

## 한계평형해석(LEM), 유한차분법(FDM) 및 유한요소법(FEM)을 이용한 사면안정해석

### Limit Equilibrium, Finite Difference, and Finite Element Analysis of Slopes

전상수<sup>1)</sup>, Sang-Soo Jeon, 이충호<sup>2)</sup>, Choong-Ho Lee, 오미희<sup>3)</sup>, Mi-Hee Oh,  
강상욱<sup>4)</sup>, Sang-Wook Kang, Nguyen Quoc Pham<sup>5)</sup>, 김두섭<sup>3)</sup>, Doo-Seop Kim

<sup>1)</sup> 인제대학교 토목공학과 전임강사, Professor, Dept. of Civil Eng., Inje University

<sup>2)</sup> 헤인이엔씨 전무, Executive Managing Director, Hyein E&C Co. Ltd.

<sup>3)</sup> 한국도로공사 도로교통기술원 연구원, Researcher, Highway & Transportation Technology Institute, Korea Highway Corporation

<sup>4)</sup> 헤인이엔씨 대리, Assistant Manager, Hyein E&C Co. Ltd.

<sup>5)</sup> Manager, Institute for Transport Science and Technology, Vietnam

**SYNOPSIS** : Engineers have performed slope stability analyses, including Limit Equilibrium Analysis, Finite Difference Analysis and Finite Element Analysis. Each analysis results in different Factor of Safety(FS) for slopes. The comparison of FS results from these stability analyses has been carried out for various conditions, such as geometry of slopes, dry and fully saturated soils, nail and anchor reinforcements. Standard deviations of FS calculated from various slope analyses are 0.03 to 0.04 and 0.22 to 0.48 for the slopes without and with nail or anchor reinforcement, respectively. Construction of tiered concrete retaining wall in addition to nail or anchor reinforcement increases FS of 12% to 29% for fully saturated soils.

**Key words** : slope stability, limit equilibrium analysis, numerical analysis, slope reinforcement

## 1. 서 론

고속도로 건설 시 필연적으로 발생하는 사면의 거동을 간접적으로 예측하고, 보강방안을 제시하기 위한 방법으로 한계평형해석법(LEM)을 사용하고 있으며(Bishop, 1954), 또한 유한차분법(FDM) 및 유한요소법(FEM) 등의 수치해석을 이용한 방법이 널리 활용되고 있다. 이러한 사면해석은 다양한 지반정수를 활용하여 현 지반 상태를 구현하고, 적절한 보강 공법을 선택하여 사면 안정성을 검토한다. 사면의 안정화 방법으로 다양한 보강 공법이 제시되고 있으며, 여러 학자들에 의해 보강 공법에 관한 사면의 안정성 연구가 활발히 이루어지고 있다(Bawden et al, 1992; Dunham, 1976; Farmer, 1975; Freeman, 1978; Indraratna and Kaiser, 1990; Lee et al, 2000; Li and Stillborg, 1999; Luo et al, 2000; Sagaseta et al, 2001; Serrano and Olalla, 1999; Windsor, 1997; Zeng and Liang, 2002; Zornberg and Kavazanjian, 2001). 그러나 각기 다른 해석 방법에 따라 안전율의 차이를 갖는다. 따라

서 본 연구에서는 다양한 방법의 수치해석 모델을 이용하여 사면의 설계시 중요한 요인으로 작용하는 사면의 형상, 지하수 및 사면보강 공법 등이 사면의 안전율에 미치는 영향을 비교분석하고자 한다.

