

말뚝기초 설계를 위한 현장 토질시험법

In-Situ Soil Test Method for Pile Foundation

박대순, Tae-Soon Park

서울산업대학교 토목공학과 교수,
Professor, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Technology

개요 : 본 원고는 말뚝기초의 설계에 사용되고 있는 현장 시험법의 특징과 연구결과를 요약정리 한 것이다. 현장토질시험법이 국내에서 본격적으로 사용되기 시작한 것은 1980년도 초반으로 추정하고 있다. 이후 많은 간척사업과 연약지반 개량을 실시하면서 여러 종류의 현장 시험법이 소개되었으며 이러한 기술 발전에 편승하여 말뚝기초 설계에도 현장토질시험법을 이용함으로써 신뢰성 있는 말뚝기초의 지지력 산정을 산정코자 노력하고 있다. 본 원고에서는 지금까지 국내에서 주로 사용하고 있는 SPT, CPT, PMT 및 최근 사용실적이 높아지고 있는 DMT의 시험방법, 원리, 관련 토질정수, 말뚝기초 설계에 활용 방법에 대하여 국내외 자료를 조사하여 정리하였다.

1. 서론

토질시험으로 얻는 정보는 경제적이며 안정된 설계를 실시하기 위한 기본조건이다. 특히, 최근에는 지반의 조건과 현장여건이 열악해 짐에 따라 현장토질의 역학적 특성을 분석하기 위하여 각종 현장시험 (in-situ soil test)을 실시하고 있으며 말뚝기초 설계 분야에서도 말뚝의 지지력을 합리적으로 추정코자 현장 토질조사법을 활용하고 있다. 현장 토질조사법이 점차적으로 확대 시행되고 있는 이유는 실내시험은 제한된 조건에서 수행되는 한정적이며 가정을 수반하는 시험이기 때문에 현장의 조건을 충분히 고려할 수 없다는 단점을 가지고 있으며, 아무리 정교하게 샘플링을 하여 호트러짐이 발생하고 시료의 크기나 조건이 전체지반을 대표 할 수 없다는 문제점이 항상 존재하고 있기 때문이다.

따라서, 이러한 문제점을 극복하기 위하여 현장조건을 그대로 보존하면서 시료의 교란을 최소화한 현장시험을 최근 많이 사용하고 있는 실정이다. 현장시험은 시험비용과 시간이 많이 소요되는 단점이 있으나 현장을 대표 할 수 있는 시험을 여러 번에 걸쳐 반복하여 수행 할 수 있다는 장점과 정확한 정보를 이용하여 경제적이며 안전한 설계를 가능하게 함으로써 공사비 절감효과를 크게 가지고 올 수 있는 장점을 가지고 있다.

현장에서 직접 시험을 실시하여 대상지반의 정확한 결과치를 얻기 위해 실시하는 시험방법을 현장 토질시험 (In-situ soil test)이라 하고, 측정방법, 사용목적에 따라 크게 사운드, 시료채취, 지하수위조사, 재하시험 및 현장계측시험 등으로 나눌 수 있다. <표 1>은 선진각국과 국내에서 일부 사용되고 있는 현장 토질조사 및 시험법과 관련 사항을 정리 요약한 것이다. 현장 토질시험법은 그 종류와 방법이 너무 많기 때문에 본 워크샵 교재에서는 현재 국내에서 활발하게 사용하고있는 표준관입시험, 콘관입시험, 공내재하시험, 영종도 국제공항에서 본격적으로 사용하기 시작한 딜라토메타 그리고 향후 그 사용 범위가 확대되어질 것으로 예상되는 지구 물리학적 지반조사에 대한 전반적인 사항을 말뚝기초와 관련하여 정리하였다.

< 표1 > 현장 토질시험법의 종류와 특징

분류	현장 토질 시험법	시험의 종류 및 시험결과	대상 토질	결과의 이용
사운딩	표준관입시험 (Standard Penetration Test-SPT)	· N치	· 모든 지반	· 토층의 구성 · 지하수의 위치 · 지지력 추정
	콘관입 시험 (Cone Penetration Test-CPT)	· Mechanical cone · Piezo-cone · Lateral stress cone · Seismic cone · Nuclear cone · Acoustic cone · Hydraulic fracture cone · Cone pressuremeter qc(선단 저항치) FR(마찰 저항치)	· 리그의 용량에 따라 결정되거나 주로 점성토 연약 지반에 적 용	· 지지력 측정 · 지반 강도의 추정 · 말뚝의 지지력 산정 · 간극 수압 측정
지하수 조사	베인 시험	· 원위치 진단강도	· 연약한 점토	· 안정해석과 지지력 계산 · 예민비의 추정
	현장투수시험	· Borehole · Porous probe · Infiltrometer · Under drain	· 투수계수가 10^{-7} cm/sec 범위도 측정가능	· 현장 투수계수 측정 (다짐정도)

분류	현장 토질 시험법	시험의 종류 및 시험결과	대상 토질	결과의 이용
채하시험	평판채하시험	<ul style="list-style-type: none"> · 지반반력계수 · 극한지지력 · 지반변형계수 	<ul style="list-style-type: none"> · 점성토, 사질토, 연암 	기초지반의 허용지지력, 침하
	공내재하시험 (Pressuremeter-PMT)	<ul style="list-style-type: none"> · Pre-bored · Self-boring · Self boring lateral Stress cell 	<ul style="list-style-type: none"> · 모든 토질 · 전석, 자갈층 · 연암 	<ul style="list-style-type: none"> · 기초의 침하 · 횡방향 변형 · 지지력 추정 · 탄성계수 추정
	Dilatometer(DMT)	<ul style="list-style-type: none"> · Standard · Offshore · Liquid · Load cell 	<ul style="list-style-type: none"> · 연약 점성토 · 사질토 	<ul style="list-style-type: none"> · 구속계수(N)추정 · 수평응력 · 포극수압계수
지구물리학적 지반조사	전기 저항 조사 조사법 (Electrical resistivity)	<ul style="list-style-type: none"> · 전기저항 또는 전도율 	<ul style="list-style-type: none"> · 지반, 암반 	<ul style="list-style-type: none"> · 지반의 종류 · 암반의 종류 · 지층의 깊이 추정
	탄성파 탐사법 (Seismic method)	<ul style="list-style-type: none"> · Seismic refraction · Seismic cross-hole · Seismic down-hole · Resonant footing 	<ul style="list-style-type: none"> · 지반, 암반 (지하수위에 영향을 받음) 	<ul style="list-style-type: none"> · 탄성계수 · 지층의 구성 · 토층의 변화 · 진단계수
	자성법 (Magnetic method)	<ul style="list-style-type: none"> · 양자 자력계 (Proton magnetometer) 	<ul style="list-style-type: none"> · 지반, 암반 	<ul style="list-style-type: none"> · 지하에 숨겨진 지하공동의 위치 추적
	시추공 기록 장치 (borehole logging device)	<ul style="list-style-type: none"> · 저항성 · 자기전위 · 전단 및 압축파 속도 	<ul style="list-style-type: none"> · 수면하 지반조사에 적절 	<ul style="list-style-type: none"> · 진단저항 · 압축성 · 압도 분포

2. 말뚝지지력 산정을 위한 토질정수

정적 말뚝기초 지지력 분석에 필요한 토질정수(soil parameters)는 내부마찰각(ψ) 및 점착력(c)이다. 이 경우 설계자에 따라 비배수 또는 전응력 개념을 사용하기도 하고, 최근에는 유효응력 개념을 사용하기 때문에 어떠한 개념을 말뚝 지지력 산정에 사용할 것인가는 다소 논쟁거리로 남아있는 실정이다.

변형으로부터 탄성회복을 및 감쇄계수는 파동방정식을 적용할 때 필요하고, 수평말뚝 분석에는 노상의 반작용에 대한 측방계수 및 측방응력-변형계수가 필요하다.

말뚝지지력 산정을 위한 토질정수는 비교란 시료를 사용하여 실내에서 삼축압축시험을 실시하여 결정할 수 있다. 삼축압축시험으로부터 얻어지는 시험결과는 사전에 천공하여 시공하는 말뚝에 대해서는 매우 신뢰성이 있으나, 타입말뚝에 대해서는 말뚝주변토질의 극심한 재형성, 함수비의 변화 및 밀도의 증가가 발생하기 때문에 좋은 결과를 얻을 수 없다. 따라서, 타입말뚝의 경우 이러한 변화는 매우 결정하기 어렵고 현존하는 실내시험방법으로 현장의 상황을 재현하기가 거의 불가능한 실정이다. 이러한 이유 때문에 현장토질시험법을 사용하는 추세가 증가하고 있는 실정이다. 말뚝설계를 위한 대표적인 시험법으로 콘관입시험(CPT), 프래셔메타시험(PMT), 표준관입시험(SPT-N치)을 주로 사용하여 왔다. 특히 표준관입시험은 사질토지반에서 현재까지 가장 많이 사용한 시험방법이며 점착력이 있는 토질에서 비구속 압축강도(q_u)를 결정하기 위한 시험으로는 포켓페너트메타, 현장베인시험 및 압축시험을 주로 사용하고 있으며 수평말뚝해석에 딜라토메타를 사용하는 방안(Motan & Gabr, 1984)도 연구보고 되고있으나 아직 까지 다른 현장 토질시험법에 비하여 활용실적이 많이 없는 실정이다. <표 2>는 말뚝설계와 관련된 현장토질 시험법의 특징을 요약 정리한 것이다.

3. 표준관입시험

3.1 시험개요

표준관입시험은 국내는 물론, 일본, 미국 및 캐나다 등지에서 지반조사법으로 사용되고 있는 가장 보편적인 방법이다. 시험장치의 간편함과 경제성, 많은 시험결과의 축적으로 여러 가지 유용한 경험 식이 표준관입시험 결과를 바탕으로 개발되어 있다. 표준관입시험은 시험과 동시에 흙 시료를 육안으로 현장에서 확인할 수 있다는 장점 때문에 널리 사용되고 있으며 국내에서도 KS F 2318에 규정되어 있으며, 그 시험 결과인 N치는 64kg의 추를 76cm 높이에서 자유 낙하시켜 관입 시험용 샘플러를 지반에 30cm 관입시키는데 필요한 타격회수로 정의되어 있다.

3.2 표준관입시험의 장단점

표준관입시험의 대표적인 장점은 다음과 같다.

- ① 시험장비가 단순하며, 저가이며, 견고하고 여러 토질조건에서 시험할 수 있다.
- ② 흙의 성질에 대한 여러 경험적 관계식이 수립되어 있어서 기초설계시 유용하게 사용할 수 있다.
- ③ 시험중에 원지반의 시료를 얻을 수 있는 유일한 방법이다.

표준관입시험의 단점은 다음과 같다.

- ① 토질 주상도가 연속이 아니므로, 중요한 지층이 시험결과에 누락될 우려가 있다.
- ② 점착성이 있는 토질의 경우 토질상수에 대한 적용에 한계가 있다.
- ③ 시험장비의 제원, 종류에 따라 시험결과에 영향을 주며, 시험결과에 반복신뢰성이 떨어진다.
- ④ 상재하중, 상대밀도, 흙의 종류, 입자의 크기 및 응력경로에 따라 시험결과에 영향을 받는다.

