

# 연계해석(Coupled Analysis)에 의한 간극수압이 사면안정에 미치는 영향

## Effect of Pore Water Pressure on Slope Stability by Using Coupled Finite Element Analysis

신 종 호<sup>1</sup> Shin, Jong-Ho  
김 학 문<sup>2</sup> Kim, Hak-Moon  
장 경 준<sup>3</sup> Jang, Kyung-Jun

### Abstract

Slope failures are one of the significant disasters which causes lots of human casualties and huge financial losses every year. Previous researches on the slope failure have indicated that most accidents are closely related to the pore water pressure in the slope due to rainfall during the rainy seasons or stormy weather conditions. It would be therefore appropriate to consider the effect of pore water pressure in the design of slopes. As the existing slopes are generally reinforced by plants and other slope protecting measures, their boundary conditions are highly complicated. In this paper an attempt to develop a new modeling and analysis technique of slopes is proposed by including pore water pressure and adopting the coupled finite element method. Non-reinforced and reinforced slope models are considered. Representative analysis showed that the numerical modeling considering pore water pressure is appropriate in slope stability analysis. Flow behavior in the slopes is identified for various hydraulic boundary conditions. It is also shown that the effect of pore water pressure on slope stability is significant.

### 요 지

사면붕괴는 매년 인간의 활동에 엄청난 재정적 손실을 끼치는 중요한 재난중의 하나이다. 사면의 붕괴특성을 고찰한 결과 강우와 매우 밀접한 상관성이 있음을 알 수 있었다. 기존 연구에 따르면 우기시 강우로 인한 간극수압의 영향으로 인하여 대부분의 사면붕괴 사고가 발생하였다. 기존사면의 안전율은 사면의 풍화 등 열화 거동과 강우 등의 작용으로 인해 점차 감소하고 있으나 식생, 보호공, 보강공 등으로 인해 안전율을 상승시키는 활동이 가미되어 실제 기존사면의 적절한 평가가 어렵다. 따라서 사면의 절취 및 보수보강이 완료된 직후부터 현재까지의 안정성에 영향을 미치는 요소를 누적적으로 고려할 수 있는 시간 의존적 해석도구가 필요하다. 본 연구에서는 변위-간극수압을 고려한 연계 수치해석 기법을 채택하여 무보강 사면과 보강사면으로 구분하여 시간의존적 거동을 고려하는 수치해석(coupled numerical analysis)을 실시하였다. 이로부터 기존사면의 간극수압에 따른 영향을 평가하고, 연계해석을 해석도구로 하는 안정해석 기술을 제시하고자 하였다.

**Keywords :** Coupled finite element analysis, Pore water pressur, Slope stability

1 정회원, 건국대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ.)

2 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Dankook Univ., khm1028@dankook.ac.kr, 교신저자)

3 종신회원, 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Dankook Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

기존사면이란 공학적으로 처리된 사면(engineered slope)으로써 조성된 지 수년이 경과하여 지반의 풍화, 수리적 열화에 의한 경계조건 변화 등 복합적인 공학적 검토 요소를 내포한 사면이라 할 수 있다. 또한 표면 보호공, 체재 보강공 등 다양한 방법으로 보수·보강되고 고려 요소가 매우 다양하며, 주로 강우 시 붕괴되는 특성을 가진다. 파괴거동을 지배하는 가장 중요한 요소는 강우 강도, 배수조건, 배수층 거동 등의 수리적 환경이라 할 수 있다.

사면해석은 전통적으로 한계평형법에 의해 수행되었다. 이 방법은 적용성이 다양하고, 간편하여 널리 사용되고 있다. 초창기에는 매우 단순한 형태로 출발하였지만 발전을 거듭하여 현재는 여러 가지 지반공학 특성 이 고려된 형태로 발전되어 왔다. 그러나 한계평형법은 파괴모드를 전제로 한 해석이므로 파괴에 대한 안전율의 결과는 제공되나, 파괴메커니즘과 이를 제어하기 위한 상세거동정보를 제공하지는 못한다(Ambramson et al., 1996; Blong, 1973; Duncan, 1996). 따라서 거동과 경계조건이 복잡한 기존사면의 안정성 평가는 수리적 거동 모델링을 포함하는 해석도구가 필요하며, 이를 위해 시간적 영향의 고려가 가능한 범위와 간극수압의 결합해석법을 도입하는 것이 바람직 할 것이다. 기존사면의 안전율은 사면형성 및 보수·보강 완료 후 사면의 풍화 등 열화 거동과 강우 등의 작용으로 인해 점차 감소하고 있으나 식생, 보호공 및 보강공 등으로 인해 안전율을 상승시키는 활동이 가미되어 실제 기존사면의 적정한 거동 추론이 어렵다. 따라서 신설시점부터 현재까지의 안정에 영향을 미치는 요소를 누적적으로 고려하는 시간 의존적 해석도구가 필요하다.

## 2. 연계유한요소모델링(Coupled Finite Element Modeling)을 이용한 안정해석법

### 2.1 기존사면의 모델링 고려요소

새로운 모델링 모색에 앞서 기존해석법이 갖는 문제점과 새로운 모델링기법에 필요한 요소를 고찰하고자 한다. 기존의 사면안정 해석법의 특성을 살펴보면 시간 의존적 풍화 및 열화특성을 고려하는 것이 곤란하며, 기존 사면의 배수재 열화에 따른 수리기능 저하와 보수보강에 따른 구조적 결합재의 거동 및 지반물성의 변화, 그리고 재하조건 변화 등과 같은 문제가 있음을 알 수 있다. 따라서 기존사면의 적절한 안정해석을 위해서는 이러한 영향을 적절히 고려 가능한 수치해석적 사면안정 해석법이 바람직한 것으로 판단된다. Terzaghi (1950) 및 Brunsden(1979)에 따르면 사면의 잠재적 안정 조건을 나타내는 요소는 다음 표 1과 같이 구분할 수 있다.

표 2의 고찰로부터 기존사면의 안정에 영향을 미치는 중점 지배요소의 모델링 요소는 지형구조, 배수조건 등으로서 실제현장에서 이러한 영향을 지배하는 요소는 배수특성, 사면 보호공, 사면 보강공, 수리경계조건, 수리적 열화(배수공 막힘현상), 지질학적인 풍화현상 등을 들 수 있다.

