

강우침투를 고려한 사면의 변형특성모델

A Combined Model of Deformation Characteristics and Seepage for a Slope

신승목, Seungmock Shin, 동국대학교 토목공학과 박사과정 수료
김상규, Sang-kyu Kim, 동국대학교 토목공학과 교수
장연수, Yeonsoo Jang, 동국대학교 토목공학과 교수
박종관, Jongkwan Park, 서울산업대학교 토목공학과 교수

개요(SYNOPSIS): 우리나라 산사태의 대부분은 사면의 깊이가 얇은 상태에서 발생하며, 지형적 지질적 및 강우조건에 따라 각기 다른 사면 파괴의 형태를 보여주고 있다. 본 논문에서는 IFDM의 기법을 이용하여 강우침투에 의해 발생할 수 있는 불포화지반으로의 침윤전선의 진행, 간극수압의 시간적 발생과정 등을 포함하는 침투해석을 수행하였다. 침투해석으로 얻은 강우침투 결과를 hyperbolic 용력-변형을 모델에 조합하여 시간별로 용력-변형해석을 할 수 있는 모델을 제안하였다. 이 모델에 의한 해석으로써 용인군 창리 산사태 지역을 선택하여 기존의 한계평형법과 본 논문에서 제안한 모델의 결과를 비교하였다.

1. 서론

지금까지 산사태에 대한 안정해석에 있어서는 통계적 방법에 의존하거나 또는 한계평형법에 의해 사면의 파괴여부를 판단하고 있으며, 다만 제한적인 조건하에서 수치해석의 방법이 행해져 왔다. 산사태는 지질, 지형, 식생 및 기후조건 등 여러가지 요인이 복합적으로 작용하여 발생된다는 것으로 알려지고 있으나, 이중 강우조건 하나만을 고려하여도 이와 사면을 구성하는 지질상태에 따라 침투력의 크기는 달라진다. 본 논문에서는 창리 산사태 지역을 대상으로 IFDM(Integrated Finite Difference Method) 기법을 적용하여 사면내에서 발생하는 강우로 인한 여러가지 침투현상을 규명하고, 여기서 얻은 결과를 이용하여 시간별 사면의 변형거동을 hyperbolic 모델로 해석하였다. 이 모델에서 얻어진 사면파괴를 예측한 결과는 한계평형법으로 구한 안전율과 현장조사를 통해 얻은 결과와 비교하고자 한다.

2. IFDM(Integrated Finite Difference Method)과 Hyperbolic Model의 조합

IFDM의 최초개발은 Mac Neal(1953)에 의해 이루어졌으며 전기공학의 분야에서 이차경계조건의 편미분 방정식을 푸는데 주로 이용되었다. 이 방법은 흐름영역을 분할하는 요소망의 크기를 유한차분법(FDM)과 달리 변화시킬 수 있으며, 곡선형태의 요소에도 적용할 수 있다는 커다란 잇점이 있다. 이후 Edwards(1969)에 의해

TRUMP라는 전산프로그램으로 투수문제에도 적용할 수 있도록 개발되었다. 이어서 1975년 Narasimhan에 의해 다공질 매체에 용력-변형 관계식을 도입하여 포화-비포화 흐름영역에 Terzaghi의 압밀론을 첨가하여 투수문제와 변형문제를 풀 수 있도록 개편된 프로그램 TRUST가 개발되었다. 그러나 이 프로그램은 횡방향을 구속한 상태의 조건이므로 지하수개발, 유정개발 등의 현장에서의 흐름-변형해석의 적용에는 적절할 수 있으나, 횡방향 변형까지를 고려해야 하는 강우에 의한 사면의 흐름-변형의 문제에는 적절치 못하다. 따라서 실시간 투수-변형의 문제에 대해서는 토질공학 분야의 많은 학자들에 의해 논의되고 검증된 hyperbolic 모델에 IFDM으로 계산되는 침투력을 대입하면 강우침투에 의한 사면의 변형해석에 적절히 적용할 수 있는 새로운 모델이 만들어질 수 있을 것이다.

