

## 지반조사 분야 최신 기술 동향-벤더 엘리먼트를 이용한 연약지반 물성 추정 Estimating Field properties of Soft Soils using Bender Elements

목영진<sup>1)</sup>, Young-Jin Mok

<sup>1)</sup> 경희대학교 토목·건축대학 토목공학전공 교수, Professor, Dept. of Civil Eng, KyungHee Univ.

### 1. 서론

근래에는 국토의 효율적인 개발과 용지부족현상 등으로 인해 지반 공학적으로 열악한 특성을 지닌 해상점토나 준서 매립된 연약지반을 사회간접시설 등의 건설 부지로 많이 사용하게 되어 지반조사에 대한 중요성이 더욱 강조된다. 따라서 지반 특성 파악을 위한 신뢰성 있는 시험법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 지반구조물의 내진해석에 필요한 정밀한 지반의 동적 물성치 측정에 대한 요구도 증가하고 있는 실정이다. 실내 시험으로 공진주 시험이나 벤더 엘리먼트 시험, 현장에서 주로 사용되는 크로스 홀, 다운 홀, 인홀 시험은 지반의 동적 물성치를 얻기 위한 대표적인 시험 방법이다. 또한 기존 연약지반 조사시 많이 사용되어온 CPT(콘 관입시험)나 DMT(딜라토미터 시험)를 변형한 SCPT(seismic piezocone)나 탄성과 시험 장치를 부착한 딜라토미터 시험에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 근래에 들어 주로 실내 시험용으로 사용되어 온 벤더 엘리먼트를 이용한 탄성과 시험을 현장에 적용하고자 하는 노력들이 많이 있으며, 벤더 엘리먼트 시험과 그 현장 적용에 대하여 기술하고자 한다.

### 2. 벤더 엘리먼트를 이용한 탄성과 시험

#### 2.1 벤더 엘리먼트

벤더 엘리먼트는 그림 1과 같이 두 개의 피에조 세라믹이 내부의 금속판(shim)과 접촉된 상태로 구성되어 있다. 벤더 엘리먼트는 특별히 정해진 표준 단면이나 설치법이 있는 것이 아니라 모양과 단면 및 설치 방법은 다양하다. 시험 조건이나 시험 대상 매질에 따라 가장 잘 반응할 수 있도록 단면을 제작한다.

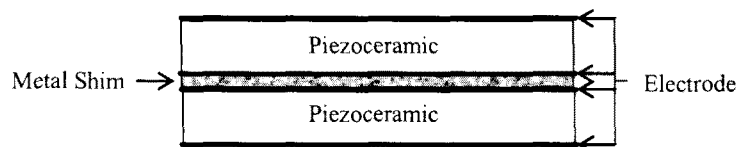


그림 1. 벤더 엘리먼트의 구조

이러한 벤더 엘리먼트는 전압이 가해질 때 한쪽 세라믹 판이 신장하는 동안 반대편 세라믹 판은 수축하게 됨으로써 굴곡 변형이 발생하게 된다. 즉 전압을 가하면 벤더 엘리먼트가 외팔보(cantilever) 형태로 진동한다. 또 이와는 반대로 외부로부터 벤더 엘리먼트에 휨 변형이 생기면 각 피에조 세라믹 판에 각각 압축 및 신장 방향으로 변형이 발생하여 벤더 엘리먼트 내부에 전하가 일어난다. 즉 진동을 전압으로 변환하여 수신을 가능하게 하는 것이다. 이와 같은 원리로 벤더 엘리먼트를 이용하여 간단하

계 진동을 발생하고 진동을 수신할 수 있다.

