

배면침투를 고려한 사면안정해석

Stability Analysis of Slope Considering Infiltration of Behind Ground

신중호¹⁾, Jong-ho Shin, 김학문²⁾, Hak-moon Kim, 장경준³⁾, Kyung-jun, Jang, 채성은⁴⁾, Sung-eun, Chae

¹⁾ 건국대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Konkuk University

²⁾ 단국대학교 토목환경공학과, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook University

³⁾ 단국대학교 토목환경공학과, Graduate Course, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook University

⁴⁾ 건국대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Konkuk University

SYNOPSIS : Previous research on the slope failure has mainly reported that most of the slope failures occur due to surface rainfall infiltration in the rainy season. A slope of which surface is protected by shotcrete or plants, can also fail due to increase in pore water pressure from the ground water flow beneath the surface, rather than from the surface. In this study such case of slope behavior is investigated using the model test and numerical method including strength reduction method. Hydraulic boundary conditions of the slopes is considered using coupled numerical scheme. The failure mechanism of the slope is investigated and the effect of pore water pressure on slope safety is identified. Increase in pore water pressure due to lateral infiltration has significantly reduced the stability of slope.

Keywords : slope stability, infiltration, coupled finite element analysis

1. 서론

기존 연구에 따르면 대부분의 사면붕괴가 우기에 강우침투에 의하여 발생하는 것으로 보고되고 있다. 강우침투에 따른 수위증가로 인한 사면 내의 수압작용은 사면의 붕괴와 매우 밀접한 상관성이 있음을 알 수 있다. 본 연구는 지표침투가 아닌 배면 수압증가 혹은 배면침투에 따른 사면 파괴메카니즘 및 안전율 변화를 조사하였다. 일반적으로 사면해석은 한계평형법에 의해 수행되고 있지만, 이 방법은 사면에 시간에 따른 안전율을 평가하기 어려울 뿐 아니라, 다양한 수리경계조건을 고려하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서, 사면의 안정성 평가는 다양한 지반의 특성을 포함할 수 있어야 하며, 시간에 따른 사면 내의 수압작용을 고려할 수 있는 시간 의존적 해석이 필요하다. 본 연구에서는 시간의존적 거동을 고려하는 수치해석(coupled numerical analysis)과 강도감소법을 이용한 사면안정평가 개념을 제시하기 위하여 배면 침투로 인한 사면실험결과를 역해석적 방법으로 모사함으로써, 시간 변화에 따른 시간의존적 거동이 지배적인 사면의 안정평가 시 연계해석이 평가도구로 사용될 수 있음을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 배면침투로 인한 사면파괴메카니즘을 파악하기 위한 모형시험을 수행하였고, 이를 수치해석적으로 모사함으로써, 수치해석적 재현가능성을 입증하고자 하였다.

2. 모형시험

자연사면이 아닌 보수 및 보강이 완료된 기존사면에서는 강우를 통한 지표침투보다 사면 내에서 발생

하는 배면침투로 인한 사면의 안정성 평가가 이루어져야한다. 따라서 본 연구에서는 지표강우의 영향을 고려한 모형시험이 아닌 사면 배면침투를 재현하여 사면의 안정성을 평가하는 시험을 수행하였다.

2.1 모형 개요

사면모형시험 토조의 규격은 길이 약 2.9m, 전면 1.3m, 후면 1.8m, 폭 0.3m의 크기를 가지고 있다. 토조는 사면모형토조, 배면침투장치, 벽체모형 Plate, 벽체지지장치, Tank부 및 계측기기로 구성되어 있다. 모형토조의 사면은 균질한 주문진 표준사로 제작하였으며, 급수 Tank에서 토조 배면으로 물의 침투가 이루어지고 사면의 경사도 및 아크릴 벽체의 배수상태에 따라 각각의 침투거동이 모형화 될 수 있게 하였다.

