

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DARBELİ TAŞ KOLONLAR (GEOPIER) İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN
MODEL DENEYLERLE İNCELENMESİ**

ŞAMİL ATAMAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOTEKNİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. MEHMET BERİLGİN**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DARBELİ TAŞ KOLONLAR (GEOPIER) İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN
MODEL DENEYLERLE İNCELENMESİ

ŞAMİL ATAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOTEKNİK PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. MEHMET BERİNGEN

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DARBELİ TAŞ KOLONLAR (GEOPIER) İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN
MODEL DENEYLERLE İNCELENMESİ

Şamil ATAMAN tarafından hazırlanan tez çalışması 02 /11/ 2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Mehmet BERİLGEN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Mehmet BERİLGEN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İlknur BOZBEY

İstanbul Üniversitesi

ÖNSÖZ

Günümüzde yumuşak zeminler üzerinde inşa edilcek yapılarda taşıma gücü ve aşırı deformasyon ile diğer duraylılık problemlerini çözmek için çeşitli iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden darbeli taş kolon (DTK) son yıllarda kullanımı giderek artan bir zemin iyileştirme yöntemidir.

Bu yüksek lisans tezinde darbeli taş kolonların iki aşamalı model deneyler ile gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için YTÜ olanakları ile geliştirilen bir darbeli taş kolon makinası kullanılarak iki aşamalı model deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerin ilk aşamasında DTK üretiminden önce Rowe hücresinde 100 kPa basınç altında konsolide edilerek hazırlanan zeminden alınan numuneler ile konsolidasyon ve mukavemet deneyleri yapılmıştır.

Model deney tankında 100 kPa basınç altında konsolide edilmiş zeminde darbeli taş kolon imal edilerek ve daha sonra eksenel olarak yüklenerek göçmeye zorlanmıştır. Yapılan ilk seri model deneylerde taş kolon imalatı sırasında gerçekleşecek iyileşme oranını belirlemek için kolon imalatı öncesi ve kolon imalatı sonrası örselenmemiş örnekler alınarak üzerinde üç eksenli ve basit kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında zemine oturma plakaları, ve gerilme hücreleri yerleştirilerek her iki deney aşamasında yükleme-yer değiştirme, boşluk suyu basıncı ve gerilmeler ölçülmüştür.

Tez çalışmam sürecinde bilgisi, desteği, ilgisi ve sabrıyla bana her zaman yardımcı olan ve her türlü imkanı sunan danışmanım Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN'e teşekkürlerimi sunarım. Yine tez çalışmamın öncesi ve sonrasında her türlü imkanı oluşmasını sağlayan Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN'a teşekkürlerimi iletmek isterim. Yüksek lisans tez çalışmam boyunca ilgilerini benden esirgemeyen her türlü yardımı sağlayan, moral aşılayan hocalarım Yrd. Doç. Dr. Saadet BERİLGİN, Öğr. Gör. Dr. Cem AKGÜNER, Araş. Gör. Dr. Tayfun ŞENGÜL, Araş. Gör. Murat Ergenekon SELÇUK'a, yüksek lisans tezim sürecinde birlikte çalıştığım bana her türlü desteği sağlayan arkadaşlarım İnş. Müh. H. Emrah NAMAL'a, İnş.-Jeof. Müh. Lale ÖNER'e, Geoteknik Müh. Serpen DEMİR'e, Geoteknik Müh. Emre AKINAY'a, Araş. Gör. Mustafa KIRKİT'e, Araş. Gör. Selçuk DEMİR'e, İnş. Müh. Selvinaz DADALOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca karşılaştığım zorlukları aşmamda bana her zaman destek olan, güç veren ve her zaman ayaklarımın üstümde durmamı sağlayıp bu günlere gelmemi sağlayan, borçlarını asla ödeyemeyeceğim çok sevgili anneme, çok sevgili babama, çok sevgili abime ve bana her zaman moral aşıl原因 yakın dostlarıma en içten sevgilerimi, saygılarımı ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Kasım, 2011

Şamil ATAMAN

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT.....	xviii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Hipotez	8
BÖLÜM 2	9
TAŞ KOLONLAR	9
2.1 Giriş	9
2.2 Taş Kolon İmalatı.....	11
2.3 Taş Kolon İmalat Yöntemleri.....	11
2.3.1 Vibro Kompaksiyon Yöntemi	12
2.3.2 Vibro Yer Değiştirme Yöntemi	12
2.3.3 Vibro Öteleme Yöntemi	13
2.3.4 Darbeli Yöntem	14
2.4 İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması	14
2.5 Taş Kolon Elemanlarının Özellikleri.....	15
2.5.1 Taş Kolon Çapı.....	15
2.5.2 Taş Kolonun Boyu	16
2.5.3 Taş Kolon İçsel Sürtünme Açısı	16
2.5.4 Taş Kolon Malzemesi Dane Çapı Dağılımı	16

2.6	Taş Kolon Tasarımı	16
2.6.1	Tasarım Koşulları.....	16
2.6.2	Taşıma Kapasitesinin Arttırılması.....	17
2.6.3	İyileştirilmiş Zeminde Oturma	18
2.6.4	İyileştirilmiş Zemin Parametreleri.....	18
2.6.4.1	İyileştirme Faktörü Hesabı	19
2.6.4.2	Kolon Sıkışabilirlik Etkisinin Değerlendirilmesi	20
2.6.4.3	Derinlik Etkisinin Dikkate Alınması.....	21
2.6.4.4	Uyumluluk Kontrolleri	23
2.6.4.5	İyileştirilmiş Zemin Temellerinde Oturma Hesapları	25
2.7	Taş Kolonlarla İyileştirilmiş Zeminde Taşıma Gücü Hesabı.....	26
2.7.1	Birim Hücre Kavramı	29
2.7.2	Taş Kolonların Taşıma Gücü Hesabı	32
2.7.2.1	Tekil Taş Kolonların Taşıma Gücü.....	32
2.7.2.2	Taş Kolon Gruplarının Taşıma Gücü	36
2.8	Taş Kolon Sistemlerinin Değerlendirilmesi	38
BÖLÜM 3		39
DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLAR.....		39
3.1	Giriş	39
3.2	Darbeli Kırmataş Kolon Yapım Aşamaları	39
3.3	Darbeli Kırmataş Kolon Çeşitleri	42
3.4	Darbeli Kırmataş Kolonlar İle Taş Kolonların Karşılaştırılması	43
3.5	Darbeli Kırmataş Kolon Elemanlarının Özellikleri	43
3.5.1	Darbeli Kırmataş Kolon Çapı	43
3.5.2	Darbeli Kırmataş Kolon Boyu	44
3.5.3	Darbeli Kırmataş Kolon İçsel Sürtünme Açısı	44
3.5.4	Darbeli Kırmataş Kolon Malzemesinin Dane Çapı	45
3.6	Darbeli Kırmataş Kolon Destekli Temellerde Oturma Hesabı.....	45
3.6.1	Üst Bölge Oturmaları	46
3.6.2	Alt Bölge Oturmaları	49
3.7	Darbeli Kırmataş Kolon İle İyileştirilmiş Zeminlerde Temel Taşıma Gücünün Bulunması	51
3.7.1	Tekil Darbeli Kırmataş Kolonun Taşıma Kapasitesi	51
3.7.1.1	Tekil Darbeli Kırmataş Kolonda Genişleme Göçmesi	52
3.7.1.2	Tekil Darbeli Kırmataş Kolon Ucunda Meydana Gelebilecek Göçme .. 53	
3.7.2	Darbeli Kırmataş Kolon Gruplarının Taşıma Kapasitesi	55
3.7.2.1	Darbeli Kırmataş Kolon Gruplarında Genişleme Göçmesi	56
3.7.2.2	Darbeli Kırmataş Kolon Gruplarında Kayma Göçmesi	57
3.7.2.3	Darbeli Kırmataş Kolon Gruplarında Zımbalama Göçmesi	57
3.7.2.4	Darbeli Kırmataş Kolon Gruplarında Zemin-Kolon Bölgesi Altında Göçme	58

BÖLÜM 4	59
ZEMİN ÖZELLİKLERİ	59
4.1 Giriş	59
4.2 Malzeme Özellikleri.....	59
4.2.1 Kaolin Kili.....	59
4.2.2 Kum	60
4.2.3 Çakıl.....	61
4.3 Model Deneylerde Kullanılan Kil kum Karışımın İndeks, Mukavemet ve Sıkışabilirlik Özellikleri.....	62
4.3.1 Rowe Hücresi ile Konsolidasyon Deneyleri.....	62
4.3.2 Ödometre Deneyleri	67
4.3.3 Üç Eksenli Basınç Deneyleri	70
4.3.4 Serbest Basınç Deneyleri	75
4.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	76
BÖLÜM 5	77
DARBELİ TAŞ KOLON LABORATUAR MODEL DENEYLERİ	77
5.1 Giriş	77
5.2 Model Deney Sistemi	78
5.3 Veri Toplama Cihazı ve Sensörler	81
5.4 Model Taş Kolonlar İçin Zemin Yatağı Hazırlanması	84
5.5 Model Darbeli Taş Kolon Üretimi.....	89
5.6 Yükleme Deneyi	93
5.7 Model DTK' dan Alınan Numuneler Üstünde Yapılan Deneyler	97
5.7.1 DTK Yapılan Zemin Üzerinde Veyn ve Cep Penetrometresi Deneyleri ...	97
5.7.2 DTK Yapılan Zemin Tabaksından Alınan Örnekler Üzerinde Üç Eksenli Basınç Deneyleri.....	98
5.7.3 DTK Yapılan Zemin Tabakasından Alınan Örnekler Üzerinde Serbest Basınç Deneyi.....	101
5.8 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	101
5.9 Model DTK'nın Taşıma Gücü.....	103
BÖLÜM 6	105
SONUÇLAR	105
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	110

SİMGE LİSTESİ

a_c	Alan Değişim Oranı
A	Toplam Kolon Alanı
A_c	Taş Kolon Alanı
A_g	Kırmataş Kolonun Enkesit Alanı
A_m	RAP (Rammed aggregate piers) İle Destekli Temelin Üst Bölgesindeki Zemin Alanı
A_{shaft}	Kolon Yapımı Sırasında Meydana Gelen Genişlemeden Sonraki Kolon Yüzey Alanı
c	Kohezyon
c_1	Taş Kolon Dizilimine Göre Saptanan Sabit Bir Katsayı
c_{avg}	Temel Altı Kayma Yüzeyinin Kompozit Kohezyonu
c_u	Kilin Drenajsız Kayma Mukavemeti
C_c	Sıkışma İndisi
d	Derinlik
d'	Kolon Efektif Çapı
d_f	İlk Tabakanın Tepe Noktasından Uzaklığı
D	Kolon Çapı
D_c	Taş Kolon Malzemesi Tek Boyutlu Sıkışma Modülü
D_e	Eşdeğer Çap
D_s	Zeminin Tek Boyutlu Sıkışma Modülü
e_0	Başlangıç Boşluk Oranı
E_{LZ}	Alt Bölge Elastisite Modülü
E_s	Zeminin Elastisite Modülü
f_d	Taşıma Gücündeki Derinlik Faktörü
f_s	Kolon Çevre Yüzeyi Boyunca Birim Taşıma Gücü
f_{si}	i.Tabakadaki Kolon Çevre Yüzeyindeki Sürtünme
F_c', F_q'	Vesic Boşluk Genişleme Faktörleri
F_v	Kırmataş Kolon Boyunca Uygulanan Düşey Kuvvet
FR	Sürtünme Oranı

