

## 제거식 쏘일네일 벽체의 적용성에 관한 연구

### A Study on Application of Removable Soil Nail Walls

김홍택<sup>1)</sup>, Kim, Hong-Taek, 강인규<sup>2)</sup>, Kang, In-Kyu, 정성필<sup>3)</sup>, Jung, Sung-Pill,  
박사원<sup>4)</sup>, Park, Sa-Won, 박시삼<sup>5)</sup>, Park, Si-Sam

<sup>1)</sup> 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept' of Civil Eng., Hong-Ik University.

<sup>2)</sup> (주)브니엘컨설턴트 책임기술자, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

<sup>3)</sup> (주)오륙개발 대표, president, O-Ryuk Development Co. Ltd.

<sup>4), 5)</sup> 홍익대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Dept' of Civil Eng., Hong-Ik University

**SYNOPSIS** Recently a removable soil nail is demanded due to problems beyond of economical and engineering purpose. In this study controlled displacement and controlled force field pull-out tests are carried out 7 times in order to evaluate short-term and long-term pull-out characteristics of the removable soil nail. For evaluating application of removable soil nailing system, bending tests of removable soil nails and tensile tests of fixed sockets are carried out. In the removable soil nailing system, the predicted horizontal displacements from *FLAC-2D* are also compared with the field measurements occurred in stepwise excavation. And approach for the stability analysis of removable soil nailing system after removed is proposed.

**Key words** : removable soil nailing systems, fixed socket, stepwise excavation

## 1. 서론

최근 들어 지반환경문제 및 대지경계선 침범으로 인한 민원발생과 점용료 납부 등의 지반공학 이외의 문제로 인하여 제거식 쏘일네일 공법에 대한 필요성이 대두되고 있는 실정이며, 본 논문에서는 이와 같은 필요성에 의해 개발된 제거식 쏘일네일 벽체의 적용성을 평가하고자 한다.

제거식 쏘일네일의 적용성을 분석하기 위해, 현재 시공중인 2개소의 현장을 대상으로 제거식 쏘일네일 구간과 일반 쏘일네일 구간에서 계측된 수평변위를 서로 비교·분석하였으며, 현장인발실험을 변위 제어방식과 응력제어방식으로 총 7회 실시하여 제거식 쏘일네일의 장·단기적인 인발-변형 특성을 평가하였다. 또한, 제거식 쏘일네일에 대한 휨강도실험과 고정자 소켓의 인장강도 실내실험을 실시하여 이형철근제거 전·후의 휨강도 및 고정자 소켓에서 발휘될 수 있는 부착강도를 평가함으로써 제거식 쏘일네일의 제거 후의 안정성 평가에 적용하였다.

본 논문에서는 제거식 쏘일네일 벽체의 안정성 평가를 위한 접근방법을 소개하고 이에 대한 평가예를 제시하였으며, *FLAC-2D* 프로그램을 이용하여 제거식 쏘일네일 벽체의 이형철근 제거 전·후에 대한 발생변위를 예측하였다.

## 2. 제거식 쏘일네일의 현장인발시험

### 2.1 현장개요

그림 1은 제거식 쏘일네일 공법이 일부구간에 대하여 적용되고 있는 현장으로 대표현장 1의 서측을

제외한 나머지 부분과 대표현장 2의 남측은 제거식 쏘일네일 구간이며, 대표현장 1의 서측과 대표현장 2의 서측은 일반 쏘일네일 구간이다. 또한 대표현장 2의 동측벽체는 제거식 앵커 구간으로, 본 논문에서는 대표현장 1의 A site내 G.L.-15m 깊이에서 1차 현장인발시험을 5회 실시하였으며, 1차 현장인발시험에서 발생한 문제점을 보완하여 2차로 대표현장 1의 B site내 G.L.-5m 깊이에서 추가적인 현장인발시험을 2회 수행하였다. 대표현장 1의 A site에 대한 현장인발시험 위치에서의 지층은 풍화암층이며, B site에 대한 현장인발시험 위치에서의 지층은 N치가 6정도인 퇴적토층이다.

