

쏘일네일 보강 연직굴착면의 한계 평형법을 이용한 설계기법 개발

Article

01

Development of design method using Limit Equilibrium Method applying to vertical excavation reinforcing by soil-nailing



이성범

(주)대우건설 오리수원복선전철
제3공구 현장소장

이 인¹⁾, 윤배식²⁾, 김홍택³⁾

SYNOPSIS: In order to apply the Limit Equilibrium Method generally used for the slope stability analysis to the vertical excavation walls reinforced by soil-nailing, in this study, the Limit Equilibrium Method for the temporary shoring facilities reinforced by soil-nailing was proposed, which is based on the stability for the horizontal displacement. In this study, the relation of the internal friction angles of the ground and the vertical excavation depths was arranged, which is satisfying the stability on the horizontal displacement by using the verification of the Limit Equilibrium Method. And then, the rational reinforcing length of soil-nailing was proposed for the critical areas. In addition, the modified safety ratio satisfying the stability on the horizontal displacement was proposed, when the Limit Equilibrium Method was applied to the vertical excavation walls reinforced by soil-nailing.

Key words: Limit Equilibrium Method, Soil-nailing, Horizontal displacement, FDM

1. 서론

본 연구는 한계평형법의 연직굴착 설계에 적용을 위한

연구로서, 수평변위를 만족하는 한계평형법의 제시를 위하여 지반의 강도, 연직굴착 깊이, 쏘일네일의 길이, 쏘일네일의 수평간격을 변수로 하여 한계평형 해석을 수행하고 기

1) 홍익대학교 토목공학과 박사과정, Candidate, Department of Civil Engineering, Hongik University, E-mail: leein10@hotmail.com

2) 홍익대학교 토목공학과 석사과정, the Master's Course, Department of Civil Engineering, Hongik University

3) 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University

준안전율을 최소로 만족하는 변수별 한계값을 산정하여 유한차분법을 통한 연속체 해석을 수행하였다. 이를 통해 얻어진 결과로 한계평형법의 적용한계를 알아보았으며, 적용한계를 벗어난 영역에 대하여 변수별로 유한차분해석과 한계평형해석을 재차 수행하여 한계평형법의 합리적 적용을 위한 쏘일네일의 길이변화 및 기준안전율을 결론으로 도출하였다.

2. 한계평형법의 적용한계

2.1 개요

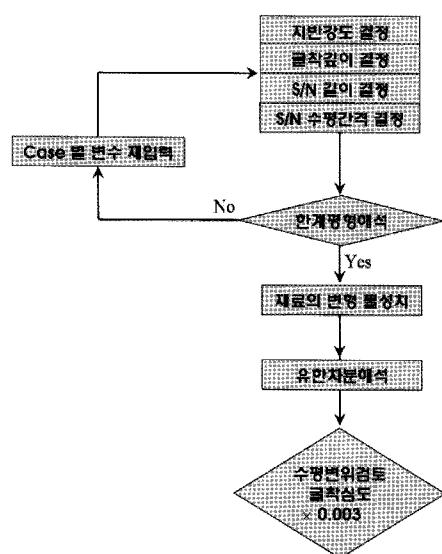
쏘일네일 공법으로 보강된 연직굴착 사면에 대한 한계평형법의 적용한계를 알아보기 위한 수치해석적인 연구를 수행하였다. 본 장의 연구 순서는 먼저 지반의 강도, 굴착심도, 쏘일네일의 길이, 수평간격 4가지 변수별로 한계평형법을 수행하였다. 다음으로 한계평형법의 결과인 안전율을 만족하는 최소 변수들을 이용하여 유한차분법

[표 1] 해석에 사용된 지반강도 정수

SPT-N	ϕ°	K(ton/m ³)	E(ton/m ³)	γ
10, 11	26	1795	804	0.25
12, 13	27	1926	958	0.25
14, 15	28	2046	1111	0.25
16, 17	29	2156	1264	0.25
18, 19, 20	30	2283	1455	0.25
21, 22	31	2401	1647	0.25
23, 24, 25	32	2511	1838	0.25
26, 27, 28	33	2634	2068	0.25
29, 30	34	2730	2260	0.25

을 수행하여 수평변위에 대한 연구를 하였다. 유한차분법에 쓰이는 재료의 변형에 관한 변수들은 지반의 강도 정수와 변형계수에 관한 기준에 제시된 제안식을 사용하였으며, 네일-지반과의 상호작용을 고려하기 위하여 쏘일네일에 경계면조건을 입력하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 지반강도 정수는 지반의 SPT-N값이 10~30의 범위라고 가정하여 기존의 경험식을 이용하여 산정하였다.

