

중공식 FRP쏘일네일링 시스템의 적용성 평가

An Estimation on the Applicability of Hollow FRP Soil Nailing System

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 이혁진²⁾, Hyuk-Jin Lee, 정우철³⁾, Woo-Chul Jung, 고희선⁴⁾, Hyung-Seon Koh

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Hongik University.

²⁾ 홍익대학교 대학원 토목공학과 박사 후 과정, Post Doc., Dept. of Civil Eng., Hongik University.

³⁾ 홍익대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Master's Course, Dept of Civil Eng., Hongik University.

⁴⁾ 삼성물산 건설부문 건축기술팀 토목파트 과장, Manager, Civil Eng. Part, Arch. D&C Team, Samsung Corporation.

SYNOPSIS : Soil nailing is a reinforcement method used for stabilizing excavated wall or slope. Due to its many advantages such as ease of construction and economical efficiency, use of soil nailing is increased. However, the soil nail can't trespass on the neighbor private land, which pays rent for use. For this reason, removable soil nailing system was developed. However, the removal rate of this system is just about 50~70%. To solve this, the Fiber Reinforced Polymer (FRP) soil nailing system, which does not need to be removed and allows for the trespass on the private land, is developed.

In this paper, through theoretical and experimental studies in laboratory and field, we evaluate the stability and behavior characteristics of the FRP nail system. Besides, numerical analyses using FLAC2D were performed for various soil conditions, where the simulations for pullout tests were carried out. As a result, compared with the conventional removable soil nailing system, the FRP soil nailing systems show similar behavior characteristics.

Key words : FRP soil nailing system, Removable soil nailing system, Pullout test, Numerical analysis

1. 서론

쏘일네일링 공법은 국내의 경우 1993년 가시철 흙막이 벽체에 처음으로 적용된 이후 주로 사면보강 및 지반굴착분야 등에 그 적용성이 더욱 확대되고 있는 공법이며, 이에 관한 이론적 연구 및 실무적 응용기술들은 국내에서도 계속적으로 진보하며 개발되고 있는 추세에 있다. 그러나, 지중매설물이 인접하여 존재하거나 대지경계선을 준수하여야 하는 등의 굴착시공조건에 의해서 설치된 쏘일네일의 길이 및 간격이 제한되거나 불가피한 경우에는 대지사용료를 지불하는 경우가 많다. 이것은 공사에 직·간접적으로 영향을 주며 시공비의 증대를 초래하게 된다. 또한, 기존의 쏘일네일공법은 보강재로 사용되는 강보강재의 무거운 중량으로 인해서 취급이 어렵고, 지하수에 의한 부식으로 인해서 장기적인 안정성이 저하될 수 있다. 이 중에서 국내에 소개된 공법은 김 등(2000)에 의해 개발된 고정자 소켓을 이용한 제거식 쏘일네일링으로서 굴착공사 완료 후 쏘일네일을 용이하게 제거하기 위한 공법으로 개발되었다. 그러나 이러한 고정자 소켓을 이용한 제거식 쏘일네일링 공법도 설치 및 제거전까지의 시점에서는 대지사용을 위한 지주의 동의를 얻어야 하며, 쏘일네일에 큰 휨변형이 발생하게 되면 제거가 불가능해진다는 문제점이 있다. 일반적으로 제거식 쏘일네일의 제거율은 50~70%로 알려져 있다. 따라서, 기존의 쏘일네일에 비해 충분한 사용성을 가지면서도 제거가 불필요하고 인근대지 침범에 대한 문제를 해결할 수 있

는 공법이 요구되고 있는 실정이다. 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 개발된 토목구조용 신소재 중 에서 대표적인 것으로 불포화 폴리에스테르 수지를 유리섬유나 기타 보강재와 혼합 성형된 FRP(Fiber Reinforced Plastic)를 들 수 있다. FRP는 가볍고 가공성이 뛰어나며 인장강도가 크기 때문에, 지반보 강재로의 적용이 용이하며 부식 및 열에도 강한 특성을 가지고 있다. 이와 같이 FRP가 갖는 재료적 이 점을 쏘일네일공법에 적용하면, 도심지 굴착공사와 같이 인접건물이 많은 경우 대지경계선 침범에 따른 점용료의 문제, 네일의 길이 및 간격제한의 문제, 인접구조물 신축공사시 발생하는 시공장애의 문제를 해소할 수 있다. 이러한 이유로 인해서 높은 인장강도를 나타내는 FRP를 강보강재 대신 보강재로 사용 하고, FRP 내부에 중공을 두어 그라우트 주입구를 대신하도록 하여 그라우팅을 위한 별도의 장치가 필 요치 않는 중공식 FRP 쏘일네일링 시스템을 개발하게 되었다. 본 연구에서는 FRP 쏘일네일의 특성을 고려한 FRP 쏘일네일의 사용성 및 안정성에 대한 평가와 함께 다양한 지반조건에 대한 FRP 쏘일네일 의 적용성을 알아보았다. 이를 위해서 제거식 쏘일네일링과 FRP 쏘일네일에 대한 기본 물성실험과 현 장 인발시험 및 현장 시험시공 그리고 유한차분해석 프로그램(FLAC 2D, version 3.3)을 이용하여 지반 조건별 거동 특성을 비교·분석하였다.

