

암반사면 안정 해석을 위한 강도정수 산정 사례연구

김학준^{1*} · 정준호²

¹대전대학교 건설안전방재공학과 교수, ²한국건설기술연구원 도로관리통합센터 연구원

Case Studies on Determination of Strength Parameters for the Analysis of Rock Slope Stability

Hak Joon Kim^{1*} · Jun-Ho Jeong²

¹Professor, Department of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University

²Researcher, Integrated Road Management Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Abstract

The estimation of strength parameters is very important for the stability analysis of rock slopes. Various methods for the determination of strength parameters were suggested by various researchers. The number of methods used for the estimation of strength parameters in the stability analysis of rock slopes were investigated based on literature reviews. The frequency of the method determining strength parameters were investigated with respect to failure types. The cohesion and friction angles of the rock and discontinuities are presented with RMR values. The cohesion shows wider range of values relative to those of friction angles according to current studies. Even though RMR does not show any correlation with cohesion values, RMR and the friction angle of the rock clearly shows a positive relationship. Proper methods should be utilized for the determination of strength parameters with consideration for failure types and be proved through literature reviews. The credibility of determining strength parameters is expected to improve if strength parameters data are accumulated from the back analysis performed for failed local rock slopes.

Keywords: strength parameters, rock slopes, stability analyses, failure type

초 록

강도정수의 산정은 암반사면의 안정성 해석에 매우 중요하다. 강도정수를 결정하는 다양한 방법들이 여러 연구자들에 의하여 제안되었다. 암반사면의 안정성 해석을 위하여 강도정수 결정에 사용된 방법들의 빈도를 문헌조사를 통하여 조사하였다. 특히 파괴유형에 따른 강도정수 결정방법의 빈도수를 조사하였다. 사례연구를 통하여 암석과 불연속면의 점착력과 마찰각의 값을 조사하여 RMR값과 함께 제시하였다. 연구 결과에 의하면 점착력은 내부마찰각과 비교하여 상당히 큰 범위를 보였다. RMR은 점착력과 상관관계를 보이지 않았으나 마찰각과는 뚜렷한 상관관계를 보였다. 파괴유형에 따라 강도정수 결정을 위하여 적절한 방법이 사용되어야 하며 문헌조사를 통하여 결과를 검증해야 한다. 향후 각 지역별로 역해석을 통하여 파괴가 발생한 사면에 대한 강도정수 자료가 축적된다면 강도정수 결정의 신뢰성이 향상될 것으로 기대한다.

주요어: 강도정수, 암반사면, 안정성 해석, 파괴유형

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Hak Joon Kim
E-mail: hakkim@dju.kr

Received: 16 March, 2020

Revised: 25 March, 2020

Accepted: 26 March, 2020

© 2020 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.

서론

암반사면의 설계 및 안정성 해석 등에는 주로 Mohr-Coulomb 모델이 많이 적용되며, 따라서 암반 물성치 중에서 점착력(c), 마찰각(ϕ)과 같은 강도정수 값이 주로 사용된다. 이 값들은 현장시험이나 실내암석시험 등에 의해 측정되거나 기존에 제안된 근사치나 경험식들을 이용하여 도출하고 있다. 사면안정 해석에 있어 지반강도정수는 암반사면의 안정성 해석 결과에 큰 영향을 미친다. 흙 사면의 경우에는 지반이 비교적 균질하므로 직접전단시험과 같은 실내시험을 통하여 흙의 강도정수를 결정할 수 있다. 그러나 암반사면의 강도정수는 절리나 층리 등의 불연속면 존재, 예상 파괴면의 풍화 정도의 불균일성, 암석 자체의 불균질성 등의 다양한 변수로 인하여 측정하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 이용되고 있는 암반사면 안정해석에서 강도정수의 적용사례 분석을 통하여 강도정수 결정의 현황 및 문제점을 파악하고 개선방안을 제안하고자 한다.

지반강도정수

암반사면 안정성 평가를 위한 강도정수

지반공학에서는 안정성 평가 대상물에 따라 다른 종류의 강도정수가 사용된다. 예를 들면 터널의 안정성 평가에는 탄성계수(E), 포아송비(ν), 점착력(c), 내부마찰각(ϕ) 등의 강도정수가 사용된다. 암반사면의 경우에는 적용되는 파괴이론과 예상되는 파괴양상에 따라 다른 강도정수를 적용하는 것이 일반적이다. 암반은 층리, 절리 등과 같은 불연속면을 포함할 수 있으므로, 암반의 전단강도는 불균질하고 이방성을 보이는 것이 일반적이다. 따라서 암반의 강도정수는 비교적 균질한 흙과 달리 실내시험 결과와 경험적 분석, 현장 관찰 등을 종합하여 결정하게 된다.

암반사면에서 발생 가능한 파괴유형은 평면파괴, 썩기파괴, 원호파괴, 전도파괴 등이 있다. 만약 Mohr-Coulomb 파괴이론을 적용하고, 파괴면이 명확한 평면파괴의 경우에는 불연속면에 대한 직접전단시험을 통하여 얻어진 점착력과 내부마찰각을 적용하여 암반사면의 안정해석을 수행할 수 있다.

파괴면이 불연속면과 무결암을 모두 통과하여 발생하는 경우에는 역해석(Back analysis)이나 Hoek and Brown(1997)이 제안한 경험적 방법에 의하여 암반의 강도정수를 산정할 수 있다. Hoek and Bray(1981)는 안전율을 1로 두고 역해석 방법을 통하여 얻어진, 다양한 암반에서의 점착력과 마찰각을 문헌조사를 통하여 제시하였다. 마찰각은 주로 점토 함량, 단층활면(slickensided surface) 존재여부 그리고 점착력은 풍화정도, 불연속면의 존재여부와 경사방향, 연장성 등을 고려하여 값을 제안하였다. Hoek and Brown의 경험적 방법에 의하여 얻어진 암반의 마찰각과 점착력은 암반 파쇄정도와 무결암의 강도에 따라 결정된다. Hoek and Brown 강도식은 균질하고 등방성의 암반을 대상으로 적용하기 때문에 무결암이나 절리가 심하게 발달하여 거시적으로 등방성 암반으로 간주할 수 있는 경우에 적용이 가능하다.

국내 상당수의 암반사면 파괴는 풍화가 진행된 지표면의 암반에서 발생한다. 이러한 암반사면의 경우에는 파괴가 발생한 상부와 하부 지반의 전단강도가 다르므로 파괴면은 전단강도가 서로 다른 부분을 통과한다. 따라서 이러한 사면의 경우 안정해석에서 특정한 값의 전단강도를 사용한다는 것은 결국 파괴면의 평균적인 전단강도를 사용해야 하므로 일부 암석의 실내시험에서 얻어진 전단강도의 사용은 많은 오차를 야기할 수 있다. 또한 대부분의 사면 안정해석이 2D로 이루어 지는데, 지반의 전단강도가 풍화정도나 지질특성에 따라 예상 파괴면과 수직 방향으로 다를 수 있다는 것도 문제이다. Wyllie and Norrish(1996)는 이러한 상태의 암반에서는 역해석 방법을 사용하여 암반의 전단강도를 결정할 것을 권장하였다. 그러나 역해석 방법에 의해 결정된 암반의 전단강도는 해당 사면에만 적용할 수 있으며 국내의 일반적인 암반사면과 같이 지질, 풍화도, 불연속면 상태가 다양한 경우에는 신뢰성이 떨어진다. 특히 파괴가 발생한 사면의 파괴면의 심도와

형상, 파괴당시의 지하수위 심도의 불확실성, 그리고 하나의 안전율 공식에 점착력과 마찰각의 두 개의 미지수로 인하여 역해석에 의한 전단강도 결정 역시 연구자의 주관적인 판단이 요구된다.

