

## 연약지반(Ⅲ)

이 영 남\*1

김 주 범\*2

### 3. 연약지반의 토질상수 결정

#### 3.1 서론

지반공학에서 다루는 설계문제는 크게 나누면 그림 1과 같이 얇은 기초의 지지력, 사면안정, 말뚝의 침하, 압밀침하 등으로 요약될 수 있다. 설계 계산방법은 한계해석(limit analysis)과 변형해석(deformation analysis)으로 분류할 수 있는데, 한계해석에서 주로 사용하는 강도정수들은  $S_u$  또는  $C', \phi'$ 이고 변형해석에서 사용하는 상수들은  $E_u, \nu_u$  또는  $E', \nu'$ 이다. 압밀문제에서는 체적변화계수( $m$ ), 압축지

수( $C_c$ ), 압밀계수( $C_v$ ) 그리고 선형압밀하중( $\sigma_p$ ) 등이 해석에 중요한 상수로 사용되고 있다.

이러한 상수들은 대체로 실내시험을 통하여 결정하거나 현장 원위치 시험결과 또는 이들의 상관관계를 이용하여 결정하게 된다. 따라서 본 강좌에서는 토질상수를 결정하기 위한 방법중에서 원위치 시험결과를 이용하여 결정하는 부분과 실내시험을 통해 결정하는 부분으로 나누어 다루고자 한다. 그리고 흙의 역학적 성질을 결정하는데 영향을 주는 요소들과 그 영향을 최소화하는 방법에 대해 기술하고자 한다.

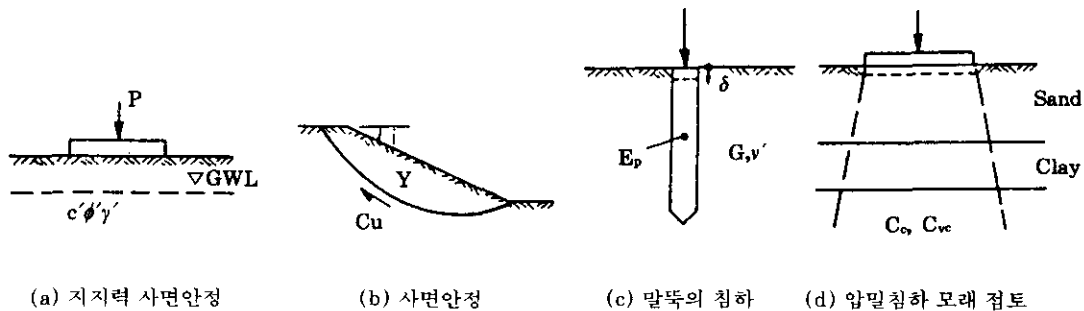


그림 1. 지반공학에서의 대표적인 설계 문제(Wroth and Houlsby, 1985)

\*1 정회원, 현대건설 기술연구소 이사

\*2 정회원, 한국안전기술협회 고문

## 3.2 연약지반의 사운딩

### 3.2.1 일반사항

자연시료를 이용하여 실내에서 행해지는 역학시험으로부터 얻어지는 토질정수는 설계에 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 채취, 운반

및 시험과정에서 시료가 교란되어 그 정수들이 현장조건을 대표할 수 있는지는 많은 연구자들에 의해 의문시 되어왔다(Perloff and Baron, 1976; Sowers, 1979). 이러한 문제를 극복하기 위해 현장에서 직접 시험을 실시하여 정확한

표 1. 원위치 시험의 종류(한국지반공학회, 1986)

구분	조 사 명	얻어지는 값	적용 토질	결과의 이용
사 운 딩	표준관입시험	N치	모든 지반	토층의 굳기, 다져진 정도, 토층 구성물 등을 판정, 지지력 추정
	정적 콘관입시험	정적콘 관입저항	연약한 지반	토층의 굳기, 다져진 정도, 토층 구성물 등을 판정, 지지력추정
	동적 콘관입시험	동적콘 관입저항	모든지반	지반강도 추정, N치의 추정
	스웨덴식 콘관입시험	하중크기, 반회전수	보통 및 단단한 점성토, 사질토	토층의 굳기, 다져진 정도의 추정
	베인시험	원위치 전단강도	특히 연약한 점토	안정해석과 지지력 계산, 예민비의 추정
지 하 수 조 사	현장 투수시험	자연지하수위	실트~사질토층	용출수량, 지하수위 저하량을 구한다. 배수용 우물 설계, 약액주입 효과 판정
	양수시험	저류계수, 투수량계수	사질토~자갈질 흙층	대수층의 투수성, 저류성, 용출수량의 산정, 배수용우물의 설계
재 하 시 험	평판재하시험	지반반력계수, 극한지지력, 지반변형계수	지반~연암	기초 지반의 허용지지력과 침하
	공내횡방향 재하시험	지반변형계수, 지반반력계수	지반~암반	기초의 침하, 횡방향 변형해석, 지지력 추정
	말뚝재하시험	횡방향, 연직 지지력, 스프링상수	모든 지반	말뚝의 연직 설계 지지력 및 스프링상수 결정
현 장 계 측	현장밀도 측정	습윤/건조밀도 함수비	입경 5cm 이하의 지반	흙의 기본적 성질계산, 다져진 강도의 판정
	토압의 측정	전 연직응력, 전 수평응력, 동적토압	모든 지반	토압계수를 구한다. 흙구조물의 응력상태를 안다. 안정성 확인
	간극수압 측정	간극수압	모든 지반	압밀진행의 계산, 전응력과 유효응력과 그 해석, 지하수위 측정
	지반의 변위, 변형 측정	지표, 지중의 연직, 수평변위 활동면의 위치	모든 지반	침하예측, 흩쌓기 및 굴착공사의 관리, 사면붕괴 발생시간의 예측

결과치를 얻기 위해 실시되는 것이 원위치 시험이다. 원위치 시험은 표 1에서와 같이 사운딩, 지하수조사, 재하시험, 현장계측 등이 있다. 본 절에서는 여러가지 원위치 시험중에서 흙의 역학적 상수를 결정할 수 있는 사운딩에 관해서만 기술하고자 한다.

사운딩은 독자적으로 지반의 개황을 간단히 알기 위해 수행하는 연약지반 조사방법으로서는 효과적이었으나, 지금까지는 보링조사를 보조하는 수단으로서 사용되는 예가 많았다. 그러나 최근에 전기식 콘관입시험기의 개발과 더불어 단독으로서 지반상수의 판정기법으로서 사용되는 예도 많아졌다(Norris and Holtz, 1981; Meigh, 1987). 현재 가장 많이 사용되고 있는 사운딩 기법으로는 표준관입시험, 정적 콘관입시험, 베인시험과 공내재하시험(pressuremeter test)이 대표적이라 할 수 있다. 이 밖에 최근에 사용이 증가되는 사운딩방법으로는 Dilatometer Test, Borehole Shear Test, Stepped Blade Test 등이 있다. 본 절에서는 여러가지 사운딩방법중에 상술한 대표적인 시험방법들을 중심으로 시험방법, 시험시 오차의 발생요인, 다른 토질상수와의 관계를 간단히 살펴보고자 한다.

표 3. N치와 토질상수와의 관계

구분	토질상수	추정 및 산정 방법	제 안 자
모래	전단저항각	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 입자가 둥글고 입도분포가 균일한 모래 <math>\phi = \sqrt{12N} + 15</math></li> <li>• 입자가 둥글고 입도분포가 좋은 모래 <math>\phi = \sqrt{12N} + 20</math></li> <li>• 입자가 모나고 입도분포가 균일한 모래 <math>\phi = \sqrt{12N} + 20</math></li> <li>• 입자가 모나고 입도분포가 좋은 모래 <math>\phi = \sqrt{12N} + 25</math></li> </ul>	Dunham (1954)
		$\phi = \sqrt{20N} + 15$	Ohsaki (1959)
지반	상대밀도	$D_r^2(\%) = \frac{C_{ER} \cdot C_B \cdot C_S \cdot C_r \cdot C_N \cdot N}{C_P \cdot C_A \cdot C_{OCR}}$	Kulhawy, Mayne (1991)
		$D_r(\%) = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}}$	Meyerhof (1956)
	지지력	$q_d = \alpha \cdot B \cdot \gamma \cdot N_f + \gamma \cdot D_f \cdot N_f$	Terzaghi (1948)
	Ko	그림 2 참조	Kulhawy, Jackson, Mayne(1989)

### 3.2.2 표준관입시험

표준관입시험은 1948년 Terzaghi와 Peck이 공표한 이후로 현재까지 토질조사 방법중 가장 중요하고 널리 사용되는 사운딩의 한 기법이다. 이 시험은 흙의 강도 혹은 지지력의 산정에 사용될 뿐 아니라, 교란된 시료의 채취가 가능해, 토층을 육안관찰 할 수 있는 것이 특징이다.

#### 1) 시험방법

표준관입시험은 63.5kg의 해머를 76cm 높이에서 자유낙하시켜 샘플러가 30cm 관입하는데 소요되는 타격수를 측정하는 시험이며, 개요를 정리, 요약하면 다음 표 2와 같다.

표 2. 표준관입시험 개요

구분	내용
샘플러	Split Spoon 샘플러
측정값	N치(Blows/30cm관입)
시험회수	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 동일토층시 1.5m간격</li> <li>• 토층변화시</li> </ul>

#### 2) N치와 토질상수와의 관계

표준관입시험은 보링과 동시에 이루어지므로, 토층판별이 가능한 것은 물론 그 결과로부터

터 얻어지는 N 치와 시료를 이용하여 표 3에 보는 바와 같은 여러가지 토질상수를 추정 또는 산정할 수 있다.

일반적으로 N 치와 점토 강도와의 관계는 아래의 경우에 비하여 신뢰도가 낮고, 편차가 크기 때문에, N 치에 의한 점토지반의 강도는 개략적인 값에 불과하다.

### 3) N 치 보정

표준관입시험에서 N 치의 측정시 측정값의 오차에 영향을 미치는 측정방법상의 요소들은 표 4와 같이 요약할 수 있다.

측정방법상의 문제와는 별도로 측정 결과 해석에 있어서의 문제점은 아래와 같다.

- ㉠ 시험기의 형상이 규격으로서 세부까지 규격화 되어있지 않다.

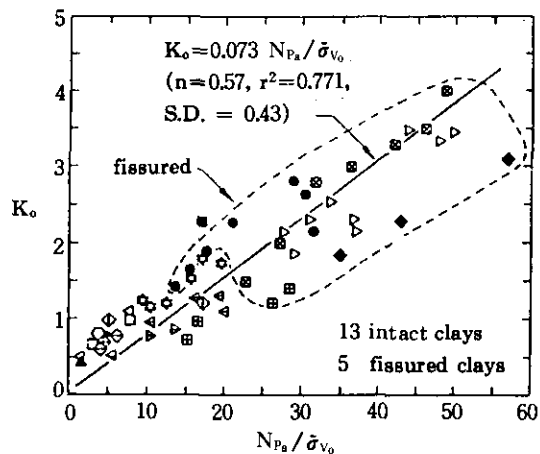


그림 2. N 치와  $K_0$ 와의 관계(Kulhawy, Jackson and Mayne, 1989)

표 4. 표준관입시험 측정시 오차에 영향을 미치는 요소(Kulhawy, 1995)

원 인	영 향	N 치의 변화
햄머의 무게가 부정확	햄머의 에너지가 변화(일반적으로 5~7%)	증가 또는 감소
보링 공내의 적당한 수두유지 실패	보링 공의 하부가 예민해짐	감 소
햄머 타격시 로드엔 편심	햄머 에너지 감소	증 가
보링 공이 깨끗하지 못함	샘플러 타격시 장애 발생	증 가
샘플러를 케이싱 바닥 위에 타격	샘플러가 다짐·교란되며 타격	매우 증가
표준화 되지 못한 샘플러 사용	표준 샘플러와의 상호관계가 무효	증가 또는 감소
굵은 자갈이나 호박돌에서 실시	샘플러가 막히거나 저항 받음	증 가
휘어진 드릴 로드 사용	샘플러에 타격 에너지가 완벽히 전달이 안됨	증 가

표 5. N 치 보정 방법

구 분	보정방법	제 안 자
흙의 상태	$N = 15 + (N' - 15) / 2$ ( $N \geq 15$ 인 경우) $N = N'$ ( $N < 15$ 인 경우) 여기서 N : 수정치, N' : 측정치	Terzaghi - Peck (1948)
Rod 길이	$N = N' (1 - X / 200)$ 여기서 X : Rod 길이 (m)	Yoshinaka (1967)
상 재 압	$N = N' \times C_n$ $C_n = 0.77 \log(20 / P')$ ( $P' > 0.25 \text{ kg/cm}^2$ 일 때 적용) 여기서 $C_n$ : 보정계수 $P'$ : 유효상재압 ( $\text{kg/cm}^2$ )	Peck, Hanson, Thornburn (1974)

㉔ Hammer 의 낙하방법

㉕ 시험자의 개인편차

㉖ 지반의 상태에 따른 N 치의 변화

㉗ Rod 길이에 따른 영향과 그 보정방법

㉘ 상재압의 크기에 의한 영향과 그 보정방법

따라서 현장에서 계측된 N 치는 적절히 보정하여 설계용 N 치로 사용하게 되는데, 이들의 보정에 관한 방법을 요약하면 표 5와 같다.

