

유한요소해석을 통한 사면 상재하중 영향 연구

Surcharge Loading Effects on Slopes Using Finite Element Analysis

전상수¹⁾, Sang-Soo Jeon, 이충호²⁾, Choong-Ho Lee, Nguyen Quoc Pham³⁾, 오미희⁴⁾, Mi-Hee Oh, 김두섭⁴⁾, Doo-Seop Kim, 강상욱⁵⁾, Sang-Wook Kang

¹⁾ 인제대학교 토목공학과 전임강사, Professor, Dept. of Civil Eng., Inje University

²⁾ 헤인이엔씨 전무, Executive Managing Director, Hyein E&C Co. Ltd.

³⁾ Manager, Institute for Transport Science and Technology, Vietnam

⁴⁾ 한국도로공사 도로교통기술원 연구원, Researcher, Highway & Transportation Technology Institute, Korea Highway Corporation

⁵⁾ 헤인이엔씨 대리, Assistant Manager, Hyein E&C Co. Ltd.

SYNOPSIS : Slope stability analyses have been carried out to investigate surcharge loading effects. Finite Element Analysis (FEA) involves the stress-strain behaviour of soils achieving reasonably accurate and useful results of slope stability analysis. Therefore, in this study, one of well known FEA programs, SIGMA/W, has been used to do slope stability analyses with respect to various upper slope angles and surcharge loadings. Factor of Safety(FS) exponentially decreases and significantly good correlation with the increased slope angle for upper slopes. As the surcharge loading increases from 10 t/m to 90 t/m for nail-reinforced slopes, the FS in fully saturated condition decreases from 42% to 47% and from 17% to 25% for relatively low and high strength of soils, respectively, than in dry condition.

Key Words : slope stability, finite element analysis, surcharge loading

1. 서 론

사면의 거동을 예측하고 안정성에 대한 검토를 목적으로 수치해석 모델이 널리 활용되고 있다. 특히, 이러한 수치해석 모델은 토질의 응력-변형률 관계를 반영할 수 있어 보다 정확하고 유용한 결과를 도출할 수 있다. 절토사면의 안전율 계산을 통한 절토사면 설계에 널리 활용되고 있다. 절토사면의 안전성을 판단하기 위해 사용되는 수치해석에 대한 연구는 오래 전부터 여러 학자들에 의해 연구되어 왔다 (Duncan, 1996; Griffiths and Lane, 1999; Hyett et al, 1996; Liang and Zeng, 2002; Lindsay et al, 2001, Morland, 1974; Sonmez and Ulusay, 1999; Wood and Nash, 2000). 이러한 연구를 바탕으로 다양한 지반 강성 및 사면의 형상 변화와 상재하중이 사면 안전성에 미치는 영향을 검토하고자 한다. 따라서, 본 연구에서는 동일한 지반강성 조건에서 사면 형상 변화에 따른 안전율과 다양한 지반강성 조건과 건기와 포화시 상재하중에 의한 절토 사면 안전율에 미치는 영향에 대해 분석하고자 한다.

2. 유한요소 해석 프로그램

지반의 응력과 변형을 해석하는 유한요소 해석 프로그램으로 SIGMA/W를 사용하였으며 단계하중이 작용하는 단순한 선형탄성 문제 및 복잡한 비선형 문제를 전응력 또는 유효응력으로 계산하는 방식을 택하고 있다. SIGMA/W의 모형 방정식을 정리하면 식 (1)과 같다.

$$\int_V [B]^T [C][B] dv \{a\} = b \int_V \langle N \rangle^T dv + p \int_A \langle N \rangle^T dA + \{F_n\} \quad (1)$$

