

그중 계단식 발파법은 이론적, 경험적인 방법을 통하여 발파패턴 및 설계가 정량화되어있다. 붕괴형 발파법은 수평방향으로 천공을 함으로서 굴착작업의 감소 및 폭약 단가에 유리한 발파공법이지만 지반진동등의 환경적인 영향에 취약하며, 절토사면의 안정성에 악영향을 미치는 발파패턴이다. 다음 그림 1은 도로절토사면 형성시 붕괴형 발파패턴을 적용하여 장기적 안정성에 악영향을 준 예이다.



그림 1. 붕괴형 발파패턴 양상

3. 발파손상영역 이론

발파에 의한 암반의 손상은 폭약의 사용량에 비례하며, 암반의 손상을 최소화한 새로운 경사면의 형성은 최후 발파열의 장약특성에 따라 좌우된다. 발파에서 장약에 따른 파괴력이 미치는 범위는 천공발파시 약실의 중심으로부터 압축권, 분쇄권, 파쇄권, 균열권, 진동권으로 진행된다. 이는 균질한 암반에 대해서는 동심원을 이루지만 불균질한 암반의 경우 타원형을 이루게 된다. 다음 그림 2는 폭약에 의한 균질한 암반에서의 위력권의 모식도이다.

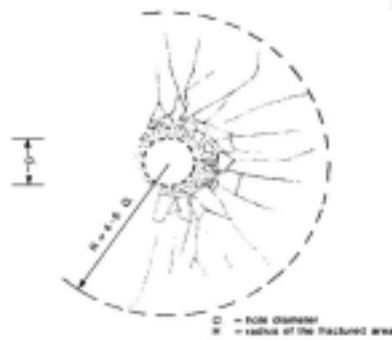


그림 2. 위력권 모식도

그림 2와 같은 파괴특성으로 인하여 발파는 암을 제거하기도 하지만 남아 있는 암반에도 영향을 끼치게 된다. 이는 폭파시의 충격파가 암반내의 탄성진동으로 약화될 때까지 영향을 미치며, 그 손상 범위는 수십m에 이르기도 한다.

일반적으로 발파진동의 표현은 기하학적 구조나 지질학적 조건을 통하여 일반해를 구하기 어려우므로 매우 경험적인 방법으로 예측하게 되며, 발파공 부근에서 진동을 직접 측정할 수 없으므로 원거리 측정결과를 외삽하여 사용하게 된다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \quad (1)$$

V : 진동속도(cm/sec, Kine) K : 발파진동 상수
D : 폭원으로 부터의 거리(m) b : 장약지수
W : 지발당 장약량(kg) n : 감쇄지수

발파에 의한 암반 손상은 생성된 동적 변형률의 결과로 탄성매질의 경우에 있어서 입자속도와 종파속도의 비율로서 계산하여 손상이 발생할때의 임계속도를 구할 수 있다. 지금까지 여러학자들의 연구결과에 의하면 일반적인 암반손상 임계속도는 700~1000mm/sec 인 것으로 알려져 있다.

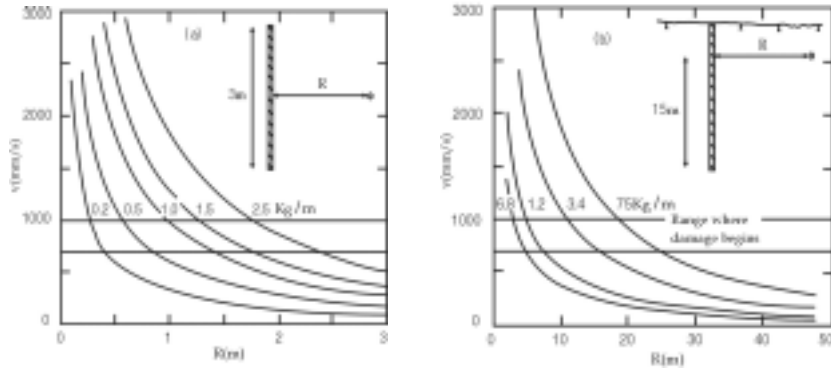


그림 3. 암반손상영역과 임계속도

다우딩은 광산 및 토목공학에서 자주 사용되는 경험식을 산정하였으며, 다음 식 (2), 식 (3)과 같다. 이 경험식을 그림 4와 같이 장약량 변화에 따라 도시하였으며, 임계속도는 1000mm/sec를 가정하였다.

