

지표물리탐사 기법을 이용한 FRP보강 그라우팅 공법의 보강효과 확인에 관한 사례연구

A Study on Verification of the FRP Grouting Effect using 2D Resistivity Survey and Seismic Refraction Methods

박종호¹⁾, Jong-Ho Park, *한현희²⁾, Hyun-Hee Han, 채휘영³⁾, Hwi-Young, 김익희⁴⁾, Ik-Hee Kim, 조현⁵⁾, Hyun Cho

¹⁾ 대원토질(주) 상무이사, Executive Director, Daewon Soil CO., Ltd.

²⁾ 대원토질(주) 부장, General Manager, Daewon Soil CO., Ltd.

³⁾ 대원토질(주) 차장, Assistant General Manager, Daewon Soil CO., Ltd.

⁴⁾ 삼성물산(주) 건설부문 이사, Director, Samsung Corporation Engineering & Construction Groupe.

⁵⁾ 쌍용건설(주) 부장, General Manager, SsangYong Engineering & Construction CO., Ltd.

SYNOPSIS : The grout-effect evaluation of the ground reinforcement technique, which has been widely applied to civil engineering and construction fields, is not established for the guidelines of choosing the efficient evaluation method, and in fact the experts have little effort to determine the reinforcement effect quantitatively. The evaluation of the grout was carried out by experiments on core specimen and drilling, which is impossible to evaluate grout-reinforcement effect quantitatively. This paper presents an example on verification of FRP grout-effect using geophysical prospecting on ground surface, which is 2D resistivity survey that easily visualize survey results with color graphics and seismic refraction method that interprets the subsurface seismic velocity structure.

Key words : grout-effect evaluation, FRP grouting, geophysical prospecting, 2D resistivity survey, seismic refraction

1. 서론

1970년대 이후 국·내외 토목공사 분야에 광범위하게 적용되고 있는 지반보강공법은 그 효과의 우수성에도 불구하고 아직까지 보강효과의 확인에 대한 뚜렷한 지침이나 방법이 결정되지 않아 시공효과의 확인이 부족한 실정이며 전문가들의 관심과 과학적이고 정량적인 검증·연구개발이 부족했던 것도 사실이다. 기존의 그라우팅에 대한 보강효과의 평가는 대부분 시추조사 및 한정된 갯수의 시추코어 시험결과로 수행되었으며, 이러한 방법으로는 보강된 지반의 전반적인 그라우팅 성능평가 및 보강효과의 정량화가 불가능하여 최근에는 물리탐사를 이용하여 그라우팅에 대한 지반개량의 효과를 확인하는 사례가 늘고 있는 추세이다.

따라서 본 연구에서는 터널 및 사면 보강공법으로 최근에 개발된 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic) 보강 그라우팅에 대한 보강효과를 비파괴 방법을 이용한 지표물리탐사 기법 중 최근에 탐사기법이 개선되어 급격히 이용이 확대되고 있는 2차원 전기비저항 영상법과 기존의 굴절법 탄성과 탐사를 그라우팅 전·후 동일장소에서 병행 실시하여 전기비저항의 분포 및 탄성과 속도변화를 분석하여 그라우팅 성과 평가에 적용한 사례를 제시하고자 한다.

2. 지질 및 현장현황

2.1 지질개요

본 현장의 지질은 중생대 백악기 중기의 선산 화강섬록암(Granodiorite)이 기반암으로 분포하며, 백악기 말기에 산성암맥(Acidic Dyke)이 관입 분포하고 있으며, 이들을 신생대 제 4기의 충적층이 부정합으로 피복하고 있다.

화강섬록암은 세립 내지 중립질로서 곳에 따라 편상구조를 띠기도 하나 대체적으로는 괴상구조를 나타내며 카리장석과 석영의 함유량에 따라 화강섬록암에서 석영섬록암까지 변한다. 맥암류로는 화강반암, 석영반암 및 석영맥 등의 산성암맥이 주를 이루며 북서-남동 방향이 우세하다.