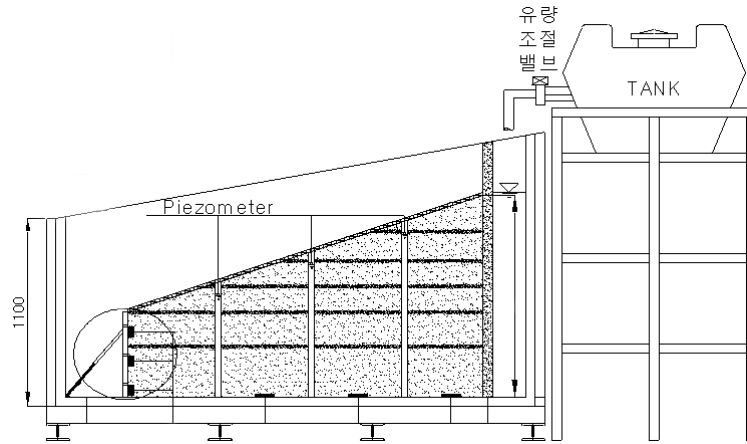


그림 1. 시험장치 개요도

2.2 모형 시험 결과

모형시험은 사면의 경사 및 옹벽의 높이, 배수조건 등의 경계조건을 변화하여 시험을 수행하였다. 순서는 벽체모형의 설치, 계측기기의 설치, 지반조성, 사면경사도 조절, 배면침투, 사면내부 파괴메커니즘 구현의 단계로 수행하였다. 그림2는 저부 폭 1.1m 옹벽높이 0.2m, 경사30°의 실험결과를 나타낸 것으로 배면 침투수의 표면유출로 인한 사면의 원호 파괴양상을 확인할 수 있다.

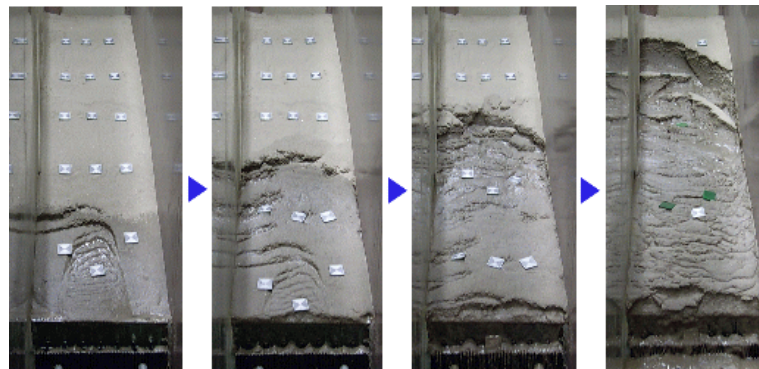


그림 2. 모형사면 침투시험 결과(경사=30°)

3. 수치해석

수리현상을 포함하는 지반은 시간 의존적 거동을 보인다. 특히 모형시험의 시간에 따른 배면수압의 영향으로 인한 사면의 거동을 적절히 모사하기 위해서는 연계해석(Coupled Analysis)이 필요하다. 본 연구에서는 기존 사면의 수리거동에 대한 수치해석의 적용 타당성은 판단하기 위하여 모형시험 장치를 수치

해석법을 이용하여 모델링하였다. 시간 의존적 특성을 보이는 수리상호작용을 적절히 표현하기 위하여 Biot's equation을 기초로 하는 Coupled FEM해석을 통하여 모형시험의 결과를 역해석적으로 모사하고자 하였다. 해석 프로그램으로는 ICFEP(Imperial College Finite Element Program)이 사용되었다. ICFEP은 Imperial college의 D.M Potts에 의해 개발되었고 지반-구조물 상호작용 문제에서 이미 신뢰할 수 있는 결과를 보여주었다(Potts and Zdravkovic, 1999).

3.1 수치모델링

수행되어진 모형시험 중 저부 폭 1.1m 옹벽높이 0.2m, 경사30°를 갖는 시험 Case를 대표 단면으로 선정하여 모형시험의 재현성 및 시간의존성을 평가하였다. 지반은 탄성 및 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며, 투수모델은 등방형 모델을 적용하였다. 모델의 좌·우측 경계는 횡방향 변위를 구속한 롤러로 구성하였고 모델의 바닥은 수직변위를 구속하였다. 또한 배면침투를 고려한 모형시험을 모사하기 위하여 지반은 좌측 경계는 불투수로 'q=0'조건을 설정하였으며, 우측 경계는 Time factor를 조정하여 수압이 점차 증가하여 평형이 유지되는 조건 및 유입을 설정하였다.