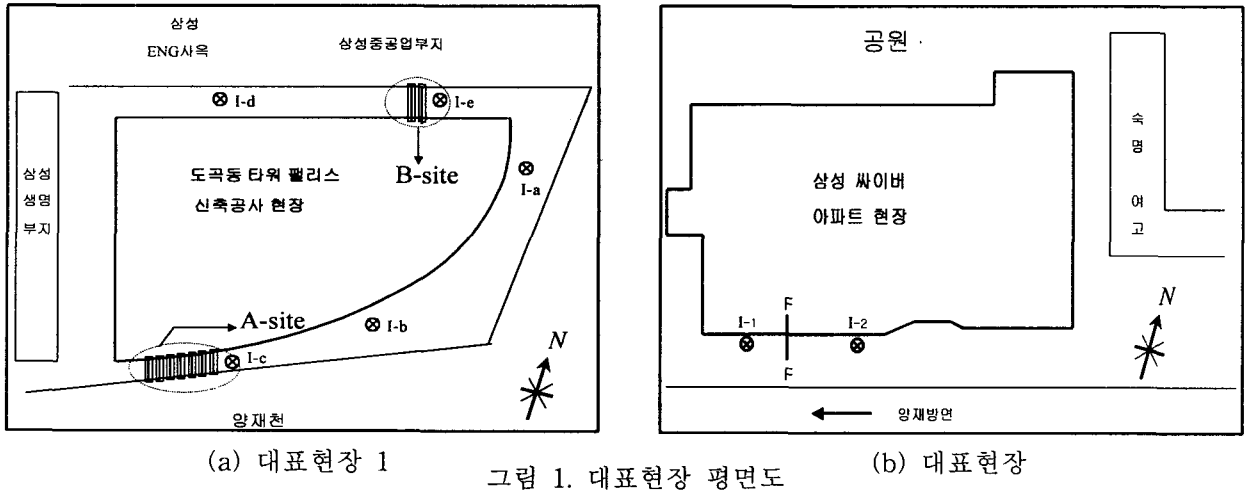


그림 1. 대표현장 평면도

## 2.2 현장인발시험 방법 및 제한

대표현장 1의 A site 및 B site에서 실시된 총 7회의 현장인발시험에 사용된 시험방법 및 제거식 쏘일네일의 제원을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 현장인발시험에 사용된 시험방법 및 제거식 쏘일네일의 제원

시험위치	시험종류	대상지층	구분	길이	고정자 소켓 간격	strain gauge 설치 간격
A-site	인발시험	Rock	No. 1	4m	0.5m	0.5m
			No. 2	4m	0.5m	0.5m
			No. 3	4m	0.5m	0.5m
	크리프시험		No. 1	4m	0.5m	0.5m
No. 2		4m	0.5m	0.5m		
B-site	인발시험	SM	No. 4	4m	0.5m	0.5m
			No. 5	4m	0.5m	0.5m

: strain gauge가 설치된 고정자 소켓, 
 : strain gauge가 설치안된 고정자 소켓, 
 : strain gauge

본 연구에서는 변위제어방식 및 응력제어방식으로 현장인발시험을 수행하였으며, 현장인발시험시

strain gauge는 인발시 고정자 소켓과 이형철근의 일체거동을 확인하기 위해 고정자 소켓중앙부와 이형 철근에 각각 부착하였다.

변위제어방식에 의한 인발시험시 인발속도는 2 t/min로 하였으며, 쏘일네일 두부(head) 좌우측에 다이얼 게이지를 각각 설치하여 인발시 고정판의 편심에 의한 인발량의 측정오차를 최대한으로 줄였다. 또한, 응력제어방식에 의한 인발시험시 각 하중단계는 변위제어방식으로 부터 결정된 한계인발력( $T_{LE}$ )보다 작고, 동시에 네일의 탄성한계값( $T_G$ )의 0.6배 이내의 하중으로 결정하였으며, 각 0.1  $T_{LE}$ 의 하중단계 별로 변위량을 측정하였다. 응력제어방식에 의한 인발시험시 최초 하중단계는 0.2  $T_{LE}$  이며, 각 하중단계 별로 하중을 1시간동안 일정하게 유지하였으며, 0.7 $T_{LE}$ 의 하중단계에서는 하중을 3시간동안 일정하게 유지시켜 제거식 쏘일네일의 Creep거동을 관찰하였다.

