

## 불연속면내 점토충전물을 고려한 사면 안정해석 연구

민경남<sup>1)\*</sup>, 안태봉<sup>2)</sup>, 양승준<sup>3)</sup>, 백선기<sup>4)</sup>, 이태선<sup>5)</sup>

### A Study on the Analysis of the Slope Stability Considering Clay Filling in Discontinuity

Min Kyong Nam, Ahn Tae Bong, Yang Seung Jun, Baek Seon Gi and Lee Tae Sun

**Abstract** When filling material such as clay is included along the discontinuity, it may cause instability on a slope even if the direction of discontinuity works in a positive way. In the study area, slope sliding occurred at the boundary between a clay filling material and weathered soil because the physical properties differ across the boundary; and this is very similar to the situation where foliation in a rock works as a weak zone during a structural behavior, causing an inter-layer slip. In most analysis, if there exists a clay filling material, a single discontinuity is assumed to perform analysis. In those cases, the discontinuity is modeled as a slip surface within clay. Therefore, the characteristics of the boundary are not considered in the analysis, so that ultimately the physical property of clay usually prevails. The result of evaluating the slope stability affected by clay filling material shows the significant difference in the safety level due to the strength parameter depending on the failure type of the discontinuity by a filling material.

**Key words** Discontinuity, Clay filling material, Failure type, Strength parameter

**초 록** 불연속면을 따라 점토 등의 충전물이 포함된 경우에는 불연속면의 방향이 유리하게 작용하더라도 사면안정에 불안정성을 초래한다. 연구지역의 사면활동은 점토충전물과 풍화토의 경계를 따라 발생하였다. 이것은 물성의 차이를 보이는 경계부분이 존재했기 때문이며, 암석에서 엽리 등이 구조적 운동시 연약대로 작용하여 층간의 미끄러짐을 유도하는 현상과 매우 유사하다. 대부분의 해석에서 점토충전물이 존재할 경우에는 하나의 불연속면으로 설정하여 해석한다. 이때의 불연속면은 점토층내에서의 활동면으로 해석되므로 점토와 원지반과의 경계부의 특성이 해석에 고려되지 못하여 불연속면의 거동은 결국 점토의 물리적 성질에 많이 지배된다. 점토충전물로 인한 활동사면의 안정성 평가 결과는 충전물에 의한 불연속면의 파괴유형에 따른 강도정수에 의해 안전율에 상당한 차이를 보인다.

**핵심어** 불연속면, 점토충전물, 파괴유형, 강도정수

## 1. 서 론

사면에서의 파괴활동은 사면내 발달한 불연속면의 방향성과 강도특성에 의해 영향을 많이 받으며 토사일지라도 크게 다르지 않다. 일반적으로 불연속면의 경사방

향이 사면 절취방향과 역경사로 존재하는 경우에 사면은 안정성을 유지한다. 하지만 불연속면을 따라 점토 등의 충전물이 존재하는 경우에는 불연속면의 방향이 유리하게 작용하더라도 사면안정에 불안정성을 초래할 수 있다.

불연속면의 역학적 거동에 영향을 미치는 충전물의 특성들로는 충전물의 광물구성, 입도분포, 함수비, 전단 변형 이력, 절리면의 거칠기 등이 있으며 이러한 특성은 지표지질조사나 실내시험을 통해 조사된다(김용준 외, 2004).

Barton(1974)은 여러 연구자들의 시험결과를 종합하여 암석과 충전물을 포함하고 있는 불연속면의 전단강도 값을 제안하였다. 그러나 제안된 값들은 개략적인 범

<sup>1)</sup> 대원토질(주) 엔지니어링사업본부 차장  
<sup>2)</sup> 우송대학교 철도건설환경공학과 교수  
<sup>3)</sup> 대원토질(주) 엔지니어링사업본부 기사  
<sup>4)</sup> 대원토질(주) 엔지니어링사업본부 대리  
<sup>5)</sup> 대원토질(주) 엔지니어링사업본부 전무

\* 교신저자 : knmin4183@naver.com

접수일 : 2007년 4월 6일

심사 완료일 : 2007년 6월 25일

위이며, 전단강도에 큰 영향을 미치는 거칠기와 충전물의 두께 등에 대한 내용이 없어 현장에 적용하기에는 상당한 어려움이 있다.

Hoek & Brown(1980)은 암종과 충전물 종류에 따른 전단강도 값의 범위를 제시한 바가 있으나 전단강도에 가장 큰 영향을 미치는 충전물의 두께에 대한 언급이 없다.

김용준 등(2006)에 의한 점토충전물의 국내연구도 물리적 강도특성과 두께에 대한 전단특성 시험만 수행되었을 뿐 실제적으로 충전물이 불연속면내에서 어떠한 작용과 파괴형태를 가지고 있는지에 대한 연구는 수행되지 않았다.

실제적으로 불연속면내에서 충전물을 고려한 실내시험과 사면안정 해석상의 방법은 제대로 확립되지 않은 실정이다.

대부분의 사면안정해석에서 불연속면내에 점토충전물이 존재할 경우에는 이를 하나의 불연속면으로 설정하여 해석하는 것이 일반적이다. 이때의 불연속면은 점토층 내에서의 활동면으로 해석되므로 점토와 원지반과의 경계부에서의 활동면 해석값과는 상당한 차이를 보이게 된다. 결국 해석값은 점토의 물리적 성질에 많은 영향을 받을 수밖에 없게 되므로 사전에 충전물의 활동패턴과 파괴형태에 대한 고려가 반드시 필요하다.

본 연구는 OO 도로건설공사 현장에서 발생한 사면 활동 사례를 중심으로 충전물을 채취하여 X-선 회절분석과 기본 물성시험 등을 통해 그 특성을 조사하고 충전물의 파괴형태를 고려한 직접전단시험을 수행하였다. 그 결과로 사면의 한계평형해석과 수치해석을 수행하였으며 충전물의 파괴형태에 의한 해석결과를 정성적으로 비교 평가하고 안정성 해석방법에 대하여 고찰하였다.

