

경제성을 고려한 사면 안정화공법 비교검토

글 김형수 토목기술부 대리
02-3433-7767 / E-mail : conshot@ssyenc.com

1. 서론

절취사면의 설계자는 지표 지질조사, 시추조사 및 물리탐사 등 각종 지반조사를 수행하여 해당 지반특성을 파악한 후, 원지반 특성에 부합되는 적절한 해석법을 적용하여 사면구배를 결정한다.

그러나, 지질구조와 풍화에 따른 강도의 변화가 큰 지역의 경우, 시공전 사면 특성을 파악하여 지반의 상태를 정량적인 지표로 정확히 평가하는 것은 매우 어렵기 때문에 과거의 시공실적 또는 기존 사면의 실태 등을 참고로 하여, 인근 토지 이용상황 등을 감안한 사면설계를 수행하는 것이 일반적이다.

그렇기 때문에, 반드시 시공 당사자는 굴착중 노출된 사면의 지반정보를 바탕으로 현장여건에 부합되는 경제적인 사면 안정화 공법을 수립하여야만 한다.

“OO고속도로 현장”의 경우 시공중인 사면에 대해 추가적인 안정성 검토를 수행하고, 이에 따라 현장여건을 반영한 적극적인 보강공법을 수립하여 경제성을 도모한 사례이다.

2. 현장 적용 사례

1) 현장지층현황

대상사면은 절토고가 약 30m, L=300m인 사면으로 상부로부터 표토층, 잔류토층, 풍화암층 순으로 구성되어 있으며,

표토층은 유기물을 함유한 황갈색의 실트질 모래층으로 지표로부터 유입되는 물을 다량함유하고 있는 상태이고, 잔류토층은 기반암인 흑운모 화강암이 완전히 풍화되어 화강풍화 잔류토로 원위지에 잔류되어 있는 상태로 토립자간의 결속력이 없다. 또한, 풍화암층은 모암인 화강암의 풍화대를 이루고 있는 층으로, 기반암이 HW(Highly Weathered Condition) 상태로 풍화되어 있으며 석영을 제외한 대부분의 구성광물들이 변색되거나 착색되었고, 압구조는 유지하고 있으나 강도가 약하며 불연속면이 5~10mm내외로 Open되어 있는 상태이고, 일부 변성퇴적암류가 존재하나 강도특성으로 보아 풍화암층에 해당된다.

2) 시공현황

대상사면은 지표면으로부터 약 3m 내외의 층후를 가진 토사층 및 그 이하는 계획고까지 리핑암으로 설계되어있으며, 절토사면에 대한 표준구배는 토사의 경우 1:1.2, 풍화암의 경우 1:1.0으로 기 설계되어 굴착 계획고(H=30m)까지 대부분 굴착되었으나, 사면내 전도파괴를 유발하는 절리군과 거의 동일향(5~10° 차이) 방향성을 가진 단층대를 중심으로 우수침투에 의한 간극수압 상승 및 지반 전단강도 저하에 따른 거시적인 파괴 가능성(평사투영해석 참조)을 보이고 있다.

3) 사면 특성

지질구조적으로 본 대상사면은 단층대(Fault Zone)에 해

당되며, 사면을 구성하고 있는 지층의 대부분이 암반의 강도 특성을 상실하여 토사와 같은 거동을 하고 있다. 특히, Fault Zone(단층점도 협제)을 따른 주변파쇄부의 Swelling이 심하고, 이러한 구조적 약선을 통해 지표수의 지중 침입을 허용하여 지반의 전단강도가 약화되었으며, 단층에 협재된 단층점도가 우기시에 수분이 첨가됨으로써 유효재로 작용하고 있는 것으로 보인다.

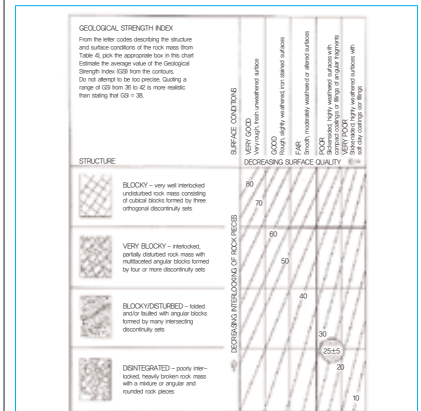
이러한 파괴양상을 띄고 있는 대상사면내 존재하는 불연속면의 분포현황 및 지반상태를 요약, 정리하면 아래(표2-1) (표2-2)와 같다. 대상사면의 GSI값이 10~20으로서 지질구조적으로는 Disintegrated에 해당하고 절리면 상태는 Very Poor에 해당한다.