2. 중공식 FRP 재료의 역학적 특성

2.1 이론적 배경

FRP 재료를 사용한 보강재의 인발 거동에 대한 기존 연구결과로서, Zhang 등(2001)은 FRP 앵커의 거동 특성을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- FRP의 응력-변형률 관계는 파괴시까지 선형이며, 항복 구간은 뚜렷이 나타나지 않는다.
- FRP 앵커는 높은 인장강도를 가진다.
- 공학적으로 FRP는 앵커로 사용하기에 충분하다.

Benmokrne 등(1996)에서는 FRP 앵커의 인발 거동에 관하여 연구를 하였으며, 결과를 요약하면 다 음과 같다.

- FRP 앵커와 그라우트의 부착력은 강재-그라우트의 부착력보다 작다.
- FRP 앵커에 코팅을 하면 그라우트와의 부착력은 더 작아진다.
- 작은 탄성계수로 인하여 파괴시 미끄러짐이 steel보다 크게 발생한다.
- FRP 앵커에 대한 인발시험결과, 인발저항력은 일반 강재 쏘일네일과 비슷한 값을 나타낸다.

2.2 FRP 재료의 역학적 특성

앞서 언급한 바와 같이 일반적인 FRP의 재료적 특성은 강재에 비하여 인장강도가 크고 탄성계수는 작 다. 또한 기존연구에서 알려진 바와 같이 FRP 쏘일네일과 그라우트 사이에서 미끄러짐 현상이 발생할 위험성을 가지고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위한 기초 단계로서 중공식 FRP 쏘일네일 시스템에 사용되는 FRP 재료에 대해서 기본적인 역학실험을 수행하였으며, 그 결과를 표 1에 요약·정리하였다.

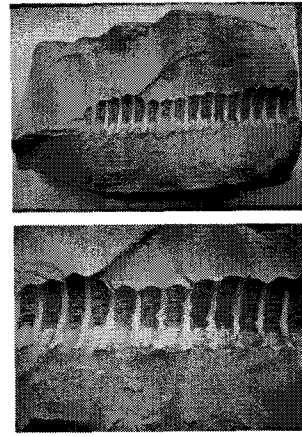
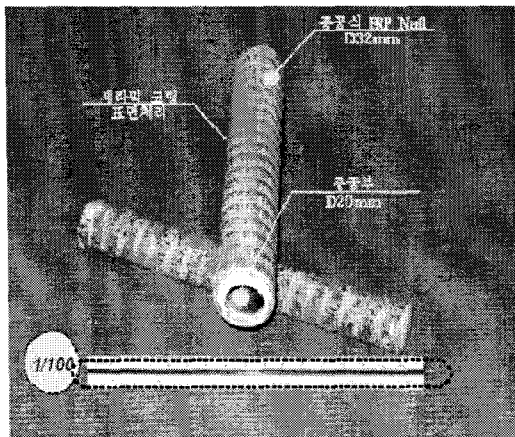
실험 결과, FRP 쏘일네일의 최대인장강도와 인장탄성계수는 일반적인 철근에 비해 각각 130%, 17% 로 나타났다. FRP 재료의 탄성계수가 일반 re-bar에 비해서 작기 때문에 쏘일네일 및 지반의 변형이 일반적인 쏘일네일보다 클 것으로 예상되며, 쏘일네일 본체와 그라우트체 사이에서 인발력 작용시 거동 에 대한 검토도 필요하다.

그라우트와 쏘일네일 본체 사이의 거동은 Zhang 등(2001)의 연구에 의하면 FRP 재료의 역학적 성질 에 크게 영향을 받는다고 알려져 있다.

