

## 석산개발 지역 퇴적장 석축사면의 안정성 해석

마호섭<sup>1</sup> · 이성재<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 환경산림과학부(농업생명과학연구원), <sup>2</sup>서울대학교 학슬림

### Analysis of Slope Stability of Masonry Retaining Walls in Quarry

Ho-Seop Ma<sup>1</sup> and Sung-Jae Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Forest Science, Gyeongsang National University (Institute of Agriculture and Life Science), Jinju 52828, Korea

<sup>2</sup>Seoul National University Forest, Seoul 08826, Korea

**요약:** 석산개발 지역 퇴적장 석축사면의 사면 조성 및 관리기술 증진을 위하여 현황측량을 실시하고, 대표단면을 선정하여 사면의 안정성 해석을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다. 사면안정 해석을 위하여 선정한 대표단면의 퇴적장 최하단부 사면(A) 경사는 59°로서 급경사를 이루고 있으나, 전체 퇴적장 사면(A, B, C, D, E, F)의 평균경사는 38.5°이었다. 퇴적장 사면의 수평거리는 총 66.2 m, 사면높이는 48.3 m이지만 퇴적장 석축사면의 경사는 비교적 급하며, 시각적으로도 불안정해 보인다. 사면안정 해석에는 건조시와 포화시를 고려하였으며 포화시의 사면안정 해석은 대상사면이 완전히 포화된 상태를 모델링하여 수행하였다. 지반의 강도정수는 석축과 배면지반으로 구분하고 안전성을 검토하였다. 건기시 안전율은 1.850, 우기시 안전율은 1.333으로 나타나 건기시 및 우기시의 안전율 1.5와 1.2를 상회하여 사면의 활동에 대하여 모두 안전한 것으로 나타났다. 그러나 집중호우 시 퇴적장 사면 상부의 풍화된 마사토는 사면침식과 붕괴 위험성이 높아 배수로 설치 등 적절한 유지관리를 통한 안정대책이 필요하다고 생각된다.

**Abstract:** The slope stabilization analysis was performed by conducting survey and selecting the representative section in order to improve slope composition and management technology of masonry embankments in the quarry area. The mean slope of the masonry retain wall (A, B, C, D, E, F) was 38.5°, although the steep slope of the lowest slope (A) as 59°. The horizontal distance of the masonry embankments is 66.2 m and the slope height is 48.3 m. However, the inclination of the masonry embankments is relatively steep and visually unstable. The slope stability analysis for the slope stability analysis was taken into account during the drying and saturation. The slope stability analysis during saturation was performed by modeling the fully saturated slope. The strength constants of the ground were divided into two groups. The safety factor for dry period was 1.850 and the safety factor for rainy season was 1.333. The safety rate of dry period and rainy season was above 1.5 and 1.2. However, the weathered granite on the upper part of the masonry embankments at the time of heavy rainfall is considered to have a high risk of slope erosion and collapse. Therefore, it is considered necessary to take measures for stabilization through appropriate maintenance such as drainage installation.

**Key words:** masonry embankments, quarry, slope stability analysis

## 서론

채석장은 각종 산업에 보조를 맞추어 급진적으로 발전하여 엄청난 양의 돌들이 산업용재로 채석되면서 크게

증가되었다. 채석장에는 흙과 풍화된 암석의 제거작업으로 인하여 많은 양의 흙과 폐석이 생기고, 침전지등에서 나오는 진흙 등 각종 흙이 다량으로 발생한다. 산지가 채석장으로 개발되기 전에는 수자원, 수질, 대기, 자연경관 등의 보존이 잘 되어 있었으나 채석장으로 개발된 이후에는 이들 환경이 파괴되고 산지의 지형이 변하게 된다.

채석장에는 암석이나 흙을 모아두고 필요로 하는 토목 공사장이나 건축공사장에 보내기 위하여 퇴적장을 설치

\* Corresponding author  
E-mail: lsj83@snu.ac.kr

ORCID

Sung-Jae Lee  <https://orcid.org/0000-0002-9192-4692>

하게 된다. 퇴적장은 퇴적용량에 비하여 충분한 여유를 가진 장소를 택하고 재해의 방지 및 경제성을 고려하여 선정하여야 한다. 퇴적장은 빗물의 유입을 방지하기 위하여 배수구나 하수구를 설치하고, 하부에는 석축 등의 옹벽을 쌓아 사면을 형성하므로 사면의 안정 검토가 필요하다. 석축에 주로 사용되는 석재는 철근이나 시멘트와 같은 다른 옹벽재료에 비해 값이 싸고 쉽게 생산될 뿐만 아니라 시공하는 비용도 적어 택지를 조성할 때에나 제방을 쌓을 때 콘크리트 옹벽 대신 석축을 많이 사용하고 있다.

특히, 석축으로 쌓은 퇴적장 사면은 수분을 흡수할 경우 유동성이 증가하여 비가 올 때 붕괴되어 도로, 하천, 주택이나 농경지에 흘러 들어갈 위험이 있으므로 주의 기울여야 한다. 퇴적장 사면의 안정성이란 체적력과 지반의 전단강도에 대한 균형의 문제이다. 현재 안정되어 있는 사면이 파괴되는 상황으로 가정하기 위해서는 두 요인에 대한 균형의 변화를 가정하게 된다. 일반적으로 체적력은 그대로 두고, 퇴적장 사면을 구성하는 지반의 전단강도가 전체적으로 감소한다고 가정하여 파괴시의 전단강도를 구하며, 그 지반의 전단강도와 비교하여 파괴에 대한 안정성을 추정한다.

