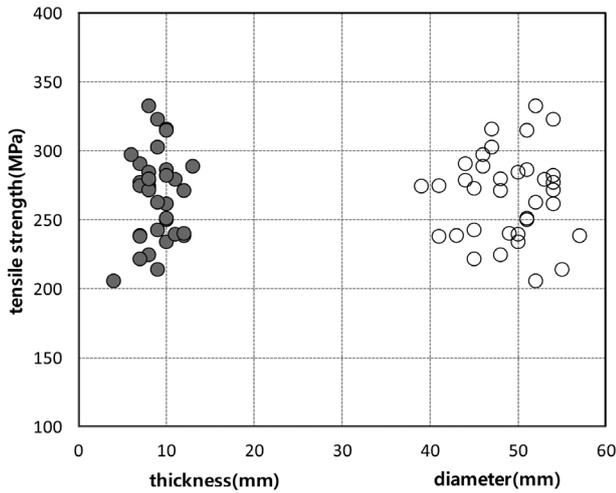


Fig. 3. Diameter and thickness - tensile strength relationship

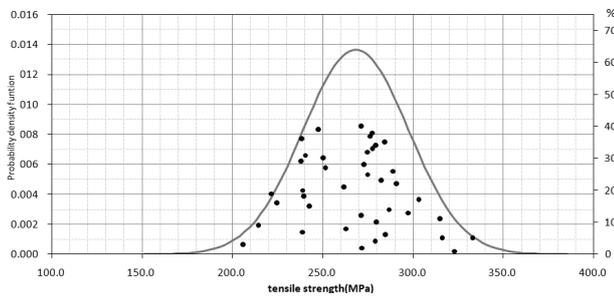


Fig. 4. Normal distribution curve of bamboo tensile strength

포곡선으로부터 인장강도 평균값은 268.3MPa, 표준편차 29.2, 신뢰 수준 95.5% 이내의 인장강도 범위는 209.9~326.8MPa로 나타났다. 이는 SD400(Φ29) 철근의 항복강도 400MPa의 약 50~80% 수준으로 향후 한계상태설계법의 설계기준 확립 시 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 압축강도

목재의 압축시험방법(KSF 2206)은 공인인증시험기관인 한국건설생활환경시험연구원에 위탁 수행하여 신뢰성을 확보하였다. 시험용 공시체는 대나무의 특성상 한변의 길이가 2cm인 정사각형 형태의 시료 가공이 불가능하므로 불가피하게 암석의 압축강도 시험방법(KSE 3033)을 준용하여 실시하였다. 대나무의 직경은 약 5cm, 길이 10cm의 공시체를 18개 제작하여 압축강도 시험을 수행하였다. 압축시험용 시료의 양 끝단은 시험 시 하중집중을 방지하기 위하여 원형의 Steel Cap으로 마감처리 하였다. 대나무 단면적은 시료의 내경과 외경을 각각 교축방향으로 측정 후 평균값으로 단면적을 계산하였다. Table 3의 압축시험 결과로부터 압축강도 범위는 49,134~64,847kPa, 평균 압축강도는 57,253kPa로 각각 나타났다. 이는 Korea Forest Research Institute(2010)의

Table 3. Uniaxial compression test result

Test No.	Max. load (N)	Diameter (max./min.) (cm)	Compression strength (kPa)
1	38,180	4.5/5.3	61,633
2	27,172	3.7/4.5	56,538
3	34,131	4.2/5.0	57,786
4	26,935	3.6/4.3	64,847
5	24,756	3.7/4.4	54,896
6	39,766	3.8/4.8	61,190
7	34,145	4.5/5.3	55,686
8	44,253	3.7/4.7	64,604
9	42,565	4.1/5.1	57,577
10	45,158	3.5/4.7	58,533
11	24,631	3.7/4.4	54,629
12	31,190	4.1/4.9	54,335
13	22,489	3.7/4.4	49,134
14	42,536	3.8/4.9	61,391
15	26,834	4.3/5.0	49,887
16	31,739	3.8/4.6	64,319
17	44,431	3.0/4.5	51,065
18	28,615	3.9/4.7	52,501

연구결과(Table 1 참조)에 제시된 왕대의 압축강도(68,600kPa)에 비하여 다소 작은 값으로 이러한 강도 차이는 시험조건 및 시험방법의 차이에 따른 것으로 판단된다.

3.3 휨강도

목재의 휨강도시험 방법은 KSF 2208(목재의 휨시험방법)에 목재의 함수율 측정방법은 KSF 2199(목재의 함수율 측정방법)에 각각 규정되어 있다. KSF 2208에 따르면 시험편의 크기는 한변의 길이가 2~3cm인 정사각형이고, 시료의 길이는 30~38cm로 하고, 지점 사이의 길이와 시험편 높이의 비는 12~16의 범위로 규정하고 있다. 하지만 두께가 1cm 미만인 대나무의 특성상 이와 같은 시료 성형이 불가능하므로, 본 연구에서는 직경 5cm 내외의 통대나무를 지점사이 길이 60cm(시험편 높이비 12)로 하여 시험하였다. 휨강도 및 함수율 측정시험은 공인인증 시험기관인 한국건설생활환경시험연구원에서 위탁 수행하였으며, 결과는 Table 4와 같다. Table 4에서 대나무 시편의 휨강도는 40,187~213,231kPa이고, 평균 휨강도는 88,453kPa로 Korea Forest Research Institute(2010)의 제시 값(Table 1, 152,500kPa)의 약 58% 수준이다. 이러한 차이는 시험용 공시체 형상과 시간장 차이 등에 기인한 것으로 향후 대나무 휨강도 시험방법의 보완 등이 필요할 것으로 판단된다. 시험에 사용한 대나무의 함수율은 17~44% 범위로 나타났다.

