

지진시 Nailed-Soil 굴착벽체의 안전율과 거동특성

Behavior and Safety Factor of Nailed-Soil Excavation Wall During Earthquake

조 영 진*

곽 명 창*

최 세 휴**

Jo, Young-Jin

Kwak, Myeong-Chang

Choi, Se-Hyu

Abstract

In this study, the behavior and safety factor of a nailed-soil excavation wall during earthquake is presented. The horizontal displacement, axial force, shear force, and moment of facing of a nailed-soil excavation wall subjected to static and seismic load are analyzed using time history analysis. The safety factor based on the strength reduction technique proposed by Dawson and Roth is used to calculate the safety factor of a nailed-soil excavation wall during earthquake. The safety factor by the proposed method is verified by comparing with those by other methods.

요 지

본 연구에서는 지진시 nailed-soil 굴착벽체의 안전율과 거동특성에 대하여 제시하였다. 시간이력해석을 이용하여 정적하중과 지진하중을 받는 nailed-soil 굴착벽체 전면부의 수평변위, 축력, 전단력, 모멘트를 해석하였다. Dawson과 Roth가 제안한 전단강도 감소기법에 바탕을 둔 안전율을 지진시 nailed-soil 굴착벽체의 안전율 계산에 사용하였다. 제안된 방법에 의한 안전율을 기존의 연구에서 산정된 안전율과 비교하여 그 타당성을 확인하였다.

Keywords : nailed-soil excavation wall, safety factor, seismic behavior

핵심 용어 : 쏘일네일링 굴착벽체, 안전율, 지진거동

* 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 박사과정

** 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 조교수, 교신저자

E-mail : shchoi@knu.ac.kr 053-950-7582

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

지반공학 분야에서는 기초의 지내력, 사면활동, 구조물의 토압 및 지하구조물의 안정 등에 발생하는 문제점을 해결하기 위한 여러 가지 보강공법이 사용되고 있다. 쏘일네일링은 붕괴의 위험이 큰 자연사면이나 굴착에 의한 인공사면의 안정성을 향상시키는 공법으로 보강재(주로 보강철근, 네일)를 이용하여 지반의 전단 및 인장강도를 증가시킴으로써 사면의 안정성을 확보하는 방법으로 그 이용성이 확대되고 있다.

쏘일네일링 구조물에 관한 대표적인 안정 해석법에는 현재 한계평형이론에 근거한 Davis방법(Shen 등, 1981), 독일 방법(Stocker 등, 1979), 프랑스 방법(Schlosser, 1982)과 운동학적 한계평형이론을 추가한 운동학적 한계해석법(Juran 등, 1990) 등이 있다. 그리고 동하중을 고려한 안정해석에는 유사정적 해석과 동적해석이 있다. 유사정적해석은 추가로 작용하는 동하중을 상응되는 유사정적하중으로 대체하는 해석 방법이다. 반면 동적해석은 동하중으로 인한 가속도 성분에 의해 유발되는 지반의 관성력을 고려하고 동하중의 시간에 따른 실제 시간이력을 고려함으로써 각 시간에 따라 유발되는 응력과 변형에 대한 변화를 해석할 수 있는 방법으로 응답스펙트럼 해석법과 시간이력 해석법이 있다.

쏘일네일링에 대한 연구로 Bang 등(1990)은 G. P.S. (Generalized Plane Strain)조건을 이용한 유한요소 해석법을 사용하여 쏘일네일링 공법에 대한 해석법을 체계화하였으며, 국내에서는 1993년 쏘일네일링 공법이 지하굴착 가시철 흙막이 현장에 처음 적용된 이래, 인공신경망 이론을 이용한 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 최적설계(유한규 등, 1999)와 계거식 쏘일 네일링 공법의 설계 및 시공(강인규 등, 2000)에 대한 연구가 이루어졌다. 또한, 유한요소해석에 의한 쏘일네일링의 네일 경사각의 영향에 관한 연구(천병식 등, 2004), 가압 그라우팅 쏘일네일링의 인발저항력 증가 원인에 관한 연구(정경환, 2008) 등 적용범위를 더욱 확대하여 연구가 진행되고 있으며 국내에서의 현장 적용 사례 역시 증가하고 있다.

