

크로스홀 시험을 이용한 교각 기초지반의 그라우팅 품질 평가 Quality Assesment of Grouting at Bridge Foundation Using Crosshole Tests

목영진¹⁾, Young-Jin Mok, 백영식²⁾, Young-Shik Paik, 임수빈³⁾, Soo-Been Im.

- ¹⁾ 경희대학교 공과대학 토목·건축공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil and Architectural Engineering, Kyung Hee University
²⁾ 경희대학교 공과대학 토목·건축공학부 교수, Professor, School of Civil and Architectural Engineering, Kyung Hee University
³⁾ 동부엔지니어링(주) 기술연구소 소장, Director, Research Center, Dong Bu Engineering Co.

SYNOPSIS : A series of crosshole testing was conducted to evaluate grouting quality of a bridge foundation site. In the tests, a seismic equipment(newly developed and called "GeoPing") was used to measure S-waves as well as P-waves. P-wave velocities varies on proportions of cement-milk and rock along the ray paths. The assesment of grouting was carried out by comparing in situ wave velocities with laboratory wave velocities of cores. The overall quality of the grouting was secured from the good agreement between in situ and laboratory velocities.

Key words : Crosshole, Piezoceramic, GeoPing, Grouting

1. 서론

탄성과 시험은 동적 하중(지진 및 진동)에 의한 지반·구조물 상호 거동 해석에 필요한 지반 물성 산정에 이용되어 왔다(목영진, 1992). 또한 탄성과 속도와 기존 물성(예 : 밀도)과의 상관관계를 이용하여 토공(동다짐 개량, 성토)의 품질 관리에도 적용되고 있다. 최근에는 탄성과 기법이 지반 물성 산정은 물론, 현장 타설 말뚝, 터널 라이닝, 암반 그라우팅의 품질 및 건전도 평가에도 이용되어 적용 분야가 증가 추세에 있다.

토목공학에 주로 이용되고 있는 탄성과 기법은 시추공(bore hole)을 이용하는 크로스홀(cross hole)·다운홀(down hole)이 있고, 표면에 계측기를 설치하여 표면파(surface waves)를 이용하는 표면파 기법(SASW tests)과 지중 지층 경계면에 굴절되어 지표면에 도달하는 선두파(head waves)를 계측하는 굴절파 기법(refraction tests)이 있다. 최근 토모그래피(tomography) 기법을 적용하여 2차원적 강성 분포의 영상 처리가 토목공학에 이용되고 있다.

이 논문에서는 본 연구진이 개발한 크로스홀 탄성과 장비(GeoPing)를 간략하게 소개하고, 이 장비를 이용하여 교각 기초지반의 암반 그라우팅 성과 평가에 적용한 사례를 발표하고자 한다. 이 교각 기초지반은 점성토가 협재한 절리가 발달하고 일부 공동 징후를 보여 그라우팅을 실시하여 보강되었다. 이 그라우팅의 성과를 평가하고자 일련의 크로스홀 시험과 검측공 시추 시 채취된 코아에 대하여 실내 탄성과 시험을 수행하였다.

2. 크로스홀 장비

이 시험 장비(GeoPing으로 명명)는 P-파는 물론 S-파 계측이 가능하도록 고안하여, 원자력발전소, 대형교량 등 중요 구조물의 기초, 터널 및 지하공간 개발을 위한 암반의 조사에 사용할 목적으로 개발되었다(백영식 외, 1997). 이 장비의 핵심기술은 압전소자(壓電素子)형 발진 장치와 계측기를 공벽에 밀착시키는 밀착 장치(coupling device)이다.

압전소자(piezoelectric material)는 전기장(electric field)에 의해 변형이 일어나고, 반대로 응력(stress)을 가하면 전하(electric charge)가 발생하는 물질이다. 전기 에너지를 압전세라믹에 충전시킨 후에 양전극판을 쇼트(short)시키면 전기장이 순간적으로 방출되며 마치 눌렀던 용수철이 통겨지듯이 탄성에너지가 방출하게 된다. 발진자(source)는 얇은 세라믹을 여러 장 겹쳐 병렬 연결한 세라믹 스택(ceramic stack)을 사용하여 탄성 에너지가 최대한 축적되도록 고안되었다. 반면에 압전세라믹을 감지기(receiver)에 사용할 때는 작은 기계적 변형(진동)에서도 높은 전기적 신호(signals)가 출력되도록 두꺼운 세라믹을 사용하여 시그널 대 노이즈 비(signal-to-noise ratio)가 극대화 되도록 병렬 연결하였다.