### 2.3 제거식 쏘일네일의 장·단기 인발특성

대표현장 1의 A site 및 B site에서 실시된 제거식 쏘일네일의 현장인발시험(변위제어방식)결과를 정리하면 그림 2와 같다. 그림 2에서 No. 1~3은 A site의 풍화암층에서 실시된 현장인발시험결과로 한계 인발력은 22 t정도로 나타났으며, No. 4와 5는 B site의 퇴적토층(N=6정도)에서 실시된 현장인발시험결과로 한계인발력은 9.5 t 정도로 측정되었다.

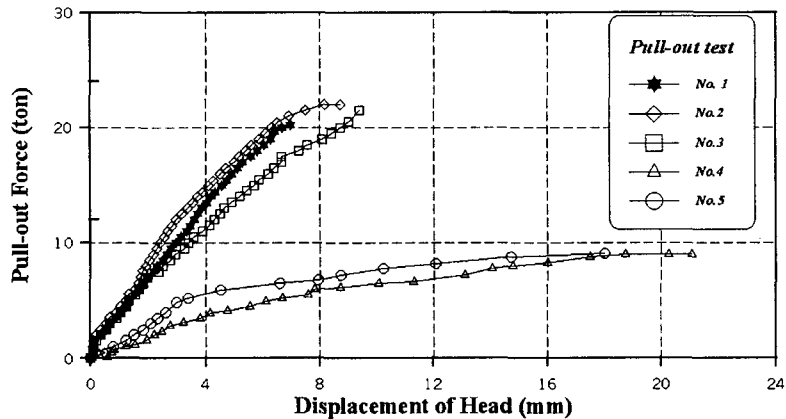
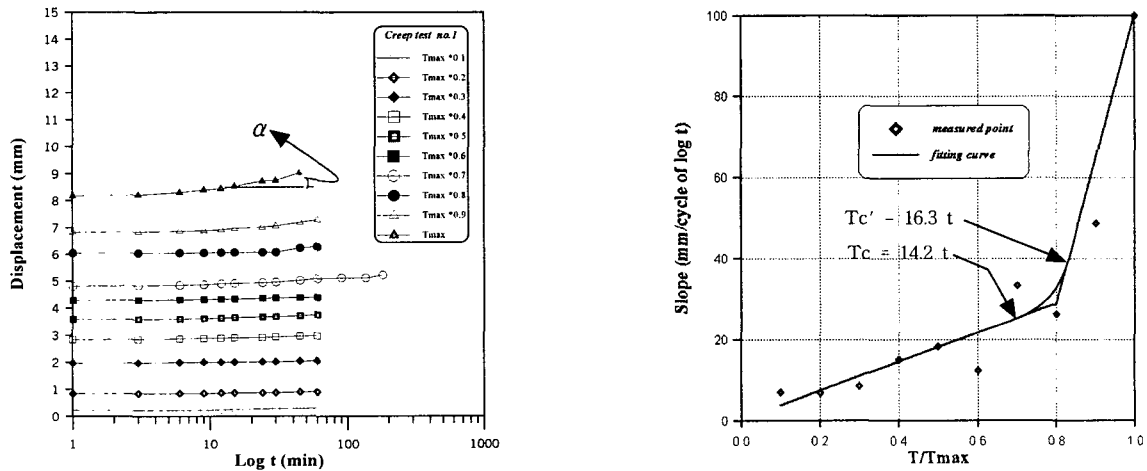


그림 2. 제거식 쏘일네일의 인발변형(변위제어방식)

또한 대표현장 1의 A site에서 실시된 현장인발시험(응력제어방식)결과는 그림 3과 같으며, 그림 3(a)는 각 하중단계( $0.2T_{LE} \sim T_{LE}$ )별로 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60분에서 측정된 네일 두부(head)에서의 변위를 도시한 결과이며, 그림 3(b)는 크리프 곡선의 기울기  $\alpha$ (즉, 각 하중단계별로 도시된  $\log t$  - 네일의 두부변위 관계곡선의 기울기)를 인발 정도에 따라 도시한 결과이다.



(a) 하중단계별 시간-변위 곡선

(b) 한계 크리프 인발력 결정 곡선

그림 3. 제거식 쏘일네일의 인발변형(응력제어방식)

특히  $0.7T_{LE}$  단계에서는 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180분 간격으로 네일 두부에서의 변위를 측정하였다.

