

양호한 연속체 암반사면의 예비 판정기준 설정 연구

김형민^{1*} · 이수곤² · 이벽규³ · 우재경⁴

¹서울시립대학교 대학원 토목공학과, 박사과정

²서울시립대학교 토목공학과, 교수

³(주)지오메카이엔지, 대표이사

⁴(주)제일엔지니어링, 부사장

A Study on Setup for Preliminary Decision Criterion of Continuum Rock Mass Slope with Fair to Good Rating

Hyung-Min Kim^{1*} · Su-gon Lee² · Byok-Kyu Lee³ · Jae-Gyung Woo⁴

¹Department of Civil Engineering, University of Seoul, Graduate School, Ph.D. Candidate

²Department of Civil Engineering, University of Seoul, Professor

³GeoMecca Engineering Inc., President

⁴Cheil Engineering Co., Ltd., Vice President

Abstract

It can be observed that steep slopes (65° to 80°) consist of rock masses were kept stable for a long time. In rock-mass slopes with similar ground condition, steeper slopes than 1 : 0.5 (63°) may be applied if the discontinuities of rock-mass slope are distributed in a direction favorable to the stability of the slope. In making a decision the angle of the slope, if the preliminary rock mass conditions applicable to steep slope are quantitatively setup, they may be used as guidance in design practice. In this study, the above rock mass was defined as a good continuum rock mass and the quantitative setup criterion range was proposed using RMR, SMR and GSI classifications for the purpose of providing engineering standard for good continuum rock mass conditions. The methods of study are as follows. The stable slope at steep slopes (65° to 80°) for each rock type was selected as the study area, and RMR, SMR and GSI were classified to reflect the face mapping results. The results were reviewed by applying the calculated shear strength to the stable analysis of the current state of rock mass slope using the Hoek-Brown failure criterion. It is intended to verify the validity of the preliminary criterion as a rock mass condition that remains stable on a steep slope. Based on the analysis and review by the above research method, it was analyzed that a good continuum rock mass slope can be set to Basic $RMR \geq 50$ (45 in sedimentary rock), GSI and $SMR \geq 45$. The safety factor of the LEM is between $F_s = 14.08$ and 67.50 (average 32.9), and the displacement of the FEM is 0.13 to 0.64 mm (average 0.27 mm). This can be seen as a result of quantitative representation and verification of the stability of a good continuum rock mass slope that has been maintained stable for a long period of time with steep slopes (65° to 80°). The setup guideline for a good continuum rock mass slope will be able to establish a more detailed setup standard when the data are accumulated, and it is also a further study project. If stable even on steep slopes of 1 : 0.1 to 0.3, the upper limit of steep slopes is 1 : 0.3 with reference to the overseas design standards and report, thus giving the benefit of ensuring economic and eco-friendliness. Also, the development of excavation technology and plantation technology and various eco-friendly slope design techniques will help overcome psychological anxiety and rapid weathering and relaxation due to steep slope construction.

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Hyung-Min Kim
E-mail: geokor@daum.net

Received: 24 April, 2019

Revised: 10 June, 2019

Accepted: 19 June, 2019

© 2019 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Keywords: RMR, SMR, GSI, continuum rock mass slope, steep slopes (65~80°)

초 록

암반으로 구성되어 있는 급경사(65~80°) 암반사면들이 장기간 안정한 상태로 유지되고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이와 유사한 지반상태로 이루어진 굴착 암반사면에서 불연속구조가 비탈면의 안정성에 유리한 방향으로 분포하고 있는 경우에는 발파암 경사기준인 1 : 0.5 (63°)보다 급한 경사를 적용할 수 있을 것이다. 비탈면 설계기준의 경사 결정 과정에서 급경사로 적용할 수 있는 예비 암반조건이 정량적으로 설정되어 있으면 설계 실무측면에서 지침으로 활용할 수 있을 것이다. 이 연구에서는 상기 암반을 양호한 연속체 암반으로 정의하고, 양호한 연속체 암반조건에 대해 공학적인 준거를 제공할 목적으로 범용적인 RMR, SMR, GSI 분류를 활용하여 정량적인 설정기준 범위를 제안하고자 하였다. 연구방법으로는 다음과 같다. 암석종류별로 급경사(65~80°)에서 안정한 비탈면을 연구 대상으로 선정하고, Face mapping 결과를 반영하여 RMR과 SMR 및 GSI 분류하였다. Hoek-Brown 파괴기준을 활용하여 산정된 강도정수를 현 상태의 암반사면 안정해석에 적용하여 나타난 결과를 검토하였다. 급경사로 안정하게 유지되는 지반조건으로서 예비기준의 타당성을 검증하기 위한 것이다. 상기 연구방법으로 분석·검토한 결과, 양호한 연속체 암반비탈면은 Basic RMR ≥ 50 (퇴적암에서는 45), GSI·SMR ≥ 45 로 설정할 수 있을 것으로 분석되었다. 한계평형 해석의 안전율은 $F_s = 14.08\sim 67.50$ (평균 32.9)이고, 유한요소해석의 변위는 0.13~0.64 mm (평균 0.27 mm)이다. 이는 급경사(65~80°)로 오랜 기간 동안 안정하게 유지되고 있는 양호한 연속체 암반사면의 안정성을 정량적으로 표현하고 확인하는 결과로 볼 수 있다. 양호한 연속체 암반사면에 대한 암반기준 설정범위는 자료가 축적되면 좀 더 세부적인 설정기준을 확립할 수 있을 것이고 추후 연구과제이기도 하다. 1 : 0.1~0.3의 급경사에서 안정할 경우에, 해외 설계기준 및 사례를 참고하여 급경사의 상한 기준을 1 : 0.3으로 설계하면 경제성과 친환경성을 확보하는 이점이 있게 된다. 또한 굴착기술과 식생기술 발달 및 다양한 친환경적 사면 설계기법으로 급경사에 따른 심리적 불안감과 급격한 지반이완을 극복할 수 있을 것이다.

