



INM 308

Zemin Mekaniği

Zeminlerde Kayma Direncinin Ölçümü

Doç. Dr. İnan KESKİN

inaneskin@karabuk.edu.tr, inaneskin@gmail.com

www.inaneskin.com

ZEMİN MEKANİĞİ

Haftalık Konular

Hafta 1: Zemin Etütleri Amacı ve Genel Bilgiler

Hafta 2: Kil Minarelleri ve Zemin Yapısı

Hafta 3: Zeminlerde Kayma Direnci Kavramı, Yenilme Teorileri

Hafta 4: Zeminlerde Kayma Direncinin Ölçümü; Serbest Basınç Deneyi, Kesme Kutusu Deneyi, Üç Eksenli Basınç Deneyi, Vane Kanatlı sonda Deneyi

Hafta 5: Zeminlerde Kayma Direncinin Belirlenmesine Yönelik Deneyler; Laboratuvar Uygulaması

Hafta 6: Zeminlerde Kayma Direncinin Belirlenmesine Yönelik Problem Çözümleri

Hafta 7: Yanal Zemin Basınçları

Hafta 8: Yanal Zemin Basınçları; Uygulamalar

Hafta 9: Yamaç ve Şevlerin Stabilitesi; Temel Kavramlar

Hafta 10: Yamaç ve Şevlerin Stabilitesi Örnek Problemler

Hafta 11: Zeminlerin Taşıma Gücü; Sığ Temeller

Hafta 12: Zeminlerin Taşıma Gücü; Kazıklı Temeller

Hafta 13: Zemin Sıvılaşması ve Analizi

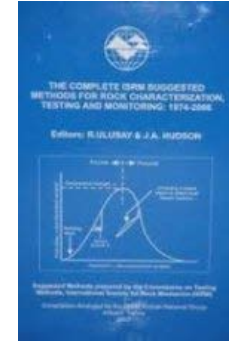
Hafta 14: Genel Zemin Mekanik Problem Çözümleri

Hafta 15: Final Sınavı

KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Zeminlerin ve kayaların kayma direncini belirlemek için başvurulacak kitaplar ve standartlar

- ASTM (American Society for Testing and Material) Standartları
- TSE Standartları
- AASHTO standartları
- ISRM (The International Society for Rock Mechanics) test metotları (Kayalar için)
- Konu ile ilgili yazılmış çeşitli kitaplar



TSE.NET



Standard Arama



Sisteme Giriş

Standard Detayı

İptal Standard
TÜRK STANDARDI

TS No :	TS 1901	
Kabul Tarihi :	25.04.1975	
Hazırlık Grubu :	İnşaat İhtisas Grubu	
Doküman Tipi :	ST	
Yürürlük Durumu :	H (İptal Edilmiş Standard/Withdrawn standard)	
Başlık :	İnşaat mühendisliğinde sondaj yolları ile örselenmiş ve örselenmemiş numune alma yöntemleri	
Başlık (İng) :	Methods of and Obtaning of Disturbed and Undisturbed Samples for Civil Engineering Purposes	
Türü :	Metot	
Kapsam :	Bu standard, inşaat mühendisliği yönünden incelenmesi gereken, killi, kumlu veya çakıllı zeminler ile kayada sondaj yapılmasını, delinen yer katlamalarında laboratuvar deneyleri için örselenmiş veya örselenmemiş numune almasını kapsar. Zemin özelliklerinin yerinde saptanması amacıyla yapılan arazi deneylerini kapsamaz...	

KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Zeminlerin kayma dayanımı; temellerin taşıma gücünün hesabında, karayolu ve hava alanlarının projelendirilmesinde, şevlerin denge analizlerinde, toprak dolgularda ve dayanma yapılarının inşasında, vb., çok önemlidir.

Zeminler üzerinde yapılan deneyler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler.

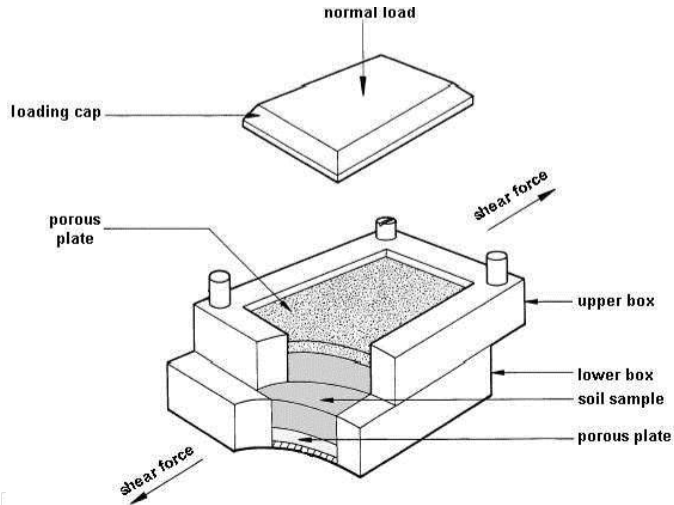
Drenajsız Deneyler (UU): Numuneler üzerine uygulanan hızlı yükleme ile drenaja müsaade edilmez ve böylelikle zeminlerin drenajsız kayma dayanımı belirlenir.

Konsolidasyonlu-Drenajsız Deneyler (CU): Numuneler, üzerlerine uygulanan normal gerilmeler altında konsolidasyona terk edilir ve daha sonra hızlı bir yükleme ile drenaja izin verilmeden kesilir.

Konsolidasyonlu Drenajlı Deneyler (CD): Numuneler, bir önceki deneyde olduğu gibi, konsolidasyona bırakılır. Daha sonra zemin numunesi, boşluk suyu basınçlarının oluşmasına izin verilmeden gerçekleştirilen yavaş yükleme ile kesilir. Bu bakımdan bu deneylerde toplam ve efektif gerilmeler birbirine eşittir.

DİREKT KESME DENEYİ

Direkt kesme deneyi kayma direnci parametrelerinin ölçülmesinde kullanılan ilk deney metodudur. Kare ve daire şekilli modelleri vardır.



