

## 콘관입시험과 탄성파탐사의 비교 이용에 관한 연구

### A Study on the Comparative Utilization of Cone Penetration Test and Seismic Prospecting

송 무 영 (Moo Yong Song)  
김 팔 규 (Pal Kyu Kim)  
김 연 천 (Yeon Cheon Kim)  
류 권 일 (Kwon Il Ryu)

충남대학교 지질학과  
충남대학교 토목공학과  
(주)SK 건설  
충남대학교 토목공학과

#### 요약 / ABSTRACT

흙은 실제 비균질, 비등방성이기 때문에 정확한 지반 특성을 파악하기는 쉽지 않다. 또한, 지반조사는 시간적, 경제적 측면에서 비효율적인 경우가 많다. 따라서, 본 연구는 지반조사의 효율적인 방법을 제시하기 위해 콘 관입치와 탄성파속도에 대한 상관성 분석을 시도하였다. 콘관입시험기는 토질특성 파악에 많이 사용되는 장비이며 특히 해안 연약지반의 특성 파악에 적합한 장비로서 본 연구에서는 휴대용 원추형 콘관입시험기를 사용하였다. 휴대용 원추형 콘관입시험기는 조작이 편리하고 신속하게 지반상태를 파악할 수 있는 장점이 있다. 또한, 탄성파탐사는 물리 탐사방법중 개략적 지반상태의 추정에 가장 많이 이용되는 방법으로 연약지반에 대한 이용이 계속 증가하고 있다 콘저항치는 심도별 지층구성에 따라 일정한 균을 형성하였고 탄성파속도 또한 지층경계에 따라 일치하는 경향이 나타났다. 따라서, 탄성파 속도와 콘관입저항치는 상당한 연관성을 가지고 있으며 이는 지반조사의 효율성을 증대 시킬 수 있을 것이다.

It is not easy to understand exact soil properties, because soil is nonhomogeneous and anisotropic. There are many inefficient cases in aspect of time and economy in site survey. So this study tried to analyze the correlation of cone resistance and seismic velocity in order to present an efficient method in ground investigation. A cone penetrometer is frequently used to investigate soil properties, which are especially fit to investigate coastal soft ground. A portable cone penetrometer was used in this research. A portable cone penetrometer has an advantage in investigating the state of soil swiftly and is convenient to manipulate. Also, seismic prospecting is one of the most popular methods among geophysical prospecting methods in the estimation of ground properties and its usage is continuously

increasing in the survey of soft ground. Cone resistance makes a regular group according to stratum in each depth. The results of seismic prospecting show a tendency to have a certain coherence according to the boundary of stratum. Therefore, cone resistance and seismic prospecting have considerable relations that may improve the efficiency of ground investigation.

## 서론

지반을 형성하는 흙의 구성은 토립자와 그 입자들 사이의 빈 공간을 채우는 공기, 물, 광물입자, 그리고 부패된 유기물질과 비교적 광물입자의 집합체로 정의할 수 있다. 이러한 집합체로 구성된 흙에서 고려되어야 할 중요한 요소는 거동 및 응력과 관계된 변형조건 및 지반특성이라 할 수 있다. 이 중 지반특성은 대부분 실내시험을 통하여 결정할 수 있으며 이러한 실내시험 외에도 현장채취 중 발생할 수 있는 시료의 교란을 방지하기 위해 흙의 변형특성과 강도는 현장에서 측정할 수도 있다. 그러나 지반특성은 시간과 비용 등 제반 요인의 제약으로 인하여 정확하게 결정되어 지지 않는 경우가 많다. 또한, 지반특성은 기본적으로 성층 단계에서의 응력이력과 같은 지반 생성기원등의 지질학적 요인까지도 잘 이해하고 있어야만 예측과 가정이 필요할 때 오차를 최대한 줄일 수가 있다. 이와 같은 지질학적 고찰을 위한 개략적인 조사는 신뢰성 있는 지질분포 파악이 가능한 물리탐사가 일반적으로 이용되어지고 있다(송무영등, 1992).

본 연구 대상 지역은 국내 서해안의 연약지반을 대상으로 하였다. 이 지역의 지반 특성 및 상관성 분석을 위해 휴대용 원추형 콘관입시험기와 탄성파 탐사를 실시하였다. 그리고 측정된 CPT-VP 결과에 따른 콘저항치와 탄성파 속도와의 상관성 분석 및 CPT-VP간 연속적이고 효과적인 연구 자료의 이용방안을 제시하고자 하였다. 또한 심도별 콘저항치의 대표값은 Vivatrat(1978)에 의해 제안된 방법에 의해 지반을 단순화 한후 지층의 대표되는 콘관입저항치를 사용하였다.

## 지질 특성

조사대상 지역은 충청남도 서산지역으로 그림 1

에 조사 대상 지역의 지질분포를 나타내었다. 이 지역은 주로 매립지반으로 앞으로 개발 가능성이 많은 서해안의 연약지반을 선정하여 본 연구를 실시하였다.