주요어: RMR, SMR, GSI, 연속체 암반사면, 급경사 암반사면(65~80°)

서론

국내에 분포하는 사면 중에 급경사(65~80°)로 오랜 기간 동안 안정하게 유지되고 있는 암반사면들이 다수 있다. 이와 유사한 암반강도 및 불연속구조로 이루어진 암반에 굴착 사면을 계획할 때, 1 : 0.2~0.5 경사의 사면으로 설계 및 시공이 가능할 증거가 될 것이다.

건설공사 비탈면 설계기준(Ministry of Construction and Transportation, 2006; Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011; Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016)에서 암반비탈면에 대해서는 단순히 암반 강도보다는 불연속구조의 특성을 우선적으로 고려하여 안정성을 확인하고 경사를 결정할 것을 명시하였다. 이는 암반(발파암)으로 구성된 굴착 사면의 경사를 공학적인 근거에 의해 급경사로 설계에 반영할 수 있다는 것을 의미하는 것일 수 있다. 현재 설계실무 측면에서, 서론 모두에 언급한 암반사면의 경사를 관행적으로 기존 발파암 경사기준인 1 : 0.5 (63°)로 적용하여 설계 및 시공하고 있다. 이는 원지반의 과도한 굴착으로 야기되는 자연 훼손(비 환경친화성)과 경제 손실(비경제성)뿐만 아니라, 도시에서의 공간 활용 비효율성 등의 문제점들이 있다. 이 문제점들을 해결하기 위한 공학적인 규명방법으로, 어떤 암반사면이 급경사로 설계 가능한 지에 대해서 예비적으로 판단하는 지표가 있으면 도움이 될 것이다. 이에 따라 사면안정성을 검토하고 사면 경사를 결정하는 절차를 수행하게 되는데, 이 과정에서 실무적이고 공학적인 암반사면의 경사 선정기준과 지반정수 산정 방법을 정립하는 것이 중요할 것이다.

설계 실무측면에서, 사면의 암반상태가 양호하고 불연속구조와의 기하학적 방향성 관계에서 안정한 경우를 양호한 연속체 암반사면으로 구분하여 분류하고(grouping), 이 암반의 지반정수를 연속체해석에 적용하기 위해 불연속구조면의 지반정수와는 별도로 산정하여 왔다. 이와 같이 설계 실무에서, 암반구조물이 불연속구조의 영향에 의해 안정성이 유리하게

나 불리해지는 결과에 따라 암반을 연속체나 불연속체로 구분하여 검토하는 수행업무 용어를 인용하여, 이 연구에서는 서두에 언급한 암반사면을 양호한 연속체 암반사면으로 정의하고 연구대상 사면으로 설정한다.

Jun(2005)은 국내외 굴착사면의 표준 경사에 대해 비교하였다. 암반 사면의 최대 급경사 적용은 국내는 1 : 0.5이고, 해외는 1 : 0.3이며, 사면 경사를 결정함에 있어 미국, 일본, 유럽기준 등에서는 설계자의 판단에 많은 재량을 부여하는 것으로 발표하였다.

설계기준으로 제시되는 깎기 사면의 지층별 표준경사는 국가기관에서 제정 또는 개정되어 과업수행 지침으로 활용되는 경향이 있다.

국토교통부에서 발표한 ‘건설공사 비탈면 설계기준(2016)’은 건설기준의 표준코드(KDS)를 통합·정비하면서 제정의 형식으로 공표한 설계기준이다. 이 기준의 경사기준 지침은 2006년에 제시한 합리적인 사면경사 설정 방법에 추가하여, 암반특성을 정확히 파악할 수 없을 때, 시추조사에 의해 파악된 암반파쇄특성(TCR, RQD)을 고려하여(Lee et al., 2011) 암반사면의 경사를 결정할 것을 명시하였다.

RMR과 SMR의 점수등급에 따라 기본적인 암반평가나 보강대책에 관련된 연구나 설계사례는 많은 편이나(Bieniawski, 1989), 설계실무자들이 설계현장의 지반이 급경사 사면으로 설계 가능한 지를 판단할 수 있는 예비 설정기준으로서 RMR과 SMR 및 GSI의 설정범위에 관련된 연구는 거의 없는 편이다.

양호한 연속체 암반사면의 경사 결정을 위한 설계 과정에서, 설계실무 측면에서 급경사 사면을 적용할 수 있는 예비 설계기준의 준거를 제공할 목적으로 정량적인 설정기준을 제안하고, 사면 안정 해석하여 현장 적용성을 평가하였다.

연구방법

설계 및 시공초기 단계의 깎기 암반사면 경사 결정 과정에서, 양호한 연속체 암반사면을 급경사(63° 이상, 1 : 0.2~0.5)로 적용 가능한지를 판단하는 예비기준이 필요하다. 이 기준이 되는 요소는 암반강도나 불연속구조 특성 및 개별 암석크기와 형태 등이다. 이를 근거해서 정량적 기준을 설정하는 것이 예비적 판단에 도움이 될 것이다. 이 기준 요소들을 포함하고 정량화되어 널리 활용되고 있는 암반 분류법인 RMR(Rock Mass Rating; Bieniawski, 1973, 1988)과 SMR(Slope Rock Mass Rating; Bieniawski, 1989) 및 GSI(Geological Strength Index; Hoek et al., 2002)을 활용하여 양호한 연속체 암반사면에 대한 설정기준을 제시한다. RMR의 변수들인 암석강도, RQD, 절리간격, 절리상태 등은 정성적으로 양호한 지 불량한지를 표현하는 암반상태를 정량적으로 정의하는 지표로 제시해준다. SMR은 평사투영 해석이 포함된 암반사면 분류법으로 임의의 암반사면과 주 불연속구조의 경사방향과 경사각이 서로 어떤 기하학적 관계에 있는가에 따라 점수의 가감이 극명하게 계산되어 사면의 예비 안정성과 함께 연속체 여부를 명확하게 판단할 수 있다. GSI의 변수인 암석Block 크기와 형태 및 불연속구조면의 상태들은 RMR 변수와 유사하며 암반의 강도정수와 관련하여 정량적으로 활용된다.

