

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.1.507>

JCCT 2022-1-57

지질단면을 이용한 교량 접속도로 퇴적암 비탈면의 안정성 검토 연구

Slope Stability for Bridge Access Road on Sedimentary Rocks using Geological Cross Sections

임명혁*

Ihm, Myeong Hyeok*

요약 연구 대상은 교량 접속도로 절취비탈면으로서 파괴 위험 가능성이 큰 중생대 경상누층군 퇴적암 비탈면이다. 비탈면의 구성 암석은 사암, 미사암 및 암맥이며, 불연속면은 층리와 전단절리, 인장절리 및 암맥 접촉면이 발달한다. 구간별로 파괴의 유형과 규모는 암석의 종류와 불연속면의 배향에 따라 다양하나 평면파괴가 우세하고, 파괴암체의 크기는 대부분 1m^3 이하이다. face-mapping 자료, SMR, 암석의 물성·역학시험, 구간별 지질횡단면도 분석 및 한계 평형해석으로 종합·검토한 결과, 대표적 단면 모두 건기 시와 우기 시의 허용안전율에 크게 미달하여 대책공법이 필요 하였다. 따라서 경제성, 효율성, 현장 특성, 등을 고려하여 비탈면 내 구간과 위치에 따라 대책공법 안을 제안하였고 대책공법을 적용한 후 비탈면의 건기 및 우기 시의 안전율은 모두 허용안전율을 상회 하였다. 특히, 법면 face-mapping 자료와 법면에 수직인 여러 대표 구간의 지질횡단면도, 그를 기본도면으로 사용한 한계평형해석 및 대책공법 제시는 비탈면의 객관적인 해석 및 안정성 검토의 합리적인 도구가 될 것으로 예상된다.

주요어 : 퇴적암, 평면파괴, face-mapping, 지질횡단면도, 한계평형해석

Abstract The subjects of the study are the sedimentary rock slope of the Mesozoic Gyeongsang Supergroup, which has a high risk of failure. The rocks of the slope shall be sandstone, siltstone and dacite, and discontinuities shall develop beddings, shear joints, extension joints, and dacite dyke boundary planes. The type and scale of failure varies depending on the type of rock and the strike/dip of the discontinuities, but the planar failure prevails. Based on the face-mapping data, SMR, physical and mechanical testing of rocks, the critical equilibrium analysis, all representative sections required a countermeasure method because the acceptable safety factor during dry and rainy seasons were far below $F_s=1.5$ and $F_s=1.2$. After applying the countermeasure method, both the dry and wet conditions of the slope exceeded the allowable safety factor. In particular, the face-mapping data of the slope-face, the geological cross-sections of several representative sections perpendicular to the slope-face, and the critical equilibrium analysis and the presentation of countermeasure methods that have been reviewed based on them are expected to be reasonable tools for the slope stability.

Key words : Sedimentary rock, Slope failure, Face-mapping, Geological cross-section, Safety factors

*정회원, 대전대학교 건설안전공학과 교수 (제1저자)
접수일: 2021년 12월 27일, 수정완료일: 2022년 1월 1일
게재확정일: 2022년 1월 8일

Received: December 27, 2021 / Revised: January 1, 2022

Accepted: January 8, 2022

*Corresponding Author: mhilm61@hanmail.net

Dept. of Construction Safety, Daejeon Univ, Korea

I. 서론

비탈면 안정성 분석과 대책공법에 대한 연구는 다양한 연구방법과 연구대상의 확대로 많은 연구결과가 도출되고, 첨단 장비와 혁신적인 아이디어로 훌륭한 논문들이 제시되고 있다. 비탈면의 파괴 조건 중 가장 흔한 평면파괴 조건은 활동 가능성이 있는 면의 주향과 절취사면의 주향의 차이가 약 20도 이내의 조건이지만 20도 이상일 경우라도 사면의 붕괴가 빈번히 발생하고 있는 국내 암반사면의 평면파괴 조건을 수정하여 제시한 연구[1], 절취사면 내 절리, 엽리, 층리, 등의 교차 조합에 기인하여 여러 유형의 파괴가 발생할 수 있음을 제시한 연구[2], 만 여 개의 국도변 절토사면 자료를 이용하여 위험도 점수가 높은 구간에 붕괴가 발생한다는 사실을 절토사면 관리 활용에 적용한 연구[3], 등이 있다.

