

네일-앵커 복합구조체 공법의 안정해석에 관한 연구

A Study on Stability Evaluation of the Nail-Anchor Mixed System

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 강인규²⁾, In-Kyu Kang, 고용일³⁾, Yong-Il Koh, 이중재⁴⁾, Jung-jae Lee, 조용권⁵⁾, Yong-kwon Cho

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dep't of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

²⁾ (주)브니엘컨설턴트 책임연구원, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

³⁾ (주)한라건설 기술연구소 차장, Deputy General Manager, R & D Center, Halla Eng., Corp.

⁴⁾ (주)새길엔지니어링 이사, Operation Director, Saegil Eng. Co., Ltd.

⁵⁾ 홍익대학교 대학원, Graduate student, Dep't of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

SYNOPSIS : In the present study, a method of two-dimensional limit equilibrium stability analysis of the nail-anchor mixed system is proposed. A shape of the potential failure wedge for this system is assumed based on the results of the *FLAC^{2D}* program analysis. Estimation of the seepage pressures is made by solving the continuity equation of a flow with appropriate boundary conditions. Using the proposed method, analyses are carried out to examine the effects of the seepage forces on the overall stability of the nail-anchor mixed system. Also, proposed is an analytical procedure to determine the thickness of a shotcrete facing on a basis of the plate theory. Probability of the punching shear failure of a shotcrete facing is also estimated for a further stability check.

Key words : 2-D limit equilibrium, nail-anchor mixed system, punching shear failure, probability

1. 서론

도심지 지반굴착에 있어, 대지경계선 침범이 부분적으로 제한되는 현장여건, 상부는 토사층이고 하부는 암반층인 지층조건, 또한 인접하여 지중매설물, 지하철 관기구조물 및 건물 등이 존재하는 시공여건 등을 종종 접하게 되며, 이와 같은 경우에 기존의 지반앵커공법 적용시, 인접 구조물등과의 이격거리, 보강재 길이의 제한성 등으로 인해 시공상의 어려움이 따르게 된다. 따라서 이를 해결하기 위한 대책공법의 일환으로, 쏘일네일과 지반앵커를 좌·우 또는 상·하로 병용하여 적용하는 사례가 존재하여 왔다. 그러나 이와 같은 경우 현재까지의 설계 방식은, 각각의 공법에 대한 안정해석을 별도로 시행하는 정도에 그치고 있는 실정이다. 본 연구에서는, 쏘일네일과 지반앵커가 상·하 연직방향으로 병용 설치되는 복합구조체의 체계적인 안정해석에 초점을 두어 연구를 진행하였다. 쏘일네일과 지반앵커가 서로 접합하는 부분에서 거동특성이 서로 다른 두 구조체의 상호작용에 연관된 '천이영역(transition zone)'이 존재하게 된다. 여기서 천이영역이란 쏘일네일에 의해 보강된 영역과 지반앵커에 의해 보강된 영역 사이의 접합부분으로, 각 공법에 의해 보강된 토체의 서로 다른 거동으로 인해 경계면에서의 상대변위가 특히 문제시 되는 영역으로 정의되며, 더 나아가 천이영역의 전면벽체에 응력이 집중되어 파괴가 일어날 가능성이 있다.

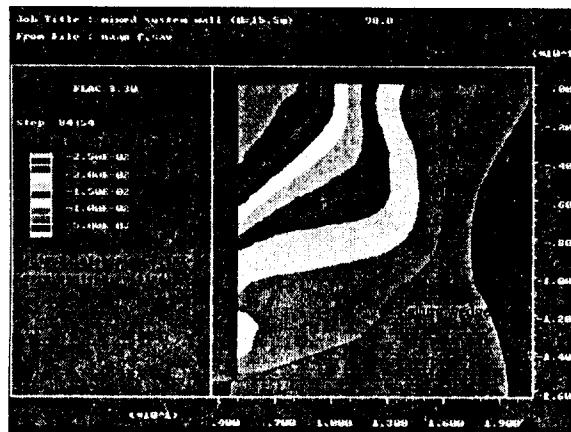
본 연구에서는 일차적으로, 네일-앵커 복합구조체의 2차원 한계평형 안정해석법을 제시하고, 이를 토대로 활동에 대한 최소안전율을 평가하였다. 계속해서, 복합구조체의 체계적인 안정해석을 위해 최소안전율의 경우에 해당되는 각 네일의 인장력, 각 앵커의 긴장력 및 작용토압 등을 토대로 관입진단파괴(punching shear failure)에 대한 전면벽체의 소요두께 결정이 수행되었으며, 결정된 전면벽체의 소요두