여기서, $[B]$: 응력-변형률 매트릭스

$[C]$: 구성방정식 매트릭스

$\{a\}$: 절점에서의 x, y 변위 증가에 대한 column 벡터

A : 요소 경계의 넓이

v : 요소의 부피

b : 단위 물체력 강도

$\langle N \rangle$: 내삽함수의 row 벡터

p : 표면의 증분 압력

$\{F_n\}$: 절점에서 증가된 하중

SIGMA/W는 증분 분석으로 방정식의 해를 구한다. 각각의 time step에서 증분 변형은 주어진 증분하중으로 계산되고 2차원 평면-변형 분석에서는 단위 두께별로 모든 요소를 고려하며 일정한 요소의 두께(t)에 대한 방정식은 식 (2)에 나타내었고 약식으로 표현하면 식(3)과 같다.

$$t \int_A [B]^T [C][B] dA \{a\} = bt \int_A \langle N \rangle^T dA + pt \int_L \langle N \rangle^T dL \quad (2)$$

$$[K] \{a\} = [F_b] + [F_s] \quad (3)$$

여기서, $[K]$: 요소의 특성(강성) 행렬

$\{a\}$: 절점의 증분 변위

$[F_b]$: 증분 물체력

$[F_s]$: 표면 경계의 증분압에 의한 힘

즉, SIGMA/W는 각각 time step 증분 변위를 유한요소 방정식을 이용하여 구하고 최종적으로 생기는 증분 응력과 변형률을 계산한다.

3. 상부사면의 영향

3.1 사면형상 및 지반 물성

사면안정 해석시 사면 형상 변화에 따른 사면 안전율 변화를 관찰하기 위해 그림 1에서 보는 바와 같이, 하부사면과 같이 상부사면 높이 10m 1단 법면의 경사를 75°와 2단 법면의 경사를 15°, 30°, 45°, 60°, 75°까지 일정한 간격으로 사면경사를 변화시켜가며 사면의 안전율을 관찰하였다. 수치해석에 사용된 지반물성은 상대적으로 지반강성이 작으며 표 1에 나타나있다.

표 1. 지반물성

| 단위중량 (t/m^3) | 점착력 (t/m^2) | 내부 마찰각 ($^\circ$) | 포와송 비 | 탄성계수 (kPa) |
|------------------|-----------------|---------------------|-------|------------|
| 1.8 | 1.0 | 25 | 0.4 | 19600 |

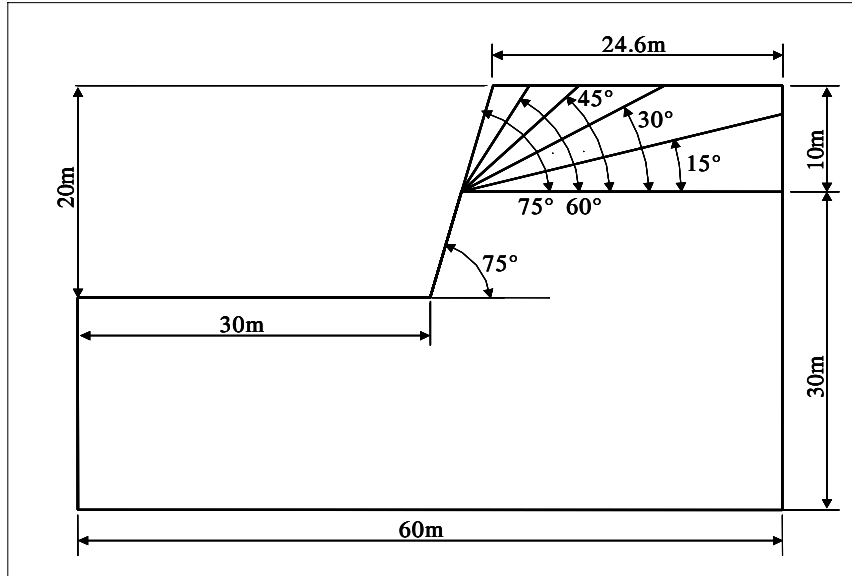


그림 1. 해석에 사용된 사면 형상 (단위 : m)