## 2. 수치해석 이론

한계평형해석(LEM) 프로그램인 SLOPE/W 와 TALREN을 이용하여 사면 안정성 해석을 수행하였다. 이들 프로그램은 Fellenius 또는 Bishop의 절편법 혹은 Perturbation 방법 등을 이용한 힘과 모멘트의 평형 방정식에 의해 안전율을 산정한다. 또한 유한차분법(FDM) 프로그램인 FLAC과 유한요소법(FEM) 프로그램인 SIGMA/W를 이용하여 사면 안정 해석을 수행하였다. FLAC은 항복 한계에 도달한 소성 유동을 받는 지반 및 다른 재료의 거동을 모사할 수 있다. 지반 및 다른 재료의 거동을 모사하기 위해 유한의 차분격자망과 구역으로 분할하여 다양한 형상으로 모델하며, 각 요소는 하중 또는 경계조건에 의해 선형/비선형 응력-변형률 거동을 모사한다. 지반의 응력과 변형을 해석하는 유한요소 해석 프로그램인 SIGMA/W는 해석 영역을 절점으로 결합된 유한계의 요소로 분할하여 각 요소에 대한 변형과 응력의 조건을 구할 수 있도록 강성 매트릭스를 만들고, 요소 전체에 대한 지배 방정식을 풀어 해석한다. 또한 이 프로그램은 단계하중이 작용하는 단순한 선형탄성 문제 및 복잡한 비선형 문제를 계산하며, 지반 거동 구현을 위한 선형탄성, 이방성 선형탄성, 탄성-소성(Mohr-Coulomb 파괴기준), Cam-Clay, Modified Cam-Clay 등의 구성모델을 사용한다.

다양한 해석방법을 통한 안전율을 비교하기 위해 한계평형해석방법(LEM), 유한차분법(FDM)과 유한요소법(FEM)을 이용하여 계산하였으며, 각각의 해석방법에 사용된 프로그램을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 해석방법 및 사용 프로그램

해석 방법	LEM 1	LEM 2	FDM	FEM
사용 프로그램	TALREN	SLOPE/W	FLAC	SIGMA/W

## 3. 설계시 사면 안전율에 미치는 영향 인자

### 3.1 사면 형상 영향

#### 3.1.1 사면의 형상 및 지반 물성

사면의 형상이 변화됨에 따라 사면의 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위해 그림 1에 나타난 것과 같이 1단의 경사를 1:1.0으로 고정된 후 2단의 구배 및 높이에 따라 3가지 경우로 사면의 형상을 변화시켜 해석을 실시하였고 사면의 형상에 대한 영향만을 관찰하기 위한 지반의 입력 물성은 표 2와 같다.

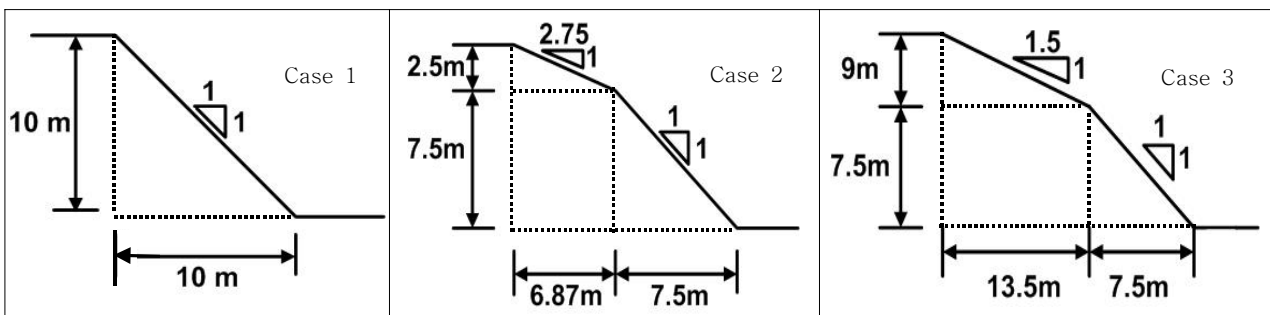


그림 1. 해석에 사용된 사면 형상

표 2. 지반 물성

단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	내부 마찰각 (°)	탄성계수 (kPa)
1.8	1.0	25	19600