표 1. FRP 재료의 역학시험 결과

	최대인장강도 (MPa)	최대전단강도 (MPa)	최대 휨강도 (MPa)	인장탄성계수 (MPa)	휨탄성계수 (MPa)
1차 시험	434.21	43.46	-	31897.04	-
2차 시험	573.12	37.62	558.11	34652.21	28910.00
3차 시험	536.37	40.64	700.58	28650.69	26633.67
평 균	514.57	40.57	629.35	31733.31	27771.84

그러나 Zhang 등(2001)과 Benmokrane 등(1996)은 표면이 미끈하거나 약간의 돌기만이 있는 FRP 재료를 사용한 보강재에 대한 연구였다. 이들의 결과에 따르면, FRP 쏘일네일과 그라우트의 거동에서는 미끄러짐이 상호거동의 가장 큰 요인으로 알려져 있다. 이에 따라 FRP 쏘일네일과 그라우트의 미끄러짐을 최소화할 수 있도록 그림 1 a)와 같은 FRP 쏘일네일이 고안되었다. 연속적인 커다란 돌기를 만들기 위해서 일정 온도 내에서 FRP관에 FRP를 감는 방법이 사용되었다. 또한 시공시 그라우트 주입의 편리함을 위하여 별도의 그라우트 주입 호스를 대체할 수 있는 중공을 두었다.



(a) 중공식 FRP 쏘일네일의 모습 (b) 중공식 FRP 쏘일네일의 그라우트 구멍 형상
그림 1. 중공식 FRP 쏘일네일의 주면부 특성

그림 1 b)는 풍화토 지반에서 인발시험을 파괴시까지 실시한 후 그라우트 코어(core)를 확인한 결과로서, 큰 돌기로 인해서 FRP 쏘일네일의 본체와 그라우트 사이의 미끄러짐은 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 중공부를 두어서 밀실한 그라우트를 형성시킬 수 있으므로 기존의 쏘일네일보다 좋은 시공성 및 그라우트의 밀실화를 기할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 현장시험을 통한 중공식 FRP 쏘일네일의 거동특성평가

3.1 현장개요

본 연구에서는 중공식 FRP 쏘일네일의 실제 거동특성을 파악하기 위하여 시험시공을 실시하였다. 시험시공은 크게 현장인발시험과 현장시험시공으로 나누어질 수 있으며 현장시험시공의 경우는 경사계, 지표침하계, 변형율계, 지하수위계 등을 설치하여 계측을 실시하였다. 현장의 지반 물성치는 강서토질

(2004)의 결과를 이용하였으며, 정리하면 표 2와 같다. 대표단면의 전개도와 단면도는 각각 그림 2 및 그림 3과 같으며 제거식 쏘일네일과 FRP 쏘일네일의 거동 특성을 비교하기 위하여 그림 2와 같이 적용 구간을 둘로 나누어서 한쪽은 FRP 쏘일네일을 시공하고 다른 한쪽은 제거식 쏘일네일을 적용하여 시공을 실시하였다.

표 2. 시험시공 현장의 지반 물성치

물성치	매립토층	퇴적토층	풍화암층
층두께 (m)	1.0	7.5	3.0
단위중량 (KN/m^3)	18	18	20
내부마찰각 ($^{\circ}$)	23	26	34
점착력 (kPa)	0	5	28
탄성계수 (kPa)	30,000	50,000	100,000

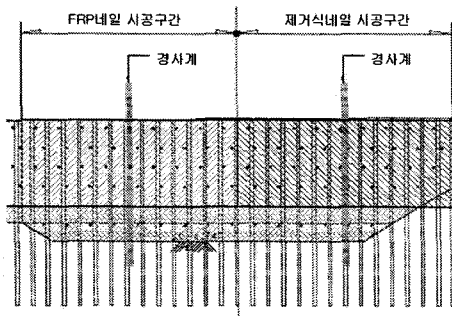


그림 2. 현장시험부지 전개도

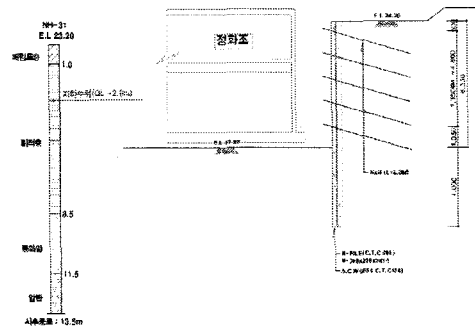


그림 3. 현장시험부지 단면도

3.2 현장시험 결과분석

3.2.1 현장인발시험 결과

FRP 쏘일네일의 최대인발력과 그 때의 두부 변위를 알아보기 위하여 현장인발시험을 수행하였다. 쏘일네일의 인발력은 벽체의 안정성을 유지시키는 중요한 요소이며, 인발과괴에 대한 저항력을 평가하는데 그 목적이 있다. 인발시험은 제거식쏘일네일과 FRP쏘일네일의 두 가지 경우에 대하여 실시하였으며 쏘일네일 길이 3m, 네일설치각도 15°로 실제 시공과 같이 굴착, 슛크리트 타설, 쏘일네일의 정착 순으로 진행하였다. 계측은 제거식 쏘일네일과 FRP 쏘일네일의 수평변위와 지표침하량 그리고 변형률을 측정하였다. 그림 4는 FRP 쏘일네일에 대한 현장 인발시험의 전경이며 그림 5는 쏘일네일 두부로부터 쏘일네일의 축을 따라서 두부에서 0.8, 1.5, 2.2, 2.9m가 되는 위치에서 측정된 변형률계이지 계측 결과이다.

