

# 연약지반 연구 및 기술동향

연약지반기술위원회

## 1. 서론

인간의 능력이 아닌 창조주에 의해 만들어지고 또 그 주권 하에 질서를 이루며 숨쉬듯 생명을 지닌 채 변화되고 있는 지반재료를 다루는 우리 지반공학자들은 연구대상이 되는 그 지반재료 특성의 신묘막측 함에 인간 능력의 한계를 절실히 깨닫기도 하고 신에 대한 경외심마저 느끼게 된다. 그 중에서도 연약지반은 인간이 그 기초지반으로 삼아 생활을 영위하고자 할 때 그 거동 특성상 많은 문제점을 야기할 수 있어 오래 전부터 끊임없이 지반공학자들의 연구대상이 되어 왔다. 국내에서도 대외적인 물류, 교통시설의 확충이 중요시되어 해안공사가 활발히 진행됨에 따라 국내 서남해안의 연약지반에 대한 관심이 고조되어 왔다.

본 고는 연약지반과 관련한 그 동안의 국내외 기술동향을 점검해보고 현재 우리가 당면한 현황 및 문제점을 솔직히 파악함으로써 앞으로의 전망 및 나아갈 방향에 대하여 심사숙고해 보는 기회를 마련하고자 준비되었다. 연약지반은 포괄적인 의미로 점성토 및 비점성토를 모두 포함하지만 국내지반 특성 및 여건상 비점성토의 연약지반에 대한 관심은 매우 저조했으며 비점성토의 경우에는 특히 지진 등의 동하중이 주어지는 경우에 주로 문제를 야기하므로 지반동역학 분야에서 주된 관심의 대상이 되어 왔다. 따라서 본 고에서는 연약 점성토지반에 국한하여 공학적 특성 규명, 규명된 특성을 표현하고자 개발된 이론, 연약점토지반 개량 방법 및 특성, 그리고 실제 현장 연약점토지반 거동측정을 위한 계측분야로 대별하여 관련 기술의 최근 현황 및 전망에 대하여 기술하고자 노력하였다.

## 2. 연약지반의 공학적 특성규명 연구

연약지반과 관련된 공사를 성공적으로 수행하기 위해서는 무엇보다도 먼저 대상이 되는 현장 연약지반의 특성을 파악하는 것이 필수적이다. 이를 위해 합리적이고 경제적인 방법을 적용하기 위한 지반조사 계획을 수립하고 얻어진 자료를 신뢰성있게 분석하여 해석함으로써 연약지반 특성을 표현하고자 개발된 이론에 사용되는 적절한 지반설계변수를 합리적으로 추정 또는 결정하는 것이 필요하다. 지반조사는 현장 원위치에서 직접 수행하는 현장 원위치시험(in-situ test)과 교란 또는 비교적 교란되지 않은 시료를 채취하여 실내에서 수행되는 실내시험으로 대별된다.

포화된 연약점토지반의 경우에는 비교적 교란되지 않은 시료채취가 가능한 것으로 알려져 있고

실내시험에 의해서도 어느 정도 합리적인 공학적 특성규명이 이루어질 수 있을 뿐만 아니라 기본적인 거동특성 규명을 위해서는 교란 및 비교란 시료를 대상으로 한 실내시험이 장점이 있어 다양한 실내시험을 적용한 특성 연구가 이론 연구와 함께 활발히 진행되어 왔다. 더불어 현장 원위치시험은 특히 시료의 교란효과를 최소화할 수 있고 현장 지반조건을 최대한 반영할 수 있는 장점과 날로 발달되는 장비개발로 인한 경제적인 조사가 가능하여 실용적으로 점차 그 활용성이 증대되고 있는 실정이다.

일반적으로 지반조사는 대상 구조물의 특성에 따라 네 가지 수준으로 나뉘어지며 각 수준에 따라 시추, 시료채취, 실내시험, 현장시험, 자료분석 및 결과보고서 등의 세부 요구사항이 달라질 수 있다. 그러므로, 유로코드의 경우에는 지반상태 및 대상 구조물의 복잡성과 중요도에 따라 지반조사 수준을 다양하게 하도록 지반조사 시방서에 규정하고 있다. 즉 지반조사는 그 수행하고자 하는 목적과 대상 구조물에 따라 그 특성을 고려하여 계획되어야 하고 그 결과 또한 대상구조물 특성에 적합하도록 보고 정리될 필요가 있다. 국내에서는 아직 이와 같은 상세한 규정 등이 시방서에 적용되고 있지는 않지만 몇몇 설계회사의 경우 실제 지반조사 결과를 각 대상 구조물의 특성에 따라 분류하여 분석하고 이를 설계에 적용하고 있다.

## 2.1 대구경 시료채취기의 개발

현장 원위치 시험에서는 다양한 경계조건 및 하중조건 등을 반영하기 어려우므로 이들을 고려한 다양한 현장조건을 재현할 수 있는 실내시험을 통한 지반 거동특성 규명은 매우 중요하다. 그러나 잘 알려진 바와 같이 실내시험의 경우 가장 문제가 되는 것이 현장지반 시료를 채취하는 과정에서 수반되는 교란효과, 응력이완, 물리화학적 변화, 함수비 감소 등이다. 국제 토질 및 지반공학회(ISSMGE)의 TC24 기술위원회(soil sampling, evaluation and interpretation)에서는 비교란 시료채취에 관한 연구 및 논의를 계속하고 있으며 시료채취와 관련된 연구는 시료채취로 인한 영향과 시료채취로 인한 교란영향을 최소화하기 위한 시료채취 장비개발이 병행되고 있다.

최근 각국에서 연구하고 개발하는 시료채취기는 대구경 및 대심도화를 지향하고 있으며 튜브식 시료채취기 중의 하나인 Laval 시료채취기는 연약한 점토지반의 비교란 채취에 매우 효과적인 것으로 알려져 있고 Shelbrooke 블록 시료채취기는 비교적 깊은 심도에서도 블록 형태로 시료채취가 가능한 것으로 알려져 있다. 국내에서도 한국건설기술연구원 및 몇몇 대형건설업체 기술연구소에서 대구경 시료채취기를 신기술로 개발하였다. 하지만 이와 같이 개선된 시료채취기가 실용적이고 경제적으로 적용되기는 아직 힘들고 기존의 통상적인 시료채취기로부터 얻어진 시료를 대상으로 분석된 설계변수에서의 차이를 정량적으로 평가하는 것이 어려우므로 주로 연구목적으로 이용되고 있는 형편이다.

## 2.2 실내시험

현재까지의 연약지반의 공학적 특성을 규명하기 위한 실내시험을 큰 줄기로 바라볼 때 역학적 특성을 파악하기 위한 것이 주류를 이루어 왔다. 이 경우 실내시험은 주로 전형적인 표준시험에 의존되

어 왔으며 특히 연약 점성토 지반에 적용된 시험은 압밀시험과 삼축 압축시험이다. 압밀시험은 표준 압밀시험이 주를 이루고 있으며 삼축 압축시험의 경우, 등방압밀 또는 이방압밀 비배수시험을 주로 적용하였다. 실내시험은 이론을 바탕으로 그 시험법이 개발되는 것이 일반적인 특성이기 때문에, 전형적인 시험법 이외에 연약지반의 공학적 특성 규명을 위한 새로운 시험법 및 시험기 개발이 많이 이루어지지는 않았으며 크게 발전되거나 개선된 사항이 많지 않은 추세이다.

최근의 실내시험을 통한 연구동향을 살펴보면 물리화학적 접근과 역학적 접근으로 구분될 수 있다. 물리화학적 접근으로는 연약지반을 구성하고 있는 지반재료에 대한 광물분석을 위하여 X-Ray 회절분석(X-Ray reflection analysis)을 수행하였고 주사전자현미경(SEM) 등을 사용하여 관측된 광물입자의 특성에 대한 연구결과들이 발표된 바 있다. 또한 전기화학적 특성을 파악하고 그 특성을 활용하기 위하여 전기삼투시험(electro-osmosis test)(그림 1 참조) 또는 전기영동시험(electrophoresis test)들이 여러 연구자에 의하여 수행되고 있다. 이러한 연약지반의 물리화학적 특성 규명을 위한 시험들은 연약지반 자체의 특성뿐만 아니라 폐기물 매립지, 준설매립 등을 위한 특성 규명시험으로 더 활발히 적용되고 있다.

한편, 역학적 접근 방법으로는 압밀시험이 주를 이루고 있다. 이중 특이할 사항은 최근 연약지반의 처리공법으로서 연직배수재가 많이 활용되고 있는 관계로 연약지반의 수평배수 또는 이방성 배수특성을 파악하기 위한 실내시험을 수행하기 위하여 Rowe Cell 압밀시험기를 이용한 연구가 많이 진행되고 있다. 또한 Rowe Cell과 유사한 시험기로서 기존의 표준압밀시험기를 개량한 수평배수 표준압밀시험기(개량 표준압밀시험기)가 개발되기도 하였다. 그리고 변형률에 대한 영향을 파악하기 위하여 일정변형률(CRS, Constant Rate of Strain) 압밀시험이 다수 수행되고 있는 것이 특징이다.