계를 토대로 하여 관입전단파괴에 대한 신뢰도 평가를 수행하였다. 또한 복합구조체중 최하단 네일의 발생변위와 최상단 앵커의 발생변위를 서로 비교하여, 그 상대변위에 의한 전면벽체의 전단파괴 가능성을 검토하고, 이를 토대로 안정성 확보에 필요한 최하단 네일과 최상단 앵커의 설치간격(천이영역)을 평가하였다.

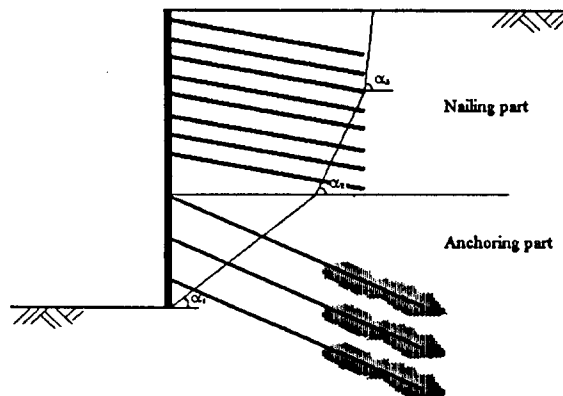
2. Nail-Anchor 복합 구조체의 안정해석

2.1 가능파괴면의 형상 및 가정사항

그림 1의 상단에 도시된 $FLAC^{2D}$ 프로그램 해석결과를 토대로, 지반앵커에 의해 보강된 영역, 쏘일네일에 의해 보강된 영역, 그리고 보강되지 않은 영역 등 3개의 영역으로 구분하여 가능파괴면의 형상을 가정하였다. 가능파괴면의 형상을 정의하는 각도는 α_1 , α_2 및 α_3 등으로 하였다. 또한 강우시 및 지하수가 존재하는 경우 파괴면에 작용이 예상되는 침투수압은 Gray의 침투이론을 토대로, Laplace 방정식 및 경계조건 등을 적용하여 유도·제시된 참고문헌 1의 방식을 이용해 결정하였으며, 이외에도 Mohr-coulomb 파괴규준을 적용하여 안정해석시 발생하는 부정정 문제를 해결하였다.



(a) $FLAC^{2D}$ 해석결과



(b) 한계평형 해석단면과 가능파괴면의 형상

그림 1 $FLAC^{2D}$ 해석에 의거한 가능파괴면의 형상

2.2 각 요소들의 평형조건

예상 파괴흙썰기에 작용하는 힘들의 평형조건식, 각 보강재의 인장력(긴장력) 평가식 및 전체적인 안정성 평가절차 등은 지면 관계상 생략하였다(참고문헌 1 및 2 참조)