그림 3의 결과로부터 한계 크리프 인발력( $T_c$ )(즉, 크리프 곡선의 기울기  $\alpha$ 에 대한 절곡점에 해당)은 14.2 ~ 16.3 t 정도로 한계 인발력과 한계 크리프 인발력의 비  $k$ 는 1.34 ~ 1.55 정도이며, 이는 일반적인 쏘일네일의  $k$ 값(표 2 참조)에 비해 큰 것으로 평가되었다. 따라서 제거식 쏘일네일의 경우, 일반 쏘일네일에 비하여 크리프에 의한 장기간의 변형특성이 큰 경향임을 알 수 있으며, 제거식 쏘일네일 벽체를 장기간 방치할 경우 인발저항력이 일반 쏘일네일 벽체에 비하여 저하되므로 장기간의 공사에 있어서는 공사에 앞서 응력제어방식에 의한 현장인발시험을 실시하여 제거식 쏘일네일의 마찰저항력을 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

표 2. 일반적인 쏘일네일의  $k$ 값(Schlosser, 1993)

흙의종류	모래	점토	이회토
$k=T_{LE}/T_c$	1.2	1.3	1.4

### 3. 제거식 쏘일네일의 적용성 평가

#### 3.1 제거식 쏘일네일 벽체의 최대수평변위

현재 시공 중에 있는 대표현장 1과 2의 일반 쏘일네일구간과 제거식 쏘일네일구간에서 계측된 최대수평변위량을 정리하면 그림 4와 같다. 그림 4에서 *FLAC-2D* 프로그램 해석결과는 대표현장 2의 F-F 단면에서의 단계별 굴착시 예측된 최대수평변위를 도시한 것이다.

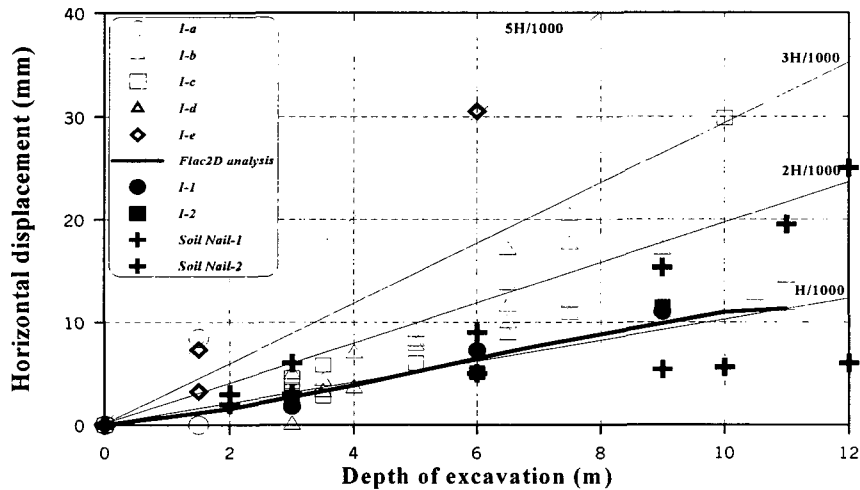


그림 4. 굴착심도에 따른 벽체의 최대변위

그림 4에서 I-a~I-e는 대표현장 1의 제거식 쏘일네일구간에서 계측된 결과이며, I-1 및 I-2는 대표현장 2의 제거식 쏘일네일구간에서 계측된 결과이다. 또한, Soil Nail 1과 2는 일반 쏘일네일의 경우에 계측된 결과(박성원, 1999)이다.

지층조건은 계측결과 I-a~I-c 및 I-1과 I-2는 풍화암층 이상의 암반층으로 최대수평변위는  $3H/1000$  범위 이내이며, I-d와 I-e는 토사층으로 최대수평변위는  $5H/1000$  정도로 일반적인 쏘일네일의 변위양상과 유사하게 나타났다.

#### 3.2 제거식 쏘일네일의 휨강도 실험

제거식 쏘일네일의 휨강도 실험은 이형철근이 제거된 제거식 쏘일네일의 휨에 의한 저항정도를 평가하기 위하여 실시하였으며, 시험방법은 한국공업규격(KS F 2408)에 따라 단순보의 3등분 하중법(Third Point Bending Test)을 사용하였다. 또한 본 실험에서 하중은 변위제어방식으로 2mm/min의 속도로 유지하였으며, 제거식 쏘일네일 및 일반 쏘일네일에 대한 휨강도 실험결과를 정리하면 표 3과 같다.