## 2. 사면현황

### 2.1 지형 및 지질

연구지역은 경북 예천군 일대로 광역지질은 선캄브리아기의 편마암류와 편암을 기반암으로 하여, 시대미상의 흑운모화강암류가 기반암을 관입하고 있다(Fig. 1). 조사구간의 지질은 호상편마암, 안구상편마암과 혼성화강편마암이며, 여기에 석회규산염암, 흑운모편암, 백운모편암, 초암쇄암, 각섬암, 흑색점판암 및 대리암 등이 분포하거나 협재되어 복잡 다양한 암종분포를 보이고 있다. 그리고 단층, 습곡 및 관입 등 지질구조가 복잡하며 절리, 열리 및 편리 등의 불연속면이 발달하여 사면에 잠재적인 불안정 요소로 작용하고 있다.

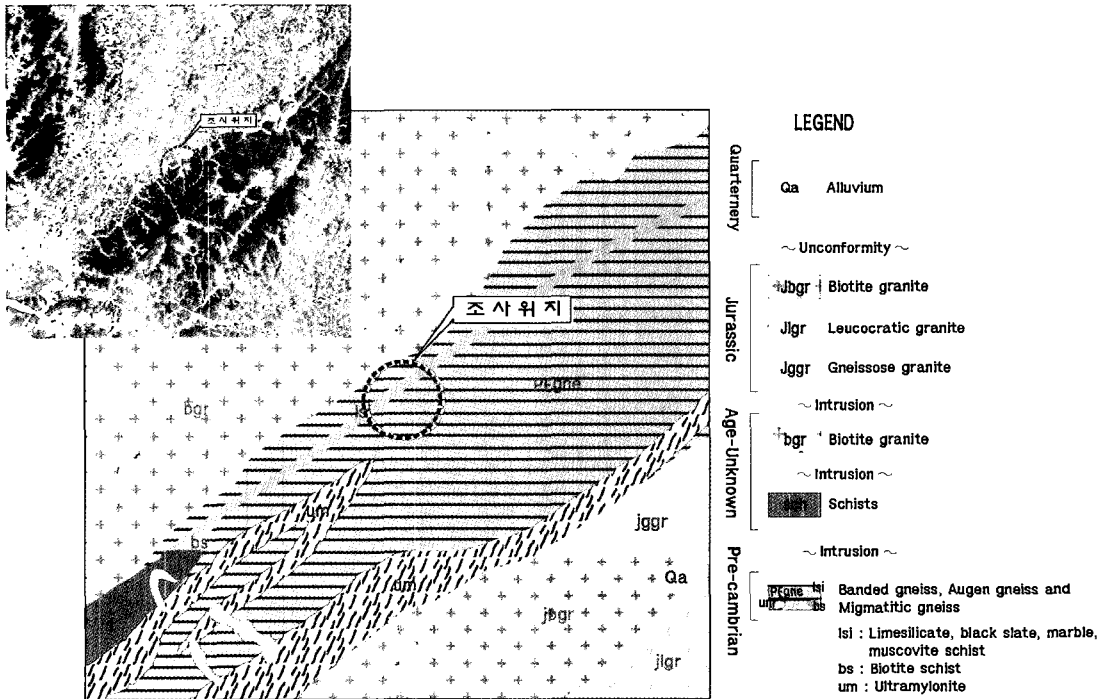


Fig. 1. Geologic map (한국지질자원연구원, 1989)

2.2 사면현황

연구대상사면은 무한사면으로서 사면고는 40 m이며 암질이 불량하고 풍화대의 층후가 깊고 불규칙하다. 사면은 1:1.0으로 절취하였으며 강우 후에 활동이 시작되었다. 사면활동구간은 풍화대와 연암 경계부의 단층대에 위치하며 단층전단면이 활동면으로 작용하였다. 활동면의 방향은 N80E, 5~10 NW로 경사가 사면방향과 역경사로 위치하여 방향성은 평면파괴의 활동조건에 부합되지 않는다. 점토는 두께 5~15 cm로 충전되었으며 연장은 70 m 이상이다. 강우 후에 지반이완 및 활동면의 변위가 더욱 가속하여 진행되었으며 배면에는 인장균열이 발생하였다. 초기 거동후의 사면전경은 Fig. 2와 같다.

3. 충전물의 공학적 특성

3.1 공학적 구분

충전물은 불연속면에서 인접한 암석 벽면을 분리시키는 물질(ISRM, 1978)로 정의되며, 일반적으로 모암보다 강도가 약한 경우가 대부분이다. 충전물질은 모래,

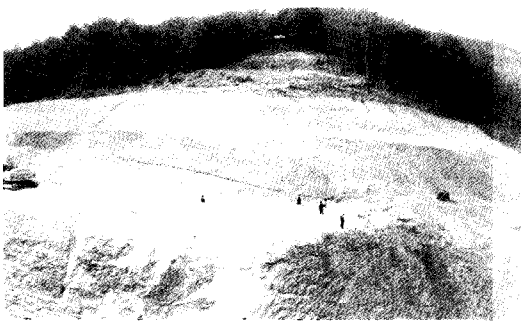


Fig. 2. View of slope

점토, 단층점토, 녹니석, 실트, 압쇄암, 단층각력암 등이나 벽면을 얇게 피복하는 광물 등도 포함된다(Barton, 1974). 방해석, 석영 등의 단단한 광백으로 충전된 경우를 제외하고는 일반적으로 깨끗한 면의 불연속면보다는 전단강도가 낮다. 그리고 충전된 불연속면의 거동은 충전물질의 광범위한 성질에 의해 좌우된다.