P-파는 속도가 가장 빠르므로 발진자 및 감지기의 방향(polarity) 조정 없이도 측정할 수 있다. 탄성파 기록에서 초동(initial arrival)을 취함으로써 P-파의 도달 시간을 측정할 수 있다. 그러나 S-파의 속도는 P-파보다 느려서 P-파의 여진과 S-파가 중첩되어 S-파 도달 시점을 식별하기 어려운 실정이다. 이런 점을 극복하고 S-파 도달 시점 식별이 가능한 탄성과 기록을 얻으려면 발진자와 감지기의 방향을 동시에 조정하여 공벽에 밀착시켜야 한다. 고안된 밀착장치(coupling)는 소방호스(fire hose)를 이용한 것이다. 이 호스는 외피가 마모에 강한 직포로 되어 있어 팽크의 염려가 없고 유지보수가 용이하고 저렴하여 현장 적용성이 뛰어난 소재이다. 이 호스의 양단을 봉합시키고 공기 입출을 위한 연결 휘팅(fitting)을 특수 제작하였다. 또한 이 공기 주머니는 세라믹하우징(housing)과 다른 부분 사이의 진동 차단재(isolator) 역할을 할 수 있어 일석이조의 효과를 거둘 수 있다.

지오핑(GeoPing)은 검측공내에 밀착되는 다운홀 유닛(downhole unit: 발진자와 감지기)과 다운홀 유닛을 작동시키는 지상 제어 유닛(control unit)으로 이루어져 있다. 다운홀 유닛중 발진자의 개념도는 그림 1과 같다. 병렬 연결된 두 조의 세라믹 스택과 전자회로를 내장하는 하우징(housing)과 소방호스를 이용한 밀착장치 및 방향 조정을 위한 연결 고리로 되어 있다. 수진기도 발진자와 동일한 형태이며 세라믹 스택과 전자회로가 다를 뿐이다. 그림 2는 직경 38mm의 압전 세라믹 20장을 병렬로 겹친 총 두께 30mm의 스택 두 조를 하우징(housing)에 조립하는 사진이다. 이 장비는 암반 및 콘크리트에 사용하고자

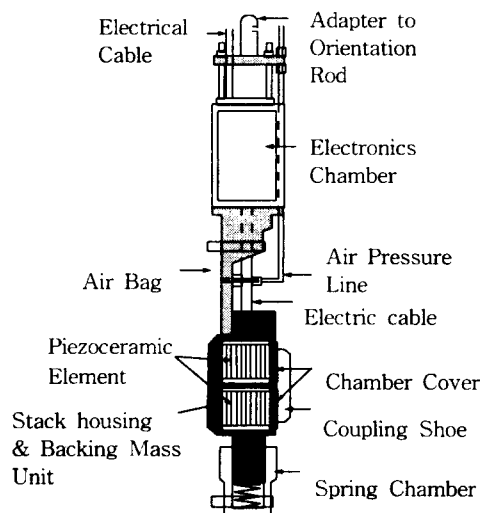


그림 1. 발진자의 개념도



그림 2. 세라믹 스택과 하우징

주파수 영역을 10kHz 내외에서 작동시키도록 하우징 재질을 스테인리스강을 사용하여 0.9 kg의 무게가 되도록 제작하였다. 이 제어유닛은 발진 및 수신 세라믹을 작동시키는 전자제어와 밀착장치를 작동시키는 압축공기 제어장치로 이루어져 있다. 이 제어장치에서 발진과 수신의 전기적 신호는 일반 오실로스코프나 파형 분석기에 연결하여 기록할 수 있다.

3. 현장 시험

3.1 현장 개요

대상 현장은 충청북도 단양군 대강면 두음리와 용부원리에 소재한 중앙고속도로 영주-제천간 10공구 현장내의 두음교 교각 4번 기초지반이다. 이 기초지반은 석회암 지대로 황갈색 점토질과 청회색 석회질대가 2조의 주절리 (주향 N85° E 경사 70° SE와 주향 N55° E 경사 60°NW)로 교호하고 있다. 그림 3은 기초지반 굴착 후 노출된 주향 N85° E 경사 70° SE인 절리를 보여주고 있다(그림 4에서 좌측 상단에 표시된 주절리). 절리에 협재된 연약한 점토질을 치환하고 일부 공동을 시멘트밀크로 채우는 SIG(super injection graouting)공법으로 기초지반을 보강하였다. 이 그라우팅의 성과를 평가하고 기초의 안정성 검토에 필요한 물성치를 결정하고자 일련의 크로스홀 시험을 수행하였다.



