

연약지반조사를 위한 전기비저항 탄성과 Flat DMT 장비의 개발 및 적용

방은석¹⁾, 성낙훈¹⁾, 김영상²⁾, 박삼규¹⁾, 김정호¹⁾, 김동수³⁾

¹⁾한국지질자원연구원 지반안전연구부, esbang@kigam.re.kr

²⁾전남대학교 해양토목공학과

³⁾한국과학기술원 건설 및 환경공학과

Development of Resistivity Seismic Flat Dilatometer Testing System for Characterizing Soft Soil Site

EunSeok Bang¹⁾, NakHoon Sung¹⁾, YeongSang Kim²⁾,
Samkyu Park¹⁾, JungHo Kim¹⁾, DongSoo Kim³⁾

¹⁾Geotechnical Engineering Div., KIGAM

²⁾Ocean Civil Engineering Dep., CNU

³⁾Civil&Environmental Engineering Dep., KAIST

Abstract: The aim of this paper is development of resistivity seismic dilatometer (RSDMT) system. The resistivity module for obtaining apparent resistivity depth plot and seismic module for obtaining shear wave velocity (Vs) depth plot are attached to the conventional flat dilatometer testing equipment. From shear wave velocity profile, the stiffness at low strains of a site can be evaluated in undisturbed condition. And the resistivity value contains some information about water content and mineral characteristics of clayey soil. Specially manufactured resistivity and seismic modules were connected between commercialized DMT blade and drilling rod. To enhance reliability and repeatability of RSDMT test, automatic testing system including notebook based data acquisition system and automatic surface source system were developed. RSDMT system can be performed rapidly and can obtain more reliable data at the same point compared with the separated testing system. The verification studies for the developed RSDMT system are going to be performed. From these studies, the effectiveness of integrated hybrid testing system will be checked in light of proper evaluation of geotechnical design parameters of clayey soils.

Keywords: resistivity, seismic, dilatometer, hybrid device, RSDMT, site characterization

1. 서론

연약지반조사를 위한 원위치 현장 실험에는 피에조콘(Piezococone), 딜레토메터(Flat Dilatometer)가 널리 사용되고 있다. 이러한 장비는 기존 기능 외에 추가적인 측정

모듈을 부착한 하이브리드(Hybrid) 형태로 적용되고 있으며 탄성과 피에조콘(SCPTu), 전기비저항 피에조콘(RCPTu), 탄성과 딜레토미터(SDMT) 형태가 널리 사용되고 있다(Mayne, 2000; Maugeri 와 Monaco, 2006). 한 번의 관입으로 동일 지점에서 다른 종류의 실험이 가능하므로 지반을 종합적으로 평가할 수 있으며 또한 각각의 실험 결과간의 상관관계(empirical relationship)를 도출하는데 유리하다. 탄성파콘(Seismic Cone)은 진단과 속도의 지반공학적 적용이 확대되고 있는 추세에 맞추어 수요가 증대되고 있으며 전기비저항콘(Resistivity Cone)은 오염대 파악 및 함수 정도를 평가하는데 있어 사용되고 있다.

물리탐사 기술을 지반공학 분야에 적용하는데 있어 주로 이미지정보 제공을 통한 정량적인 평가가 주되어 왔다. 하지만 토목 시공회사에서는 더 나아가 설계를 위한 지반 정수를 요구하고 있어 지구물리학적 계수와 지반정수간의 상관관계를 도출하는 것이 중요해졌다. 따라서 앞서 언급한 하이브리드 장비의 개발 및 적용이 필요하다고 생각하고 본 연구에서는 그 연구의 일환으로 기존의 Flat DMT 장비에 전기비저항 및 탄성과 측정 모듈을 부착한 RSDMT(Resistivity Seismic Flat Dilatometer) 장비를 제작하고 그 적용성을 평가하고자 하였다.

