

## 999번 지방도로 경상북도 안동시 위리 지역의 사면 변형 및 안정성 분석

### Analysis of Deformation and Stability of Slope at the Wiri Region of Local Road 999 Nearby Andong, Gyeongsangbukdo in Korea.

장 현 식 (Hyun Sic Jang)

강원대학교 지구과학부

장 보 안 (Bo-An Jang)

강원대학교 지구과학부

#### 요약 / ABSTRACT

경상북도 안동시 임동면에 위치한 999번 지방도로 위리 지역에 고개 마루를 절취하여 도로 개설 공사를 시행한 후, 강우량이 많을 때 산측이 침하하고 도로가 융기하는 등 사면이 불안정하게 활동하였다. 이 연구에서는 위리 지역의 변형 발생의 원인을 분석하고, 수치해석을 통하여 연구지역 사면의 안정성을 평가하였다.

연구지역은 백악기 셰일, 이암 및 사암으로 구성되어 있으며, 북북서 및 북북동 방향의 두개의 단층이 분포하고 있다. 사면의 변형은 지하수위의 증가에 따른 단층 점토의 전단강도 감소, 간극수압의 증가, 단위중량의 증가 등으로 인하여 단층을 따라 사면이 이동하면서 발생하며, 위의 여러 요인 중에서 단층 점토의 전단강도 감소가 사면의 변형에 가장 큰 요인으로 밝혀졌다. 사면의 안정성 및 변형 정도를 파악하기 위하여 사면에 8개의 단면을 설정한 후 한계평형법, 유한 요소법 및 유한 차분법을 이용하여 해석을 실시하였다. 해석 결과, 지하수위가 단층면 아래에 분포할 때 안전율은 1.7 이상이지만, 지하수위가 지표면까지 상승하면 안전율은 1.0 이하로 감소하고, 15~30cm의 변위가 발생하는 것으로 해석되어 위리 지역에 발생한 변형과 거의 유사한 결과를 보여준다. 안정화 공사가 끝난 현재에는 지하수위가 지표면에 도달하여도 각 단면의 안전율은 2.4 이상이고 2.8cm 이하의 변위가 발생하여, 이 지역의 사면은 매우 안정한 것으로 판단된다.

**주요어** : 위리지역, 사면 변형, 안정성 분석, 안전율, 수치해석

Heaving of road and subsidence of slope took place at the Wiri region of the local highway 999 in Gyeongsangbukdo, Korea after heavy rain in the next year of construction. Although the state

government had performed remedial treatments by reducing the angle and the height of the slope, deformation had never stopped. Therefore, we have preformed the analysis of deformation and stability of the slope.

Study area consists of the Cretaceous shale, siltstone and sandstone and two faults are found. The major deformation occurred by sliding of rock mass along faults after heavy rain because not only the pore pressure at the fault plane and the unit weight of sliding mass increased, but did the shear strength of saturated fault clay become very low. The decrease in shear strength of saturated fault clay is the major factor among the reasons for deformation. Numerical simulations using limit equilibrium model, finite difference model and finite element model were performed for eight cross sections. Although safety factors are above 1.7 during the dry season, they become below 1.0 when groundwater level raises to surface. The maximum displacement is about 15-30cm. However, safety factors increased to above 2.4 and the maximum displacement is below 2.08cm after remedial treatment, indicating that the slope becomes stable.

**Key Words** : wiri region, deformation of slope, stability analysis, factor of safety, numerical simulation.

## 서 론

도로 개설과 같은 토목공사 및 각종 건설공사에 의하여 형성된 인위적인 절취사면이나 성토사면들은 우기나 장마철에 거의 매년 파괴가 발생하고 있는 실정이다. 특히 1999년 9월 10일 발생한 부산 황령산 터널 입구 도시고속도로 진입 인터체인지 인근 사면의 붕괴는 인명의 손실과 커다란 재산상의 피해를 유발하여 사면파괴에 대한 방지대책이 절실히 요구되고 있다. 사면파괴에 대한 방지대책에 있어서 무엇보다 중요한 것은 초기 설계이다. 사면의 설계는 지질 조건 및 암반의 특성이 모두 다르기 때문에 표준적인 방법이나 해법이 없으며, 실제적인 해는 기초적인 지질자료, 지반의 강도에 대한 정보, 지하수 관측 및 공학적 지식에 입각한 적절한 대책으로부터 얻어진다. 이러한 요소들은 각 경우마다 다른 비율로 융합되므로 각 요소에 대한 정보를 신속하고도 효율적으로 수집하고 정돈된 방법으로 처리하여야 한다. 최근 들어 이들 정보를 처리 분석하는 능력은 computer의 빠른 발달에 의하여 매우 지능화되고 고속화되었다.

본 연구에서는 사면의 파괴 및 지반의 활동으로 인하여 커다란 사회적 문제가 발생한 지역인 경상북도 안동시 임동면에 위치한 999번 지방도로 위리

지역을 선정하여 지질학적, 공학적 기초자료를 조사, 수집하고, 이러한 자료를 토대로 사면의 안정성을 computer를 이용한 다양한 수치해석을 통하여 분석하였다. 연구지역은 1987~1989에 고개 가루를 절취하여 도로 개설 공사를 시행하였고, 공사가 완공된 후부터 강우량이 많을 때마다 산측이 침하하고 도로가 융기하는 등 주변 지반이 불안정하게 활동하였다. 가장 최근에는 1997년 6월에서 7월 사이의 폭우로 인해 지반이 거동하여 도로가 파괴되는 재해가 발생하였으나, 현재는 활동부분을 절취, 제거하고 도로하부를 쇄석으로 치환하는 사면 및 도로 안정화 공사가 완료된 상태이다. 연구지역에서 실시된 기초 조사는 지표 지질조사와 시추 조사, 측량 조사 등이 수행되었고 토질 및 암반의 역학적 특성 및 물성을 획득하기 위하여 실내 역학실험과 XRD 분석 등을 실시하였다. 이렇게 얻어진 토질 및 암반의 물성을 시추 조사와 측량 조사 의해 구해진 지반 단면에 적용한 후, computer 수치해석을 실시하여 사면의 안전율, 지반의 변형량 등을 구하였고, 위의 결과를 토대로 사면의 안정성과 사면파괴의 원인을 분석하였다.

