

원심모형실험을 이용한 방추형 콘 네일링 시스템의 장기거동 특성 평가 Evaluation of Long-Term Behaviors of the Cone Nailing System using Geotechnical Centrifuge Guidelines

박시삼¹⁾, Si-Sam Park, 배우석²⁾, Woo-Seok Bae, 정우철³⁾, Woo-Chul Jung,
김홍택⁴⁾, Hong-Taek Kim, 김용규⁵⁾, Yong-Kyu Kim

- 1) GS건설(주) 기술본부 연구개발팀 선임연구원, Senior Research Enger., Technical Division, GS E&C Corp.
- 2) 청주대학교 토목환경공학과 겸임교수, Adjunct Professor, Dept. of C&EI Engrg., Cheongju Univ.
- 3) 홍익대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Hongik Univ.
- 4) 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik Univ.
- 5) 성우지엔씨 대표이사, President, SUNGWOO G&C Co. Ltd.

SYNOPSIS : In case of the Soil Nail System applied to a slope, effects of vibrations from blasting, earthquake and creep of long term behaviors cause reductions of adhesion between grout and soil-nail. There are some reports of nail's pull-out failure by those reasons. In this paper it is suggested that the Cone Nailing System is enable to diminish effects of vibrations and creep. In this study on Cone Nailing System, the cones are installed to each nail by 2m. By such installing cones, the adhesion between nail and grout will increase and the long term creep behavior will decrease. In this study, the centrifuge test is performed to understand the behaviors of the Cone Nail System. For the centrifuge test, the soil tank is 52cm in width, 17cm in length and 35cm in height. In comparison with general soil nail, the centrifuge test of general soil nail(without cone) is performed equally. Additionally, the interface between cone nail and soil through the pull-out test is applied to *FLAC 2D* version 3.3. and the evaluation of application for the Cone Nail System in slope is performed.

Key words : Cone nail system, Centrifuge test, Pull-out test, Numerical analysis

1. 서 론

1990년 초 국내 보급되기 시작한 쏘일네일링 공법은 사면안정 및 지하굴착공사 등에 널리 적용되고 있는 보강공법으로, 주로 풍화암지반 이하에 적용하고 있으나, 최근에는 암반의 절리면 발달상태 등의 현장상황에 따라 암반사면에 적용되고 있는 대표적인 보강공법이라 할 수 있다. 암반사면에 쏘일네일링 공법을 적용할 경우, 대부분의 암반사면 보강공법이 영구 보강목적으로 적용되기 때문에, 크리프(creep) 변형 등을 반영한 장기인발거동특성을 평가하여 설계에 반영해야 할 것으로 판단되나, 현재 장기인발거동 특성을 반영하여 설계하는 경우는 거의 없는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 장기인발거동특성을 평가하여 설계에 반영할 수 있는 설계기법을 개발하기 위한 기초연구의 일환으로서 원심모형실험기를 이용한 일반 쏘일네일의 장기인발거동특성을 평가해 보았으며, 아울러 크리프 변형 및 잔류 인발저항 등의 장기인발거동특성이 우수한 방추형 콘 네일의 적용성도 평가해 보았다. 또한 개발중에 있는 방추형 콘네일의 현장인발시험 결과를 토대로, 수치해석을 위한 경계면요소(interface element)를 결정하여 방추형 콘 네일링 시스템의 변위감소효과 등을 살펴보았다.

2. 방추형 콘 네일링 시스템

2.1 구성요소

일반적인 쏘일네일링 시스템에 비해 진동 및 장기 크리프 변형 등에 저항할 수 있는 저항력을 향상시킨 개량 쏘일네일링 시스템인 방추형 콘 네일링 시스템의 개요도는 그림 1과 같다.