DENEYİN YAPILIŐI

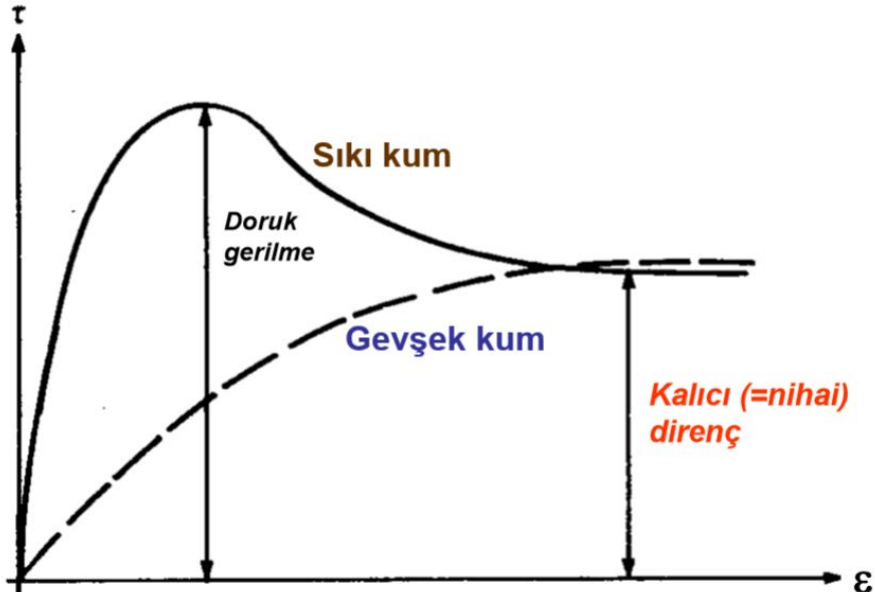
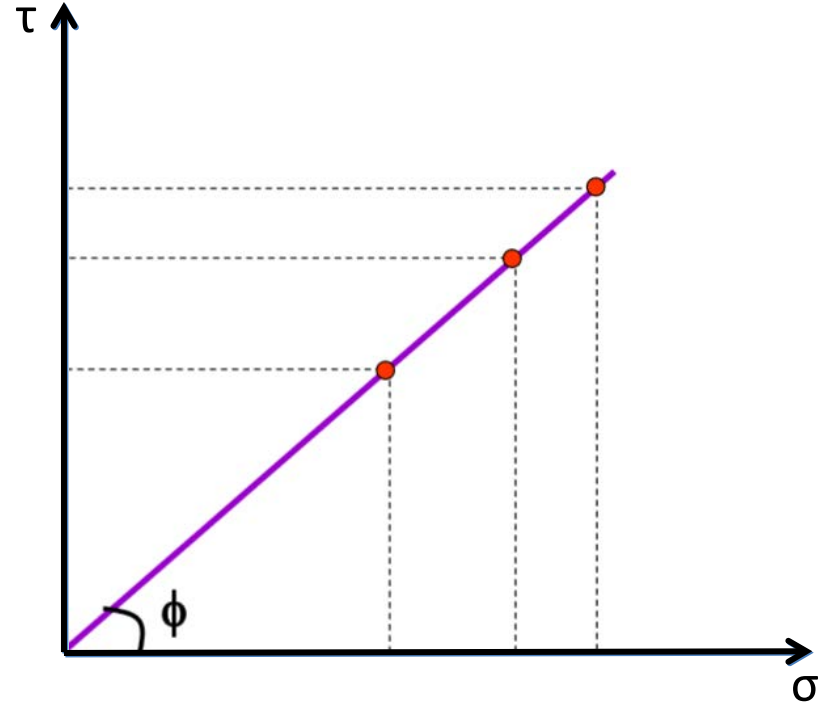
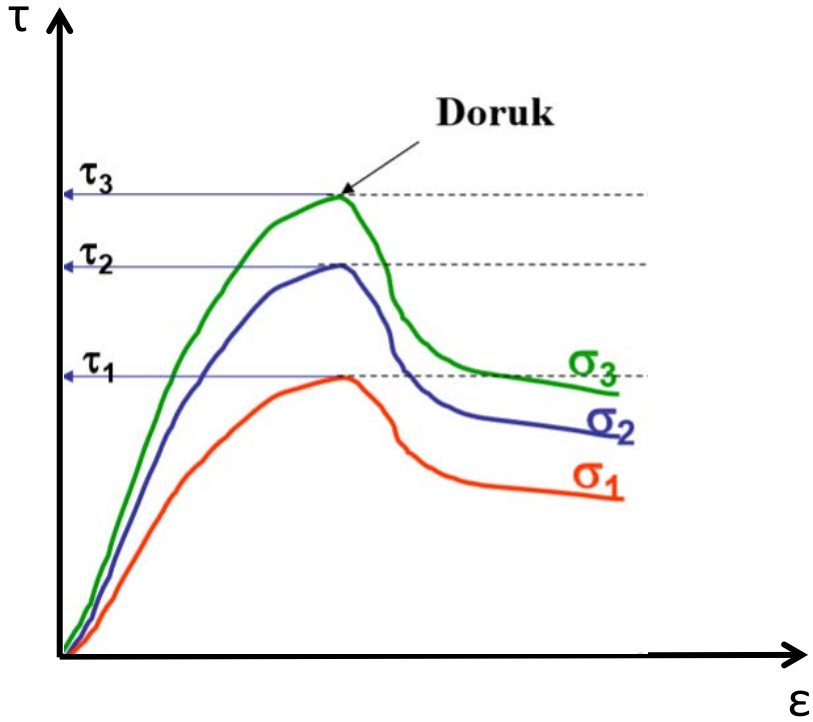


Yükleme başlığı ile 2, 6, 12 18, 36, 72 kg gibi sabit düşey N yükü ve düşey yük sabitken de aletin durumuna göre elle ya da otomatik olarak artırılan yatay bir P kesme kuvveti uygulanarak, 1 mm/dk lık kesme hızıyla numune kesmeye tabi tutulur. Gittikçe artan kesme kuvvetine karşın, zemin örneği önce direnir, sonra iki parçayı ayıran düzlem boyunca kesilir. Uygulanan kayma kuvveti, bir yük halkası ile ölçülür.

DENEYİN YAPILIŐI



HESAPLAMALAR ve SONUÇLARIN GÖSTERİLMESİ



Genellikle sadece göreceli olarak yavaş, drenajlı deneyler yapılır. Killer için kesme hızı artık boşluk suyu basıncı oluşmayacak şekilde seçilir. Kumlar ve çakıllar üzerinde deneyler hızlı yapılabilir.

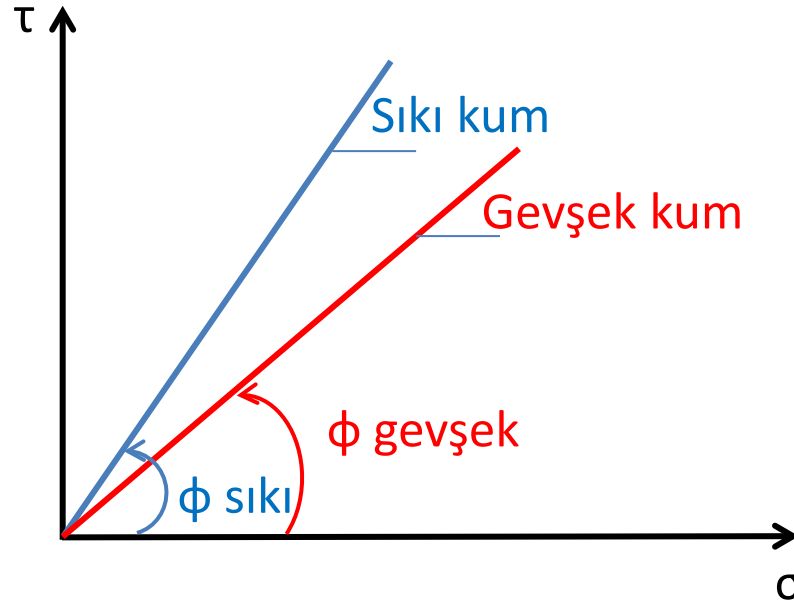
Kumlar ve çakıllar üzerinde genellikle deneyler kuru olarak yapılır.

HESAPLAMALAR ve DEĞERLENDİRMELER

Kumlar üzerinde yapılan kesme kutusu deneyine göre, kumların rölatif sıkılığındaki artışa bağlı olarak içsel sürtünme açısı artmaktadır.

Kumlarda, içsel sürtünme açısı zeminin iyi yada kötü derecelenmiş olmasına tanelerin şekline bağlıdır. İyi derecelenmiş kumda içsel sürtünme açısı, kötü derecelenmişe göre daha büyüktür. Köşeli taneli kumlarda yuvarlak taneliye göre daha büyüktür.

Yatay bir düzlemde, serbest dökülerek oluşturulmuş bir kuru kum yığınının şev açısı o kumun gevşek durumdaki içsel sürtünme açısına eşittir.



DEZAVANTAJLARI - AVANTAJLARI

Avantajları

- Kesme yatay düzlemde oluşur
- Ucuz, hızlı ve basit bir deney
- Kesme yönünü değiştirerek büyük deformasyonlara ulaşılabilir. Bu zeminin rezidüel kayma mukavemetini bulmak için yararlıdır.
- Büyük örnekler üzerinde deneyler yapılabilir.

