

탄성과 검층법을 이용한 암반 사면 평가

姜 聲承, 尾原祐三, 熊本大學
原口直之, 平田篤夫, 崇城大學

1. 서 론

그라운드 앵커는 사면의 붕괴방지나 구조물의 뜸 현상 및 전도를 방지할 목적으로 이용되고 있는 지반 공법중의 하나이다(김낙경, 2000, 2001; 김래현 외, 2002). 그라운드 앵커와 함께 록 볼트, 케이블 볼트, 스파이럴 볼트 등과 같은 지보재는 사면이나 터널을 굴착한 후에 시멘트 그라우트의 마찰력이나 부착력을 이용하여 지반과 볼트를 고정시켜 지반의 안정성을 확보하는 공법이다(Hudson, 1989; Indraratna & Kaiser, 1990; Bawden et al., 1992; Yazici & Kaiser, 1992; Hyett et al., 1995; Tannant, 1995; Oreste & Peila, 1996; Jeng & Huang, 1999; Ito et al., 2001; Hirata et al., 2003, 2005). 어떤 시공법이든 시공후의 암반 상태를 적절한 방법으로 계속적으로 평가하고 유지·관리해야 함은 주지의 사실이다. 즉, 볼트의 종류, 대상 구조물의 크기나 상태 등에 따른 적절한 관리기법이 요구된다. 지반조사에 사용되는 검층법은 지반 중에 시추공을 천공한 후 검층 장비를 투입하여 지반의 정보를 획득하는 방법으로써 주로 유전탐사나 지질조사에 많이 이용되고 있다. 이러한 목적으로 사용되는 대부분의 장비들은 규모가 클 뿐만 아니라 수직 시추공을 이용하여 측정이 이루어지는 경우가 많다. 반면 터널 주위나 사면 내의 암반 상태 조사, 또는 발파로 인하여 발생하는 암반 손상대의 파악과 같은 건설 분야에 이용될 수 있는 소규모의 원위치 조사법은 미미한 실정이다. 현재 국내에도 도로 확충으로 인한 도로 사면 및 터널 시공의 증가, 핵폐기물, 원유, LPG 저장을 위한 지하 저장 비축기지 개발, 지하 발전소의 개발 등이 갈수록 증가하고 있다. 이들 구조물 개발의 증가와 함께 구조물 주위를 구성하고 있는 암반의 상태를 적절하게 판단할 수 있는 방법도 필요하게 되었다. 이러한 이유에 기인하여 작고 가벼우면서 사용이 간편한 탄성과 검층 시스템이 개발되었다. 탄성과 검층법은 암반 상태를 평가하기 위하여 사용될 수 있는 검층법 중의 하나로써 원위치에서 비교적 간편하게 정밀한 자료를 수집할 수 있다. 또한 탄성과 검층법은 지보재가 설치되기 전후의 거동을 평가하는데도 유용하게 사용될 수 있는 방법이라 하겠다. 본 논문에서는 먼저 탄성과 검층법을 적용할 때 사용되는 기구 구성과 적용 방법에 대해서 설명하고,

다음으로 암반 사면에 대한 안정성 평가의 적용 예에 대하여 기술하고자 한다.