## 지 질

연구 지역은 한반도 남동부의 백악기 경상 분지 영양소분지의 서쪽 경계 지역에 해당하며(김남장 외, 1970; 장기홍, 1977), 경상누층군의 하양층군 동화치층의 사암과 셰일이 호층을 이루며 분포하고 있다(Fig. 1). 뚜렷한 지질구조로는 북북동 방향과 북북서 방향의 두 개의 단층이 사교하고 있으며, 두 단층 사이의 지반이 북북서 방향의 단층을 따라 아래로, 북북동 방향의 단층을 따라 위로 이동하여 산사면과 도로에 변형이 발생한다(Fig. 2). 북북동 단층의 경사는 매우 급한 반면에, 북북서 단층은 상부에서는 N15W, 40SW의 주향과 경사를 보이다가 하부에서는 N5E, 10~15NW 정도로 주향과 경사가 변하며, 퇴적암의 층리에 평행한 정단층의 운동감각을 나타낸다. 특히 단층면에는 두께 5~20cm 정도의 단층점토대가 발달되어 있으며, 단층면상에는 산사태를 야기시킨 암반거동에 수반된 미끄럼선(slicken line)(10~13/274~290)이 존재하여 미끄럼 방향을 지시해 주고 있다.

## 기 초 조 사

사면의 안정성 해석에 필요한 기초자료를 획득하기 위하여 시추조사, 지하수위 측정, 시추 코아 및 표토에 대한 실내시험, XRD 시험이 실시되었다.

시추조사는 NX 규격으로 2개 공에 대하여 최대 심도 25m까지 실시되었다. 시추조사 결과 연구지역의 지하 지질은 전반적으로 회백색 사암과 적색 셰일이 호층을 이루고 있으며, 부분적으로 역질 사암 내지 사질 역암이 협재되어 있다. RQD는 최대가 50% 정도로 균열이 상당히 심하게 발달하여 있음을 지시하고, 층리의 경사는 대략 10~20° 정도로서 일정한 양상을 보이며, 층리 방향으로 주 절리군이 관찰되었다.

지하수위는 시추조사에서 형성된 시추공에서 1998년 7월 21일 부터 8월 28까지 약 1개월에 걸쳐서 측정되었다. Fig. 3에서 보여지는 것과 같이 지하수위는 8월 3일까지 도로를 기준으로 지표하 약 11~13m 정도로 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 그러나 8월 1일의 약 33mm의 강우와 이후 몇 차례의 강우로 인하여 지하수위는 점점 상승하였고, 8월 15일에 내린 약 85mm 호우로 인하여 지하수위가 거의 지표면까지 상승하는 것으로 관측되었으

며 이 후에도 상당히 높은 지하수위를 유지하였다. 이와 같은 지하수위의 변화는 ① 장마시에는 지하수위가 상승하여 단층대내의 점토가 포화상태에 이르게되고, ② 집중 호우 시에는 지하수위가 지표면까지 급속하게 상승함을 지시한다.

해석에 필요한 기초자료를 얻기 위해서 표토 및 시추 코아에 대한 실내 역학시험을 실시하였다. 지표에 분포하는 토질은 대부분이 점토에 해당하며, 비배수 점착력(Cu)은 0.031~0.051 MPa, 직접전단 시험에 의하여 구해진 강도정수는 내부마찰각이 12~18.4°, 점착력은 0.0253~0.0442 MPa로 매우 연약한 점토이다. 시추조사에서 채취된 코아시료에 대한 물성 및 역학시험 결과, 시료의 비중은 2.61~2.64 정도로 전형적인 경상계 퇴적암의 값을 보이고 있으며, 인장강도는 12.3~17.9 MPa, 일축압축강도는 153.9~226.4 MPa, 삼축압축시험에서 측정된 내부마찰각은 38~39°, 점착력은 30.6~45.9 MPa로 측정되었다(한국수자원공사, 1999).

사면의 붕괴를 일으키는 단층면에는 단층점토가 분포하고 있으며, 점토의 팽창이 사면의 거동에 영향을 미칠 수 있으므로 XRD 분석을 통하여 단층점토의 종류를 분석하였다. XRD 분석에 사용된 시료는 단층면에서 채취된 점토에서 입자크기가 1 $\mu$ m 이하인 점토만 선별하여 평행하게 배열시킨 정향표본(oriented sample)을 사용하였다. XRD 분석 결과 단층점토는 illite가 주된 구성 광물인 것으로 확인되었고, illite는 다른 점토 광물에 비하여 팽창성이 매우 낮은 점토 광물이므로 단층점토의 팽창에 의한 사면의 활동 가능성은 배제하였다.

## 안정성 해석을 위한 단면 및 분석 단계 설정

해석을 위하여 연구 지역의 북쪽에 위치한 line-1로부터 남쪽에 위치한 line-8까지 총 8개의 2차원 단면을 설정하였다(Fig. 1). 각각의 단면은 단층면에서 관측된 미끄럼선(slicken line)에 평행하게 설정하였으며, 15m 간격으로 서로 평행하고, 표토층(soil), 활동지괴(active mass), 연약층(weak zone) 및 연암층(soft rock)의 4개의 층으로 구성되어 있다(Fig. 4). 표토층은 풍화토 및 심한 풍화암으로 지표로부터 약 3~5m 하부에까지 이른다. 연약층은