그러나, 기존에 제안된 설계 및 해석방법들은 실

내모형실험과 실험실실험을 바탕으로 주변지반과 보강네일 사이의 상호작용, 파괴메커니즘, 네일의 저항력 산정 등에 있어서 서로 다른 가정 및 안전율을 제시하고 있다. 또한, 쏘일네일링 공법에 대하여 지금까지 수행되어온 대부분의 연구는 주로 굴착사면에 대한 지보체계의 제공에 주안점을 두고 연구 개발되어 굴착사면에 지진과 같은 동하중이 작용하는 경우, 지진동으로 인한 전면벽체의 수평변위가 증가하여 안정성 문제가 야기될 수 있다. 그리고 nailed-soil 굴착벽체가 지진하중에 대한 저항능력이 우수함에도 불구하고 설계 및 안정해석에 관한 최근까지의 연구는 대부분 굴착 배면지반의 자중만을 고려하여 이루어졌다.

토류 구조물에서 동하중의 영향을 고려하기 위한 연구로서 이규진 등(2000)은 연약지반상에 지오그리드로 보강된 기초지반의 지지력 변화 및 동적거동을 실험을 통해 분석하였으며, 유충식(2001)은 유한요소해석을 이용하여 블록식 보강토 옹벽의 지진시 거동에 관한 매개변수 연구를 수행하였다. 김두기 등(2006)은 응답변위법을 이용해 지중구조물의 내진해석을 수행하였으며, 유충식 등(2007)은 축소모형 실험을 통해 지속하중 또는 반복하중 등 다양한 하중 이력에 대한 보강토 구조물의 장기변형 특성 메커니즘을 고찰하였다. 쏘일네일링으로 보강된 토류벽의 동적 거동의 경우 Felio 등(1990)은 원심모형실험을 통해 지진하중을 받는 쏘일네일링 구조물의 파괴메커니즘 평가에 대한 연구를 하였다. 하지만 nailed-soil 굴착벽체에 시간이력을 고려한 지진하중의 영향을 분석한 동해석과 그에 따른 굴착벽체 전체의 안정성에 관한 연구는 아직 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 nailed-soil 굴착벽체의 정해석과 시간이력을 고려한 동해석을 수행하여 전면벽체의 거동을 분석하고 안전율을 계산하였다. Nailed-soil 굴착벽체의 합리적인 설계를 위해 유한차분해석 프로그램인 FLAC2D(Itasca, 1996)를 사용하여 미국의 San Francisco Bay 지역에 설계·시공된 후 지진의 영향을 받았던 nailed-soil 굴착벽체의 구조물 해석결과와 비교하고 분석하였다.

2. 적용모델 및 안정해석법

2.1 적용모델

본 연구에서 적용한 모델은 Davis 방법에 의해 설계된 San Francisco Bay 지역의 쏘일네일링 굴착벽체 구조물로서 Fig. 1에 나타내었다. 이 구조물은 1989년에 발생한 Loma Prieta ($M_s=7.1$) 지진시 최대 수평 지반 가속도가 대략 0.1~0.2g 정도로 측정되었으며 정해석과 유사정적 해석에 의한 지진의 영향을 고려하여 Davis 방법을 이용하여 Hudson (1990)이 계산한 안전율과 미국 캘리포니아 교통국 (California Department of Transportation, Caltrans)에서 독일방법을 기초로 개발한 SNAIL 프로그램을 이용해 Vucetic 등(1998)이 계산한 안전율을 본 연구에서 제안한 방법에 의한 안전율과 비교하였다.