암반사면 강도정수 결정방법

암반사면의 안정성 평가를 위한 강도정수 결정방법은 실내시험, 역해석, 경험적 방법 등이 있으며 KSRM(2007)에 의하여 상세히 제시되었다.

암반 불연속면의 강도정수는 불연속면 사이의 충전물질이나 거칠기를 고려하여 산정해야 한다. 충전물질이 암반의 전단강도에 미치는 영향은 충전물질의 종류와 두께에 따라 달라진다. Barton(1974)은 여러 연구자들의 연구 결과를 토대로 불연속면 사이의 다양한 충전물질에 대한 전단강도를 제시하였다. Barton(1976)은 절리면 거칠기 계수, 절리면 암석의 압축강도와 유효수직응력의 비율을 사용하여 절리면의 마찰각을 보정하는 방법을 제안하였다.

Bieniawski(1989), Kim et al.(2006a) 등은 RMR로부터 암반의 점착력과 마찰각을 구하는 방법을 제안하였다. Hoek and Brown(1997)과 Hoek et al.(2002)은 Hoek and Brown 강도식을 바탕으로 등가 Mohr-Coulomb 강도정수를 산정하는 방법을 1차 회귀분석법에 의하여 제시하였다.

역해석을 이용한 암반의 전단강도 결정 방법은 Hoek and Bray(1981)에 의하여 상세히 제시되었다.

국내 암반사면 강도정수 산정 현황

국내의 암반사면에 적용된 강도정수의 산정 현황을 국내에 발표된 학회지 게재논문 21편, 학술발표논문 11편, 학위 논문 8편 등 총 40편에 대한 문헌조사를 통하여 조사하였다. 암반사면의 안정성 평가에 사용된 강도정수 산정 현황에 대한 문헌조사 결과, 점착력과 마찰각 산정 방법은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다. 40편의 논문 분석 결과에 의하면 문헌조사, 직접전단시험(Direct Shear Test, DST), RMR, Barton의 경험식, Hoek and Brown 강도식, 역해석, 삼축압축시험, 시추공 전단시험(Borehole Shear Test, BST), 기울기시험(Tilt test), 표준관입시험(SPT) 등 총 10가지 방법이 강도정수 결정에 사용되었다.

Table 1. Method of cohesion determination for rock slopes in Korea

Determination of cohesion	References	
	Adopted	Investigation only
Literature reviews	Park (2003), Choi et al. (2003), Hwang et al. (2006), Kim et al. (2008), Jin (2007), Koo et al. (2008), Song et al. (1998), Park (2009), Song (2006), Chun et al. (2006), Oh and Jeong (2002), Kim et al. (2007), Cho et al. (2010), Ihm and Park (2017), Kim et al. (2018)	Kim et al. (2006b), Yoo (2011)
Direct shear test	Lee and Son (2002), Jung (2004), Jang et al. (2010), Park et al. (2009), Cho et al. (2010), Jang et al. (2002), Cho et al. (2012), Song and Yun (2013), Lee et al. (2014)	Cho and Kim (1995), Park (1998), Lee et al. (2001), Park (2003), Choi et al. (2003), Kim et al. (2008)
RMR	Lee and Son (2002), Kim et al. (2006b), Koo et al. (2008), Song et al. (1998), Lee (2005), Jang and Yang (2010), Choi et al. (2010), Choi and Chung (2004), Ki et al. (2001), Song and Yun (2013)	Song et al. (2001), Choi et al. (2003), Jung (2004), Park (2009), Lee et al. (2017)
Barton eq. (JRC)	Park et al. (2009), Jung (2004), Kim (2001), Song (2006), Jang et al. (2010), Park et al. (2013), Ihm and Park (2017)	Lee et al. (2001), Choi et al. (2003), Yoo (2011), Kim et al. (2018)

Table 1. Continued

Determination of cohesion	References	
	Adopted	Investigation only
Hoek and Brown including GSI	Park (1998), Koo et al. (2008), Jung (2004), Chun et al. (2003), Lee et al. (2014)	Song et al. (2001), Lee and Son (2002), Yoo (2011), Park (2009), Song (2006)
Back analysis	Song et al. (2001), Cho et al. (2010), Kim et al. (2006b), Yoo (2011), Cho and Kim (1995), Jang et al. (2014), Kim et al. (2018)	Choi et al. (2003), Kim et al. (2008)
Triaxial test	Oh and Jeong (2002), Jang et al. (2014)	Lee et al. (2001), Song et al. (2001), Choi and Chung (2004), Song and Yun (2013)
BST	Hwang et al. (2006), Jeong and Seo (2013)	Choi et al. (2003), Jin (2007), Lee et al. (2014)
Tilt test	-	Kim (2001), Jin (2007), Song (2006)
SPT	-	-

Table 2. Method of friction angle determination for rock slopes in Korea

Determination of friction angle	References	
	Adopted	Investigation only
RMR	Song et al. (2001), Lee and Son (2002), Kim et al. (2006b), Koo et al. (2008), Yoo (2011), Song et al. (1998), Lee (2005), Jang and Yang (2010), Choi et al. (2010), Choi and Chung (2004), Ki et al. (2001), Song and Yun (2013), Lee et al. (2017)	Choi et al. (2003), Jung (2004), Park (2009), Cho and Kim (1995), Park (1998)
Literature reviews	Park (2003), Hwang et al. (2006), Kim et al. (2008), Jin (2007), Koo et al. (2008), Song (2006), Chun et al. (2006), Oh and Jeong (2002), Kim et al. (2007), Cho et al. (2010), Ihm and Park (2017), Kim et al. (2018)	Choi et al. (2003), Kim et al. (2006b), Yoo (2011), Song et al. (1998), Park (2009)
Direct shear test	Lee et al. (2001), Lee and Son (2002), Jung (2004), Jang et al. (2010), Park et al. (2009), Cho et al. (2010), Jang et al. (2002), Cho et al. (2012), Song and Yun (2013), Lee et al. (2014)	Park (2003), Choi et al. (2003), Kim et al. (2008)
Barton eq. (JRC)	Park et al. (2009), Jung (2004), Song (2006), Jang et al. (2010), Choi et al. (2010), Park et al. (2013), Ihm and Park (2017), Kim et al. (2018)	Lee et al. (2001), Cho and Kim (1995), Kim (2001), Choi et al. (2003), Yoo (2011),
Hoek and Brown including GSI	Park (1998), Koo et al. (2008), Park (2009), Jung (2004), Chun et al. (2003), Lee et al. (2014)	Song et al. (2001), Lee and Son (2002), Yoo (2011), Song (2006),
Back analysis	Choi et al. (2003), Kim et al. (2008), Cho et al. (2010), Kim et al. (2006b), Cho and Kim (1995), Jang et al. (2014), Kim et al. (2018)	Song et al. (2001),
Tilt test	Kim (2001)	Cho and Kim (1995), Choi et al. (2003), Jin (2007), Song (2006), Yoo (2011)
Triaxial test	Jang et al. (2014)	Lee et al. (2001), Song et al. (2001), Choi and Chung (2004), Oh and Jeong (2002), Song and Yun (2013)
BST	Hwang et al. (2006), Jeong and Seo (2013)	Choi et al. (2003), Jin (2007), Lee et al. (2014)
SPT	Song et al. (1998)	-

RMR을 이용하는 방법은 Bieniawski(1989)가 제안한대로 단순한 평점을 이용하는 방법과 RMR경험식을 이용하여 강도정수를 산정하는 방법으로 구분되나 이를 합하여 사례를 조사하였다.

