암반 사면 안정성 해석
-SMR 분류법을 중심으로-

조영호| 기술개발부토목기술팀대리| 02) 3433-7769 | cyh4@mail.ssyenc.co.kr

1. 암반 사면의 특성 및 해석 방법

1-1. 암반사면의특성

암반은 미시적 관점에서나 거시적 관점에서나 많은결함을 지닌 재료로서이러한결함들은암반의강도를 저하시키고 굴착면에 대하여 특정 방향으로 응력을집중시키는 역할을 하게 된다. 암반에서의결함은 크게 조직적 결함(fabric defects)와 구조적 결함(structural defects)으로 나눌 수 있는데 이 구조적 결함이 바로 일반적으로 불연속면(discontinuities)로불려지는습곡(fold), 단층(fault), 절리(joint) 등을 의미한다. 또한, 암반(rock mass)은 물리적 작용, 화학적분해와같은다양한원인에 의해풍화를받기도 하는데 이러한 풍화는 암석을 변질시켜 암반의 공학적건전성을감소시킨다. 따라서, 암반사면의안정성은 암석(intact rock)의 강도, 불연속면의 기하학적 특성과강도특성, 암석과불연속면에대한풍화작용의유무와정도에의존한다. 공학적 설계에서실용적으로 암반을 연속체(continuous medium)적 관점으로접근할 것인지 불연속체(discontinuous medium) 적관점으로 접근할것인지에대한 논란의여지는있으나그어느쪽관점으로접근하게되더라도암반내의 불연속면은 설계에 반영되어야 하며 실제로 어떤 형태로든지 반영이 이뤄지고 있다. 일반적으로 불연속면의발달이극히미약한경우와 심한 파쇄나풍화로인하여 거시적관점에서연속체로보는것이더욱 효과적인 경우를 제외하고는 암반 사면의 설계는 불연속체적관점에서의접근이필요하다.

1-2. 암반사면안정해석방법

암반 사면의 안정성을 평가하기 위한 방법은 다양하지만크게다음네가지로대별할수있다.

(1) 경험적방법: 암반분류법에의한암반평가와보강대책 (RMR, SMR 등)

(2) 기하학적방법: 평사투영해석, 블록이론

(3) 한계평형법: 평면, 쐐기, 전도, 원호파괴에대한한계평형해석

(4) 수치해석적방법: 연속체(FEM, FDM), 불연속체(DEM) 해석

이상의 방법들은 모두 고유의 용도와 각각 장단점을 가지고 있으나 개별적으로 사용되기 보다는 병행되어상호보완적으로사용하는것이일반적이다.

이와 같은 방법들을 사용하여 안정성 해석을 수행하기 위해서는 정확한 입력 변수 산정이 선행되어야 한다. 따라서 현장 조건을 정확히 반영할 수 있도록 현장암석의특성(물리적성질, 변질정도등), 불연속면의조건(기하학적특성, 물리적성질, 충진물질등), 지하수 조건(투수성, 지하수위) 등에 대한 충분한 조사와자료의 분석이 필요하며 이를 통해정확한 입력변수를산정하는합리적인방법또한필수적이다.

그러나, 여기서는자료의분석과입력 변수 산정에 대한 설명은 하지 않을 것이다. 왜냐하면 이와 같은 문제들은 암반 사면에 국한되는 것이 아니라 암반공학의 전반을 다루어야 하는 포괄적인 문제이므로 제한된 지면과 시간으로는 충분한 설명이 불가능하기 때문이다. 따라서본고에서는암반사면안정해석방법 중 현장 기술자들에게 다소 생소한 SMR 분류법에대하여설명한다.

2. 암반 분류와 SMR분류법

2-1. 암반분류개요

암반 분류란 암반의 공학적 특성을 파악하기 위해 암반을 구성하는 암석의 강도, 풍화 및 변질 정도, 암반틈새의 상태, 암반의 불균질성과 불연속면의 속성 등에 관한 사항을 일정한 기준에 따라 등급으로 나누어 구분하는 것이다. 이러한 암반분류 방법은 Terzaghi(1946), Lauffer(1958), Deere et al.(1967), Wickham et al.(1972), Bienawski(1973), Barton et al.(1974) 등 많은 사람들에 의해 개발되고 수정되어 왔으며, 현재 국내 · 외에서 가장 많이 사용되는 것은 Bieniawski의 Rock Mass Rating(RMR) 분류법이다.