지진 하중으로 인한 nailed-soil 연직 굴착벽체의 거동을 관찰하기 위하여 본 연구에 적용한 동적해석 방법으로 유한차분법을 기본으로 하고 있는 FLAC2D

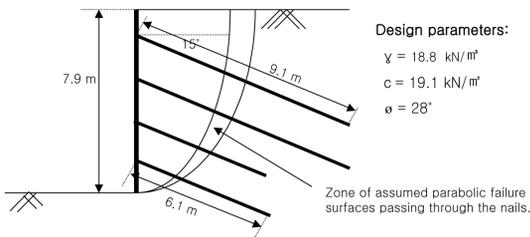


Fig. 1 Nailed-soil 굴착벽체

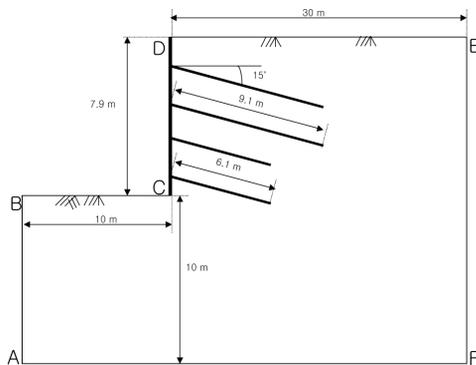


Fig. 2 해석모델

을 이용하여 지진데이터를 입력 동하중으로 사용한 동해석을 실시하였다.

FLAC2D는 지진파의 전파에 따른 굴절 및 반사에 의한 영향, 지진하중의 재하 위치 등에 대해 신뢰할 수 있는 동적거동을 파악하기 위해 하부의 지진파로부터 1차원 파진파 해석을 하여 이를 측면의 입력하중으로 가하게 된다. FLAC2D에서는 동적해석을 위한 동적 물성치로 원지반에 대한 주진동수와 감쇠비를 필요로 한다. 원지반에 대한 주진동수는 굴착전 해석 모델에 대한 자유진동해석으로 산정된 고유주기 0.23669sec의 역수로서 4.225Hz를 사용하였다. 사용된 감쇠비는 강성에 비례하는 Rayleigh 감쇠비로서 본 연구에서는 보통 흙의 경우인 5%를 사용하였다. FLAC2D의 동적해석에서 원지반에 대한 주진동수와 감쇠비는 전체 해석모델에 일률적으로 적용하였으며 경계조건은 free field boundary로 설정하였다. 적용한 해석모델을 Fig. 2에 나타내었다.

Nailed-soil 굴착벽체를 FLAC2D의 유한차분망을 80×43 (mesh)크기로 사용하였으며 각각의 대표 좌표와 grid point는 Table 1에 나타내었다. Nailed-soil 굴착벽체의 네일은 케이블 요소로 모델링 하였으며, 쇼크리트는 빔 요소로 모델링 하였다. Nailed-soil 굴착벽체의 쇼크리트 전면벽체 두께는 20cm로 설정하였다. 또한, 본 연구에서 적용된 토질, nail 및 shotcrete의 물성치를 Table 2 및 Table 3에 나타내었다.

시간이력을 고려한 지진동의 영향을 고려하기 위하여 정해석과 동해석으로 얻어진 쏘일네일링 연직 굴착벽체의 거동을 비교·분석하였다. 전단강도감소 기법을 이용하여 nailed-soil 연직 굴착벽체에 대한 안전율을 계산하고 Hudson(1990) 및 Vucetic 등(1998)의 결과와 비교하였다.

Table 1 Nailed-soil 연직 굴착벽체의 좌표

Point	A	B	C	D	E	F
좌표	X(m)	0	0	10	10	40
	Y(m)	-17.9	-7.9	-7.9	0	0
Grid Point	i	1	1	21	21	81
	j	1	21	21	44	44

Table 2 해석에 사용된 지반 물성치

In-situ soil	Friction angle(°)	Cohesion (kPa)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio (ν)	Unit weight (kN/m ³)
	28	19.1	127.53	0.3	18.8

Table 3 Nail과 Shotcrete 물성치

	E (GPa)	A(m)	Unit weight (kN/m ³)	Horizontal spacing (m)	Vertical spacing (m)	Yield strength (Pa)
Nail	200	4.91×10 ⁻⁴	78.5	1.8	1.8	1.09
Shotcrete	24.5	0.2	24		-	