<표 2> 말뚝설계와 관련된 현장토질 시험법의 특징

시험법	취지 토질	적용 불능 토질	말뚝설계를 위해 얻을 수 있는 정보	장 점	단 점	비 고
콘관입 시험 (CIP)	사질토, 실트 점성토	자갈층, 매우 조밀한 토층, 풍화암층	· 지속적인 지층구성 · 사질토의 현장밀도 및 마찰각 결정을 위한 관계 · 점토의 비배수 전단강도	1. 콘을 축소모형 말뚝으로 간주할 수 있다. 2. 간편 신속한 시험 3. 보오링공의 숫자를 감소시킬 수 있다. 4. 시험자의 숙련도에 크게 영향을 받지 않음.	1. 흙 샘플 채취가 불가능하다. 2. 시험결과 해석에 지역적인 경험식을 필요로 한다.	· 축방향 하중을 받는 말뚝 설계에 적합
간극수압 측정 + 콘관입 시험 (CPT)	사질토, 실트 점성토	자갈층, 매우 조밀한 토층	· CPT보다 상세한 지층 구성 정보 · 사질토의 현장밀도 및 마찰각 결정을 위한 상관 관계 · 점토의 비배수 전단 강도	1. CPT와 동일한 장점 2. 토질의 Setup 효과 판정 가능 3. 관입시 배수 또는 비배수 상태 판정가능	1. CPT와 동일한 단점 2. 다공판의 위치와 포화정도가 간극수압 측정에 영향을 미칠 수 있다.	· 축방향 하중을 받는 말뚝 설계에 최적
프렛서메타 (PMT)	사질토, 실트 점토, 연암	유기질토 및 경암	· 한계 압력으로 지지력, 프렛서 메타 변형계수로 부터 압축성	1. 다른 현장 시험장치로 불가능한 단단한 층내 및 하부에서 시험가능 2. 비균질성 토질층에서 시험 실시 가능	1. 보어홀의 준비가 매우 중요함 2. 하루에 수행할 수 있는 시험 회수가 제한 3. 축방향 하중을 받는 말뚝설계에는 제한이 있음.	· 수평 하중을 받는 말뚝 설계에 적합
딜라토메타 (DMT)	저 강도에서 증강도의 사질토 및 점토	토질의 종류, 정지토압계수, 파악 밀비, 비배수 전단강도 및 딜라토메타 계수	토질의 종류, 정지토압계수, 파악 밀비, 비배수 전단강도 및 딜라토메타 계수	1. 신속하고 경제적인 시험 2. 시험자의 숙련도에 크게 영향을 받지 않음	1. 익숙하지 않은 시험 방법 2. 작은 자갈 보다 작은 토립자에 적합 3. 축방향 하중을 받는 말뚝설계에는 제한이 있음	· 수평하중을 받는 말뚝설계에 사용 할 수 있는 가능성이 있음. (ASTM규정 상정 중)
배인전단 시험	연약점토	실트, 사질토 및 자갈층	비배수 전단강도	1. 신속하고 경제적인 방법 2. 낮은 깊이에서 일축압축시험 결과와 동일한 결과 제공	1. 케이싱 보어홀 없이 4-6m 정도 깊이에서 만 사용 할 수 있다.	· 수평 하중을 받는 말뚝의 소성, 균열이 있는 점토의 시험 결과는 주의를 요함.
증적콘 시험	사질토 및 자갈토	토질밀도의 정량적인 평가 토질층의 정량적인 비교	토질밀도의 정량적인 평가 토질층의 정량적인 비교	· 정적콘관입시험이 불가능한 토질 조건에서 유용하게 사용할 수 있다.	1. 주면의 마찰 저항이 심하여 미지의 저항 발생 2. 전반적인 사용성이 다소 제한되어 있다.	· 최종 말뚝 설계에는 부적합한 방법.

3.3 표준관입시험 결과의 수정과 이용

3.3.1 결과 보정

표준관입결과는 사용된 시험장비, 룯드의 길이, 햄머 등에 따라 보정하여야 한다. 결과의 보정은 약 60% 이룬 에너지 값을 내도록 조정된 된 것이다.

1) 시험장비에 따른 수정사항

- 스플릿 스푼 샘플러
 - 라이너가 있는 경우 : 수정이 필요 없음
 - 라이너가 없는 경우 : N치에 1.2를 곱함

- 룯드의 길이에 대한 보정
 - 10m 이상인 경우 : 수정이 불필요
 - 6 - 10m인 경우 : $0.95 \times N$
 - 4 - 6m인 경우 : $0.85 \times N$
 - 3 - 4m인 경우 : $0.75 \times N$

- 햄머에 대한 보정
 - 셰이프티 햄머를 사용할 경우 : $0.9 \times N$
 - 도우넛 햄머 : $0.75 \times N$
 - 트립 해머 : 엔빌의 무게에 따라 수정

2) 시험 깊이에 대한 수정사항

- 표준응력(100Kpa)에 대한 상재하중의 보정

$$N_c = N_{cN} \quad (3.1)$$

여기서, $N_c = 0.77 \text{Log}_{10}(20\text{Pa}/\sigma_v')$
 $P_a = 100\text{Kpa}$
 $\sigma_v' = \text{유효수직응력}$

위의 보정은 상재하중 1 tsf(100Kpa, N_1)에 대한 N치를 나타낸다. 이러한 방법으로 보정된 N치(N_{60})₁은 토질의 공학적 성질을 판단하는데 사용된다.

3.3.2 결과의 이용

N 치를 이용하여 말뚝의 연직 및 수평지지력을 추정하는 방법은 종류를 헤아릴 수 없을 만큼 많은 경험식과 실험식이 발표되어 있다. 그중 가장 대표적인 몇가지를 예로 들어 설명하기로 한다.

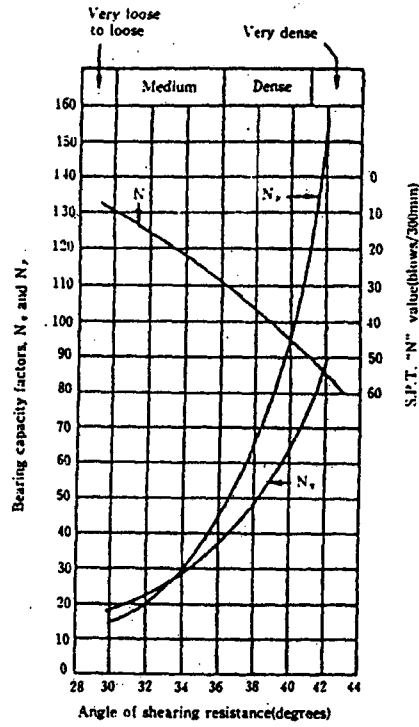
사질토에서는 지반의 상대밀도의 추정, 마찰각 추정(Peck, Hanson 및 Thornburn, 1974-그림 1 참조) 하여 말뚝의 설계에 사용하고 있다. 이 외에도 말뚝설계와 직접적인 관련을 없으나 임계전단응력비(τ_{av}/σ_v')와 N치 및 진도에 대한 관계를 이용하여 액상화 예측에도 사용하고 있다.

N 값을 직접 사용하여 말뚝의 지지력을 구하는 방법으로는 Meyerhof의 방법이 가장 대표적이다. Meyerhof 공식 이외에도 Dunham, Ohsaki의 공식이 있으나 국내에서는 Meyerhof의 공식을 주로 사용하고 있다. <식 3.2>은 1956년 Meyerhof가 제안한 연직지지력을 산정하는 공식이고 [그림 2]는 N치를 이용한 주면마찰력에 대한 일본의 연구결과이다. [그림 3]은 Reese등의 연구결과로서 수평말뚝의, 해석

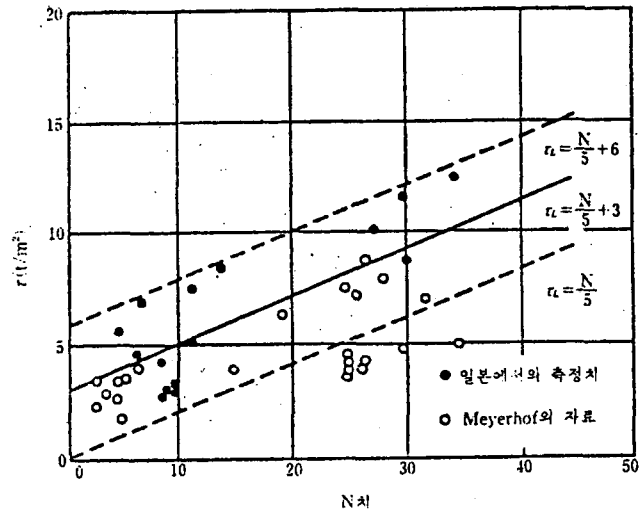
을 위한 지반반력계수를 상대밀도와의 관계로 도시한 것이다.

$$R_u = R_p + R_f = 40 NA_p + (N_1/5)A_s \quad (3.2)$$

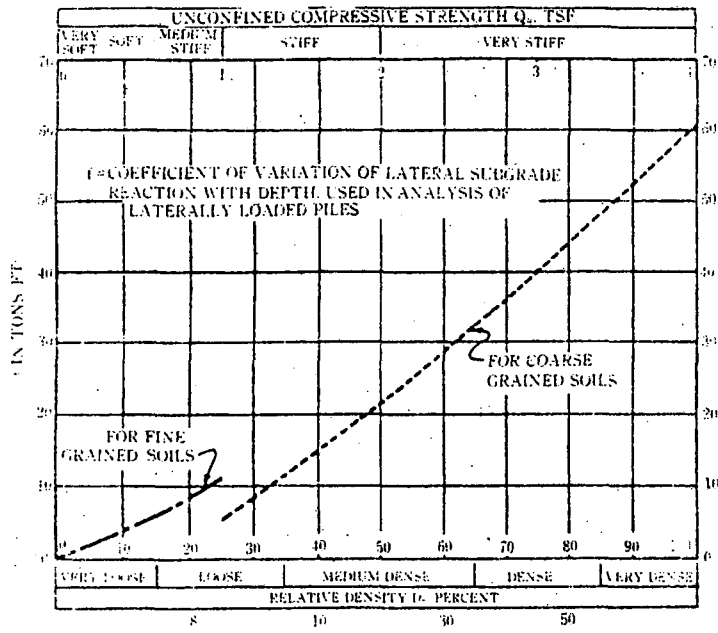
- 여기서,
- R_u : 말뚝의 극한지지력(ton)
 - R_p : 선단지지력
 - R_f : 말뚝저항
 - A_p : 말뚝단면적(m^2)
 - A_s : 말뚝의 표면적(m^2)
 - N : 말뚝선단부의 N-값
 - N_1 : 말뚝근입장의 평균N-값



[그림 1] 마찰각 추정도표



[그림 2] 주변마찰력 f_s 와 N과의 관계



[그림 3] 상대밀도와 횡방향 지반반력계수(f) (Reese et al)

4. 콘관입 시험(Cone penetration test-CPT)

4.1 개요

콘관입시험의 역사를 살펴보면 1917년에 스웨덴 철도협회에 초기형태의 CPT장비를 개발한 것이 최초이며, 그후 1927년에는 덴마크 철도협회에서, 1934년에는 네덜란드에서 각자의 CPT장비를 개발하였다.

멘틀콘(mantle cone)은 콘과 로드(rod)사이의 공간에 흠입자가 끼는 것을 방지하기 위해서 고안되었으며(Verneiden, 1948), 1953년에는 Begemann에 의해서 마찰 슬래브(friction sleeve)를 가진 콘이 개발되었다.

전기식 CPT가 처음 소개된 것은 1948년으로, 콘의 내부 또는 바로 위에 장착된 트랜스 듀서를 사용하여 콘의 저항과 마찰력을 측정한다. 1960년경에는 유럽의 장비회사를 주축으로 상품화되어 널리 사용되기 시작하였다. CPT는 주로 유럽에서 광범위하게 사용되고 있으며, 최초에는 미국, 캐나다 등지에서도 사용이 증가되고 있으며, 국내에서는 해안 점성토 및 연약지반의 지지력과 토성시험에 많은 실적을 쌓아가고 있으며, 여러 관련 기업체에서는 CPT장비를 도입하여 연구와 실무에 활발히 사용하고 있다. CPT와 관련된 장비를 서유럽에서 발달되었으며 그후 계측기술, 컴퓨터의 발달과 오늘날과 같은 여러 형태의 CPT장비가 개발되기에 이르렀다. 콘의 형태는 축소 말뚝의 형상과 유사하기 때문에 그 시험 결과가 말뚝의 지지력을 예측하는데 직접 사용 할 수 있다는 장점으로 인하여 선진 각국에서는 콘 관입시험 결과를 이용하여 말뚝의 지지력을 예측하는데 널리 사용하고 있는 실정이다.

4.2 CPT의 장단점

CPT는 경제적이며 적용분야가 많은 지반조사 방법으로 표준관입시험에 비하여 지속적으로 토질 층에 대한 정보를 제공 해준다. CPT의 장점으로서는

- ①지속적인 토질 층에 대한 정보제공
- ②토질에 대한 각종변수(engineering parameter)와 지지력 및 침하를 측정 할 수 있으며
- ③선단의 장치를 교환함으로써 간극수압, 토질의 오염도 측정등 다양한 정보를 수집 할 수 있다.

그러나, CPT의 단점으로는

- ①표준관입시험 처럼 시료를 얻을 수 있으며
- ②조립토가 많이 산재된 지반에서는 시험이 곤란하며
- ③토층의 깊이가 증가함에 따라 리그(rig)를 계속 연장하면서 작업을 실시하여야 한다는 단점이 있다.

또한, CPT시험의 결과는 기존의 시험결과와 관련하여 사용하여야 하는 단계이므로, 이러한 경험식을 사용할 때는 시험조건, 방법, 사용된 CPT의 제원등을 상세히 숙지하여야 하다.

4.3 장비의 구성

CPT장비는 밀어 넣는 장치(thrust machine), 반작용 시스템(reaction system-rig) 측정 및 시험결과 기록 장비를 포함한 관입기로 구성되어있다.

4.3.1 리그(rig)

리그의 종류는 세 종류로서, 리그가 저항할 수 있는 힘에 따라 구분한다. 경리그(light rig)는 20-25KN 정도의 관입저항을 가지고 있으며, 주로 연역한 상부 층의 탐사에 사용한다. 중간리그(medium rig)는 약 100KN 정도로 트레일러에 장착하여 사용하며, 유압잭킹으로 관입한다. 관입깊이는 견고한 점토 및 중간 조밀한 정도의 사질토 층에서 약 20m 정도의 깊이에 적당하다. 중리그(heavy rig)의 관입저항의 범위는 175-200KN으로, 가장 큰 관입력을 가지고 있어서, 자주식 트레일러 또는 트럭 등에 장착하

여 시험에 사용하다.