채석장내 석축으로 쌓은 퇴적장의 사면은 장기간에 걸쳐 전단응력의 작용을 받고 있지만, 응력이 작용하더라도 실제 변형이 일어나지 않는 것은 변형이 일어나지 않을 정도의 전단강도가 지속되고 있기 때문이다. 그러나 호우가 내려 흙에 물이 침투하면 중량이 증가하고, 투수력도 더욱 커져 토중의 전단응력이 증가하게 된다. 여러 해에 걸쳐 균형이 유지되어 온 전단강도와와의 관계가 변화되면서 전단파괴가 일어나게 된다. 특히 지반이 튼튼하더라도 과대한 체적력의 증가가 있으면 파괴가 일어날 수 있다.

사면안정 해석은 대상지역의 지형이나 지질 또는 과거의 붕괴나 침식 흔적을 참고하고 재료의 강도특성, 수리 조건 등을 조사하여 파괴형상의 예측과 그 사면의 안정성을 계산하여 평가를 하게 된다. 사면안정해석에 가장 보편적인 방법은 한계평형방법으로서 신뢰성이 가장 높은 것으로 평가되어 지고 있다.

한계평형이론에 근거한 사면안정해석 이론은 Fellenius (1936)에 의하여 발표된 이래 Bishop(1954, 1965), Janbu (1954), 및 Morgenstern and Price(1965)에 의하여 제안 개발되어 현재에 와서는 사면안정 해석이론의 주축을 이루고 있다. 이러한 사면안정 해석 이론을 주축으로 사면안정의 이론적 해석방법에 관한 연구(Nonveiller, 1965; Kim, 1974)가 이루어졌으며, 사면붕괴 지역의 안정성 해석으로 각종 복합공법을 제안(Goo et al., 2000)하고 있다.

특히, 석축 구조물과 암반 사면의 해석 시 석축 및 암반을 큰 비탈로 간주하고 연구하였으며(Kim, 1974; Kim,

2002), 이러한 석축 구조물과 암반 사면의 해석 연구와 함께 각종 연약지반상의 보강성토사면의 안정에 관한 연구도 이루어 졌다(Chun et al., 2000; Lim et al., 2001). 절리면이 발달한 골재석산의 최적개발을 위한 발파 및 사면유지에 관한 연구도 있다(Yang et al., 1997). 또한, 암반 절개에 따른 사면안정성 조사 시 지질구조 외에 환경요인도 고려하여 지반 특성에 적합한 지질조사 방법을 적용하여야 한다고 하였다(Lee and Chang, 1996; Lee and Yoo, 2000).

본 조사지역 채석장내 퇴적장은 석축을 쌓아 만든 사면으로서 비교적 사면길이가 길어 시각적으로 불안정해 보일 뿐만 아니라, 산길을 걸어 들어가는 진입로와 경계를 이루고 있고, 석축으로 인한 과대한 체적력의 증가로 사면 붕괴의 위험성을 안고 있다.

따라서 본 연구는 석산개발 지역에 석축으로 쌓은 퇴적장 비탈면에 대한 석축사면의 안정성을 해석을 통하여 채석장내 퇴적장 석축의 조성 및 유지관리를 위한 기초적 자료를 제공하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 퇴적장 석축사면의 조사

본 채석장은 거창군 위천면 상천리 산 9번지 외 1필지로서 위천면 소재지에서 금원산 자연 휴양림 방면으로 약 2.5 km 지나서 북쪽으로 약 1.8 km 산복지점에 위치하고 있다. 채석장 진입 도로변에 2개 마을 123세대 298명의 주민이 거주하고 있으며, 채석지구는 채석으로 인하여 경관이 많이 훼손되어 금원산 자연휴양림 입구도로변에서 노출되는 가시지역이다.

본 채석장에 대하여 토탈스테이션을 이용하여 현황측량을 실시하고 횡단도면을 작성하였으며, 지표지질 조사와 퇴적장 석축사면 중 가장 불안정하다고 판단되는 1개 지점을 대표단면으로 설정하였다(Figure 1). 퇴적장 석축사면은 대표단면을 중심으로 사면의 수평거리, 길이, 높이 및 경사도를 측정하였다(Figure 2).

### 2. 퇴적장 석축사면의 안정성 해석

퇴적장 사면의 안정성 해석은 대표단면을 중심으로 비탈면의 특수성을 파악하여 지반물성치 산정을 통해 건기시와 우기시의 안정성을 검토하였다. 특히, 퇴적장의 석축으로 쌓은 성토사면에 대한 안정해석은 이해가 쉽고, 힘과 모멘트의 평형을 고려하여 원호 및 비원호 해석에 용이한 Bishop의 절편법을 이용하여 해석을 수행하였다. 사용된 사면안정 해석 프로그램은 *pcstable* 5 m이며, 사면안정 해석에는 건조시와 포화시를 구분하였다. 포화시의

