

사면활동에 대한 지반공학적 조사 및 그 적용 사례연구

The Geotechnical Investigation on the Movement of a Slope

김성환¹⁾, Sung-hwan Kim, 유병옥²⁾, Byung-ok You, 정경자²⁾, Gyung-ja Jung, 조성로²⁾, Sung-ro Cho

¹⁾ 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 수석연구원, Research Director, Geotechnical Research Division, Highway Research Center, Korea Highway Corporation

²⁾ 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 연구원, Research Director, Geotechnical Research Division, Highway Research Center, Korea Highway Corporation

개요(SYNOPSIS) : Slope failures were occurred twice at the location of 18 km on Gu-ma Expressway. Geological surface investigation, boring test, and seismic exploration were conducted to determine the cause of failure and sliding shape. Especially in this study, the seismic exploration was used to find out the sliding failure plane. The results of seismic exploration were compared with the results of boring test and the reliability of seismic exploration was examined.

From the results of surface investigation, it was observed that the causes of slope failure were reduction of shear strength and increase of unit weight due to water infiltration along the bedding plane of direction of major crack. The boundary line between soil and rock layers determined by seismograph test is consistent with the direction of slope failure, and is considered as the sliding surface. This result shows a good agreement with the result of boring test when a change of rock structure by the movement of profile is considered.

주요어(Key words) : Slope, Seismic Exploration, Refraction Method, Boring Test, Sliding Surface

1. 서론

고속도로 상에 존재하는 절토사면은 설계 과정에서 충분한 안정성을 검토하며 사면파괴의 가능성이 약간이라도 존재하는 곳에는 방지공을 적용한다. 그럼에도 불구하고 장마나 폭설에 의해서 사면이 붕괴되는 일이 종종 발생하는 것은 사면안정 문제가 토압이나 지지력 이외에 사면의 지질학적 특성의 영향을 많이 받기 때문이다. 특히 암반 사면의 경우에는 암석의 종류, 절리면의 유무와 그 방향, 암반의 상태 등에 의해서 충분한 사면구배를 주었다 하더라도 예기치 않은 붕괴가 발생하기도 한다. 그러나 암반의 절리면이나 방향 및 암의 상태를 육안으로 구별하는 것은 지표에 노출된 경우로 한계가 있으며, 지하 깊은 곳까지 암반의 상태를 가장 정확하게 알 수 있는 시추조사는 비용이 많이 들고 시추공 한 지점의 1차원적인 정보밖에 얻지 못하는 단점이 있다. 이에 최근에는 예비탐사로서만 실시하였던 물리탐사를 지반의 2, 3차원적인 구조 파악에 적용하고자 하는 노력이 활발하다.

본연구에서는 두 차례에 걸쳐 파괴를 일으킨 절토사면에서 지표지질조사, 탄성파탐사 및 시추조사를 실시하여 붕괴원인을 규명하고자 했으며, 특히 암판정과 지층의 구별을 위하여 도입된 굴절법 탄성파탐사의 절토사면에서의 적용성 여부와 문제점에 대해서 논의하고자 한다.

2. 지형 및 지질

본 사면은 구마고속도로 하행선 금호기점 18.3~18.4km 구간으로 사면방향은 N6°W이며 경사는 34° SE이다. 이 지역의 지질은 백악기의 퇴적암으로 주로 사암 및 사질세일로 구성되어 있다. 퇴적암들의 주향은 NE 방향이고 경사는 SE 방향이다. 붕괴 발생 후 측정된 조사지역의 지형은 그림1과 같다. 붕괴로 인하여 토층이 흘러내려 중앙부가 볼록해진 것과 우측부의 계곡을 확인할 수 있다.