4.3.2 뚫트(rod)

표준 뚫트는 매우 견고한 금속으로 제작되어 있으며, 외경이 30mm, 내경이 16mm이며, 길이는 약 1m 정도이다. 메케니칼 콘 시스템의 표준 내경은 표준 뚫트에 비하여 0.5mm에서 1.0mm 정도 작는데, 15mm 정도의 내경을 가진 것이 많다.

4.3.3 선단 콘(penetration tip)

선단 콘은 메케니칼과 전자식 두 가지로 나뉘는데, 메케니칼 선단 콘은 콘저항 및 주변의 마찰력을 발휘하기 위한 힘이 뚫트를 통해서 선단 콘으로 전달되며, 전자식은 선단콘내에 장착되어 있는 하중계(load cell)에 의해서 측정된다.

전자식 콘의 장점으로는

- ①정확도 및 시험결과의 재현성이 우수
- ②지층의 미세한 변화의 감지도 우수
- ③작업의 신속성
- ④간극수압의 측정 가능
- ⑦시험결과의 취급용이

4.4 기타 부속 장치

콘관입시험과 병행하여 사용되고 있는 주요 부속 장치로는 ①경사계(inclinometer) ②간극수압계(pore pressure transducer) ③음향측정장치(acoustic penetrometer)가 있다. 경사계는 선단 콘이 관입되는 동안 뚫트가 정확하게 수직이 되어 관측깊이의 오차를 줄이도록 경사계를 사용하며, 간극수압계는 선단 콘이 지중에 관입될 때 발생하는 과잉간극수압(excess pore pressure)을 측정하는데 사용하는데, 간극수압의 발생이 전단저항에 미치는 영향이 크기 때문에 간극수압의 측정은 최근 매우 중요하고 현장시험으로 되어가고 있다. 음향측정 장치는 스펙트럼과 음향레벨이 토질의 종류와 밀도의 함수라는 사항에 착안하여 새로이 개발된 장치로서 토질내의 오염측정, 지하수위의 높이 등을 결정하는데 매우 유용한 수단으로 사용되어질 전망이다.

4.5 콘관입 시험 결과의 이용

콘관입 시험 결과는 ①토질의 분류 ②흙의 강도 및 변형 ③탄성계수 ④기초의 침하 및 지지력을 산정 하는데 유용하게 사용 될 수 있다.

4.5.1 토질의 분류

Olsen 과 Malone(1981)는 CPT 결과를 1 tsf의 표준유효응력에 해당하는 수치로 전환하여 토질분류를 실시하였는데, 이때 1 tsf의 표준유효응력에 해당하는 정규 q_{cl} 은 다음과 같이 계산하였다.

$$q_{cl} = \frac{q_c}{(\sigma_v)^n} \quad (4.1)$$

여기서, q_c : 선단저항(tsf)
 q_{cl} : 수정 CPT 선단 저항(정규 q_c)
 σ_v : 수직유효응력

n: 상수(0.6:사질토, 1.0:점토)

또한, 마찰력은

$$f_{sl} = \frac{f_s}{\sigma_v} \quad (4.2)$$

여기서, f_s :CPT 슬래브의 마찰저항

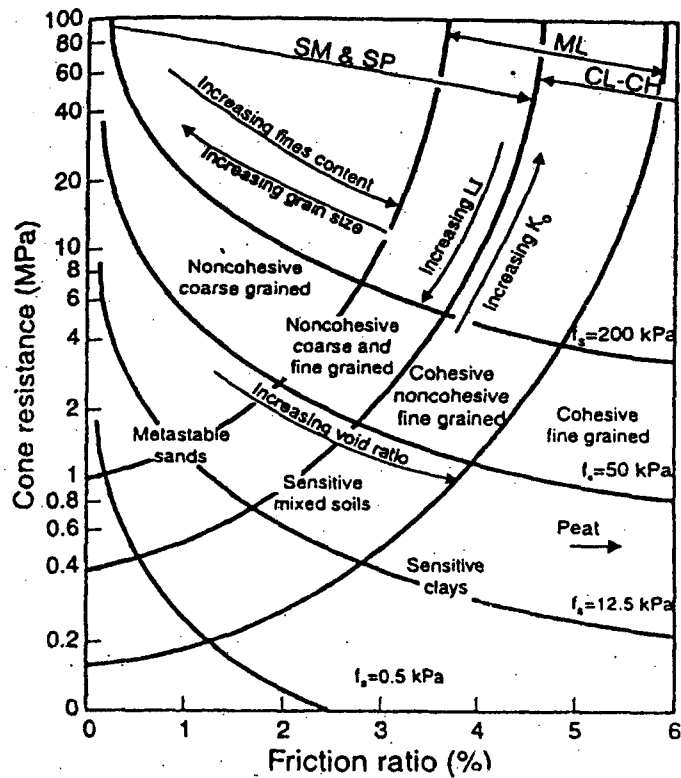
CPT 마찰저항률, FR은

$$FR = \frac{f_s}{q_c} \times 100 \quad (4.3)$$

식(4.1)과 식(4.2)를 식(4.3)에 대입하면

$$FR_1 = \frac{f_{sl}}{q_{cl}} \times 100 = \frac{f_s}{q_c \times (\sigma_v)^{(1-n)}} \times 100 \quad (4.4)$$

식(4.4)을 사용하며, [그림 4]의 관계를 이용하여 흙의 분류를 실시할 수 있다.



[그림 4] CPT결과를 이용한 흙의 분류 (Campanella, 1983)

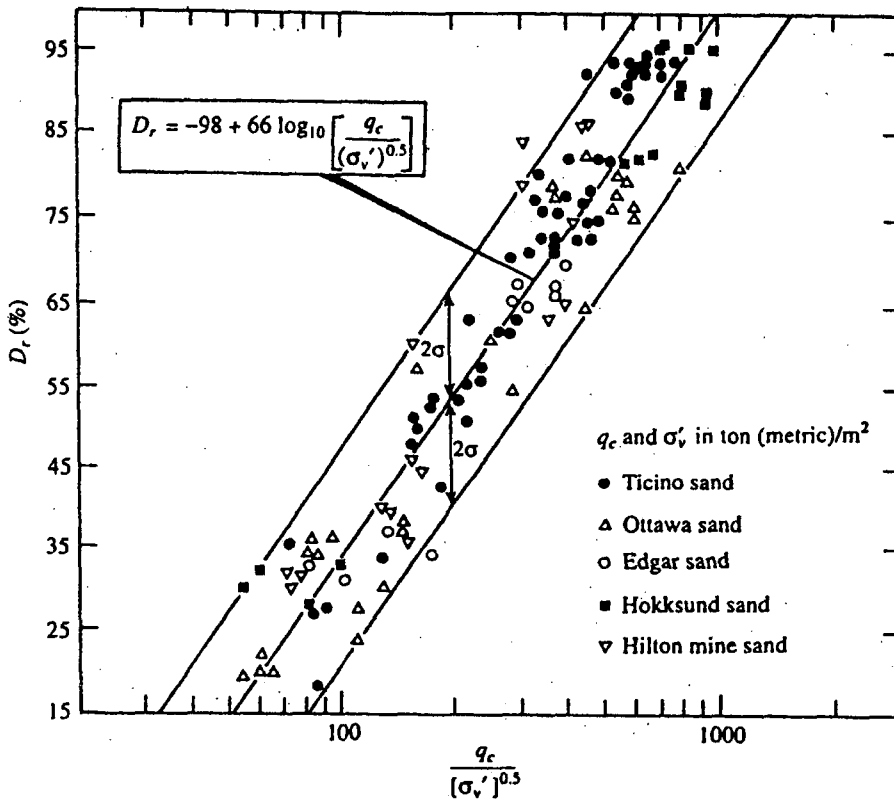
4.5.2 비점성토의 토질상수

콘관입시험 결과를 이용하여 비점성토의 상대밀도, 강도, 변형특성, 탄성계수(E), 동적전단계수(G) 등을 구할 수 있다. 정규 압밀 사질토의 상대밀도(D_r)와 q_c 및 σ'_{vo} 의 관계는 [그림 5]와 같으며 Schmertmann(1975)은 K_0 에 대한 다음관계를 경험식으로 제안하였다(1975).

$$K_{0(OCR)} = (OCR)^{0.42} \times K_{0(NC)} \quad (4.5)$$

$$\frac{q_{c(OC)}}{q_{c(NC)}} = 1 \times X \times [(OCR)^\beta - 1] \quad (4.6)$$

여기서, $X=0.5$ (OCR=2일 때), 0.25 (OCR=15일 때)
 $\beta = 0.275 + 0.26 \times D_R$



[그림 5] 정규압밀 사질토의 상대밀도(D_r)와 q_c 및 σ'_{vo}

4.6 점착성이 있는 토질

4.6.1 비배수 전단강도

콘관입시험으로부터 얻을 수 있는 점성토의 비배수 전단강도는 선단콘저항과 수직응력의 관계로부터 구할 수 있다.

$$q_c = C_u \times N_k + \sigma_{v0} \quad (4.7)$$

여기서, N_k : 지수
 C_u : 비배수 전단강도 (N.C Clay=15)
 σ_{v0} : 전응력
 q_c : 콘선단 저항

4.6.2 예민도(S_c)

점성토의 예민도는 재 성형된 흙의 강도에 대한 흐트러지지 않은 강도의 비로써, 콘관입시험 결과인 마찰저항비(FR%)를 사용하여 구할 수 있다.

$$S_c = \frac{10}{FR\%} \quad (4.8)$$

4.6.3 변형특성

1) 구속계수(M)

Sanglerat et al(1972) 구속계수(M)과 계수 α_m 그리고 콘선단저항 q_c 와의 관계를 아래와 같이 표현하였다.

$$M = \frac{1}{m_v} = \alpha_m \times q_c \quad (4.9)$$

각종 토질에 대한 구속계수 및 구속계수상수(α_m)를 정규압밀점토 및 실트는 <표3>에 과압밀 점토 및 실트는 <표4>에 정리 하였다.

2) 강도

콘관입 시험결과를 이용하여 사질토의 유효전단저항각 ψ' 를 추정할 수 있다. Schmertmann (1978)이 발표한 상대밀도(D_R)와 유효전단저항각(ψ')의 관계는 [그림 6]과 같다. 또한 Terzaghi의 전반 전단 지지력 계수인 N_f 는 Muhs와 Weiss의 연구결과에 의하면 아래와 같은 관계가 있다.

$$N_f = 12.5 \times q_c \quad (4.10)$$

Durgunoglu와 Mitchell(1975)은 토질의 콘저항각 및 토압계수 K_0 와 관계는 다음과 같이 표시하고 있다.

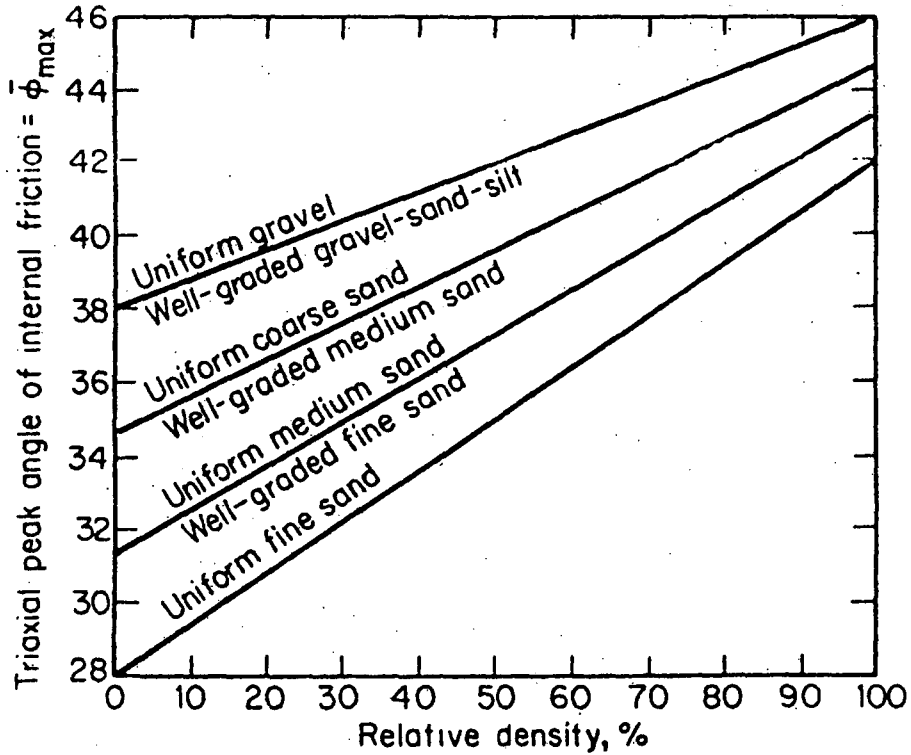
$$K_0 = 1 - \sin \psi' \quad (4.11)$$

< 표3 >정규압밀점토 및 실트에 대한 구속계수상수

흙의 종류	구분	$\alpha_m (=M/q_c)$	
		맨틀콘	기준선단콘(R)
매우 소성이 큰 점토 및 실트	CH, MH	2 - 6	2.5 - 7.5
중간 내지 낮은 소성의 점토	Cl, LL	$q_c < 0.7MN/m^2$	3 - 8
		$q_c > 0.7MN/m^2$	2 - 5
중간 내지 낮은 소성의 실트	M1, ML	3 - 6	3.5 - 7.5
유기질 실트	OL	2 - 8	2.5 - 10
피트 및 유기질 점토	Pt, OH	$50\% < w < 100\%$	1.5 - 4.0
		$100\% < w < 200\%$	1.0 - 1.5

< 표4 >과압밀점토 및 실트에 대한 구속계수상수

흙의 종류	구분	$\alpha_m (M/q_c)$	
		$1.2 < q_c < 0.7MN/m^2$	$q > 0.7MN/m^2$
매우 소성이 큰 점토 및 실트	MH, CH	2 - 6	-
중간내지 낮은 소성의 점토	Cl, CH	2 - 5	1 - 2.5
중간내지 낮은 소성의 실트	M1, ML	3 - 6	1 - 3



[그림 6] 상대밀도(D_r)와 유효전단저항각(ϕ')의 관계 (Schmertmann, 1979)

3) 변형특성

여러 지반공학의 문제를 풀기 위해서 대상 토질의 탄성계수(E), 전단계수(G), 구속계수(M)등을 구해야 한다. 콘관입 시험결과를 이용하여 이들 계수를 구하는 방법은 다음과 같다.