2. 탄성과 검층기

2.1 탄성과 검층 장비

탄성과 검층기는 충격을 가하여 에너지를 발생시키는 부분, 데이터를 받는 부분, 그리고 저장하는 부분 등 크게 세 부분으로 구분될 수 있다(그림 1). 탄성과 검층기(seismic logging probe)는 그림 2와 같이 시추공에 투입, 고정, 회수 등 일련의 작업과정을 간편하게 할 수 있도록 제작되었다. 재료의 성질은 티탄과 니켈 합금의 초탄성 성질을 갖는 용수철 형태의 구조 재료써 자체에 진동기(vibration sensor)가 장착되어 있다. 그림 3은 티탄과 니켈 합금판과 이를 열처리 가공을 하여 만든 초탄성 용수철 형상을 나타낸다. 용수철은 탄성과 검층기를 시추공에 투입한 후 공벽에 적당한 압력으로 밀착될 수 있도록 그 크기를 조정할 수 있다. 탄성과 검층기를 공벽에 밀착시키는 힘이 강하면 강할수록 진동기를 공벽에 확실하게 고정시킬 수 있으므로 진동기의 감도는 높아진다. 하지만 그 힘이 너무 크면 탄성과 검층기를 측정하고자 하는 위치까지 이동시키거나 측정을 완료한 후 회수하는데 어려움이 발생한다. 반면 탄성과 검층기를 공벽에 밀착시키는 힘이 약하면 탄성과 검층기의 이동과 회수는 용이하다 할지라도 진동기의 감도는 떨어진다. 따라서 진동기가 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 위해서 진동기를 시추공벽에 밀착시키는 적절한 압력을 알아보는 것이 중요하다. 그림 4는 탄성과 검층기의 밀착 압력에 따른 진동기의 감도를 알아보기 위한 실험 모식도를 나타낸다. 무게 10 g의 철구슬을 30 cm 높이에서 콘크리트 표면에 자유낙하 시켰을 때 낙하지점으로부터 30 cm 떨어진 거리에 설치된 진동기의 밀착 압력 P를 단계별로 변화시켜 가면서 진동기의 감도를 측정하였다. 밀착 압력과 진동기의 감도 결과를 그림 5에 표시하였다. 실험 결과에 의하면 밀착 압력이 초기에서 10 N까지는 불안정한 진동 감도를 보이다가 10 N 이상에서는 안정한 상태를 유지하였다. 이러한 결과는 안정한 상태의 진동기 감도 데이터를 얻기 위해서는 적어도 10 N 이상의 밀착 압력이 작용되어야함을 의미한다.

2.2 초탄성 합금 용수철

일반적인 탄성 특성을 갖는 용수철을 사용하여 2.1절에서 설명했던 성능을 만족하기란 쉽지 않다. 이러한 성질의 용수철로 검층기를 제작할 경우 탄성과 검층기를 시추공벽에 밀착시키기 위해서는 공기압이나 유압과 같은 기계적인 방법을 사용해야 하므로 측정 장비가 대형화 또는 복잡화된다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 초탄성 합금 성질을 갖는 재료를 고려하게 되었다. 이상적인 초탄성 합금재료의 하중-변위 관계를 그림 6에 표시하였다(Inaba, 1995). 초탄성 합금 재료는 탄성재료처럼 직선관계를 보이지 않음에도 불구하고 하중을 제거했을 때 원래의 초기상태로 회복되는 특성을 가지고 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 초탄성 합금 재료는 하중 초기단계에서는 탄성적 거동을 보이다가(1st phase) 하중 중간단계에서는 약간의 하중 증가에