### 3.1.2 해석 방법에 따른 안전을 비교

그림 2는 사면형상의 변화에 따른 건기시의 안전율을 나타내었다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 1단 범면 상단의 사면 높이가 가장 커 상재하중이 가장 크게 작용된 경우인 case 3의 안전율은 상대적으로 적은 상재하중을 가진 case 1과 case 2에 비해 약 10% 작은 안전율 값을 보인다. 동일한 사면높이에서 약 30%의 높이를 2.75:1의 낮은 경사를 구현한 경우(case 2)에 상부사면 경사가 없는 경우(case 1)에 비해 오히려 안전율이 약 40% 증가함을 알 수 있다. 그림 3에 나타나듯이 사면 안정해석방법에 따른 case 1과 case 3의 안전율 표준편차는 각각 0.05, case 2 사면은 0.03의 작은 값을 보였으며, 사면 안정해석방법에 따른 안전율은 유사한 것을 판단된다.

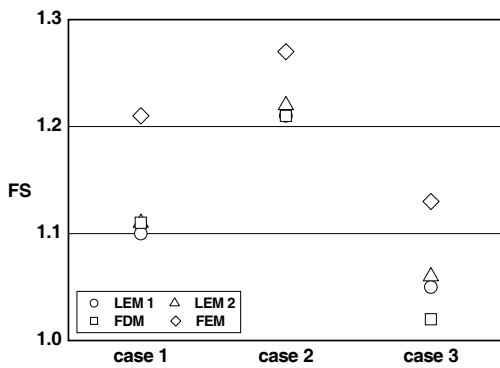


그림 2. 사면형상 변화에 따른 안전율

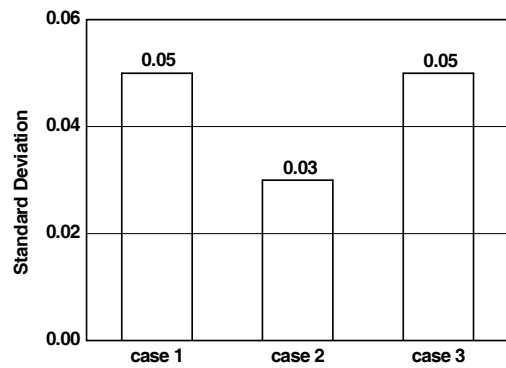
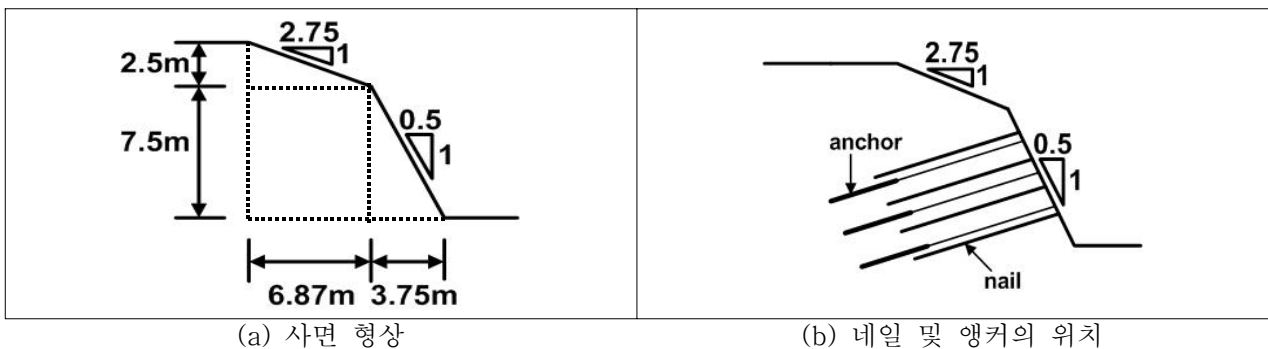


그림 3. 사면형상 변화에 따른 표준편차

## 3.2 네일 및 앵커 보강 시 지하수가 사면 안전율에 미치는 영향

### 3.2.1 사면의 형상 및 지반 물성

그림 4는 네일과 앵커보강 시 지하수의 영향을 알아보기 위해 해석에 사용된 사면의 형상 및 네일 및 앵커의 설치 위치를 나타내었다. 해석에 사용된 지반 물성을 정리하면 표 3과 같다.