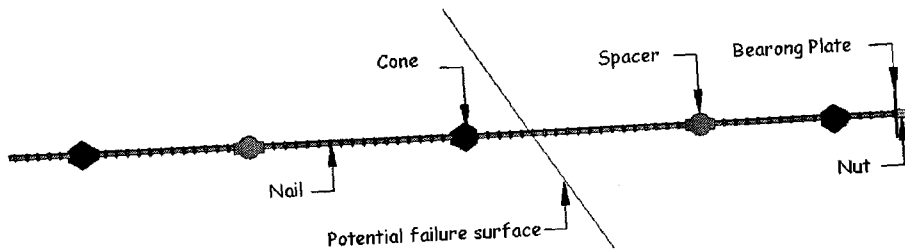
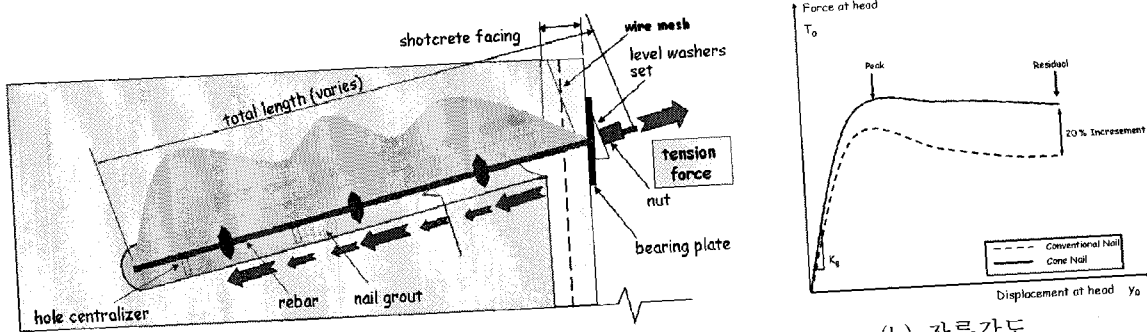


그림 1. 방추형 콘 네일의 구성

보강재 및 지압판 등은 일반적인 쏘일네일링 시스템의 재료와 동일하나, 보강재에 2m 간격으로 직경 7cm의 방추형 콘을 설치하여, 진동 및 장기 크리프 변형이 발생했을 경우 유발될 수 있는 인발과괴를 미연에 차단할 수 있는 공법이라 할 수 있다.

2.2 기본원리

일반적으로 사면안정을 목적으로 쏘일네일링 공법을 적용할 경우, 영구구조물로서의 안정성을 확보하는 것이 매우 중요한 요소인 것으로 판단된다. 따라서, 장기인발거동특성이 우수한 방추형 콘 네일링 시스템을 개발하였으며, 방추형 콘 네일링 시스템의 인발과괴시 개념도는 그림 2와 같다.



(a) 인발과괴시의 주변마찰력

그림 2. 방추형 콘 네일의 개념도

방추형 콘 네일링 시스템은, 그림 2(a)와 같이 지진시 진동 등에 의한 영향으로 시멘트 그라우트체에 크랙이 발생하였을 경우, 네일의 인발과괴를 미연에 방지할 수 있도록 고안하였으며, 방추형 콘의 경우 네일인발시 보강재에 전달되는 인발하중 등의 저항력을 방추형 콘에서 분산 발휘할 수 있도록 2m 마다 설치하였다. 아울러 'Recommendations Clouterre 1991' 보고서를 살펴보면, 장시간이 경과하였을 경우 일반적인 쏘일네일의 두부에서 발휘되는 인발강도는 20% 정도 감소하는 것으로 보고한바 있으나(그림 2(c)), 방추형 콘 네일링 시스템의 잔류저항강도의 감소율의 경우 일반 쏘일네일에 비해 크게 향상될 수 있을 것으로 판단된다.

3. 방추형 콘 네일의 원심모형실험

3.1 개요

본 연구에서는 방추형 콘 네일링 시스템의 장기인발거동 특성을 살펴보기 위해 원심모형실험을 수행하였으며, 원심모형실험기의 개요도는 그림 3과 같다.