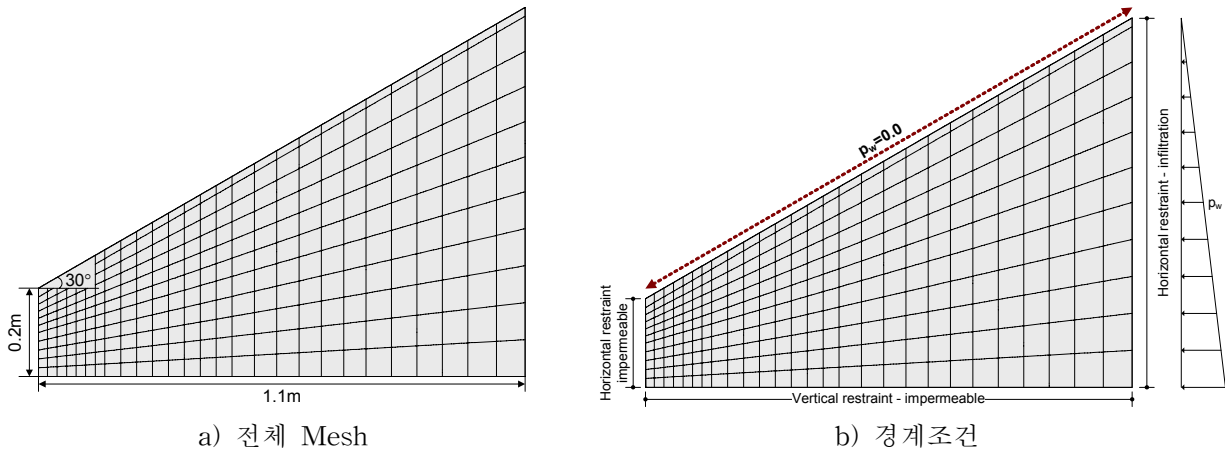


그림 2. 수치모델 해석단면

표 1. 수치해석에 사용된 재료물성

항복 전 구성모델		항복 후 구성모델	
Isotropic Elastic		Mohr-Coulomb	
$\gamma_d(kN/m^2)$	14.715	$c(kN/m^2)$	$\phi(^{\circ})$
$E(kN/m^2)$	3.0×10^{-6}	5.0	37.5
ν	0.45		
투수계수		$k_s(m/sec)$	1.145×10^{-5}