3.2.3 정적 콘관입시험

정적 콘관입시험(static cone penetration test, SCPT)은 비교적 연약한 토질에서 이용되는 원위치 시험방법으로 1930년대에 개발되어 현재까지 사용되고 있다. 이 시험은 로드와 원추콘을 설치하여 일정한 관입속도(보통 2cm/sec)로 연속압입할 때의 관입저항을 측정하여 개략적인 토층성상을 파악하고, 원위치의 전단강도를 측정하기 위해 실시된다. 이 시험은 긴 연장의 노선조사나 건설부지를 조사할 때 표준관입시험(보링 포함)을 먼저 시행한 후, 보완조사나 정밀조사에 이용되는 경우가 많고, 구체적으로 토층의 굳기, 흩쌓기의 다짐 정도와 토층의 배열, 지반개량 효과와 압밀에 의한 강도증가의 판정에도 이용된다. 정적 콘

표 6. 더치콘 관입시험 개요

구분	내용
장비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 콘: 선단각 60°, 저면적 10cm<sup>2</sup>(직경 35.7mm)의 이중관 구조</li> <li>• 10~20ton 용량의 유압 관입기</li> </ul>
측정값	선단 지지력( $q_c$ ), 마찰 저항력( $f_s$ ), 마찰비율( $FR=f_s/q_c$ )
시험회수	적당한 깊이별 측정(약 5cm, 10cm)

관입시험은 크게 기계식으로 네덜란드식 이중관 관입시험(더치콘시험)과 전기식 피조콘시험으로 나누며, 지반의 원추관입저항력과 마찰저항력을 측정하고, 특히 피조콘시험으로는 간극수압의 측정도 가능하다.

1) 네덜란드식 이중관 관입시험

이 관입시험은 더치콘시험이라는 약칭으로 불리우는 대표적인 정적 사운딩방법이며, 이 시험에서는 콘을 2cm/sec의 속도로 지반에 관입하면서 선단지지력과 마찰저항력을 일정한 간격으로 측정하는데, 그 시험개요는 표 6과 같다.

선단지지력( $q_c$ )은 총 원추관입 저항력( $Q_c$ )을 콘의 저면적( $A_c$ )으로 나눈으로써 얻어지며, 마찰저항력( $f_s$ )은 총 마찰력( $Q_s$ )을 콘의 슬리브

표 7. 정적 콘관입시험 측정시 오차에 영향을 미치는 요소(Kulhawy, 1995)

원인	영향	결과에 대한 오차
굵은 자갈지반에서 사용	콘관입시 장애 유발(콘이 파손될 수 있음)	$q_c$ 가 상당히 증가
관입 팁 불량	팁이 규격 이상이나 이하로 무디거나 표면이 거칠다.	$q_c, f_s$ 가 현저히 증가 또는 감소
마찰슬리브 끝이 흙으로 막힘(기계식 콘에 해당)	$f_s$ 의 영향으로 선단지지력에 오차발생	$f_s$ 가 80%정도 증가
내부 로드가 녹슬거나 막힘(기계식 콘에 해당)	외부 로드와의 마찰력 증대	$q_c, f_s$ 가 증가
단단한 지반에서 사용(기계식 콘에 해당)	내부로드에 탄성 압축이 발생하여 실제관입이 이루어지지 않음	$q_c, f_s$ 를 측정 불능
방수막의 누수(전기식 콘에 해당)	전자측정기가 부식됨	$q_c, f_s$ 가 증가 또는 감소
전자 장비 보정 불량(전기식 콘에 해당)	부정확한 측정	$q_c, f_s$ 가 증가 또는 감소

면적( $A_c$ )으로 나눔으로서 산정되는데, ASTM에서는  $A_c$ 는  $10\text{cm}^2$ ,  $A_c$ 는  $150\text{cm}^2$ 으로 규정하고 있다.

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad ; \quad f_s = \frac{Q_s}{A_s} \quad (1)$$

정적 콘관입시험은 주변마찰을 분리하고 순수한 콘관입저항이 구해지므로 정밀도가 높은 결과를 얻을 수 있으나, 여러 원인에 의해 오차가 발생할 수 있는데, 이를 요약하면 표 7과 같다.

표 8. 콘지력과 토질상수와와의 관계

구분	토질상수	추정 및 산정 방법	제안자
공통	$K_0$	그림 3 참조	Kulhawy, Jackson, Mayne(1989)
	상대밀도	$D_r^2 = \frac{C_u \cdot (q_c / P_a)}{305 \cdot C_A \cdot Q_c \cdot Q_{OCR}}$ (그림 4 참조)	Jamiolkowski (1988)
점토지반	전단강도	$q_c = Su N_k + \sigma_{vo}$ (정규압밀점토) $q_c = Cu N_k + \sigma_{vo}$ (과압밀점토)	Schmertmann(1978)
	콘저항계수	$N_k = 15 \pm 4$	Lunne - Kleven(1981)
		$N_k = 17$	Kiekstand(1978)
		$N_k = 4 \sim 30$	Robertson(1988)
모래지반	전단강도	$q_c = 0.4N$ (그림 5 참조)	Burland - Burbridge (1985)
	전단저항각	그림 6 참조	Durgunolu - Mitchell (1975)

다.

더치콘 관입시험은 점성토나 실트질 지반은 물론 사질토 지반에서도 아주 유용하게 사용되며, 그 시험 결과도 다른 방법에 비해 신뢰성이 높다고 평가되고 있기 때문에 근래에 들어 전세계적으로 사용이 확산되고 있는 추세이다. 이 시험의 결과에서 얻어질 수 있는 토질상수는 다음 표 8과 같다.

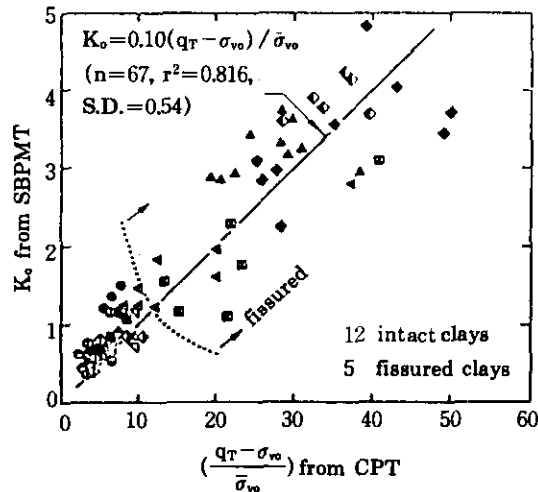
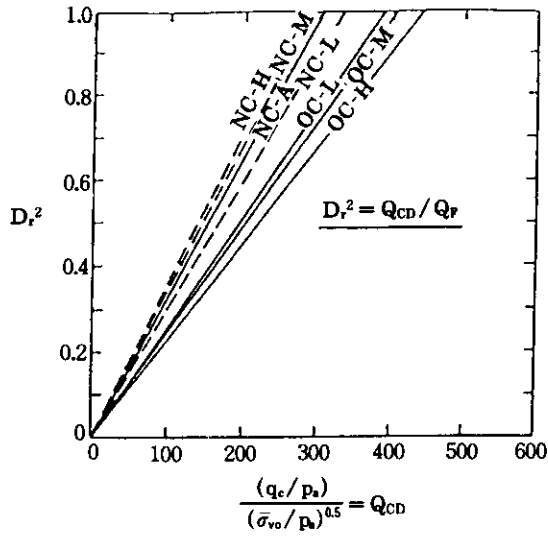
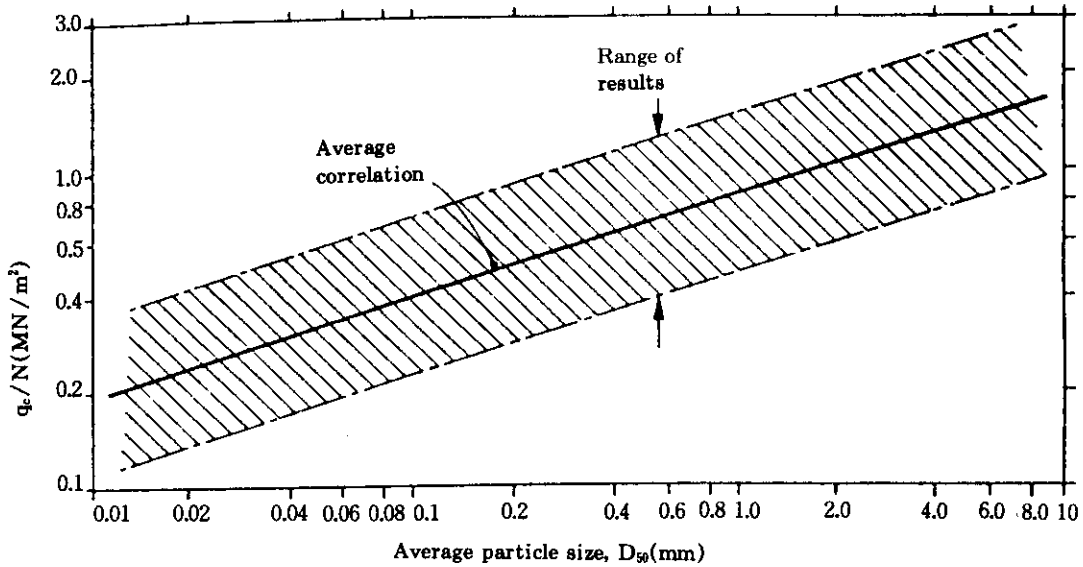


그림 3. 더치콘 관입시험에서의  $K_0$  산정 (Kulhawy, Jackson and Mayne, 1989)



Case	Q <sub>F</sub>	n	r <sup>2</sup>	S.D.
NC-high comp.	280	59	0.796	0.14
NC-med. comp.	292	145	0.885	0.10
NC-low. comp.	332	190	0.711	0.14
NC-average	305	404	0.776	0.13
Low OCR(<3)	390	34	0.711	0.14
Med. OCR(3-8)	403	56	0.849	0.10
High OCR(>8)	443	50	0.859	0.12

그림 4. 더치콘 관입시험에서의 상대밀도 산정 (Jamolkowski, 1988)



Medium	Coarse	Fine	Medium	Coarse	Fine	Medium
SILT		SAND			GRAVEL	

그림 5. 콘관입시험과 표준관입시험과의 관계 (Burand-Buridge, 1985)

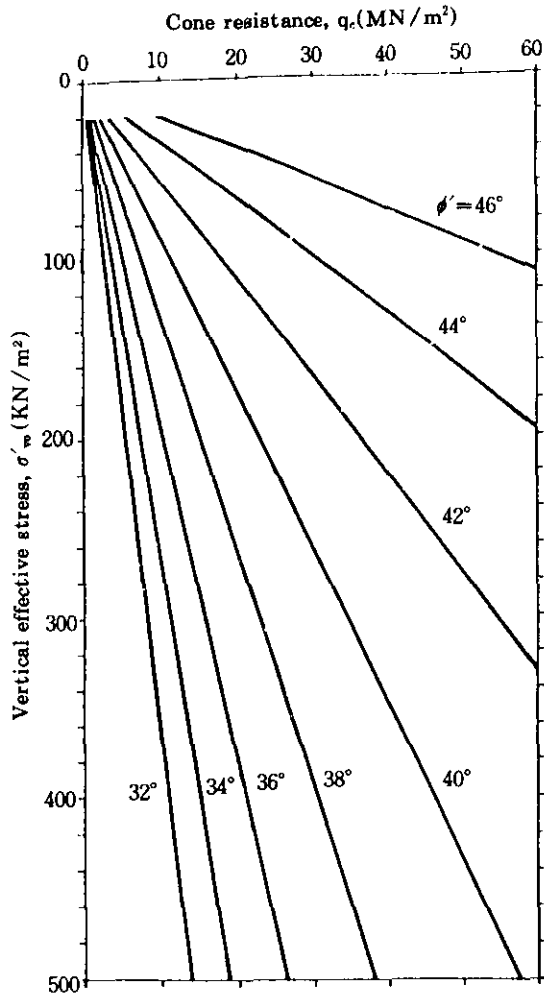


그림 6. 콘관입시험에 의한 모래지반에서의 마찰저항과 산정 (Durgunolu-Mitchell, 1975)

## 2) 피조콘 관입시험

피조콘 관입시험은 더치콘 관입시험과 마찬가지로 전자측정기가 부착된 피조콘을 지반에 2cm/sec의 속도로 관입시키면서 선단지지력( $q_c$ ), 마찰저항력( $f_s$ ) 및 콘의 관입으로 발생하는 과잉 간극수압( $\Delta u$ )을 지반 침도에 따라 연속적으로 측정하는 것이다. 피조콘 시험개요는 표 9와 같다.

측정시 과잉간극수압은 원추관입 저항력과 마찰저항력에 영향을 미치게 되는데, 이를 고

표 9. 피조콘 관입시험 개요

구분	내용
장비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 선단각 60°, 저면적 10cm<sup>2</sup>(직경 35.7mm)의 스트레인 게이지형 로드셀과 다공질 필터가 부착된 전자식 피조콘 (그림 7 참조)</li> <li>• 피조콘과 연결된 Read-out기기</li> <li>• 10~20ton 용량의 유압 관입기</li> </ul>
측정값	선단지지력( $q_c$ ), 마찰 저항력( $f_s$ ), 마찰비율( $FR=f_s/q_c$ ), 간극수압( $\Delta u$ )
시험회수	적당한 깊이별 측정(1cm, 2cm, 5cm)

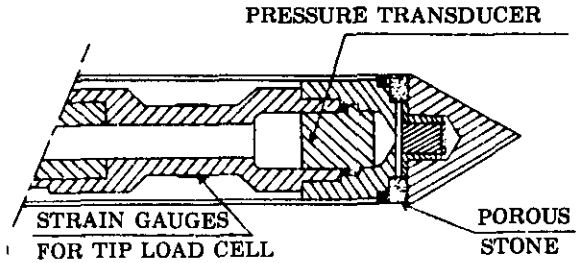


그림 7. 피조콘의 구조

려한 순 콘저항력( $q_T$ )과 순 마찰저항력( $f_T$ )은 다음의 식(2), 식(3)과 같다.

$$q_T = q_c + (1-a)u \quad (2)$$

$$f_T = f_s - \frac{U_{bt} A_s}{A_c} \quad (3)$$

여기서,  $u$ 는 콘 팁 배면에서 발생하는 간극수압,  $U_{bt}$ 는 마찰슬리브에 작용하는 간극수압이고,  $a$ 는 콘순면적비를 나타내며 식(4)와 같다.

$$a = \frac{d^2}{D^2} \quad (4)$$

여기서,  $d$ 는 로드셀 하부의 직경이고,  $D$ 는 콘의 직경이다.

