

붕괴사면에서 역해석기법에 의한 활동면의 전단강도 추정 Assumption of Shear Strength on Failed Discontinuities Due to Back Analysis

유병옥, Byung-Ok You¹⁾

1) 한국도로공사 도로연구소 수석연구원, Director Researcher, Highway Research Center, Korea Highway Corporation

개요(SYNOPSIS) : 절토사면의 붕괴원인은 토질 및 지질조건, 지형, 강우, 지하수 및 지표수, 사면형상, 굴착 및 발파와 같은 인위적인 조건, 사면보호공 등과 같이 다양한 영향이 있을 수 있으나 가장 많은 영향을 주는 원인으로 토질 및 지질적인 조건이라고 할 수 있다. 본 논문은 이러한 지질조건에서 붕괴가 발생할 경우의 활동면에 대한 전단강도 추정하는 방법에 있어 역해석법에 의한 활동면의 전단강도 추정을 연구하였다. 연구결과 붕괴된 사면에서 화성암은 마찰각 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 점착력 $0\sim 2t/m^2$ 의 범위를 가지며 퇴적암에서는 마찰각 $10^{\circ}\sim 17^{\circ}$, 점착력 $0\sim 2.5t/m^2$ 의 범위, 변성암에서는 마찰각 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$, 점착력 $0\sim 4.0t/m^2$ 의 범위가 우세한 것으로 나타났다. 그리고 지질구별 구분에 의하면, 절리에 의해 붕괴가 발생한 경우에는 마찰각 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$, 점착력 $0\sim 3.5t/m^2$, 엽리면은 마찰각 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$, 점착력 $0.5\sim 3.0t/m^2$, 단층면은 마찰각 $11^{\circ}\sim 38^{\circ}$, 점착력 $0\sim 3.0t/m^2$, 층리면은 마찰각 $10^{\circ}\sim 17^{\circ}$, 점착력 $0\sim 2.5t/m^2$ 정도의 범위를 갖는 것으로 나타났다.

주요어(Key words) : 절토사면, 사면안정, 활동면, 전단강도, 마찰각, 점착력, 절리, 단층, 엽리, 층리, 지질구조

1. 서론

인구증가 및 산업발달로 인해 국토의 효율적인 개발이 요구되면서 산악지형이 많은 우리나라는 산지를 절토하여 도로개설 및 주택단지의 개발로 인해 대규모의 절토사면이 형성되고 있는 경우가 많다. 절토사면은 얇은 토층과 풍화토, 풍화암, 연암 및 경암 등의 풍화도가 다른 물질로 구성되어 지반구성물질에 대한 공학적인 판단은 많은 경비가 요구되고 또한 그 한계성을 가지고 있어 시공 중 또는 후에 사면의 안정성 문제가 대두되고 있는 실정이다.

절토사면의 안정에 영향을 미치는 요소로는 암종, 풍화, 지질구조의 특성 등의 내적인 요인과 강우, 용해, 지진, 발파 등의 외적인 요인을 들 수 있으나 이들 중 암반사면의 내적인 요인들이 사면안정에 커다란 영향을 주는 주 요인으로 작용할 수 있으므로 국내에 분포하는 암반의 내적 요인들에 대한 지질학적인 구분과 공학적인 특성을 파악하는 것이 매우 중요한 일이다. 특히, 절토사면에서의 사면안정해석을 위한 전단강도추정방법은 일반적으로 실내의 시험자료의 활용, 기존문헌참조, 역해석에 의한 방법 등 여러 가지 방법들에 의해 접근하고 있으나 암석별, 지질특성을 고려한 방법 등에 대한 연구는 미비한 실정이다. 그러므로 본 논문은 기존 절토사면에서 붕괴가 발생한 활동면에서 전단강도를 역해석법에 의해 암석종류, 지질구조에 따라 마찰각 및 점착력을 추정하는 방법을 연구하고자 한다.

2. 절토사면 붕괴유형

2.1 절토사면의 붕괴원인

국내의 고속도로에 분포하는 사면붕괴의 원인은 작게는 미소한 지형조건에서 풍화도, 지질구조 등 너무나 다양해 기술하는 것이 곤란하며 각각의 사례에 따라 특징을 가지고 있다고 할 수 있다. 여기에서

는 고속도로에서의 사면붕괴유형을 분석한 결과에 의해 붕괴를 발생시킬 수 있는 주요 원인에 대해 언급하고자 한다.

2.1.1 지질 및 토질

사면붕괴는 구성암반과 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 사면의 붕괴빈도가 경기변성암복합체를 이루는 편마암, 편암과 중생대 백악기의 퇴적암에 높은 붕괴빈도를 보인다.

지질구조에 따른 사면붕괴는 단층(점토, 파쇄대), 층리(점토층전), 편리, 엽리 등이 붕괴가 발생할 가능성이 크며 특히, 사면방향과 유사할 경우가 극히 위험하다고 할 수 있으나 절리면의 경우는 사면방향으로 일반적으로 45°이상의 급한 경사를 가진 경우에 붕괴가 쉽게 발생된다.

암종별로 살펴보면, 경기 변성암복합체를 이루는 암층은 복잡한 지질구조선 및 불규칙한 풍화양상을 보이며 지표에 노출시, 풍화가 되기 쉽고 미세균열에 의해 깨짐이 쉽게 발생한다. 경기 변성복합체에서의 붕괴양상은 붕괴규모 및 붕괴를 발생시키는 지질구조선이 다양하나 그림 1과 같이 암질불량으로 인해 발생한 붕괴가 발생하는 양상과 그림 2와 같이 단층이 붕괴를 발생시키는 원인이 되는 경우가 많고 엽리나 편리에 의해 발생하는 사례도 많았다.

퇴적암층은 주로 세일과 사암으로 이루어진 암층으로 점토질이 충전된 층리면을 따라 붕괴가 발생하는 특성을 가지며 이러한 붕괴유형은 그림 3과 같이 대규모의 평면파괴양상을 보인다. 그러나 퇴적암지대 중 중앙고속도로 대구~안동구간에서는 그림 4와 같이 적색 세일의 단층파쇄대 등과 같은 지질구조선을 따라 차별적인 침식이 발생되어 세굴되는 양상을 보이고 흑색 세일로 이루어진 사면에서는 물리적인 풍화작용에 의해 매우 작은 암

편으로 파쇄되어 낙석되는 사례가 많았다. 남해고속도로의 경우는 그림 5와 같이 세일의 차별적인 풍화로 인해 암피가 붕락되는 경우가 많았는데 이는 세일이 풍화에 약한 특성으로 발생하는 것이다. 그러나 전반적으로 암반사면붕괴는 암질불량, 심한 풍화작용 및 사면방향과 유사한 방향으로 지질구조가 발달한 상태에서 강우와 수반되어 발생하는 사례들이 많았다.