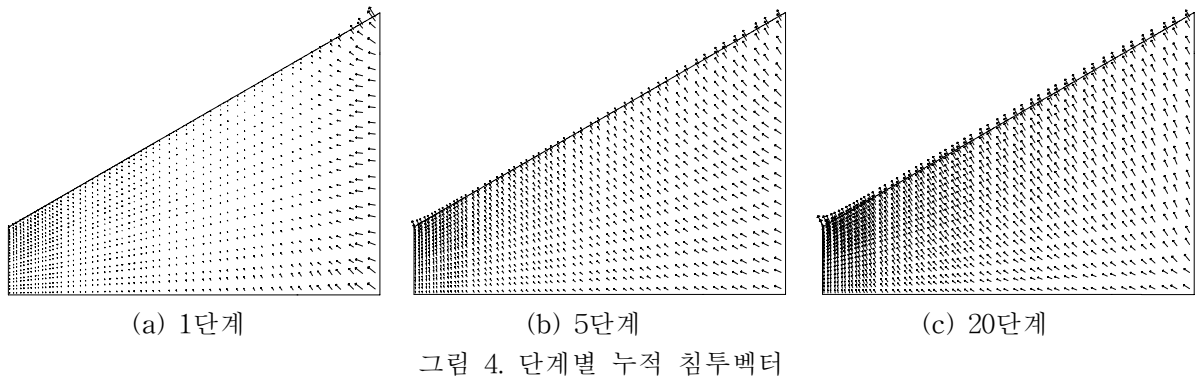
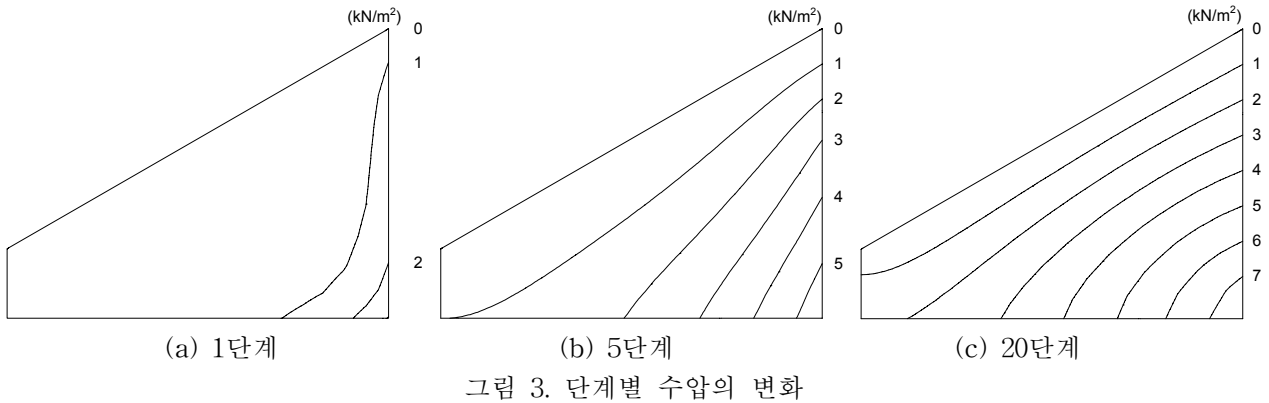
4. 대표 해석결과

수치해석으로 얻어진 배면간극수압, 변위 벡터, 소성영역 등을 모형시험 결과와 비교함으로써 모형시험의 수치 해석적 모사 가능성을 판단하였다.

4.1 배면 간극 수압의 변화

배면수압의 증가는 배면간극수압의 증가로부터 확인가능하다. 시간의 증가에 따라 수압이 점진적으로

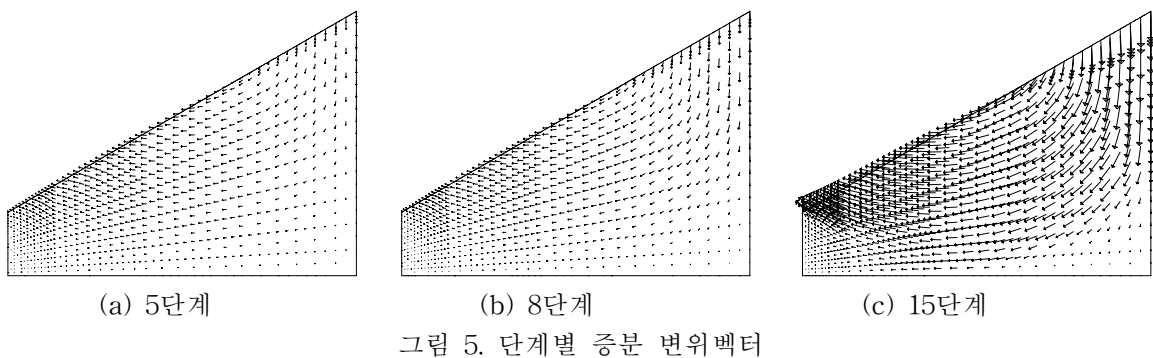
증가하여 해석의 최종단계에서 평형이 유지되는 것을 확인하였으며 배면침투는 Seepage 벡터를 확인함으로써 침투가 적절히 모델링되었음을 확인하였다.



4.2 변위 벡터

단계(시간)가 증가함에 따라 사면내의 변위가 증가하는 모습을 확인할 수 있었다. 누적벡터는 총 변위를 나타내며, 증분벡터는 파괴당시 요소의 움직임을 나타낸다. 증분벡터의 확인결과 초기거동은 사면의 경사방향 따라 하향으로 이동하는 모습을 나타내었으나, 파괴에 이르러서는 사면 외부로 크게 이동하는 양상을 나타내었다. 수압이 증가하는 주요 단계에서의 사면의 거동은 그림5에 나타내었다. 변위증분벡터는 단계별 지반입자의 이동을 나타내는 결과로 이해할 수 있다.