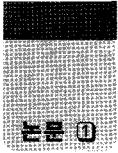
한계평형 해석을 통한 안정성 판단의 기준은 안전율이며, 기준안전율은 사면의 경우 1.5이다. 본 연구에서는 안전율 1.5을 기준으로 하였으며, 물성의 한계값을 알기 위하여 변수별로 기준안전율을 가장 미소하게 상회하는 값을 찾는 해석을 수행하였다. 이후 한계평형 해석결과를 이용한 유한차분해석을 통하여 수평변위에 안정성을 검토하였다. 수평변위의 기준은 0.002H(NAVFAC, DM, 1982; Clough & Rouke, 1990; Chang 등)로 제안되어 있으나 일반적으로 실무에서 적용하는 0.003H를 적용하였다.



[그림 1] 연구흐름도

2.2 한계평형법의 적용범위

한계평형해석과 유한차분해석 결과를 이용하여 수평변위의 안정성이 확보되는 한계평형법의 범위를 [식 (1)]과 [그림



2)에 제시하였다.

$$\text{식 1} \quad H \leq A \cdot \emptyset + B$$

여기서,

H : 한계평형해석 만으로 수평면위를 만족하는 굴착깊이

$$A = 55.55L_H^3 - 198.31L_H^2 + 235.09L_H - 91.926$$

$$B = -1277.6L_H^3 + 4599.4L_H^2 - 5493.7L_H + 2171.5$$

L_H : 쏘일네일의 수평간격(m)

2.3 한계평형법의 적용범위 간편식

2.2에서 제시된 한계평형법의 적용범위 산정식은 계수와 계수의 산정이 L_H 에 대한 3차 다항식으로 각각을 구하기가

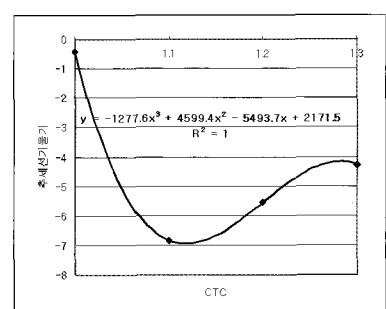
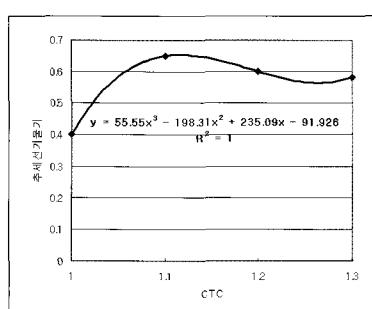
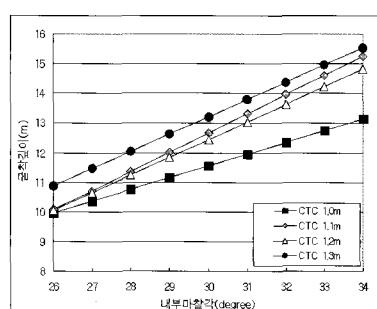
까다롭다.

좀 더 간편한 사용을 위하여 간편식을 제안하였다. 간편법의 제안을 위하여 [그림 2(a)]에서 y축과 교차하는 값을 통일시켰다. 그 값은 최소값인 10이며, 다음으로 [그림 3.(a)]에서 각 식의 기울기 차이를 선형적 증가에 가깝게 나누었다.

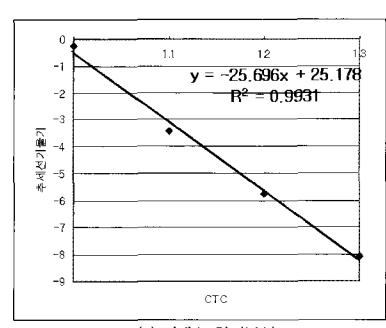
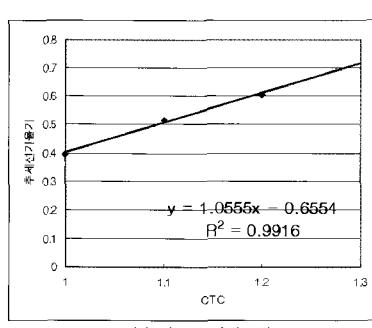
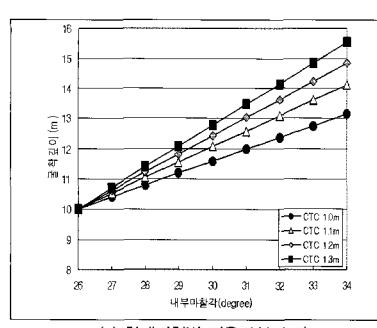
이 결과 [그림 2(a)]는 [그림 3(a)]과 같이 변하며 이 경우 2.2의 제안보다 간편법의 제안이 더 안전측이다. 각각에 대한 식은 [식 (2)]이다.