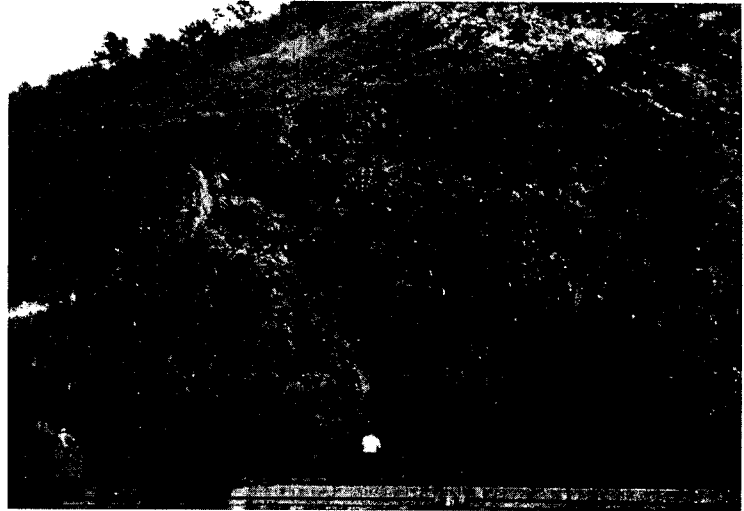


그림 1. 편마암 사면에서의 암질불량으로 인한 붕괴사례



그림 2. 편마암 사면의 단층으로 인한 붕괴사례

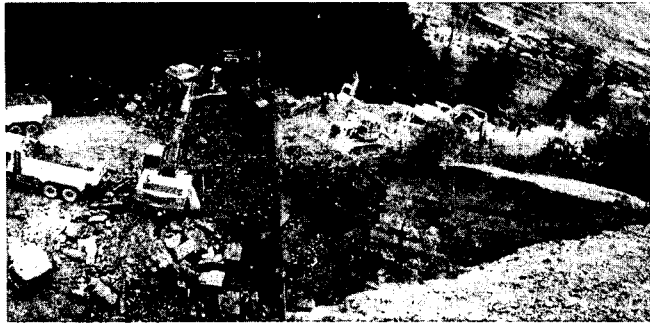


그림 3. 퇴적암에서의 점토층에 의한 대규모 평면파괴발생사례

붕괴된 토층구간에서의 토질조건을 살펴보면, 사질토로 이루어진 사면이 가장 높은 붕괴빈도를 보였다. 토사붕괴는 흔히 기반암상에 놓여 있는 붕적토와 풍화토 등에서 발생되는데 일반적으로 흙의 강도, 투수성에서 상이한 면이 형성되어 있는 경우에 일어난다고 생각된다. 이 경우의 토사붕괴는 무한사면붕괴와 같은 양상을 보이고 비교적 소규모적이고 국부적인 붕괴양상을 보인다.

점성토 및 쉘트질로 이루어진 사면에서는 투수계수가 낮으며 우수침투가 적어 붕괴 위험도는 적다고 생각되지만 사면상부의 집수면적이 넓어 강우로 인해 포화된 상태에서는 배수시간이



그림 4. 적색 셰일에서의 단층과쇄대에 의한 절토사면의 유실사례

오래 걸려 사면하단부의 저부파괴에서 그림 6과 같은 대규모의 붕괴양상을 보이기도 한다.



그림 5. 셰일의 차별적인 풍화로 인한 붕괴발생사례



그림 6. 점성토 및 쉘트질로 이루어진 사면의 대규모 붕괴발생사례

2.1.2 지형

사면붕괴에 있어서 지형요인의 역할은 명확하지는 않으나 지형은 집수면적에 매우 민감하게 영향을

준다. 사면상부에 묘지, 밭, 과수원 등과 같은 집수면적이 넓은 지형이 있는 경우, 토질조건이 점성토로 이루어진 지반조건에서는 특히, 배수문제로 인해 상부로부터 붕괴가 쉽게 발생하는 예들이 많았다. 그러나 급경사를 이루는 산악지형인 경우에는 배수문제로 인한 붕괴사례는 드물었다.

사면붕괴에 관련된 지형구분의 방법은 아직 확립되어 있지 않으나 사면붕괴 후 지반 특히, 사면어깨 부에서 상부를 잘 조사해 보면, 예전에 한번 붕괴를 일으킨 흔적을 볼 수 있는 경우가 많다. 사면어깨 위에 밭이나 과수원 등의 평지가 있는 경우에 그 상부에 오래전 붕괴가 발생하여 활락애가 남아 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 지형적인 요인은 현지답사를 자세히 실시하거나 대축척 항공사진을 이용하여 판별한다.

2.1.3 강우

사면붕괴 발생률 중, 약 90% 이상이 강우와 수반되어 발생되며 특히, 태풍, 기타 집중호우에 의한 것이 많지만 붕괴발생시의 강수량 자료가 많지 않아 49개의 강수량 자료가 있는 사면에 대해 넓은 범위의 구분으로 연속강수량을 조사해 보면, 표 1 및 그림 7과 같이 50mm 이하에서 50~100mm까지가 가장 많고 100~200mm 사이의 강수량에서 전반적으로 고른 분포를 보이나 붕괴발생 일자로 장마철 및 봄철에 상당수의 붕괴가 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 연속강우는 24시간 이내에서 붕괴가 발생하는 예가 많았다.

표 1. 붕괴발생시의 강수량

누적강수량	횟수	백분율(%)	
50mm이하	15	17.6	17.6
50~100mm	12	41.2	58.8
100~200mm	13	24.6	83.4
200 mm 이상	9	16.6	100.0

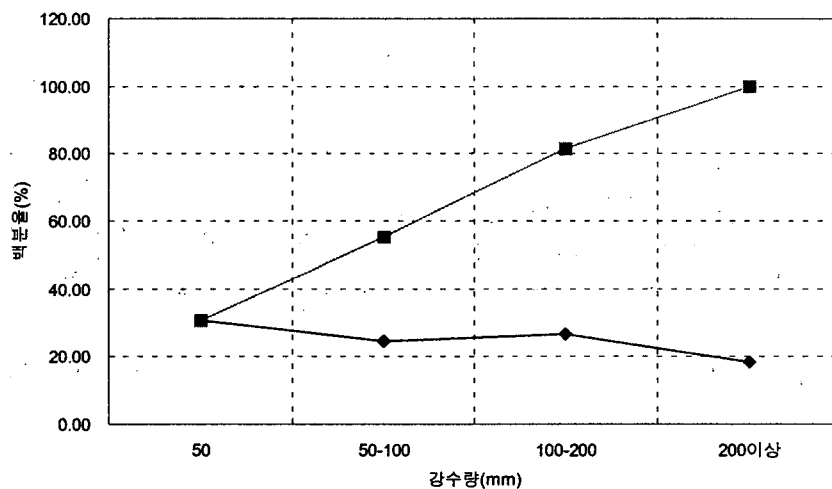


그림 7. 강우에 의한 붕괴발생 빈도(%)

2.1.4 지하수 · 지표수

절토사면 붕괴의 주요한 원인은 강우에 의해 발생하는 지하수 또는 강우시 집중되는 지표수이다. 붕괴가 일어나기 위해서는 붕괴지점에 지하수 또는 지표수가 집중되어야 하는데 지표수의 집중규모에 따라 침식피해의 정도가 결정된다. 토층에서의 붕괴는 지하수에 의해 수압이 발생되어 흙의 전단저항을 감소시켜 붕괴가 발생한다. 그러나 암반에서의 붕괴는 활동면에서 양압력(Uplift Pressure)이 발생되거나 물에 의해 활동면의 전단저항이 감소되어 발생된다.