### 2.2 연계수치해석(coupled numerical analysis)에 의한 강도감소법

앞에서 고찰한 문제점을 개선하고 다양한 영향요인, 특히 수리적 영향을 고려할 수 있는 해석법을 선택하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 이런 관점에서 시간 의존적 거동을 고려할 수 있는 연계 수치해석 방법(coupled numerical method)을 해석도구로 채택하여 기존사면의

표 1. 사면의 안정조건 필요요소

안정상태의 외적 변화	안정상태의 내적 변화
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기하적 변화(절개, 침식, 인공적인 굴착에 의한 경사변화, 길이 또는 가파름)</li> <li>- 제하(침식, 절개, 인공적인 굴착)</li> <li>- 재하(재료의 추가, 높이 증가 등)</li> <li>- 충격과 진동(인공의 진동, 지진, 등)</li> <li>- 수위 저하(호수나 저수지에서 수위 저하)</li> <li>- 수리영역의 변화(강우, 수위 상승, 간극 압력)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 점진적 파괴 (뿌리에 의한 확장 또는 쪼개짐과 침식)</li> <li>- 풍화 (동결-융해, 건조, 결합력 감소, 결합력 제거)</li> <li>- 지하수 침식(융해, 배관 등)</li> </ul>

표 2. 모델링 요소의 특성분석(잠재적 안정 조건에 영향을 미치는 요소)

구분	요소	잠재적 안정	잠재적 불안정
지형구조	계곡 길이	작다	매우 크다
	경사도	낮다	매우 가파름
	절벽	없다	존재한다
	계곡 간 높이차이	작다	매우 크다
	계곡 측면 모양	불룩함	오목함
배수조건	배수 밀도	낮다	매우 높다
	하천 기울기	완만하다	매우 가파르다
	굴착 경사	없다	매우 심하다
	응축	없다	있다
	고여있는 지하수	없다	빠른 배수 시
	최근의 절개	없다	크다
	간극수압	낮다	매우 높다
Man-made features	굴착깊이	없다	깊다
	채움-암밀	높다	없다
	저수지	없다	있다
	배수전환	없다	있다
	저수지 수위 변화	작다	크다
	상재하중	없다	많다

안정해석기술로 정립하고자 한다.

대부분의 사면붕괴가 강우와 연관되고 있는 바, 이는 사면의 붕괴가 수압작용과 밀접한 관계가 있음을 시사하는 것이다(국립방재연구소, 1998; 한국도로공사, 1996; 한국지반공학회, 1997; Dawson, 1999). 강우 시 사면 거동은 지반의 배수속도, 배수경계조건 등에 영향을 받아 변형과 수압의 상호작용에 따라 발생하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 기존사면의 붕괴거동을 정확히 모사하기 위해서는 변형과 수압의 연계해석이 보다 바람직 할 것이다.

### 2.2.1 연계해석의 지배방정식(Governing equations)

일반적으로 사질토와 같이 투수성이 큰 흙으로 구성된 지반에서 하중 변화에 의해 발생된 과잉간극수압은 단기간에 소산된다. 따라서 포화된 사질토 지반의 간극수압은 0으로 볼 수 있으며, 전응력은 유효응력과 같다고 할 수 있다. 반면 투수성이 작은 점토질의 지반은 하중의 일부분을 간극수가 부담하며 간극수압이 증가되는 동안에도 흐름이 거의 발생하지 않는다. 즉, 간극수압의 소산이 일어나지 않으며 비압축성 탄성거동을 보인다. 물론 이는 하중재하속도 개념을 고려하여 설명되어야 하지만 일반적인 지반 구조물의 건설 시간을 고려할 때 점토질 지반은 단기적으로는 비배수 거동을 보인다고 할 수 있다. 위의 두 경우를 정리하면 사질토 지반의 거동과 점토질 지반의 단기거동은 각각 완전 배수 조건과 완전 비배수 조건으로 고려할 수 있다. 이러한 경우 지반의 거동은 시간 경과에 따른 간극수의 흐름

변화를 고려하지 않아도 되므로 이는 지반의 Uncoupled 거동에 해당한다고 할 수 있다.

반면, 화강토나 풍화토와 같은 중간 정도의 투수성을 보이는 흙으로 이루어진 지반은 위 두 조건의 사이에 위치하며 응력변화 및 변형과 더불어 토체의 간극을 지나 는 간극수의 흐름변화를 수반한다. 이는 지반의 Coupled 거동을 의미하며 이를 적절히 설명하기 위해서는 하중 변화에 따른 지반 변형의 지배방정식과 간극수의 지배 방정식을 연계하는 것이 필요하다. Biot(1941)는 비압축 성의 유체를 포함하는 포화토를 가정으로 부피변화와 응력의 상호작용을 고려하는 이론을 제시하였다. Coupled, Uncoupled 거동은 변형률 재하속도에 따라 지반의 강도특 성이 배수조건에 따라 달라짐을 의미하는 것이다. 즉, 변 형률 재하속도를 배수속도보다 빠르게 하면 압축강도는 비배수 조건의 압축강도 특성을 보이고, 반대로 재하속도 를 배수속도 이하로 느리게 하면 압축강도는 배수조건의 특성을 보인다는 것이다. 이 두 경계의 중간에 해당되는 재하속도로 비구속 압축강도 시험을 하는 경우 지반은 재 하속도와 상관되어 압축강도를 달리하며 이러한 상태의 지반 거동을 Coupled behaviour로 정의할 수 있다.

이와 같은 사실을 바탕으로 본 해석은 Biot's equation을 기초로 하는 변위-간극수압 결합해석(coupled-analysis)을 수행하였다. 일반적으로 국내에 시공되는 사면의 대부분은 특수한 경우를 제외하고 화강토 및 풍화토 지반을 포함하여 건설된다는 점을 고려하였을 때 이는 적절하다고 할 수 있다. 또한 기존사면의 경우에 많은 응력 변화 및 변위를 수반하고 시공공정 및 현장조건에 따라 오펀시

간을 거치는 동안 수리조건을 달리해 왔으므로 이러한 조건은 더욱 타당하다고 할 수 있을 것이다. 일반적으로 지반공학의 유한요소법은 응력-변형을 관계를 해석하는 것이다. 그 과정을 간단히 살펴보면 해석 대상을 요소화한 후, 입력 데이터를 바탕으로 개별 요소에 대한 강성행렬을 구성한다. 이 강성행렬을 조합하여 전체강성 행렬을 생성한 후 초기 조건 및 경계 조건을 바탕으로 각 절점(node)에 대한 변위를 계산하고 이 변위를 바탕으로 각 요소의 응력 및 변형률을 산정한다. 본 연구는 수리거동을 포함하고 있기 때문에 Biot's equation을 기초로 하는 Coupled FEM해석을 수행하였다. 수리거동을 포함하는 FEM 해석은 응력-변형을 관계를 간극수압과 연계하여 지배방정식(governing equations)을 구성한다. 연계해석에 사용되는 지배방정식은 변형거동을 모사하기 위한 평형방정식, 구성방정식, 적합방정식 그리고 흐름거동을 모사하기 위한 Darcy의 법칙 및 Bernoulli 정리로 구성된다. Biot의 지배방정식은 이와같이 크게 4개의 기초방정식(fundamental equation)으로 구성되며 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- The equation of equilibrium