Dezavantajları

- Deney sırasında asal gerilmeler ve asal gerilme doğrultuları bilinmez.
- Zeminin en zayıf zon içerisinde yenilmesine izin verme yerine kesmenin belirli bir düzlem boyunca oluşmasına olanak sağlayabilir.
- Kesme sırasında kesme düzleminde gerilme yığılmaları oluşur (kesme düzleminde üniform olmayan gerilme dağılımı)
- Boşluk suyu basıncı ölçümleri doğru olmaz. Drenajsız deneylerden efektif gerilme parametreleri belirlenemez
- Drenajsız kayma mukavemeti güvenli olmaz çünkü yüksek hız uygulanmazsa yerel drenaj önlenemez

SERBEST BASINÇ DENEYİ

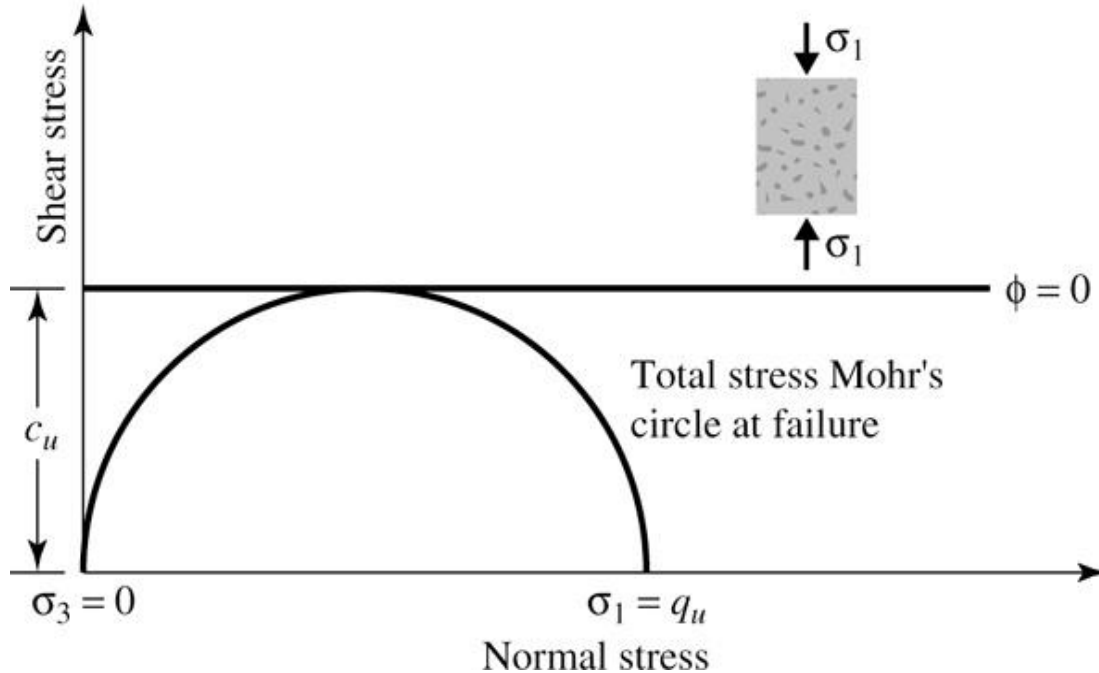
Serbest basınç deneyinde silindirik bir zemin numunesi yalnızca aksenal doğrultuda yüklemeye tabi tutulmaktadır.

Eksenel yük artışları altında meydana gelen numunenin boy kısılması (eksenel şekil değiştirmesi) ölçülmekte gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir.



SERBEST BASINÇ DENEYİ

- Serbest basınç deneyi kendini dik olarak ayakta tutabilecek özelliklere sahip zeminler üzerinde uygulanabilmektedir.
- Bu yönden yalnızca killi zeminler için kullanılan bir deney yöntemi olmaktadır.
- Deney sırasında numunenin drenaj koşulları kontrol edilemediği için, hızlı yükleme yapılarak zeminin drenajsız kayma mukavemetinin elde edildiği kabul edilmektedir.
- Serbest basınç deneyi killerin drenajsız kayma mukavemetini belirlemekte yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemi olmaktadır.



Deney drenajsız olduğu için yükleme sırasında boy kısalması olmasına rağmen hacim sabit kalır. Kesit alanı;

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_z}$$

Kırılma sağlandığında serbest basınç dayanımı;

$$q_u = \sigma_{1max} = 2c = \frac{P_{max}}{A}$$

KİLLERİN SERBEST BASINÇINA GÖRE AYRIMI

KIVAM	q_u (kpa)
Çok Yumuşak	<25
Yumuşak	25-49
Orta Katı	50-96
Katı	97-192
Çok Katı	193-383
Sert	>384

Yapısı hassas olan killer örselenmiş durumda yüksek dayanım gösterirken su muhtevası değiştirilmeden yoğurulur ve tekrar sıkıştırılırsa direncin belirgin ölçüde düşük bir düzeye indiği görülür. Bu düşüşün ölçütü **Hassaslık Derecesi**'dir

$$S_t = \frac{(q_u) \text{ örselenmemiş}}{(q_u) \text{ yoğurulmuş}}$$

Olağan koşullarda hassaslık derecesi 2-4 arasında değişir. Orta derecede hassas killerde 4-8, akıcı killerde ise 8'den büyüktür.

SERBEST BASINÇ DENEYİ

SERBEST BASINÇ DENEYİ

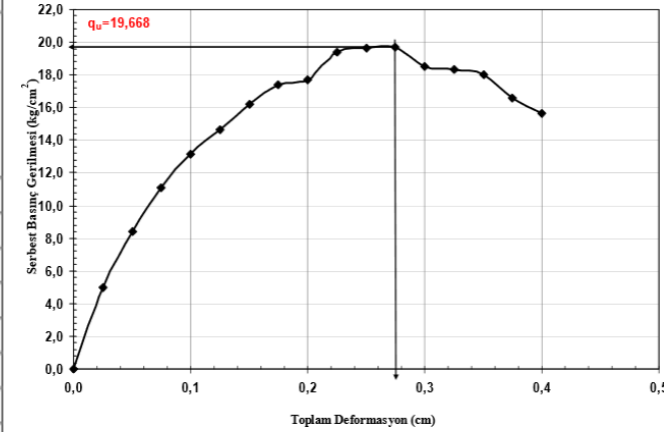
Kuvvet = (Kuvvet Halkası okuması) * (Kuvvet Halkası)

Toplam Deformasyon = (Deformasyon Okuması) * (Deformasyon Okuması 1 Birimi) / 10

$$\text{Birim Deformasyon } (\varepsilon) = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{Düzeltilmiş Alan } (A_d) = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad \text{Serbest Basınç Gerilmesi } (\sigma_1) = \frac{P}{A_d} = \frac{\text{Kuvvet}}{\text{Düzeltilmiş Alan}}$$

