

충전물에 의한 암반사면 붕괴사례

김용준*, 김선기*, 김주화*

*대림산업(주) 토목사업본부 토목설계팀

e-mail:9yjkim9@hanmail.net

Case Study on Failure of Rock Slope Caused by Filling Material

Yong-Jun Kim*, Sun-Ki Kim*, Joo-Hwa Kim*

*Dept. of Civil Project, Daelim Industrial Co., Ltd.

요 약

세일층으로 구성된 암반사면에서 층리면을 따라 대규모 평면파괴가 사면 중앙부에서 발생하였다. 현장조사시 파괴사면 주변은 지하수 누수 흔적과 점토층의 충전물이 존재하였으며, 파괴원인을 검토한 결과 층리면을 따라 형성된 점토 충전물의 낮은 전단강도와 강우시 인장균열내 형성된 수압에 의해 붕괴가 발생한 것으로 나타났다. 그리고 충전된 절리면의 전단강도 특성을 규명하기 위해서 모래, 점토의 인위적인 충전물을 이용하여 충전재 두께비에 따른 전단강도 특성을 고찰하였다.

1. 서론

암반사면의 파괴는 토사사면과 달리 사면을 구성하는 재료의 강도 보다는 사면내 발달한 불연속면의 방향성에 의해 주로 발생한다. 그러나 절리면의 방향성이 사면의 안정성에 불리하더라도 절리면의 표면이 거칠고 강도가 큰 경우는 안정성을 유지하고 있다. 그러나 불연속면을 따라 파괴가 발생한 사면은 파괴면이 풍화에 의해 강도가 저하되거나 충전물이 포함된 경우가 빈번하다. 본 연구에서는 세일층으로 구성된 암반사면에서 층리면을 따라 평면파괴가 발생한 사면을 조사한 결과 파괴사면 주변은 지하수 누수 흔적과 점토층의 충전물이 존재하였으며, 파괴원인을 검토한 결과 층리면을 따라 형성된 점토 충전물의 낮은 전단강도와 강우시 인장균열내 형성된 수압에 의해 붕괴가 발생한 것으로 나타났다.

2. 충전물의 분류

충전물은 불연속면에서 인접한 암석 벽면을 분리시키는 물질(ISRM, 1978)로 정의되어지며, 보통 모암 보다 강도가 약한 경우가 대부분이다. 전형적인 충전물로는 모래, 점토, gouge 그리고 압쇄작용

에 의해 원암의 광물이 모두 파쇄되어 미립결정의 집합체로 변화된 압쇄암, 압쇄각력암, 단층각력암 등이 있다(Barton, 1974).

Barton(1974)은 충전된 절리면의 발생기원을 변위이력과 하중이력으로 구분하고 충전된 절리면의 특징을 그림 1과 같이 분류하였다. Barton(1974)은 충전물의 발생기원과 다양성을 강조하기 위하여 변위이력에 따라 2가지로 분류하였다. 그리고 하중이력에 따라서 정규압밀과 과압밀로 구분하여 충전물의 특성에 대하여 언급하였다.

첫 번째 그룹은 오랜 기간에 걸쳐 전단변위를 겪은 것으로서 단층, 전단대, 활동이 발생한 층리면 등이 있다. 이중 점토 압쇄암과 활동이 발생한 층리면 내에 존재하는 충전물은 습곡작용이나 중력에 의해 활동이 발생하는 동안에 불연속면에 존재하는 충전물이 재형성된 것이며 충전물 내에 활동면을 가지고 있다. 그러나 단층, 전단대 내에 존재하는 충전물은 전단과정 중에 모암에서 발생한 각력이나 gouge 등으로 충전되고 풍화의 진행에 따라 세립의 입자로 변질되며, 점토입자는 우세한 응력방향을 따라 방향성을 가지기도 한다.