지질특성이 비탈면 안정성 해석에 영향을 미친다는 다양한 연구 결과도 제시되었다. 사면 안정성 해석 시 사면 내 연약층이 협재되어 있고 습곡이나 단층, 등 지질구조에 대한 고려가 반드시 포함되어야 한다는 연구[4], 비탈면이 화산암으로 주로 구성되어 있고 소규모 단층, 염기성 암맥, 지질학적 약대 및 점토광물의 함유가 비탈면 붕괴발생인인이라는 사례 연구[5], 퇴적암 내 지질구조가 비탈면의 안정성에 미치는 영향이 있다는 사례 연구[6], 비탈면이 주로 화강암으로 구성된 경우의 안정성 검토 사례 연구[7], 등이 있다.

하지만 비탈면은 3차원 지반으로서 조사, 분석 및 대책 수립 시, 비탈면의 법면 face-mapping 자료와 이를 수직으로 절단한 여러 구간의 횡단면의 자료가 제시되고 그를 기반으로 안정성 해석 및 대책공법 등이 제시되어야 바람직하다. 법면의 face-mapping 자료를 바탕으로 지질횡단면도를 작성하기 어려워 최근까지도 체계적인 지질횡단면도를 활용한 비탈면의 안정성 검토를 수행한 사례는 극히 드물다[8] [9]. 따라서 본 연구는 안덕교 개체공사 중 경상북도 청송군 안덕면 소재 교량 접속도로에 위치한 퇴적암 절취비탈면으로서, 법면 face-mapping 자료와 지질전개도(사면현황도), 법면에 수직인 대표 구간의 지질횡단면도, 대표 구간 불연속면의 평사투영 해석, 강도정수 산정을 위한 암석 물성 및 역학시험, 암반분류, 다양한 조건의 안전율 계산을 위한 한계평형해석 및 그에 따른 대책공법, 등의 사례를 제시하고자 한다.

II. 지질

1. 지표 지질

영남지역에는 대부분 경상누층군에 속하는 중생대 백악기 퇴적암류와 이를 관입한 화성암류들이 있는데, 이들은 주로 선캠브리아기에 형성된 변성암류를 기반암으로 하고 있다. 이들 기반암은 남으로는 지리산-소백산을 거쳐 태백산으로 이어지는 지질분포를 보이며, 주로 변성암복합체로서 편마암, 편암, 석회암, 규암, 등으로 구성된다.

청송지역은 경상누층군 하양층군으로 불리는 퇴적암체의 일부가 분포하는데, 본 연구지역에 나타나는 지질은 하양층군의 사곡층과 춘산층으로서 주로 세일, 사암으로 구성된 사곡층, 사암, 세일, 응회암 및 역암으로 구성된 춘산층과 이들을 관입하고 있는 소규모 산성화성암맥으로 대별된다.

본 과업수행 비탈면은 중생대 백악기의 퇴적암인 사곡층과 춘산층의 경계부로서 춘산층의 최하부층에 해당하는 사암, 세일, 및 협제한 응회암으로 분류할 수 있다.

2. 비탈면 현황과 법면 지질

비탈면의 길이는 약 80m이고, 높이는 40m 규모이다. 법면의 주향은 N60W 경사는 50SW로서 중생대 퇴적암으로 구성되어 있으며, 일부 소규모 화성암맥이 부분적으로 관입하고 있다. 암반은 비교적 풍화상태가 불량한 편이다. 구성 암석은 세일이 주된 암석이고 사암과 응회암이 협재되는 양상임으로 풍화진행속도가 비교적 빠른 세일과 응회암, 풍화진행속도가 비교적 느린 사암이 공존하는 상태를 유지하고 있다. 그러나 암반 내 단층대에 발달한 단층비지의 경우와 3조 이상의 전단절리와 수 mm 간격으로 발달한 층리면의 영향으로 매우 빠른 풍화속도를 보이는 상태이다.

암반은 입자 크기가 세립질인 사암과 극세립질인 세일 및 다공상인 응회암으로 구성되어 있으며, 엽상 및 입상 조직을 나타낸다. 구성 광물은 방해석, 옥수, 석영, 장석, 암편, 기타 점토광물로 되어 있으며, 암색은 담적색 내지 적색 및 일부 담녹색을 띠고 있다. 층리면은 N80W 12SW ~ N80W 26SW로 비교적 완만하나, 파괴가 발생한 부분의 층리면의 주향 경사는 단층과 전단절리 등의 영향으로 경사각이 급해지는 경향이다. 즉, 파괴부 층리면의 주향과 경사는 평균 N80W 25SW(190/25)이다.