피조콘시험 결과를 분석하여 비배수강도, 투수계수, 선행압밀하중 등을 결정할 수 있으며, 간



극수압의 소산시험을 하면 압밀계수도 추정할 수 있다. 피조콘 시험결과와 여러 토질정수와와의 관계는 더치콘 결과를 적용할 수 있기 때문에 표 8을 참조하면 될 것이다. 피조콘 시험결과를 이용하면 지층의 구분이 가능한데, 그림 8에 그 대표적인 예를 소개하였다. 이 그림에

서와 같이 과잉간극수압이 크게 발생하고 콘저항력이 상당히 작게 나타나면 일반적으로 점토나 실트질의 연약층으로, 과잉간극수압이 작게 발생하고 콘저항력이 크게 나타나면 모래나 자갈층으로 평가된다.

최근에는 피조콘 장비에 부착하여 사용하는

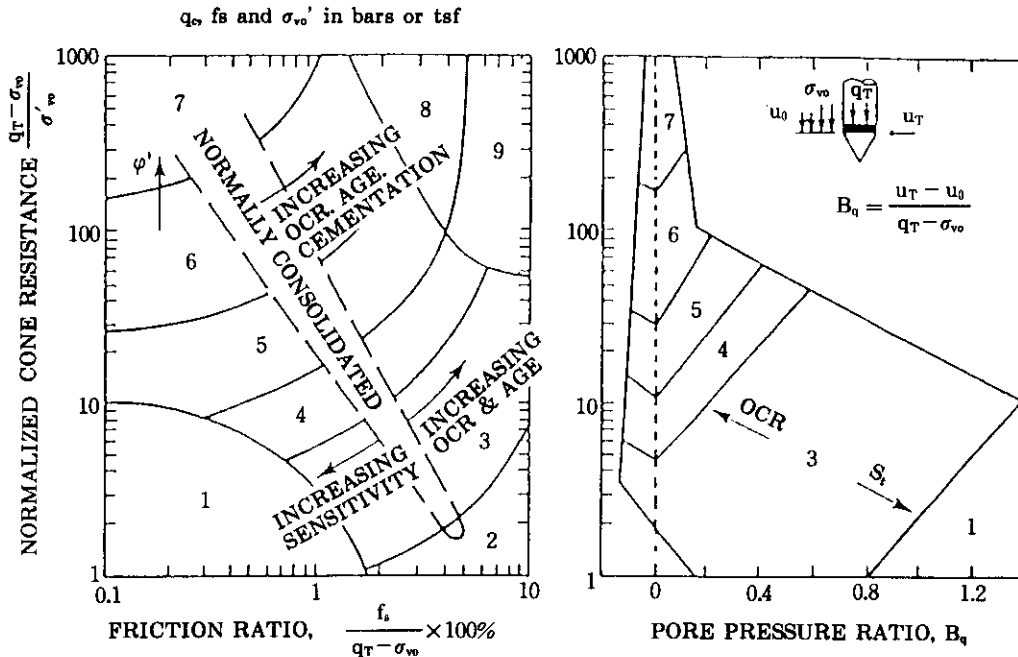


그림 8. 피조콘 결과를 이용한 흙의 분류 (Robertson, 1990)

Cone Pressuremeter 가 개발되어 사용되기 시작했다 (Withers et al., 1986; Houliaby and Nutt, 1992; Kolk, 1992). 이 장비는 사전 보

링 없이 피조콘과 같이 지중에 관입하여 간단히 Pressuremeter 시험을 시행할 수 있어, 앞으로 널리 사용될 전망이다.

### 3.2.4 베인시험

베인시험은 연약한 점토층을 대상으로 하는 사운드링 방법으로서, 베인을 지중에 관입시켜 회전로드를 이용해 일정한 속도의 회전력을 주고, 이 때의 회전모멘트를 측정하여 전단강도를 구하는 시험이며, 스웨덴에서 개발되어 세계적으로 널리 사용되고 있다. 시험에 대한 개요는 표 10과 같다.

표 10. 베인시험 개요

구분	내용
장비	• 베인(그림 9 참조) • 회전로드 및 관입기
측정값	전단모멘트(전단강도)
시험회수	원하는 깊이에서 실시

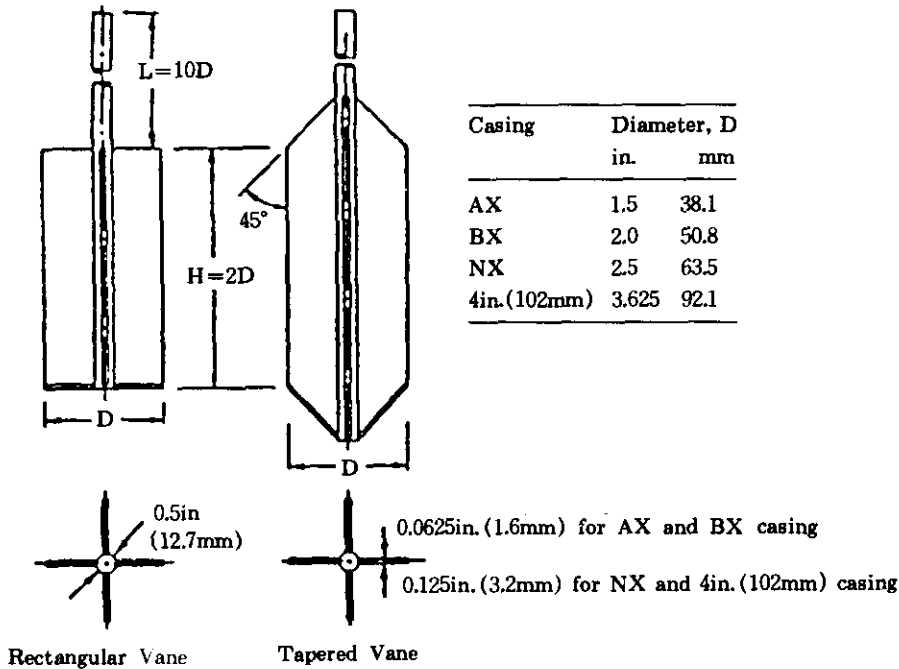


그림 9. 베인시험기

점토의 전단강도는 원위치에서 교란되지 않은 시료를 채취하여 실내시험으로 구할 수 있으나, 시료의 교란으로 인해 현장 지반강도의 정확한 값을 구하기 어렵다. 베인시험은 이러한 문제를 해결하기 위하여 고안되었으며, 현장에서 간단하고 빠르게 점성토의 전단강도를 구할 수 있다.

측정한 회전모멘트  $M_{max}$ 를 알면, 전단강도는 다음 식에서 산정된다.

$$\tau = \frac{M_{max}}{\frac{\pi}{2} D^2 (H + \frac{D}{3})} \quad (5)$$

여기서,  $\tau$ : 전단강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

$M_{max}$ : 최대회전모멘트(kgf·cm)

D: 베인의 직경(cm)

H: 베인의 높이(cm)

베인시험 측정시 여러 원인에 의해 발생할 수 있는 오차를 요약하면 아래 표 11과 같다.

표 11. 베인시험 측정시 오차에 영향을 미치는 요소(Kulhawy, 1995)

원 인	영 향	전단강도
회전 로드와 흙과의 마찰	마찰저항력을 포함한 회전모멘트 측정	증 가
장비 보정 불량	부정확한 전단력 측정	증가 또는 감소
베인을 너무 빠르게 회전	흙이 너무 빠르게 전단됨	증 가
교란된 지반에서 사용됨	흙의 구성이 파괴됨	감 소
손상된 베인 사용	흙을 과하게 교란시킴	감 소
부분적인 장애물 존재(자갈/시멘트)	장애물의 저항력까지 측정됨	증 가

베인시험은 원위치에서 실시되는 일종의 비압밀비배수(UU)의 급속전단 시험으로서, 얻어진 결과는 다른 역학시험 결과와 같이 안정해석, 지지력의 계산에 사용된다. 그러나 이 시험으로 얻어진 강도값은 보수적인 값으로 평가되며, 이 값은 보정해서 사용하는 것이 적절하다. Bjerrum(1972)은 점토지반상에 축조한 16개의 제방 붕괴 사례를 재해석한 결과에 근거하여 소성지수 값에 따라 현장 베인시험 결과를 그림 10같이 보정하여야 한다고 하였다. Messri(1975)는 Bjerrum의 연구결과를 재분석하여 선형압밀하중  $\sigma'_p$  과 비배수강도비( $\mu S_{uv}/\sigma'_p$ ) 사이에는 일정한 관계가 존재한다고 하였다.

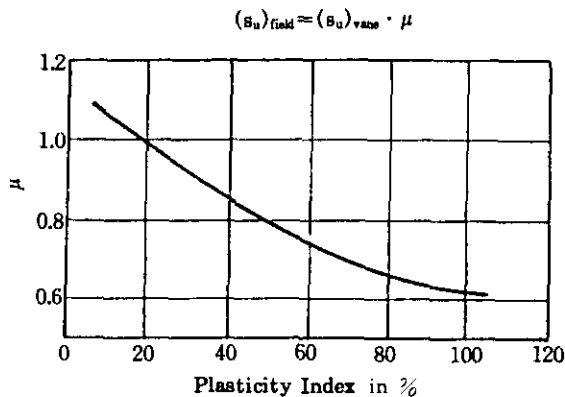


그림 10. 현장 베인시험결과의 보정계수(Bjerrum, 1972)

### 3.2.5 공내재하시험(Pressuremeter Test)

공내재하시험은 시추공의 공벽면을 가압하고 그때의 공벽면 변형량을 측정함으로써 지반성질(강도·변형 특성)을 조사하는 시험으로, 1933년 Kögler가 처음으로 공벽재하장치를 고안하고, 1954년 Menard가 공내재하시험을 도입한 후 1957년에 처음으로 사용하였다. 그 뒤로 1973년에 Baguelin이 자가보링식 공내재하시험(Self-Boring Pressuremeter Test)장치를 개발하여 실용화되고 있는데, 그 시험개요는 표 12에 정리되어 있다.

표 12. Pressuremeter 시험 개요

구 분	내 용
장 비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menard형이나 자가보링형 Pressuremeter (그림 11 참조)</li> <li>• Read-out장비</li> </ul>
측 정 값	횡방향변형계수, 마찰각, 탄성계수, 현장수평응력, 전단강도 등
시험회수	원하는 깊이에서 실시

공내재하시험을 통하여 얻어낼 수 있는 대표적인 지반의 공학적 특성 및 그 산출방법은 아래 표 13과 같다. 그러나, 이 시험으로 얻어지는 정수들은 수평방향에 대한 값들이고 공학적으로 이용하는 대부분의 토질상수들은 수직방향에 대한 값이기 때문에 이방성에 대한 어려움이 있다.

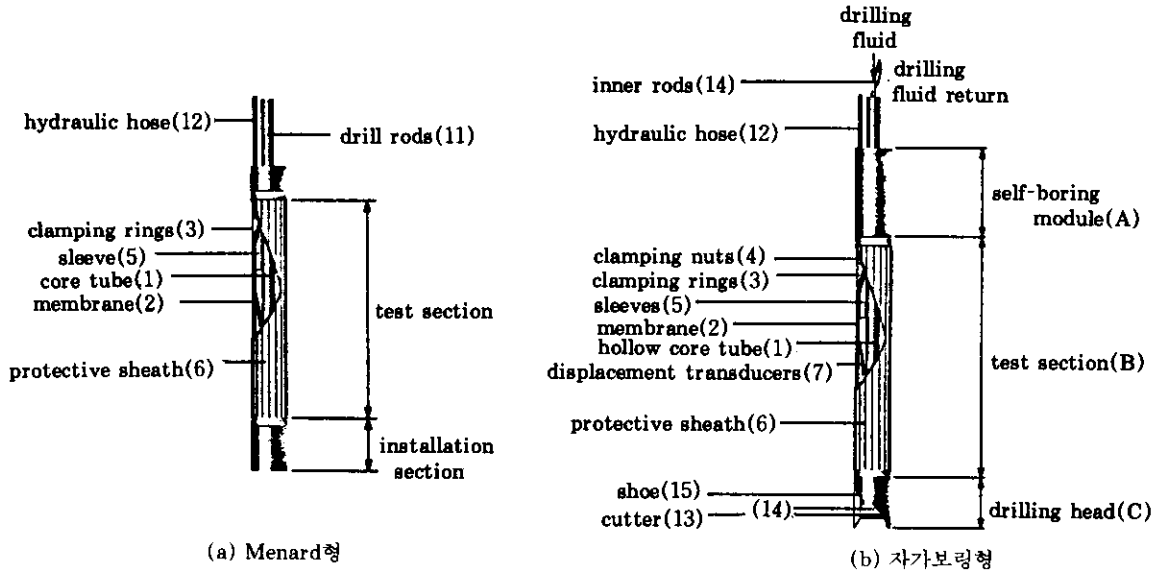


그림 11. Pressuremeter 구조

표 13. 공내재하시험에서 얻어지는 토질상수 산정방법

토질상수	산정방법	제안자
횡방향 변형계수	$E_m = 2(1+\nu)[(V_0 + 0.5(V_B - V_A))] \left( \frac{p_B - p_A}{V_B - V_A} \right)$	Menard(1965)
극한압력	$p_{LM}$ = 공동 초기 체적의 두배에 해당할 때의 압력	Menard(1965)
현장 수평응력	$\sigma_h = p - \frac{dp}{d(\ln \Delta V / V)}$	Hawkins(1990)
비배수 전단강도	$p_L - \sigma_h = s_u [1 + \ln(G / s_u)]$	Cassan(1972)
내부 마찰각	$\sin \phi' = \frac{s}{1 + (s-1) \sin \phi_{cv}'}$	Hughes(1977)
전단 탄성계수	$G = V \frac{dp}{dV}$	Menard(1965)
탄성계수	$E = E_c / \alpha$	Menard(1965)

### 3.2.6 기타 사운드링 방법

기술한 대표적인 사운드링방법외에도 최근에 개발되었거나 실용화되고 있는 사운드링방법은

로는 Dilatometer Test, Borehole Shear Test, Stepped Blade Test 등이 있으며, 그 특징은 아래 표 14와 같다.