강우집중은 지형형상에 의해 결정되지만 그 판별이 매우 어렵다. 그리고 지표수는 대부분의 경우에 지면으로 강우가 스며들거나 표면에서 흐르는 물이 사면어깨의 산마루측구로 흘러 들어가야 하나 산마루 측구는 사면내에서 배수로 역할을 하지 못하는 경우가 대부분이다. 지하수의 경우에는 침수면적이거나 그 흐름을 판단하기가 매우 어려운데 일반적인 경우, 건기시 사면에서 지하수 심도는 매우 낮은 상태이다. 사면에 용수가 있는 경우는 지하수가 집중해 있다는 것을 알기 쉽지만 강우시만 용수가 발생하는 장소는 구별하기 어렵다.

그러므로 객관적으로 빗물이 침수되는 구역을 알아 볼 수 있는 방법을 개발할 필요가 있을 것이다.

2.1.5 사면형상

일반적으로 사면높이가 높을 수록 붕괴되기 쉽고 발생하는 피해도 크다. 사면높이가 높을 수록 붕괴되는 사례가 많았으며 주로 강우에 의해 수반되고 붕괴토량도 높은 사면일 수록 많게 된다.

그림 8과 같이 사면형상이凸형, 凹형이나에 따라서도 사면붕괴의 원인이 될 수 있다. 이는 강우의 침수와도 관련이 있지만 凹형 사면에서는 계곡부를 형성하는 부분에 붕적토(Colluvium)가 퇴적될 수 있는 여건이 되고 붕적토의 심도가 깊게 되므로 이 부분에서 붕괴 가능성이 크다고 할 수 있다. 그리고 사면을 설계할 때 일반적인 설계경사를 적용하는데 있어서 확실적인 사면경사의 적용으로 붕괴를 유발시키는 원인이 될 수 있으므로 지질적 특성, 지형형상 등을 파악한 후에 사면경사를 정하여야 한다.

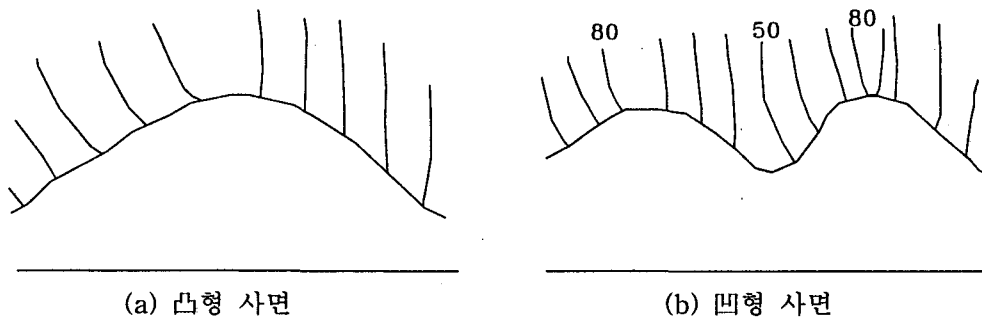


그림 8. 사면형상에 따른 붕괴

2.1.6 인위적 요인

도로공사시의 절토사면은 인위적으로 절토하는 것이므로 절토공사가 붕괴의 직접적인 원인이 되는 경우가 있다. 이것은 설계시에 고려하지 못하는 요인 예를 들면, 암반의 절리특성 등이 붕괴를 일으킬 수 있는 조건에 있는 경우는 절토시공 중에 붕괴되거나 굴착완료 후 1~2년 후에 붕괴되는 경우가 많다.

상부 토층의 붕괴에 있어서도 그 원인의 대부분은 사면어깨 부근의 굴착으로 인해 강우의 흐름이 증대했기 때문이다. 그리고 지금까지 임야였던 곳이 도로가 건설되면서 식생이 없는 지표면의 노출이 급증하여 지금까지 피해가 없었던 사면에 재해가 발생하게 된다.

그러므로 사면부근의 환경이 급속히 변화하는 경우에는 배수구의 용량부족이나 물이 모이는 쪽이 급변하는 상황이 발생하기 때문에 충분히 주의가 필요하다.

2.1.7 사면보호공과 재해

사면보호공을 시공한 경우, 붕괴에 대한 방재효과가 어느 정도 증가했는가를 객관적으로 평가하는 것은 어렵다.

지반의 조건과 지질특성을 고려하여 사면보호공 및 보강공을 설치하여야 하지만 그렇지 못한 경우는 오히려 붕괴를 촉진하여 주는 예들도 있다. 예를 들어, 녹생토 공법의 적용은 주로 암반의 녹화를 목적으로 사용하나 이를 토층구간 또는 약한 풍화암 구간에 사용된 경우, 강우에 의해 자중의 증가로 토층과 함께 활동되는 경우가 흔히 있다. 그리고 기성 플라스틱 격자블록의 시공시는 지면과 밀착되지 못하는 경우가 많아 강우에 의해 흠이 유실되어 붕괴를 유발시키는 경우가 많다. 그러나 일반적으로 붕괴가 발생한 사면의 90% 이상이 보호공이 없는 상태에서 발생된다.

2.2 암종별 붕괴유형

각 암종에 따른 절토사면의 붕괴유형은 다음에서 언급된 바와 같이 특성을 가지고 있다.

2.2.1 화성암으로 이루어진 사면

화성암으로 이루어진 사면의 불연속면 발달특성은 지형과 유사하게 발달하는 판상절리와 수직절리가 규칙적으로 우세하게 발달하여 직육면체의 암괴블록을 형성한다. 그래서 화성암에서의 붕괴유형은 판상절리에 의한 평면파괴 가능성이 있으며 수직절리에 의해 전도파괴의 가능성이 있다. 그리고 상부 토층의 경우는 석영이 많이 혼입된 자갈 내지 모래질로 이루어져 빗물에 의한 유실가능성이 크다.

특히, 화강암에서는 핵석형의 풍화로 인해 토층 유실로 암괴가 빠져 낙석이 발생되고 토층이 얇고 수직으로 사면이 형성된 경우는 상부 토층이 붕락되는 경우도 많이 발생하고 있다.

2.2.2 퇴적암으로 이루어진 사면

국내에 분포하는 퇴적암층은 중생대 백악기층의 퇴적암과 고생대 퇴적암층으로 분류(Lee, Dai-Sung, 1988)할 수 있는데 중생대 퇴적암은 남해고속도로, 구마고속도로, 중앙고속도로의 한반도 남동측 지대에 위치하고 고생대 퇴적암층은 옥천 지향사대가 지나는 경부고속도로 횡간, 중부고속도로 일부구간, 중앙고속도로 영주-제천구간에 주로 분포한다.

종합적으로 언급하면, 퇴적암에서는 지질구조선에 의한 붕괴와 풍화로 인한 붕괴를 대별할 수 있다. 평면파괴유형이 가장 많은 빈도를 보이고 세일이 풍화로 의해 암편화의 낙석, 차별적인 풍화로 인한 낙석, 세굴문제, 풍화에 표면부에서의 원형파괴 양상이 우세한 것으로 나타났다.

