

대절토사면내 붕괴발생에 따른 안정성검토 사례연구 A case study of slope failure for large cut-slope

이연희¹⁾, Yeon-Hee Lee, 신창건²⁾, Chang-Gun Shin, 김용수³⁾, Yong-Soo Kim,
한재희⁴⁾, Jae-Hee Han, 최준일⁵⁾, Jun-Il Choi

- 1) 한국시설안전기술공단 기술개발실 사원, Team Staff, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation
- 2) 한국시설안전기술공단 기술개발실 팀장, Team Chief, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation
- 3) 한국시설안전기술공단 기술개발실 과장, Team manager, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation
- 4) 건설교통부 도로관리팀 사무관, Subsection-chief-grade official, Road Management Team, Ministry of Construction & Transportation
- 5) 건설교통부 도로관리팀 주무관, Junior official, Road Management Team, Ministry of Construction & Transportation

SYNOPSIS : A counterplan of slope failure has to investigate about various and engineering safety factors. Especially, it is important that large cut-slope must examine rational and economic solution. In this case study, cut-slope failure caused by inflow of rainwater into alternate layers. Hereafter it is suggested that large cut-slope should consider analysis the cause for a decline of safety factor and the engineering character of corestone ground mass.

Key words : Large cut-slope, Alternate layers, Corestone ground mass, Safety factor, Slope failure

1. 서 론

현재 국내에는 내륙지역 개발, 관광자원 개발, 물류비용 절감 등을 통한 국가경쟁력 강화를 위해 고속국도와 일반국도 등의 도로망을 확충하는 과정에서 많은 절토사면들이 생성되고 있다. 이렇게 생성되는 사면들 중 대절토사면은 특히 안정성 및 보강대책의 문제가 발생할 경우 안정성 해석시 복잡하고 다양한 공학적인 요인에 대한 검토와 합리적이고 경제적인 해결방안제시가 중요한 문제이다. 본 연구에서는 대절토사면에서의 붕괴 발생에 따른 정비대책 제시사례를 통하여 대절토사면에서의 안정성 검토와 보강대책 검토시 반드시 고려되어야 할 사항에 대하여 고찰해 보고자 한다.

2. 연구대상지역 현황

2.1 일반현황

연구대상 절토사면은 OO군에서 OO시 방향의 국도 35호선 상에 위치하며, 행정구역상으로 OOO도 OO군 OO면 OO리에 소재한다. 연구대상사면의 원래 규모는 연장 약 186m, 최대높이 약 62m, 경사 약 43° 내외,

상부자연사면경사 시점부 약 35°, 종점부 약 10°를 나타냈으며(사진 1, 2), 정비공사로 인하여 최대높이 약 100m, 사면경사는 높이 약 45m 지점을 기준으로 상부 약 33°내외, 하부 약 43° 내외의 대절토사면을 나타내고 있다(사진 3).

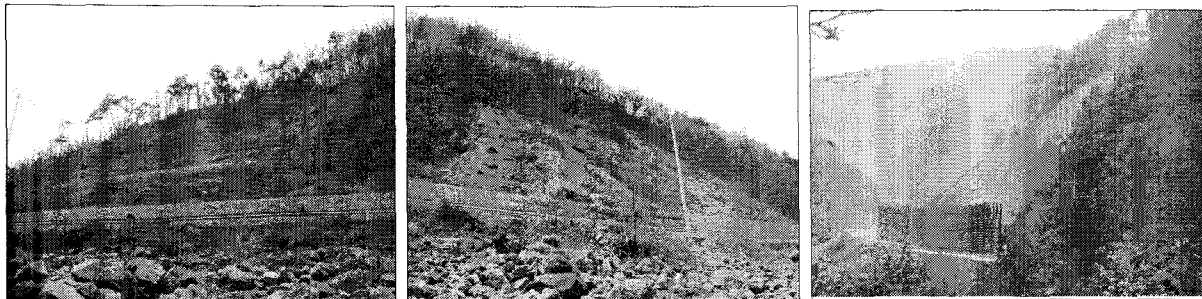


사진 1. 조사당시 종점부 전경 사진 2. 조사당시 시점부 전경 사진 3. 연구대상절토사면 원경

2005년 9월 현장 검토당시 사면높이 5m 마다 폭 1m의 소단부를 두고 경사 약 33°내외(1:1.5 구배)로 사면상단에서 6소단까지 절취공사가 진행 중이었다. 절취면 상에는 핵석양상의 대규모 기반암은 관찰되지 않았으며, 기반암인 역암으로부터 분리된 것으로 추정되는 역들(평균크기 : 0.05×0.04×0.03m³, 최대크기 : 0.2×0.1×0.2m³)이 사면상에 분포해 있었다(사진 4).