3.2 사면형상과 안전율

그림 2는 대표적으로 상부사면의 경사가 30°인 사면의 해석결과를 보여준다. 그림 3은 1단 법면의 경사를 75°와 2단 법면의 15°~75°경사 변화에 따른 사면의 안전율을 보여준다. 상부 사면의 경사와 하중의 증가에 따른 작용하중(driving force) 증가로 인하여 사면 안전율이 역지수함수 관계로 감소하며, 상부 사면각의 증가와 안전율 감소의 상관관계가 회귀분석 결과 $r^2=0.99$ 로서 통계적으로 매우 좋음을 알 수 있다.

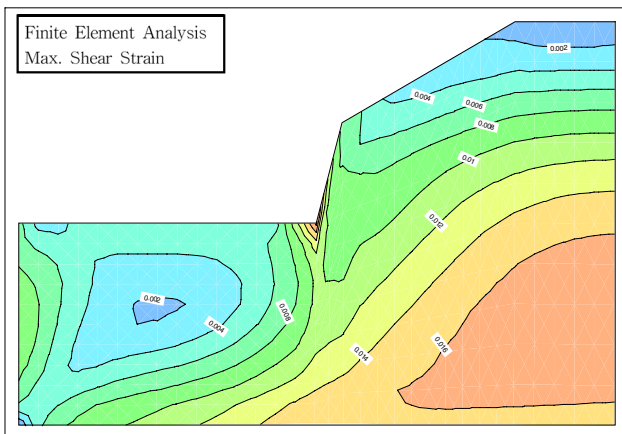


그림 2. SIGMA/W 해석결과(상부경사 30°)

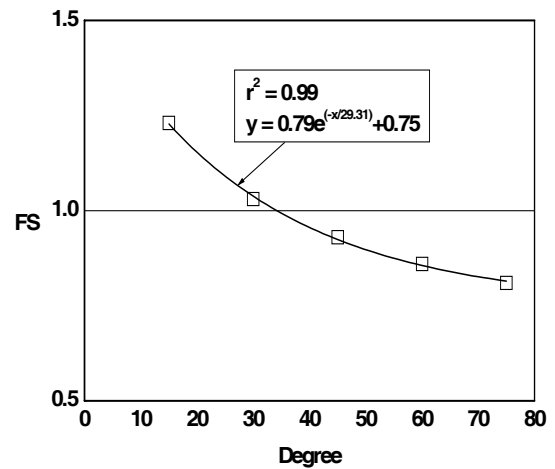


그림 3. 사면형상 변화에 따른 안전율

4. 지반 강성 및 상재하중 영향

4.1 지반물성과 상재하중

지반 강성과 상재하중이 사면 안전율에 미치는 영향을 분석하기 위해 동일한 사면 형상에 대해 수치 해석을 실시하였으며, 해석에 사용된 지반의 물성과 단면의 형상을 각각 표 2와 그림 4에 나타내었다.

표 2. 해석에 사용된 지반 정수

| 구분 | 지 층 | 단위중량(t/m ³) | 점착력(t/m ²) | 내부 마찰각(°) | 탄성계수(kPa) | 포와송 비 |
|----|--------|-------------------------|------------------------|-----------|-----------|-------|
| C1 | 매 립 토 | 1.70 | 0.0 | 25 | 1,000 | 0.40 |
| C2 | 퇴 적 층 | 1.80 | 0.0 | 26 | 1,000 | 0.33 |
| C3 | 풍화잔류토 | 1.90 | 0.0 | 30 | 6,000 | 0.30 |
| C4 | 풍 화 암 | 2.20 | 2.5 | 24 | 14,000 | 0.30 |
| C5 | 연 암 | 2.20 | 5.0 | 24 | 25,000 | 0.25 |
| C6 | 보 통 암 | 2.40 | 6.0 | 26 | 100,000 | 0.25 |
| C7 | 경 암 I | 2.50 | 7.7 | 35 | 200,000 | 0.25 |
| C8 | 경 암 II | 2.50 | 8.2 | 34 | 300,000 | 0.20 |