2.1 IFDM의 경계조건

일반적으로 흐름의 문제를 푸는데 필수적인 요소중의 하나가 경계조건이다. 이러한 경계조건은 주로 두가지를 고려하고 있다. 하나는 포텐셜(수두) 경계조건이고 다른 하나는 유량(flux) 경계조건이다. 특히 비포화흐름의 경우에는 침출면(seepage face), 증발, 증산 등을 고려하는 부가적인 경계조건이 필요하다.

1) 수두 경계조건과 유량 경계조건

이 수치모델에서는 유체의 이동은 표면의 절점과 수두 경계조

건으로 주어지는 계(system)와 그 주변 사이에서 발생되므로 흐름영역에서의 시간에 따른 수두의 변화와 유량의 변화는 표면 전도도(conductance)를 이용하여 구한다.

2) 침출면(seepage face)

포화-불포화 흐름문제는 침출면에 특별한 주의를 요한다. 침출면은 2가지 특징을 갖는다. (1) 침출면에서는 대기압이고 압력수두는 0, ($\psi=0$)이기 때문에 침출면의 수두는 위치수두, z 와 같다. (2) 유체의 흐름은 흐름영역과 그 주위의 침출면에서만 흐름 수 있다. 따라서 계산하는 매 단계마다 흐름영역내의 수두가 suction($\psi<0$)으로 인해 어떤 한계치 아래로 떨어지는가와 흐름영역내로 흐름이 발생하는 것을 방지하기 위해, 침출면이 불투수 경계면으로 인식되었는가를 검토해야 한다(Neuman, 1972).

3) 증발 및 증산 경계조건

지반과 대기의 접촉면간의 상호작용을 다룰때 지표경계면을 통한 물의 증발 및 증산을 고려해야한다. 흙으로부터 증발 및 증산으로 빠져나가는 수분의 양을 각각 potential evaporation(E_p)와 potential evapo-transpiration(E_{pt})이라 한다. E_p 와 E_{pt} 의 합은 주어진 경계면을 통과하는 유량을 나타내며, 마른흙 표면에서 발생하는 압력, ψ_s 과 뿌리에서 발생하는 최소압력수두, ψ_w 는 각각 흙-대기 경계사이의 상한치와 하한치를 나타낸다. 여기서 ψ_w 는 물리적으로 식물을 시들게하는 압력수두이며 ψ_s 와 ψ_w 는 미시기상학과 농경학적 자료를 근거로 결정할 수 있다. 흙-대기의 경계는 수두경계도 아니고 유량경계도 아니지만, 그 크기는 통상 표면의 경계수두의 최소값보다 약간 크다.

침투 경계조건은 증발 경계조건과 반대이다. 만일 표면에 더해가는 물의 양이 포화투수계수로 결정된 흙의 물 흡수능력보다 크다면 남는 양은 유출되어야만 한다. 지금까지의 연구에서는 증발-증산 경계조건은 수치해석모델에 포함되지 않았다. 그러나 여기서는 이들 조건을 원칙적으로 조절할 수 있다.

2.2 조합모델의 계산과정

본 논문에서 제안하는 조합모델은 앞에서 언급한 바와 같이 침투해석으로 IFDM을 사용하고, 그 결과를 hyperbolic 모델에 입력한 것이다. IFDM에 의한 침투해석 결과는 각 절점에서의 압력수두, 동수경사와 침투수력, 각 요소에서의 속도 및 유량 등, 3가지 형태의 결과를 얻을 수 있다. 산지사면의 경우, 강우시에는 사면내의 흐름은 대부분 정상류(steady-state flow)가 되기 이전의 상태이므로

사면내에는 침투력이 발생하게 된다. 우리나라 산사태는 강우도중 혹은 강우종료 직후에 파괴되는 양상을 보이고 있으므로 변형 및 파괴의 적용에는 hyperbolic 모델에 대해서는 침투력의 적용이 더 실제적일 것이다. 따라서 이러한 과정을 모사하기 위해 hyperbolic 모델을 프로그램화 하고 있는 FEADAM 프로그램의 점증하중 입력항에 침투력을 입력하여 변형 및 파괴거동을 살펴보았다.