(a) 사면 형상

(b) 네일 및 앵커의 위치

그림 4. 해석에 사용된 사면 형상

표 3. 지반 물성

단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	내부 마찰각 (°)	탄성계수 (kPa)
1.8	1.0	30	3000

### 3.2.2 지하수의 영향

사면의 안정성에 지하수가 미치는 영향을 알아보기 위해 지하수가 전혀 존재하지 않는 상태인 건기와 사면이 완전히 포화된 포화상태 두 경우에 대한 사면해석 결과를 표 4에 정리하였으며, 해석방법에 따른 안전율의 표준편차를 그림 5에 나타내었다. 표 4 및 그림 5에서 보는 바와 같이, 네일보강이 이루어진 경우 건기시 안전율은 1.51 ~ 2.52, 표준편차는 0.48을 보였으며, 완전 포화 상태의 안전율은 0.81 ~ 1.29, 표준편차는 0.22로 나타났다. 앵커보강의 경우는 건기 시 1.56 ~ 2.40의 안전율 분포를 보였으며, 표준편차는 0.42로 나타났다. 앵커보강이 이루어진 사면의 포화시 안전율은 0.58 ~ 1.21, 표준편차는 0.31의 분포를 보였다. 각 해석방법에 따른 네일 및 앵커로 보강된 사면의 지하수에 대한 영향으로 인한 안전율 감소율을 정리하면 그림 6과 같다. 그림 6과 같이, 네일보강이 이루어진 사면의 경우 약 46% ~ 59%의 안전율 감소를 확인할 수 있었으며, 앵커보강의 경우는 약 48% ~ 63%정도 안전율이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 안전율의 감소는 지하수에 의한 간극수압의 증가로 인해 사면의 전단응력 감소로 기인된다. 여기에서 사용된 지반형상 및 물성, 네일 및 앵커보강의 경우 사면 안정해석 방법에 따른 안전율 표준편차가 약 0.22 ~ 0.42까지 나타나 사면 설계시 각 해석방법에 따른 안전율 차이가 크음을 알 수 있다.

표 4. 건기 및 포화시의 안전율

보강	상태	LEM 1	LEM 2	FDM	FEM
네일	건기	2.52	2.34	1.51	1.74
	포화	1.29	0.96	0.81	0.82
앵커	건기	2.40	2.30	1.56	1.72
	포화	1.21	1.20	0.58	0.83