2. RSDMT 장비의 제작

RSDMT 수행 시스템의 전체적인 개요는 Fig. 1과 같다. 관입을 위한 관입장비와 RSDMT 장비의 본체, 그리고 제어 및 계측 장비로 구성되어 있다. RSDMT 장비 본체는 기존의 DMT 장비 상단에 탄성과 측정 모듈과 전기비저항 측정 모듈을 부착하는 방식으로 설계하였다. 다운홀 기법을 수행할 수 있도록 탄성과 측정을 위한 모듈을 3성분 속도계를 삽입하는 방식으로 제작하였으며 전기비저항 측정을 위한 모듈은 총 4개의 전극을 일정 간격으로 부착하였다. RSDMT 장비의 케이블(Cable)은 로드 내부를 통과하여 지상에 위치한 제어 및 계측 장비와 연결되게 되며 DMT 전용 라인 외에 탄성과 모듈용 3개, 전기비저항 모듈용 2개, 총 5개의 동축 케이블을 포함하여 자체 제작하였다. 전문 관입장비 혹은 시추기의 유압을 이용하여 관입을 하며 일정 시험 간격으로 동일 심도에서 DMT 시험, 전기비저항 측정, 다운홀 탐사를 차례로 수행하는 방식으로 진행한다.

DMT 시험은 지반 설계 정수를 도출하기 위한 현장 원위치 시험이다. 블레이드(blade)에 있는 멤브레인(membrane)이 지반과 평형을 이룬 상태의 압력(A), 1.1mm 지반 쪽으로 움직이는데 필요한 압력(B)을 측정하는 방식으로 실험이 수행되며 이러한 측정값을 바탕으로 지반 분류를 용이하게 할 수 있으며 경험식을 이용하여 지반의 강도, 변형 계수 등의 지반관련 설계 정수를 도출할 수 있다. 다시 멤브레인을 평형 상태로 돌렸을 때의 압력(C)는 지반의 간극수압과 관련되어 있으므로 간극수압 소산 실험을 통해 투수 계수 및 압밀 계수 등을 추정할 수 있다(Marchetti et al., 2001). DMT 장비는 규격화 되어 있으므로 Marchetti 연구팀에서 제작한 상용 장비를 도입하였다.

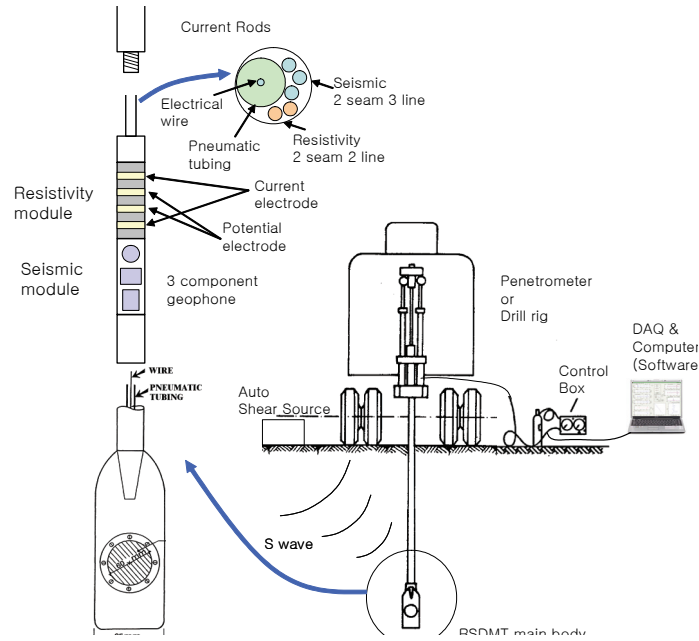


Fig. 1. Schematic diagram of RSDMT testing system

전기비저항에 영향을 끼치는 가장 큰 요소는 간극수의 전기전도도이며 포화도나 간극률, 흙 입자에 의해 영향을 받게 된다. 일반적으로 특정 심도에 오염물질, 해수 등이 유입되지 않았다면 간극수의 전기 전도도는 동일 부지에서 같다고 볼 수 있다. 그러므로 전기비저항 값을 이용하여 토질 분류나 함수비 등의 지반상태 평가가 가능하다. 전기비저항 값을 측정하기 위한 전극 배열은 여러 가지가 있지만 RSDMT 장비에는 웨너(Wenner) 배열을 적용하였다. 웨너 배열은 다른 전극 배열에 비해서 신호 강도도 높으며 배열 수평 방향으로의 민감도가 좋으므로 이러한 관입형 원위치 시험에 가장 적합하다. 관입으로 인한 교란 영역을 고려하면서도 국부적 물성을 측정하기 위해 전극 간격을 2.5cm로 하였으며 전극 사이에는 강화 플라스틱으로 절연하였다. 실제 각 전극 배열에서 사용되는 거리 계수(Geometric factor)는 점 전류원을 가정한 상태로 유도된 것으로 본 장비에서와 같은 링 형태의 전극은 거리 계수를 일반적인 웨너배열의 거리계수를 사용할 수 없다. 실제로 Fukue 등(1998)은 옴의 법칙(Ohm's law)에 근거하여 d 는 콘의 지름, a 를 전극간격이라고 할 때 전기비저항 콘을 위한 전기비저항식을 식 (1)과 같이 유도하였다.