2.2 현장 현황

○○고속도로 확장공사 건설공사 중 SAT. 1+680 ~1+750 구간은 풍화작용에 약한 기반암의 특성에 따라 완전풍화 내지 심한풍화상태의 사질토로 구성된 풍화대층이 두껍게 분포하고 있어 사면 절토시 절취 경계부에 인접한 기존묘지의 붕괴 우려가 높은 지역으로서 당초 Soil Nailing에 의한 사면보강 공법으로 설계된 구간이나 사질토, 절리 및 균열부의 풍화대에 의한 불연속면을 충전할 수 있는 FRP 보강 그라우팅 공법(C.T.C.=2.0m, L=10.0m)으로 선정된 지역이다.

3. FRP 보강 그라우팅 공법

3.1 개 요

자연사면을 절취함에 있어 지반 강도가 약하여 지반파괴가 우려되는 경우에 지반보강을 위하여 적절한 보조공법을 사용하게 된다. 이러한 보조공법들은 지반을 보강재 및 그라우트재로 적절히 보강하여 지반의 안정성을 증대시키므로 현재 여러현장에서 절토 사면 조성시 널리 적용 되고 있다.

그러나 부분적인 붕괴 등으로 인해 지반이 이완된 경우에는 기존 보강공법으로는 효과적인 보강이 어렵고, 보강재가 강관 또는 강봉이기 때문에 부식 등으로 인한 내구성 확보가 어려워 공법개선의 필요성이 대두되었다.

FRP(Fiberglass Reinforced plastic)보강 그라우팅 공법은 기존의 Soil Nailing공법 또는 Rock bolt공법과 유사하나, 주 보강재를 강봉 대신 고강도 FRP관을 이용하여 그라우트재를 지반에 침투 주입시킴으로써 주변지반의 전단강도를 증가시켜 현장에서 요구하는 품질을 확보할 수 있는 장점이 있다.

우리나라의 토질 및 암반은 많은 공극 및 균열(절리)을 내포하고 있어 해빙기나 우기에 절리면을 따라 크고 작은 많은 붕괴가 발생하므로 이러한 붕괴를 방지하기 위하여 현재 Rock Bolt공법이나 Nailing 공법을 적용하고 있거나 시공 및 유지관리 측면에서 많은 문제점이 발생하고 있어 이를 보완하기 위하여 고강도 유리섬유 보강 플라스틱관을 이용한 보강공법(FRP 보강그라우팅 공법)을 개발하여 사면의 시공 및 유지관리의 문제점을 해결하고 장기적인 안정성을 확보하는데 그 목적이 있다.

3.2 공법의 특성

기본원리는 Soil Nailing공법과 유사하나, 철근대신 FRP보강재를 지질조건 및 현장상황에 따라 적절한 형상으로 배열·설치하고 FRP보강재 내에 Packer를 설치하여 그라우트재를 주입함으로써 주입재에 의한 지반의 고결로 인하여 FRP보강재와 주변지반을 일체화시켜 차수 및 지반보강 효과를 동시에 얻는 공법이다. 기존의 Soil Nailing과 달리 주재료를 철근이 아닌 고강도 FRP보강재를 사용함으로써 기존공법의 단점인 철근의 부식성과 천공홀내 채움방식의 문제점을 근본적으로 해결할 수 있다.

본 공법의 기대효과는 다음과 같다.

- ▶ 주입재에 의한 지반의 고결로 인하여 원지반의 전단강도증대와 FRP보강재에 의한 빔작용에 의해 지반에 가해지는 상재하중, 토압 등의 분산효과 및 경감효과를 얻을 수 있다.
- ▶ 차수효과 및 보강효과를 동시에 얻을 수 있다.
- ▶ 보강재의 부식에 대한 우려가 전혀 없으며 중량이 가벼워 시공성이 뛰어나다.
- ▶ 시멘트밀크로 주입하기 때문에 원지반을 Soil cement화 시킴은 물론 영구 보강재인 고강도 FRP관을 삽입함으로 보강간격을 넓게 할 수 있어 경제적이다.

4. 물리탐사 기법을 이용한 현장실험

4.1 2차원 전기비저항 탐사(2D Resistivity Survey)

4.1.1 개 요

2차원 전기비저항 탐사법은 최근에 개발되어 급격히 이용이 확대되고 있는 탐사기법으로서 수직탐사와 수평탐사를 조합, 병행하는 방법이며 지하의 지질구조를 영상화하여 고밀도의 해석이 가능한 탐사방법이다.

본 조사에서 사용한 전기비저항탐사 방법은 축선단면에 대한 비저항의 수평 및 수직적 분포상태를 파악할 수 있는 2차원 단극 배열법(2D Pole-Pole Array)을 적용하였다.