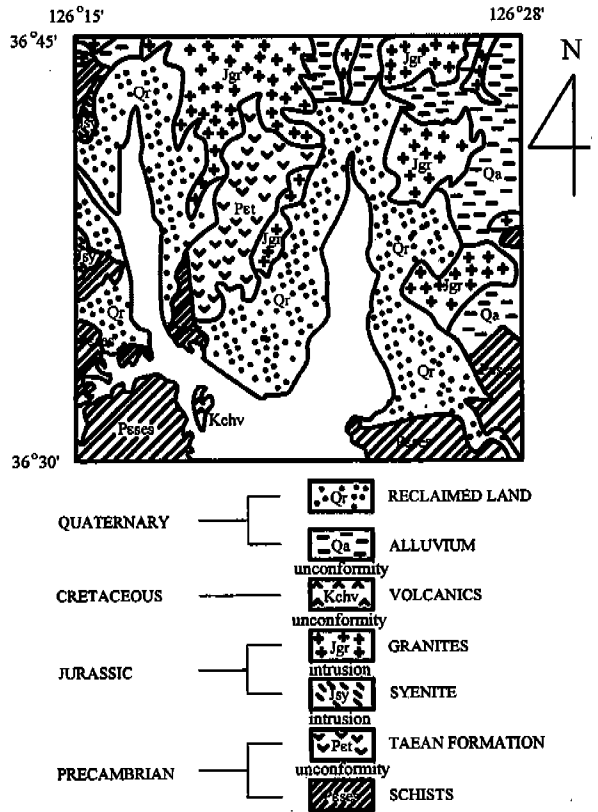


Fig. 1. Geological map of the study area.

이 지역의 지질은 조간대의 조립질 퇴적물과 세립질 퇴적물에 기인하는 기반암과 사장포 남서부지역에 넓게 분포하는 선캠브리아기의 변성 퇴적암류 및 창리와 간월도 사이에 소규모 분포되는 중생대

화산암류 그리고 북동부로부터 가장 넓게 분포하는 관입암류로 구성된다. 이들 화산암류로는 석영 안산암질과 응회암으로 띠섬을 포함하여 주위의 몇몇 작은섬으로 구성되어있다. 중생대 관입암류로는 반상 섬장암, 반상 화강암등과 본 연구지역에 가장 넓게 분포하는 조립질 내지는 중립질의 흑운모 화강암이 분포한다. 사장포 주위는 낮은 구릉과 충적층이 넓게 발달하고 있으며 수량이 적은 소규모의 하천들이 사장포로 흘러 들어가고 있다.

## 시 험

지반특성의 평가는 지반단면, 지반특성치 등의 결정을 통한 지반 모델링이 첫단계로서 지반이상화 및 지반특성의 대표치를 산정하는 과정이다. 지반 이상화는 지반의 단순화를 통한 것이므로 합리적인 판단 및 경험을 필요로 한다(송무영등, 1995). 또한, 지반대표치가 불확실성을 갖게되고 실제 문제와는 차이를 갖게되는 원인은 경험 및 합리적인 판단의 결여 뿐만 아니라 시험재료의 교란 및 지반특성의 공간적 변환으로 인해 발생한다. 따라서 산정된 지반대표치는 각 시험결과의 상관분석 및 자료조사를 통하여 해석에 적용할 설계곡선 및 설계치로의 변환을 하여야 하는데 이 평가과정은 지반의 비선형성을 적절하게 나타내야 한다. 또한, 시험과 해석의 상관성뿐만 아니라 입력치를 적절히 설계목적에 맞게 조정해야하므로 이론과 많은 경험이 요구된다. 본 연구에 사용된 시험방법은 연약지반의 특성 파악에 효과적이라 판단되는 콘관입시험 및 물리탐사로 지반 특성치의 상호 연관성에 대하여 시험 및 분석을 하고자 하였다.

### 1. 콘관입시험

휴대용 원추관입시험기의 가장 큰 장점은 휴대가 간편하여 이동성이 좋다는 점이다. 시험 기구는 선단, 콘, 룯드, 핸들, 걸력계 및 저울로 구성되어있다. 이 시험기는 50cm의 룯드 10개를 한 셋트로 하여 룯드를 연결시켜가면서 이루어진다. 룯드의 직경은 16mm, 선단각 30°, 저면적 6.45cm<sup>2</sup>로 구성되어 있으며 관입저항치인 qc값으로 토층 구성을 판단한다.