$$A = 0.81g \left(\frac{30.5m}{R} \right)^{1.84} \times \left(\frac{c}{3050m/s} \right)^{1.45} \times \left(\frac{Q}{4.54kg} \right)^{0.28} \times \left(\frac{2.4}{\rho} \right)^{0.28} \quad (2)$$

$$PPV = 18.3mm/sec \left(30.5 \frac{m}{R} \right)^{1.46} \left(\frac{Q}{4.54kg} \right)^{0.48} \left(\frac{2.4}{\rho} \right)^{0.48} \quad (3)$$

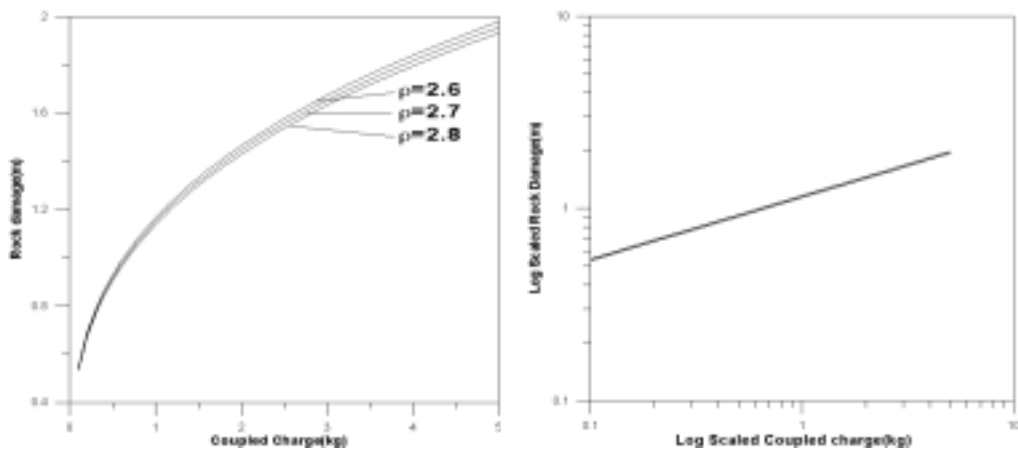


그림 4. 장약량과 손상영역의 관계(다우딩)

현재 암반사면의 안정성 평가법으로 보편화 되어있는 SMR(Slope Mass Rating)은 굴착공법에 따른 차등화된 점수를 주고 있으며, 이에 따른 교란 효과는 다음 표 1과 같다.

표 1. 발파공법에 따른 교란효과

굴착방법	교란두께		SMR F4
	범위(m)	평균(m)	
자연사면	0	0	+ 15
Presplitting	0~0.6	0.5	+ 10
Smooth blasting	2~4	3	+ 8
Bulk blasting	3~6	4	0

4. 도로절취암반 사면에서의 피해상황분석

본 연구는 과도한 발파 절취로 인한 사면의 피해양상을 분류하고, 보강 공법의 특성을 분석하기 위함이며, 국도 변의 절토사면을 그 대상으로 하였다. 전국에 산재되어 있는 절토사면 중 과도한 발파 작업에 의한 암반사면의 선정은 강릉 대구 영주 의정부 진주 정선 포항 지역을 대상으로 하였으며, 발파 절취의 확인은 발파공의 여부, 이완상태 등을 확인하여 분류하였다. 발파에 의해 형성된 절토사면의 모델 및 사례는 다음 표 2 와 표 3에 정리하였다.