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} - f_i = 0 \quad (1)$$

- The effective stress principle

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij} = D_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (2)$$

- The equation of continuity

$$-\frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \epsilon_V}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

- The generalized Darcy's law

$$v_i = -k \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_{ij}$  : 전응력 텐서,  $f_i$  : 물체력 텐서,  $\sigma'_{ij}$  : 유효응력 텐서,  $p$  : 간극수압,  $\delta_{ij}$  : Kronecker delta,  $D_{ijkl}$  : 응력과 변형률에 관련된 텐서,  $\epsilon_{kl}$  : 변형률 텐서,  $v_i$  : 표면 유속 벡터,  $\epsilon_V$  : 체적 변형률,  $t$  : 시간,  $h$  : 전수두 이다.

유한요소방정식은 기본방정식을 토대로 변형방정식과 연속방정식을 결합하여 구하며 이렇게 구한 방정식은 변형과 수압이 연계된(coupled) 결합형태를 나타내게 된다. 최소 포텐셜 에너지의 원리를 이용하여 유도된 Coupled Finite Element Equation은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [K_G] & [L_G] \\ [L_G]^T & -\beta \Delta t \cdot [\Phi_G] \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\Delta d\}_{n_G} \\ \{\Delta p\}_{n_G} \end{Bmatrix} \left\{ ([n_G] + Q + [\Phi_G] \{p\}_{n_G}^t) \cdot \Delta t \right\} \quad (5)$$

여기서,  $[K_G]$  : 전체 강성행렬,  $[L_G]$  : 변위와 간극수압의 연계행렬,  $[R_G]$  : Right hand side 하중 벡터,  $[B]$  : 요소 변형률-변위 행렬,  $[D]$  : 구성행렬,  $\{m\}$  : 단위 열벡터,  $[N_p]$  : 간극수압 요소 형상함수  $[N]$  : 변형 요소 형상함수,  $\{\Delta F\}$  : 물 체적 벡터,  $\{\Delta T\}$  : Right hand side 표면력 벡터,  $\beta$  : 수치 파라미터,  $[\Phi_G]$  : 흐름 행렬,  $k \{n_G\}$ ,  $\{Q\}$  : Right hand side flow rate 벡터 이다.

식 (5)는 강우로 인한 변위와 간극수압 간 상호작용을 시간의존적 개념으로 모델링할 수 있는 연계 유한요소 방정식이다. 본 연구에서는 위 식을 이용하여 기존사면의 열화, 강우작용, 보호 및 보강 등을 포함하는 시간의존적 해석을 수행함으로써 안정성을 평가하고자 한다. 본 해석도구의 모체는 ICFEP(Imperial College Finite Element Program, Potts and Zdravkovicz, 1999 and 2001)이며, 기본사면의 안정해석을 위한 새로운 모델링 기법이 증진(enhancement)되었다. 연계해석을 본 사면안정 해석에 적용한 방법은 강도 감소법이다. 연계해석을 이용하여 간극수압과 변위가 산정된 일정시점에서 강도를 일정률로 감소시켜 해석함으로써 수렴이 되지 않았을 때의 비율을 안전율로 산정하였다.

### 3. 기존사면의 모델링 및 안정해석

연계해석은 모델의 구조적인 속성과 수리적인 속성을 동시에 고려하므로, 해석모델은 앞에서 고려한 기존사면의 여러 측면을 포함하고 있어야 한다. 구조적 요소로서는 사면 보호공, 사면 보강공 등을 들 수 있으며, 수리적 요소로서는 배수시스템(배수재, 배수공), 수리경계조건, 배수시스템 기능열화(배수공 폐색 등) 등을 들 수 있고, 이밖에도 지질학적 요소로서 풍화에 따른 지반 강도저하 특성 등을 생각할 수 있다.

그림 1은 Engineered Slope의 전형적인 형태를 보인 것이다. 이 사면은 기존사면으로서 사면보호공, 사면보강공 및 옹벽을 비롯한 고려요소를 충분히 포함하고 있다. 따라서 이 단면을 토대로 대표해석을 위한 표준 해석단면을 선정하고자 하였다.

보강사면의 해석결과는 상대적으로 미보강된 사면과의 비교가 필요하였다. 따라서 대표해석을 위한 단면은 미보강사면과 보호 및 보강사면 두 가지 경우를 선정하였다.

### 3.1 미보강 사면

#### 3.1.1 모델링

미보강 사면 모델은 그림 2와 같이 선정하였다. 저부 폭 45m 높이 10m 경사 1:3인 사면이 고려되었다. 사면 해석의 경우 초기응력의 설정이 매우 중요하다. 본 해석에서는 지반제거법을 적용하여 신설상태의 초기응력을 재현하였다. 즉 초기지반을 수평으로 가정하고 사면외

부에 해당하는 지반을 제거함으로써 기존사면의 응력 상태를 재현하였고, 지반제거에 따라 발생한 변형은 초기변위조건을 제로로 하여 초기상태를 설정하였다.

연계 유한요소 해석으로서 일반적인 변위의 경계조건 외에도 수리경계 조건의 설정이 필요하다. 연계해석의 수리경계 조건은 일반적으로 투수 혹은 불투수로 설정한다. 투수조건의 경우 “간극수압=0 조건”이 부여되며, 불투수조건의 경우 “흐름(flow rate)=0” 조건으로 표시할 수 있다. 본 해석에서는 미보강사면의 경우, 그림 3에서 보는바와 같이 표면배수가 허용되는 것으로 설정하였다.