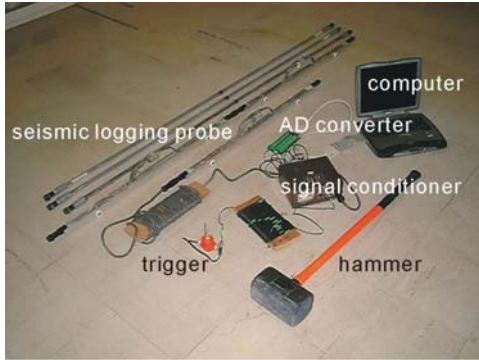


그림 1 탄성과 검증 시스템

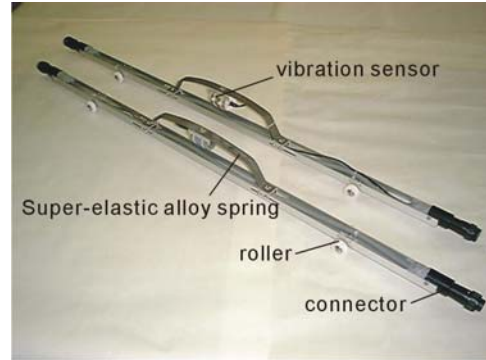


그림 2 탄성과 검증기



그림 3 티탄-니켈 합금판 및 초탄성 합금 용수철

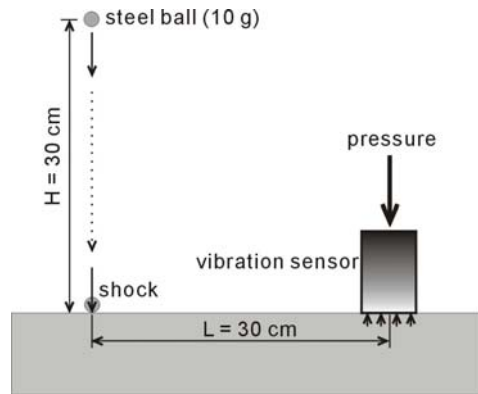


그림 4 탄성과 검증기의 밀착 압력과 진동기 감도 실험 모식도

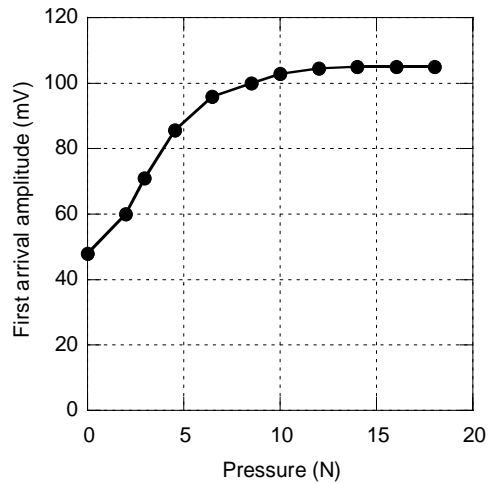


그림 5 진동기 감도와 밀착 압력 관계

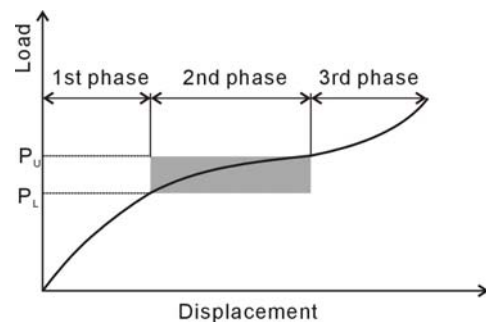


그림 6 초탄성 합금의 이상적 하중-변위 관계

따른 변위가 증가하는 소성적 거동(2nd phase)을 보인다. 열처리 과정이나 합금 배합에 따라 하중-변위 관계는 달라지지만 하중의 증가와 함께 변형을 경화(strain hardening) 현상이 나타

나는 경우도 있다(3rd phase). 그림상의 PU-PL사이 하중에서는 변형이 가장 크게 일어나는데 이 영역에서 초탄성 합금 용수철을 사용하면 측정 시추공이 굽어있었다던가 시추공 표면이 매끄럽지 못하다 할지라도 일정한 압력으로 안정하게 탄성과 검층기를 고정시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 초탄성 합금 용수철 검층기를 이용할 경우 시추공의 크기나 형태, 시추공 내의 상태 등에 제약을 받지 않고서 압반 상태를 측정할 수 있다는 장점이 있다. 더군다나 수직시추공은 물론 경사시추공이나 수평시추공에도 적용이 가능하므로 활용 범위가 넓다 하겠다.

초탄성 합금 용수철의 형상은 그림 7과 같다. 이러한 형상의 용수철에 중앙부분의 암나사를 이용하여 진동기를 고정시킨다. 이 암나사의 머리부분을 통해서 시추공벽에 진동기를 밀착시킨다. 길이 30 cm, 폭 20 mm, 두께 0.9 mm 크기의 니켈과 티탄 합금 평판에 열처리 과정을 거치면서 블록한 형태의 형상을 기억시킨다. 이렇게 해서 만들어진 초탄성 합금 용수철은 그림에서 보는바와 같이 길이와 높이에 있어서 기본 형상과 다르다. 즉 암나사가 고정하고 있는 진동기의 높이는 기본 형상보다 높은 반면, 길이는 짧다.