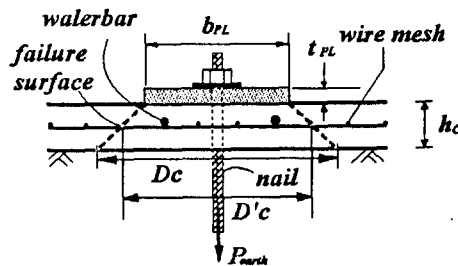
3 관입전단파괴에 대한 전면벽체 설계

3.1 전면벽체의 전단강도

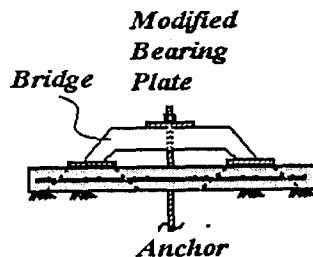
전면벽체의 전단은 미소토체요소 내부에서 유발되는 전단력에 의한 일면전단파괴와 쏘일네일 내부에 유발되는 인장력의 전달에 의해 지압판이 전면벽체 내부로 관입하여 발생하게 되는 관입전단파괴 등의 두가지 종류가 있다. 이중 전면벽체와 같이 너비와 폭에 비해 두께가 얇은 경우 관입전단파괴에 취약하며, 특히 지반앵커에 긴장력이 가해질 경우 관입에 대한 안정성은 전면벽체의 두께를 산정하기 위한 가장 중요한 설계변수가 된다. 이와 같은 경우, 전면벽체의 두께 산정기법은 참고문헌 3의 연구내용을 토대로 정리되었다.

3.2 수정된 전면벽체의 설계

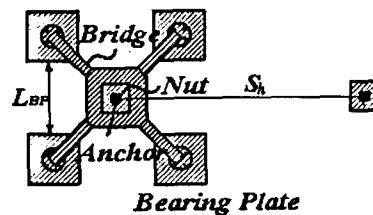
복합구조체 시공시 일반적으로, 앵커 시공영역은 H-pile과 띠장 등을 이용하여 전면벽체를 시공하고, 네일 시공영역은 숏크리트등을 이용하여 시공된다. 이와 같이 기존의 방법으로 시공이 이루어 질 경우 작업의 연속성 문제와 전면부 구성부재가 서로 상이하여 경계면에서 일체화된 거동을 하지 못하는 불연속면 문제가 발생할 수 있다.



(a) 기본형상



(b) 수정된 형태의 측면도



(c) 수정된 형태의 평면도

그림2. 앵커 시공영역의 수정된 지압판의 형태

본 연구에서는 작업의 연속성과 집합부에서의 일체거동의 문제를 해결하기 위한 방안의 하나로, 모든 시공영역에 슛크리등을 이용하여 시공할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 앵커 시공영역의 경우 긴장력에 의한 관입전단파괴에 대해 안정성을 확보하기 위해, 일반적인 지압판을 시공할 경우 전면벽체의 두께가 증대되는 문제점이 발생하므로, 지압판 형태의 일부 수정이 필요하다.

제시하고자 하는 수정된 지압판의 형태는 그림 2와 같으며, 일반적인 지압판의 형태에서 면적을 4배 크게 설계한 지압판의 경우 보다, 같은 면적으로 4개의 지압판으로 분산시키는 경우가 관입저항 능력의 증대에 더욱 효과적이며, 전면벽체의 두께 감소량을 증대시킬 수 있을 것으로 기대된다. 단, 지압판 사이의 간격은 지압판 상호간의 간섭효과를 배제시키기 위하여 전면벽체 두께의 2배 이상이 되도록 한다.

3.3 신뢰도 및 파괴확률

복합구조체의 경우 계측자료나 실험결과의 획득이 여의치 않아, 따라서 이에 대한 보완조치로써 신뢰도 해석의 도입이 적극 검토되었다. 원지반 혹은 공간적으로 비등방성의 특징을 지니고 있어 일관된 논리적 근거가 취약하고, 시료교란 및 계측오차 등과 같은 여러 가지 불확실성을 내포하고 있기 때문에 구조물 및 지반 자체가 지니고 있는 각종 파라미터에 대한 불확실성(uncertainty)을 극복할 수 있는 해석방법이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 요구조건에 부합되도록 구조물의 파괴확률(probability of failure)을 평가할 수 있는 신뢰도 해석기법을, 슛크리트 전면벽체의 관입전단파괴 발생 가능성에 초점을 맞춰 제한적으로 적용하였다.

관입전단파괴에 대한 신뢰도 해석을 위해, 관입을 일으키려는 힘(S)과 전면벽체가 저항할 수 있는 힘(R)을 산정한 후, 이를 토대로 g -함수를 구하면 신뢰도 지수 및 파괴확률을 구할 수 있다.

$$Z = R - S = V_{ps} - P_{earth} = g(\sigma_{ck}, \phi, \gamma, T_0) \quad (1)$$

본 연구에서는 복합구조체 공법에 대한 신뢰도 분석을 위해, 'First Order Reliability Method, FORM'을 이용하여 신뢰도 지수를 구한 후, 이를 토대로 파괴확률을 산출하였다(참고문헌 9 참조).