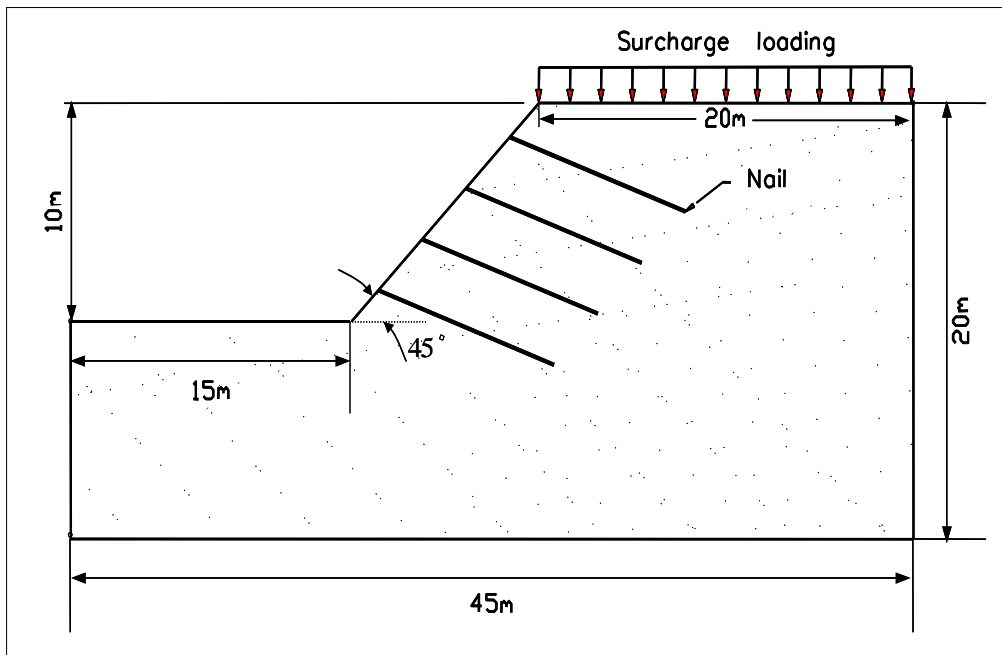
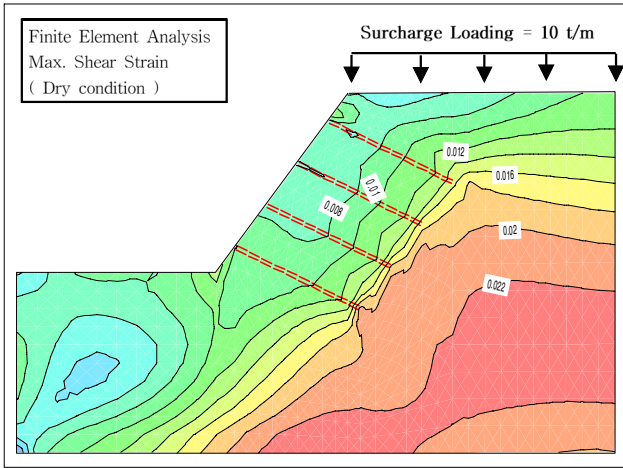