Table 4. Flexural strength and moisture content test result

Test No.	Flexural load (N)	Flexural strength (kPa)	Moisture content (%)
1	575	40,187	17
2	1,855	44,906	26
3	3,704	213,231	30
4	1,249	56,139	20
5	1,581	65,798	21
6	5,685	208,465	26
7	1,710	70,597	28
8	5,492	157,055	36
9	1,823	52,794	36
10	1,734	81,435	24
11	3,173	134,455	26
12	1,396	43,946	27
13	5,374	185,619	24
14	1,348	52,751	28
15	1,366	61,398	34
16	1,356	58,123	25
17	1,806	65,177	28
18	3,144	101,420	33
19	2,695	116,216	37
20	1,006	53,255	19
21	1,682	77,432	24
22	1,032	51,979	27
23	1,441	64,114	35
24	4,394	171,234	45
25	933	43,814	36
26	1,447	50,745	45
27	1,929	71,841	44
28	1,084	72,061	30
29	1,858	58,490	33
30	3,321	128,905	35

Table 5. Conversion tensile strength of bamboo tube

Test No.	Extern. Dia. (mm)	Thick. (mm)	Intern. Dia. (mm)	Section area (mm ²)	Tensile strength (kN)
1	53.2	4.1	45.0	632.1	132.59~206.43
2	44.9	3.8	37.3	490.4	102.87~160.16
3	49.9	4.2	41.5	602.7	126.42~196.83
4	43.1	3.4	36.3	423.8	88.90~138.42
5	43.8	3.65	36.5	460.2	96.52~150.28
6	48.0	4.9	38.2	663.1	139.10~216.57
7	52.7	4.1	44.5	625.7	131.24~204.33
8	47.3	5.3	36.7	699.0	146.61~228.27
9	51.4	5.2	41.0	754.4	158.23~246.36
10	47.2	6.1	35.0	787.2	165.13~257.09
11	44.3	3.6	37.1	460.1	96.50~150.25
12	49.1	4.15	40.8	585.7	122.86~191.29
13	43.9	3.7	36.5	467.0	97.97~152.53
14	48.5	5.2	38.1	707.0	148.30~230.89
15	49.8	3.8	42.2	548.9	115.13~179.25
16	46.0	3.8	38.4	503.5	105.62~164.44
17	45.2	7.5	30.2	887.8	186.23~289.95
18	47.3	4.1	39.1	556.2	116.66~181.63
Min.	35.0	3.5	28.0	346.2	72.61~113.06
Diameter	30.0	3.0	24.0	254.3	53.35~83.06

3.4 통대나무의 환산 인장강도

Table 2의 실내 인장시험결과 나타난 대나무의 인장강도 및 Table 3의 대나무 치수로부터 대나무 단면적과 환산 인장강도를 계산한 결과는 Table 5와 같다. 시험시공 시 사용한 대나무는 상단부 외경 4.2~5.9cm, 내경 3.0~5.4cm이고 하단부 외경 3.0~3.5cm, 내경 2.4~2.8cm로 Table 5의 최하단에는 시험 대나무의 최소직경에 해당하는 환산 인장강도를 나타내었다. 대나무 시편의 신뢰 수준 95.5% 최소인장강도(209.9MPa)를 토대로 계산한 통대나무의 환산 인장강도는 88.90(상단부)~53.35kN(하단부) 범위이고, 최대인장강도(326.8MPa)를 토대로 한 통대나무의 환산인장강도는 289.95(상단부)~113.06kN(하단부) 범위이다. 대나무의 두께는 마디와 가까워질수록 두껍고 마디와 마디 사이의 중양부에서 가장 얇은 형태로서 단면적 계산 시에 마디 사이의 가장 얇은 부분을 측정하였다. 실제로 본 연구의 인장강도 시험결과(Table 2)를 바탕으로 외경과 두께 각각 5.0cm, 0.5cm 이상인 대나무의 환산 인장강도를 계산하면 약 150kN 이상, 235kN 이하로 이는 SD400(Φ29) 철근의 항복강도 약 264kN의 약 57~89%에 해당한다.

4. 현장시험시공을 통한 거동특성 평가

4.1 시험시공 개요

시험시공 현장의 지층구성은 지표면으로부터 매립층(자

갈 섞인 실트질 모래), 풍화토층(실트질 모래) 및 풍화암 순으로 분포하며, 지하수위는 관측되지 않았다(Fig. 5).

시험시공은 높이 6m, 길이 26m, 시공각도 15°의 쏘일네일링 연직 벽체를 굴착 시공한 후 쏘일네일링을 시공하였으며, 벽체의 변위를 유발하기 위하여 벽체 상부에 1m 높이의 토사를 추가 성토하였다. 예비해석 결과를 바탕으로 쏘일네일링의 연직 및 수평간격은 1.2m, 길이는 6m로 하였다. 시

험시공 벽체의 좌측에는 대나무쏘일네일링을 중간부에 PS 대나무 네일링을 우측에 고장력 철근(φ29) 쏘일네일링을 각각 4×4열 시공하여 벽체 변위 등의 비교·분석이 가능하도록 하였다. 일반적인 쏘일네일링 시공의 순서와 동일하게 지표면으로부터 굴착→천공, 쏘일네일링 설치→와이어매쉬 설치→슛크리트 타설의 순서로 진행하였고, 시공 단면도 및 시공 과정은 Fig. 6, Fig. 7에서 보는 바와 같다.