콘관입시험에 의하여 나타나는 지반에 대한 단

면은 콘이 관입되는 동안에 콘의 관입속도, 콘의 기하학적 형상, 지반의 토층 분포상태, 지하수위 등의 여러가지 원인에 의하여 콘 저항치의 단면이 매우 불규칙하게 나타난다. 만일 지반이 등방성, 균질성인 지층으로 분포하고 있고 관입속도, 콘의 종류 등 외적인 요인이 지반에 대해 일정하게 작용된다면 지반의 단면에 나타난 콘 관입 저항치는 토층의 변화 지하수위의 변동등 내적 요인이 발생하기 전에는 콘 저항치가 일정하게 나타나야 한다. 그러나 콘 저항치는 지반에 내포되어 있는 비균질성, 비등방성등의 토질형태에 의한 원인과 콘의 관입속도, 콘의 기하학적 형상 등의 원인에 의하여 콘 관입 저항치가 일정하게 나타나지 않으므로 쉽게 지층의 경계를 구분할 수 없다.

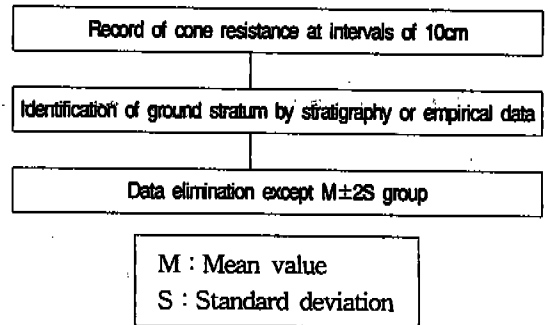


Fig. 2. Simplification of ground by Vivatrat (1978).

따라서, 경험에 의한 방법이나 다른 시험에 의한 자료와의 비교 등에 의하여 콘 저항치에 따르는 지층의 경계를 구분해야 한다. 이와 같이 대표되는 콘의 저항치로 지층의 경계를 구분하여 지반을 단순화(이상화)시킬 수 있다. 따라서 각 층별 콘 관입 저항치의 대표값을 산정하기 위해서 Vivatrat(1978)에 의해 제안된 방법에 의해서 지반을 단순화 한 후에 지층에 대표되는 콘 관입 저항치를 나타낼 수 있다. Vivatrat(1978)에 의한 지반단순화는 그림 2에 나타내었다.

또한, 지반의 특성으로 결정되는 것 중의 하나가 탄성계수(Young's modulus)이다. 탄성계수의 결정방법은 콘 관입시험과 같이 현장시험 결과로부터의 상관성에 따른다. 이런 상관성은 토질형태

에 따라서 각각의 선형적인 관계를 가지는 것을 발견한다. 그러나 탄성계수의 결정은 연구지역 및 연구방법에 따라서 많은 차이를 보이고 있다. 기존 연구된 콘관입 저항치를 이용하여 탄성계수를 구하

는 식들은 표 1에 나타나있다. 보통  $E = \alpha q_c$  로 표현되고 각 시험자와 시험 위치의 토질 형태, 콘관입방법등에 따라  $\alpha$ 의 값이 다르게 표현된다.

Table 1. Empirical equations for Young's Modulus.

De Beer(1957)	$E = 1.5 q_c$
Meyerhof(1956) & Schmertmann(1970)	$E = 2.0 q_c$
Van Weele(1957)	$E/(1-\nu)^2 = 60 q_c$
Thomas(1968)	$E = (3-12) q_c$
Trofimenkov(1974)	$E = 3.4 q_c + 130$ ---- (sand) $E = 1.5 q_c + 123$ ---- (clay)
Poulos(1979)	$E = (8\sim 20) q_c$ ---- (sand) $E = (10\sim 40) q_c$ ---- (clay)
Schmertmann(1978)	Dense Sand : $E/q_c = 1$ Loose Sand : $E/q_c = 1.5$ Silt : $E/q_c = 1$ Insensitive Clay : $E/q_c = 3$ Very sensitive Clay : $E/q_c = 20$

2. 탄성과 탐사

물리탐사법(Geophysical prospecting)에는 지표에서 지하층과 밀접하게 관련되는 물리량을 측정하여 이를 분석함으로써 지질구조를 추정하는 지표탐사법과 보링공을 이용하여 공내 각 깊이의 물리량을 측정해서 동일한 목적을 달성하는 절반 원위치시험적인 공내검층법이 있다. 지표탐사법은 한 지역에 걸치는 지표지질의 대국적 경향을 판정하기 위해 보링의 전단조사로서 이용되고 공내 검층법은 보링 실시때에 지질학적 정보를 보완·확인하는 의미를 곁해서 실시된다.

탄성과 탐사(Seismic prospecting)는 지표탐사 중에서 가장 많이 이용되는 탐사법으로 흙속에 작은 폭발을 일으키거나 해머로 흙 위에 있는 판을 두들겨 생성되는 충격이나 충격파를 음원으로 사용하며, 그 파의 전파를 관측해서 지층구조를 추정하는 방법이다. 탄성과 탐사는 크게 굴절법(Refraction

method)과 반사법(Reflection method)으로 나눌 수 있다. 이중 주로 이용되는 방법은 굴절법 탐사법이며 굴절법 탐사중에서도 인라인 굴절법 탐사법이 가장 많이 쓰인다.