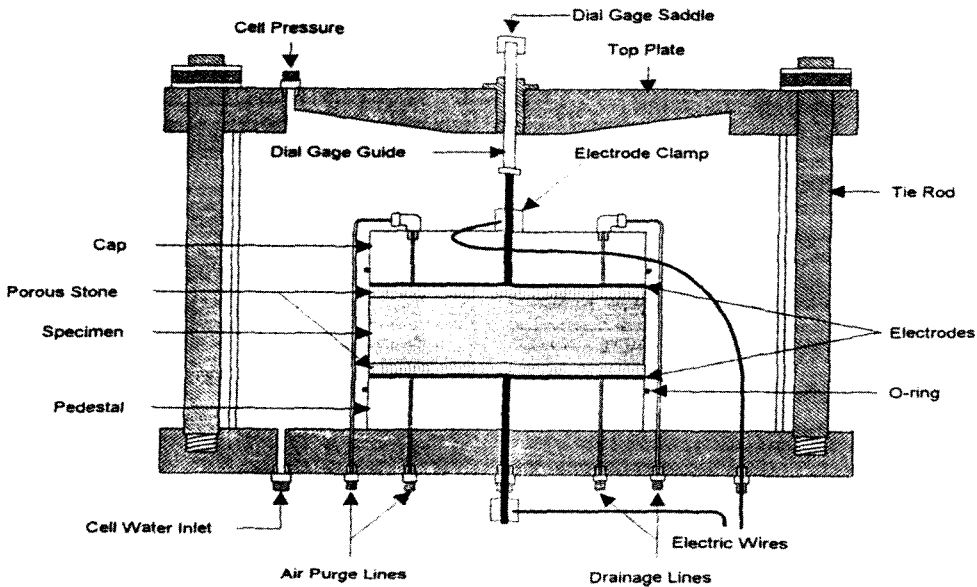


그림 1. 전기 삼투시험기

표준압밀시험의 경우 단계별로 하중을 증가시키기 때문에 장시간이 요구되며, 매우 낮은 연직응력과 높은 초기함수비를 가진 초연약점토의 압밀정수를 구하기가 쉽지 않다는 단점이 있다. 따라서 이를 극복하기 위하여 수행되고 있는 일정변형률 압밀시험(Wissa 등, 1971)은 표준압밀시험보다 빠른 시일 내에 압밀특성을 구할 수 있는 장점이 있으며 대형 압밀셀을 사용함으로써 높은 초기함수비 상태를 갖는 초연약점토의 압밀 특성을 구할 수 있다.

이 실험기법의 장점은 현재 국내외적으로 연약지반의 압밀특성을 결정하는 간극비-유효응력관계는 물론 간극비-투수계수의 변화를 측정한다는 것이다. 이때 연약지반의 간극비-투수계수의 변화를 정교하게 측정하기 위해 흐름펌프(flow pump)를 사용하여 실험을 실시하고 있다(Moriwaki 등, 2000). 흐름펌프는 일정 단면적을 갖는 펌프를 사용하여 매우 낮은 속도로 점토시료 내에 일정 유량을 인위적으로 주입 또는 배수시키고 그에 따른 손실수두 변화량을 측정하여 투수계수를 측정하는 방법이며 압밀링에 부착하여 실험을 수행한다.

한편, 통상적인 압밀시험에서 요구되는 시간을 단축하기 위하여 연속적인 하중을 가하는 시험이 이론식과 함께 개발되어 적용되고 있다. 이 경우 Janbu 등은 임의 연속하중시험에 대한 일반해를 구하였으나 장비가 고가이고 이차압밀 특성을 얻기가 어렵다는 단점이 있다. 그리고 분할형 압밀실험 장치(separated type consolidometer)를 사용하여 시료의 높이에 따른 압밀 특성을 구하는 실험기법이 사용되고 있는 바, 이러한 시험기법은 여러 압밀셀을 상호 연결하고 그 사이에 간극수압계를 설치함으로써 시료의 내부에서 발생하는 과잉간극수압의 소산상태를 알 수 있는 실험방법이다(Kang과 Tsuchida, 2000).

### 2.3 모델시험

최근에 현장 준설매립지반의 압밀거동을 실험실에서 동일한 응력조건으로 모사가 가능한 원심모형시험(Bloomquist와 Townsend, 1984)을 통하여 준설매립 해성점토의 자중압밀을 실내 실험실에서 짧은 시간 내에 재현시키는 실험기법이 보편적으로 사용되고 있는 상황이다. 준설 매립토와 같은 초연약지반의 압밀특성을 구하기 위하여 기존의 실내 실험실 기법 또는 장치의 사용으로는 그 한계가 있어서 원심모형시험기법이 최근에 사용되고 있다. 뿐만 아니라 자중압밀 상태에서 시간경과에 따른 침하 및 과잉간극수압의 변화를 측정 후 역해석 기법을 사용하여 측정된 시험 결과를 수치해석기법과 비교 분석함으로써 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 구성관계를 구하는 방법으로써 그 효율성이 입증된 바 있다(Kondo 등, 1998; Yamagami 등, 2000).

Xie 등(1995)은 연약지반 위에 성토한 고속도로에 다양한 연직 배수재와 토목섬유재로 보강된 기초지반에 대해 원심모형시험을 수행하였으며 이를 최적의 공법을 선정할수 있는 기본자료 및 실험 근거를 마련하여 주는 효율적인 실험기법으로 사용하였다. 그리고 Takemura 등(1995)은 연약지반 위에 모래층이 형성된 지반에서 원형 강성기초의 침하거동을 재현하기 위한 원심모형시험을 수행한 결과, 이와 같은 경우의 기초의 압밀침하 특성은 기초 폭에 대한 모래층 두께의 영향보다 강성기초에 가하여진 하중강도에 의해 더 지배받으며, 특히 압밀침하 동안 기초 중심에서의 응력은 감소하는 반면에 기초의 연단에서는 응력이 증가하는 응력재분배 효과가 기초의 침하 특성에 영향을 크게 미치

는 것을 확인하였다.

최근의 연약지반 관련 원심모형실험은 대표적인 연약지반 보강공법인 SCP공법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Kimura 등(1983)은 원심모형 시험장치를 이용한 실내모형시험을 실시하여 개량 폭, 개량 심도와 파괴 메카니즘의 관계를 검토하여 개량 폭이 2.0 정도일 때 최대의 개량 효과를 볼 수 있다고 발표하였다. Masaaki 등(1990)은 원심모형시험 장치를 이용한 실내모형시험을 통하여 저치환율로 개량된 복합지반에 대하여 개량 폭과 재하속도, 상대밀도를 변화시켜 연직, 수평하중 하에서의 복합지반의 파괴거동을 연구 발표하였다. 그리고 Masaki와 Kiyoharu(1993)는 SCP개량 지반의 변형, 파괴거동 및 거동에 영향을 미치는 개량 폭, Sheet Pile Wall 강성 등의 영향을 실내 원심모형시험으로 검토하였다.

Takemura 등(1989)은 성토하중 아래 SCP로 개량된 연약한 정규압밀 점토지반의 안정성에 대한 연구를 원심모형시험기를 이용하여 수행하였으며 복합지반의 치환율과 개량 폭에 변화를 주어 성토하중에 의한 복합지반의 파괴면을 확인하였다. 또한, SCP를 이용한 지반개량으로 인해 전단저항이 증가하여 극단적인 지반의 파괴를 방지할 수 있다고 보고되었고, 개량범위에 따른 지반의 거동특성도 확인하였다. 그리고 Masaaki 등(1993)은 널말뚝벽체에 작용하는 개량지반의 수동토압에 관한 원심모형시험을 수행하였는데 이 연구로 수평하중을 받는 모래말뚝에서 전체적인 변형은 발생하였으나 전단파괴는 발생하지 않는다는 연구발표를 하였다.

Rahman 등(2000)은 원심모형시험을 통하여 30~50%의 저치환율 SCP공법으로 보강된 케이슨 기초지반의 안정성에 관한 연구를 수행하였다. 케이슨 배면의 뒷채움하중에 의한 케이슨의 수평변위는 케이슨의 무게가 증가함에 따라서 감소하였으며 케이슨 하중이 뒷채움하중보다 작을 경우에는 SCP 보강영역을 뒷채움 방향으로 확장함으로써 SCP 보강 지반의 장단기적 안정성에 효과가 있음을 확인하였다.

## 2.4 현장시험

현장 원위치시험은 크게 시추공을 이용한 파괴적인 개념의 현장 사운딩에 해당하는 시험법과 비파괴적인 기술을 적용한 지구물리탐사법이 있다. 지구물리탐사에 의한 방법은 탄성파, 음파 등의 파를 이용하여 지반의 특성을 파악하는 방법으로 개략적인 지반의 특성(층 구분, 층의 연경도 등)의 판별은 가능하지만 아직은 지반구조물 설계에 필요한 강도, 변형, 압밀 등에 관련한 구체적인 정보를 얻는 것은 불가능하다. 따라서 현장 사운딩 기법의 다양한 시추공 시험법이 연약점토 지반조사를 위한 현장시험의 주류를 이루고 있다.

최근 들어 국내에서도 연약지반조사의 중요성이 재차 강조되고, 입찰제도 변화 등에 따라 설계품질 제고에 대한 노력이 증대되면서 다양한 지반조사 기법들이 소개되어 적용되고 있으나, 아직도 대부분의 경우에 표준관입시험(SPT) 등의 재래적인 방법에 크게 의존하는 실정으로 지반상수를 산정하는데 많은 불확실성이 내포한 것으로 알려져 있다. 하지만 점차 선진국처럼 연약지반조사를 위하여 현장원위치시험으로 콘관입시험(CPT)에 대한 연구사례가 증가하고 실무에 적용되는 빈도가 증가하고 있다. 또한 점성토층에 대한 딜라토미터(DMT), 프래셔미터(PMT), 전기비저항 탐사 등에 대한

연구 및 실무 적용이 시도되고 있으며, 표준관입시험과 관련하여 N-값의 적용한계를 명확히 하고, 에너지 효율 등 주요 요소에 대한 보정을 규정하려는 노력이 국내 지반공학회를 중심으로 진행되고 있다.