H_{LZ}	Alt Bölge Kalınlığı
H_{UZ}	Kolon Boyuna Kolon Çapı Eklenerek Bulunan Uzunluk
I_S, I_F	Westergaard Etki Katsayıları
I_q	Westergaard Etki Faktörü
k	Yay Sabiti
k_m	Zeminin Yataklanma Katsayısı
k_p	Kolon Elemanı Yataklanma Katsayısı
K	Yanal Toprak Basıncı Katsayısı
K_{ac}	Taş Kolon Malzemesi Aktif İtki Katsayısı
K_{OC}	Taş Kolon Malzemesinin Sükûnetteki Toprak Basıncı Katsayısı
K_p	Taş Kolon Malzemesi Pasif İtki Katsayısı
n	Tabaka Sayısı
n	Oturma Azaltma Faktörü
n_s	Gerilme-Konsantrasyon Oranı
N_c, N_q, N_γ	Taşıma Gücü Faktörleri
p	İyileştirilmiş Zemine Uygulanan Temel Tabanı Basıncı
p_i	i. Tabakadaki Kolonun Çevre Uzunluğu
P	Temel Yüğü
P_0'	Başlangıç Düşey Efektif Gerilme
P_c	Temelden Dolayı Taş Kolona Gelen Yüğü
P_s	Temelden Dolayı Zemine Gelen Yüğü
q_0	Ortalama Temel Tabanı Basıncı
q_{bottom}	Kırmataş Kolon Yapılmış Tabakanın Altında Oluşan Gerilme
q_p	Kolon Elemanı Üzerindeki Gerilme
q_p	Kolona Etkiyen Düşey Gerilme
q_m	Zemine Etkiyen Düşey Gerilme
$q_{tip,g}$	Kolon Ucu Taşıma Gücü
$q_{ult,bot,g}$	Kırmataş Kolon Uç Taşıma Kapasitesi
R_a	Alan Değişim Oranı
R_a'	İndirgenmiş Alan Değişim Oranı ($0.4 R_a$)
R_s	Kolon-Zemin Gerilme Oranı
R_s'	İndirgenmiş Gerilme Konsantrasyon Oranı (n_s)
s	Merkezden Merkeze Taş Kolonlar Arası Mesafe
$S_{c,LZ}$	RAP İle Destekli Temelin Alt Bölgesindeki Birincil Konsolidasyon Oturması
$S_{i,LZ}$	RAP İle Destekli Temelin Alt Bölgesindeki Ani Oturma Miktarı
S_{LZ}	RAP İle Destekli Temelin Alt Bölgesindeki Toplam Oturma Miktarı
S_{UZ}	RAP İle Destekli Temelin Üst Bölgesindeki Ani Oturma Miktarı
$S_{s,LZ}$	RAP İle Destekli Temelin Alt Bölgesindeki İkincil Konsolidasyon Oturması

S_{∞}	Homojen Zeminde Sınırsız Kolon Dizilimi ve Limitsiz Yükleme Alanı Altındaki Oturma
$[t g \phi]_{avg}$	Kompozit İçsel Sürtünme Açısının Tanjantı
u_o	Boşluk Suyu Basıncı
ν	Poisson Oranı
W_c	Taş Kolon Malzemesi Ağırlığı
W_g	Kırmataş Kolon Ağırlığı
W_s	Zemin Ağırlığı
β	Göçme Yüzeyi Eğimi
γ_m	Zemin Birim Hacim Ağırlığı
γ_s	Kohezyonlu Zeminin Islak Doygun Birim Hacim Ağırlığı
δP	Düşey Gerilmedeki Artış
Δz_i	i.Tabakada Kolon Uzunluğu
μ_c	Taş Kolon İçin Gerilme Konsantrasyon Faktörü
μ_s	Zeminin Poisson Oranı
σ_1	Nihai Düşey Gerilme
σ_3	Yanal Çevre Gerilmesi
$\sigma_{r,lim}$	Sınır Radyal Gerilme
σ'_v	Kolon Ucundaki Düşey Efektif Gerilme
σ'_{vo}	Düşey Efektif Gerilme
$\sigma_{v,ave}$	Ortalama Düşey Efektif Gerilme
σ_{ro}	Kolon İmalatından Sonrası Toplam Radyal Gerilme
ϕ	Kolon Malzemesi İçsel Sürtünme Açısı
ϕ_c	Taş Kolon Malzemesi İçsel Sürtünme Açısı
ϕ_s	Zeminin İçsel Sürtünme Açısı

KISALTMA LİSTESİ

BSB	Boşluk Suyu Basıncı
BST	Kuyu Kesme Testi
CPT	Koni Penetrasyon Testi
CU	Konsolidasyonlu Drenajsız Üç Eksenli Deney
DKK	Darbeli Kırmataş Kolon
DTK	Darbeli Taş Kolon
OİO	Oturma İyileştirme Oranı
PP	Boşluk Suyu Basıncı Ölçer
RAP	Darbeli Kırmataş Kolon
SP	Toprak Basıncı Ölçer
SPT	Standart Penetrasyon Testi
UU	Konsolidasyonsuz Drenajsız Üç Eksenli Deney

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1	Yük - oturma grafiği [6].....	7
Şekil 1. 2	Zamana bağlı oturma oranı [6].....	7
Şekil 2. 1	Taş kolon yapım aşamaları [9].....	11
Şekil 2. 2	Vibro kompaksiyon yöntemi imalat adımları [12].....	12
Şekil 2. 3	Vibro yer değiştirme imalat adımları [12].....	13
Şekil 2. 4	Alttan beslemeli yöntem imalat aşamaları [12].....	14
Şekil 2. 5	Zemin mukavemetinin teorik kolon çapına etkisi [12].....	15
Şekil 2.6	$\mu_s = 1/3$ için iyileştirme faktörü, n_0 [14].....	20
Şekil 2.7	$\mu_s = 1/3$ için kolon sıkışabilirlik düzeltmesi eğrileri [14].....	21
Şekil 2.8	$\mu_s = 1/3$ için derinlik faktörü [14].....	23
Şekil 2.9	Derinlik faktörü limit değerleri [14].....	25
Şekil 2.10	(a)Tekil temellerin oturması [14].....	26
Şekil 2.10	(b)Şerit temellerin oturması [14].....	26
Şekil 2.11	Tekil taş kolon göçme mekanizmaları [15].....	27
Şekil 2.12	Taş kolona etkiyen farklı yükler [15].....	27
Şekil 2.13	Grup taş kolonlarının göçme mekanizmaları [15].....	28
Şekil 2.14	Homojen olmayan kohezyonlu zeminlerde taş kolon göçme mekanizmaları [15].....	29
Şekil 2.15	Taş kolonlarda eşkenar üçgen dizilimi (a) plan, (b) geometrisi [15].....	29
Şekil 2.16	Birim hücre tanımlaması (a) plan, (b) birim hücre, (c) kesit [15].....	30
Şekil 2.17	Tek bir kolonun kabarma göçmesi [15].....	33
Şekil 2.18	Vesic silindirik boşluk genişleme faktörleri [15].....	35
Şekil 2.19	Taş kolon grup analizleri [15].....	36
Şekil 3.1	Darbeli kırmataş kolon yapım aşamaları [20].....	40
Şekil 3.2	Darbeli kırmataş kolonun açılması [22].....	40
Şekil 3.3	Kılıf yardımıyla darbeli kırmataş kolon açılması [22].....	41
Şekil 3.4	Kırmataş kolon malzemesinin yerleştirilmesi [22].....	41
Şekil 3.5	Darbeli kırmataş kolon sıkıştırılması [22].....	42
Şekil 3.6	Darbeli kırmataş kolon çeşitleri [20].....	42
Şekil 3.7	DKK üzerinde uygulanan arazi kesme deneyi [20].....	44
Şekil 3.8	DKK üzerinde uygulanan üç eksenli basınç deneyi [23].....	45
Şekil 3.9	DKK ile desteklinmiş temellerde oturma hesabı [20].....	45
Şekil 3.10	DKK için yay modeli [20].....	47
Şekil 3.11	Westergaard etki faktörü [24].....	50
Şekil 3.12	Tekil kırmataş kolonda göçme mekanizmaları [24].....	51

Şekil 3.13	DKK gruplarında göçme mekanizmaları [25]	56
Şekil 4.1	Kum malzemenin granülometresi	60
Şekil 4.2	Taş kolonlar için kullanılan çakılın granülometresi.....	61
Şekil 4.3	Rowe hücrenin düşey yönlü konsolidasyon deneyleri için düzenlenmiş hali	65
Şekil 4.4	Rowe hücresi ve konsolidasyon deneyi.....	65
Şekil 4.5a	Rowe Hücresinde 25 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği	66
Şekil 4.5b	Rowe Hücresinde 50 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği	66
Şekil 4.5c	Rowe Hücresinde 100 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği	67
Şekil 4.6a	Ödometre deneyinde 100 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği	68
Şekil 4.6b	Ödometre deneyinde 200 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği	68
Şekil 4.6c	Ödometre deneyinde 400 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği	69
Şekil 4.6d	Ödometre deneyinde 800 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği	69
Şekil 4.6e	Ödometre e-log p eğrisi.....	70
Şekil 4.7	Üç eksenli hücrede drenaj ve boşluk suyu basıncı ölçüm vanaları.....	71
Şekil 4.8	Rowe Hücresinden üç eksenli deneyi için numune alımı	72
Şekil 4.9	Üç eksenli basınç deneyi düzeneği	72
Şekil 4.10	Şekil değiştirme - deviatör gerilme grafiği.....	73
Şekil 4.11	Şekil değiştirme - boşluk suyu basıncı grafiği	73
Şekil 4.12	CU deneyi Mohr Dairesi.....	74
Şekil 4.13	Şekil değiştirme - deviatör gerilme grafiği.....	74
Şekil 4.14	UU deneyi Mohr Dairesi	75
Şekil 4.15	Şekil değiştirme - deviatör gerilme grafiği.....	75
Şekil 5.1	Deney sistemi ana elemanları	78
Şekil 5.2	Dokunmatik kontrol paneli.....	79
Şekil 5.3	Deney sisteminin ön cepheden görünümü	79
Şekil 5.4	Model deney tankı.....	80
Şekil 5.5	Model tankın çizimi	81
Şekil 5.6	imcStudio veri toplama cihazı	82
Şekil 5.7	Toprak basıncı ölçer (soil pressure transducer)	83
Şekil 5.8	Boşluk suyu basıncı ölçer	83
Şekil 5.9	Mikser içerisinde hazırlanan zemin numunesi	84
Şekil 5.10	Tank tabanına çakıl ve üzerine geotekstil filtre yerleştirilmesi	85
Şekil 5.11	75 cm seviyesinde tankın içine yerleştirilen sensörler.....	86
Şekil 5.12	Tankın 105 cm yüksekliğine kadar doldurulan zemin	86
Şekil 5.13	Hazırlanan zemin numunesine geotekstil ve çakıl serilmesi.	87
Şekil 5.14	Tank içine yerleştirilen hava yastığı.....	88
Şekil 5.15	Üstü kapatılıp, düşey deplasman ölçerler yerleştirilen tanklar.....	88
Şekil 5.16	Model tankta ölçülen oturma - zaman değişimi	89
Şekil 5.17	Cep penetrometresi ve veyn ölçümleri.	90

Şekil 5.18	Model deney tankında DTK üretimine başlamadan önceki görünüş	90
Şekil 5.19	DTK makinesinin çakıl haznesi	91
Şekil 5.20	Deney sonu tankta oluşan DTK.....	91
Şekil 5.21	(a) Deney 1 ve (b) Deney 2 için DTK üretimi sırasında sensörler tarafından alınan ölçümler.	92
Şekil 5.22	Yükleme plakasının ve deplasman ölçerin yerleşimi	93
Şekil 5.23	Yük deplasman grafiği.....	94
Şekil 5.24	(a) DTK 1, (b) DTK 2 ve (c) Zemin yükleme deneyleri sırasında sensör ölçümleri	95
Şekil 5.25	Deney sonucunda elde edilen darbeli kırmataş kolon tabakaları	96
Şekil 5.26	Deney sonu kolon içinde oluşan boğumlar.	96
Şekil 5.27	Veyn deneyi ölçümleri	97
Şekil 5.28	Cep penetrometresi ölçümleri	98
Şekil 5.29	Şekil değiştirme- deviatör gerilme grafiği.....	98
Şekil 5.30	Şekil değiştirme- boşluk suyu basıncı grafiği	99
Şekil 5.31	CU deneyi Mohr Dairesi.....	99
Şekil 5.32	Şekil değiştirme- deviatör gerilme grafiği.....	100
Şekil 5.33	UU deneyi Mohr Dairesi	100
Şekil 5.34	Serbest basınç deneyi grafiği	101
Şekil 5.35	CU deneyi karşılaştırılması.....	102
Şekil 5.36	UU deneyi karşılaştırılması	103
Şekil 5.37	Serbest basınç deneyi karşılaştırılması	103

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1. 1 Taş kolon ve DKK inşa sahasının zemin özelliklerinin karşılaştırılması [4]... 4	
Çizelge 1. 2 Yükleme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması [4]	5
Çizelge 1. 3 Oturma sonuçları [4].....	5
Çizelge 2. 1 Deney sahaları zemin özellikleri [13].....	17
Çizelge 4.1 Kumun indeks özellikleri.....	61
Çizelge 4.2 Çakılın indeks özellikleri.....	61
Çizelge 4.3 Deneyde Kullanılan Karışımın İndeks Özellikleri.....	62
Çizelge 5.1 İyileştirilmemiş Zemin Deneyleri Sonuçları	101
Çizelge 5.2 İyileştirilmiş Zemin Deney Sonuçları.....	102

DARBELİ TAŞ KOLONLAR (GEOPIER) İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN MODEL DENEYLERLE İNCELENMESİ

Şamil ATAMAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN

Yumuşak zeminler üzerinde inşa edilecek yapılarda taşıma gücü ve aşırı deformasyon ile diğer duraylılık problemlerini (yanal yayılma, yerel göçme vs.) çözmek için çeşitli iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında zemine darbe uygulayarak yerleştirilen taş kazık/kolon temel uygulaması, özellikle inşaat süresini kısaltması, yüksek güvenilirlik, mevcut makine ve ekipmanlarla inşa edilebilme avantajlarından dolayı yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde kullanımını cazip hale getirmektedir.