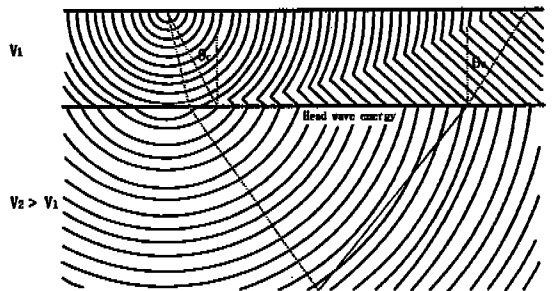


Fig. 3. Wavefront for energy of first arrival energy & head wave.

그림 3에서 보는 바와 같이 탄성파는 속도가 다른 두 매질의 경계면에 입사할 때 반사, 굴절, 회절이 일어나게 된다. 본 탐사에서는 굴절의 성질을 이용하는 굴절법 탐사로 시행되었다.

본 연구에서는 현장시험으로 미소변형률의 탄성

파 탐사를 실시하여 속도에 따른 지반의 형태를 측정 한 후, 실험결과에 따라 산정된 대표치와 기존자료와의 비교를 통하여 동적지반 특성에 관한 연구를 수행하였다. 표 2는 탄성과 탐사의 작업단계 및 전산처리 과정을 나타낸 것이다.

Table 2. Four stage of collection & interpretation of shallow seismic refraction data.

STAGE I	FIELD WORK Collection of seismic records and topographic information
STAGE II	INTERPRETATION-PHASE I Production of velocity section from travel time curves
STAGE III	INTERPRETATION-PHASE II Determination of geological and petrophysical properties from velocities
STAGE IV	INTERPRETATION-PHASE III Geological significance

### 상관성 분석

#### 1. 콘관입 시험

일반적으로 점토, 실트 또는 유기질 점성토등에 있어서는 콘관입저항치 qc와 점착력 c와의 사이에 비례관계가 인정되고 비교시험의 결과 콘관입저항치(qc), 일축압축강도(qu), 점착력(c)의 관계는 대략 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$c = (1/10)q_c = (1/2)q_u \quad \dots\dots(1)$$

$$\{q_u = 0.12 - 0.13N(kg/cm^2)\}$$

$$c = 0.06 - 0.065N(kg/cm^2) = \dots\dots(2)$$

$$0.06 - 0.065N(ton/m^2)$$

상기의 (1), (2)식은 내부마찰각이 무시되는 점토 지반에 광범위하게 적용되는 실험적 관계이며 비교적 정밀도가 낮은 표현식으로 탐사심도가 깊은 지

역인 경우에는 관입되는 주변지반의 마찰력(Skin friction)으로 인하여 신뢰도 저하가 우려되므로 사용에 주의를 요한다. 그림 4는 조사지역의 지반심도에 대한 콘관입저항치를 도시한 것이다. 전 지역에 걸쳐 심도에 따르는 콘 관입 저항의 분산성이

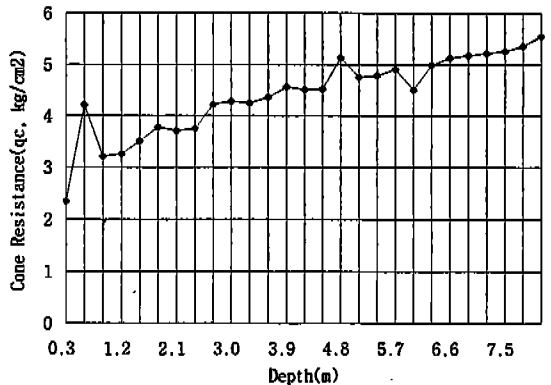


Fig. 4 Cone resistance(qc) according to depth.

크게 나타나는데 이는 다양한 퇴적환경과 복잡한 성층상태를 이루고 있는데 기인하는 것으로 보인다. 대체적으로 심도가 깊어질수록 비례하여 큰 저항이 증가하는 경향을 보이고 있다.

2. 탄성과 탐사

탄성과 탐사의 방법 중 굴절법을 이용하여 지반 조사의 자료를 얻기 위해 행해진 본 시험은 탐사측선을 7 Line으로 배열하였다. 이 탐사 측선에서 큰 관입시험이 동시에 수행되었다. 탐사를 위한 조사 위치 배열은 그림 5와 같이 직선상으로 3 Line을 평행하게 배열하였다. 이 Line과 평행하게 3 Line을 배열한 뒤 이와 수직 방향으로 1 Line을 구성하여 총 7 측선을 배열하였다. 연구지역은 지표면 경사가 거의 수평구조를 하고 있으며 탐사장비중 수신기는 24ch, 14Hz를 이용하였고 각 수신기의 간격은 3m로 설치하였다. 탄성과 발생의 근원으로는 망치 타격법(Hammer impact method)을 사용 하였다. 근접 발파시(FNS 또는 RNS) 수신기 간격을 3m로 하고 양끝 수신기에서 3m 떨어진 지점에서 타격하였다. 심도반응을 알기 위한 원격발파(FRS, RRS)시에는 수신기에서 타격지점까지 69m 격리시켜 타격하였으며 양측의 반응비교를 위해 왕복측정을 시행하였다. 굴절법 탄성과 기록은 초동을 취득하여 주시곡선으로 구성되고 수신기에서의 지연시간 개념을 이용한 상반법(Reciprocal method)에 따라 속도분석을 거쳐 지하의 탄성과 속도층 구조를 해석 하였다. 탄성과 음원조성은 햄머의 중복타격으로 하였고 신호강화(Signal Enhancement)시켜서 탄성과 반응 기록을 획득하였다.