표 14. 최근에 실용화 되고 있는 사운드링 방법

종 류	시 험 방 법	측정값	특 징	제 안 자
Dilatometer Test	Membrane에 압력을 가하면서 변위를 측정	$K_0, OCR$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사용 가능한 지반의 영역이 넓다.</li> <li>• 시험비가 싸다.</li> <li>• 시험방법이 빠르고 간단.</li> </ul>	Marchetti (1975, 1980)
Borehole Shear Test	그림 12의 장비를 이용하여 uplift시의 마찰력을 측정	$C, \phi$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사용이 비교적 간단하다.</li> <li>• 대중적이지 못하다.</li> <li>• 시험장비가 다소 복잡함.</li> </ul>	Wineland (1975)
Stepped Blade Test	여러개의 Blade를 지중에 삽입 시키며 횡압을 측정	$\sigma_h$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사용이 비교적 간단.</li> <li>• 장비가 비싸다.</li> <li>• 연약지반에서만 가능.</li> </ul>	Handy et al. (1982)

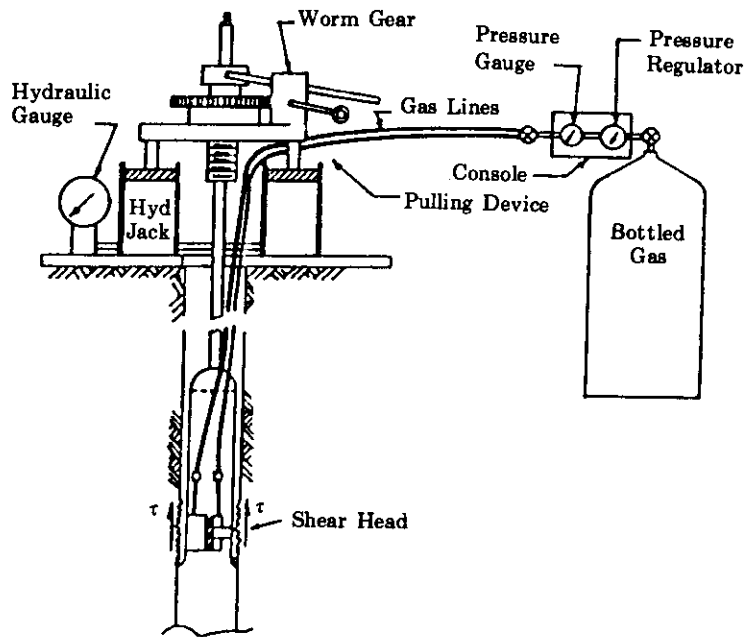


그림 12. Borehole Shear 시험기(F.H.A. 1993)

### 3.2.7 대표적인 사운드링 방법들의 특징

전술한 4가지 대표적인 사운드링 방법들에 대한 상대적인 장단점을 비교해 보면 표 15와 같다. 이 표에서 보는 바와 같이 표준관입시험과 콘관입시험은 대부분의 토질에 광범위하게 적용되고 있지만 표준관입시험은 모래지반에서 그 효용이 뛰어난 index test 이고, 콘관입시

험은 표준관입시험과 비교할 때 연속적인 지반 상태를 기록할 수 있고, 흠분류가 가능하다는 장점이 있다. 반면에 배인시험은 연약점토지반의 강도측정에 주로 많이 쓰이고 있으며, 공내재하시험은 상기의 3가지 조사방법에 비해 그 시험방법이 복잡하여 사용성이 제한되고 있지만,  $K_0$ 와  $E$ 값을 구하는데 유리한 방법이다.

표 15. 사운딩의 종류별 특징(Kulhawy, 1995)

사운딩 종류	장 비	난이도	해석방법	적용가능지반	적용성
표준관입시험	단순하고 다루기 쉬움	간 단	경 험	모든지반	대중적
콘관입시험	복잡하나 다루기 쉬움	간 단	경험, 이론	모든지반	대중적
베인시험	간단하고 다루기 쉬움	간 단	이 론	연약점토	대중적
공내재하시험	복잡하고 다루기 어려움	복 잡	경험, 이론	모든지반	제한적

### 3.3 지반조사 및 샘플링

#### 3.3.1 샘플링

점성토를 주요 대상으로 하는 샘플러와 그 적용성에 대하여 표 16에 정리했는데, 그 각각의 방법은 지반조건, 채취목적에 따라 구분하여 사용해야 한다. 정도가 높은 시험에 적합한 양질의 시료를 얻기 위해서는 샘플러의 선정 및 샘플링방법에 대하여 충분한 사전준비가 필요하다. 점토의 불교란 시료채취용 샘플러는 많으나 특수한 목적으로 적용하는 것을 제외하면 고정 피스톤식 Thin Wall 샘플러가 일반적으로 많이 사용되어 왔다(Andresen, 1981). 연약지반에서의 샘플링은 튜브 샘플의 크기가 클수록 시료의 질은 좋아지지만 직경이 큰 튜브 샘플러라도 실질적으로는 불력 샘플러보다는 점토의 구조에 많은 손상을 미친다. 불력 샘플링방법은 현재까지의 샘플링 방법중에서 가장 교란이 적은 시료를 채취할 수 있는 방법인데, 한 위치에서 실내시험량이 많을 경우 가장 적합한 방법으로 트렌치 굴착을 하거나 보링공을 이용하여 샘플링을 하게 된다. 트렌치 굴착을 하는 경우에는 샘플링 깊이가 제한을 받으나 보링공을 이용하는 경우에는 물이나 벤토나이트로 채운 상태에서 샘플링하기 때문에 깊이의 제한과 응력이완 현상을 극복할 수 있다(Lefebvre and Povlin, 1979).

#### 3.3.2 시료의 질

시료의 상태 또는 질을 평가하는 방법으로는 주로 세가지 방법이 사용되고 있다(Jamiolkowski et al., 1985). 방사성 사진을 이용하는 방법, 시료내의 유효응력을 측정하는 방법,

일차원 압밀시험의 압축곡선을 평가하는 방법으로 구분된다. 방사성 방법은 의료계통에서 사용하는 X-ray 장비로 튜브 시료사진을 찍어, 시료내의 공극, 균열, 이물질 혼입, 균일성, 층리등의 존재를 파악한다. 시료내의 유효응력을 측정하는 방법은 시료가 응력제하로 인해서만 교란된 "완전 샘플링"이 되었다는 가정하에 채취시의 시료내의 등방유효응력(식 6의  $\sigma_{ps}'$ )으로부터 감소된 시료내의 현재 유효응력을 측정함으로써 시료의 질을 평가하는 방법이다.

$$\sigma_{ps}' = \sigma_{vo}' [K_0 + A_v(1 - K_0)] \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_{vo}'$  = 초기 수직 유효응력

$K_0$  = 정지토압계수

$$A_v = (\Delta u - \Delta \sigma_v) / (\Delta \sigma_v - \Delta \sigma_h)$$

참고로 시료내의 초기 평균 유효응력에 영향을 미치는 요소를 정리한 것이 그림 13에 나타나 있다.

일차원 압밀시험을 이용하는 방법은 시료의 교란 정도가 압밀시험의 압축곡선에 영향을 준다는 점에 착안하여 압밀시험 결과를 평가하는 방법이다. 시료가 교란되었다면 압축곡선상에서 다음과 같은 사항을 관찰할 수 있을 것이다.

(㉠) 주어진 압밀응력하에서 공극비가 감소한다.

(㉡) 최소 곡률반경점을 찾기가 어렵고  $\sigma_p'$ (선행압밀하중) 값이 명확하지 않거나 낮은 값으로 나타난다.

(㉢) 재 압축구간에서 압축성이 증가한다.

압밀시험 결과에서 상기와 같은 사항을 관찰하므로써 채취한 시료의 질을 평가할 수 있게

표 16. 점성토에 사용되는 샘플러(藤田圭一, 1993)

샘플러의 종류	피스톤의 상태	특징	주요대상토질	샘플의 질								
				보급도	지층 구성 구분	콘시스턴시, 비중, 입도분포	자연함수비	밀도	전단 특성	변형 특성	간극수 화학특성	
오거 보링	-	예비적인 조사에 사용되는 일이 많다. 얇은 위치의 흩어진 시료의 채취를 실시할 수 있다.	자갈질토, 고결도를 제외한 층, 지하수면하의 사층에서는 곤란	○	○	○	○					△
코어 보링	-	연질토에서는 터파기 등에 의해 코어를 채취한다. 이때 주변부는 열처리 함수비가 변화하기 쉽다. 경질토에서는 불교란 시료의 채취도 가능하다.	거의 모든 지하층에 이용 고결토(터파기) 미고결토(터파기)	△	○	○	△					△
오픈드라이브 샘플러	표준관입 시험	없음	타격에 의해 샘플링을 실시한다. 흙의 진밀도 판정과 같이 흩어진 시료의 채취에 널리 사용되고 있다.	거의 모든 흙, 고결토에 적용	◎	◎	◎	◎				○
신월 튜브 사용	신월 튜브	없음	조작은 간단하지만 시료의 압축, 탈락을 일으키기 쉽다.	주로 N값 3~4이하의 부드러운 점성토(일부 사용에 있어서도 이용 가능한 경우가 있다)		◎	◎	◎	△	△	△	
	고정피스톤식 신월 샘플러	고정	가장보급도가 높은 신뢰성이 있는 샘플러로 불교란 시료채취에 쓰인다.		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	추절 샘플러	고정	기구·성능은 상기와 같다. 샘플러 인양시, 시료하단에 생기는 잔공제거를 도모한다.		△	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	수압식 샘플러	고정	피스톤로드는 샘플러 헤드에 고정된다.			◎	◎	◎	◎	○	○	◎
	프리피스톤식 샘플러	자유	피스톤이 샘플링튜브에 따라서 이동할 때가 있다. 조작은 간단하지만 다소 흩어지기 쉽고 고도의 시험에는 부적당.			◎	◎	◎	○	△	△	◎
이중관입	폼포지트 샘플러	고정	단면적비가 크고 관입시 큰힘을 요한다. 부드러운 점토를 대상으로 한 샘플링으로서는 보급도가 낮다.		◎	◎	◎	◎	○	○	◎	
	데니스계 샘플러(신월 튜브 사용)	없음	일종의 오픈드라이버 샘플러로 N값 4~20 정도의 다소 경질한 점성토의 샘플링에 많이 이용되고 있다.	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	
포일 샘플러	고정	연속된 샘플링이 채용되므로 샌드 시트의 유무등 세밀한 지하층의 확인에 적합하다. 단면적비가 넓고 도중에 간단한 사질토층을 사이에 두는 경우 압입이 어려움.	부드러운 점성토	○	◎	◎	○	○	○	○	○	
블러 샘플러	-	지표·세로말뚝 등에서 질취 흩덩어리로서 시료를 채취한다. 함수비의 변화, 시료의 팽윤에는 주의를 요한다.	거의 모든 흙에 적용	○	○	◎		○	○	○	○	

주 ◎ 대단히 보급도가 높고 극히 일반적으로 사용되고 있다. ○ 비교적 보급도가 높은 것. △ 보급도가 낮은 것.  
 ◎ 거의 원지반의 상태를 유지한다고 보아도 되는 것. ○ 주의깊은 샘플링이 행해진 경우 거의 원지반의 상태를 유지한다고 보아도 되는 것. △ 교란에 영향을 받기 쉬운 것

된다. 시료의 압축정도에 근거해서 시료의 질을 판단하는 또 하나의 방법이 1986년에 Berre에 의해 제안되었는데, 시료를 현장의 응력상태로 비등방압밀 시키면서 체적변화율( $\epsilon_v$ )을 측정한 후 표 17에 주어진 기준에 따라 시료의 질을 평가하게 된다(Lacasse and Berre, 1988).

표 17. 체적변화율과 시료의 질과의 관계 (Lacasse and Berre, 1988).