지표면의 축선 상에 배치된 전극을 사용하여 획득된 측정자료를 FEM(Finite-Element Method) 및 FDM(Finite-Difference Method)을 이용한 전산프로그램으로 역산 모델링을 실시하여 2차원 영상 단면을 구하는 방법으로서 비저항 영상법, 고밀도 전기탐사법, 2차원 전기비저항 영상법이라고도 불린다.

4.1.2 축선설정 및 현장실험

일반적으로 탐사 축선의 방향은 예상되는 지질구조선에 가능한 한 직교되도록 설정되어야 하며 측정 간격의 결정은 요구되는 탐사심도에 따라서 적절이 조정되어야 한다. 따라서 금번 탐사에서 실시한 2차원 전기비저항 탐사는 탐사 목적상 설계된 사면의 횡방향으로 STA.1+700지점이 탐사축선의 중앙측점이 되도록 축선 방향을 설정하였으며, 단극 배열법(Pole-Pole Array)을 이용하여 그라우팅 전에는 사면 전반에 걸쳐 발달되어 있는 지질구조대 및 연약대의 연장성 및 방향성 등을 파악하기 위하여 측정간격을 3m로 설정하였으며, 그라우팅 후에는 주입재의 확산에 따른 비저항치의 분포변화에 대한 정밀한 자료를 얻기 위하여 측정간격을 2m로 설정하였다.

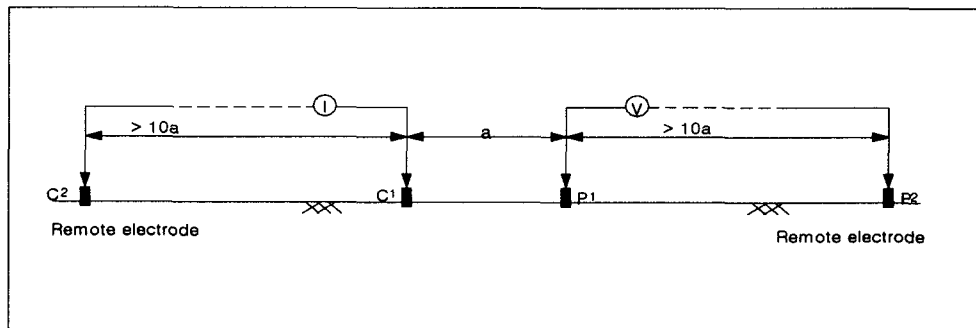


그림 1. Pole-Pole Array의 모식도

본 탐사에 적용된 단극 배열법(Pole-Pole Array)의 특징은 이론적으로는 2개의 전극(전류전극 C_1 , 전

위전극 P₁)이 이용되지만 실제 탐사에서는 원거리 전극(원거리 전류전극 C₂, 원거리 전위전극 P₂)이 포함되는 4전극 배열을 이용한다는 점이다(그림 1.) 이때 전류전극 C₁과 전류전극 P₁사이의 최대거리(a)는 단위전극(unit electrode)간격의 6~10배이며, 2개의 전극(C₁, P₁)으로부터 원거리 전극(C₂, P₂)까지의 거리는 최소한 C₁과 P₁ 사이의 전극간격의 10배 이상이 되어야 한다.

따라서, 두 원거리 전극 C₂, P₂는 탐사측선의 양단으로부터 원거리에 고정 설치하고, 그 사이에 전류전극 C₁과 전위전극 P₁을 이동시키면서 전기비저항치를 측정하게 됨으로 작업이 신속하게 이루어질 수 있다. 이 경우 겉보기 전기비저항(Apparent Resistivity) 값(ρ_a)은 다음 공식에 의해 계산된다.

$$\rho_a = 2\pi \cdot \frac{\Delta V}{I} \cdot a \quad (1)$$

여기서, $\Delta V/I$ 는 측정된 저항(Resistance)값이며 a는 전류전극 C₁과 전위전극 P₁사이의 거리이다.