초기변위는 최저위치의 배수경계인 사면 좌하에 집중되고 있다. 하지만 파괴 모드에 접근하면서 수평으로 전파하다, 수직화하는 경향을 보이고 있다.



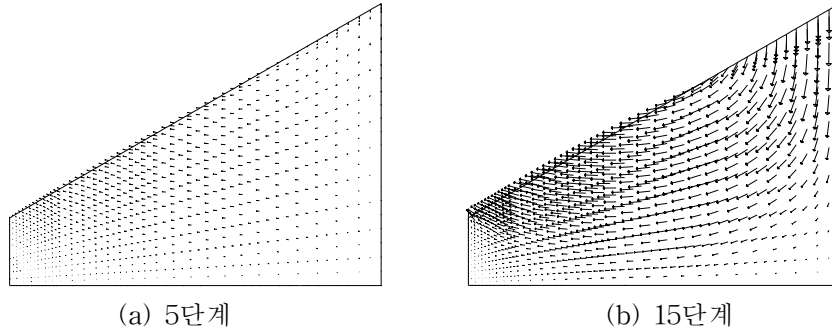


그림 6. 누적 변위벡터

4.3 소성영역

시간에 따른 소성영역의 발생을 확인한 결과 초기에 사면의 왼쪽 경계상부에서 국부적인 소성변형을 보이다가, 그림 7, 그림 8에 보이바와 같이 심부로 확장되는 현상을 확인하였다. 이는 왼쪽경계부의 변형이 고정되어 응력이 집중되어 발생된 것으로 판단되며, 최종결과 심부에서 상부로의 소성영역의 발달도 확인할 수 있었다.

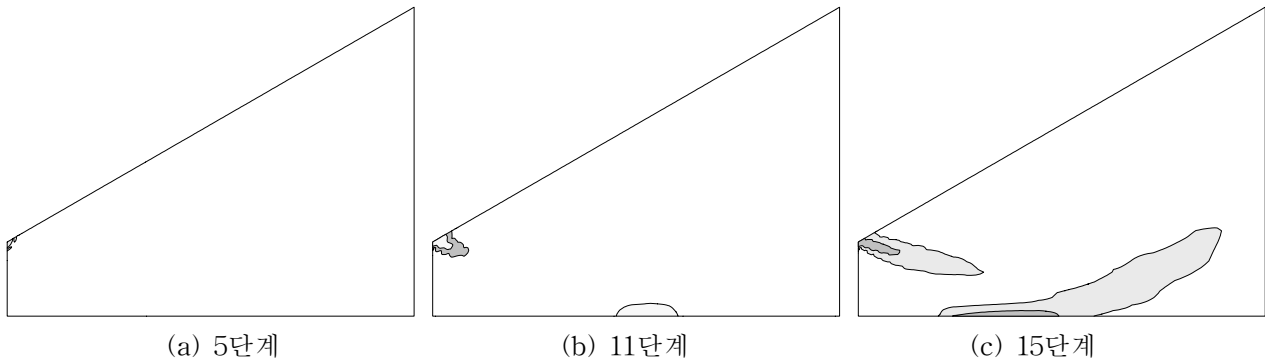


그림 7. 시간경과에 따른 소성영역 확대과정

소성영역이 발생한 시점부터 주요 단계별 변형흐름 특성은 아래 그림과 같다.