표 2. 발파에 의한 절토사면 모델 개요




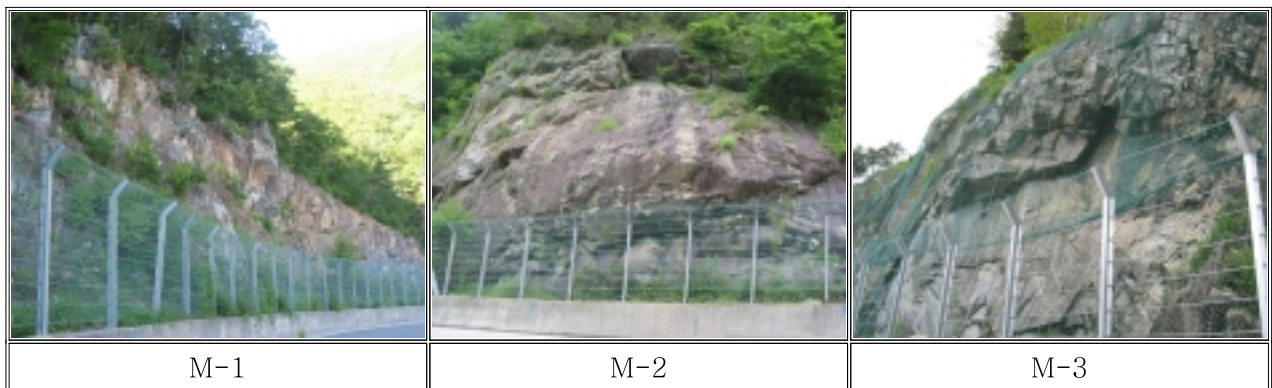
모델		개요
M-1		· 절토사면 범면부의 표면이완이 심하여 낙석 발생이 심함
M-2		· 암반 절토사면 하부의 Under-Cut으로 인하여 하부지지력 약화 및 직상부블록 불안정, 심한 절리노출
M-3		· 암반 절취 범면상에 대형 암블록 이완으로 인하여 대형 낙석 발생 및 대규모 붕괴 가능

표 3. 각 모델별 사례



4.1 절취 암반사면의 이완암블록 크기 분석 및 영향

본 연구에서는 69개 현장에 대한 절취 법면조사를 통하여 나타난 최대 이완암블록 및 이완암블록의 평균크기, 분포량을 조사하였다. 본 조사대상 지역만을 고려할 때 발파에 의한 절취시 이완암블록의 크기 등이 매우 작게 형성되는 것으로 나타났으며, 최대 이완 암블록의 크기 분포는 0~0.5m³에 매우 집중되어 나타나며, 이완암블록의 평균값은 0~0.12m³ 크기가 매우 높은 분포를 보였다. 이완암블록의 분포량은 14~16m³이 매우 높은 값을 나타내었지만 이는 사면의 크기는 고려되지 않은 값이다. 이러한 분석 결과를 활용하여 이완암블록 낙하시의 에너지를 도출하였다. 사면의 경사는 발파암에 대한 표준구배인 1:0.5를 적용하였으며, 낙하 높이는 본 조사의 평균 최대 높이의 약 70%인 17m를 적용하였다. 조사결과 0.5m³급 낙석의 경우 절토사면 하단에서 160kJ의 에너지 값을 나타내었으며, 낙석에너지 산정을 위해서는 rocscience 사의 RocFall 프로그램을 이용하였다.

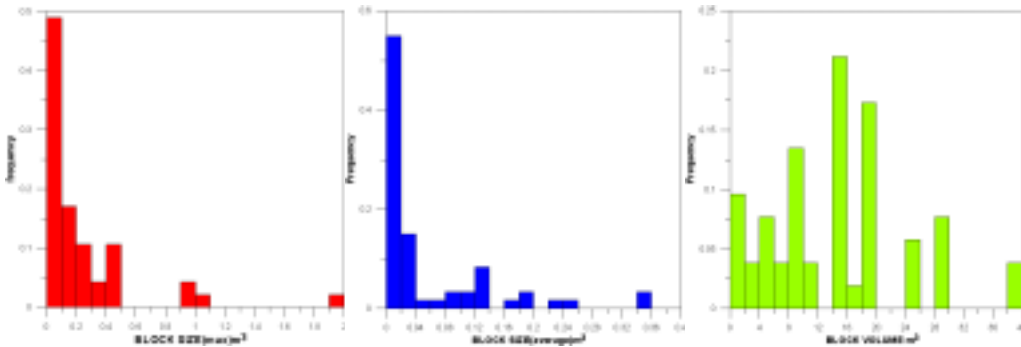


그림 5. 이완암블록 크기 및 분포량

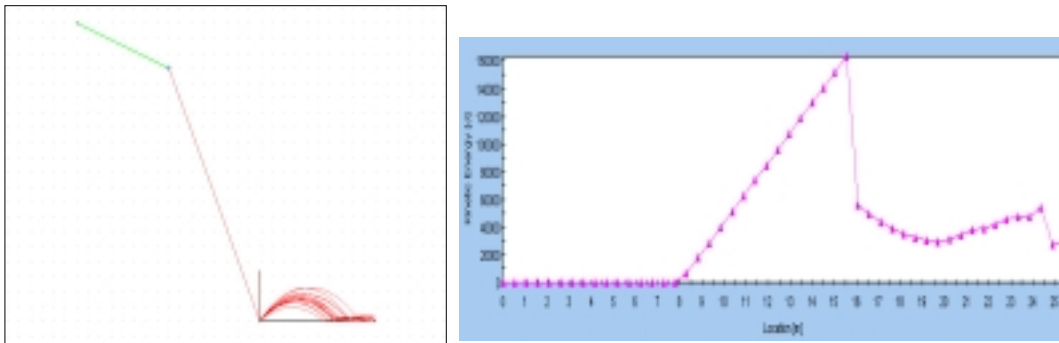


그림 6. RocFall 중단면 형상과 Kinetic Energy(J)