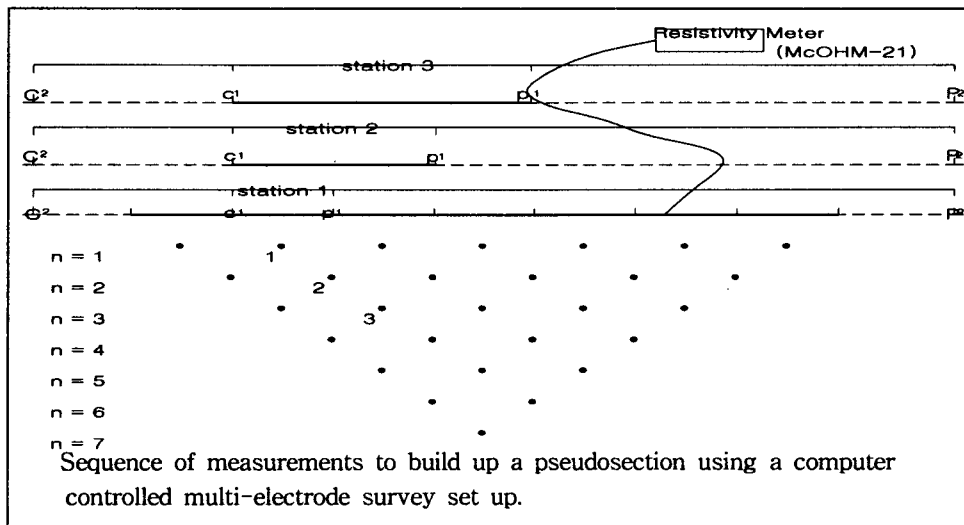


그림 2. Pole-Pole Array에 의한 2차원 전기비저항 탐사 개념도

그림 2는 단극 배열법에 의한 겉보기 전기비저항 측정단면을 도시한 것이다. 이 단면에서 조합가능한 모든 측정점에 대한 측정이 이루어진다. 측정에 사용된 장비는 일본 OYO사의 McOHM-21으로서 모두 32개의 전극이 연결된 전선을 Geoelectric scanner에 연결하여 측정 조합에 따라 자동측정이 이루어지며 측정값은 Floppy diskette에 저장한 후 그 값들을 실내에서 분석한다.

4.1.3 측정 자료 분석

2차원 전기비저항 탐사로부터 얻은 자료를 이용하여 지하 지질구조에 대한 2차원 전기비저항 모델을 결정하기 위하여 Loke에 의해 개발된 RES2DINV Ver. 3.4(1999)를 이용하였다. 이 프로그램에 사용된 역산 Routine은 2차원 전기비저항 자료에 대한 Smoothness-Constrained Least-Squares Method (deGroot-Hedlin & Constable, 1990 ; Sasaki, 1992)에 기초를 두고 있다.

또한, Quasi-Newton Optimization Technique에 기초한 새로운 Least-Square Method가 적용되었다.

이 방법의 장점은 여러 가지 다른 유형을 가진 값들에 맞게 Damping Factor와 Flatness Filter를 조정할 수 있다는 것이다. 해석에 사용된 2차원 모델은 지하지질 구조를 많은 사각형의 블록으로 나눈다. 블록의 배열은 가상단면도 상에서 측정점의 분포에 연결된다. 블록의 분포와 크기는 블록의 수가 측정점의 수를 초과하지 않도록 프로그램에 의해 자동적으로 생성된다. 블록 맨 아래 열의 심도는 대략 가장 큰 전극간격을 갖는 측정점의 탐사심도와 같도록 조정된다(Edwards, 1997).

이 프로그램의 목적은 실제 측정과 일치하는 겐보기 전기비저항 가상단면도를 만드는 사각형 블록의 전기비저항 값을 결정하는 것이다. 블록의 첫 번째 층의 두께는 단위전극 간격의 0.9배이며, 그 아래 층으로 내려갈수록 두께는 10%(또는 25%)씩 증가한다. Optimization 방법은 기본적으로 모델 블록의 전기비저항 값을 조정함으로써 계산 겐보기 비저항 값과 측정 비저항 값의 차를 줄여나간다. 이 차이에 대한 측정은 RMS(Root-Mean-Squared) Error에 의해 주어진다. 그러나 가장 작은 RMS Error를 갖는 모델이 때로는 모델 비저항 값에서 크고 비현실적인 변화를 보여주기도 하기 때문에 지질학적인 관점에서 항상 최적의 모델이 되는 것은 아니다. 일반적으로 가장 신중한 접근은 RMS Error가 크게 변화를 보이지 않는 반복수행 단계에서의 모델을 선택하는 것이며 보통 3 ~ 5번의 반복수행으로 이루어진다.