RMR 분류의개념은터널설계를위해 제안된 방법임으로 사면에 대한 적용은 가능하지 않았었다. 실제 사면에 대한 RMR값의 적용은 Bieniawski의 1976년 수정판에서 불연속면에 대한 보정치로 매우 유리, 유리, 양호, 불리, 매우불리의6가지등급에대하여0 ~ -60 까지의값을제시하였으나, 이는매우정석적이므로 실제 적용에 어려움이 있었다. 따라서 Romana(1985)RMR에서 불연속면-사면 관계에 의존한 적응 인수값을 빼고 굴착 방법에 의존한 인수값을 더하므로써 얻어지는 Slope Mass Rating (SMR) 분류법을개발하였다. SMR 분류는사면안정성에대한사전평가를하기위한유용한도구로적용요인(adjustment factor)과 사면에 대한 체계적 사용을가능케하는보강방법에대한현장지침과권장사항을제공한다. 그러나이것이사면에 대한정밀한분석을대체할수있는것은아니므로, 정밀한분석은상식적인공학과견실한해석적방법을결합해야만한다.

2-2. SMR(Slope Mass Rating) 분류법

SMR 분류는 RMR 평가값에 사면과 절리면의 주향과 경사 그리고 사면의 절개방법에 의존하는 변수들을고려하여사면의붕괴형태와지보방식을제시하여 주는 1차적인 사면 안정 분석법이다. 이분류법에서 고려되는 암반사면의 파괴형태는 평면파괴(plane failure), 쐐기형 파괴(wedge failure), 전도파괴(toppling failure)가 있으며, 아래와 같은 요소들을 고려하여등급을분류한다.

- 암반의일반적인특성(RMR_{basic})
- 사면과불연속면의경사방향의차이(F_1)
- 사면의경사방향과불연속면의경사각의차이(F_2)
- 불연속면의경사(F_3)
- 사면의굴착방법(F_4)

(1) 암반의일반적인 특성(RMR_{basic})

RMR_{basic}은Bieniawski(1973,1976 & 1989)가제안한바에의거하여 (i) 신선암의 강도, (ii) RQD(측정 또는 추정값), (iii) 절리의 간격, (iv) 절리조건, (v) 절리를통한지하수흐름량(가장나쁜조건으로추정)의다섯가지점수를합하여계산된다. RMR_{basic}은전통적으로터널에적용되는 RMR과는달리절리의방향성에의한보정값은 적용하지않으며총0 ~ 100의범위를갖는다. <표1 >참조

또한, 불연속면및사면과관련된보정인자(F_1, F_2, F_3)는<표 2>와 같이결정되며, 경험적으로그값을계산에의해아래와같이구하기도 한다.

(2) 사면과불연속면의경사방향의차이(F_1)

F_1은 불연속면과 사면 경사방향의 평행 정도에 의존한다. 이 값의 범위는 1.00(거의평행할때)에서 0.15(이들사이의각이 30°를넘고 파괴 가능성이 매우낮을 때)까지이다. 이 값들은 경험적으로 결정되며, 식(1)과같은관계식에근사적으로일치한다.

여기서, A는사면경사방향과불연속면경사방향의사이각

$$F_1 = (1-\sin A)^2 \qquad (1)$$

(3) 사면의경사방향과불연속면의경사각의차이(F_2)

F_2는평면파괴에서는불연속면의경사각에관련된다. 이는어느정도는 불연속면 전단강도의 확률으로 볼 수 있으며, 1.00(경사각이 45°보다 큰 경우)에서 0.15(경사각이 20°보다 작은 경우)까지 변한다. 이또한경험적으로결정하지만식(2)에근사적으로일치한다. 그리고, 전도파괴의경우F_2는 1.00이다.

$$F_2 = \tan^2 \beta_j \qquad (2)$$

여기서, β_j는불연속면의경사각

(4) 불연속면의경사(F_3)

F_3은사면과불연속면 경사의관계성을 반영한다. 평면파괴에서는 F_3은불연속면이사면에서daylight될가능성을의미한다. 사면과불연속면이평행할경우조건은양호하며, 사면경사가불연속면경사보다 10°이상크면매우불리한경우가발생한다. 전도파괴에대해서는 불리또는매우불리한조건은전도파괴의본질상일어날수없다.