사진 4. 절취면상에 분포한 역들

2.2 지질개요

본 연구대상 절토사면일대의 광역지질을 살펴보면, 선캠브리아기 원남층, 이를 관입한 시대미상의 화강암류, 부정합관계의 쥐라기-백악기 퇴적암류, 제 4기 퇴적층 및 하성층 등으로 구성되어 있다. 본 절토사면을 구성하고 있는 기반암은 중생대 쥐라기에서 백악기 사이의 퇴적암류로 주로 역암과 사암이 관찰된다. 현장조사시 종점부 인근의 계곡부에서 사진 5와 같이 기반암인 역암과 사암이 교호하는 지층구조가 확연하게 관찰되었으며, 이는 시추조사결과에서도 동일한 결과를 나타내고 있다. 암반의 풍화정도는 보통풍화(M.W.)에서 완전풍화(C.W.)상태로 나타났다.



사진 5. 종점부 인근에서 관찰되는 지층구분

2.3 시공 및 붕괴발생 이력

본 연구대상 절토사면은 2003년 12월 이전에도 소규모 표층붕괴가 발생하였으며, 이에 대한 정비대책으로 이완암블록 및 뜬돌제거, 표면보호공, 앵커공등을 시공하던 중 2005년 7월 장마시 집중호우로 인하여 약 40~60m 구간 높이 약 30m 내외 지점에서 표층붕괴 및 핵석 양상의 노출된 기반암 붕괴가 발생하였다. 이후 본 절토사면내에 추가적인 붕괴 발생 가능성을 내포하고 있는 상부구간에 대한 안정성 확보를 위해 절토사면 높이 약 45m 이상에 대한 상부절취(사면경사 약 33°, 1:1.5 구배)공사를 시작하였다. 절취공사 중 사면상에서 공극 발견 및 핵석 양상의 대규모 기반암이 관찰되어 비교적 완만한 경사의 절취후에도 절취면에 대한 추가적인 보강공의 타당성 여부에 대한 문제점이 제기되었다.

3. 연구대상지역 지반조사

본 연구대상 절토사면의 절취 후 추가적인 보강공 타당성 여부에 대하여 검토를 하기 위하여 전기비저항탐사, 시추조사, 시추공전단시험, 표준관입시험, 현장투수시험, 시험굴조사, 실내물성시험 등의 지반조사를 실시하였다. 본 절토사면에 대하여 실시한 각 지반조사 위치도는 다음의 그림과 같다.

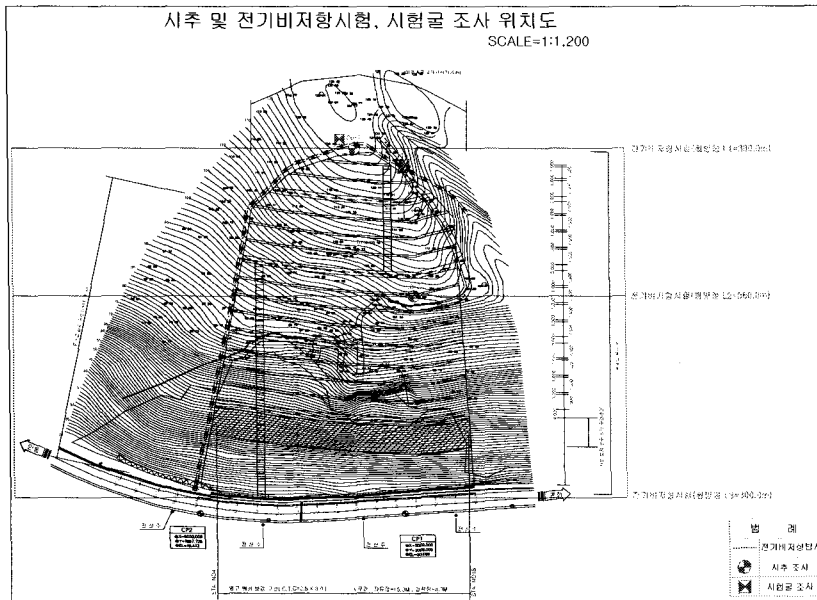


그림 1. 시추 및 전기비저항 시험

전기비저항탐사결과 3축선 각각의 지반고는 다르지만 저비저항대의 위치가 일치하며, 탐사결과 대규모 공동이나 특이한 지질구조대는 인지되지 않았다. 다만, 우기시 붕괴가 발생하였던 지역으로 부분적인 역암과쇄대가 존재하는 것으로 추정되었다.