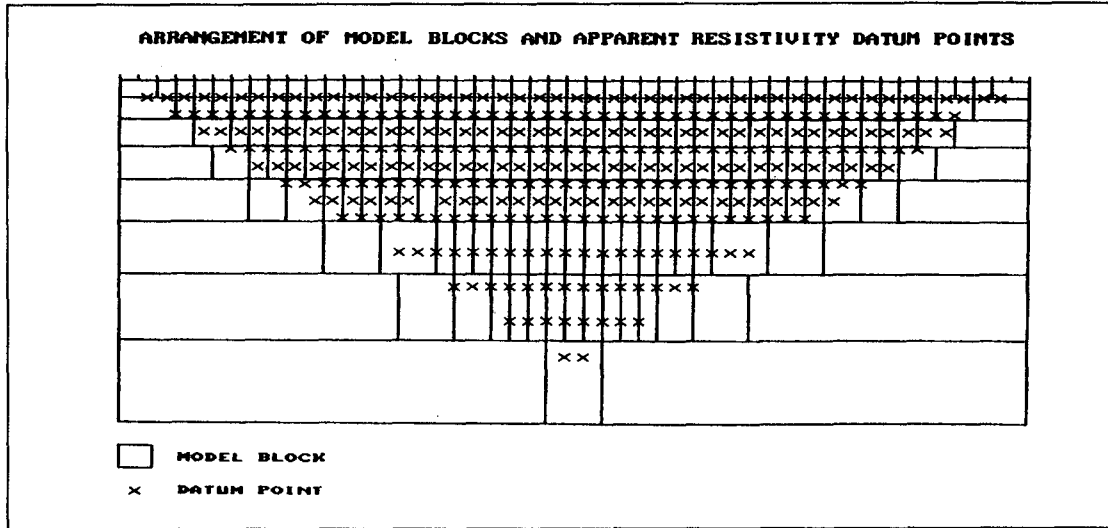


그림 3. 2차원 전기비저항 탐사 모델 블록

상기 그림과 같이 전극간격과 배열방법에 따라 최고 8개의 심도층까지 수회의 측정이 자동으로 진행되며 동일층의 Model Block에 각기 상이한 비저항치가 상대적인 High-Low값을 형성하여 수직, 수평적인 등전위 곡선을 연결하면 2차원 해석 단면을 얻게 된다.

4.2 탄성과 굴절법 탐사(Seismic Refraction)

4.2.1 개요

탄성과 굴절법 탐사는 지표부근 또는 지하에서의 발파 등에 의해 인공적으로 탄성파를 발생시켜 종파(P파) 또는 횡파(S파)가 직접 또는 서로 다른 지층 사이에서 굴절하고 지층을 전파하는 상황을 지표에 설치된 측정 시스템에서 관측하고, 그 결과를 해석하여 지층상태를 규명하는 방법을 말한다. 또한 진원점에서 발생한 탄성파 중 각각의 수진기에 최초로 도달하는 파의 소요시간, 즉 초동주시(first arrival time)를 측정하고 해석하는 탐사방법이라고 바꾸어 말할 수 있다.

4.2.2 축선설정 및 현장실험

본 굴절법 탐사에서는 일본 OYO사의 McSEIS-SX장비를 사용하여 발파점과 수진기를 일직선상에 배열하는 인라인 (in-line)탐사법으로 탐사축선 중앙을 STA.1+700지점에 일치시킨 후 24개의 수진기 (geophone)를 2m 간격으로 일렬로 설치한 후 축선이나 그 연장 축선상에 무게 5kg의 Sledge Hammer를 사용하여 탄성파를 발생시켰다.

그라우팅 전의 탐사에서는 지하물질의 개략적인 탄성파속도를 얻기 위하여 수진기 전개의 양단에서

발진하여 2회의 탐사자료를 획득하였으며, 그라우팅 후에 실시된 탐사에서는 보다 정밀한 탄성파 속도를 얻기 위하여 수진기 전개 양단, 중앙점 그리고 양끝에서 같은 거리로 멀리 떨어진 지점에서 발진하여 모두 5회의 탐사자료를 획득하였다.