2.3 측정 방법

그림 8은 탄성과 검층기를 이용하여 압반 사면을 측정하는 방법에 대해서 개략적으로 나타낸 모식도이다. 먼저 탄성과 검층기를 시추공에 투입한 후 측정하고자 하는 위치에 고정시킨다. 둘째, 그림 1에서 보이는 해머를 이용하여 압반 사면의 표면을 타격한다. 타격에 의해 발생한 진동이 압반 내를 전파한 후 탄성과 검층기에 수신된다. 한편 타격을 가한 지점과 가까운 곳에 설치된 트리거(trigger) 감지기가 탄성과 검층기보다 빨리 진동을 감지해내어 신호 처리기(signal conditioner)에 의해 TTL신호가 발생되며 이때 형성된 파형을 기록하게 된다. 그러므로 TTL신호가 발생될 때부터 탄성과 검층기에 신호가 감지될 때까지 충분한 기록장을 확보해야 할 필요성이 요구된다. 신호 파형 기록은 측정한 후에 분석하고 해석하는 과정을 고려하여 본 연구에서는 일본의 RST사의 NJW-2012-RM 모델인 100Hz~10kHz 주파수 범위를 갖는 4채널의 직접 디지털 신호 처리기를 사용하였다. 파형 자체가 고주파 성분을 포함하면서 진폭이 클수록 초동 파형을 찾는데 용이하다. 타격에 의해 생성된 파형에는 고주파 성분이 포함되어 있지만 진동이 전파되는 거리가 수 미터를 초과하면 고주파 성분이 감쇄되어 1 kHz 정도의 신호 성분만 남게 된다. 따라서 5~10 kHz 정도의 신호를 처리할 수 있는 AD 변환기가 있으면 충분히 측정이 가능하다. 파형을 분석하고 해석하는데 있어서도 신호 처리기의 증폭 배율을 조정함으로써 충분한 양질의 파형을 획득할 수 있다.

탄성과 검층기를 압반 시추공 기저부에 투입·설치하면 전파거리가 멀어지므로 신호가 감쇄하게 된다. 일반적으로 신호를 측정할 때 증폭을 전기적으로 시킴으로써 감쇄를 줄일 수 있는데 감쇄가 크면 증폭부분에서는 신호측정이 불가능하게 된다. 신호측정이 불가능한 거리는 압반 상태에 따라 다르지만 석회암과 같은 압반에서는 약 15 m를 초과하면 초동 파형을 찾는 것이 불가능하게 된다. 이러한 경우는 전기적인 증폭 외의 방법인 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, SN)비를 개선하여 처리해야 할 필요성이 있다. 본 연구에서는 타격 위치를 정한