4.2 하부 Under-Cut의 영향

절취 암반의 Under-Cut에 의한 영향을 검토하기 위하여 평사투영 및 모델해석을 실시하였다. 암반 사면 하부에서 Under-Cut 된 사면에 대한 Daylight Envelope 및 전도영역을 함께 도시하여 평사투영에서의 영향을 검토결과, 일반적으로 Daylight Envelope 영역이 넓게 전시되어 절리의 노출 위험이 더 높으며, 전도 파괴영역도 넓게 나타났다. 그림 7 현장의 평면·전도 파괴 해석시 절리 set-3, 4가 Under-Cut Daylight Envelope상에 도시됨을 확인하였다. 켄기파괴 영역도 하부 Under-Cut 경사에 의한 파괴영역이 보다 넓은 영역으로 확대되는 양상을 보였다. 그림 7 현장의 켄기파괴 해석시 하부에서 절리 set-3과 set-7의 교선방향으로 켄기 블록 형성 및 파괴가 일어날 수 있음이 확인되었다.

사면의 거동 측면에서 Under-Cut의 보다 정량적인 영향을 확인하기 위하여 동일한 조건하에서 개별요소법에 의한 해석을 실시하였으며, 프로그램은 UDEC verion 3.1을 사용하였다. 해석결과 그림 9, 그림 10과 같이 하부에서 블록 이탈에 의해 Under-Cut 직상부에 대한 최종 수직변위에서 큰 차이를 보였으며, 전단응력도 크게 나타나 사면안정에 큰 영향을 미칠수 있을 것으로 사료된다.