2.2 안정해석법

본 연구에서 사용한 유한차분해석 프로그램인 FLAC2D에서의 직접적인 안전율을 산정하기 위하여 Dawson와 Roth(1999)이 제안한 전단강도 감소기법을 사용하였다. 전단강도 감소기법은 지반의 강도정수(c , $\tan\phi$)를 서서히 감소시켜 가면서 사면의 파괴상태까지 반복하면서 해석을 수행하여 계산이 수렴되지 않는 시점을 파괴로 간주하고, 그 때의 최대 강도 저하율을 가지고 사면의 안전율을 계산하는 기법이다. 이는 사면, 독, 제방 등에 있어서 '파괴를 막을 수 있는 최소 전단강도와 실제 지반의 전단강도와의 비'라는 것에 착안하여 안전율은 실제 물질과 가상의 물질, 혹은 실제 지반의 강도와 사면이 붕괴될 때의 가상 지반 강도와의 비를 비교함으로써 구할 수 있다. 따라서 안전율은 지반의 실제 전단강도를 파괴가 일어나는 시점에서의 강도로 줄이기 위하여 나눈 값이라고 할 수 있다.

굴착벽체 해석에서 전단강도 감소기법을 사용하려면 실제 지반의 강도정수를 시험 안전율(trial factors of safety : F_s^{trial})로 나누어 일련의 해석을 반복 수행하여야 한다. 이때 시험 안전율과 감소된 지반 물성치와의 관계는 식(1)과 식(2)와 같다.

$$c^{trial} = \frac{c}{F_s^{trial}} \quad (1)$$

$$\phi^{trial} = \tan^{-1}\left(\tan\frac{\phi}{F_s^{trial}}\right) \quad (2)$$

FLAC2D에서는 모델의 해석에 있어서 평형상태에

도달하는지 또는 그렇지 않는지를 결정하기 위한 수렴 조건은 모델 각 지점의 최대 불평형력(Maximum nodal unbalanced force)이 좌우한다. 불평형력은 정해석에서 모델의 역학적 평형이나 소성흐름 상태임을 가리키는 지표로서 해석모델은 각 그리드 포인트의 절점력 벡터의 전체 값이 수치 해석상 최대 불평형력이 아주 작을 때 해석모델은 평형 상태라고 할 수 있다. 보통 지반 안정시의 최초 1step에 대한 최대 불평형력의 0.01%의 최대 불평형력이 될 때 모델은 안정화된 평형 상태로 프로그램에서 간주된다.

Dawson과 Roth는 FLAC2D의 정확한 수렴 조건을 위해 수치요소내의 절점에 작용하는 불평형력을 요소의 물체력(gravitational body force)에 의해 나누어진 정규화된 불평형력(Normalized unbalanced force)을 사용한다. 따라서, 수치해석에서 불평형력은 낮은 한계치가 선택되어야 한다. 많은 수치해석 결과를 통해 정규화된 불평형력(Normalized unbalanced force)이 요소내 모든 절점에서 0.001보다 작은 값을 가져야만 안정화된 평형 상태에 있다고 간주될 수 있음을 증명하였다(Dawson and Roth, 1999).

3. 단계별 굴착과정을 고려한 정해석

본 연구에서는 단계별 굴착과정을 고려하여 정해석을 실시하였으며 5단계에 걸쳐 평균 1.75m 간격으로 굴착하였다. 굴착된 전면벽체는 쇼크리트 처리를 하였으며 9.1m의 네일 두 개를 먼저 설치하고, 6.1m의 짧은 네일 두 개를 아래에 설치한 후 그라우팅처리를 하였다. 해석모델의 mesh가 일정한 크기로 한정되어 있기 때문에 양 측면 경계는 수평방

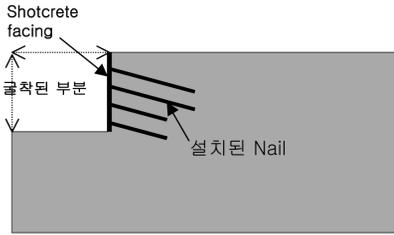


Fig. 3 Nailed-soil 굴착벽체

향으로, 맨 아래 경계는 수직방향으로 고정하였다. 최종 굴착 후 완성된 해석모델은 Fig. 3과 같다.

3.1 전면벽체 수평변위

전면벽체의 수평변위에 대한 해석결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 최상단부에서 1.382cm로 가장 큰 수평변위를 보였으며 굴착 최하단부도 미소한 수평이동이 되었음을 알 수 있다.