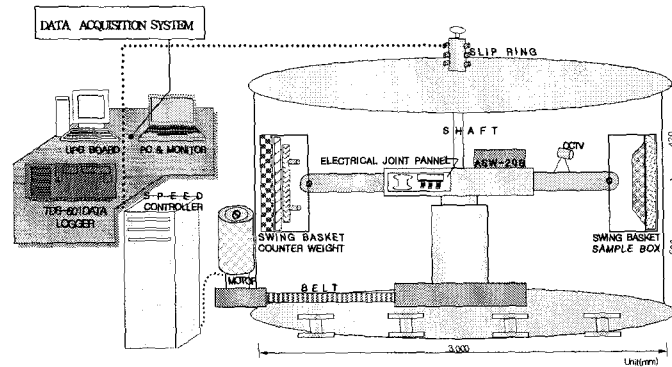


그림 3. 원심모형실험기의 개요도

원심모형실험기의 최대가속도는 200중력수준(g-level), 최대용량은 25g-ton으로 실험 가능한 모형토조의 최대크기는 500×500×300mm이고, 중심축에서 힌지까지의 거리가 920mm이고, 스윙바스켓 (swing basket) 저면까지의 거리는 1280mm이다. 원심모형실험기는 그림 3과 같이 기본 구조를 이루는 shaft와 boom, 2개의 스윙바스켓, slip ring으로 이루어져 있으며, 주요 장치로 구동장치, 자료 획득장치, 속도제어장치(speed controller), 모니터링 장치로 구성되어 있다. 양쪽의 boom은 shaft를 중심으로 회전하며, boom 끝에 swing basket이 힌지로 연결이 되어 있다. 스윙바스켓의 한쪽에 모형토조를 설치하고, 그 반대쪽은 모형토조와 평형을 맞추기 위한 평형추를 설치한다. 모형토조에 설치되어 있는 계측기로부터의 전기적 신호는 slip ring을 통하여 자료 획득장치에 기록된다. 삼상모터는 원심모형실험기를 가동시키며, 속도제어장치로 실험기의 회전수를 조절하여, 중력수준(g-level)을 조정할 수 있다. 그림 4는 원심모형실험기의 외부전경을, 그림 5는 원심모형실험기의 내부전경을 보여준다.

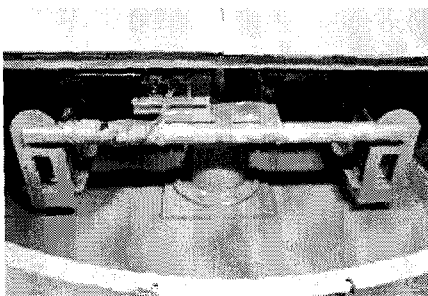


그림 4. 원심모형실험기의 외부전경

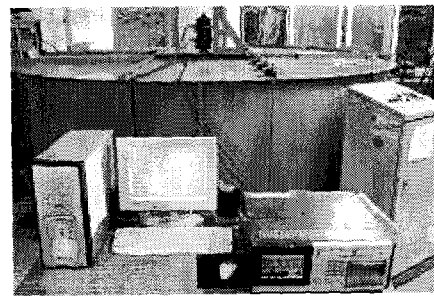


그림 5. 원심모형실험기의 내부전경

3.2 실험방법

실험은 균질한 지반을 형성하기 위해 주문진 표준사를 사용하였으며, 기본적인 물리·역학적 시험을 실시한 결과는 표 1과 같으며, 강사장치를 이용하여 주문진 표준사를 포설하였으며 단위중량은 95% 정도를 유지하였다(그림 6). 또한 네일이 설치된 위치의 전면부에는 지반의 변형을 측정하기 위해 토조바닥을 기준으로 3.5, 10.5 및 17.5cm 높이에 염색사를 포설하였다(그림 7).

표 1. 주문진 표준사의 기본 특성

| | | |
|----------|-------------------|-------|
| 다짐시험결과 | 비중 | 2.6 |
| | 최대건조단위중량 g/cm^3 | 1.664 |
| | 최소건조단위중량 g/cm^3 | 1.343 |
| | 최대공극비 | 0.936 |
| 체분석 결과 | 최소공극비 | 0.563 |
| | 균등계수 | 1.3 |
| | 곡률계수 | 1.02 |
| | D_{10} | 0.2 |
| 삼축압축시험결과 | D_{30} | 0.23 |
| | D_{60} | 0.26 |
| | 내부마찰각 | 42 |
| | 점착력 | 0 |