3. 투수-용력변형 모델에 의한 적용예

본 절에서는 1991년 7월에 발생한 용인-안성 산사태의 대표적인 유형중의 하나인 용인군 남사면 창리를 대상으로 투수-용력변형 해석을 실시하고 한계평형법에 의한 안정해석과 비교하여 보았다.

3.1 용인군 남사면 창리의 입력자료

투수-용력변형 해석에는 첫째, 현장의 지질조건이 필수적이다. 이곳의 지질상태는 현장조사를 통하여 다음과 같이 조사되었다. 표토층의 두께는 약 40cm 정도로 기반암을 덮고 있었으나, 사면 상부의 38° 부분에서 부터 산사태가 발생하여 절리가 매우 발달한 상태로 풍화된 기반암이 노출되어 있다.

둘째, 현장 토질에 대한 물성시험값이 필요하다. 현장 지질에 대한 물성자료는 산사태 발생지의 측면 0.2m와 0.4m 깊이에서 시추시험과 들밀도시험 및 실내시험을 통하여 표 3.1과 같은 결과를 얻었다.

표 3.1 시추시험과 들밀도시험 결과

깊이 (m)	비중 (G_s)	함수비 (%)	간극율 (n)	전체단위중량 γ_t (t/m^3)	분류
0.2	2.65	14.7	0.53	1.42	SW-SM
0.4	2.67	12.9	0.53	1.42	SP-SM

셋째, 침투해석을 위한 투수계수가 요구된다. 지층내에 존재하는 macro pore 등을 포함하는 현장투수시험을 실시한 결과 $2 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-5}$ m/sec로 나타났다. 특히 macro pore 부분의 투수계수는 Brady and Brown(1985)이 제안한 균열존재시의 투수계수 산정식을 이용하여 1×10^{-2} m/sec로 산정하였다. 포화-비포화 흐름의 계산에는 부간극수압-투수계수, 부간극수압-체적함수비의 관계를 나타내야 하는데, 이 관계는 현장에서 측정된 포화투수계수와 간극율을 감안하였다.

넷째, 산사태 당시 발생한 강우자료가 요구된다. 이 지역에 대한 강우자료는 산사태가 발생한 1991년 7월 21일 오전 4시부터 오후 10시까지 인근 수원관측소에서 관측된 자료를 이용하였으며 그림 3.1에 나타나 있다.

다섯째, 용력-변형해석에 필요한 Hyperbolic 모델의 매개정수가 요구된다. 표 3.1에서 시험된 토질의 분류는 SW-SM, SP-SM이므로 이에 대한 Hyperbolic 모델의 매개변수는 Duncan(1981)의 시험자료로부터 선택하였다. 이에 대한 것은 표 3.2에 나타나 있다.

표 3.2 용력-변형 해석을 위한 매개변수자료(from Duncan, 1980)

Soil	내부마찰각 (°)	K	n	R _r	K _s	m
SW	38	260	0.5	0.76	100	0.5
GP	48	2500	0.21	0.75	1400	0
Rock	58	10000	0.78	0.92	5200	0