단층 또는 전단대 내에 존재하는 충전물은 전단과정 중에 모암에서 발생한 각력이나 단층점토 등으로 충전되고 풍화의 진행에 따라 세립의 입자로 변질되며, 점토입자는 우세한 응력방향을 따라 방향성을 가지는 것으로 알려져 있다(김용준 외, 2004). 충전물의 강도와 충전된 불연속면의 거동을 파악하기 위해서는 충전물의 구성물질이나 함량, 두께 등을 확인할 필요가 있다. 단층점토로 충전된 활동면은 충전된 물질의 함량과 두께에 따라 Fig. 3과 같이 4가지로 구분된다(USBR, 2001).

Nieto(1974)는 충전된 불연속면의 전단거동을 불연속면의 돌출부와 충전물의 상호작용에 근거하여 3가지로 구분하였다. 맞물림은 충전물의 두께가 매우 얇아서 전단동안에 돌출부의 접촉이 발생하는 경우이며, 간섭은 전단동안에 충전물에 의해 돌출부의 접촉은 발생하지 않으나 돌출부의 지형적인 특성에 의해 충전된 불연속면의 강도가 충전물의 강도보다 큰 경우이다. 그리고 충전물이 돌출부 높이보다 두꺼워 전단동안에 돌출부의 접촉이 발생하지 않고 충전물에 의해 전단특성이 결정되는 것을 비간섭으로 정의하였다.

3.2 X-선 회절분석

불연속면의 방향이 경사방향으로 활동하는 평면파괴의 조건을 만족하지 않은 상태에서 충전물의 팽창에 의한 사면활동이 감지되어 충전된 점토를 채취하여 X-선 회절분석(XRD)을 실시하였다.

분석결과, Fig. 4와 같이 충전물은 백운모(Muscovite),

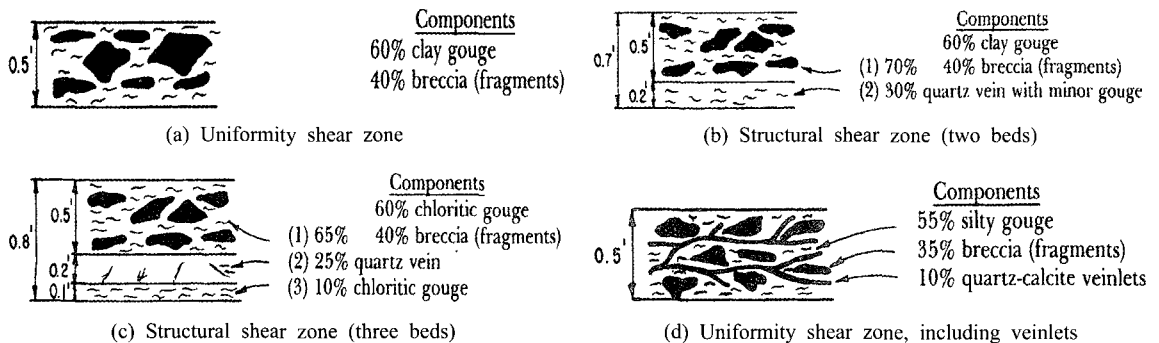


Fig. 3. Classification of shear zone (USBR, 2001; Unit: feet)

고령토(Kaolinite) 등으로 구성되어 있는 것으로 확인되었다. 이들은 모암인 백운모편암 등이 풍화되었거나 지표수 침투시 불연속면내로 유입되는 광물성분에 기인한 점토충전물인 것으로 판단된다. 백운모 및 고령토는 팽윤성 점토광물로 알려져 있으며 사면 내에서 팽창에 의한 응력이 발생하여 사면 거동의 주요인으로 작용한 것으로 보인다. 팽윤성 점토광물은 우기시에 수배이상 팽창하는 것으로 알려져 있다.

### 3.3 파괴유형

현장조사 결과 단층활동면의 점토충전물은 두께가 최대 15 cm로서 투수성이 거의 없고 충전물이 심하게 압밀되어 있었다. 그리고 노두면 상의 짧은 거리 내에서도 주 구성물질과 부 구성물질 간의 비율이 수평적으로 달라진다.

구성물질이나 함량을 확인하기 위해 충전물을 채취하

여 부피의 조성비율을 조사해 본 결과 약 60%의 점토질 가우지(gouge)와 40%의 암편들로 구성되어 있는 것을 확인하였다. 다양한 성분들이 층상으로 배열되어 있지 않기 때문에 전단면은 비교적 균일한 유형에 속하며 충전된 풍화토 활동면의 거칠기는 매끄러운 상태로 돌출부의 영향을 받지 않는다.

Fig. 5에서 보이는 바와 같이 이들의 파괴유형은 변위가 발생하면서 활동면에 조선(striation)과 활면(slickenside)을 형성시켰고, 특히 전단변위된 풍화토의 표면에 점토가 피복되지 않은 점으로 보아 점토와 풍화토의 경계를 따라서 변위가 발생한 것으로 보인다. 이것은 물성의 차이를 보이는 경계부분이 존재했기 때문이며, 이는 암석에서 사암과 셰일, 엽리 등이 구조적 운동에서 연약대로 작용하여 층간의 미끄러짐을 유도하는 현상과 매우 유사하다고 할 수 있다(Lee et al., 2002).