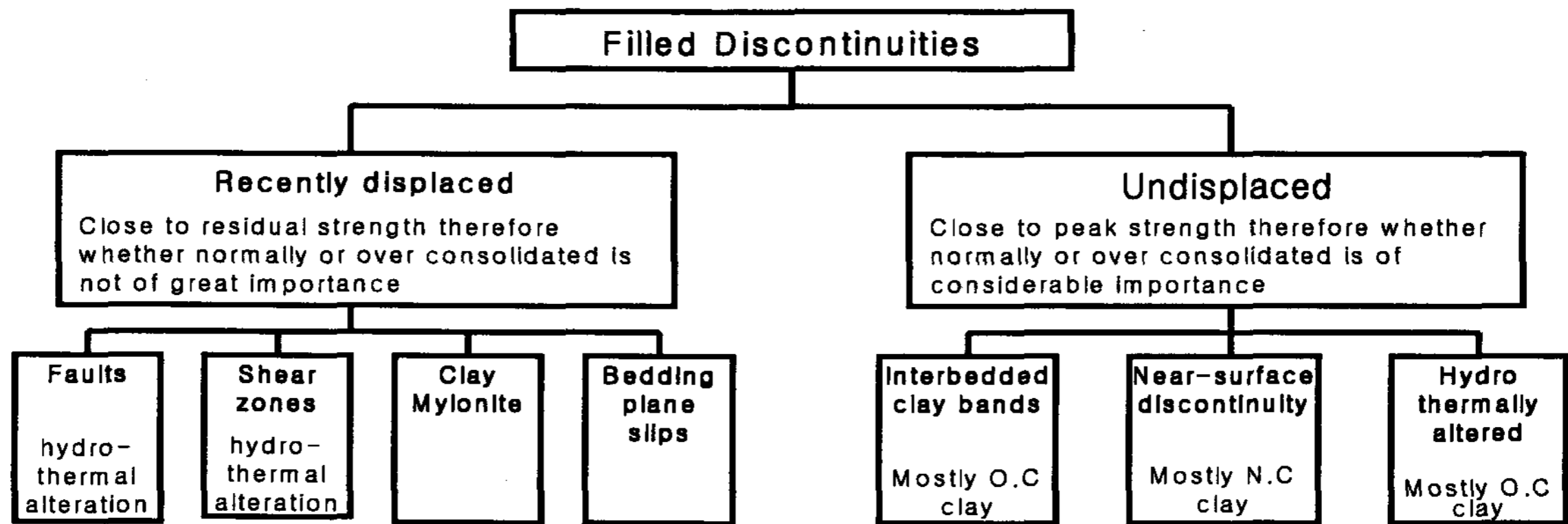


그림 1. 충전물의 분류 (Barton, 1974)

변위가 발생하지 않은 두 번째 그룹은 셰일, 사암, 석회암과 같이 강도가 약한 퇴적암에서는 변질 층이나 점토층으로 나타나며, 화강암과 변성암에서는 변질정도에 따라 충전물의 종류가 매우 다양하며, 그 규모도 변성의 저항정도에 따라 폭이 수 mm에서 수 m로 매우 폭 넓게 나타난다. 이때 형성된 점토입자는 정수역학적인 특성 때문에 특정한 방향성을 나타내지는 않는다.

그리고 Barton(1974)은 변위이력에 따른 구분 이외에도 추가적으로 점토 충전물에 대해서 정규압 밀인지 과압밀인지 구분하고자 하였다. 이는 굴착에 의한 충전된 절리면에 제하가 발생할 경우 점토층 내에서 발생하는 연화(softening), 팽창(swelling), 간극수압의 변화를 간과하는데 그 구분 근거를 찾을 수 있으며, 공학적인 설계에서 이런 특성을 고려하여야 하는 것으로 언급하고 있다.

3. 사면붕괴현황

3.1 사면현황

본 연구의 대상사면은 상부대동계의 칠곡층에 해당하는 사암과 셰일이 호층을 이루고 있으며, 사면 중앙부에 3 ~ 5m 폭으로 관입된 암맥(dyke)이 3군데 나타나고 있다. 대상사면의 총 연장은 280m로써 붕괴가 발생한 구간은 40m 정도이다. 사면의 방향은 N86E/45SW이며, 사면내 발달한 층리의 방향성은 N57E/20SE이다. 그리고 층리의 연장성은 매우 좋으며 사면내 분포하는 불연속면은 4개의 군으로 나뉘어진다.