$$\text{식 2} \quad A' = 11L_H - 0.7$$

$$B' = -26.5L_H + 25.9$$



[그림 2] 쏘일네일로 보강된 연직굴착면의 한계평형법 적용범위



[그림 3] 쏘일네일로 보강된 연직굴착면의 한계평형법 적용범위

3. Soil-Nail의 길이 보강을 통한 한계평형법의 적용범위 확대

3.1 Soil-Nail의 길이 보강을 통한 한계평형법 및 유한차분법 해석 결과

	굴착깊이(m)										
Ø	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26						0.1H					
27						0.1H					
28						0.1H					
29						0.1H	0.1H	0.1H			
30						0.1H					
31						0.1H					
32						0.1H					
33						0.1H					
34						0.1H					

(a) 수평간격 1.0m

	굴착깊이(m)										
Ø	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26					0.1H						
27					0.1H						
28					0.1H						
29					0.1H						
30					0.1H						
31					0.1H						
32					0.1H						
33					0.1H						
34					0.1H						

(c) 수평간격 1.2m

	굴착깊이(m)										
Ø	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26					0.2H						
27					0.2H						
28					0.2H						
29					0.2H						
30					0.2H						
31					0.2H						
32					0.2H	0.2H					
33					0.2H	0.2H					
34					0.2H	0.2H					

(e) 수평간격 1.0m

	굴착깊이(m)										
Ø	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26					0.2H						
27					0.2H						
28					0.2H						
29					0.2H						
30					0.2H						
31					0.2H						
32					0.2H	0.2H					
33					0.2H	0.2H					
34					0.2H	0.2H					

(g) 수평간격 1.2m

2절에서 수행하였던 수평변위를 만족하는 한계평형의 결과에서 안정의 범위를 벗어난 구간에 대하여 쏘일네일의 길이를 0.1, 0.2증가시켜 유한차분 해석을 통한 수평변위 검토를 수행하였으며, 그 결과를 〈표 4.1~4〉에 나타내었다. 겹게 채워진 영역은 2절에서 안정을 나타낸

	굴착깊이(m)										
Ø	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26						0.1H					
27						0.1H					
28						0.1H					
29						0.1H					
30						0.1H					
31						0.1H					
32						0.1H					
33						0.1H					
34						0.1H					

(b) 수평간격 1.1m

	굴착깊이(m)										
Ø	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26						0.1H					
27						0.1H					
28						0.1H					
29						0.1H					
30						0.1H					
31						0.1H					
32						0.1H					
33						0.1H					
34						0.1H					

(d) 수평간격 1.3m

	굴착깊이(m)										
Ø	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26						0.2H					
27						0.2H					
28						0.2H					
29						0.2H					
30						0.2H					
31						0.2H					
32						0.2H					
33						0.2H					
34						0.2H					

(f) 수평간격 1.1m

	굴착깊이(m)										
Ø	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26						0.2H					
27						0.2H					
28						0.2H					
29						0.2H					
30						0.2H					
31						0.2H					
32						0.2H					
33						0.2H					
34						0.2H					

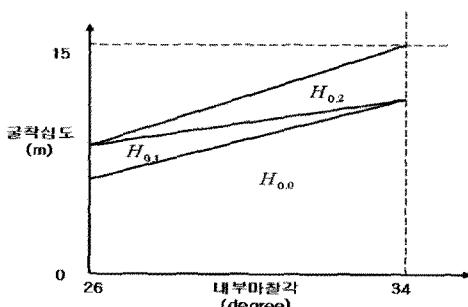
(h) 수평간격 1.3m

[표 2] 쏘일네일의 길이보강을 통한 한계평형법 적용범위 확장

영역으로 한계평형 해석만으로 수평변위의 안정을 만족시키는 영역이며, '0.1H'라고 표시된 영역은 쏘일네일의 길이를 0.1증가하였을 경우 수평변위를 만족하는 구간이다. '0.2H'라고 표시된 영역은 쏘일네일의 길이를 0.2증가하였을 경우 수평변위를 만족하는 구간이다. 0.2증가시켰을 경우의 겹게 칠해진 부분은 0.1증가 시 안정구간을 포함한다. 아무런 표시가 없는 구간은 불안정 구간이다. 겹게 채워진 영역과 표시영역이 겹치는 구간은 쏘일네일의 길이를 0.1, 0.2증가하여도 굴착심도가 증가하지 않는 구간이다.