2.2.3 변성암으로 이루어진 사면

대부분 선캠브리아기의 고기에 형성된 암석으로 복잡한 지질구조가 발달하여 조사시 세심한 주의를 요하며 특히, 사면내에 단층과쇄대, 단층점토 등의 약선대의 존재여부를 주의 깊게 판단하여야 한다.

변성암중 가장 많이 사면안정문제가 발생하는 사면으로는 편마암으로 이루어진 사면으로 편마암은 서울외곽 고속도로, 서해안 고속도로, 중앙고속도로 춘천측, 88 고속도로의 일부구간, 중부고속도로의 일부구간 등에 분포하며 평면파괴, 썩기파괴, 원형파괴 등의 다양한 붕괴양상을 보인다.

절토사면의 붕괴형태를 암종별로 나누어 각각 낙석, 유실, 세굴에 의한 붕괴형태와 원호파괴, 평면파괴, 썩기파괴 및 전도파괴로 구분한 결과는 표 2와 같이 조사되었다(그림 9).

표 2. 고속도로 절토사면의 암종별 붕괴유형에 따른 붕괴빈도

붕괴유형	전 암 종		화 성 암		퇴 적 암		변 성 암	
	붕괴 지점수	붕괴발생율(%)	붕괴 지점수	붕괴발생율(%)	붕괴 지점수	붕괴발생율(%)	붕괴 지점수	붕괴발생율(%)
평면파괴	262	43.4	26	31.0	95	43.4	141	44.4
썩기파괴	77	17.1	10	11.9	17	7.8	50	15.8
전도파괴	42	2.3	7	8.3	22	10.0	13	4.1
원형파괴	76	6.9	10	11.9	17	7.8	49	15.5
낙석, 유실	163	19.4	31	36.9	68	31.0	64	20.2
합 계	620	100.0	84	100.0	219	100.0	317	100.0

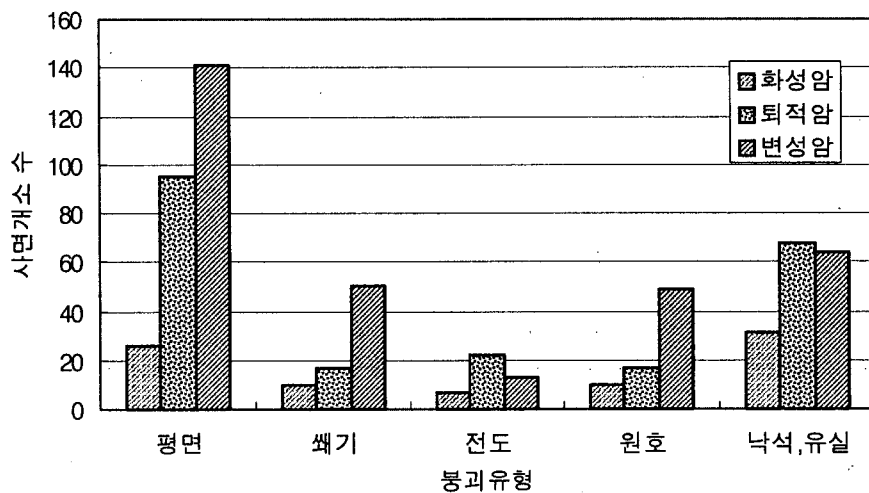


그림 9. 암종별 붕괴유형에 따른 붕괴빈도

본 논문에서 암종별 붕괴유형에 따른 붕괴빈도 분석은 붕괴형태를 조사한 총 620개 절토사면을 대상으로 하였으며, 전체 사면 중 평면파괴는 262개소에서 조사되어 전체의 약 43.4%에 이르러 가장 많은 붕괴형태로 나타났다. 또한 썩기파괴는 17.1%가 발생했으며 전도파괴는 가장 적은 2.3%를 차지하였다. 원호파괴는 풍화가 발달한 부분에서 대부분 발생한 것으로 전체의 6.9%로 조사되었으며, 암괴의 탈락으로 인한 낙석이나, 세굴에 의한 유실 혹은 상부 토사부분에서의 유실에 의한 붕괴형태는 전체의 약 19.4%가 발생한 것으로 조사되었다.

이를 암종별로 구분하여 분석하면, 화성암으로 이루어진 사면은 비교적 안정된 사면이 많아 붕괴빈도가 퇴적암이나 변성암에 비하여 적었으며 붕괴형태는 비교적 다양한 붕괴형태로 나타나, 평면파괴와

낙석 또는 유실에 의한 파괴가 전체의 약 68%를 차지하여 화성암에서의 주된 붕괴요인으로 파악된다.

퇴적암으로 이루어진 사면의 붕괴유형은 썩기파괴나 전도파괴 및 원형파괴 형태에 비하여 평면파괴 형태의 붕괴유형이 월등히 많은 것으로 조사되었으며, 낙석이나 유실에 의한 붕괴 형태를 제외하면, 퇴적암에서의 전체 붕괴의 약 63%를 차지하여 평면파괴 형태의 붕괴가 퇴적암에서의 주된 붕괴유형임을 알 수 있었다.

중생대 퇴적암으로 이루어진 사면의 붕괴양상은 구마고속도로의 경우, 층리경사방향이 도로쪽으로 향한 하행측 사면에서 사면안정의 문제가 발생되고 있으며, 특히 층리면에 점토질이 충전되어 있는 경우가 빈번하여 대규모적인 사면 상부로부터의 평면파괴가 주를 이룬다. 남해고속도로의 경우는 세일층과 사암이 교호되어 세일이 차별적인 풍화를 받아 사암이 붕락되는 유형의 붕괴양상을 보이며 중앙고속도로 대구측의 경우는 단층파쇄대에 의한 대규모적인 평면파괴 형태가 많이 발생하였고 풍화에 약한 적색 세일이 발달하여 세일층이 풍화를 받아 원형파괴를 보인다. 또한 단층파쇄대가 지나는 구간에서 세일 및 사암이 세굴이 심하게 발생하는 양상을 보인다.

고생대 퇴적암 중 사암, 세일은 규칙적인 층리발달이 보이지 않아 평면파괴 유형은 그리 흔하지 않으나 암층의 상부 토층에서 활동되는 경우가 발생된다. 그러나 석회암의 경우는 잘 발달된 층리에 의해 평면파괴가 발생되며 공동에 대한 문제가 심각하다.

변성암으로 이루어진 사면 역시 평면파괴 형태의 붕괴빈도가 가장 높으며 낙석이나 유실을 제외할 경우 전체 붕괴의 약 55%를 차지하여 변성암에서의 주된 붕괴형태로 판단된다.

2.3 지질구조별 붕괴유형

암반사면의 붕괴는 암반에 발달하는 불연속면에 의해 좌우되며 사면붕괴의 주원인이 될 수 있는 불연속면으로는 절리, 엽리, 단층, 층리 등이 있다. 절리는 모든 암석내에 분포하나 층리는 퇴적암, 엽리, 편리는 변성암중 편마암, 편암에서 발달하는 지질구조이고 단층파쇄대는 주로 변성암에서 우세하게 발달하는 지질구조이다.