본 연구에서는 현장 동적지반 특성시험인 탄성과 탐사를 통하여 그 결과치인 탄성과의 속도에 따라 굴절법 해석의 주시곡선 자료해석에 의해 지반층의 분포를 구분하였다.

그림 6의 (a), (b) 및 (c)는 각각 Profile 1, Profile 2와 Profile3의 주시곡선도를 보여주고 있다. Profile 1을 얻기 위한 측선 배치는 SN방향이며, 수신기 1번은 남쪽으로 위치하고 수신기 24번은 북쪽 방향에 위치한다. 탄성과 속도 분석 결과 2층으로 추정되며, 제1층의 속도( $V_1$ )는 0.46km/sec이며 제2층의 속도( $V_2$ )는 1.453km/sec로, 제1층과 제2층의 층후는 1.8m~2.1m로 추정된다.

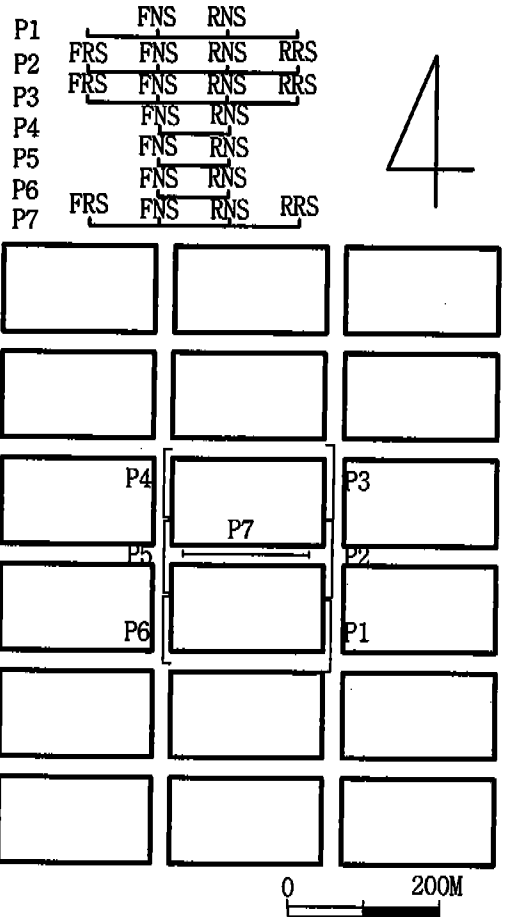
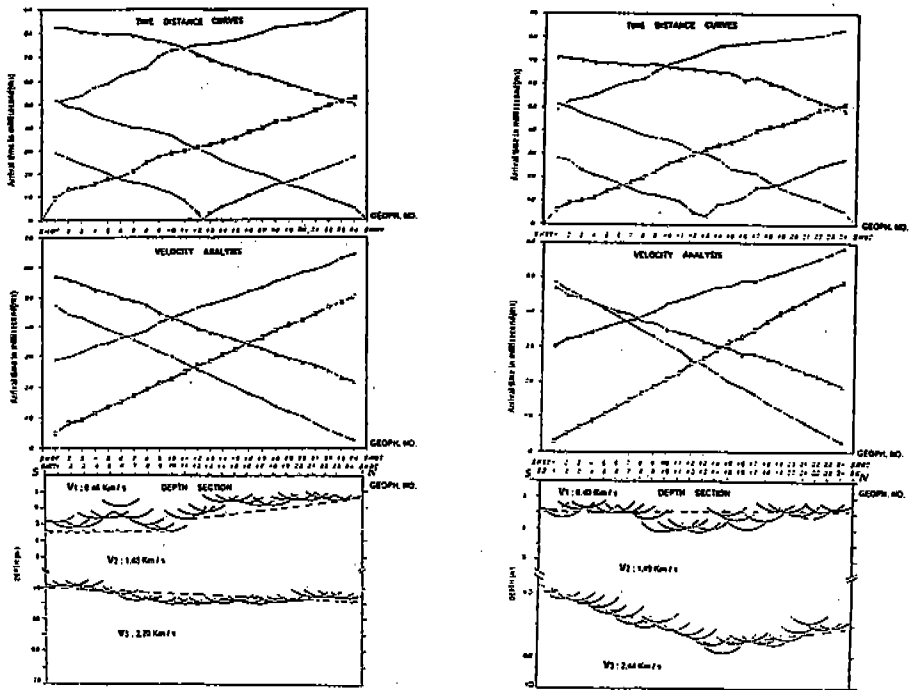


Fig. 5. Location map of seismic tracks in the survey area divided rectangular for paddyfield.