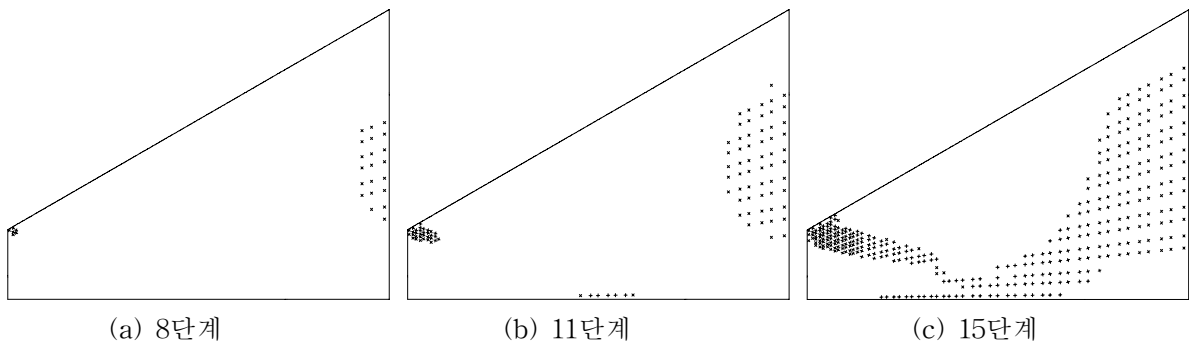


그림 8. 단계별 strain velocity characteristics

4.4 파괴메카니즘

수치해석에서 파괴가 일어난 시점의 변위벡터와 모형시험의 파괴면을 비교하여 파괴모드를 확인하고, 이를 모형시험의 파괴모드와 비교하였다. 수치해석결과로 얻어진 사면의 증분벡터, 소성영역, 진행단계

에 따른 strain velocity characteristics를 중첩한 결과 그림 9와 같이 원호모양을 갖는 사면을 따른 넓은 영역의 파괴모드를 확인하였다. 그림 10은 모형시험 파괴모형과 수치해석의 파괴모드를 중첩한 결과로 유사이동과 벡터방향이 거의 일치함을 보였다.