급경사에서도 오랫동안 안정하게 유지되고 있는 기존 암반사면을 연구 대상으로 선정하고, 암석 강도와 불연속구조 분포 및 특성을 현장 조사하여 Basic RMR과 SMR 및 GSI를 분류한다. 이 Basic RMR과 SMR 및 GSI를 분석하여 기준을 설정한다. GSI 분류 및 Hoek-Brown 파괴기준(Hoek et al., 2002)을 활용하여 산정된 강도정수를 안정해석에 적용하여 나타난 결과를 검토하여 급경사로 안정하게 유지되는 지반조건으로서 예비기준의 타당성을 검증한다.

RMR과 SMR 및 GSI를 산출하기 위해 현장 및 실내시험과 암반 내 불연속구조 분포 특성 조사(Face mapping; Brown, 1981)는 사업단계 별로 수행한다. 설계 단계에서는 시추 및 실내시험 자료, 공내영상촬영 및 주변 암반노두의 Face mapping 자료로 암반분류하고 암반 지반정수를 산출한다. 시공 단계에서는 높이 3~5 m 정도로 깎기 암반면이 노출되면, Face mapping을 수행한다. 설계단계에서의 추정변수들 및 지층분포 상태와 비교·검토하고 설계변경 여부를 결정한다.

기재 내용은 지질 종류, 암석 강도, 불연속구조 종류, RQD 추정(Palmstrom, 2005)을 위한 단위길이 당 절리 개수(J_v), 불연속구조 방향성(Strike and dip), 간격(Spacing), 연속성(Persistence), 거칠기(Roughness), 간극(Aperture, 틈새), 간극 내 충전물(Filling), 불연속구조면의 강도(Wall strength), 불연속구조면 내 함수상태(Seepage), 절리계 수(Number of sets), 암괴 크기 및 모양(Rock block size and shape) 등이다(Korean Geotechnical Society, 2000).

연구 내용에 따른 연구방법을 정리하여 기술하면 다음과 같다.

- 1) 양호한 연속체 암반사면을 급경사로 설계 가능함을 예측하는 예비 암반기준 제시; 급경사에서도 안정한 기존 암반사면을 연구대상으로 선정하고, Basic RMR과 SMR 및 GSI 분류 및 범위를 설정한다.
- 2) 예비 설정기준의 타당성을 검증; Hoek-Brown 파괴기준에서 유도된 연속체 암반의 강도정수를 적용하여 사면 안정해석하고, 안전율과 변위를 분석·검토한다.
- 3) 연구대상 암반사면 선정 기준: 경사 65~80°의 사면, 10년 이상 경과하고 파괴이력이 없는 사면, 실내 삼축압축시험 자료가 있는 현장, 노두 관찰 가능한 사면이다.

양호한 연속체 암반사면의 암반분류 결과

급경사(65° 이상, 1 : 0.1~0.4)에서도 오랫동안 안정하게 유지되고 있는 기존 암반사면을 연구 대상 암반사면으로 선정하였으며, 암석 종류 및 위치는 다음과 같다(Fig. 1 참조).

- ① 화강암, 편마암: 경남 고령군 야로면 정대리(보탑마을 부근)
- ② 안산암: 경남 거제시 장목면 장목리, 매동마을(채석장)
- ③ 혼펠스: 부산 사상구 엄궁동(도로변, 사상~하단선 4공구 부근)
- ④ 괴상 사암: 경남 거제시 장목면 농소리, 장목터널 상부(전망대)
- ⑤ 사암·니암 호층: 경남 거제시 장목면 유희리, 상유마을 해변



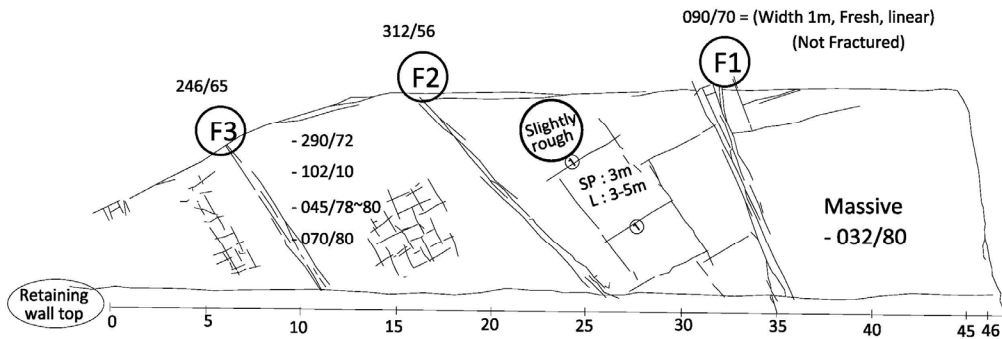
Fig. 1. Location map of study area.

암석종류 별 연구대상 암반사면에서 측정된 불연속구조의 분포 특성 자료를 정리하여 Face map으로 표현하였다. 불연속구조의 분포 양상이 전체적으로 동일한 것은(Systemetic joint set) 대표적인 패턴만을 기재하였다. Face map에 표현된 불연속구조의 방향성과 특성에 대해서는 단층만 개별적으로 표시하였다. 동일 암석종류에서 풍화의 정도에 따라 연암(PWR, Partly weathered rock)과 경암(FSR, Fresh sound rock)으로 구분하여 표현하였다. 측정된 자료는 각 암반분류에 적용하여 RMR, SMR, GSI 분류를 하였다. 비탈면의 평균 경사는 연장 20 m마다 측정하고, 주 절리의 경사와 비교·검토하였다. 편마암 사면을 대표적으로 선정하여 암반분류 과정을 도시하고(Fig. 2, Table 1 참조) 화강암, 편마암, 사암·니암 호층 암반사면들의 결과(Table 2 참조)를 종합적으로 기술한다.

