

연약지반에서의 P파와 S파의 속도검층

Velocity Logging of Compressional and Shear Wave in a Soft Ground

유영준¹⁾, Youngjune You, 송무영²⁾, Moo-Young Song

¹⁾ 대한광업진흥공사 기술사업처, Dept of Geotechnical Engineering, Korea Resources Corp.

²⁾ 충남대학교 지질학과, Dept of Geology, Chungnam National University

SYNOPSIS : Seismic P (compressional) and S (shear) wave was generated by the vertical and the horizontal striking using Solenoid hammer of electromagnetic type separated 0.8m from borehole and installed to surface. Their waves recorded to 3-component (x,y,z) borehole geophone fixed to the wall at 1m interval from depth 2m to 25m. The dominant frequency for received component was analysed 100Hz, 60~80Hz and 180~200Hz for x,y,z-component, respectively. And y-component of SV-wave shows the second resonant frequency due to geophone installation direction. In the soft ground consisted of alluvium, clay, sandy, silty, and conglomerated layer of the Quaternary Formation, and mudstone of the Tertiary Formation, seismic velocity distribution range from 108 to 400m/s for S-wave and from 540 to 2,500m/s for P-wave, and Poisson's ratio ranges from 0.46 to 0.49 and the variation degree is relatively large. In the soft ground of the Quaternary Formation, the correlation formula between S-wave velocity and N-value of SPT calculated at $V_s = 85.2N^{0.27}$. Knowing the S-wave velocity of their formations, we can assume N-value using the formula.

KEYWORDS : Soft ground, Solenoid hammer, P&S-wave velocity, Poisson's ratio, N-value

1. 서 론

탄성파는 종파(P파)와 횡파(S파) 및 표면파(Rayleigh 파, Love 파) 등으로 분류되고, 이들의 파는 각각 고유한 특성을 갖고 전파하며 이 성질을 이용하여 각종의 탄성파 탐사를 실시하고 있다. P파는 전파방향과 진동방향이 서로 평행하게 진행하며 경계면에서 반사·굴절시 P파 및 변환된 SV로 된다. 그리고 S파는 전파방향과 진동방향이 서로 직각으로 진행하는 데 그들의 방향이 수평방향으로 직각일 때를 SH파, 수직방향으로 직각일 때를 SV파라고 한다. 이 S파는 경계면에서 반사·굴절할 때 SV파는 SV파와 변환된 P파로 되나 SH파는 경계면에서 변환되지 않고 SH파 고유의 성질을 유지하고 있기 때문에 보통 S파 탐사라고 하면 SH파를 이용하는 것이다.

S파를 발생시키는 대표적인 방법은 외국의 경우 Syslab, Marthor®, Vibroseis® 등이며, 우리나라의 경우 중축타(Choongchookta), 진자운동형 철구가 있으며, 본 실험에 사용된 것은 솔레노이드 전자파를 이용한 전자기적 구동형의 P, S파 검층 솔레노이드 함머(狐崎, 1970)이다.

탄성계수와 탄성파 속도와의 관계를 보면 P파는 k 와 μ 의 함수이며 S파는 체적탄성율과는 무관한 강성을 μ 만의 함수이다. 그리고 Poisson 비 σ 는 예를들면, 암석의 평균(0.25), 물(0.5), 납(0.4) 정도의 값을 나타내므로 고체물질의 경우 일반적으로 $0.25 \leq \sigma < 0.5$ 범위이다. V_P/V_S 비는 암상(lithology)의 변화를 구분할 수 있는 indicator이고 k/μ 비는 다짐(compaction), 교결(cementation), 공극, 파쇄, 유체포화 등의 변화에 관하여 해석할 수 있다(Ahmed, 1989). 따라서 도시화가 진행됨에 따라 고층 건축물, 터널, 교량, 댐, 발전소 등 대형구조물의 설치 지반의 동특성 평가는 설계 및 시공법의 결정에 있어서 중요한 요소가 되므로 탄성파 P파 및 S파 속도를 측정하여 각종 현장(is-situ) 동탄성계수를 산출하는 것이 바

람직할 것이다.