당초 본 절취사면은 표준횡단면도에 의해 발파암의 사면구배 1 : 0.5로 계획되었으나, 사면에서 발달한 절리에 의해 일부구간에서 붕괴가 발생하여 시

공중 사면구배가 1 : 1.0으로 완화되었다. 그 후 집중호우시 사면 내 발달한 층리면(dip 20°)을 따라 사면 중앙부에서 대규모의 평면파괴가 발생하였다. 사면 붕괴현황을 그림 3에 나타내었다.

파괴가 발생한 사면에 대해서 지표지질조사를 수행한 결과, 사면은 적색 셰일과 사암이 호층을 이루며 그 층상이 비교적 뚜렷하였다. 그리고 사면의 1단 소단 상부는 풍화가 매우 심하고 절리면의 간격이 매우 조밀하였다. 그리고 사면내 관입된 암맥은 보통 정도의 풍화를 나타내고 있으며, 그 경계면을 따라 지하수 누수 흔적과 2~10cm 두께의 충전물이 존재하였다. 사면파괴는 층리면과 인장균열에 의해 형성된 블록이 선단에서 층리면을 따라 발생하였다. 파괴사면 하단부에는 상당히 풍화한 연약대가 존재하였으며, 파괴사면 주변에는 활동시 압출된 점토 충전물이 관찰되었다. 그리고 사면상부에는 깊이 15m 정도의 인장균열이 있었으며, 사면 파괴에 의해 폭은 4m 정도였다. 파괴사면의 우측에는 평면파괴에 저항력을 갖지 못하는 수직절리가 있었으며, 변위가 발생하지 않은 위치에서 약 2m의 수평변위가 발생하였다. 그리고 평면파괴에 의한 사면의 수평이동 형상과 상부 인장균열 상황을 그림 2에 나타내었다.