왜냐하면갑작스런파괴는매우드물고전도된사면의많은경우가 안정을유지하고있기때문이다. 전도파괴는풍화된사면에서더욱빈번하고회전마찰에 기인하는 전단강도 감소가작다(대략5°)는 가정을가진Goodman-Bray 조건은전도파괴가능성을평가하는데사용된다.

(5) 사면의굴착방법(F_4)

굴착방법에대한보정인자F_4는<표 3>과같이경험적으로적용된다.

(i) 오랜시간에걸친침식과보호기구(식생, 표면건조등)의형성으로자연사면이더욱안정하다. : F_4 = +15

(ii) 프리스프리팅은사면안정성을어느정도증가시켜준다.
: F_4 = +10

(iii) 잘시행된스무스발파는사면안정성을증가시켜준다.
: F_4 = + 8

(iv) 보통발파는사면안정성을변화시키지않는다. : F_4 = 0

(v) 과장약, 폭파시기불량, 천공열의비뚤어지는것과같은불완전한 발파는사면안정성에타격을준다. : F_4 = -8

(vi) 보통리핑에의한사면의기계굴착은연약하거나균열이심한암반에서만행해지며, 간혹선행의발파와결합되어사용하기도한다. 사면의 평면을 마감하기가 어렵다. 이 방법은 안정성을 증가시키지도감소시키지도않는다. : F_4=0

<표1> RMR_{76} 분류기준

변 수			값의 범위						
1	무결암의 강도	정하중 강도	> 10 MPa	4 ~ 10 MPa	2 ~ 4 MPa	1 ~ 2 MPa	일축압축강도사용		
		일축압축 강도	> 250 MPa	100 ~ 250 MPa	50 ~ 100 MPa	25 ~ 50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	점 수		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 ~ 100 %	75 ~ 90 %	50 ~ 75 %	25 ~ 50 %	25 %		
	점 수		20	17	13	8	3		
3	절리간격		> 2 m	0.6 ~ 2 m	200 ~ 600 mm	60 ~ 200 mm	< 60 mm		
	점 수		20	15	20	8	5		
4	절리상태		절리면매우거침 분리폭없음 절리불연속 절리벽면견실	절리면약간거침 분리폭 1mm이내 절리벽면약간풍화	절리면약간거침 분리폭1mm 이내 절리벽면높은풍화	절리면매끄럽거나, 충전물5mm 이하 또는 분리폭1 ~ 5 mm로연속절리	충진물 5mm이상 또는분리폭 5mm이상이며 연속절리		
	점 수		30	25	20	10	0		
5	지하수 상태	일반상태	건 조	습기찬	젖은	물방울떨어짐	물흐름		
		절리수압/ 주응력	0	< 0.1	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.5	> 0.5		
	점 수		15	10	7	4	0		

<표2> 불연속면과사면에의한보정값(F_1, F_2, F_3)

구분	매우바람직	바람직	양호	불리	매우불리
$\lvert \alpha_p - \alpha_s \rvert$ $\lvert (\alpha_p - \alpha_s) - 180 \rvert$	> 30°	30 ~ 20°	20 ~ 10°	10 ~ 5°	< 5°
P / T F_1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P $\lvert \beta_j \rvert$	< 20°	20 ~ 30°	30 ~ 35°	35 ~ 45°	> 45°
P F_2	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T F_2	1	1	1	1	1
P $\beta_j - \beta_s$	> 10°	10 ~ 0°	0°	0 ~ 10°	< -10°
T $\beta_j + \beta_s$	< 110°	110 ~ 120°	> 120°	-	-
P / T F_3	0	-6	- 25	- 50	- 60

P ; 평면파괴 α_s ; 사면의경사방향 β_s ; 사면의경사각
T ; 경사각전도파괴 α_j ; 불연속면의경사방향 β_j ; 불연속면의 정사각

<표3> 사면굴착방법에대한보정값(F_4)