3.4 상대변위에 의한 전면벽체의 안정해석

기 설계된 전면벽체를 1차원 보요소로 가정하고 보강재가 설치된 지점과 지점사이를 보요소의 길이로 결정하고 지점은 고정으로 한후 양쪽 지점사이의 상대변위만으로 발생하는 전단력을 산정한다.

상대변위에 의한 전면벽체에 발생하는 전단력의 평가식은 다음과 같다.

$$V = \frac{12EI}{l^3} \Delta \quad (2)$$

설계된 전면벽체가 받을 수 있는 전단력의 평가식은 아래와 같다.

$$V_{SF} = \phi \cdot 0.53\sqrt{\sigma_{ck}B} \cdot T \quad (3)$$

여기서, ϕ : 강도감소계수, 전단의 경우 0.7, B : 전면벽체의 폭, T : 전면벽체의 두께

설계된 벽체의 V_{SF} 와 상대변위에 의한 V 를 비교하여 V_{SF} 가 더 커지도록 전면벽체의 두께를 증가시킨다. 즉,

$$V_{SF} \geq V \quad (4)$$

4. 분석 및 고찰

본 연구에서 사용된 지반의 제원은 다음과 같다.

표1. 지반의 제원

지 층	깊 이	지반의 점착력 (t/m ²)	지반의 마찰각 (°)	지반의 단위하중 (t/m ²)
지 층 #1	0 ~ 5m	0.5	25	1.8
지 층 #2	5 ~ 11m	0.5	28	1.9
지 층 #3	11m 이하	3.0	35	2.0
총 굴착깊이	15.5m			

본 연구에 적용된 지반의 제원을 토대로 무보강 상태의 전체 안전율을 평가한 경우 최소 안전율 (FS_{min})은 0.652이고 이때의 파괴면 각도는 71° ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4$)이다.

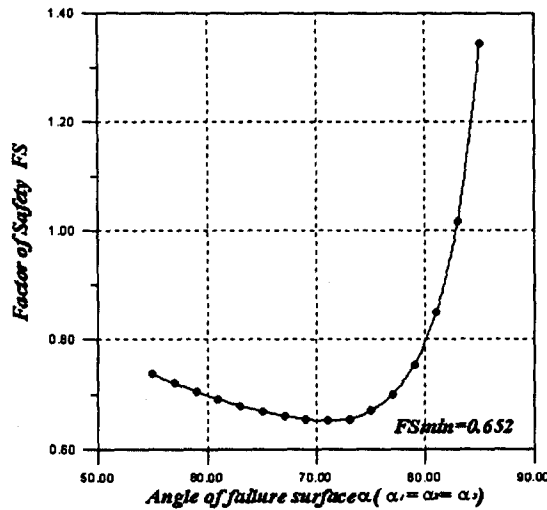
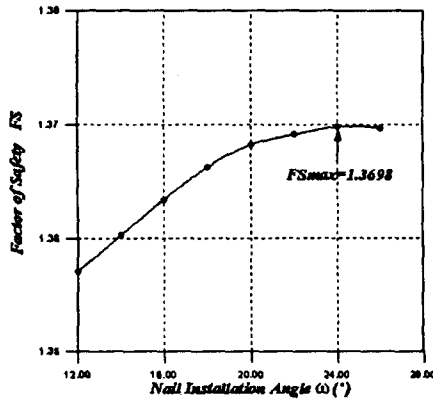
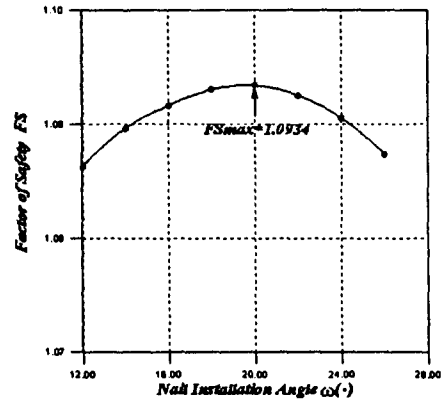