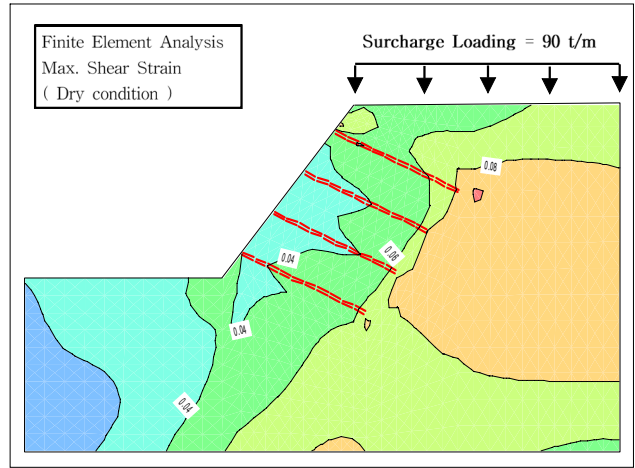
그림 4. 해석에 사용된 사면 형상

4.2 상재하중 영향

상재하중이 사면의 안전율에 미치는 영향을 알아보기 위해 상재하중을 10t/m ~ 90t/m까지 일정한 간격으로 증가시켜 수치해석을 실시하였다. 상재하중 변화에 따른 해석결과는 그림 5와 같고, 상대적으로 지반의 강성이 작은 경우와 큰 경우에 대해 정리하면 그림 6과 같다.



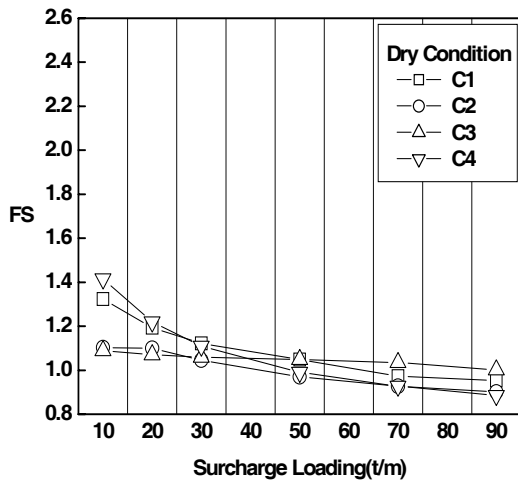
(a) 상재하중 10 t/m



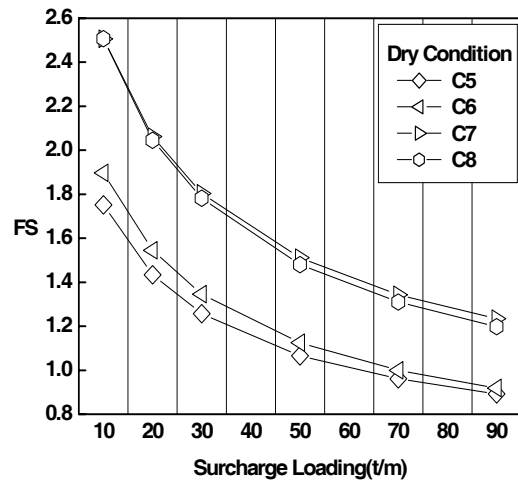
(b) 상재하중 90 t/m

그림 5. 건기시 상재하중 변화에 따른 해석결과

그림 5에서 보는 바와 같이 상재하중의 증가로 인한 큰 파괴면 형상을 알 수 있고, 그림 6에서는 상재하중이 증가함에 따라 사면의 안전율은 감소하는 경향을 보인다. 또한 지반강성에 따라 상재하중이 사면의 안정성에 미치는 영향을 확인할 수 있고 그림 6.(a)에서처럼 지반강성이 상대적으로 적은 경우, 사면의 안전율 감소가 그림 6.(b)의 지반 강성이 큰 경우에 비해 작은 것으로 나타났다.