$$\rho = \frac{\pi^2}{2/(d+a) - 2/(d+2a)} (\Delta V/I) = K(\Delta V/I) \quad (1)$$

여기서 ΔV 는 측정된 전위차, I 는 적용된 전류이다. 실제 참 전기비저항 값을 도출하기 위해서는 K 값이 매우 중요하므로 식(1)에 대한 적용성을 평가하기 위한 검증 실험을 수행하였다. 실험은 물을 가득 채운 대형 수조에 NaCl의 농도를 달리하며 EC(Electrical Conductivity) meter로 전기전도도를 측정하고 그 값과 제작한 전기비저

항 측정 모듈로 측정된 값을 비교하는 방식으로 수행하였으며 그 결과는 Fig. 2와 같다. 하지만 Fukue 등(1998)이 제안한 식을 통해 획득한 K값은 1.478인데 비해 실험을 통해 획득한 K값은 0.5274로 많은 차이를 보였다. 일반적인 웨너배열에서의 K값($4\pi a$)은 0.314로 이 또한 큰 차이를 보인다. 따라서 검증 실험 자료를 이용하여 본 RSDMT 장비 전기비저항 측정 모듈의 고유 거리계수를 결정하고자 하였으며 따라서 장비 고유의 거리계수 값은 0.5274이다.

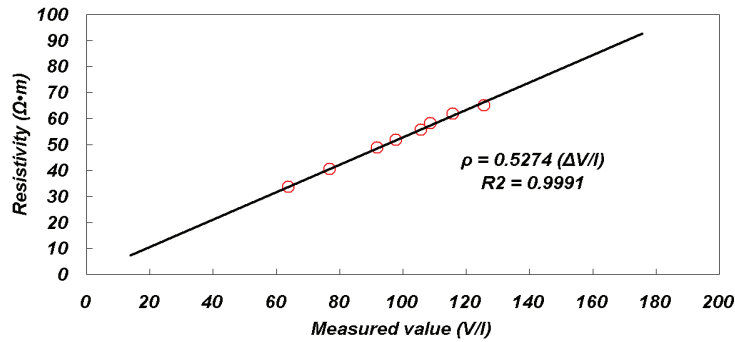


Fig. 2. Geometric factor for resistivity module in RSDMT testing system

다운홀 탄성과 탐사는 지표면 가진원과 지중에 설치된 감지기를 이용하여 지반의 속도 주상도를 도출하는 기법이다. 본 시스템은 3성분 속도계가 삽입된 탄성과 감지 모듈을 다운홀용 감지기로 이용하는 방식으로 다운홀 탄성과 탐사를 수행한다. 전체적인 시스템은 방은석(2007)에 의해 구성된 다운홀 탄성과 탐사 자동화 시스템을 기반으로 하였다. 자동 가진원 및 노트북 기반의 신호 획득 장비, 해석 프로그램을 바탕으로 손쉽게 현장 실험을 수행하며 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있다. 도달시간 도출 과정을 현장 실험과 동시에 다양한 방법으로 수행하고 그에 따른 최종 결과를 바로 확인함으로써 최대한 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있도록 하였다. Fig. 3에 구성된 자동 가진원, 감지기 및 운용 프로그램을 도시하였다.