그림 7. 하부 Under-Cut 사면에

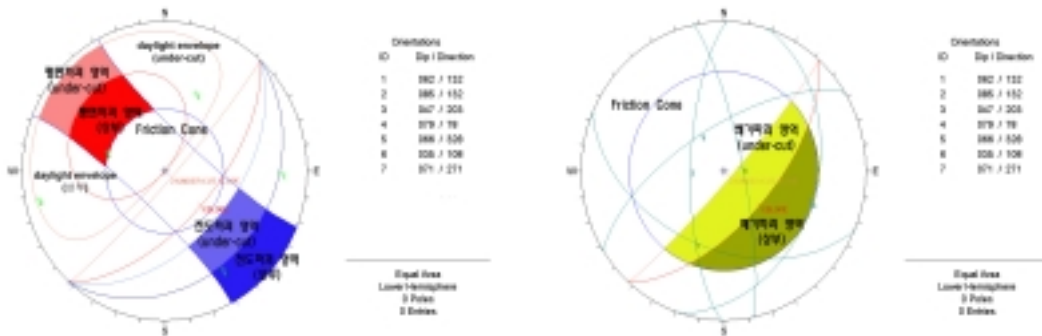


그림 8. 사면에 대한 평사투영해석결과

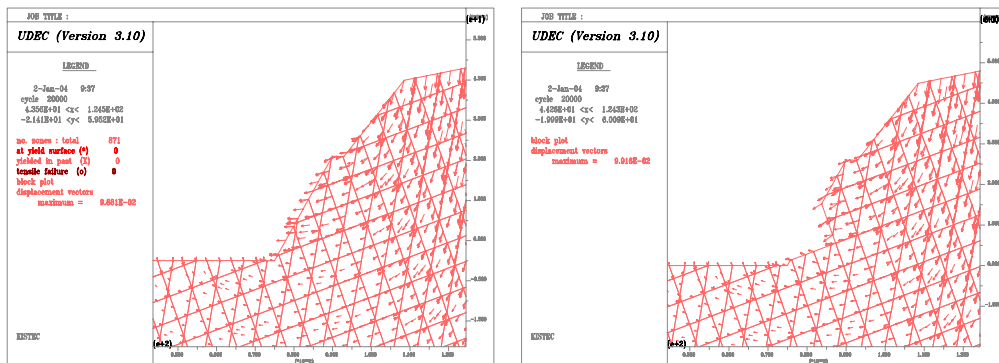


그림 9. 변위해석단면

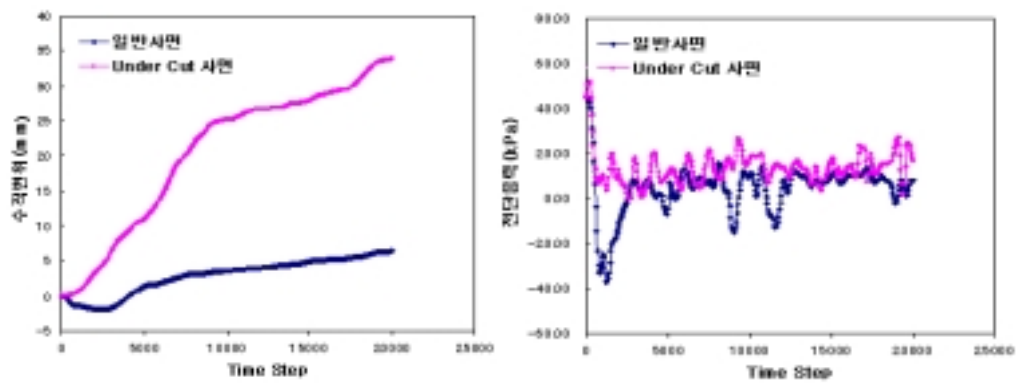


그림 10. 변위 및 전단응력 해석결과

4.3 절취 암반사면의 공법사례 분석

본 조사 대상 절토사면의 결과를 토대로 제시된 공법별 사례적용률을 조사하였다. 공법을 A~E 그룹으로 나눈 것은 특수 공법 적용사례를 일반화시켜 나타내기 위한 것으로 기능이나 목적이 동일하거나 유사한 공법별로 분류하여 총 69개 현장 사례에 대한 각 그룹별 적용 경향을 나타내었다. 각 공법별 세부항목은 표 4에 나타내었으며, 공법별 적용사례비는 그림 11과 같다.

공법 적용사례를 분석한 결과, 과도한 발파로 인하여 절취된 사면은 이완암블록 및 뜬돌 등의 위험요소로 인하여 공법 A 즉, 절취, 상부절취, 면정리, 이완블록제거, 라운딩 등이 채택됨으로서 보강보다는 절취를 통하여 위험요소를 제거하는 것이 가장 유효했던 것으로 사료되며, M-1과 M-3와 같은 절리이완암에 대하여 70%가 다시 절취라는 공법이 내려짐으로서 최초 시공시 매우 불안정한 시공이었으며, M-2와 같은 절토사면 하부 절취 및 지지력 약화에 대하여 공법B 즉, 버트리스, 의지식옹벽, 계단식옹벽이 전체중 40%가 적용됨으로서, 발파 절취와 함께 현재 도로절토사면 유지관리를 위한 예산 증가의 주요 원인이 되고 있는 것으로 사료된다. 또한 공법 C에 대한 자료 분석을 통하여 이완이 매우 심한 암반사면에 대해서는 망을 이용한 보호·보강은 적용사례가 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

표 4. 공법그룹별 분류

공법 Group	세부 공법명
공법 A	절취, 상부절취, 면정리, 이완암블록제거, 라운딩
공법 B	버트리스, 의지식옹벽, 계단식옹벽
공법 C	기능성 낙석방지망 및 특수망류
공법 D	록앵커, 락볼트류
공법 E	숏크리트, 격자블록