본 연구는 제3, 4기의 충적층, 점토층, 사질층, 실트층, 역암층, 이암층으로 구성된 연약지반에서 지표에 솔레노이드 함머를 설치하여 수직 및 수평방향으로 타격시켜 P, S파를 발생시키고, 시추공에 고정형 3성분 수진기를 이용하여 지표로부터 심도 2m에서 25m까지 측정점 1m 간격으로 P, S파를 기록하였다. 이 P, S파의 기록을 이용하여 측정 구간별 속도를 분석하여 지층구분, 현장 동포아송 비, 표준관입 시험 N치와의 상관관계식 등을 유도하였다.

2. P, S파 발생 및 기록

2.1 솔레노이드 함머

작동원리원리는 원통형 플라스틱에 여러개의 층으로 코일이 감겨 있고 그 원통내에 원주 철제의 플런저가 포함되어 있어 코일에 전류를 보낼 때 솔레노이드라는 전자기파가 생성되고 그때 그 전자기파에 의해 강한 인력이 발생하는 일종의 플런저 타입의 전자기(plunger or leakage flux type electro-magnet)에 의한 운동을 이용하는 것이다. 이 플런저를 지면에 연직 또는 수평으로 충돌시킬 때 탄성파가 발생한다. shot mark는 전기회로로 shot하는 경우와 충돌시 충격을 검출하는 형의 2종류가 있는 데 본 실험의 경우는 후자의 경우를 택하였다. 강한 진원력을 발생시키기 위해서는 높은 전류가 필요하며 순간적인 힘을 가하기 위해 콘덴서에 축전된 전류를 일시에 방전시킨다. 본 실험에서의 충분한 에너지를 발생시키기 위한 필요한 직류전류는 120~400Vdc 정도이다.

함머를 수평 및 수직방향으로 타격하고자 할 때는 솔레노이드를 steel cylinder에 각각 수평 및 수직으로 설치하면 된다. 수평방향으로 설치하는 경우는 지면을 그 cylinder 정도의 크기로 구멍을 만들어 견고하게 고정시켜야 한다. 이때 타격 시 발생하는 진동과 수평 전단력에 의해 실린더와 지면과의 결합상태가 느슨하게 되므로 수회 타격 후 접촉면을 견고하게 다지면서 실시하는 것이 좋다. 수직방향으로 타격하는 경우는 지면위에 놓고 실시하면 되므로 별 특별한 어려움이 없다. 본 실험에 사용된 솔레노이드 함머의 에너지량은 capacitance $C=650\mu F$, 출력전압을 $E_0=400Vdc$ 로 할 때 함머의 질량 $M_0=16.5kg$ 가 속도 V 로 운동한다. 이때 전기 에너지는 52J, 운동 에너지는 2.5J, 운동량은 9.08kgm/s이다.

2.2 시추공내 수진기 고정

시추공용 수진기의 구성은 수평 2성분, 수직(상하) 1성분을 조합하여 x,y,z 직각좌표의 3성분으로 되게 배열되어 있다. 시추공내 수진기의 고정방향은 수진기내에 방위계가 내장되어 있으므로 방위조절 장치를 이용하여 지표에서 조절가능하다. 수진기 고정에 관한 문제는 수진기 자체의 고정과 수진기 소자의 수평성분 고정방향 등으로 생각할 수 있다. 수진기의 고정상태를 결정할 수 있는 요소는 지층의 탄성에 의한 스프링 효과를 나타내는 상수(stiffness)로 기기 본체의 강판면과 공벽면의 접촉 불완전에 의한 스프링 효과이다. 정상적으로 관측 가능한 S파의 최단파장을 Λ_0 라고 할 때 이론적인 관계식은 $\Lambda_0 \approx \pi \sqrt{M/\rho bk}$ 이며, 여기서 b는 기기가 공벽에 접촉하는 부분이 원형이라고 할 때 그의 직경이고, k는 그 접촉면의 상태를 나타내는 수로 보통 4, ρ 는 지층의 밀도이다. 보통의 경우 Λ_0 는 수 10cm이다. 본 실험에 사용된 시추공용 수진기(Model 3320, Oyo) 시스템에 대하여 관측 가능한 최단파장을 계산하면 $M=1,200g$, $b=5.2cm$, $k=4$, $\rho=2g/cm^3$ (가정치)일 때 Λ_0 는 16.9cm이다. 이는 수진기가 완벽하게 공벽에 고정되었을 때 측정될 수 있는 최소파장을 의미한다.