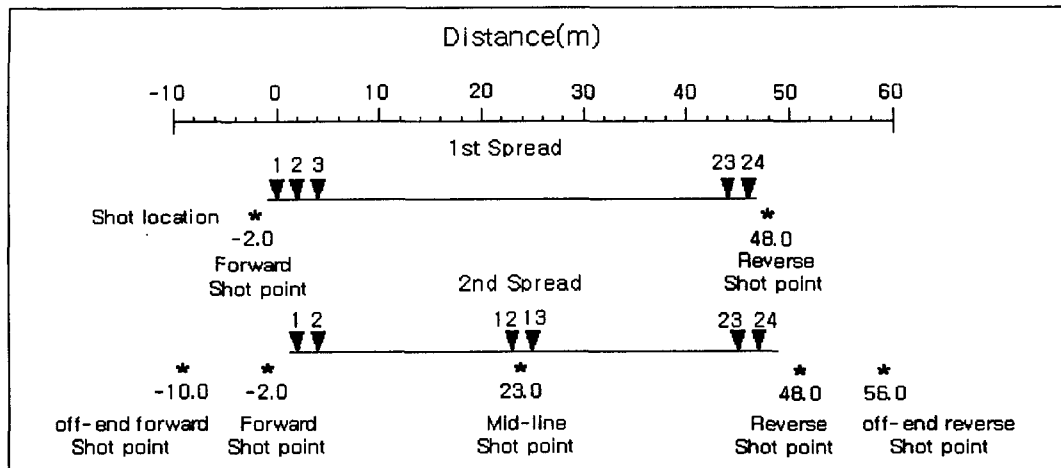


그림 4. 인라인 굴절법탐사 및 수진기 전개

4.2.3 측정 자료 분석

굴절법 탐사자료의 해석은 탐사과정에서 측정된 탄성파의 기록에서 각 수진기(geophone)에 가장 먼저 도달된 파의 시간 (초동주시 : first arrival time)을 Interpex사의 FIRSTPIX(V. 4.0) 프로그램을 이용하여 읽은 다음에, 이 초동주시를 발진점-수진점의 위치의 함수로 나타내어 주시곡선(Time-Distance curve)을 작성한다. 지층의 속도가 일정하고 지층경계면(굴절면)이 평탄할 경우에는 주시 곡선상의 각 직선의 기울기와 절단시간으로부터 지층의 속도 및 경계면의 심도를 계산할 수 있다. 그러나 측선의 고도 차가 심하고 지층의 속도가 수평적으로 변하거나 지층경계면 또한 평탄하지 않은 경우에는 직접파를 제외한 굴절파들은 주시곡선 상에서 직선이 아닌 곡선으로 나타나기 때문에 지연 시간법(Delay Time Method), 플러스-마이너스법(Plus-Minus Method), 파면법(Wavefront Method), 일반화된 상반해석법인 GRM(Generalized Reciprocal Method)등과 같은 보다 일반적인 해석방법을 사용한다.

본 탐사의 해석에 이용한 Interpex사의 GREMIX(V. 2.0)프로그램은 Hagedoorn (1959)의 플러스-마이너스법에 Palmer(1980)가 고안한 GRM의 특징을 결합한 프로그램이다.

GRM 해석방법의 기본 이론은 이동원리를 적용한 것으로, X-Y라고 하는 거리를 두고 위치한 두 개의 수진기에 탄성파가 도달한 시간으로 탄성파의 속도와 각 속도층까지의 심도를 산출한다. 굴절면상의 동일지점에서 발생하는 전향 및 후향 사이의 최적의 X-Y 간격은 여러번의 시도를 거쳐 얻어지는 것이기 때문에 굴절파는 작은 구간내에서는 평행으로 진행한다고 가정한다. 굴절법 속도분석함수 (Velocity-Analysis Function) T_V 는 주행시간 부호를 사용하여 정의하면 $T_V = (t_{AG} - t_{BG} + t_{AB})/2$ 이다.

위의 식에서 X-Y 중간의 수진점을 G로 하여 굴절면상의 X,Y 중간점과의 거리차를 속도로 나눈 값으로 T_V 를 구하는데 굴절파의 속도는 주시곡선의 기울기로 구한다.

5. 현장실험 결과

5.1 2차원 전기비저항탐사(2D Resistivity Survey)

그라우트재의 주입전 측정은 자연상태에 있어서의 비저항 분포를 주입후의 측정은 주입재가 충분히 고화된 후에 비저항 분포를 파악했다.