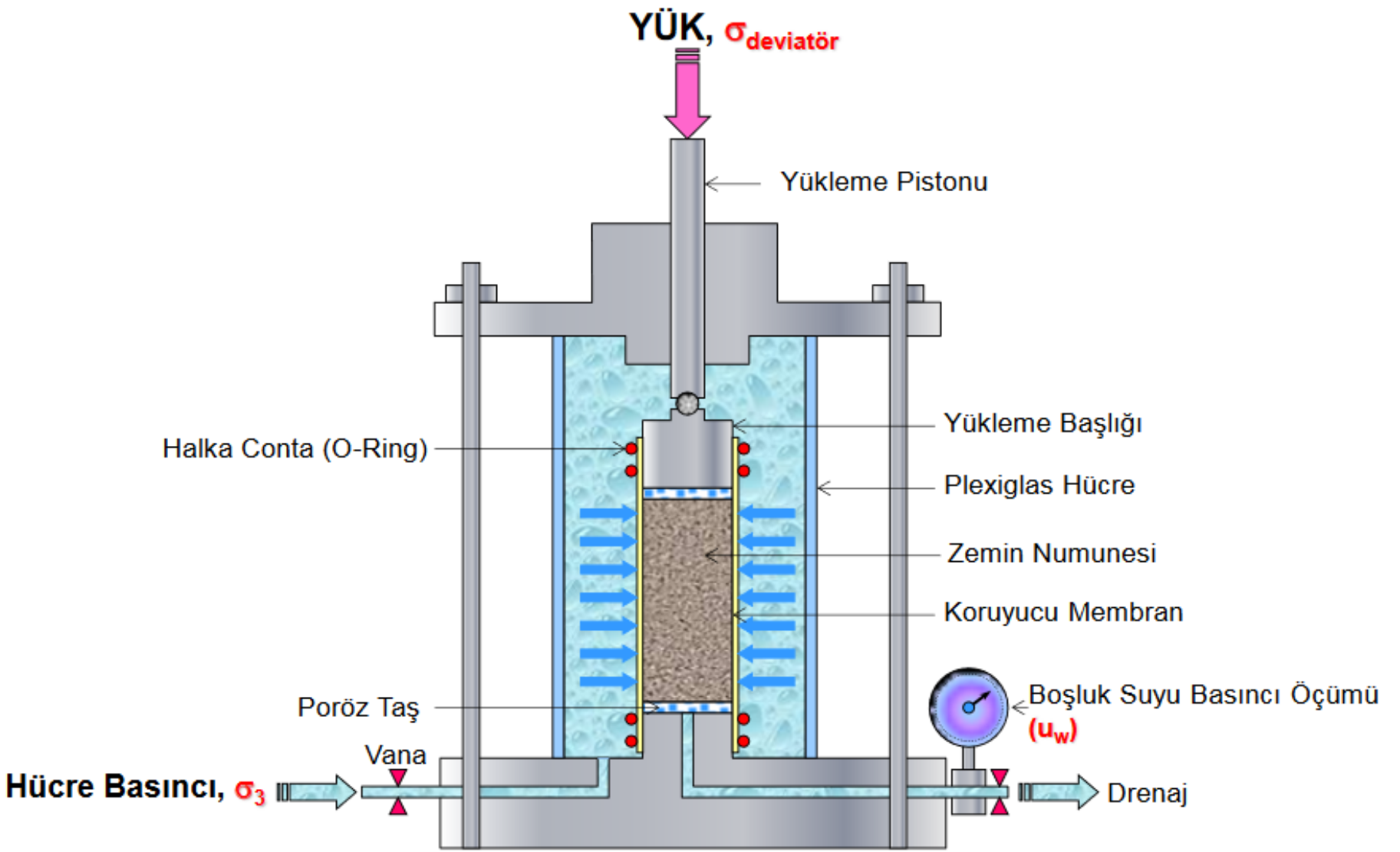
ΔL : Toplam Deformasyon: Boy kısalması

Geçen Zaman (dk)	Kuvvet (Yük) Halkası Okuması	Kuvvet (Yük) (kg)	Deformasyon Okuması	Toplam Deformasyon (cm)	Birim Deformasyon (ε)	Düzeltilmiş Alan (A_d) (cm^2)	Serbest Basınç Gerilmesi (σ_1) (kg/cm^2)
0,00	0	0,000	0	0,000	0,000	18,500	0,000
0,25	53	88,828	25	0,025	0,002	17,751	5,004
0,50	89	149,164	50	0,050	0,003	17,782	8,388
0,75	118	197,768	75	0,075	0,005	17,813	11,102
1,00	140	234,640	100	0,100	0,007	17,844	13,149
1,25	156	261,456	125	0,125	0,009	17,876	14,626
1,50	173	289,948	150	0,150	0,010	17,907	16,192
1,75	186	311,736	175	0,175	0,012	17,939	17,378
2,00	190	318,440	200	0,200	0,014	17,970	17,721
2,25	208	348,608	225	0,225	0,016	18,002	19,365
2,50	211	353,636	250	0,250	0,017	18,034	19,610
2,75	212	355,312	275	0,275	0,019	18,066	19,668
3,00	200	335,200	300	0,300	0,021	18,098	18,522
3,25	198	331,848	325	0,325	0,023	18,130	18,304
3,50	195	326,820	350	0,350	0,024	18,162	17,995
3,75	180	301,680	375	0,375	0,026	18,194	16,581
4,00	170	284,920	400	0,400	0,028	18,227	15,632



Aranan	Değer	Birim	Formül
Örselenmemiş Numunenin Serbest Basınç Dayanımı (q_u)	19,668	kg/cm^2	Grafikten
Kohezyon (C)	9,834	kg/cm^2	$C = q_u / 2$
İçsel sürtünme Açısı (Φ)		Derece	$\Phi = 2 * \theta - 90$

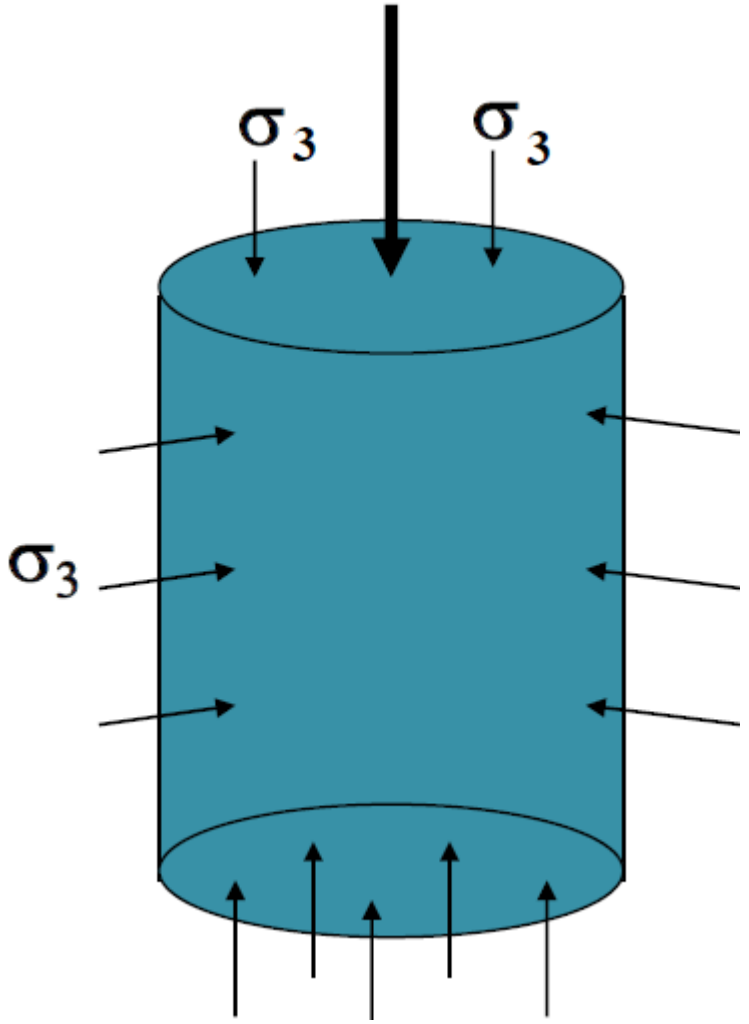
ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ



ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ

$\sigma_a = \text{deviator gerilme}$

$\sigma_3 = \text{radial gerilme (hücre basıncı)}$



$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_a$ aksenal gerilme



ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ

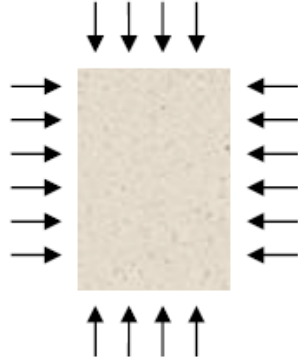
Zeminlerin kayma mukavemetini saptamak için kullanılan laboratuvar deney yöntemleri arasında üç eksenli basınç deneyi en gelişmişlerinden biri olmaktadır.

Bu deney düzeneği ile zeminin arazi koşullarında sahip olacağı kayma mukavemetini gerçeğe en yakın olarak belirlemek mümkün olmaktadır.