〈표 2-1〉 대상사면의 불연속면의 방향성 및 절리면 상태

| 절리군 | 경사/경사방향 | 사면방향 | 종류 | JRC | JCS |
|-----|---------------|--------|--------|-------|------------|
| J1 | 70~75/110~120 | 45/300 | 단층, 절리 | 0 ~ 4 | 5 ~ 15 MPa |

〈표 2-2〉 대상사면의 지질학적 특성에 의한 GSI 값 평가

| 구분 | 지질 구조 | 절리면 상태 | GSI 값 |
|------|---------------|-----------|-------|
| 대상사면 | Disintegrated | Very Poor | 10~20 |

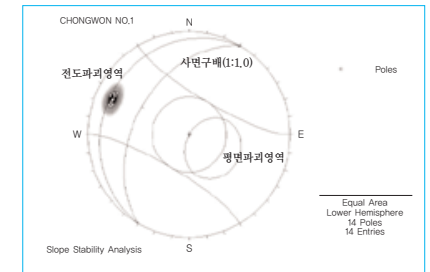


〔그림 2-1〕 지질학적 특성에 의한 GSI, Hoek and Brown(1997)

4) 평사투영 해석

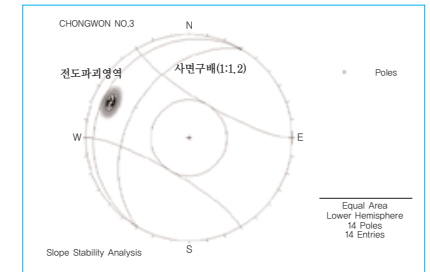
(1) 평면 및 전도파괴 분석

불연속면(단층, 절리) 방향성에 대한 검토결과 대상사면은 전도파괴 양상을 보여주고 있으며, 이러한 파괴유형은 현 사면구배를 최소 1:1.2이상으로 완화시켜야만 사면의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

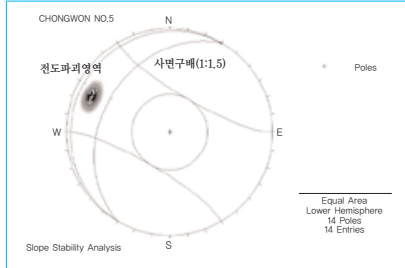


(2) 구배조정에 따른 전도파괴 분석

다음은 사면구배를 1:1.2~1:1.5로 조정할 경우에 대한 평사투영해석 결과이다.



위 검토결과와 같이 구배를 1:1.5로 조정할 경우, 대상사면은 파괴영역에서 벗어나 안정한 것을 알 수 있으나, 평사투영에 의한 해석방법은 불연속면들의 방향성 관계에 의한 정성적인 해석방법임으로 구배조정에 따른 대상사면의 안정해석은 현지 사면을 구성하고 있는 지층에 부합하는 강도정수를 적용한 한계평형해석법(Limit Equilibrium Method)을 병행



하여 판단하여야 한다.

5) 사면안정해석

대상사면의 사공 구배를 1:1.2와 1:1.5로 조정할 경우에 대해 'Bishop의 절편법'을 이용하여 안정성을 검토한 결과 아래 <표 2-3>와 같다

<표 2-3> 해석결과

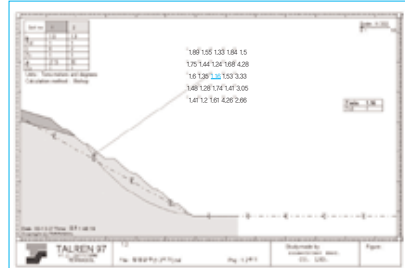
| 구분 | 구배 | 추정안전율 | 기준안전율 | 비고 |
|--------------|-----|-------|-------|----|
| 사면구배 (1:1.2) | 우기시 | 1.16 | 1.2 | NG |
| | 건기시 | 1.52 | 1.5 | OK |
| 사면구배 (1:1.5) | 우기시 | 1.26 | 1.2 | OK |
| | 건기시 | 1.71 | 1.5 | OK |

상기 검토 결과로부터 볼 때 대상사면의 구배를 1:1.5로 조정할 경우에 설계안전율 이상을 확보하여 안정한 것을 알 수 있으나, 1:1.2로 시공할 경우는 별도의 보강공법이 필요하다.