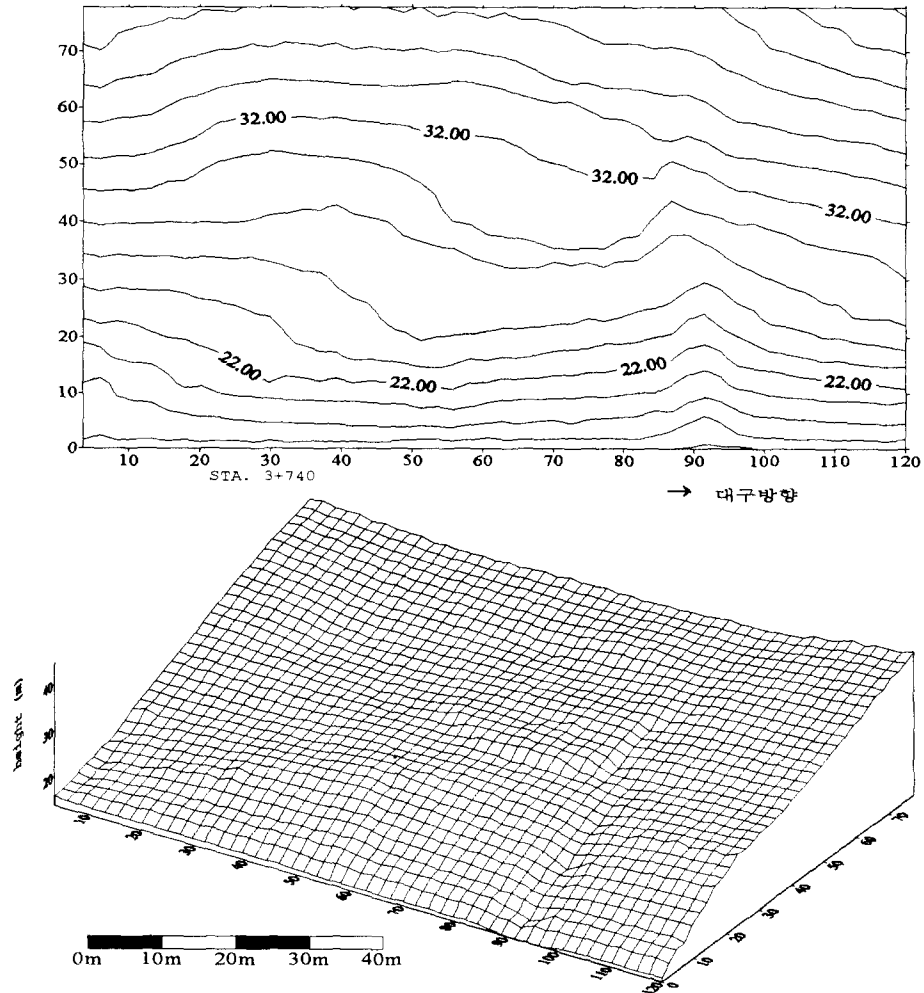


그림 1. 구마고속도로 18.4K(하) 절토사면 지형도

제1차 붕괴는 1996년 6월25일에 발생하였다. 상부 산마루측구에서 50m정도까지 인장균열을 확인할 수 있었고 노면 노건부가 음기되었다. 또한 전면부 L형 측구에 균열이 발생하였음을 확인할 수 있었다. 활동방향은 N50°W이다. 제2차 붕괴는 7월4일에 발생하였다.

3. 탄성과탐사

지표 또는 시추공에서 암석, 광물의 물리적 특성을 측정하여 지하구조, 지하에 부존하는 광물, 지하수 등을 탐사하는 것을 물리탐사라고 한다. 이들 물리탐사는 그 결과 얻어지는 자료의 정확도나 해상도에 비해서 자료를 수집, 분석하여 해석하는 작업이 복잡하여 공학적인 측면에서 쉽게 실용화되지 못하였다.

그러나 최근에는 물리탐사 기기의 해상도와 정확도가 향상되고 대규모 용량의 전산처리가 가능해짐에 따라 자료처리를 위한 프로그램이 상용화되어 지반조사에 활발히 응용되고 있다.

3.1 탐사개요

두 차례에 걸쳐 붕괴를 일으킨 절토사면의 붕괴의 원인을 규명하고 보완공사를 위한 설계시 필요한 기반압선을 찾고자 탄성파탐사를 실시하였다. 또한 시추조사를 병행하여 두 결과를 비교, 분석하여 암종에 따른 탄성파 속도의 분포와 암의 상태와의 관계를 구하고자 하였으며 이 후의 탄성파속도의 데이터베이스화 작업시 필요한 경상계 퇴적층에서의 탄성파 속도를 획득하고자 하였다.