실험에 사용된 수진기는 xyz 방향으로 고유주파수 28Hz를 갖는 소자가 설치되어 있고 시추공내에서 고무튜브 팽창에 의해 고정된다. 고정방식은 원통형 튜브의 면중 한쪽에 강판이 부착되어 있어서 고무 튜브가 팽창될 때 공벽에 고정되도록 설계되었다. 수진기의 설치 방향은 수평성분 xy, 수직성분 z으로 구성되어 있는 데 여기서 수평성분중 x방향이 고정방향이고, y방향은 그의 직각방향으로 배열되어 있다. 고주파수 특성을 지배하는 가장 중요한 요인중에 하나는 진자 시스템 방식 수진기의 2차 공진 현상이다. 본 실험 결과에 의하면 x와 z성분은 우세 주파수가 각각 120Hz, 195Hz를 나타내며 비교적 양질의 신호를 볼 수 있다. 반면 y성분은 우세 주파수가 80Hz 정도를 갖으면서 2차 공진하고 있음을 알 수 있다. 이 경우 탄성파 신호와 혼합되어 있으므로 신호의 구분을 거의 불가능하게 만든다.

2.3 P, S파 기록

탄성파 P파는 경계면에서 반사와 굴절시 P파 또는 SV파로 변환되는 데 이를 파종변환(wave mode conversion)이라고 한다. 한편 SH파는 경계면에서 다른 파로 변환하지 않고 항상 SH파의 특성을 유지하면서 전파하고 수신점에서의 초동(first motion)은 진원방향과 동일한 극성(polarity)으로 기록된다. 그림 1은 실제 시추공을 이용한 P, S파의 기록을 위한 장비설치 및 진원방향에 따른 신호의 기록 특성을 나타내는 것이며, 이때 고정형 수신기가 시추공내 설치되어 있고 지표에서 진원점 A,B인 경우 수신 성분별 기록이다. 여기서 기호 ⊗은 지면에 대하여 들어가는 방향을 의미하고, ⊙은 나오는 방향을 의미한다. 진원점 A는 지면에서 들어가는 방향으로, 진원점 B는 좌우방향으로 진원을 가한 것이다. 이때 N(Normal)은 신호의 초동극성이 '+' 방향, R(Reverse)은 '-' 방향을 나타낸다. P, S파의 전파특성을 보면 P파는 파선의 방향과 평행하게, SV파는 P파에 직각되게, SH파는 진원방향과 평행하게 입자변위가 나타나고 있다. 그때 변위벡터의 크기를 성분별로 도시하였고 직각 우수계 좌표이다. 그림 1의 하단부에는 진원의 위치 및 방향에 따른 수신 성분별 기록을 나타낸 것으로 진원점 A의 경우 수신기의 y성분에서 B의 경우 x성분이 SH파가 기록되고 있다. 이때 진원방향에 따라 초동의 극성이 '+', '-'로 변화됨을 알 수 있다.

3. 속도검층

본 실험지역은 일본의 아카다 대학내 실험용 시추공이며, 구성지질은 충적층, 점토층, 실트층, 사질층, 역암, 이암 등 제3기 및 제4기의 퇴적암층이 주를 이루고 있는 연약지반이다. 시추공의 상태는 내경 $\phi 65\text{mm}$ 플라스틱 PVC 파이프로 심도 22.3m까지 케이싱되어 있고 그 하부 50m까지는 open hole이다.