각 논문의 암반사면 안정성해석에 사용된 강도정수 산정 방법에 대한 적용 횟수 및 비율을 살펴보면 점착력을 산정하는 방법과 마찰각을 산정하는 방법의 적용횟수 및 비율은 비슷한 양상을 보이고 있으며 대부분 같은 방법에 의해 점착력과 마찰각을 결정하고 있다. 그러나 점착력을 생략하는 경우, 마찰각 또는 점착력을 건기와 우기로 나누어 산정하는 경우, 기울기시험과 같이 마찰각에만 주로 사용되는 방법, 연구사면의 구간별로 산정방법을 달리 하는 등 점착력과 마찰각을 산정하는 과정에서 산정 방법이나 사용 횟수 또는 비율에서 약간의 차이를 보이고 있으므로 별도로 조사하였다.

국내 암반사면의 안정성 평가와 관련된 40편의 논문 분석 결과에 의하면, 한 가지 방법을 이용하여 점착력과 마찰각을 추정(12편)하기도 하였지만 대부분 다양한 방법으로 강도정수 값을 산출하였다. 강도정수 산출에 3가지 방법을 사용한 경우가 13편, 2가지 9편, 4가지 4편 그리고 6가지와 7가지가 각 1편씩이었다. 논문 한 편당 평균적으로 약 2.5개의 방법이 강도정수 결정에 사용되었으며 실제 사면 안정성 해석에 적용된 강도정수 결정 방법은 1.7개였다. 여러 가지 방법이 강도정수 결정에 사용된 이유는 흙, 암석, 불연속면에 따라 혹은 점착력과 마찰각에 다른 강도정수 결정방법이 적용되었기 때문이다.

Table 1과 Table 2의 결과를 종합하여 전체 조사방법 중에서 특정 조사방법의 사용 비율을 정리하면 Table 3과 같다. 예를 들면, 점착력 조사를 위하여 40편의 논문에서 사용한 방법들의 총 빈도수는 91개이며 이중에서 문헌조사는 17번 사용되어 19%이고, 문헌조사가 실제로 사면안정해석에 사용된 것은 15번으로 이는 26%에 해당된다. Table 4는 각 방법이 40편의 논문에서 강도정수 결정의 조사에 사용되었거나 최종 안정해석에 적용된 비율을 나타낸 것이다. 예를 들면, 점착력 조사를 위한 문헌조사의 경우 40편의 논문에서 17번 사용되어 43%에 해당된다.

Table 3. Numbers and percentages of the methods used for the determination of strength parameters for 40 case studies

Method	Cohesion			Friction angle		
	Investigation	Adopted	Adoption rates	Investigation	Adopted	Adoption rates
	Nos. (%)	Nos. (%)		Nos. (%)	Nos. (%)	
Literature reviews	17 (19%)	15 (26%)	88	17 (18%)	12 (20%)	71
Direct shear test	15 (16%)	9 (16%)	60	13 (13%)	10 (16%)	77
RMR	15 (16%)	10 (18%)	67	18 (19%)	13 (21%)	72
Barton eq. (JRC)	11 (12%)	7 (12%)	64	13 (13%)	8 (13%)	62
Hoek and Brown	10 (11%)	5 (9%)	50	10 (10%)	6 (10%)	60
Back analysis	9 (10%)	7 (12%)	78	8 (8%)	7 (11%)	88
Triaxial test	6 (7%)	2 (4%)	33	6 (6%)	1 (2%)	17
BST	5 (5%)	2 (4%)	40	5 (5%)	2 (3%)	40
Tilt test	3 (3%)	0 (0%)	0	6 (6%)	1 (2%)	17
SPT	0 (0%)	0 (0%)	0	1 (1%)	1 (2%)	100
Total	91 (100%)	57 (100%)		97 (100%)	61 (100%)	

점착력 조사에는 Table 3과 같이 기존의 문헌자료 이용이 19%로 가장 우세하게 나타났으며 직접전단시험과 RMR 이용 16%, Barton의 경험식 이용 12% 등의 비율로 사용되었다. 조사된 점착력이 실제 사면안정해석에 적용된 경우는 문헌조사가 88%, 역해석 78%, RMR 67%, Barton의 식 64%, 직접전단시험 60%의 순이었다. 삼축압축시험, 공내전단시험(BST),

기울기시험, SPT는 점착력 산정을 위한 조사나 실제 사면안정해석에 적용되는 경우가 매우 저조하였는데, 특히 기울기시험의 경우에는 조사된 점착력을 실제 안정해석에 적용한 사례는 없었다. 문헌자료를 이용하여 점착력을 산정하는 비율이 높은 것은 암반에 대한 점착력 산정의 불확실성으로 직접적인 결정에 어려움이 있어 이미 널리 사용되고 있는 기존의 연구결과를 활용하고 있는 것으로 판단된다.

Table 4. Percentages of the each method used for the determination of strength parameters for 40 case studies

Method	Cohesion		Friction angle	
	Investigation Nos. (%)	Adopted Nos. (%)	Investigation Nos. (%)	Adopted Nos. (%)
Literature reviews	17 (43%)	15 (38%)	17 (43%)	12 (30%)
Direct shear test	15 (38%)	9 (23%)	13 (33%)	10 (25%)
RMR	15 (38%)	10 (25%)	18 (45%)	13 (33%)
Barton eq. (JRC)	11 (28%)	7 (18%)	13 (33%)	8 (20%)
Hoek and Brown	10 (25%)	5 (13%)	10 (25%)	6 (15%)
Back analysis	9 (23%)	7 (18%)	8 (20%)	7 (18%)
Triaxial test	6 (15%)	2 (5%)	6 (15%)	1 (3%)
BST	5 (13%)	2 (5%)	5 (13%)	2 (5%)
Tilt test	3 (8%)	0 (0%)	6 (15%)	1 (3%)
SPT	0 (0%)	0 (0%)	1 (3%)	1 (3%)
Total no. of case studies (percentages)	40 (100%)	40 (100%)	40 (100%)	40 (100%)

마찰각 산정 조사에 주로 사용하는 강도정수 결정 방법은 점착력을 산정하는 경우와 비슷한 경향을 보이지만 사용방법의 비율에 있어서 약간의 차이를 보였다(Table 3). 마찰각 조사에는 점착력과 달리 RMR이 19%로 가장 우세하였으며 문헌조사 18%, 직접전단시험과 Barton의 경험식 이용이 각각 13%, Hoek and Brown 10% 등의 비율로 사용되었다. 마찰각 산정을 위한 기울기시험 조사 비율은 6%로 점착력보다 사용빈도가 높았다. 조사된 마찰각이 실제 사면안정해석에 적용된 경우는 SPT 100%, 역해석 88%, 직접전단시험 77%, RMR 72%, 문헌조사 71% 등의 순이었다. 삼축압축시험과 기울기시험은 각각 17%로 실제 적용률이 가장 저조하였다.

마찰각의 경우에는 점착력과 비교하여 암반사면의 안정성에 더 중요한 변수로 작용하는 요소이므로 직접적인 결정과 더불어 이미 적용된 경험값이나 문헌자료 및 실험을 통하여 제안된 값과 비교하여 적절한 값을 선택하는 것으로 나타났다. 그리고 기울기시험을 통하여 마찰각을 조사하는 비율도 6%로 나타나 점착력과는 달리 그 사용비율이 상대적으로 높게 나타났으나, 실제로 활용된 사례는 Kim(2001)에 의하여 불연속면의 마찰각 산정에 이용된 단 1건에 불과하였다. 삼축압축시험, 공내전단시험, SPT에 의하여 산정된 마찰각도 실제 사면안정해석에 적용되는 비율은 매우 낮게 조사되었다.

파괴 유형별 강도정수 산정 사례연구

이전 절에서 분석한 40편의 논문을 파괴 유형별로 분류하여, 적용한 강도정수(점착력 c 와 마찰각 ϕ)를 분석하였다. 암반사면에서 발생 가능한 파괴유형은 평면파괴, 썩기파괴, 원호파괴, 전도파괴, 낙석 등이 있는데 강도정수가 주로 활용되는 평면파괴, 썩기파괴, 원호파괴를 중심으로 사례를 조사하였으며 현재 안정한 사면이나 파괴 유형이 2가지 이상인 사면에 대해서도 강도정수 산정 사례를 검토하였다. 본 사례연구에 사용된 사면에서 파괴유형과 특정 암석 종류와의 상관관계

는 발견할 수 없었다.