Son yıllarda kullanımı hızla artan bu kolonlar Geopier ismi ile patentlendirilmiş olup delgi kazık tekniğine benzer şekilde zeminde açılan çukura belirli yüksekliklerde çakıl-taş yerleştirilip darbe uygulayarak sıkıştırılmak suretiyle imal edilmektedir. Kazıkların imalatı sırasında kazı çukurunun duraylılığının sağlanamadığı durumlarda Geopier kolonlar kılıf kullanılarak imal edilmektedir. Darbeli (Impact) kolon olarak adlandırılan bu uygulamada bir kılıf, ucuna yerleştirilmiş bir plaka ile istenilen kolon derinliğine kadar zemine sürüldükten sonra bir miktar yukarı çekilerek özel başlığa sahip kılıf ile darbe uygulanmakta, istenilen sıklığa ulaşıncaya işlem tekrarlanarak kolon imalatı gerçekleştirilmektedir.

Bu tez çalışmasında yumuşak bir zeminde imal edilmiş darbeli taş kolonların imalatı sırasında zeminde gerçekleştirebileceği iyileştirme oranı ve yük altında çalışma mekanizmasının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için YTÜ olanakları ile geliştirilen bir tokmaklanmış taş kolon makinesi kullanılarak iki aşamalı model deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deneylerin ilk aşamasında yumuşak killi malzeme yerleştirilmiş bir model deney tankında darbeli taş kolon imal edilmiş ve daha sonra aksenel olarak yüklenerek göçmeye zorlanmıştır. Yapılan iki adet model deneyde taş kolon imalatı sırasında gerçekleşen iyileşme oranını belirlemek için kolon imalatı öncesi ve kolon imalatı sonrası örselenmemiş örnekler alınarak üzerinde üç aksenli ve basit kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında zemine oturma plakaları ve gerilme hücreleri yerleştirilerek her iki deney aşamasında yükleme-yer değiştirme, boşluk suyu basıncı ve gerilmeler ölçülmüştür.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen model deneyler ile darbeli taş kolonların çevre zeminde gerçekleştirdiği iyileştirme oranı ve aksenel yüklenmesi durumunda çalışma mekanizması hakkında önemli ipuçları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: taş kolon, zemin iyileştirmesi, darbeli kırmataş kolon, GeoPier, model deney.

**INVESTIGATING BEHAVIOR OF SOIL IMPROVED BY CONSTRUCTING
RAMMED AGGREGATE PILE WITH MODEL EXPERIMENTS**

Şamil ATAMAN

Department of Civil Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet BERİLGEN

Some soil improvement methods are developed for solving the problems associated with bearing capacity and large deformation of the structure that will be built on soft grounds and the stability problems (lateral spread, local failure etc.). One of these methods is the application of placing stone columns under the foundation of the structure. This method is usually preferred improvement soft soil because it shortens the construction time, has high reliability and is easily applicable with current machines and equipments.

Recently, this application which is patented under the name of “Geopier”, is being used widely. The application is similar to “drilled pile method”. Gravels are poured into a hole that are drilled into the ground with certain height, then they are compacted by a hammer. If drill stability failure occurs during the production of piles, Geopier columns are produced by using a cover. In this application which is called as “Impact column”, a cover is placed on the ground in desired column depth with a plate placed on its edge and then an impact is applied with a cover that has a special cep. This process continues until the desired density is achieved.

This thesis improvement ratio and working mechanism of rammed aggregate pile that are produced in a soft ground is aimed. For this purpose, model experiments are conducted by in two steps an rammed aggregate pile machine which is developed by utilizing YıldızTechnical University facilities is used.

In the first step of the experiments, rammed aggregate pile columns are constructed in a tank which contains soft clay. Then, it is applied an axial load until the failure of the column. In both experiments, in order to determine the improvement ratio during the construction of the rammed aggregate pile, undisturbed samples are investigated by applying triaxial both before and after the column production. During the experiments, load-displacements, porewater pressures and stresses values are measured by displacements transducer, porewater transducer and load cells.

In conclusion important result about the improvement ratio of surrourndary due to rammed aggregate pile and working mechanism of rammed aggregate pile under axial load are obtained by conducting model experiments.

Key words: Stone column, ground improvement, rammed aggregate piers, GeoPier, model testing.

1.1 Literatür Özeti

Durgunoğlu vd.'nin [1]'de verilen Türkiye'de ilk olarak Borçelik Gemlik Soğuk Hadde Fabrikası'nda taş kolon uygulaması ve zemin ıslahı amacı ile, taş kolonların projelendirilmesi, yapılan deneyler, kalite kontrolü ve bunların sonuçları ele alınmıştır. Bu amaçla, sıvılaşma iyileşmesine yönelik olarak doğal zemin kotundan itibaren 50 cm çapında ve 12 m boyunda taş kolonlar ile ıslah edilmesi projelendirilmiştir. Ayrıca tesis dahilinde ki yüksek stok sahası yüklerini taşımak ve oturmaları azaltmak için de bazı bölgelerde sağlam (taşıyıcı) zemine kadar taş kolon uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Taş kolon elemanları muhafaza borusunun üstten darbe yapılarak sürülmesi ile oluşturulmuştur. Bu yöntemde, ucu saç tapa ile kapalı olan muhafaza borusu üstten bir darbeli dizel çekiç ile vurularak istenilen derinliğe kadar sürülmüş olup, boru içerisine taş kolon malzemesi doldurulmuştur. Muhafaza borusu titreşim ile yukarı çekilerek imalat tamamlanmıştır. Taş kolon yapımında kullanılan malzeme; emiz, sert, plastik olmayan, kimyasal reaksiyona girmeyen, dane boyutu 10-100 mm olan ve içeriği 200 No' lu elekten geçen ince malzeme miktarı % 5'den az olan doğal kırmataştır.

Raju [2]'de çok yumuşak killerde taş kolon yöntemi uygulandığında oluşan konsolidasyon sürecini incelemiştir. Taş kolonlar genellikle gevşek siltli kumlar, yumuşak siltler ve kayma mukavemeti 15 kPa' dan yukarı olan killer gibi zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada taş kolon metodunun drenajsız kayma mukavemeti 10 kPa' dan az olan çok yumuşak killer için uygun olup olmadığı Malezya'nın Kinrara ve Kebun şehirlerinde gerçekleştirilen araştırmalar ile

incelenmiştir. Kinrara'daki madencilik etkinlikleri nedeniyle geniş çukurlar açılmakta ve bu çukurların içi çamur ile dolu bulunmaktadır. Bazı yerlerde bu çamurların kalınlıkları 16 m'yi bulmakta ve derinliği boyunca SPT değerleri sıfıra eşit olmaktadır. Çamur havuzu derinliğinin 16 m olduğu noktadan bir otoyol geçirilmesi araştırılmıştır. CPT deneyleri sonuçlarında ise uç direnci değerleri 0.15 MPa ile 1.0 MPa arasında değişmektedir. Kayma mukavemeti değerleri tepede 6 kPa'dan azdır ve derinlikle birlikte her metrede 2-3 kPa artmaktadır. Kebun şehri ise Malezya'nın batı sahilinde bulunan bir liman kenti olma özelliği taşımaktadır. Sahil kesiminde zeminin üst kısmında baskın olarak kalınlığı 35 m'den fazla olan çok yumuşak deniz kili bulunmaktadır. Bu bölgede ki CPT deneyi sonuçlarında ise uç direnci 0.1 MPa ile 0.3 MPa arasında değişmektedir. Drenajsız kayma mukavemeti değerleri ise 5 kPa'dan azdır ve derinlikle birlikte her metrede 1 kPa artmaktadır.

Bu çalışmada kolon çapları 1 m olmakla beraber, bazı durumlarda kolon çapı 1.2 m'den fazla alınmıştır. Kolonlar bazı yerlerde 1.5 m, bazı yerlerdeyse 2 m aralıklara sahip olacak yerleşim düzeninde ve sıkı veya katı tabakaya ulaşacak boyda imal edilmişlerdir. Oturma ölçüm aletleri ile oluşacak olan oturmaların geniş bir alanda ölçülmesine çalışılmıştır. Her sahaya yaklaşık 40 adet ölçüm cihazı yerleştirilmiştir. Kinrara da alınan maksimum oturma 25 cm olarak ölçülmüştür. Kebun da ise maksimum oturma 40 cm olarak ölçülmüştür. Raju [2] iki saha arasındaki zemin şartları farklı olduğu için oturma değerlerinin direkt karşılaştırılamayacağını söylemiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmaya göre taş kolonları drenajsız kayma mukavemeti 10 kPa'dan küçük olan çok yumuşak killi zeminlerde uygulamak mümkündür. Uygulanan zemin iyileştirmesini takiben 10 m'lik otoyol dolgusu inşa edilmiştir ve meydana gelen oturmaların kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.

Wissmann vd. [3]'de darbeli kırmataş kolonların tasarımını oturma ve genel stabilite yönünden incelemişlerdir. Darbeli kırmataş kolon yapımında kullanılan malzemenin yüksek kayma dayanımı, şev ve dolgu zeminlerde kayma direncini arttırarak göçmeye karşı yüksek güvenlik vermektedir. Kolonların bu ve bunun gibi özelliklerini belirlemek için arazi ve laboratuvar ortamında çeşitli deneyler yapmışlardır. Arazide kırmataş kolon

üzerinde yapılan kesme deneyleri ile laboratuvar ortamında yapılan üç eksenli deneyler neticesinde kolonların yüksek kesme dayanımına sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

Darbeli kırmataş kolon elemanlarının rijitliği ve inşası sırasında zeminde oluşturulan yanal gerilme artışı nedeniyle iyileştirme yapılan bölgede kompozit rijitlik artmakta ve oturmaların azalması sağlanmaktadır. Kolon imalatı ile oluşacak radyal drenaj oturmalarının daha hızlı olması sağlanmaktadır. Iowa' da yapılan arazi deney çalışmasında köprü ayağı altındaki kırmataş kolon elemanları incelenmiştir. İnşaat sonrasında güçlendirme yapılmış bölgede alınan ölçümlerde oturmanın yaklaşık 2.5 cm olduğu görülmüştür ki bu değer iyileştirme yapılmayan bölgede tahmin edilen oturmanın %10'u kadardır.

White vd. [4]'te, Des Moines, Iowa'daki bir otoyol genişletme inşaatında komşu iki dolgu sahasından birinin taş kolonlar (TK) ile diğerinin de darbeli kırmataş kolonlar (DKK) ile iyileştirilmesini araştırmışlardır. Bu çalışma ayrıca taş kolon uygulaması ve darbeli kırmataş kolon uygulamasının karşılaştırılması adına ilk proje olma özelliğini taşımaktadır. Komşu iki dolgu sahasının zemini taşıyabilmesi için, birinde taş kolonlar kullanılarak sıkışabilirliği azaltmak ve kayma dayanımını arttırmak hedeflenmiş; diğerinde ise oturma hızının artırılarak oturmaların azaltılması amaçlanmıştır. Bunun için de her iki sahada da uygulanan metotların ne kadar yararlı olduğunu ortaya çıkarmak için Standart Penetrasyon Testi (SPT), Kuyu Kesme Testi (BST) ve yükleme deneyleri yapılmıştır.