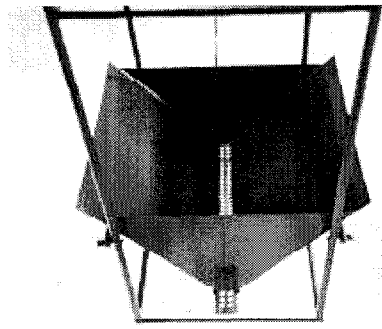


그림 6. 표준사 강사장치

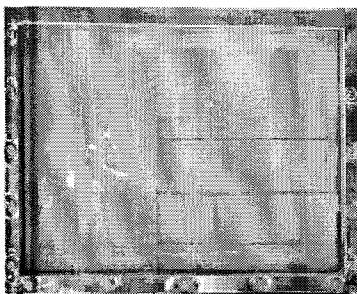


그림 7. 염색사 도포현황

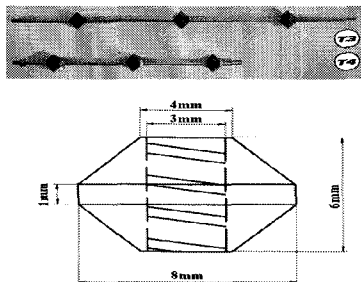


그림 8. 방추형 네일

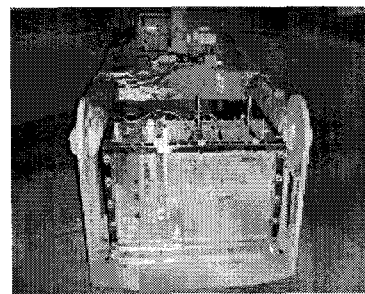


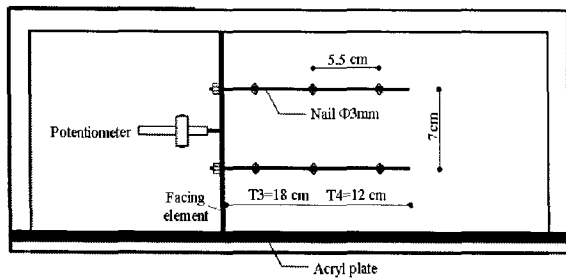
그림 9. 모형토조

원심모형실험은 중력수준 5g 간격으로, 각 중력수준에서 1분 동안 유지시켜가면서 증가시켰으며, 방추형 콘 네일 및 일반 쏘일네일의 경우에 대하여 모형을 제작하여 파괴가 발생할 때까지 수행하였으며, 실험의 개요는 표 2와 같다(그림 8 및 9).

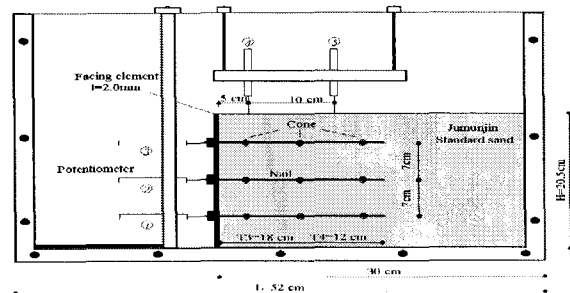
표 2. 지반의 원심모형실험 상세 조건

| 구분 | 보강벽체높이 (cm) | 뒷채움다짐도 (%) | 네일길이 (cm) | 네일간격 (cm) | G-Level | 네일보강재 |
|-----|-------------|------------|-----------|-----------|---------|---------|
| T 1 | 20.5 | 95 | 18 | 7x7 | 5~80 | 일반형 네일 |
| T 2 | 20.5 | 95 | 12 | 7x7 | 5~80 | 일반형 네일 |
| T 3 | 20.5 | 95 | 18 | 7x7 | 5~80 | 방추형 콘네일 |
| T 4 | 20.5 | 95 | 12 | 7x7 | 5~80 | 방추형 콘네일 |

철근보강재를 모사하기 위해 사용된 스테인레스봉은 7cm 간격으로 총 6본이 설치되었으며, 스테인레스봉은 네일길이에 따른 영향을 분석하기 위해 18cm 및 12cm로 변경하여 실험을 수행하였다(그림 10).



