*KGS Fall '95 National Conference*
*28, October, 1995/Seoul/Korea*

# 쏘일네일링 시스템의 최적설계방법에 관한 연구

# A Study on the Optimum Design Method for Soil Nailing System

김홍택[1], HONG-TAEK KIM
강인규[2], IN-KYU KANG

[1]홍익대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Hong-ik University
[2](주)브니엘컨설턴트 선임연구원, Senior Researcher, VNIEL Consultant Co., LTD.

SYNOPSIS : In the present study, an analytical approach to develop the optimum design technique of soil nailing system was made. For this purpose Davidon-Fletcher-Powell method was used as a basis, and the nailed-soil wall displacements expected during construction stages were qualitatively taken into account. Based on the developed optimum design technique of soil nailing system, the estimation of importances of various design parameters was made in detail. It was further proved that the developed optimum design technique could be more efficiently applied in designing the ground excavation system when compared to the design of slope reinforcement system.

## 1. 서론

쏘일네일링(soil nailing) 시스템은 최근에 들어 사면보강 및 지반굴착 분야 등에 그 적용성이 더욱 확대되고 있는 공법이며, 이에 관련된 안정해석법은 국내의 경우에도 활발한 연구가 진행되고 있다. 국내 지반굴착의 경우 쏘일네일링 시스템은, 지반앵커와 같은 기존 흙막이 공법을 주변건물이나 지장물 등으로 인해 적용하기 어려운 경우 대체공법으로 주로 이용되고 있으나, 이에 대한 설계지침 및 설계시 참고할 수 있는 설계도표 등과 같은 실무차원에서의 연구결과는 비교적 미비한 실정이다. 일반적인 쏘일네일링 시스템의 설계는 한계평형해석적 접근방법에 의해 각 설계변수를 변화시켜 소요안전율을 만족하는 설계단면을 구한 다음, 이를 유한요소해석 또는 유한차분해석 프로그램을 이용하여 예상 발생변위를 검토하는 과정으로 이루어 진다. 그러나 쏘일네일링 시스템의 경우, 설계변수가 많고 설계변수 상호간의 민감성이 파악되지 않은 실정이어서, 설계시 대부분의 경우가 설치간격이나 삽입각도 등의 설계변수는 고정시키고 보강재의 길이만을 변화시켜 소요안전율을 만족하는 설계단면을 찾고 있다. 따라서 본 연구에서는 쏘일네일링 시스템의 최적설계기법을 개발을 시도하였으며, 또한 현단계에서 본 연구를 통해 개발된 최적설계기법을 토대로 각 설계변수들에 대한 중요도등을 비교·평가하여, 쏘일네일링 시스템의 안정성에 중요한 설계변수 및 설계지침 등을 제시하고자 한다.

## 2. 쏘일네일링 시스템의 설계조건

실내실험 및 실물모형실험 등의 결과에 의하면, 쏘일네일링 시스템의 파괴유형은 크게 다음의 4가지로 구분된다.

(1) 보강재가 파단되는 경우
(2) 지반과 보강재 사이의 마찰력이 부족한 경우
(3) 시공과정 중 내적안정성이 부족한 경우
(4) 보강영역 전체에 대해 활동에 대한 안정성이 부족한 경우

이상의 실험결과로 부터 설계시 쏘일네일링 시스템의 안정성은 다음과 같이 구분하여 검토해야 적절할 것으로 판단된다.

### 2.1 보강영역에 대한 내적안정

본 연구에서는 계산상 수렴속도가 양호한 모멘트 평형조건을 이용한 한계평형해석법을 기초로 하여 해석이 이루어 졌다. 일반적으

로 모멘트 평형조건은 힘의 정적평형조건의 경우 보다 계산된 안전율이 작게 평가되기 때문에 설계상 안전측에서 평가된다.

보강영역에 대한 내적안정은 파괴면이 보강된 영역 내부를 통과할 경우 활동모멘트에 대한 저항모멘트의 비로 평가되며, 요구되는 소요안전율은 지하수등 침투수압을 고려할 경우 1.3 이상을, 지하수의 영향이 무시될 경우에는 1.5 이상을 추천한다.

### 2.2 보강재에 대한 안정

보강재에 대한 안정은 보강재가 파단되는 경우와 지반과 보강재 사이의 마찰력이 부족한 경우 등에 대해 검토하며, 소요안전율은 표 2.1과 같다.