인발시험결과, 최대인발력은 200kN으로 측정되었으며, 인발거동은 제거식 쏘일네일에서도 비슷한 값이 얻어졌다. 이때의 FRP 쏘일네일 신장량은 3m 길이의 FRP 쏘일네일에 대하여 200kN의 인발시 27.47mm로 측정되었다. 전체적인 변형률은 약 0.0082이다. 또한 시험결과 FRP 쏘일네일의 주변 마찰력은 198.1 kPa로 같은 지반에 동시에 시험한 제거식 쏘일네일의 시험 결과인 193.2 kPa와 비슷한 값이 측정되었다. 그러나 제거식 쏘일네일의 계측 결과는 고정자 소켓과 쏘일네일체 사이에 미끄러짐이 발생하여 고정자 소켓에 설치한 변형률계이지의 값은 의미가 없게 되어 본 연구에서는 그 내용을 신지 않았다.

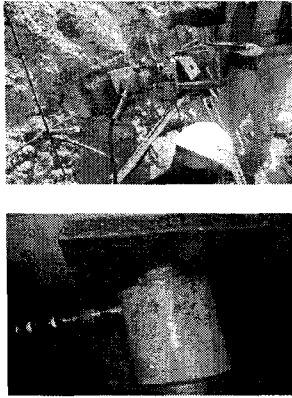


그림 4. FRP 쏘일네일의 현장인발시험 전경

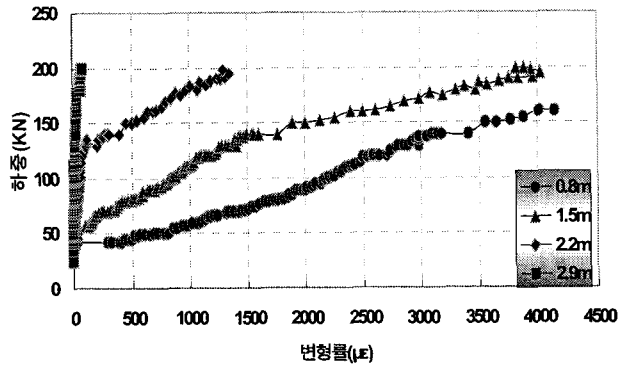


그림 5. FRP 쏘일네일의 현장인발시험 결과

3.2.2 현장시험시공결과

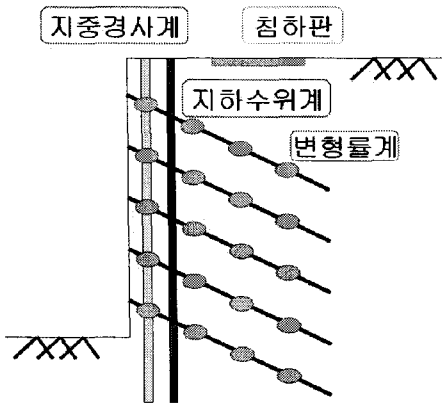


그림 6. 계측기 설치도

현장 시험시공은 지반에 FRP 쏘일네일과 제거식 쏘일네일을 설치하여 일정기간(25일) 동안 쏘일네일의 거동특성을 알아보기 위하여 실시되었다. 그림 6과 같이 지반에 수평경사계, 지표침하계, 지하수위계를 설치하였고, 쏘일네일에는 변형률계를 설치하였다. 굴착심도 5.2m에 대해서 4단으로 굴착하고 쏘일네일의 길이 6m, 수직간격 1.2m, 수평간격 1.35m로 설계되었다. 또한, 시험시공과 함께 변형률계는 쏘일네일의 양끝단을 제외하고 1m 간격으로 설치하였으며, 변위를 측정하기 위하여 지중경사계와 지표침하계를 설치하였다.

시험시공 후 계측결과를 그림 7에 제시하였다. 지표침하는 제거식 쏘일네일과 FRP 쏘일네일 두 가지 경우 모두 거의 발생하지 않았으며, FRP 쏘일네일이 설치된 굴착벽체의 수평변위가 제거식 쏘일네일이 설치된 굴착벽체의 수평변위에 비하여 120% 정도 큰 것으로 나타났다. 또한 시험시공기간동안의 축력변화를 살펴보면, 제거식 쏘일네일의 축력이 FRP 쏘일네일의 축력에 비해서 10배 가량 큰 것을 알 수 있다.