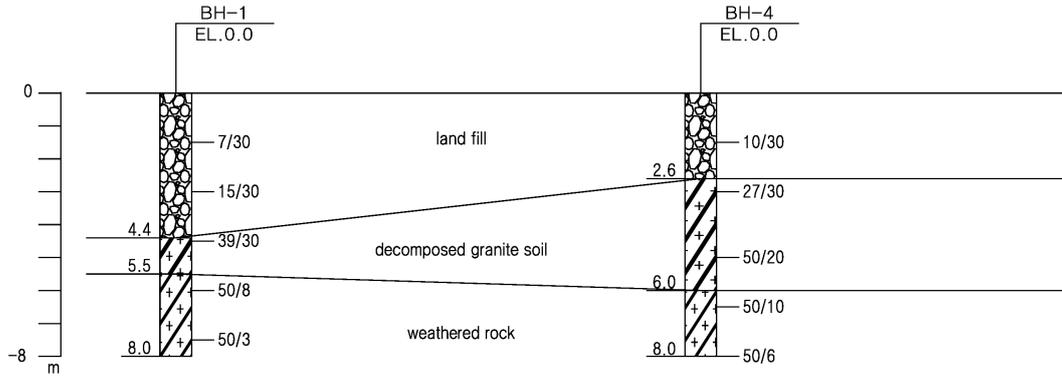


Fig. 5. Boring log of test field

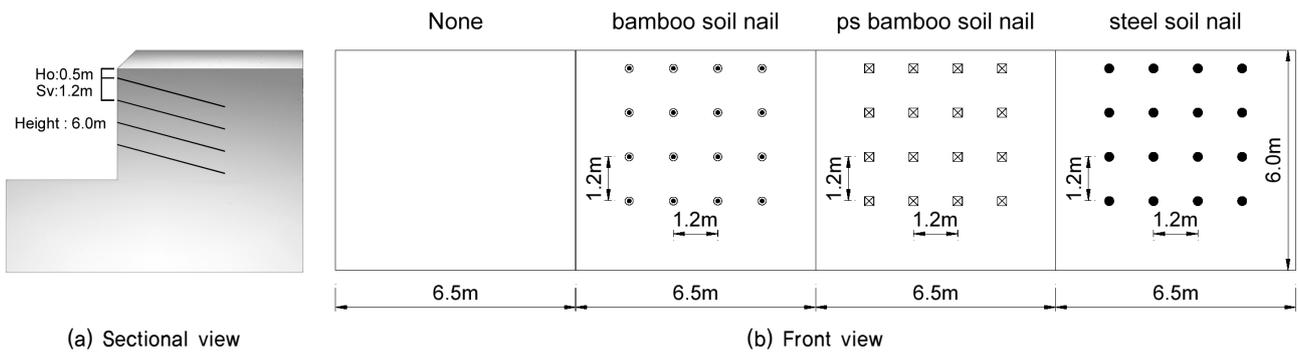


Fig. 6. Section and planar figure



(a) Excavation



(b) Indicate drilling hole



(c) Drilling nailing hole



(d) Install soil nailing



(e) Shotcrete



(f) Construction completion

Fig. 7. Experimental construction procedure

4.2 현장계측 및 시험

대나무 네일링공법의 거동특성을 분석하기 위해 굴착 배면에 경사계 4개소, 쏘일네일링에 응력계 36개(4포인트씩 9개소)를 설치하여 약 100일간(2014년 5월 17일~2014년 8월 30일) 계측을 수행하였으며, 쏘일네일링 종류별 현장 인발 시험을 실시하였다. 계측기 상세 설치 위치는 Fig. 8과 같다.

4.3 현장계측 및 시험결과 고찰

4.3.1 지중경사계

시공 완료 후 변위가 거의 수렴단계에 들어간 7월 28일~8월 25일 사이의 경사계 계측결과는 Fig. 9와 같다. 최대수

평변위는 무보강의 경우 76.4mm, 쏘일네일링 보강은 71.1~74.6mm의 범위로 나타났다. 보강 굴착면의 변위량은 네일링 종류에 따라 큰 차이가 없었으며, 변위형태는 PS대나무 네일링의 경우에 벽체 중간 부분에서 변위억제가 특징적으로 나타났다(Fig. 8(c)). 무보강 굴착면의 경우 굴착면 좌측에 직각방향 측면 구속효과에 의해 발생변위가 억제된 것으로 판단된다.

4.3.2 응력계

본 연구에서는 계측기간 중 쏘일네일링에 발휘되는 응력의 크기를 비교·분석하기 위하여 굴착벽체 상단부로부터 2, 3, 4번째 보강재의 길이방향으로 각각 4개씩 총 36개