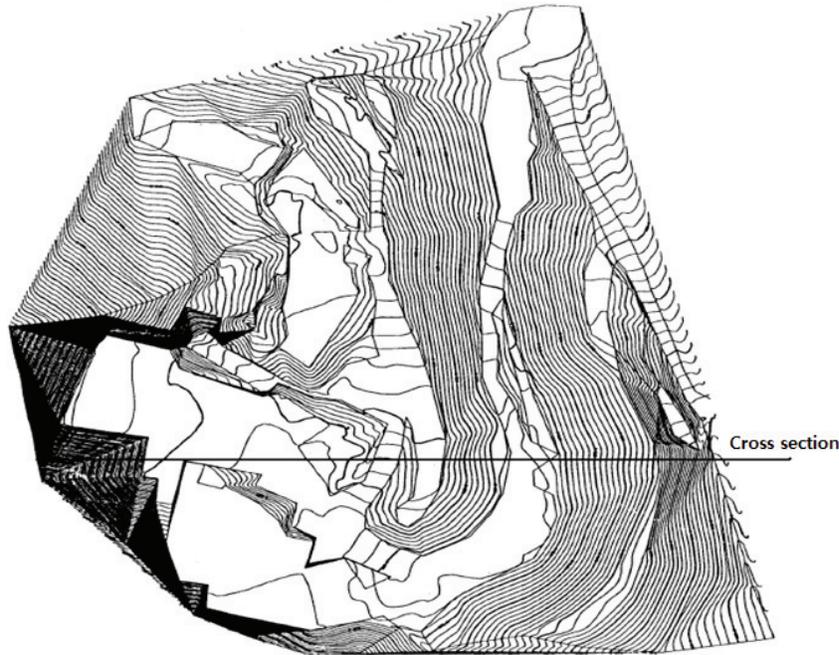


Figure 1. The present condition plane and cross section of the slope.

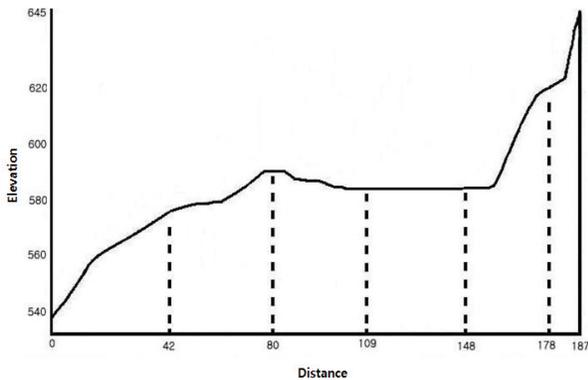


Figure 2. The cross section of the slope.

사면안정해석은 현장에서 간극수압 계측이 실시되지 못한 관계로 예상 지하수위가 지표면에 존재하여 대상사면이 완전히 포화된 상태를 모델링하여 수행하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 잔벽면 및 퇴적장 석축사면의 특성

본 채석장지역 일대에 분포하는 암석은 선캄브리아기 변성암류를 기반으로 하여 이를 관입한 중생대의 화성암류를 주체로 하며 시대미상의 각섬석 화강암과 섬록암과 제 4기 충적층이 소규모로 분포하고 있다. 선캄브리아기의 변성암류는 주로 서북부와 동부에 분포하나 타 지역에도 소규모 분포하고 있는데, 이와 같은 분포상태는 백악기

에 있었던 화산활동에 의해 상호분리된 것으로 보인다.

본 채석장내에서 산출되는 화강암 중 흑운모화강암 원석은 중립등립질 입상석리를 갖고 사장석, 석영, 정장석, 흑운모로 구성되어 있다. 타 지역의 화강암에 비하여 입도가 작아 기념비석과 건축석으로 혼용이 가능하고 사장석의 함량이 많아 담백한 색상을 나타냄과 동시에 암석 전체로 보아 경도가 낮으므로 절단 시 공임이 적게 소요되는 장점이 있다. 또한 절리가 적어 대괴로 산출되고 철분도 적어 비교적 고가로 판매되고 있으나, 부분적으로 절리가 나타나며 흑운모 반점이 희소하게 나타나기도 한다.

채석작업으로 인하여 발생된 잔벽면은 Figure 2에서 보는 바와 같이 정상부(641 m)와 바닥의 채석작업과의 높이(576 m)는 약 65 m 정도로 나타났다. 수평거리 약 160 m 지점 채석장 잔벽의 경사는 80도 이상을 보이고 있으며, 산정부 산림토양의 토심은 대체적으로 20 cm 내외로 얇은 편이나 퇴적이 되어 있는 산복 및 산록부위는 약 100 cm 두께의 풍화토(마사토+실트질)로 구성되어 있다. 채석장 주변일대의 표토층 및 풍화잔류토는 10 m 미만으로 얇게 분포하고 대부분 사질토로서 투수성이 양호하며, 그 하부는 박층의 풍화대와 석재로 채석되고 있는 신선한 화강암 암반으로 구성되어 있다.