Taş kolon elemanları ile darbeli kırmataş kolon elemanlarının inşa edildiği sahalarda zemin özellikleri büyük oranda benzerlikler göstermekle birlikte, yer yer bazı farklılıklar söz konusu olup, Çizelge 1.1' de zemin özellikleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Taş kolonlar büyük çaplı ve uzun elemanlar olarak seçilmişlerdir. Darbeli kırmataş kolon elemanlar ise küçük çaplı ve kısa fakat yüksek rijitlikte seçilmişlerdir. Dolgu yerleştirilmeden önce arazi deneyleri ve tam ölçekli yükleme deneyleri yapılarak tasarım için gerekli zemin parametreleri belirlenmiştir. Piezoelektrik elemanlar geoteknik mühendisliğinde cisim dalgalarını ölçmek için kullanılmaktadır. Bu elemanların boyutlarının küçük olması sebebiyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Küçük boyuttaki piezoelektrik eleman zemin içine yerleştirilerek laboratuvar

kullanılabilmektedir. Zemin numunesi çapları genelde 3.56 cm ile 7.6 cm arasında değişmekte olup boy/çap oranı yaklaşık ikidir.

Çizelge 1. 1 Taş kolon ve DKK inşa sahasının zemin özelliklerinin karşılaştırılması [4].

	Taş kolon	DKK
Taşıyıcı tabakaya olan mesafe (m)	3-13	4-6
CPT uç direnci (kPa)	650 - 1000	400 - 950
CPT sürtünme oranı (%)	1.7 - 2.9	3.8 - 6.7
Kolon elemanı inşa derinliği (m)	3 - 14	4.5 - 6.5
Kolon elemanı çapı (m)	0.91	0.76
Kolon elemanı arası mesafe (m)	1.8 (eşkenar üçgen dizilimi)	1.8 (kare)
Alan değişim oranı (%)	23	14
Dolgu tabakası yüksekliği (m)	9	8
Kolon elemanı sayısı	871	234

Taş kolon ve darbeli kırmataş kolon yapılan bu sahalarda yükleme deneyleri de yapılmış olup, bunun sonuçları Çizelge 1.2' de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1.2' de gerilme deformasyon eğrisinin eğimi olarak rijitlik değerleri gösterilmiş olup, sonuçlar Çizelge 1.3'de özetlenmiştir. Buna göre;

- 6 metre dolgu serildikten sonra taş kolon inşa edilen zeminde oturma yaklaşık olarak 19.5 cm olurken, kırmataş kolon inşa edilen zeminde bu değer 5.4 cm civarındadır.
- Taş kolon ile iyileştirilmiş zemindeki oturma miktarının darbeli kırmataş kolondaki oturma miktarına oranı 6 m' lik dolgu için yaklaşık 3.2' dir.
- Taş kolon yapılan zeminde meydana gelen oturmalar, kırmataş kolon uygulanan zeminde meydana gelen oturmalara göre kıyaslandığında oturmaların çok daha büyük olduğu gözlenmiştir. Taş kolonda ki oturma miktarının fazla olmasının nedeni de, taş kolon ile yeniden şekillendirilen zeminin kolonları sınırlandırmaması ve kolonların genişlemesi olarak açıklanabilir [5].

Çizelge 1. 2 Yükleme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması [4]

Uygulanan Gerilme (kPa)	Taş Kolon Rijitliği (MPa) (R1)	Darbeli Kırmataş Kolon Rijitliği (MPa) (R2)	Rijitlik Oranları (R1/R2)
25	84	196	2.4
50	44	171	3.9
100	21	132	6.3
200	-	40	-
400	-	18	-

Çizelge 1. 3 Oturma sonuçları [4]

Oturma (cm)	Dolgu Yüksekliği (m)			
	2	4	6	8
Taş kolon oturması	1.7	2.8	4.8	8.1
Taş kolon yapılan zemin oturması	2.7	7.2	19.5	52.4
Oturma oranları	1.6	2.6	4.1	6.5
Darbeli kırmataş kolon oturması	1.1	1.3	1.5	-
Darbeli kırmataş yapılan zemin oturması	1.8	3.1	5.4	-
Oturma oranları	1.6	2.4	3.6	-

White vd.'nin [4]'te yapmış olduğu bu çalışmaların sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

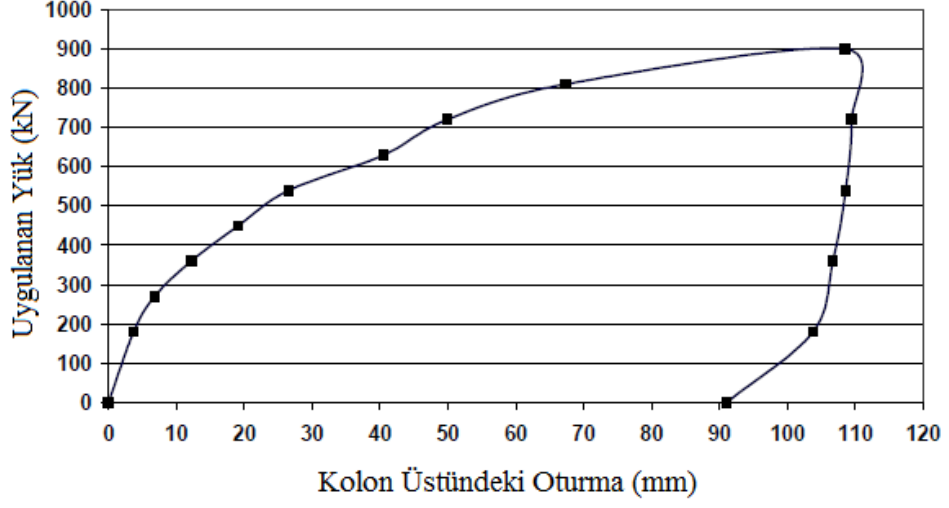
- CPT verilerinin sonuçlarına göre taş kolon yapılmış olan saha, darbeli kırmataş kolon yapılmış olan sahaya göre daha dayanımlı ve az kohezyonludur.
- Her iki zeminde yapılan kolonlar arası mesafe merkezden merkeze 1.8 m olarak belirlenmiştir. Taş kolon çapının büyük olması hem de eşkenar üçgen dizilim uygulanması nedeniyle elde edilen alan oranı taş kolon elemanları için daha büyüktür.
- Kolonlar arası yapılan SPT sonuçlarına göre ortalama N değeri taş kolon yapılan zeminde 11 iken darbeli kırmataş kolon yapılan zeminde 17 olarak bulunmuştur.
- İnşaat sonrası yanal gerilme, darbeli kırmataş kolon yapılan zeminde, taş kolon yapılan zeminin 2 katı olarak hesaplanmıştır.
- Yükleme deneyleri sonuçlarına göre, uygulanan gerilmeye bağlı olarak, darbeli kırmataş kolonların rijitliğinin taş kolonların rijitliğine oranı 2 ile 9 arasında değişmektedir.

- Taş kolon yapılarak iyileştirilen zeminde meydana gelen oturma, darbeli kırmataş kolon yapılarak iyileştirilen zemine oranla 3 kat daha fazla çıkmıştır.

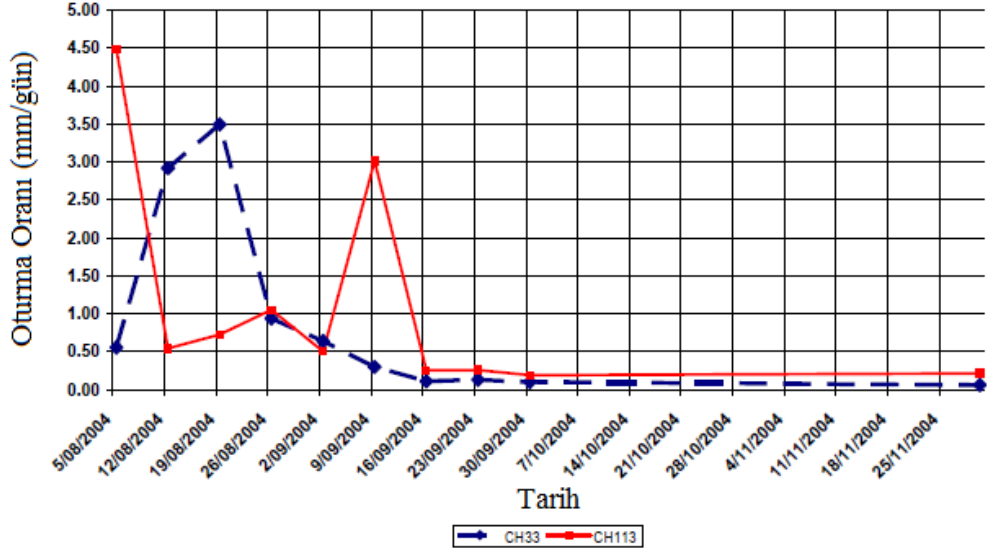
Liew ve Tan. [6]'te, yumuşak zemin içinde inşa edilen taş kolon elemanlarının davranışlarını yükleme testleri ile incelemiştir. Proje kapsamında uygulanması planlanan 10 m yüksekliğinde toprakarme duvarın düşey ve yatay stabilitesinin sağlanması amacıyla teknik ve ekonomik sebeplerden dolayı taş kolon uygulamasına karar verilmiştir.

Söz konusu yapının desteklenmesi amacıyla 100 cm çaplı taş kolonların merkezden merkeze 2 m karelaj ile uygulanması kararlaştırılmıştır. Taş kolonların projelendirilmesi (kolonun yanal genişleme kontrolü, kolon ve zemin arasındaki gerilme dağılımı, zeminin ve kolonun taşıma kapasitesi, iyileştirme sonrası oturma durumu vb.) literatürde belirtilen tasarım yöntemleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiş olup, tasarımın performansını incelemek amacıyla 1.0 m x 1.0 m boyutlarındaki plaka üzerinde yükleme testleri yapılmıştır.

Şekil 1.1' de gösterildiği gibi 900 kN maksimum yük altında oturma miktarı 110 mm olarak ölçülmüştür. İyileştirme olmadan önce tahmin edilen oturma miktarı 650 mm mertebelerinde iken, taş kolonlar ile iyileştirilmiş bölgede tahmin edilen oturma miktarı 250-280 mm mertebelerindedir. Söz konusu yapının inşaatından sonra da devam eden oturma miktarlarının ölçümü yapılmış olup, 4 aylık bir zaman diliminde oturmaların halen 115 mm mertebelerinde olduğu gözlenmiştir. Ayrıca en kritik iki kesimdeki oturma oranının yıl sonunda 0.2 mm/gün olduğu görülmüştür. (Şekil 1.2). Toprakarme duvarın imalatından 6 hafta sonra yumuşak kil birimlerde gözlemlenen bu sıkışmanın taş kolonların etkin bir drenaj sistemi olarak da çalıştığını göstermektedir.



Şekil 1. 1 Yük - oturma grafiği [6]



Şekil 1. 2 Zamana bağlı oturma oranı [6]

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında yumuşak bir zeminde imal edilmiş darbeli taş kolonların imalatı sırasında zeminde gerçekleştirebileceği iyileştirme oranı ve yük altında çalışma mekanizmasının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için YTÜ olanakları ile geliştirilen bir taş kolon makinesi kullanılarak iki aşamalı model deneyler gerçekleştirilmiştir.

1.3 Hipotez

Darbeli taş kolonlar ile zeminlerde iyileştirme sağlanmaktadır. Bu yöntem ile zemin iyileştirmesi yanında uygulanan darbe ile kolon hacmi artarken matris zeminde hem sıkışma hem de yanal gerilme artışlarına yol açmaktadır. Bu şekilde sıkışan ve yanal gerilmelerin arttığı bir zeminde kayma mukavemeti de artmakta ve yük altında sıkışabilirlik azalmaktadır. Darbeli taş kolonlar hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminlerde kullanılabilirler. Darbeli taş kolonlar sıvılaşma potansiyelini azaltma, taşıma gücünü arttırma, çevre zeminde mukavemet artışı ve oturma kontrolü sağlama gibi avantajlar sunmaktadır.

TAŞ KOLONLAR

2.1 Giriş

Kötü zemin şartları altında süregelen temel inşaatı yöntemleri pahalıya mal olmakta, ekonomikliği yitirmekte ve zaman kaybına neden olmaktadır. Bu sorunların önüne geçebilmek için zamanla, yerinde zemin iyileştirme metotları araştırılmaya başlanmıştır. Geçmişten bu yana gelen birçok zemin iyileştirme yöntemi günümüzde hala kullanılmakla beraber güvenlik ve uygulanabilirlik açısından daha fazla araştırmaya gerek duyulmuştur.