조사된 사면을 지질구조별로 분류하여 절리나 단층 등의 불연속면이 원인이 된 붕괴와 파쇄대가 주 붕괴원인인 붕괴, 풍화 발달에 의한 암질불량이 주 붕괴 원인인 사면과 토층에서 발생한 붕괴로 구분하여 조사한 결과는 표 3 및 그림 10과 같다.

표 3. 암종별 지질구조에 따른 붕괴빈도

암종 \ 지질구조	전암종		화성암		퇴적암		변성암	
	①붕괴 지점수	붕괴발생율(%) (①/②)	①붕괴 지점수	붕괴발생율(%) (①/②)	①붕괴 지점수	붕괴발생율(%) (①/②)	①붕괴 지점수	붕괴발생율(%) (①/②)
불연속면 (절리, 단층 등)	337	60.0	46	57.5	119	53.4	172	55.7
파쇄대	11	1.8	0	0.0	2	0.9	9	2.9
암질불량(풍화)	236	39.2	34	42.5	91	40.8	111	35.9
토층	18	3.0	0	0.0	11	4.9	17	5.5
②합 계	602	100.0	80	100.0	223	100.0	309	100.0

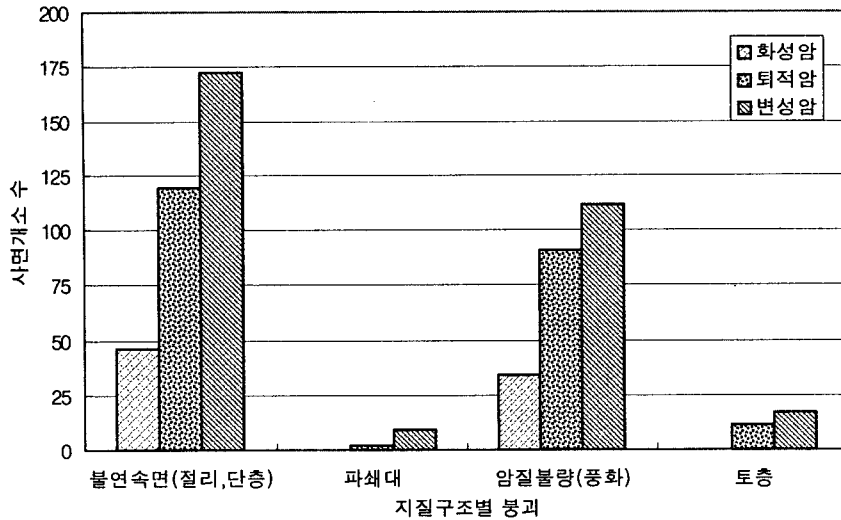


그림 10. 지질구조에 따른 암종별 붕괴빈도

사면 중 대부분의 사면 붕괴원인은 사면내에 발달하고 있는 절리면이나 단층면 등의 불연속면이 원인인 것으로 나타났으며, 지질구조별로 분류할 경우에 전체 붕괴의 약 60%에 해당된다. 특히 풍화발달에 의한 암질불량이 전체 붕괴의 약 39%를 차지하여 사면의 주된 붕괴요인중의 하나로 나타났다.

사면중 특히 암반내에 발달하는 지질구조중 절리는 모든 암석에 발달하는 지질구조이므로 각 암종에 따라 비교적 고른 분포를 보인다. 층리는 퇴적암의 지질구조로 층리면에 의해 평면파괴가 주로 발생되었으나 세일층의 풍화로 인해 사암이 낙석되기도 한다. 그리고 엷리는 변성암의 지질구조로 이로 인해 평면파괴 및 썩기파괴가 발생하기도 하며 단층에 의한 사면붕괴는 변성암에서 우세하게 나타나고 있다.

특히, 암질불량으로 인한 붕괴빈도의 경우, 퇴적암은 전체 빈도의 41%에 달하고 있어 불량한 암질로 인해 발생하는 붕괴는 비록 대규모 붕괴의 직접적 원인은 아니나 그 빈도 면에서 상당한 부분을 차지하고 있는 것으로 분석되었다.

3. 활동이 발생한 절토사면의 전단강도

절토사면에서 붕괴가 발생한 경우에는 활동면의 전단강도를 결정하는 방법으로 역해석(Back Analysis), 토질시험, 경험적인 전단강도 추정방법 등이 있는데 일반적으로 아래와 같은 역해석법이 많이 이용되고 있다(山田邦光, 1982, Mihail E. Popeseu, 1994).

3.1 역해석에 의한 절리면의 전단강도 추정방법

절리면의 점착력은 0 이라 할 수 있으나 실제 암반상태는 절리면이 완전히 끊어지지 않은 상태에 있으므로 어느 정도의 점착력을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

이는 절리면의 풍화와 관계되며 시간에 따른 풍화속도에 대해서는 아직까지 정확한 시험자료 및 정립화된 이론이 없는 실정이다. 그러나 단지 완전히 끊어진 상태의 직접전단시험에서 얻은 절리면 마찰각만을 고려하고 점착력을 고려하지 않는다면 안정해석시 불안정한 측면으로 해석이 될 가능성이 크다.

그러나 암반에서 절리면이 얼마나 붙어 있는지에 대해서는 확인할 수 있는 방법이 없으므로 이에 대한 점착력추정은 다음과 같은 방법에 의해 실시하고 한다.

과거에 사면활동과 붕괴를 일으킨 적이 있는 지역에서는 그 활동면의 전단강도는 다음에 서술한 역산

법으로 구하는 경우가 많다. 현행 안전율을 사면상태에 따라 표 4와 같이 1.0 전후의 적당한 값으로 한다. 이 경우 일반적으로 활동하고 있는 것은 0.9~1.0, 활동이 정지한 것은 1.0~1.1 정도로 하는 경우가 많다.

표 4. 현행 안전율의 예

운 동	분류			
	암반활동	풍화암활동	붕적토활동	점토질활동
활동정지중	1.10	1.05~1.10	1.03~1.05	1.00~1.03
활동중	0.88	0.95~0.99	0.93~0.95	0.90~0.93

붕괴가 발생한 사면의 횡단면도에 활동면의 횡단면형상, 토괴의 단위중량 등을 취하여 활동력을 구한다. 활동력과 당초 가정한 현행안전율에서 활동면의 전단강도는 식(1)에서 구한다.

$$C = \left(\frac{\sum W \cos \theta - \sum u \cdot l}{\sum l} \right) \tan \phi + \frac{Fs \cdot \sum W \sin \theta}{\sum l} \quad \text{----- (1)}$$

여기에서, W : 활동토괴의 중량, u : 활동면에 가해진 지하수압

θ : 활동면경사각, l : 활동면의 길이, Fs : 현행안전율 ≒ 1.0

활동토괴의 중량, 활동면에 가해진 지하수압, 활동면 경사각, 활동면 길이 및 현행안전율 ≒ 1.0은 이미 알고 있는 값이고, 미지수는 점착력 C와 마찰각 φ만이 된다.

일반적으로 활동면 전단강도는 그림 10과 같이 현행안전율을 가정하고 역해석법에 의해 C-φ 관계도를 그리고 그 범위를 구한다. 이어서 C, φ의 어느 한쪽을 가정하고 전단강도를 결정한다.