그림 3. 교호된 석회질과 점토질의 절리

3.2 검측공 설치

주 절리의 주향을 고려하여 그림 4와 같이 검측공을 설치하였다. 상행선과 하행선의 가장 취약한 곳 각각 1 개소에 검측공을 시추하였다. 상행선 쪽의 검측공은 BHA1, BHA2, BHA3, BHA4, BHA5, BHA9이다. 검측공 BHA1-1이 원래 천공 위치로 선정 되었으나 공벽이 무너져 굴진을 15m에서 멈추고 BHA1으로 변경하였다. 천공 깊이는 BHA1부터 BHA5까지는 30m이고 BHA9은 20m이었다. 하행선 쪽의 검측공은 BHA6, BHA7, BHA8이다. BHA6-1이 원래 천공 위치였으나 공벽 유지가 어려워 15m에서 천공을 중단하고 BH6로 변경하여 검측공을 설치하였다. 검측공 BHA6부터 BHA8의 천공 깊이는 20m 이었다. 시험 당일 검측공 BH3에서 깊이 18m에서 공벽이 무너져 검측공 BHA3을 포함한 축선에서는 깊이 18m까지 크로스홀 시험을 수행할 수밖에 없었다. 그림 4에 표시된 축선 거리는 검측공 내벽 사이의 거리이다.

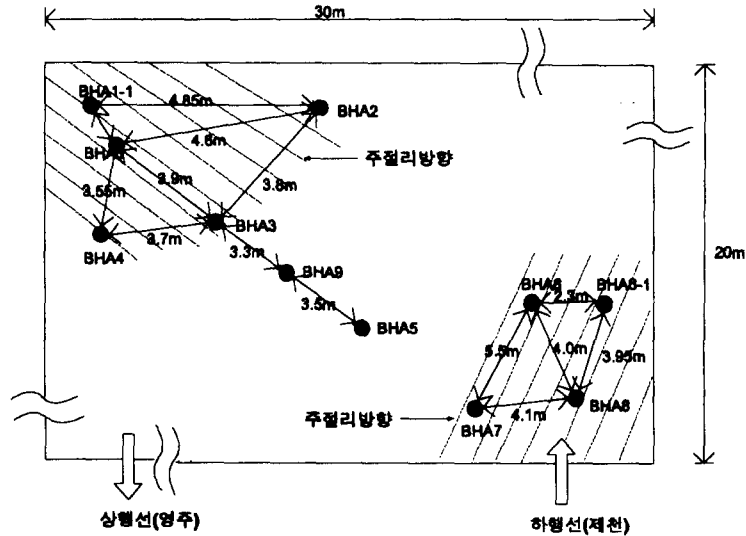


그림 4. 검측공 배치 현황

3.3 크로스홀 시험

다운홀 유닛(발전자와 감지기)을 검측공의 측정 깊이에 내려 방향을 조정한 후에 압축공기로 검측공 내에 밀착시킨다. P-파 계측에는 발전자와 수신기를 서로 마주 보게 방향을 조정한다. S-파 계측은 발전자와 수신기의 방향을 전파 경로와 수직방향으로 나란하게 조정한다. 발전자와 감지기를 같은 방향으로 향하게 조정하여 P-파의 후속진동을 극복하고 S-파 에너지 계측을 극대화하여 S-파 도달 시점을 확연하게 구별되도록 한다. 발전자와 감지기를 서로 반대방향으로 향하게 조정하여 동일한 효과를 얻을 수 있다. 이때 두 계측기록을 중첩시키면 S-파 도달시점에서 파형이 서로 반대 방향으로 갈라져 “나비 날개” 모양을 보이게 된다. 이와 같이 S-파 도달 시점 판독을 용이하게 하기 위해 발전자와 감지기의 방향을 반전시켜 한 계측점에서 1쌍의 S-파 계측을 실시한다. 한 계측지점에서 P-파 기록과 S-파 기록 1쌍을 플로피 디스켓에 기록한다. 이러한 과정을 깊이 0.5m간격으로 검측공 바닥까지 반복하여 P-파와 S-파를 기록하였다