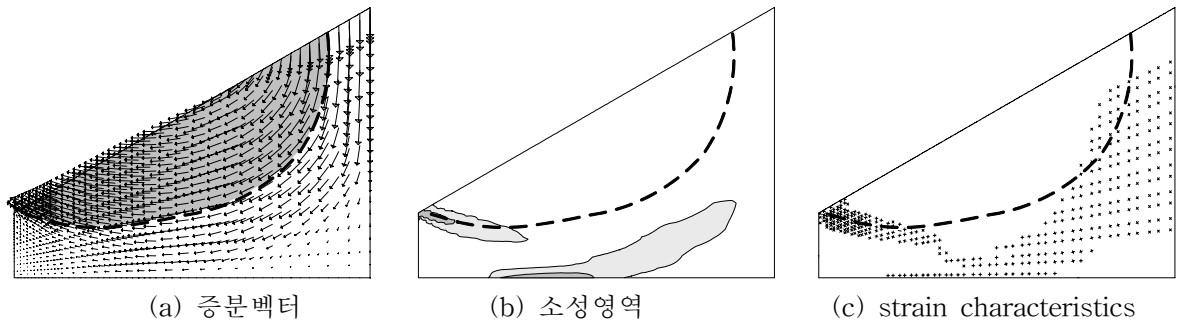


그림 9. 수치해석 결과 사면의 파괴메카니즘

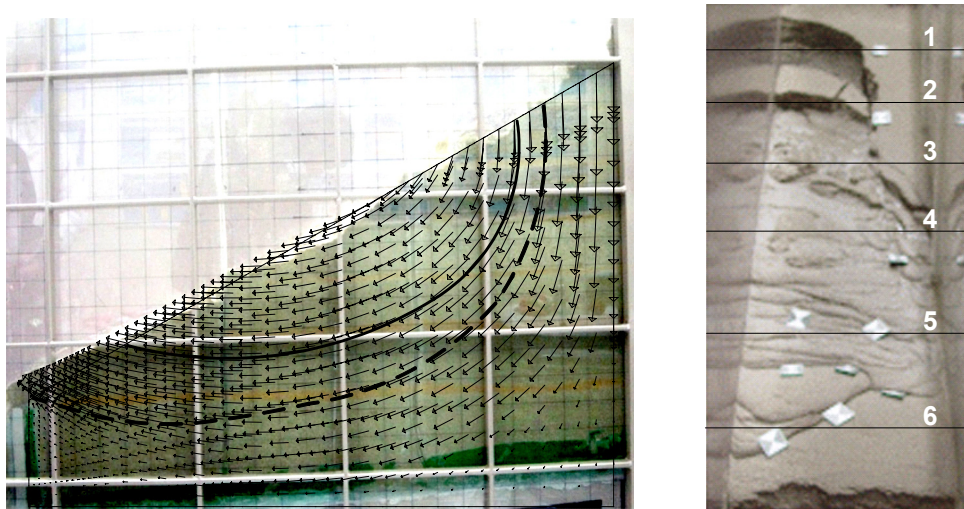


그림 10. 수치해석과 모형시험의 파괴메카니즘 비교

4.5 간극수압에 따른 안전도 평가

배면침투로 인한 시간 의존적 사면의 안정성을 평가하기 위하여 강도감소율을 적용하였다. 사면의 탄성계수 E와 포아슨 비 ν 는 일정하게 간주하고, 수압증가에 따른 파괴시 c_r , ϕ_r 값은 식 (1)로부터 강도감소율(SRF)을 적용하여 점진적으로 감소시켜 시행착오법으로 각 수압조건에 따른 사면의 안정성을 평가하였다.

$$c_r = c/SRF, \quad \phi_r = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\phi}{SRF}\right) \quad (1)$$

수압은 사면의 전체 영역에서 변화하므로 그림 11과 같이 사면의 한 점을 정하여 변화를 확인하였다. 수압이 감소함에 따라 강도감소율은 증가하였으며 배면에서의 침투로 정수압에 도달한 경우(case E) 사면의 강도감소율은 2.1, 침투초기 수압이 매우 작은 경우(case A)의 강도감소율은 15.9로 매우 크게 나타났다(표. 2).