국내에서 가장 널리 사용되고 있는 표준관입시험은 다양한 지반에 적용할 수 있고 사용이 간편한 반면에 점성토층에 대한 시험 결과의 신뢰도가 낮은 편이며, 현장베인시험은 점성토의 비배수 전단 강도를 구하는데 있어 가장 신뢰성 있는 시험이다. 그리고 콘관입시험, 프레스미터시험, 델라토미터 시험 등은 대부분의 토사 지반에 적용이 가능하며, 다양한 지반 특성을 효과적으로 비교적 정확하게 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

1930년대부터 현장지반조사에 적용되어 온 CPT는 거듭된 장비 개량과 해석기술의 발전에 힘입어 외국에서는 점성토 지반은 물론 사질토 지반에서도 광범위하게 사용되고 있으며, 연약지반 조사시 가장 기본적인 시험법으로 자리하고 있다. 또한 기존의 콘에 다양한 종류의 센서와 장치를 부착하여 지반의 오염상태나 특이 지반의 존재 유무 등의 부가적인 지반정보를 획득하고자 하는 시도가 꾸준히 진행되고 있으며, 여러 가지 복합적인 기능을 갖는 현장시험장비들이 많이 등장하고 있다. 최근 들어서는 콘 선단에 소형 카메라를 장착(vision cone)하여 관입 도중 지층 상태, 지하수 오염정도, 전단 및 활동면 등을 시각적으로 확인할 수 있는 기법이 시도되고 있으며, 관입 중 화상처리에 소요 되는 시간을 줄이는 데 연구가 집중되고 있다. 또한 지표에서 일정한 경사를 두고 관입하여 수평 방향으로 CPT를 수행하기도 하는데, 연직방향 관입 시에 비하여 로드 주면의 마찰이 매우 크므로 관입 길이는 장비 용량의 제약을 크게 받는다. 그 밖에도 전기비저항 센서를 부착하거나, 환경조사 목적으로 수소이온농도, redox potential 센서를 내장한 콘이 상용화되었으며, 현재는 유도형광물질이나 자외선 감지 센서를 부착하는 경우도 있다. 한편 콘 후방에 프레스미터를 함께 부착한 콘프레스미터는 일정 심도에서 콘 관입을 멈추고 프레스미터 재하시험을 실시하여 초기에는 한번의 시험으로 연약지반의 전단강도와 전단계수를 함께 평가할 수 있는 방법으로 호평을 받았으나, 시험시간이 길고 장치가 복잡하여 널리 보급되지는 않았다.

연약지반 조사 시 가장 중요한 간극수압의 상태를 파악하기 위하여 사용되는 CPTU는 간극수압을 측정함으로써 퇴적지층 분류 시 점토층 사이에 끼여 있는 얇은 모래지반이나 모래층 사이에 끼여 있는 얇은 점토층을 구분하기 어려운 오류를 최소화 할 수 있다. 또한 관입 도중에 일정한 깊이에서 유발된 과잉 간극수압에 대한 소산 실험을 수행함으로써 연약지반의 현장 수평압밀특성과 현재 상태의 간극수압을 측정하여 지반의 압밀도를 평가할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 최근에는 콘 관입 시 유발되는 간극수압의 중요성이 인식되면서 피조미터의 측정위치를 콘 팁이나 마찰 슬리브 뒤에 동시에 설치하여 간극수압의 변화를 측정하도록 했다.

## 2.5 해저 연약지반 조사

21세기 해양개발시대 및 신항만 건설에 대비하기 위한 해저지반 전용 조사선의 구축은 해양관련 기반 연구 수행에 필수적이며, 해상 호텔, 해상공항 및 해양레저시설을 위한 인공섬 개발과 신항만 건설에 따른 해저지반의 공학적 특성을 조사하는 기술개발의 중요성이 새롭게 인식되고 있다. 국내

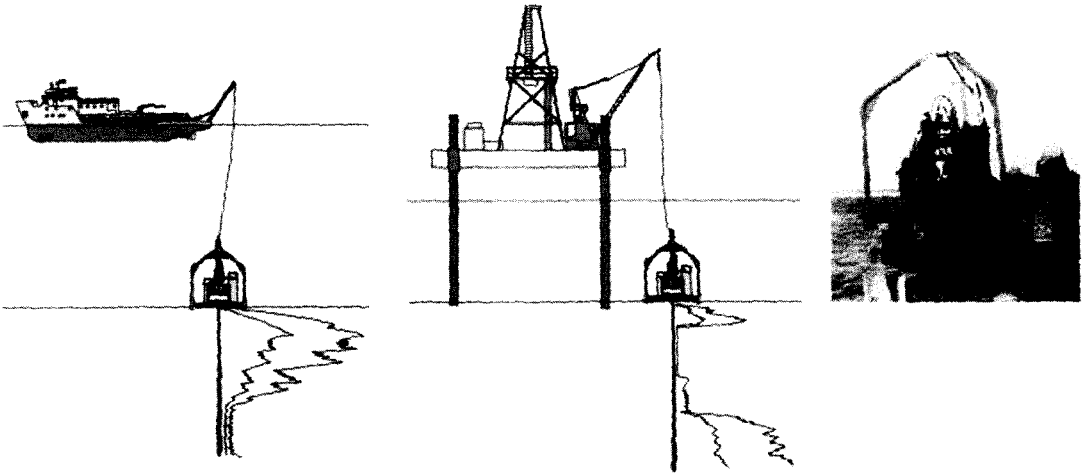


그림 2. 해저 지반 CPT를 위한 Seascout 장비(Fugro)

의 경우 이에 대한 지반조사 기술은 비교적 낙후되어 있으며 현재 SEP 바지를 이용하여 조사하는 수준으로 조사결과의 신뢰성이 높지 않은 수준이다. 이로 인해 조사 관련 업체나 학술단체에서 이에 대한 연구개발의 필요성이 일찍이 강조되어왔다.

국내에서는 몇몇 건설회사의 건설연구소에서 주로 육상의 지반조사에 대한 연구개발은 어느 정도 진행되고 있으나, 바다와 관련한 해양 지반조사 기술에 대한 연구는 거의 실적이 전무하다. 특히 일본 및 유럽에 비해 상당히 낙후된 기술을 보유하고 있으면서도 연구개발 및 투자에는 인색한 입장이다. 일본을 비롯한 유럽, 북미의 선진국에서는 인공 섬, 해상공항 및 항만건설을 위해서 다양한 지반조사 기술을 연구 개발하여 실용화하고 있는 상황이다(그림 2 참조).

### 3. 연약지반의 이론개발 분야

연약지반과 관련된 이론의 연구는 연약지반 재료 자체의 거동특성을 모사하기 위한 구성모델 개발 부분과 연약지반을 보강하기 위하여 이용되는 각종 보강공법이 적용되는 경우 이에 대한 설계 및 해석을 위한 모델링 기법 및 수치해석 개발 부분으로 나눌 수 있다. 연약지반 재료의 거동특성 모사를 위한 구성모델은 1950년 대 Cam-Clay 구성모델이 제안된 이래로 이를 수정 보완한 모델들이 개발되어 왔고 이와 병행하여 경화현상, 이방성, 동적 거동특성, 시간 의존적 거동특성 등을 고려하기 위한 수많은 모델들이 개발되어 왔다. 수치해석 기법에 대한 연구 또한 컴퓨터의 발달로 인해 더불어 활발히 진행되었다.

그로 인해 기존에는 매우 복잡한 거동특성을 나타내는 지반재료의 거동특성을 모두 고려하여 해석할 수 없었던, 그러기에 많은 가정사항들을 바탕으로 하여 단순화된 모델을 적용하여 이론 해를 근거로 한 해석기법이 주로 적용되었지만 수치해석 기법의 발달은 기존의 단순화된 가정들을 뛰어 넘는 보다 복잡한 현상들을 고려할 수 있는 토대를 마련하였다. 그럼에도 불구하고 이러한 수치해석 기법

의 실제 현장에서의 적용은 현실적으로 아직 신뢰성이 결여되고 있으며 이는 수치해석 기법 자체의 발달에도 불구하고 지반재료와 관련된 모델링 및 관련된 설계변수들의 추정과 실제 현상을 모델링 하는 과정이 다소 비현실적이기 때문인 것으로 사료된다.

따라서 이러한 현실 하에 수치해석 기법의 적용은 단순히 예비설계 또는 이론적 연구를 위한 해석 방법으로만 대부분 적용되고 있는 실정이며 실제적으로 이를 활용한 적극적인 지반공학 문제들의 해결은 아직 미비한 상태이다. 그러나 수치해석 기법은 날로 그 적용성이 향상될 것으로 예상되고 컴퓨터의 활용 또한 날로 급격히 증가되고 있는 추세에서 이들의 지반공학에의 적용 또한 피할 수 없는 현실이다.

### 3.1 구성모델

연약 점토지반의 재료 거동특성을 모사하고자 제안되었던 대표적인 Cam-Clay 모델은 비교적 단순한 하중변화 상태에 대하여만 적용성이 있으며 기본적으로 등방경화 현상을 나타내는 경우만을 묘사하고 있다. 따라서 보다 복잡화된 하중변화 조건 및 이방성, 이방경화 및 연화현상 등을 고려하기 위한 연구는 지속적으로 진행되어 왔다. 이와 관련된 최근의 연구 결과 중 하나로 Gajo와 Wood(2001)는 경계면 소성모델을 근거로 한 새로운 이방모델을 제안하였다. 그들의 모델은 결합된(cemented) 자연점토가 점차적으로 구조가 붕괴되는 거동특성과 새로 재성형된 점토의 소성 비등방성을 고려할 수 있다.

Puzrin과 Burland(2000)는 특히 파괴전의 작은 변형률 상태에서의 거동특성을 모사하기 위한 비등방 경화소성모델을 제안하였다. 그리고 연약지반의 경우 많은 변형을 나타내는 특성을 가지므로 이를 고려한 대변형 해석을 위한 모델이 Jeremic 등(2001)에 의하여 최근 제안되었다. 한편 Vatsala 등(2001)은 결합된(bonded or cemented) 흙의 경우 강도가 흙 구조에 의해 발현되는 부분과 결합에 의해 발현되는 두 부분으로 나눌 수 있고 변형특성 또한 마찬가지로 구분될 수 있다는 개념을 바탕으로 이들 거동특성을 모사할 수 있는 모델을 제안하였다. 그 외에도 Sivakumar 등(2001)은 과압밀 자연점토의 항복 거동특성에 비등방 탄성의 영향에 대하여 기술하였고 Puzrin과 Kirschenboim(2001)은 과압밀 점토를 위한 이방경화 모델을 제안하였다. Kim과 Leroueil(2001)은 압밀과정에서의 점토의 점소성 거동에 관한 연구를 그리고 Navarro과 Alonso(2001)는 국부적인 탈수과정에 의한 점토의 이차 압밀에 대하여 연구하였다.