(a) 지반 강성이 작은 경우



(b) 지반 강성이 큰 경우

그림 6. 상재하중 변화에 따른 안전율

지반강성의 차이에 의한 사면의 안전율 분포를 알아보기 위해 상대적으로 지반강성의 차이가 큰 C1 과 C8에 대해 상재하중 변화에 따른 사면의 안전율을 그림 7과 같이 정리하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이, 10t/m로 상대적으로 작은 상재하중이 작용한 경우 사면의 안전율 변화가 크게 나타났으며, 상재하중이 증가함에 따라 안전율 변화 폭이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 안전율 감소를 상재하중에 대한 분포로 정리하면 그림 8과 같다. 상재하중이 증가함에 따라 지반강성 차이에 의한 사면 안전율 차이는 감소하며, 상재하중에 따른 사면 안전율 차이의 회귀분석 결과 $r^2 = 0.99$ 로 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

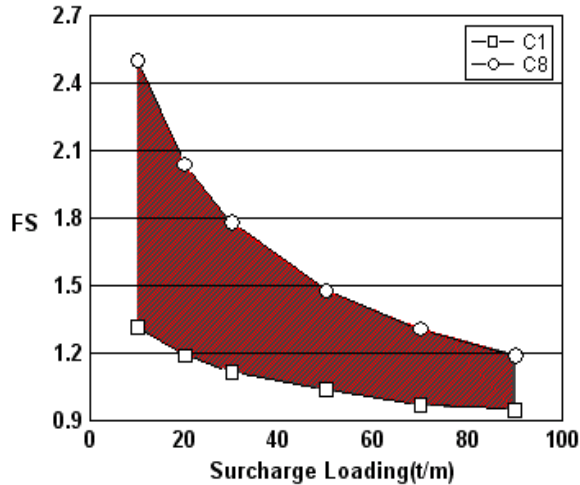


그림 7. 지반강성에 따른 상재하중과 안전율의 상관관계

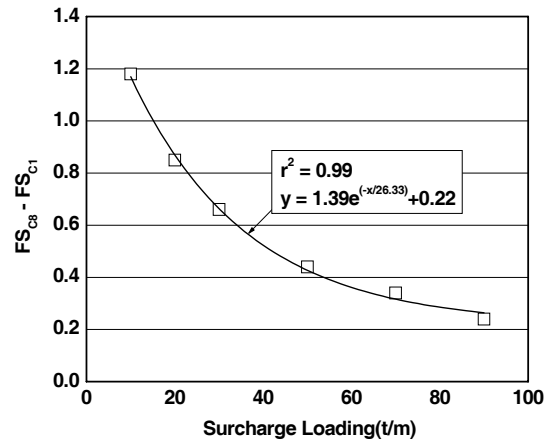
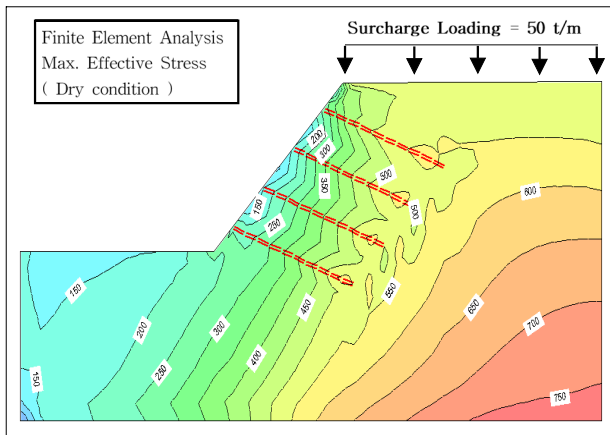