본 채석장지역 사면의 상부 비탈면에서 유입되는 지표수는 적지만 오랜 세월동안 비, 바람, 풍설에 의하여 물리, 화학적 변화를 일으켜 잔벽면의 상단부는 시꺼멓게 물길의 흔적이 남아 있다. 채석장 잔벽면에 나타나는 분

리면들의 특징을 보면 절리면이 대체로 신선하며 풍화가 거의 되지 않은 상태로 나타나고 있다. 절리면의 거칠기는 평탄하거나 가끔 계단상을 보이며, 미소 거칠기는 조금 거친 수준이다. 절리의 간극은 0.1 mm 이하로 매우 작고, 절리의 연장성은 매우 좋게 나타나며, 곳곳에 지하수의 영향으로 누수가 발생한 것을 관찰할 수 있다. 지하수의 흐름은 주로 불연속면에 의하여 결정되고, 대부분 화강암의 풍화는 네모형의 절리에 따라 균열이 진행되면서 양파모양으로 풍화되어 마사토로 변하게 될 것이다. 또한, 불연속면에 침투한 침투수량에 따라 균열의 결합력이 약해지거나, 동결에 의하여 균열이 확대되면 잔벽면은 블록상의 낙석붕괴도 일어날 위험성이 있다.

본 채석장 퇴적장의 석축사면은 대부분 채석장에서 생산한 석재와 폐석으로 쌓았으며, 배면지반은 화강암에서 풍화된 마사토 및 자갈이 혼재된 지반으로 구성되어 있다. 퇴적장의 물매는 채석적지의 안정성과 복구 시 복구 녹화를 가능하게 하므로 대단히 중요하다. 특히, 사면 저부지반의 전면에는 큰 석재 및 폐석으로 구성되어 있고, 상부로 올라갈수록 다소 적은 석축들이 사면을 형성되어 있어 A, B, C, D, E 및 F 모든 사면을 석축으로 보고 퇴적장의 사면안정 해석을 실시하였다.

퇴적장의 사면활동에 관한 안정해석을 수행하기 위하여 가장 붕괴의 위험성이 높은 지점 한 곳을 대표단면으로 선정하여 Figure 3과 같이 퇴적장 사면의 횡단도를 나타내었다.

본 채석장의 안정해석을 위하여 선정한 대표단면 퇴적장의 사면에 대한 횡단도와 사면정보는 Figure 4 및 Table 1과 같다. 사면 최하단부 퇴적장(A) 경사는 59°로서 급경사를 이루고 있으나, 전체 퇴적장 사면(A, B, C, D, E, F)의 평균경사는 38.5°이었다. 또한 퇴적장 복구공사 후 사면길이는 소단을 쳐서 최상단부(F) 1곳을 제외하고는 11 m~20 m범위로 짧게 하였으나, 사면의 물매는 30°~69°범위로 비교적 급경사로 되어 있다.

채석장 퇴적장의 퇴적방법에는 수평층상 퇴적법, 계단식 퇴적법 및 투하퇴적법 등이 있다. 수평층상 퇴적법은

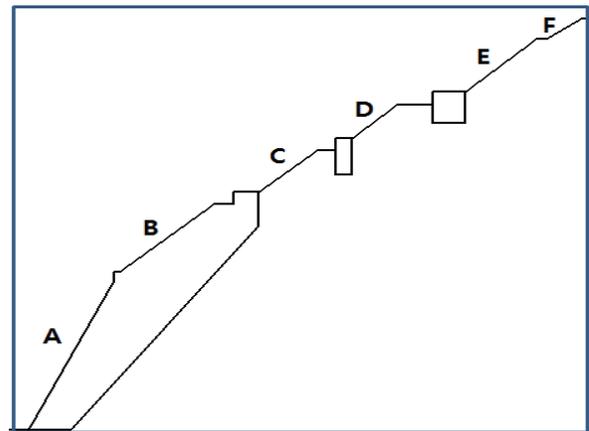


Figure 3. Assumptions on cross section of the embankment slope.

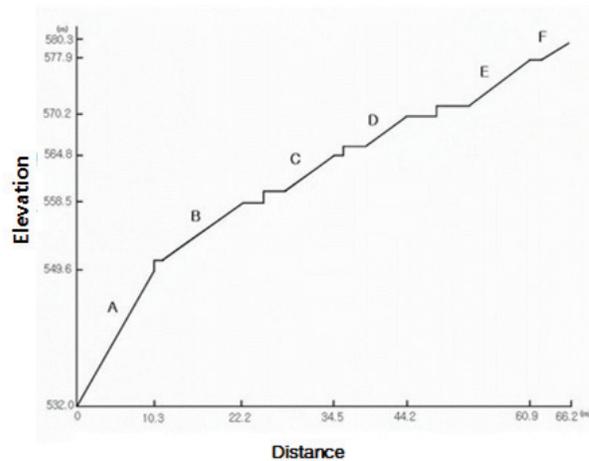


Figure 4. A representative cross section of the embankment slope.

퇴적 시 한번 흙을 쌓는 높이는 1 m 이하로 하고 이것의 4/5 이하로 감량하도록 다진 후 다시 쌓도록 한다. 즉 높이와 물매와의 관계를 보면 퇴적높이 30 m 이상은 물매 29°에 준하는 안전물매로 하여야 한다. 이러한 방법은 다지면서 퇴적하므로 물매가 급한 지역에서도 견고하고 대용량의 퇴적장을 구축할 수 있으며, 녹화수종을 심고 복

Table 1. Information of the masonry embankment slope.