Yerinde zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan taş kolonlar genelde yumuşak ve orta yumuşak killi zeminlerde, siltlerde ve siltli kumlarda başarılı bir şekilde kullanılan yöntemdir. Taş kolonlar, uygulandıkları zeminde hem taşıma gücüne hem de zemin içerisindeki suyun hidrolik eğim nedeniyle düşey dren gibi çalışarak oturma hızını arttırmaları. Zemin oturmalarının azalmasına olumlu yönde etkide bulunurlar. Taş kolonların başlıca kullanım amaçları ise;

- Taşıma kapasitesini arttırmak
- Konsolidasyonu hızlandırmak
- Sıvılaşma potansiyelini azaltmak
- Toplam ve farklı oturmaları azaltmak
- Doğal ve dolgu şevlerinin stabilitesini arttırmak

olarak özetlenebilir.

Taş kolonlar özellikle sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerde (kohezyonu az ve ince daneli zeminlerde) de sıvılaşma riskine karşı önerilmektedirler [7]. Sıvılaşma riski olan bir zemine taş kolon uygulaması yapıldığında şu özellikleri kazanmaktadır:

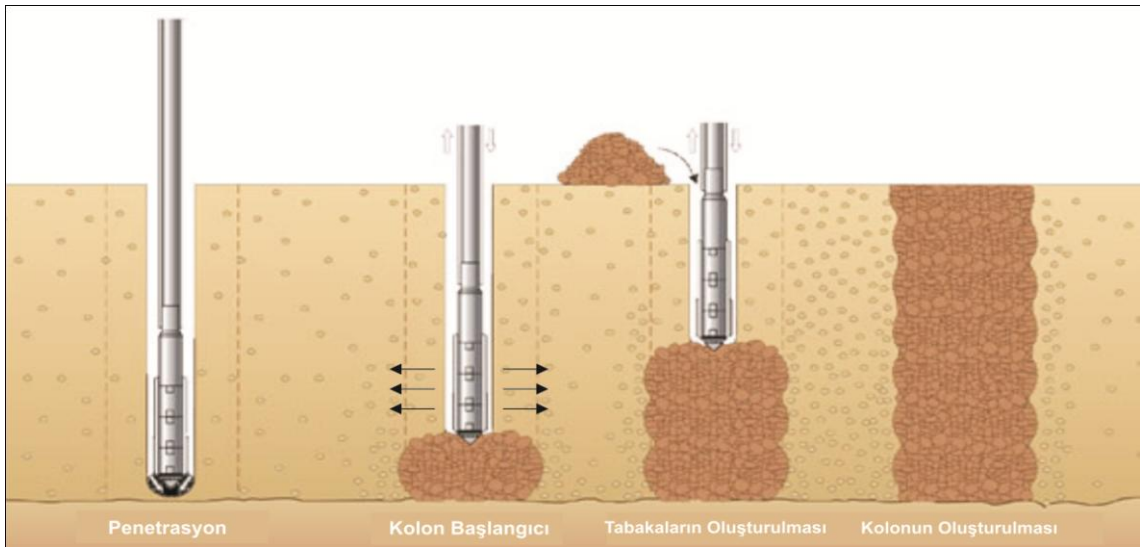
- Taş kolon yapımı sırasında oluşan titreşim ve yer değiştirme sayesinde zeminin sıkılık derecesinde artış sağlanır.
- Taş kolonlar, sahip oldukları yüksek dayanım ve yoğunluk ile zeminin taşıma gücü kapasitesini arttıırırlar.
- Taş kolonlar aşırı boşluk suyu basıncı oluşmasını engeller.
- Taş kolon uygulaması ile kolon etrafındaki zeminde yanal gerilme artışları meydana gelir.

Taş kolon yapımında kullanılacak malzemeler belirlenerek, zemin içine düşey olarak 0.6 - 1.0 m çapında ve 20 m' ye kadar derinliklere çeşitli yöntemlerle yerleştirilir ve sıkıştırılır [8]. 20-75 mm arası kırma taş daha çok kullanılmasına rağmen tabii kaba çakıl agrega veya kum-çakıl karışımları da kullanılabilir. Üçgen veya kare yerleşim planında merkezden merkeze taş kolonlar arası uzaklıklar 1.5- 5.0 m arasında değişmektedir. Eğer mümkünse kolonların uç kotta sert bir formasyona girmesi istenmektedir. Taş kolon uygulanan alanda zeminle kolon arasında ki davranışı etkileyen faktörleri de aşağıda ki gibi sıralayabiliriz [9], [10]:

- Zeminin drenajsız mukavemeti,
- Jeolojik gerilme,
- Taş kolon radyal gerilmesi,
- Birim boy değiştirme özellikleri,
- Başlangıçtaki kolon boyutu,
- Taş kolon yapımından sonraki kolon boyutu,
- Taş kolon malzemesinin özellikleri sayılabilir.

2.2 Taş Kolon İmalatı

Taş kolonun imalatı için öncelikle, titreşim ve su ve/veya hava jeti ile birlikte vibroprob yardımıyla imalatın yapılacağı derinlikte bir kuyu kazılır. Açılan bu kuyu, kazı sırasında içinde meydana gelebilecek göçme veya yanıl sıkışmalara karşı probdan biraz daha geniş olacak şekilde oluşturulur. Taş kolonun yapımı, tabakalar oluşturacak şekilde 30-120 cm arasında geri dolgularla yüze kadar çıkılarak oluşturulur. Taş kolon içindeki malzemeler, zemin yüzeyinden kuyu içine bırakılır. Kuyu içinde göçme oluşması beklenmiyor ise tabakalar halinde olan malzemeyi sıkıştırmak için baskı uygulanır. Zemin yüzeyine kadar birbirini takip eden bu sıkıştırma işlemi ile taş kolonlar elde edilir (Şekil 2.1).



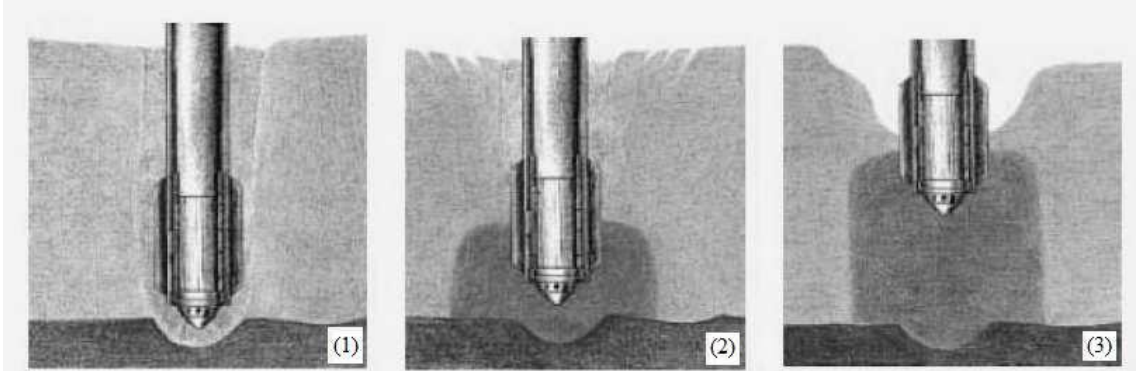
Şekil 2. 1 Taş kolon yapım aşamaları [9]

2.3 Taş Kolon İmalat Yöntemleri

Taş kolon, uygulanacak projenin türüne ve uygulama alanında ki zemin koşullarına göre farklı metotlarla birlikte farklı uzunluk ve çaplarda yapılabilir. Aşağıda taş kolon yöntemleri hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

2.3.1 Vibro Kompaksiyon Yöntemi

Vibro kompaksiyon, ince dane oranı %10'dan az olan (kohezyonsuz) zeminlerde derinlik vibratörleri yardımı ile sıklığın arttırılmasında kullanılır. (Şekil 2.2) Vibratör, genelde su veya hava jetleri yardımı ile istenilen derinliğe indirildikten sonra (1) tabakalı şekilde (0.50 m aralıklarla) geri çekilmeye başlar (2). Vibro kompaksiyon yöntemi tepeden veya yerinde yapılan geri dolgu ile sonlandırılır (3). Vibro kompaksiyon ile %70-80 civarında rölatif sıklık elde edilebilir. Bu işlemler sırasında, sıkıştırmadan dolayı zemin hacminde meydana gelen azalmayı dengelemek için kum takviyesi yapılarak arazi seviyesinin korunması sağlanır. Bu yöntemin, su seviyesi üstünde ve altında iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Vibro kompaksiyon yöntemi ile ekonomik olarak 240- 480 kPa arasında taşıma gücü artışı sağlamaktadır [11].

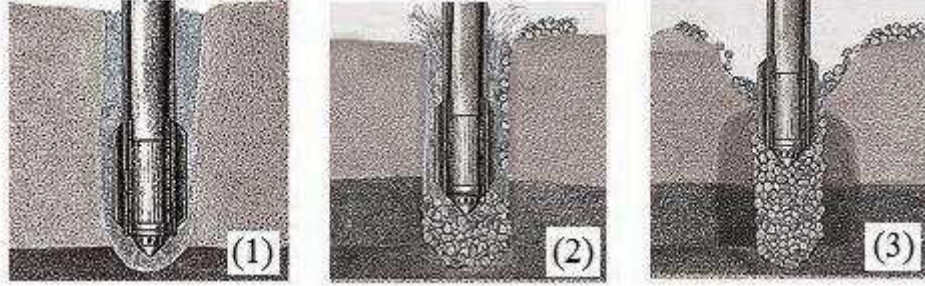


Şekil 2. 2 Vibro kompaksiyon yöntemi imalat adımları [12]

2.3.2 Vibro Yer Değiştirme Yöntemi

Vibro yer değiştirme yöntemi (ıslak yöntem), karışık kohezyonlu ve tabakalı zeminlerin istenildiği gibi sıkıştırılma yapılamadığı bölgelerde uygulanır. Şekil 2.3'de gösterildiği gibi titreşim ve yüksek basınçlı su jeti yardımıyla bir kuyu açılır (1). Prob etrafındaki bölge basınçlı su jeti ile yıkanır ve taş kolon yüzeyden taş eklenerek oluşturulur (2). Taş kolon imalatı bittikten sonra zemin silindir ile düzeltilir (3). Vibro yer değiştirme yöntemindeki en önemli etken, ince danelerin kuyu çevresinde taş kolonun geçirimsiz olmasını engelleyen ve kuyunun inşası sırasında stabilitesini sağlayan su jetidir. Yumuşak ile katı kıvamlı zemin koşullarında ($c_u=15- 50$ kPa), yeraltı suyunun yüksek olduğu bölgelerde etkili kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Vibro yer

değiştirme aynı zamanda uygun maliyetli bir derin vibrasyon tekniğidir. Vibro taş kolonlar zemin cinsi, istenilen şartlar ve yükleme şartlarına göre değişik şekillerde projelendirilebilirler. Kolonlar arası mesafeler 1.8 ile 3 metre arasında değişebilir. Güçlendirilmiş zeminlerde zemin durumu ve performansa bağlı olarak izin verilebilir yükler değişiklik gösterebilir.

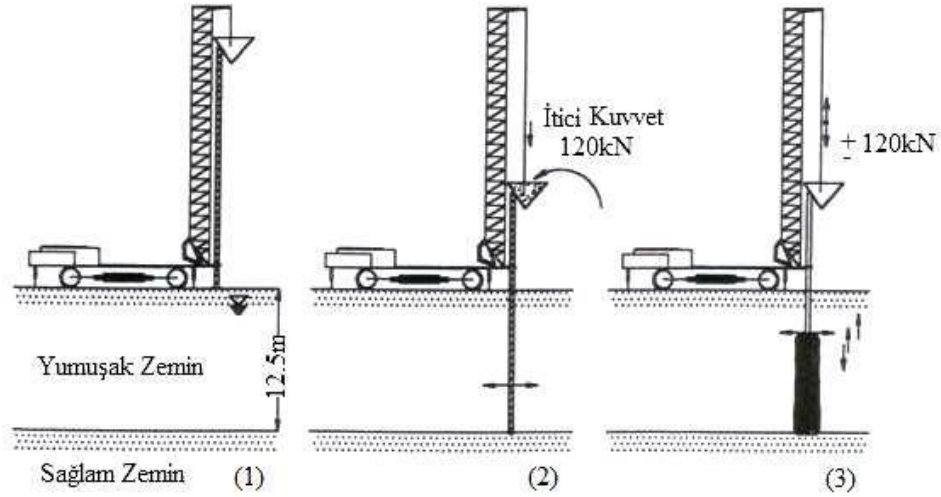


Şekil 2. 3 Vibro yer değiştirme imalat adımları [12]

2.3.3 Vibro Öteleme Yöntemi

Vibro öteleme yönteminde (kuru yöntem), taş kolon uygulaması yapılacak bölgede istenilen derinliğe kadar probun zemini yanal olarak ötelemesi ile bir kuyu oluşturulur. Kuyu dibine indirilen prob çıkarılır ve içine tabakalar halinde taş doldurulur. Tabakalar halinde doldurulan kuyu içine tekrar prob indirilerek oluşturulan tabakalara kuvvet uygulanır. Uygulanan bu kuvvetle taşın düşey ve kuyu çeperine doğru sıkışması sağlanır. Sıkışmış bir taş kolon oluşturulan bu yöntemde kuyunun içine taş dolduruluncaya kadar zeminin kendini tutması ve göçmemesi gerekmektedir. Bu yöntem, vibro yer değiştirmeye göre daha mukavim ($c_u=30-60$ kPa) ve yeraltı su seviyesinin derinlerde olduğu bölgelerde uygundur.