편마암

RMR (Gneiss, Nearby Healn-sa I/C, BoTap town 1)

연구대상 편마암 사면에서의 지질공학도(Face Map)와 RMR 분류결과는 Fig. 2와 같다.



Item	Description	Rating	
Strength (MPa)	110~120	⑩~⑪	
R.Q.D (%)	70~85	⑭~⑰	
Spacing (cm)	20~30	⑧~⑨	
Ground water	Dry, Moist	⑫	
Subtotal		⑳~㉑	
Persistence	3~5 m	③~⑤	
Joint- condition	Aperture	Tight~below 0.1 mm	⑤~⑥
	Roughness (Rr)	Slightly rough	③
	Infilling (Rf)	Hard, Below 5 mm	④~⑥
	Weathering (Rw)	Slightly Weathered, Fresh	⑤~⑥
Basic RMR	64~75		
J_v (ea/m ³)	10~15		

$RQD = 110 - 2.5 \times J_v$ (Palmstrom, 2005; J_v = Volumetric joint count/m³).

Fig. 2. Face map and RMR of gneiss rock mass slope.

SMR (Gneiss, Nearby Healn-sa I/C, BoTap town)

연구대상 편마암 사면에서의 SMR 분류결과는 Table 1과 같다.

Table 1. SMR of gneiss rock mass slope

Station	Slope (α_s/β_s)	Joint system (α_j/β_j)	Fault, Fold (α_j/β_j)	F1	F2	F3	F4
BoTap town 1	015/70~72	<ul style="list-style-type: none"> • major: - 092/42 - 032/80 - 290/72 • minor: - 102/10 - 045/80 - 070/80 	<ul style="list-style-type: none"> - 246/65 - 312/56 - 090/70 	0.7	1.0	-6	0
		SMR	64 (~75) + (0.7×1×(-6)) + 0 ≐ 59~70 (59.8~70.8)				

α_s : Slope angle direction, α_j : Joint dip direction, β_s : Slope angle, β_j : Joint dip.

연구대상 암반사면에서 측정된 사면경사와 암반분류는 Table 2와 같다.

Table 2. Engineering rock mass classification, discontinuity dip and slope angle of rock mass slope in study area

Rock type		Engineering classification			Discontinuity dip	Slope angle
		GSI	RMR	SMR		
Granite	Range	60~75	61~71	60~70	68~78	70~80
	Mean	67	66	65	73	75
Andesite	Range	60~75	60~90	56~89	80~82	80~85
	Mean	67	65/75	62/72	81	82
Gneiss 1	Range	55~70	60~73	57~70	68~70	68~70
	Mean	62	66	63	69	69
Gneiss 2	Range	60~75	64~75	59~70	78~80	70~72
	Mean	67	69	64	79	71
Hornfels (PWR 1)	Range	45~60	49~53	46~50	45~80	45~80
	Mean	52	51	48	45, 73	45, 73
Hornfels (FSR 1)	Range	60~75	63~65	57~59	80~85	78~80
	Mean	67	64	58	82	79
Hornfels (FSR 2)	Range	55~65	60~68	54~62	80~85	78~80
	Mean	60	64	58	82	79
Sand-stone	Range	55~70	59~67	56~64	70~80	76~80
	Mean	62	63	60	75	78
I.L. (FSR)	Range	55~65	57~74	57~74	78~80	76~80
	Mean	60	64	65	79	78
I.L. (PWR)	Range	45~60	45~64	45~64	70~80	70~80
	Mean	52	54	54	75	75

PWR: Partly weathered rock, FSR: Fresh sound rock, I.L. : Interbedded layer of sandstone and siltstone, Discontinuity dip: Steeper angle of major joint set.

화강암 사면은 주로 경암으로 구성되어 있으며, RMR은 61~71, SMR은 60~70, GSI 60~75 정도의 범위를 나타낸다. 화성암의 암반사면은 비교적 균질한 육면체 암괴상태로 구성되어 있어 유사한 암반분류 등급을 보인다. 사면의 경사는

70~80°이며, 주 절리의 고각은 70~80°로 서로 유사하다. 사면 경사는 고각의 주 절리에 의해 영향을 받은 것으로 보인다. 편마암사면은 주로 경암으로 구성되어 있으며, 계곡부를 경계로 단층과 절리의 방향성과 패턴이 다르므로 편마암1과 편마암2로 구분하였다. 편마암1사면에서는 RMR = 60~73, SMR = 57~70, GSI = 59~70 정도의 범위를 나타낸다. 편마암2 사면에서는 RMR = 64~75, SMR = 59~70, GSI = 60~70 정도의 범위를 나타낸다. 사면의 경사는 70~72°이며, 주 절리의 고각은 72~80°로, 사면 경사는 주 절리 경사의 위경사와 유사하다. 사면 경사는 고각의 주 절리에 의해 영향을 받은 것으로 보인다. 사암과 니암이 호층으로 분포하는 이방성 암반사면은 자연상태의 사면이다. 단층에 의해 연·경도가 혼재되어 있는 암반사면은 사암·니암 호층(연암)으로, 단층이 없는 암반사면은 사암·니암 호층(경암)으로 구분하였다. 이 사암·니암 호층 암반은 정합으로 퇴적되고 암석화된 상태이어서 연속체 암반의 범주로 분류하였다. 연구대상 사암·니암 호층(연암) 사면에서는 RMR = 45~64, SMR = 45~64, GSI = 45~60 정도의 범위를 나타낸다. 연구대상 사암·니암 호층(경암) 사면은 RMR = 57~74, SMR = 57~74, GSI = 55~65 정도의 범위를 나타낸다. 사면의 경사는 78~80°이며, 주 절리의 고각은 70~78°로 서로 유사하다. 사면 경사는 고각의 주 절리에 의해 영향을 받은 것으로 보인다.

Fig. 3은 Table 2의 RMR, SMR, GSI 범위의 평균을 도시한 것이다.