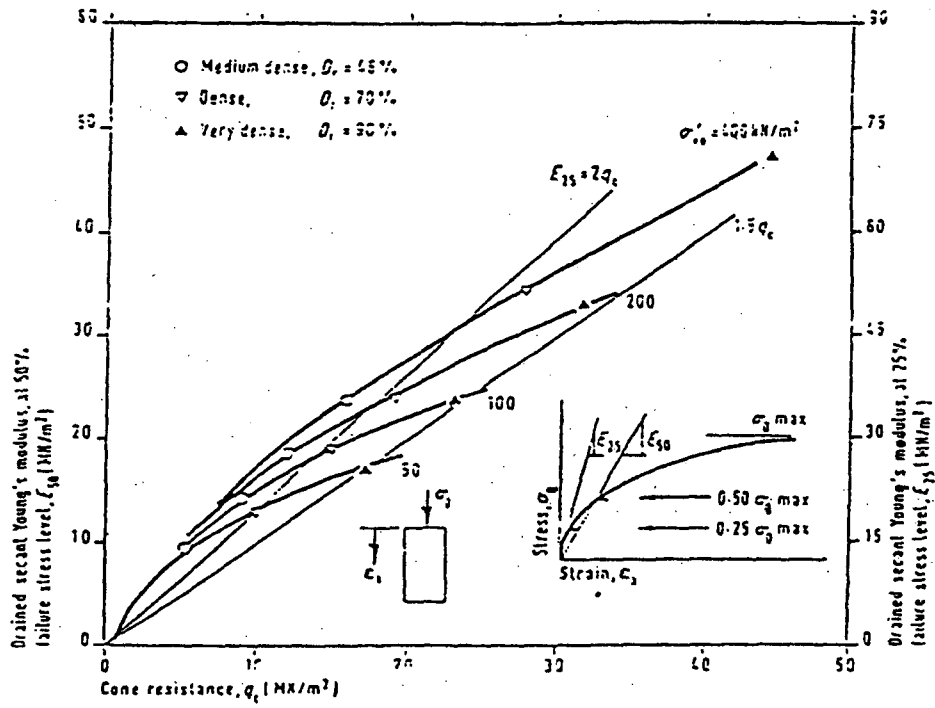
(1) 탄성계수(E)

[그림 7]은 1983년에 Robertson과 Campanella가 발표한 콘의 선단저항(q_c)와 배수세칸트(secant) 계수와의 관계이다. 이 도표로부터 25%의 파괴응력(E_{25})와 50%의 파괴응력(E_{50})을 구할 수 있는데, 대부분의 기초(foundation)문제를 해결하는데는 E_{25} 가 적합하고, E_{50} 은 말뚝의 선단지지력을 구하는데 적합한 것으로 알려져 있다.

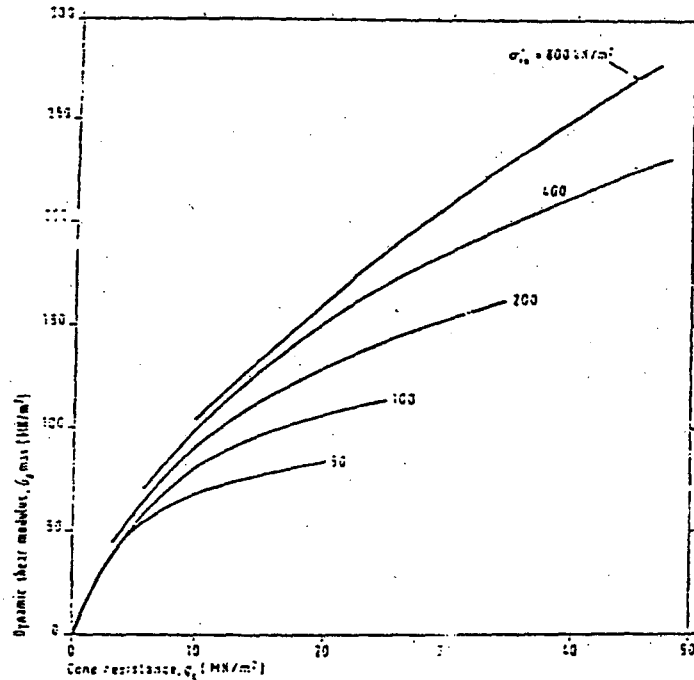
(2) 동적전단계수(G)

[그림 8]은 Robertson과 Campanella(1983)가 연구 발표한 동적전단계수, 콘선단저항 및 수직유효 응력간의 관계 도표이다. Seed와 Idres(1970)의 발표에 의하면 여러 변형단계에서 동적전단계수는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$G_{\max} = K_G \times P_a \times \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^{0.5} \quad (4.12)$$



[그림 7] 선단저항(q_c)과 배수세칸트(secant)계수의 관계 (Robertson & Campanella, 1983)



[그림 8] 동적전단계수, 콘선단저항 및 수직유효응력간의 관계도표 (Robertson & Campanella, 1983)

(3)구속계수(M)

구속계수(M), 콘선단저항(q_c)사이에는 아래와 같은 관계가 있다.

$$M = \alpha_M \times q_c \quad (4.13)$$

$$\left(\alpha_M = Z \times \left[1 + \left(\frac{D_R}{100} \right)^2 \right] \right)$$

Webb(1982)에 의하면 깨끗한 사질토의 경우는

$$M = 2.5(q_c + 3.2) \quad (\text{MN/m}^2) \quad (4.14)$$

점토질 사질토의 경우는 다음과 같다.

$$M = 1.7(q_c + 1.6) \quad (\text{MN/m}^2) \quad (4.15)$$

4.7 사질토의 즉시 침하량 산정

Schmertmann et al(1978)은 콘관입시험결과를 사용하여 사질토의 즉시 침하량을 산정하는 관계식을 발표하였다.

$$S_t = C_1 \times C_2 \Delta_p \sum_{i=1}^n \frac{I_z}{(p \times q_c)} \Delta Z \quad (4.16)$$

여기서, C_1 , C_2 : 깊이와 토질의 크리프에 대한 보정계수

$$C_1 = 1 - 0.5 \frac{\sigma_{v0}}{\Delta_p}$$

$$C_2 = 1 + 0.2 \text{Log}(lot)$$

Δ_p : 기초의 압력 증가분

p : 형상계수

I_z : 변형 영향계수

q_c : 토의 선단 저항치

Δ_p : 깊이 할증분

σ_{v0} : 수직응력

4.8 CPT 결과의 말뚝기초 설계 적용

여러 학자들의 연구로부터 CPT 결과를 직접 말뚝의 지지력을 추정 할 수 있는 방법들이 개발되었다. Ruiter 및 Beringen(1979), Bustamante 및 Gianceselli(1982)등은 CPT의 결과를 사용하여 구한 말뚝의 지지력이 실측치와 매우 근사하게 일치하였으며, Briaud(1988)은 CPT결과를 사용 할 경우 말뚝의 지지력을 약 30% 과대평가 한다고 보고하고 있다. 무엇보다도 중요한 사실은 CPT 시험결과를 사용함으로써 실내 또는 현장 시험결과에서 얻은 결과를 사용하여 구한 예측지지력이 훨씬 더 실측치에 접근하고 있다는 것이다. CPT를 이용한 말뚝설계는 일찍이 유럽에서 발달하였으며, 최근에는 미국에서도 많이 사용하고 있으며 정확하고 새로운 방법을 개발코자 연구 노력하고 있다.

CPT를 이용한 두 종류의 주요 설계방법으로 Bustamante 및 Gianceselli(1982)와 Ruiter 및 Beringen(1979)의 방법이 있는데 Bustamante 와 Gianceselli(1982)의 방법을 간략하게 소개하기로 한다.

● Bustamante 및 Ganeselli의 방법 (1982)

이 방법은 여러종류의 토질조건과 기초형식에서 197개의 말뚝재하 시험결과 분석을 근거로 하고 있다. 이 방법은 LCPC방법으로도 알려져 있다.

말뚝의 단위 주면마찰력 f_p 는 다음식으로 구하고

$$f_p = q_u / \alpha_{LCPE} \quad (4.17)$$

여기서, q_u : 선단지지력
 α_{LCPE} : 마찰계수

<표 5>는 각종 말뚝에 대한 마찰계수를 정리한 것이다.

말뚝의 선단지지력 q_p 는 등가 평균 콘저항치(q_{ca})를 선단지지력계수 K_c 를 곱하여 구한다.

$$q_p = K_c \cdot q_{ca} \quad (4.18)$$

여기서, q_{ca} : 말뚝선단에서 상하 고정된 거리 $a(a=1.5 \times \text{말뚝직경})$ 에서의 평균 q_c
 K_c : 지지력계수 (표 6 참조)

<표 5 > 마찰계수 α

토질의 종류	$q_c(\text{Mpa})$	마찰계수, α			
		I		II	
		A	B	C	D
연약토질	<1	30	90	90	30
실트 및 느슨한 사질토	≤ 5	60	150	60	120
단단한 점토 및 실트	> 5	60	120	60	120
다짐된 사질토 및 자갈층	5~12	100	200	100	200
매우 단단한 사질토 및 자갈층	> 12	150	300	150	200

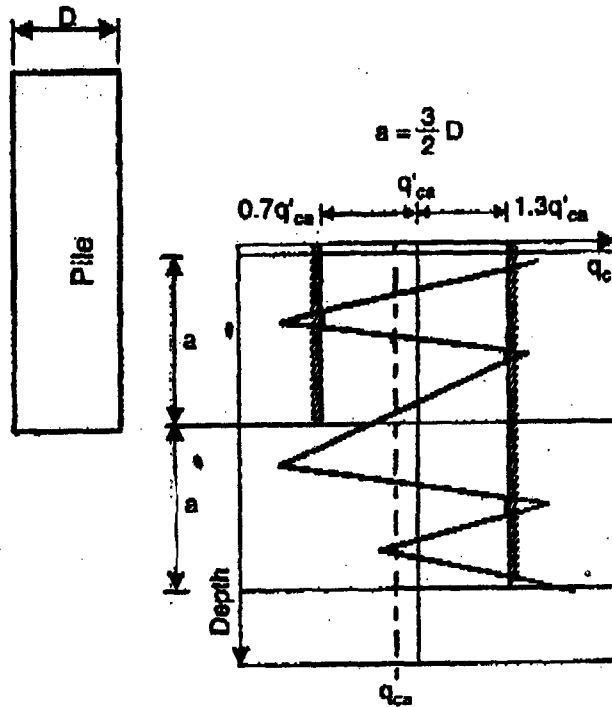
주) 범위 : I A : 보강하지 않은 보어드 파일(bored piles)

I B : Cased bored pile

II A : 항타말뚝

II B : 250mm이상 직경을 가진 고압 그라우팅말뚝, 마이크로 파일(고압분사)

[그림 9]는 등가평균 콘저항치를 산정하는 절차를 보인 것이다.



[그림 9] 등가 평균 콘저항치(q_{ac})의 산정절차

Bustamante 및 Gianeselli의 방법(1982)에서는 단지 측정된 q_c 값을 주변마찰력과 선단지지력을 계산하는데 사용되기 때문에 별도의 절차없이 손쉽게 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력을 구할 수 있어서 많은 설계자에게 호응을 받고 있다.