평면파괴는 사면파괴가 특정한 불연속면을 따라 발생하므로 암석의 강도보다는 불연속면의 강도정수가 사면의 안정 해석에 직접적으로 영향을 미친다. 평면파괴가 발생한 10개 사례의 경우, 암석의 강도정수 결정은 RMR이 3회로 가장 널리 사용되었고 Hoek and Brown이 2회, 임의의 값 사용 1회의 순이었다(Table 5). 사면안정에 결정적인 영향을 미치는 불연속면의 강도정수는 역해석을 이용한 경우가 4회로 가장 많았고, 문헌조사(c 3회, Φ 2회), 직접전단시험(c 2회, Φ 3회), 임의의 값(c 2회, Φ 1회), Barton의 경험식(c 1회, Φ 2회)의 순이었으며 RMR은 Φ 에 1회가 적용되었다. RMR은 암반전체의 평균적인 강도를 나타내므로 Yoo(2011)에 의하여 불연속면의 마찰각 결정에 RMR을 사용한 것은 신뢰성이 의문이다. 역해석은 파괴가 발생한 사면에 적용되므로 일반적으로 불균질하고 이방성인 다른 사면에 적용하는 것은 한계가 있다. 따라서 국내의 평면파괴 사면은 주로 문헌조사와 직접전단시험 결과 혹은 임의의 값이 사용된다.

Table 5. Case studies for the rock slope having plane failure

Area	Rock type	RMR	Strength parameters		Refer.
			Investigation	Chosen	
Daegu	Sandstone, Shale	Not given	Bedding: DST, Barton eq., Back analyses, BST, Lit. Rew**, RMR, Tilt test	HR: arbitrary value Discontinuities: Φ : Back analyses, c: Lit. Rew**	Choi et al. (2003)
Goryeong	Shale	Not given	DST, Back analyses, Lit. Rew**	Discontinuities: Lit. Rew**	Kim et al. (2008)
Jinju	Shale, Sandstone	Not given	RMR, Lit. Rew**, Back analyses	Rock: RMR Discontinuities: Back analyses	Kim et al. (2006b)
Uljin	Phyllite, Schist	40	RMR, GSI, Lit. Rew**	Rock: RMR, GSI Discontinuities: Lit. Rew. ** (arb.*)	Koo et al. (2008)
Not given	Sandstone, Shale	44	Hoek and Brown, Barton eq., RMR, Tilt test, Back analyses, Lit. Rew**	Discontinuities: Φ : RMR, c: Back analyses	Yoo (2011)
Seoul	Gneiss	Not given	DST, Barton eq., Tilt test, Back analyses	Discontinuities: Back analyses	Cho and Kim (1995)
Boeun	Granodiorite	62	Triaxial test, DST, Barton eq.	Discontinuities: Φ : DST, c: arb.*	Lee et al. (2001)
Ulsan	Shale, Sandstone	30-37	RMR, Hoek and Brown, Barton eq., DST	Rock: Hoek and Brown Discontinuities: Barton eq., DST (arb.*)	Jung (2004)
Yeongwol	Limestone	34, 58	Triaxial test, DST, RMR	Rock: RMR Discontinuities: DST	Song and Yun (2013)
Busan-Ulsan	Shale, Mudstone	70	Barton eq., Lit. Rew**, Back analysis	Discontinuities: Φ : Barton eq., Lit. Rew**, Back analysis c: Lit. Rew**, Back analysis	Kim et al. (2018)

*arb.: arbitrary values, **Lit. Rew: Literature Reviews.

원호파괴가 발생한 5개 사면에서의 암석의 강도정수 결정은 문헌조사, Hoek and Brown 강도식, 삼축압축시험이 1회씩 사용되었다(Table 6). 불연속면은 역해석을 이용한 강도정수 결정이 2회로 가장 많았고, 문헌조사(c 3회, Φ 2회), Hoek

and Brown 강도식, 직접전단시험, 공내재하시험이 1회씩 적용되었다. 원호파괴는 풍화가 많이 진행된 암석에서, 전단강도가 낮은 특정한 불연속면이 없는 사면에서 발생하므로 평면파괴 사례와 비교하여 불연속면의 강도정수 적용 빈도가 낮았으며 역해석과 문헌조사가 주로 강도정수 결정에 사용되었다.

Table 6. Case studies for the rock slope having circular failure

Area	Rock type	RMR	Strength parameters		Refer.
			Investigation	Chosen	
Not given	Not given	Not given	Lit. Rew., BST	Rock: Lit. Rew., Joints: BST	Hwang et al. (2006)
Not given	Tuff	27-42	DST, Hoek and Brown (Hoek et al.)	Discontinuities: Hoek et al.	Park (1998)
Gangneung	Limestone	45, 65, 75	BST, DST, Hoek and Brown	Soil: Φ : DST, c: (arb.) Rock: Hoek-Brown Discontinuities: DST	Lee et al. (2014)
Jeongseon	Sandstone, Shale	Not given	Triaxial test, Back analysis	Rock: Triaxial test Soil and Rock Boundary: Back analysis	Jang et al. (2014)
Busan-Ulsan	Sandstone, Mudstone	70	Barton eq., Lit. Rew., Back analysis	Discontinuities: Φ : Barton eq., Lit. Rew., Back analysis c: Lit. Rew., Back analysis	Kim et al. (2018)

썩기파괴가 발생한 4개 사면의 암석의 강도정수 결정은 임의의 값 사용(c 2회, Φ 1회) 문헌조사와 RMR 각 1회, Hoek and Brown 강도식은 Φ 결정에 1회가 적용되었다(Table 7). 불연속면은 Barton의 경험식 1회, 문헌조사가 Φ 결정에 1회 적용되었다. 썩기파괴는 임의의 값 혹은 문헌조사를 통한 강도정수 결정의 빈도가 가장 높았다.

Table 7. Case studies for the rock slope having wedge failure

Area	Rock type	RMR	Strength parameters		Refer.
			Investigation	Chosen	
Chungju	Gneiss	58-61	Lit. Rew, RMR, Hoek and Brown	Φ : Hoek and Brown c: Lit. Rew (arb.)	Park (2009)
Gokseong	Gneiss	32-40	Lit. Rew., Tilt test, Hoek and Brown, Barton eq.	Soil, WR*: Lit. Rew Discontinuities: Barton eq. Stereo: Φ : Lit. Rew	Song (2006)
Andong	Gneiss	Not given	Lit. Rew	Lit. Rew (arb.)	Kim et al. (2007)
Yeongwol	Limestone	II-IV	RMR, Hoek and Brown, DST	Soil: DST Rock: RMR	Lee and Son (2002)

*WR: weathered rock.

2가지 이상의 파괴유형을 가진 4개 사면의 강도정수 결정 방법은 Table 8과 같으며, 암석은 문헌조사 3회, 불연속면은 문헌조사와 Barton의 경험식은 각 2회, 역해석과 직접전단시험은 각 1회가 강도정수 결정에 사용되었다.

Table 8. Case studies for the rock slope having more than 2 types of failure

Area	Rock type	Failure types (RMR)	Strength parameters		Refer.
			Investigation	Chosen	
Gwangju	Tuff	Plane, Wedge (55, 43)	BST, Tilt test, Lit. Rew	Rock: Lit. Rew. Discontinuities: Lit. Rew.	Jin (2007)
Gyeonggi-do	Phyllite	Wedge, Circular (not given)	Back analyses, Lit. Rew, DST	WR: Lit. Rew Discontinuities: Back analyses (= DST)	Cho et al. (2010)
Goseong	Shale, Sandstone	Plane, Wedge, Toppling (not given)	Barton eq.	Discontinuities: Barton eq.	Park et al. (2013)
Bonghwa	Basalt, Conglomerate	Circular, Plane (not given)	Barton eq., Lit. Rew.	Rock: Lit. Rew. Discontinuities: Barton eq., Lit. Rew.	Ihm and Park (2017)

낙석과 전도파괴가 발생한 3개 사면에서 암석의 강도정수 결정 방법은 문헌조사와 RMR 각 1회, 불연속면은 임의의 값 1회이었다(Table 9).