탐사는 절토사면의 2차 붕괴 후인 1996년 7월 5일과 10일에 Geometrics사의 SmartSeisTMS12 기기를 사용하여 실시되었다. 조사사면에 5개의 탄성파탐사 측선을 설치하였고 시추는 6개의 지점에서 실시되었는데 그 위치는 그림2와 같다. 24개의 수신기를 사용하여 측선1과 측선3은 수신기 간격을 4m로 측선4와 5는 수신기간격을 2m로 설치하였으며 측선2의 양끝단은 수신기 간격을 1m로 중앙부는 2m 간격으로 설치하였다. 탄성파 에너지는 해머링에 의해서 발생시켰으며 사용된 수신기의 주파수는 28Hz였다.

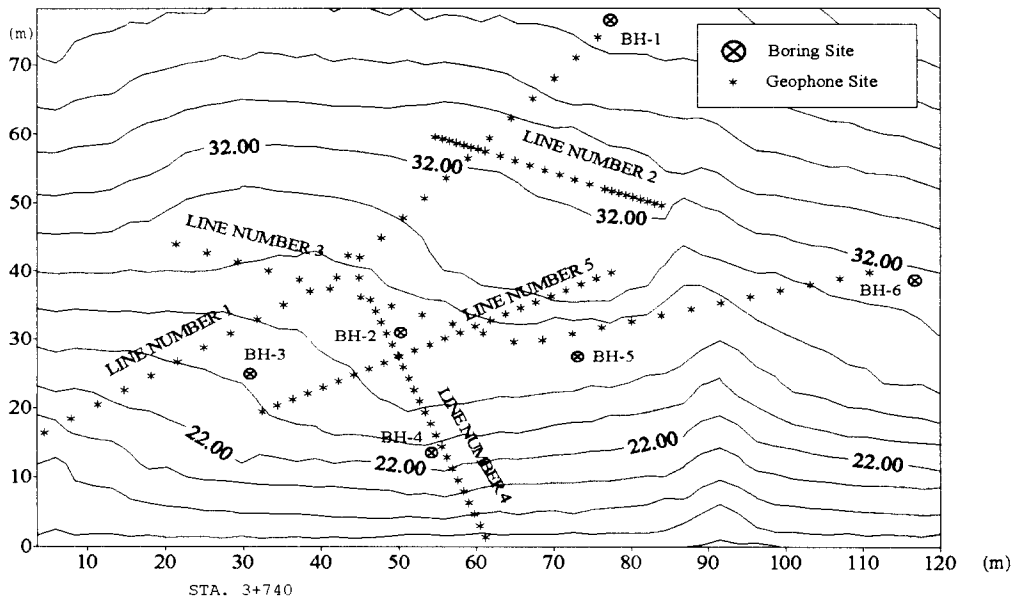


그림 2. 탐사지역의 측선 및 시추조사 위치

3.2 탐사원리 및 자료처리 방법

굴절법에 의한 탄성파탐사는 해머 타격이나 다이내마이트 발파와 같은 인위적인 에너지로 파를 발생시켜 심부층에서 굴절되어 오는 파를 감지하여 해석하는 탐사법이다. 상부의 지층에서 속도가 높은 하부층에 임계각으로 입사한 파는 층의 경계면에 평행하게 굴절되며 이때 에너지는 경계면을 따라 하부층의 속도로 전파하며, 에너지의 일부는 연속적으로 상부층으로 재굴절하여 지표면에 도달하게 된다. 이때 에너지원에서 어느 정도의 거리가 되면 속도가 빠른 하부층을 통과하여 오는 굴절파가 지표면의 속도로 전달되어 오는 직접파보다 먼저 수신기에 도달하게 된다. 굴절법 탐사는 이렇게 임계굴절(critical refraction)이 일어날 수 있는 경우에만 사용가능하고 수신기에 제일 먼저 도달하는 초동(first arrival)을 읽어서 주시곡선도(time-distance chart)를 작성하여 각 직선들의 기울기로부터 지층의 속도를 결정한다. 일직선으로 측선을 설정하여 탐사를 실시하는 인라인(in-line) 탐사시는 측선의 양끝에서 에너지원을 받

생시키는 왕복측정을 원칙으로 하는데 이는 일반적으로 지층에 경사가 있기 때문이다. 수진기 전개 길리와 수진기 간격은 탐사심도나 지층의 분해 정도에 따라 결정하는데 경험상 수진기의 총 전개 길리는 조사 심도의 약 5배 이상이 되어야 한다(민병덕; 서정희; 권병두, 1987).