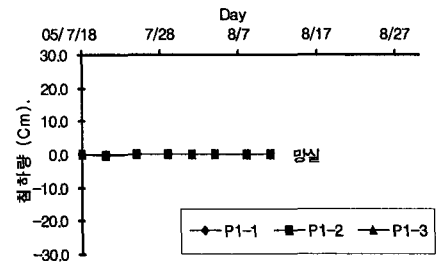
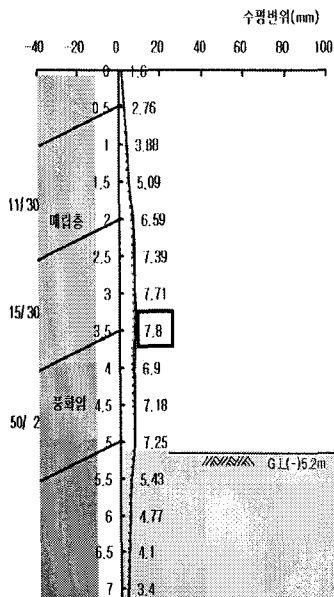
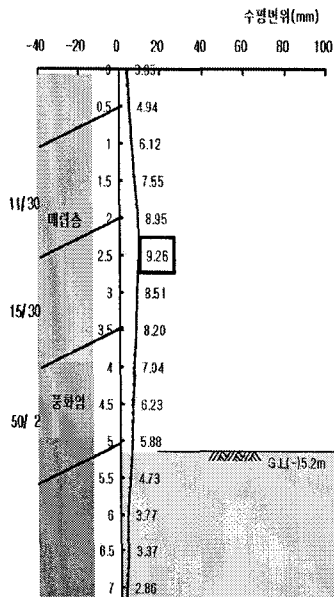
4. 수치해석을 통한 FRP 쏘일네일의 적용성 평가

4.1 수치해석 개요

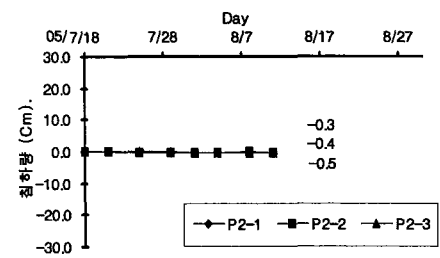
현장시험시공을 통하여 FRP 쏘일네일이 기존의 제거식 쏘일네일에 비해서 축력이 작게 발생한다는 점 이외에는 안정성에 있어서 큰 차이가 없으며, 사용성 측면에서는 벽체 변위가 120% 정도 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 범용수치해석 프로그램인 FLAC 2D(version 3.3)를 이용하여 다양한 표준관입시험의 N치를 갖는 지반에 대해서 FRP 쏘일네일과 제거식 쏘일네일의 인발시험에 대한 모델링을 실시하여 현장인발시험과 현장시험시공과의 비교, 분석하였다.

인발시험모델링은 N치가 10, 20, 30, 40, 50인 지반에 대하여 수행하였으며 하중은 단계별로 증가시켜서 파괴시의 인발력을 평가해 보았다. 모델은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 표 3에는 인발시험 모델링에 사용된 쏘일네일 관련 물성치가 제시되어 있으며, 표 4에는 지반관련 물성치가 제시되어 있다.



(c) 지표침하량(FRP Nail)



(a) 수평변위(FRP 쏘일네일) (b) 수평변위(제거식 쏘일네일) (d) 지표침하량(제거식 쏘일네일)

그림 7. 시험 시공시 지반의 수평변위 및 지표침하량 측정 결과

표 3. 인발시험모델링에 사용된 쏘일네일 관련 물성치

쏘일네일의 종류	쏘일네일의 본체			천공 직경(mm)
	설치 길이(m)	탄성계수(kPa)	직경(mm)	
제거식 쏘일네일	5	2.06E+08	29	105
FRP 쏘일네일	5	3.14E+07	32	105

표 4. 해석에 사용된 지반 물성치

해석 경우	지반의 N치	단위중량 (kN/m ³)	탄성계수 (kPa)	포아송비	내부마찰각 (°)	점착력 (kPa)
1	10	16	10000	0.3	26	5
2	20	16.5	20000	0.31	28	5
3	30	17	30000	0.32	30	5
4	40	17.5	50000	0.33	32	5
5	50	18	80000	0.35	35	5