Cross section	Distance(m)	Slope grade (°)	Height (m)	Slope distance (m)
A	10.3	59°	17.6	20.4
B	11.9	34°	8.9	14.9
C	12.3	35°	6.3	13.8
D	9.7	36°	5.4	11.1
E	16.7	37°	7.7	18.4
F	5.3	30°	2.4	5.8
Total	66.2	38.5° (Average)	48.3	84.4

구축화를 할 수 있는 장점이 있으므로 영구퇴적지에 적합한 방법이다.

계단식 퇴적법은 지형에 따라 퇴적물을 수평으로 유지하면서 밑으로 퇴적하는 방법으로서 퇴적 높이 30 m 이상에서는 물매를 26°이하로 하고, 퇴적높이 30 m 이하에서는 물매 26°에 준한 안전물매로 한다. 투하퇴적법은 흙을 부리는 장소에서 옹벽까지의 거리가 긴 경우에 사용되는 방법이다. 상부에서 흙을 쏟아 사면에 쌓이게 하는 방법이므로 퇴적높이 30 m 이상에서는 물매 21°이하로 하고, 퇴적높이 30 m 이하에서는 물매 21°에 준하는 안전물매로 하여야 한다(Kim, 1990).

본 채석장 퇴적장은 지형에 따라 퇴적물을 수평으로 유지하면서 계단식으로 형성되어 있어, Kim(1990)에 따르면 퇴적높이가 30 m 이상일 경우 퇴적장 사면이 안정을 유지할 수 있는 최대 물매 29°를 넘고 있으므로 현재에도 사면은 다소 불안정하고 위험스럽게 보인다. 퇴적장 하단부 사면 석축의 평균크기가 1.1 × 1.4 × 1.6 m 내외이며, 사면상에는 배수도가 전혀 없어 퇴적장 배면 성토지반에 침투한 지하수가 석축 틈 사이로 유출되면서 누구침식이 많이 발생하고 있다. 퇴적장 사면의 수평거리는 총 66.2 m, 사면높이는 48.3 m이다.

## 2. 퇴적장 석축사면의 안정성 해석

석축의 안정을 해석하는데 있어서 현재까지 널리 행해지고 있는 방법은 토압을 근거로 삼고 있다. 고전 토압공식은 중력식 옹벽처럼 토류구조물 자체가 충분히 강성이 커서 횡력의 작용을 받아 한쪽을 중심으로 회전할 수 있을 때 만족스러운 결과를 얻을 수 있다. 석축의 경우 메쌓기는 말할 것도 없거니와 저질의 콘크리트로 견치돌을 붙여서 쌓아올리는 찰쌓기인 경우에도 그 석축의 벽체는 충분한 강성을 가지고 있지 않는다. 그러나 석축의 붕괴도 대부분 사면활동으로 붕괴되는 것으로 보고 안정해석을 실시하였다(Kim, 1974; Chun et al., 2000; Kim, 2002).

사면에 대한 안정해석을 수행하는 방법은 크게 한계평형해석법(Limit Equilibrium Analysis)과 유한요소법, 유한차분법 등의 기법을 이용한 수치해석법(Numerical Analysis)이 있다. 이 중 사용이 간편하며 과거부터 사면 안정 해석에 그 신뢰성이 입증되어 현재에도 가장 많이 이용되고 있는 것이 한계평형 해석법이다(Fellenius, 1936; Bishop, 1954, 1965; Janbu, 1954; Morgenstern and Price, 1965).

한계평형 해석법에 의한 사면 안정 해석은 여러 가지 관점에 의해 분류될 수 있으나 크게 활동토체를 단일토체로 보는 방법과 활동토체를 수개의 수직절편으로 분할하는 절편법(Method of Slice)으로 구분되지만, 이 중에서

절편법에 의한 사면 안정 해석법이 가장 많이 이용되고 있다. 본 연구에서도 한계평형해석법 중 Bishop의 절편법을 선택하여 사면 안정해석을 실시하였다.

### 1) 기준안전율 산정

사면안정 해석 시 이론상 사면 안정성을 판단하기 위한 기준안전율은  $F_s=1$ 로 볼 수 있다. 그러나 실제로 사면안정 해석 시 그 안정성을 판단하는 절대적 기준 안전율을 결정한다는 것은 사실상 어렵다. 이는 사면안정해석에 의해 산정되는 안전율은 강도정수, 하중 등의 입력물성치에 대한 불확실성, 파괴모델의 불확실성 등의 요소를 포함하고 있기 때문이다.

따라서 실무상 채택할 수 있는 기준 안전율은 어떤 절대적 기준에 의해서 임의적으로 선정하여 사용하기보다는 과거의 적용 기준 안전율, 사면의 중요도, 기술자의 경험적 판단 등에 의해 적절하게 판단하여 사용할 수밖에 없다. 안정해석으로 구한 안전율 값의 공학적 의미는 첫째, 거의 같은 토질 조건 하에서 장기간 안정했던 사면이 있을 때 그 주변에 존재하는 다른 사면의 안전여부를 판단하는 경우이다. 이 경우에는 이미 안정하다고 판단된 사면에 비해 안전율이 크면 안정하다는 정성적 판단을 할 수 있다.