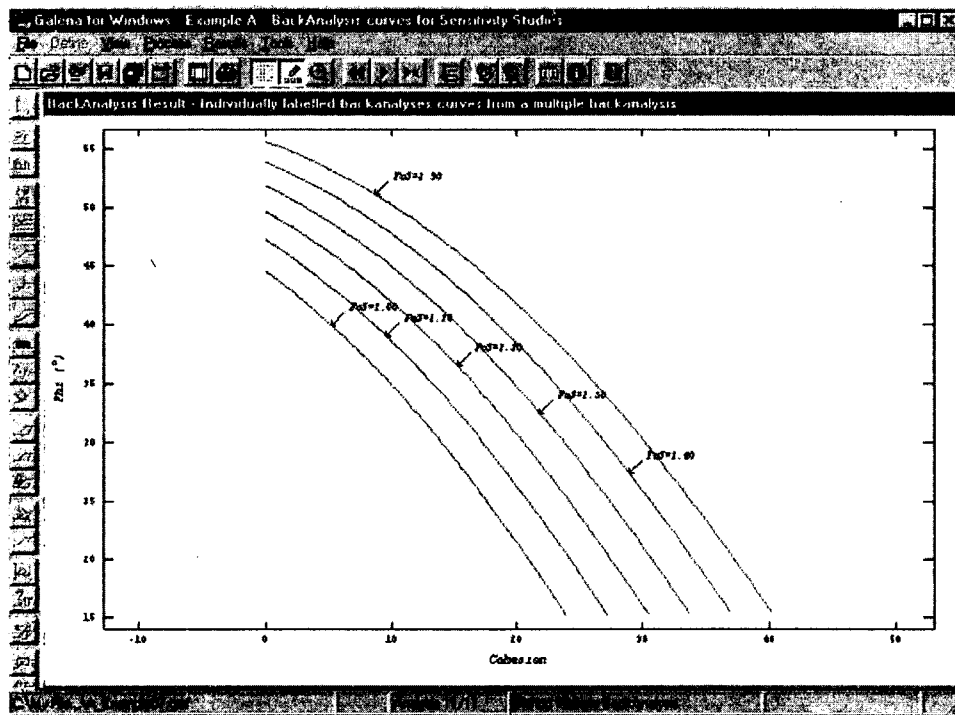


그림 11. 역해석 프로그램에 의한 전단강도 추정방법(Galena, 2002)

3.2 전단강도의 추정에 대한 문헌 검토

한계평형해석에서 가장 민감한 단계중의 하나가 활동이 예상되는 면에 대한 전단강도(C, ϕ)를 추정 혹은 결정하는 문제이다. 초기 검토과정에서 전단강도에 대한 정보가 없는 경우, 유사한 암석에 대한 기존 자료의 검토를 통해 추정이 이루어져야 한다.

Heok & Bray(1974)는 사면붕괴에 대한 역해석 결과자료를 근거로 암석과 토층에 대한 점착력과 마찰각의 그래프를 그림 12와 같이 제안하였다.

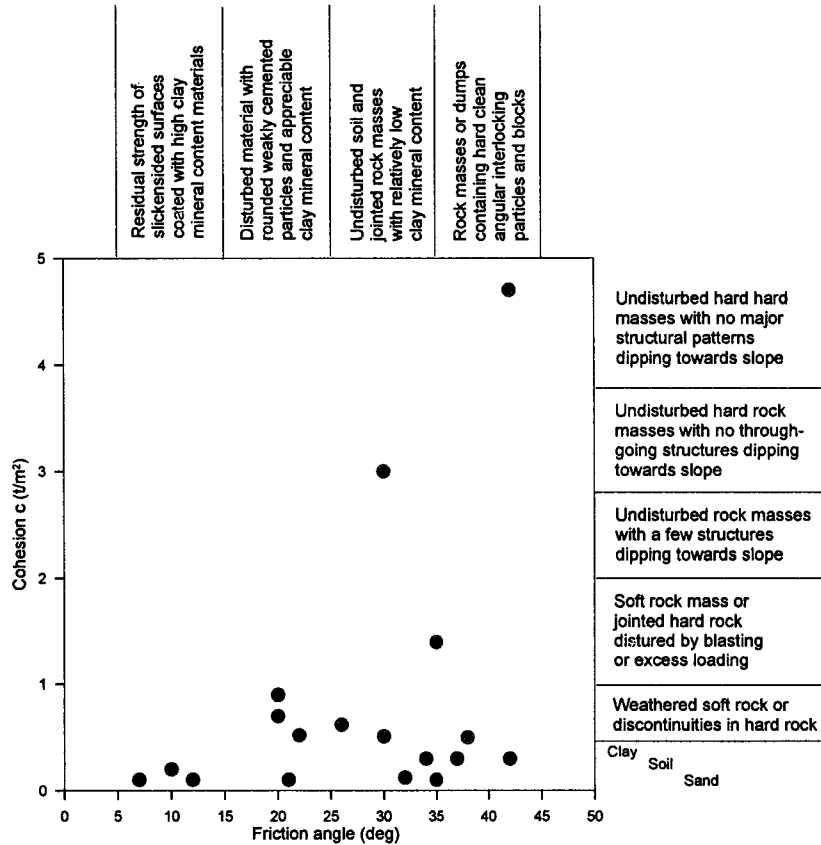


그림 12. 지반조건에 따른 붕괴사면의 점착력과 마찰각의 관계(After Heok and Bray 1974)

특히, 활동면에 충전물질이 존재하는 경우에 대해서는 표 5와 같이 여러 문헌치를 참조로 하여 결정하기도 한다.

표 5. 충전물을 포함하고 있는 불연속면의 전단강도(After Barton, 1974)

암 석 명	설 명	최 대 강 도		잔 류 강 도		시 험 자
		$C'(kg/cm^2)$	$\phi(^{\circ})$	$C'(kg/cm^2)$	$\phi(^{\circ})$	
현무암	점토화된 현무암질 각력암, 점토에서 현무암까지의 함유량 변화가 큼	2.4	42			Ruiz, Camargo, Midea & Nieble [109]
벤토나이트	백악내의 벤토나이트층 얇은 층상 삼축시험	0.15 0.9~1.2 0.6~1.0	7.5 12~17 9~13			Link [110] Sinclair & Brooker [111]