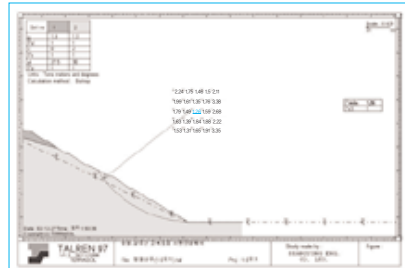
그러나, 용지경계조건을 기준으로 할 때, 아래 표(2-4)와 같이 사공구배를 1:1.5로 조정할 경우에는 당초 용지경계선보다 27m후방까지 굴착하여 굴착량이 과도하게 증가하는 문제점이 있다.

<표 2-4> 추가 굴착량검토

| 구분 | 용지경계초과거리(m) | 추가 굴착량(m ³ /m) | 비고 |
|---------|-------------|---------------------------|----|
| 1:1.2구배 | 7 | 98 | |
| 1:1.5구배 | 27 | 297 | |



[그림 2-3] 1:1.2 구배인 경우(우기시)



[그림 2-4] 1:1.5 구배인 경우(우기시)

3. 사면 보강공법 비교 · 검토

1) 개요

일반적으로 사면의 안정은 구배를 표준구배 이하로 완화하고 원할한 배수공을 실시하여 지반활동을 안정시켜야 한다.

현장조사 등에 의하여 사면 안정성이 부족한 사면에 대하여는 사면붕괴를 방지하기 위하여 사면의 안전율을 적극적으로 증가시킬 수 있는 대책이 마련되어야 할 것이다. 이러한 대책으로는 두 가지 종류의 방법이 이용될 수 있으며, 하나는 사면의 활동력에 저항시키기 위하여 저항력을 증가시켜주는 방

법이고, 다른 하나는 사면이 안전하도록 사면의 활동력을 감소 시켜주는 방법이다.

우선 저항력 증가법으로는 억지말뚝, 앵커, 옹벽, 흙 등을 사용하여 이들 재료의 전단, 휨, 인장, 압축 등의 역학적 저항 특성을 이용하는 물리적 방법과 지반안정약액을 이용하여 직접적으로 지반의 강도를 증가시켜 사면 활동에 저항하도록 하는 화학적 방법을 들 수 있다. 활동력감소법으로는 사면상부의 흙을 제거시키는 절토공과 사면의 경사를 보다 완만하게 변경시키는 사면구배 완화법을 들 수 있다.

대상사면의 경우는 사면 높이에 비해 용지경계선과의 이격거리가 짧아 사공구배를 1:1.5로 조정할 경우, 굴착량이 과도하게 증가하는 문제점이 있다. 이에 자연훼손을 최소화하고 기반암의 풍화가 심한 현상여전 및 암반의 상태등을 종합적으로 반영할 수 있는 방안으로 대상사면의 사공구배를 적절한 수준(1:1.2)으로 조정한 후 설계안전율을 만족하기 위한 보강공법을 병행하는 것이 합리적인 시공방안이다.

안전율 증가 공법중 대표적인 공법의 개요와 특징을 정리하면 <표 3-1>과 같으며, 지층조건 및 안정성, 경제성, 시공성 등을 감안할 때 Soil Nailing 공법이 가장 적합하다.

<표 3-1> 사면안정 보강공법 비교표

| 구분 | 개요 | 특징 |
|--------------|---|---|
| Soil Nailing | 절토면에 수평방향 방향으로 천공한 후 철근을 삽입하여 보강된 지반을 일체화시켜 작용토압에 저항하도록 하는 공법 | 토사 또는 풍화가 심한 대질토 구간에 적합하며, 평면활동이 발생하여 우려되고 용출수가 있어 알은 활동이 발생하는 경우에 적합 |
| Micro Pile | 수직 및 경사방향 방향으로 천공한 후 철근을 삽입하여 보강된 토체가 중력식 옹벽과 유사한 역할을 하여 작용토압에 저항하도록 하는 공법 | 토사 또는 풍화암층에 적합하며, 절토고가 높고 예상활동면의 심도가 깊은 경우에는 적용 곤란 |
| Rock Anchor | 사면이 연약한 면을 따라 활동할 때 활동면을 관통하여 천공을 한 후 콘크리트 또는 강재말뚝을 설치하여 저항하도록 하는 공법 | 예상활동면의 심도가 깊은 경우에는 적용 곤란하며, 비경제적이거나 토사사면의 구배완화가 불가능한 경우에 적용 |
| 억지말뚝 | 절토사면의 예상활동면이 깊은 심도에 위치할 때 Rock Anchor를 예상활동면에 관통하여 정적시킴으로써 Anchor의 인장력에 의하여 활동에 저항하도록 하는 공법 | 깨기 활동 가능성이 있는 급구배 사면에 적합 |