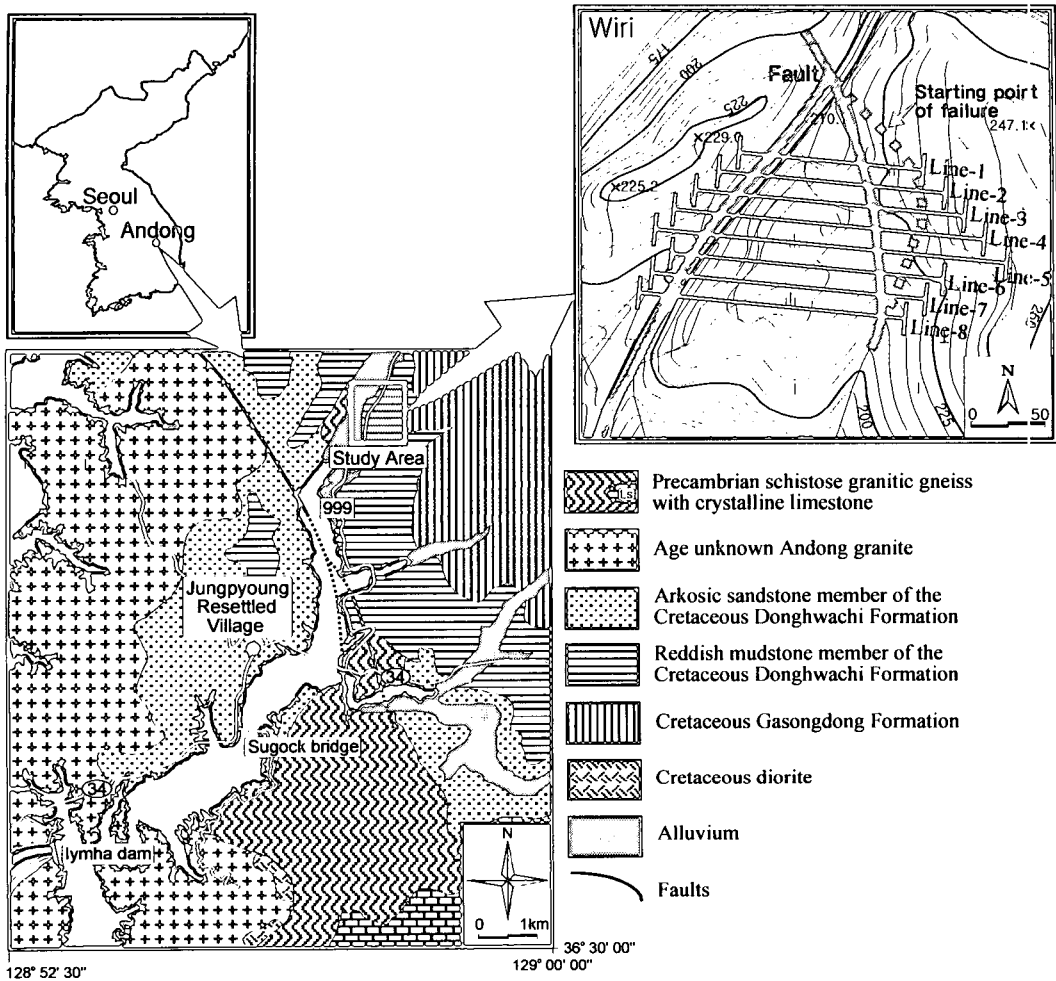
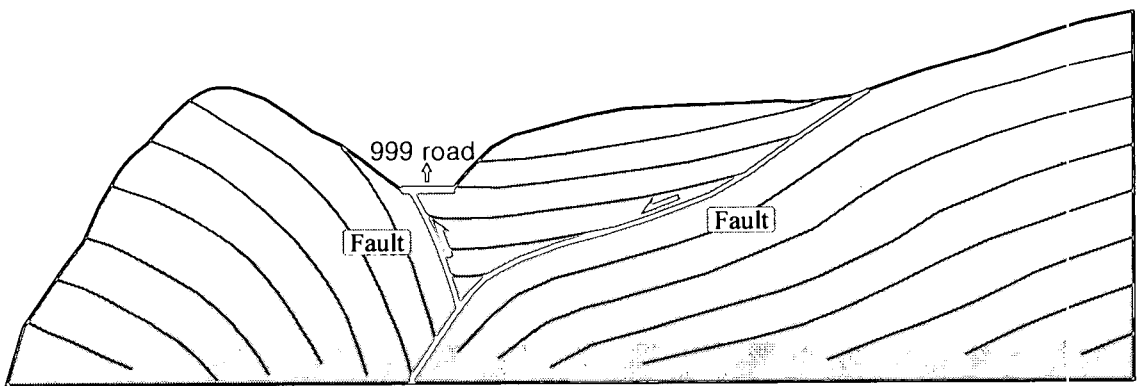


Fig. 1. Geological setting of the study area and locations of eight cross sections for numerical simulation.



NONE SCALE

Fig. 2. The schematic diagram showing the geological setting of the study area and shape of slope movement. Rock masses between two faults slid down along the right fault.

999번 지방도로 경상북도 안동시 위리 지역의 사면 변형 및 안정성 분석

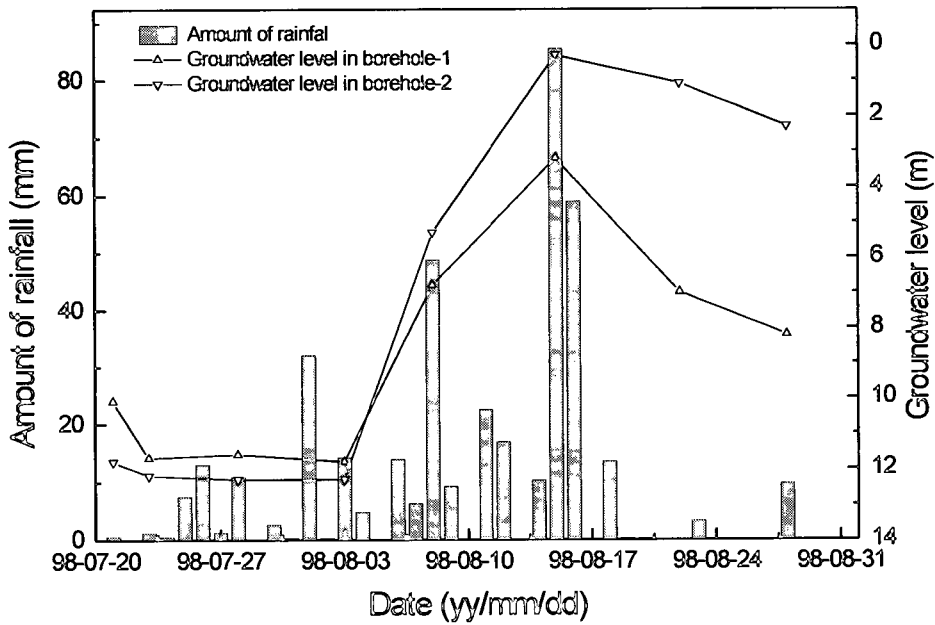


Fig. 3. The relationship between rainfall and groundwater level. Groundwater level began to rise up to the surface after heavy rain on August 1st and 15th.