< 표 6 > 지지력계수 K_c (LCPE-SETRA, 1985)

흙의 종류	q_c (Mpa)	지지력계수, K_c	
		Group	
		I	II
연약점토	< 1	0.4	0.5
적당히 다짐된 점토	1~5	0.35	0.45
실트 및 느슨한 사질토	≤ 5	0.42	0.5
단단한 점토 및 실트	> 5	0.452	0.55
적당히 다짐된 사질토	5~12	0.4	0.5
매우 단단한 사질토 및 자갈토	> 12	0.3	0.4

주) Group I: 보강하지 않은 보어드 파일, 낮은 압력으로 그라우트한 마이크로 파일

Group II: 스크류파일, 향타말뚝, 대규모 고압그라우트 말뚝, 높은 압력으로 그라우트한 마이크로파일

5. 공내재하시험(Pressuremeter - PMT)

5.1 서론

공내재하시험은 독일의 Kogler(1933)에 의해서 흙과 암반의 강도와 변형에 대한 특성을 파악하고자 최초로 제안되었으며, 그후 프랑스의 Menand(1956)에 의해서 오늘날의 프레스메타(Pressuremeter)로 발전하였다. 공내재하시험은 지반의 역학적 특성을 현장에서 교란되지 않은 상태로 신속하게 구할수 있는 현장 시험이다. 사운딩을 실시할 수 없거나 비교란 시료를 채취할 수 없는 기존의 시험 방법들을 적용하기 어려운 암반지반, 자갈, 전석층 등에서 비교적 양호한 결과를 얻을 수 있는 시험이다. 국내에서도 암반지반에서의 터널공사, 지하 저장 창고 개발 공사등에 활발히 사용되고 있으며, 말뚝설계를 위해서도 점차적으로 활용실적을 쌓아가고 있다.

여러 종류의 공내재하시험 장치가 개발되어 있는데 가장 대표적인 것으로는 ①self-boring pressuremeter(SBPMT) ②full-displacement pressuremeter(FDPMT) ③prebored pressuremeter(PMT)의 세 종류가 있다.

공내재하시험은 적절한 보정계수와 변형율을 가함으로써 시험결과에 대한 정확한 해석을 실시할 수 있는 것으로 알려져있다. 특히, 초기 전단계수와 비배수 전단강도는 변형율과 토질의 흐트러짐에 민감함을 보인다.

5.2 시험장치 및 절차

직경이 60m~80m 원통형의 고무원관을 보링구멍에 넣고 압력증가에 따른 체적변화를 측정한다.(고무원관에 압력을 가할 때 물을 사용한다. [그림 10]은 공내재하 시험의 개략도(a,b)와 전형적인 시험결과를 보인 것이다.) 압력의 증가는 약10단계로 하고 각단계는 약 1분 정도를 머물도록 한다. 고무원관으로 유입된 물의 체적은 15초, 30초 및 60초 간격으로 측정한다.

5.3 장점 및 단점

여러 가지 다양한 토질변수를 공내재하시험 결과로부터 압력-변형관계를 이용하여 해석할 수 있다. 프레스메타는 대략 하루에 5~8번 정도의 시험을 실시할 수 있다. 공내 재하시험 장치의 장점으로서는

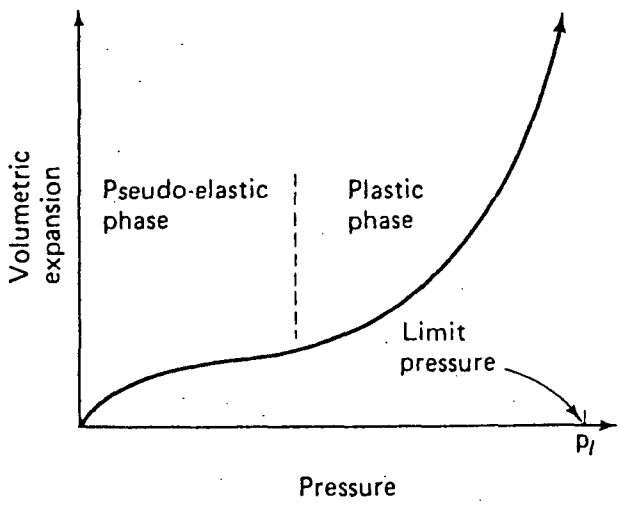
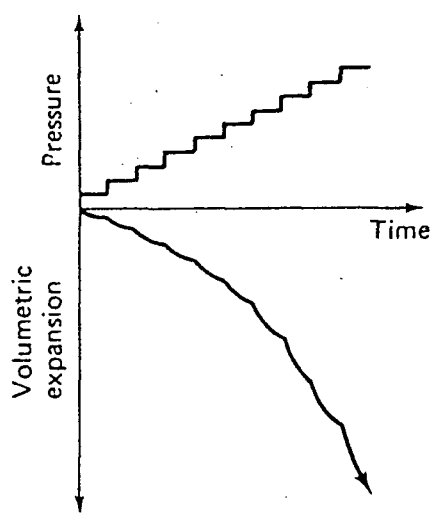
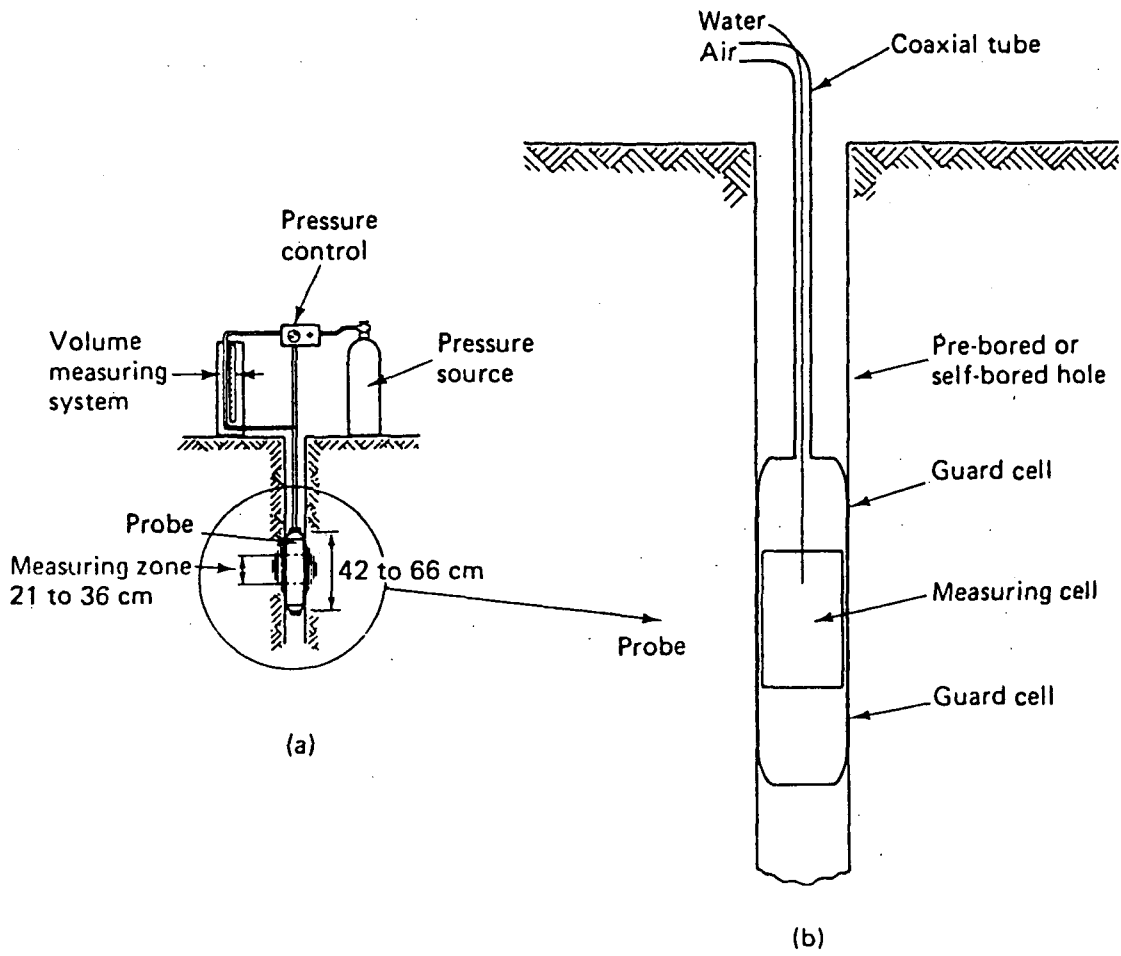
- ① 흙에 대한 응력-변형 관계를 얻을수 있다.
- ② 지반에 대한 K_0 값을 추정 할 수 있다. 그러나, 보어 홀(bore hole)의 흐트러짐과 응력이완으로 인하여 셀프 보링 PMT가 훨씬 더 적합하다.
- ③ 말뚝 기초 설계에 매우 훌륭한 시험장치이며, 특히 수평하중을 받는 조건에서는 더욱 훌륭한 장치이다.

그러나, 프레스메타의 단점으로는

- ①지층 구성을 시험 전에 미리 파악하고 있어야 한다.
- ②시험 중에 발생하는 간극수압을 알 수 없다.
- ③보어 홀의 흐트러짐이 시험결과에 큰 영향을 미친다.
- ④시험에 장시간이 소요되며 시험비용이 고가이다.
- ⑤토질이 매우 불균질 할 때 계수(modulus) 및 변형상수가 정확하지 않을 경우가 있다.

5.4 측정 방법 및 읽음치 수정

[그림 11]은 프레스메타 측정으로부터 얻은 시험결과로서 압력-변형관계의 일반적인 결과이다. 이 곡선은 세 가지의 특징이 있는 구역으로 나누어진다.

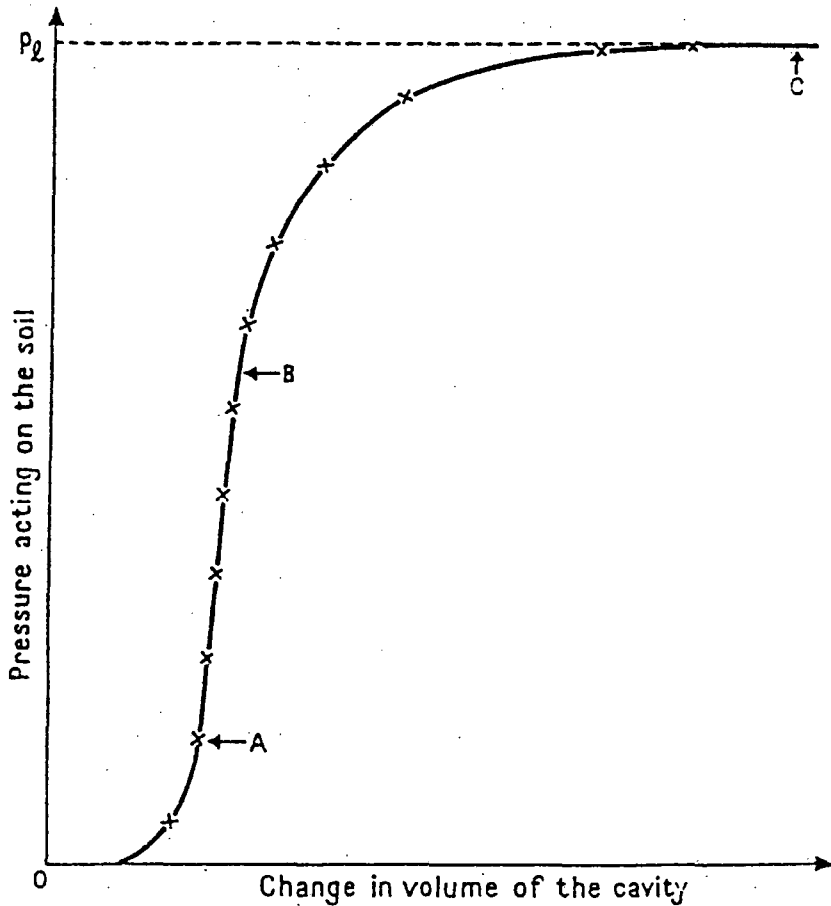


[그림 10] 공내재하시험 개략도(a,b) 및 시험결과(c,d)

① 곡선의 초기부분(0-A) 정지 상태의 응력 시스템을 재설정 하는데 필요한 응력과 변형을 나타낸다. 초기 공동 크기는 A점에서 V_0 나 P_{0m} 으로 정의한다.

② A-B 영역은 대략적으로 직선이며 반탄성(pseudue-elastic)상태를 나타낸다. 점 A는 시험의 시작점이며 이부분의 경사는 프레셔메타 계수(E_{pm})를 계산하는데 사용한다.