국내의 경우에도 이송 등(2001)에 의해 시멘트와 혼합된 점토의 거동을 모사하기 위하여 한계상태 이론에 근거한 모델을 제안하였고 서용교(2001)는 연속 탄소성 Cap모델 및 이의 적용성에 대하여 기술하였다. 그리고 Oh와 Lee(2001)는 비등방 경화모델의 적용을 위한 내재적 응력적분 방법 및 연관성 있는 접선계수 산정방법에 대하여 기술하였다. 그밖에 김재영 등(2001)은 고유기질토의 반복압밀 특성에 대하여, 그리고 이영희 등(2001)은 배수 및 비배수 상태에서의 연약 해성점토의 전단거동에 대하여 연구하였다. 또한 윤길립 등(2001)은 굴폐각을 혼합한 모르타르 혼합토의 강도특성에 대한 연구결과를 발표하였다.



### 3.2 수치해석

연약지반과 관련된 수치해석의 적용에 대한 최근의 연구동향은 배수재가 설치된 압밀거동이나 기타 보강공법이 적용된 연약지반 거동해석에 관련된 연구가 주를 이루고 있다. Zhu와 Yin(2000)은 배수재가 설치된 연약지반의 압밀거동 해석을 위해 유한요소법이 적용된 연구를 수행하였고 Tang과 Onitsuka(2000, 2001)은 특히 층을 이룬 경우와 작용 하중이 시간에 따라 변화되는 경우를 고려한 압밀해석에 대한 연구결과를 발표하였다. 그리고 Han과 Ye(2001)는 채석기둥(stone column)으로 보강된 연약지반의 압밀거동 해석을 위한 간편법을, Chai 등(2001)은 PVD로 보강된 지반 모델을 위한 간편법을 제안하였다. 또한 Zhu 등(2001)은 단순화된 유한요소법을 이용한 Hong Kong의 Chek Lap Koh 국제공항 부지에서의 압밀 모델링 과정에 대하여 기술하였다. 한편 Hansbo(2001)는 압밀해석 시 기본적으로 가정되는 Darcy의 법칙의 적용성을 판단하기 위하여 non-Darcy 흐름을 포함한 압밀 방정식에 대하여 연구하였고 Darcy 흐름의 경우와 그 결과를 비교하였다.

국내의 경우에는 수평배수 공법이 적용된 압밀해석을 위한 유한차분법의 적용에 대하여 이송 등(2001)이 연구결과를 발표하였다. 그리고 김현태 등(2001)은 수평배수층의 소요 통수능을 고려한 해석에 대한 연구를 수행하였다. 이와같이 연약지반과 관련된 수치해석의 적용에 대한 연구는 오래 전부터 활발하게 진행되어 온 연유로 최근에는 이들의 적용성 향상을 위한 간편법 등의 연구와 실제 적용 시 현장 적용성을 높이는 방향의 연구가 진행되고 있다. 특히 다양한 연약지반 보강공법 적용 시 적용 가능한 해석방법에 대한 연구도 진행되고 있다. 마찬가지로 이러한 수치해석 기법들의 현장 적용성 성공 여부는 수치해석 방법에 내재되어 있는 현장 시공방법 및 현장조건, 하중변화 특성 등과 같은 고려방법의 적절성과 연약지반 자체의 거동특성 모사를 위해 적용된 구성모델의 적정성 및 설계변수 도출의 간편성에 좌우된다.

### 3.3 현장시험과의 연계성

앞서 기술한 바와 같이 여러 구성모델 및 수치해석 기법의 현장 적용성 성공여부는 대상 연약지반의 물성파악과 이를 고려한 모델의 적용에 달려있다. 따라서 아무리 발전된 모델과 수치해석 방법이 적용되더라도 그 해석결과가 신뢰성이 떨어지는 이유는 대상 현장 연약지반의 물성추정 및 거동에 영향을 미치는 현장조건 파악이 사실 상 매우 어렵기 때문이다. 이러한 연유로 현장 연약지반의 물성 파악을 위한 현장시험 방법 및 해석에 대한 연구가 꾸준히 진행되었으며 최근 들어서는 현장시험 결과 해석을 위한 수치해석 방법의 연계성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

연약지반과 관련된 현장시험 방법으로 콘 관입시험은 매우 적용성이 뛰어난 것으로 알려져 이로부터 얻어지는 결과 해석 시 이론 연구의 적용에 관한 연구가 수반되었다. 예로서 Cao 등(2001)과 Chang 등(2001)은 비배수 공동확장 이론을 적용한 수정 Cam-Clay 모델에 관하여 연구함으로써 현장 피에조콘과 Pressuremeter 시험 해석을 위한 이론적 근거를 제공하고자 하였다. 또한 현장 계측자료를 이용한 압밀계수 등의 역해석에 대한 연구가 Cao 등(2001)에 의해 연구되었다. 국내의 경우에도 송정락(2001)은 피에조콘 관입시험을 이용한 투수계수 산정 시 수치해석의 적용에 대한 연구를 발표하였다.

### 3.4 요약

이상과 같이 연약지반과 관련된 이론 연구동향을 살펴보면 날로 다양해지는 주변 환경변화 및 하중조건 등의 변화에 따른 연약지반 재료의 거동특성을 모사하기 위한 모델개발이 꾸준히 이루어지고 있고 기존의 여러 분야에서 날로 발전되고 있는 수치해석 기법들을 적용하거나 기존의 수치해석 방법의 적용성을 향상시키고자 하는 연구가 진행되고 있다. 또한 이러한 복잡한 이론적인 연구성과에도 불구하고 그 신뢰성이 낮게 평가되는 현실에서 보다 적절한 대상 연약지반의 특성을 평가하기 위해 적용되는 현장시험 결과 분석 시 이론적인 연구 및 수치해석 기법들이 연계되어 이용되고 있다. 그리고 최근에는 기존의 여러 자료들을 활용하여 연약지반과 관련된 설계변수들을 보다 신뢰성 있게 추정하고자 신경망 이론 등을 적용한 연구(김병탁 등, 2001; 김영상과 이승래, 2002)가 진행되고 있다. 따라서 이러한 노력들이 계속 수반된다면 재료적으로 날로 복잡해지는 연약지반 및 보강 관련 재료의 거동특성 및 상호작용 효과 등을 적절히 고려한 해석방법들이 개발될 뿐 아니라 그 적용성 또한 날로 향상될 것이다.

## 4. 연약지반의 개량분야

### 4.1 압밀축진

연약지반 개량을 위하여 간극수의 배수거리의 단축에 의한 압밀축진공법의 적용이 전 세계적으로 점점 증가되고 있다. 이는 공법의 원리, 설계 및 시공이 간단하며 경제적이고 효율적이기 때문인 것으로 판단된다. 적용 배수재에 의하여 명명된 압밀축진공법의 역사는 Terzaghi의 압밀이론이 발표된 시기와 유사하다. 샌드드레인 공법은 1926년 미국의 Moran에 의해 특허 출원된 후 1934년에 Porter가 캘리포니아 도로공사 현장의 연약지반 개량공법으로 시공된 것이 그 효시이며, 플라스틱 드레인 공법은 1937년에 스웨덴 지반연구소의 Kjellman이 판상으로 된 마분지(Card board drain)를 이용하여 지반을 개량한 것이 그 시초이다. 그 후 1948년에 Barron과 Kjellman이 각각 연직배수공법에 관한 설계 계산식을 발표하여 압밀축진공법의 적용이 활성화되기 시작하였다.

그 후 일본에서 1963년 치요다(千代田)화공건설사가 직경 12cm의 샌드 팩 드레인공법을 독자 개발하여 1968년에 첫 시공되었다. 한편 자갈을 이용한 드레인 공법은 지진 등에 의한 모래지반의 액상화 방지공법으로 적용되기 시작하였으며, 천연마섬유 드레인공법은 1970년대 후반에 싱가포르의 Lee에 의해 개발되고 1979년 싱가포르의 창이(Changi) 국제공항 제2활주로 구축공사에 압밀축진공법으로서 최초로 적용되었다.

#### 4.1.1 배수재의 특성

일반적으로 압밀축진용 배수재의 경우 기본적으로 요구되는 사항으로는 타설시 손상 및 변형이 발생하지 않아야 하며, 타설 심도에 상응한 토압과 압밀진행에 따른 변형이 발생하여도 충분한 통수능력을 유지하고 배수정의 단절이 발생되지 않아야 한다. 또한, 세립토 등의 이동특성에 의한 악영향에 대해서도 소정의 투수계수가 확보되어야 하는 것이다. 배수재는 상기의 사항을 충족하면서 원활

한 배수기능을 수행하여 대상 연약지반이 소정기간 내에 소요의 개량효과를 도모할 수 있도록 하여야 한다.

연약지반개량용 압밀축진공법에 적용되는 배수재에 관한 기본적인 지금까지의 연구로서는, 배수재의 변형 및 축압에 의한 중방향 통수능력의 저하를 확인한 연구로 Kramer 등(1983), Hansbo(1986), Holtz 등(1989), Oostveen(1990), 三浦 등(1993), 朴·三浦(1994) 등이 있다. 판상의 배수재의 등가 직경에 관한 연구로는 Hansbo(1979), Rixner 등(1986), Kamon 등(1991)이 있으며, 플라스틱 드레인재 필터슬리브의 투수계수에 관한 연구로 嘉門(1985), 박영목(1985) 등을 열거할 수 있다.