Profile 2의 측선 배치는 Profile 1과 일직선 상에 배치되어 있으며 표면경사는 거의 수평이다. 탄성과 속도 분석 결과 3개의 층으로 나타났다. 제1층의 속도( $V_1$ )는 0.4km/sec, 제2층의 속도( $V_2$ )는 1.49km/sec, 제3층의 속도( $V_3$ )는 2.91km/sec를 보이고 있으며 제1층과 제2층의 경계면 심도는 1.7m~2.2m, 2층과 3층이 41m~52m 이하를 보여주고 있어 3개의 층으로 구분 된다.

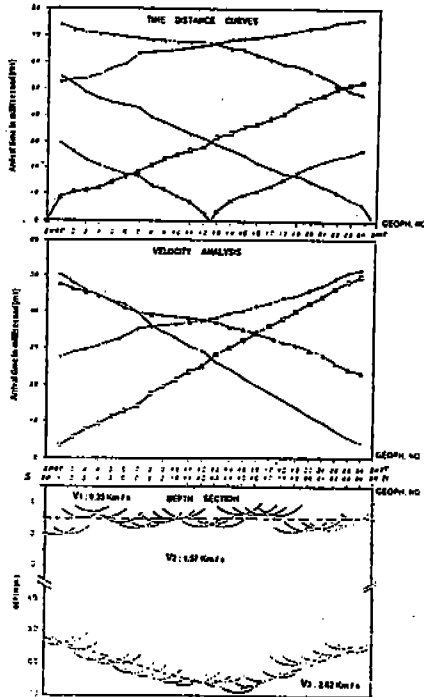
Profile 3의 측선은 Profile 1, 2와 같은 일직선상에 배치되어 있으며 측선 배열조건은 같다. 제1층의 속도( $V_1$ )는 0.35km/sec, 제2층의 속도( $V_2$ )는 1.577km/sec, 제3층의 속도( $V_3$ )는 2.79km/sec를 보이고 있다. 제1층과 제2층의 경계면 심도는 1.7m~

콘관입시험과 탄성파탐사의 비교 이용에 관한 연구



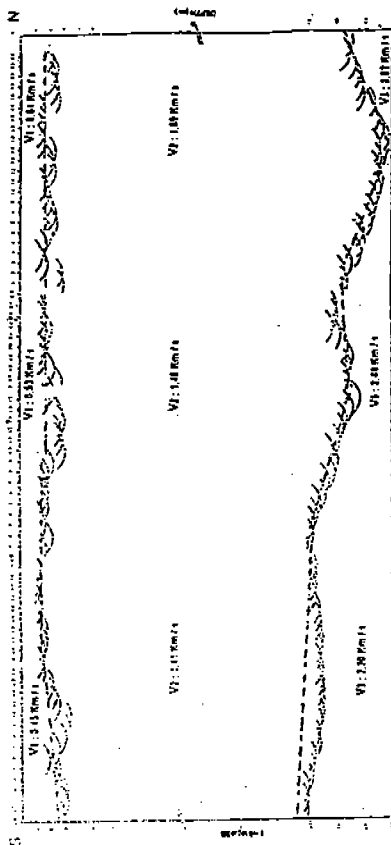
(a) profile 1

(b) profile 2

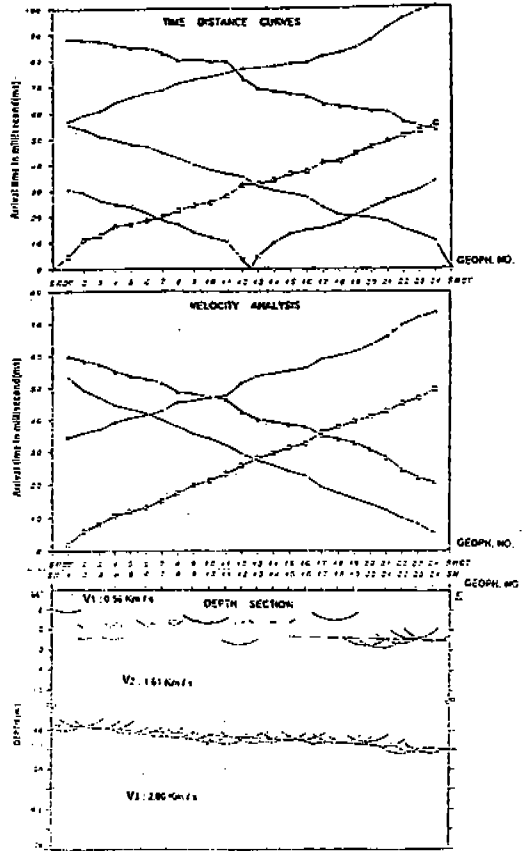


(c) profile 3

Fig. 6. Travel time curves, analysis and layer structure interpretation along profile 1, 2 and 3.