두 번째는 파괴사태에 대하여 신뢰할 수 있는 파괴 후 해석이 행해진 경우이다. 파괴 후 해석으로는 파괴조짐이 나타나기 이전에서 파괴직전의 지반의 물성 값이 필요하다. 파괴직전의 지반의 물성 값을 사용해 구한 파괴시의 안전율은 그 값에 관계없이 실제로는  $F=1$ 이라는 의미를 가지고 있다. 따라서 토질조건이 크게 변화하지 않은 주변지역에 동일한 사면을 만드는 경우에는 파괴 후 해석에 의한 파괴시의 안전율에 대하여 어느 정도의 여유를 갖는 안전율을 확보해 놓는 것이 필요하게 된다.

사면안정 해석에 있어 최소 허용안전율의 선정이 중요한 해석조건이 된다. 허용안전율에 대한 설계기준은 지역과 공사내용에 따라 차이가 있으나 일반적으로 1.1~1.5 정도의 범위이다. 현재 국내외 각 기관 또는 제안자에 의해 제시되고 있는 절토사면 안정해석시의 기준 안전율은 건기시 1.5, 우기시 1.2이며, 성토사면은 1.3을 기준으로 사용하고 있다.

본 연구에서는 Korea Express Corporation(1996)의 기준안전율이  $F_s = 1.1 \sim 1.5$ 의 범위로 제안되고 있음에 따라 현장여건 및 구조물 중요도 등을 고려하여 기준안전율을 건기시  $F_s = 1.5$ , 우기시  $F_s = 1.2$ 를 기준으로 적용하였다.

특히, 본 대상지역은 일반적인 절토사면이 아니라 채석장내 퇴적장의 석축사면이다. 따라서 퇴적장의 석축사면

을 강성이 큰 사면의 일부로 가정하고, 집중호우 시 지하수위가 지표면에 존재하여 대상사면이 완전히 포화된 상태를 모델링하여 안정해석을 수행하였다.

## 2) 지반의 물성치 산정

사면안정성 해석을 위해서는 지반의 물리적 특성을 결정하고 필요한 지반정수는 지반조사 시 불교란 시료를 채취하여 적절한 실내시험을 통해 결정되어야 한다. 토사 및 암반의 지반정수는 실내시험 및 현장시험을 통하여 적용하여야 하지만, 현지상황 등에 의해 시험을 할 수 없는 경우와 개략적인 검토를 하는 경우에는 참고자료를 이용하여 추정한다.

퇴적장 석축사면의 안정에 가장 영향을 미치는 것은 석축의 강도정수일 것이다. 퇴적장 석축의 강도정수 결정을 위하여 석괴담(Rockfill dam) 사면의 안정성 검토 연구내용도 참고하였다. 석괴담의 높이가 100 m 이상일 때는 암괴의 내부마찰각을 37~45°로 결정하여 연구하였으며, 여기서 높이가 100 m 보다 낮을 때에는 유효응력이 작아지기 때문에 암괴의 내부마찰각은 37~45°보다 더 커지고 사면의 안정성도 더 높아지는 것으로 보고하였다(Charles and Watts, 1980). 또한 구속압을 650 psi까지 변화하면서 삼축압축시험 결과 내부마찰각은 약 31~48°의 범위에 있고 구속압이 증가할수록 암석 버력 집합체의 내부마찰각은 감소하였으며, 입자의 크기가 커질수록 내부마찰각이 감소하는 경향을 보고하였다(Marachi et al., 1972).

특히, 본 연구대상지 퇴적장의 지반은 채석장의 암석을 채취한 후 1~2 m 정도 크기의 돌로 다듬어 석축을 쌓고, 그 배면에 풍화토로서 성토를 한 후 다짐을 실시한 지반이다. 본 연구의 사면 안정해석에 적용되어진 지반의 물성치는 배면의 토사지반과 암반에서 채취한 석축으로 구분하고 Kim(1974), Chun(1999) 및 Kim(2002) 등의 자료와 외국의 연구사례(Marachi et al., 1972; Charles and

Watts, 1980)를 참고하여 결정하였다.

본 퇴적장 사면의 안정해석을 위하여 적용되어진 지반의 물성치는 Table 2와 같다. 일반적으로 석축은 강도정수가 대단히 큰 비탈의 일부로 간주하여 활동에 대한 안정성을 검토해야 하므로 석축 구조체에 대한 입력 물성치를 결정하여야 한다. 석축벽체의 붕괴에 있어서는 그 벽체를 이루는 석축의 크기나 배면지반의 모래 및 자갈이 혼재된 지반의 강도가 중요한 역할을 한다. 석축의 단위중량은 석재의 질과 크기에 따라 차이가 있으며, 사용된 석축은 채석장의 연질 및 경질의 화강암질의 암석(화강암의 단위중량 2.4~2.8 t/m<sup>3</sup>)이 사용되어 비교적 적은 값을 선정하여 2.4 t/m<sup>3</sup>, 점착력은 10 t/m<sup>2</sup>을 적용하였다. 석축의 뒤채움으로는 사질토인 모래와 깬 자갈이 사용되어서 배면지반의 단위중량은 2.0 t/m<sup>3</sup>, 점착력은 0 t/m<sup>2</sup>을 적용하였다. 내부마찰각은 석축부분과 뒤채움 배면부분 모두 40°로 적용하였다.