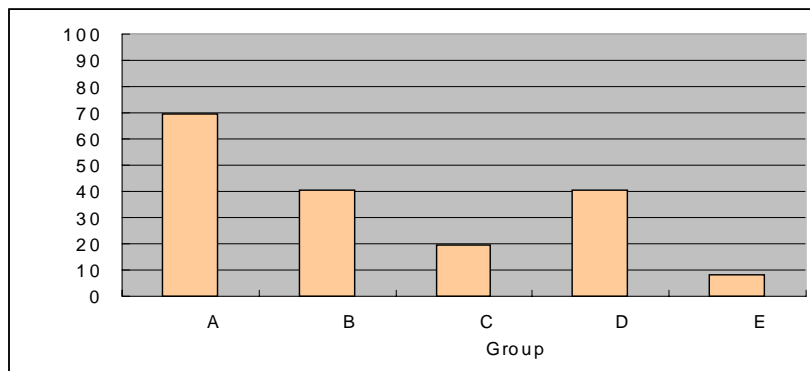


그림 11. 공법별 적용사례 비교

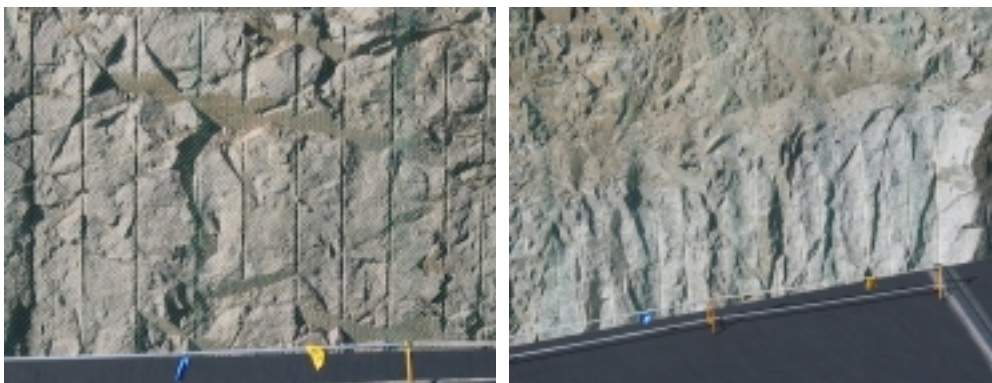


그림 12 도로절토사면에서의 조절발파적용사례

5. 결론

과거 지형적 여건 및 공기단축, 사면에 대한 안정성 개념 부족으로 과도한 발파작업과 절취가 이루어져 현재에 와서는 대규모의 보강 및 절취가 필요하게 되었으며, 이에 따라 막대한 예산의 수립이 요구되고 있다. 그러므로 암반사면의 설계 및 시공시에는 현장 여건 및 차후 시설물의 운용까지를 고려한 설계가 이루어지도록 하여 하부 Under-Cut 등의 발생을 줄이고, 사면의 목적에 알맞은 발파패턴 및 장약형식을 선택하여 대형이완 암블록의 형성을 줄임으로서 낙석피해를 최소화 하여야 한다. 발파작업에 의한 사면 조성시 암반이완대 형성은 화약의 특성으로 인하여 피할 수 없으므로 조절발파를 적용하여 암반의 이완영역을 최소화 하고, 발파이후 이완암블록의 철저한 제거를 통하여 향후 암반사면의 불안정 요인을 제거해야 한다. 현재 국토 암반사면에 대한 유지관리시 현장여건상 발파공법에 의한 절취가 요구될 때, 조절발파를 이용한 이완영역 최소화를 적극 검토하여 장기적인 안정성을 기대할 수 있는 대책공법 제시가 요구된다.

* 참고문헌

1. 건설교통부(2002), "2002년도 도로절개면 안정성 해석 및 대책", 강릉국도유지관리사무소, 1~3권
2. 건설교통부(2002), "2002년도 도로절개면 안정성 해석 및 대책", 대구국도유지관리사무소, 1~3권
3. 건설교통부(2002), "2002년도 도로절개면 안정성 해석 및 대책", 수원의정부국도유지관리사무소, 1권
4. 건설교통부(2002), "2002년도 도로절개면 안정성 해석 및 대책", 진주국도유지관리사무소, 1~4권
5. 건설교통부(2002), "2002년도 도로절개면 안정성 해석 및 대책", 포항국도유지관리사무소, 2~3권
6. 기경철, 윤철현(1997), 화약발파해석, 구미서관, pp.262
7. 장수호 외(2000), "발파에 의한 터널 주변 암반의 손상영역 평가에 관한 연구". 한국지반공학회는 집,16권, 제5호, pp.129~140
8. 전성기(1998), 실무자를 위한 사면안정화 설계실무편람, 과학기술, pp.95~108
9. 이천식, 박중호(2003), 암발파시 전달되는 에너지 분포, 제2회 한화 발파 기술 심포지움, pp.140~157
10. Evert Hoek and John Bray(1981), Rock Slope Engineering, The Institution of Mining and Metallurgy, pp.37~63
11. Y.K. Wu, H. Hao, Y.X. Zhou and K.Chong(1998), "Propagation characteristics of blast-induced shock waves in jointed rock mass" Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 17, pp.407~412