(a) 파괴사면 수평이동 (b) 상부 인장균열

그림 2. 사면파괴 세부사진

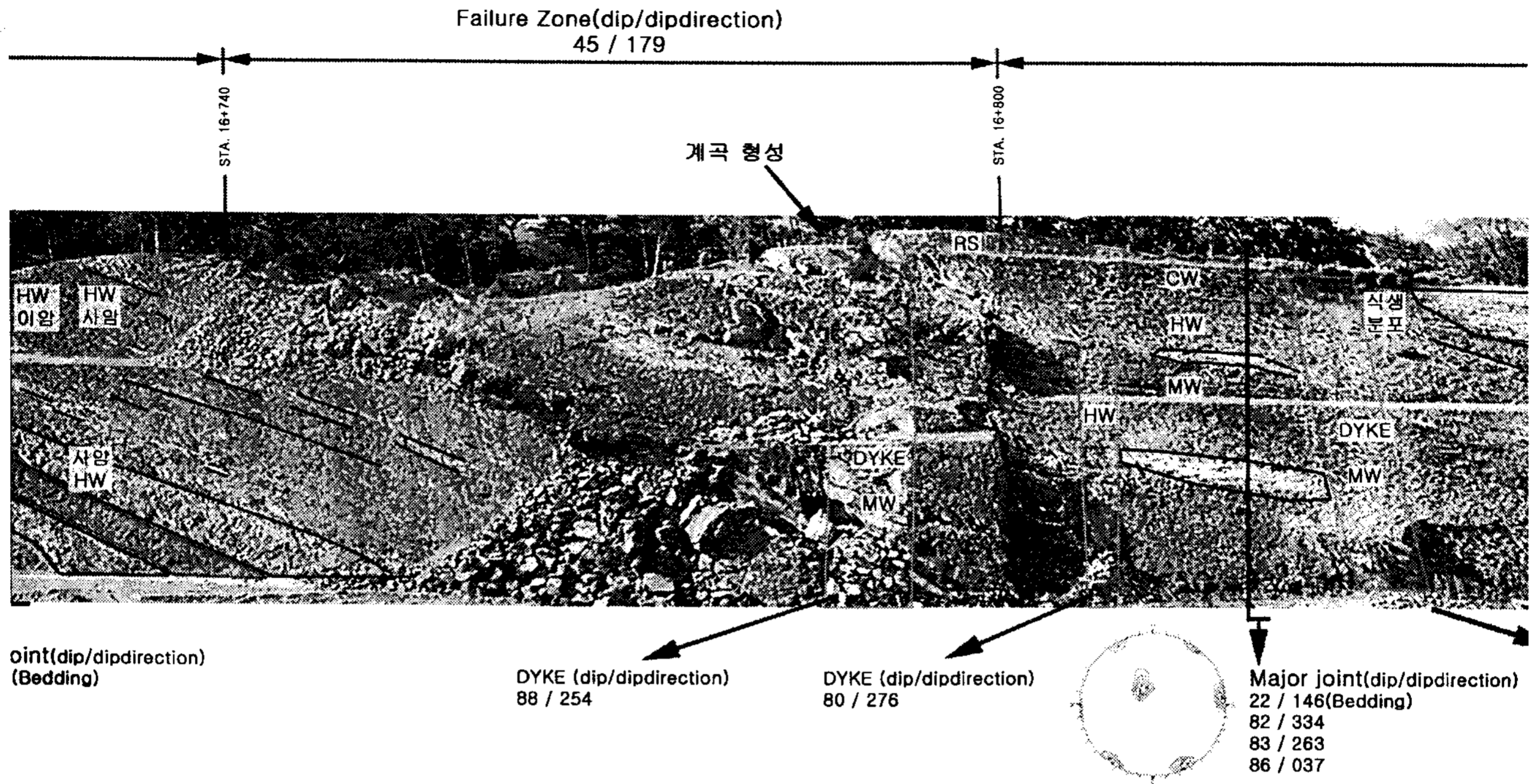


그림 3. 사면파괴 현황

3.2 절리면의 공학적 특성

암석의 공학적 특성을 파악하기 위하여 대상사면에서 채취된 시료에 대해서 일련의 시험을 수행하였으며, 특히 절리면의 전단강도를 충전물이 포함된 경우와 포함되지 않은 2가지 경우에 대해서 수행하였다. 이때 충전재 두께는 2cm 였으며, 절리면 전단시험 결과 충전된 절리면은 충전되지 않은 절리면은 상당히 낮은 전단강도를 보이고, 충전재의 전단강도와 유사하게 나타났다.