## 2.2 벤더 엘리먼트 현장 적용

벤더 엘리먼트 센서를 부착한 장치를 사용한 탄성파 시험은 그림 2의 모식도에서 보는 바와 같이 실내에서 주로 사용하는 삼축 압축 시험기의 base pedestal과 top cap에 벤더 엘리먼트를 부착한 장치를 제작하였다. 또한 현장에 적용하기 위하여 벤더 엘리먼트가 장착된 계측기를 목표 심도까지 관입 또는 매설 후 신호발생기(Function generator)로 발생한 전기적 신호를 전압증폭기(Power Amplifier)로 증폭하여 벤더 엘리먼트를 가동하여 진동을 발생한다. 이때 신호발생기(Function generator)로부터 1MHz ~ 19.9MHz의 주파수를 조절하여 벤더 엘리먼트와 매질의 공진 주파수에서 측정을 하게 된다. 본 실험에서는 30 ~ 50V, 200 ~ 2500Hz의 정현파를 벤더 엘리먼트의 발진원으로 사용하였다.

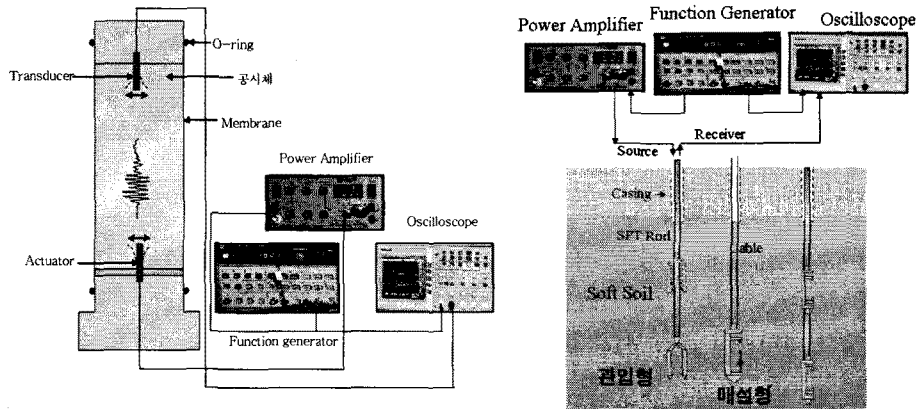


그림 2. 벤더 엘리먼트를 이용한 시험 모식도(좌-실내, 우-현장)

벤더 엘리먼트 센서가 부착된 장치를 사용하여 실내 모형 토조에 관입 후 전단파 신호를 측정하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 모형 토조내 카울리나이트를 통해 전파 되는 전단파 신호를 계측할 수 있었으며, 그림 3의 오른쪽 그림은 실제 연약지반 현장에 관입하여 계측한 전단파 신호로서 cross-talk이나 노이즈가 발생하나 연약지반을 통해 전파되는 전단파 신호를 확인할 수 있었다.

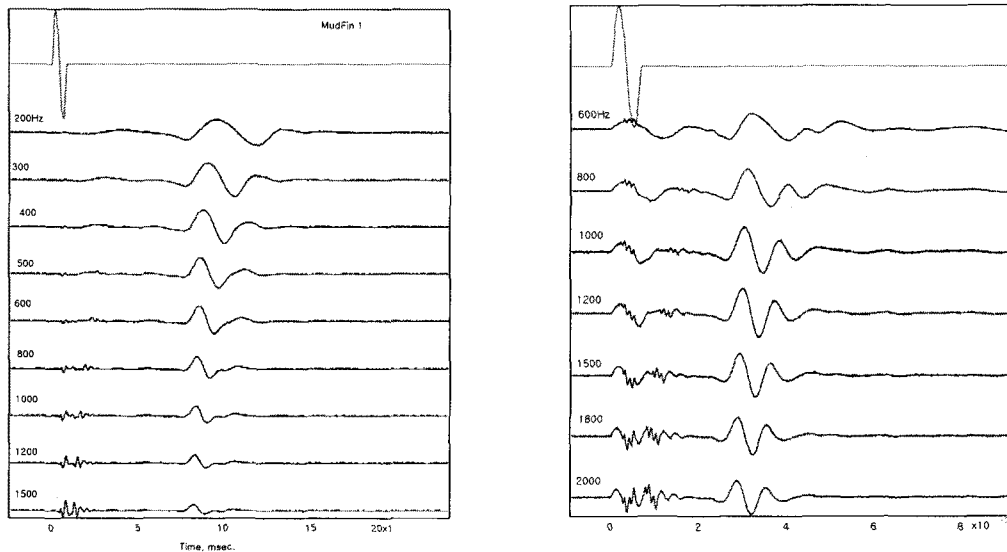


그림 3. 벤더 엘리먼트를 이용하여 계측한 전단파 신호(좌-실내, 우-현장)