4 결과 및 분석

4.1 탄성과 통과시간 결정

P-파 계측의 전형적인 파형은 그림 5와 같다. 위 파형은 발전자의 트리거(trigger)파형이고 아래기록은 감지기의 P-파의 도달 시점(arrival time) 판독의 이해를 돕기 위해 파형을 두 부분으로 나눈다. 처음 직선부분은 아직 P-파 에너지가 발전자에서 출발하여 감지기에 도달하지 않았다. 이 신호의 두번째 부분은 직선부분이 끝나고 첫 P-파가 도달한 후 (그림 5에 P로 표기됨) P파의 여진파 반사파 등 각종 파들의 기록이다. 그림 5에서 발전자 트리거 신호상에 표기된 “T”는 발전자에서 충격파가 출발한 시점이고 감지기 신호상의 “P”는 P-파가 감지기에 도달한 시점이다. “P”와 “T” 사이의 경과 시간은 P-파가 검측공 사이의 거리를 통과하는데 걸린 시간이다.

S-파 계측의 파형은 그림 6과 그림 7과 같다. 그림 6은 기반암의 S-파 기록이고, 그림 7은 절리의 주향방향으로 치환된 시멘트밀크 층의 S-파 기록이다. 앞에서 설명한바와 같이 S-파 계측은 계측기를 검측공 측선에 대해 직각방향으로 향하게 하여 계측하면 된다. 발전자와 감지기를 동일한 방향으로 향하게 하여 기록한 S-파 파형과 발전자와 감지기를 서로 반대 방향으로 향하게 하여 계측한 S-파 신호를 중첩시키면 S-파 도달시점의 신호 모양이 “나비모양” 처럼 보인다. 이러한 방법은 S-파 도달 시점

의 판독을 용이하게 한다. “T” 와 “S” 사이의 경과시간이 S-파가 발진자를 출발해 감지기까지 도달하는 데 걸린 시간이다.