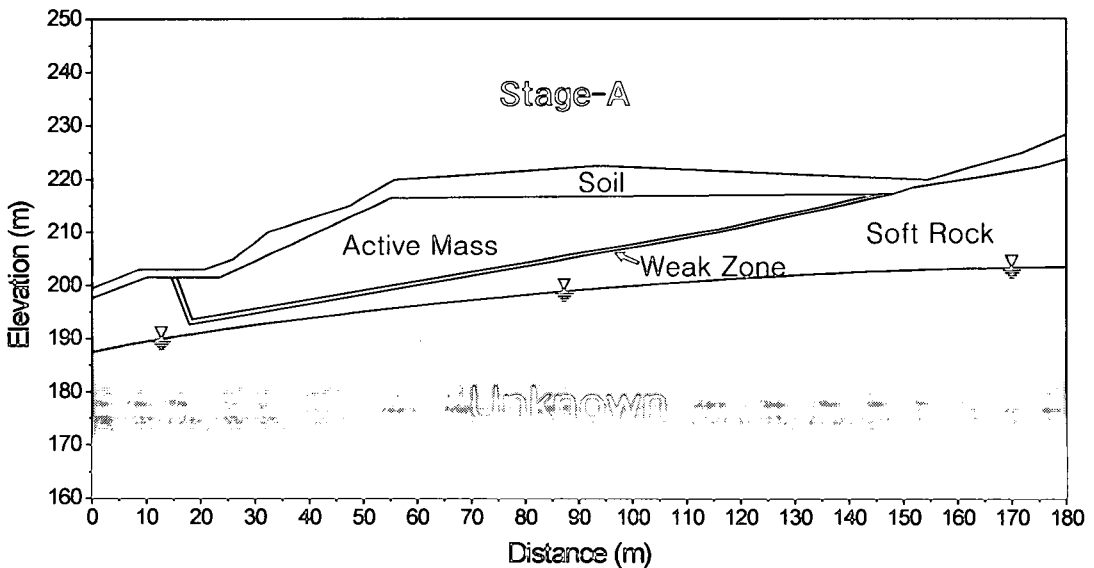


Fig. 4. Typical cross section of line for numerical simulation.

단층면과 동일한 면으로, 이 면을 따라 활동지괴가 미끄러진다. 연약층의 자세 및 위치는 안정화 공사로 인해 노출된 단층면을 측량하여 결정하였고, 지표면 아래는 상부에서 측정된 단층면을 연장시켜 설정하였으며, 약 10~30cm의 두께를 가진다. 활동지괴는 표토층과 연약층 사이의 지반으로 활동의 주체가 되는 지괴를 의미하며, 단층면 아래의 모든 부분은 연암층으로 가정하였다. 각 층의 물성 및 역학적 특성은 토질 및 암석의 실내시험에서 결정된 값을 사용하였으며, Table 1에 요약되어 있다.

위와 같이 구성된 각각의 단면에 대하여 지하수위의 변화와 사면 안정화 공사 전·후를 고려한 3단계에 대하여 수치해석을 실시하였다. 먼저 첫 번째 단계인 stage-A는 안정화 공사 이전으로 지하수위가 단층면 아래에 위치한 상태이고, 두 번째 단계인 stage-B는 stage-A의 조건에서 집중 강우로 인하여 지하수위가 지표면까지 상승한 조건이며, 마지막 단계인 stage-C는 안정화 공사를 끝난 후 지하수위가 지표면에까지 상승하였을 때로 설정하였다.

### 한계평형법을 이용한 해석

한계평형 해석은 미국 Purdue University에서 개발한 STABL5M software를 사용하여 실시하였다. STABL5M은 안정문제의 일반적인 해를 2차원으로 구하며, 사면의 안전율을 절편법(Janbu의 간편법)으로 계산한다. 안전율은 사면의 활동면상에서 활동

을 일으키고자 하는 합력에 대한 활동에 저항하고자 하는 합력의 비율로, 이론상으로는 안전율이 1 이상이면 사면은 안전한 것으로 인정되지만 지반 구조의 불확실성, 강도 정수의 불확실성, 계산상의 가정 및 오차 등을 고려할 때 일반적으로 허용 최소 안전율( $F_s > 1.5$ ) 이상이 되어야 사면이 안정하다고 간주한다.

한계평형 해석시에 적용된 각 지반의 물성은 연구 지역에서 획득된 토질 시료와 시추 코아 암석 시료에 대한 역학시험을 통하여 결정하였다(Table 1). 그러나 역학시험의 결과만으로는 강도정수를 결정하기 어려운 암반 지반에 대하여서는 RQD 및 굴착난이도를 고려한 암반 강도정수를 적용하여 결정하였고(전성기, 1998), 함수비에 따라 물성의 차이가 크게 나타나는 단층 점토(weak zone)의 경우 습윤 상태에서의 강도정수와 건조 상태에서의 강도정수를 구분하여 적용하였다.

한계평형법을 이용한 수치해석 결과 stage-A의 경우, 8개 단면 모두가 1.73이상의 안전율로 해석되어 stage-A의 지반은 안전한 것으로 분석되었다. 그러나 stage-B의 경우, 연구지역의 가장 북쪽에 위치한 line-1 단면을 제외한 모든 단면에서 허용 최소 안전율인 1.5 보다 낮은 값을 보여 불안정한 것으로 분석되었다(Fig. 5). 특히 line-3, 6, 7, 8 단면들은 1.0 보다 낮은 안전율을 나타내어 강우에 의하여 지하수위가 지표까지 상승하면 사면의 파괴가 필연적으로 발생함을 지시하고 있다. 안정화 공사 이후의 상태를 가정한 stage-C의 경우 모든 단

Table 1. Properties of soil and rock masses.

	Soil	Weak Zone	Active Mass	Soft Rock
Wet density, $\gamma_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	1735.0	1702.2	2544.0	2544.0
Saturated density, $\gamma_{sat}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2013.0	2029.0	2581.0	2581.0
Cohesion (MPa)	0.03415	0.03779	0.075	0.15
Friction angle (°)	15.5	0	19.3	35
Tensile strength (MPa)	0.03415	0.03779	0.075	0.15
Youngs modulus, E (MPa)	4.247	2.993	841	1778
Poisson's ratio, $\nu$	0.35	0.35	0.30	0.25

999번 지방도로 경상북도 안동시 위리 지역의 사면 변형 및 안정성 분석

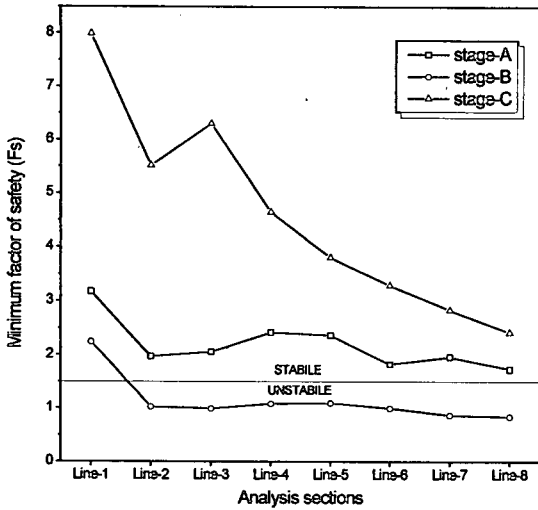


Fig. 5. Safety factors at each stage calculated using the limit equilibrium analysis. At stage B, all safety factors except line 1 are below 1.5 which is regarded as a minimum safety factor for slope.