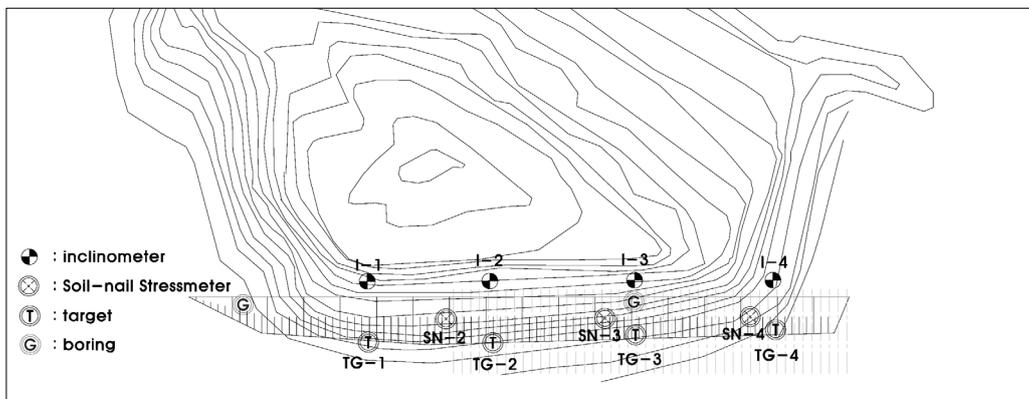


Fig. 8. Field instrumentation plan

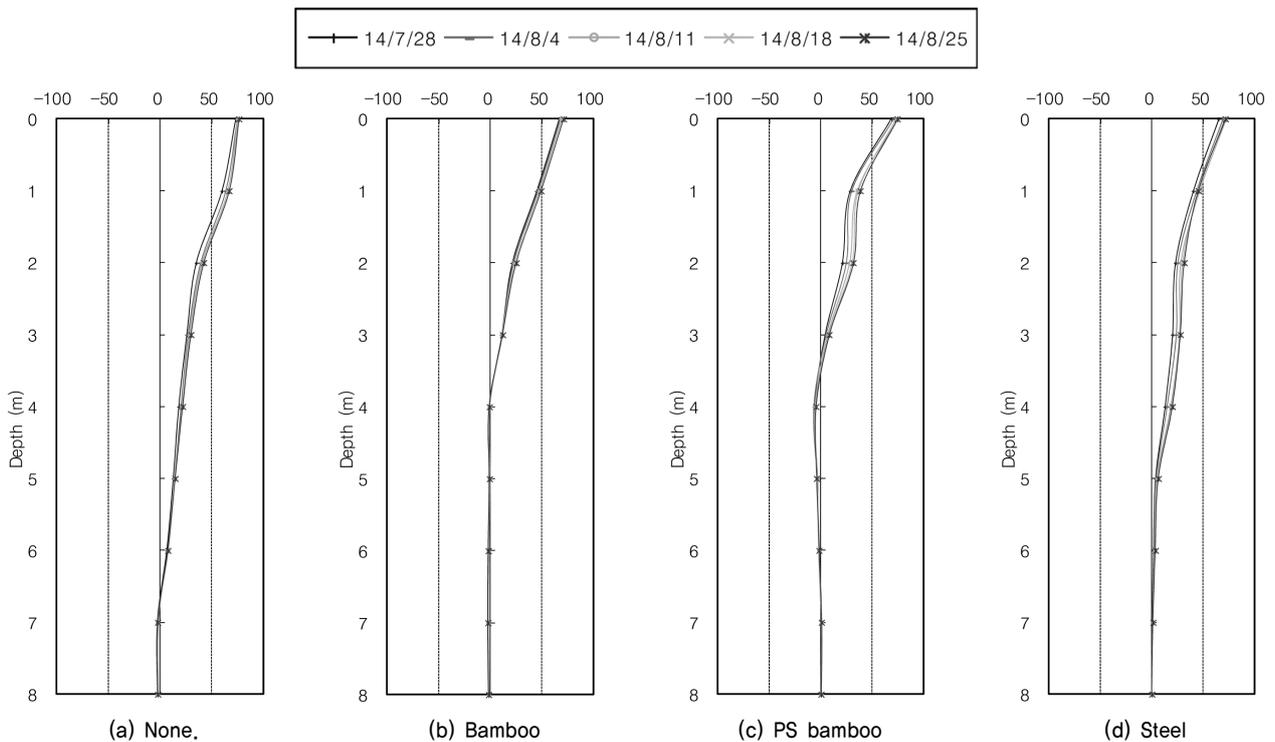


Fig. 9. Inclinometer monitoring result

의 응력계를 부착하여 정기적으로 응력변화를 측정하였으며, 2단 쏘일네일링에 대한 응력계 측정결과를 Fig. 10에 나타내었다. 네일링 두부로부터 응력계가 부착된 위치까지의 거리는 Fig. 10의 범례에 표기하였다. 쏘일네일링에서 발휘되는 응력분포는 시간 경과에 따라 점차 증가하여 시공 후 약 2달이 경과한 2014년 7월 말 이후에는 증가율이 수렴하였는데 이는 경사계 측정결과 수평변위의 수렴시기와 대체적으로 일치하는 경향으로 측정 결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 발휘되는 응력의 크기는 대체적으로 쏘일네일링 두부(Fig. 10에서 1P)에서 가장 크게 나타나고, 쏘일네일링 종류별로는 철근보강재에서 가장 크게 대나무 네일링에서 가장 작게 나타났다. 이는 쏘일네일링 두부에서

의 변위가 상대적으로 가장 크게 발생하는 쏘일네일링의 특징과 철근 보강재의 탄성계수가 대나무에 비하여 매우 큰데 원인이 있으며, PS대나무 네일링은 프레스트레스의 영향으로 대나무에 비하여 상대적으로 큰 응력이 발생한 것으로 판단된다. 전체적으로 네일링 두부로부터 가장 먼 거리에 있는 4P 위치에서의 발생응력이 2P 혹은 3P보다 크게 나타나는 현상은 본 시험시공 현장의 지반조건이 상부에 $N < 15$ 인 매립토층으로 성토하중 재하에 따른 배면지반의 침하 거동 등에 기인한 것으로 추정된다. 참고로 대나무의 탄성계수는 Bang et al.(2005)의 연구결과를 토대로 35,000MPa로 가정하였다.

4.3.3 현장 인발시험

본 연구에서는 쏘일네일링의 인발거동특성을 분석하기 위하여 대나무, PS대나무, 철근 쏘일네일링에 대한 현장 인발시험을 수행하였다. 현장 인발시험에 사용된 쏘일네일링의 갯수는 총 6개(대나무 2개, PS대나무 2개, 철근 2개)를 대상으로 각각의 인발거동특성을 객관적으로 비교·검토하기 위하여 유사한 지반조건에 대하여 시험을 수행하였다. 현장 인발시험은 FHWA(1998, 2003)와 French National Research Project Clouterre(1991)을 참조하여 변위제어방식 현장 인발시험을 수행하였다. 인발속도는 1mm/min의 속도로 인발력이 일정한 값에 수렴할 때까지 지속하였다. 현장 인발시험 결과 나타난 각각의 쏘일네일링의 인발력-두부변위 특성은 Fig. 11과 같다.