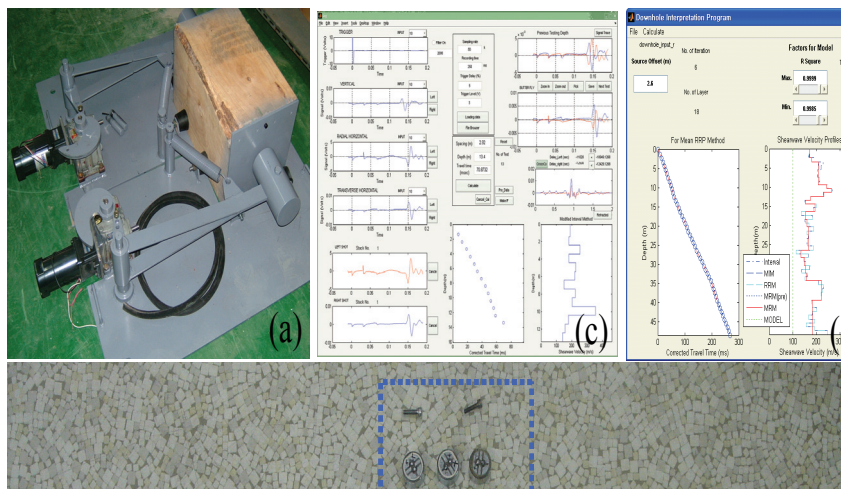


Fig. 3. Downhole seismic testing system; (a) Automatic Shear Source, (b) main body of RSDMT and seismic module, (c) managing program, (d) interpretation program

따라서 제작한 RSDMT 장비로 실험할 경우 한 번의 관입을 통해 위에서 언급한 A(P_0), B(P_1), C값의 DMT 계수를 깊이별로 획득하는 것 외에 전기비저항 및 전단과 속도 주상도를 도출할 수 있다. 그림 4에 RSDMT 시험을 수행할 경우 획득되는 결과물 일례를 도시하였으며 RSDMT 장비의 적용 사례가 아직 없어 여러 다른 장비의 결과물을 조합하여 도시하였다. DMT 실험을 통해서 획득한 A, B값은 경험식을 이용하여 토층 구분 및 탄성계수, 토압계수, 지반 강도 정수, 과압밀비, 밀도 등을 추정할 수 있다. C값을 통해서도 토층 분류 및 투수계수, 압밀 계수 등을 추정할 수 있다. 탄성과 모듈을 통해서 전단과 속도 주상도를 획득할 수 있으며 이를 통해 지반의 저변형을 탄성계수 및 지반 상태 평가가 가능하다. 전기비저항 모듈을 통해서 깊이별 전기비저항 값을 획득할 수 있으며 토층 구분, 간극비, 함수비 추정 및 지중에서의 오염층 파악 등이 가능하다. 무엇보다도 이러한 여러 자료들을 한 지점에서 동시에 획득할 수 있다는 점에 있어서 어느 한 실험을 통해서 지반을 평가하는 것보다 확실하고 종합적인 평가가 가능하며 각 자료간의 상관관계 도출이 용이하게 된다.