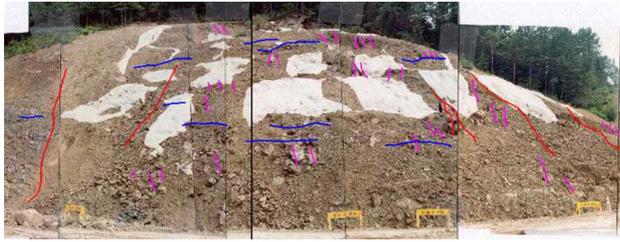


그림 1. 연구대상 비탈면의 전경 사진
 Figure 1. Panoramic view of the slope

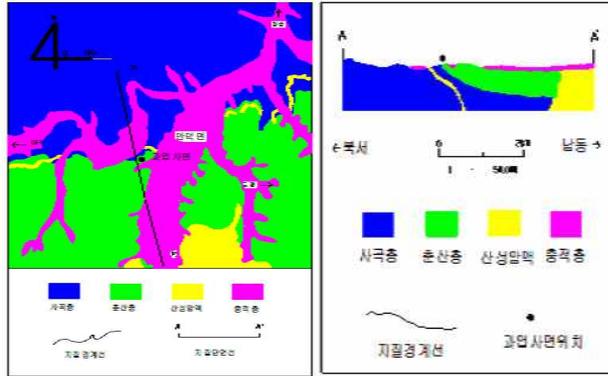


그림 2. 연구 지역의 지질도와 지질단면도
 Figure 2. Geological map and geological cross section map of the study area

비탈면에 발달하는 불연속면의 종류 및 특성은 표 1에 상세히 제시 하였다.

표 1. 불연속면의 간격, 연속성, 거칠기, 지하수 상태 및 충전물의 현황

Table 1. Spacing, type, groundwater, infilling material, and roughness of discontinuities on the slope

discontinuity	bedding	shear joint	extension joint	fault
spacing	1cm~50cm	30cm	500cm	500cm
roughness	smooth	planar	planar	slickenside
persistence	infinite	3m	10m	10m
groundwater	dry	dry	dry	dry
aperture	0.1mm	1mm	100mm	2mm
infillings	clay mineral	not	clay mineral	calcite

III. 암반 등급

1. 현장 및 실내 시험

지표에 드러난 토사와 암반의 공학적 특성을 파악하기 위해 비탈면 주변과 비탈면 법면의 지표지질 맵핑을 수행하고, 그 자료를 바탕으로 평사투영해석을 수행하였다. 비탈면 내부의 암반 특성과 분포를 구명하기 위해

비탈면 상부 2곳에서 시추조사를 수행하였으며, 각 시추공에서 투수시험을 수행하였다. 비탈면 안정성 검토와 대책공법 수립을 위한 필수 입력인자를 구하기 위해 토사와 암반의 시료를 통해 실내 역학 및 물성시험을 수행하였다. 즉, 단위중량, 비중, 흡수율, 일축압축강도, 소성한계, 액성한계, 내부마찰각, 점착력, 질리면 전단강도 값, 등을 도출하였다.

2. SMR

암반을 등급별로 나누는 방법에는 Q-system 방법과 RMR 분류법이 있으나, 본 연구에서는 암반 노두의 육안 관찰 결과와 시추조사 결과 및 암석의 실내 물성 및 역학시험 결과를 종합하여 편의상 SMR 분류법을 이용하였다. 5개의 주변수들 중 일축압축강도는 147.2kgf/cm²~ 913.2kgf/cm²로 2점 ~ 7점, 암반 노두 및 시추조사 시 암실에서 측정된 평균 RQD의 값은 거의 0%로 3점, 불연속면의 간격은 0.3m 이하로 10점, 불연속면의 상태는 매우 평활한 10점, 지하수 상태는 건조상태로서 10점에 해당한다. 부가적으로 주 불연속면의 배향과 사면의 배향이 거의 일치하고 암반 내 3조의 절리, 단층, 무수히 많은 층리 및 인장절리 등이 형성되어 아주 작은 암체로 분리되어 있어 거의 토사와 유사함을 고려해 볼 때 불량한 -50점에 해당되어, 총 점수는 5점 ~ 10점으로서 SMR class V인 매우 불량한 암반에 해당 한다.