Table 9. Case studies for the rock slope having rock fall or toppling failure

Area	Rock type	Failure types (RMR)	Strength parameters		Refer.
			Investigation	Chosen	
Guri	Gneiss	Rock fall (plane, wedge possible) (not given)	Lit. Rew	Rock: Lit. Rew	Chun et al. (2006)
Pyeongchang	Granite	Toppling (57)	RMR, Barton eq.	Rock: RMR Discontinuities: Barton eq. (arb.)	Choi et al. (2010)
Gyeongju	Granite	Rock fall (70)	RMR	Stereonet: Φ : RMR	Lee et al. (2017)

사면 파괴가 발생하지 않은 사면의 경우에는 Table 10과 같이 RMR을 사용한 암석 강도정수 결정 빈도가 가장 높았고, 불연속면은 직접전단시험, Barton의 경험식 순이었다.

Table 10. Case studies for the rock slope without failure

Area	Rock type	Situation (RMR)	Strength parameters		Refer.
			Investigation	Chosen	
Chilgok	Sandstone, Shale	Stable (plane, toppling possible) (not given)	Bedding: DST WR: Lit. Rew	Rock: Lit. Rew Discontinuities: Lit. Rew	Park (2003)
Donghae	Not given	Stable (16-42)	Lit. Rew, RMR, SPT	Soil: Φ : SPT c: Lit. Rew Rock: RMR	Song et al. (1998)
Daegu	Tuff	Stable (plane possible) (not given)	Triaxial test, Lit. Rew	Rock: Φ : Lit. Rew (arb.) c: Triaxial test Discontinuities: Lit. Rew (arb.)	Oh and Jeong (2002)

Table 10. Continued

Area	Rock type	Situation (RMR)	Strength parameters		Refer.
			Investigation	Chosen	
Hongcheon	Gneiss, Schist	Stable (plane possible) (not given)	DST, Barton eq.	Discontinuities: DST, Barton eq.	Jang et al. (2010)
Jecheon	Granite	Stable (plane possible) (not given)	DST, Barton eq.	Discontinuities: DST, Barton eq.	Park et al. (2009)
Gyeonggi-do	Gneiss	Stable (plane, wedge possible) (not given)	DST	Discontinuities: DST	Jang et al. (2002)
Gyeonggi-do	Gneiss, Schist	Stable (plane possible) (78)	RMR	Rock: RMR	Lee (2005)
Not given	Rhyolite, Andesite	Stable (circular possible) (58, 67)	RMR	Rock: RMR	Jang and Yang (2010)
Indonesia	Mudstone, Sandstone	Tension crack, stable (19, 15)	Triaxial test, RMR	Rock: RMR	Choi and Chung (2004)
Cheonan-Nonsan	Granite, Andesite	Stable (58-68)	RMR	Rock: RMR	Ki et al. (2001)
Not given	Not given	Stable (not given)	Hoek and Brown	Rock: Hoek and Brown	Chun et al. (2003)
Hampyeong	Not given	Tension crack Stable (plane possible) (57)	Tilt test, Barton eq.	Discontinuities: Φ : tilt test c: Barton eq.	Kim (2001)
Not given	Schist	Stable (39.7)	Triaxial test, Hoek and Brown, RMR, Back analyses	Rock: Φ : RMR c: Back analyses	Song et al. (2001)
Not given	Gneiss, Schist	Stable (plane, wedge possible) (not given)	DST	Discontinuities: DST	Cho et al. (2012)
Inje	Gneiss	Stable (circular possible) (not given)	BST	Rock: BST (arb.)	Jeong and Seo (2013)

Table 5부터 Table 10까지의 결과를 종합하여 파괴유형별로 사용된 강도정수 결정 방법의 빈도수를 종합하면 Table 11과 같다. 결론적으로, 파괴유형에 따라 강도정수 결정방법이 다소 차이가 있었으며 평면파괴가 발생한 사면들은 주로 불연속면에 대한 문헌조사와 직접전단시험 결과와 임의의 값이 강도정수로 사용되었다. 원호파괴 발생 사면들은 평면파괴 사례와 비교하여 불연속면에 대한 강도정수 적용 빈도가 낮았으며 역해석과 문헌조사가 주로 강도정수 결정에 사용되었다. 썩기파괴 발생사면은 임의의 값 혹은 문헌조사를 통한 강도정수 결정이, 2가지 이상의 파괴유형을 가진 사면은 문헌조사와 Barton의 경험식이 사용빈도가 가장 높았다.

Table 11. Numbers of methods for determining the strength parameters considering failure types obtained from 40 case studies

Types		Arb. value	Back analy.	Lit. Revi.	RMR	Hoek and Brown	DST	Barton eq.	BST	Tri. test	Tilt test
Plane	Rock	c	1		3	2					
		ϕ	1		3	2					
	Discon.	c	2	4	3		2	1			
		ϕ	1	4	2	1	3	2			
Circular	Rock	c		1		1				1	
		ϕ			1		1			1	
	Discon.	c		2	1		1		1		
		ϕ		2	1		1	1	1		
Wedge	Rock	c	2	1	1						
		ϕ	1	1	1	1					
	Discon.	c						1			
		ϕ			1			1			
More than 2 types	Rock	c		3							
		ϕ			3						
	Discon.	c		1	2		1	2			
		ϕ		1	2		1	2			
Rock fall and toppling	Rock	c		1	1					1	
		ϕ			1	1					
	Discon.	c	1								
		ϕ	1			1					
Stable	Rock	c	1	1	1	5	1				1
		ϕ	2		1	6	1				
	Discon.	c	1		1			4	3		
		ϕ	1		1			4	2		1

사면 파괴가 발생하지 않은 사면의 경우, 암석의 강도정수 결정에는 RMR 사용이 가장 많았고 불연속면은 직접전단시험, Barton의 경험식 순이었다. 파괴 미발생 사면에 역해석 사례가 거의 없는 이유는 흙 사면과 달리 암석사면은 불균질하고 이방성이 커서 인근지역에서 역해석으로 얻어진 강도정수를 조사대상 사면에 적용하기 어렵기 때문으로 판단된다.

강도정수 결정의 분석 및 개선방안

사례연구에 사용된 강도정수 분석과 토론

지반상태와 강도정수의 상관관계를 알아보기 위하여 실제 사면안정해석에 사용된 강도정수와 RMR값이 동시에 제시되어 있는 사례들을 요약하면 Table 12와 같다. 암석과 불연속면의 점착력, 마찰력과 RMR과의 상관관계는 Fig. 1과 같다. 암석 점착력 범위는 7~1,863 KPa로 불연속면에 사용된 점착력 범위인 0~50 KPa보다 훨씬 크다. 암석 마찰각은 12~44°이었으며, 불연속면 마찰각은 19~35°이었다. RMR은 전반적인 암반의 상태를 나타내므로 Fig. 1에서와 같이 특정 불연속

면의 전단강도와는 상관이 없음을 보인다. 일반적으로 RMR이 증가하면 암석의 강도정수는 같이 증가하는 것이 일반적 인데, 점착력의 경우에는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않으며 마찰각의 경우에는 뚜렷한 상관관계($R^2 = 0.756$)를 보인다. 점착력이 RMR과 명확한 상관관계를 보이지 않는 이유는 점착력이 마찰각과 비교하여 값의 편차가 크며, 더 다양한 방법에 의하여 결정되고 불확실성이 크기 때문으로 판단된다. 특히 Song et al.(2001)이나 Yoo(2011)에서와 같이 마찰각을 먼저 결정한 후 역해석을 이용하여 점착력을 구하게 되면, 경우에 따라 점착력이 일반적인 범위를 벗어날 수 있다.