3.2 관계식 유도

2.3의 간편식을 쏘일네일의 길이를 0.1, 0.2 증가하였을 경우에 대하여 유도하였다. 기본적인 흐름은 2절과



[그림 4] 수평변위를 만족하는 한계평형법의 범위

[표 3] 각 영역별 관계식 정리

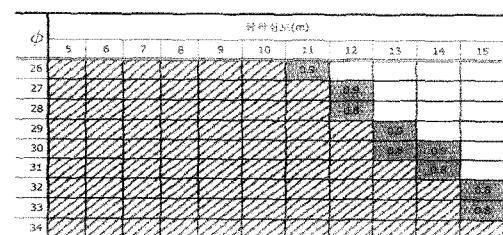
조건식		$H_s \leq A' \cdot \phi + B'$	$A' \cdot \phi + B' \leq H_s \leq A'' \cdot \phi + B''$
계수		$A' = 1.1L - 0.7$	$A'' = 0.6949L - 0.4034$
		$B' = -26.5L + 25.9$	$B'' = -18.068L + 21.488$
조건식			$\max(H_s) \leq H_s \leq 0.5\phi - 2$
계수			
비고	$L = $ 쏘일네일의 수평간격(m), $\max(H_s) = A'' \cdot \phi + B''$		

같다. 쏘일네일의 길이 0.1H, 0.2H증가에 대한 구분으로 계수와 계수, 계수와 계수를 각각 $A_{01}, A'_{01}, B_{01}, B'_{01}$, $A_{02}, A'_{02}, B_{02}, B'_{02}$ 로 정의하였으며, 그 결과를 [그림 5]와 [표 2]를 통하여 나타나었다. 여기서, 은 한계평형법의 기준안전율의 만족만으로 수평변위를 만족하는 영역, 과는 한계평형법의 기준안전율은 만족하지만 수평변위에 대하여 불안정한 구간 중 쏘일네일의 길이를 각각 0.1H, 0.2H증가 시켰을 경우(H : 굴착깊이) 수평변위에 대하여 안정성을 만족하는 영역이다.

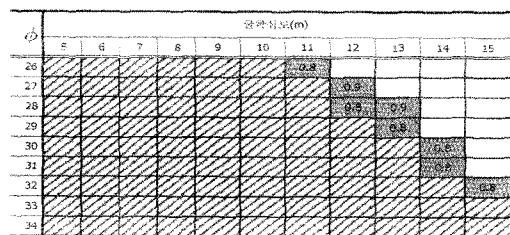
4. Soil-Nail의 길이 보강을 통한 한계평형법의 수정안전율 제시

4.1 한계평형해석 입력치

H_{01}, H_{02} 의 범위에 있을 경우에 대한 한계평형 해석법의 입력치(L/H)를 [표 4.10~13]에 나타내었다. 겹게 채워진 영역은 H_{01}, H_{02} 의 범위이며, 빛금이 채워진 영역은



(a) 수평간격 1.0m



(b) 수평간격 1.1m

		굴착깊이(m)										
ϕ		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												
33												
34												

(c) 수평간격 1.2m

		굴착깊이(m)										
ϕ		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												
33												
34												

(d) 수평간격 1.3m

[표 4] 길이보강 후의 한계평형해석 입력치

한계평형해석 만으로 수평변위의 안정을 만족하는 구간, 공백은 불안정 구간이다. L/H 를 증가하여도 굴착심도가 변하지 않는 구간에는 L/H 의 증가량 중 작은 값을 채택하였다.