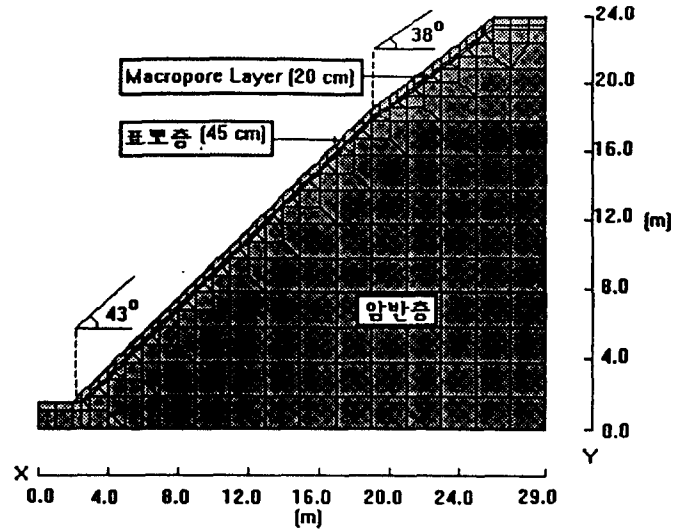


그림 3.2 창리 산사태 지역의 요소망

있다. 침투해석 결과는 각각 강우발생후 7, 8, 10 시간경과 후에 대한 것으로, Perched water table은 시간이 진행됨에 따라 macro pore 층이 단절되는 부근의 표토층으로부터 형성되며 이 층을 따라 발전되기 시작하여 macro pore층이 시작되는 사면상부 부근에서 확산되고 있다. 이로 인해 macro pore층을 따라 침투수압이 작용하게 되고, 특히 macro pore층이 끝나는 부근에서는 큰 침투수압이 작용하게 되어 순간적이고 국부적인 사면파괴에 이르는 원인이 될 수 있다.

2) 최대전단 변형율과 변위

그림 3.6, 3.7, 3.8은 강우발생후 각각의 사면에서 발생하는 최대전단변형율 분포도를 나타낸 것이다. 7시간 경과후의 최대전단변형율은 5% 정도를 보이고 있으나 8, 10시간이 경과함에 따라 macro pore층의 부근에서 15% 이상의 변형율을 보이고 있다. 그림 3.9, 3.10, 3.11은 각각 7, 8, 10 시간경과후의 변위벡터를 보여주고 있다. 이 그림은 최대전단변형율의 분포도와 상응하게 7시간 경과후는 macro pore층의 하단부에서 변위가 발생되어 8, 10 시간이 경과함에 따라 macro pore층의 상단부로 발전되어 가는 과정을 보여주고 있다.

3) 용력수준

Hyperbolic 모델에서 용력수준은 다음의 식으로 정의 된다.

$$SL = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_i} \quad (3.1)$$

여기서, SL: 용력수준

($\sigma_1 - \sigma_3$): 현재의 용력상태

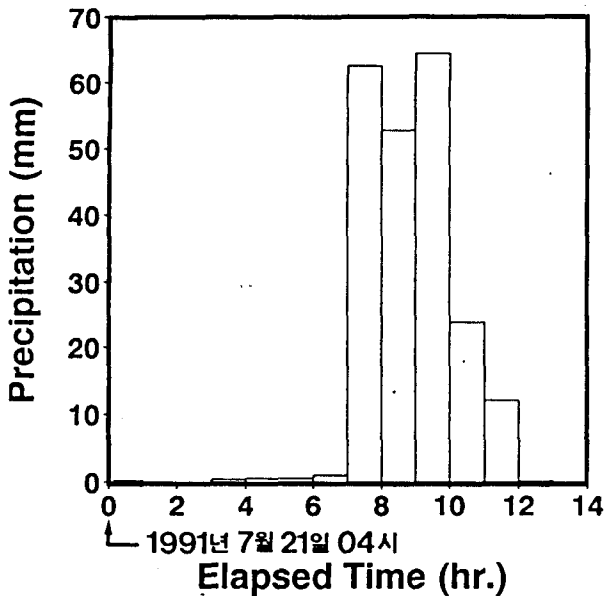


그림 3.1 관측강우량(1991년 7월 21일, 수원관측소)

3.2 침투-변형해석 결과 및 분석

IFDM과 hyperbolic 모델을 조합한 실시간 용력변형해석을 위한 요소망은 그림3.2에 나타나 있다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 요소는 암반층, 표토층 및 Macro pore 층으로 구성되어 있으며, 사면의 경사는 현장조사를 토대로 사면하부에서 43°, 사면상부에는 38°로 나타내었다. 해석결과는 1) 강우침투시 perched water table이 형성되는 7, 8, 10 시간경과에 대한 발전과정을 보여주고, 2) 최대전단변형율 3) 용력수준 4) 한계평형법에 의한 안전율과의 비교에 대한 것으로 이루어 진다.