2) Soil Nailing 공법의 개요

Soil Nailing 공법은 다른 철근류 삽입 공법과 마찬가지로 토사나 암반에 비교적 길이가 짧은(L=5~10m) 강재나 유리 합성섬유 등의 보강재(D22~D32)를 설치하는 지반보강과 슛크리트 등으로 굴착면을 보호하는 표면보호공을 조합 시공하여 안정화 시키는 공법이다. 시공 방법은 비탈면 등에 자립할 수 있는 안정 높이로 굴착함과 동시에 슛크리트 등으로 표면 보호공을 시공하고, 굴착배면 지반에는 천공 또는 기타의 방법으로 보강재를 박아 넣는 단순작업에 의해 보강도 벽체를 조성한다. 이 공법의 용도는 절토 비탈면의 안정대책이나 토류벽 이외에 터널보강, 기존 구조물 보강, 비탈면 보강 등 광범위한 용도에 적용할 수 있다. 특히, 이 공법은 굴착된 가까이 지하 구조물이 있어 앵커공법의 사용이 제한받는 곳에서 효과적으로 이용할 수 있지만, 성토 비탈면에서 흠막이나 옹벽 대체 공으로는 적합하지 않다.

비탈면 안정 대책으로 사용하는 경우에 이 공법이 갖는 특징으로는 시공장비가 간단하고 소형이므로 협소하거나 긴 비탈면 등 시공조건이 나쁜 곳에도 적용이 쉽고, 지질 상황이나 시공조건 변화에 대한 순응성이 좋으며, 비탈면 경사를 급경사로 할 수 있어 토지 이용률을 높일 수 있다.

3) Soil Nailing 공법의 설계 개념 및 타공법과의 차이점

Soil Nailing 공법의 기본적인 설계개념은 Nailing에 의해 보강된 영역의 토체가 마치 일체화된 옹벽과 같은 작용을 하여, 어떤 경사면에 대해 안전을 유지한다는 방식에 근거한다. 비탈면 안정의 기본적인 방식은 범면내의 인계사면위에 있어서 경사면 아래에 배치된 보강재에 발생하는 인장력과 경사면 위에서 흙의 전단 저항력, 그리고 경사토피중량의 균형을 맞춘다고 하는 단순한 힘의 평형식을 근거로 한다.

Nailing 공법의 원리는 보강토공법이나 Ground Anchor 공법과 유사하여, 흙과 보강재사이의 마찰력, 보강재의 인장응력, 전단응력 및 휨모멘트에 의해 지반의 안정성을 유지하게 된다.

보강토 공법이 주로 성토부위에 사용되는 반면에 Nailing 공법은 주로 절토부위에 사용되므로 구조 및 시공방법에 차이가 있고, Grond Anchor공법과는 보강재의 길이 및 전면판의 역할등의 차이로 구분된다.

〈표 3-2〉 Soil Nailing과 Ground Anchor 공법 비교

| 구분 | Soil Nailing | Ground Anchor |
|---------------|---|---|
| 보강재의 응력 | 주변지반의 변형억제를 위해 응력을 가지지 않거나 약간의 가함 | 구조체 자체의 이동억제를 위해 많은 응력을 가함 |
| 보강재 파손의 영향 | 보강재를 조밀하게 배치함으로 하나의 파손이 공법전체에 미치는 영향이 적음 | 보강재 하나의 파손이 전체에 미치는 영향이 큼 |
| 보강재 길이 및 설치장비 | 보강재의 길이가 비교적 짧고, 설치장비가 간단함 | 보강재의 길이가 길다 |
| 지지설비 | 보강재 각각에 작용하는 힘에 솟 크리트내의 강재 지지판에 모여 있으므로 별도의 지지설비가 필요 없음 | 앵커에 작용하는 힘에 의해 벽면이 PUNCHING될 우려가 있으므로 이를 억제할 샐베(WALE BEAM, 앵커블록 등)가 필요함 |
| 부식의 영향 | 숏크리트 및 그라우팅으로 처리됨으로 부식의 영향이 적음 | ANCHOR 선단부의 부식을 확실히 하기 위해 많은 시간이 필요하고 부식에 따른 인장력 손실로 장기간으로 효과 저하 |
| 공기 | 양생기간에 대한 고려 없음 | 단계별 굴착 시 양생기간 및 인장력에 따른 공기 지연 |
| 공사비 | 공사비 저렴 | 공사비 고가 |