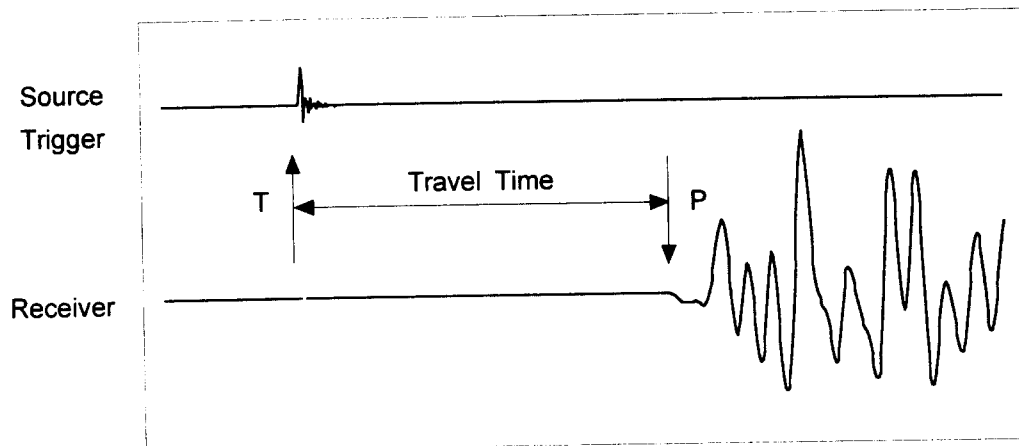


그림 5. P-파 기록
 측선 BHA1과 BHA1-1 깊이 = 7.5m

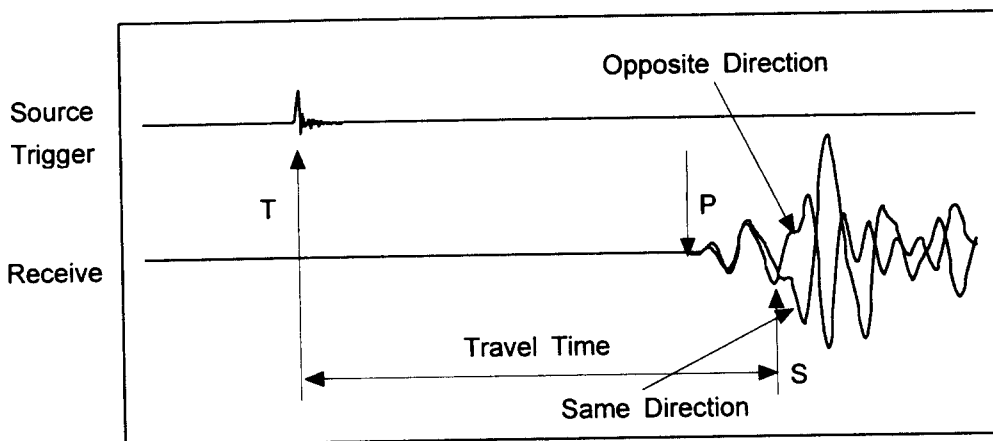


그림 6. S-파 기록 (기반암)
 측선 BHA9와 BHA5 깊이 = 16m

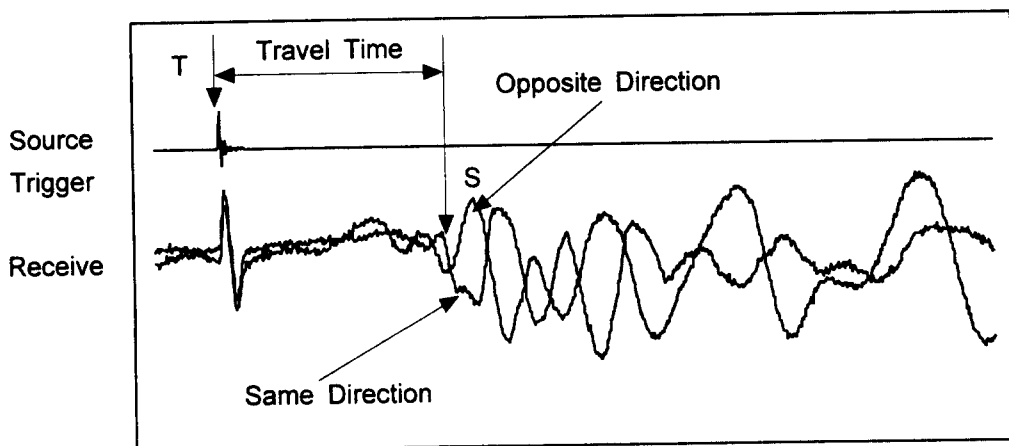


그림 7. S-파 기록 (시멘트 밀크)
 측선 BHA6과 BHA6-1 깊이 = 5.5m

4.2 탄성과 속도계산

P-파와 S-파의 측정된 통과 시간으로부터 P-파와 S-파 속도 및 포아슨 비, 탄성계수는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$V_P = \text{통과거리} / \text{P-파 통과시간} \quad (1)$$

$$V_S = \text{통과거리} / \text{S-파 통과시간} \quad (2)$$

$$G = (\gamma / g) V_S^2 \quad (3)$$

$$M = (\gamma / g) V_P^2 \quad (4)$$

)

$$\nu = [0.5(V_P / V_S)^2 - 1] / [(V_P / V_S)^2 - 1] \quad (5)$$

여기서, V_P = P-파 속도, V_S = S-파 속도, G = 전단 탄성계수, M = 구속 탄성계수, ν = 포아슨 비이다.

그림 8은 한 축선의 깊이별 탄성과 속도 및 포아슨 비이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 축선상의 구성 매질에 따라 P-파 속도는 2000 m/sec에서 5000 m/sec, S파 속도는 1100 m/sec에서 2500 m/sec까지 변하고 있다. 포아슨 비는 0.2에서 0.35의 범위 내에 있다.