Nailed-soil 굴착벽체에 대한 전면벽체의 최상단부 수평변위에 대한 허용기준으로 굴착 깊이의 $0.001H \sim 0.004H$ 정도로 정하고 있다. 7.9m에 대한 벽체 최상단부의 허용수평변위는 0.79 ~ 3.16cm 로서 정 해석 결과인 1.382cm는 비교적 작은 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 정해석 후 최대 전단변형이 발생하는 영역을 나타낸 것으로 영구변형으로 인한 파괴 가능성이 큰 부분을 의미한다. 연직 굴착벽체에 대한 파괴 양상이 네 개의 네일 영역 밖 혹은 일부를 지나는 형태가 아니라 네일 모두 지나가는 형태를 보이고 있으며, 최종적으로 굴착면의 선단부를 지나는 파괴면이 형성되고 있는 모습을 볼 수 있다. 부분적으로 인장 균열이 보이고 있으며 아직까지 벽체 전체에 걸쳐 나타나지 않았고 불평형력이 아직 수렴상태에 있기 때문에 파괴상태가 아님을 알 수 있다.

3.2 안전율

본 연구에서는 Dawson과 Roth가 제안한 수치적 안전율 계산방법을 바탕으로 FLAC2D FISH문을 이용하여 적용 해석모델에 대한 안전율을 계산하였다.

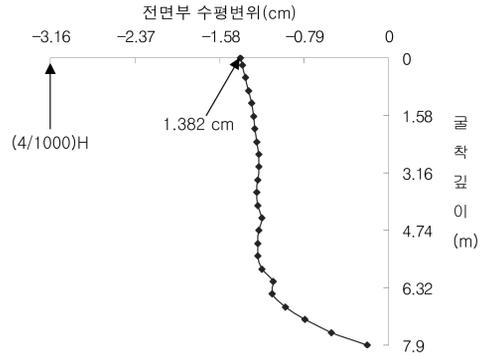


Fig. 4 전면부 수평변위

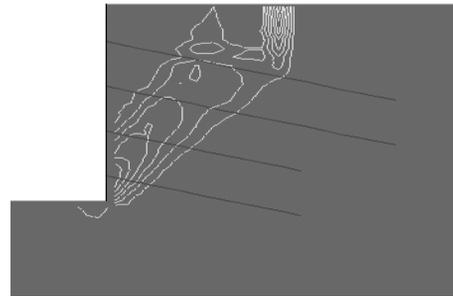


Fig. 5 최대 전단변형



Fig. 6 Trial factor of safety

Fig. 6은 전단강도 감소기법을 사용하여 이분법에 따라 시험안전율 값을 감소시키면서 정규화된 불평형력을 그래프로 나타낸 것이다. 반복적인 해석을 수행하면서 수렴되지 않고 기울기가 급격히 바뀌는 지점의 시험 안전율 값이 해석모델의 최소 안전율로 판정하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 안전율이 1.63까지는 0.001보다 작은 값에 수렴하다가 1.63을 넘어서는

Table 4 정해석 안전율

구분	본 연구결과	Hudson(1990)	Vucetic 등(1998)
안전율	1.63	1.19	1.64

순간 더 이상 수렴하지 않고 기울기가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 즉, nailed-soil 연직 굴착벽체의 안전율이 1.63임을 알 수 있었다. Table 4에서 보는 바와 같이 본 연구에서 계산된 안전율 1.63은 Vucetic 등(1998)이 계산한 안전율 1.64와 비교하여 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

4. 시간이력을 고려한 지진해석

4.1 시간이력에 대한 지진해석

본 연구에서는 nailed-soil 굴착벽체에 대하여 시간이력을 고려한 지진해석을 수행하였다. 지진해석에

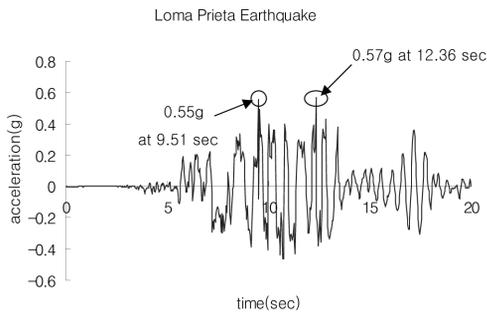


Fig. 7 Loma Prieta 지진 (1989)