4) Nailing의 구조적 요소

(1) 보강재(Nail)

〈표 3-4〉 Soil Nailing과 Ground Anchor 공법 비교

| 구분 | 공법 개요 | 특징 |
|------------------|--|---|
| Driven Nail | 배면지반을 미리 천공하지 않고 Vibro percussion 장 비 나 Hydraulic hammer를 이용하여 설계된 각도대로 타입 | 시공속도가 빠르고, 경제적이거나 자갈이나 전석층에서는 시공이 곤란하고 최대 20m까지 시공 가능하다 |
| Grouted Nail | 미리 천공한 후 고강도 강형을 삽입하고 중력 또는 저압의 그라우팅을 실시 | 부착력 증대를 위하여 Ribbed Bar가 사용되며, 구멍둘린 특수한 튜브로 분사주입함 |
| Jet-Grouted Nail | Nail은 Vibro percussion 헤드로 설치되고 시멘트나 레진은 강재 Rod로 분사주입 | 주변지반의 재타입 및 지반개량 효과가 있으며, 합성 보강재의 전단저항 및 인발저항을 증대할 수 있으나 고압분사의 경우 Hydraulic Fracturing 유발 |
| 부식방지용 Nail | 물의 침투에 대한 방지로 Nail에 에폭시 코팅을 하거나 Steel Bar를 그라우트함 | 영구 구조물에 주로 사용함 |

Nail에 주로 사용되는 보강재는 Driven Nail, Grouted Nail, Jet-Grouted Nail, 부식방지용 Nail등 4가지로 구분할 수 있다. 당 현장의 경우는 가장 일반적이면서 시공성 및 경제성이 좋은 Grouted Nail을 적용하는 것이 바람직하며, 그 외 보강재의 종류 및 특징은 다음(표3-4)와 같다.

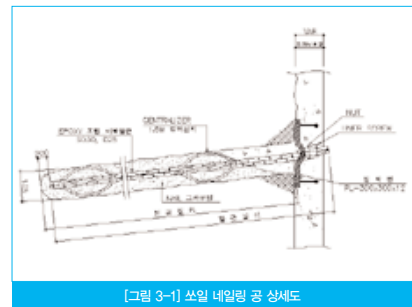
(2) 전면판(Facing)

전면판의 주요기능은 보강층 층 사이의 국부적인 안정 및 굴착 후 지반의 안정을 확보하며, 침식 및 풍화작용으로부터 지반을 보호하기 위한 것이다. 따라서 전면판은 연속적으로 연결되어 설치되어야 하고 사면의 다양한 표면형상에 맞게 설치되어야 한다. 또한 굴착이 진행되는 동안 지반변위를 견디기에 충분한 유연성을 확보하여야 한다.

지반의 특성 및 적용성에 따라 주로4가지 종류(숏크리트 Facing, Welded Wire Mesh, 콘크리트 구조체, 강재전면판)의 전면판이 사용되며, 당현장의 경우 Nail을 고정시키기 위한 강재 지압판(PL-300×300×15mm)을 설치하여 Nut로 고정하는 방안을 적용한다.

5) Nailing 시공방법 및 유의사항

Nailing 은 지반굴착, 천공, 보강재 삽입, 그라우팅 실시, 강재전면판 설치 순으로 시공하며 관련 상세는 아래와 같다.



〈그림 3-1〉 쓰일 네일링 공 상세도

Nail 시공시 굴착하는 동안 지반의 교란을 최소화하고 지

반의 이완을 가능한 억제하며, 원지반이 지닌 역학적 성질의 저하를 방지하기 위해서는 굴착 후 신속하게 시공되어야 하고, 표면보호공이 반드시 실시되어야 함으로 보강공법 결정 뒤 이에 수반되는 적절한 표면보호공을 선정하여 반드시 적용하여야 한다.