Probun kuyu içerisinden çekilmeden önce taş kolon malzemesinin, taş kolon içine doldurulması işlemine dayanan ve bu yöntem ile kuyunun çökme ve stabilitesini koruma problemlerini ortadan kaldıran alttan beslemeli yöntem olarak adlandırılan bir diğer yöntemde vibro öteleme yönteminin bir modifikasyonudur [12]. Bu yöntemin imalat aşamaları Şekil 2.4' te gösterilmiştir. Ekipmanın kuruluşu (1), Probun zemin içine itilmesi (2) ve vibrasyon ile birlikte taş kolonun oluşturulması (3).



Şekil 2. 4 Alttan beslemeli yöntem imalat aşamaları [12]

2.3.4 Darbeli Yöntem

Darbeli yöntemde, ucu açık veya kapalı bir boru zemine itilerek ya da bir burgu yardımıyla kuyu açılır. Açılan bu kuyu içine tabakalı şekilde kolon malzemesi doldurulur her tabakanın doldurulmasından sonra boru düşük hızla geri çekilerek, tabakanın üstüne düşen borunun etkisi ile boru altında kalan zeminin sıkışması sağlanır. Darbeli yöntem ile ilgili detaylı bilgi ve çalışmalar Bölüm 3'de detaylı olarak verilmiştir.

2.4 İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yukarıda detaylı olarak anlatılan taş kolon imalatı yöntemleri karşılaştırılmış olup sonuçları aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Vibro yer değiştirme yöntemi genel olarak kil ve silt zeminler için uygundur. Vibro kompaksiyon ise kumlar-siltli kumlar için iyi sonuçlar vermektedir.
- Kendini tutabilen göçmeyen zemin koşullarında vibro yer değiştirme yönteminde kılıfa ihtiyaç duyulmadığından, imalat hızının darbeli yöneme göre daha yüksektir.
- Vibro öteleme yönteminin uygulanması için malzeme temini edilemediği gibi durumlarda imalat yöntemi olarak darbeli yöntem kullanılır.
- Genel olarak kuru yöntem ıslak yöneme göre daha ekonomiktir.

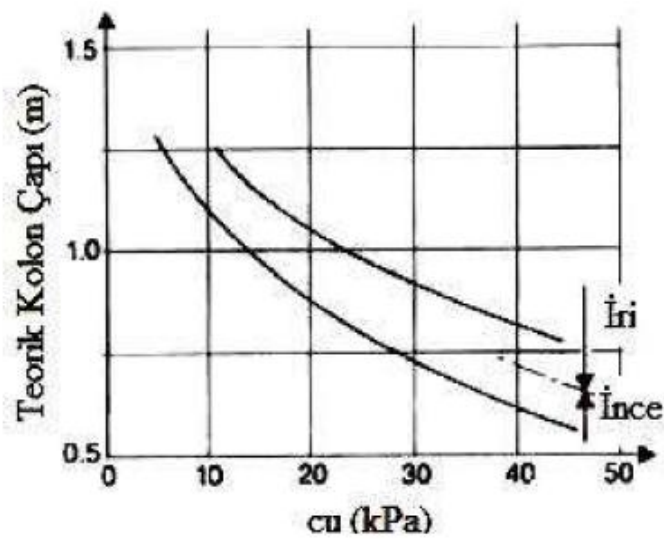
- Vibro yer değiştirme yönteminde büyük miktarda su kullanıldığından imalat sonrasında yüzeye çıkacak suyun çevreye zarar vermeyecek Şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. Vibro teleme yöntemi ise temiz bir yöntemdir. Ancak bu yöntem, kuyu stabilitesini sağlamak için yeraltı suyunun derinlerde olduğu ve kendini tutabilen zemin koşullarının bulunduğu bölgelerde kullanılmalıdır.

2.5 Taş Kolon Elemanlarının zellikleri

Taş kolon imalatında kullanılan malzemelerin özellikleri, çapları, boyları ve içsel sürtünme aları hakkında genel bilgiler aşağıda verilmiştir.

2.5.1 Taş Kolon apı

Taş kolon elemanlarının çapları uygulama yapılacak zeminin mukavemetine, imalat yöntemlerine ve uygulamada gerçekleştirilen sıkıştırma enerjisine bağlı olarak değiştiğinden tam olarak çapları belirlenememektedir. Buna rağmen genel olarak Vibro yer değiştirme ve vibro öteleme yöntemleri ile imal edilen kolonların çaplarının 100 cm civarında olduğu, darbeli yöntem ile imal edilen kolonların çaplarının da 80 cm ya da daha küçük ölçülerde olduğu belirtilebilir. Gerçekleştirilmiş olan çalışmalar sonucu etkili kolon çapı ile kohezyonlu zeminin kayma mukavemeti arasındaki ilişki Şekil 2.5'te gösterilmiştir [12].



Şekil 2. 5 Zemin mukavemetinin teorik kolon çapına etkisi [12]

2.5.2 Taş Kolonun Boyu

Taş kolonlar ile zemin iyileştirme yöntemlerinde, taşıma gücünün artırılması ve oturmaların azaltılması için kolon boyunun sağlam zemine kadar uzatılması istenmektedir. Sağlam zeminin taş kolonun ulaşamayacağı kadar derin olması gibi durumlarda taş kolonlar sağlam zemine ulaşmadan sonlandırılabilir. Fakat bu şekilde sonlandırılan taş kolonlar uç mukavemetine sahip olmadığından dolayı yüzen kolon davranışı gösterecektir. Taş kolon elemanlarının sonlandırılacağı tabaka derinliği 6 m ile 10 m arasında değişim göstermektedir ve bu şekilde ekonomik bir çözüm sağlanmış olmaktadır.

2.5.3 Taş Kolon İçsel Sürtünme Açısı

İçsel sürtünme açısı taş kolonlar için kullanılan malzemeye göre değişmekte olup genel olarak 40° ile 45° arasında değişmektedir. Uygulama açısından bakıldığında güvenlik faktörü de dikkate alındığında 38° olarak kullanılması önerilmektedir [12].

2.5.4 Taş Kolon Malzemesi Dane Çapı Dağılımı

Taş kolon elemanlarının imalatında çapları 1.3 cm - 1.7 cm arasında değişen iyi derecelenmiş taş ve çakıl malzeme kullanılabilirdiği gibi, bu malzemelerin temininde zorlanıldığı durumda kırmataş malzeme de kullanılabilir. Eğer kırmataş ile imalat yapılacaksa, oturmaların azaltılabilmesi amacıyla malzemenin farklı dane çaplarından oluşturulması önerilmektedir.

2.6 Taş Kolon Tasarımı

2.6.1 Tasarım Koşulları

Taş kolonların dizilimi, iyileştirilmemiş bölgedeki temel oturmasının, iyileştirilmiş bölgedeki temel oturmasına oranı olarak açıklanarak, hedeflenen oturma iyileştirmesi oranı (OİO) ile yapılır [13]. Hedeflenen OİO, zemin koşullarına göre hesaplanan oturmaya göre bulunabilir. Taş kolonların oturmalara etkisini ve taş kolon tasarımının nasıl yapıldığını Clemente ve Davie'nin [13] incelemişlerdir. Bu çalışmada 4 adet deney bölgesi bulunmakta ve granüler, suya doygun kohezyonlu ve aşırı konsolide zeminlerde

meydana gelen oturmaların sonuçları elde edilmiştir. Çizelge 2.1’de bu deney bölgelerinin özellikleri verilmiştir.

Yapılan bu çalışma da örnek olarak 2 numaralı bölge incelendiğinde, taş kolonların 8 m uzunluğunda, 0.9 m çapında ve 2.0 m aralıklı olarak uygulandığı gözlenmektedir. 2 numaralı bölgede iyileştirilmemiş zeminde 200 kPa yük altında 4 m²’lik temelde 45 mm oturma gerçekleşmiştir. Bu değer yükleme testi neticesinde 59 mm olarak bulunmuştur.

Bu çalışma sonunda tasarım koşullarının oturma ve sıvılaşmaya bağlı olduğu söylenebilmektedir.

Çizelge 2. 1 Deney sahaları zemin özellikleri [13]

1. Deney Sahası			3. Deney Sahası		
Zemin Cinsi	H (m)	E (MPa)	Zemin Cinsi	H (m)	E (MPa)
Kum	2	10	Dolgu	4.1	15.0
Silt / kil	6	7	Alüvyon	2.5	34.
Kum ve Mercan	1	0		5.5	77.5
	>	0	Kum ve çakıl	5.0	8.1
2. Deney Sahası			4. Deney Sahası		
Zemn Cinsi	H (m)	E (MPa)	Zemin Cinsi	H (m)	E (MPa)
Siltli kil	3	17.2	Kahverengi karbonatlı kum	1.5	17.2
Siltli kum kumlu silt	1.5	5.2		.0	34.4
Kum	8	2.8	Siltli kum / kumlu silt	1.	5.2
Çakıllı kum	12.5	75.0		2.	1.7
				1.0	3.4

2.6.2 Taşıma Kapasitesinin Arttırılması

Taş kolonların taşıma kapasitesini, zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ) ve/veya kohezyonu (c) belirler. Vibro sistemler, izin verilebilir taşıma kapasitesini içsel sürtünme açısını yükselterek arttırırlar. Vibro kompaksiyon, kohezyonsuz granüler zeminleri sıkıştırarak içsel sürtünme açısının da artmasına sebep olur. Artan içsel sürtünme açısı ile de izin verilebilir taşıma kapasitesi artar ve taşıma kapasitesi geleneksel yöntemler ile hesaplanabilir. Vibro yer değiştirme ile zemin iyileştirmesi yapılacak olan arazide ise taş kolonlar imal edilebilir. İzin verilebilir taşıma kapasitesi de çok çeşitli yöntemlerle hesaplanabilir. Taş kolon uygulaması yapılacak arazide granüler malzeme varsa uygulama için o granüler malzemenin iyileştirilmiş parametreleri de hesaplanmalıdır.

2.6.3 İyileştirilmiş Zeminde Oturma

Oturma, zeminin sıkışma katsayısına ve konsolidasyon derecesine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Vibro sistemler ile temel altında oluşacak oturmalar azaltılmaktadır. Bunun için de taş kolon imalatı yapılacak bölgenin sıkışma katsayısında artış sağlanır veya yüksek modüllü vibro taş kolonlar yapılır.

Vibro kompaksiyon, kohezyonsuz, granüler zeminleri sıkıştırdığından zeminin sıkışma katsayısı değerinde bir artış meydana gelir. Bu durumda oturma hesabı iyileştirilmiş katsayı değeri kullanılarak tekrarlanır.

Vibro yer değiştirme ile zemin iyileştirilmesinde beklenen oturma Priebe'nin yöntemi gibi yöntemler ile hesaplanabilir. Bu yöntemde iyileştirilen bölgedeki taş kolonla değiştirilen bölgenin yüzdesine (alan değiştirme oranı) ve taş kolonun içsel sürtünme açısına bağlı bir iyileştirme faktörü belirlenir. Eğer arazideki zemin içerisinde granüler malzeme var ise, tasarımda onun da iyileştirilmiş değerleri kullanılmalıdır.

2.6.4 İyileştirilmiş Zemin Parametreleri

Kohezyonsuz zeminlerde sıklık derecesinin vibrasyon ile arttırılarak zeminin iyileşmesi sağlanan vibro kompaksiyon yönteminin aksine vibro yer değiştirmede zeminde iyi sıkıştırılmış ve iyi derecelendirilmiş granüler malzemeler kullanılan taş kolonlar oluşturulur. Buradaki problem taş kolon yapılan zemin ile zeminde oluşturulan taş kolon malzemelerinin bir araya gelerek oluşturacağı yeni parametrelerin ve zeminde ne derecede bir iyileşme sağlandığının saptanmasıdır. Priebe'ye göre [14]'de taş kolonların davranışlarının belirlenebilmesi için geniş ölçekli arazi deneyleri yapılması gerekmektedir. Ayrıca da taş kolonlu zemin ile taş kolon yapılmayan zemin karşılaştırılarak, iyileştirme derecesi saptanabilir.