굴절법 탐사자료의 해석방법은 여러 가지가 있다. 절단시간법(Intercept Time Method), 지연시간법(Delay Time Method)(Barry, 1967), 차분법(Difference Method of Plus-minus Method), 일반화된 상반 해석법인 GRM(Generalized Reciprocal Method)(Palmeer,1981) 등이 있다.

본 탐사의 해석은 지연시간법에 의해서 실시되었는데, 지연시간이란 파가 상부층내에서 하향 또는 상향 경로를 주행하는데 걸리는 실제 시간과, 이 경로를 굴절 경계면에 수직으로 투영하였을 때의 경로를 하부층의 속도로써 주행하는데 요하는 시간과의 차이이다. 그림3에서 상부층의 속도를 v_1 , 하부층의 속도를 v_2 라고 할 때, 발파점 S와 수진점 G에서의 지연시간 ΔT_s , ΔT_g 는 각각 다음과 같다

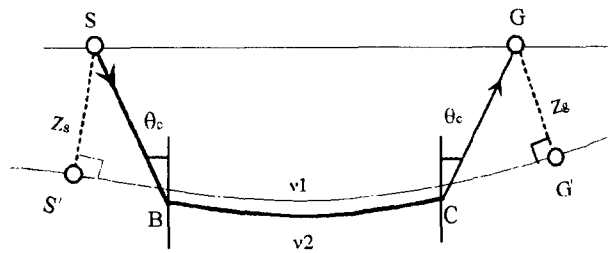


그림 3. 경사가 일정하지 않은 면에서의 굴절파

$$\Delta T_s = \frac{SB}{v_1} - \frac{S'B}{v_2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_G &= \frac{CG}{v_1} - \frac{CG'}{v_2} \quad (2) \\ &= Z_G \frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \end{aligned}$$

총지연시간은 식(1)과 (2)를 합하여 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta T_{SG} &= T_t - \frac{SG}{v_2} \quad (3) \\ &= \Delta T_s + \Delta T_G \end{aligned}$$

여기서 T_t 는 발파점에서 수진점까지의 실제 총 주행시간이다. 이 식에서 ΔT_G 는 다음과 같고,

$$\begin{aligned} \Delta T_G &= T_t - \frac{S'G'}{v_2} - \Delta T_s \quad (4) \\ &= \frac{1}{2}(T_1 + T_2 - T_t) \end{aligned}$$

지연시간을 통한 심도결정은 식(5)와 같이 구해진다.

$$Z_G = \frac{\Delta T_G v_1 v_2}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (5)$$

4. 탐사결과 및 분석

본 탐사에서 이용한 자료처리 프로그램은 SIPQC로 수신기와 발파점이 같은 평면 일직선상에 있다고 가정하여 탄성파의 속도 및 심도를 결정한다. 이로 인하여 사면에서의 탄성파탐사를 위한 측선은 사면의 횡방향으로 설정하는 것이 본 프로그램을 이용하여 해석할 때 오차를 줄일 수 있으나, 사면의 지형과 식생의 영향으로 인하여 종방향으로 측선을 설정할 수 밖에 없었다.

이번 탐사에서는 고속도로를 주행하는 차량의 소음으로 인하여 탄성파 신호의 구분이 어려웠는데 특히 터널을 통과하는 차량에 의한 진동과 고속도로 노면이 소음흡수 효과가 적은 콘크리트 포장되어서 이에 의한 영향이 크게 나타난 것으로 보인다. 또한 해머링에 의해서 유발된 탄성파 에너지가 소음에 비해서 상대적으로 약하여 초동의 구별이 어려웠다. 탄성파 신호에 비해서 잡음은 일반적으로 고주파이므로 본 해석 프로그램에서 실행할 수 있는 고주파 절단 필터를 사용하여 신호대 잡음비(S/N)를 향상시켰다.

그림2의 각 측선별 탐사결과는 그림4에서 그림8에 나타났다. 5개의 모든 측선에서 제1층과 제2층은 탄성파속도 800~1,000m/sec에서 구분되었고, 제2층과 제3층의 구분은 측선1은 1,765m/sec, 측선2는 3,267m/sec, 측선3은 1,509m/sec, 측선4는 4,246m/sec에서 되었고 측선5의 경우에는 구분이 안되었다. SIPQC는 측선이 직선인 경우의 해석 프로그램이므로 중앙부에서 측선이 꺾어진 측선1과 측선3의 경우에는 측선의 전면과 후면을 따로 계산하였기 때문에 해석심도가 15m 이하밖에 되지 않았다. 다른 3개의 측선도 타격지점과 수신기와의 거리가 멀리떨어진 경우에는 탄성파 신호의 구별이 어려워 해석에서 제외시킴으로써 심도 20m 이상의 심부층에 대한 정보를 얻지 못하였다.