$\epsilon_v(\%)$	시료의 질
<1	very good to excellent
1-2	good
2-4	fair
4-8	poor
>8	very poor

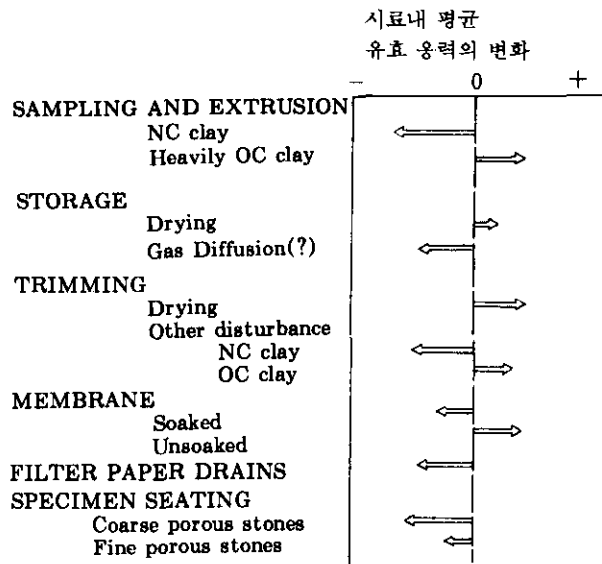


그림 13. 점성토에서 초기평균유효응력에 영향을 미치는 요소(Baldi et al., 1988)

### 3.4 실내 토질 시험

#### 3.4.1 서론

실내토질시험은 물리시험과 역학시험으로 나눌 수 있는데, 이 중에서 삼축시험과 압밀시험에 대한 중요한 사항을 요약하면 표 18과 같다. 본 절에서는 흙의 역학시험 중 강도시험과 압밀시험에 대해서만 언급하고자 한다.

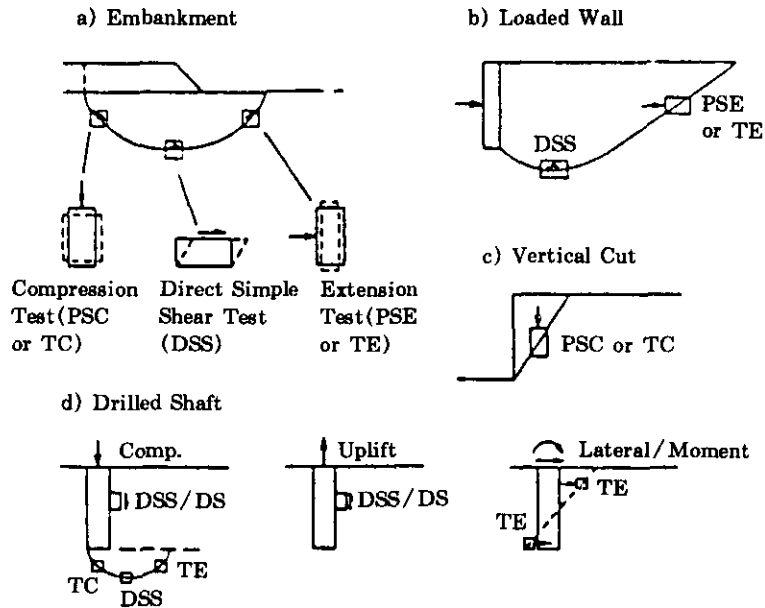
#### 3.4.2 강도 시험

일반적으로 현장에서 만나게되는 지반내의 응력상태는 상당히 다양하고 복잡하지만 Kulhawy(1993)가 시도한 것처럼 몇개의 대표적인 경우(그림 14 참조)로 분류할 수 있다. 그러나, 본 절에서는 여러가지 전단 시험 방법중에서 보편적으로 많이 사용되는 시험방법들인 직접전단, 단순전단, 삼축전단 시험방법에 관해 좀더 자세히 살펴보려 한다.



표 18. 주요 역학시험방법

시험 방법	얻어지는 주요 토질 상수	시험 결과의 이용
직접전단시험	내부마찰각( $\phi$ ), 점착력(C)	지지력 · 사면안정 · 토압등의 검토
단순전단시험	내부마찰각( $\phi'$ ), 점착력(C')	지지력 · 사면안정 · 토압등의 검토
비압밀비배수(UU) 3축압축시험방법	압축강도 1축방향응력관계 내부마찰각( $\phi_u$ ), 점착력( $C_u$ )	지지력 · 사면안정 · 토압등의 검토
압밀비배수(CU) 3축압축시험방법	압축강도 1축방향응력관계 내부마찰각( $\phi'$ ), 점착력(C')	강도증가율( $C_u/P$ )의 설정, 다단계성토 등의 검토, 유효응력해석
압밀배수(CD) 3축압축시험방법	압축강도 1축방향응력관계 내부마찰각( $\phi_d$ ), 점착력( $C_d$ )	점성토의 장기 안정의 검토
압밀시험	e-log P 곡선, 선행압밀하중( $P_c$ ), 압축지수( $C_c$ ), 체적압축계수( $m_v$ ), 압밀계수( $C_v$ )	압밀침하량의 계산 침하속도의 계산



Note : Plane strain tests (PSC / PSE) used for long features  
 Triaxial tests (TC / TE) used for near symmetrical features  
 Direct shear (DS) normally substituted for DSS to evaluate  $\phi$

그림 14. 실내강도시험과 현장조건과의 관계 (kulhawy, 1993)

(1) 직접 전단시험

수평방향으로 2조각으로 갈라진 전단상자에 시료를 넣고 연직하중을 가한 다음 흙이 갈라진 수평면을 따라 전단되도록 하단의 상자에 수평력을 작용시킨다. 하나의 연직하중하에서 전단

하였을 때의 수평력을 흙의 단면적으로 나누어 최대전단응력을 계산하고 같은 방법으로 연직하중을 바꾸어 시험을 3, 4회 계속한다. 그 결과를 3, 4개의 수직응력과 그에 상응하는 최대전단응력의 향들로 Plot 하여 연결하면 Mohr

의 파괴 포락선을 얻고 경사각과 절편을 측정하여  $\phi$ 와  $c$ 값을 결정한다. 시험방법이 간단한 이 점은 있으나 다음과 같은 제약점들이 있다 (Head, 1986).

- ㉠ 미리 결정된 파괴면을 따라 파괴가 일어난다.
- ㉡ 이 파괴면상의 응력분포가 균일하지 않다.
- ㉢ 실제응력상태가 복잡할뿐 아니라 주응력면들의 방향이 시험도중에 회전하게 된다.
- ㉣ 배수조건의 조정이 어렵다.
- ㉤ 간극수압을 측정할 수 없다.
- ㉥ 최대 변위량에 제한이 있다.
- ㉦ 시험이 진행됨에 따라 상하반 단면의 접촉면적이 줄어든다.

(2) 단순 전단시험

Swedish Geotechnical Institute의 Kjelman에 의해 개발되고 NGI에 의해 발전된 단순전단시험은 쇠 링들로 만들어진 전단상자

속의 고무 멤브레인에 원통형으로 성형된 시료를 넣은 후 시험을 수행하는데, 고무 멤브레인은 시료의 측면을 통해 균일하게 전단 변형을 일으키게 한다. 시료는 수직응력하에서 비등방으로 압밀되어서 전단응력에 의해서 변형되며, 비압밀비배수(UU), 압밀비배수(CU), 압밀배수(CD) 조건으로 전달할 수 있는 장점이 있다. 직접 전단 시험과는 달리 파괴면이 수평면이 아니며 파괴면을 자유롭게 조정할 수 있고, 파괴면상에 응력의 집중도 없으며, 시험면적도 시험기간중 일정한 장점이 있다.

(3) 삼축 전단시험

삼축전단시험은 셀(cell)속에서 일정한 구속압을 받는 원통형 시료에 소정의 방향을 갖는 응력을 가하여 시료를 파괴시켜 전단강도를 측정하는 시험방법이다. 삼축전단시험은 공시체 내부의 응력상태가 명확하고, 배수의 제어가 자유로와 흙의 전단강도를 측정하기 위한 시험

표 19. 포화된 점토에 대한 삼축시험방법 요약

시험단계	압밀단계	전단단계
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">시험방법</div> </div>		
압밀배수시험(CD 시험)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 셀 응력 <math>\sigma_c</math> 가함</li> <li>▶ 완전히 배수시켜서 발생하는 간극수압(<math>u=u_a</math>)이 짝이 되도록 한다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 축 응력 <math>\Delta\sigma</math> 천천히 가함</li> <li>▶ 배수를 허용하여 <math>\Delta\sigma</math>에 의해 발생하는 간극수압(<math>u=u_d</math>)이 짝이 되도록 한다.</li> <li>▶ 파괴시 : <math>\Delta\sigma = \Delta\sigma</math> ; 간극수압 <math>u_f = u_a + u_d = 0</math></li> </ul>
압밀비배수시험(CU시험)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 셀 응력 <math>\sigma_c</math> 가함</li> <li>▶ 완전히 배수시켜서 발생하는 간극수압(<math>u=u_a</math>)이 짝이 되도록 한다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 축응력 <math>\Delta\sigma</math> 가함</li> <li>▶ 배수를 허용하지 않는다. (<math>u=u_d \neq 0</math>)</li> <li>▶ 파괴시 : <math>\Delta\sigma = \Delta\sigma</math> ; 간극수압 <math>u_f = u_a + u_d = 0 + u_{df}</math></li> </ul>
비압밀비배수시험(UU시험)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 셀 응력 <math>\sigma_c</math> 가함</li> <li>▶ 배수를 허용하지 않으므로 <math>\sigma_c</math>에 의해서 발생하는 간극수압(<math>u=u_a</math>)이 짝이 아니다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 축 응력 <math>\Delta\sigma</math> 가함</li> <li>▶ 배수를 허용하지 않는다(<math>u=u_d \neq 0</math>)</li> <li>▶ 파괴시 : <math>\Delta\sigma = \Delta\sigma</math> ; 간극수압 <math>u_f = u_a + u_d = u_a + u_{df}</math></li> </ul>

방법으로 널리 보급되어 왔으며, 많은 연구자들에 의해 연구결과들이 보고되었다. Bishop과 Henkel은 1962년에 삼축전단시험에 관한 최초의 서적을 발간하였고, Head(1994)도 삼축전단시험에 대해서 그간에 개발 또는 개선된 사항들을 상세히 정리하였고, ASTM(1988)에

서는 흙과 암의 삼축시험 장비, 시험방법, 결과 분석, 새로운 시험방법등에 대해 광범위하고 심도 깊게 다루었다. 삼축시험으로 얻어지는 전단강도는 배수조건에 의해 크게 달라지므로 배수조건에 따라 비압밀비배수시험(UU 시험), 압밀비배수시험(CU 시험), 압밀배수시험(CD

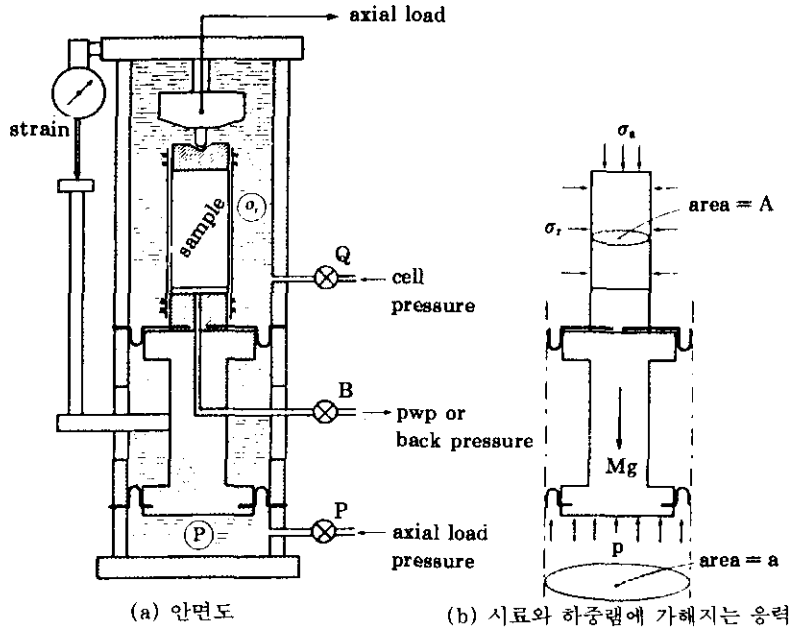


그림 15. Bishop-Wesley 응력경로 셀의 작용원리

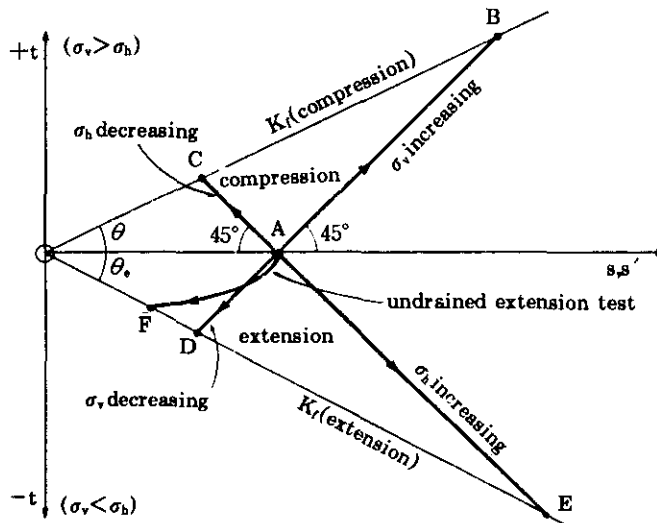


그림 16. 압축과 팽창시험을 나타내는 응력경로

표 20. CU삼축전단시험에서의 전형적인 오차와 영향(Germaine and Ladd, 1988)