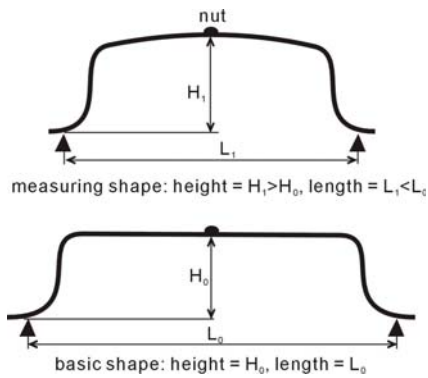


그림 7 초탄성 합금 용수철의
형상

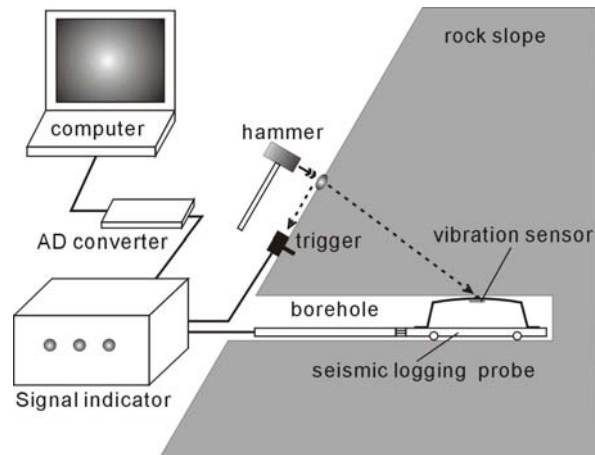


그림 8 탄성과 검층 측정 모식도

후 해머를 이용하여 비슷한 힘으로 타격을 실시하기 때문에 수차례 타격을 실시하더라도 비교적 비슷한 크기의 진동을 발생시킬 수 있다. 진동을 일으키는 메카니즘이 동일하므로 진동의 전파 경로도 거의 일정하다고 할 수 있다. 이렇게 형성된 파형은 선형성을 보이기 때문에 중합을 시킬 수가 있다. 각 파형 중에는 신호 성분과 잡음(noise)이 함께 존재하지만 진동 발생 메카니즘, 전파 경로, 수신점 부근의 상황이 일정하면 신호 성분은 변하지 않는다. 잡음의 발생 원인은 다양해서 특정 짓기가 간단하지 않지만 불규칙적으로 발생하기 때문에 중합(stack)을 이용하여 제거할 수 있다. 신호처리이론에 따르면 중합시킨 파형의 수를 n 이라고 할 때, 중합시키기 전의 파형에서 확인한 잡음의 진폭은 $1/\sqrt{n}$ 으로 표현될 수 있으므로 그 값이 감소됨을 나타냈다 (Al-Sadi, 1980; 민경덕 외, 1986; Steeples & Miller, 1990; 현병구, 1994). 신호는 중합에 의해 진폭이 증가하므로 초기 진폭을 찾는 것이 훨씬 쉽다. 이상의 처리과정을 거치면 암반 사면의 기저부까지 정보를 얻을 수 있다.

3. 암반 사면의 손상대 측정

그림 9와 같이 화약발파로 인하여 발생한 Tsugumi 노천 채굴 석회석 광산의 잔벽 사면의 손상대를 평가할 목적으로 탄성과 검층법을 이용한 조사를 실시하였다. 조사는 두개의 수평시추공 HB-1과 HB-2를 대상으로 수행되었다. 두 시추공의 해발 높이는 800 m로 동일한 위치에 있으며 직경은 90 mm이고 깊이는 25 m로 같다. 두 시추공은 수평거리상 약 200 m 떨어져 있으며 천공 방위도 다르다. 측정 대상 암반 사면은 PS 제어 발파 방법을 사용하여 발파를 수행하였다. 측정은 수평시추공 입구에서부터 기저부까지 1 m간격으로 탄성과 검층기를 이동해 가면서 수행되었다. 총 20개 지점에서 측정이 이루어졌으며 소요된 총 시간은 약 30분 정도이다. 그림 10은 석회석 암반 사면 현장에서 탄성과 검층기를 이용하여 데이터를 획득하는 모습을 보여준다.