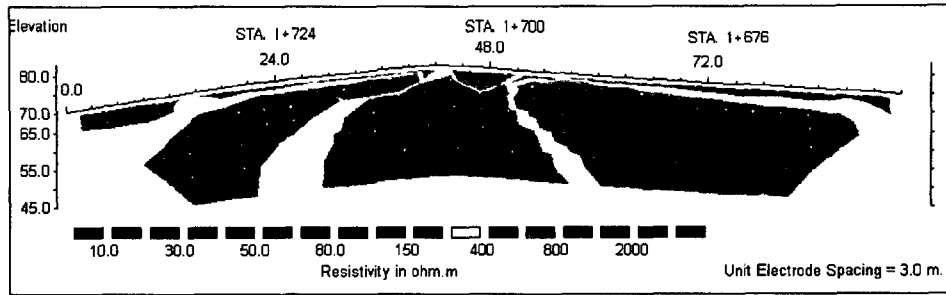


그림 5. 그라우팅 전 전기비저항 분포 단면도

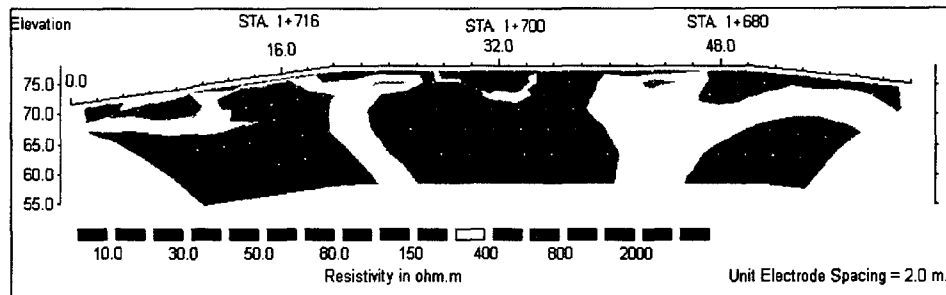


그림 6. 그라우팅 후 전기비저항 분포 단면도

그림 5와 6은 주입전의 자연상태와 주입후의 비저항 분포를 역산프로그램으로 처리한 등비저항곡선 단면도를 각각 나타내고 있다. 이들 그림으로부터 그라우팅 후의 비저항의 분포는 그라우팅 전과 비교할 때 전반적으로 낮은 비저항이 분포하고 있어 주입재는 전기전도성이 높은 물질임을 알 수 있다.

5.2 탄성과 굴절법 탐사(Seismic Refraction Survey)

암반의 탄성과 속도는 풍화, 변질, 파쇄나 균열의 발달 등에 의해 P파와 S파의 속도가 변화하지만 P파의 속도 측정이 훨씬 용이하므로 흔히 P파의 속도를 측정하여 이의 변화로부터 암반의 상태를 추정할 수 있다. 암반과 암석의 균열 등의 공극은 점토나 물, 공기 등으로 채워져 있다.

당 현장의 기반암으로 분포하는 화강암의 대표적인 조암광물인 석영이나 장석의 P파 속도는 5,500~6,500m/sec 정도이지만 공기의 P파 속도는 333.45m/sec, 물의 P파 속도는 1,500m/sec로 어떠한 조암광물의 P파 속도보다 느리다. 따라서 암석내에 공극이 많으면 암석의 탄성과 속도는 떨어진다. 그리고 암석의 탄성과 속도에 영향을 미치는 공극 이외의 요인은 암석의 풍화진행 정도, 고결도, 생성시기 등이다. 또한 암반 내 단층 파쇄대 지역의 경우처럼 균열의 발달이 많아 공극율이 커지게 되어 암반내 부분적인 전파속도를 저하시킨다. 따라서 본 탐사에서는 그라우팅 전·후의 P파 속도변화에 중점을 두고 분석하였다.