기록장치는 McSeis 170(Oyo)이고 recording length는 1024words, sampling rate는 P파의 경우 200 μs , S파의 경우 500 μs 로 설정하여 측정하였다. 솔레노이드 함머를 사용할 때는 높은 전압을 일시에 방전시켜 에너지를 발생시키기 때문에 유도전압에 의한 잡음의 제거와 트리거 신호에 주의해야 한다. 특히 S파용 진원으로 사용할 때는 진원의 타격방향을 육안으로 관찰할 수 없기 때문에 기록지로부터 타격방향을 파악해야 하므로 수신기 소자(고유주파수 28Hz)를 함머의 주변에 부착 고정하여 타격방향을 구분하였다. 수신기의 방향은 연결과 분리가 가능한 rod를 사용하여 시추공 수신기에 부착시켜 시추공에 넣고 회전시키면서 방향 제어장치로부터 판독하여 결정하였다. 그리고 이 rod로 부터의 잡음전달을 방지하기 위해 수신기를 고정한 다음 약 2m 정도 분리하였다. 또한 수신기 케이블로부터 전달될 수 있는 잡음도 차단하기 위해 수신기 고정 후 이 케이블을 느슨하게 하였다.

지면에서 솔레노이드 함머를 이용하여 P파를 발생시키기 위해서는 연직방향으로 S파를 위해서는 수평방향으로 타격을 가하였다. 진원점 S-0 지점에서 P, S파를 발생시킬 때 이들의 파는 시추공축을 따라 전파한다고 가정하고 시추공에서 수신점을 이동하면서 기록하였다. 이때 검층간격은 1m씩 하였으며 진원점은 시추공 입구로부터 80cm 떨어졌으며 수신기의 각 성분별 방향은 그림 1의 진원점 B에 해당한다. 이 경우 지표에서 진원방향에 따라 시추공내 3성분 수신기에 우세하게 기록되는 파종을 살펴 보면 수평방향으로 타격할 때 x성분은 SH파, y성분은 SV파, z 성분은 P파가 기록된다. 그리고 연직방향으로 타격할 때는 xy성분에서는 SV파가 기록되며 SH파는 거의 나타나지 않고 z성분에서는 P파가 기록된다. 이렇게 각 성분별로 어떠한 파가 기록되는 지를 사전에 검토되어야 검층의 결과에 대하여 분석할 수 있다. 수평방향의 진원에 대하여 기록된 x성분은 SH파에 해당되며 우세주파수는 100Hz이며 최대 입자변위의 크기는 10^{-2}kine sec 정도의 오더로 모든 측정 심도에서 수신된 에너지는 거의 일정한 것으로 추정된다. 연직방향 진원에 대한 z성분은 180~200Hz 범위의 주파수가 우세하다.

4. 결과 및 고찰

전자식 솔레노이드 함머를 사용하여 진원점 S-0 지점에서 진원을 발생시킬 때 P파의 입자속도 분포는 심도 2m부터 20m 사이에서 $2.93 \times 10^{-4} \sim 1.04 \times 10^{-5}\text{kine}$, SH파는 2m부터 21m 사이에서 $3.46 \times 10^{-4} \sim 2.05 \times 10^{-6}\text{kine}$ 의 범위를 나타낸다. 그리고 수신기의 설치심도(D)와 입자속도와의 관계는 P파가 $D^{-1.54}$, S파가 $D^{-2.24}$ 으로 S파가 더 크게 감소하고 있다.

본 실험에 사용된 시추공용 수신기가 공벽에 완벽하게 고정되었다고 가정할 때 관측 가능한 최단파

장 A_0 는 16.9cm, 고유주파수가 28Hz이므로 측정 가능한 최저 속도는 4.7m/s이다. 즉 지층의 속도가 이 정도 이상일 때는 관측 가능하다는 것이다. 이때 공벽의 고정상태를 결정하는 중요한 요인중 하나는 공벽과 접촉하는 강판의 형태를 지시하는 k인데 이를 적절하게 가공하여 접촉조건을 양호하게 하여 이 값을 크게 만들어 주고 2차 공진주파수의 발생을 최소화시키는 것이다.