(1) Perched water table

Perched water table의 시간별 발전과정은 그림 3.3-3.5에 나타나

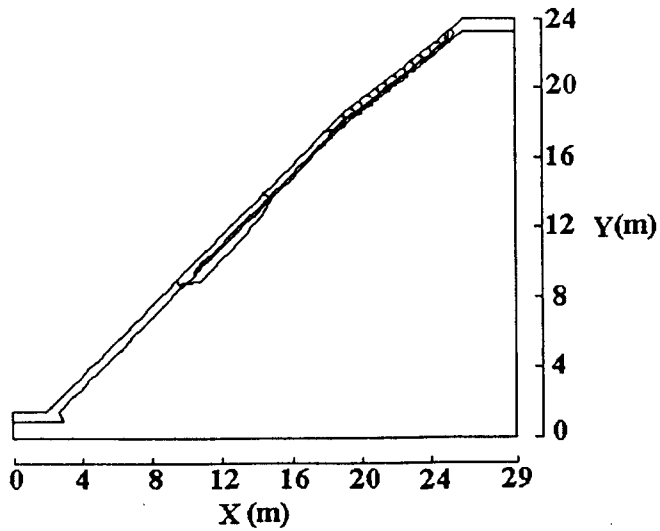


그림 3.3 Perched water table(7시간 경과후)

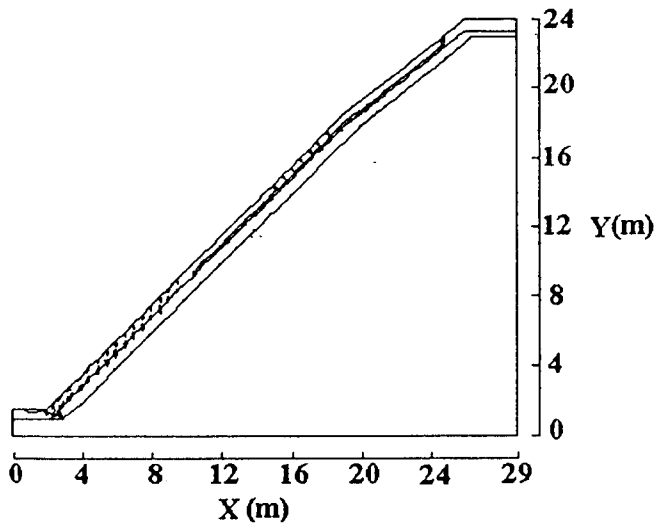


그림 3.4 Perched water table(8시간 경과후)

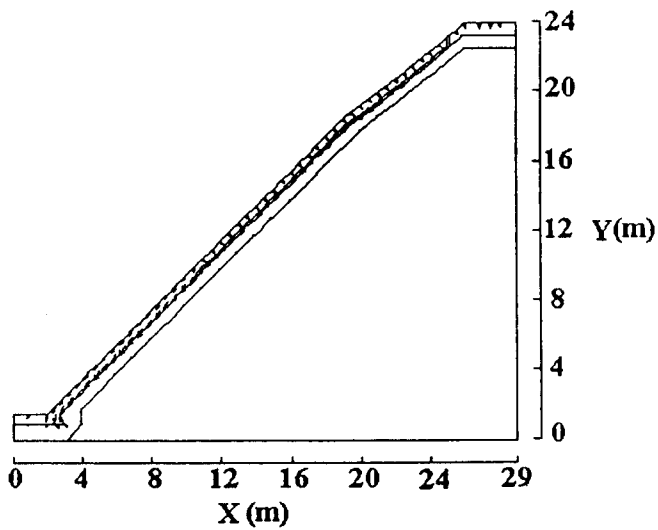


그림 3.5 Perched water table(10시간 경과후)