Table 12. Strength parameters actually used for slope stability analyses

Rock types	Failure types	RMR	Final strength parameters	Refer.
Phyllite, Schist		40	Rock, c: 196 KPa; Φ : 25° Discontinuities, c: 0; Φ : 32°	Koo et al. (2008)
Sandstone, Shale		44	Discontinuities, c: 9 KPa; Φ : 27°	Yoo (2011)
Granodiorite		62	Discontinuities, c: 5 KPa; Φ : 30°	Lee et al. (2001)
Shale, Sandstone		30-37	Discontinuities, c: 31 KPa; Φ : 24°	Jung (2004)
Limestone	Plane	34, 58	Rock, c: 294 KPa; Φ : 36°- c: 1,863 KPa; Φ : 42° Discontinuities, c: 33 KPa; Φ : 21°	Song and Yun (2013)
Shale, Mudstone		70	Discontinuities, c: 50 KPa; Φ : 30° (without filling) c: 50 KPa; Φ : 25° (with filling)-from lit. Rew. c: 24 KPa; Φ : 19° (with filling)-from back analysis	Kim et al. (2018)
Tuff		27-42	Discontinuities, c: 29 KPa; Φ : 25°	Park (1998)
Limestone	Circular	45, 65, 75	Rock, c: 330 KPa; Φ : 30° c: 920 KPa; Φ : 38° c: 1,740 KPa; Φ : 41°	Lee et al. (2014)
Sandstone, Mudstone		70	Same as Kim et al. (2018)'s case above	Kim et al. (2018)
Gneiss		58-61	c: 98 KPa; Φ : 30°; c: 147 KPa; Φ : 35°	Park (2009)
Gneiss	Wedge	32-40	Discontinuities, c: 0; Φ : 28°	Song (2006)
Limestone		II-IV	c: 98 KPa; Φ : 40°-c: 20 KPa; Φ : 28°	Lee and Son (2002)
Tuff	Plane, Wedge	43, 55	Rock, c: 39 KPa, 98 KPa; Φ : 35° Discontinuities, c: 13 KPa; Φ : 32°	Jin (2007)
Granite	Toppling	57	Rock, c: 284 KPa; Φ : 33° Discontinuities, c: 0; Φ : 20°	Choi et al. (2010)
Granite	Rock fall	70	Rock, c: 349 KPa; Φ : 39°	Lee et al. (2017)
Not given		16-42	Rock, c: 78 KPa; Φ : 25°- c: 196 KPa; Φ : 30°	Song et al. (1998)
Gneiss, Schist		78	Rock, c: 392 KPa; Φ : 44°	Lee (2005)
Andesite, Rhyolite		58, 67	Rock, c: 284 KPa; Φ : 34°- c: 329 KPa; Φ : 39°	Jang and Yang (2010)
Sandstone, Mudstone	Stable	15, 19	Rock, c: 549 KPa; Φ : 12°- c: 654 KPa; Φ : 14°	Choi and Chung (2004)
Granite, Andesite		58-68	Rock, c: 284 KPa; Φ : 34°- c: 334 KPa; Φ : 39°	Ki et al. (2001)
Not given		57	Discontinuities, c: 26 KPa; Φ : 35°	Kim (2001)
Schist		39.7	Rock, c: 7 KPa; Φ : 25°	Song et al. (2001)

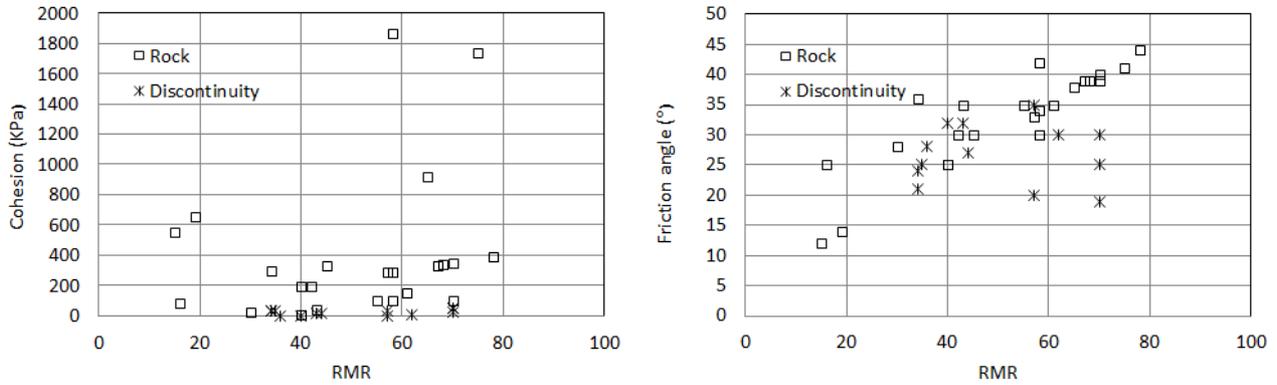


Fig. 1. Variation of cohesion values and friction angles with RMR for rocks and discontinuities.

사례연구를 통해 조사된 강도정수 결정의 문제점은 Cho and Kim(1995), Song et al.(1998), Song et al.(2001), Jin(2007), Park(2009) 등에서의와 같이 동일한 사면에서 다양한 방법에 의하여 얻어진 강도정수의 편차가 크며, 일부 논문은 경우에는 뚜렷한 근거가 제시되지 않은 상태로 특정한 방법에서 얻은 값을 강도정수로 선정한다는 것이다. 또한 Lee et al.(2001), Choi et al.(2003), Choi et al.(2010) 등과 같이 조사 결과와 다른 임의의 값을 강도정수로 사용하기도 한다. 이러한 현상은 지반의 특성상 연구자들이 사면안정해석을 위한 강도정수 결정이 어렵다는 것을 의미한다.

삼축압축시험은 일반적으로 양호한 암석에 대하여 실험을 수행하므로 삼축압축시험에서 얻어진 강도정수가 직접적으로 사면안정해석에 사용되는 경우는 매우 드물었으며, 기울기시험, 공내전단시험, SPT 등에서 얻어진 강도정수도 시료의 대표성 문제 등으로 활용성이 거의 없었다. Hoek and Brown 강도식은 암반강도를 위하여 제안된 방법이지만 사용방법이 어렵고 강도식 계산과정에 많은 값이 필요하므로 활발히 사용되기는 어렵다는 문제가 있다.

강도정수 결정 개선 방안

암반사면의 안정성해석과정은 먼저 현장 사면에 대한 맵핑(Face mapping)을 수행하고 암반사면의 RMR을 결정하게 된다. 이를 토대로 사면과 불연속면의 정보를 이용한 평사투영해석을 실시하여 암반사면의 발생 가능한 파괴유형을 결정하게 된다. 국내에서 평사투영해석을 위한 마찰각은 일반적으로 30°가 많이 사용되고 있으나, 해석 결과의 객관성을 높이기 위해서는 Barton(1973)이 제안한 여러 암석들의 기본마찰각을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 점토와 같은 충전물이 있을 경우에는 Kim et al.(2018)이 제안한대로 이를 고려한 마찰각이 사용되어야 하며, 전반적인 충전물의 마찰각은 Barton(1974)에 의하여 제시되었다. Table 13은 국내 여러 연구자들이 평사투영해석에 사용한 마찰각을 제시하였는데, 점토 충전물을 고려하여 22°까지 낮은 마찰각을 적용한 사례도 있었다. 국내외 연구를 종합했을 때, 평사투영해석에서 국내 실무자들이 일반적으로 사용하는 30°의 마찰각을 사용할 경우에는 파괴가능성이 있는 사면이 안정한 사면으로 판정될 수도 있다. 따라서 불연속면 사이에 충전물이 없을 경우에는 30°, 풍화가 많이 진행되고 충전물이 있는 경우에는 20°정도까지 마찰각을 낮추어서 평사투영해석을 수행해야 할 것으로 판단된다.