대부분의 사면안정해석에서 점토충전물이 존재할 경

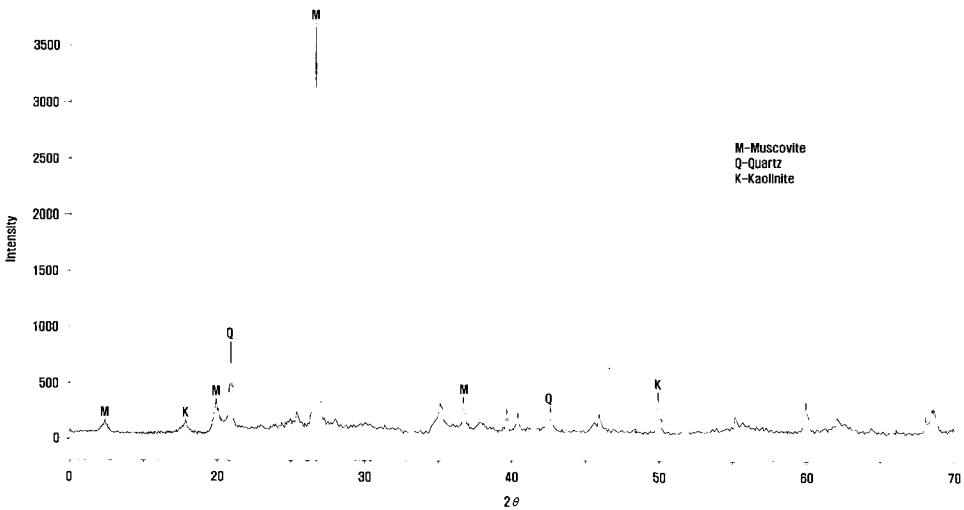


Fig. 4. Result of XRD

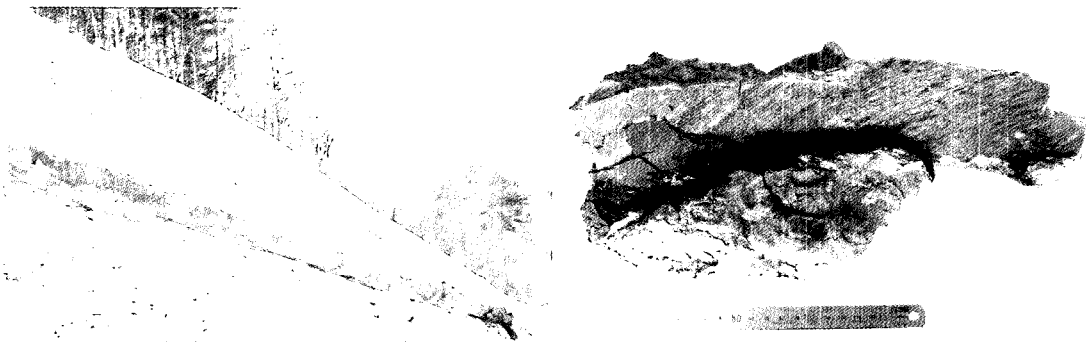


Fig. 5. Slip surface filled with clay

우에는 이를 하나의 불연속면으로 설정하여 해석한다. 이때의 불연속면은 점토층내에 존재하는 활동면으로 해석되므로 점토와 원지반과의 경계부를 고려한 해석 값과는 상당한 차이를 보이게 되고 결국 점토의 물리적 성질에 많은 영향을 받을 수밖에 없게 된다.

**3.4 실내토질시험**

흙 입자의 크기와 기본적 성질들을 살펴보기 위해 채취된 시료에 대하여 함수비, 비중, 아터버그한계, 입도 시험의 물리적 시험을 수행하였다.

흙의 분류는 통일분류법(Unified Soil Classification System)으로 분류하였다(Table 1). 시험결과, 풍화토는 통일분류법상 조립토인 실트질 모래로서(SM) 무기질 실트인 세립분을 15%이상 함유하고 있으며, 점토는 소

성이 보통이상인 모래질 점토로(CL) 압축성이 크고 불투수성의 특성을 가지는 것으로 분석되었다. 토질시험 결과는 Table 2와 같다.

직접전단시험은 충전물에 의한 파괴유형을 고려하기 위하여, 점토층 내에서의 파괴를 가정한 점토의 직접전단시험과 점토와 풍화토 경계부에서의 파괴를 가정한 점토+풍화토의 직접전단시험을 수행하였다(Fig. 6 참조).

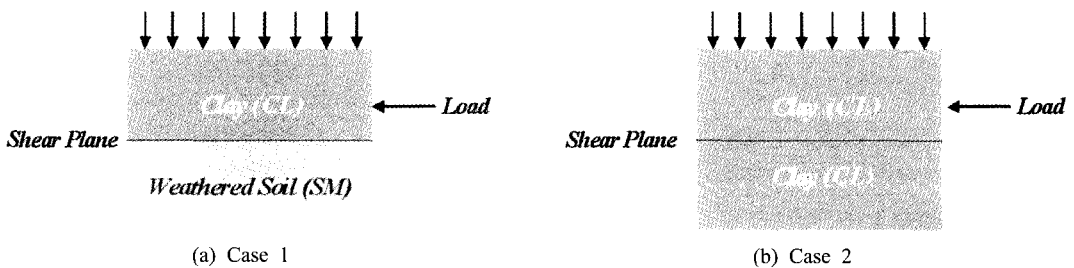
직접전단시험에 사용한 시료는 절토사면의 경사면에서 전단 링(H: 2 cm, D: 6 cm)으로 채취한 불교란 시료이다. 각 파괴유형별로 3개소에서 시료를 채취하였으며 채취된 시료는 밀봉하여 실험실로 운반하여 즉시 직접전단시험을 시도하였으나 시료성형 중에 미세균열 등 교란이 발생하여 불가피하게 재성형하여 시험하였다. 이때 전단시험시 초기의 다짐밀도는 현장의 단위중량

**Table 1.** Unified soil classification system (ASTM D 2487)

Class	The First Symbol		The Second Symbol	
	Group Symbol	Group Name	Group Symbol	Group Name
Coarse-grained soil	G	Gravel	W	Well graded
			P	Poorly graded
	S	Sand	M	Silty
			C	Clayey
Fine-grained soil	M	Inorganic Silt	L	Low plasticity (Liquid limit less 50)
	C	Inorganic Clay	H	High plasticity (Liquid limit more 50)
	O	Organic Silt and Clay		
	Pt	Highly Organic Matter	-	-

**Table 2.** Results of soil test

Class	Water Content (W, %)	Specific Gravity (G <sub>s</sub> )	Liquid Limits (W <sub>L</sub> , %)	Plasticity Index (I <sub>p</sub> , %)	U.S.C.S
Weathered Soil	20	2.68	-	-	SM
Clay	21	2.62	32.0	12.5	CL



**Fig. 6.** Profile of direct shear test

및 함수비와 일치하도록 단계적으로 조절하였다.