③ 이 곡선의 마지막 부분은 B점으로부터 시작되는 p_f 및 v_f 로서 소성영역 또는 크리프 영역이라 불리는 곡선이다. 한계 압력(P_L)은 압력의 점근선 수치이며 초기 공동 체적의 두배가 되는 압력으로 정의 된다.



[그림 11] 압력-변형의 일반적인 관계

5.5 시험 데이터수집 및 시험결과

[그림 12]은 프레셔메타 시험 중에 수집된 시험 데이터로서 보정하지 않은 결과이다. 시험결과로는

- 한계 압력 : P_L
- 순수 한계 압력 : $P_L = P_L - P_0$

Pre-bored 프레셔메타를 사용할 경우 정지 전응력 및 추정하여야 한다. 보어 홀의 교란과 응력이 이완으로 인하여 P_{0m} 수치에 매우 큰 에너지가 발생하게 된다. 따라서, P_0 는 아래의 곡선을 사용하여 구한 값을 반드시 사용 하여야 한다.

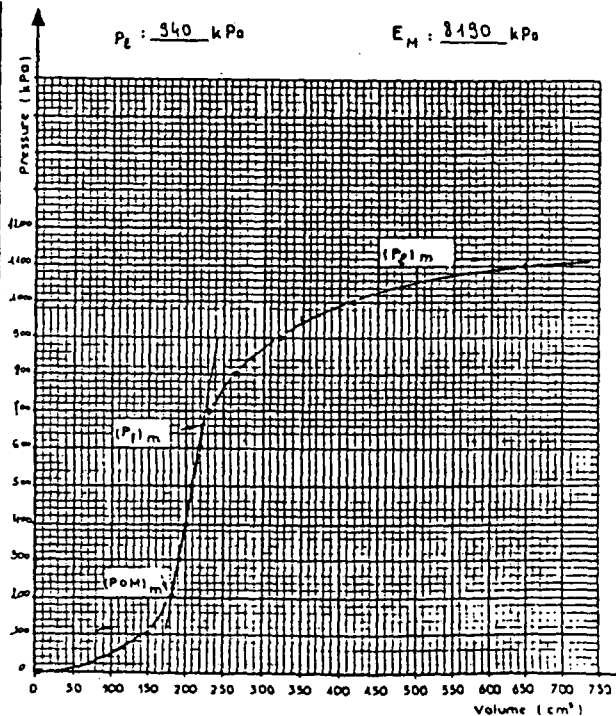
PRESSUREMETER TEST					Job No. 422	Date: 23 Feb 1966			
Hole No. 24					Tool dia. 60 mm	Type Hand Auger with Bentonite			
Depth 1 m					Gauge Ht 0.6 m	Water level 1.5 m			
Soil 3.1% Clay									
Volumeter No. 416 GC					Probe dia. 0.8	Membrane 3pa rubber			
Sheath metal									
Rec. Press. Diff. 140 kPa					Water Press. 10 (2-hol) 56 kPa	Diff Req'd - 36 kPa			
Pressure kPa	Time sec	Volume cm ³	Guard Cell Pressure or Differ. kPa	Creep Change	Pressure kPa	Time sec	Volume cm ³	Guard Cell Pressure or Differ. kPa	Creep Change
0		0			0	reading set for $V_0 =$	cm ³		
100	15	119	-36	5	900	15	119	-36	14
	30	143	-36	140		30	143	-36	38
	60	167	-36			60	167	-36	
200	15	115	-36	5	1000	15	116	-36	21
	30	141	-36	33		30	141	-36	53
	60	166	-36			60	166	-36	
300	15	116	-36	2	1400	15	116	-36	38
	30	141	-36	5		30	141	-36	132
	60	166	-36			60	166	-36	
400	15	116	-36	2	1440	15	116	-36	
	30	141	-36	10		30			
	60	166	-36			60			
500	15	103	-36	1					
	30	129	-36	9					
	60	154	-36						
600	15	114	-36	3					
	30	141	-36	11					
	60	166	-36						
700	15	114	-36	5					
	30	141	-36	15					
	60	166	-36						
800	15	114	-36	7					
	30	141	-36	32					
	60	166	-36						

(1) $V_{10} - V_{50}$ (2) $V_{10} - V_{50}$ Refer to membrane resistance: R 193-76
 Test Started at: 11-23 finished at: 11-23
 Remarks: - differential pressure unstable at 1400 kPa
- sunny day, 20°C

Fig. 2-61: Field notes for pressuremeter test.

PRESSUREMETER TEST				Job No. 422	Date: 23/2/66
Hole No. 24				Tool dia. 60 mm	Type Hand Auger / mud
Depth 1 m				Gauge Ht 0.6 m	Water level 1.5 m
Soil Clay					
Volumeter No. 416				Probe dia. 0.8	Mem. 3pa rubber
Sheath metal					
Rec. Press. Diff. 140 kPa				Water Press. 10 (2-hol) 56 kPa	Diff Req'd - 36
Pressure	Volume	Pressure	Volume		
0	1	100	151		
			165		
100	119	900	143		
	143		167		
	167		195		
200	115	1000	116		
	141		141		
	166		166		
300	116	1400	116		
	141		141		
	166		166		
400	116	1440	116		
	141		141		
	166		166		
500	103				
	129				
	154				
600	114				
	141				
	166				
700	114				
	141				
	166				

Test Started at: 11-23 finished at: 11-23
 Refer to membrane resistance: R 193-76



[그림12] 프레스메타 현장 시험결과(보정전)

$$P_0 = (r \cdot z - u)K_0 + u \quad (5.1)$$

여기서, r = 결보기 밀도
 z = 깊이
 u = 간극수압(정수압)
 K_0 = 측방 토압 계수

- 프레셔메타 계수
 원통형 공동의 방사 팽창에 대한 탄성이론으로부터

$$G = V \cdot \Delta P / \Delta V \quad (5.2)$$

여기서, G = 전단계수
 v = 공동의 체적
 p = 공동내의 압력

그러나, 전단계수(G)는 공동의 체적에 크게 영향을 받기 때문에 체적-압력 곡선의 성형부분이 중간점에 해당하는 체적을 사용하여야 한다.

$$V_{PM} = V_0 + (V_0 + V_f)/2 \quad (5.3)$$

여기서, V_0 = 쉘의 초기 체적

따라서, 전단계수는

$$G_{PM} = V_{PM} \cdot \Delta P / \Delta V \quad (5.4)$$

- 탄성계수(E_{PM})

$$E_{PM} = 2(1 + \nu)G_{PM} = 2.66G_{PM} (\nu=0.33) \quad (5.5)$$

$$E_{PM} = 2.66V_{PM} \cdot \Delta P / \Delta V \quad (5.6)$$

- 기초설계
 - 지지력(Bearing)
 - 기초의 침하량 계산

5.6 말뚝기초 설계에 이용

측방향 선단지지력 계산은 아래의 공식을 사용하고, K 는 지반의 종류, 기초의 깊이, 형상에 의해서 영향을 받는다.

$$K = \frac{q_u - \sigma_v}{P_{1m} - \sigma_h} \quad (5.7)$$

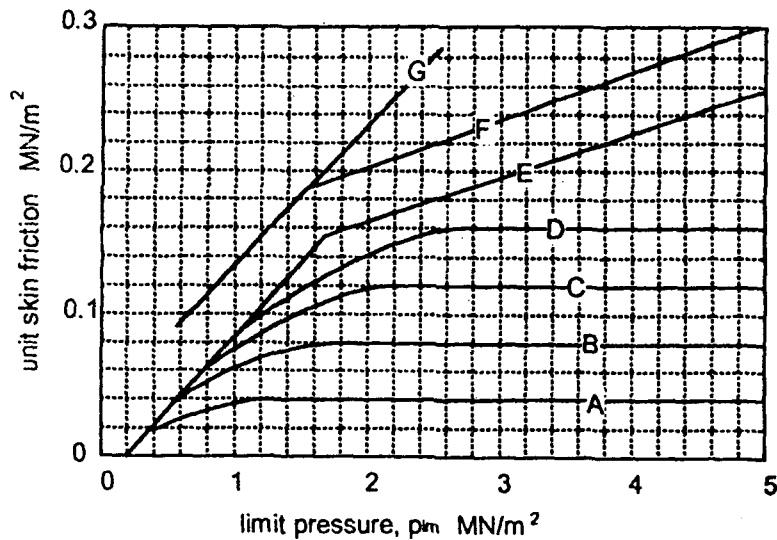
여기서, K : PMT 지지력계수
 q_u : 극한 지지력
 σ_v : 전수직응력
 σ_h : 전수평응력(PMT시험 측정)
 P_{lm} : 한계압력

Menard(1963)가 최초로 제안한 이 공식은 지반의 종류 및 말뚝의 종류와 관련이 있다. Menard가 제안한 공식은 이후 여러 연구결과와 현장데이터의 수집을 통하여 여러 차례 수정된다. 가장 최근에 개발된 LCPC-SETRA(1985)의 방법은 200개의 계측된 말뚝과 지반의 종류 및 순수 한계압력을 바탕으로 개발되었는데 폐단 말뚝의 극한 선단지지력 Q_p 는 다음과 같은 공식을 사용하여 구한다.

$$Q_{p/A} = K [P_{lme} - \sigma_h] + \sigma_v \quad (5.8)$$

여기서, A = 말뚝저면의 면적
 P_{lme} = 등가한계압력
 σ_h = 저면에서의 전수평 압력
 σ_v = 저면에서의 전수직 압력
K = 지지력 계수 (표 참조)

[그림 13]은 말뚝의 종류에 따른 한계압력과 단위 마찰력의 관계를 도시한 것이다. 상기의 방법 이외에도 여러방법이 제안되어 있다.



[그림 13] 말뚝의 종류에 따른 한계압력과 단위 마찰력의 관계

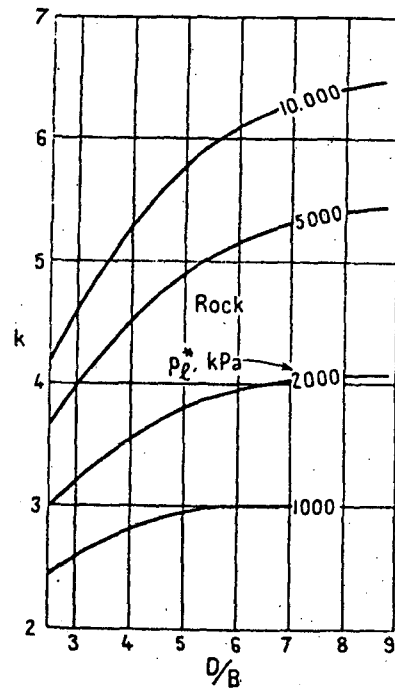
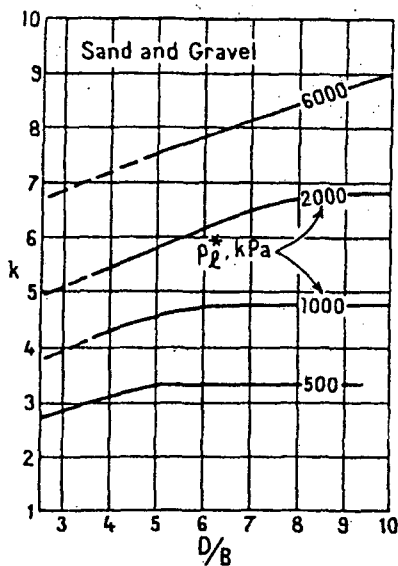
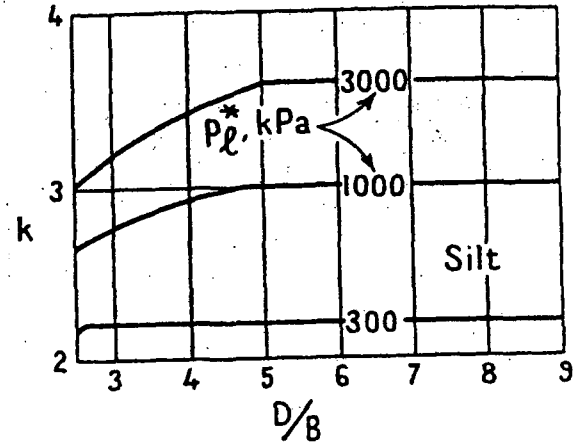
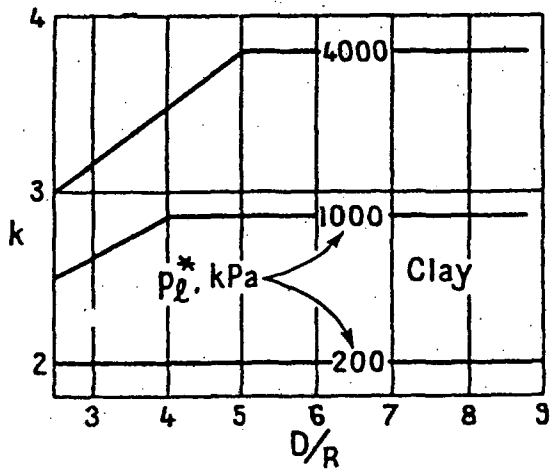
지지력을 산정하는 다른 방법으로 다음과 같은 것이 있다.