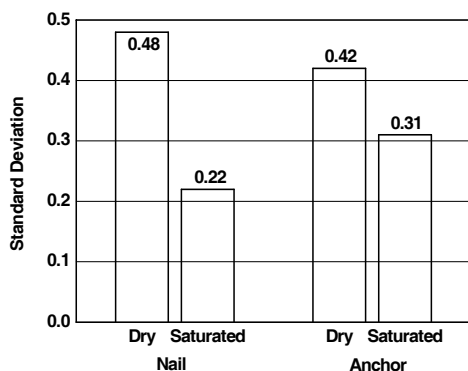


그림 5. 건기 및 포화시의 표준편차

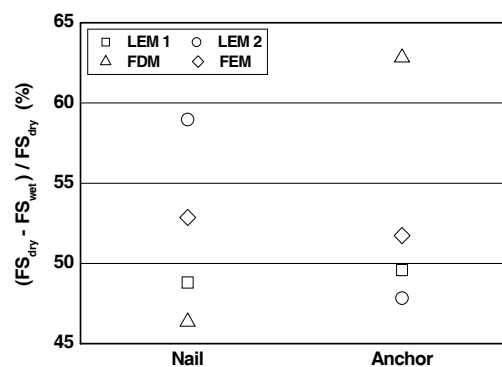
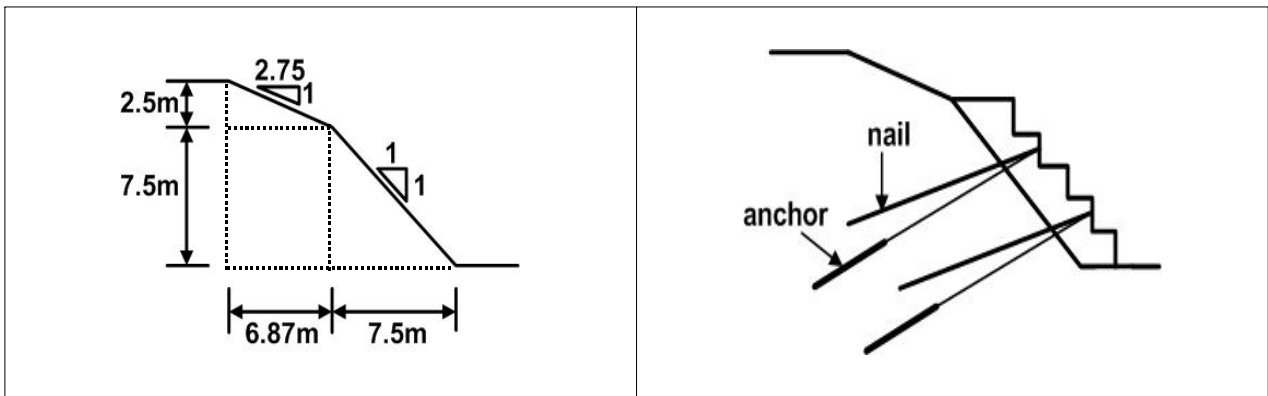


그림 6. 지하수의 영향

### 3.3 계단식 콘크리트 옹벽이 사면 안전율에 미치는 영향

#### 3.3.1 사면의 형상 및 지반 물성

그림 7.(a)는 보강공법에 따른 사면 안전율 차이를 검토하기 위해 사용된 사면의 형상을 나타낸 것이며, 그림 7.(b)는 계단식 콘크리트 옹벽의 설치 형태 및 보강재 설치 위치를 나타내었다. 계단식 콘크리트 옹벽은 하부에서 높이 1.5m, 폭 1.5m로 일정하게 설치하였으며, 계단식 콘크리트 옹벽의 최상단 폭은 1단 법면의 상부에 일치하도록 연장하여 설치하였다. 또한 두 보강재의 효과를 비교하기 위해 동일한 지점에 보강재를 설치하였다. 해석에 사용된 지반과 계단식 콘크리트 옹벽의 물성을 정리하면 표 5와 같다.



(a) 사면 형상

(b) 계단식 콘크리트 옹벽 및 보강재의 위치

그림 7. 해석에 사용된 사면 형상 (단위 : m)

표 5. 지반 및 계단식 콘크리트 옹벽 물성

구 분	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	내부 마찰각 (°)	탄성계수 (kPa)
지 반	1.8	1.0	30	3000

#### 3.3.2 네일 및 앵커보강

네일 및 앵커의 설치가 사면의 안전율에 미치는 영향을 파악하기 위해 네일 및 앵커보강을 실시한 후 사면의 포화상태 안전율을 계산하였으며, 그 결과를 그림 8에 나타냈다.

그림 8 및 그림 9에서 보는 바와 같이, 네일보강 경우의 각 해석방법에 따른 안전율은 0.91 ~ 1.02이며, 표준편차는 0.07로 나타났다. 앵커를 이용한 사면 보강의 경우는 안전율이 0.96 ~ 1.10의 범위를 보였으며, 표준편차는 0.08로 나타났다. 여기에서 사용된 지반형상 및 물성, 네일 및 앵커보강으로 인한 안전율은 사면 안정해석방법에 따라 유사함을 알 수 있다.