시추조사결과 CB-1 시추지점에서는 심도 약 19m 지점, CB-2 시추지점에서는 심도 약 28m 지점까지 대체로 자갈층과 연암층이 교호하여 나타나는 지층구조를 나타내고, 그 이하 심도구간에서는 연암층을 나타내는 것으로 나타났다. 시추조사결과 나타난 교호하는 지층구조는 현장조사시에

도 역암과 사암의 교호구조가 유사하게 관찰되었으며, 특히 역암의 경우 심한 풍화작용으로 미고결 역암과 같은 양상을 나타내고 있었다. 이에 본 연구에서는 현장조사결과와 시추조사결과 나타난 지층구조에 대한 통일된 언급을 위하여 현장에서 관찰되는 미고결역암 또는 절리심한사암에 대하여 자갈층으로, 기반암인 사암에 대하여 연암으로 표현하고자 한다.

시추공 CB-2에서 심도 42.0~44.0m 위치의 연암층에서 사암층간에 점토질이 약 3cm 두께로 협재하는 것으로 나타났으며 이는 시추결과에 따른 연장성의 규모를 판정하기에는 무리가 있으나 두께와 경사등을 판단해 볼 때 대규모의 외력이 작용하지 않는 한 점토층을 경계로 한 붕괴의 가능성은 낮은 것으로 판단되었다.

시추공전단시험결과 CB-1 시추지점에서 풍화암의 최대 강도정수는 점착력 3.2t/m², 내부마찰각 31°, 잔류 강도정수는 점착력 1.7t/m², 내부마찰각 30°인 것으로 나타났다.

현장투수시험결과 CB-1 위치의 심도 6m 지점 자갈층에서의 투수계수는 1.458E+00 cm/sec, CB-2 위치의 심도

4m 지점 자갈층에서의 투수계수는 $1.164E+00$ cm/sec로 본 절토사면의 자갈층이 높은 투수계수를 나타냄을 알 수 있다.

실내시험결과로는 직접전단시험결과 TP-1 점착력 $1.85t/m^2$, 내부마찰각 36° , TP-2 점착력 $2.52t/m^2$, 내부마찰각 35° 로 나타났으나, 시험굴의 심도가 표층부로서 물성치 적용에서는 배제하여야 할 것으로 판단되었다. 시험굴 조사시 채취된 시료의 실내시험 결과 흙 분류는 CL-ML로 모래 및 실트 섞인 점토인 것으로 나타났고, 시추심도별 RMR 분류 결과 Good~Very Poor 상태로 다양하게 나타났다. RMR 값을 근거로 경험식을 이용하여 점착력과 내부마찰각을 도출해보면, CB-1 시추지점에서 연암의 평균 강도정수는 점착력 $14.2t/m^2$, 내부마찰각 14° , CB-2 시추지점에서 연암의 평균 강도정수는 점착력 $18.5t/m^2$, 내부마찰각 23° 인 것으로 나타났다.

4. 연구대상지역 붕괴원인 및 안정성 검토

4.1 붕괴원인 검토

본 연구대상 절토사면은 2003년 12월 현장조사 당시 약 45~70m 구간에서 폭 약 25m, 길이 약 20m, 깊이 약 1.5m 규모의 표층붕괴 이력이 관찰되었다(사진 6). 이 구간에서의 붕괴발생원인은 차별풍화가 진행됨에 따라 일부구간은 두터운 표층을 나타내고 일부구간은 기반암인 역암의 역들이 분리되면서 집중강우시 우수의 유입에 의해 표층 및 핵석 양상의 역암들이 함께 붕괴된 것으로 판단된다. 2005년 7월 정비공사중 발생한 표층붕괴의 원인 또한 차별풍화된 절토사면에 집중호우시 다량의 우수 유입에 의한 것으로 판단된다(사진 7).