시추조사는 연구지역내의 6개의 지점에서 실시되었다. 전반적으로 RQD가 저조하며 특히 경암층의 회수율에 비해서 RQD가 현저하게 낮음으로써 암반에 많은 절리가 있음을 알 수 있는데, 특히 시추공 BH-4에서는 심도 11.7~13.1m의 1.4m 두께에서의 회수율이 100%임에 비해서 RQD는 0%로 나타났다. 회수율과 RQD가 특정 깊이에서 낮게 나타나는데 이는 퇴적층의 층리면을 따라서 파쇄가 진행되었음을 나타낸다.

탄성파탐사 결과를 시추결과와 비교하여 그림9에 나타내었다. 이 그림에서는 시추공과 가까운 위치의 탄성파탐사 측정에서의 결과를 도식화한 것으로 탄성파속도에 의한 지층경계와 시추결과에 분류된 암반의 경계를 나타내고, 비교대상간의 거리에 따른 편차를 고려하여 두 결과를 연관시켜 보았다. 탄성파속도 700~1200m/sec를 풍화암으로 1200~1900m/sec를 연암으로 하고 4000m/sec 이상은 경암으로 분류하였는데 이는 건설부 표준품셈(1996)의 사암 및 석회암의 자연상태에서의 탄성파속도에 의한 암반분류를 따른 것이다. (a)는 산정상부에 위치한 시추공BH-1의 시추결과이다. 탄성파 결과로는 측선의 길이와 에너지원의 제약조건으로 인하여 1765m/sec이상이 되는 속도 경계층을 찾을 수 없어 연암층의 경계를 연관시키지 못하였다. 그러나 23번 측정에서 24번으로 가면서 연암의 심도가 낮아지고 있으므로 그 경향성은 일치하며, 토질주상도에서 연암층으로 분류된 심도 6.0m~8.8m의 회수율이 14%, RQD가 8%인 것을 감안한다면 이 층을 탄성파속도가 827m/sec인 층일 가능성이 존재한다. (b)의 BH-2의 위치는 3번 측선까지의 거리가 4번측선까지의 거리의 3배이상이다. 토질주상도에서의 풍화암과 연암의 경계가 탄성파속도에서는 보이지 않는다. (c)에서는 BH-3의 위치가 비교 탄성파측점에 비해서 고도가 높아서 토층이 두껍게 나왔으며, 경암층으로 분류된 심도 9.0~10.8m의 회수율은 47%, RQD는 24%로 오히려 탄성파속도에 의한 경계와 일치하는 것으로 보인다. (d)에서는 보령주상도에서의 풍화암까지의 경계가 460m/sec의 경계 경향을 따른다. (e)와 (f)에서는 경향이 잘 일치함을 볼 수 있다.

그림9에서 보여지듯이 토질주상도에 의한 암의 분류는 토층과 풍화암의 경계 및 연암과 경암과의 구분에서 정성적인 판단에 의존하므로 탄성파속도에 따른 경계위치와 비교해 볼 때 그 일치도가 낮다. 또한 시추결과에서도 알 수 있듯이 이 지역의 암상은 위치에따라 변화가 심하여 비교에 어려움이 있었다.

탄성파속도에 의한 지층의 경계를 측선별로 그 양상을 비교하면, 붕괴방향과 거의 일치하는 방향으로 배열된 1번 측선의 암선은 산정상 방향으로 분지형태를 이루다가 사면의 지형대로 낮아진다. 붕괴가 일어난 지역을 가로질러 배열된 측선 2의 경우는 그림5에서 확인할 수 있듯이 지층의 경계가 수평이고 토층의 깊이가 10m로 나타났다. 측선3의 지층의 경계는 측선의 우측에서 좌측으로 낮아지다가 좌측의