#### 3.3.3 계단식 콘크리트 옹벽 추가 보강 효과

사면에 네일 및 앵커보강에 추가하여 계단식 콘크리트 옹벽을 설치한 경우의 보강 효과를 알아보기 위해 그림 7.(b)와 같이 네일 및 앵커를 계단식 콘크리트 옹벽과 같이 설치한 후 해석을 실시하였다. 계

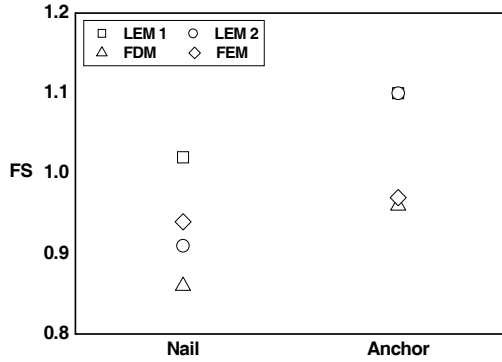


그림 8. 네일 및 앵커보강에 따른 안전율

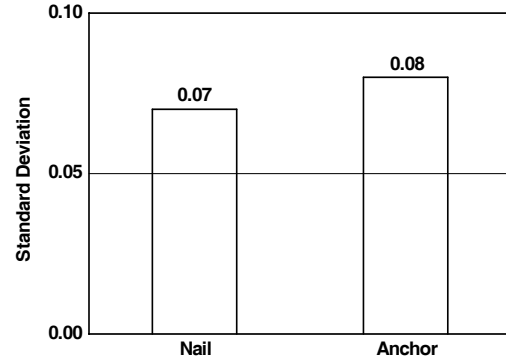
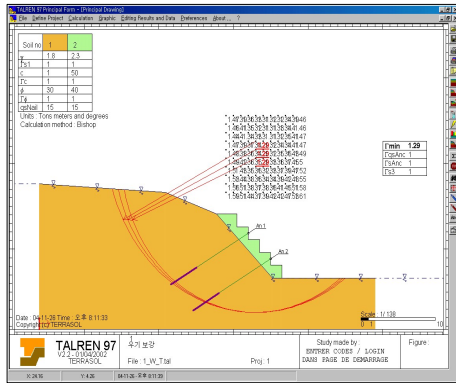
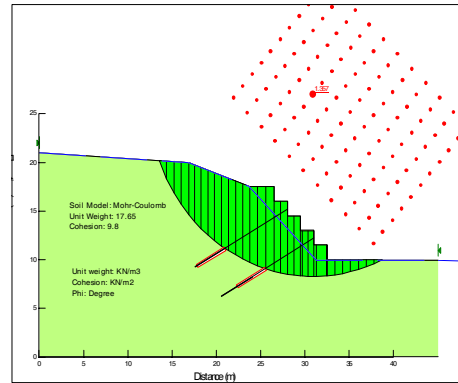


그림 9. 네일 및 앵커보강에 따른 표준편차

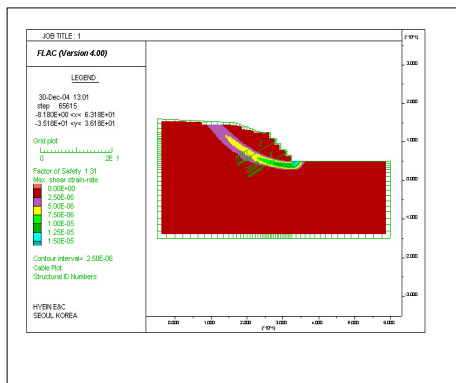
단식 콘크리트 옹벽을 추가 보강한 경우의 포화상태 사면 안전율을 표 6, 앵커에 계단식 콘크리트 옹벽을 추가한 경우의 사면파괴면을 그림 10에 정리하였다. 그림 10에서 보는 바와 같이 한계평형해석법, 유한차분법, 유한요소법에 따른 서로 다른 파괴 형상을 확인할 수 있었다.