본 퇴적장 사면은 여러 개의 소단으로 나누어져 있지만 이를 하나의 단면으로 가정하여 안정해석을 실시한 결과는 Table 3 및 Figures 5 and 6과 같다. 건조기와 우기와의 안전율의 차이는 거의 1.3배 정도의 변화를 보이는 것으로 나타났다. 퇴적장 사면의 대표단면에 대한 안전율은 건기시 및 우기시 각각 1.850 및 1.333로서 기준 안전율인 건기시 안전율  $F_s = 1.5$ , 우기시 안전율  $F_s = 1.2$ 를 모두 상회하는 것으로 나타나 사면의 활동에 대하여 모두 안전 것으로 나타났다. 우리나라 다목적댐인 용담댐과 밀양댐의 사면 안정성 해석에서 석축 비탈면이 1; 1.4이고, 내부마찰각은 각각 41°와 45°인 경우에 사면의 안전율은 1.22 및 1.14로 나타나 안전한 것으로 보고한 바 있다(Kim, 2002).

특히, 퇴적장 석축하단부의 사면 경사는 비교적 급하며, 시각적으로도 불안해 보이고 퇴적장 성토부위의 흙은 화강암에서 풍화된 마사토질이라 사면침식과 붕괴 위험성이 높은 곳이라 할 수 있다.

**Table 2. Soil constants applied to the masonry retaining wall.**

Item	Unit weight ( t / m <sup>3</sup> )	Cohesion ( t / m <sup>2</sup> )	Inner friction( ° )
Backfill	2.0	0	40
Masonry	2.4	10	40

**Table 3. The results of slope stability analysis.**

Study area	Safety factor		Remarks
	Dry period	Rainy season	
OO Quarry	1.850	1.333	The safety rate of dry period and rainy season was above 1.5 and 1.2.

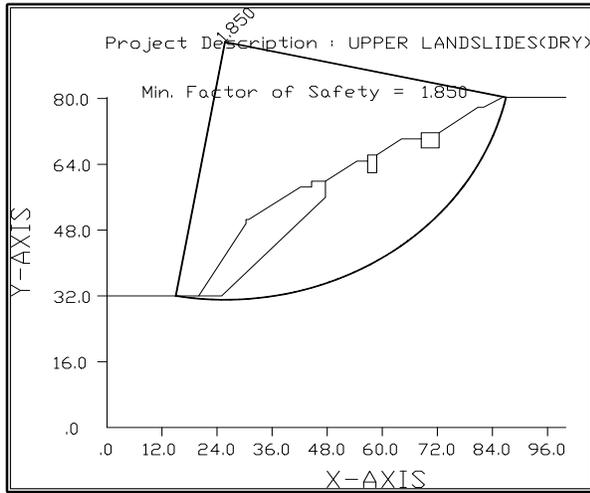


Figure 5. Results of stability analysis during dry season.

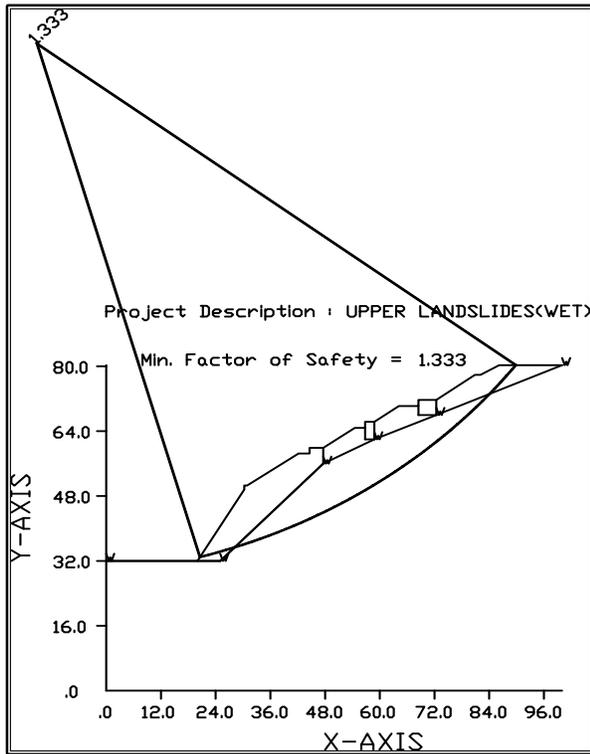


Figure 6. Results of stability analysis during rainy season.

따라서, 석축으로 쌓은 퇴적장 사면이나 댐의 석축사면은 수분을 흡수할 경우 유동성이 증가하여 비가 올 때 붕괴될 위험이 있으므로 주의를 기울여 사면을 조성하고 관리를 잘 하여야 할 것이다.

### 결론

본 연구지역의 퇴적장 석축사면의 사면 조성 및 관리 기술 증진을 위하여 석산개발 주변에 대하여 현황측량을

실시하고, 지표지질 조사를 통하여 가장 불안정하다고 생각되는 지점을 대표단면을 선정하여 사면 안정해석을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

사면안정 해석을 위하여 선정한 대표단면의 퇴적장 최하단부 사면(A) 경사는 59°로서 급경사를 이루고 있으나, 전체 퇴적장 사면(A, B, C, D, E, F)의 평균경사는 38.5°이었다. 퇴적장 사면의 수평거리는 총 66.2 m, 사면높이는 48.3 m로서 퇴적장 석축의 사면 경사는 비교적 급하며, 시각적으로도 불안정해 보인다.