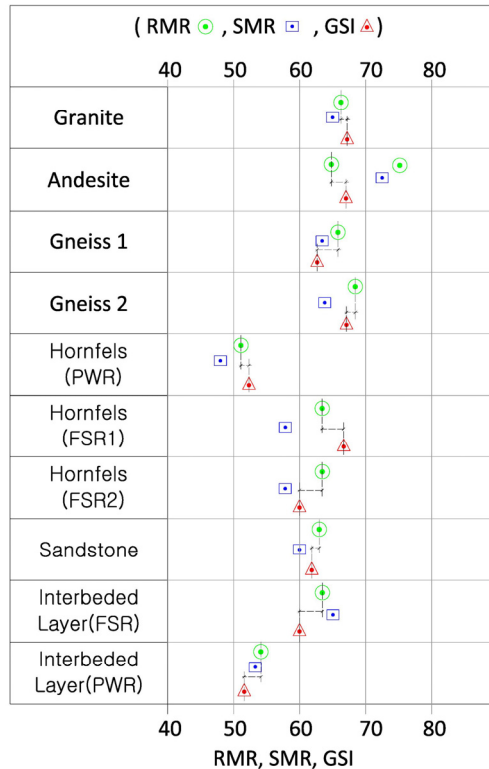


Fig. 3. RMR, SMR, GSI of rock mass slope in study area.

화성암의 암반사면은 비교적 균질한 암괴상태로 구성되어 있어, 불연속구조가 상대적으로 다소 많이 분포하는 경암 구간에도 유사한 암반분류 등급을 보인다. 변성암의 암반사면은 편마구조 등의 이방성구조에 의해 암반분류 등급의 범위가 화성암보다 약간 넓으나, 안산암의 열 변성으로 형성된 혼펠스 암반사면은 원암의 균질한 특징으로 암반분류 등급 범위가 좁게 나타난다. 연구대상 퇴적암의 암반사면은, 고결도 및 불연속구조 분포상태의 이방성 특성에 따라, 괴상사암 암반사면에서는 비교적 규칙적이어서 분산도가 좁은 암반분류 등급 범위를, 사암·니암 호층 암반사면은 수직 및 수평 공간의 분

포상태가 단층이나 층리구조에 의해 다소 불규칙하여 분산도가 넓은 암반분류 등급 범위를 나타낸다.

연구대상 암반사면은, 절리에 의해 45° (1 : 1)경사를 나타내는 혼펠스 연암사면을 제외하면, 68~80°의 경사를 나타내고 있고, 일부 발파 굴착에 의해 이완된 소규모 전도암괴(장경 30 cm 이하)가 낙석으로 전이된 현상(대부분 낙석방지망에 포획되어 있음)이 있으나 대부분 안정된 상태인 것으로 확인되었다. 연구대상 암반사면은 급경사 사면으로 설계에 적용 가능한 양호한 연속체암반으로 간주할 수 있다. 이 암반사면의 RMR, SMR 분류 결과를 분석한 결과, 연암(PWR)은 Basic RMR = 51~54, SMR = 48~54, GSI = 45~60 이며, 경암(FSR)은 Basic RMR = 63~75, SMR = 58~72, GSI = 55~75 범위이다.

연구대상 암반사면이 안정된 상태인 것을 공학적인 방법으로 규명하기 위해 Hoek-Brown 파괴기준(2002)에서 유도된 강도정수를 사면안정해석에 적용하여 안전율과 변위를 확인하고 검토한다.

연속체 암반사면의 강도정수 산정

Hoek-Brown 파괴기준(2002)은 연속체 암반 거동모델해석에 적용성이 입증되었으며, 전체 파괴포락선에서 암반에서의 불연속구조의 영향을 허용하고, 초기의 간단한 감소지수보다 훨씬 정교하다는 점에서 현재로서 가장 발전된 형태인 것으로 알려져 있다. 대부분 해석 프로그램은 Mohr-Coulomb파괴기준에 의한 탄소성 해석기법을 적용하므로 Hoek-Brown 파괴기준의 주응력 곡선($\sigma'_1 - \sigma'_3$)으로부터 등가 Mohr-Coulomb 강도정수를 산정하여 수치해석에 활용한다.

Hoek-Brown 파괴기준에서 유도된 강도정수 산정방법

실무적 전단강도 산정방법(등각분할법)은 Hoek-Brown 파괴기준(2002)을 응용하였으며 Fig. 4와 같다. Hoek-Brown 파괴포락선의 최대구속응력(σ'_{3max})의 상한 범위 $\sigma'_{3max} \leq \frac{1}{4} \cdot \sigma_{ci}$ (Generalized)에서 최대 및 최소 Mohr-Coulomb 강도정수(직선)에 대해 등각분할선으로 작도하여 구하는 방법이다.

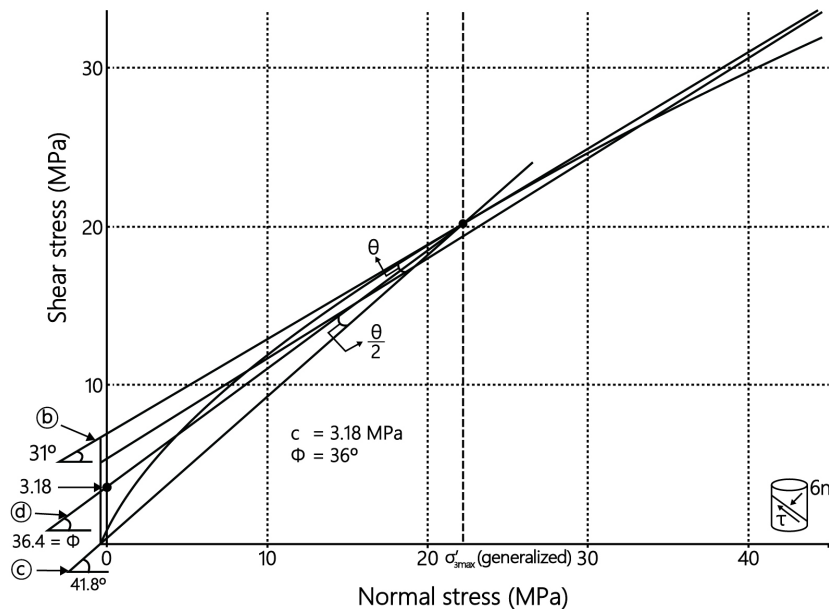


Fig. 4. Estimating method of shear strength in continuum rock.