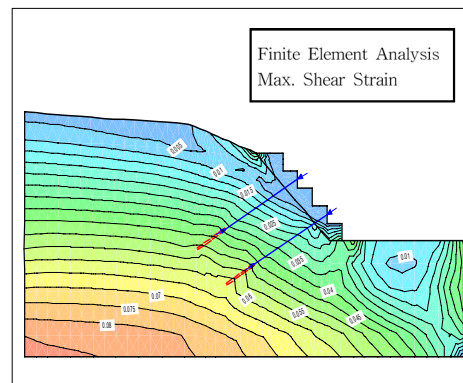
(a) LEM 1



(b) LEM 2



(c) FDM



(d) FEM

그림 10. 계단식 콘크리트 옹벽과 앵커보강 시 사면 파괴 형상

표 6 및 그림 11에서 보는 바와 같이, 네일보강 단면에 계단식 콘크리트 옹벽을 추가 보강한 경우, 각 해석방법에 따라 안전율은 1.17 ~ 1.28의 분포를 보였으며, 표준편차는 0.05의 값을 보였다. 또한 앵커 보강에 계단식 콘크리트 옹벽을 추가 보강한 경우 각 해석방법에 따라 안전율은 1.10 ~ 1.36의 분포를 보였으며, 표준편차는 0.11의 값을 보였다.

그림 9는 계단식 콘크리트 옹벽 설치 유무에 따른 사면의 안전율 증가율을 보여준다. 네일보강의 경

우, 계단식 콘크리트 옹벽을 설치함에 따라 약 13% ~ 29% 정도의 안전율 증가를 보였으며, 앵커보강 시에는 12% ~ 27% 정도의 안전율 증가를 보이는 것으로 나타났다.

표 6. 계단식 콘크리트 옹벽 설치 시의 안전율

구 분	LEM 1	LEM 2	FDM	FEM
계단식 콘크리트 옹벽 + 네일	1.17	1.28	1.17	1.17
계단식 콘크리트 옹벽 + 앵커	1.29	1.36	1.31	1.10

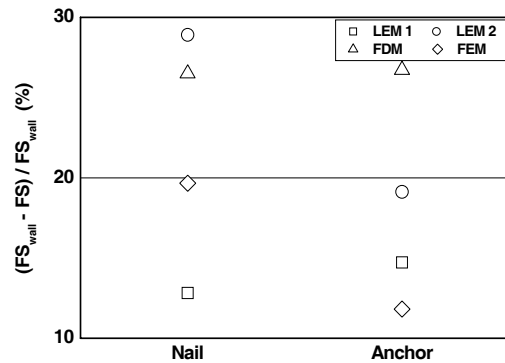
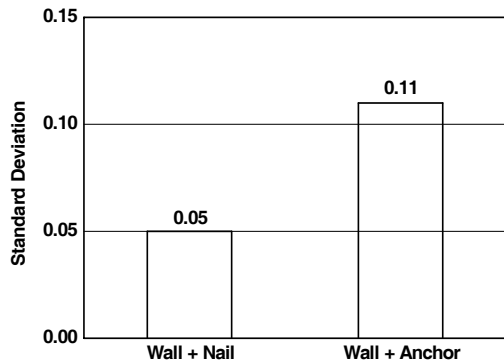