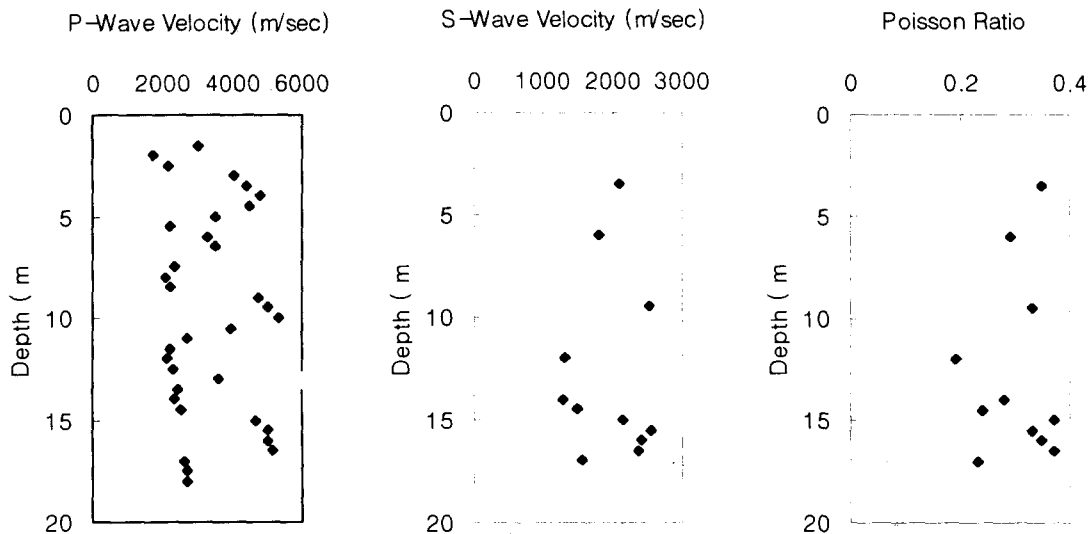


그림 8. 탄성과 속도 및 포아슨비(축선 BHA1-BHA4)

4.3 그라우팅 성과 평가

표 1은 두음교 교각 4번 기초지반의 종합적 탄성과 속도(P-파)와 포아슨비 이다. 특이한 현상은 주 절리 방향의 두꺼운 점성토가 치환된 시멘트밀크가 축선 상의 지층을 구성할 경우 P-파 속도가 2300m/sec. ~ 2700 m/sec.. 이고 포아슨비는 0.20~0.27 이었다. 기반암의 구성비가 증가할수록 P-파

속도와 포아슨비는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 시멘트밀크가 기반암 보다 취성 변형특성을 보이는 것을 의미한다. 상기의 시험 결과는 교각 기초의 안정성 검토에 필요한 기초지반의 비선형 변형특성을 모델링하는데 이용된다.

표 1. 지층 구성에 따른 P-파 속도와 포아슨비

지층 구성	P-파 속도 ,m/sec.	포아슨비
두꺼운 점성토 협재 구간이 치환된 시멘트밀크 층	2200~2700	0.20~0.27
파쇄된 석회암과 시멘트밀크가 혼합된 층	2700~3500	0.27~0.33
석회암과 시멘트밀크가 교호된 층	3000~4500	0.27~0.33
석회암 위주의 층	4500~6000	0.33~0.38

이 결과를 확인하고 그라우팅 성과를 평가하고자 시추 시 채취된 코아에 대하여 실내 탄성과 시험을 수행하였다. 시멘트밀크의 P-파 속도는 2300 m/sec.~2800 m/sec., 시멘트밀크와 기반암이 혼합된 코아는 3200m/sec.~3500m/sec., 기반암은 5000 m/sec.를 상회하고 있다. 포아슨비는 시멘트밀크와 기반암이 0.20~0.30으로 큰 차이가 없었다(목영진, 1998).

현장 탄성과 시험 결과와 실내 탄성과 시험 결과가 매우 잘 일치하므로 현장의 그라우팅 성과는 매우 양호한 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

교각 기초지반에 실시한 S.I.G. 처리를 확인 검증하기 위해 실시한 현장 크로스홀 시험을 수행하였다. 주 절리의 방향을 고려한 축선을 설정하여 검측공을 시추하였다. 매질의 구성에 따라 탄성과 속도의 변화를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주절리 방향의 두꺼운 점성토가 치환된 시멘트밀크가 지층을 구성할 경우 P-파 속도가 2300~2700 m/sec. 이고 포아슨비는 0.20~0.27 이었다. 기반암의 구성비가 증가할수록 P-파 속도와 포아슨비는 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 실내 코아 탄성과 시험 결과, 시멘트밀크의 P-파 속도는 2300 m/sec.~2800 m/sec., 시멘트밀크와 기반암이 혼합된 코아는 3200m/sec.~3500m/sec., 기반암은 5000 m/sec.를 상회하고 있다. 포아슨비는 시멘트밀크와 기반암이 0.20~0.30으로 큰 차이가 없었다.
- 3) 현장 시험 결과와 실내 코아 탄성과 시험 결과가 일치하는 것으로 볼 때 그라우팅 보강 성과는 양호한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 목영진(1992), "In Situ Measurement of Stiffness and Damping of Soils by Crosshole and Downhole Methods", 한국지반공학회 지반진동 위원회 제1회 학술논문집 제1권 제1호 pp 1-18
2. 목영진(1998), 중앙고속도로 영주-제천간 10공구 두음교 교각-4 확인 검증 탄성과 조사, 경희대학교
3. 백영식 외(1997), 지반구조의 영상화를 위한 Seismic Geotomography개발, 건설교통부

감사의 글

본 연구는 건설교통부 94'연구개발사업(R&D/94-0014)과, 동부건설주식회사의 현장시험 지원으로 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드린다.