4.2 수치해석 결과분석

프로그램 해석결과는 그림 8과 같으며 N치별 네일 두부의 인발력 및 그 때 두부의 변위를 나타낸 것이다. 인발시험에 대한 해석결과(그림 8), 제거식 쏘일네일과 FRP 쏘일네일의 인발저항력은 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 모든 N치에 대해서 제거식 쏘일네일에 비해서 FRP 쏘일네일이 인발파괴시 두부 변위가 크게 발생하며, 그 범위는 7.5mm(N=10) ~ 22mm(N=50)로 N치 증가와 함께 인발파괴시 두부 변위가 증가됨을 알 수 있었다. 이는 FRP재료의 특징인 낮은 탄성계수에서 기인하는 것으로 판단되며 하중증가에 따른 쏘일네일의 축력은 150 kN까지는 선형적인 변화양상을 나타내다가 그 이후 제거식 쏘일

네일의 축력이 FRP 쏘일네일보다 약 10 kN 크게 축력을 받는 것을 알 수 있다. 두 재료 모두 인장강도 부족에 의한 항복현상은 관찰되지 않았다. 두 가지 쏘일네일 모두에서 최대인발저항력이 기존 예측치보다 작게 산출되는 것은 전면벽체나 횡방향 토압에 의한 구속력 증가를 고려하지 않았기 때문으로 판단된다.

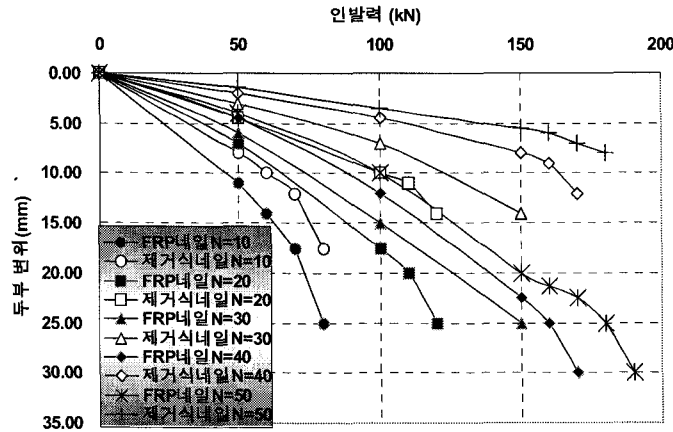


그림 8. N치에 따른 인발력과 변위

5. FRP 쏘일네일의 사용성 평가

5.1 개요

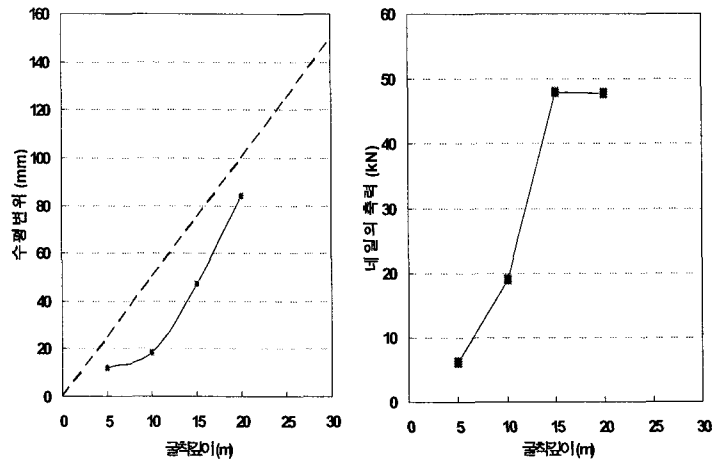
FRP 쏘일네일의 적용성을 평가하기 위하여 범용수치해석 프로그램인 FLAC 2D(version3.3)를 이용하여 일반적인 지반조건(N=30인 지반)을 가정하고 5m, 10m, 15m, 20m깊이를 갖은 굴착벽체를 모델링하였다. 각 굴착깊이에 대하여 1.25m간격으로 쏘일네일을 설치하여 수평변위의 발생량을 검토하였다.

5.2 높이별 FRP 쏘일네일의 사용성 평가

FRP 쏘일네일은 변위에 취약한 경향을 나타내기 때문에 각 굴착깊이에 대한 최대 수평변위를 기준으로 사용성을 평가하고자 한다. 이를 위해 수치해석 프로그램인 FLAC 2D(version3.3)를 이용하여 N치가 30인 지반에 대해서 각 굴착깊이(5m, 10m, 15m, 20m)별로 벽체의 최대수평변위 및 쏘일네일에 발생하는 축력이 산출된 값을 도시하면 그림 9와 같다. 그림 9에서 알 수 있듯이, 최대횡방향 변위는 굴착높이가 20m일 때까지는 일반적인 기준치(1/200H, H : 굴착높이, 한국지반공학회, 2002)보다 작은 것을 알 수 있으나, 20m 이상인 경우는 변위양상을 고려했을 때, 관리기준치를 초과하는 변위가 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 이러한 위험성에 대해서 설계단계에서 검토하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