무결암의 삼축압축시험 및 GSI 결과를 Rocscience사의 Free-ware인 RocLab 1.0 (2002, H-B 파괴기준을 기본으로 코딩하여 프로그래밍된 지반정수 산정 Tool)에 입력하여 Hoek-Brown 상수 m_i 와 σ_{ci} 및 수직-전단응력 관계도를 도출한다. 이 등각분할선은 $\sigma'_{3max} \leq 1/4 \cdot \sigma_{ci}$ (Generalized) 범위에서 비선형 Hoek-Brown 포락선의 위아래를 균형있게 지나가게 되어, Hoek-Brown 파괴포락선의 전단응력 평균값과 유사하게 산정되는 결과를 나타낸다.

연속체 암반사면의 강도정수 산정 결과

연구대상 암반사면은 조성된 후, 10~25년 경과하여 변위가 수렴된 평형상태로 되어도, 굴착 사면 형성 당시의 이완영역은 불가역적인 지반 이완상태인 것으로 간주하고, 교란계수(D)는 Hoek et al.(2002)이 제시한 $D=0.7$ 을 적용하였고, 자연 상태에서 형성된 사암·니암 호층 암반 사면은 $D=0$ 을 적용하였다. 연구대상 암반사면의 GSI 분류는 범위 값으로 산정되었는데, 평균값을 적용하였다. 연구대상 암반사면의 강도정수 산정 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Shear strength of iso-angle division method induced by H-B envelope

Class.	E_m (MPa)	C_m (MPa)	ϕ_m (°)	
Granite	26,000	3.1	36	
		RMR; 61~71 (66)		
Andesite	21,000	2.0	36	
		RMR; 60~70 (65), 70~90 (75, Massive)		
Gneiss	19,000	1.7	30	
		RMR; 60~73 (66)		
		21,000		2.3
RMR; 64~75 (69)				
Hornfels	10,000	3.1	38	
		(PWR)		RMR; 49~53 (51)
		16,500		3.7
(FSR)	RMR; 60~68 (64)			
Sandstone	19,000	4.1	37	
		RMR; 59~67 (63)		
Interbedded layer	9,000	2.0	36	
		(PWR)		RMR; 45~64 (54)
		14,000		3.0
(FSR)	RMR; 57~74 (64)			

화강암 사면에서는 RMR 범위 61~71(66, 이하 평균)에서 변형계수(이하 E_m) = 26,000 MPa, 점착력(이하 C_m) = 3.1 MPa, 내부마찰각(이하 ϕ_m) = 36°으로 나타났다. 안산암 사면에서는 RMR 범위 60~70(65)에서 E_m = 21,000 MPa, C_m = 2.0 MPa, ϕ_m = 36°으로 나타났다.

편마암 사면에서는 각 RMR 범위 60~73(66)/64~75(69)에서 E_m = 19,000/21,000 MPa, C_m = 1.7/2.3 MPa, ϕ_m = 30°/35°로 나타났다.

hornfels 사면에서는 각 RMR 범위 49~53(51, 연암)/60~68(64, 경암)에서 E_m = 10,000/16,500 MPa, C_m = 3.1/3.7 MPa, ϕ_m = 38°/40°으로 나타났다.

괴상 사암 사면에서는 RMR 범위 59~67(63)에서 $E_m = 19,000$ MPa, $C_m = 4.1$ MPa, $\phi_m = 37^\circ$ 로 나타났다. 사암·니암 호층 사면에서는 각 RMR 범위 45~64(54, 연암)/57~74(64, 경암)에서 $E_m = 9,000/14,000$ MPa, $C_m = 2.0/3.0$ MPa, $\phi_m = 36^\circ/39^\circ$ 로 나타났다.

주 절리의 분포상태에 의해 개별 암석이 육면체 모양이거나 어느 한 절리계의 연속성이 짧은 경우와 조직이 치밀한 경우인 화강암, 혼펠스, 괴상 사암과 사암·니암 호층(경암) 사면에서는 상대적으로 다소 큰 강도정수를 보인다. 참고로 각 암석종류에 상응하는 인근의 기존 실시 설계 현장에서 동일한 암반등급에 적용한 강도정수와 유사하다.

양호한 연속체 암반사면의 안정 해석

굴착 암반사면의 안정 해석

연속체 암반사면의 안정 해석을 수행한 설계 사례(77개의 프로젝트와 94개의 보고서를 분석)를 종합하여 정리하면 다음과 같다.

깎기 사면 높이는 대부분 20~30 m이며, 길이(연장)는 30~100 m 정도이다. 지층은 높이 20 m 기준으로 토사층·풍화암(평균 5 m 두께), 연암·보통암(평균 5 m 두께), 경암(평균 10 m 두께) 순으로 구성되어 있다. 사업 발주방식에 따라 수행한 안정 해석 방법은 다소 차이가 있다. 전반적으로 평사투영 해석, SMR 분류에 의한 예비 안정성 검토는 수행하는 것으로 나타났다. 예비 안정성 검토에서 나타나는 결과에 관계없이, 한계평형 해석은 깎기 사면의 안정성 유무를 확인하는 차원에서, 단위 지질구역(Zoning or Grouping area)의 대표적인 단면을 선정하여, 대부분의 과업에서 실시하였다. 유한요소 해석은 연속체 굴착사면을 대상으로 해석 모델링하는 경우에 주로 적용되었다. 불연속구조의 방향성이 사면 안정성에 영향을 미치지 않는 상태의 암반으로 구성된 굴착사면을 연속체 굴착사면으로 간주하였다. 단층 등의 불연속구조가 사면 안정성에 영향을 미치는 상태로 분포하는 중요한 지반조건(변위가 중요)에서는 개별요소해석이 추가로 활용되었다. 안정 해석 방법 시행빈도를 분석한 결과는 Fig. 5와 같다.