지반재료는 등방 탄성 및 Mohr-Coulomb 모델로 모델링하였다. 본 해석모델은 보호공 및 보강공을 포함하지

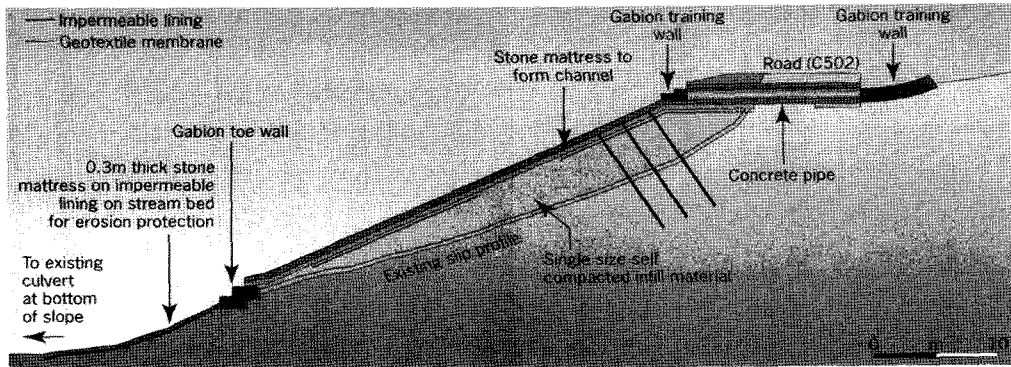


그림 1. 기존사면 예시도(Ground Engineering, 2006)

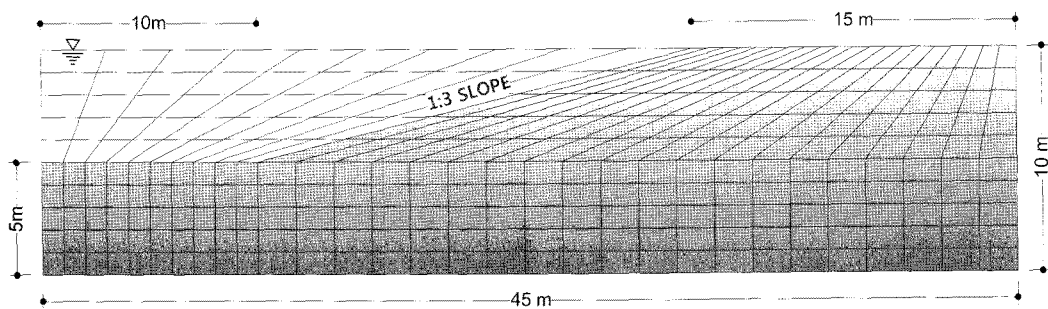


그림 2. 미보강사면 계획(해석단면)

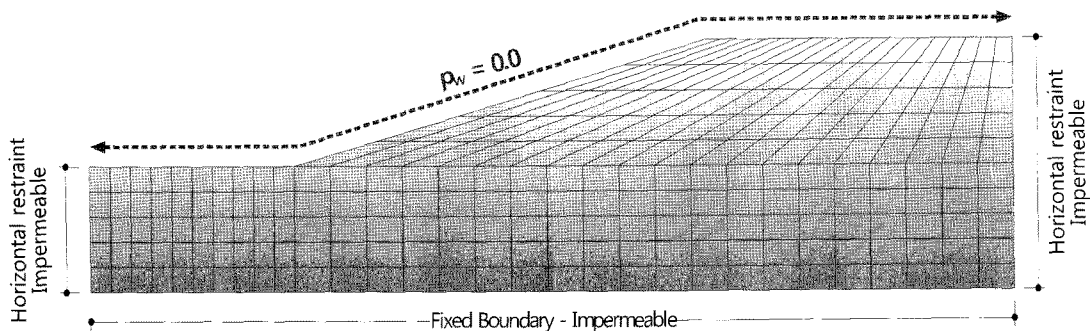


그림 3. 미보강사면 유한요소망

표 3. 재료물성

항복 전 구성모델		항복 후 구성모델		
Isotropic Elastic		Mohr-Coulomb		
단위중량	20KN/m <sup>3</sup>	감소율	c(KN/m <sup>2</sup> )	Φ(DEG)
탄성계수	1.0×10 <sup>7</sup> KN/m <sup>2</sup>	1	12.0	45.00
포와송비	0.2	1.2	10.0	37.50
초기응력 조건		1.4	8.6	32.14
K <sub>0</sub>	1.5	1.6	7.5	28.13
간극비	0.5	1.8	6.7	25.00
투수계수		-	-	-
지반	1.0×10 <sup>6</sup> m/sec	-	-	-

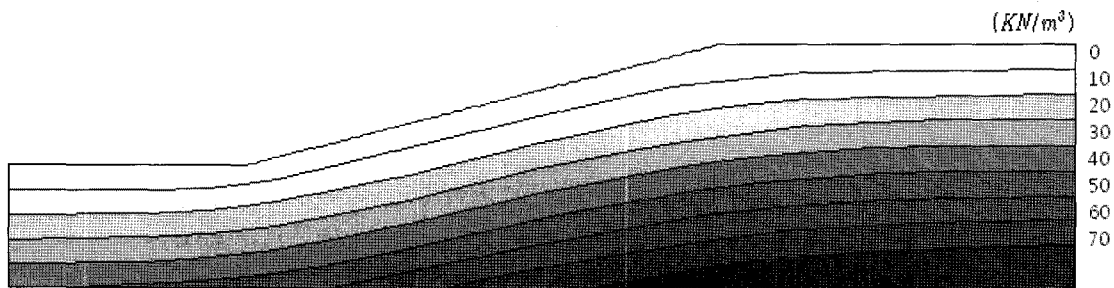


그림 4. 간극수압분포

않는 가장 단순한 모델로서 단지 연계해석법을 기존사면의 안정해석에 적용성 여부를 평가하고자 하였다. 표 3은 항복 전·후 구성모델의 재료물성을 나타낸 것이다.

본 해석은 유한 요소해석과 강도감소법의 조합해석이므로, 우선 유한요소해석을 수행하여 안전율이 요구되는 상태를 유지하고, 이 상태에서 강도파라미터를 감소시켜가며 파괴를 나타내는 안전율을 구하는 방식으로 이루어진다. 해석 수행된 단계는 다음과 같다.

- ① 지반 굴착(하중분담을 적용, Increment 1~20)
- ② 수리경계조건 재설정 : 굴착면에서 완전배수조건
- ③ 특정 Increment에서 응력 및 수압상태 유지(고정)
- ④ 해석이 수렴하지 않을 때까지 강도의 감소율을 변경하면서 해석수행
- ⑤ 해석 수렴 불가 시점에서 직전단계의 안전율을 설계안전율로 규정
- ⑥ 수렴하지 않았던 해석결과를 분석하여 취약부분 및 파괴형상 예측

### 3.1.2 해석결과

해석결과 무보강 사면의 안전율은 1.8인 것으로 나타났다. 이때의 거동을 간극수압, 변위벡터, 소성영역 등의 관점에서 항목별로 고찰하였다.

#### 1) 간극수압 분포

강도감소법을 적용하기 전 수압분포상태는 그림 4와 같다. 이러한 수압형태는 배면정수압이 사면경사와 같게 나타난 경우로서 실제 지반에서 가장 흔하게 확인되는 간극수압의 유형이라 할 수 있다. 따라서 앞으로 설명할 결과들은 그림 4의 간극수압을 전제로 하여 얻어진 것이라 할 수 있다.