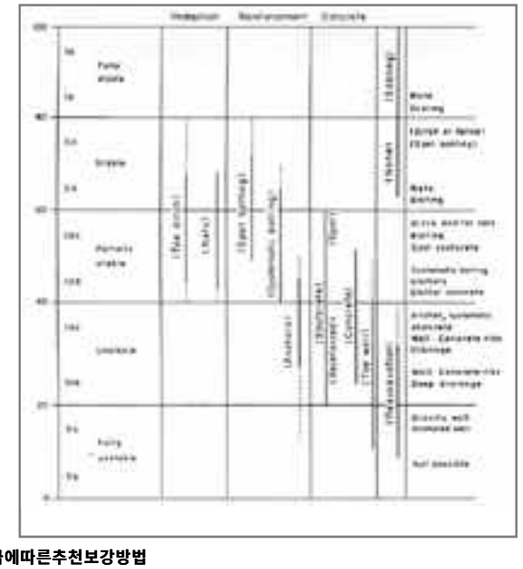
보정인자	자연사면	프리스프리팅	스무스발파	일반발파/ 기계적리핑	불완전한발파
F_4	+15	+10	+8	0	-8

<표4> SMR 등급에대한설명

등급	SMR	설명	안정성	파괴	보강
I	81 - 100	매우양호	완전안정	없음	없음
II	61 - 80	양호	안정	약간의블록	부분적실시
III	41 - 60	보통	부분적안정	일부불연속면/ 다수의쐐기	체계적실시
IV	21 - 40	불량	불안정	평면/ 큰쐐기	중요/ 교정
V	0 - 20	매우불량	완전불안정	큰평면/ 토사형	재굴착

Class	SMR	Support
Ia	91–100	None
Ib	81–90	None. Scaling
IIa	71–80	(None. Toe ditch or fence) Spot bolting
IIb	61–71	Toe ditch or fence. Nets Spot or systematic bolting
IIIa	51–60	Toe ditch and/or nets Spot or systematic bolting Spot shotcrete
IIIb	41–50	(Toe ditch and/or nets) Systematic bolting. Anchors Systematic shotcrete Toe wall and/or dental concrete
IVa	31–40	Anchors Systematic shotcrete Toe wall and/or concrete (Reexcavation) Drainage
IVb	21–30	Systematic reinforced shotcrete Toe wall and/or concrete Reexcavation. Deep drainage
Va	11–20	Gravity or anchored wall Reexcavation

(i) Very often several different support methods are used in the same slope.
(ii) Less usual support measures are in brackets.



[그림1] SMR 등급에따른추천보강방법

결과적으로 이러한 보정요소를 고려한 SMR 값은 식(3)으로구하며, 이값에따른사면암반등급과안정성그리고예상되는파괴형태는<표 4>와같다.

$$SMR = RMR_{basic} + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4 \quad (3)$$

[그림 1]은 SMR 값에 따른 추천된 보강방법으로 동일사면에 대해 몇가지 다른 보강방법을 동시에 적용하여야 한다. 크게 3가지(Protection, Reinforcement, Concrete)로 나누어진 추천 보강방법은 지면관계상생략한다.

2-3. SMR 보정인자 F_4에관련된연구결과 및기타주의사항

Swindells는발파방법이사면안정성에미치는영향을 평가하기 위하여 스코틀랜드 5개 현장(자연사면, 철도, 고속도로, 채석장)의 16개 서로 다른 절취면을대상으로 연구를 수행하였다. 연구대상사면은 화성암 혹은 변성암으로 구성되어 있으며, 절취면은 다양한기법(육안판별, 현장탄성파굴절법조사, 시추공 TV, 실내 시험)으로 조사되었다. Swindells는 비조절또는대규모또는채석용 발파에 의해굴착된 면은측정가능한교란층의두께가크므로, 측정가능한 교란의 정도는 굴착 기법에 관련된다고 결론지었다. Swindells가 제시한 수치 자료를 재처리하고 SMR 보정인자 F_4와 비교한 것이 <표 5>이다. 이 결과는 교란 지역의 두께와 SMR 보정인자 F_4간에는 일반적인유사성을보이고있다.

Kendorski 등은 지하 광산에서 RMR에 곱하는 인수 A_B로발파로인한함몰손상을평가하였다. <표 6>은이들을 SMR의보정인자 F_4와비교한것이다. 쐐기파괴에 대해서는 평면파괴 양상에 적용하는 것과 별다른 인수가 없으며, 분류 시 RMR값에 대한 의존도역시별차이가없었다. 따라서분류는각절리군에 대해서개별적으로적용해야한다.