Üç eksenli basınç deneyinde;

- Zemin numunesi arazi gerilmeleri altında konsolide edilmekte ve suyu doygunluk derecesi kontrol edilebilmektedir.
- Yanal ve eksenel gerilmeler uygulamak sureti ile arazi yükleme izlerine yakın yüklemeler yapılabilmektedir.
- Eksenel yükleme sırasında drenajsız veya drenajlı koşullar geçerli kılınabilmektedir.
- Drenajsız yüklemelerde numunede oluşan boşluk suyu basıncı artışları, drenajlı deneylerde ise meydana gelen hacim değişimleri ölçülebilmektedir

ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ/Deney Türleri



Her yönden çevre
basıncı σ_c etkisi
altında

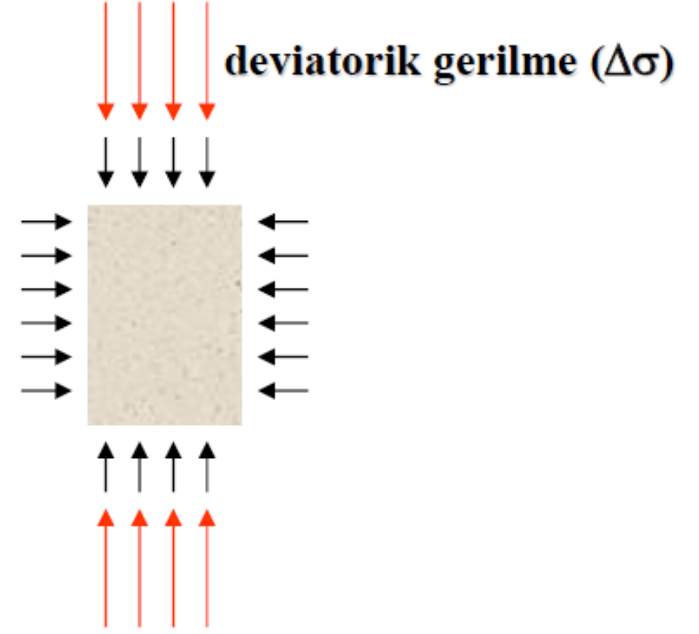
Drenaj kanalı açık mı?

evet

hayır

Konsolide
edilmiş zemin
örneđi

Konsolide
edilmemiş zemin
örneđi



kayma (yükleme)

Drenaj kanalı açık mı?

evet

hayır

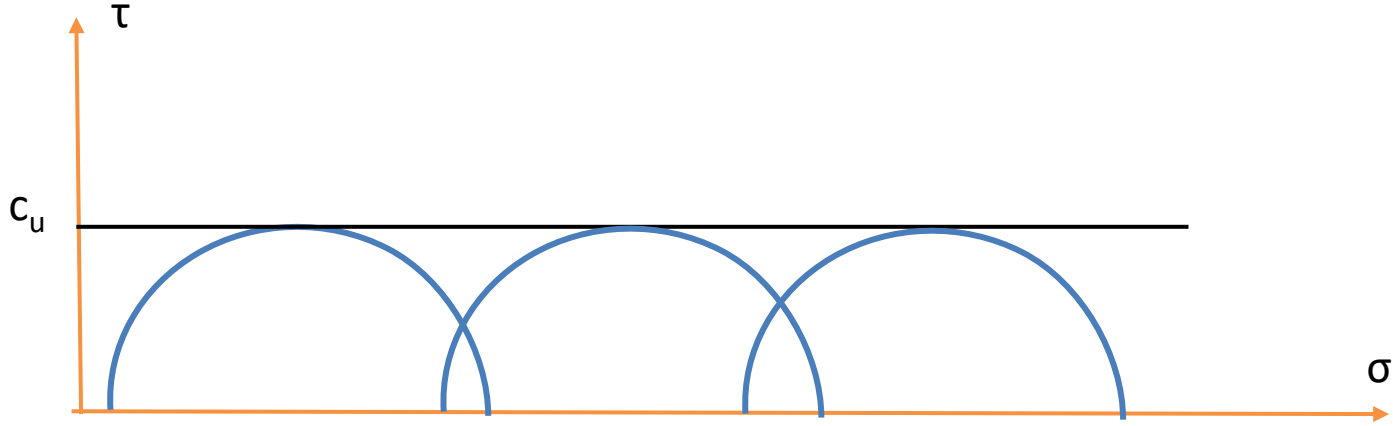
Drenajlı
yükleme

Drenajsız
yükleme

ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ/Deney Türleri

Konsolidasyonsuz – Drenajsız Deneyler (UU-Deneyleri)

Bu tür deneyde, gerek hücre basıncı uygulanmasında gerekse eksenel yükleme sırasında **zemin suyunun numuneden dışarı çıkmasına izin verilmemektedir.**



*Silindirik aynı zemine ait üç farklı numune üç farklı çevre gerilmesine maruz bırakılır ve bu aşamada drenaja izin verilmez.

*Numunelerin doygun olması gereklidir.

*Kumlar, siltler ve killer için uygundur.

*Elde edilecek parametreler $\phi=0$, c_u (s_u)

*Hangi durumları kapsar;

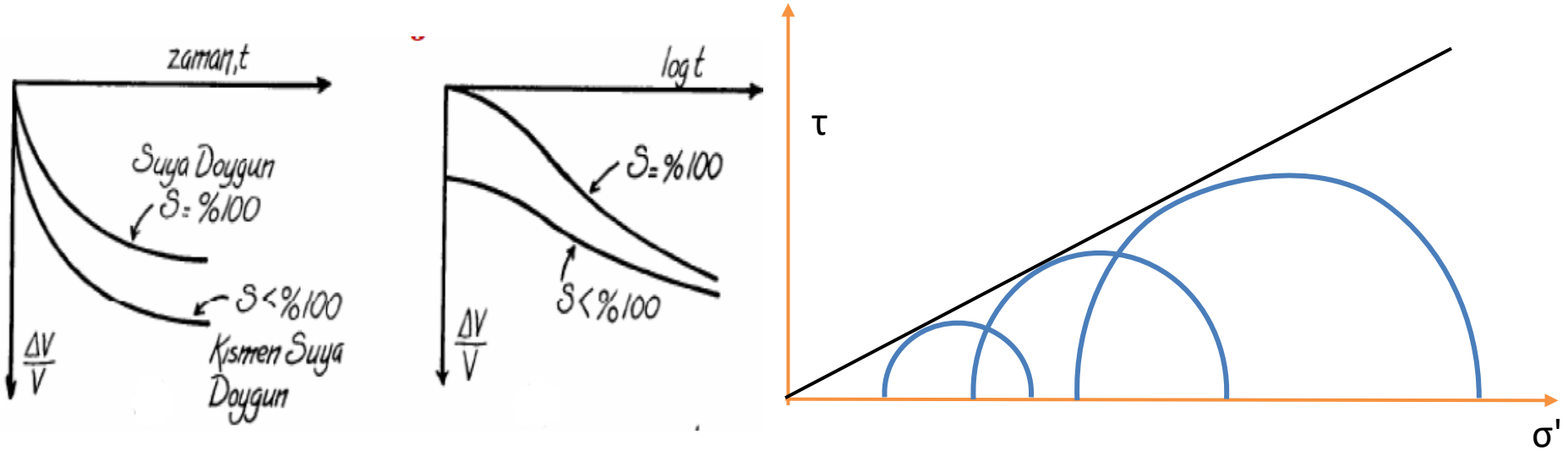
- Bir dolgunun normal konsolide killer üzerine hızlı bir şekilde inşa edilmesi,
- Yumuşak bir zemin üzerinde hızlı bir şekilde temel inşa edilmesi

ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ/Deney Türleri

Konsolidasyonlu – Drenajlı Deneyler (CD- Deneyleri/çok yavaş deney)

Silindirik aynı zemine ait üç farklı numune öncelikle suya doyurulur. Sonraki aşamada numuneler üç farklı çevre gerilmesine maruz bırakılır ve bu aşamada drenaja izin verilir. Ve böylelikle numuneler konsolide olur.

Son aşamada boşluk suyu basıncı oluşmayacak hızda numuneler kesilir.



*Kademeli dolgu imalatı ve Doğal bir yamaçtaki mukavemet değerlerinin belirlenmesi durumlarında zemin özelliklerinin belirlenmesi niyetiyle yapılır.