### 3. 벤더 엘리먼트 시험 결과의 적용

#### 3.1 전단파 속도와 전단응력

실내 삼축 압축 시험과 벤더 엘리먼트 시험을 병행 실시하여, 상재하중에 따라 압밀되어 그 강성이 증가하였으며, 탄성파의 속도 또한 상재하중에 따라 증가하여 강성의 증가와 밀접한 관계가 있음을 보였다.

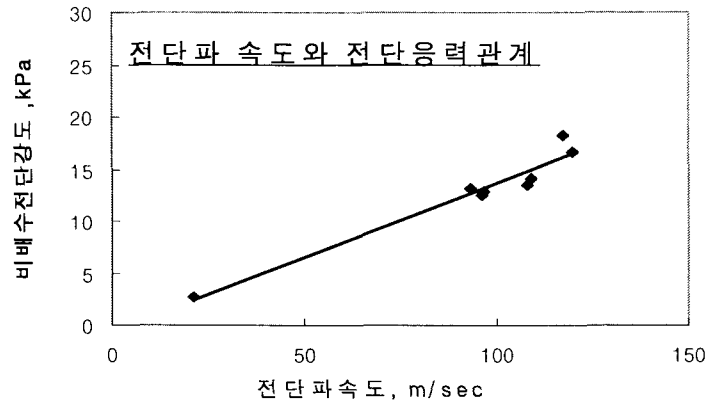


그림 4. 전단파 속도와 전단응력의 관계

#### 3.2 전단파 속도와 간극비

벤더 엘리먼트를 이용한 현장 탄성파 시험으로 연약지반의 깊이별 전단파 속도를 측정할 수 있다. 그러나 본 연구는 일정 깊이에 매설된 벤더 엘리먼트 측정 장치로부터 연약지반의 압밀 진행 과정 중 지속적인 전단파 속도를 측정하고자 하였다. 연약 점토 지반에 대한 압밀 상태 및 강도 평가는 추후 구조물 시공으로 인해 발생하는 지반의 변위 및 지지력 산정을 위해 매우 중요하다. 특히 간극비는 여러 압밀 이론들에 의해 제시되는 압밀 상태 및 강도 평가를 위한 중요한 변수가 된다. 그러나 실제 현장에서 연약 지반의 압밀에 따른 신뢰할 만한 간극비 산정에 어려움이 많다.

지반의 전단파 속도는 아래 식 (1), (2), (3)과 같이 유효응력과 간극비의 함수로 나타내어 질 수 있다. 벤더 엘리먼트 사이간 거리(D)와 Travel Time(Tr)을 측정하여 식 (1)로부터 전단파 속도를 측정하게 된다. 이렇게 계산된 전단파 속도를 이용하여 식 (2)에서  $G_{max}$ 를 구할 수 있으며, 식 (3)을 이용하여 지반이 밀도를 추정할 수 있는 간극비(e)를 구할 수 있다.

$$V_s = \frac{D}{T_r} (m/s) \quad (1)$$

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (2)$$

$$G_{max} = 1230 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} OCR^K \sqrt{\sigma'_0} \quad (3)$$

그림 5에서와 같이 깊이별로 측정된 전단파 속도 주상도로부터 연약지반의 깊이별 간극비를 추정할 수 있다.