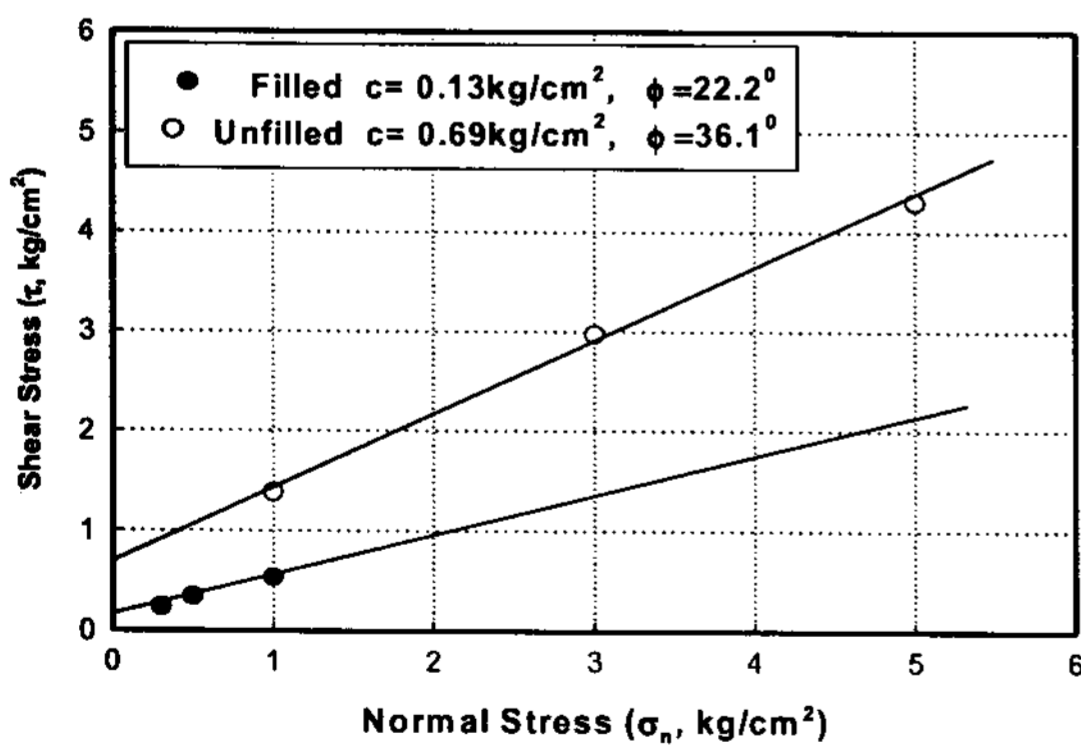


그림 4. 절리면 전단시험 결과

4. 사면붕괴 원인

현장조사 결과 파괴면은 사면전단의 층리면과 사면 상부에 발달한 수직절리를 따라 발생한 인장균열에 의해 형성되는 것으로 판단되어 파괴사면의 형상을 그림 5와 같이 선정하였다. 이러한 파괴면은 파

괴사면 제거시 현장에서 조사된 파괴면과 거의 유사하였다. 사면 파괴 원인을 파악하기 위하여 충전물 존재 유무에 따른 전단강도 값과 인장균열의 지하수위 조건을 변화하여, 사면파괴시 전단강도와 인장균열 수위 조건을 검토하였다. 파괴사면의 해석결과를 표 1에 나타내었다.

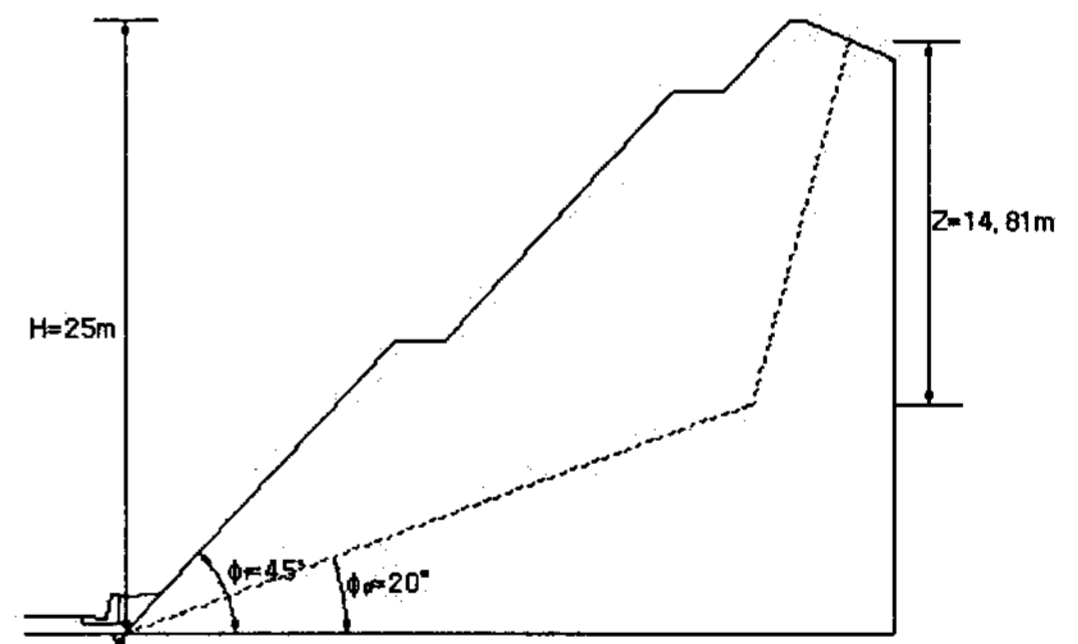


그림 5. 붕괴된 사면의 해석 단면

표 1. 파괴사면 해석결과

절리면 상태	물의깊이 (Zw, m)	안전율 (F.S.)
충전된 상태	0	1.28
	7.41	1.04
충전되지 않은 상태	14.81	0.71
	0	2.64
	7.41	2.18
	14.81	1.54