인 자	오차의 원인	오차방향	비 고
1. 최대전단응력 $q = \frac{P}{2A}$	· 피스톤 마찰	+ $\Delta q$	반드시 보정할것 Stationary bushing 사용 금함
	· $\alpha$ 상승	+ $\Delta q$	반드시 보정할 것
	· 멤브레인 저항	+ $\Delta q$	표준 보정 적용
	· 필터 배수 저항	+ $\Delta q$	표준 보정 적용하거나 갯수와 방향에 의하여 최소화시킴
	· 단부 구속에 의한 불균등 면적	+ $\Delta q$ (증가시) - $\Delta q$ (감소시)	포물선 보정 적용 시험 중단
	· 단부 구속에 의한 불균등 응력 $\sigma'$	+ $\Delta q$	일반적으로 미소한 영향
	· 단부 구속에 의한 불균등 $e$	일반적으로 - $\Delta q$	높은 OCR에서 현저함 $\Delta e$ 를 줄이기 위해 빠른 전단속도가 필요 하나 $u$ 값에 오차를 유발함
	· 파괴면을 따라 발생 하는 변위	+ $\Delta q$	면적이 복잡하게 변화하여, 멤브레인, 필터, 피스톤의 횡력 등과의 상호작용. 그러므로 시험 중단요
	· 시료의 기움	$\pm \Delta q$	강성 피스톤과 윗 갯을 사용하여 최소화한다.
	· 내부의 누출 : 물, 가스	- $\Delta q$	-
· 외부의 누출	+ $\Delta q$	-	
2. 간극수압, $u$	· $S < 100\%$	$\pm \Delta u$	방향은 TSP와 OCR에 의존 반드시 백프레셔를 사용하고 전단 전 후에 B계수를 체크
	· 내부의 누출 : 물	+ $\Delta u$	가시로 사용하여 압밀중 누출 체크 침투압 구배를 최소화
	· 내부의 누출 : 가스	+ $\Delta u$	가스-물의 경계를 제거
	· 외부누출	- $\Delta u$	-
	· 단부구속 또는 파괴 영역으로 인한 불균등 $u$ 분포	일반적으로 + $\Delta u$	높은 OCR에서 현저함 $u$ 를 평형시키기 위하여 느린 $\dot{\epsilon}$ 필요
3. 축 변형률, $\epsilon_a$	· 시료의 안치	+ $\Delta \epsilon_a$	작은 $\epsilon$ 과 높은 OCR에서 매우 클수 있음
	· 단부구속으로 인한 불균등면적	- $\Delta \epsilon_a$	Necking시에는 시험 종료
	· 파괴면에 따라 발생하는 변위	- $\Delta \epsilon_a$	-
4. 체적 변형률 $\epsilon_v$	· 백프레셔를 가하는 동안 S증가	+ $\Delta \epsilon_v$	$\sigma'$ 를 일정하게 유지하고 면적은 일정하다고 가정
	· 내부 누출 : 물, 가스	+ $\Delta \epsilon_v$	
	· 외부누출	- $\Delta \epsilon_v$	

시험)으로 나눌 수 있으며 각 시험의 방법은 표 19에 요약되어 있다.

일반적인 삼축전단시험 외에도 외부하중으로 인해 지반의 한 요소(element)가 경험하는 응력 경로(stress path)를 상사한다거나, 원지반에서의 응력상태로 시료를 압밀하는 비등방 삼축압축시험인 CK<sub>U</sub> 시험을 수행할 경우에는 Bishop-Wesley 셀을 사용하면 편리하다(Bishop and Wesley, 1975; 그림 15 참조). 이러한 셀을 사용하면 그림 16에 보는 여러가지 응력 경로를 갖는 현장조건하에서 시료의 전단강도를 측정할 수 있다.

삼축전단시험에서 발생할 수 있는 Error들과 그 영향에 대해서는 Germaine and Ladd (1988)가 표 20와 같이 잘 요약 보고하였다.

### 3.4.3 압밀 시험

압밀시험에서는 시료를 압밀링에 넣고 하중을 가하면 시료내에 과잉간극수압이 유발되고, 이 간극수압이 소산하면서 침하를 동반하게 되는데, 이를 측정하여 흙의 변형거동특성을 측정하는 것이다. 하중을 가하는 방법에 따라 여러가지 다른 시험방법의 적용이 가능한데 그림 17에 요약되어 있다.

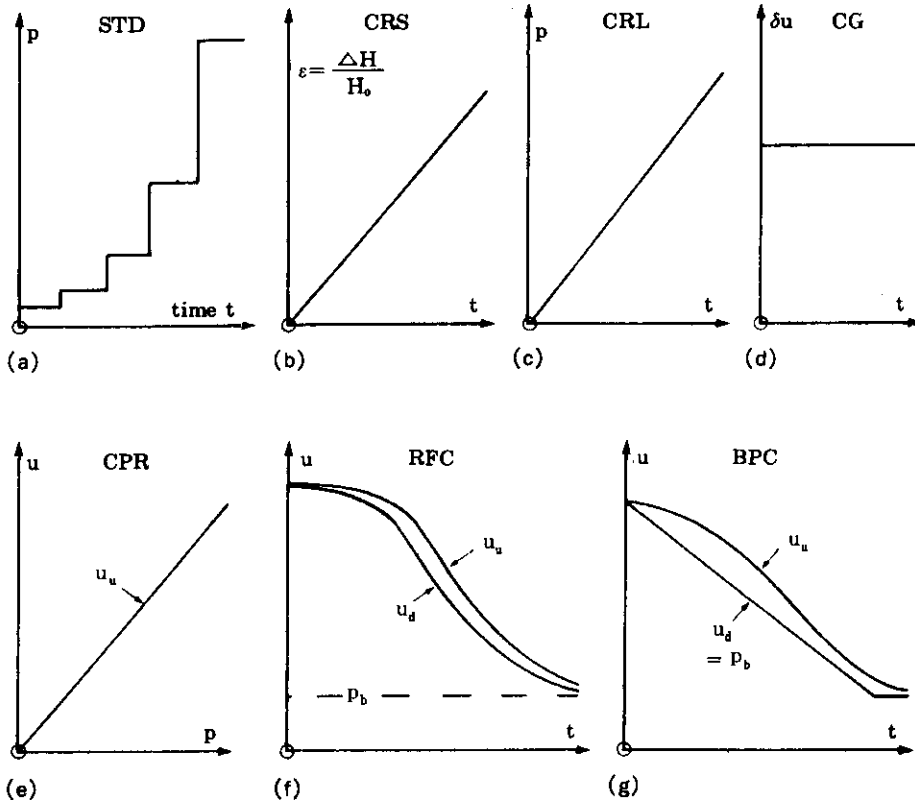


그림 17. 압밀시험의 하중제틴 (a) conventional incremental loading(STD) (b) constant rate of strain(CRS) (c) constant rate of loading(CRL) (d) constant pore pressure gradient(CG) (e) constant pressure ratio(CPR) (f) restricted flow consolidation(RFC) (g) back pressure control(BPC) (Head, 1994)

상기 여러가지 시험방법중에서 가장 보편적으로 널리 쓰이고 있는 시험방법은 표준압밀시험(STD)으로 통상적인 하중증가법, 즉 매 24시간 마다 하중을 배가 시키는 방법이다. 압밀시험결과는 압밀응력-간극비의 관계와 압밀도-시간곡선의 형태로 도시하게 되고, 여기에서 압밀침하량과 압밀에 요하는 시간을 계산하는 각종 상수를 구할수 있다.

여러가지 압밀상수들 중에서 가장 중요한 상수로는 선행압밀하중( $\sigma'_v$ )을 들 수 있는데, Ladd(1986)는 선행압밀하중( $\sigma'_v$ )을 일차원 압밀 조건하에서 작은 변형률 "탄성" 거동과 큰 변형률 "소성" 거동을 구분하게 하는 항복응력(yield stress)이라고 정의하고, 그 중요성을 논의하였다. 압밀침하량의 정확한 산정을 위해

서는 물론, 대부분의 단기 안정 문제에 있어서도 선행압밀하중 값을 정확히 아는 것은 중요하다(Jamiolkowski et al. 1985). 선행 압밀 하중의 정확한 결정에 영향을 주는 요소로는 시료의 교란, 시험장비와 방법, 결과 해석 방법 그리고 간극수 성분과 온도같은 환경 인자들이 있다. 선행압밀 하중의 정확한 결정방법으로 Ladd(1986)는 통상적인 단계하중 증가법을 사용하되 하중 증가량을 1배로 하는 대신 0.5배로 하고, 24시간 후에 하중을 증가시키는 대신 1차 압밀 종료 시점에서 하중을 증가시킬 것을 추천했다. 연속하중 증가 압밀시험방법인 CRS나 CHG 방법은 현장  $\sigma'_v$  값을 과다하게 예측하는 경향이 있으므로 주의를 환기했다.

표준압밀시험방법은 쉽게 흙의 압밀특성을

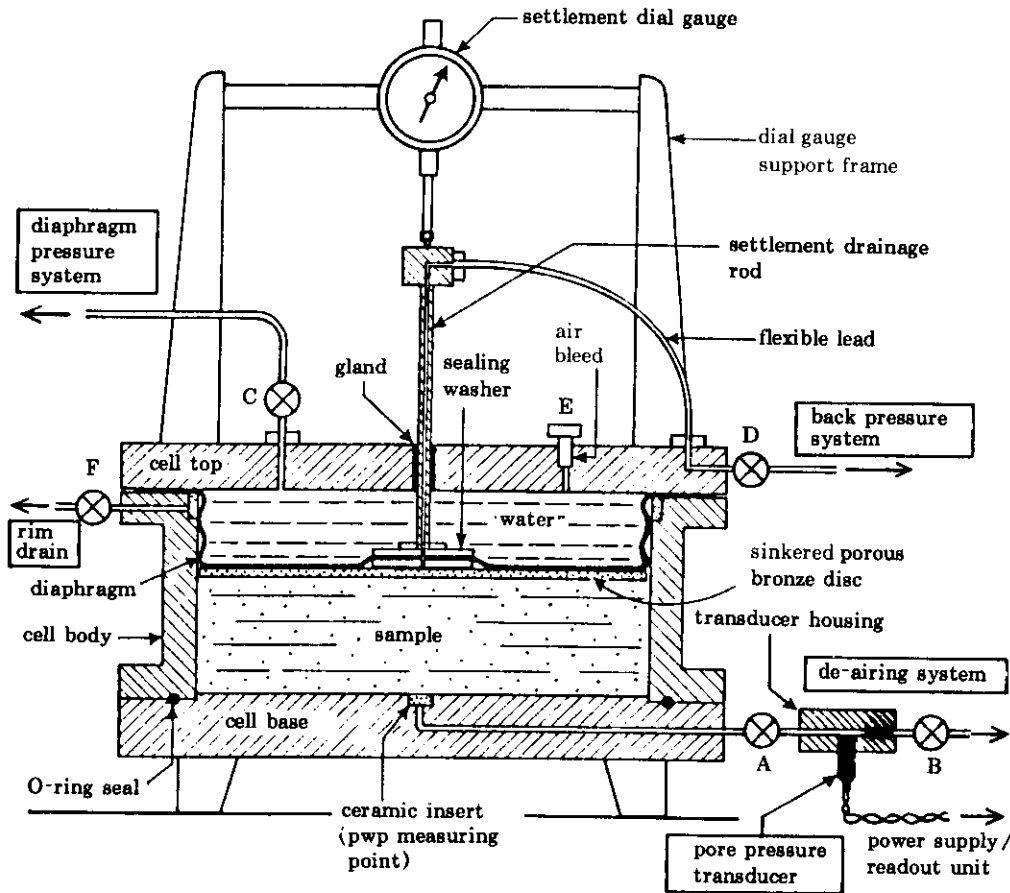


그림 18. Rowe cell 압밀시험기의 구조도

표 21. 표준압밀시험방법과 연속하중시험방법들의 특징(Head, 1994)

시험 종류(와 참고서)	장 점	단 점	특수 필요사항
표준 단계 하중 증가법 (STD) (BS 1377:1975, Test 17) (Head, 12권, 14장)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 단순 장비</li> <li>· 쉽다</li> <li>· 시험 수행과정과 분석 방법이 잘 정립되어 있음</li> <li>· C.를 직접결정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 매우 느림(2주까지 소요)</li> <li>· 분할점이 얻어짐</li> <li>· Curve fitting 해석필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Data logger를 사용하지 않으면 계속 주의 관찰해야 하고 수작업 분석해야함</li> <li>· 다음 하중단계를 가할 때 결정</li> </ul>
일정 변형률법(CRS) (Gorman et al, 1978) (Smith and Wahls, 1969) (Wissa et al, 1971) (Sallfors, 1975)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 작동 쉬움</li> <li>· ASTM 표준시험과정으로 명시되어 있음</li> <li>· 낮은 변형률에서 정상상태(Steady state)</li> <li>· 백프레셔 필수조건 아님</li> <li>· 제하 쉬움</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 변형률이 반드시 결정되어야 함</li> <li>· STD제하 곡선과 상관관계가 설정되어 있지 않음</li> <li>· Plotting 방법 다양</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 하중 골조</li> <li>· 특수 셀과 재하 피스톤</li> <li>· 매우 느린 속도 필요</li> <li>· 차압 트랜스듀서</li> </ul>
일정 하중률법(CRL) (Aboshi et al, 1970) (Wissa et al, 1971) (Burghignoli, 1979)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 직접(쉽게) 분석됨</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 하중 비율이 반드시 결정되어야 하고 조절되어야함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 하중 조절기 또는 피드백제어기</li> </ul>
일정 간극수압 구배법(CG) (Gorman et al. 1978) (Sallfors, 1975)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 쉬운 세팅</li> <li>· Null device로 쉽게 조절 가능</li> <li>· <math>p' &gt; p'_c</math> 일때 정상 상태</li> <li>· 간극수압 지연반응이 중요치 않음</li> <li>· 분석 단순</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시료 시스템이 시료 성형에 민감함</li> <li>· 구배가 반드시 결정되어야함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 피드백 가능한 Null 센서나 컴퓨터 제어 필요</li> </ul>
일정 압력 비율법(CPR) (Janbu et al. 1981)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시험시간 0.5일</li> <li>· <math>\lambda &lt; 0.8</math> 일때 압력비율이 중요치 않음</li> <li>· 몇 개의 plot에서 <math>p'_c</math>가 얻어짐</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 컴퓨터제어 필수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 컴퓨터 제어요</li> </ul>
흐름 제한법(RFC) (Hoare. 1980) (Sills, Hoare & Baker, 1985)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 하나의 작용하중</li> <li>· 조절 불필요</li> <li>· 시험시간 0.5일</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 흐름 제한기의 효율이 관건</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 흐름 제한기</li> <li>· 차압 트랜스듀서</li> <li>· 목적에 맞게 제작한 셀</li> </ul>
백프레셔 조절법(BPC) (Head의 제안)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 하나의 작용하중</li> <li>· 일정윤의 감압이 쉬움</li> <li>· 백프레셔를 시간 또는 다른 인자들과 연관가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 백프레셔 필수</li> <li>· 백프레셔의 감압율의 시간 의존성 여부 결정요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Pacer 또는 피드백 컴퓨터 조절요</li> </ul>

결정할 수 있는 장점이 있지만, 하기와 같은 결점도 있다.