6. FRP 쏘일네일의 휨 및 전단파괴에 대한 위험성 평가

FRP 재료를 사용한 쏘일네일의 경우는 일반 re-bar를 사용한 강재와는 달리 재료자체의 인장파괴 뿐만 아니라, 휨 및 전단력 부족으로 인해서 쏘일네일체에 파괴가 발생할 위험이 있으므로 FRP 쏘일네일의 휨과 전단에 대한 파괴 가능성을 검토하였다.



(a) 굴착벽체의 수평변위 (b) 쏘일네일의 축력
 그림 9. 굴착깊이에 따른 굴착벽체의 최대수평변위 및 쏘일네일의 축력

보강토가 전단을 받을 때 인장력, 전단력 및 휨모멘트 발현에 관한 연구는 탄소성모델(Schlosser, 1982, 1983 ; Blondeau 등, 1984)을 이용한 이론적 연구와 실험적 연구(Marchal, 1984)에 의해서 이루어졌으며, 다음과 같은 결론이 도출되었다.

- 1) 쏘일네일 토체의 전단시, 쏘일네일의 파괴는 파괴면에서 인장-전단에 의해서 발생하거나, 파괴면 외측에 위치하는 최대휨모멘트 지점에서의 소성화에 의해서 발생한다. 쏘일네일을 형성하는 재료는 연성을 가지고 있기 때문에, 최대 휨모멘트가 발생하는 지점의 소성화는 실제로 쏘일네일의 파괴에 해당하지 않는다. 소성화를 제한하기 위한 변형이 발생하고 쏘일네일에서 두 개의 소성 힌지가 발생하게 되고 횡방향 변위는 흙의 횡방향 지지력 p_u 의 발현에 의해서 제한되게 된다. 이러한 발현 과정에서, 최대 전단력이 발생하는 지점에서 인장-전단에 의해서 쏘일네일은 파괴되게 된다.
- 2) 쏘일네일에 의해서 흙에 발생하는 횡방향 토압 p 가 그 한계값 p_u 에 도달했을 때 쏘일네일에 의해서 지반이 잘리게 된다.

Anthoine(1987)에 의해서 최대 모멘트($T_c=0$) 지점에서 쏘일네일의 소성화는 다음과 같은 포물선의 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_{\omega} = a \frac{M_0}{I_0} \left[1 - \left(\frac{T_n}{R_n} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서, 상수 a 는 3.12이며, T_{ω} 는 가상파괴면에 작용하는 전단력이다.

쏘일네일의 소성화는 쏘일네일에 작용하는 횡토압 때문에 발생되며, 가상파괴면에 작용하는 최대치는 다음과 같다.

$$P_0 = \frac{2T_{\omega}}{Dl_0} \quad (2)$$

흙의 지지력 (P_u)은 파괴의 유형을 결정하며, 가상파괴면에 작용하는 전단력과 함께 다음 식으로 표현된다.

1) $P_u \leq P_0$: 쏘일네일이 소성화되기 전에 흙의 소성화에 의한 파괴

$$T_{c1} = -\frac{P_u D l_0}{2} \quad (3)$$

2) $P_u \geq P_0$: 쏘일네일에서 소성 힌지가 발생하고 흙의 소성화에 의한 파괴

$$T_{c2} = b \frac{M_0}{l_0} \left[1 - \left(\frac{T_n}{R_n} \right)^2 \right] + c P_u D l_0 \quad (4)$$

여기서, b : 1.62의 값을 갖는 계수

c : 0.24의 값을 갖는 계수

$$l_0 : \text{쏘일네일의 전이길이} = l_0 = \sqrt{4cf} \frac{4EI}{k_s D}$$

M_0 : 휨에 대한 강도

T_n : 쏘일네일에 발생하는 전단력

R_n : 인장에 대한 저항력

D : 쏘일네일의 직경

식 (1) ~ (4)를 이용하여 쏘일네일 내부에 발생하는 전단력을 검토한 결과가 표 5에 제시되어 있다. 지반의 N치와 무관하게 모든 경우에서 발생이 예상되는 전단력이 전단강도(표 1)값보다 훨씬 작음을 알 수 있다. 따라서, FRP 쏘일네일의 보강제로서 전단 및 휨파괴의 위험성은 없는 것을 알 수 있다.