시험은 응력범위를 고려하여 7.5 kPa, 12.5 kPa, 15.0 kPa의 3단계 수직응력을 적용하여 실시하였다. 전단변형 후의 시료의 상태는 Fig. 7과 같고 시험결과는 Fig. 8에 나타내었다. Table 3에 시험결과 및 문헌자료 결과를 비교하였다.

실제 지반의 경우 잠재적 임계파괴면(가장 약한 파괴면)을 따라 파괴가 발생하나 직접전단시험의 경우에는

임의로 설정된 전단면(상하부 전단상자의 분리면으로 공시체의 가장 약한 부분의 파괴면이 아님)을 따라 파괴시킨 후 그 결과를 분석하여 강도정수를 결정하므로 시험에 의한 물성치는 실제 지반의 강도정수에 비하여 과대평가하게 된다. 따라서 그 결과를 그대로 적용하기 보다는 다소 강도정수를 낮추어 적용하는 것이 일반적이다. 다만 직접전단시험결과를 실제 지반의 파괴와 관련된 강도정수로의 보정 등에 관한 충분한 연구자료가



Fig. 7. Sample after shear deformation

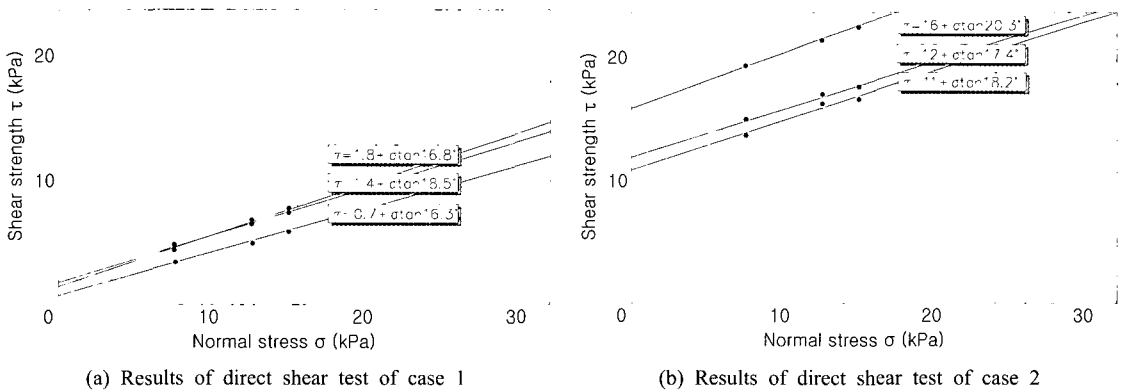


Fig. 8. Results of direct shear test

Table 3. Comparison of direct shear test results and shear strength of filling materials

Class	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Internal Friction Angle (°)	Remark
Weathered Soil	18.6	5.6	28	-
Case 1	16.8	1.1	17.2	-
Case 2	17.1	11.0	18.6	-
Fault Gouge, General	-	-	15~30	Roy E. Hunt (2005)
Clay filling material (t: 10~15 cm)	-	30~80	32	Barton (1974)

없이 강도정수를 어느 정도 보장하여야 하는지는 아직 논란의 여지가 있다.

본 연구에서는 이러한 직접전단시험의 한계성을 감안하여 강도정수를 시험값의 85%로 낮추어 적용하였다.

직접전단시험 결과 점토의 강도가 경계부에서의 값보다 점착력은 10배 크게 나타났으며 내부마찰각도 크게 나타났다. 이러한 결과는 모암의 풍화나 지표수 침투시 불연속면내로 유입되는 광물성분에 기인한 점토충전물이 사면 활동 시에 불연속면내에서 과압밀되어 충전물의 점착력이 증가되고 이로 인해 전단응력이 점진적으로 증가한 것으로 판단된다.

Phien-wej *et al.*(1990)에 의하면 충전물의 두께가 두꺼워질수록 최대전단강도가 발현되는 전단변위는 커지며, 최대강도는 감소한다고 하였다. 그리고 충전물 두께가 두꺼워질수록 수직변위는 팽창에서 압축으로 변화하는 것으로 알려져 있다.

## 4. 사면안정 해석

### 4.1. 한계평형해석

사면안정해석에서는 점토와 토사층의 경계부에 활동면이 존재하는 경우와 점토층 내에 별도의 활동면이 작용하는 경우에 대한 한계평형해석을 수행하였다. 한계평형 해석법은 활동면을 따라 파괴가 일어나려는 순간에 있는 토체의 평형조건으로부터 안정성을 해석하는 방법으로 사면의 안정성은 안전율을 근거로 하여 판단한다. 안전율은 주어진 활동면에 대한 흙의 전단강도를 현재 파괴면 상에 유발된 전단응력으로 나눈 값으로 대

상 사면은 허용 안전율 이상이 되어야 안전한 것으로 판정된다.

한계평형해석법은 일반적으로 절편법이 많이 사용되어지며 이들 방법 중 Fellenius 방법과 Bishop(Bishop, 1955) 방법이 주로 사용되고 있다. 본 연구에서는 안정해석법 가운데 일반적으로 많이 사용되며 해석방법이 간편하면서도 이해가 쉽고 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 안전율 산정방법인 Bishop의 간편법을 적용하였다.

해석 프로그램은 사면의 파괴형태가 원호, 비원호에서도 Fellenius나 Bishop의 간편법 해석이 가능한 TALREN 97을 사용하여 수행하였다.

안정해석에서의 지반물성치는 실내시험에 의하여 산정된 경계부에서의 강도정수와 점토의 강도정수를 구분하여 적용하였다. 점토층의 두께는 15 cm로 설정하였으며 해석단면은 Fig. 9와 같다.