표 3. 제거식 쏘일네일 및 일반 쏘일네일의 휨강도 실험결과

재형	합성체크기(mm)	네일 타입	이형철근	휨강도(kg/cm <sup>2</sup> )
7일	φ 150×500	제거식 쏘일네일	무	0.91
7일	φ 150×500		유	14.18
7일	φ 150×500	일반 쏘일네일	유	24.12

표 3에서 알 수 있듯이 이형철근이 포함된 제거식 쏘일네일의 휨강도는 일반 쏘일네일의 휨강도의 약 60% 정도이며, 이형철근이 제거된 제거식 쏘일네일의 휨강도는 이형철근이 포함된 제거식 쏘일네일의 휨강도의 약 6% 정도로 평가되었다.

### 3.3 고정자 소켓의 인장강도 실내실험

고정자 소켓의 인장강도 실내실험은 고정자 소켓 내부에 이형철근(길이 50cm)을 양쪽으로 삽입하여 인발시켜 이형철근의 rib와 고정자 소켓 내부의 rib 사이에 발휘되는 부착강도를 평가하기 위하여 실시하였으며, 실험방법은 한국공업규격(KS B 0802)에 따라 실시하였다. 또한 본 실험에서 하중은 변위제어 방식에 따라 2mm/min의 속도로 유지하였으며, 실험결과를 정리하면 표 4 및 그림 5와 같다.

표 4에서 극한하중은 최대인발하중을 의미하며, 고정자 소켓 내부에 이형철근을 양쪽으로 삽입하였으므로 고정자 소켓 내부의 rib에서 발휘되는 부착강도는 극한하중의 2배에 해당된다. 표 4 및 그림 5에서 알 수 있듯이 고정자 소켓 내부의 rib에서 발휘되는 부착강도는 약 1.5 t정도이며, 고정자 소켓과 시멘트 그라우트 합성체에 대한 고정자 소켓 내부의 rib에서 발휘되는 부착강도는 1.8 t정도로 평가되었다. 또한 고정자 소켓 1개당 발휘되는 부착강도는 현장인발실험결과 5~8 t 정도(김홍택 등, 1999)인 것을 감안할 때, 고정자 소켓의 부착강도는 고정자 소켓 내부의 rib에서 약 30%정도 발휘되고 고정자 소켓 전면과 후면의 disk 모양의 돌기에서 약 70%정도 발휘되는 것으로 판단된다.

표 4. 인장시험편의 제원

시험 번호	제 원	극한하중 (t)	부착강도 (t)
1	고정자 소켓	0.74	1.48
2	고정자 소켓	0.71	1.42
3	고정자 소켓+ 시멘트 몰탈	0.98	1.96
4	고정자 소켓+ 시멘트 몰탈	0.82	1.64

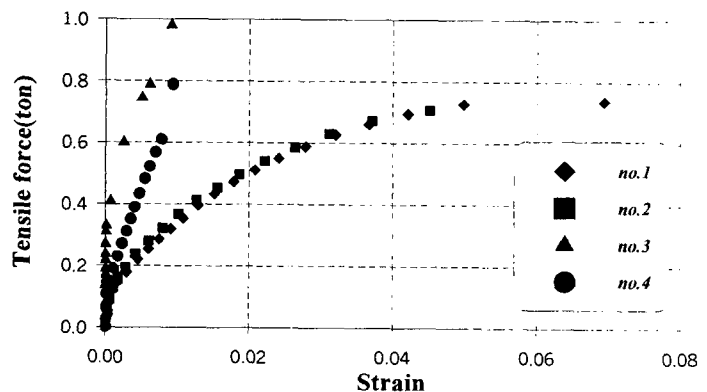


그림 5. 인장력-변형을 관계곡선

## 4. 제거식 쏘일네일의 안정성 평가에

### 4.1 안정해석 개요

제거식 쏘일네일의 안정해석 절차를 요약하면 그림 6과 같다. 그림 6과 같이 제거식 쏘일네일 벽체의 안정성은 단계별 굴착중의 안정성과 단계별 제거 후의 안정성을 동시에 만족해야 하며, 단계별 굴착

중의 안정성 평가시 네일의 항복인장강도는 고정자 소켓의 설치간격 및 설치위치, 시멘트 그라우트의 W/C비 등의 함수이며, 단계별 제거시의 시멘트 그라우트체에 작용하는 전단력은 이형철근이 제거된 제거식 쏘일네일의 휨저항 특성에 좌우된다.