#### 2) 변위벡터(INC. 19)

그림 5는 해석결과 중 변위벡터를 나타낸 것이다. 누적벡터(accumulated vector)는 총변위를 나타내며, 증분벡터(incremental vector)는 파괴당시 요소의 움직임을 나타낸다. 이로부터 사면의 초기거동은 사면과 약간 경사진 하향방향을 나타내었으나, 파괴에 이르러서는 사면 외부로 크게 이동하는 양상을 보였다.

#### 3) 소성영역 발생 과정

변위의 거동 메커니즘은 소성영역의 발달과정을 고찰함으로써 구체적으로 파악할 수 있다. 증분(increment)은 시간 개념으로서 본 해석에서는 잠정적으로 1년을 설정하였다. 하나의 Increment는 약 1.6월에 해당한다. 그림 6에 보인 바와 같이 시간경과와 함께 소성영역이 확대되는 현상을 확인할 수 있다. 초기의 소성영역은 사

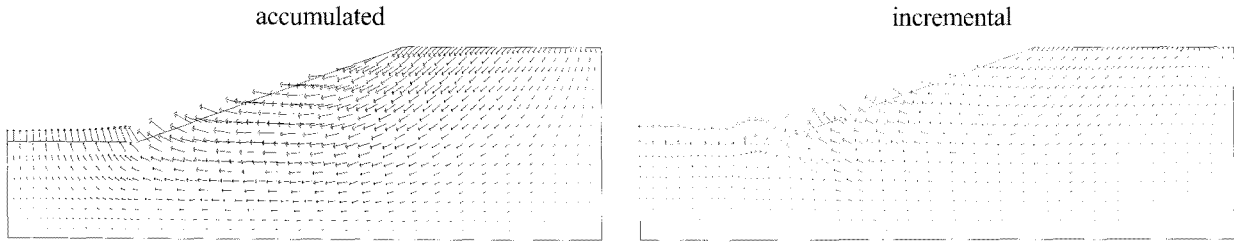


그림 5. 변위벡터

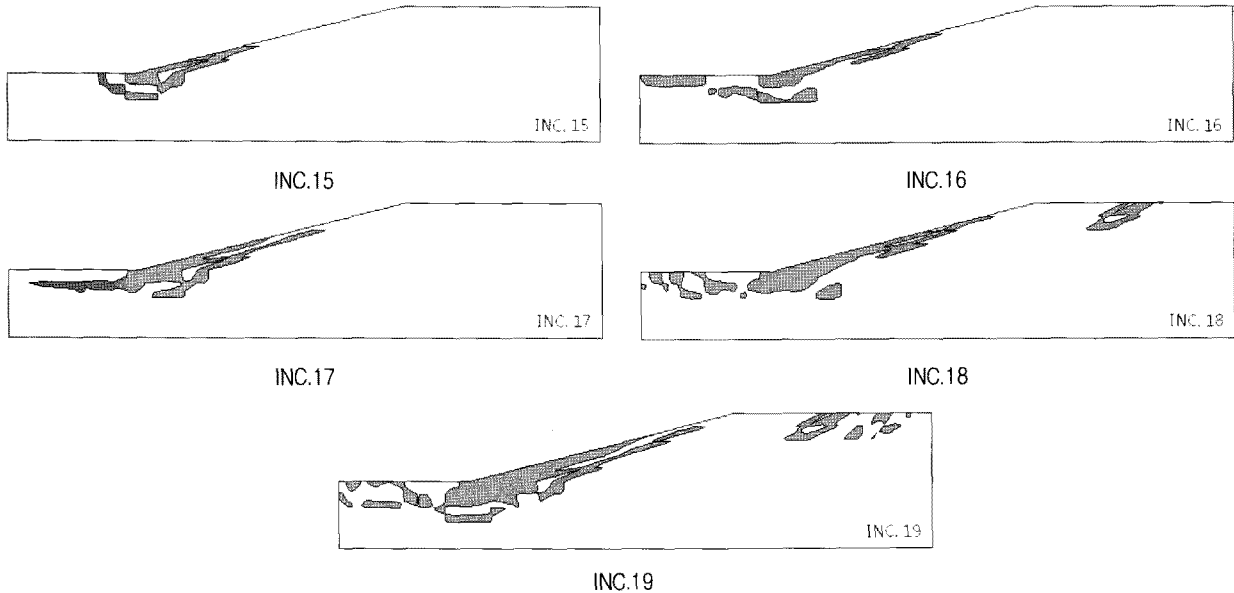


그림 6. 미보강사면 시간경과별 소성영역 진행

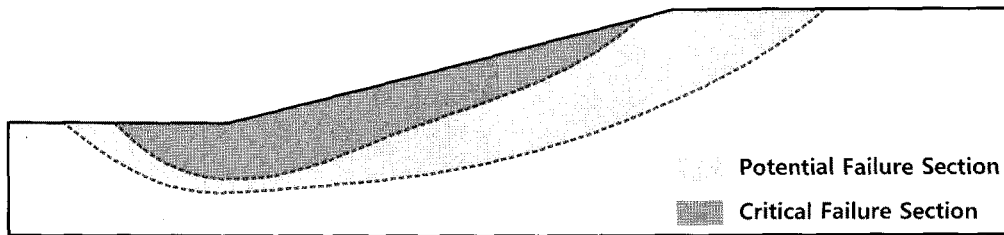


그림 7. 미보강사면의 잠재 파괴영역

먼저부에서 발생하나 점차 확대되어 사면상부로 이동함을 보인다. 이러한 결과는 기존사면의 모니터링이 사면저부의 거동에 유의할 필요가 있음을 시사하는 것이다.

#### 4) 해석결론

해석결과 강도감소율 1.8에서 파괴에 상응하는 미수렴변형이 발생하여 안전율은 1.8로 산정되었다. 증분변위 벡터와 전단소성 영역으로부터 파악된 파괴유형(failure mode)은 그림 7과 같다. Potential Failure Section은 소성영역이 시작되는 최외곽 경계를 나타낸 것으로, 잠재적으로 가능한 파괴선의 분포영역이며, Critical

Failure Section은 소성변형률이 최대가 되어 최소 안전률을 주는 파괴면이다. 미보강 사면해석으로부터 본 해석법이 기존사면해석에 적용 가능성을 확인하였다.