면에서 2.4 이상의 높은 안전율을 나타내어 연구 지역은 안정화 공사로 인해 지반이 평형을 이룬 것으로 사료된다.

Fig. 6은 line-3, 6, 8 단면에 대한 stage-B의 분석 결과를 보여준다. 각 단면에서 대부분의 파괴면은 단층면을 따라 형성되었지만, 일부 안정성이 취약한 곳에서는 활동지괴 내에 인장균열이 형성되어 파괴면이 활동지괴를 절단하면서 형성되었다. 이러한 형태의 파괴면은 기 발생한 연구지역의 재해 현황과 비교적 일치하며, 단층면의 자세가 인장균열의 원인인 것으로 판단된다. Line-3에서는 파괴면의 시작 지점에 급한 경사의 단층면이 분포하고 있어서 활동지괴의 중량에 의하여 유발된 상당한 크기의 힘이 단층면의 아랫쪽, 즉 파괴면의 종단부로 작용하고 있다. 그러나 line-6, 8 단면은 급경사의 단층면이 분포하지 않아서 활동지괴의 오른쪽 부분에서 단층면의 아래로 향하는 힘의 크기는 매우 작은 반면에, 왼쪽 부분은 line-3 단면에서와 동일한 힘이 작용하여 인장응력이 형성되고, 그 결과 인장균열이 발생하는 것으로 판단된다.

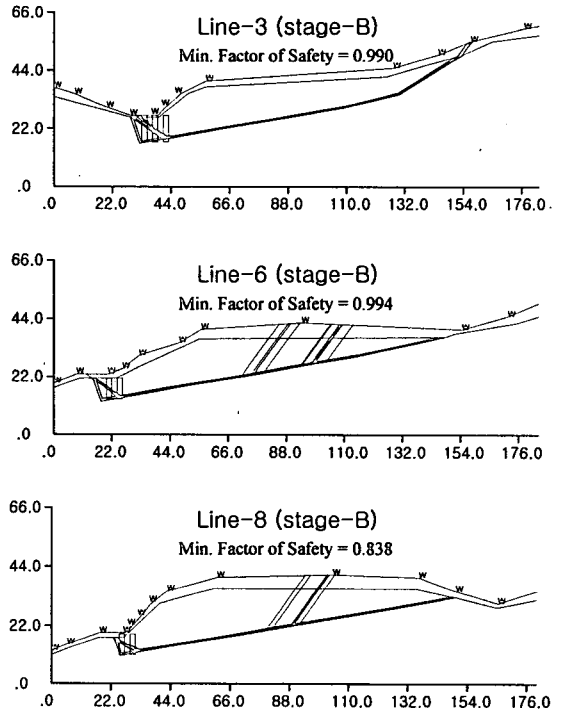


Fig. 6. Result of the limit equilibrium analysis for line-3, line-6 and line-8 showing the minimum factor of safeties. Tension cracks were developed on line-6 and line-8.

유한요소법(FEM)을 이용한 해석

복잡한 기하학적 형상과 하중 그리고 다양한 매질의 성질을 가지고 있는 문제들에 대하여, 일반적으로 해석적인 해를 구하는 것은 거의 불가능하다. 해석 해들은 관심 대상인 전체 구조체내의 임의의 점에서 원하는 값을 계산할 수 있도록 수식으로 표현되어지며, 따라서 그 구조체 내의 모든 점에 대해서 사용할 수 있다. 그러나 이런 해석 해들은 일반적으로 상미분이나 편미분 방정식을 풀어야 하는데, 복잡한 기하학적 형상이나 하중, 매질의 성질 때문에 일반적으로 해석 해를 구하기는 매우 어렵다. 그러므로 적절한 근사해를 구하기 위해서 유한요소법과 같은 수치 해석법에 의존해야 한다.

유한요소법에서는 구조체의 매질을 더 작은 물

체나 단위(유한요소)로 나누고, 그 요소들을 두 개 이상의 요소들이 공유하는 점(절점)이나, 경계선, 또는 경계면으로 연결된 대등한 시스템으로 만드는 모델화 과정인 이산화(discretization) 혹은 격자분할을 우선적으로 수행하고, 매질에 대해 요소의 공통되는 점(절점), 선 등에서 여러 가지 경계조건을 사용하여 수식을 만든 후, 이를 이용해 매질 전체에 대한 연립 대수 방정식을 만들어 미지의 해를 근사적으로 구한다(신중계의, 1998).

본 연구에서는 캐나다의 University of Toronto에서 개발한 Phase<sup>2</sup> 프로그램을 이용하여 FEM 해석을 수행하였다. FEM 해석의 적용단면은 앞서 설정한 한계평형 단면과 일치하고 사면 파괴가 인지된 line-3, 6, 7, 8 구간에서는 사면활동에 중대한 영향을 미치는 단층면을 한계평형 해석에서 도출된 파괴면으로 수정하여 적용하였다. 또한 한계평형 해석결과 전 구간이 안전율 1.725 이상을 보인 stage-A 단계는 변위 발생이 없는 것으로 간주하여 분석을 생략하였고, stage-B와 C 단계에서는 도로상부(P1), 산사면 상부의 두 지점(P2, P3), 연약면상의 두 지점(P4, P5) 등 총 5개의 추적점을 설정하여 각 지점에서의 변위를 산출하였다(Fig. 7).

Stage-A의 단계에서는 최초 설정단계에서 초기

변위가 없는 것으로 가정하였으므로 모든 변위 추적점에서 변위를 0cm으로 설정하였다.