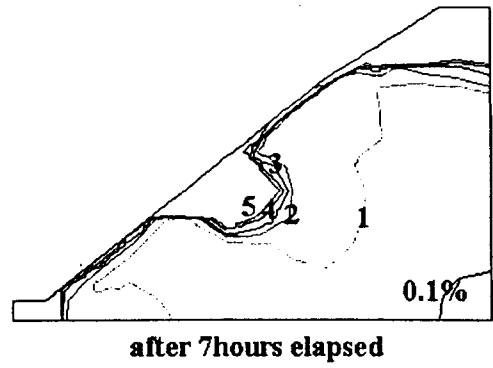


그림 3.6 7시간 경과후의 최대전단변형률 분포도

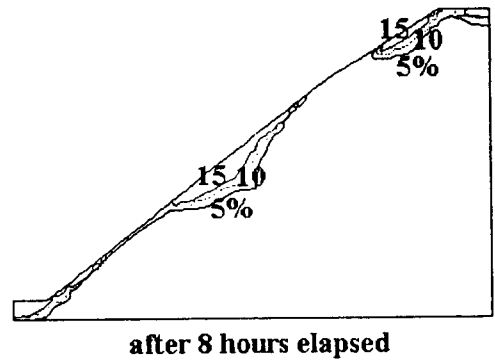


그림 3.7 8시간 경과후의 최대전단변형률 분포도

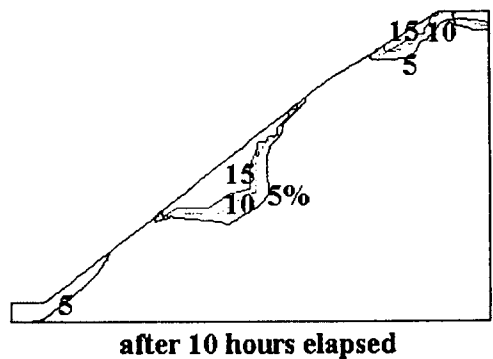
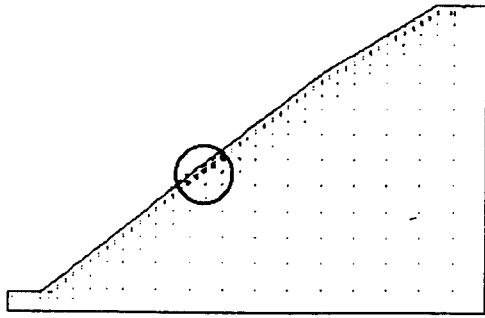


그림 3.8 10시간 경과후의 최대전단변형률 분포도

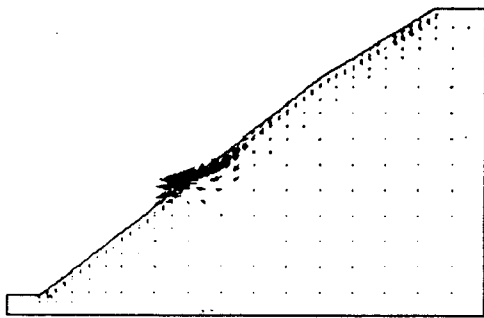
$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 파괴시의 응력상태

응력수준은 식 (3.1)에서 파괴시의 응력상태를 기준으로 현재의 응력상태를 표시하므로 한계평형법의 안전율의 개념과 비교될 수 있다. 그림 3.12, 3.13, 3.14는 각각 7, 8, 10시간후의 응력수준 분포도를 나타낸 것인데, 7시간 경과후의 응력수준도는 macro pore층의 하단부에서 파괴위험 단면이 발생되고, 8시간 경과후에는 macro pore층의 상단부에 위험단면 발생되고 있으며, 10시간이 경과하면 macro pore층의 상단부에서 하단부로, macro pore층의 하단부에서