그림 9 석회석 광산 잔벽 암반
사면

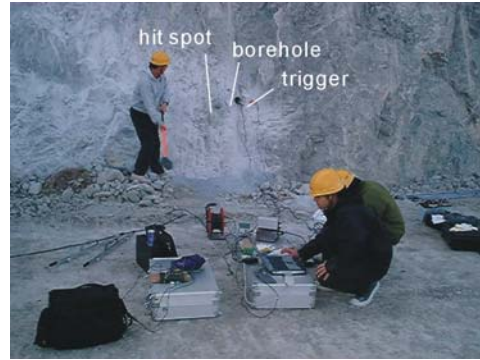


그림 10 원위치 암반 사면 측정

4. 결과 및 토의

탄성과 검증법을 이용한 석회석 광산의 잔벽 사면 손상대 평가를 위한 측정 결과를 그림 11에 나타내었다. 그림은 수평시추공 입구에서 1 m간격으로 기저부까지 20개 지점에 대한 수평시추공 깊이에 따른 파의 도달 시간 관계를 두개의 수평시추공 HB-1과 HB-2에 대해 각각 보여준다. 그림에서 나타내듯이 심도가 깊어질수록 파형의 감쇄 정도가 증가하므로써 진폭도 작아짐을 알 수 있다. 측정된 상태의 진폭으로 파형을 분석할 때 심도가 깊은 곳의 파형은 진폭을 확인할 수 없게 됨으로 각 파형을 최대진폭으로 정규화해서 표현하였다. 각각의 심도에서 측정된 파형의 초동주시(first arrival)를 확인한 후 그 위치를 삼각기호로 표시하였다. 두 수평시추공에서의 초동주시 위치는 다르게 나타나지만 어느 일정 심도 이상이 되면 두 시추공 모두에서 거의 직선에 가까운 양상을 보인다. 이들 심도의 초동주시 부분을 근사시키면 그림 상의 직선이 되며, 이 직선의 기울기가 평균 P파 속도에 해당된다. 두 시추공의 평균 P파 속도는 모두 3.68 km/s로 나타났다. 그림 11에서 확인한 초동주시 위치만을 그래프 상에 표시하면 그림 12와 같다. HB-1의 경우 초동주시의 크기는 암반 사면 표면으로부터 심도 5 m지점까지와 그 이상의 심도에서 확연하게 달라짐을 알 수 있다. 두 부분을 각각 나누어서 근사시킨 결과 5 m지점까지는 1.37 km/s의 평균 P파 속도를 보이다가 그 이상의 심도에서는 3.68 km/s로 증가하였다. HB-2의 경우 암반 사면 표면으로부터 심도 10 m지점에서 초동의 크기가 달라지므로 HB-1과 같은 방법으로 두 부분으로 나누어서 근사시킨 결과 10 m지점까지의 평균 P파 속도는 1.55 km/s를 보이다가 그 이상의 심도에서는 3.68 km/s로 증가하였다. 이러한 측정 결과는 화약발파로 인하여 생성된 손상대의 영역이 HB-1의 경우 암반 사면 표면으로부터 최소 5 m이내, HB-2의 경우 최소 10 m이내에 분포하고 있음을 지시한다. 반면 그 이상의 심도에서는 화약발파에 의한 영향이 미약하였거나 거의 받지 않았음을 의미한다. 또한 측정 결과는 화약발파에 의한 암반 손상 정도가 위치나 장소에 따라서 달라지는 것을 보여준다. 이렇게 암반 손상 정도가 달라지는 요인으로는 발파에 의한 영향뿐만 아니라 암반 내에 잠재되어 있는 균열의 배열성과 열림 정도 등의 지질적·역학적 요인도 함께 존재함으로 종합적인 관점에서 손상 정도를 평가하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