해석시에 지하수위조건은 지표면으로 가정하여 설정하였으며 그 결과는 Fig. 10과 같다.

해석결과 점토층내의 활동면에서 우기시의 안전율은 0.71 그리고 점토와 토사 경계부에서 안전율은 0.43으로 나타나 충전물에 의한 파괴면의 위치 설정이 해석결과에 중대한 요소로 작용하는 것을 알 수 있었다. 결국 불연속면내 충전물의 파괴유형에 따른 지반의 강도정수 차이가 중요한지인 것을 확인 할 수 있다.

하지만 상기의 해석결과는 다음과 같은 점을 고려해야 할 것으로 보인다. 현장에서 시료를 채취할 때, 실험실로 운반시, 실내에서 전단링에 설치하기 위하여 시료를 성형할 때에 필연적으로 시료는 어느 정도 교란되기 마련이고 또한 직접전단시험의 한계성 등을 감안한다

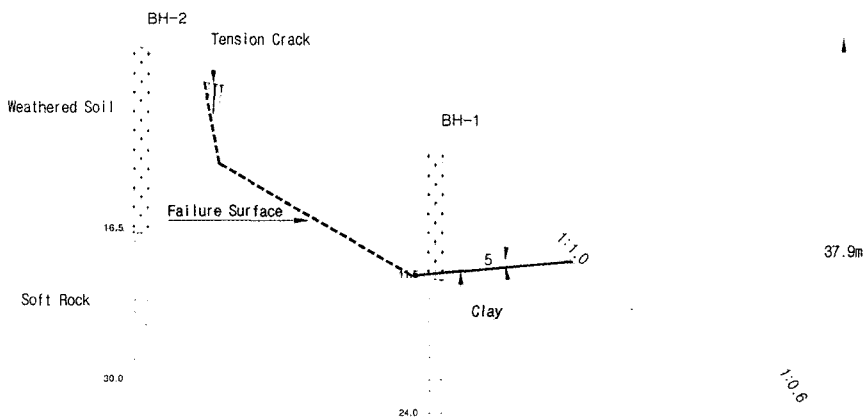


Fig. 9. Section of slope

면 해석결과는 실험적 기법에 의한 정성적 의미로 이해하여야 할 것으로 판단된다.

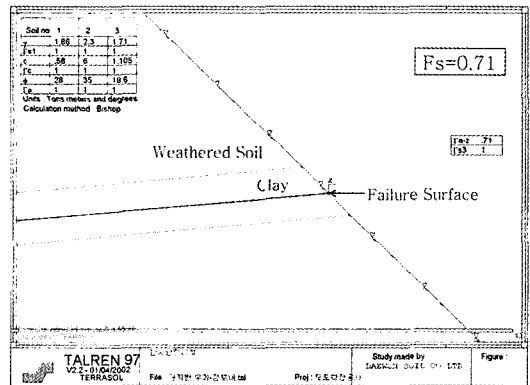
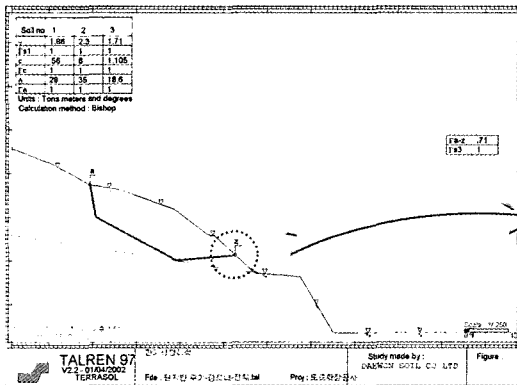
4.2. 유한차분 수치해석

한계평형해석에서는 절편들의 힘 평형 조건만을 만족시키는 해석법으로 사면의 파괴거동에 대한 자세한 정보를 주지 못한다. 따라서 실제로 사면의 파괴가 어디서 시작되고 발달되는지 살펴보고 전반적인 사면의 거동을 파악하기 위하여 *FLAC<sup>2D</sup> ver. 5.00* 프로그램을 이용한 유한차분 수치해석을 수행하였다. 지반요소는 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb 이론을 적용하였으며, 불연속면내 점토와 토사층의 경계부 파괴를 합리적으로 모델링하기 위하여 불연속면은 Bonded Interface Element로 처리하여 수치해석을 수행하였다. 불연속면은 미끄러짐이 발생할 수 있도록 모델링 하였으며, 점토층 내에 활동면을 고려하는 경우와 비교하여 사면의 거동을 분석하였다.

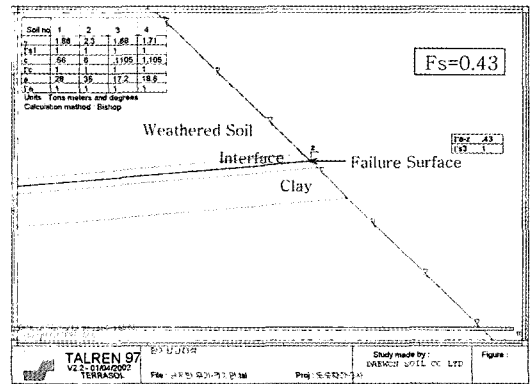
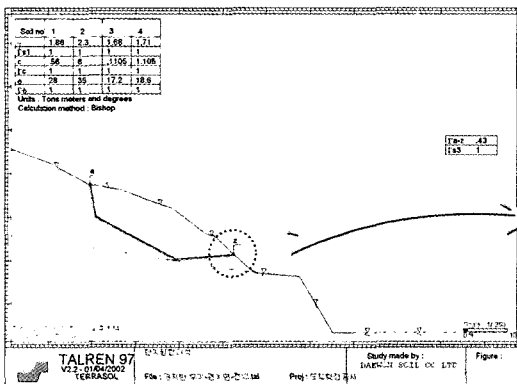
수치해석을 수행한 대표단면은 한계평형해석에 적용된 대표단면을 동일하게 이용하였으며, 지반강도정수 조건 또한 한계평형해석에 적용된 지반강도정수를 동일하게 적용하였다. 수치해석에 적용된 해석격자망은 Fig. 11에 나타내었으며, 해석에 적용된 지반강도정수는 Table 4에 요약, 정리하였다.