Fig. 11에서 인발저항력은 대나무 약 107kN, PS대나무 약 117~137kN, 철근 156kN 정도의 범위로 나타났다. 이는 Bang et al.(2005)의 대나무 네일링에 대한 현장 인발시험 결과 나타난 인발저항력 76.49~112.78kN 범위와 유사한 결과이다. 98kN 이하의 인발하중 조건에서의 두부변위를 살펴보면 대나무에서 약 35mm, 철근에서 약 15mm, PS대나무에서 약 16~30mm의 범위를 나타내어 대나무에서 가장 크게 철근에서 가장 작게 나타났으며, 이는 매립토층에서 수행된 제한된 지반조건과 실험조건에서의 거동특성이므로 추후 보다 다양한 지반조건에서의 데이터 축적이 필요할 것으로 판단된다(Bang et al., 2005).

5. 매개변수 분석

본 분석에서는 현장 시험시공에 의한 변위 측정결과와 적정성 검증을 위하여 굴착시공 과정에 따른 변위해석을 실시하였다. 해석용 프로그램은 유한요소해석 상용프로그램인

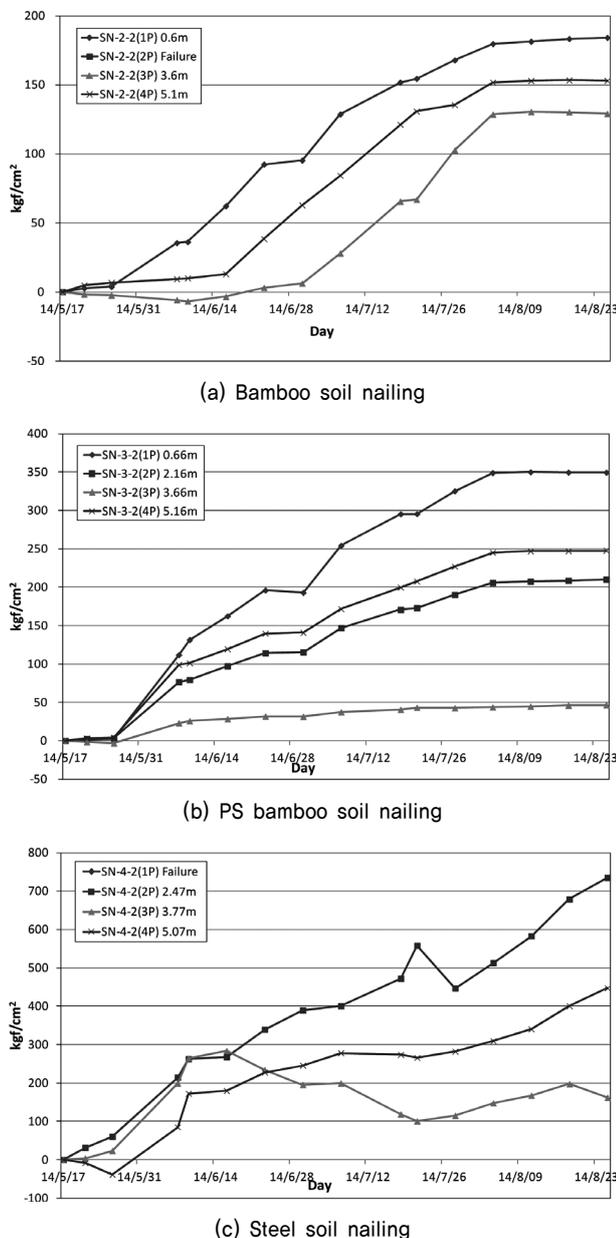
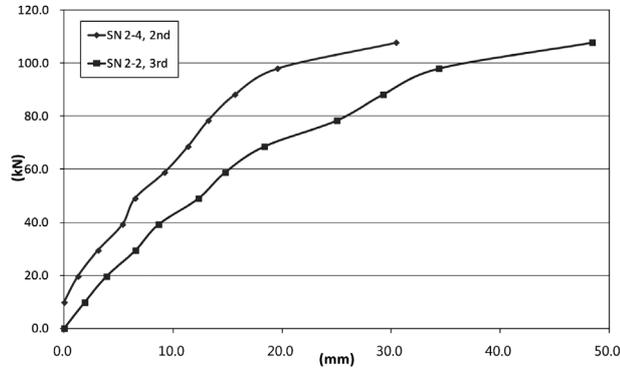


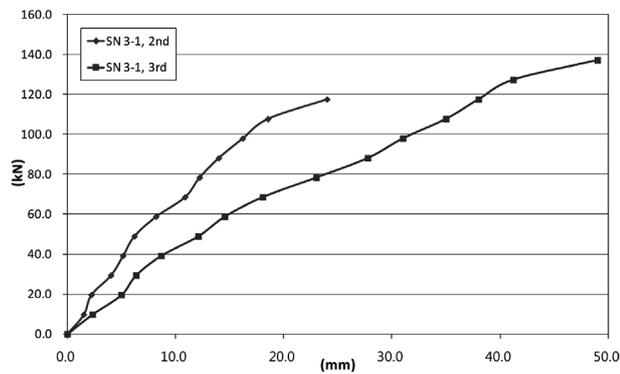
Fig. 10. Internal stressmeter measuring result