Stage-B의 단계에서는 다양한 변위가 발생하였다. 한계평형 분석시 안전율이 1.0 이상으로 해석된 단면에서는 비교적 적은 변위가 발생한 반면에 안전율이 1.0 이하인 단면에서는 상당히 큰 변위가 발생하였다. 한계평형 분석시 안전율이 1.0 이상인 line-1, 2, 4, 5 단면에서는 산사면 상부에 설정된 P2 및 P3 추적점에서 3.25cm~6.69cm의 변위가, 단층면에 설정된 P4와 P5 추적점에서는 0.4cm~4.88cm의 변위가, 999번 지방도 상부에 설정된 P1 추적점에서는 1.01cm~1.70cm의 변위가 발생하여, 모든 추적점에서 6.69cm 이하의 적은 변위가 발생하였다. 이 단면들은 지반 내에 작용되는 힘이 서로 균형을 유지하고 있으므로 단층면을 따라 미끄러지는 변위는 매우 작게 발생할 것으로 예상된 단면들이다. 그러나 한계평형 분석시 안전율이 1.0 이하인 단면들인 line-3, 6, 7, 8 단면에서는 비교적 큰 변위가 발생하였다. 도로상부(P1)에서는 line-6 단면에서 10.05cm의 최소의 변위를, line-8 단면에서 최대인 35.02cm의 변위를 보였다(Fig. 7). 사면 파괴의 중단부쪽인 도로 아래에 위치한 연약면내의 추적점 P4에서는 line-6 단면에서 최소의 변위

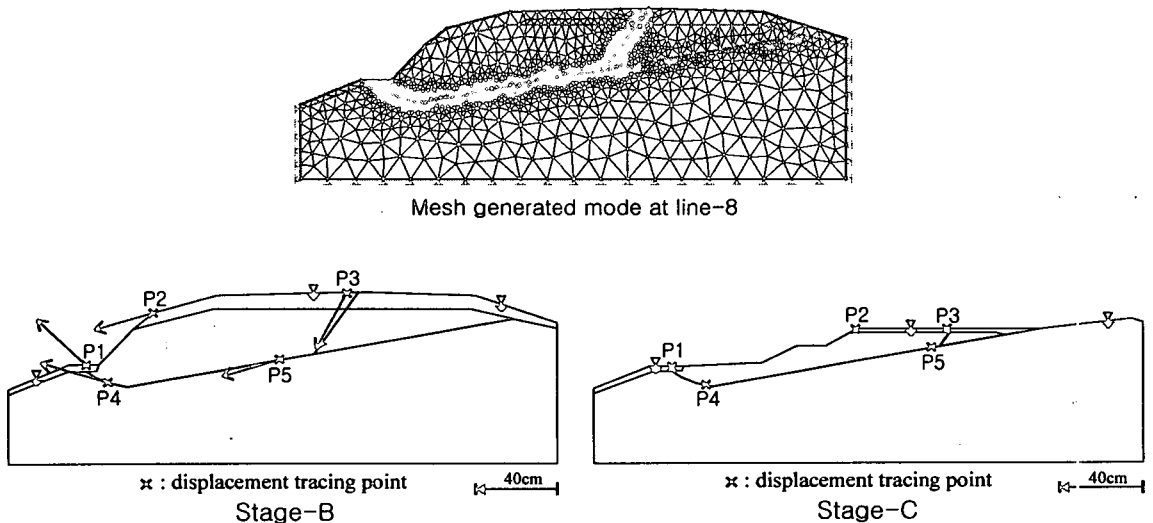


Fig. 7. Mode of mesh generation and the results of FEM analysis on line-8. P1~P5 represent the tracing points for displacement. Downward displacement at P3 and P5 and upward displacement at P1 indicate failure at slope and heaving at road.



12.28cm, line-8에서 최대인 35.97cm의 변위가 발생하여 변위 추적점중 가장 큰 변위량을 나타내었다. 또한 산사면 상부에 위치한 추적점 P2, P3에서는 13.83cm~34.24cm의 변위가 발생하였으며, 미끄럼 발생의 시작부에 위치한 또 다른 연약면상의 추적점 P5에서는 12.24cm~31.32cm의 변위가 발생하였다.

산사면을 절취하는 안정화 공사 이후 단계인 stage-C에서는 전 단면에 걸쳐 0.54cm~2.08cm 매우 작은 변위가 발생하였다. 이러한 결과는 안정화 공사를 통하여 지반이 안정되었음을 지시한다.

### 유한차분법(FDM)을 이용한 해석

FDM 해석에는 미국의 Itasca Consulting Group, Inc.에서 개발한 FLAC이 이용되었다. FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)은 수치해석 방법으로 유한차분법(Finite Difference Method)을 사용하며, 2차원 연속체공간을 유한 차분망(Finite Difference Mesh)으로 원하는 만큼 자세하게 분할하여 각 요소의 절점에서 불균형력에 의한 Newton의 운동방정식을 세워 해를 구하고, 구해진 해를 사용하여 변형율을 계산하며, 사용 모델의 구성방정식(Equation of Constitution)에 변형률을 적용하여 응력 증분량을 구해 각 절점에 해당되는 불균형력이 0에 근접하도록 반복하여 해를 구한다.

FDM 해석의 적용단면은 앞서 설정한 FEM 해석 단면과 일치하며 한계평형 해석 결과 전 구간이 안전율 1.725 이상을 보인 stage-A 단계는 변위 발생이 없는 것으로 간주하였다. Stage-B와 C 단계에서는 FEM 해석에서와 마찬가지로 도로상부(P1), 산사면 상부의 두 지점(P2, P3), 단층면 상의 두 지점(P4, P5) 등 총 5개의 추적점을 설정하여 각 지점에서의 변위를 계산하였다.

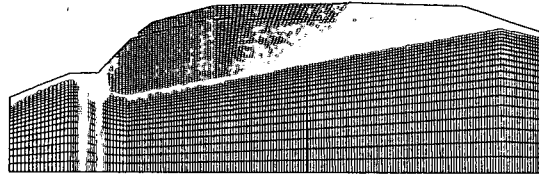
먼저 건기에 해당하는 stage-A의 해석 결과는 최초 설정단계에서 초기 변위가 없는 것으로 가정하였으므로, 모든 변위 추적구간에서 변위를 0cm으로 설정하였다.