- ㉠ 시료의 크기가 작으므로 침하율이 작게 산정될 때가 많다.

- ㉡ 얇은 시료에 비해 응력경사(stress gradient)가 크게 변한다.
- ㉢ 압밀중의 간극수압을 측정할 수 없다.
- ㉣ 수평배수가 불가능하다.

㊸ 단계하중만을 가할 수 있다.

표준 압밀시험의 이러한 결점들을 극복하기 위해 Manchester 대학의 Rowe 교수에 의해 개발된 시험방법이 Rowe Cell Consolidation Test이다(Rowe and Barden, 1966; Head, 1994; 그림 18 참조). 이 시험방법의 중요한 특징들은 유압으로 하중을 가하며, 배수조건을 조절할 수 있으며, 간극수압을 측정할 수 있으며, back pressure도 가할 수 있다는 것이다. 상기 장점들 외에도, 이 시험방법으로는 상당히 큰 직경(직경 25.4cm)의 시료에 대한 시험도 수행할 수 있다. Rowe cell을 이용하면 그림 17에서 보았던 여러가지 하중들의 재하가 가능한데, 특히 표준압밀시험이 단계하중인 것에 비해 연속하중을 가하는 특징이 있다.

연속하중 시험은 표준압밀시험에 비해 일반적으로 시간이 적게 걸리고, 자동화가 가능하고, 정확하고, 결과 해석이 객관적이고, 반복성이 있다는 장점이 있다. 상기 장점들을 제외한 표준압밀시험방법과 연속하중시험방법의 장단점들이 표 21에 비교되어 있다.

### 3.4.4 흙의 역학적 상수결정에 영향을 주는 요소

현장 지반에서의 응력-변형률-강도 특성을 정확히 결정하기 위해서는 다음 두가지 요인사항이 만족되어야 한다. 첫째, 현장에서와 같은 흙의 성질(구조)을 가지는 시료를 채취하여야 하는 것이고, 둘째는 현장과 같은 조건을 반영할 수 있는 시험을 수행하여야 한다

표 22. 강도 특성에 영향을 주는 요소

대 상	시료채취방법	시험방법
요 소	① 시료의 교란	① 변형 속도 (Strain Rate)
	② 압밀응력 (크기와 방향)	② 환경
	③ Aging(이차압밀)	③ 응력 시스템 i) $\Delta\sigma_1$ 의 방향 ii) $\Delta\sigma_2$ 의 크기 iii) $\Delta\sigma_3$ 의 크기
	④ 환경 (염분 함유율, 온도)	④ 배수와 반복 하중

(Lambe, 1958). 이상의 두 조건에 영향을 미치는 요소들은 표 22와 같으며, 여러 연구자들이 이러한 요소들의 역학적 특성에 미치는 영향을 조사, 발표했다(Jamiolkowski et al., 1985; Ladd, 1986; Germaine and Ladd, 1988). 영향을 주는 여러가지 요소들 중 본 절에서는 시료의 교란, 시간효과, 전단양상(전단시 응력시스템) 및 비등방성들에 대한 것을 간단히 살펴 보려 한다.

#### (1) 시료의 교란

이상적인 실내시험용 시료는 샘플링하기 전의 현장에 존재하는 함수비와 유효응력을 가지고 있어야 한다. 그러나, 불력샘플링으로  $K_c=1$ 인 흙을 채취하지 않는 한 실현 불가능하기 때문에, 일반적으로  $K_c \approx 1$ 인 흙을 튜브 샘플러로 채취하는 경우에는 시료교란을 최소화하거나 시료교란이 역학적 특성에 미치는 영향을 최소화해야 한다. Jamiolkowski et al. (1985)는 이러한 시료교란의 원인을 표 23과 같이 요약하였다.

시료교란으로 인한 역학적 특성에의 영향을 최소화하기 위해서는 CK<sub>U</sub> 시험을 수행하게 되는데, 이는 현장 흙 구조(soil structure)와 응력상태를 복원하는데 유리하기 때문이다(Ladd et al., 1977; Jamiolkowski et al., 1985; Ladd, 1986). 시료의 교란효과를 극복하기 위해 수행하는 CK<sub>U</sub> 시험 방법으로는 재압축(Recompression)방법과 SHANSEP(Stress History And Normalized Soil Engineering Properties)방법이 주로 사용된다.

이 두방법에서 중요한 두변수는 수직압밀응력( $\sigma_{vc}$ )와 압밀응력비  $K_c(=\sigma_{vc}'/\sigma_{vc}')$ 이다. 수직압밀응력 관점에서 보면, 재압축방법은 초기 현장 유효상재응력(그림 19에서  $\sigma_{vc}'$ )으로 압밀시킨후 시료를 전단파괴시킨다. 반면에, SHANSEP방법은 그림 25의 A, B점들 처럼 현상 재하중  $\sigma_{vo}'$ 보다 상당히 큰 하중하에서 압밀시킨후, 하중을 재하한 상태에서나(C, D의 경우) 아니면 현 하중하(A, B경우)에서 전단파



괴시킨다. 두 방법과 UU전단시험방법에 대한 개요가 표 24에 요약되어 있다.

표 23. 점성토 시료의 교란 원인(Jamiolkowski et al., 1985)

조 건	항 목	비 고
응력해방	진공에 의한 응력변화	· 輕진공수로 인한 $\sigma_v$ 의 과도한 감소는 과도한 인장 변형 유발 · 큰 진공압력이 과잉 압축변형 유발
	현장초기전단응력의 제거	· 결과로 발생하는 전단변형률은 일반적으로 작음
	구속응력의 제거	· 조립재의 존재로 인한 부의 간극수압 $u$ (soil-suction)의 손실 · 가스(기포나 용해되지 않은 가스)의 팽창
시료채취기술	· 시료의 기하학 : 직경/길이 면적비 간격비 부속품 : 피스톤, 코어링 튜브, 내부 포일 등	이 변수들은 다음에 영향을 미침 : 회수율 시료 벽면을 따른 접착력 내부벽면을 따라 교란된 영역의 두께
	샘플러 추진방법	타격법 보다 연속적인 추진방법이 좋음
	시료 회수 방법	시료의 바닥에서 suction 효과를 제거하기 위해 진공 브레이커 사용
핸들링 방법	운반	충격, 기온변화 등을 피할것
	저장	· 박테리아 성장을 최소화하기 위해 현장은도로 저장 · 샘플링 튜브와의 화학적 반응을 피할 것 · 저장 시간 장기화에 따른 물의 이동 증가
	시료추출과 성형 등	· 더 변형되는 것을 최소화 할 것(즉, 주의해서 수행할 것)

표 24. 시료의 교란효과를 최소화시키기 위한 세가지 방법의 비교

	재압축방법	SHANSEP방법	UU 전단시험
압밀응력( $\sigma_{vc}'$ )	$\sigma_{vo}'$	$(1.5 \sim 2)\sigma_{vo}'$	0
Ko 압밀	바람직	바람직	-
전단전의 압밀응력	$\sigma_{vc}'$	$1/n \times \sigma_{vc}'$ ( $n=1, 2, 3 \dots$ )	0
강도정수	한 OCR값 하에서 결정	여러 OCR 값 하에서 결정	-
적용점토	시멘팅된 점토 또는 예민점토	낮은 예민비의 NC, OC 점토	-
현장응력 이력	알아야함	알아야함	-
제약점	측정된 $Cu/\sigma_{vc}'$ 값의 적절성 여부검토 필요	비싸고, 시험이 복잡함	신뢰할만하지 않음

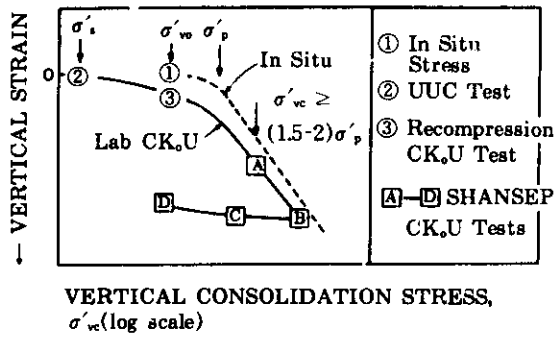


그림 19. 실내 CK<sub>o</sub>U 시험을 위한 압밀과정 (Ladd et al., 1977)

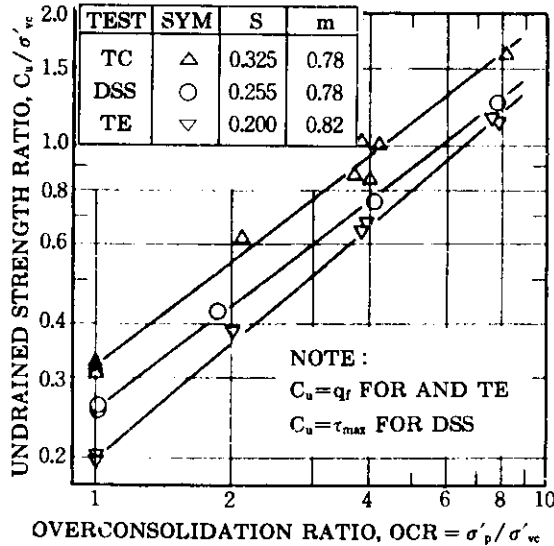


그림 20. 해성점토에 대한 SHANSEP CK<sub>o</sub>U 시험에서의 비배수강도비(Koutsoftas and Ladd, 1984)

SHANSEP 결과의 대표적인 예가 그림 20에 도시되어 있는데, 시험결과를 OCR값과 비배수강도비( $C_u/\sigma'_{vc}$ )값의 향으로 log-log scale로 나타냈는데, 식으로 표시하면 다음과 같이 정리된다.

$$C_u/\sigma'_{vc} = S(OCR)^m \quad (7)$$

여기서, S는 OCR=1에 대한 비배수강도비이고, m은 상수이다.

## (2) 시간효과(Time effects)

흙의 역학적특성에 영향을 주는 시간효과는 두가지로 나타나는데, 그 한가지는 일정 유효 응력 하에서의 Aging이고 다른 하나는 전단속도(rate of shearing)이다. Aging효과는 압밀 시험에서 결정되는 선행압밀하중( $\sigma'_p$ )값의 크기에 영향을 주는데, 24시간마다 하중을 배가하는 경우가 1차 압밀 종료시점마다 하중을 배가하는 경우 (end-of-primary, EOP)보다  $\sigma'_p$ 의 값이 약 10%정도 작게 결정된다(Ladd, 1986).

전단속도의 영향과 관련하여 점성토에 대한 UU와 CU 삼축압축시험결과들을 정리 보고한 문헌들(Lacasse, 1979; Germaine and Ladd, 1988)이 다수 있는데, 이들에 의하면 전단 속도가 증가할수록 큰강도를 나타내고, 따라서 파괴에 도달하는 시간이 감소한다는 것을 알 수 있다.

## (3) 응력 시스템

응력 시스템이 전단강도에 미치는 영향은 중간 주응력의 크기와 주응력 방향의 회전으로 나타나게 된다. 이러한 응력 시스템의 차이를 설명하기 위해 두가지 상수가 사용되는데, 그 하나는 중간 주응력의 상대적 크기를 정의하는  $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 이고, 또 다른 하나는 연직방향에 대한 최대 주응력의 방향인 각  $\delta$ 이다. b와  $\delta$ 의 변화를 보여주는 실제적인 현장 상황의 한 예가 그림 21에 도시되어 있다. 이 예는 다단계 성토로 제방을 건설하는 경우로 제방이 축조되어 감에 따라 지반하의 한 요소(D)에 발생하는 주응력 방향의 변화를 보여주고 있다. 또한, 평면 변형률 상태의 제방아래 지반조건을 상사하기 위해 중간 주응력 크기도 실험에서 고려되어야 할 것이다. b와  $\delta$ 값이 변함에 따라 응력-변형률 관계도 변하기 때문에 많은 연구자들이 현장의 응력상태(b와  $\delta$ 로 나타남)를 정확하게 상사할 수 있는 여러가지 전단시험 방법들과 장비들을 개발하였는데, 상세한 사항들은 Jamiolkowski et al.(1985), Saa-

da(1988) 등에 의해 잘 요약보고 되었다.