배수재 주위의 세립토의 이동현상에 관해서는 Rankilor(1981), 박영목(1985), Dierickx(1986), 三浦 등(1993) 등의 연구가 수행되고 있다. 지반내의 간극수 중에 용존되어 있던 공기(기포)가 배수재 속에 환원되어 통수능력에 영향을 미치는 것에 관한 연구는 三浦 등(1993)과 박영목(1997)에 의해 수행되었다. 플라스틱 드레인재와 같은 비압축성 배수재에 대한 지반압밀침하에 따른 변형에 관해서는 Oostveen과 Troost(1990), 三浦 등(1991), Kremer 등(1983), 朴(1994) 등에 의하여 연구가 수행되었으며, Lawrence와 Koerner(1988)는 지반조건에 따른 플라스틱 드레인재의 변형형상을 가정하였고, Madhav 등(1995)은 지반의 압밀에 의한 연직배수재의 변형형상을 예측할 수 있는 모델 식을 개발하여 기존의 실측된 변형형상과 유사함을 입증하였다.

또한 Kremer 등(1983)은 필터재의 요구인장강도를 제안하고 있다. 박영목(1997)은 국내, 외의 대표적인 플라스틱 드레인재를 대상으로 인장강도시험을 실시하여 대체적으로 만족할만한 강성을 유지하고 있다고 보고하고 있다. 그 외의 배수재의 특성에 관해서는 朴(1994)에 의해서 다양한 실내시험이 수행되어 통수능력에 영향을 미치는 내, 외적인 요인들이 정리되어 있다. 그 결과에 의하면 연약지반이 매우 낮은 투수성을 갖고 있는 경우에 배수재의 배수정 효과는 압밀축진에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한, 박영목(1999)은 최근 현장실물길이 배수재의 통수능력시험이 실내에서 가능하도록 대형시험장치를 고안, 제작함으로써 배수재의 통수능력을 정확히 평가하여 배수재의 길이에 관한 기술자들의 의구심을 해소할 수 있도록 하였다.

#### 4.1.2 해석 및 설계

연약지반의 압밀축진을 도모하기 위하여 설치되는 연직배수재의 설계를 위한 해석에 관해서는 1935년 Reudulic이 방사상 흐름에 의한 일차원 연직방향의 압밀에 관한 해를 유도하였으며, 1948년에 Barron과 Kjellman이 각각 설계 계산식을 발표하여 연직배수공법의 적용이 활성화 되었다. 그 후로 많은 연구가 수행되었으며 평균압밀도 산정에 관해서는 Rixner 등(1986)이 있으며, 대표적인 웰 레지스턴스에 관한 근사해석은 Yoshikuni와 Nakanodo(1974), Hansbo(1979), Cheung과 Lee(1991), Hird 등(1992), Bergado와 Long(1994) 및 엄밀해석으로 Onoue(1988)의 연구가 있다. 스미어 존에 관한 연구로는 Hansbo(1979), 尾上(1991), Madhav 등(1993), Indraratna와 Redana(1997) 등의 연구가 주목되어진다. 최근에는 연직배수공법의 개연성 설계방법이 Zhou 등(1999)에 의해 제안되었다.

### 4.1.3 재료 및 장비개발

최근에 압밀축진용 배수재의 웰레지스턴스의 영향에 대한 중요성이 실험 및 해석 등을 통하여 점차로 감소함에 따라 통수능력은 다소 부족한 단점이 있으나 환경친화적인 재료의 개발이 활성화되고 있다. 특히, 일본과 국내에서는 천연 마섬유 배수재의 재료특성에 관심을 가지고 제반특성규명이 종료된 상태이며(先端建設技術, 1996), (주)삼성중공업(1998)에서는 배수재의 단면을 십자형으로 개발하여 집수량을 증가시킨 경우도 있다. 또한, 준설패립지반 등의 초연약지반상에 운용하는 중기의 주행성 증가를 위한 표층개량공법을 적용하기 위한 실내시험에서 배수재의 단면을 2배 증대시킬 경우 통수능력이 4배 증가됨에 착안하여 대형의 플라스틱 드레인재의 개발이 이루어져 있다.

장비 면에서는 스미어 존(smear zone)의 발생이 압밀축진작용에 가장 악영향을 크게 미친다는 연구결과를 토대로 맨드럴 사이즈의 축소, 합리적인 맨드럴 형상을 도출하기 위한 실내 및 현장시험이 수행되었으며, 수평배수재의 타설장치가 박 영목 등(1997)에 의해 고안, 제작되어 시공의 합리성을 도모하는 단계에 있다.

### 4.1.4 요약

압밀축진공법에 관해서 과거에는 배수재 자체의 특성규명 및 배수재의 성능향상에 중점을 둔 연구가 주종을 이루었으나 최근 들어 개량 대상지반과 배수재의 상호작용에 기인하여 압밀축진의 효율성이 결정된다는 결론을 얻고 배수성능은 다소 부족하여도 환경친화적인 재료의 개발, 시공 시 지반의 교란을 최소화하는 것이 압밀축진에 있어 가장 중요한 것이라는 점을 착안하여 이에 맞는 합리적인 장비개발, 시공방법 설정 및 지반교란에 의한 투수성 변화요소를 정확히 고려한 해석 등에 중점을 두어 연구가 활발하게 진행되고 있는 상태이다.

## 4.2 강도강화

연약지반의 강도강화를 위한 대표적인 지반개량공법에 대한, 최근 국내·외 연구동향은 2002년도 지반지에 비교적 상세히 게재되어 있으며 본고에서는 이 중 약액주입공법에 대하여 요약 정리하였다.

### 4.2.1 약액주입공법

약액주입공법은 지하철, 대규모 구조물 건축 등 도시에서의 건설공사에서 악화되는 교통사정, 협소한 도로·상가·주택의 밀집, 혼잡한 지하시설물 등의 악조건을 극복하고, 안전하고 신뢰할 수 있는 시공을 위해 없어서는 안될 공법으로서, 타 공법만으로는 할 수 없는 본 공법만의 독특한 장점을 갖고 있어서, 그 필요성 및 활용실적이 세계적으로 급증하고 있는 추세이다.

#### (1) 강도증가 매커니즘

약액주입 후의 흙은 주입전의 흙에 비하여 비중, 공극비, 밀도, 투수계수 및 강도정수 등 토질성상에 큰 변화가 생기게 된다. 이들 중 투수계수 및 강도정수는 그 변화폭이 크고 또한 매우 중요한 요소가 된다.

전단강도의 증대는 느슨한 상태에서는 주로 약액 자체의 점착력에 의해 이루어지며 조밀한 상태에서는 이와 더불어 토립자 자체의 어떤 요소로부터 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 또한 약액에 의한 Gel이 피막을 형성하여 불투수성으로 되기 때문에 고결토의 차수효과는 매우 증가하게 된다. 이와 같이 약액주입에 의한 흙의 전단강도 및 차수효과 증가는 결국 흙의 점착력 때문이라고 볼 수 있다. 따라서 약액에 의한 고결토의 차수효과 및 강도증가 효과를 규명하기 위해서는 이들 점착력이 어떠한 요소에 의하여 지배되며 이들 요소는 어떠한 모양으로 구성되어 있는지가 규명되어야 한다.

## (2) 수압파쇄(Hydraulic fracturing)

약액주입공법의 가장 큰 과제인 수압파쇄에 대해서는 Haimson과 Fairhurst(1967)나 Medlin과 Masse(1979)가 액의 침투에 따르는 간극수압의 증가를 고려하는 파쇄압 식을 제안하였다. 그리고 Morgenstern과 Vaughan(1963)은 주입에 따른 간극수압의 변화를 고려하여 주입공 주변의 흙의 전단 파괴가 할렬을 발생시킨 것으로 가정하여 주입시의 허용 주입 압을 명확히 규정한 바 있다. 또한 Horsrud 등(1982)은 침투에 따른 소성영역의 발생을 고려하여 할렬발생을 3차원 응력상태로 보는 이론적 해석을 수행하였고, 福島(1982)은 fill dam core재의 할렬현상을 조사한 바 있으며 Ayres (1994)는 점성토 지반의 사면 보강을 위한 할렬주입에 대해 주입메커니즘과 주입방법, 계측 및 적용 사례, 파쇄주입에 대한 한계점을 제시한 바 있다.

## (3) Computerized grouting

약액주입공법은 아직 해결하지 못한 중대한 문제점을 안고 있는 바, 지반개량의 확실성 즉, 약액의 정확한 주입범위, 주입고결토의 강도 증대효과와 주입효과 판정법 문제가 바로 그것이다. 자연지반토는 매우 불균질하기 때문에 설계 시 주입범위를 정한다 하더라도, 실제 목적인 범위에 충분히 주입되지 않은 경우가 허다하다. 이러한 주입범위, 주입효과를 확인할 목적으로 ENPASOL에 의한 주입효과 판정에 대한 새로운 연구가 진행되고 있으며, SINNUS 그라우팅 시스템을 이용한 주입공법이 불란서 솔레땅쉬사를 중심으로 폭넓게 연구되고 있다(千, 1995; Chun 등, 1999; 천 등, 2000).

한편, 주입시공관리 System에 관한 연구가 실용화되고 있는 바, GQC시스템(Grouting Quality Control System)은 약액주입공법을 시공하는 데 있어서, 주입약액의 지반 내 거동을 전기저항방식에 의한 계측을 하여 주입시점에서 파악할 수 있고, GROUT CONSTRUCTION(약액주입 총합관리장치)은 각종 센서와 PC를 이용하여 주입작업의 기록 및 관리장표를 출력·확인할 수 있다. 또한 주입 현장에서 많이 쓰이고 있는 CGS(Chemical Grouting Automatic Control System)은 각종 약액주입공법에 대응하는 집중관리시스템이며, GROUTING-Computer-Monitored System은 약액주입 계측제어 장치로서 댐용 자동그라우트 프랜트, 주입용 소형유량계, 에어몰탈 레코더, 그라우트 콘트롤러, 그라우트 데이터레코더 및 데이터 처리시스템으로서 실용화되고 있다(千, 1998).