İyileştirilmiş zemin parametrelerinin belirlenebilmesi için Priebe tarafından [14]'de önerilen yöntem detaylı olarak aşağıda adım adım açıklanmıştır. Bu yöntemde taş kolonun iyileştirme etkisi ile zeminin başlangıçtaki durumu karşılaştırılmaktadır. Ayrıca iyileştirilmemiş zemin ile taş kolon ile iyileştirilen zemin karşılaştırılarak bir iyileştirme faktörü elde edilmektedir.

2.6.4.1 İyileştirme Faktörü Hesabı

Priebe tarafından [14] de önerilen taş kolonların tasarım yöntemine göre, kolonun rijit bir tabaka üzerine yerleştirildiği ve kolon – zemin sisteminin sadece yatay deformasyonlar sonucunda oturduğu kabul edilmiştir. Kolon malzemesinin başından itibaren kesildiği, çevresindeki zeminin ise elastik davrandığı kabul edilirken kolon imalatı sırasında çevre zeminin aşırı yer değiştirmeye zorlanmasından dolayı başlangıç yanal direncin sıvı duruma karşılık geldiği (yanal toprak basıncı katsayısının $K=1$ olduğu) varsayılmaktadır. Buna göre iyileştirme faktörü (n_0);

$$K_{ac} = \tan^2\left(45 - \frac{\phi_c}{2}\right) \quad (2.1)$$

$$f(\mu_s, A_c / A) = \frac{(1 - \mu_s)(1 - A_c / A)}{1 - 2\mu_s + A_c / A} \quad (2.2)$$

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \left[\frac{1/2 + f(\mu_s, A_c / A)}{K_{ac} f(\mu_s, A_c / A)} - 1 \right] \quad (2.3)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır. Burada;

K_{ac} : Taş kolon malzemesi aktif itki katsayısı

ϕ_c : Taş kolon malzemesi içsel sürtünme açısı

μ_s : Zeminin Poisson oranı

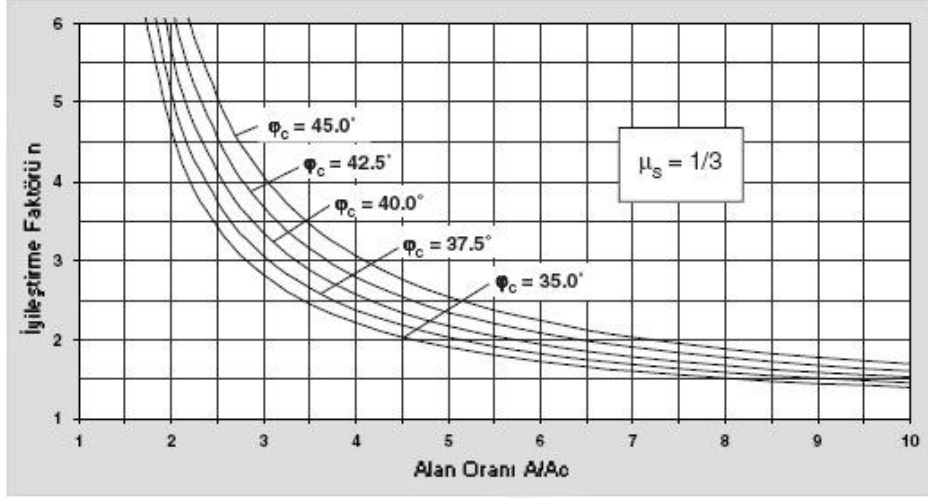
A_c : Taş kolon alanı

A : Toplam alan

olarak tanımlanır. Çoğu zaman Poisson oranının $\mu_s = 1/3$ alınması son oturma için yeterli olmaktadır. Bu durumda da iyileştirme faktörü;

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \left[\frac{5 - \frac{A_c}{A}}{4K_{ac} \left(1 - \frac{A_c}{A}\right)} - 1 \right] \quad (2.4)$$

olmaktadır. Kolon malzemesinin içsel sürtünme açısı, iyileştirme faktörü n_0 ve ters alan oranı olan A/A_c ilişkisini belirten grafik aşağıda verilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 $\mu_s = 1/3$ için iyileştirme faktörü, n_0 [14]

2.6.4.2 Kolon Sıkışabilirlik Etkisinin Değerlendirilmesi

Sıkıştırma işlemi yapılan kolon dolgu malzemesi pratikte hala sıkışabilme olanağına sahiptir. Bundan dolayı, kolon üzerine gelecek olan bir yük neticesinde kolon dışarıya doğru genişleyip, oturmalar oluşturabilir. Teoride A/A_c oranının 1 olmasından dolayı zaman iyileştirme faktörü sonsuz hesaplanmakta; gerçekte ise kolonun sıkışabilmesine göre değişiklik göstermektedir. Priebe'a göre iyileştirme faktörü kolon ve çevre zemin arasındaki tek eksenli sıkışma modülleri (D_c/D_s) oranıyla sınırlıdır. $\mu_s=1/3$ için;

$$(A_c / A)_1 = -\frac{4K_{AC}(n_0 - 2) + 5}{2(4K_{AC} - 1)} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{4K_{AC}(n_0 - 2) + 5}{4K_{AC} - 1} \right]^2 + \frac{16K_{AC}(n_0 - 1)}{4K_{AC} - 1}} \quad (2.5)$$

Kolon malzemesinin sıkışabilirliğini tespit edebilmek için, alan oranında (A/A_c) bir düzeltme yaparak, düzeltilmiş iyileştirme faktörü hesaplanabilir.

$$\Delta(A / A_c) = \frac{1}{(A_c / A)_1} - 1 \quad (2.6)$$

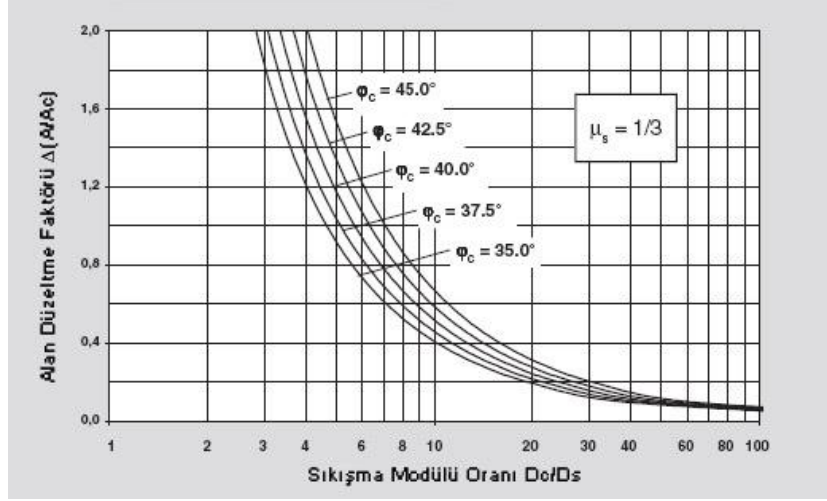
Düzeltilmiş alan oranı;

$$\left(\frac{\overline{A_c}}{A} \right) = \frac{1}{\frac{A}{A_c} + \Delta \left(\frac{A}{A_c} \right)} \quad (2.7)$$

şeklinde bulunur. Son olarak da düzeltilmiş iyileştirme faktörü elde edilir.

$$n_1 = 1 + \frac{\overline{A_c}}{A} \left[\frac{1/2 + f(\mu_s, \overline{A_c}/A)}{K_{AC} f(\mu_s, \overline{A_c}/A)} - 1 \right] \quad (2.8)$$

Poisson oranı $\mu_s=1/3$ olan zeminlerde farklı taş kolon malzemeleri için içsel sürtünme açıları ile tek eksenli sıkışma modülleri oranı için alan düzeltme faktörü $\Delta(A/A_c)$ Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 $\mu_s = 1/3$ için kolon sıkışabilirlik düzeltmesi eğrileri [14]

2.6.4.3 Derinlik Etkisinin Dikkate Alınması

Zemin ve taş kolon birim hacim ağırlıklarını ihmal ederek kolonun dışa doğru genişlemesine sebebi, zemin ve taş kolon arasındaki baştaki basınç farklılıklarıdır. Bu durum da yalnızca temelden gelen P yükünün zemin ve taş kolonlar arasında dağıtımına bağlı ve derinlikle sabit olduğunu düşünmek anlamına gelmektedir. Bu nedenler göz önüne alınarak zeminin ve taş kolonun ağırlıkları dıştaki yüke eklenmesi gerekmektedir. Ağırlıklar göz önüne alındığında başlangıç basınç farklılığı derinlikle birlikte asimptotik (bir eğrinin bir doğruya sonsuzda teğet olması davranışı) olarak düşecek ve de yanal genişlemelerin azalmasına neden olarak, derinlikle jeolojik yükün artması sonucu kolonlar yanal olarak çok daha iyi bir şekilde desteklenecek ve de dolayısıyla taşıma kapasiteleri de artacaktır.

Basınç farklılığı iyileştirme faktörünün elde edilmesinde doğrusal şekilde değişen bir parametre olduğundan dolayı, başlangıç basınç farklılığı ile derinliğe bağlı olanın oranı (derinlik faktörü, f_d) kullanılarak iyileştirme faktöründe bir düzeltme yapılabilir. Düzeltilmiş iyileştirme faktörü $n_2=f_d n_1$ olarak elde edilir. Örneğin, basınç farklılığı miktarı başlangıç değerinin %50'si olan bir derinlikte, derinlik faktörü $f_d=2$ olmaktadır. Derinlik faktörünün f_d , derinlikle doğrusal olarak değişen $(P_c+\gamma_c d)K_{oc}$ ve $(P_c+\gamma_c d)(K_s=1)$ yanal basınç çizgilerinden bulunabileceği kabul edilmektedir. Bununla birlikte derinlikle yataydaki deformasyonların azalması sonucu kolonlardan, toprak basıncı aktif basınç katsayısı K_{AC} değerinden K_{OC} değerine doğru değişiklik göstermektedir. Basınç farkı olarak varsayılan düz çizginin, mevcut olan asimptotik çizgi ile kesiştiği derinliğe kadar önerilen derinlik faktörü güvenli tarafta olmaktadır. Fakat pratikte ise iyileştirme derinliği bundan çok daha az olmaktadır.

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{K_{oc} - \frac{W_s}{W_c} x \frac{W_c}{P_c}}{K_{oc}}} \quad (2.9)$$

$$P_c = \frac{P}{\frac{A_c}{A} + \frac{1 - \frac{A_c}{A}}{\frac{P_c}{P_s}}} \quad (2.10)$$

$$\frac{P_c}{P_s} = \frac{1/2 + f(\mu_s, \overline{A_c/A})}{K_{AC} f(\mu_s, \overline{A_c/A})} \quad (2.11)$$

$$W_c = \sum(\gamma_c \Delta d) \quad (2.12)$$

$$W_s = \sum(\gamma_s \Delta d) \quad (2.13)$$

$$K_{OC} = 1 - \sin \phi_c \quad (2.14)$$

$$n_2 = f_d \cdot n_1 \quad (2.15)$$

Burada denklemlerde kullanılan ifadeler;

f_d : Taşıma Gücü için Derinlik Faktörü

W_s : Zemin Ağırlığı

W_c : Taş kolon malzemesi ağırlığı

P_c : Temelden dolayı taş kolona gelen yük

P_s : Temelden dolayı zemine gelen yük

P : Temel yükü

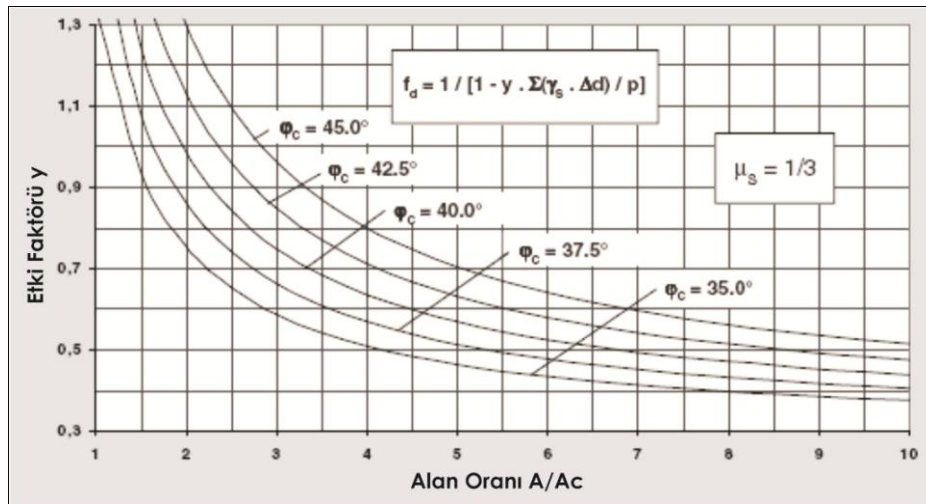
K_{oc} : Taş kolon malzemesinin sükkûnetteki toprak basıncı katsayısı

olarak tanımlanabilir.