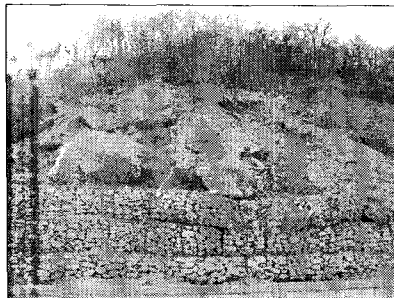


사진 6. 기 붕괴 구간 (2003년)

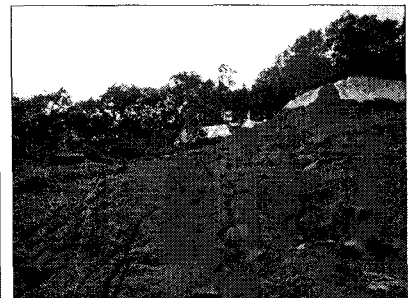


사진 7. 붕괴된 암석(좌) 및 붕괴발생구간 상부 응급복구(우)

4.2 안정성 검토

연구대상 절토사면은 높이 약 45m를 기준으로 상부만 경사 33° 로 (1:1.5 구배) 절취를 실시하여 절취 후 현재 절토사면의 최대높이(수직고)는 약 100m 이다. 현장조사와 지반조사결과를 토대로 본 연구대상 절토사면의 절취 후 안정성여부와 추가적인 보강공의 수립유무를 판단하고 검증하기 위하여 Talren 4 프로그램을 이용하여 안정성 해석을 실시하였다. 안정성 해석시 절토사면의 지층구조는 시추조사 결과, 전기비저항 탐사 결과 비저항값 등의 지반조사 결과와 현장조사시 관찰되는 자갈층과 연암이 교호하는 것으로 모델링 하였고, 해석방법은 편리성과 신뢰성이 양호한 Bishop의 간편법을 적용하였다. 안정성해석시 적용된 지반물성치는 지반조사 결과에 따라 자갈층의 단위중량 $2.0t/m^3$, 점착력 $2.0t/m^2$, 내부마찰각 35° , 연암의 단위중량 $2.7t/m^3$, 점착력 $14.2t/m^2$, 내부마찰각 14° , 기 붕괴발생한 구간에 대한 연암의 잔류강도값으로 점착력 $1.7t/m^2$, 내부마찰각 30° 이며, ①절취 후 절토사면의 안정성여부, ②사면상단부에 배수시설 및 표면보호공을 적용할 경우 안정성여부, ③전기비저항탐사결과 기 붕괴구간의 안정성 여부로 구분하여 안정성 해석을 실시한 결과는 다음과 같다.

① 절취 후 절토사면의 안정성 해석(사면상에 보강공을 적용하지 않았을 경우)

안정성 해석 결과 현재 절토사면의 안전율은 건기시 1.46, 우기시 0.96으로 기준안전율인 건기시 1.5, 우기시 1.2에 미달하는 것으로 나타났다(그림 1, 2). 우기시 안전율 검토에서 지하수위는 절토사면의 최상부층인 GL.- 0.0m에 예상지하수위가 위치하는 것으로 적용하였다.

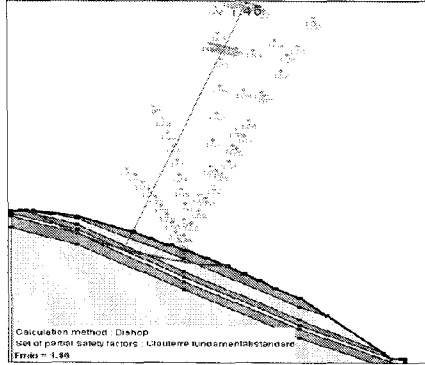


그림 2. 절취 후 안전율 (건기)

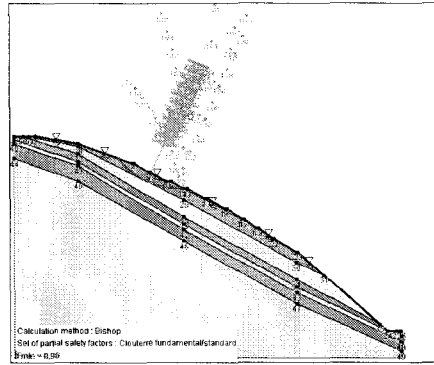


그림 3. 절취 후 안전율 (우기)