(a) profile 4, 5, 6



(b) profile 7

Fig. 7. Travel time curves, analysis and layer structure interpretation along profile 4,5,6 and 7.

2.3m, 제2층과 3층의 경계면 심도는 42m~47m로 남에서 북으로 갈수록 심도가 깊어짐을 추정할 수 있다. 이상의 Profile 1, 2, 3를 종합하여 보면 제1층의 평균속도( $V_1$ )는 0.41km/sec~0.51km/sec, 제2층의 속도( $V_2$ )는 1.45km/sec~1.68km/sec, 제3층의 속도( $V_3$ )는 2.11km/sec~2.83km/sec로서 1층과 2층의 경계면 심도는 1.7m~2.3m, 제2층과 3층의 경계면 심도는 42m~55m로 파악된다.

그림 7은 Profile 4, 5, 6 및 Profile 7의 주시곡선도를 보이고 있다. Profile 4, 5, 6의 축선 배열은 Profile 1, 2, 3과 평행하게 북쪽에서 남쪽방향으로 배열하였으며 수신기 1번은 북쪽, 수신기 24번은 남쪽방향이다. Profile 4, 5, 6 축선에서 탐사된 결과를 분석하면 제1층의 평균속도( $V_1$ )는 0.45~0.61km

/sec, 제2층의 속도( $V_2$ )는 1.41km/sec~1.69km/sec, 제3층의 속도( $V_3$ )는 1.98km/sec~2.83km/sec를 보여주고 있다. 경계면의 심도는 1층과 2층이 1.5m~2.7m, 2층과 3층이 38m~68m 이하를 보여주고 있다.

Profile 7은 Profile 1, 2, 3과 Profile 4, 5, 6에 수직(W-E)방향으로 배열 하였다. 수신기 1번이 서쪽이며 24번은 동쪽으로 원거리 이동발파(FRS or RRS)를 실시 하였다. 제1층의 속도( $V_1$ )는 0.55km/sec, 제2층의 속도( $V_2$ )는 1.61 km/sec, 제3층의 속도( $V_3$ )는 3km/sec를 보이고 있다. 제1층과 제2층의 경계면 심도는 1.7m~3m, 2층과 3층이 35m~42m로 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 깊어짐을 보인다.



3. 상관성 분석

연약지반은 입도조성, 점토광물의 성질, 간극수의 성질과 응력이력, 압밀층의 두께, 배수조건 및 경과 시간 등에 의해 다양한 특성을 나타낸다. 이러한 토성으로 구성된 지반의 조사에 적합한 장비인 콘관입 시험기를 이용한 콘 저항치의 분포도와 탄성파 탐사의 결과를 분석하여 보면 표토층과 매립층 등에서 비슷한 분포를 보이고 있음을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 탄성파와 콘 저항치의 값이 일정한 관계가 있음을 알 수 있다. 그림 8~그림 10에 나타나듯이 상관성 회귀분석을 보면 매우 높은 상관계수를 볼 수 있다. 따라서 이 결과로 볼 때 두 지수간 밀접한 연관성을 나타낼 수 있다고 본다.

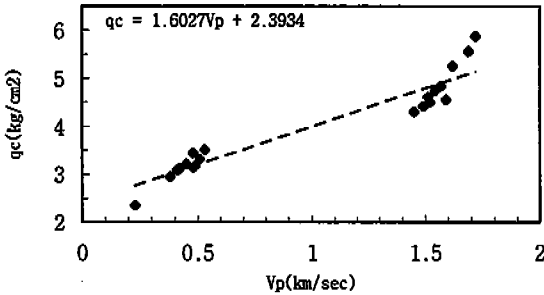


Fig. 8. Relationship between seismic wave velocity and cone resistance at Profile 1, 2 and 3.

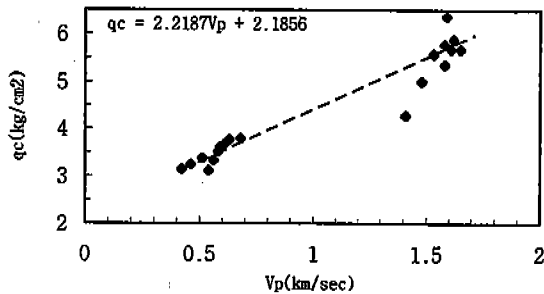


Fig. 9. Relationship between seismic wave velocity and cone resistance at Profile 4, 5 and 6.