해석 결과에 의하면 사면 선단으로부터 발달한 층리면 내에 충전물이 없는 경우는 인장균열면 내의 수위가 최대인 경우도 안전율이 1.5를 상회하여 안정성에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러나 층리면에 충전물이 있는 경우는 인장균열 내의 수위가 인장균열 깊이의 절반 정도에서 안전율이 1.04을 나타내어 극한상태에 있는 것을 알 수 있었다. 따라서, 붕괴원인은 층리면을 따라 형성된 점토 충전물과 강우시 인장균열면에 형성된 수위에 의해 붕괴가 발생한 것으로 판단된다.

5. 결론

불연속면내에 존재하는 점토 충전물로 인해 붕괴가 발생한 파괴사면에 대해서 파괴사례를 규명하고, 충전물을 포함한 불연속면의 전단강도 평가방법에 대해서 고찰하고 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 사면파괴 현황

본 연구의 대상사면은 상부대동계의 칠곡층에 해당하는 사암과 셰일이 호층을 이루고 있으며, 집중호우시 사면 내 발달한 층리면을 따라 사면 중앙부에서 대규모의 평면파괴가 발생하였다. 파괴사면 주변은 지하수 누수 흔적과 점토층의 충전물이 존재하였다. 그리고 사면상부에는 깊이 15m 정도의 인장균열이 있었으며, 사면 파괴에 의해 인장균열 폭은 4m로 확대되어 있었다. 그리고 파괴사면은 약 2m 정도의 수평변위가 발생하였다.

2) 사면파괴 원인

파괴사면의 해석결과, 불연속면내에 충전물이 없는 경우는 인장균열의 수위가 사면상부 15m까지 상승하여도 안전율이 1.5를 상회하여 안정성에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러나 충전물이 있는 경우는 수위가 인장균열 깊이의 절반 정도에서 안전율이 1.04를 나타내었다. 따라서 붕괴원인은 층리면을 따라 형성된 점토 충전물의 낮은 전단강도와 강우시 인장균열내 형성된 수압에 의해 붕괴가 발생한 것으로 판단된다.

3) 충전된 불연속면의 전단강도 평가

충전된 불연속면의 전단강도는 불연속면의 거칠기, 충전물 종류, 두께 등에 따라 변화한다. 그러나 충전된 절리면의 전단강도가 일정해지는 한계두께비 이후는 충전물의 전단강도를 적용하여도 될 것으로

사료되며, 충전물 두께가 한계두께비 보다 작은 경우는 강도감소율이나 실험식에 의해 전단강도 산정 모델식을 이용하여 그 안정성을 평가할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Barton N., "Review of a new shear strength criterion for rock joints", *Engineering Geology*, Vol. 7, 287-332, 1974.
- [2] Bieniawski Z. T., "The geomechanics classification in rock engineering application", *Proc. 4th Int. Congr. Rock Mech., ISRM, Montrteux*, Vol. 2, pp. 51-58, 1979.
- [3] Hoek, E. and Brown, E. T., "Empirical strength criterion for rock masses", *J. Geotech. Engng Div. ASCE 106(GT9)*, pp. 1023-1035, 1980.
- [4] Nieto, A. S., "Experimental study of the shear stress-strain behavior of clay seams in rock masses", Ph. D. Thesis, University of Illinois, 1974.
- [5] Phien-wej, N., Shrestha, U. B. and Rantucci, G., "Effect of infill thickness on shear behaviour of rock joints", *Proc. Int. Conf. on rock joints, Leon, Norway*, pp. 289-294, 1990.
- [6] Toledo and Freitas, "The peak shear strength of filled joints", *Fractured and jointed rock masses, Balkema*, pp. 385-392, 1995.