## (4) 약액주입에 사용되는 시멘트의 지반환경 오염문제

최근 들어 약액주입에 사용되는 시멘트의 지반오염에 대한 환경문제가 대두되기 시작하였다. 건설

현장에서 세계적으로 폭넓게 사용되어 오던 지반주입공법은 1974년을 전후하여 건설공사에서 사용하는 주입약액에 대한 규제는 있었으나 시멘트는 규제대상이 아니었다. 그동안 시멘트의 공해에 대해 논의가 없었던 것은 아니지만 고분자계 약액에 비해 상대적으로 직접적 공해 피해가 많지 않은 것으로 인식되고 있고, 또 워낙 방대한 양이 쓰여지고 있어서 이에 대한 대책을 경미하게 취급해온 것 또한 사실이다.

그러나, 최근 시멘트 그라우팅 현장에서 발암물질인  $Cr^{6+}$ 이 용출되고(木暮, 2000), 이에 대한 공해 문제가 대두됨에 따라 외국에서는 관련기관(예; 일본건설성)에서 이에 대한 규정이 발효되고, 곧바로 본격적인 법적 조치에 들어가는 등 엄격히 규제가 되고 있다. 주입재료에 따라서 주입지반에 산성 물질, 알칼리성 물질, 유기물질 등이 함유되어 있어서 이것에 따라 주입재의 성질이 변화되고, 목적을 달성하지 못할 경우가 있으므로 채취시료에 대하여 발산사, 강열감량 등을 측정하는 등 흙과 물에 대해 화학적 시험을 행하여 주입재의 적용성을 확인하도록 명시하고 있다(日本材料學會, 1974). 또한, 주입 시공 후 주변의 수질기준인 pH를 8.60이하로 제한하고 있기 때문에 오염성이 낮은 물유리계 약액조차 항상 안전하다고 할 수는 없다(천, 2001). 또한, 건설현장에서의 페콘크리트(松尾, 1999), Slime 등은 지반오염을 유발시킬 수 있으므로 Slime 발생량이 적은 장비를 사용함이 바람직하다.

최근, 국내에서도 지반개량재료로서의 시멘트 사용 시 발생하는 오염물질의 농도를 파악하기 위하여  $Cr^{6+}$  용출 등 환경적 위해성 여부가 평가되고 더욱 우레탄, 시멘트 등을 대상으로 어독성을 측정함으로써 주입약액에 의한 환경영향성이 평가되고 있다(천 등, 1998, 2001).

### 4.3 지수성 강화공법

강도강화 공법으로 요약 기술된 약액주입공법은 지수성을 강화하기 위한 공법으로도 많이 적용되고 있으며 이에 대한 상세한 기술은 2002년도 지반지에 게재되어 있으므로 본고에서는 다음과 같이 요약 정리하였다.

#### 4.3.1 고압분사주입(Jet Grouting)공법

고압분사주입공법은 연약지반의 심층혼합처리공법의 일종으로 200~600kg/cm<sup>2</sup>의 초고압 Jet Energy를 이용한다. 일반적인 주입공법은 저압주입이며 될 수 있는 한 지반의 구조를 파괴하지 않고 그 간극에 주입재를 침투 또는 할렬주입(맥상주입) 시키는 점에 반하여 이 공법은 적극적으로 지반을 파쇄하여 치환 또는 혼합충진하는 것으로서 시공원리가 상당히 다르므로 약액주입공법에 포함시키지 않는 경우도 있다.

고압분사 주입공법은 고압수 절삭원리를 응용한 것으로서 물이나 주입액을 고압으로 초고속 분사함으로써 극히 짧은 시간내에 지반을 절삭하고, 그 절삭 공간에 주입재를 분사시켜 잔류 토사와 혼합·교반 또는 치환하여 지반을 고결시키는 공법이다. 이미 오래전부터 고압수에 의한 절삭법이 미국과 영국의 탄광에서 활용되어 왔으며, 영국의 Nicholson(1963)에 의해서 절삭을 위한 이론적인 개념이 발전되었다.

1965년경에는 일본의 Yamakado 형제가 고압수에 의한 절삭의 원리를 토사와 시멘트의 고결에 처음으로 활용하였고 1970년 초반에는 일본의 Miki와 Nakanishi가 분사주입재로서 약액을 사용하여 CCP(Chemical Churning Pile)공법을 개발하였으나, 약액은 환경적인 문제를 유발시키므로 주입재를 시멘트로 대체하였다. 이 CCP 개발법은 1972년에 처음으로 압축공기와 주입액을 별도로 보내는 이중관을 이용하여 직경 80~200cm의 기둥을 형성할 수 있는 JSP(Jumbo Special Pattern)공법을 개발하였다. 그 후 3중관을 이용하는 RJP(Rodin Jet Pile)공법이 개발되어 1980년대 후반부에 국내에 도입되었다.

이 공법은 일본 N.I. Technology사와 이태리 Rodio사가 공동 개발한 공법인데 기계공학의 발달에 따라 토출압력이 400~700kg/cm<sup>2</sup>인 초고압 펌프가 개발되어 3중관의 각 관내에 공기와 물 및 Cement를 압송시켜서 노즐을 통해 분출시킬 때 공기와 물 및 공기와 Cement가 혼합되게 된 기구를 갖는 공법으로 JSP에 비하여 직경이 훨씬 큰 직경 200~300cm의 개량체인 기둥을 형성하는 공법이다. 또 이와 유사한 공법으로 삼중관을 사용하는 SIG(Super Injection Grouting)공법이 이태리에서 개발되어 국내에 보급되었는데 JSP공법과 대동소이하나 분사방법에 차이가 있으며 직경 120~200cm의 개량체 기둥을 형성하는 공법이다. 그러나 이들 공법은 치환 또는 혼합충진하는 과정에서 건설폐기물(slime)이 발생하는데 이러한 Slime의 발생을 최소화시키는 친환경적인 고압분사 주입공법을 실용화시키는 노력이 진행되고 있고 그 결과의 일환으로 SRC(Slime Reused Column Jet Grout)공법 등이 일본에서 개발되어 국내에 도입되어 있다.

이 공법은 고압워터제트가 가진 높은 에너지를 이용하여 지반을 절삭·이완시키며 에어리프팅 작용으로 배출되는 Slime을 분류장치로 이송시켜 Slime과 이수로 분류한 후 이수는 침전조를 거쳐 다시 천공수로 재사용하며, Slime은 고화제인 시멘트와 섞어 주입재로 재사용하는 공법이다. 워터제트에 의해 절삭되고 배출되어 형성된 공간은 삼중관 룯드 선단의 토출구를 통해 되게 반죽된 시멘트몰탈 주입재로 채워지므로 원지반토와 혼합되지 않고 지상의 플랜트에서 배합된 주입재로 완전히 치환되는 균질성이 높은 고압분사 전체치환공법이다. 주입재는 고화제의 양을 배합 과정에서 조절함으로써 지반 조건에 관계없이 원하는 강도를 일정하게 만들 수 있으며, 해성점토층에서의 시공시에는 강도발현을 위하여 조골재를 첨가함으로써 고강도의 구근을 형성할 수 있다.

이러한 고압분사 주입공법은 흙막이벽 배면에 SGR 차수용 그라우팅을 2열로 시공한 후 굴착공사를 실시하던 중에 보일링현상이 발생하여 추가로 SCW(Soil Cement Wall)를 시공하였으나 차수효과를 얻지 못하고 보일링현상이 계속 발생하여 다시 3중관 분사주입공법으로 지반 개량체를 시공하여 굴착공사를 실시한 사례가 있을 만큼 지수성에 탁월한 공법으로 건설폐기물의 발생이 최소화 되도록 실용성 있게 연구 개발된다면 기술자들의 주목을 보다 많이 받게 될 공법이다.

#### 4.3.2 심층혼합처리공법을 이용한 지수

연약지반에서 시공되고 있는 심층혼합처리공법(Deep Soil Mixing Method)은 당초 지반의 강도증진과 변형억제를 목적으로 사용되었으나 오염지반에서 연직차수벽으로도 그 적용이 확대되고 있다. 국내에서는 다양하게 여러 가지 명칭으로 불리워지고 있는데(예; DWM, Deep Wing Mixing

Method) 이 공법에 대한 실용적인 효과가 여러 곳에서 실제 시공결과와 평가로 확인되고 있다. 특히 퇴적토층의 특성상 수평방향의 투수계수가 연직방향에 비하여 커서 침출수등의 차단이 필요하고 또 지반강화의 목적이 동시에 요구될 때 주목할만한 공법이다.

#### 4.3.3 지수성 강화공법의 향후 연구과제

주입공법은 소규모 장치를 이용하여 지중의 매우 깊은 곳이나 터널막장과 같이 매우 협소한 장소에서도 시공이 가능하고 상하좌우 등 방향에 제한을 받지 않고 시공할 수 있으며 소음·진동 등의 환경공해가 다른 공법에 비해 적고 공사기간이 매우 짧은 특성이 있어 현재 국내 건설공사 현장에서 활발히 사용되고 있다. 국내에는 많은 주입공법들이 개발되거나 도입되어 소개되고 있는데 보다 체계적으로 분류하여 기술자가 현장에서 실용적으로 적용할 수 있도록 하는 것이 필요하다. 주입공법은 고결토의 전단강도 평가, 주입되어 고결된 지반의 장기 내구성에 대한 신뢰도, 주입효과를 정량적으로 파악할 수 있는 방법 등이 확립되어 있지 않은 점 등 아직 해결하여야 될 문제점이 많은 공법이다. 특히 불균질한 지반을 대상으로 시공하기 때문에 숙련 및 경험을 요하고 있으며 그 성과는 주입 기술자의 기량과 성의에 적지 않게 영향을 받고 있는 실정이다.

과거 약액주입공법은 지표부터 천부에서 이루어졌으나 최근에는 지하공간 개발이 활발해짐에 따라 대심도(100m이상) 지역의 지반개량 필요성이 대두되고 있으며 일본의 경우 100m를 초과하는 심도의 경우 천공오차를 줄이고 주입관을 정확히 관입시키기 위해 3점식 향타기를 이용한 장공 천공기계를 개발하여 주입관 설치의 정밀도를 향상시키는 방안에 대한 연구가 진행 중에 있다. 또한 일본약액주입협회에서는 주입재로 주입된 고결된 지반의 장기 내구성 확인을 위한 현장규모의 시험시공을 진행 중에 있다.