6) Nailing 보강해석

사면의 설계안전율을 만족하는 최적의 시공안을 수립하기 위해Nail(105mm천공, SD30 D25, L=10m, 시공각도 10° 내외)의 시공간격을 가.CTC1.2×1.2 (10열), 나.CTC1.5×1.5(8 열), 다.CTC2.0×2.0(6열) 시공할 경우에 대해 각각의 한계평형해석을 수행하였고, 이중 나.CTC1.5×1.5, 8열로 시공하는 것이 가장 경제적이고 합리적인 방안으로 해석된다.

〈표 3-5〉 Nailing 보강 해석결과

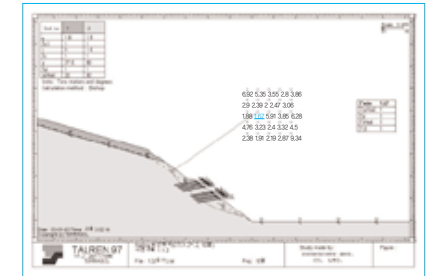
| 보강안 | 우기시 안전율 | 건기시 안전율 | 비고 |
|-----------------|------------|------------|----|
| CTC1.2×1.2, 10열 | 1.67 > 1.2 | 2.16 > 1.5 | OK |
| CTC1.5×1.5, 8열 | 1.40 > 1.2 | 1.84 > 1.5 | OK |
| CTC2.0×2.0, 6열 | 1.23 > 1.2 | 1.63 > 1.5 | OK |

4. 결론

대상사면의 경우 현지 지질조사를 통하여 공학적 지반 특성값을 평가한 후 평사투영법(상용프로그램 DIPS ver5.0사용) 및 한계평형법(상용프로그램 Talren 97 ver2.1사용)에 의한 사면의 안정성을 검토한 결과, 대상사면의 구배를 1:1.5로 조정할 경우에 설계안전율 이상을 확보하여 안정한 것을 알 수 있으나, 1:1.2로 시공할 경우는 별도의 보강공법이 필요한 것으로 사료된다.

대상사면은 사면 높이에 비해 용지경계선과의 이격거리가 짧아 시공구배를 1:1.5로 조정할 경우, 굴착량이 과도하게 증가하여 경제성이 떨어지는 문제점이 있다. 이에 자연훼손을 최소화하고 기반암의 풍화가 심한 현장여건 및 암반의 상태 등을 종합적으로 반영할 수 있는 방안으로 대상사면의 시공

구배를 적절한 수준(1:1.2)으로 조정하여, 굴착량을 최소화한 후 설계안전율을 만족하기 위한 보강공법을 병행하여 시공성과 안정성, 경제성을 도모해야 한다.



〈그림4-1〉 최적보강설계 해석결과(우기시)

참고문헌

- (주)도화종합기술공사(1997), "대구-포항간 고속도로 건설공사 실시계획 지반조사보고서(제4공구 : 가삼-덕면)", 한국도로공사, pp.73~180.
- 김성환(1997), "고속도로 사면안정대책", 토목기술강좌, 대한토목학회, pp.475~505.
- 윤지선(1992), "사면의 지질조사", 토목지질공학, 구미서관, pp.299~326
- 신희순(2000), "토공에서의 암반층 문제점 및 암반조사", 2000년도 한국지반공학회 일반역학위원회 특별세미나 논문집, pp.81~116.
- 이영남(1997), "암반사면의 안정성 해석, 산사태, 토질 및 암반사면의 안정 해석, 대책공법, 동국대학교 산업기술대학원, pp.111~160.
- 이수권(1997), "암반절취사면의 조사 및 안정공법", 토목기술강좌, 대한토목학회, pp.507~602.
- 시만철(2000), "탄성파속도를 이용한 암중구분 및 지반정수 산출", 지질공학 기술강좌, 대한지질공학회, pp.47~96.
- 박형동(2000), "암석 및 암반의 풍화도 판단기술", 2000년도 한국지반공학회 일반역학위원회 특별세미나 논문집, pp.1~23.
- 신우철(2000), "암반공학에서의 불연속면조사", 2000년도 한국지반공학회 일반역학위원회 특별세미나 논문집, pp.117~1142.
- 유병욱, 황영철, 조성록(1999), "암반의 굴착난이도 평가에 관한 연구", 제16회 토목기술연구성과발표회 논문집(지반분야), p.7.
- 국립지질 광물연구소(1974), "한국지질도 청주도역(1:50,000)", 지질도록 발행서, pp.2~8.
- 김종택, 강인규(1995), "Nailing System으로 보강된 역지벽체 공법에 관한연구", 한국지반공학회지 Vol.17, pp.79/99.