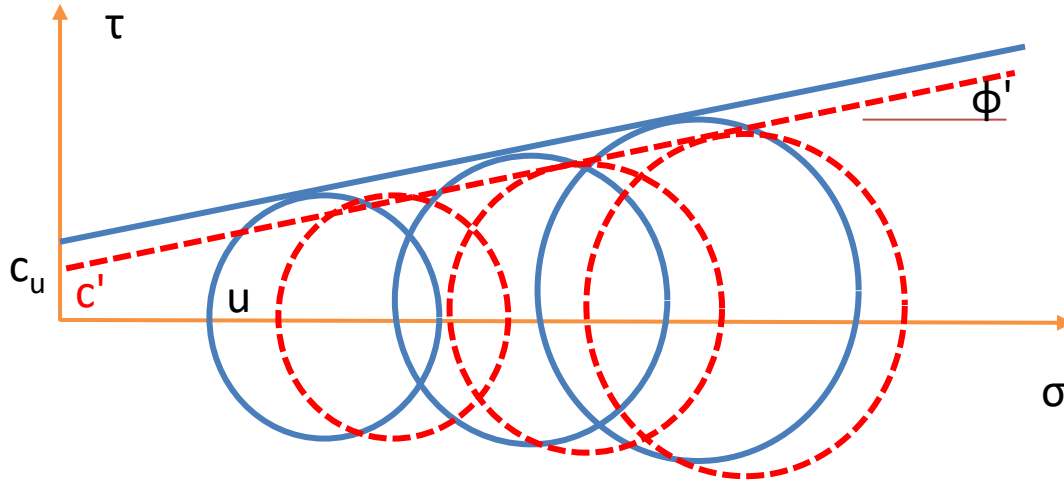
*Drenajlı deneylerde uygulanan hücre basıncı altında, zeminde hacim değişimleri (konsolidasyon) meydana gelir.

*Efektif mukavemet parametreleri elde edilir (ϕ' , c'). Deformasyon modülü (E) elde edilir.

ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ/Deney Türleri

Konsolidasyonlu – Drenajsız Deneyler (CU- Deneyleri)

Birinci aşamada hidrostatik hücre basıncı altında zemin suyunun dışarı çıkmasına (numunenin konsolide olmasına) izin verdikten sonra, ikinci aşamada drenajsız durumda aksel yüklemeye yapılan deneylerdir. Deney sonuçları toplam ve efektif gerilmelere göre çizilir.



Normal konsolide kilerde $c' \approx 0$

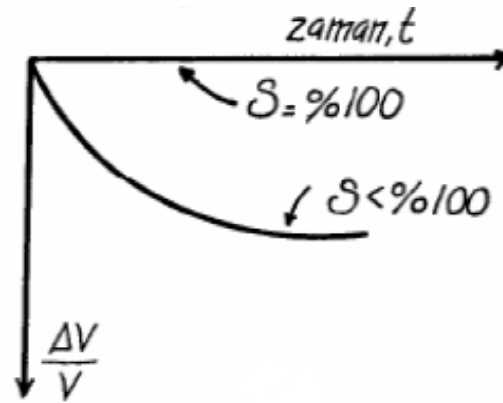
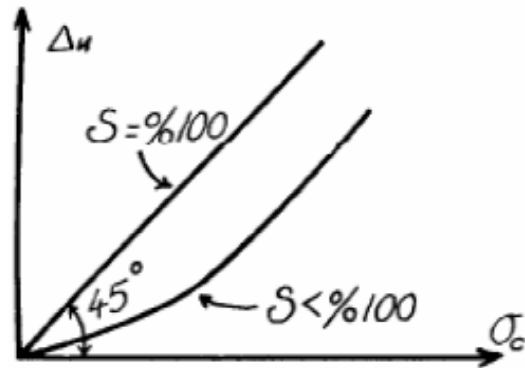
Efektif gerilme türünden; $\tau_f = \sigma' \tan \phi'$

Aşırı konsolide kilerde, $c' \neq 0$

Efektif gerilme türünden, $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$

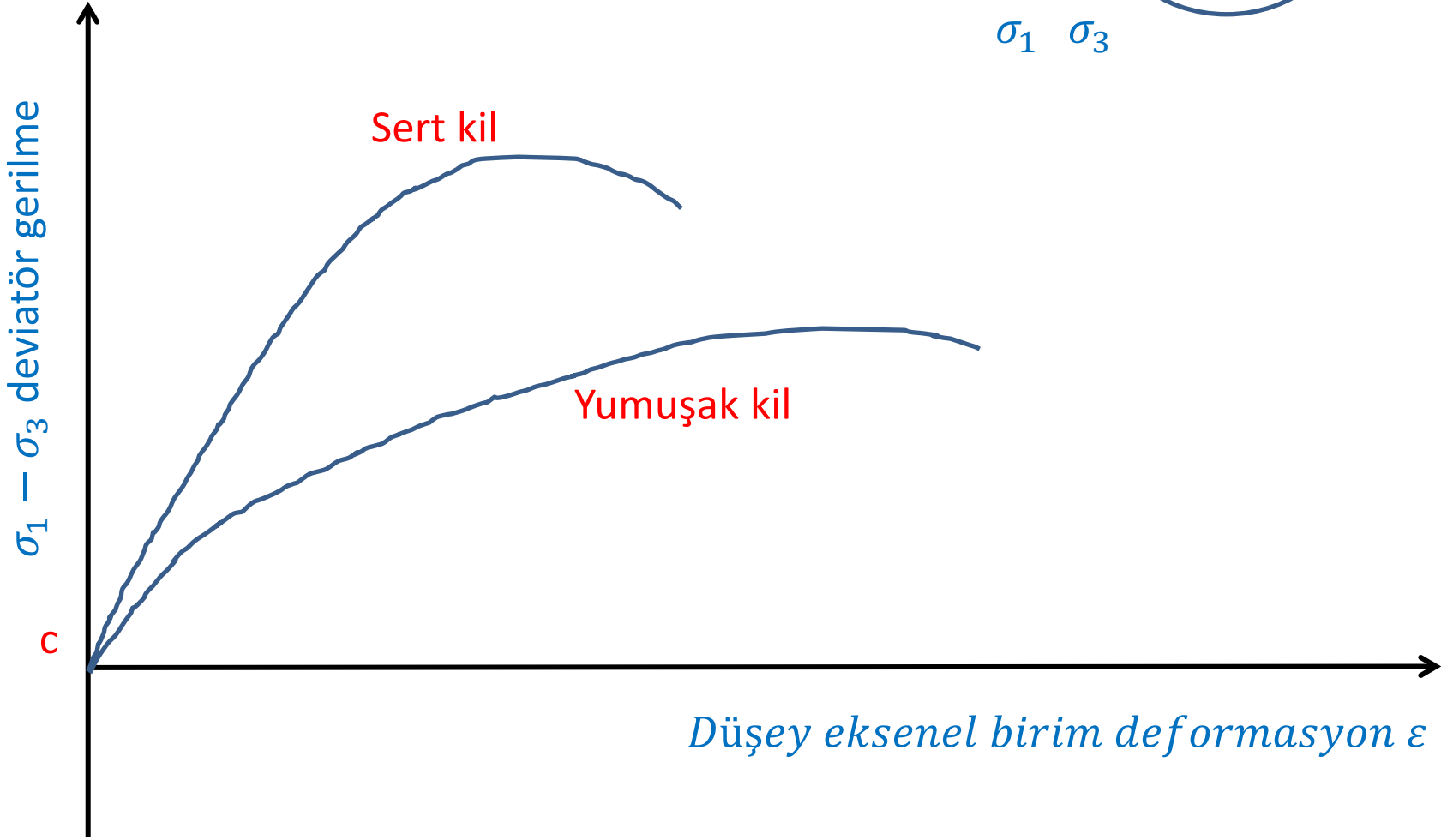
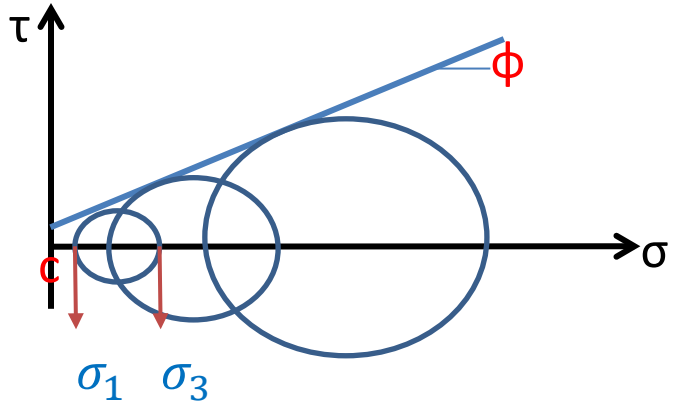
Altındaki zeminde konsolidasyon süreci tamamlanmış bir dolgu üzerine hızlı bir şekilde ilave dolgu yapılması ve doğal bir yamaç üzerine hızlı bir dolgu yapılması gereken zeminlerin özelliklerini belirleme durumlarında uygundur.