(a) 평면도



(b) 단면도

그림 10. 일반형 네일보강 지반의 파괴실험 개요도

4. 수치해석

4.1 개요

방추형 콘 네일링 시스템의 거동특성을 파악하기 위해 사용한 수치해석 프로그램은 *FLAC 2D ver 3.30*이며, 해석격자망은 그림 11과 같으며 해석에 적용한 지반강도 및 보강재의 특성치는 표 3과 같다.

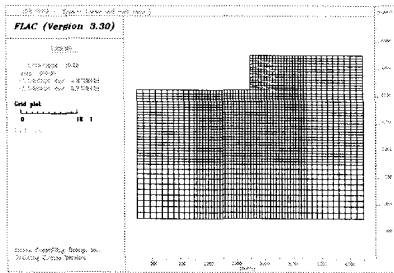


그림 11. 해석격자망

표 3. 지반강도 및 보강재 특성치

| 지반강도특성치 | | 보강재특성치 | |
|---------|----------------------|--------|--|
| 점착력 | 0.5 t/m ² | 직경 | 25mm |
| 마찰각 | 26° | 탄성계수 | 2.1×10 ⁶ kg/cm ² |
| 전단탄성계수 | 2690.23kPa | 항복강도 | 4000 kg/cm ² |
| 체적탄성계수 | 5830.33kPa | 길이 | 5m |

* 사면 절취고 : 6.33m

지반은 Mohr-Coulomb으로, 네일은 케이블요소(cable element)로 모델링 하였으며, 슛크리트의 경우 빔요소(beam element)로 모델링 하였으며, 총 5단의 단계별 굴착시 유발되는 수평변위량을 평가해 보았다.

4.2 접착강성 결정

쏘일네일에 축력이 작용하면, 그라우트가 거동을 하고 그 후 그라우트와 지반사이에서의 거동이 발생하게 되는데, 수치해석에서 쏘일네일을 케이블 요소로 모델링 할 경우 실제 주변마찰력(s-bond) 및 그라우트의 전단강성(k-bond) 등을 반영하기 위해 접착강성(s-bond 및 k-bond)을 결정하는 것이 매우 중요하다(그림 12).

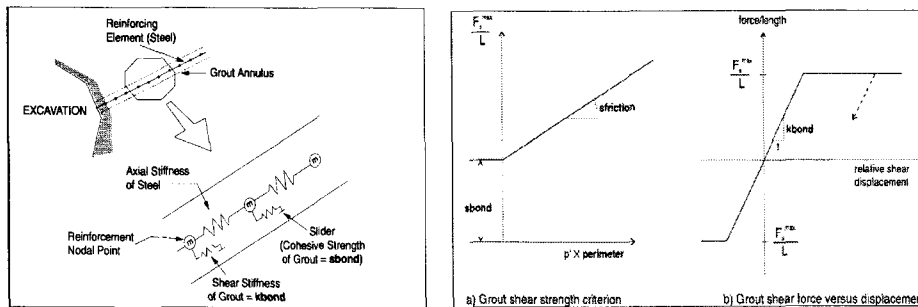


그림 12. 케이블 요소의 경계조건

따라서 본 연구에서는 방추형 콘의 주변마찰력 및 잔류강도 증대효과를 반영하여 해석을 수행하기 위해, 방추형 콘 네일의 현장인발시험 결과(표 4)를 토대로, 지반과 보강재 사이의 마찰저항력이라 할 수 있는 s-bond 값을 결정하였다.

표 4. 현장인발시험 결과

| 네일형태 | 네일길이(m) | 인발하중(ton) | 지반조건 |
|------|---------|-----------|------|
| 쏘일네일 | 3 | 7.54 | 풍화토 |
| 콘 네일 | 3 | 11.86 | |
| 쏘일네일 | 3 | 17.1 | 풍화암 |
| 콘 네일 | 3 | 23.26 | |

표 4를 토대로 결정된 s-bond 값의 경우, 방추형 콘 네일의 경우 일반네일에 비해 풍화도에 대해서는 50%, 풍화암에 대해서는 30% 정도 증가되는 것으로 평가되었다. 따라서 수치해석시 이를 반영하여 일반네일 및 방추형 콘 네일의 경계면 요소값을 다르게 적용하였다.