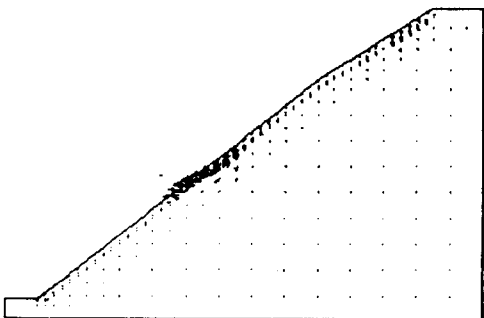
after 7 hours elapsed

그림 3.9 7시간 경과후의 변위벡터



after 10 hours elapsed

그림 3.10 8시간 경과후의 변위벡터



after 8 hours elapsed

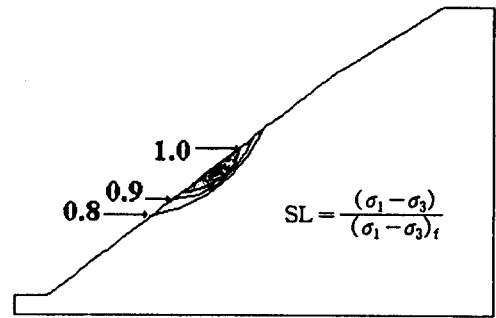
그림 3.11 10시간 경과후의 변위벡터

상단부로 발전되고 있다. 이는 사면의 파괴과정 양상을 시간별로 구현하고 있으며 파괴면의 추정도 가능하게 한다.

4) 한계평형법에 의한 사면안정해석

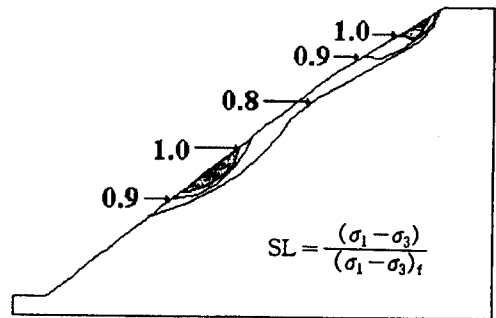
여기서 이용한 사면안정 해석은 Bishop의 간편법을 적용하여 프로그램 STABL을 사용하여 7, 8, 10시간 경과 후의 사면안정 해석을 실시하였다. 그 결과 7, 8, 10시간 경과후 안전율은 그림 3.15, 3.16, 3.17에 보이는 바와 같이 각각 1.192, 0.964, 0.820로 계산되었

다. 이 둘 그림으로 부터 사면의 파괴는 7-8 시간 사이에 파괴가 발생하였음을 보여주고 있다. 그러나 한계평형법에 의한 해석은 3) 절의 그림 3.12-3.14가 보여주는 국부파괴 현상이나 파괴면의 확산 과정을 표현하지 못하며, 파괴면 역시 원호 혹은 직선으로 가정하여 안전율을 구하게 되므로 표층이 얇은 사면의 경우, 적절한 안전율을 구하는 데는 문제가 있을 것으로 사료된다.