그림 8. 안전율 감소폭과 상재하중

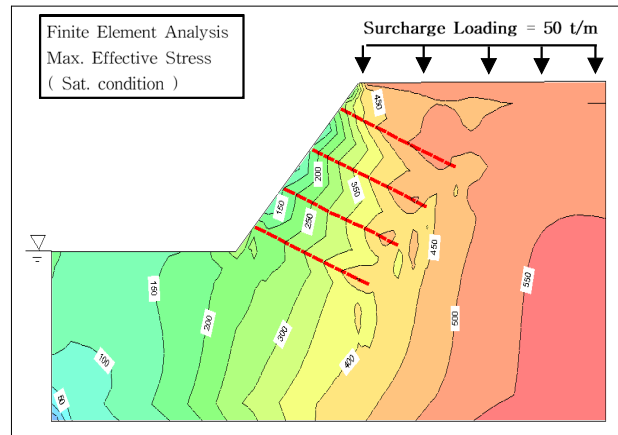
4.3 지하수 영향

지하수의 영향을 알아보기 위해 상재하중을 10t/m ~ 90t/m까지 변화시켜 다양한 지반물성에서 건기시와 포화시의 안전율을 해석하였다. 그림 9는 대표적으로 상재하중이 50t/m일 때, 건기시와 포화시의 해석결과를 나타내며, 결과를 정리하면 그림 10과 같다. 건기시 안전율이 0.89 ~ 2.51 포화시는 0.70 ~ 2.07로서 포화시 건기시보다 약 20% 정도 감소함을 알 수 있다.

그림 11은 상재하중에 따른 사면의 안전율 변화를 보여준다. 그림 11에서 보는 바와 같이 상재하중이 상대적으로 작은 10t/m ~ 30t/m 경우, 건기에 비해 포화시 약 14% ~ 47%의 안전율 감소율을 보였으며, 상재하중이 50t/m ~ 90t/m인 경우는 약 8% ~ 23%의 안전율 감소율을 보여준다. 안전율 감소율 폭이 상재하중이 큰 경우보다 작은 경우에 높음을 보여준다.



(a) 건기시(상재하중 50 t/m)



(b) 포화시(상재하중 50 t/m)

그림 9. 건기시와 포화시 해석결과

5. 결 론

다양한 지반특성과 건기와 포화시 사면상부의 형상 변화(사면각)와 상부에 다양한 상재하중에 의한 사면 안정해석을 유한요소 해석 프로그램의 하나인 SIGMA/W를 이용한 수치해석을 수행하였다. 수치해