5. 분석 및 고찰

5.1 중력수준 증가에 따른 파괴거동특성

네일 보강재의 방추형 콘 설치 여부에 따른 장기인발거동특성을 평가하기 위해 수행한 원심모형시험 결과, 인발파괴형상은 그림 12와 같으며, 중력수준을 증가시켜가면서 측정한 수평변위 및 수직변위를 도시하면 그림 13과 같다.

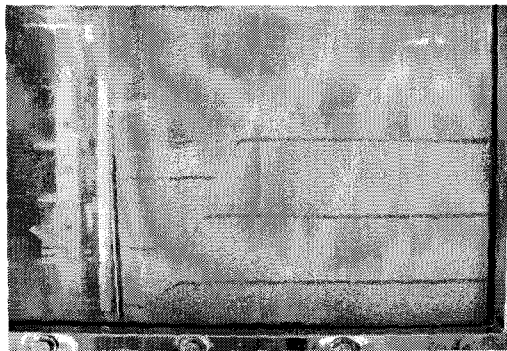


그림 12. 인발파괴시의 예상활동파괴면

그림 12의 모형토조의 파괴형상을 살펴보면, 토조바닥을 기준으로 3.5, 10.5 및 17.5cm 높이에 설치된 염색사의 변형형태가 전형적인 파괴흡쇄기 모양인 것으로 나타났다.

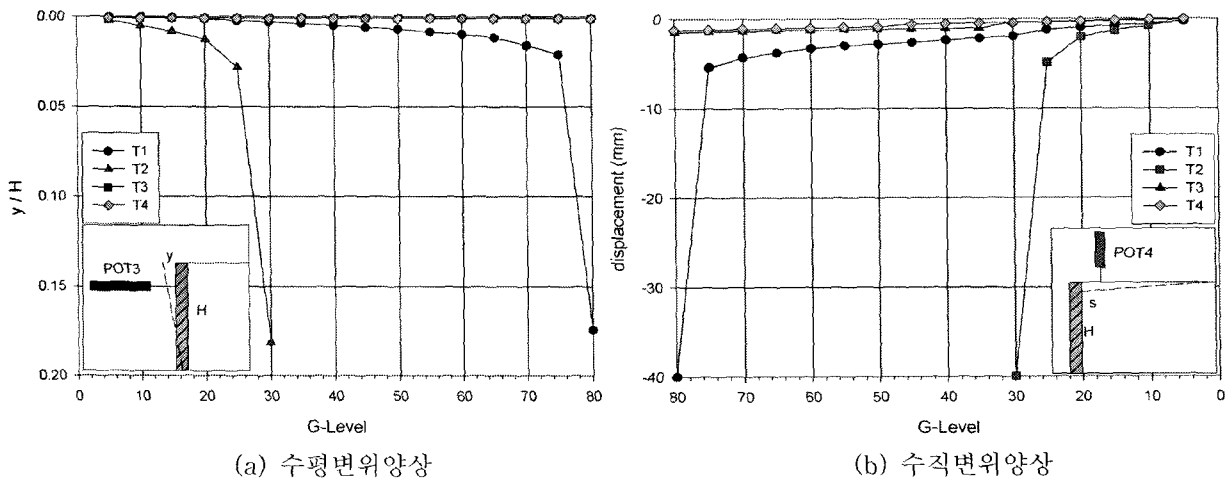


그림 13. 중력수준-변위 관계곡선

그림 13(a)의 결과를 살펴보면, 일반 쏘일네일의 경우, 네일길이 12cm 인 경우 25g 중력수준에서, 네일길이 18cm인 경우 75g 중력수준에서 파괴가 발생하는 것으로 나타났으며, 방추형 콘 네일링 시스템의 경우 길이변화에 상관없이 80g 중력수준에서 60분 동안 가속하여도 파괴가 발생하지 않았다. 따라서 방추형 콘 네일의 경우, 일반 쏘일네일에 비해 저항력이 크게 향상된 개량된 쏘일네일링 시스템인 것으로 판단된다. 또한 그림 13(b)에서 동일한 중력수준(25g)에서의 수직변위량을 비교해 보면, 네일의 길이가 12cm인 경우 일반 쏘일네일은 5.0mm, 방추형 콘 네일은 0.4mm 정도 발생하는 것으로 측정되었으며,

네일의 길이가 18cm인 경우 일반 쏘일네일은 1.2mm, 방추형 콘 네일은 0.4mm 정도 유발된 것으로 계측되었다. 따라서 방추형 콘을 설치함에 따라 67~92% 정도 수직변위 감소효과가 있는 것으로 평가되었다.