- 1) 예비안정성 검토: 평사투영해석 및 SMR분류 방법으로 검토한다.
- 2) 한계평형해석(LEM): 기준 최소안전율 안정 검토와 보강력 산출을 위해 수행한다(Limit equilibrium analysis).
- 3) 유한요소해석(FEM): 응력 및 변위 예측과 함께 계층의 안정 기준 값을 제시한다. 강도감소법(Strength reduction method)과 응력해석법(Stress analysis method) 등이 있다.
- 4) 개별요소해석(DEM): 주로 Key Block Failure(단층)에 대한 안정성을 판단하기 위해 수행한다.

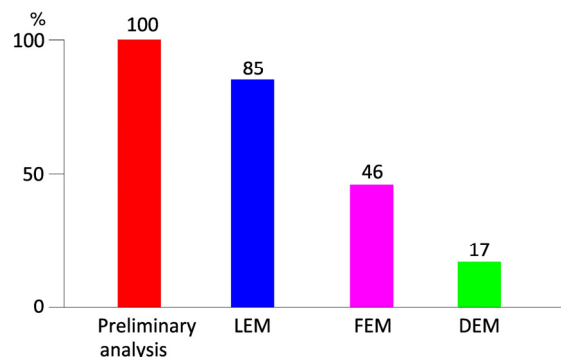


Fig. 5. Performance frequency of slope stability analysis.

이 연구에서 연구대상 암반사면의 안전율을 구하는 검토에는 안전측 이고 간편 해석이 가능한 한계평형해석을 수행하고, 응력 및 변위 예측을 위한 해석방법으로 유한요소해석의 응력해석법을 활용하였다.

굴착 사면 안정해석 결과 분석

토사층(풍화암 포함)은 표준경사로 형성되어 있고, 토사층과 암반층을 포함한 횡단면 전체를 대상으로 해석할 경우 토사표층에서만 파괴면

형상이 표현되고, 안정한 것으로 나타났다. 이 연구 목적에 부합하기 위해 암반층을 포함한 파괴형상이 형성되도록 파괴모델을 구현하고 안정 해석하였다. 암반분류 결과와 같이 편마암사면에 대해 사면해석 결과를 Fig. 6으로 예시하고, Table 4와 함께 종합하여 검토한 것을 간단히 기술한다. 한계평형해석 결과는 우기(Wet condition) 기준이다.

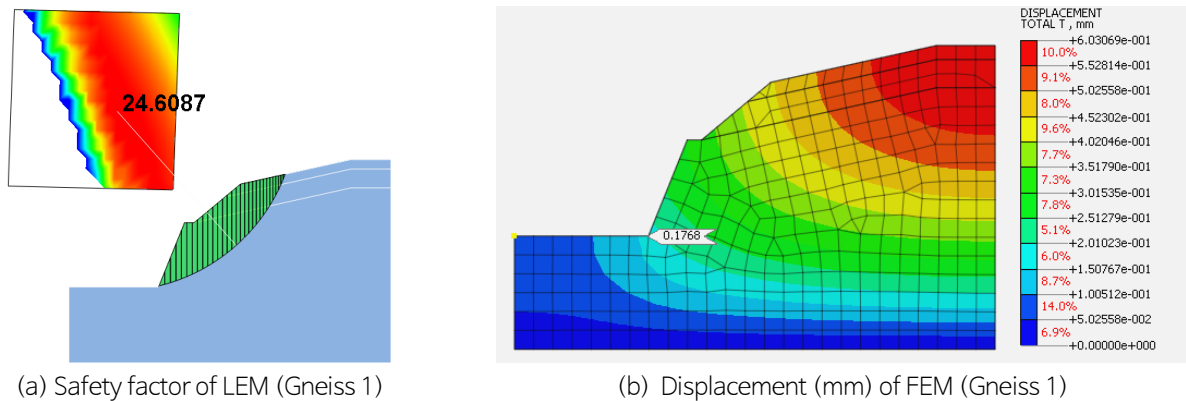


Fig. 6. Slope stability analysis of gneiss rock mass.

Table 4. Numerical analysis result applied rock mass strength of iso-angle division method

Class.		LEM-wet condition (safety factor)	FEM (displacement: mm)
Granite		37.57	0.22
Andesite		14.08	0.65
Gneiss	1	24.60	0.17
	2	37.91	0.22
Hornfels	1	44.49	0.24
	2	67.50	0.15
Sandstone		58.22	0.13
Interbedded layer	1	28.04	0.29
	2	30.11	0.22

1 : 0.4 (69°경사) 편마암사면의 안전율은 $F_s = 24.6$ 으로 나타났다. 유한요소 해석에서, 사면 하부변위는 0.1768 mm으로 매우 안정한 상태이다.

한계평형해석 결과, 우기를 기준으로, 안전율은 $F_s = 14.08\sim 67.50$ (평균 32.9)으로 나타났다. 암석종류에 따라 다소 차이가 있으나, 상대적으로 강도정수가 큰 암반사면에서는 $F_s = 35$ 이상을 보인다.

유한요소해석 결과, 변위는 0.13~0.65 mm (평균 0.27 mm)이고, 절 리가 발달된 안산암 사면(높이 40 m 내외)에서 상대적으로 높은 변위(0.65 mm)를 보이는 것을 제외하면 대부분 0.3 mm 이하이다. 우기 최소 안전율인 $F_s = 1.2$ 이상보다 매우 큰 안전율과 미미한 수준의 변위 결과는 안정한 상태로 수렴된 양호한 연속체 암반사면을 정량적으로 나타내는 것이다.