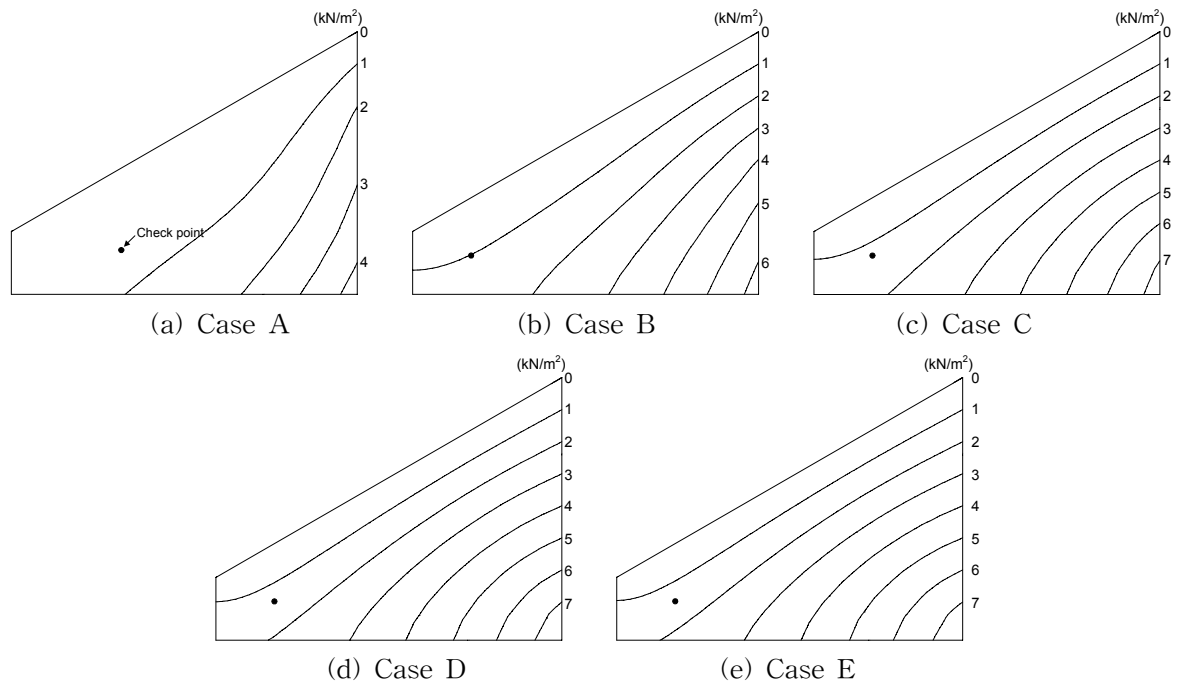


그림 11. Case별 수압조건

표 2. Cases별 수압 및 강도감소율

Cases	수압(kN/m^2)	강도감소율	$\phi(^{\circ})$	$c(kN/m^2)$
Case A	0.599	15.9	2.79	0.31
Case B	1.155	8.1	5.47	0.62
Case C	1.461	5.0	8.82	1.0
Case D	1.613	3.4	12.85	1.47
Case E	1.675	2.1	20.27	2.38

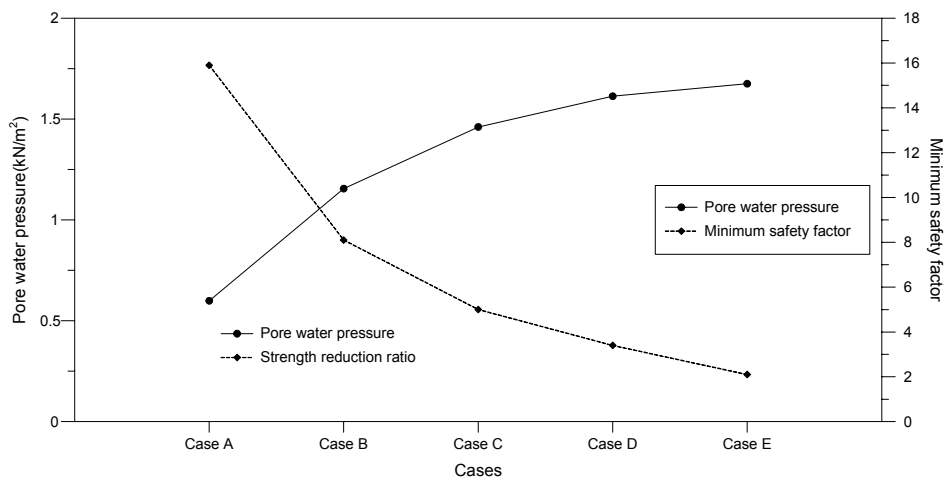


그림 12. Case별 수압변화에 따른 안전율 변화

5. 해석결론

본 논문에서는 모형사면 시험조건 중 대표조건을 선정하여 연계해석으로의 모사가능성을 평가하고자

하였다. 본 연구를 통하여 기존사면의 시간에 따른 배면수압의 증가와 이로 인한 사면의 안정성 감소를 확인 할 수 있었다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다

- 1) 연계해석을 통하여 시간에 따른 사면의 붕괴 현상을 모사할 수 있었다.
- 2) 연계해석의 파괴형태가 모형시험의 결과와 거의 일치함을 확인하였다.
- 3) 수리경계조건으로 배면침투, 수압의 변화를 모델링 가능하였다.
- 4) 수압의 증가에 따라 안전율의 크기가 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청의 2008년 자연재해저감기술사업인 “사면붕괴 예측 및 대응기술 개발” 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김영민(2004), “강도 감소법에 의한 지하수위를 고려한 FEM 사면안정해석”, 한국지반공학회논문집, Vol. 20, No. 8, pp. 97-102.
2. 신종호, 김학문, 장경준(2008), “연계해석(Coupled analysis)에 의한 간극수압이 사면안정에 미치는 영향”, 한국지반공학회, 2008 사면안정학술발표회
3. Biot, M. A.(1941), “General theory of three dimensional consolidation”, J. Appl. Physics, Vol.12, pp. 155-169.
4. D. M. Potts, N. Kovacevic and P. R. Vaughan(1997), “Delayed collapse of cut slopes in stiff clay”, Géotechnique, Vol. 47, No. 5, pp. 953-982
5. D. M Potts and Zdravkovic (1999), “Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory”, Thomas Telford, London
6. D. V. Griffiths and P. A. Lane(1999), “Slope stability analysis by finite elements”, Géotechnique, Vol. 49, No. 3, pp. 387-403