5.2 장기인발거동특성

방추형 콘 네일의 장기인발거동 특성을 평가하기 위해, 네일길이 18cm인 경우에 한하여 동일한 중력수준(75g)에서 시간경과에 따른 수평변위 파괴양상을 확인해 보았다(그림 14).

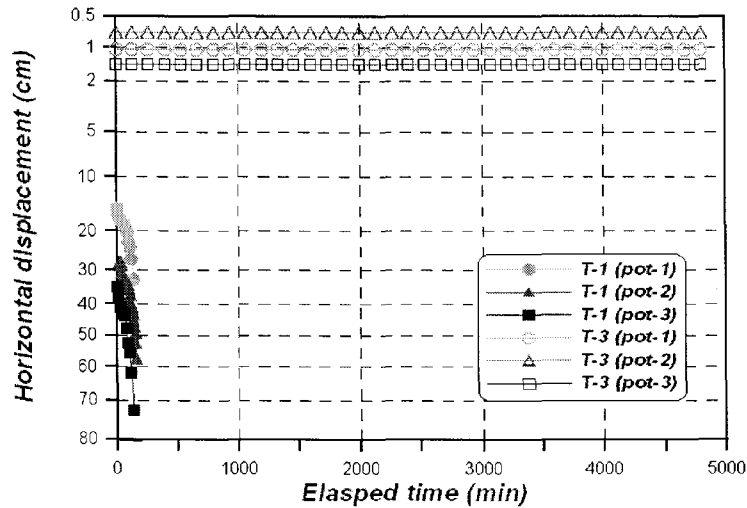
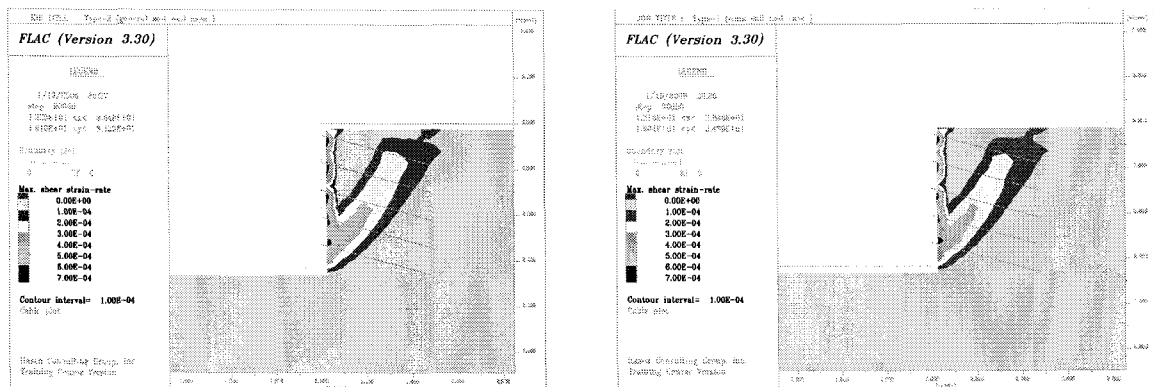


그림 14. 시간경과에 따른 벽체의 수평변위 변화 (L=18cm)

그림 14를 살펴보면 일반 쏘일네일의 경우 133분에서 파괴양상을 나타내는 것으로 나타났으며, 방추형 콘 네일의 경우 4469분 까지 동일한 중력수준에서 회전을 가해도 파괴가 발생하지 않는 것으로 나타나, 방추형 콘 쏘일네일의 장기인발거동특성이 우수하다는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다.

5.3 수치해석결과

방추형 콘 네일링 시스템의 수평변위 감소효과를 살펴보기 위해 수행한 수치해석 결과는 그림 15와 같다.