표 2.1 보강재에 대한 소요안전율

| | 보강재의 항복강도 | 지반-보강재의 상호작용 |
|---|---|---|
| 지하수 영향 무 시 | 1.71 이상 | 1.5 이상 |
| 지하수 영향 고 려 | 1.71 이상 | 1.3 이상 |

### 2.3 보강영역에 대한 외적안정

외적안정은 지하굴착등과 같이 경사도가 급한 사면의 경우에 한하여 검토 가능하며, 계산은 보강영역을 일종의 중력식 옹벽과 같이 가정하고 활동에 대한 안정성을 검토한다. 일반적으로 외적안정은 지반조건이 극히 연약하지 않을 경우라면 활동에 대한 안정이 전체 외적안정성을 지배한다. 외적안정에 대한 소요안전율은 지하수등 침투수압을 고려할 경우에는 1.3 이상, 지하수의 영향을 무시할 경우에는 1.5 이상을 추천한다.

### 2.4 허용변위검토

쏘일네일링 시스템의 횡방향 변위 및 지표면 침하형태 등은 그림 2.1과 같다. 일반적인 경우에 횡방향 변위는 상부에서 최대값을 나타내며 하부에서는 최소값을 나타낸다. 또한 쏘일네일링 시스템에서 지반굴착에 따른 이완영영의 범위는 식(2.1)과 같다.

$$\lambda = H(1-\tan\alpha)x \qquad \cdots\cdots (2.1)$$

여기서, $H$ : 굴착깊이

$\alpha$ : 벽체의 경사각도

$x$ : 이완영역 계수 (표 2.2 참조)

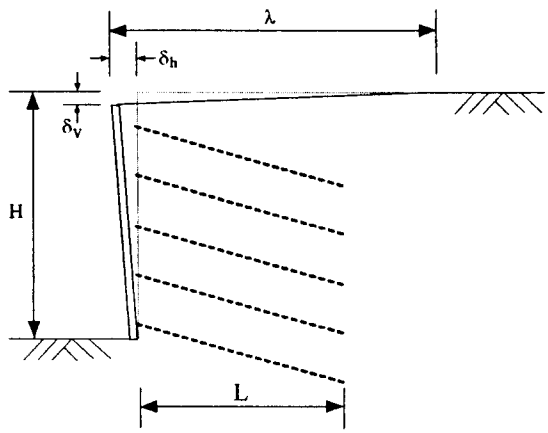



그림 2.1 횡방향 변위 및 지표면 침하형태

표 2.2 지반 종류별 발생가능한 최대변위 및 이완영역의 범위

| | 풍화암 | 모래 | 점토 |
|---|---|---|---|
| $\delta_v = \delta_h$ | H/1000 | 2H/1000 | 4H/1000 |
| $x$ | 0.8 | 1.25 | 1.5 |

설계시 변위에 대한 검토는 특별한 설계지침이 없을 경우에는 표 2.2를 참고로 하여 안정성 여부를 판단할 수 있다. 표 2.2는 대표적인 쏘일네일링 시스템에서 계측된 경험치를 토대로 발생 가능한 최대변위 및 이완영역의 범위 등을 나타낸 것으로 설계단면이 표 2.2 범위 정도 이내에서 계산되면 안정하다고 판단할 수 있다.

## 3. 쏘일네일링 시스템의 최적설계 모델

쏘일네일링 시스템의 최적설계는 형상에 대한 최적설계 뿐만아니라 최소안전율을 나타내는 파괴면에 대한 최적화 문제가 상호 관련되어 있기 때문에 최적화 과정이 매우 복잡하다. 이와 같이 최적해를 구해야 하는 목적함수가 여러개 존재할 경우, 효율적인 최적화 기법으로 다단계 분할 최적화 기법(multilevel optimization approach)이 여러 연구자들에 의해 연구되고 있다.

본 연구의 다단계 분할최적화 기법은, 제1단계에서는 파괴면의 형상을 결정하는 각도 z와 t를 초기 가정한 다음, 보강재의 설치각도, 길이, 및 설치간격 등을 설계변수로 하고 쏘일네일링 시스템의 비용을 결정하는 보강재의 전체길이를 목적함수로 하여 이에 대한 최소해를 구한다. 그리고 제2단계에서는 제1단계에서 계산된 설계변수를 고정시키고 파괴면의 형상을 결정하는 각도 z와 t를 변수로 하여 모멘트 평형조건으로 부터 계산되는 안전율이 최소화되는 해를 구한다. 이상의 두단계를 허용범위 이내에 수렴될 때 까지 반복하여 계산한다. 본 연구에서는 최소화 시키는 최적화방법으로 1차도함수를 이용하는 Davidon-Fletcher-Powell 방법을 사용하였다.