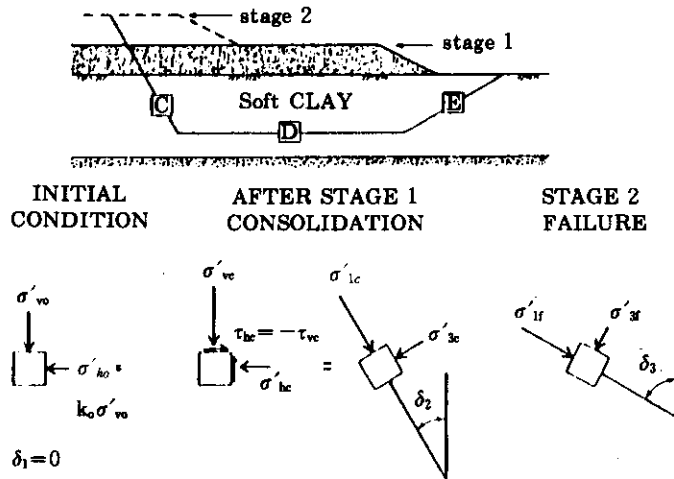


그림 21. 요소D의 다단계 성토중의 복잡한 응력 상황의 예(Ladd, 1986)

#### (4) 비등방성

비등방성이 강도에 미치는 영향을 보여주는 결과가 Bjerrum and Kenney(1968), Bjerrum(1973), Jamiolkowski et al.(1985), Ladd(1986), 그리고 Germaine and Ladd(1988)에 의해 보고되었다. Bjerrum과 Kenney는 Manglerud quick clay에 대해 현장시험과 실내시험을 수행하였는데, 같은 종류의 시험에서는 전단파괴면의 방향을 바꾸어 가면서 이방성 효과를 검증하여 그 결과를 표 25와 같이 보고하였다. 이 표에서 보면 같은 종류의 실험 방법에서도 실내시험이든 현장시험이든 흙의 전단강도가 전단파괴면의 방향에 따라 상이한 것을 알 수 있다. 그리고 다른 종류의 시험방법 간에도 측정된 전단강도가 상당히 차이가 나는 것을 알 수 있다. 그림 22에는 정규압밀 점토에 대해 수행한 CKoU 시험결과로서 소성지수와 비배수 강도( $C_u$ )를 압밀응력( $\sigma'_w$ )으로 나눈 비배수 강도비를 도시하였다. 이 그림에서 보면 소성지수가 작은 점성토에서는 좀더 큰 이방성을 보이고 있으며, 안정성 해석을 위한 비배수 전단강도 산정시에 삼축압축시험(TC)

표 25. 여러가지 시험에서 구해진 Manglerud quick clay의 비배수전단강도(Bjerrum and Kenney, 1968)

시험종류		$s_u / p$ 의 평균값
배인시험	수직	0.12
	45°	0.14
	수평	0.18
대형현장전단시험	수평	0.24
	45° 하향	0.30
	45° 상향	0.08
삼축시험	압축	0.29
	신장	0.13
단순전단시험		0.18

결과를 사용하면 해석결과가 불안전 측으로 나오게 된다는 것을 알 수 있다. 대형 프로젝트의 경우에는 여러가지 다른 전단형태를 갖는 CKoU 시험을 수행해야 하지만, 그렇지 못한 경우에는 Jamiolkowski et al.(1985)이 제안한 식 8의 관계식을 이용하여  $C_u$ 를 산정하는 것이 바람직할 것이다.

$$C_u / \sigma'_{vc} = (0.23 \pm 0.04) (OCR)^{0.8} \quad (8)$$

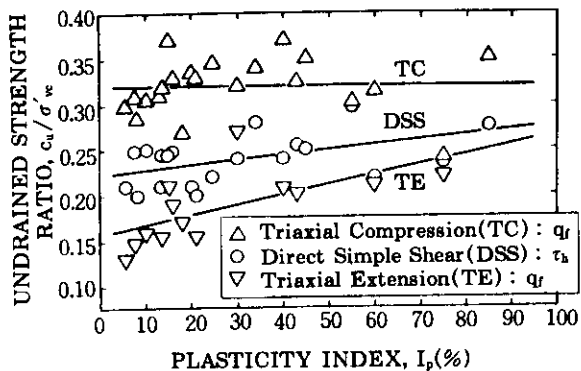


그림 22. 정규압밀점토와 실트의 CK<sub>o</sub>U 시험으로부터의 비배수 강도의 비등방성 (Germaine and Ladd, 1988)

### 3.5 제 언

본 강좌에서는 해외에서 심도있게 연구 조사되고, 그 결과 실무에서 활발히 사용되고 있는 현장 사운드링방법과 실내시험 방법을 이용해 연약지반의 상수를 결정하는 것에 대해서 살펴보았다. 해외에서는 현장 조건하에서 지반의 지층구조를 파악하고 토질상수를 결정할 수 있는 유용한 사운드링 기법이 많이 개발, 사용되고 있다. 실내시험 또한 여러방면에서 상당히 괄목할 만한 발전을 이루어, 시료 교란 효과를 극복하는 방법, 시간 효과를 정확히 파악하는 방법, 중간 주응력의 크기와 시험중에 발생하는 최대 주응력의 회전으로 인한 영향을 평가하는 방법 등이 다양하게 연구 되어 왔다. 이에 반해 국내

실정은 현장사운드링 방법의 종류가 다양해 지기 시작했으나 경험과 실적 자료는 미약한 편이다. 실내시험 분야에서도 설계상에 사용되는 토질 상수의 결정방법들에 있어서 강도결정에 영향을 미치는 다양한 인자들을 고려하지 않고 있는 초보적인 수준에 머물고 있다고 판단된다. 따라서, 이러한 분야에 많은 연구, 조사가 이루어지기를 기대해 본다.

### 참 고 문 헌

1. 김상규(1995. 6) 연약지반(1), 한국지반공학회지, Vol.11, No.2, pp.164~175
2. 한국지반공학회(1986) 건설부제정 구조물기초설계기준해설
3. 한국지반공학회(1994) 지반조사 결과의 해석 및 이용
4. 藤田圭-(1993) 實用 軟弱地盤對策 技術 總覽
5. Andresen, A.(1981) Exploration, Sampling and In-situ Testing of Soft Clays, Soft Clay Engineering, Edited by Brand and Brenner, Elsevier
6. Arthur, J.R.F.(1988) Cubical Devices : Versatility and Constraints, Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977, pp.743-765.
7. Baldi, G., Hight, D.W. and Thomas, G.E. (1988) A Reevaluation of Conventional Triaxial Test Methods, Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977, pp.219-263.
8. Berre, T. and Bjerrum, L., (1973) Shear Strength of Normally Consolidated Clays, Proc. 8<sup>th</sup> ICSMFE, Moscow, Vol.1(1), pp. 39-49.
9. Bishop, A. W. and Henkel, D.J.(1962) The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, 2nd Edition, Arnold, London.
10. Bishop, A.W. and Wesley, L.D.(1975) A Hydraulic Triaxial Apparatus for Controlled Stress Path Testing, Geotechnique, 35(4) pp. 657
11. Bjerrum, L.(1972) Embankments on Soft Ground, State-of-the-Art Report, Proc. Speciality Conference on Performance of

- Earth Supported Structures. ASCE, Vol.2, pp. 1-54
12. Bjerrum, L.(1973) Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays, State-of-the-Art Report, Session 4, Proc. 8<sup>th</sup> ICSMFE, Moscow, Vol.3, pp.111-159
  13. Bjerrum, L. and Kenney, T.C.(1968) Effect of Structure on the Shear Behavior of Normally Consolidated Quick Clay, Proc. Geotechnical Conference on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks, Oslo, Vol.2, pp. 19-27.
  14. Campanella R.G. and Vaid, Y.P.(1972) A Simple  $K_0$ -Triaxial Cell, Can. Geotech. J., No.3
  15. Clarke, B.G.(1995) Pressuremeters in Geotechnical Design, Balckie Academic and Professional
  16. Clayton, C.R.L., Simons, N.E. and Matthews, M.C.(1982) Site Investigation, Intercontinental Publication Inc.
  17. Fang, H.Y.(1991) Foundation Engineering Handbook, 2nd Edition, VNR
  18. F.H.A.(1993) Advanced Course on Soil Slope Stability
  19. Germaine, J.T. and Ladd C.C.(1988) Triaxial Testing of Saturated Cohesive Soils, Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977, pp.421-459
  20. Handy, R.L., Remmes, B., Moldt, S., Lutenegger, A.J. and Trott, G.(1982) In-situ Stress Determination by Iowa Stepped Blade, J. Geotech. Div., ASCE, GT 11
  21. Hawkins, P.G., Mare, R.J., Mathieson, W.G. and Muir Wood, D.(1990) Pressuremeter Measurement of Total Horizontal Stress in Stiff Clay, Proc. 3rd Int. Symp. on Pressuremeter, Oxford, pp.321-330
  22. Head, K. H.(1994) Manual of Soil Laboratory Testing, 2nd Edition, Pentech Press, London, Vol.1-3
  23. Houslyby, G.T. and Nutt, N.R.F.(1992) Development of the Cone Pressuremeter, Wroth Memorial Symposium, Oxford
  24. Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T. Lancellotta, R.(1995) New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils, Proc. 11<sup>th</sup> ICSMFE, SanFrancisco, Vol.1, pp.57-153.
  25. Kolk, H.J.(1992) A Recent Development in Pressuremeter Testing : Cone Pressuremeter, International Seminar on In-Situ Testing, Portuguese Society for Geotechnics and TC27 of the ISSMFE, Lisbon
  26. Koutsoftas, D. C., and Ladd C.C.(1984) Design Strength of an Offshore Clay, J. of Geotech. Engrg., ASCE, 111(3), pp.337-355
  27. Kulhawy, F.H.(1993) Some Thoughts on the Evaluation of Undrained Shear Strength for Design, Predictive Soil Mechanics, Thomas Telford, London, pp.394-403
  28. Kulhawy, F.H.,(1995) Estimation of Soil Properties for Foundation Design, Short Course Lecture Notes, Nanyang Tech. Univ., Singapore
  29. Kulhawy, F.H., Jackson, C.S., and Mayne, P. W.(1989) First-Order Estimation of  $K_0$  in Sand and Clays, Foundation Engineering : Current Principles and Practices, ASCE, pp. 121-134
  30. Kulhawy, F.H. and Mayne P.W.(1991) Relative Density, STP, and CPT Interrelationships, Proc. 1st ISOCCTI, New Work, Elsevier, pp.197-211
  31. Lacasse, S.(1979) Effect of Load Duration on Undrained Behavior of Clay and Sand Literature Survey, Norwegian Geotechnical Institute, Internal Reoprt 40007-1.
  32. Lacasse S. and Berre T.(1988) Triaxial Testing Methods for Soil, Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977, pp.264-289
  33. Ladd, C. C.(1986) Stability Evaluation During Staged Construction, 22nd Terzaghi Lecture, J. of Geotech. Engrg., ASCE, 117(4), pp. 537-615.
  34. Ladd, C. C.(1994) Fundamental and Practical Issues Concerning Undrained Strength Anisotropy, Proc. 13th ICSMFE, New Delhi, India, Vol. 1, pp.57-58.
  35. Ladd, C. C., and Foott, R.(1974) New Design Procedure for Stability of Soft Clays, J. of Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 100, No. GT 7, pp.763-786.
  36. Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F., and Poulos, H. G.(1977), Stress-Deform

- mation and Strength Characteristics, State-of-the-Art Report, Proc. 9<sup>th</sup> ICSMFE, Tokyo, Vol. 2, pp.421-494.
37. Lambe, T.W.(1958) The Engineering Behavior of Compacted Clay, J. Soil Mech. Found. Eng., ASCE(May).
  38. Lambe, T.W. and Whitman R.V.(1969) Soil Mechanics, 11th ed., Wiley, New York.
  39. Leebver, G. and Povlin, C.(1979) A New Method of Sampling in Sensitive Clay, Can. Geotech. J., 16, pp.226-233.
  40. Marchetti, S.(1975) A New In-situ Test for the Measurement of Horizontal Soil Deformability, Proc. ASCE Spec. Conf. on In situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, N. C., Vol.2
  41. Marchetti, S.(1980) In situ Tests by Flat Dilatometer, J. Geotech. Div., ASCE, GT 3.
  42. Meigh, A. C.(1987) Cone Penetration Testing-Method and Interpretation, CIRIA Ground Engineering Report, Butterworths
  43. Norris, G. M. and Holtz, R. D., Editors (1981) Cone Penetration Testing and Experience, Proc. Geotech. Div., ASCE National Convention, St. Louis.
  44. Perloff, W. H. and Baron, W.(1976) Soil Mechanics, John Wiley and Sons
  45. Robertson, P.K.(1990) Soil Classification Using the Cone Penetration Test, Can. Geotech. J., Vol 27, No.1, pp151-158
  46. Robertson, P.K. and Campanella, R.G.(1989) Guidelines for Geotechnical Design Using the Cone Penetrometer Test and CPT with Pore Pressure Measurement, 한국지반공학회 특별강연집, 서울, 1995
  47. Roctest(1983) The Pressuremeter Test Principles, Testing Equipment and Test Procedure.
  48. Rowe, P.W. and Barden, L.(1966) A New Consolidation Cell, Geotechnique, 16(2), pp 162.
  49. Saada, A. S.(1988) Hollow Cylinder Torsional Devices : Their Advantages and Limitations, Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977, pp.766-795.
  50. Saada, A. S. and Townsend, F. C.(1981) Laboratory Strength Testing of Soils, Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP 740, Philadelphia, ASTM, pp.7-77
  51. Sowers, G.F.(1979) Introductory Soil Mechanics and Foundations : Geotechnical Engineering, 4th Edition, Macmillan Publishing
  52. US Army Corps of Engineers(1972) Soil Sampling, EM1110-2-1907
  53. Withers, N. J., Schaap, L. H. J. and Dalton, C. P.(1986) The Development of a Full Displacement Pressuremeter, The Pressuremeter and Its Marine Applications, 2nd International Symposium, ASTM STP 950, pp. 38-56.
  54. Wroth, C. P. and Housby, G. T.(1985) Soil Mechanics-Property Characterization and Analysis Procedures, Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, Vol. 1(1), pp.1-55.