수진기의 설치 방향에 따라 수진 신호의 특성을 보면 연직 방향인 z성분과 공벽 고정방향인 수평 x성분은 뚜렷하게 주파수 특성을 보이면서 양질의 신호를 얻을 수 있다. 반면 이 고정방향과 직각인 수평 y성분에서는 우세 주파수 80Hz 정도의 파가 2차 공진하고 있는 데 이는 매질 정보를 포함하고 있는 주파수와 혼합되어 있으므로 탄성과 신호와의 구분을 거의 불가능하게 만든다. 이러한 공진주파수의 발생원인은 수진기의 공벽 고정상태가 불완전하여 발생하는 것으로 생각되므로 가능한 한 적절하게 최대의 압력을 가하여 공벽에 고정시켜 주는 것이 좋다. 따라서 시추공에서 고정형 수진기를 이용하여 신호를 관측할 때는 수진기의 고정방향의 성분을 택하는 것이 바람직하다.

P파의 검층결과를 보면 심도 25m까지 매우 양질의 신호가 기록되었으며 초동의 변화가 뚜렷하다(그림 2). 수평 타격으로부터 발생한 SH파를 수진기의 x성분에서 얻은 트레이스들에 대한 shear pair는 그림 3과 같다. '+'극성을 나타내는 트레이스가 N(normal)방향의 진원이고 '-'극성이 R(reverse)방향의 진원이다. 여기서 P파를 지시하는 파형들은 거의 볼 수 없으며, SH파들은 양 방향(N,R)의 진원에 대한 극성변화가 정확하게 역전되고 있다. 따라서 그림 2와 그림 3의 트레이스를 이용하여 PS파의 속도검층 결과는 그림 4와 같다. 이때 좌측에 시추자료와 케이싱 심도 및 상태를 표시하였으며 속도변화와 표준 관입 시험 N치와를 비교하기 위해 속도 자료와 함께 나타내었다. 그리고 실험당시의 지하수위는 지표로부터 4.7m이었다.

S파 속도는 108~400m/s, P파 속도는 540~2,500m/s 범위의 속도분포를 보이고 있으며 Poisson비는 0.46~0.49으로 비교적 크다. 먼저 S파 속도분포를 보면 지표부터 심도 8m까지는 속도 108~133m/s를 보이며 심도 8~13m 구간에서는 속도 182~250m/s로 증가하다가 13~16m에서는 다시 170~220m/s로 감소한다. 그리고 그 하부 심도에서는 220~400m/s 범위로 증가하고 있다. 이의 결과와 N치와 비교할 때 거의 유사한 경향을 보이고 있다.

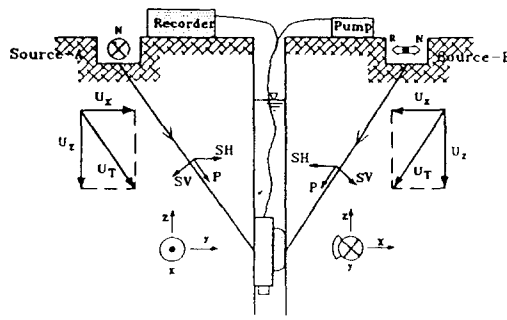
P파의 속도분포를 보면 지표부터 심도 14m까지는 속도 540~2,000m/s 범위를 나타내는 데 부분적으로 약간씩 감소하기도 하나 거의 연속적으로 증가한다. 그리고 심도 14~20m 사이에서는 930~1,103m/s로 저속도를 보이다가 그 하부 심도에서는 2,500m/s로 다시 증가한다. 여기서 지하수위 경계부 상부에서의 속도는 1,140 m/s이고 하부에서는 1,550m/s 정도로 동일한 사질층임에도 불구하고 속도차가 410m/s로 비교적 크다. 이는 지하수의 영향을 받아 P파의 속도가 증가된 것이다. 반면 지하수의 영향을 거의 받지 않는 S파의 속도차는 30m/s 밖에 되지 않는다. P, S파의 속도 분포와 시추자료를 비교하여 보면 지층 구성에 따라 비교적 잘 일치하고 있으나 심도 17~21.6m 구간은 역암층으로 되어 있는데 이 구간은 시추도중 시추공이 붕괴되어 시멘트로 그라우팅한 후 시추하였기 때문에 소위 콘크리트화 되어 실제 역암층 보다 견고해져 강성율이 증가되어 S파의 속도증가를 초래한 것 같다. 반면 P파의 속도는 역암층에서 체적탄성율이 보다 크게 감소되어 속도감소를 나타내고 있다.