지하수위가 지표에까지 도달하는 stage-B에 대한 해석 결과, line-1, 2, 4, 5 단면에서는 거의 변위 발생이 없고, line-3, 6, 7, 8 단면에서는 큰 변위가

발생하여 FEM 해석과 비슷한 결과를 보인다. 변위 발생이 작게 계산된 line-1, 2, 4, 5 단면은 한계평형 해석시 안전율이 1.0 이상인 단면들로서 안정한 사면에 해당되어 작은 변위가 예상된 단면들이다. 모든 추적점에서 계산된 변위는 FEM 해석과 비슷하지만 다소 작은 변위를 보여, line-2 단면의 P3 추적점에서 최대 2.58cm 변위가 나타났다. 큰 변위가 발생한 line-3, 6, 7, 8 구간은 FEM 해석과 동일하게 연약면의 형태를 한계평형 해석에서 도출된 파괴면의 형상으로 적용하였으며, 이미 파괴가 발생하기 시작하였다는 가정 하에서 각 해석 단면에 설정된 추적점에서 변위와 방향을 분석하였다. 사면파괴 종단부쪽인 도로 아래의 연약면 상에 위치한 P4 추적점에서는 line-6 단면에서 최소인 16.92cm가, line-8 단면에서 최대인 35.32cm의 변위가 발생하였다. 도로상부에 위치한 P1 추적점에서는 line-6 단면에서 최소 15.77cm를, line-8 단면에서 최대 5.26cm의 변위를 보였고, 파괴가 시작되는 부분에 위치한 P3 추적점에서는 12.92cm ~ 29.57cm의 변위를, 도로 쪽 산사면 상부에 위치한 P2에서는 13.37cm~28.89cm의 변위를, 미끄러짐이 발생하는 시작부에 위치한 연약면상의 추적점 P5에서는 line-6에서 13.45cm의 변위를, line-9 단면에서 29.24cm의 변위를 나타내었다(Fig. 8).

위와 같은 stage-B에 대한 FDM 해석 결과를 종합하면, 각 단면과 추적점들 사이에서 약간의 변위 차이는 있으나 최소 12.92cm에서 최대 35.32cm의 큰 변위를 보였다. 특히 도로 상부에서 발생한 15.77~35.26cm의 변위는 도로가 변형되어 파괴될 만한 충분한 크기를 보였으며 이러한 결과는 FEM 해석 결과와 거의 일치한다. 또한 해석된 지반의 변형 형태는 산측이 침하하고 도로부가 융기하는 것으로 나타났으며, 단층면 상에 설정된 P5 추적점에서의 변위 방향은 단층면의 자세와 거의 일치하게 해석되어 기 발생한 변형 현상과 비교적 일치하였다.

산사면을 절취하는 안정화 공사가 끝난 상태인 stage-C에서는 1.9cm 이하의 매우 작은 변위가 발생하는 것으로 해석되었으며, 이는 안정화 공사로 인해 지반내에 작용하는 힘들이 서로 평형을 이룰 만큼 지반이 안정화되었다는 것을 의미한다.



Grid used in FLAC Analysis

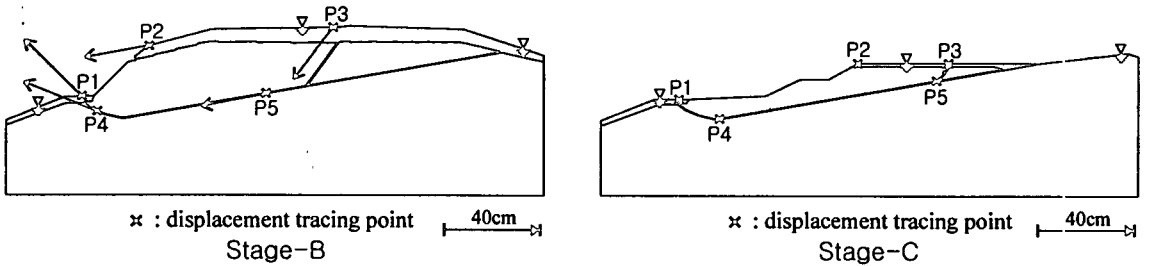


Fig. 8. Configuration of grids and results of FDM analysis for line-8. P1~P5 represent the tracing points for displacement.

### 사면 파괴의 영향 요인 분석

연구 지역의 사면 파괴는 집중 강우 이후에 발생하여 지하수위의 상승에 의한 영향이 가장 큰 것으로 판단된다. 지하수위가 상승하면 단층 점토의 포화에 따른 전단강도 감소, 간극수압의 증가, 지반의 단위중량 증가 등이 발생하며, 이러한 각 요인이 사면파괴에 미치는 영향을 line-8 단면에 대하여 한계 평형법으로 분석하였다. 영향 요인 분석은 지하수 상승에 의하여 발생하는 간극수압의 증가, 지반의 단위중량 증가, 단층점토의 전단강도 감소 등을 개별적으로 대상 구간에 적용하여 실시하였고, 간극수압의 증가와 단위중량의 증가, 간극수압의 증가와 전단강도의 감소 등 두 요인을 동시에 적용하는 분석도 실시하였다.

Fig. 9는 분석 결과를 보여준다. 먼저 안정화 공사를 시행하지 않은 상태에서 건조한 경우에는 안전율이 1.725로 계산되었으나, 지하수위가 상승하여 간극수압이 증가하면 안전율은 1.258로 감소한다. 지반이 포화되어 단위중량이 증가하면 안전율은 1.716으로 계산되어, 평상시보다 안전율이 0.009 감소하였고, 단층점토의 함수비 증가에 따른 전단강도 감소에 의한 안전성 영향 분석 결과 안전율은

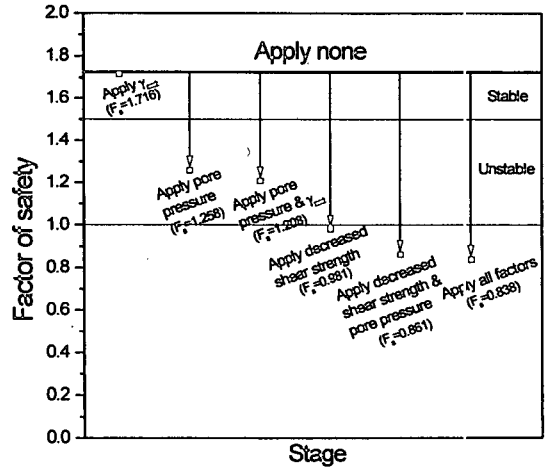


Fig. 9. Analysis for factors which caused the slope failure. The decrease in shear strength of fault clay due to increase in moisture was the major factor of failure.

0.981로, 평상시 보다 안전율이 0.744 감소하였다. 따라서 분석 대상 구간에서는 이 한 요인만으로도 사면이 불안정하게 될 수 있는 것으로 판단되며 단층점토의 전단강도 감소는 사면 안전에 가장 큰 원

인이 되는 것으로 판단된다.