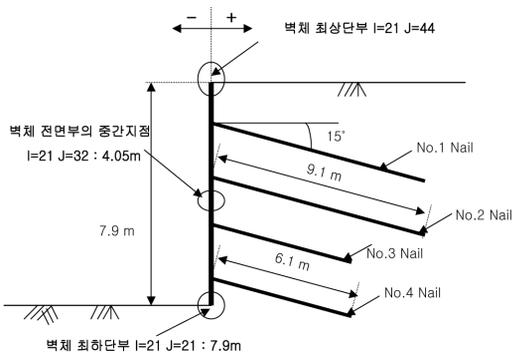


Fig. 8 지진해석 관측지점 및 네일위치

선 19.98초 동안 최대 수평지반 가속도가 0.57g인 Loma Prieta 지진의 남북 방향 지진데이터를 사용하였으며, Fig. 7에 0.03초 간격으로 기록된 지진데이터를 나타내었다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 Loma Prieta 지진은 지진 발생 후 9.51초에 두 번째로 큰 지진 가속도 0.55g를 보이며 연속해서 2.85초 후인 12.36초에 최대 가속도 0.57g를 보였다. 본 연구에서는 지진 시 구조물에 가장 큰 영향을 주는 지진의 수평방향 성분만 고려하여 시간이력을 고려한 동적해석을 실시하였으며 벽체 상단부, 중앙부, 최하단부 각각의 변위 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 해석 결과 nailed-soil