그림 11. 계단식 콘크리트 옹벽 추가시 표준편차 그림 12. 계단식 콘크리트 옹벽 설치시 안전율 증가율

#### 4. 결 론

사면의 수치해석에 꼭 필요한 요소인 사면 형상, 지하수 및 보강공법 등이 사면의 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위해 한계평형해석과 유한요소법 및 유한차분법의 수치해석 모델을 이용한 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 지반강성이 작은 사면형상을 변화시켜 안전율을 비교한 결과, 동일한 사면 높이에서 약 30%를 낮은 경사로 구현한 경우 상부 사면경사가 없는 경우에 비해 오히려 안전율이 약 40% 증가하였으며, 사면 안정해석방법에 따라 안전율이 약 0.03 ~ 0.05의 표준편차를 보여 사면안정해석방법에 따른 안전율은 유사하다.
- 2) 네일과 앵커보강 사면의 지하수 영향을 분석한 결과, 건기시에 비해 사면이 완전히 포화된 경우 해석방법에 따라 약 46% ~ 59% 및 48% ~ 63% 정도 안전율 감소를 확인할 수 있다. 또한 사면 안정해석방법에 따른 안전율 표준편차가 약 0.22 ~ 0.48까지 나타나 사면 설계시 각 해석방법에 따른 안전율 차이가 클 수 있다.
- 3) 네일보강이 이루어진 사면의 안전율은 약 0.91 ~ 1.02, 앵커보강시 안전율은 약 0.96 ~ 1.10의 분포를 보였다. 각 보강방법에 따른 표준편차는 각각 0.07, 0.08로 나타나, 이 해석에 사용된 지반형상 및 물성, 네일 및 앵커보강으로 인한 안전율은 사면 안정해석방법에 따라 유사하다.
- 4) 계단식 콘크리트 옹벽의 효과를 확인하기 위해 네일 및 앵커보강이 이루어진 사면에 계단식 콘크리트 옹벽을 추가로 설치한 경우, 계단식 콘크리트 옹벽 없이 네일 및 앵커보강의 포화시 안전율은 약 12% ~ 29%의 증가를 보였다.

## 참고문헌

1. Bawden, W. F., Hyett, A. J. and Lausch, P.(1992), "An experimental procedure for the in situ testing of cable bolts", *International journal of rock mechanics mining sciences and geomechanical*, Vol. 29, No. 5, pp.525~533.
2. Bishop, A. W.(1954), "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", *Geotechnique*, Vol. 5, pp.7~17.
3. Dunham, R. K.(1976), "Anchorage tests on strain-gauged resin bonded bolts", *Tunnels & Tunnelling*, pp.73~76.
4. Farmer, I. W.(1975), "Stress distribution along a resin grouted rock anchor", *International journal of rock mechanics mining sciences and geomechanical*, Vol. 12, pp.347~351.
5. Freeman, T. J.(1978), "The behaviour of fully-bonded rock bolts in the Kielder experimental tunnel", *Tunnels & Tunnelling*, pp.37~40.
6. Indraratna, B. and Kaiser, P. K.(1990), "Analytical model for the design of grouted rock bolts", *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol. 14, pp.227~251.
7. Lee, J. S., Bang, C. S., Mok, Y. J. and Joh, S. H.(2000), "Numerical and experimental analysis of penetration grouting in jointed rock masses", *International journal of rock mechanics and mining sciences*, Vol. 37, pp.1027~1037.
8. Li, C. and Stillborg, B.(1999), "Analytical models for rock bolts", *International journal of rock mechanics and mining sciences*, Vol. 36, pp.1013~1029.
9. Luo, S. Q., Tan, S. A. and Yong, K. Y.(2000), "Pull-out resistance mechanism of a soil nail reinforcement in dilative soils", *Soils and foundations*, Vol. 40, No. 1, pp.47~56.
10. Sagaseta, C., Sanchez, J. M. and Canizal, J.(2001), "A general analytical solution for the required anchor force in rock slopes with toppling failure", *International journal of rock mechanics and mining sciences*, Vol. 38, pp.421~435.
11. Serrano, A. and Olalla, C.(1999), "Tensile resistance of rock anchors", *International journal of rock mechanics and mining sciences*, Vol. 36, pp.449~474.
12. Windsor, C. R.(1997), "Rock reinforcement systems", *International journal of rock mechanics mining sciences*, Vol. 34, No. 6, pp.919~951.
13. Zeng, S. and Liang, R.(2002), "Stability analysis of drilled shafts reinforced slope", *Soils and foundations*, Vol. 42, No. 2, pp.93~102.
14. Zornberg, J. G. and Kavazanjian, E.(2001), "Prediction of the performance of a geogrid-reinforced slope founded on soil waste", *Soils and foundations*, Vol. 41, No.6, pp.1~16.