과거 주입공법은 주입효과를 과신한 나머지 단순히 주입재의 주입량에만 의존하여 사실상 불필요한 주입, 주입압력조절 실패에 따른 인접구조물의 피해발생, 국내 기술개발 보다는 외국 기술도입에만 의존하였다. 향후 국내의 약액주입공법의 활발한 건설현장의 적용을 위해서는 앞서 기술한 약액주입공법의 미해결된 문제점에 대한 지속적인 연구, 대심도 주입공사를 위한 기계장비 개발 및 주입량·주입압력 등을 조절할 수 있는 자동제어 시스템개발 등의 연구가 필요하다.

## 5. 연약지반 거동 측정 분야의 최근 경향

연약지반 상의 구조물 축조 시 중요하게 고려되는 항목은 침하관리와 안정관리라고 할 수 있는데, 설계 시 충분한 지반조사와 실내시험을 통하여 대상 지반의 물성치를 파악하고 설계를 수행하지만 실제 지반 거동은 설계 예상 치와 상당한 차이를 보일 때가 종종 있다. 이는 지반이 불균일하고 대상 또한 광범위하여 현장조사 및 실내시험을 아무리 정성스럽게 수행하여도 현장 상황을 똑같이 재현, 파악하기가 매우 어려운 까닭이다. 그러므로 이러한 문제점들을 보완하고자 연약지반상의 구조물 축조나 개량시에는 계측관리가 필수공정으로 정착되었다. 계측관리분야도 사회적인 여건의 변화와 관련기술의 발전과 함께 계측기기와 관리 시스템이 많은 변화와 발전을 거듭하고 있다. 본 장에서는



연약지반 계측분야에서 최근 사용 빈도가 높아지는 계측기와 시스템을 살펴보고자 한다.

### 5.1.1 자동 계측기 사용의 증가

연약지반 처리공법 중 자연적인 압밀침하의 시간을 단축시키는 연직 배수재의 타입과 선행하중재 하공법을 병행하여 시공하는 예가 많은데 그러나 이를 통하여 압밀시간을 단축한다 하더라도 짧게는 수개월에서 길게는 수년까지 걸리는 것이 사실이다. 그러므로 압밀이 진행되는 전체 시간동안 인력을 이용한 계측값의 수집은 많은 비용이 소모되며 비효율적이라고 할 수 있다.

최근의 계측기 제조 기술 및 전자 통신 기술의 발전 또한 근래 들어 대두된 영구(유지관리) 계측의 필요성에 의하여 자동화된 계측기의 사용은 점차 보편적인 사양이 되고 있다. 특히 그림 3과 같은 최근의 침하계는 연약층이 두터워 침하량이 수십 cm에서 수 m에 이르는 지반의 장기간 계측이 용이하도록 고안되었다. 원지반에서 지지층까지 일체로 연결된 계측기가 지반의 침하에 따라 동일한 거동을 할 수 있도록 계측기 중간에 신축 장치가 부착되어 있어 계측자는 이를 특정한 전기신호나 저항신호로써 파악할 수 있다. 마찬가지로 지반의 수평 변위를 측정할 수 있는 자동 경사계도 고안되어

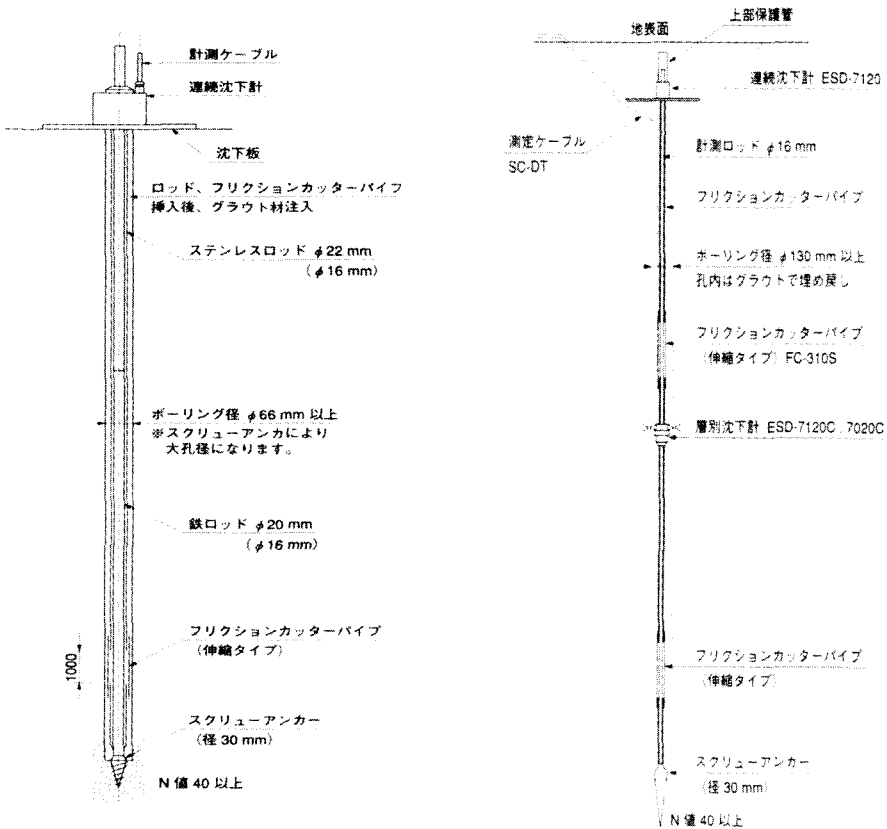
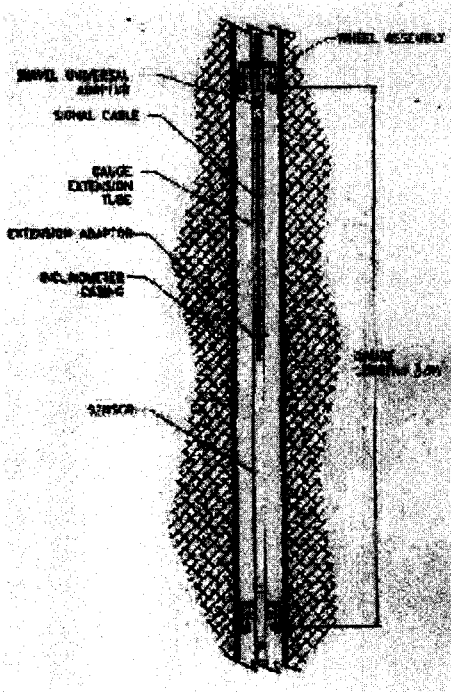


그림 3. 자동 연속 침하계 및 층별 침하계



**Model 6300 V-W In-Place Inclinometer**

The Model 6300 Vibrating Wire In-Place Inclinometer is used in conjunction with near vertical inclinometer casing for the measurement of lateral displacement similar to the Model 6300 inclinometer Probe. However, the Model 6300 In-Place system is designed to be left in place inside the casing to permit automatic or continuous monitoring. Strings of sensors are joined together to obtain deflection profiles

그림 4. 자동 경사계

사용되고 있다(그림 4 참조).

이는 기존의 수동 계측기와 그 원리는 같으나 계측값을 자동 기록장치에 연결하여 수기로 인한 번거로움과 오차를 줄일 수 있고, 특히 프로그램에 의하여 계측 빈도를 다양하게 조절할 수 있다. 수동 계측으로는 1일 최대 수 회정도 밖에 할 수 없지만 자동 기록에 의하여 추가적인 비용 없이 계측자의 의도대로 계측 빈도를 높일 수 있어 계측의 정도를 향상시킬 수 있는 장점도 있고, 대단위 준설 매립이 이루어지는 해안등의 연약 지반은 자동 계측기에 의하여 파고와 조수간만인 지반, 지하 수위, 압밀 속도에 미치는 영향등도 좀더 면밀히 살펴볼 수가 있다.

### 5.1.2 계측 시스템의 자동화

언급한 바와 같이 기존의 수동 계측에 비하여 자동 계측 시스템의 구축은 대상 지반의 대형화, 계측 빈도가 증가할 경우 대단히 편리하고 경제적인 방법이라고 할 수 있다. 그림 5와 같이 기설된 계측기로부터의 측정된 계측 값을 무선(혹은 유선) 전송 방식에 의하여 원하는 장소(계측 사무실)에서 실시간으로 모니터링하고 이를 저장, 분석함으로써 적절한 시공관리 및 향후 설계 혹은 시공 시에 반영하는 것이 가능하다. 이 시스템은 물론 무선 전송장치에 의하여 원하는 장소뿐만 아니라 Internet 을 이용하여 다자의 동시적인 모니터링도 가능하게 할 수 있으며 변위가 급격하거나 주의를 요하는 계측이라면 이상 거동에 대한 경보 발현도 가능할 수 있다.