표 2. 비탈면의 구역별 암반의 SMR 등급

Table 2. SMR of rock mass by zone on the slope

zone	top	middle	bottom
rock	tuff	sandstone shale	shale
uniaxial compressive strength (kgf/cm ²)	147.2	913.2	530.2
RQD(%)	0	0	0
spacing of discontinuity(cm)	1~20	20~50	20
condition of discontinuity	very smooth	smooth	smooth
groundwater	dry	dry	dry
intersection angle(°)	parallel	sub-parallel	sub-parallel
score	5	5	7.5
rating	V	V	V

SMR 분류를 위한 각 항목별 점수 및 등급은 표2에 상세히 제시 하였다.

3. 지질횡단면

암반 비탈면의 경우, 비탈면의 법면 Face-mapping 자료와 대표적인 단면의 Face-mapping 자료가 확보되어야만 합리적이고 3차원적인 비탈면의 안정성 해석 및 검토가 수행할 수 있다[9]. 따라서 본 연구에서도 비탈면을 대표하는 횡단면을 설정하여 지질횡단면을 작성하고, 이를 근거로 비탈면의 파괴를 일으키는 미끄러짐면(주 불연속면)을 설정하였으며, 한계평형해석의 기본도면으로 사용하였다.

그림 3에 비탈면의 대표적인 지질횡단면도를 제시하였다.

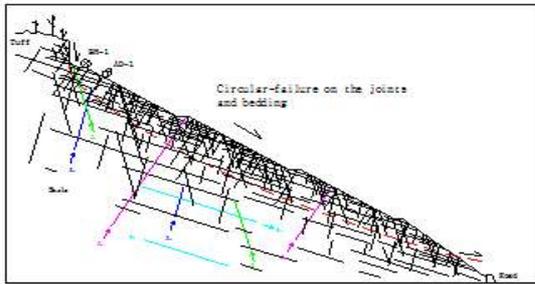


그림 3. 연구대상 비탈면의 대표적인 지질횡단면도
Figure 3. Geological cross section map of the slope

IV. 안정성 검토

1. 한계평형해석

비탈면의 안정성 검토를 위하여 주 불연속면에 대하여 검토하고, 파괴 암체의 크기 및 파괴형태를 예측하였다. 또한, 불연속면의 입체투영망 분석을 실시하여 (StereoNett), 사면의 예상 파괴방향을 결정하였다. 위험 구간과 붕괴된 비탈면에 대하여 PC STABL 5M 프로그램을 이용하여 비탈면 활동 파괴 해석을 실시하였다.

파괴암체의 크기는 평균적으로 $0.001m^3 \sim 0.0125m^3$ 정도이나 단층대가 분포하는 경우는 $0.75m^3$ 정도로서, 파괴암체의 하중은 평균 약 $1.725ton \cdot m$ 를 나타낸다. 현재 비탈면의 상부는 전단절리면을 따른 전도파괴 및 단층면을 따른 평면파괴가 발생하였고, 중부는 단층면과 전단절리면을 따른 평면파괴가 발생하였고, 하부는 절리면과 층리면을 따른 원호파괴가 발생하였다.

파괴암체의 미끄러짐 방향을 살펴보면 중·상부의 경우는 제1 및 제2 전단절리, 제2 및 제3 전단절리, 제2 전단절리 및 인장절리, 제2 전단절리 및 단층면을 따른 썩기파괴가 남서 방향으로 45° 의 침강각을 나타내며, 비탈면 상부의 단면은 제2 전단절리면을 따른 평면파괴가 남서 방향의 45° 의 경사각으로 발생한다.

비탈면의 한계평형해석에 입력한 인자 값과(표 3) 건기와 우기 시 안전을 해석 결과는 표4에 제시하였다.

표 3. 비탈면의 한계평형해석에 입력한 물성치
Table 3. In put data for slope stability of the slope

location	yt(g/cm3)	c(kg/cm2)	ϕ (°)
top	1.61	0.14	20
middle	2.00	0.2	25
bottom	2.70	2.5	25

표 4. 비탈면의 건기와 우기 시 안전율

Table 4. Safety factors for dry and wet condition of the slope

location No.	safety factor(Fs)		remark
	dry	wet	
1	1.488	1.112	limit criterion
2	1.558	1.188	dry: 1,2 wet: 1.5
3	1.875	1.493	

2. 대책 공법

본 비탈면은 층리와 절리, 단층면을 따라 기 파괴가 발생한 상태이며, 붕괴 비탈면을 대상으로 평사투영해석과 한계평형이론에 의한 비탈면안정해석을 수행한 결과, 불안정한 상태로 나타났으며 향후 추가적인 파괴 발생 가능성이 충분히 존재하여 적절한 대책공법이 요구되는 상황이다.