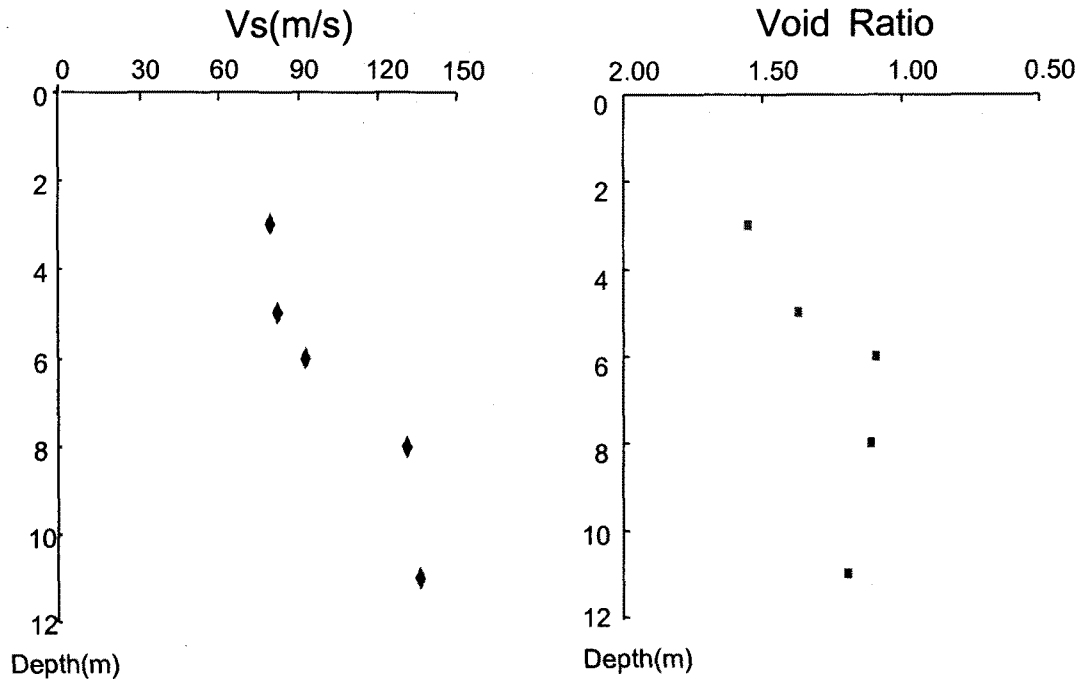


그림 5. 전단파 속도 주상도와 깊이별 간극비

#### 4. 결론

지반 조사의 새로운 다양한 시험법에 대한 연구와 더불어 기존 벤더 엘리먼트 센서가 부착된 장치를 이용하여 현장 탄성과 시험을 수행 할 수 있다. 벤더 엘리먼트를 이용한 현장 탄성과 시험으로 전단파 속도를 측정하였으며, 전단파 속도를 통해 간극비를 계산할 수 있다. 이를 이용하여 현장 밀도를 추정 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 벤더 엘리먼트 센서를 연약지반에 관입하여 깊이별 전단파 속도 주상도를 도출 할 수 있을 것이며, 연약 지반에 매설된 벤더 엘리먼트 계측기를 통하여 역학적 물성치를 지속적으로 측정 할 수 있고 전단파 속도를 통한 밀도 추정으로 지반 개량 정도를 평가할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. S.K., Hwang(1997). "Dynamic Propertieess of Natural Soils"Ph.D. Dissertation, UT at Austin
2. 목영진 외(2005), "전단파 계측을 이용한 연약지반의 압밀상태와 전단강도 평가" 2005년도 대한토목학회 정기학술대회
3. 목영진 외(2006), "지속 가능한 연약지반 역학적 특성 평가를 위한 Piezoelectronics의 실용화 연구", 한국건설교통기술평가원
4. 목영진 외(2006), " 연약지반 강성측정을 위한 벤더 엘리먼트의 현장 적용성 연구," 한국지반공학회 논문집, 제 22권 11호, pp.37-45