석 결과 사면의 안정성에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

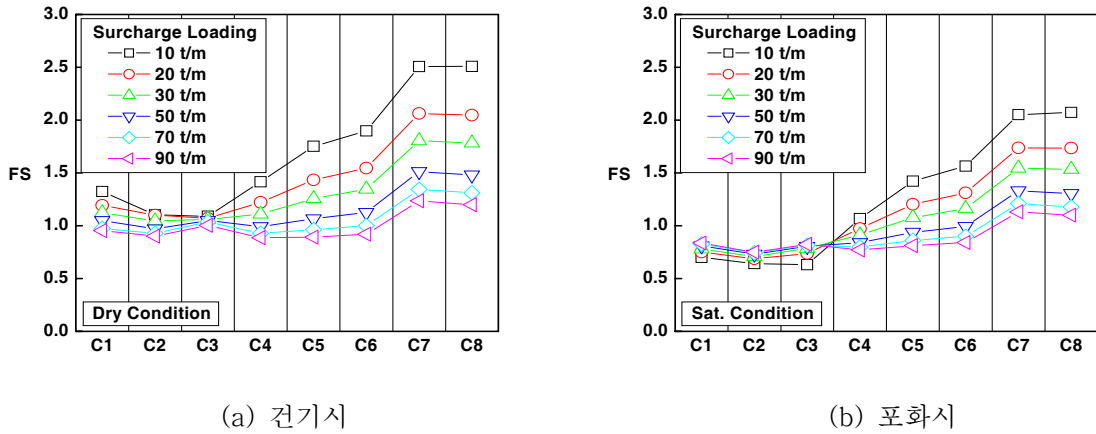


그림 10. 건기시와 포화시의 안전율 비교

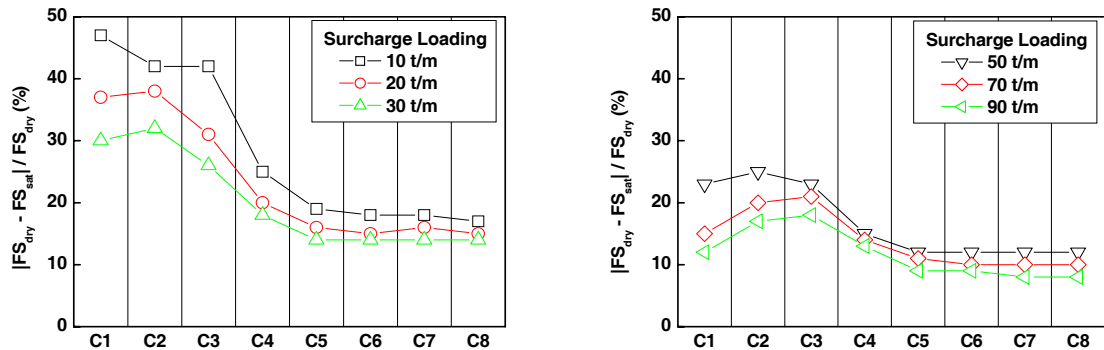


그림 11. 포화시 안전율 감소율

- (1) 사면의 1단 범면 경사를 75°, 상부 사면의 높이를 하부사면 높이와 같은 10m, 경사를 15°, 30°, 45°, 60°, 75°로 변화시켜 수치해석을 실시한 경우, 상부 사면의 경사와 하중의 증가에 따른 작용 하중(driving force) 증가로 인하여 사면 안전율이 역지수함수 관계로 감소하며, 상부 사면각의 증가와 안전율 감소의 상관관계가 회귀분석 결과 $r^2=0.99$ 로서 통계적으로 매우 좋음을 알 수 있다.
- (2) 10t/m로 상대적으로 작은 상재하중이 작용한 경우 사면의 안전율 변화가 크게 나타났으며, 상재하중이 증가함에 따라 안전율 변화 폭이 감소하는 것으로 나타났다. 상재하중이 증가함에 따라 지반 강성 차이에 의한 사면 안전율 차이는 감소하며, 상재하중에 따른 사면 안전율 차이의 회귀분석 결과 $r^2 = 0.99$ 로 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.
- (3) 상재하중이 상대적으로 작은 10t/m ~ 30t/m 경우, 건기에 비해 포화시 약 14% ~ 47%의 안전율 감소율을 보였으며, 상재하중이 50t/m ~ 90t/m인 경우는 약 8% ~ 23%의 안전율 감소율을 보여 준다. 안전율 감소율 폭이 상재하중이 큰 경우보다 작은 경우에 높음을 보여준다.

참고문헌

1. Duncan, J. M. (1996), " State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes", *Journal of geotechnical engineering*, pp.577~596.
2. Griffiths, D. V. and Lane P. A. (1999), "Slope Stability analysis by finite elements", *Geotechnique*, Vol. 49, No. 3, pp.387~403.
3. Hyett, A. J., Moosavi, M. and Bawden, W. F. (1996), "Load distribution along fully grouted bolts, with emphasis on cable bolts reinforcement", *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol. 20, pp.517~544.
4. Liang, R. and Zeng, S. (2002), "Numerical study of soil arching mechanism in drilled shafts for slope stabilization", *Soils and foundations*, Vol. 42, No. 2, pp.83~92.
5. Lindsay, P., Campbell, R. N., Fergusson, D. A., Grillard, G. R. and Moore, T. A. (2001), "Slope stability probability classification, Waikato coal measures, New Zealand", *International journal of coal geology*, Vol. 45, pp.127~145.
6. Morland, L. W. (1974), "Continuum model of regularly jointed mediums", *Journal of geophysical research*, Vol. 79, No. 2, pp.357~362.
7. Sonmez, H. and Ulusay, R. (1999), "Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes", *International journal of rock mechanics mining sciences*, Vol. 36, pp.743~760.
8. Wood, d. M. and Nash, D. (2000), "Earth pressures on an integral bridge abutment: a numerical case study", *Soils and foundations*, Vol. 40, No. 6, pp.23~38.