(a) 일반 쏘일네일링 시스템

(b) 방추형 콘 쏘일네일링 시스템

그림 15. 예상활동 파괴면

수치해석결과 중 최종굴착시 유발된 최대수평변위량을 살펴보면, 일반 쏘일네일의 경우 1.675cm, 방추형 콘 네일의 경우 1.56cm 정도 인 것으로 평가되었으며, 따라서 방추형 콘을 네일에 설치함에 따라 수평변위가 최대 12% 정도 감소하는 것으로 평가되었다.

6. 결론 및 제언

본 연구에서는 방추형 콘 쏘일네일링 시스템을 개발하였으며, 개발된 방추형 콘 쏘일네일링 시스템의 장기인발거동특성을 평가하기 위해 중력수준 5~80g까지 증가시켜가면서 원심모형실험을 수행해 보았으며, 방추형 콘 쏘일네일링 시스템의 안정해석기법을 개발하기 위한 기초연구의 일환으로 수치해석을 통한 적용성 평가를 수행해 보았다. 본 연구를 토대로 얻어진 연구결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 중력수준 증가에 따른 네일 보강벽체의 파괴실험 결과, 일반 쏘일네일의 경우, 네일길이 12cm 인 경우 25g 중력수준에서, 네일길이 18cm인 경우 75g 중력수준에서 파괴가 발생하는 것으로 나타났으며, 방추형 콘 네일링 시스템의 경우 길이변화에 상관없이 80g 중력수준에서 60분 동안 가속하여도 파괴가 발생하지 않았다. 따라서 방추형 콘 네일의 경우, 일반 쏘일네일에 비해 저항력이 크게 향상된 개량된 쏘일네일링 시스템인 것으로 판단된다.
- (2) 동일한 중력수준(25g)에서의 수직변위량을 비교해 보면, 네일의 길이가 12cm인 경우 일반 쏘일네일은 5.0mm, 방추형 콘 네일은 0.4mm 정도인 것으로 계측되었으며, 네일의 길이가 18cm인 경우 일반 쏘일네일은 1.2mm, 방추형 콘 네일은 0.4mm 정도 유발된 것으로 계측되었다. 따라서 방추형 콘을 설치함에 따라 67~92% 정도 수직변위 감소효과가 있는 것으로 평가되었다.
- (3) 네일길이 18cm인 경우에 한하여 동일한 중력수준(75g)에서 시간경과에 따른 파괴양상을 살펴보면, 일반 쏘일네일의 경우 133분에서 파괴양상을 나타내는 것으로 나타났으며, 방추형 콘 네일의 경우 4469분 까지 동일한 중력수준에서 회전을 가해도 파괴가 발생하지 않는 것으로 나타나, 방추형 콘 쏘일네일의 장기인발거동특성이 우수하다는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다.
- (4) 방추형 콘 네일링 시스템의 수평변위 감소효과를 살펴보기 위해 수행한 수치해석 결과를 살펴보면, 최종굴착시 유발된 최대수평변위량을 살펴보면, 일반 쏘일네일의 경우 1.675cm, 방추형 콘 네일의 경우 1.56cm 정도 인 것으로 평가되었다. 따라서 방추형 콘을 네일에 설치함에 따라 수평변위가 최대 12% 정도 감소하는 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

1. 김홍택, *Soil Nailing 공법의 과거·현재·미래*, 도서출판 평문각, 2001.
2. 박시삼, 박성철, 정성필, 김홍택, "스파이럴 파이프 네일링 시스템의 인발거동특성 및 적용성 평가", *대한토목학회 2004년도 정기 학술대회 논문집*, pp. 1468~1471.
3. Jewell, R. A. and Pedley, M. J. (1992), "Analysis for Soil Reinforcement with Bending Stiffness", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, No. 10, pp. 1505~1528.
4. Lee, F. H., Ng, Y. W., and Yong, K. Y.(2001), "Centrifuge Modelling of Sand Compaction Piles in Soft Ground", *Proceedings of the 2th International Conference on Soft Soil Engineering*, Nanjing, China, pp. 407~412.
5. Schlosser, F.(1993), *Recommendations Clouterre*, 1991 (English Translation), Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-026.