지반의 탄성과 속도와 토질공학의 역학적 정보중 하나인 표준관입시험 N치와 S파 속도와 상관은 지층별로 구하는 것이 타당하나 본 실험에서는 충적층, 점토층, 사질층, 실트층 등 제4기층 미고결 연약지반에 대한 S파 속도와 N치와의 상관 관계식 $V_s=85.2N^{0.27}$ 을 얻었다(그림 5). 이 식은 상기 미고결 연약지반의 S파 속도를 알 때 대략적으로 N치를 추정할 수 있다.

참 고 문 헌

- 송무영, 유영준, 1993, 연약지반에서 P파와 S파의 연구, 한국지구과학회지, 14(3), p.338-347
 유영준, 1996, 시추공에서 P파, S파의 탐지효율 증대에 관한 실험, 충남대학교 박사학위 논문, P.109
 狐崎長琅, 1970, 震源用, 電氣→機械的變換素子としてのSolenoid hammer-理論, 物理探鑽, 23(2), p.86-96
 Ahmed, H., 1989, Application of mode converted shear wave to rock-property estimation from vertical seismic profiling data, Geophysics, 54(4), p.478-485

(a) Cross Section



(b) Signal Polarity for the First Motion

	Source-A	Source-B	
x-comp.			Normal-solid line Reverse-dashed line
y-comp.			
z-comp.			

Figure 1. Distinction of seismic records according to source direction. (a) Raypaths for source point A and B and displacement vectors. (b) Signal polarity for the first motions and shear pair.

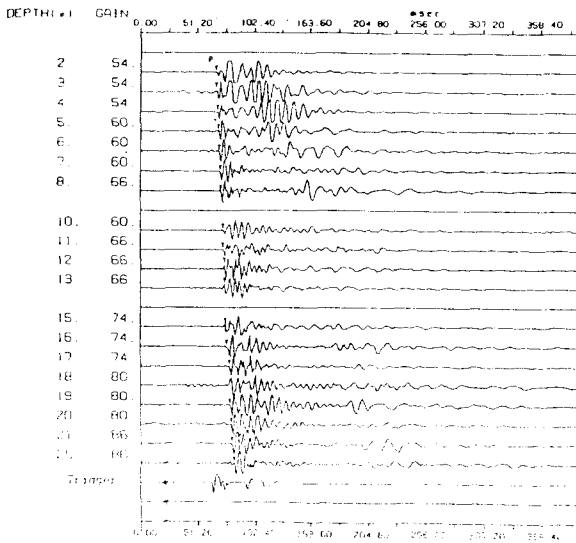


Figure 2. P-wave records for vertical impact by Solenoid hammer. Logging interval and source point are 1m and S-0, respectively. Polarity of the first motion is negative and very clear for vertical source.

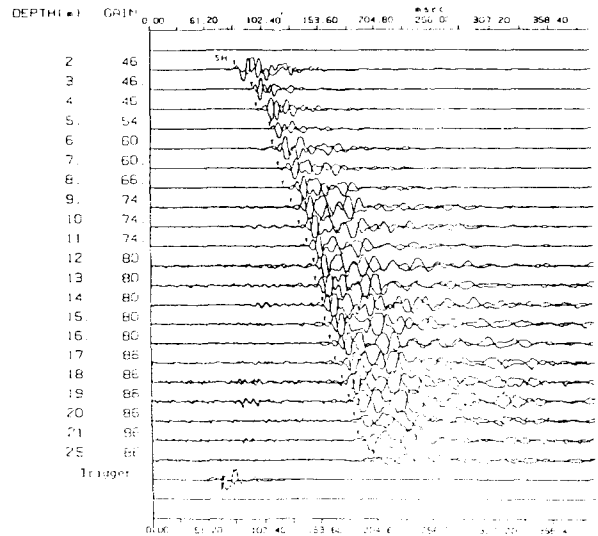


Figure 3. Shear pair records by horizontal impact of Solenoid hammer at the source point S-0. Polarity changes of first motion are positive for normal source and negative and very clear for reverse.