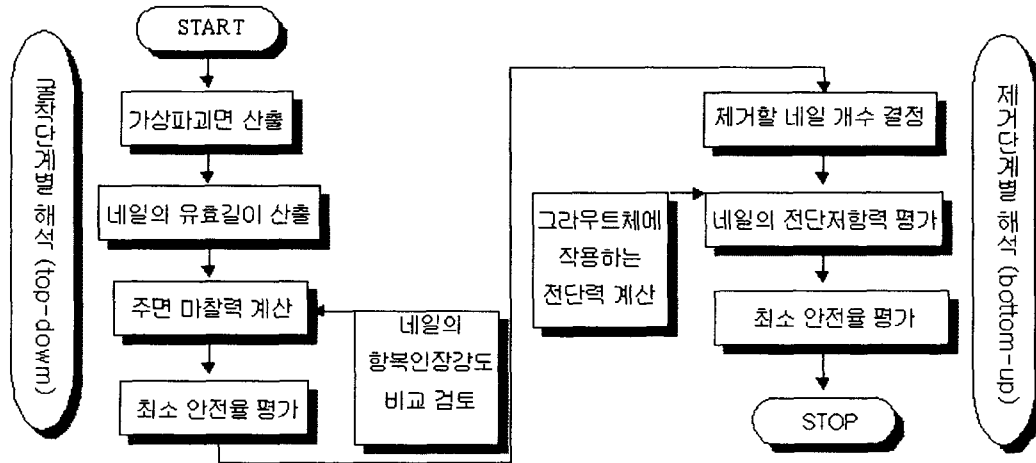


그림 6. 제거식 쏘일네일의 해석흐름도

본 연구에서는 제거시 시멘트 그라우트체에 작용하는 전단력은 표 3의 휨강도 시험결과로부터 제거식 쏘일네일의 탄성변형 내에서 발휘되는 휨에 의해 추가되는 전단저항력으로 식(1)로부터 계산할 수 있다.

$$P_s = \frac{M_y}{0.32 \left( \frac{2l_e}{\pi} \right)} \quad (1)$$

여기서,  $M_y = \frac{\pi D_{hole}^3}{32} \sigma_{cb}$ ,  $\sigma_{cb}$  = 제거후 제거식 쏘일네일의 휨강도,

$$l_e = \frac{\pi d_{hole}}{4} \sqrt[4]{\frac{\pi E}{k_s d_{hole}}}, \quad d_{hole} = \text{천공직경},$$

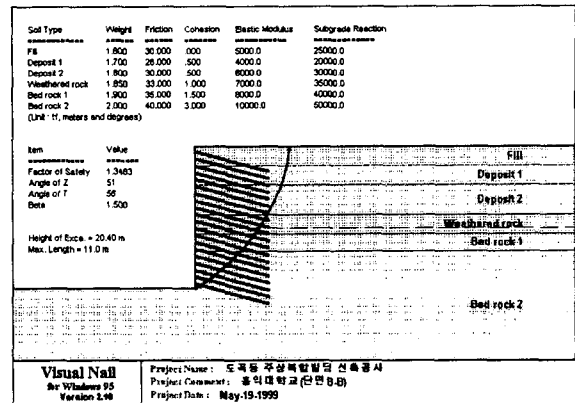
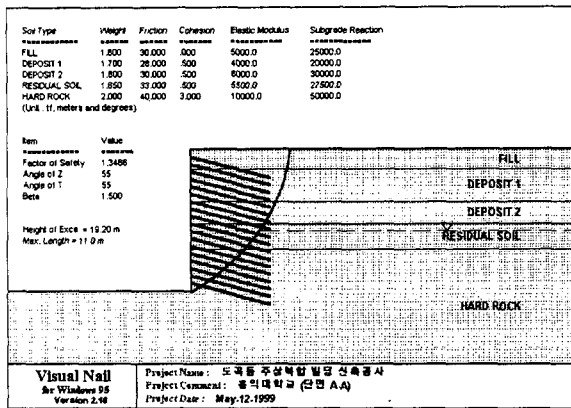
$k_s$  = 네일 주변지반의 횡방향 지반 반력계수,  $E$  = 네일 주변지반의 탄성계수

#### 4.2 제거식 쏘일네일의 제거후 안전성 평가

대표현장 1의 A-A, B-B단면에 대한 지반 특성치는 표 5와 같으며, 최종굴착상태에서의 안정해석결과는 그림 7과 같다.