Soil Works v.400을 사용하였으며, 일반 쏘일네일링과 대나무를 이용한 쏘일네일링의 발생변위를 비교·분석하였다. 아울러, 상용 설계프로그램인 TARLEN Ver.4를 이용하여 쏘일네일링의 강도, 길이버가 굴착벽체의 안전율에 미치는 영

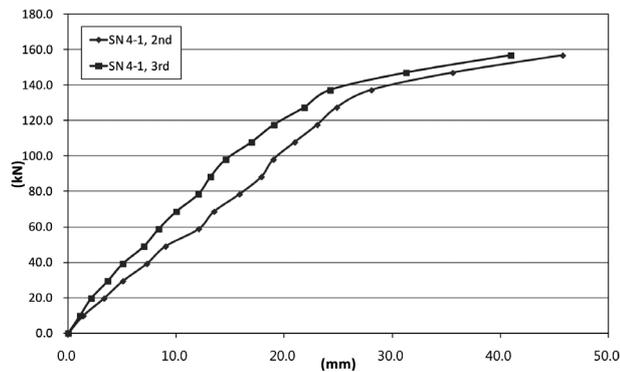
향 등에 대한 매개변수 분석을 수행하였다. 분석에 사용된 대표단면은 시험시공에 적용된 단면(Fig. 6(a))과 같고, 적용물성치는 Table 6과 같다. Table 6에서 대나무의 지름은 현장 시험시공 시 적용된 대나무의 하단부 외경(3.0~3.5cm) 중 최소값을 적용하였고, 단면적은 튜브 형태의 순단면적을 적용하였다.



(a) Bamboo soil nailing



(b) PS bamboo soil nailing

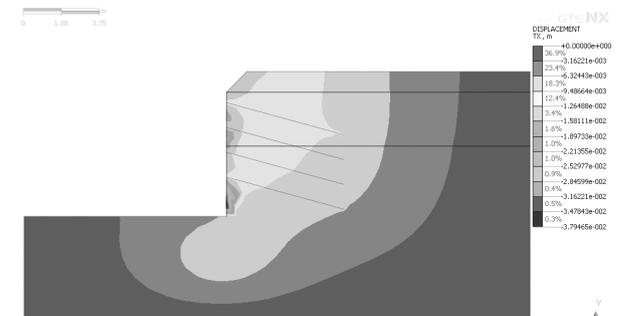


(c) Steel soil nailing

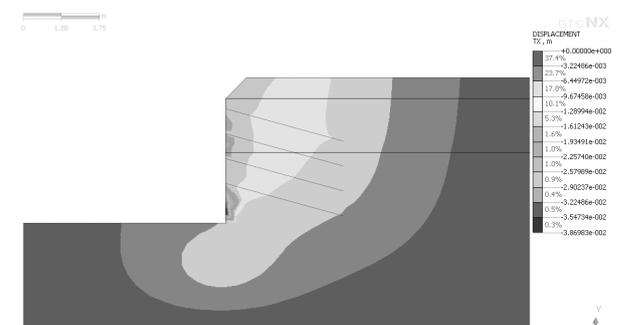
Fig. 11. Field pull-out test result

5.1 변위해석

일반 쏘일네일링과 대나무 네일링에 대한 해석결과, 최종 시공단계에서의 변위 분포도는 Fig. 12와 같으며, 단계별 굴착시공 과정에 따른 최대수평변위를 분석한 결과는 Fig. 13과 같다. Fig. 12에서 벽체의 변위 분포 형태는 두 가지 모두 벽체의 상단부에서 크게 나타나는 분포형태로 큰 차이점을 보이지 않으며 최대변위량은 철근 쏘일네일링 13.9mm, 대



(a) Steel soil nailing



(b) Bamboo soil nailing

Fig. 12. Numerical analysis result of bamboo soil nailing

Table 6. Material properties for numerical analysis

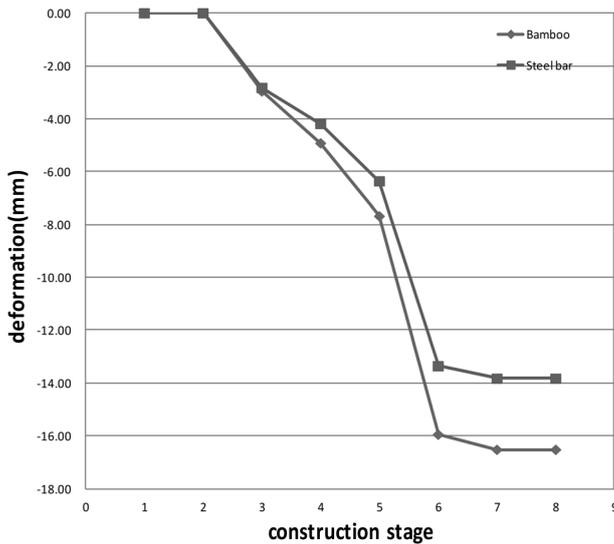
Classification	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Inter. friction angle (°)	Young's module (kPa)	Note
Soil	18.0	15	30	20,000	
Reinforcement	Length (m)	Diameter (cm)	Section area (cm ²)	Moment of inertia (cm ⁴)	Young's module (MPa)
Steel bar (D29)	6.0	2.9	6,605	3,472	210,000
Bamboo	6.0	3.0	6,283	3,927	35,000

나무 네일링 15.2mm로 대나무 네일링 벽체의 최대 수평변위량이 약 9% 크게 나타났다. 이는 Bnag et al.(2005)이 수행한 10m 높이의 굴착벽체의 수치해석 결과와 유사한 결과로서, 본 연구의 현장 시험시공에 의한 계측결과와는 정량적 수치에서 차이를 보이지만 발생변위의 형태와 두 가지 쓰일네일링공법의 발생변위량에서 큰 차이를 보이지 않는다는 점에서 유의미한 결과로 판단된다.