암 석 명	설 명	최 대 강 도		잔 류 강 도		시 험 자
		$C'(kg/cm^2)$	$\phi(^{\circ})$	$C'(kg/cm^2)$	$\phi(^{\circ})$	
벤토나이트질 세일	삼축시험 직접전단시험	0~27	8.5~29	0.3	8.5	Sinclair & Brooker [111]
점토	과압밀, 미끄러짐면, 절리 및 소규모 전단면	0~1.8	12~18.5	0~0.03	10.5~16	Skempton & Petley [112]
점토세일	삼축시험	0.6	32			Sinclair & Brooker [111]
점토세일	성층면(成層面)			0	19~25	Leussink & Muller-Kirchenbauer [113]
협탄층 암석	점토 분쇄암층, 두께 1.0~2.5cm	0.11~0.13	16	0	11~11.5	Stimpson & Walton [114]
백운석	변질된 세일층, 두께 약 15cm	0.41	14.5	0.22	17	Pigot & Mackenzie [115]
섬록암, 화강섬 록암 및 반암	점토 충전물 (점토 2%, PI=17%)	0	26.5			Brawner [116]
화강암	점토 충전물이 있는 단층 사실양토로 된 단층 충전물과 함께 약화됨. 구조적 전단대, 편암질 및 파쇄된 화강암, 풍화된 암 석 및 충전물	0~1.0	24~45			Rocha [105] Nose [117] Evdokimov & Sapegin [118]
		0.5	40			
		2.42	42			
경사암	층리면내 1-2mm의 점토			0	21	Drozd [119]
석회암	6mm의 점토층 1-2cm의 점토 충전물 1mm 이하의 점토 충전물	1.0	13~14	0	13	Krsmanovic 등 [120] Krsmanovic & Popovic [121]
		0.5~2.0	17~21			
석회암, 이회 암 및 갈탄	층상의 갈탄층 갈탄-이회암 접촉면	0.8	38			Salas & Uriel [122]
		1.0	10			
석회암	이회질 절리, 두께 2cm	0	25	0	15~24	Bernaix [123]
갈탄	갈탄과 그 하부에 있는 점토 사이의 층	0.14~0.3	15~17.5			Schultze [124]
몬모릴로나이 트 점토	백악내에 있는 8cm의 벤 토나이트(몬모릴로나이트) 점토층	3.6	14	0.8	11	Eurenus [125] Underwood [126]
		0.16~0.2	7.5~11.5			
편암, 규암 및 규산질 편암	10~15cm 두께의 점토충전물 얇은 점토를 가진 성층구조 두꺼운 점토를 가진 성층구조	0.3~0.8	32			Serafim & Guerreiro [127]
		6.1~7.4	41			
		3.8	31			
점판암	세밀한 판상 및 변질상태	0.5	33			Coates, McRorie & Stubbins [128]
석영/고령토/ 연방간석	혼합시료에 대한 삼축시험	0.42~0.9	36~38			

3.3 암종별 활동면의 전단강도

본 논문에서는 붕괴가 발생된 사면에 대해 현장에서 Tilt Test나 Profile Gauge로 활동면의 거칠기를 측정하여 활동면의 마찰각을 고려하고 점착력의 추정은 위의 역해석에 의해 추정하고자 한다.

화성암은 그림 13에서 보는 바와 같이 마찰각이 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 및 점착력이 $0\sim 2t/m^2$ 정도의 범위를 갖는다.

퇴적암은 그림 14에서와 같이 주로 마찰각이 층리면에 충전된 점토층에 의해 좌우되어 매우 작은 전단강도의 값을 갖는다. 마찰각은 $10^{\circ}\sim 17^{\circ}$, 점착력은 $0\sim 2.5t/m^2$ 의 범위에서 많이 분포한다.

변성암의 경우는 그림 15와 같이 매우 넓은 범위의 분포를 갖는데 마찰각은 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$, 점착력은 $0\sim 4.0t/m^2$ 범위를 갖는다. 이는 활동면으로 작용한 지질구조의 종류, 충전물질의 종류에 커다란 영향을 받는 것으로 판단된다.

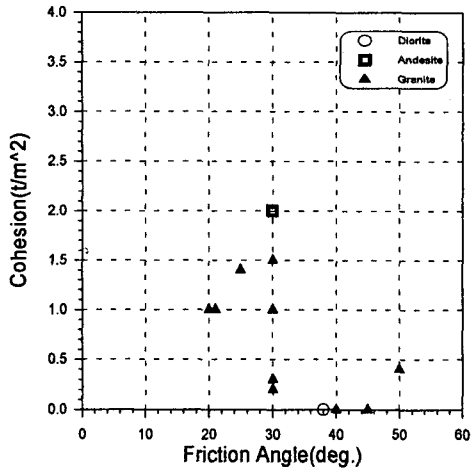


그림 13. 화성암에서 활동면의 점착력과 마찰각

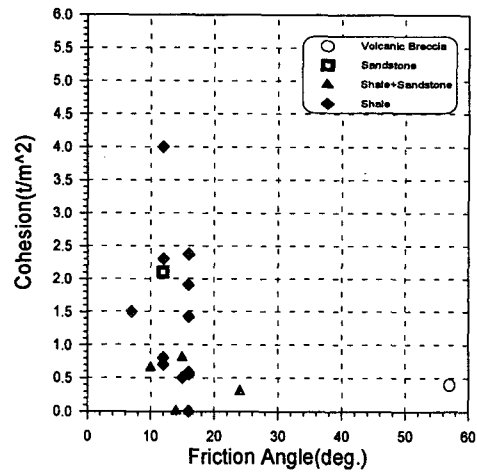


그림 14. 퇴적암에서 활동면의 점착력과 마찰각

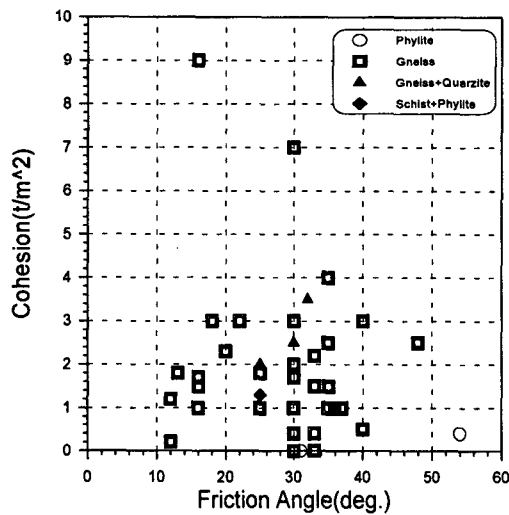


그림 15. 변성암에서 활동면의 점착력과 마찰각

각 암종별의 활동면에서의 전단강도는 표 6과 같은 범위를 나타내었다.

표 6. 각 암종별 활동면의 마찰각과 점착력범위

구 분 \ 암종	화성암	퇴적암	변성암
마찰각(°)	20°~30°	10°~17°	10°~40°
점착력(t/m ²)	0~2t/m ²	0~2.5t/m ²	0~4.0t/m ²

3.3 지질구조에 따른 활동면의 전단강도

일반적으로 지질구조에 따라 다른 전단강도를 보이는데 본 연구에는 지질구조에 따른 활동면의 전단강도를 표 7 및 그림 16~19과 같이 나타내었다.

표 7. 각 지질구조별 활동면의 마찰각과 점착력범위

구 분 \ 암종	절 리	엽 리	단 층	층 리
마찰각(°)	30°~40°	30°~35°	11°~38°	10°~17°
점착력(t/m ²)	0~3.5t/m ²	0.5~3.5t/m ²	0~3.0t/m ²	0~2.5t/m ²

절리는 절리면의 거칠기에 좌우되어 그림 16과 같이 마찰각이 30°~40°, 점착력이 0~3.5t/m²의 범위로 비교적 큰 전단강도값을 갖으나 마찰각이 25°이하의 범위에 존재하는 것들은 충전물질이 존재하는 경우의 전단강도이다. 엽리는 데이터수가 많지 않으며 그림 17과 같이 범위의 값을 갖는다. 단층은 그림 18과 같이 마찰각이 11°~38°, 점착력이 0~3t/m²의 범위로 비교적 넓은 범위의 분포를 보인다. 그리고 점토가 충전된 층리면은 그림 19와 같이 마찰각이 10°~17°, 점착력이 0~2.5t/m²의 범위에서 존재하는 것이 많았다.