풍화는 암반 분류에서 평가되지 않는데 이는 암석의 광물학적 조건과 기후에 대부분 의존하는 일시적인 과정이기 때문이다. 일부 진화성 암반(이회암, 점토질셰일같은) 사면은절취할당시는안정적이다가 일정 기간(보통 1 ~ 2년후)이 지난 후에 파괴되는 수가 있다. 따라서 SMR 분류는 현재의 신선한 경우와 미래에풍화된조건에대하여두번적용되어야한다.

<표5> 발파방법에의한교란효과와 F_4의비교

굴착방법	N	교란두께		SMR F4
		범위	평균	
자연사면	4	0	0	+15
프리스프리팅	3	0 - 0.6	0.5	+10
스무스발파	2	2 - 4	3	+8
대규모발파	1	3 - 6	4	+0

<표6> Kendorski의발파계수와 F_4의비교

굴착방법	A_B	(%)	SMR F_4
조절발파	0.97 - 0.94	108 - 104	+8
양호한발파	0.94 - 0.90	104 - 100	0
불량한발파	0.90 - 0.80	100 -89	-8

3. 맺음말

이상과 같이 암반 사면 안정성 해석에 사용되는 해석방법들중현장기술자들에게가장생소한SMR 분류법에대하여대략적으로살펴보았다.

암반사면해석방법들은각자의고유한용도가있고 개별적으로사용되기보다는전체적인해석흐름에의해 상호보완적으로 순차적으로 사용되는 것이 일반적이다. 따라서, 암반사면을설계하기위해서는이와같은해석방법들에대한전반적인이해가선행되어야할 것이다. 그러나, 무엇보다중요한것은해석방법자체보다는각해석방법에서사용되는입력변수의정확한 산정이다. 특히, 암반사면안정성문제의경우해석대상물이 노출되어 있는 경우가 대부분이므로 철저하고 면밀한현장조사와물성추정이가능하다는장점이있다. 본고에서다루지는못했지만암반사면안정성검토에서가장중요한것은용의주도한현장조사계획과 실천이라고해도과언은아니다.

열전달의 이해 및 공동주택의 적용

박동신| 기전부설비팀| 02)3433-7404 | pdssbb@mail.ssyenc.co.kr

1. 개요

산업화, 현대화로 인하여 지구 환경이 변화하면서 지역별로 급격한 온도의 변화를 보이고 있으며 최근 기후 변화에 안전지대로만 여겨졌던 우리나라에도 차츰 이상기후의 영향권에 들어서면서 장마철의 집중호우와겨울철의저온현상이심해지는상황이다.

이러한 이상기후에 대처하기 위해서 많은 부문에서노력을기울이고있지만결코쉽게해결될수있는 상황이 아니며 기존의 설계되어진 모든 부분들은 변화를 요구하게 되었다. 또한 향후 시설들은 더 많은 안전율을 부여하여 설계가 이루어지는 것도 중요하지만 이럴 경우 시공적인 측면에서 상당한 어려움을 야기할 수 있으므로 새로운 방안으로의 전환이 필요할것이라판단된다. 본문에서는이러한부분에대한 해결방안을 모색하기 위해 열전달을 이해하고 실제로 공동주택에 발생하는 동파문제에 관하여 기술하고어떤특별한환경적인변수를고려하기 보다는통상적인것에관하여논술하고자한다.

2. 열전달 이해

(1) 열전달

물체 사이에서 온도 기울기가 존재함으로써 생기는 에너지 전달이며, 계내에서 일어나는 열전달률을 해석하는데이용된다.

1) 전도(conduction) 열전달

고온부의 열이 열전달 매체를 통하여 저온부 쪽으로 시간의 경과에따라 이동하는 열에너지 전달메커니즘 즉, 매질내의 좀 더 활발한 입자 사이의 상호작용에의한입자간의에너지전달방식으로고온부에서 저온부로 전도에 의한 열전달량은 열유동 방향에 수직한변과그방향의온도기울기와의곱에비례한다.

계산식(푸리에(Joseph Fourier)의법칙)

Qx = - k · A · (dT/dL)(kcal/h 또는W)

여기서, k : 열전도율(kcal/m℃h)

A : 전열면적(㎡)

dT/dL : 온도구배