5.2 보강재 인장강도 및 길이비(L/H)가 안전율에 미치는 영향

Fig. 14에는 쓰일네일링의 인장강도가 안전율에 미치는 영향을 알아보기 위해 쓰일네일링 보강재의 강도 변화에 따른 안전율 변화 경향을 나타내었으며, Fig. 15에는 쓰일네일링의 길이비(L/H) 변화에 따른 보강재의 강도별 안전율 변화 경향을 나타내었다. Fig. 14에서 보강재의 강도가 증가함에 따른 안전율 변화 경향을 살펴보면 보강재의 인장강도가

증가할수록 안전율도 증가하고, 안전율의 증가율은 보강재 길이비가 클수록 크게 나타났다. 하지만 보강재 길이비가 작아질수록 보강재 인장강도의 증가에 따른 안전율 증가효과는 미미해지며 구체적으로 길이비 0.6인 경우 인장강도가 50kN 이상에서는 안전율 증가효과를 기대할 수 없는 것으로 나타났다. 이는 보강재의 길이가 짧은 경우에는 보강재 인장강도가 증가하더라도 안전율이 크게 증가하지 않는다는 것을 의미한다. 한편 보강재의 인장강도가 증가할수록 안전율도 증가하지만 보강재의 인장강도가 일정값 이상이 되면 안전율은 더 이상 증가하지 않고 일정값에 수렴하며 이때의 인장강도 값은 길이비가 작을수록 작은 값을 나타냈다. 보강재의 설치간격 등 현장시공 분석단면 조건에 한정된 결과이긴 하나 길이비 L/H=1.0의 경우에 보강재의 인장강도가 100kN 이상으로 증가하면 굴착벽체가 소요의 안전율(Fs=1.2)을 만족하여 29mm SD 40 철근(인장강도 125kN)을 사용하는 경우와 유사한 안전율을 확보하는 것으로 나타나



No.	step
1	Initial state
2	NULL
3	1 step excavation +1step install soilnailing
4	2 excavation + #2 install soilnailing
5	#3 excavation + #3 install soilnailing
6	#4 excavation + #4 install soilnailing
7	Soft shotcrete
8	Hard shotcrete

Fig. 13. Max. horizontal displacement at each construction stage

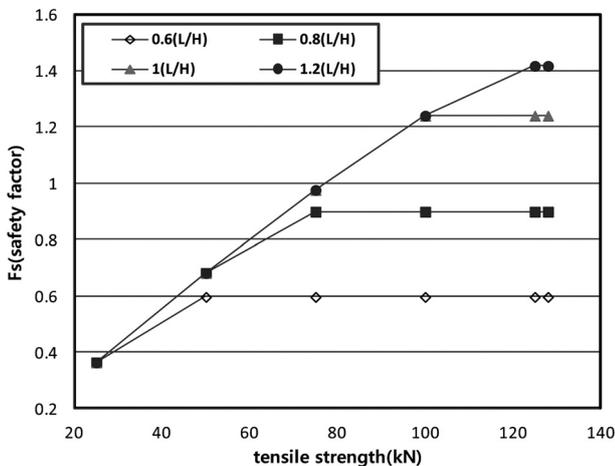


Fig. 14. Factor of safety - tensile strength relationship

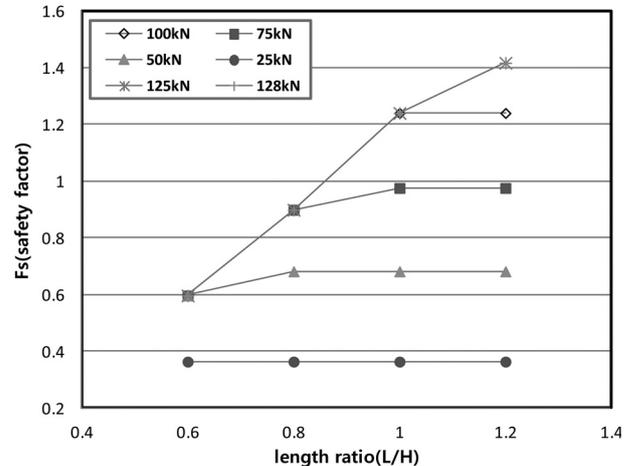


Fig. 15. Factor of safety - reinforcement length ratio relationship

며 이는 실제 시험시공의 계측 및 수치해석 결과에서 일반 쏘일네일링과 대나무 쏘일네일링 사이에 최대수평 변위와 변위형태에서 큰 차이점이 없는 점 등을 설명할 수 있는 합리적인 근거로 판단된다. 실제로 Bang et al.(2005)의 연구결과에서도 직경 50mm 이상인 대나무 보강재를 사용하는 경우 일반 철근 쏘일네일링과 안전율 차이가 거의 없는 것으로 나타난 바 있다. 따라서 실제로 대나무 쏘일네일링 적용 시 사용 대나무의 제원과 본 연구의 대나무 인장강도(Table 2 및 Fig. 3)를 토대로 소요의 안전율을 만족하는 대나무 쏘일네일링 굴착벽체 설계가 가능할 것으로 판단된다(Bang et al., 2005).

Fig. 15로부터 보강재의 길이비 변화에 따른 안전율 변화를 살펴보면 보강재의 길이비가 증가할수록 안전율도 대체적으로 증가하고 안전율 증가율은 보강재 인장강도가 클수록 커지지만, 보강재 인장강도가 50kN 이하에서는 길이비 증가에 따른 안전율 증가효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 인장강도가 상대적으로 작은 보강재의 경우에는 길이비를 증가시키는 것이 안전율 확보에 크게 도움이 되지 않는다는 것을 의미한다.