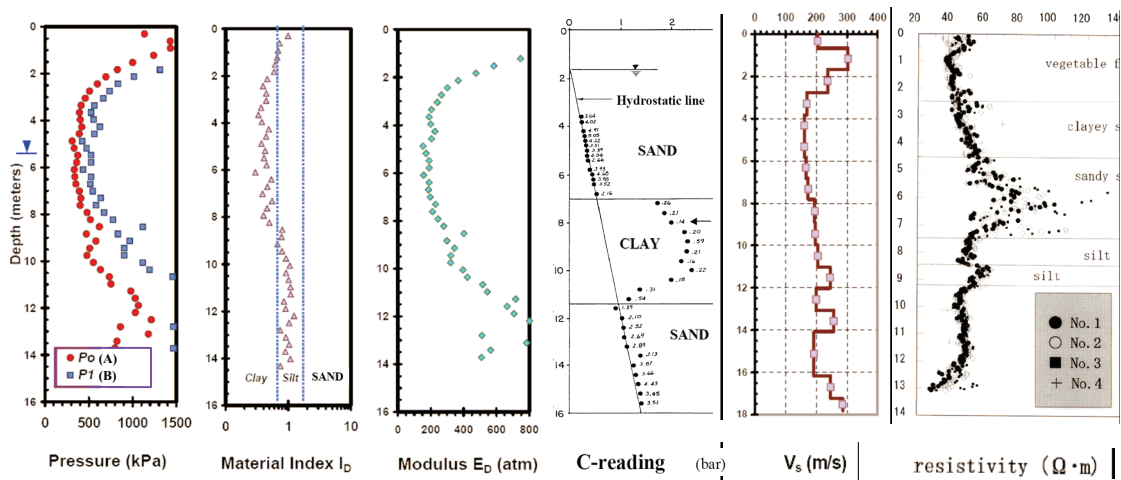


Fig. 4. Example testing result of RSDMT sounding

3. 현장 적용성 평가

RSDMT 장비의 현장 적용성 평가를 위해서 검증 실험을 계획하였다. Fig. 5는 검증 부지의 2차원적 층상구조로 깊이별 층상변화가 두드러져 RSDMT 장비의 적용성을 평가하기 적당하다. 또한 강물에 의한 퇴적 지반으로 염수의 영향이 덜해 전기비저항으로 지반 평가를 수행하기에도 유리하다. 측선을 설정하고 여러 지점에서 RSDMT 장비 적용하여 각 지점에서 깊이별 DMT 계수, 전단과 속도 주상도 및 전기비저항 값을 획득하고 동일 측선에서 수행한 지표면 전기비저항 및 표면과 탐사 결과와 비교할 예정이다. 비교란 시료를 채취하여 실내 배인 전단 시험 및 공진주 시험을 실시하여 RSDMT로 추정한 지반 강도 및 지반의 비선형 특성과 비교 검증하고 콘 관입 시험을 병행함으로써 강도변화의 세밀한 변화를 RSDMT 결과와 비교

할 예정이다. 그리고 본 부지는 점성토에 대한 개량 공법이 수행될 예정에 있어 RSDMT 장비 및 지표면 전기비저항, 표면과 기법을 이용한 지반 개량 모니터링 또한 계획하고 있다.

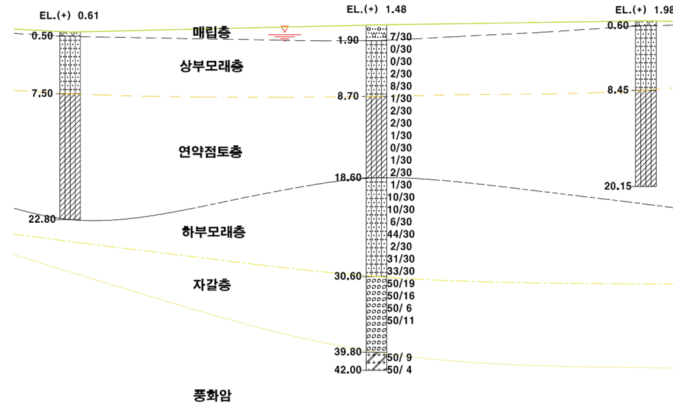


Fig. 5. Soil layer section view of the test planning site

4. 결론

본 연구에서는 기존의 Flat DMT 장비에 전기비저항 및 탄성과 측정 모듈을 부착한 RSDMT(Resistivity Seismic Flat Dilatometer) 장비를 제작하였다. 연약지반을 종합적으로 평가할 수 있으며 탄성과 속도와 전기비저항 값과 지반 정수와의 상관관계를 도출하는데 유리한 D/B를 확보할 수 있다. 현재 제작된 장비의 검증을 위해 현장 실험을 계획하고 있으며 다양한 현장 실험 및 실내 실험을 통해 그 적용성을 평가하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 전문연구사업인 ‘지하 정밀 영상화 융합기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 방은석, 김동수, 김기석, 2007, 상호검증시험을 통한 효율적인 다운홀 탄성과 기법 수행 시스템의 구성, *한국지반공학회 논문집*, 제23권 4호(계제 예정).
- Fukue, M., Minato, T., Matsumoto, M., Horibe H., Taya N., 2001, Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers, *Engineering Geology*, **60**, 361-369.
- Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G. & Calabrese, M., 2001, The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations, Proceedings, International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties & Case Histories, Bali, Indonesia, 95-131.
- Maugeri, M., Monaco, P., 2006, Liquefaction Potential Evaluation by SDMT, *Proc. Second International Conf. on the Flat Dilatometer*, Washington D.C., 295-305.
- Mayne, P. W., 2000, Enhanced Geotechnical Site Characterization by Seismic Piezocone Penetration Tests, Invited Lecture, *Fourth International Geotechnical Conference*, Cairo University, 95-120.