평사투영과 현장 실무자의 공학적 판단에 의하여 조사사면의 파괴유형을 결정한 후, 평면파괴나 췌기파괴가 예상되는 경우에는 불연속면의 강도정수, 원호파괴는 암반의 강도정수 결정이 필요하다. 평면파괴나 췌기파괴가 예상되는 사면의 강도정수는 불연속면에 대한 직접전단시험, Barton의 경험식, 문헌조사, 원호파괴는 암반에 대한 RMR, 문헌조사 결과 등의 활용이 권장된다.

Table 13. Friction angles used for the stereonet projection to determine slope failure types

Rock type	Friction angle (°)	Method	References
Tuff	25, 30	Hoek and Brown	Park (1998)
Not given	35	Tilt test	Kim (2001)
Gneiss	23	Lit. Rew	Song (2006)
Gneiss	Dry: 30; Rainy: 25	Lit. Rew	Kim et al. (2007)
Phyllite, Schist	32	Arbitrary value	Koo et al. (2008)
Gneiss, Schist	22	DST	Cho et al. (2012)
Granite	39	RMR	Lee et al. (2017)

그러나 암반사면 안정해석을 위한 강도정수는 흙 사면과 달리 암석 자체의 불균질성과 이방성, 풍화도의 차이, 시험시료의 대표성, 예상 파괴면에서의 강도정수 불균질성 등으로 인하여 신뢰성 있는 결정을 하는 것이 매우 어려우며 40개의 사례연구에서도 이를 확인할 수 있었다.

결론적으로 먼저 직접전단시험, RMR 분류를 통한 등급별 값이나 경험식을 이용하는 등 직접적인 암석물성에 대한 역학적 시험이나 경험을 바탕으로 대표적인 강도정수 값을 산정한다. 이를 토대로 문헌조사를 통하여 기존에 제안된 값을 비교 검토하여 그 범위 안에서 가장 적절한 강도정수 값을 사면안정성 해석에 적용하는 것이 바람직하며, 이 과정에서 현장 실무자의 경험이 강도정수 결정에 매우 중요한 역할을 한다고 판단된다. 향후 각 지역별로 역해석을 통하여 파괴가 발생한 사면에 대한 자료가 축적된다면 좀 더 강도정수 결정의 신뢰성이 향상될 것으로 기대한다.

결론

본 연구에서는 국내 암반사면의 안정성 해석을 위한 강도정수 결정에 사용된 방법들의 빈도를 40개의 문헌조사를 통하여 조사하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 국내 암반사면의 강도정수 산정을 위해서 논문 한 편당 평균적으로 약 2.5개의 방법이 강도정수 결정에 사용되었으며 실제 사면 안정성 해석에 적용된 강도정수 결정 방법은 1.7개였다.
- (2) 암석 점착력의 범위는 7~1,863 KPa로 불연속면에 사용된 점착력의 범위인 0~50 KPa보다 훨씬 컸다. 암석 마찰각의 크기는 12~44°이었으며, 불연속면의 마찰각은 19~35°이었다. RMR과 암석의 마찰각은 뚜렷한 상관관계($R^2 = 0.756$)를 보였다.
- (3) 평사투영해석을 위한 마찰각은 불연속면 사이에 충전물이 없을 경우에는 30°, 풍화가 많이 진행되고 충전물이 있는 경우에는 20°정도까지 낮추어서 적용하는 것이 권장된다.
- (4) 점착력 조사에는 기존의 문헌자료 이용이 19%로 가장 우세하게 나타났으며 직접전단시험과 RMR 이용 16%, Barton의 경험식 이용 12% 등의 비율로 사용되었다.
- (5) 마찰각 조사에는 점착력과 달리 RMR이 19%로 가장 우세하였으며 문헌조사 18%, 직접전단시험과 Barton의 경험식 이용이 각각 13%, Hoek and Brown 10% 등의 비율로 사용되었다.
- (6) 파괴유형에 따라 강도정수 결정방법이 다소 차이가 있었으며, 평면파괴 발생 사면들은 주로 불연속면에 대한 문헌 조사와 직접전단시험 결과가 강도정수로 사용되었다. 원호파괴 발생 사면들은 역해석과 문헌조사가 주로 강도정수 결정에 사용되었다. 파괴 미발생 사면의 경우, 암석의 강도정수 결정에는 RMR 사용이 가장 많았고 불연속면은

직접전단시험, Barton의 경험식 순이었다.

- (7) 강도정수 결정 방법들이 조사에 사용된 빈도와 실제 사면안정해석에 적용된 비율, 실용성 등을 고려했을 때 삼축압축시험, 기울기시험, 공내전단시험, SPT, Hoek and Brown 방법의 사용은 효율적이지 못하며, 문헌조사, 역해석, RMR, Barton의 경험식, 직접전단시험 등은 향후 사용이 권장된다.
- (8) 파괴유형에 따라 강도정수 결정에 적절한 방법이 사용되어야 하며 문헌조사를 통하여 결과를 검증해야 한다. 향후 각 지역별로 역해석을 통하여 파괴 발생 사면에 대한 자료가 축적된다면, 강도정수 결정의 신뢰성이 향상될 것으로 기대한다.

사사

본 논문은 2019학년도 대전대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Barton, N., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, 7, 287-332.
- Barton, N.R., 1974, A review of the shear strength of filled discontinuities in rock, Norwegian Geotechnical Institute Publication, No. 105, 38p.
- Barton, N.R., 1976, The shear strength of rock and rock joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 13(9), 255-279.
- Bieniawski, Z.T., 1989, *Engineering rock mass classifications*, John Wiley & Sons, 251p.
- Cho, T.C., Hwang, T.J., Lee, G.H., Cho, K.S., Lee, S.B., 2012, A study of the applicability of cross-section method for cut-slope stability analysis, *Tunnel and Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, 22(1), 43-53 (in Korean with English abstract).
- Cho, T.C., Kim, Y.H., 1995, A study on the determination of shear strength and the support design of pre-failed rock slope, *Tunnels and Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, 5(2), 104-113 (in Korean with English abstract).
- Cho, Y.H., Lim, D.S., Chun, B.S., 2010, A case study on the slope collapse and reinforcement method of the phyllite slope, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, 11(8), 83-93 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.M., Shim, S.H., Han, B.H., Kim, J.K., 2003, Case study of slope failures and reinforcements in the interbedded layers of sandstone and shale, *Spring Conference of the Korean Society for Rock Mechanics*, 135-143 (in Korean).
- Choi, J.Y., Kim, S.H., Koo, H.B., 2010, A study on the stability evaluation and numerical simulation of toppling failure on a cut-slope, *The Journal of Engineering Geology*, 20(1), 13-23 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.O., Chung, S.K., 2004, Assessment of RMR with the Monte Carlo simulation and stability analysis of rock slopes, *Tunnel and Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, 14(2), 97-109 (in Korean with English abstract).
- Chun, B.S., Lee, I.K., Park, T.S., Shin, Y.W., Sagong, M., Choi, H.S., 2003, Rock slope stability analyses by non-linear Hoek-Brown failure criterion, *Spring Conference of the Korean Society for Rock Mechanics*, 145-159 (in Korean).
- Chun, B.S., Lee, S.E., Kong, J.Y., Lim, J.H., 2006, A case study on the stability and reinforcement method at a rock slope, *Conference of the Korean Society for Railway*, 37-43 (in Korean).
- Hoek, E., Bray, J.W., 1981, *Rock slope engineering*, 3rd ed., The Institution of Mining and Metallurgy, London, 358p.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1997, Practical estimates of rock mass strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 34(8), 1165-1186.

- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002, Hoek-Brown failure criterion 2002 edition, Proceedings of 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunnelling Association of Canada Conference, Toronto, 1, 267-273.
- Hwang, E.S., Hwang, C.H., Song, C.Y., Lee, J.S., 2006, Safety assessment considering the slip failure surface of a slope, Conference of Korean Society of Civil Engineers, 1128-1131 (in Korean).
- Ihm, M.H., Park, J.Y., 2017, Study on the geological characteristics and slope stability of Nammyeon reservoir in Bonghwa County, Kyungpook Province, Tunnel and Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics, 274(2), 77-88 (in Korean with English abstract).
- Jang, B.A., Sung, S.K., Jang, H.S., 2010, Probability analysis of rock slope stability using zoning and discontinuity persistence as parameters, The Journal of Engineering Geology, 20(2), 155-167 (in Korean with English abstract).
- Jang, H.D., Yang, H.S., 2010, An analysis of stability on rock slope by changing water level, Tunnel and Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics, 20(2), 7-14 (in Korean with English abstract).
- Jang, H.S., Lee, J.Y., Seo, Y.S., Jang, B.A., 2014, Stability evaluation of failed slope in Gohan, Korea using Numerical analysis, The Journal of Engineering Geology, 24(4), 511-523 (in Korean with English abstract).
- Jang, Y.S., Oh, S.H., Kim, J.S., 2002, Reliability analysis of plane failure in rock slope, Journal of Korean Geotechnical Society, 18(4), 119-126 (in Korean with English abstract).
- Jeong, H.G., Seo, Y.S., 2013, Slope stability analysis and landslide hazard assessment in tunnel portal area, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 15(4), 387-400 (in Korean with English abstract).
- Jin, H.H., 2007, A case study on the stability analysis of slopes, M. Eng. Thesis, Department of Civil Engineering, Chonnam National University, 94p (in Korean).
- Jung, S.Y., 2004, Rock slope stability evaluation using statistical analysis, M. Sc. Thesis, Department of Geology, Kyungpook National University, 71p (in Korean).
- Ki, W.S., Kim, S.S., Joo, S.W., 2001, Analysis of rock slope stability based on fuzzy approximate reasoning, The Journal of Engineering Geology, 11(2), 153-161 (in Korean with English abstract).
- Kim, C.H., Kim, B.Y., Park, T.W., Kim, T.H., 2018, Estimation of shear strength of discontinuous (bedding) Cut sedimentary rock slope by using back analysis, Journal of Korean Geosynthetics Society, 17(1), 139-152 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.J., Lee, S.H., Shin, H.S., Bae, G.J., 2006a, Evaluation of support requirements for the single shell tunnels from the case study of rock mass classifications, The Journal of Engineering Geology, 16(3), 283-291 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.I., Bae, D.W., Kim, J.T., Chae, B.G., Jeong, G.C., 2007, Analysis of rock slope stability for natural slope and cut slope of gneiss area in Andong, Korea, The Journal of Engineering Geology, 17(2), 289-297 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.G., Kim, C.H., Kang, J.T., Lee, J.H., Kim, M. S., Kim, J.R., 2008, The stability analysis regarding the plane failure of the base rock slope which uses a reliability analysis, Conference of Korean Society of Civil Engineers, 2976-2979 (in Korean).
- Kim, S.H., Koo, H.B., Rhee, J.H., Lee, J.Y., 2006b, Field characteristics and stability analysis of the rock cut slope in Jinju-Jibhyun area, Conference of Korean Society of Civil Engineers, 1168-1171 (in Korean).
- Kim, Y.S., 2001, A study on the stability analysis of cut rock slope, M. Sc. Thesis, Department of Mining and Minerals Engineering, Chosun University, 64p (in Korean).
- Koo, H.B., Kim, S.H., Lee, J.Y. 2008, A study on jointed rock mass properties and analysis model of numerical simulation on collapsed slope, Journal of Korean Geotechnical Society, 24(5), 65-78 (in Korean with English abstract).
- KSRM, 2007, Slope engineering, Korean Society for Rock Mechanics, Gunsulbook, 525p (in Korean).
- Lee, B.H., 2005, A study on the estimation of stability in the cutting slope on the cutting face of metamorphic rock and output the experienced formula, M. Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Hanyang University, 77p (in Korean).

- Lee, J.S., Park, H.J., Min, K.D., Koo, H.B., 2001, Rock slope stability analysis in Boeun region considering properties of discontinuities, *Economic Environmental Geology*, 34(6), 601-615 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.W., Kim, S.H., Cho, S.D., 2017, A study on the slope stability assessment of Seokguram Region in Gyeongju, *Journal of Korean Geosynthetic Society* 16 (4), 139-149 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.E., Kim, H.S., Jang, Y.H., 2014, A study on the failure cause of large scale rock slope in limestone quarries, Tunnel and Underground Space, *Korean Society for Rock Mechanics*, 24(4), 255-274 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.G., Son, G.C., 2002, Stability analysis of rock slope composed of limestone in Yeongwol area, Spring Conference of the Korean Society of Engineering Geology, 9-16 (in Korean).
- Oh, D.Y., Jeong, G.C., 2002, A study on slope stability analysis of sedimentary rock using interfaces module of FLAC, *The Journal of Engineering Geology*, 12(3), 345-360 (in Korean with English abstract).
- Park, B.J., 2003, A study on the stability of major rock slope and field measurement data analysis, M. Eng. Thesis, Chungnam National University, 65p (in Korean).
- Park, C.S., Choi, Y.H., Kim, J.H., Lee, C.M., 2013, A case study on stability and reinforcement of rock slope in Goseong, Gyeon-Nam, Conference of Korean Society of Civil Engineers, 2485-2488 (in Korean).
- Park, H.J., Woo, I., Um, J.G. 2009, Probabilistic analysis for rock slope stability due to weathering process, *Journal of Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 42(4), 357-366 (in Korean with English abstract).
- Park, J.B., 2009, A case study on the stability analysis of rock slopes, M. Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Kong Ju National University, 68p (in Korean).
- Park, N.S., 1998, A case study on rock slope stability analysis, National Conference on Slope Stability, Korean Geotechnical Society, Seoul, Korea, 111-124 (in Korean).
- Song, D.M., 2006, The study on the stability analysis of gneiss rock slope having fragmental fault zone -a focus in the Sinpung area, Gokseong, Chonranamdo, M. Sc. Thesis, Department of Geological Environment, Chonnam National University, 83p (in Korean).
- Song, W.K., Han, K.C., Shin, H.S., Kim, K.S., Cho, D.H., 1998, Case study on the optimal design of highway slopes by limit equilibrium and numerical analysis, National Conference on Slope Stability, Korean Geotechnical Society, Seoul, Korea, 81-98 (in Korean).
- Song, W.K., Sunwoo, C., Park, C., Shin, H.S. 2001, Determination of realistic rock strength of slope considering geological characteristics, National Conference, Committee of Slope Stability, Korean Geotechnical Society, Seoul, Korea, 20-30 (in Korean).
- Song, Y.S., Yun, J.M., 2013, Analysis of the stability and behavior of a calcareous rock slope during construction of a tunnel entrance, *The Journal of Engineering Geology*, 23(3), 283-292 (in Korean with English abstract).
- Wyllie, D.C., Norrish, N.I., 1996, Rock strength properties and their measurement, In *Landslides, Investigation and Mitigation*(edited by Turner, A.K and Schuster, R.L.), Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council, 372-390.
- Yoo, S.H., 2011, A case study on the stability analysis of rock slope during road construction, M. Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Hanyang University, 74p (in Korean).