6. 결론 및 제언

본 연구에서는 기존 쏘일네일링 및 제거식 쏘일네일링을 대체할 수 있는 대나무 쏘일네일링(Bamboo Soil Nailing System)을 개발하고, 이를 검증하기 위한 현장 시험시공을 실시하였다. 대나무 재료에 대한 실내시험과 현장 시험시공을 실시하고 현장계측 및 현장 인발시험 등을 수행하여 제안된 공법의 실용화를 위한 적용성을 분석하였다. 시험시공 현장 계측결과와 적정성 판단을 위해 실험조건을 반영한 수치해석을 통해 현장시험 계측결과와 비교·검증을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구의 실내인장시험 결과 3년생 왕대 시편의 인장강도는 206.0~332.9MPa의 범위로 대나무의 직경이나 두께, 보관기간 등은 인장강도와 상관성이 없는 것으로 나타났다.
- (2) 본 연구에서 사용한 통대나무의 환산 인장강도는 대나무의 상단부 84.59kN~295.36kN, 하단부는 50.76~115.17kN의 범위이고 외경과 두께 각각 5.0cm, 0.5cm인 대나무의 환산 인장강도는 약 150kN 이상, 235kN 이하의 범위로 나타났다.
- (3) 대나무 시편에 대한 압축시험 결과 압축강도는 49,134~

64,847kPa의 범위로 휨강도는 40,187~213,231kPa의 범위로 나타났다.

- (4) 현장 시험시공에 의한 경사계 계측결과 최대수평변위는 무보강의 경우 76.4mm, 쏘일네일링 보강은 71.1~74.6mm의 범위로 네일링 종류에 따라 큰 차이가 없었으며 변위형태는 프리스트레를 가한 PS대나무 네일링의 변위억제가 특징적으로 나타났다.
- (5) 쏘일네일링에서 발휘되는 응력분포는 시간 경과에 따라 증가율이 수렴하여 경사계 계측결과와 대체적으로 일치하는 경향을 보여 계측 결과의 적정성을 확인하였다. 응력의 크기는 쏘일네일링 두부에서 가장 크게 나타나고 쏘일네일링 종류별로는 철근보강재에서 가장 크게 대나무 네일링에서 가장 작게 나타났다.
- (6) 현장 인발시험 결과 인발저항력은 대나무 약 107kN, PS 대나무 약 117~137kN, 철근 156kN 정도의 범위로 나타났다. 98kN 이하의 인발하중 조건에서 두부변위는 대나무에서 가장 크게 철근에서 가장 작게 나타났다.
- (7) 유한요소해석결과와 현장 시험시공에 의한 계측결과와는 정량적 수치에서 차이를 보였지만 발생 변위의 형태와 두 가지 쏘일네일링공법의 발생 변위량에서 큰 차이를 보이지 않는다는 점에서 일치하는 결과를 나타내었다.
- (8) 설계 예를 통한 매개변수 분석결과 보강재의 길이가 짧아질수록 보강재 인장강도 증가가 안전율 증가에 크게 기여하지 않는 것으로 나타났다. 또한 인장강도가 상대적으로 작은 경우에는 보강재 길이를 증가시키는 것이 안전율 확보에 크게 기여하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 대나무 보강재와 같이 인장강도가 상대적으로 작은 경우에는 보강재의 길이가 짧은 경우의 적용성이 큰 것으로 분석되었다.
- (9) 설계 예로부터 인장강도 100kN 이상인 대나무 보강재를 사용하는 경우에 일반 철근 쏘일네일링과 안전율 차이가 거의 없는 것으로 판단되었으며, 본 연구의 실험결과를 바탕으로 대나무 직경 변화에 따라 소요의 안전율을 만족하는 대나무 보강재의 길이, 간격 등을 결정, 설계 및 시공이 가능할 것으로 판단된다.
- (10) 향후 다양한 지반조건에서 대나무 네일링의 현장 인발 시험 자료 축적과 적극적인 현장 적용이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2014년 대·중소기업협력재단 원가절감형 대·

중소기업 공동사업(과제번호 14BCF6)의 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과의 일부이며, 관련 기관에 감사드립니다.

References

1. 김홍택, 이경인 (2000), 고정자소켓을 이용한 제거식 가시철용 쏘일네일링공법, 건설신기술 257호.
2. 지에스건설(주), (주)케이디엔지니어링건축사사무소, (주)대작 컨스트럭션(2014), 제거식 네일과 제거식 강연선을 복합시킨 쏘일네일링공법, 건설신기술 724호.
3. (주)포스코건설, (주)장평건설, (주)삼안 (2012), 확장형 날개를 이용한 연약지반용 제거식 그라운드앵커공법, 건설신기술 652호.
4. (주)한국향만기술단 (2001), 대나무매트를 이용한 초연약지반 호안 및 가설도로의 기초처리공법, 신기술 제 290호.
5. Bang, Y. K., Kim, H. T., Yoo, S. D. and Yoo, C. H. (2005), A study for on application of bamboo soil nailing system, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 21, No. 6, pp. 31~40 (in Korean).
6. FHWA-SA-96-069R (1998), Manual for design and construction monitoring of soil nail walls, pp. 132~142.
7. FHWA-OIF-03-017 (2003), Geotechnical engineering circular No.7 soil nail walls. pp. 63~82.
8. French National Research Project Clouterre (1991), Recommendations clouterre 1991, pp. 660~675.
9. Kim, Y. H. (2002), Immediately settlement estimation of soft ground using bamboo mats, Master's Degree Dissertation, Chon Nam National University, pp. 31~34 (in Korean).
10. Korea Forest Research Institute (2010), Symposium of the new insights and enhancemenet of application of bammboo as the forest resources of the future, pp. 3~53 (in Korean).