표 5. 안정해석에 사용된 지반 특성치

분 류	A-A 단면				분 류	B-B 단면			
	습윤단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	마찰각 (°)	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )		습윤단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	마찰각 (°)	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )
매립토	1.8	30.00	.00	5000.0	매립토	1.8	30.00	.00	5000.0
퇴적토 1	1.7	28.00	.50	4000.0	퇴적토 1	1.7	28.00	.00	5000.0
퇴적토 2	1.8	30.00	.50	6000.0	퇴적토 2	1.8	30.00	.50	4000.0
풍화산류토	1.85	1.95	.50	5500.0	풍화암	1.85	35.00	.50	6000.0
경암	2.00	2.10	3.00	10000.0	연암	1.9	1.95	.50	5500.0
-	-	-	-	-	경암	2.00	2.10	3.00	10000.0



(a) A-A 단면

(b) B-B 단면

그림 7. 최종굴착상태에서의 안정해석결과

제거식 쏘일네일의 단계별 제거에 따른 최소안전율의 변화는 표 6과 같으며, 표 6에서 이형철근이 제거된 시멘트 그라우트체의 휨강도( $9t/m^2$ )를 무시한 경우와 고려한 경우를 비교해 볼 때, 이형철근이 제거된 시멘트 그라우트의 휨에 의한 저항은 전체 안정성의 1~8% 정도로 평가되었다.

표 6. 단계별 제거에 따른 최소안전율

해석 단계	A-A 단면				B-B 단면			
	제거된 내일	무지보 높이	최소안전율		제거된 내일	무지보 높이	최소안전율	
			휨강도 무시	휨강도 고려			휨강도 무시	휨강도 고려
Step 1	No.16~18	3.7m	1.18	1.27	No.18~20	3.2m	1.18	1.18
Step 2	No.13~15	3.0m	1.33	1.40	No.15~17	3.0m	1.30	1.30
Step 3	No.10~12	3.0m	1.31	1.41	No.12~14	3.0m	1.37	1.37
Step 4	No.7~9	3.0m	1.41	1.42	No.8~11	4.0m	1.32	1.32
Step 5	No.4~6	3.0m	1.38	1.39	No.4~7	4.0m	1.21	1.22
Step 6	No.1~3	3.5m	0.97	1.00	No.1~3	3.2m	0.95	1.00

### 4.3 제거식 쏘일네일의 수평변위의 예측

대표단면 1의 A-A 단면에 대한 제거식 쏘일네일 벽체의 이형철근 제거전·후의 최대 수평변위의 변화를 FLAC-2D 프로그램을 이용하여 예측하면 그림 8과 같다.

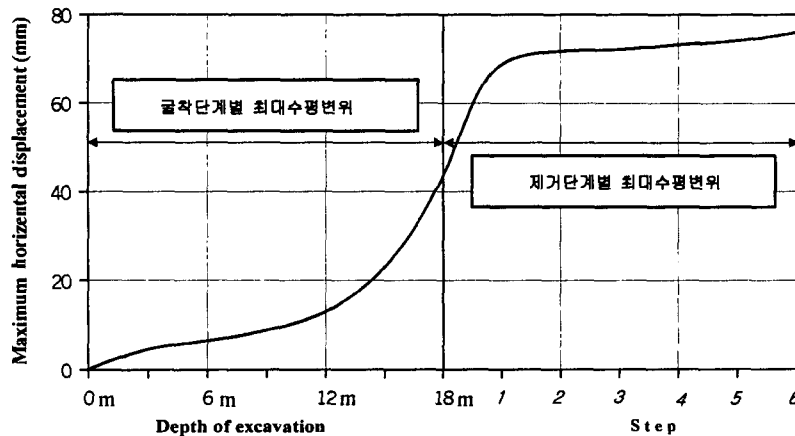


그림 8. 제거식 쏘일네일 벽체에서 예상되는 최대수평변위량(A-A 단면)