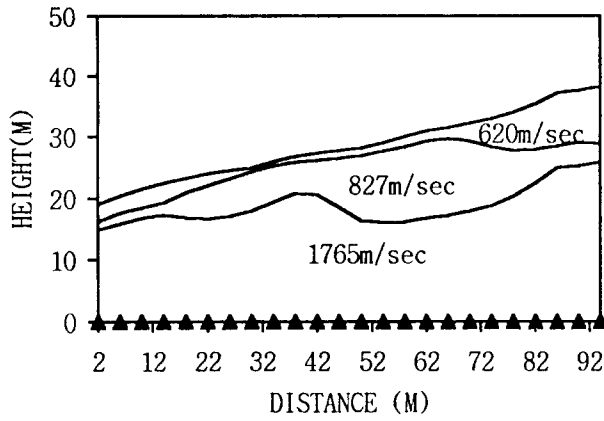


그림4. 측선1의 탄성과탐사 결과

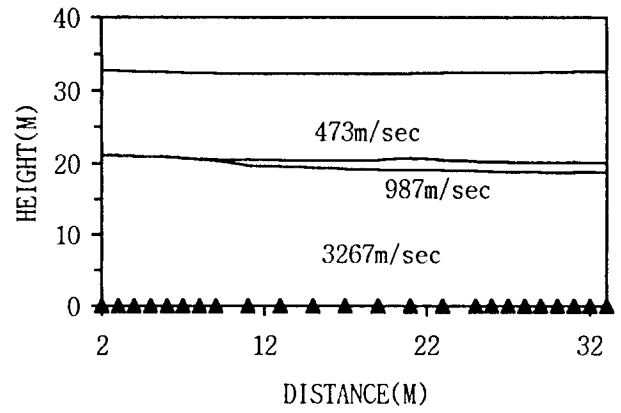


그림5. 측선2의 탄성과탐사 결과

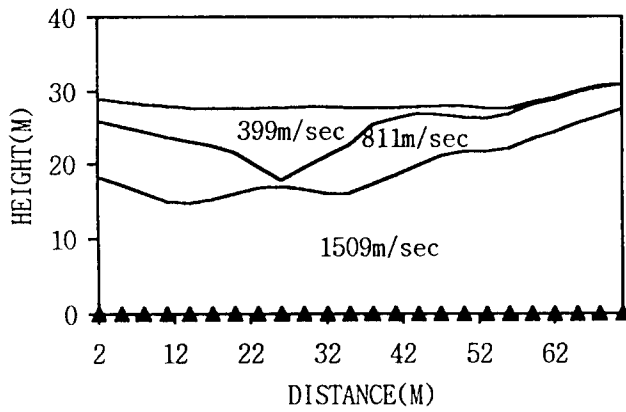


그림6. 측선3의 탄성과탐사 결과

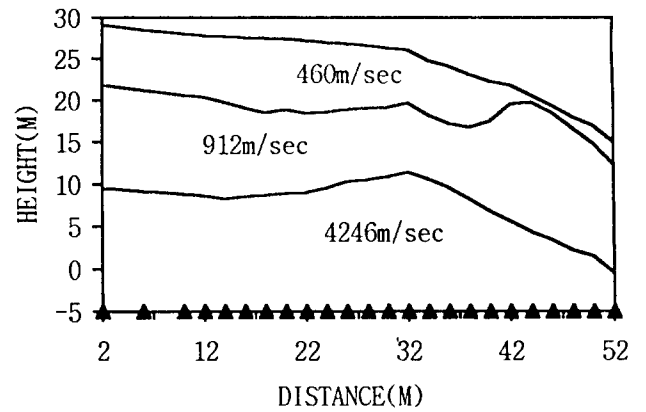


그림7. 측선4의 탄성과탐사 결과