② 절취 후 절토사면의 안정성 해석(사면상단부에 배수시설 및 표면보호공을 적용할 경우)

현재 절토사면의 우기시 안전율 미확보에 대하여, 사면 상단부 산마루측구와 함께 차수그라우팅을 실시하여 상부로부터의 우수유입을 차단하고 사면상에는 식생공을 시공할 경우 예상지하수위가 GL.- 3.0~4.0m에 위치하는 것으로 적용하여 안정해석을 실시해 본 결과 우기시 안전율이 1.38인 것으로 나타났다(그림 3). 건기시 안전율은 기준안전율에 조금 못 미치는 바가 있으나 본 절토사면에서는 우기시 우수의 유입으로 인한 파괴가능성이 높으므로 절취 후 본 절토사면에 대한 계측기를 설치하여 건기시 안전율 미확보에 대해서는 차후 지속적인 유지관리를 통해 필요시 추가적인 보강대책을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

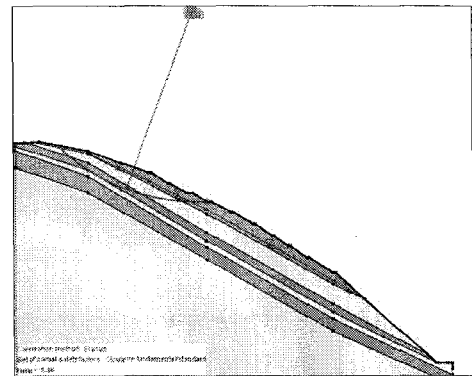


그림 4. 상부배수 및 보호공 적용시 (우기)

③ 전기비저항탐사결과 역암파쇄대 및 기 붕괴구간의 안정성 해석

높이 약 45m 하부 구간은 상부 절취 시 일부 면정리를 실시하였으나 높이 약 10~30m 구간 내외에서 기 표층붕괴 발생이력 및 전기비저항탐사에서 부분적으로 역암파쇄대를 나타내고 있다. 그러므로 이 구간의 취약부를 중심으로 연암(경암)의 지반강도정수를 잔류강도 정수값으로 적용하여 앵커공을 시공할 경우에 대한 안정성해석을 실시하였다.

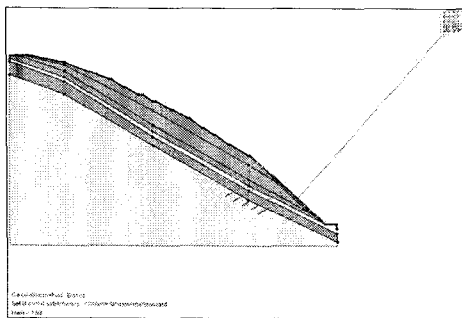


그림 5. 기붕괴구간 앵커보강 후 (건기)

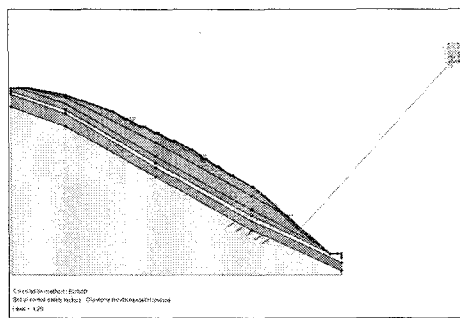


그림 6. 기붕괴구간 앵커보강 후 (우기)

해석 결과 붕괴부 주변으로 앵커공을 약 2.5~3m 간격으로 5열 시공 하였을 경우 건기시 안전율은 1.68, 우기시 안전율은 1.29으로 나타났다(그림 4, 5).

현장조사시 높이 약 45m 하부 구간

의 절토사면상에는 연암층 상부를 자갈층 또는 풍화암층이 피복해 있는 상태로 관찰되고 있어, 안정성 해석시 이를 반영하여 연암층을 약 1.5~2m 두께로 자갈층이 피복하고 있는 지층상태로 모델링을 실시하였다.