표 5. 쏘일네일의 휨 및 전단파괴 검토 결과

	전이길이, l_0 (cm)	지반반력계수, k_s (kN/m ³)	흙의 한계압, P_u (kPa)	전단력, T_c (kN)	안정성검토
N=10	18.9	4902.9	500	3732.62	O.K
N=20	24.9	14708.8	1000	17521.95	O.K
N=30	28.3	21514.6	1500	19308.20	O.K
N=40	29.7	29417.5	2000	21984.93	O.K
N=50	30.8	34320.5	2500	24932.79	O.K

7. 결론

본 연구는 FRP를 건설재료로 사용한 중공식 FRP 쏘일네일링 시스템의 거동 특성을 평가하였다. 이를 위해서 건설재료로서 FRP 재료가 쓰인 사례를 조사하였으며, 실내 실험을 통하여 재료적 특성을 파악하고 이러한 물리적 특성을 가진 FRP 쏘일네일의 거동 특성을 알아보았다. 이를 위하여 현장 인발 시험과 현장 시험시공을 실시하였으며, 유한차분해석 프로그램인 FLAC 2D를 이용하여 다양한 지반 조건을 가정하여 인발시험을 모델링하여 수치해석을 실시하였다. 이러한 과정에서 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 현장 인발시험 및 수치해석에 의해서 FRP 쏘일네일과 제거식 쏘일네일의 인발저항력 검토 결과, FRP 쏘일네일은 인발저항력 측면에서 제거식 쏘일네일과 큰 차이가 나지 않는 것을 알 수 있었다. 또한, 현장인발시험 결과, FRP 쏘일네일은 인발력 작용시 FRP 본체와 그라우트 사이의 미끄러짐이 발생하는 것을 방지하기 위하여 돌기를 형성시켰으며, 이로 인하여 두 재료 사이의 미끄러짐은 효과적으로 방지할 수 있다는 것을 확인하였다.
- (2) 현장 시험시공 계측 결과를 검토해 본 결과, 제거식 쏘일네일을 시공한 굴착벽체의 횡방향 변형은 FRP 쏘일네일을 시공한 굴착벽체의 횡방향 변형과 큰 차이가 없는 것을 알 수 있었다. 또한, FRP 쏘일네일과 슛크리트로 시공된 벽체의 횡방향 변위는 일반적인 네일 시공의 경우(N치가 30정도이고 네일의 설치 간격이 1.25m, 쏘일네일의 설치길이가 0.7H), 굴착 벽체의 높이가 20m까지는 연직벽체의 사용성에 문제가 없을 것으로 판단된다.
- (3) FRP 쏘일네일의 지반 보강재로서의 적합성 검토를 위해서 휨과 전단파괴 가능성에 대해서 검토결과, FRP 쏘일네일은 휨과 전단에 대한 파괴가능성이 없는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김홍택, (주)오륙개발, (주)브니엘컨설팅(2000), 고정자소켓을 이용한 제거식 쏘일네일링 공법(보완본) 신기술보고서.
2. (주)강서토질(2004), 월곡 제2구영 주택재개발 아파트 신축공사 지반조사 보고서.
3. (사)한국지반공학회(2002), 굴착 및 흙막이 공법, 구미서관, pp. 598.
4. Anthoine, A.(1987), Stabilité d'une fouille renforcée par clouage, *Proc. 4th Franco-Polish Conference*.
5. Benmokrane, B., Xu, H., and Bellavance, E.(1996), Bond strength of cement grouted fibre reinforced plastic(FRP) anchor bolts, *Inter. J. of Rock Mech. and Min. Sci.& Geomech. Abst.*, vol. 33, no 5, p. 455 ~ 465.
6. Blondeau, F., Christiansen, M., Guilloux, A., and Schlosser, F.(1984), TALREN: Méthode de calcul des ouvrages en terre renforcée, *Proc. Int Conference. In situ Soil and Rock Reinforcement, Paris*, pp. 219 ~ 224.
7. Marchal, J.(1984), Renforcement des sols par clouage. Étude expérimentale en laboratoire, *Proc. Int. Conf. In situ Soil and Rock Reinforcement, Paris*, pp. 275 ~ 278.
8. Schlosser, F.(1982), Behaviour and design of soil nailing. *Proc. Symp:Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok*, pp. 399 ~ 413.
9. Schlosser, F.(1983), Analogies et différences dans le comportement et le calcul des Ouvrages de Soutènement en Terre Amée et par Clouage du Sol, *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics* No. 418.
10. Zhang, B., Benmokrane, G., Chennouf, A., Mukhopdhyaya, P. and El-Safty, A.(2001), Tensile behaviour of FRP tendons for prestressed ground anchors, *ASCE J. of Composites for Construction*, vol. 5, no 2, pp. 85 ~ 93.