$$q^* = K(P_L - P_o) \quad (5.9)$$

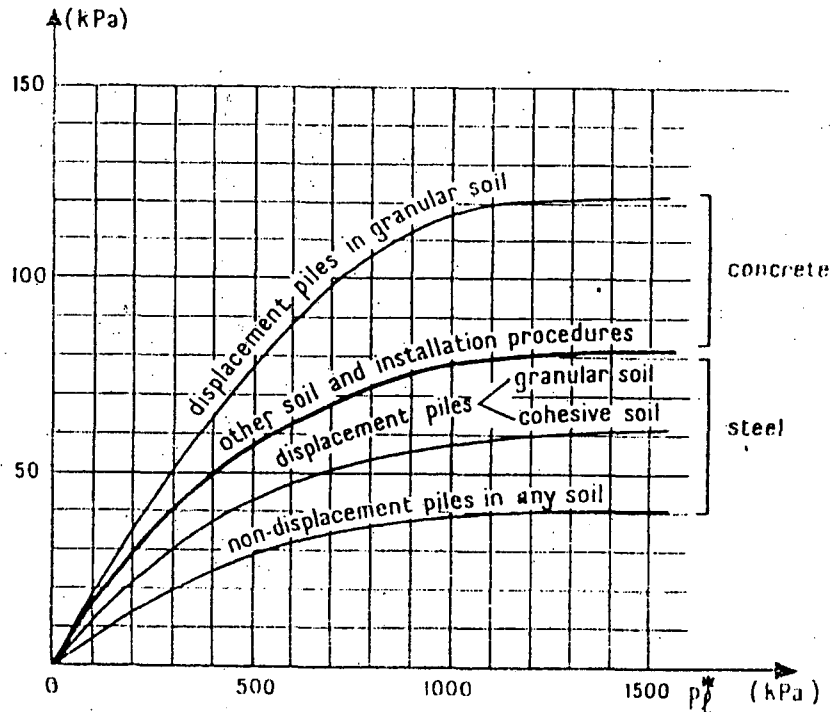
여기서,

- q^* : 지지력
- K : 보정계수
- P_L : 한계압력
- P_0 : 초기치

위의 관계는 알은 기초는 물론 현장타설말뚝의 선단지지력을 산정하는데 적용될수 있다. 항타말뚝의 경우 [그림 14]으로부터 지반의 조건과 말뚝의 깊이와 직경의 비로부터 보정계수를 산정함으로써 말뚝의 지지력을 구할 수 있다. [그림 15]은 말뚝의 종류에 따른 말뚝주면의 마찰력을 프레스메타를 사용하여 측정한 결과이다



[그림 14] 보정계수



[그림 15] 말뚝종류에 따른 말뚝주면의 마찰력

6. 디라토메타(Dilatometer-DMT)

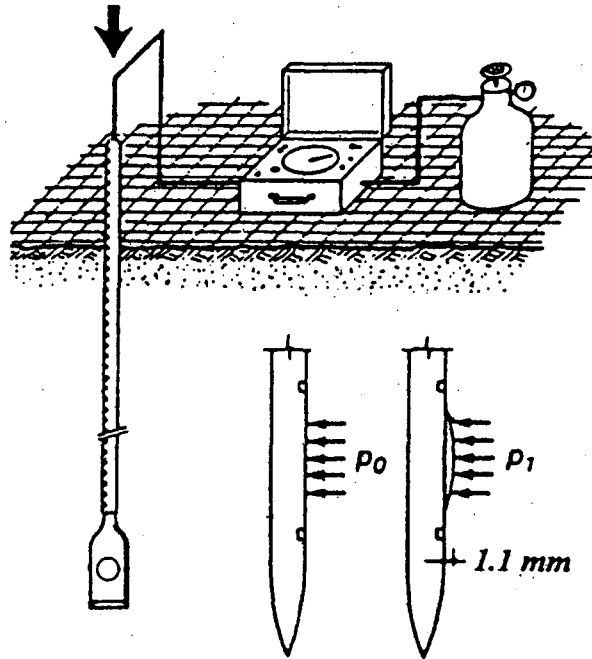
6.1 개요

DMT는 미국과 유럽에 1980년에 최초로 소개되었으며 현재에는 약 40여개국에서 사용하고 있는 관입시험이다. 현재 우리나라에서도 영종도 국제공항의 지반특성 조사를 위하여 사용하고 있으며, 우리나라에 최초로 도입된 시기는 1995년으로 추정된다. DMT가 현장지반조사 장비로 짧은 기간 내에 크게 각광을 받는 이유는 다음과 같다.

1. 특별한 전기 기술이 없이 단순한 조작이 가능.
2. 시험결과와 반복성이 우수.
3. 경제적인 시험
4. 기존관입장치와 로드사용이 가능.

1970년 이탈리아의 마케티교수에 의해서 개발된 DMT는 토질의 특성과 토질의 주상을 평가하는 매우 간편하고 신속한 현장토질장비로 평가받고 있다. DMT와 관련된 연구논문 및 발표도 약 300편여에 이르고 있으며 ASTM 및 Eurocode 7에 제시되어 표준화 되어있다. DMT시험의 원리와 결과에 대한 관련 사항은 1980년 Marchetti교수의 보고서에 상세하게 기록되어 있으며 1997년에는 지금까지의 연구결과를 토대로 새로이 개발된 관계식들을 정리보고하고 있다. 말뚝기초설계분야에서는 타 현장시험방법에 비하

여 적용사례가 극히 한정되어 있는 실정이지만 수평하중을 받는 말뚝의 설계와 말뚝의 관입으로 인한 주위지반의 교란, 군말뚝의 효과등 여러분야에 사용되어 새로운 해석의 시도가 가능 할 것으로 기대되는 현장시험이다. [그림 16]은 DMT의 시험개략도를 도시한 것이다.



[그림 16] DMT시험 개략도

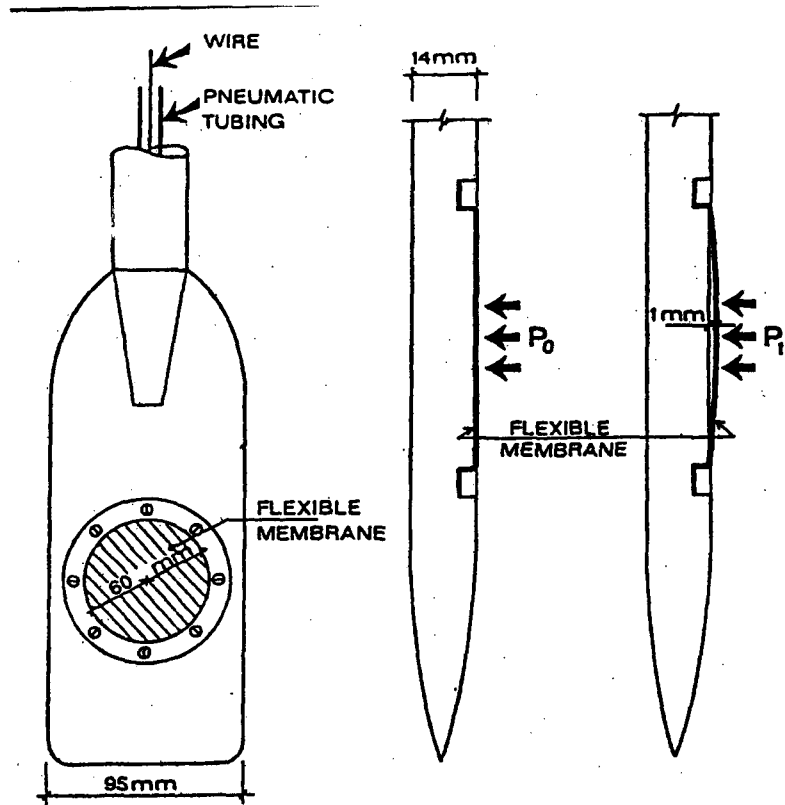
6.2 시험순서 및 특징

DMT는 팽창이 가능한 경우 얇은원형 철재멤블렌이 표면에 장착된 철재날로 제작되어 있다. 이 철재날은 로드와 연결하고 지상의 콘트롤 판넬에서 멤블렌을 정해진 시험방법에 따라 조작하면서 시험을 실시한다.

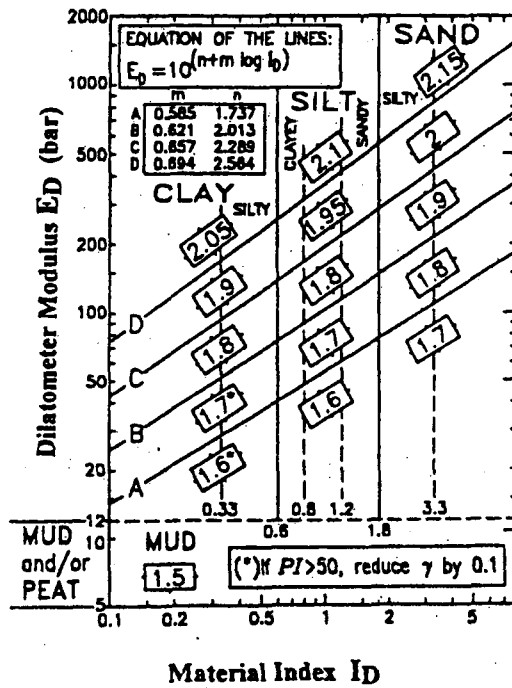
DMT시험은 [그림 17]의 철재날(딜라토메타)을 지반에 삽입함으로써 시작한다. 압력조절장치가 달린 제어판, 게이지와 소리신호음을 사용하여 시험자는 약 1분동안 P_0 (P_0 : 딜라토메타의 멤블렌이 움직이려 하는 순간 필요한 압력)압력을 측정하고, P_1 (P_1 :멤블렌의 중심부가 1.1mm팽창했을 때 압력)을 측정한다.

딜라토메타는 통상 20cm깊이마다 측정하며, P_0 및 P_1 값을 해석하여 [그림 18]의 관계를 사용하여 토질을 분류하는 기본자료로 사용한다. 딜라토메타를 관입하는 장치로는 여러 장치가 사용되는데 밀어넣는 방식으로는 콘관입장치의 리그를 사용하기도하며 유압장치를 사용하기도 한다. DMT는 연약한토질부터 연암까지 광범위하게 시험을 실시할 수 있다. 철재날(딜라토메타)은 25톤의 힘에 견딜 수 있으며 점토의 경우 $C_u=100\text{bar}$ 까지, 일반토질인 경우에는 $M=4000\text{bar}$ 까지 측정할 수 있다(M =구속계수). [그림 19]는 DMT시험 결과이다. 이 시험결과에서 M 과 C_u 는 일반적인 토질파라메타이고 일상적인 방법으로 사용된다. I_d 는 토질의 종류(사질토, 실트, 점토등)를 구분하는데 사용하며 K_d 는 OCR 단면도와 유사한 형태를 띠고 있다. K_d 값이 높을수록 점토는 과압밀상태를 표시한다. DMT의 결과는 이외에도 다음과 같은 유용한 정보를 제공해 준다.

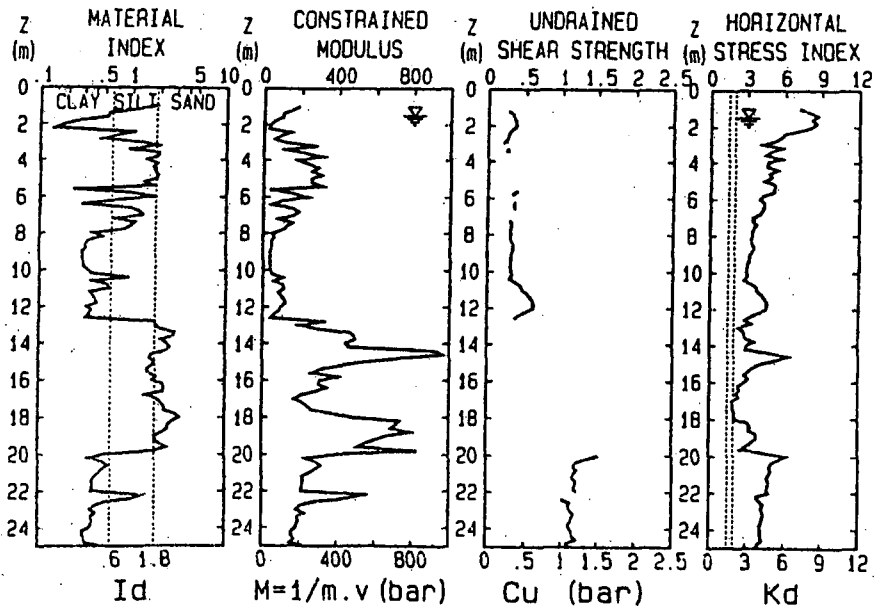
압밀계수 및 투수계수
 비배수층으로부터 배수층 구별
 수평하중을 받는 말뚝의 p-y곡선
 모래의 액상화
 사질토의 마찰각
 사질토의 OCR 및 K_0



[그림 17] 철재날(Steel blade)의 삽입과 P1 및 P2값의 정리



[그림 18] 토질분류도표



[그림 19] DMT시험 결과

DMT시험 수행중에 A값, B값 및 C값을 측정하게 되는데 A값은 철재날(blade)의 관입에 의하여 수축된 멤블렌을 0.05mm 팽창시킬 때 압력을 나타내며, B값은 멤블렌의 중심부가 1.1mm 팽창했을 때의 압력

을 나타내며, C값은 멤블렌이 다시 원위치로 되돌아왔을 때 측정된 압력 값이다. 이로부터 측정된 A,B,C값들로부터 얻어지는 주요한 지수와 관계를 [표 7]에 정리 요약하였다.