5. 결론 및 고찰

본 연구대상 절토사면은 기반암인 역암과 사암이 보통풍화에서 완전풍화상태를 나타내며 교호하는 지층구조를 나타내고, 2003년에 두터운 표층부와 최상부층에 해당하는 자갈층(미고결역암)에서 기 붕괴이력이 관찰되어, 높이 약 45m 이상인 구간에서 경사 약 33°(1:1.5 구배)로 절취공사를 실시하던 중 2005년 여름 우기시 집중호우로 인하여 추가적인 붕괴가 발생하였다. 토사사면이 아닌 본 절토사면에 대하여 일반적인 절취기준에 비하여 매우 완만한 절취경사인 약 33°(1:1.5 구배)로 절취공사가 시공중이었으나, 절취면상에 기반암이 관찰되지 않고 분리된 역들로 추정되는 핵석양상이 나타나며 일부구간에서는 역들이 탈락하여 소규모 공동양상이 관찰되어 절취 후의 안정성확보에 대한 문제점이 제기되어 보강공법의 적용성 여부에 대한 검토가 실시되었다.

정확한 지반구조와 지반강도정수 산정을 위하여 현장조사와 각종지반조사(시추조사, 시추공전단시험, 물리탐사, 실내물성시험)를 실시하였고, 이를 통하여 연구대상 절토사면이 자갈층(미고결역암 또는 절리심한사암)과 연암(사암)이 교호하는 지층구조를 나타냄을 알게 되었고, 각 지층별 지반강도정수를 산정하였다. 본 연구대상 절토사면에 대한 안정성 검토를 실시한 결과 절취 후 안전율이 건기시 1.46, 우기시 0.96의 안전율을 나타내 절취후 절토사면의 안정성이 취약한 것으로 나타났고, 특히 본 절토사면의 최상부층에 해당하는 자갈층(미고결역암)이 높은 투수계수를 나타내고 있어 우수 유입시 안정성에 가장 취약한 것으로 판단되었다.

연구대상 절토사면의 안정성 확보를 위하여 사면상부에 차수그라우팅 또는 숏크리트, 산마루측구등을 시공하여 사면으로의 우수유입을 차단하여야 할 것으로 판단된다. 절취 후 절토사면상에는 표면보호공으로 식생공과 격자블록공을 시공하여 우수에 의한 표면침식이나 유실을 방지하고, 일부 소단부에는 라이닝처리를 실시하고 수평배수공을 시공하여 원활한 배수가 이루어질 수 있도록 할 필요가 있다. 상대적으로 취약한 상태를 나타내는 기 붕괴 발생구간에 대해서는 앵커공을 시공하되 절토사면의 특이한 지층구조를 감안하여 앵커공의 시공전에 반드시 시험시공 실시를 실시하여 현장여건에 적합한 앵커공의 간격과 길이 등을 적용하는 시공이 필요할 것이다. 본 연구대상 절토사면은 절취 후 연장 약 200m, 높이 약 100m 의 대절토사면으로 「시설물의안전관리에관한특별법」 대상 2종 시설물에 해당(절취 후 연장 약 200m, 높이 약 100m)되므로 「시설물의안전관리에관한특별법」에 따라서 지속적인 유지관리가 이루어져야 할 것이며, 향후 이상 징후 또는 변위 발생시 신속하고 원활한 대응이 이루어 질 수 있도록 계측기 설치 등에 따른 지속적인 유지관리가 이루어 져야 할 것으로 판단된다.

향후 본 연구대상 절토사면과 같이 높이 100m 이상이며, 교호하는 지층구조를 가지는 대절토사면의 경우 안정성검토시 ①대절토에 따른 안전율 저하 원인 분석 - 높은 수직고를 나타내는 상단부 절토사면 내에서 소규모의 낙석 혹은 소규모 표층붕괴 발생시 도로의 안정성 확보에 큰 영향을 미치고, ②핵석지반의 공학적 특성 - 미고결역암층이 핵석지반과 유사한 양상을 나타낼 경우 핵석의 함유량(60% 이상)과 체적비율(45% 이상)에 따라 일축압축강도가 증가하는 등 핵석지반의 공학적 특성 등 여러 조건에 대한 다각적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 권성주(2002), “핵석지반에서의 합리적인 지반강도 정수의 산정”, 서울시립대학교 석사학위논문
2. 이수곤, 김동은, 이천용, 김재현, 양홍석(2004), “핵석지반의 강도 및 변형특성 연구”, 2004 봄학술발표회논문집, 한국지반공학회, pp.327~333