간극수압의 증가와 지반의 단위중량 증가의 두 요인을 함께 적용 분석한 결과 안전율은 1.208로서 간극수압의 증가만을 고려하였을 때와 유사하였다. 간극수압의 증가와 단층 점토의 전단강도 감소를 함께 적용한 안전성 분석에서는 안전율이 0.861로 계산되어 이 두 영향 요인이 사면파괴에 주요 원인을 보여준다. 위의 결과는 연구지역의 사면 파괴를 유발하는 영향 요인 중에서 단층점토의 전단강도 감소가 안전성 저하에 가장 지배적인 요인이고, 간극수압의 증가가 또한 중요한 요인임을 지시한다. 그러나, 지반의 단위중량 증가는 사면 파괴에 거의 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

### 해석 방법에 따른 변위 차이 비교

서로 다른 구성방정식을 사용하는 FEM과 FDM 해석이 어느 정도의 해석 결과 차이를 보이는지 규명하기 위해 두 해석 결과 중 가장 큰 변위를 보인 line-8 단면에 대한 해석 결과를 비교 분석하였다. line-8 단면에 대한 mesh는 Phase<sup>2</sup> 해석에서는 3 noded triangle with graded element type으로 3375 개의 element를 구성하였고, FLAC 해석에서는 4 noded quadrilateral element type으로 12000개의

element를 구성하였다. 분석은 해석 단면에 설정된 5개의 추적점에서 도출된 수평방향(x방향)과 수직방향(y방향)의 변위 및 총 변위를 각각 비교하여 유사성을 백분율로 표시하는 형식으로 실시하였다.

Fig. 10은 각 방법에서 계산된 x변위, y변위 및 총 변위를 보여준다. x방향의 변위는 추적점의 위치에 따라 FDM 방법이 큰 값을 보여주기기도 하고 FEM 방법이 큰 값을 보여주기기도 하지만, 모든 추적점에서 1.78cm 이하의 차이를 보인다. 그러나 y 방향의 변위는 모든 추적점에서 FDM 방법이 FEM 방법보다 큰 값을 보여, 추적점 P1에서 최소인 0.97cm의 차이를, 추적점 P3에서 최대인 6.22cm의 차이를 보였다. 각 방법에서 산출된 변위의 비를 백분율로 나타내면 x방향에서 96.91%, y 방향에서 88.40%, 그리고 총 변위에서 94.29% 정도로서 두 방법에 의해 계산된 결과가 비교적 일치한다.

### 결론

연구 지역의 지반 안정성을 평가하기 위한 한계 평형 해석 결과, 연구 지역은 지하수위가 단층면 아래 위치하는 정상시는 전 구간이 1.725 이상의 안전율을 보여 안전한 것으로 분석되었다. 그러나 집중 강우로 인해 지하수위가 지표면에 까지 상승할 경우 사면 북쪽의 line-1 구간을 제외한 모든 구간에서 최소 허용 안전율 1.5 보다 낮게 분석되었으며 특히 연구 지역의 남쪽에 위치한 line-7, 8 구간은 사면의 안정성이 극히 취약하여 연구 지역 내의 북쪽 사면 보다 남쪽 사면에서 주도적인 파괴가 일어나는 것으로 판단된다. 안정화 공사가 끝난 현재는 전 구간이 안전율 2.4 이상의 높은 안정성을 나타냈다.

FEM과 FDM를 통한 변위 해석 결과 지하수위가 단층면 아래에 위치하였을 때는 연구 지역의 지반은 변형이 발생하지 않는 안정된 상태로 분석되었다. 그러나 집중 강우로 인한 지하수위가 지표면에 까지 상승할 경우 999번 지방도로 상부에서는 최대 35cm 이상 융기하며, 사면의 산측은 약 30cm 이상 침하되는 것으로 분석되었다. 사면의 절취를 통한 안정화 공사가 끝난 현재는 사면의 변형이 없는 안정된 상태로 해석되었다.

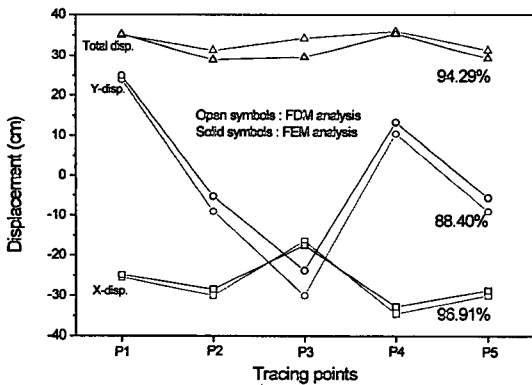


Fig. 10. Displacements at the tracing points on line-8 analyzed by FEM and FDM. Displacements analyzed by both methods are similar within 88.4~96.9%.

연구 지역의 사면 파괴 요인은 북북서 단층의 자세와 집중 강우로 인한 지하수위 상승이 초래하는 단층 점토의 전단강도 감소, 간극수압의 증가, 지반의 단위중량 증가 등인 것으로 판단된다. 이러한 요인을 한계 평형법을 통하여 분석한 결과 단층 점토의 전단강도 감소가 안전성 저하에 가장 지배적인 요인이고, 간극수압의 증가 또한 상당한 작용을 한 것으로 분석되었다. 그러나 지반의 단위중량 증가는 사면 파괴에 거의 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

본 연구에서 실시한 전산해석의 결과는 기 발생된 사면 파괴 현상과 비교적 일치하나 시추자료 부족으로 인해 지반내에 위치한 단층면을 노출된 단층면의 경사로 추정하여 적용한 점, 지반의 대표 물성치 추정에 있어서의 여러 가지 가정, 사면 파괴에 있어서 크립(creep) 효과를 고려하지 못한 점, 지하수의 흐름이 없는 정수압 상태로 가정한 점 등에 있어서 오차 요인 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 김남장, 강필중, 이홍규, 1970. 한국지질도 중평동 도폭 및 도폭 설명서, 국립 지질 조사소.
- 장기홍, 1977. 경상분지 상부 중생대의 층서, 퇴적 및 지구조. 지질학회지, 13권, 76~90.
- 전성기, 1998. 사면안정화 설계실무편람, 도서출판 과학기술, 278 p.
- 한국수자원공사, 1999. 임하댐 저수지 주변지역 지반변형 원인조사 보고서. A206 p.
- 신종계, 이용신, 조성욱, 1998, Logan의 유한요소법 첫걸음, 시그마 프레스, 722p.

---

장현식, 장보안

강원대학교 자연과학대학 지구과학부

강원도 춘천시 효자2동 192번지 (우 : 200-701)

TEL : (0361)250-8583

FAX : (0361)244-8580

e-mail : bajang@kangwon.ac.kr