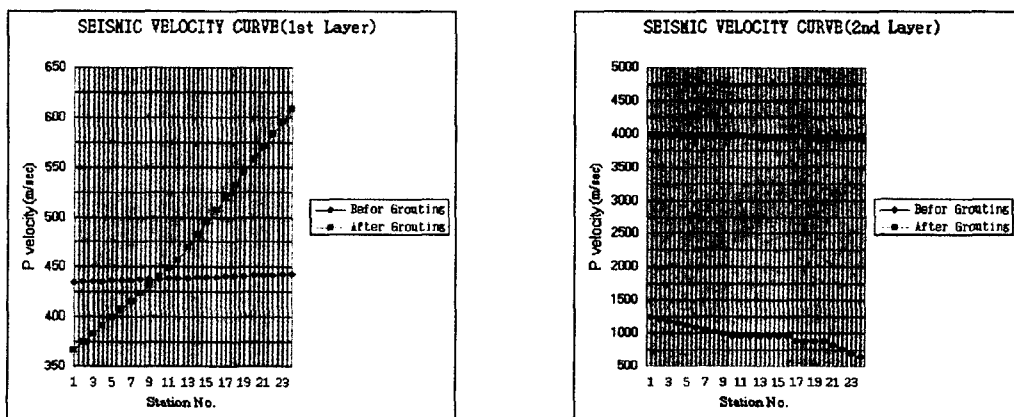


그림 7. 그라우팅 전(Befor Grouting), 후(After Grouting)의 P파 속도변화도

그림 7에서 사면 절취전 자연상태에서 실시한 탄성과탐사 결과, 각 지층별 P파 속도와 심도는 제1층의 경우 435~443m/sec 와 2.3~ 8.1m이고, 제2층은 649 ~1247m/sec로 측정되어 전반적으로 풍화대가 두껍게 분포하는 것으로 판단된다.

그라우팅 실시 후 실시한 탄성과탐사 결과, 제 1층의 P파 속도는 그라우팅 실시 전의 P파 속도와 큰 변화가 없으나, 제2층의 경우에는 약 3,000m/sec내외의 P파 속도의 증가를 보여준다. 또한 시점방향(지오폰의 Station No.증가방향)으로 갈수록 P파 속도의 증가폭이 커지는 것은 전기비저항 탐사결과와 저비저항대의 범위가 증가된 것과 일치함으로써 이는 주입재의 영향에 기인한 것으로 판단된다.

6. 결론

터널 및 사면 보강공법으로 최근에 개발된 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)관을 이용한 FRP 사면 보강그라우팅 공법의 보강효과를 확인하기 위해 2차원 전기비저항 영상법과 기존의 탄성과 굴절법 탐사를 그라우트재 주입 전·후에 실시하였으며, 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전기비저항 영상법 탐사 결과 그라우팅 후의 비저항치의 분포 양상은 전반적으로 저비저항대(400 Ω -m)의 분포범위가 확대되었으며 이는 전기전도성이 높은 주입재의 확산에 의한 영향으로 판단된다.

2) 탄성과 굴절법 탐사 결과 그라우팅 전·후에 제 1층의 P파 속도는 큰 변화가 없으나, 제 2층의 경우에는 약 3,000m/sec내외의 탄성과속도의 증가를 보여준다. 비록 사면 절토로 인하여 그라우팅 전 , 후의 탐사조건이 변화되었다 하더라도 제 2층의 경우 그라우팅에 의해 P파 속도가 증가된 것이 확인하다.

그라우팅 효과 검증을 위해 금번 실시된 지표물리탐사는 단기간에 최소의 비용으로 그라우트재의 확산 및 지반의 강도증가에 대한 개략적인 유추가 가능한 것으로 판단되며 보다 정량적인 효과 검증을 위해서는 시추공을 이용한 추가적인 물성시험이 병행되어야 할 것으로 요망된다.

참고문헌

1. 대원토질(주), 한국건설기술연구원(1999), 터널보강재로서 FRP 적용성 검토, pp.4~9.
2. 한국건설기술연구원(1994), 강관보강형 다단 그라우팅공법의 개발, pp.58~60.
3. 권병두, 민경덕, 서정희(1987), 응용지구물리학, 우성문화사.
4. 김기영, 김인수, 김지수, 서만철, 송영수, 손호웅, 윤왕중, 조인기(1999), 지반환경물리탐사, 시그마프레스, pp.11~166.
5. 정승환 외 12인(1993), 지구물리탐사 품질관리지침 연구, 한국자원연구소, pp.33~38, 86~90.
6. Rovert E. Sheriff and Lloyd P. Geldart(1995), Exploration Seismology, Cambridge University Press, pp.425~448.
7. Milton B. Dobrin(1981), Introduction to Geophysical Prospecting, International Student Edition, pp.568~619.