사면안정 해석에는 건조 시와 포화시를 고려하였으며 포화시의 사면안정 해석은 대상사면이 완전히 포화된 상태를 모델링하여 수행하였다. 석축의 단위중량은 석재의 질과 크기에 따라 차이가 있으며, 사용된 석축은 채석장의 연질 및 경질의 화강암질의 암석이 사용되어 비교적 낮은 값을 선정하여 2.4 t/m<sup>3</sup>, 점착력은 10 t/m<sup>2</sup>을 적용하였다. 석축의 뒤채움으로는 사질토인 모래와 깬 자갈이 사용되어서 배면지반의 단위중량은 2.0 t/m<sup>3</sup>, 점착력은 0 t/m<sup>2</sup>을 적용하였다. 내부마찰각은 석축부분과 뒤채움 배면부분 모두 40°로 적용하였다. 지반의 강도정수는 석축과 배면지반으로 구분하고 안전성을 검토하였다. 건기시 안전율은 1.850, 우기시 안전율은 1.333으로 나타나 건기시 및 우기시의 안전율 1.5와 1.2를 상회하여 사면의 활동에 대하여 모두 안전한 것으로 나타났다. 그러나 석축 사면의 상부 평탄지에는 배수로가 전혀 없어 퇴적장 배면 성토지반에 침투한 지하수가 석축 틈 사이로 유출되면서 누구침식이 많이 발생하고 있다.

특히, 집중호우 시 퇴적장 사면 상부의 풍화된 마사토는 사면침식과 붕괴 위험성이 높아 배수로 설치 등 적절한 유지관리를 통한 안정대책이 필요하다고 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호: S211213L020110)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

### References

Bishop, A.W. 1954, "The Use of Pore Pressure Coefficient in Practice," *Geotechnique* 4: 148-152.  
 Bishop, A.W. 1965. "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Earth Slopes," *Geotechnique* 5: 7-17.  
 Charles, J.A. and Watts, K.S., 1980. The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill. *Geotechnique* 30(4): 353-367.  
 Chun, B.S., Seo, Y.H., Yeoh, Y.H. and Kim, K.M. 2001. A Case Study on the Stability Analysis for Masonry Retaining

- Walls and Backfill. J. of The Korea Institute Structural Maintenance and Inspection 5(1): 149-160.
- Chun, S.K. 1999. Handbook of Slope Stability Design. p. 278.
- Fellenius, W. 1936. "Calculation of the Stability of Earth Dams," Trans., 2<sup>nd</sup> Congress on Large Dams(Washington), 4: 445.
- Goo, H.B., Lee, J.H. and Baek, Y.S. 2000. A Study of Slope Stability Analysis and Reinforcement on Alluvial soil Slope in Hysok, Danyang. J. of Korea Geo. Soc. 16(6): 43-50.
- Janbu, N. 1954. "Application of Composite Slip Surfaces for Stability Analysis," Proc. European Conf. on Stability of Earth Slopes. Stockholm 3: 43-49.
- Kim, C.H. 2002. Stability Analysis of Embankment Slope Consisting of Pock Fragments. J. of Korean Society for Rock Mech. Tunnel and Fountains 12(2): 83-91.
- Kim, D.Y. 1990. Quarry science. Jungmi Press. p. 310.
- Kim, S.K. 1974. Stability Analysis for Masonry Walls by Circular Arc Method. J. of Korean Society of Civil Engineer 22(1): 83-97.
- Korea Express Corporation. 1996. Handbook of Road Design. p. 78.
- Ma, H.S. 1994. Studies on Development of Prediction Model of Landslide Hazard and Its Utilization. J. of Korean For. Soc. 83(2): 175-190.
- Marachi, N.D., Clarence, K.C. and Bolton, H.S. 1972. Evaluation of properties of rockfill materials, T. of Soil Mechanics and Foundations ivision, ASCE 98(1): 95-114.
- Morgenstern, N. and Price, V.E. 1965. The Analysis of the Stability of General Slip Surface. Geotechnique 15: 79-93.
- Nonveiller, E. 1965. "The Stability Analysis of Slopes with a Slip Surface of General Shape," Proc. 6<sup>th</sup> ICSMFE, Montreal 2: 525-552.
- Lee, C.K. and Chang, S.M. 1996. A Comparative Study on Slope Stability of Analysis Methods. J. of Korean Society of Civil Engineer 16: 359-368.
- Lee, S.G. and Yoo, J.S. 2000. A study on slope establishment for rock slope. J. of Korean Society of Civil Engineer 37: 647-650.
- Lim, H.U., Kim, C.H. and Back, H.J. 2001. Stability Analysis of Rock Slope in Limestone mine by Numerical Analysis. J. of Korean Society for Rock Mech. Tunnel and Fountains 11(3): 270-278.
- Park, Y.H., Lee, C., Seo, I.S. and Kim, Y.S. 1996. Stability of Geotextile-Reinforced Embankments on soft foundations. J. of Korean Society of Civil Engineer 15: 179-182.
- Yang, H.S., Kim, N.S. and Kim, H.G. 1997. Stability Evaluation and Blasting of Slopes for Optimal Development of Aggregate Quarry with Highly Damaged Discontinuities. J. of Korean Society for Rock Mech. Tunnel and Underground 7: 150-157.

---

Manuscript Received : July 4, 2018  
 First Revision : October 12, 2018  
 Second Revision : October 25, 2018  
 Accepted : October 26, 2018