그림 8에서 알 수 있듯이 최종 굴착단계에서의 예상 최대수평변위량은 4.38cm정도로서, 일반적으로 적용되는 허용기준치(최종 굴착고의 0.3~0.4%정도)를 초과하지 않는 것으로 나타났으며, 3개의 네일을 1개조로 하여 벽체 하단부에서 부터 단계별로 제거할 경우 최대로 발생 예상되는 최대 수평변위량은 2.5cm이하의 비교적 작은 값으로 평가되었다. 또한 그림 8의 결과로부터 제거식 쏘일네일의 단계별 제거 완료 후의 추가적인 변형량은 3.26cm정도로서 단계별 굴착에 의한 변형량의 약 75%정도로 평가되었다.

## 5. 결론 및 제언

이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 풍화암층에서 실시된 크리프 인발시험에서 한계 인발력과 한계 크리프 인발력의 비  $k$ 는 1.34 ~ 1.55 정도로서 일반적인 쏘일네일에 비해 큰 것으로 평가되었다. 따라서 제거식 쏘일네일의 경우, 일반 쏘일네일에 비하여 장기간의 변형특성이 크므로 장기간의 공사에 있어서는 응력제어방식에 의한 현장인발시험을 실시하여 제거식 쏘일네일의 마찰저항력을 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (2) 각 대표현장에서 계측된 굴착시 최대수평변위량은 풍화암층 이상의 암반층에서는 3H/1000 범위 이내로 나타났으며, 토사층에서는 5H/1000 정도로 일반적인 쏘일네일의 변위양상과 유사하게 나타났다.
- (3) 이형철근이 포함된 제거식 쏘일네일의 휨강도는 일반 쏘일네일의 휨강도의 약 60% 정도이며, 이형철근이 제거된 제거식 쏘일네일의 휨강도는 이형철근이 포함된 제거식 쏘일네일에 대한 휨강도의 약 6% 정도로 평가되었다.
- (4) 고정자 소켓의 인장강도 실내실험결과, 고정자 소켓의 부착강도는 고정자 소켓 내부의 rib에서 약 30%정도 발휘되고 고정자 소켓 전면과 후면의 disk 모양의 돌기에서 약 70%정도 발휘되는 것으로 판단된다.
- (5) 제거식 쏘일네일의 단계별 제거에 따른 안정해석에 있어서 이형철근이 제거된 시멘트 그라우트체의 휨에 의한 저항은 전체 안정성의 1~8% 정도로 평가되었다.
- (6) 제거단계시 휨강도( $9t/m^2$ )를 무시한 경우와 고려한 경우를 비교해 볼 때, 이형철근이 제거된 시멘트 그라우트 쏘일네일 벽체의 이형철근 제거전·후의 최대 수평변위의 변화를 *FLAC-2D* 프로그램을 이용하여 예측한 결과, 제거식 쏘일네일의 단계별 제거 완료 후의 추가적인 변형량은 단계별 굴착에 의한 변형량의 약 75%정도로 평가되었다.
- (7) 향후 연구과제로 제거식 쏘일네일의 제거전에 대한 안정해석기법에 대한 연구와 단계별 제거에 따른 수평변위의 변화량에 대한 계측결과 및 수치해석결과와의 비교 연구가 수행될 예정이다.

## 참고문헌

1. 김홍택, 강인규, 이대형, 정성필, 박시삼(1999), "현장인발시험을 통한 제거식 쏘일네일의 거동특성 평가," '99 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.137-144.
2. 박성원(1999), 인공신경망을 이용한 굴착벽체의 변위예측시스템 개발, 석사학위논문, 홍익대학교.
3. Jones, C.P.D.(1990), "In-Situ Techniques for Reinforced Soil", Proc. of the International Reinforced Soil Conference : Performance of Reinforced Soil Structures, British Geotechnical Society, Glasgow, pp. 277-282.
4. Robert M. Jones(1975), *Mechanics of Composite Materials*, pp. 85~146.
5. Robert Y. Liang(1997), *Soil nailing, Ground Anchoring, and Anchored Excavation*, pp. 1-61.
6. Schlosser, F.(1993), *Recommendations Clouterre 1991*(English Translation), FHWA-SA-93-026.