4.2 한계평형해석 결과 및 수정안전율 제안

$H_{\text{d}1}$ 영역과 $H_{\text{d}2}$ 영역에 대하여 한계평형 해석을 4.1절에

		굴착깊이(m)										
ϕ		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												
33												
34												

[표 5] 길이보강 후의 한계평형해석 결과

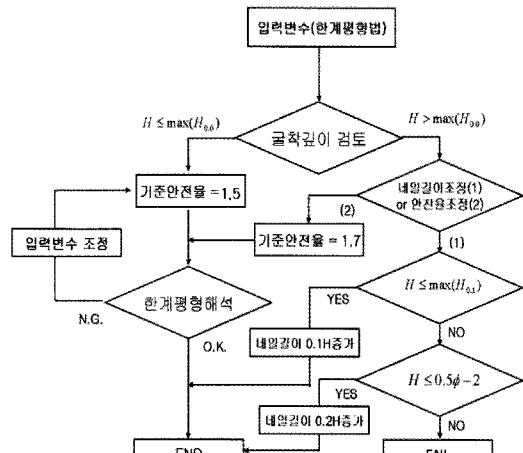
[표 6] 수정안전율 제안

영역	1.5	1.7
설계기준	1.5	
안전율 (일반적인 경우, 건기사)	(일반적인 경우, 건기사)	1.7

서 실시하였으며, 그 결과를 최대값을 정리하면 표 5와 같으며 이에 따른 수정안전율을 [표 6]에 제시하였다.

5. 수평변위를 만족하는 한계평형 해석 절차

이상의 결과를 종합하여 쏘일네일 공법이 적용된 연직굴착 벽체의 설계시 수평변위를 만족하는 한계평형법 설계의 흐름은 [그림 5]와 같다. 지반은 점착력이 없는 사질토이며, 최대 굴착깊이는 15m, SPT-N값은 10~30, 시공단계별 굴착깊이는 1m, 쏘일네일의 수평간격은 1.0~1.3m, 설치각도 15°, 쏘일네일의 규격 H29이다.



는 사질토로 이루어진 단일 토층이며, 쏘일네일 시공시 단계별 굴착깊이는 1m이다. 또한 쏘일네일의 제원은 H29로 제한하였으며, 지반의 SPT-N값은 10~30, 연직 굴착벽체는 솗크리트 10cm, 쏘일네일의 수평간격은 1.0~1.3m이다. 이상의 조건으로 본 연구의 진행사항 및 결론은 다음과 같다.

(1) 지반의 강도는 점착력을 무시하고 내부마찰각만으로 강도를 산정하였으며, 내부마찰각의 산정은 SPT-N값에 따라 Dunham의 제안을 이용하였으며, 횡방향 지반반력계수의 산정은 SPT-N값에 따라 Hukouka법을 이용하였다.

(2) 지반의 강도, 연직굴착깊이, 쏘일네일의 길이, 쏘일네일의 수평간격을 변수로하여 한계평형 해석을 수행하고 기준안전율(1.5)을 최소로 만족하는 변수별 한계값을 산정하여 유한차분법을 통한 연속체 해석을 수행하였으며, 그 결과 쏘일네일 공법이 적

용된 연직굴착 시 수평변위를 만족하는 한계평형 법의 적용범위에 대한 간편식으로 식 (2)를 제시하였다.

(3) 기준안전율에 대해 수평변위를 만족하지 않는 변수별 영역에 대하여 쏘일네일의 길이를 0.1H, 0.2H를 증가시켜 유한차분해석을 재차 수행하여 쏘일네일의 증가 길이에 따른 수평변위의 안정에 대한 입력변수별 범위를 제안하였다. 그 결과를 [그림 4]와 <표 3>으로써 제시하였다.

(4) 쏘일네일의 길이를 증가시켰을 경우에 대하여 재차 한계평형해석을 수행하였으며 그 결과 안전율의 한계값이 1.7로 산정되었으며, 이에 따라, H_{cr} H_{cr} 영역에서의 한계평형법의 기준안전율을 1.7로 제안하였다.

(5) 이상의 결과를 종합하여 수평변위를 만족하는 한계평형해석에 대한 흐름도를 [그림 5]로 제시하였다.

참고문헌

1. 김상규(1995). 토질역학(이론과 응용), 청문각
2. 김홍택(2001). 쏘일네일링의 원리 및 지침, 평문각
3. 김홍택(2001). Soil Nailing 공법의 과거, 현재, 미래, 평문각
4. FHWA, "Manual for Design and Construction and Monitoring of Soil Nail Walls", Publication No. FHWA-SA-96-069R, 63~136.
5. Itasca Consulting Group Inc. FLAC2D Ver 4.0 Program manual.