6.3 말뚝기초 설계에 이용

Motan과 Gabr(1984)는 DMT를 사용하여 수평하중을 받는 말뚝에서 토질의 수평계수(lateral subgrade coefficient)를 측정하는데 매우 유용하게 사용 할 수 있는 것으로 결론으로 제시하고 있다.

$$K_h = \frac{P_{o(7)} - P_{o(0)}}{d}$$

여기서 d : 딜라토메타 날의 $\frac{1}{2}$ 두께
 P_o : 다이어프램의 외측변위
 $P_{o(7)}$: 정지상태에서의 다이어프램 외측변위
 $P_{o(0)}$: 다이어프램의 7mm 이동시변위

<표 7> 딜라토메타의 측정결과(A,B,C)로부터 얻어지는 주요지수(Marrhetti,1999)

기 호	기호에 대한 설명	관계식 및 조건	
P_0	1차보정 읽음치	$P_0=1.05(A-Z_M+\Delta A)-0.05(B-Z_M-\Delta B)$	
P_1	2차보정 읽음치	$P_1=B-Z_M-\Delta B$	
I_D	재료지수	$I_D=(P_1-P_0)/(P_0-U_0)$	$U_0 =$ 간극수압
K_D	수평용력지수	$K_D=(P_0-U_0)/\sigma'_{v0}$	$\sigma'_{v0} =$ 상재하중응력
E_D	딜라토메타지수	$E_D=34.7(P_1-P_0)$	탄성계수가 아님
K_0	현장토압계수	$K_{0DMT}=(K_D/1.5)^{0.47}-0.6$	$I_d < 1.2$ 인 경우 성립
OCR	과압밀비	$OCR_{DMT}=(0.5K_D)^{1.56}$	$I_d < 1.2$ 인 경우 성립
C_u	비배수전단강도	$C_{u,DMT}=0.22\sigma'_{v0}(0.5K_D)^{1.25}$	$I_d < 1.2$ 인 경우 성립
ϕ	마찰각	$\phi_{safe,DMT}=28+14.6\log K_D-2.1\log^2 K_D$	$I_d > 1.8$ 인 경우 성립
C_h	압밀계수	$C_{h,DMTA}=7c_{uf}/T_{flex}$	
K_h	투수계수	$K_h=C_h\gamma_w/M_h(M_h=K_{0DMT})$	
M	수직배수 구속계수	$M_{DMT}=R_M E_D$ if $I_D \leq 0.6$ $R_M=0.14+2.36\log K_D$ if $I_D \geq 3$ $R_M=0.5+2\log K_D$ if $0.6 < I_D < 3$ $R_M=R_{M,0}+(2.5-R_{M,0})\log K_D$ where $R_{M,0}=0.14+0.15(I_D-0.6)$ if $K_D > 10$ $R_M=0.32+2.18\log K_D$ if $R_M < 0.85$ set $R_M=0.85$	
U_0	평형간극수압	$U_0=P_2-C-Z_M+\Delta A$	배수가 자유로운 토질에서 성립

7. 지구물리학적 지반조사

7.1 서론

흙과 암반의 층상은 자성, 밀도, 전기저항, 탄성 등의 물질의 어떤 물리학적 성질을 측정하는 지구물리학적 방법에 의해 규명할 수 있다. 이 방법은 토층의 물리적 성질이 매우 다른 층상의 변화 기록만을 제공하므로 여기서 얻을 수 있는 정보는 여러 층 사이의 경계면의 위치일 뿐이다. 대개 지하수 상태에 대한 생생한 정보는 구하기 어렵다.

현재의 기술개발 수준을 고려할 때 지구물리학적 방법은 전단강도, 압축성 혹은 입도 분포에 대한 직접적이고 정량적인 데이터를 제공하지 못하지만, 탄성과속도 측정은 암반체에서 압축성에 대한 불연속점의 영향을 평가하는데 도움을 준다. 큰 현장의 경우에는 지구물리학적 방법이 광범위한 지역을 신속하게 조사할 수 있으므로 경제성이 있을 수도 있다.

지금까지의 경험에 의하면 지구물리학적 방법은 토층보다는 깊은 암반 층에 대한 조사에 가장 적당하다. 암반의 층상 분포가 전체 구조물에 중요한 영향을 미치는 댐이나 터널 공사등에서는 매우 적절한 방법이다. 현재 지구물리학자들은 토목공사 현장에 사용될 가볍고 간편한 기구를 꾸준히 개발하고 있다. 이 방법이 신중히 이용되고 시추조사기록과 숙련된 지질학적 해석을 적절히 관련지을 수 있다면 향후 기초공학용으로 더욱 많이 사용될 것으로 기대할 수도 있다.

일반적으로 사용되는 방법을 구분하여 정리하면 다음과 같다.

- ①전기저항조사법
- ②탄성과굴절법
- ③탄성과반사법
- ④자성법
- ⑤시추공 기록장치

7.2 지구물리학적 지반조사의 종류

7.2.1 전기저항조사법(electrical resistivity)

전기저항조사법(electrical resistivity)은 지반 또는 암반의 종류에 따른 전기 저항이나 전도율의 차이를 이용하는 방법이다. 한 쌍의 전극으로 전류를 지반에 통과시키고 전위 전극으로 알려진 한 쌍의 내부 전극사이의 전위낙하를 측정한다. 네 개의 전극이 직렬로 같은 간격으로 설치되어 있으며, 간격을 조절함으로써 전류의 관통깊이를 변화시킬 수 있다. 전극확장기법에서는 전위전극 사이의 거리를 점진적으로 증가시켜 각 간격에서 전위 하강을 측정한다. 여러 지층의 깊이를 추리할 수 있는 도해법 또는 수학적 방법으로 결과를 해석할 수 있다. 지하수위가 토층의 변화로 나타날 수 있기 때문에 전기저항 수치해석에는 주의를 기울여야 하며 지하수위가 높을 때는 혼란이 올 수 있다. 화학물질 등으로 인하여 전기저항이나 전도율에 영향을 받는 경우가 발생하여 측정결과에 오류가 발생하기도 한다.

7.2.2 탄성파탐사법(seismic method)

탄성파탐사법(seismic method)은 흙과 암반의 오류가 발생하기도 한다. 진동 전파속도 특성이 서로 다른 특성을 이용한다. 따라서 폭발물이 지표면이나 시추공에서 터졌을 때 파동은 폭발 지점으로부터 모든 방향으로 진행되어 여러 지층에 의해 굴절되거나 반사된다. 탄성파는 느슨한 지층에서보다 암반이나 압밀도가 높은 흙에서 더 빠른 속도로 진행한다. 그러므로 지진계(seismometer)를 사용하여 지표면의 한 지점에 파동이 도착하는 시간을 측정하여 하부 지반의 성질과 깊이를 유추해 낼 수 있다.

7.2.3 탄성파 굴절법(Seismic refraction method)

탄성파 굴절법(Seismic refraction method)은 100m 이상의 깊이에서 이용되는 전통적인 탄성파 반사법보다 얇은 지층의 조사에 더욱 적절한 방법이다.

7.2.4 탄성파반사법(seismic reflexion technique)

'sharka', 'pulga' 또는 'boomer' 등을 이용하여 연속적으로 탄성파의 종단면을 작성하는 방법은 탄성파반사법(seismic reflexion technique)의 한 종류이며, 수면 위에서 조사할 때만 사용된다. 이 방법의 원리는 소형 증기선에 의해 견인되는 케이블 끝단에 음향 에너지를 간헐적으로 발사하는 것이다. 에너지 파는 해저와 그 아래 여러 종류의 흙과 암석층으로부터 반사되어 돌아온다. 반사파는 에너지원에 평행한 케이블에 달린 수중 청음기에 의해 모아져 연속적이 도표 형식으로 분석되어 해저와 여러 반사된 층의 깊이를 나타내 준다. 이 방법은 경간이 큰 교량기초, 수중터널, 선착장 또는 항만계획에 이용할 수 있다.

7.2.5 자성법(magnetic method)

자성법(magnetic method)은 지구 자기장의 세기의 변화를 측정하는 것에 기초한다. 이 방법은 성공적은 아니지만 얇은 구멍이나 폐기된 광산 수직갱과 같은 지하에 숨겨진 지하공동의 위치를 추적하는데 사용된다. 양자 자력계(proton magnetometer)는 이런 목적을 위한 편리한 기구이다.

7.2.6 시추공 기록장치(borehole logging device)

시추공 기록장치(borehole logging device)는 저항성, 자기전위, 전단 및 압축과 속도 그리고 지반의 밀도 같은 특성을 연속으로 기록하기 위해 시추공 아래로 내려보내는 탐사장치이다. 이 방법으로 이러한 특성을 기록하기 위해 전기저항장치, 음향장치, 그리고 방사능장치를 이용한다. 이 방법으로 측정된 지반특성과 전단저항, 압축성, 입도 분포 같은 토질정수 사이에 관계가 설정된 것이 없기 때문에 이 방법은 아직 기초공학 분야에서 널리 이용되지 않는다. 그러나 재래적인 방법을 사용하여 정보를 구하기 어려운 깊은 수면 아래의 지반조사에 대비하여 개발할 필요가 있다.

8. 맺음말

지금 까지 살펴본 것처럼 현장 토질 시험 결과를 말뚝기초에 사용하는 방법은 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 나눌 수 있다. 표준관입시험 및 CPT는 직접적인 방법에 속하고, PMT, DMT 및 지구물학적 시험방법은 간접적인 방법으로 분류 할 수 있다. 특히, CPT는 일찍이 유럽지역에서 말뚝기초의 설계에 널리 사용되어 시험결과 만을 가지고도 말뚝기초의 지지력을 직접 구할 수 있는 큰 장점을 가지고 있는 현장시험법이다. 향후 많은 전자기술의 발달과 계측기술의 발전으로 CPT를 이용한 새로운 기술이 보급되어 말뚝기초 분야의 발전에 크게 이바지 할 것으로 기대된다. PMT 및 표준관입시험 결과를 이용한 많은 연구도 계속되어 계산과 실측치간의 오차를 줄여 나갈수 있을 것으로 예측된다. DMT는 아직 까지 말뚝기초 분야에서는 활발하게 사용되지 않고 있으나 수평하중을 받는 말뚝의 설계에 이용되어 기존의 방법이나 공식에 비하여 정확한 횡방향력을 간편하게 산출 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 지반공학회(1997), 지반공학시리즈 1. 지반조사의 해석 및 이용, 구미서관
2. 지반공학회(1997), 지반공학시리즈 4. 깊은기초, 구미서관
3. 지반공학회(1999), 현장기술자를 위한 현장지반조사 및 기초설계, 99년 지반조사 위원회 세미나
4. Butamante and Gianceselli (1982), "Pile Bearing Capacity Prediction by means of Static Penetration CPT", Proceedings of 2nd European Symposium on Penetration Testing, Asterdam, pp. 493-500
5. CLARKE. B. G(1995), Pressuremeters in Geotechnical Design, BLACKIE ACADEMIC & PROFESSOINAL, pp.247-255
6. LCPE-SETRA(1985), Regels de justification des foundations sur pieux a partir des resultats des essais pressiome trique, Ministre del Urbanisme du Logement et des Transports, paris
7. Machetti, S. "The Flat Dilatometer Test (DMT) and Its Applications, 현장기술자를 위한 현장지반 조사 및 기초설계, 99년 지반조사 위원회 세미나pp.3-87
8. Meyer. R. J(1984), Analysis and Design of Pile Foundation, procedures of a symposium sponsored by the ASCE Geotechnical Division
9. NHI(1996), Design and Construction of Driven Pile Foundations, Workshop Manual-volume 1, U. S Department of Transportation. Publication No. FHWA-H1-96-033
10. Peck, Hanson and Thornburn (1974), "Foundation Engineering," 2nd Edition, Jhon Wiley & Sons
10. Schemersman (1978), "Guideline for Cone Penetration Test, Performance and Design, FHWA TS-78-209