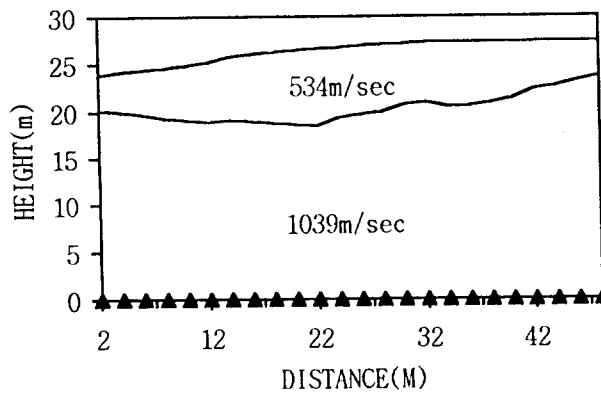
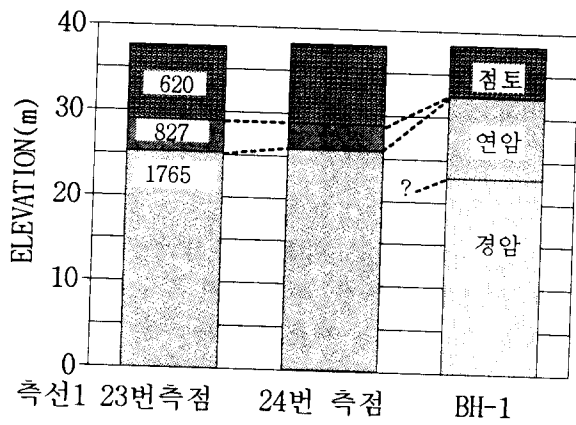
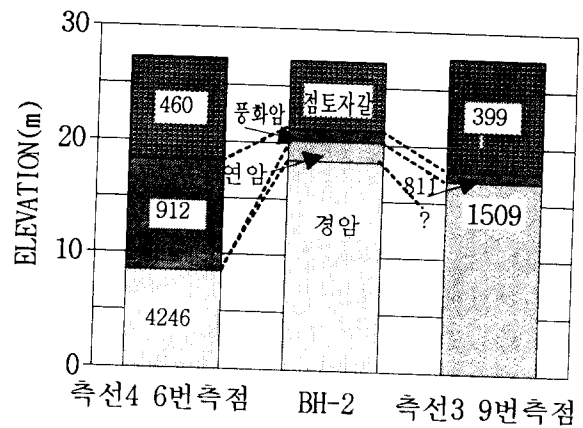


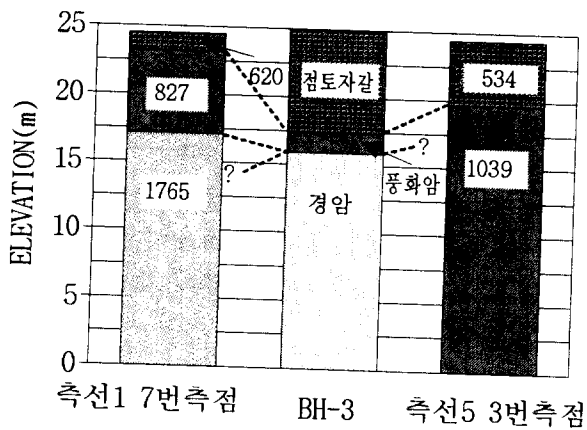
그림8. 측선5의 탄성과탐사 결과



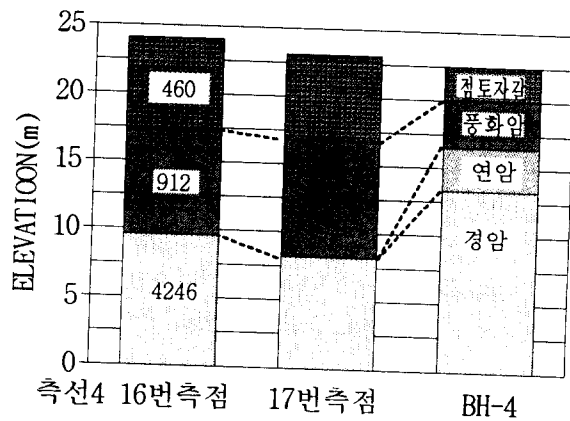
(a)



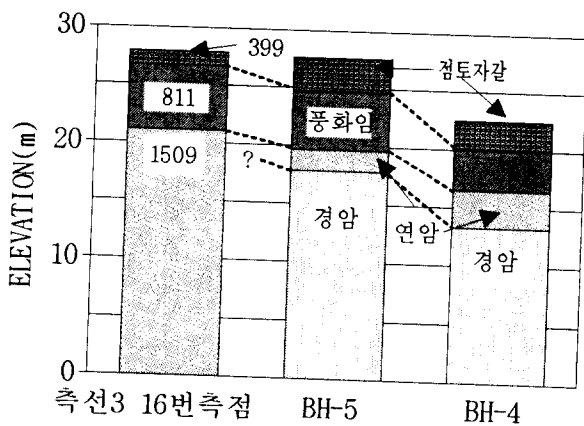
(b)