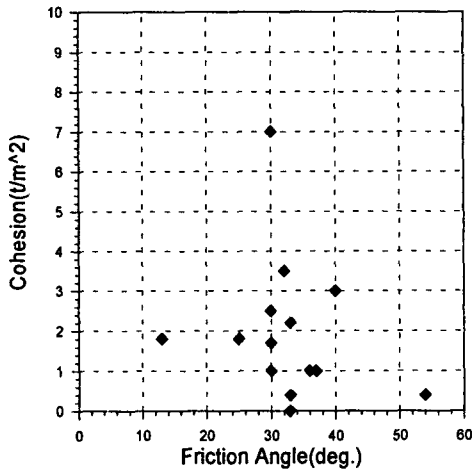


그림 16. 절리면의 마찰각과 점착력

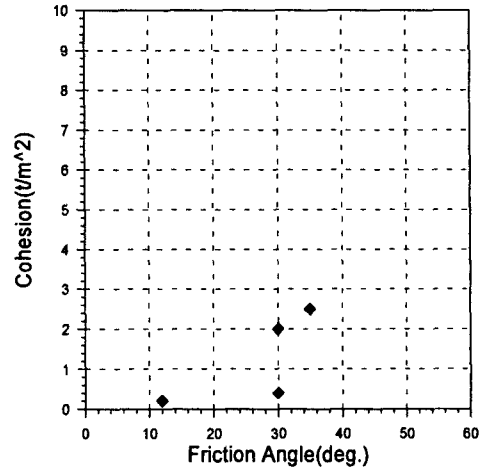


그림 17. 엽리면의 마찰각과 점착력

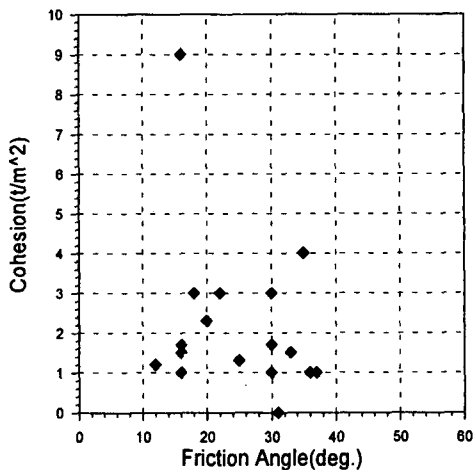


그림 18. 단층면의 마찰각과 점착력

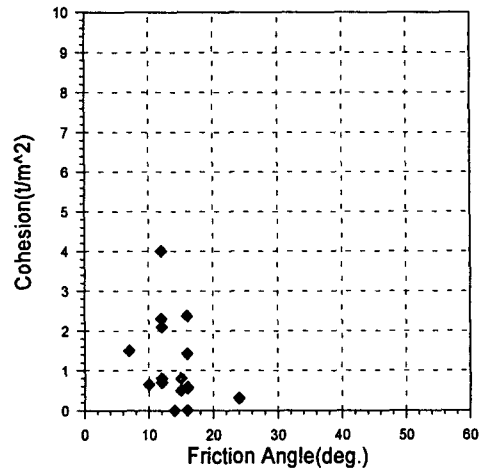


그림 19. 점토충전된 층리면의 마찰각과 점착력

4. 결론

붕괴가 발생한 절토사면에서 암종별, 지질구조별로 역해석법에 의해 사면안정해석을 위한 전단강도를 추정한 결과는 다음과 같다.

- 1) 절토사면의 붕괴원인은 토질 및 지질조건, 지형, 강우, 지하수 및 지표수, 사면형상, 굴착 및 발파와 같은 인위적인 조건, 사면보호공 등과 같이 다양한 영향이 있을 수 있으나 가장 많은 영향을 주는 조건으로 토질 및 지질적인 조건이라고 할 수 있다.
- 2) 암종별 붕괴유형에 따른 붕괴빈도 분석은 평면파괴는 전체의 약 43.4%에 이르러 가장 많은 붕괴형태로 나타났고 쉐기파괴는 17.1%가 발생했으며 전도파괴는 가장 적은 2.3%를 차지하였다. 원호파괴는 풍화가 발달한 부분에서 대부분 발생한 것으로 전체의 6.9%로 조사되었으며, 암괴의 탈락으로 인한 낙석이나, 세굴에 의한 유실 혹은 상부 토사부분에서의 유실에 의한 붕괴형태는 전체의 약 19.4%가 발생한 것으로 조사되었다.
- 3) 붕괴가 발생한 사면에서 역해석법에 의한 활동면의 전단강도를 추정한 결과, 화성암에서는 마찰각 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 점착력 $0 \sim 2t/m^2$ 의 범위를 가지며 퇴적암에서는 마찰각 $10^{\circ} \sim 17^{\circ}$, 점착력 $0 \sim 2.5t/m^2$ 의 범위, 변성암에서는 마찰각 $10^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 점착력 $0 \sim 4.0t/m^2$ 의 범위가 우세한 것으로 나타났다.
- 4) 지질구별 구분에 의하면, 절리에 의해 붕괴가 발생한 경우에는 마찰각 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 점착력 $0 \sim 3.5t/m^2$, 엽리면은 마찰각 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$, 점착력 $0.5 \sim 3.0t/m^2$, 단층면은 마찰각 $11^{\circ} \sim 38^{\circ}$, 점착력 $0 \sim 3.0t/m^2$, 층리면은 마찰각 $10^{\circ} \sim 17^{\circ}$, 점착력 $0 \sim 2.5t/m^2$ 정도의 범위를 갖는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 유병옥(1997), “암절취면의 안정성 평가 및 대책에 관한 연구”, 한양대학교 박사논문, pp.4~58, pp.155~169
2. 정형식, 유병옥(1996), “지질특성에 따른 암반사면 붕괴유형연구”, 한국지반공학회지, 제 12권, 제 6호, pp.37~49.
3. 유병옥외 2인(2000.12), “암석특성에 따른 절토사면구배 결정기준 연구”, pp.106~107, 153~153.
4. 山田邦光(1982), “最新の斜面安定工法”, 理工圖書, pp.55~97.
5. 山田剛二, 小橋燈治(1971), “地すべり・斜面崩壊の實態と對策”, pp.361~388, pp.403~417.
6. 日本道路公團(1986), “道路土工 のり面工・斜面安定工 指針”, 社團法人 日本道路協會, pp.6~32.
7. Heok(2000), “Shear strength of discontinuities”, Rock Engineering, p69, pp98~100.
8. Mihail E. Popescu, Takuo Yamagami(1994), “Back Analysis of Slope Failure - A Possibility or A Challenge”, 7th International IAEG Congress, Balkama, Rotterdam, pp.4737~4744.