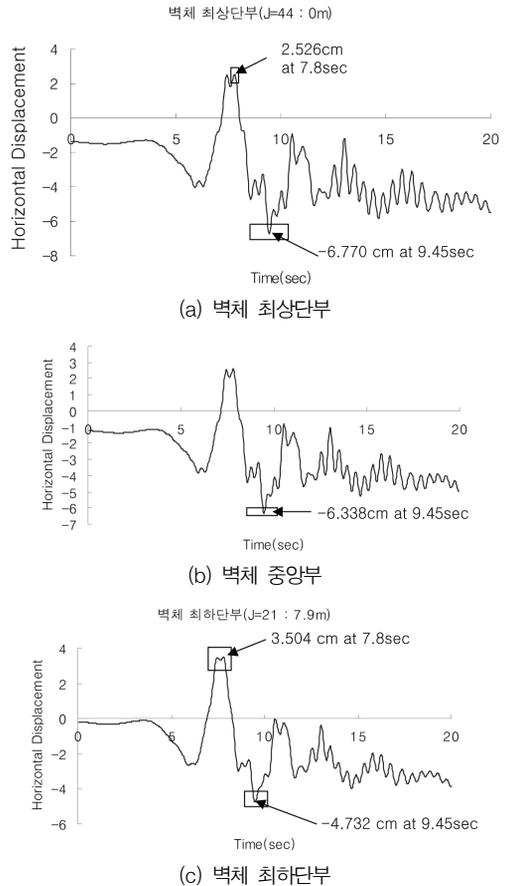


Fig. 9 시간이력에 대한 수평변위

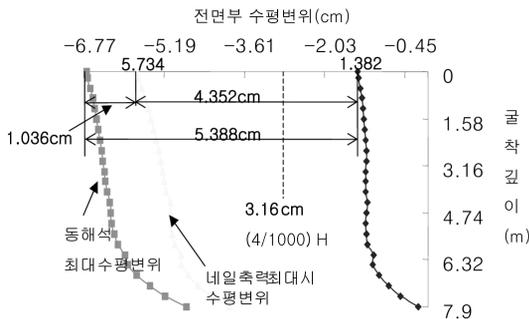


Fig. 10 전면부 수평변위

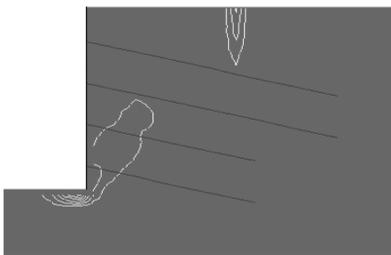


Fig. 11 지진해석 후 최대 전단변형

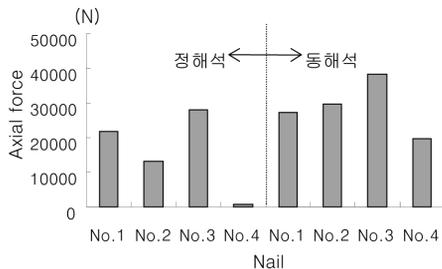


Fig. 12 네일의 축력

굴착벽체 최대변위는 최상단부에서 6.77cm로 가장 크게 나타났다. Fig. 10은 지진동으로 인한 네일의 최대 축력이 발휘되는 지점에서의 전면부에 발생하는 수평변위의 변화 양상을 정해석 및 동해석 최대 수평변위와 비교한 것이다. 지진동으로 인해 발생한 최대 수평변위가 네일의 최대 축력 발생 시의 최대 수평변위보다 1cm 정도 더 큰 값을 보여 주었다.

Fig. 11은 지진 진동 후 최대 전단변형 결과인데 지반 가속도의 영향을 받던 굴착벽체에서 지진동이 종결된 후 오히려 최대 전단 변형이 발생한 지점을 연결한 부분이 정해석 결과에 비해 현저히 줄어든

Table 5 지진시 안전율

구분	본 연구결과	Hudson (1990)	Vucetic 등 (1998)
안전율	1.21	0.94	1.39
지진가속도	0.19	0.2	

것을 보여준다. 이를 통해 nailed-soil 굴착벽체 구조물이 지진동에 대해 저항력이 우수하다는 사실을 알 수 있었다.

Fig. 12에 정해석 및 동해석시 네일의 축력의 변화를 나타내었다. 네일에 작용하는 축방향 인장력은 지진발생으로 인해 전면벽체 하단부에 설치된 네일에서 상대적으로 큰 증가량을 보임을 알 수 있었다. 기존 설계방법은 하단부 네일의 길이를 상대적으로 짧게 설계한다는 점에 비추어 보면, 지진발생 시 벽체 하단부 네일의 축방향 인장력 증가량이 가장 크므로 벽체 전체 혹은 국부적인 안정성에 큰 영향을 가져올 수 있음을 보여준다.

4.2 지진시 안전율

본 연구에서는 시간이력을 고려한 지진해석으로 계산된 최대 수평변위량을 정해석에서 추정하여 지진시 안전율을 계산하였다. 즉 지반의 강도정수(c , $\tan\phi$)를 서서히 감소시켜 정해석시 수평변위가 지진해석 시 발생한 최대 수평변위 6.77cm가 되도록 강도정수를 찾아 안전율을 산정하였으며 계산된 안전율을 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 보는 바와 같이 제안된 방법에 의한 지진시 안전율은 1.21로서 Vucetic 등(1998)이 계산한 안전율 1.39와 큰 차이가 나지 않았다.

5. 결론

본 연구는 nailed-soil 굴착벽체에 대하여 단계별 굴착과정을 모사한 정해석, 시간이력을 고려한 동해석을 수행하여 전면벽체의 거동을 분석하고 안전율을 계산하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 제안한 방법에 의한 정해석시 안전율은 1.63으로 Vucetic 등이 계산한 안전율 1.64와 유사한 결과를 나타내었다. 또한, 동해석시 안전율은 1.21로 Vucetic 등이 계산한 안전율 1.39와 큰 차이가 나지 않았다.

2. 본 연구에서 수행한 해석결과 전면벽체의 최상단부에서 최대 수평변위는 정해석시 1.382cm, 지진시 6.77cm를 나타내었다.

3. 네일에 작용하는 축방향 인장력은 지진발생으로 인해 전면벽체 하단부에 설치된 네일에서 상대적으로 큰 증가량을 보임을 알 수 있었다. 즉 벽체 하단부의 네일 길이가 매우 중요함을 알 수 있었다.