현장 상황에 적합한 다양한 대책공법들에 대하여 안정성 해석을 수행하였다.

여러 대책공법은 FRP 보강 그라우팅 공법, 락 앵커 공법, 락 볼트 공법, 비탈면 구배완화 공법 및 개비온 공법 등이다. 이들 공법들 중 FRP 보강 그라우팅 공법 적용 후의 건기와 우기 시의 안전율과(표5) 안정성 해석 프로그램 적용 결과를 그림 4에 나타내었으며, 그림 5와 그림 6 및 그림 7에 보강 후 TALREN97 비탈면해석 프로그램 적용 결과와 FRP 보강 그라우팅 공법 적용 단면도 및 시공 계획 전개도를 나타내었다.

표 5. FRP 보강 그라우팅 공법 적용 후 건기와 우기 시 안전율
 Table 5. Safety factors of dry and wet condition for the FRP grouting method

FRP grouting method	safety factor(Fs)		remark
	dry	wet	
	1.64	1.34	limit criterion dry: 1.2 wet: 1.5

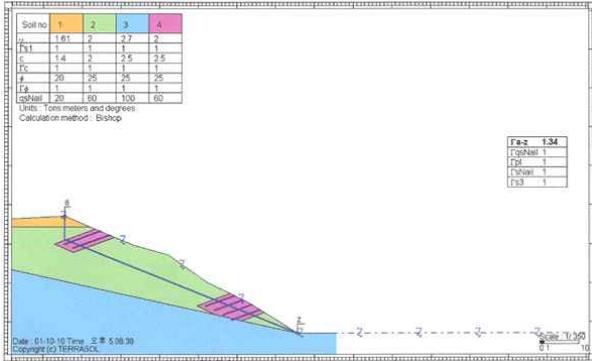


그림 5. FRP 보강 그라우팅 적용 안정성 해석
 Figure 5. Slope stability of Program TALREN97 for the FRP grouting

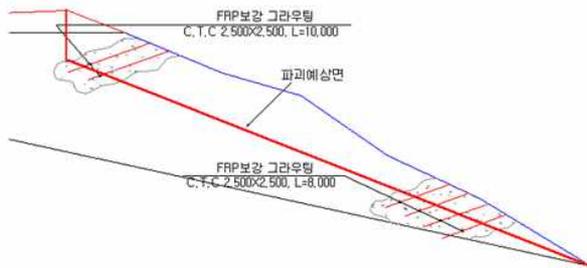


그림 6. FRP 보강 그라우팅 적용 단면도
 Figure 6. Cross section map of the FRP grouting

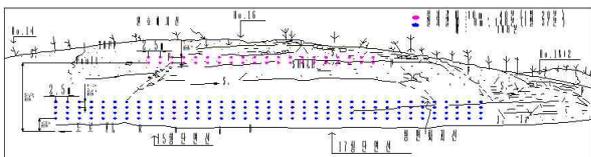


그림 7. FRP 보강 그라우팅 시공 계획 전개도
 Figure 7. Panoramic view map of construction drawings for the FRP grouting

다양한 보강공법 즉, FRP 보강 그라우팅 공법, 락 앵커 공법, 락 볼트 공법, 비탈면 구배완화 공법 및 개비운 공법 모두 안전율이 기준이상으로 도출되어 적절한 공법으로 적용 가능하나, 현장의 시공성과 공사비의 적절성 및 토지 보상 및 안전성을 고려해 FRP 보강 그라우팅 공법이 가장 합리적인 공법으로 판단되어 시공하였다.

V. 결론

연구지역은 경북 청송군 안덕면에 소재한 안덕교 개체공사 중 붕괴가 발생한 절취비탈면에 대해 안전진단을 실시하여 안정성을 검토하고 대책공법을 제시하였다.

연구대상 비탈면은 중생대 백악기의 퇴적암인 사곡층과 춘산층의 경계부로서 춘산층의 최하부층에 해당하는 사암, 세일 및 협재한 응회암으로 분류할 수 있다.