### 3.1 2단계 분할 최적화문제 형식

(1) 제1단계 최적화 문제

목적함수 : $Q_1 = L_T(\{X\},\{Y^0\})$

제약조건 : $\{X^L\} \le \{X\} \le \{X^U\}$

여기서, $\{X\} = \{\varepsilon, L, S_H, S_V\}$ : 제1단계의 설계변수 벡터

$\{Y^0\} = \{z^0, t^0\}$ : 제2단계의 설계변수 벡터

$Q_1$ : 제1단계 최적화 문제의 목적함수

(2) 제2단계 최적화 문제

목적함수 : $Q_2 = F_S(\{X^0\},\{Y\})$

제약조건 : $\{Y^L\} \le \{Y\} \le \{Y^U\}$

여기서, $\{X^0\} = \{\varepsilon^0, L^0, S_H^0, S_V^0\}$: 제1단계의 설계변수 벡터

$\{Y\} = \{z, t\}$ : 제2단계의 설계변수 벡터

$Q_2$ : 제2단계 최적화 문제의 목적함수

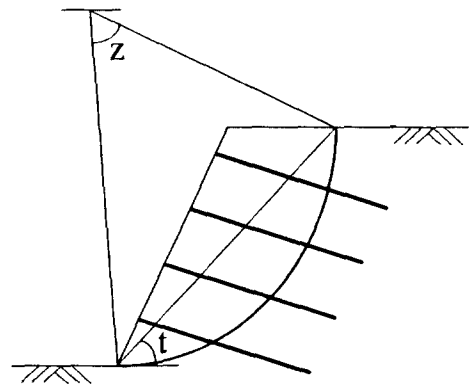



그림 3.1 파괴면의 기하학적 체계

### 3.2 설계변수의 조정

본 연구에서는 설계공간을 축소시키기 위해 전체 설계변수 중 보강재의 유효직경(=10cm), 철근의 항복강도(=4100kg/cm$^2$) 및 철근의 직경(=25mm) 등은 대표적인 값을 사용하여 설계변수를 제한하였다.

## 4. 적용예 및 결과분석

### 4.1 벽체의 변위를 고려한 경우의 설계 안전율

쏘일네일링 시스템의 설계시 벽체의 변위를 고려할 경우 설계 안전율은 표 4.1과 같이 적용하여 사용할 것을 제안한다. 표 4.1은 동일한 지반조건 및 보강조건 하에서 벽체의 움직임 정도에 따라 계산된 안전율 값으로 $\beta$는 벽체가 최하단을 중심으로 회전이동하는 경우 벽체의 움직임 정도를 정의하는 계수이다.

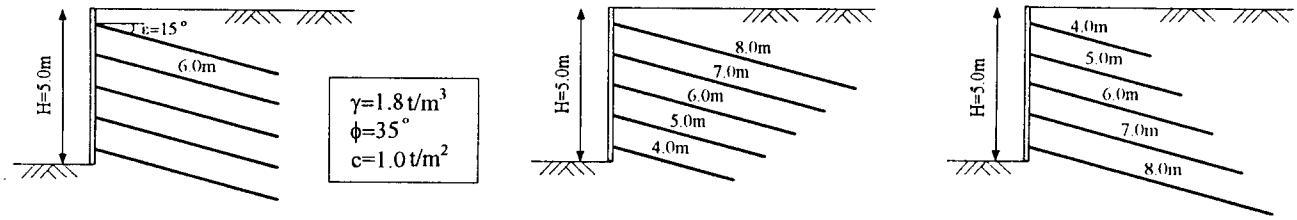
표 4.1 벽체의 변위 정도를 반영한 경우의 설계 안전율

| $\beta$ | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
|---|---|---|---|
| 지하수 영향 무 시 | 1.2 이상 | 1.4 이상 | 1.5 이상 |
| 지하수 영향 고 려 | 1.0 이상 | 1.2 이상 | 1.3 이상 |