수치해석결과는 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다.

수치해석결과, 불연속면내 점토와 토사 경계부의 활동을 고려한 Case 1과 점토층내의 활동면을 고려한 Case 2의 경우에 사면의 전반적인 거동은 매우 다르게 평가되었다. 최대수평변위 발생지점은 유사하게 평가되었으나, 수평변위의 분포양상이 서로 상이하게 나타났다. Case 1의 경우에서는 파괴메커니즘이 접촉면을 따라서 발생하는 미끄러짐의 형태가 주요 파괴원인으로 평가되었으나, 점토층전물만을 고려하는 경우에는 점토층을 따라서 원호파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 전단변형률의 분포를 중심으로 살펴보면, Case 1의 경우에는



(a) Failure in clay



(b) Failure at the boundary

Fig. 10. Results of Limit Equilibrium Analysis



Table 4. Shear strength

Class	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$E$ (MPa)	$\nu$
Weathered Soil	18.6	5.6	28.0	50	0.35
Clay filling material	17.1	11.0	18.6	50	0.40
Soft Rock	23.00	60.0	35.0	10,000	0.25
Interface Element	-	1.1	17.2	$k_n$ : 38.5 MPa $k_s$ : 129 MPa	

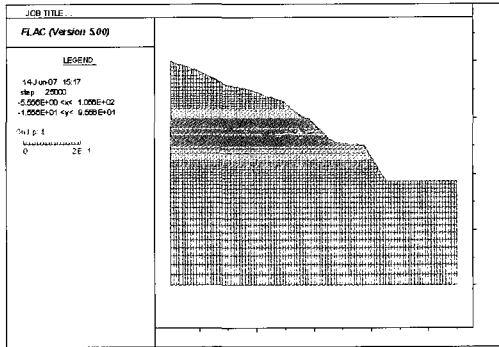


Fig. 11. Analysis grid element

경계부를 따라서 발생하는 미끄러짐에 의한 인장파괴면을 따라서 전단변형률이 분포하는 것으로 나타났으며, Case 2의 경우에는 점토층을 경계로 하는 원호파괴면을 따라서 전단변형률이 분포하는 것으로 평가되었다. 발생변위를 중점적으로 살펴보면 접촉면을 고려하는 경우에는 최대 40 cm의 변위가 발생하는 것으로 평가되었으나, Case 2의 경우에는 최대 25 cm의 변위가 발생하여 불연속면에 포함된 점토층을 합리적으로 고려하지 못하는 경우에는 전체 사면의 거동을 과소평가 할 수 있음을 확인하였다.

수치해석에 의한 변위거동을 실제 현장과 비교하였을 때 경계면에서의 활동 변위량이 거동 후 변위가 계속 진행되는 현장의 변위량과 비교적 일치하고 사면붕괴 유형도 인장균열을 수반한 평면파괴 형태로 접촉면을 고려한 해석결과와 유사하다. 이로 미루어 보아 불연속면에 점토층전물이 충전되어 있는 경우에는 이를 고려한 사면안정해석을 수행하는 것이 정확한 사면의 거동을 예측하는 방법임을 확인하였다.

5. 결론 및 고찰

점토층전물에 의한 사면활동 현장을 중심으로 충전물을 채취한 뒤 X-선 회절분석 시험과 직접전단시험을 수

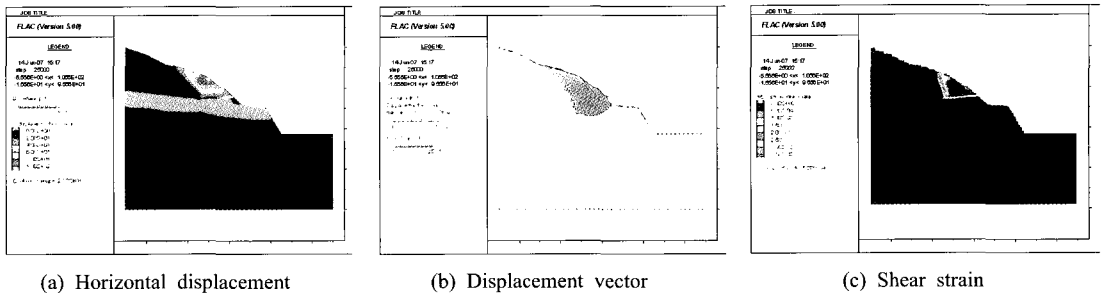


Fig. 12. Results of Finite Difference Method (Case 1)

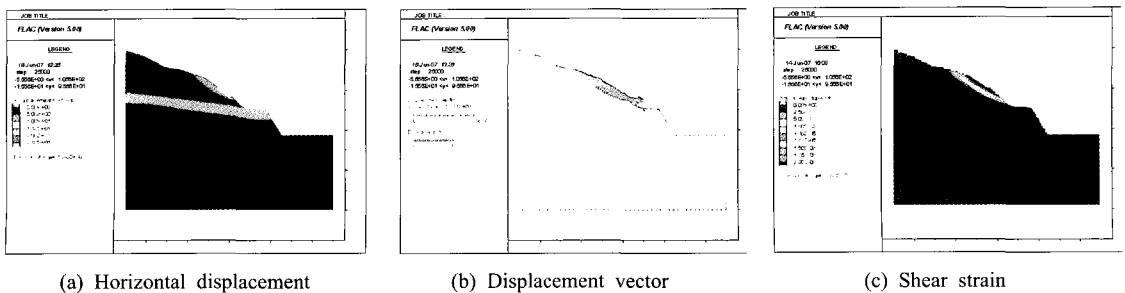


Fig. 13. Results of Finite Difference Method (Case 2)