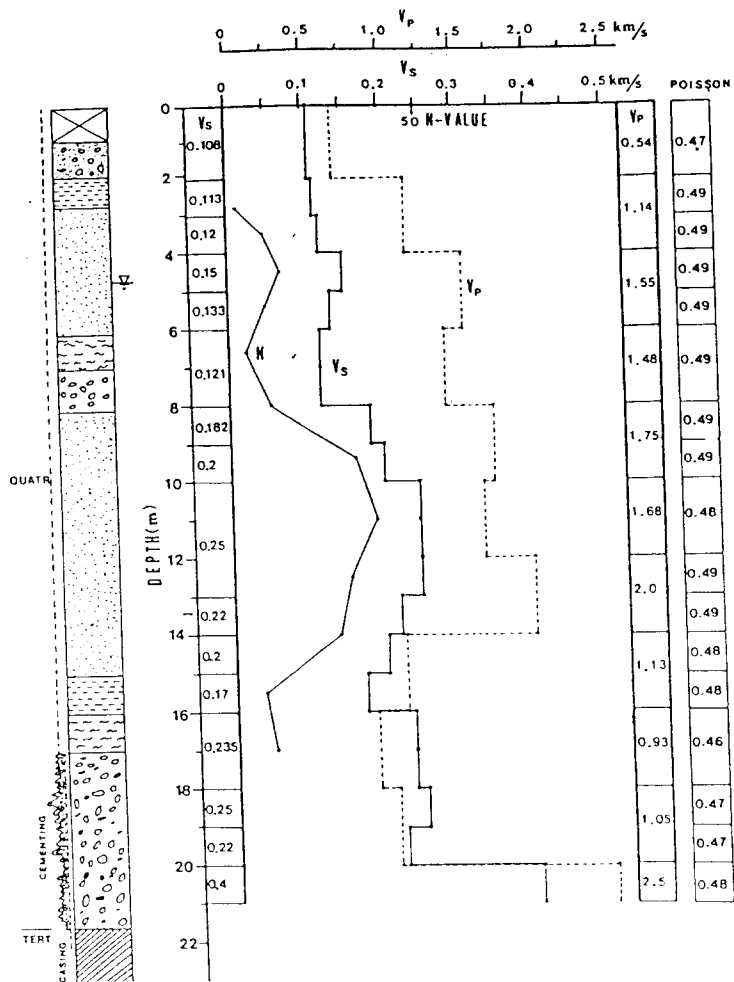


Figure 4. Velocity logs of P- and S-wave and Poisson's ratio of right side calculated from V_p and V_s logs. N-value of SPT and core log plotted from the existing data for comparison to the V_p and V_s logs.

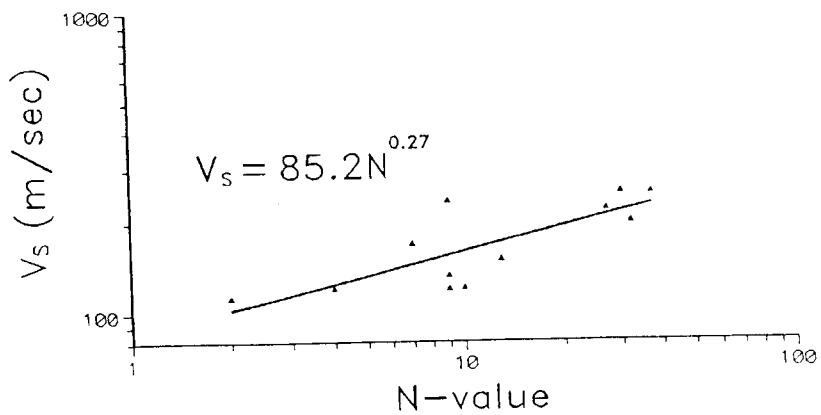


Figure 5. Experimental correlation between V_s and N-value in the soft ground, Quaternary Formation.