여기서, $\beta=1.0$ : 최상단에 위치한 흙입자만 소성상태에 도달한 경우

$\beta=1.5$ : 벽체의 중앙부에 위치한 흙입자까지 소성상태에 도달한 경우

$\beta=2.0$ : 전깊이에 걸쳐 흙입자가 소성상태에 도달한 경우




(a) 배치형태 ①　　(b) 배치형태 ②　　(c) 배치형태 ③

그림 4.1 보강재의 배치형태

표 4.2 보강재의 배치형태에 따른 안전율의 변화

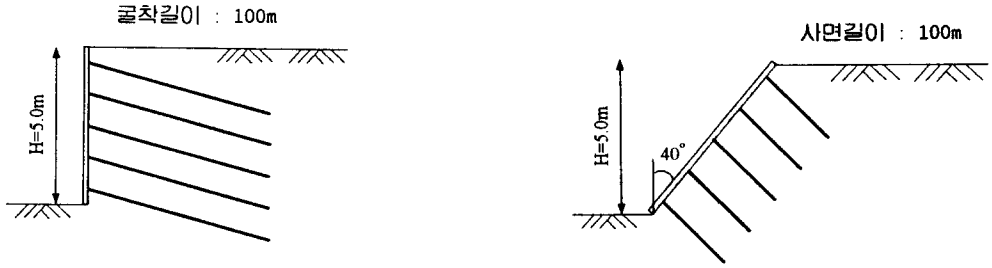
| $\beta$ | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
|---|---|---|---|
| 배치형태 ① | 1.25 | 1.50 | 1.58 |
| 배치형태 ② | 1.26 | 1.47 | 1.53 |
| 배치형태 ③ | 1.24 | 1.53 | 1.63 |

### 4.2 설계예

본 연구에서 제시한 설계기법과 기존의 설계방법을 서로 비교하기 위해, 그림 4.2과 같이 대표적인 경우 2가지에 대해 검토하였다. 설계조건은 표 4.3와 같으며, 검토결과를 요약하면 표 4.4 및 4.5와 같다.

표 4.3 설계조건

| 지반굴착의 경우 | 사면보강의 경우 |
|---|---|
| 단위중량 $\gamma = 1.8\ t/m^3$ | 단위중량 $\gamma = 1.8\ t/m^3$ |
| 내부마찰각 $\phi = 35\ ^\circ$ | 내부마찰각 $\phi = 35\ ^\circ$ |
| 점착력 $c = 1.0\ t/m^2$ | 점착력 $c = 0\ t/m^2$ |
| 설계안전율 $Fs_{(\beta=1.0)} = 1.2$ | 설계안전율 $Fs_{(\beta=2.0)} = 1.5$ |




(a) 지반굴착의 경우 (b) 사면보강의 경우

그림 4.2 설계예

표 4.4 및 4.5의 결과로 부터 최적설계를 위해서는 보강재의 수평방향 설치간격 및 연직방향 설치간격이 넓을수록 경제적이나, 설치간격이 커짐에 따라 발생되는 횡방향 최대변위는 증가함으로, 허용변위 내에서 최적해가 결정된다.

표 4.4 지반굴착의 경우 검토결과

| $S_H$ | $S_V$ | $\varepsilon$ | $L$ | $z$ | $t$ | $n$ | $m$ | $\sum L$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.0 | 1.0 | 15 | 5.5 | 30 | 65 | 5 | 100 | 2750 |
| | 1.2 | 20 | 6.0 | 32 | 67 | 5 | 84 | 2520 |
| | 1.4 | 20 | 6.5 | 32 | 67 | 5 | 72 | 2340 |
| | 1.6 | 25 | 7.5 | 36 | 70 | 5 | 63 | 2362.5 |
| | 1.8 | 25 | 8.0 | 36 | 70 | 5 | 56 | 2240 |
| | 2.0 | 30 | 8.5 | 37 | 72 | 5 | 50 | 2125 |
| 1.25 | 1.0 | 20 | 6.0 | 32 | 67 | 4 | 100 | 2400 |
| | 1.2 | 20 | 7.0 | 34 | 68 | 4 | 84 | 2352 |
| | 1.4 | 25 | 7.5 | 33 | 69 | 4 | 72 | 2160 |
| | 1.6 | 25 | 8.5 | 36 | 70 | 4 | 63 | 2142 |
| | 1.8 | 30 | 9.5 | 39 | 73 | 4 | 56 | 2128 |
| | 2.0 | 30 | 10.0 | 39 | 73 | 4 | 50 | 2000 |
| 1.67 | 1.0 | 20 | 7.5 | 34 | 68 | 3 | 100 | 2250 |
| | 1.2 | 20 | 8.5 | 34 | 68 | 3 | 84 | 2142 |
| | 1.4 | 25 | 9.0 | 35 | 70 | 3 | 72 | 1944 |
| | 1.6 | 25 | 10.0 | 35 | 70 | 3 | 63 | 1890 |
| | 1.8 | 30 | 11.0 | 39 | 73 | 3 | 56 | 1848 |
| | 2.0 | 30 | 11.5 | 39 | 73 | 3 | 50 | 1725 |