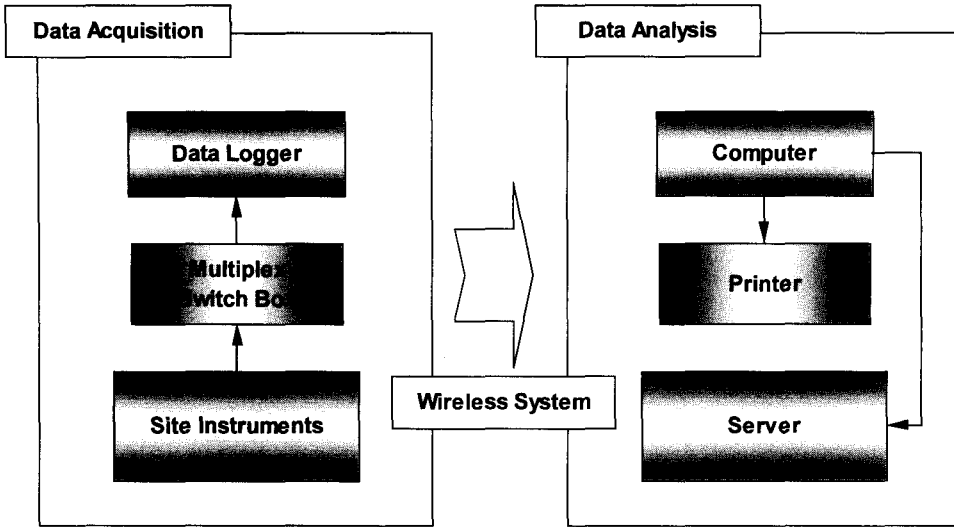


그림 5. 자동화 시스템 구성도

### 5.1.3 무선 데이터 전송

토공사의 계측을 수행하는 경우, 특히 준설매립 공사 시에 성토 및 준설매립이 진행됨에 따라 침하, 성토 등으로 인하여 계측가능 상태로의 보존 및 연장 등의 작업을 하여야 하거나 대상지역이 광

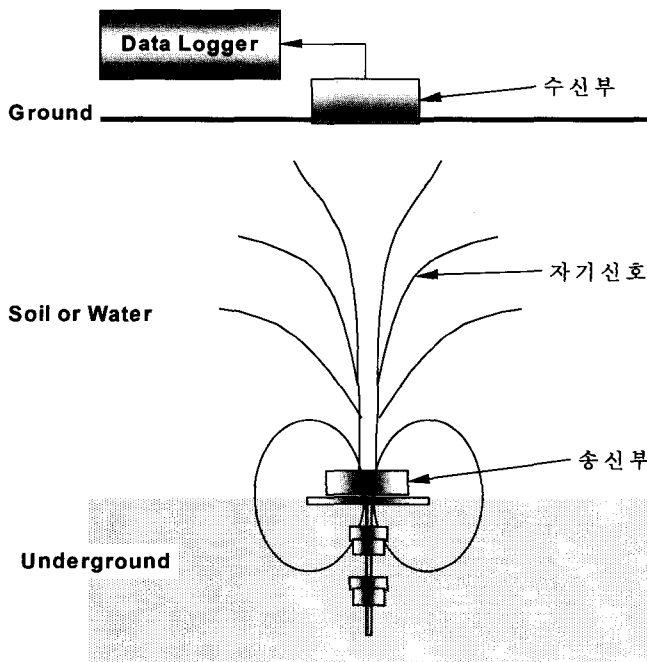


그림 6. 자기 무선 통신

대하여 장거리의 케이블을 연결하여야만 하는데, 이는 주변의 전자기적인 간섭에 의하여 계측 값의 오류가 생길 수 있고 거리가 길어짐에 따라 계측 값의 손실을 초래할 수 있다. 또한 시공 중 부주의로 인하여 계측기 및 계측기 케이블이 손상되기가 쉬우며 케이블을 보호하기 위하여 소요비용은 수동 계측의 소요비용보다 많은 비용이 소요되기도 한다. 물론 계측기로 인한 시공 간섭도 상당히 발생한다. 따라서 이를 근본적으로 해결하기 위하여 그림 6과 같은 무선 계측 시스템이 고안되었다.

이 계측기 시스템은 계측기와 데이터 저장 장치와의 연결을 무선으로 처리할 수 있도록 고안되어 케이블이 필요치 않으며 그에 따른 계측 값의 오류를 상당부분 배제할 수 있다. 아직은 극히 일부의 제조사 혹은 일부의 계측기만 무선 측정이 가능하며 매우 고가이지만 그 방식의 편리함, 우수성에 비추어 점차 사용이 증가할 것으로 예상된다.

### 5.1.4 맞춤형 계측기의 사용

연약지반 계측분야는 타 분야와 달리 설계 시 예측의 정확도가 다소 낮은 편이다. 특히 깊은 심도의 연약지반, 특히 해수면 아래의 대심도 해성점토층상의 방조제 축조 공사의 경우 시공방법에 따라 대규모 침하와 종단면상의 매우 다른 침하량 및 속도차이를 나타내기도 한다. 따라서 이러한 거동을 파악하기 위하여 각 현장의 시공 상황에 적합한 계측기기를 고안하여 그 측정범위, 측정정도와 방법, 설치 및 보호방법 등도 맞춤형으로 설계, 제작, 설치하여 긍정적인 성과를 얻고 있다. 그림 7은 해수

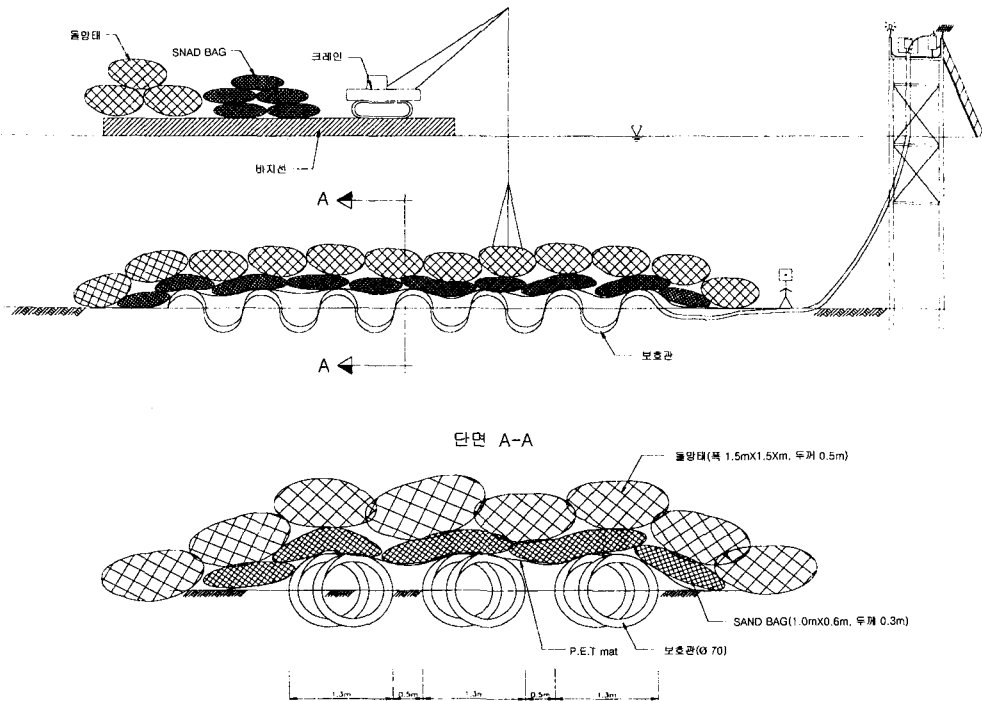


그림 7. Liquid Settlement Cell

면 하의 두터운 연약 해성 점토층 상에 방조제 시공 시 약 10여m의 과도한 침하량 및 침하단면을 계측할 목적으로 고안, 설치된 프로파일 게이지의 일종이다.

## 5.2 요약

위에서 언급한 바와 같이 계측대상 연약지반이 대심도, 광역화함에 따라 연약지반 계측의 전반적인 추세는 자동계측 시스템의 사용과 준설·매립공사 또는 해수면상에서의 공사 특성상 케이블 관리의 어려움을 극복하고자 무선데이터 전송방식의 사용이다. 또한 유지관리의 필요성 증대로 인하여 계측 모니터링, 자동분석 프로그램의 기술도 발전되고 있다.

그러나 아직 국내는 계측에 대한 기술 개발이 미비할 뿐 아니라 계측기술에 대한 인식이 매우 부족하고, 관련법이 정비되지 못하여 계측관련 기술 및 경험이 전무한 영세업체들까지 난립하여 치열한 경쟁을 하는 관계로 기술개발에 대한 투자는 거의 중단된 상태이다. 따라서 정확한 유지관리 계측을 위해서는 대부분 외산기기에 의존할 수밖에 없는 상황이다. 그러나, 현재 국내의 전자통신 기술의 수준을 감안할 때 관련법이 정비되고 체계적인 연구와 투자가 이루어진다면 쉽게 세계적인 수준으로 도약할 수 있으리라 판단된다.

한국지반공학회의 연약지반위원회에서는 2003년 8월 20일 한양대학교 박물관 강당에서 학술세미나를 개최하였다.

본격적인 세미나에 앞서 ‘연약지반 공학자의 당면문제 및 해결방안’에 관한 주제로 전 연약지반위원회 위원장이셨던 (주)에스코 컨설턴트의 김승렬박사께서 초청강연을 하여 주셨다. 김승렬박사께서는 그 원고의 꼬리말을 다음과 같이 기술하며 마무리하셨다. 국내 연약지반 기술수준의 상황과 우리의 위상을 제고하기 위한 좋은 말씀으로 생각되어 본고에서는 그 부분을 인용하는 것으로 끝을 맺고자 한다.

‘우리나라의 연약지반 기술수준은 동남아시아 지역의 국가들인 싱가포르, 대만, 태국, 심지어는 베트남에 비해 결코 우월한 위치에 있지 않다. 오히려 많이 낙후되었다고 할 수 있다. 경제규모와 위상과 발전상태에 비추어 보면 실로 부끄러운 일이 아닐 수 없다. 이렇게 된 배경에는 연약지반이 사회의 문제로 대두되는 일이 미미하여 이 분야에 쏠리는 관심이 상대적으로 적은 점이 주 원인이라고 볼 수 있다. 연약지반이 기술현장에서 문제로 떠오르기 시작한지도 꽤 오랜 시간이 경과하였다. 이제 더 이상 우리의 기술수준을 이대로 방치할 수는 없는 시점에 와 있는 것이다. 연약지반에 몸담고 있는 우리 스스로가 위상을 지키려는 노력을 배가 하여야 한다. 연약지반 공학자들은 스스로 고급의 데이터를 생산하고 평가하고 예측하는 기법을 활발하게 적용하고 발전시킴으로써 자신들의 위치를 지켜야 할 것이다. Clean-handed-research만을 고집하는 환상에서 깨어나 국외의 변모하는 모습을 빠르게 수용하고 국내의 연약지반 관련 자료를 국외에 널리 알릴 수 있는 위치로 발돋움할 때 연약지반 공학자의 위상도 제고될 것이다.’