그림4. 무보강시 적용된 지반의 안전율

본 분석에서는 네일의 삽입각도의 영향을 알아보기 위해 앵커는 삽입각도 30° 로 고정하고 침투수압을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 구분하여 네일의 삽입각도를 $12 \sim 26^\circ$ 까지 변화하였다. 그 결과 일반적으로 네일만 시공할 경우의 최적 삽입각도는 $8 \sim 15^\circ$ 로 나타나지만 앵커와 복합적으로 시공할 경우 앵커의 영향을 받아 $20 \sim 24^\circ$ 사이에서 가장 높은 안전율을 나타내고 있다(그림 5). 또한 침투류의 영향을 파악하고자 강우시에 발생할 수 있는 침투수압의 영향을 분석한 결과 침투수압의 효과로 전체 안전율의 값이 $19 \sim 20\%$ 정도 감소되는 결과를 나타내고 있다.



(a) 침투수압 고려하지 않을 경우



(b) 침투수압 고려시

그림5. 보강재의 삽입각도에 따른 안전율 변화

앵커가 시공된 영역의 관입전단파괴에 대한 발생가능성을 조사하기 위하여 전면벽체 및 지압판이 수정된 전면벽체의 두께를 참고문헌 3을 통하여 산정하고 각 변수에 대한 평균과 표준편차를 토대로 신뢰도 지수 및 파괴확률을 산출하였다. 분석에 사용된 재료의 평균 및 표준편차는 표2와 같이 가정하였다.

표2. 신뢰도 분석에 사용된 재료의 평균과 표준오차

변수	단위중량 (t/m ³)		내부마찰각 (°)		긴장력 (ton)		σ_{ck} (kg/cm ²)	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
풍화암	2.0	0.36	35	4.41	47.12	9.99	210.14	25.02
distribution	lognormal		normal		lognormal		lognormal	

$b_{PL}=30\text{cm}$

분석은 그림3에 나타나 있는 해석절차에 따라 실시되었으며, 수정지압판의 사용여부에 따른 결과의 차이를 중점적으로 분석하였다.

표3. 신뢰도 해석결과 요약

분류	일반지압판 사용			수정지압판 사용			
	벽체두께 (cm)	신뢰도지수 (β)	관입전단 파괴확률 (P_f)	벽체두께 (cm)	신뢰도지수 (β)	관입전단 파괴확률 (P_f)	
수평, 수직간격	2.6	33.85	1.62	0.0527	16.93	2.71	0.0340
	2.8	34.80	1.74	0.0411	17.40	2.81	0.0250
	3.0	35.87	1.87	0.0308	17.94	2.93	0.0170
	3.2	37.08	2.01	0.0220	18.54	3.07	0.0110
최종결과	<ul style="list-style-type: none"> 최대 파괴확률 : 6% 신뢰도 : 94% 			<ul style="list-style-type: none"> 최대 파괴확률 : 4% 신뢰도 : 96% 			

분석결과, 일반지압판을 사용한 경우 신뢰도 95% 이상이라는 허용설계기준에 미달하는 것으로 나타났다. 이러한 경우 파괴확률을 낮추고 신뢰도를 높이기 위한 대책방안으로 수정지압판을 사용하면 파괴확률을 허용기준치 이내로 조정할 수 있으며 동일한 지압판의 면적을 사용할 때 일반지압판의 경우보다

수정지압판의 경우 벽체두께는 약 50%정도 벽체두께가 감소하는 현상을 나타낸다. 이는 경제적인 면과 시공속도면에서 상당한 장점으로 부각될 수 있다.

본 연구에서 제시한 상대변위에 의한 적절한 네일과 앵커사이의 간격을 결정하기 위한 목적으로 지반-구조물 관련거동 해석 프로그램인 *FLAC^{2D}*를 이용하여 수평방향 변위를 해석하였다. 본 분석에서는 복합구조체 공법에서 전면벽체를 일체로 시공하였을 경우 응력집중으로 인한 파괴에 대한 안정성에 중점을 두었다. 그 결과는 다음과 같다.