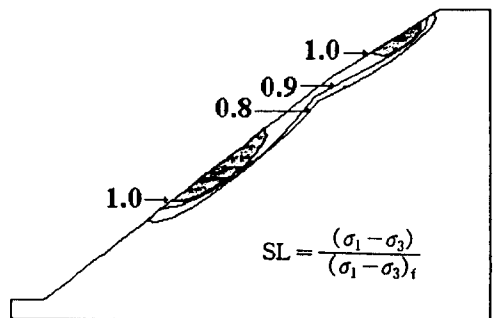
after 7 hours elapsed

그림 3.12 7시간 경과후의 용력수준



after 8 hours elapsed

그림 3.13 8시간 경과후의 용력수준



after 10 hours elapsed

그림 3.14 7시간 경과후의 용력수준

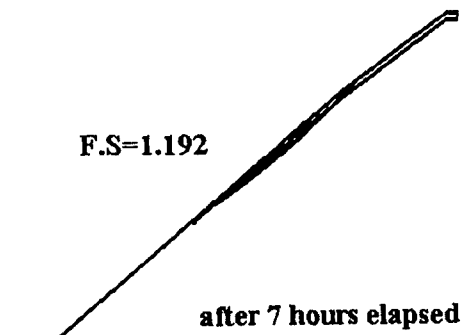


그림 3.15 7시간 경과후의 안전율과 파괴면

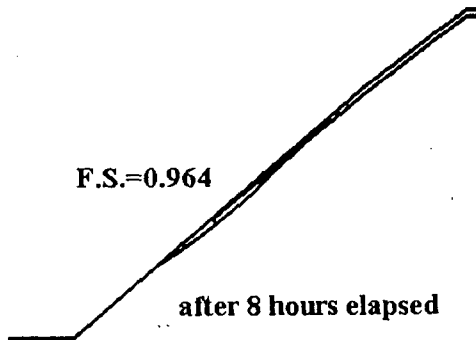


그림 3.16 8시간 경과후의 안전율과 파괴면

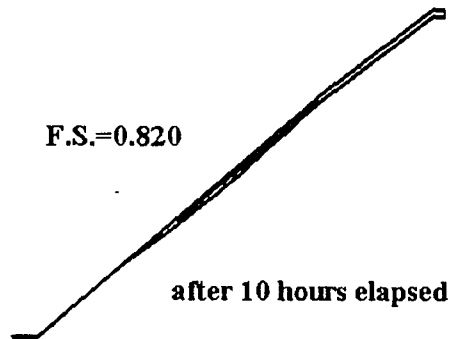


그림 3.17 10시간 경과후의 안전율과 파괴면

4. 결론

본 논문에서는 제 강우시간의 변화와 강도에 따른 사면의 용력-변형해석을 수행하여 사면파괴 양상과 발전과정을 알아보았다. 그리고 기존의 한계평형법과 본 논문에서 제안한 모델의 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 논문에서 제안한 모델은 사면내에서 발생하는 침투수압을 계산하고, 이로 인한 변형율과 용력수준의 변화로부터 파괴과정 및 파괴면을 모사할 수 있다.

2) 강우강도와 강우지속 시간의 변화에 따른 파괴시간의 예측 및 파괴면의 추정은 한계평형법으로 구한 안전율에 의한 것보다 제안된 모델로서 더 적절하게 나타낼 수 있다.

3) 제안된 모델을 용인군 창리 산사태 지역과 같이 사면의 두께가 얇고 macro pore층이 존재하는 사면에 적용한 결과, 파괴의 양상은 먼저 macro pore층의 하단부에서 국부적인 파괴가 일어나고 시간이 경과함에 따라 macro pore층을 따르는 사면으로 파괴가 확산되어 1시간 정도의 짧은 시간내에 급격한 파괴가 일어나는 것을 나타내고 있으며, 이 결과는 현장조사를 통한 파괴유형과 유사한 양상을 보인다.

5. 참고문헌

1. Bradley B. H. and Brown E. T. (1985), "Rock Mechanics for Underground Mining", George Allen and Union(Publicatins) LTD, U.K.
2. Duncan J. M., Peter Byrne, Kai S. Wong and Phillip Mabry(1980), "Strength, Stress-strain and Bulk Modulus Parameters for FEA of Stresses and Movements in Soil Mass," Report No. UCB/GT/80-01, U.C. Berkeley, California.
3. Edward, A.L.,(1969), "TRUMP: A Computer Program for Transient and Steady State Temperature Distributions in Multidimensional Systems, National Tech. Information Ser. UCRL 14754, Rev. II, Springfield Virginia, 22151, pp. 265.
4. Green R.E. and Corey J. C. (1970), "Calculation of Hydraulic Conductivity: A Further Evaluation of Some Predictive Methods", Soil Science Society of American Proceedings, Vol. 35, pp. 3-8.
5. Mac Neal, R.H.(1953), "An Assymmetrical Finite Difference Network, "Quart. Appli. Math. pp. 295-310.
6. Narasimhan, T.N.(1975), "A Unified Numerical Model for Saturated-Unsaturated Grounwater Flow", PH.D. Dissertation in Engineering Science, Civil Engg. U.C. Berkeley
7. Neuman, S.P.(1973), "Saturated-Unsaturated Scepape by Finite Elements", Jour. Hydr. Div. ASCE 99 HY12, pp. 2233-2250.
8. STABL(1975), "STABL User Manual," Joint Highway research Project (JHRP) No. 75F-9, Purduc Univ., West Layfaette.
9. 김상규, 장연수, 서홍석, 류지협(1993), "사면내 균열의 산사태 활동에 미치는 영향에 관한 연구," 한국지반공학회 사면안정위원회 학술발표회집 제2집, pp. 99-107.