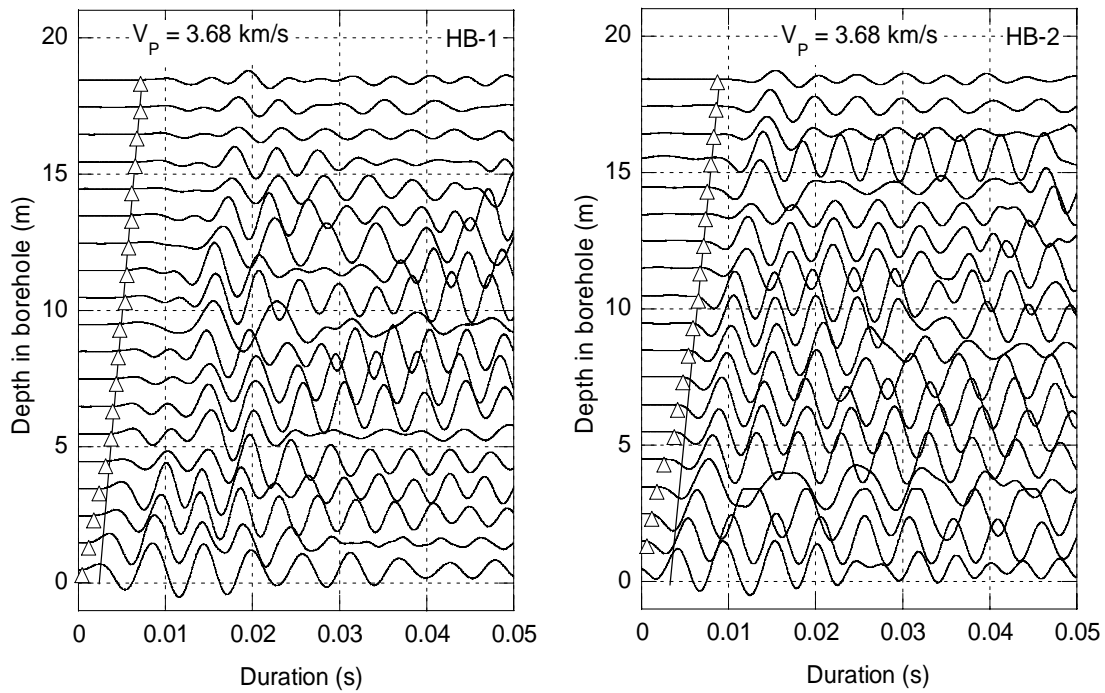


그림 11 석회석 광산의 잔벽 암반 사면 손상대 평가를 위한 측정 예

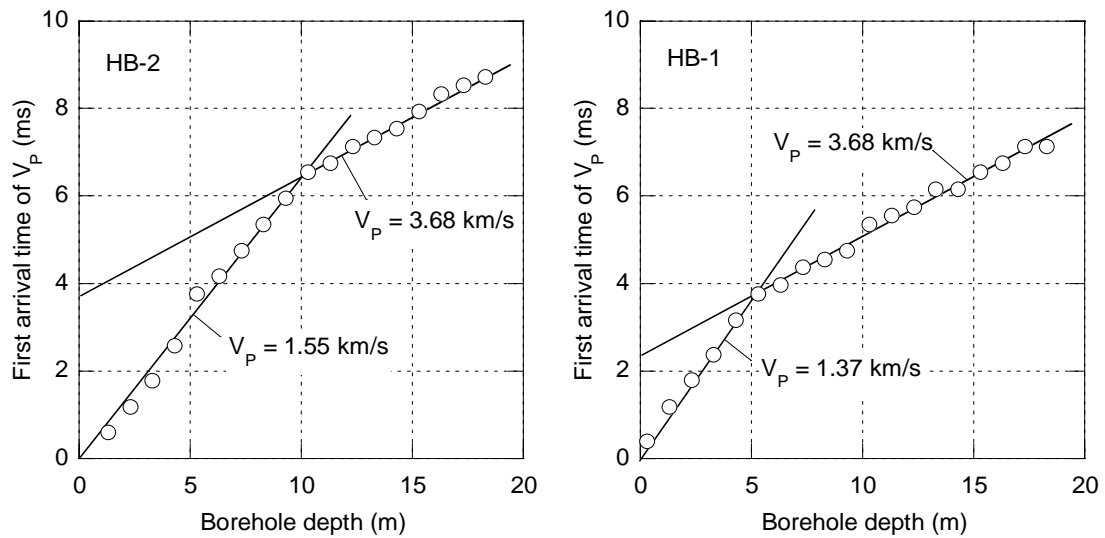


그림 12 수평시추공 HB-1과 HB-2의 초동주시와 손상대 범위

이상의 측정 결과로부터 탄성과 검층법을 이용하여 화약발파에 의한 암반 내의 손상 정도를 P파 속도로써 정량적으로 평가하는 것이 가능함은 물론 손상 범위를 합리적으로 결정할 수 있었다. 또한 그라운드 앵커, 록 볼트, 케이블 볼트, 스파이럴 볼트와 같은 지보재의 설치 심도를 탄성과 검층 결과를 이용하면 보다 효과적이고 경제적으로 결정할 수 있을 것으로 기대된다. 마지막으로 지보재의 설치 전후의 안전 관리에도 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