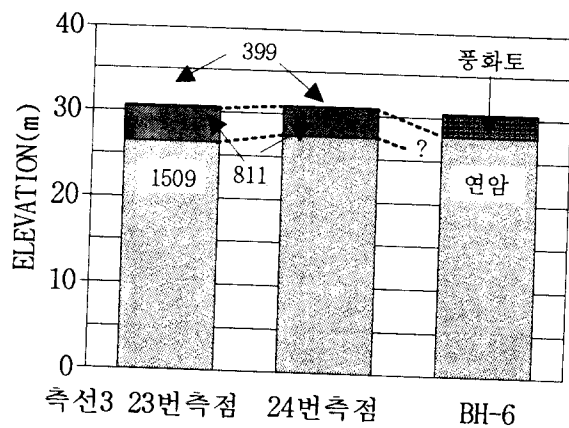
(c)



(d)



(e)



(f)

그림9. 탄성과탐사결과와 시추결과 비교도

끝부분에서 약간 높아진다. 특히 이 측선의 중앙부의 토층은 심도가 깊게 나타나고 속도 또한 399m/sec의 작은 값을 보이는데 이는 붕괴의 영향으로 점토지반의 강도가 저하되었기 때문인 것으로 보인다. 4번 측선은 지층의 경계가 수평을 이루다가 절토사면에서는 절토사면의 지형을 따라 평행하게 나타나는데 이는 고도의 차가 심한 곳에 측점이 위치하여 지형에 의한 효과가 내포되어 있으므로 정확한 자료로 보기가 어렵다. 측선 5번의 경우는 가운데가 블록하다. 이러한 결과는 시추공 BH-2에서부터 산정상 부분의 토층의 심도가 깊고 암선의 경사방향이 붕괴 방향과 일치함을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 두 차례에 걸쳐서 파괴를 일으킨 절토사면의 지반조사를 위하여 탄성과탐사와 시추조사를 실시하였다. 시추조사의 결과 시추공의 위치에 따른 암의 심도 변화가 크고 암의 회수율과 RQD가 저조하여 층리면 사이가 많이 파쇄되고 절리가 있음을 추정할 수 있었다. 지표지질조사 결과 밝혀진 붕괴양상과 배수현상을 종합하면 조사지역에 쏟아진 폭우로 많은 물이 층리면을 따라 유입되어 지반의 강도저하 및 활동을 일으키는 토체의 자중이 증가하여 붕괴가 발생했을 것으로 판단된다.

일반적으로 시추조사는 가장 정확하게 지층의 상태를 알 수 있는 방법이지만 토질주상도를 작성할 때에는 정성적인 판단에 기초하여 암반의 경계를 정한다. 이로 인하여 토질주상도간의 일관성 및 객관성이 결여될 수 있으며 특히 토층과 풍화암층의 경계 및 연암과 경암층의 경계를 정하는데 있어서는 작성자의 주관성이 많이 포함된다. 이를 고려하여 탄성과속도에 의한 지층의 경계면과 토질주상도를 비교해보면 두 결과가 일치함을 알 수 있다. 또한 탄성과탐사의 각 측선별로 암선을 분석해 본 결과 암선의 양상이 붕괴방향으로 기울어져 있고 탐사지역 중앙부의 토층의 두께가 10m이상의 큰 값을 보이고 탄성과 속도도 낮아 붕괴에 의하여 강도가 낮아졌음을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합할 때 암상의 경계면을 파악하고자 할 때 굴절법에 의한 탄성과탐사는 유용할 수 있으며, 특히 보다 정확한 암판정을 위한 정량화에 기여할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 고속도로 절토사면에서의 굴절법에 의한 탄성과탐사는 주행차량에 의한 잡음의 제거와 사면의 경사 방향으로 측선을 설정할 경우, 지형의 영향을 최소화하는 것이 선행되어야 할 것이다.

6. 참고문헌

1. 민병덕, 서정희, 권병두(1987), 응용지구물리학, 우성문화사, 서울, pp.516~545
2. Barry, K.M., 1967, "Delay Time and Its Application to Refraction Profile Interpretation, in Seismic Refraction Prospecting", *Soc. of Expl. Geophys.*, pp.348~361
3. Green, R., 1962, "The Hidden Layer Problem", *Geophys. Prosp.*, Vol.10, pp. 166~177
4. Palmer, D., 1981, "An Introduction to the Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation", *Geophys.*, Vol.46,, pp. 1508~1518