종합 고찰

설계 초기단계에서 암반비탈면의 경사를 결정할 때, 급경사 적용 가능성을 예비적으로 판단할 수 있는 업무지침으로서 암반조건 설정기준이 있으면 설계 실무측면에서 도움이 될 것이다. 급경사(65~80°)로 오랜 기간 동안 안정하게 유지되고 있는 암반사면들은, 이와 유사한 암반강도 및 불연속구조로 이루어진 암반에 굴착 사면을 계획할 때, 1 : 0.2~0.5 경사의 사면으로 설계 및 시공이 가능할 근거가 될 것이다. 설계 실무에서

상기 암반조건으로 구성된 지반을 양호한 연속체 암반의 사면구조물로 구분하는 것을 원용하여 이 연구에서는 양호한 연속체 암반사면으로 정의 하였다. 양호한 연속체 암반사면의 정의를 정량적으로 규정하기 위해, 고각(65~80°)에서 10년 이상 안정성이 유지되어 온 암반사면을 연구 대상으로 선정하였다. 이 연구대상 암반사면에 대해 범용적인 RMR, SMR 및 GSI 분류를 수행한 결과를 반영하여 암반기준 범위를 설정을 제시 하고자 하였다. 설계단계에서, 급경사로 적용할 수 있는 양호한 연속체 암반조건은 Basic RMR ≥ 50 (퇴적암에서는 45), $GSI \cdot SMR \geq 45$ 으로 나타났다. 또한 설계단계에서 사면이 계획된 지반에 대해 인근 암석노두가 없거나, 민원이나 시추조사가 어려운 지형조건 등에 의해 불연속구조의 분포특성을 파악하지 못한 경우, 시공 초기단계에서 설계 암반사면 경사를 확인·검토하거나 변경을 계획하는데 기본 근거 자료로 활용될 수 있을 것이다. 절리가 많은 연속체암반의 거동모형을 잘 반영한다고 알려진 암반특성화시스템인 GSI분류와 Hoek-Brown 파괴기준이 여러 설계 사례에서 활용되고 있다. 연구대상 암반비탈면에 대해 최대구속응력 범위를 General($\sigma_1 \leq \sigma'_{3max} \leq \frac{1}{4} \sigma_{ci}$)로 설정하고 수직응력 $\sigma_n (= \frac{1}{4} \sigma_{ci})$ 에서 등각분할법에 의해 산정한 M-C 강도정수를 한계평형해석과 유한요소 해석의 입력자료로 활용하여 사면안정성을 확인하였다.

안전율은 $F_s = 14.08 \sim 67.50$ (평균 32.9)이고, 변위는 0.13~0.64 mm (평균 0.27 mm)이다. 이는 급경사(65~80°)로 오랜 기간 동안 안정하게 유지되고 있는 양호한 연속체 암반사면의 안정성을 정량적으로 규명하고 확인하는 해석결과로 볼 수 있다.

굴착기술과 식생기술 발달 및 다양한 친환경적 사면 설계기법으로 급경사에 따른 심리적 불안감을 극복할 수 있을 것이다.

결론 및 제언

연구대상 암반비탈면에 대해 Basic RMR과 SMR 및 GSI 분류하고 수치 해석하여 안정성을 확인한 결과, 양호한 연속체 암반사면 조건은 Basic RMR ≥ 50 (퇴적암에서는 45), $GSI \cdot SMR \geq 45$ 으로 설정할 수 있을 것이다. 자료를 추출한 현장을 대표적인 지질종류 별로 선정하는 관계로 표본수가 적은 한계가 있지만, 각 암반분류 방법(RMR, SMR, GSI)에 의한 적용범위가 공통적으로 설정될 수 있으면, 추가적인 조사를 통해 설정기준을 공유하고 세밀하게 정립할 수 있을 것이다.

양호한 연속체 암반사면으로 간주되는 연구대상 암반사면의 경사각을 분석하면, 기본적으로 주 불연속구조가 연속성이 크고 고각(65° 이상)으로 분포하고 있다. 암반사면의 경사는 이 주 불연속구조의 경사각과 동일하거나 유사하다. 암반사면의 경사는 주 불연속구조의 경사각을 우선으로 참고하여 결정하는 것이 바람직할 것이다. 암반상태 및 지질구조에 따라 1 : 0.1~0.3의 급경사에서도 안정할 경우에는, 해외 설계기준 및 사례를 참고하여 급경사의 상한 기준을 1 : 0.3으로 제안한다.

References

- Bieniawski, Z.T., 1973, Engineering classification of jointed rock masses, *Transportation South African Institute Civil Engineering*, 15(12), 335-344.
- Bieniawski, Z.T., 1988, The rock mass rating (RMR) system (Geomechanics Classification) in engineering practice, In: Kirkaldie, L. (Ed.), *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, ASTM International STP 984, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 17-34.
- Bieniawski, Z.T., 1989, *Engineering rock mass classification*, New York, John Wiley and sons, 215 p.
- Brown, E.T., 1981, Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods, ISRM, 171-183.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B, 2002, Hoek-Brown criterion-2002 edition, *Proc. NARMS-TAC Conference*, 267-273.
- Jun, S.K., 2005, A study on design criteria of cut-slope angle, Master of Engineering Thesis, University of Seoul, 26-38 (in Korean with English abstract).
- Korean Geotechnical Society, 2000, *Rock engineering for civil engineer*, GoomeeSeokwan, 678 p (in Korean).
- Lee, S.G., Kim, H.M., Kim, S.H., 2011, Study on slope design standard and case in Korea, *Slope Stability Symposium*, Korean Geotechnical Society, Seoul, 117-123 (in Korean).
- Ministry of Construction and Transportation, 2006, *Standard of slope design in construction work*, 117-121 (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016, *Standard of slope design in construction work*, 29-36 (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011, *Standard of slope design in construction work*, 29-36 (in Korean).
- Palmstrom, A., 2005, Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD), *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(4), 362-377.