본 비탈면의 암반부는 암반 내 단층대에 발달한 단층비지와 3조 이상의 전단절리와 수 mm 간격으로 발달한 층리면의 영향으로 매우 빠른 풍화속도를 보이는 상태를 나타내며 층리, 단층, 전단절리, 인장절리가 발달하여 풍화가 많이 진척되어 암반 등급은 SMR class V인 매우 불량한 암반에 해당된다.

과피암체의 크기는 평균적으로 $0.001\text{m}^3 \sim 0.0125\text{m}^3$ 정도이나 단층대가 분포하는 경우는 0.75m^3 정도로서, 과피암체의 하중은 약 $1.725\text{ton} \cdot \text{m}$ 를 나타낸다.

비탈면의 대표적인 단면 위치를 선정하여 붕괴 전 비탈면을 역해석하여 토질 및 지질정수를 산정하여 비탈면 안정성을 검토한 결과, 우기 시에는 모든 해석방법 및 단면에서 안전율(Fs)이 1.2에 근접하므로 기존의 파괴 발생을 충분히 입증할 수 있는 불안정한 상태를 나타내어 향후 추가적인 붕괴가 예상되므로 대책공법의 적용이 요망되는 비탈면으로 판단된다.

본 비탈면의 여건을 종합적으로 고려할 때, 적용 가능한 대책공법으로 비탈면구배완화공법, Rock Anchor 보강, Rock Bolt+Grouting 보강, FRP 보강 및 GABION 옹벽설치 등을 들 수 있으나, 현장의 시공성과 공사비의 적절성 및 토지 보상의 여건상 FRP 보강공법의 적용이 가장 합리적인 것으로 판단된다.

특히, 범면 face-mapping 자료와 범면에 수직인 여러 대표 구간의 지질횡단면도, 그를 기본도면으로 사용한 한계평형해석 및 대책공법 제시는 비탈면의 객관적인 해석 및 안정성 검토의 합리적인 도구가 될 것으로 예상된다.

References

- [1] Hwang, Y.C., 2002, Consideration of the plane-failure condition of rock slopes according to failure characteristics in Korea, The Journal of

- Engineering Geology, 12(3), 295-303, (in Korean with English Abstract).
- [2] Cheong, S.W. and Choi, B.R., 2009, Comparative study of square-inventory method with scanline survey in slope stability analysis, The Journal of Engineering Geology, 19(2), 119-129, (in Korean with English Abstract).
- [3] Kim, H.G., Kim, S.H., Ok, Y.S., and Koo, H.B., 2012, Case study of a stability analysis of a granitoid slope in the Gansung-Hyunnae area GangwonDo, The Journal of Engineering Geology, 22(3), 331-341, (in Korean with English Abstract).
- [4] Koo, H.B., Kim, H.J., and Lee, D.Y., 2003, Slope stability analysis and suggestion of stabilization methods on failed cut-slope interbedded with weakness layer, 2003, The Journal of Engineering Geology, 13(2), 157-170, (in Korean with English Abstract).
- [5] Kim, S.H., Koo, H.B., Hwang, J.Y., and Son, M., 2011, Case study on the cause of failure and characteristics of soil at a collapsed cut-slope at the ○○ detour, Jeonranam-Do, The Journal of Engineering Geology, 21(4), 313-322, (in Korean with English Abstract).
- [6] Ko, K.T., Choi, J.H., and Kim, Y.S., 2012, Effects of geological structures on slope stability : An example from the Northwestern part of Daegu, Korea, The Journal of Engineering Geology, 22(1), 1-13, (in Korean with English Abstract).
- [7] Kim, J.H., Baek, Y., Koo, H.B., and Park, K.B., 2012, The Journal of Engineering Geology, 22(2), 223-231, (in Korean with English Abstract).
- [8] Ihm, M. H., 2021, Countermeasures for slope stability on coal-seam bearing mudstone using the geological cross-sections, Tunnel & Underground Space, 31(2), 98-110, (in Korean with English Abstract).
- [9] Ihm, M. H. and Park, J. Y., 2017, Study on the geological characteristics and slope stability of Nammyeom reservoir in Bonghwa County, Kyungpook Province, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, 27(2), 77-88, (in Korean with English Abstract).

※ 이 논문은 2021학년도 대전대학교 교내학술
연구비 지원에 의해 연구되었음