탄성과 검증법을 이용한 암반 사면 평가에 대하여 몇 개의 결론을 얻었으며 이것을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 탄성과 검증법을 이용하여 암반 내의 손상 정도를 정량적으로 평가하는 것이 가능하였다. 또한 암반 내의 손상 범위도 합리적으로 결정할 수 있었다.

둘째, 탄성과 검증의 조사 결과를 이용하면 지보재의 설치 심도를 보다 효과적이고 경제적으로 결정할 수 있을 것으로 기대된다.

마지막으로, 탄성과 검증법은 지보재의 설치 전후에 대한 안전 관리에도 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

■ 참고문헌 ■

- 김낙경, 2000, 점토지반에 설치된 앵커의 하중전이에 관한 연구, 한국지반공학회지, 16, 145-155.
- 김낙경, 2001, 인장형 앵커와 압축형 앵커의 하중전이에 관한 연구, 한국지반공학회지, 17, 59-68.
- 김래현, 이기환, 이우진, 김대규, 김낙경, 2002, 현장시험에 의한 그라운드 앵커 시스템의 크리프 및 단기거동 특성 연구, 대한토목학회지, 22, 585-594.
- 민경덕, 서정희, 권병두, 1989, 응용지구물리학, 우성문화사, 서울.
- 헌병구, 1994, 물리탐사용어사전, 선일출판사, 서울.
- Al-Sadi, H.N., 1980, Seismic exploration, Birkhauser Verlag, Basel.
- Bawden, W.F., Hyett, A.J. and Lausch, P., 1992, An experimental procedure for the in situ testing of cable bolts, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 29, 525-533.
- Hirata, A., Kokaji, S., Fujita, M., Akamine, A., Fujita, M. and Goto, T., 2003, Dilation stress in borehole induced by a spiral anchor, Proceedings of the 3rd International Symposium on Rock Stress, Balkema, Rotterdam, 499-505.
- Hirata, A., Kokaji, S., Kang, S.S. and Goto, G., 2005, Study on the estimation of the axial resistance of spiral bar based on interaction with ground, Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan, MMIJ, 121, 370-377.
- Hudson, J.A., 1989, Rock mechanics principles in engineering practice, CIRIA, London, 40-47.
- Hyett, A.J., Bawden, W.F., Macsporrán, G.R. and Moosavi, M., 1995, A constitutive law for bond failure of fully-grouted cable bolts using a modified Hoek cell, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 32, 11-36.
- Inaba, T., 1995, Expansive demolition agent method of rock using shape memory alloy, Ph.D. thesis, Sojo University.

- Indraratna, B. and Kaiser, P.K., 1990, Design for grouted rock bolts based on the convergence control method, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27, 269–281.
- Ito, F., Nakahara, F., Kawano, R., Kang, S.S. and Obara, Y., 2001, Visualization of failure in a pull-out test of cable bolts using X-ray CT, *Construction and Building Materials*, 15, 263–270.
- Jeng, F.-S. and Huang, T.-H., 1999, The holding mechanism of under-reamed rockbolts in soft rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 761–775.
- Oreste, P.P. and Peila, D., 1996, Radial passive rock bolting in tunnelling design with a new convergence–confinement model, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33, 443–454.
- Steeple, D.W. and Miller, R.D., 1990, Seismic reflection methods applied to engineering, environmental, and ground water problems: *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists.
- Tannant, D.D., Brummer, R.K. and Yi, X., 1995, Rockbolt behavior under dynamic loading: Field tests and modeling, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32, 537–550.
- Yazici, S. and Kaiser, P.K., 1992, Bond strength grouted cable bolts, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 29, 279–292.