#### 3.2 보강사면

보강사면은 무보강 사면과 달리 사면 표면 보호공 그리고 보강공을 포함하는 사면으로서 신설 후 시간경과와 함께 열화와 보수 및 보강작업이 수행된 사면이다. 이것은 기존사면의 일반적인 특성이므로 본 대표해석에서는 보강사면의 해석을 통하여 기존사면 해석에 연

계해석 적용의 적정성을 평가하고자 한다.

### 3.2.1 모델링

그림 8(a)는 보강사면의 해석단면을 예시한 것이다. 저폭 45m, 높이 16m를 모델링 범위로 하였다. 이 사면은 수압저감을 위한 배수공, 보강재 그리고 소단과 표면 보호공을 포함한다. 본 대표해석에서는 사면의 배수조건만을 고려하여 해석하였다.

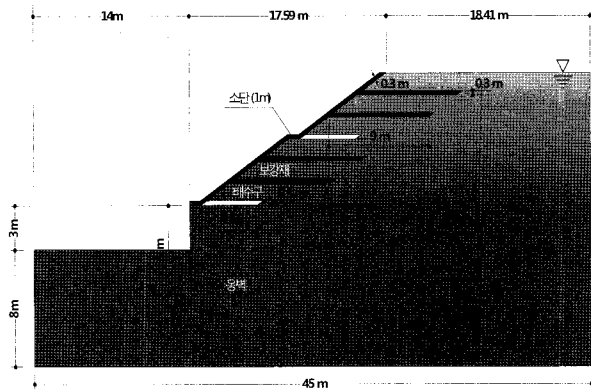
그림 8(b)는 해석대상 요소망(mesh)을 보인 것이다. 초기응력 재현을 위하여 좌측 상단부는 모델에는 포함하였으나 굴착 해석으로 초기응력을 확정된 뒤 제거되었다.

보강사면은 다양한 구조재를 포함한다. 지반모델은 미보강사면과 마찬가지로 등방탄성 및 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였으며, 구조재는 탄성거동을 가정하였

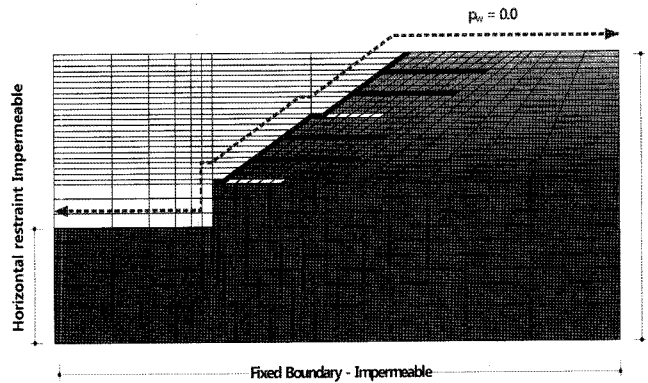
다. 지반 및 보강재의 재료물성은 표 4와 같다.

보강사면에 대한 해석 Case는 표 5와 같이 5가지 경우로 설정하였다. 사면의 투수성이 옹벽, 보호공, 보강재 및 배수공에 따라 달라지므로 이러한 영향을 고려하였다. 옹벽, 보호공, 보강재의 투수성은 지반의 1~0.01배로 변화시켰으며, 배수공의 투수계수는 지반 투수계수의 1,000배로 설정하였다.

보강사면의 해석순서도 미보강사면의 유한요소 해석과 같이 안전율이 요구되는 상태를 유지하고, 이 상태에서 강도파라미터를 감소시켜가며 파괴를 나타내는 안전율을 구하는 방식으로 이루어진다. 다만, 보강재의 영향을 고려하기 위하여 해석 중간단계에서 보강재의 설치효과가 발현되도록 물성치를 변경하는 과정이 필요하다. 수행된 해석 단계는 다음과 같다.



(a) 보강사면 해석 모델



(b) 보강사면 유한요소망

그림 8. 보강사면 해석모델

표 4. 보강사면 지반 물성치

항복 전 구성모델		항복 후 구성모델		
Isotropic Elastic		Mohr-Coulomb		
단위중량	25KN/m <sup>3</sup>	감소율	c'(KN/m <sup>2</sup> )	Φ'(DEG)
탄성계수	1.0×10 <sup>6</sup> KN/m <sup>2</sup>	1	100.0	45.00
포와송비	0.2	1.2	83.3	37.50
		1.4	71.4	32.14
초기응력 조건		1.6	62.5	28.13
		1.8	55.6	25.00
K <sub>0</sub>	1.0	2	50.0	22.50
		2.2	45.5	20.45
간극비	0.5	2.4	41.7	18.75
		2.6	38.5	17.31
투수계수		2.8	35.7	16.07
		3	33.3	15.00
지반	1.0×10 <sup>6</sup> m/sec	3.2	31.3	14.06
		3.4	29.4	13.24
		3.6	27.8	12.50



표 5. 해석 Case

	옹벽	보호공	보강재	배수공
Case 1	$K_w=K_s$	$K_c=K_s$	미설치	미설치
Case 2	$K_w=K_s$	$K_c=K_s$	$K_r=K_s$	미설치
Case 3	$K_w=0.1K_s$	$K_c=0.1K_s$	$K_r=0.1K_s$	미설치
Case 4	$K_w=0.01K_s$	$K_c=0.01K_s$	$K_r=0.01K_s$	비배수조건
Case 5	$K_w=0.01K_s$	$K_c=0.01K_s$	$K_r=0.01K_s$	$K_p=1,000K_s$

- ① 지반 굴착(하중분담율 적용, Increment 1~20)
- ② 수리경계조건 재설정 : 굴착면에서 완전배수조건
- ③ 특정 Increment에서 응력 및 수압상태 유지(고정)
- ④ 지반물성치 변경: Parameter 변화 모델
- ⑤ 해석이 수렴하지 않을 때까지 감소율을 변경하면서 해석수행
- ⑥ 해석 수렴 불가 시점에서 직전단계의 안전율을 설계안전율로 규정
- ⑦ 수렴하지 않았던 해석결과를 분석하여 취약부분 및 파괴형상 예측

### 3.2.2 해석결과

보강사면의 해석결과는 변위벡터, 소성영역의 발생과정, 안전율 그리고 파괴영역 등으로 구분하여 살펴보았다.

#### 1) 변위벡터

그림 9는 보강사면의 증분변위벡터를 보인 것이다.