표 4 상대변위에 대한 안정성 검토결과

네일과 앵커간격 (m)	상대변위 (mm)	발휘 전단력 V(ton)	저항 전단력 V_{SF} (ton)	전체 안정성
1.3	4.47	38.25	15.10	1.3649
1.4	4.53	31.04	16.26	1.3590
1.5	4.57	25.46	17.42	1.3531
1.6	4.69	21.63	18.58	1.1924
1.7	4.82	18.54	19.74	1.1884
1.8	4.95	15.96	20.91	1.1843

분석결과 표 4는 상대변위에 대한 안정성은 1.7m이상 네일과 앵커사이가 이격되어져야 하나 1.7m 이상 이격 시켰을 경우 전체안정성은 1.1884로 전체 사면에 대한 안정성이 확보되지 않음을 나타낸다. 이는 안정성의 확보를 위해 보강재의 길이 간격등을 조정하여 재 설계하여 같은 순서에 따라 재검토하여야 한다.

5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 복합적으로 설치된 보강재의 경우 앵커를 일정각도로 유지하고 네일의 각도를 변화시켰을 경우 일반적인 네일의 최적각보다 더 큰 삽입각도에서 최적각을 이룬다. 이는 최적의 삽입 각도는 서로 간섭의 효과가 있음을 나타낸다.
- 2) 앵커의 긴장력을 적용한 전면벽체의 소요두께는 상대적으로 증가하게 되지만 긴장력이 적용된 부분에 수정지압판을 사용하면 소요두께는 1/3~1/4로 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 신뢰도 해석결과, 수정지압판을 사용할 경우 파괴확률을 허용기준치 이내로 조정할 수 있으며 신뢰도를 높일 수 있다. 또한, 소요되는 전면벽체의 두께를 50%이상의 감소효과를 보였다.
- 4) 전면벽체를 같은 재료를 이용하여 시공한 경우 서로 다른 보강재간의 상이한 거동에 의해 천이영역 사이의 전면 벽체에 응력이 집중됨을 알 수 있다. 이를 감소시키기 위해서는 서로 다른 보강재의 간격을 전체적인 안정성이 확보되는 상황에서 증가시킴으로서 전면벽체의 안정성 또한 확보할 수 있다.

계속되는 연구과제로는, 기존의 지반거동 프로그램을 이용할 경우 변위해석시 많은 시간을 투자하여야 하므로 좀더 간단하면서 시간을 단축시킬 수 있는 변위예측기법에 관한 지속적인 연구와 실제 계측 결과와의 비교를 통한 확인 검증작업도 요구된다.

참고문헌

1. 김홍택, 강인규(1992), “ 보강석축의 안정해석 및 설계”, 대한토목학회논문집, 제 12권, 제 2호,pp239~253
2. 김홍택, 박준용(1997), “ Soil Nail-Rock Anchor 복합구조체 공법의 안정해석”, 대한토목학회 가을학술발표회,pp337~340
3. 김홍택, 황정순(1997), “쏘일네일링 전면벽체 해석기법의 체계화 및 최상단 네일의 한계설치깊이의 평가”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집,pp.189~196.
4. Bauer, G.E. & Mowafy, Y.M. (1986), “The behavior of reinforced earth walls under self-weight and external loading” 2nd International Symposium on Numerical Models in Geomechanics /Ghent pp.519~530.
5. Bruce, D.A. and Jewell, R.A. (1987), “Soil Nailing : Application and Practice-part2” Journal of GROUND ENGINEERING, Vol. 20, No, No.1, pp.21~33
6. French National Research Project Clouterre (1991), RECOMMENDATIONS CLOUTERRE 1991.
7. FHWA, “Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls”. Publication No. FHWA-SA-96_069, pp.63~146.
8. Hobst, L. and Zajic, S. (1982), Anchoring in Rock and Soil, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
9. Smith, G. N.(1986), Probability and Statistics in Civil Engineering, William Collins Sons & Co. Ltd, London