행하여 불연속면에 협재된 점토의 파괴유형을 파악하였으며 이를 토대로 안정성 해석방법을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 불연속면을 따라 점토 등의 충전물이 포함된 경우에는 불연속면의 방향이 유리하게 작용하더라도 사면안정에 불안정성을 초래할 수 있다. 사면안정 해석에서 점토충전물이 존재할 경우에는 하나의 불연속면으로 설정하여 해석하는 것이 일반적이다. 이때의 불연속면은 점토층 내에서의 활동면으로 해석되므로 점토와 원지반과의 경계부에서의 해석 값과는 상당한 차이를 보이게 된다. 결국 해석 값은 점토의 물리적 성질에 많은 영향을 받을 수밖에 없게 되므로 충전물의 활동패턴과 파괴형태에 대한 충분한 고려가 필요하고 이를 토대로 한 실내토질시험이 수반되어야 할 것으로 판단된다.
- 2) 파괴유형을 고려한 직접전단 시험결과 점토의 강도가 경계부에서의 값보다 크게 나타났다. 이러한 결과는 점토충전물이 사면 거동 시에 불연속면내에서 과압밀되어 충전물의 점착력이 증가되고 이로 인해 전단응력이 점진적으로 증가한 것으로 판단된다.
- 3) 사면안정 해석결과는 점토층내의 파괴면에서 우기시의 안전율은 0.71, 점토와 토사 경계부에서 안전율은 0.43으로 나타나 충전물에 의한 파괴면의 위치 설정이 해석결과에 중대한 요소로 작용하는 것을 알 수 있었다. 유한차분법에 의한 수치해석에서도 발생 변위량이 상이하게 나타나고 수반되는 사면붕괴 형태도 다르게 나타나고 있음을 확인하였다. 따라서 사면안정 해석시에 이러한 점들이 고려되지 않는다면 실제와 다른 큰 규모의 파괴가 예측되어 비경제적이고 비합리적인 결과를 초래할 수 있을 것으로 보인다.
- 4) 실내토질시험과 안정해석에서 충전물의 다양한 물리적 특성과 그리고 경계부 접촉면의 광범위한 조건 등은 제대로 반영되지 않았다. 따라서 제안된 해석기법들의 실제 현장에 적용을 위해서는 파괴 형태의 명확한 구분과 수치해석 그리고 실험적 연구를 통한 정량적인 검증 등의 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 한밭대학교 토목공학과 토질연구실의 협조를 받아 실내토질시험이 가능하였으므로 이에 심심한 감사를 드립니다. 아울러 문서편집 및 자료정리에 많은 도움을 준 대원토질 김신애님에게도 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김용준, 이영휘, 도성규, 2004, 충전된 절리면의 전단특성에 대한 기초연구, 터널과 지하공간 (한국암반공학회지), 제 14권, 제 5호, pp. 318-326.
2. 김용준, 이영휘, 김선기, 김주화, 2006, 점토 충전물에 의한 암반사면 파괴사태 연구, 터널과 지하공간 (한국암반공학회지), 제 16권, 제 5호, pp. 368-376.
3. 한국지질자원연구원, 1989, 영주도폭 지질보고서 (1:50,000).
4. ASTM, 2004, Annual book of astm standards, Soil and rock D 2487.
5. Barton N., 1974, Review of a new shear strength criterion for rock joints, Engineering Geology, Vol. 7, pp. 287-332.
6. Bishop, A.W., 1955, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, Geotechnique, Vol. 5, pp. 7-17.
7. Hoek, E. and Brown, E. T., 1980, Empirical strength criterion for rock masses, J. Geotech. Engng Div. ASCE 106 (GT9), pp. 1023-1035.
8. ISRM, 1978, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomch. Abstr., Vol. 15, pp. 319-368.
9. Lee, J.-C., Chu, H.-T., Angelier, J., Chan, Y.-C., Hu, J.-C., Lu, C.-Y. and Rau, R.-J., 2002, Geometry and structure of northern surface ruptures of the 1999 Mw=7.6 Chi-Chi Taiwan earthquake: influence from inherited fold belt structures. Journal of Structural Geology, 24, pp. 173-192.
10. Nieto, A. S., 1974, Experimental study of the shear stress-strain behavior of clay seams in rock masses, Ph. D. Thesis, University of illinois.
11. Phien-wej, N., Shrestha, U. B. and Rantucci, G., 1990, Effect of infill thickness on shear behavior of rock joint, Proc. Int. Conf. on rock joints, Leon, Norway, pp. 289-294.

12. Roy E. Hunt., 2005, *Geotechnical Engineering Investigation Handbook*. pp. 257.

13. USBR, 2001, *Engineering Geology field manual*, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation.

**민경남**

1998년 충남대학교 지질학과 이학석사  
2007년 우송대학교 철도건설환경공학과 석사과정

Tel: 042-528-6607  
E-mail: knmin4183@naver.com  
현재 대원토질(주) 엔지니어링사업본부 차장



**안태봉**

1985년 한양대학교 토목공학과 공학사  
1991년 Univ. of Texas at Austin 공학석사  
1995년 Univ. of Arizona at Tucson 공학박사

Tel: 042-630-9735  
E-mail: tbahn@wsu.ac.kr  
현재 우송대학교 철도건설환경공학과 교수



**양승준**

2006년 한밭대학교 토목공학과 공학석사

Tel: 042-528-8700  
E-mail: did0101@lycos.co.kr  
현재 대원토질(주) 엔지니어링사업본부 기사



**백선기**

2001년 충남대학교 지질학과 이학사

Tel: 042-528-8700  
E-mail: dungndal@dreamwiz.com  
현재 대원토질(주) 엔지니어링사업본부 대리



**이태선**

1977년 우송대학교 토목공학과 공학사

Tel: 042-528-8700  
E-mail: ts7149@hanmail.net  
현재 대원토질(주) 엔지니어링사업본부 전문