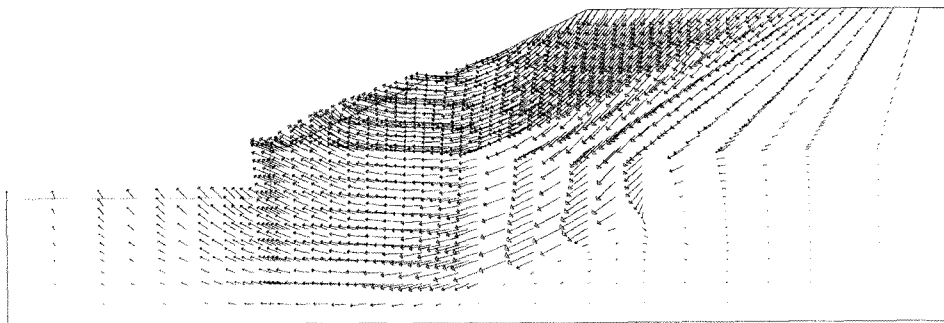


그림 9. 증분 변위벡터

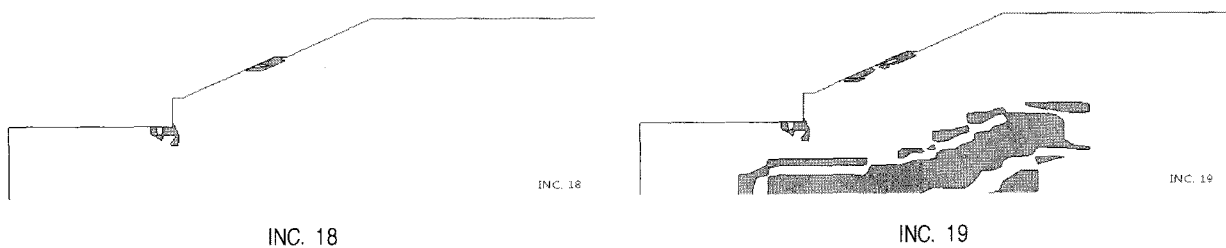


그림 10. 보강재 설치 전 소성영역

변위가 보강부와 미보강부를 경계로 현저한 차이가 발생함을 보였다. 특히 옹벽상부로 변위가 집중되는 특성을 나타내었다. 보강재의 구속효과로 인해 사면외부로 향하는 변위 보다는 하향의 변위가 지배적으로 나타났다. 보강재의 역할로 보강사면이 파괴할 때는 훨씬 더 큰 영역으로 파괴가 일어날 수 있음을 보였다.

#### 2) 소성영역 발생과정

보강사면의 소성영역은 보강재 설치 전, 보강재 설치 후 그리고 비배수조건인 3가지 경우로 살펴보았다.

##### a. 보강재 설치 전(Case 1)

그림 10은 옹벽만 설치되고, 보강재는 설치하지 않은 경우의 소성영역을 보인 것이다. 초기에 보강 사면의 옹벽하부 및 사면 중간에서 국부적인 소성변형을 보이다가 옹벽하부로 대변형이 진전될 수 있음을 보였다.

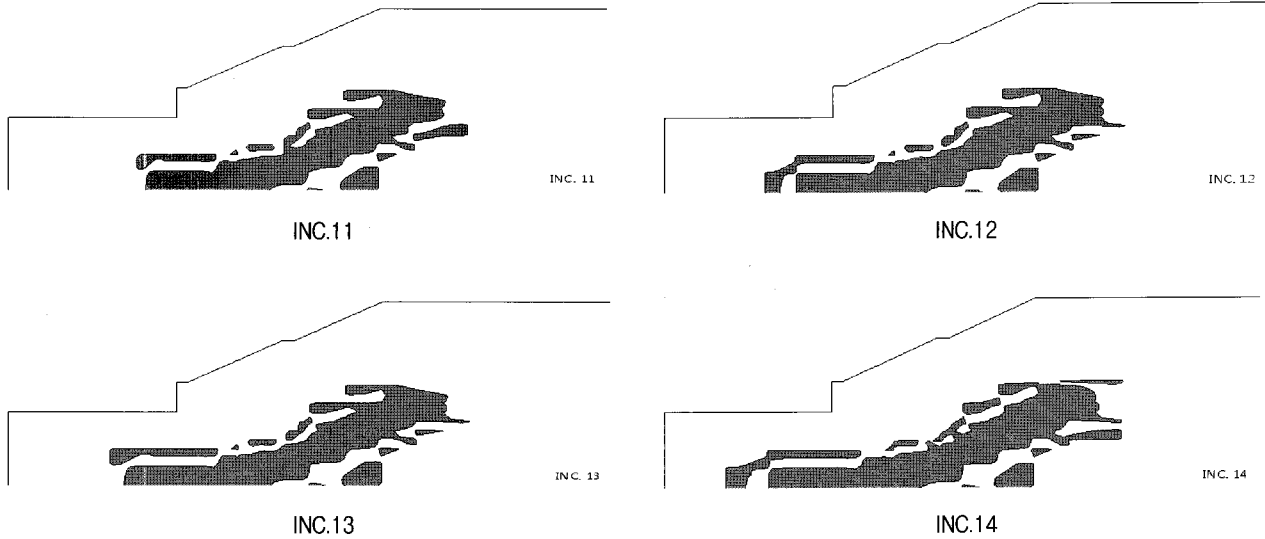


그림 11. 보강재 설치 후 시간경과에 따른 소성영역

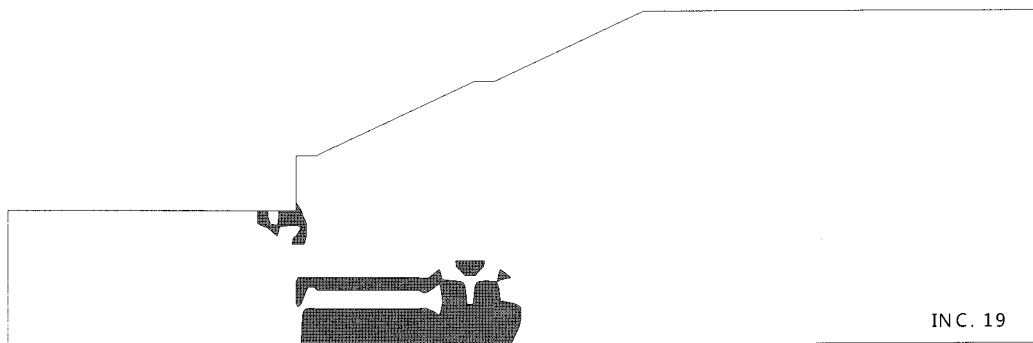


그림 12. 비배수조건 소성영역

b. 보강재 설치 후(Case 2)

그림 11은 보강재 설치 후 시간경과에 따른 소성영역을 나타낸 것이다. 보강재 설치 이후 국부적인 파괴는 발생하지 않았으며 보강영역에서 소성영역이 발생되지 않았다. 이는 보강재의 영향으로 하중이 지반 저부로 전달되어 원호형태의 소성영역의 큰 확장없이 파괴가 점진적으로 발생함을 보였다. Case 3, 5는 안전율에서 차이가 발생하였으나 소성영역 발생범위는 유사하였다.

c. 비배수 조건(Case 4)

그림 12는 비배수 조건의 소성영역을 보인 것이다. 비배수 조건인 Case 4의 경우 저부에서 소성영역이 국부적으로 발생하고 짧은 시간에 파괴가 일어남을 보였다. 이 경우 저부파괴가 과대하게 발생하였으나 이 변형이 상부로 전이되는 현상은 나타나지 않았다.