4. 지진발생 빈도가 증가하고 도심지 근접 시공이 증가하고 있는 시점에서 좀 더 다양한 토질 조건과 상황에서 nailed-soil 굴착벽체의 거동연구가 향후 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 강인규, 류정수, 김홍택, 박시삼, 정성필, “제거식 쏘일 네일링 공법의 설계 및 시공”, 한국지반공학회는 논문집, 16권, 3호, 2000, pp.107-118.
2. 김두기, 서형렬, 박진우, 최인정, “응답변위법을 이용한 지중구조물의 지진해석”, 한국구조물진단학회지, 제10권, 6호, 2006, pp.133-142.
3. 유충식, “유한요소해석에 의한 블록식 보강토 옹벽의 지진시 응답특성”, 한국지반공학회는논문집, 17권, 4호, 2001, pp.15-25.
4. 유충식, 김선빈, 김영훈, 한대희, “지속하중 및 반복하중 재하시 보강토 옹벽의 잔류변형 특성”, 한국지반공학회는논문집, 23권, 6호, 2007, pp.5-21.
5. 유한규, 박성원, 김홍택, 황정순, “유전자 알고리즘 및 인공신경망 이론을 이용한 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 최적설계”, 한국지반공학회는논문집, 15권, 4호, 1999, pp.113-133.
6. 이규진, 신방웅, 신웅철 “연약지반상에서 지오그리드 보강기초의 동적거동해석”, 대한토목학회논문집, 20권, 5C호, 2000, pp.393-404.
7. 정경한, “가압 그라우팅 쏘일네일링의 인발저항력 증가 원인에 관한 연구, 한국지반공학회는논문집”, 제24권 제4호, 2008, pp.101-114.
8. 천병식, 김원철, 윤창기, “유한요소해석에 의한 쏘일 네일링의 네일 경사각의 영향에 관한 연구”, 한국지

- 반공학회는논문집, 20권, 6호, 2004, pp.19-28.
9. Bang, S. and Yeon, H., “Analysis of Retaining Structures with Skew Reinforcements”, Transportation Research Record, No.1288, 1990.
10. Dawson, E.M. and Roth, W.H., “Slope Stability Analysis with FLAC in FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics(Proceedings of the International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Minneapolis, Minnesota, September 1999)”, A.A.Balkema, Rotterdam, 1999, pp.3-9.
11. Felio, G.Y., Vucetic, M., Hudson, M., Barar, P. and Chapman, R., “Performance of Soil Nailed Walls during the October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake, in Proceedings of the Forty-Third Canadian Geotechnical Conference, Quebec”, Canadian Geotechnical Society, 1990, pp.165-173.
12. Hudson, M.B., “The Effects of the Loma Prieta Earthquake on Soil-nailed Earth Retaining Structures in the San Francisco Bay area”, Civil Engineering Department, University of California, Los Angeles, M.S.thesis, 1990, p.108.
13. Itasca Consulting Group, Inc., “FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua”, Version 3.3, Vol. I, II, III, IV. 1996.
14. Juran, I., Baudrand, G., Frarrag, K. and Elias, V., “Kinematical Limit Analysis for Soil Nailed Structures”, Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.116, No.1, 1990, pp.54-73.
15. Schlosser, F., “Behavior and Design of Soil Nailing”, Symposium on Recent Developments in Ground improvement Techniques, Bangkok, 1982, pp.399-413.
16. Shen, C.K., Bang, S. and Herrmann, L.R., “Ground Movement Analysis of an Earth Support System”, Journal of the Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol.107, GT12, 1981, pp.1625-1642.
17. Stocker, M.F., Korber, G.w., Gassler, G. and Gudehus, G., “Soil nailing”, in Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement, Paris, Vol.2, 1979, pp.469-474.
18. Vucetic, M., Tufenkjian, M.R., Felio, G.Y., Barar, P. and Chapman, K.R., “Analysis of Soil-nailed Excavations Stability during the 1989 Loma Prieta Earthquake”, USGS Professional Paper 1552-D : The Loma Prieta, California, Earthquake

of October 17, 1989 Performance of the Built
Environment—earth Structures and Engineering
Characterization of Ground Motion, 1998, pp.
27-45.

(접수일자 : 2009년 7월 23일)
(1차수정일자 : 2009년 10월 6일)
(심사완료일자 : 2009년 10월 26일)