표 4.5 사면보강의 경우 검토결과

| $S_H$ | $S_V$ | $\varepsilon$ | $L$ | $z$ | $t$ | $n$ | $m$ | $\sum L$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.0 | 1.0 | 45 | 3.0 | 77 | 44 | 5 | 100 | 1500 |
| | 1.2 | 45 | 3.5 | 78 | 43 | 5 | 84 | 1470 |
| | 1.4 | 45 | 4.0 | 78 | 44 | 5 | 72 | 1440 |
| | 1.6 | 45 | 4.0 | 77 | 44 | 5 | 63 | 1260 |
| | 1.8 | 45 | 4.5 | 77 | 44 | 5 | 56 | 1260 |
| | 2.0 | 45 | 5.0 | 78 | 44 | 5 | 50 | 1250 |
| 1.25 | 1.0 | 45 | 3.5 | 78 | 44 | 4 | 100 | 1400 |
| | 1.2 | 45 | 4.0 | 78 | 44 | 4 | 84 | 1344 |
| | 1.4 | 45 | 4.5 | 79 | 43 | 4 | 72 | 1296 |
| | 1.6 | 45 | 5.0 | 79 | 44 | 4 | 63 | 1260 |
| | 1.8 | 45 | 5.0 | 78 | 44 | 4 | 56 | 1120 |
| | 2.0 | 45 | 5.5 | 79 | 43 | 4 | 50 | 1100 |
| 1.67 | 1.0 | 45 | 4.5 | 80 | 44 | 3 | 100 | 1350 |
| | 1.2 | 45 | 5.0 | 80 | 44 | 3 | 84 | 1260 |
| | 1.4 | 45 | 5.5 | 80 | 44 | 3 | 72 | 1188 |
| | 1.6 | 45 | 6.0 | 80 | 44 | 3 | 63 | 1134 |
| | 1.8 | 45 | 6.0 | 80 | 44 | 3 | 56 | 1008 |
| | 2.0 | 45 | 6.5 | 80 | 44 | 3 | 50 | 975 |

표 4.4 및 4.5로 부터 지반굴착의 경우, 보강재의 설치간격이 증가할수록 최적삽입각도는 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 또한 파괴면의 크기는 줄어드는 경향(= 각도 t값이 증가)을 나타냈으며, 파괴면의 곡률은 증가하는 경향(= 각도 z값이 증가)을 보였다.

사면보강의 경우에는 보강재의 설치간격 변화가 최적삽입각도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 평가되었으며, 파괴면의 크기 및 곡률 등에 대한 변화도 거의 없는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 지반굴착의 경우에는 기존의 방법에 의한 설계(즉, 보강재의 삽입각도 및 설치간격을 일반적인 단면에 대한 값으로 고정시키고 보강재의 길이만을 변화시키는)방법은 최적단면을 찾기에 부적절한 것으로 판단된다. 그러나 사면보강의 경우에는 설계변수들에 대한 변화의 차이가 심하지 않으므로 기존의 설계방법에 의한 방법도 타당할 것으로 평가되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 쏘일네일링 시스템의 최적설계기법 개발을 위한 시도가 이루어 졌다. 이를 위해 Davidon-Fletcher-Powell 방법이 적용되었으며, 벽체전면부의 발생변위에 대해서는 정성적인 형태로 고려되었다. 제시된 최적설계기법을 이용해 쏘일네일링 시스템 각 설계변수들에 대한 중요도 등을 비교·평가하였으며, 벽체의 변위를 고려한 설계에 있어서의 안전율도 제시하였다. 또한 제시된 본 연구 최적설계기법을 지반굴착 및 사면보강의 경우 각각에 적용하여 분석한 결과, 사면보강의 경우 보다는 지반굴착의 경우가 본 최적설계기법 적용이 보다 효율적일 것으로 판단된다.

## 6. 참고문헌


(1) Himmelblau, D.M. (1972), Applied Nonlinear Programming, McGraw-Hill.

(2) Reklaitis, G.V., Ravindran, A. and Ragsdell, K.M. (1983), Engineering Optimization - Methods and Applications, John Wiley & Sons.

(3) U.S. Department of Transportation (1991), Soil Nailing Recommendations - 1991, FHWA-SA-93-026.

(4) Vanderplaats, G.N. (1984), Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, McGraw-Hill.

(5) 건설부 (1992), 도로교표준시방서.

(6) (주)동아지질 & 홍익대학교 (1994), KK-NAIL Ver. 1.1 - SOIL NAILING 공법 지하굴착 흙막이벽체 해석 및 설계.

(7) 이규원, 김완영 (1995),"다단계 다목적 함수 최적화 방법에 의한 트러스 구조물의 형상 최적화," 대한토목학회논문집, 제15권, 제2호, pp. 389-399.

(8) 한국지반공학회 (1994), 지반지공학 시리즈 5 - 사면안정.