3) 해석결론

각각의 경우에 따른 안전율은 그림 13과 같다. 미보

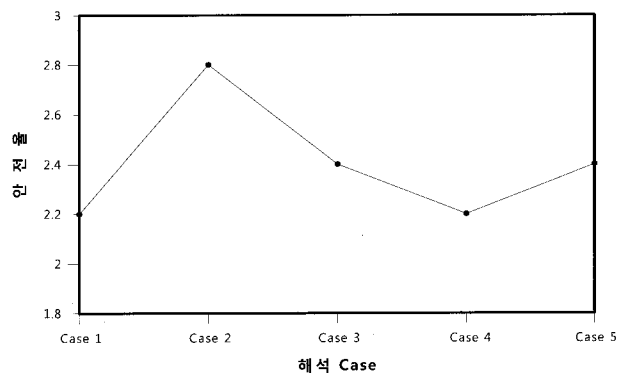


그림 13. 안전율

강, 배수공 미설치 시 낮은 안전율을 보였다. 보강사면의 해석결과로부터 사면의 수리경계조건 및 보강상태가 안전율 및 파괴모드에 현저한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히 안전율은 보강재의 투수경계조건에 따라 2.2에서 2.9까지 변화함을 보이는 바, 이는 기존사면에 있어 배수관리가 중요함을 시사하는 것이다. 해석조건에 따른 파괴모드의 차이는 그림 14에 나타내었다.

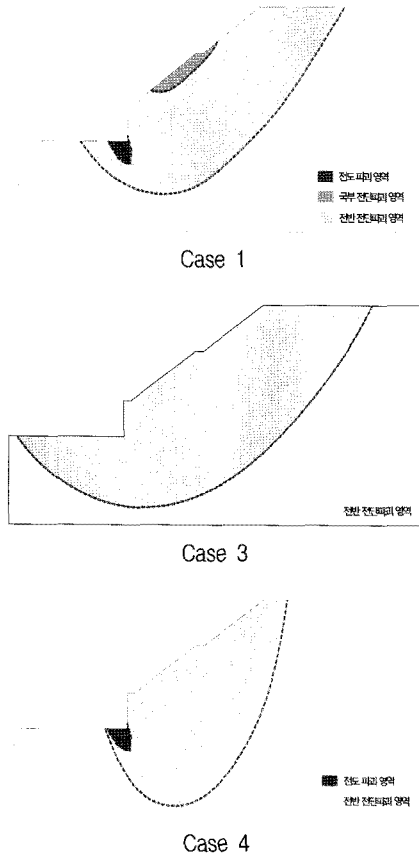


그림 14. Case별 잠재 파괴영역

국부파괴의 가능성도 있으나, 대체로 보강영역을 넘는 큰 영역의 파괴면이 형성될 수 있음을 보였는데, 이는 사면의 보강이라는 당초효과는 만족이 되었으나, 보강이 전반파괴의 가능성도 줄였다고는 볼 수 없다는 사실을 시사하는 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 연계해석법을 이용하여 기존사면의 안정성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 미보강 및 보강사면의 두 형태 사면모델을 선정하여 거동과 안정특성을 분석하였다. 본 해석을 통해 확인된 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 사면의 초기응력상태는 지반제거방식을 통해 구현할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 변위-간극수압 연계 모델을 통해 안전율과 거동의 시간에 따른 변화를 모사할 수 있었다.
- (3) 연계해석법을 도입함으로써 배면강우, 배수공, 보강 및 보강공을 모델링에 포함 가능하였다.
- (4) 또한, 수리경계조건 및 투수성 차이를 적절이 모델

링 가능하였다

- (5) 보강사면의 해석결과, 보강여부 및 수리경계조건에 따라 파괴모드가 현저히 달라질 수 있음을 보였다

본 연구로부터 강우 시 사면붕괴가 발생하는 기존사면의 거동 및 안정특성을 변위와 수압을 연계하는 수치해석의 강도감소법을 사용하여 모사할 수 있음을 확인하였다. 이로부터 향후 시간의존적 거동이 지배적인 사면의 안정평가 시 연계 유한요소해석이 평가도구로서 활용될 수 있음을 보였다.

#### 감사의 글

본 연구는 소방방재청의 2007년 자연재해저감기술사업인 “사면붕괴 예측 및 대응기술 개발” 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. 국립방재연구소 (1998), “사면안정성 조사와 피해 경감을 위한 기초연구”, 국립방재연구소, pp.99-157.
2. 한국도로공사 (1996), “도로설계실무편람”.
3. 한국지반공학회 (1997), “사면안정”, 구미서관.
4. Abramson, L.W., Lee, Thomas S., Sharma, Sunil and Boyce, G.M. (1996), “Slope stability and stabilization methods”.
5. Biot, M.A. (1941), “General theory of three dimensional consolidation”, *J. Appl. Physics*, Vol.12, pp.155-169.
6. Blong, R. J. (1973), “A numerical classification of selected landslides of the debris slide-avalanche-flow type”, *Eng. Geol.*, 7, pp.99-114.
7. Brunsden, D. (1979), “Mass movements”, In: *Progress in Geomorphology*. (C. E. Embleton and J. B. Thornes, Eds), Arnold, pp.130-186.
8. Dawson, E.M., Roth, W.H. and Drescher, A. (1999), “Slope stability factors of safety by strength reduction”, *Technical note submitted to Geotechnique*.
9. Duncan, J.M. (1992), State-of-the-art : “Static stability and deformation analysis”, *Proc. Vol.I, ASCE*.
10. Duncan, J.M. (1996), “State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.122, No.7, pp.577-596.
11. Ground Engineering (2006), Swept away, Technical Notes, pp.29-31.
12. Potts, D.M. and Zdravkovic, L. (1999), *Finite element analysis in geotechnical engineering, Theory*, Thomas Telford, London.
13. Terzaghi, K. (1950), “Mechanism of landslides”, *Geol. SOC. AM, Berkeley volumes*, pp.83-123.

(접수일자 2008. 8. 4, 심사완료일 2009. 2. 2)