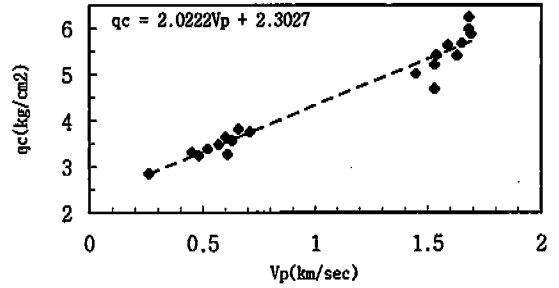


Fig. 10. Relationship between seismic wave velocity and cone resistance at Profile 7.

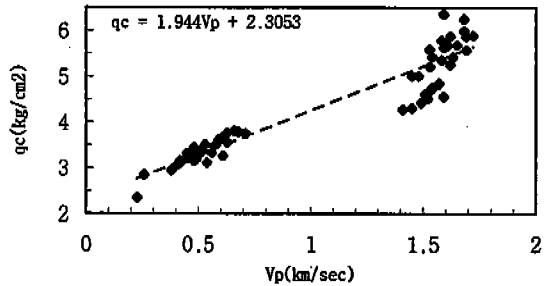


Fig. 11. Relationship between seismic wave velocity and cone resistance at Profile Total.

결론

지반조사 결과를 보면 전반적으로 심도별 지층 구성에 따라 콘 저항치 분포도는 일정한 균을 형성하고 있다. 표토층은 평균 2.5~3kg/cm<sup>2</sup> 정도, 연약지반층에서는 4.5~5.5kg/cm<sup>2</sup> 정도의 콘저항치를 보인다. 탄성파탐사를 통한 지층구분은 지표로부터 1.5~3.0m 사이에는 표토층, 이하 평균심도 30~40m 정도는 연약층, 그리고 30~40m이하 깊이 기반암층 등 대략 3개층으로 구분이 가능하다. 속도 분포는 표토층 0.41~0.61km/sec, 연약지반층 1.41~1.69km/sec로 탐지되었다.

또한, 탄성파 탐사 측선과 일치하는 부분에서 산정된 콘관입저항치와 탄성파 속도와의 사이에는  $qc = 1.944 Vp + 2.3053$  이라는 대표식이 얻어졌다. 두 지수간 상관계수를 통해본 결과는 0.9 정도의 양호한 분석 자료로 나타났다. 이러한 상관결과로

불 때 큰 관입시험과 탄성과 탐사를 병행한 지반조사방법은 충분히 이용가치가 있다고 판단된다. 따라서 앞으로의 지반조사 수행에 있어서도 효율성 및 신뢰성 제고에 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 SK건설, LG건설, 현대건설 및 자원연구소의 협조로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 송무영, 김팔규, 이은덕, 1992, 서산간척지 연약지반의 토질역학과 물리탐사 비교연구(I), 지구과학회지, 제13권 2호, 146-156.
- 송무영, 김팔규, 김연천, 1995, 서산간척지 연약지반의 토질역학과 물리탐사 비교연구(II), 지구과학회지, 제16권 4호, 292-298.
- 한국자원연구소, 1996, 대전지질도폭 설명서(1: 250,000)
- De Beer, E. and Martens, A., 1957, Method of computation of an upper limit for the influence of heterogeneity of sand layers on the settlements of bridges, Proceeding 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, 271-275.
- Meyerhof, G.G., 1956, Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 82(SM1), 1-19.
- Poulos, H.G., 1979, Settlement of single piles in Nonhomogeneous soil, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 105, No. GT5, 627-641.
- Schmertmann, J.H., 1970, Static cone to compute static settlement over sand, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 96(SM3), 1011-43.
- Schmertmann, J.H., 1978, Guidelines for cone penetration test, Performance and Design, US Federal Highway Administration, Washington, DC, Report, FHWA-TS-78-209, 145.
- Thomas, D., 1968, Deep sounding test results and the settlement of spread footings on normally consolidated sands, Geotechnique, 18(4), 472-88.
- Trofimenkov, J.B., 1974, Penetration testing in USSR, State of the art report, Proceeding European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, Vol. 1, 147-154.
- Van Weele, A.F., 1957, A method of sepearating the bearing capacity of a test pile into skin friction and point resistance, 4th ICSMFE, Vol. 2, 76-80.
- Vivatrat, V., 1978, Cone penetration in clays, Ph. D. thesis, MIT, Cambridge, Mass.

송무영

대전광역시 유성구 궁동 220  
충남대학교 자연과학대학 지질학과  
042) 821-6423

E-mail : mysong@168.188.1.3

김팔규

대전광역시 유성구 궁동 220  
충남대학교 공과대학 토목공학과  
042) 821-5673

김연천

서울 종로구 관훈동 192-18(SK건설 9층)  
플랜트토목설계팀  
02) 3700-7139

E-mail : yckim@comos.skec.co.kr

류권일

대전광역시 유성구 궁동 220  
충남대학교 공과대학 토목공학과  
042) 821-5680

E-mail : baram@168.188.1.3