Drenajsız deneylerde boşluk suyu basıncında artışlar meydana gelmektedir



ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ SONUÇLARI

Suya doymun killerde tipik deviator gerilme düşey eksenel gerilme ilişkisi



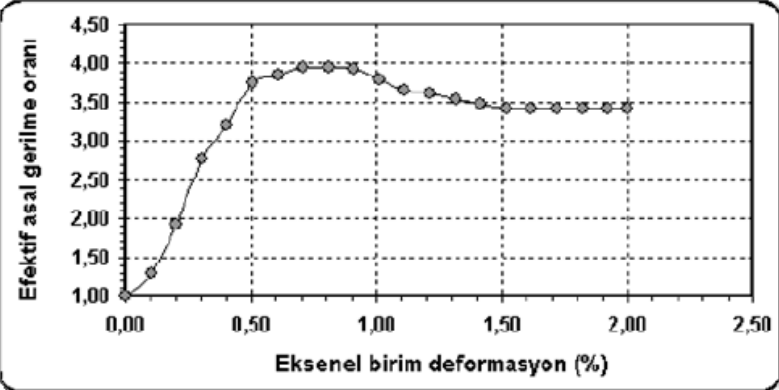
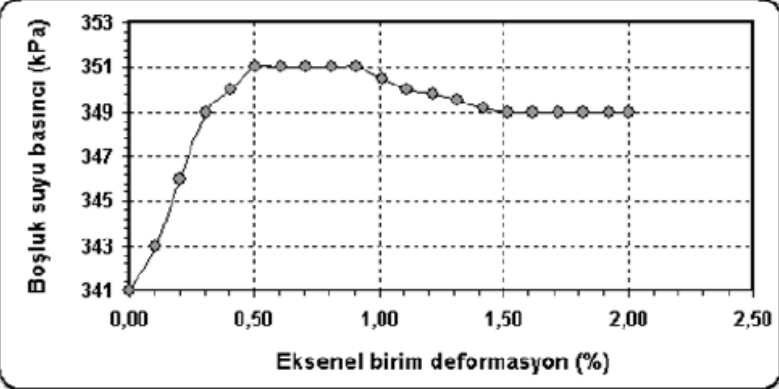
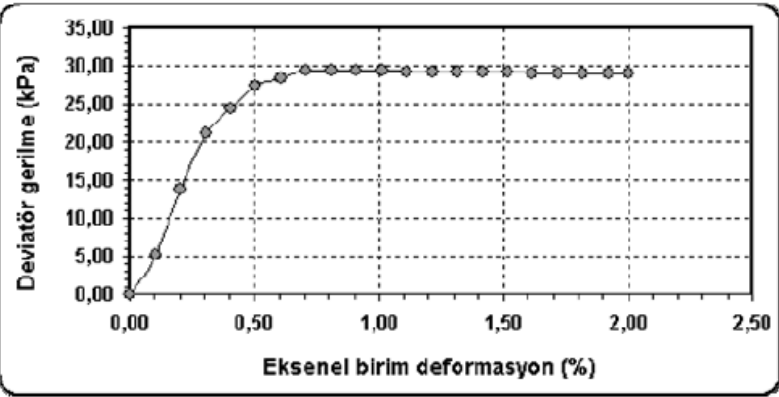
ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ SONUÇLARI

ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ (KONSOLIDASYONLU-DRENAJSIZ: CU-%2 (20 kPa))												
NUMUNYİ KESME VERİLERİ												
No	Defor. Okuma (divs)	Birim Defer. ε , (%)	Yük (divs)	Yük (N)	Boşluk Suyu Basıncı (divs,kPa)	Dev. Gerilme $(\sigma_1-\sigma_3)_m$ (kPa)	Düzel. Dev. Gerilme $(\sigma_1-\sigma_3)_c$ (kPa)	Min. Efek. Asal Geril. σ_3' (kPa)	Mak. Efek. Asal Geril. σ_1' (kPa)	Efektif Asal Geril. Oranı σ_1' / σ_3' (kPa)	p' (kPa)	q' (kPa)
1	0	0,000	35	0,00	341	0,00	0,00	20,00	20,00	1,00	20,00	0,00
2	102	0,102	40	10,43	343	5,31	5,30	18,00	23,30	1,29	20,65	2,65
3	203	0,203	48	27,11	346	13,80	13,77	15,00	28,77	1,92	21,88	6,88
4	304	0,304	55	41,70	349	21,20	21,16	12,00	33,16	2,76	22,58	10,58
5	405	0,405	58	47,96	350	24,36	24,30	11,00	35,30	3,21	23,15	12,15
6	506	0,506	61	54,21	351	27,51	27,44	10,00	37,44	3,74	23,72	13,72
7	607	0,607	62	56,30	351	28,54	28,45	10,00	38,45	3,85	24,23	14,23
8	708	0,708	63	58,38	351	29,56	29,47	10,00	39,47	3,95	24,73	14,73
9	809	0,810	63	58,38	351	29,53	29,42	10,00	39,42	3,94	24,71	14,71
10	910	0,911	63	58,38	351	29,50	29,38	10,00	39,38	3,94	24,69	14,69
11	1011	1,012	63	58,38	351	29,47	29,34	10,50	39,84	3,79	25,17	14,67
12	1112	1,113	63	58,38	350	29,44	29,29	11,00	40,29	3,66	25,65	14,65
13	1213	1,214	63	58,38	350	29,41	29,25	11,20	40,45	3,61	25,83	14,63
14	1314	1,315	63	58,38	350	29,38	29,21	11,50	40,71	3,54	26,10	14,60
15	1415	1,416	63	58,38	349	29,35	29,16	11,80	40,96	3,47	26,38	14,58
16	1516	1,517	63	58,38	349	29,32	29,12	12,00	41,12	3,43	26,56	14,56
17	1617	1,618	63	58,38	349	29,29	29,08	12,00	41,08	3,42	26,54	14,54
18	1718	1,719	63	58,38	349	29,26	29,04	12,00	41,04	3,42	26,52	14,52
19	1819	1,820	63	58,38	349	29,23	28,99	12,00	40,99	3,42	26,50	14,50
20	1919	1,920	63	58,38	349	29,20	28,95	12,00	40,95	3,41	26,48	14,48
21	1999	2,000	63	58,38	349	29,18	28,92	12,00	40,92	3,41	26,46	14,46

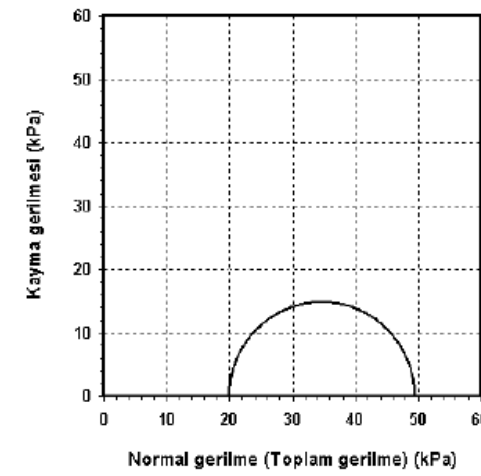
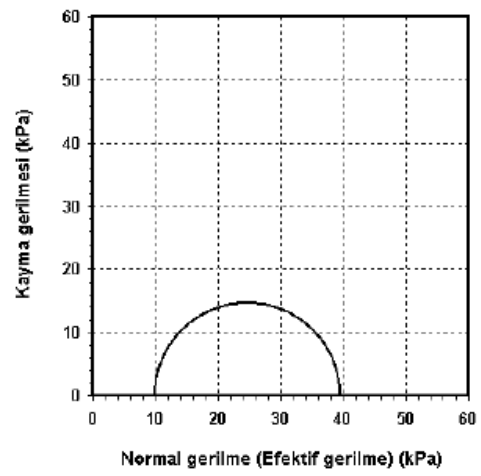
ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ SONUÇLARI

ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ (KONSOLIDASYONLU-DRENAJSIZ: CU-%2 (20 kPa))

GRAFİKLER



ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ (KONSOLIDASYONLU-DRENAJSIZ: CU-%2 (20 kPa))
MOHR DAİRELERİ



ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ / Dezavantajları - Avantajları

Avantajları

- Numuneler (yaklaşık) üniform gerilme ve şekil değiştirmelere maruz kalır.
- Gerilme-şekil değiştirme-mukavemet davranışı elde edilebilir.
- Drenajlı ve drenajsız deneyler yapılabilir.
- ***Drenajsız deneylerde boşluk suyu basıncı ölçülebildiğinden efektif gerilmeler belirlenebilir.***
- Hücre basıncı ve aksenal gerilmelerin farklı kombinasyonları uygulanabilir.
- Arazi yükleme ve drenaj koşullarına uygun yükleme ve drenaj yapılabilir.

KUMUN KAYMA DİRENCİ

İri taneli yada kohezyonsuz olarak nitelendirilen kumlarda sürtünme birinci derece etkin unsurdur. Kumlarda kayma direncini etkileyen başlıca özellikler

- Tanelerin minerolojik kökeni ve bicimi
- Tanelerin boyutu ve dağılımı
- Kuru birim hacim ağırlık ve bağıl sıkılık
- Kumun jeolojik tarihçesi
- Çimentolanma
- Etkiyen efektif gerilmeler
- Doygunluk derecesi

Kum taneleri çoğunlukla kuvars mineralinden oluşmaktadır. Kuvars oldukça dayanıklı olduğu için olağan düzeyde normal ve kesme gerilmesi altında tanelerde kırılma ve ezilme olmayabilir. Ancak var olan diğer mineraller gerilmelere dayanıklı olmadıklarından taneler ezilebilir.

KİLLERİN KAYMA DİRENCİ

Kil ile CL, CH, MH ve şeyl gibi kıvam özellikleri gösteren tüm malzemeler ifade edilmektedir. Yapılan çalışma ve incelemeler, killerde kayma direncinin aşağıdaki özelliklere bağlı olduğunu göstermektedir.

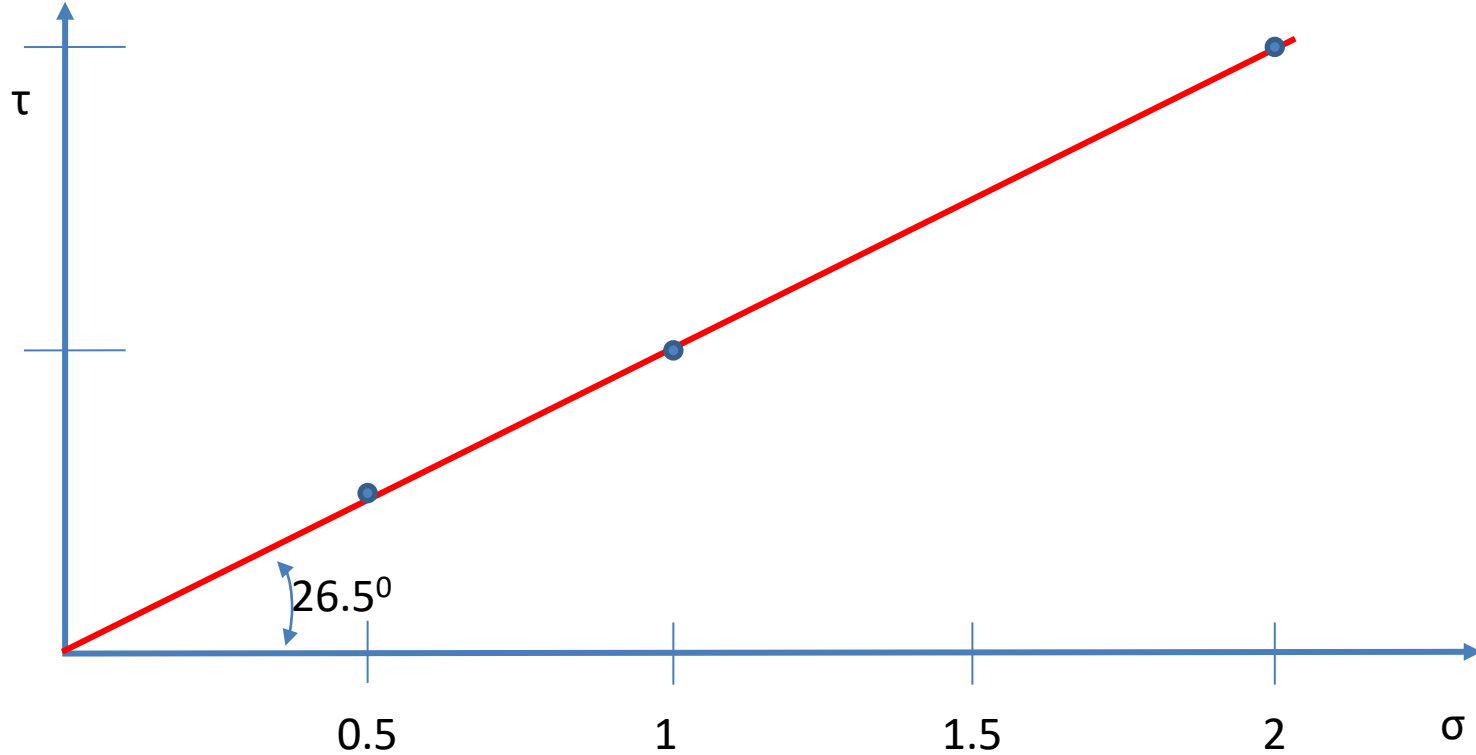
- Efektif gerilme yüzeyi
- Kilin kıvamı (plastisitesi)
- Çimentolanma
- Taneler arası çekme ve itme
- Su içeriği
- Kesilme hızı
- Ortamın anizotropluğu
- Gevreklik
- Deneye tabi tutulan numunenin kalitesi
- Kullanılan ölçüm tekniği

ÖRNEK SORULAR

Soru

Bir kum üzerinde kesme deneyi yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur. Kumun içsel sürtünme açısını belirleyiniz.

Deney No	Normal Kuvvet	Max. Kayma kuvveti	Normal Gerilme (kg/cm ²)	Max. Kayma Gerilmesi (kg/cm ²)
1	18	9,36	0.5	0.26
2	36	17.64	1	0.49
3	72	36.10	2	1



ÖRNEK SORULAR

b. Grafiksel olarak ϕ açısı 30° olarak bulunabilir. Ancak analitik çözüm ile de sorunun cevabına ulaşılabilir.

$$\sin\phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \gg \phi = \arcsin \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \arcsin \frac{200}{400} = 30^\circ$$

c. Mohr kırılma hipotezinden Mohr kırılma zarfının ve kırılma anındaki Mohr dairesinin tanjant koordinatları τ_{ff} ve σ_{ff} dir.

Analitik yoldan;

$$\sigma_{ff} = \frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2} - \frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2} \sin\phi = 200 - 100 \sin 30^\circ = 150 \text{ kpa}$$

$$\tau_{ff} = \sigma_{ff} \tan\phi = 150 \tan 30^\circ = 87 \text{ kpa}$$

Kırılma düzleminin teorik eğim açısı grafiksel olarak kutup yöntemi ile yada analitik olarak bulunabilir. Grafik yöntemi ile 60° olarak bulunmuştur.

Analitik çözüm ise;

$$\alpha_f = 45^\circ + \frac{\phi}{2} = 60^\circ$$