Şekil 2.8’de gösterilen sadeleştirilmiş diyagramda zemin ile taş kolon malzemesi için aynı birim hacim ağırlık değerleri kullanılmıştır. Güvenlik sebebiyle uygun olmayan bu kabulde birim hacim ağırlığı daha düşük olan zeminin değeri kullanılmalıdır. Derinlik düzeltme faktörü de;

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{K_{oc} - 1}{K_{oc}} x \frac{W_c}{P_c}} = \frac{1}{1 + \frac{K_{oc} - 1}{K_{oc}} \frac{\sum (\gamma_s \Delta d)}{P_c}} \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 2.8’de $\mu_s = 0.33$ için etki faktörünün (γ) alan oranı ve taş kolon malzemesinin içsel sürtünme açısı ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.8 $\mu_s = 1/3$ için derinlik faktörü [14]

2.6.4.4 Uyumluluk Kontrolleri

Tasarımdaki bu adımlar birbirleriyle ve matematiksel olarak bağlantılı bulunmadığından, çeşitli kabuller ve sadeleştirmeler içermektedirler. Bundan dolayı sınır koşullarında bulunan kolonların sıkışabilirliklerinden daha fazla yük taşımamaları için uygunluk kontrolü yapılmalıdır.

Derinliğin artmasıyla birlikte zeminin yaptığı destek, kolonun artık yanal olarak daha fazla genişleyemeyeceği sınır koşuluna ulaşır. Buna rağmen derinlik faktöründe de sonsuza kadar bir artış görülmez. Bu yüzden yapılacak olan ilk uyumluluk kontrolü, derinlik faktörü sınırlarının belirlenerek, kolonun etkiyeceği yükün sınırlandırılması olmalı ve kolonun içsel sıkışabilirliği ile meydana gelecek olan oturmanın, komposit sistemin oturma değerini geçmemesi gerekir. Bu kontrol aşaması, arazide katı ve sıkı zeminlerde uygulanmalıdır. Derinlikle değişen iyileştirme faktörü düzeltmesinin sınır koşulu:

$$f_d \leq \frac{D_c / D_s}{P_c / P_s} \quad (2.17)$$

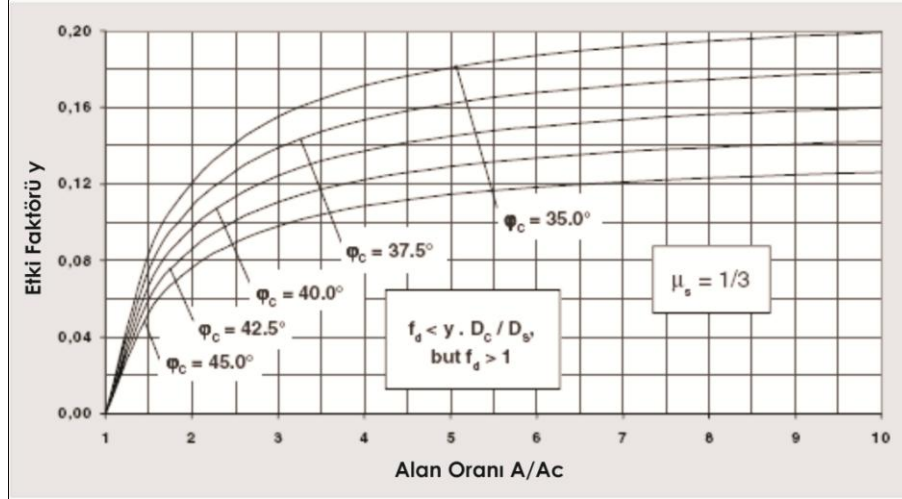
şeklinde olmalıdır. Burada kullanılan ifadeler de şu şekilde tanımlanabilir:

D_c : Taş Kolon Malzemesi Tek Boyutlu Sıkışma Modülü

D_s : Zeminin Tek Boyutlu Sıkışma Modülü

Şekil 2.9'deki grafik yardımı ile alan oranı A/A_c ve kolon malzemesi içsel sürtünme açısına bağlı olarak etki faktörü olan y değeri okunur ve bu değer ile de derinlik faktörü değeri kontrol edilir. Eğer derinlik faktörü $f_d < 1$ şeklindeyse, bu sonuç dikkate alınmamalıdır. Bu şartlarda iyileştirme faktörünün maksimum değeri ile alakalı ikinci bir uygunluk kontrolü gerekmektedir. Bu kontrol, ilki ile benzer şekilde yapılır ve kolonların içsel sıkışabilirliklerinden kaynaklanacak olan oturmanın, kolonu çevreleyen zeminin oturmasını aşmaması gerekir. İkinci kontrolün öncelikli olarak arazide yumuşak veya gevşek zemin tabakalarının bulunduğu yerlerde uygulanması gerekmektedir.

$$n_{\max} = 1 + \frac{A_c}{A} \left(\frac{D_c}{D_s} - 1 \right) \quad (2.18)$$



Şekil 2.9 Derinlik faktörü limit değerleri [14]

2.6.4.5 İyileştirilmiş Zemin Temellerinde Oturma Hesapları

Taş kolonların tekil veya şerit temel altındaki davranışları net bir şekilde açıklanabilmiş değildir. Tasarımlar, sınırsız yükleme şartları altında sınırsız kolon dizilimi performansının ortaya konmasına bağlıdır. Bu durumda homojen şartlar altında oluşacak toplam oturma S_{∞} n_2 değerinin d derinliğine bağlı ortalama değeri kullanılarak;

$$S_{\infty} = p \frac{d}{D_s n_2} \quad (2.19)$$

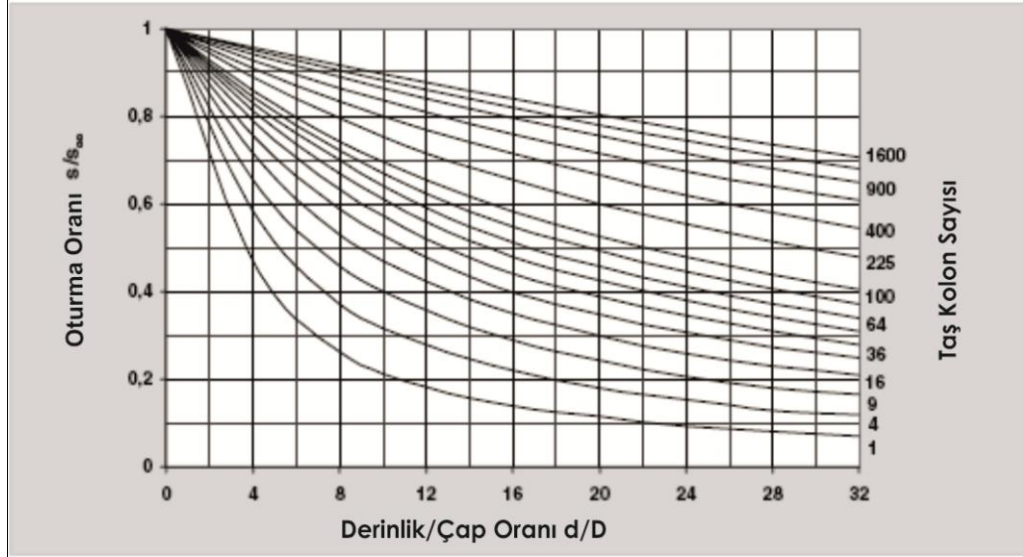
eşitliği ile hesaplanabilir. Burada kullanılan ifadeler şu şekilde tanımlanabilir:

S_{∞} : Homojen Zeminde Sınırsız Kolon Dizilimi ve Sınırsız Yükleme Alanı Altındaki Oturma

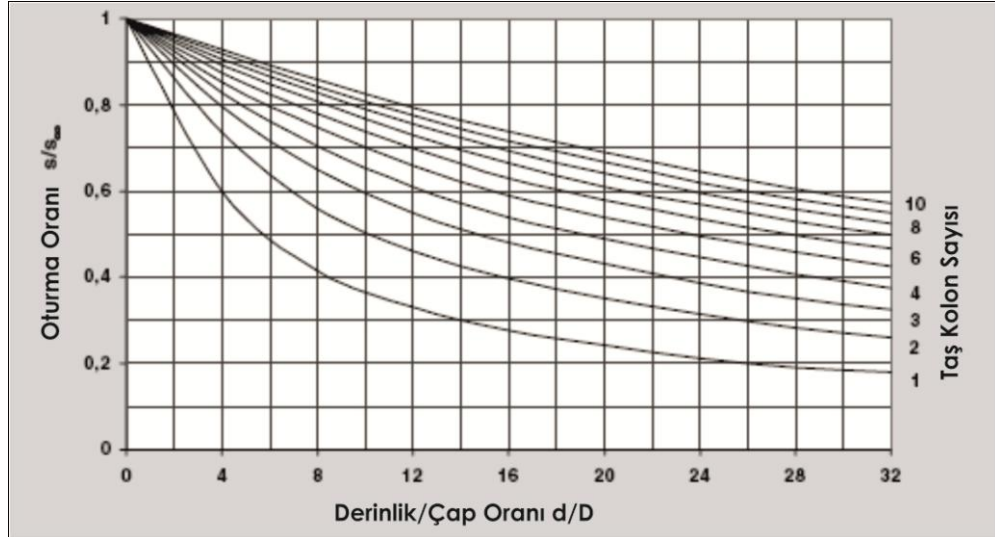
p : İyileştirilmiş Zemine Uygulanan Temel Tabanı Basıncı

d : Derinlik

Aşağıda Şekil 2.10.(a) ve Şekil 2.10.(b)'de verilen bu değer yardımıyla taş kolon uygulanmış tekil veya şerit temellerdeki oturmalar hesaplanabilir. Bu grafikler hem yükleme dağılımına hem de temel altı kolon gruplarında, dışarıda bulunan kolonların düşük taşıma kapasitesinin göz önüne alındığı sınırsız hesaplamalara dayanmaktadır[14].



Şekil 2.10.(a) Tekil temellerin oturması [14]



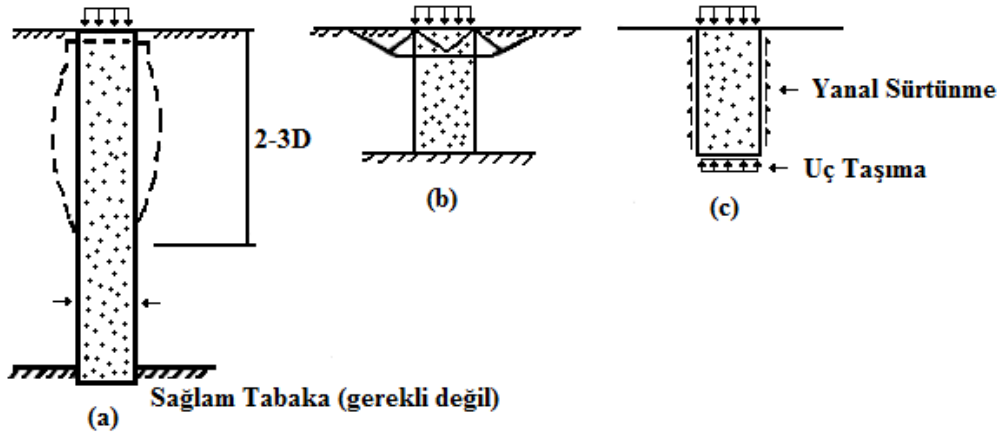
Şekil 2.10.(b) Şerit temellerin oturması [14]

2.7 Taş Kolonlarla İyileştirilmiş Zeminde Taşıma Gücü Hesabı

Taş kolon elemanları yumuşak tabaka içerisinde imal edilirken, ya sağlam tabakaya kadar uzatılır ya da sağlam tabakaya ulaşmadan kolonun ucu yumuşak tabaka içerisinde kalacak şekilde imal edilebilirler.

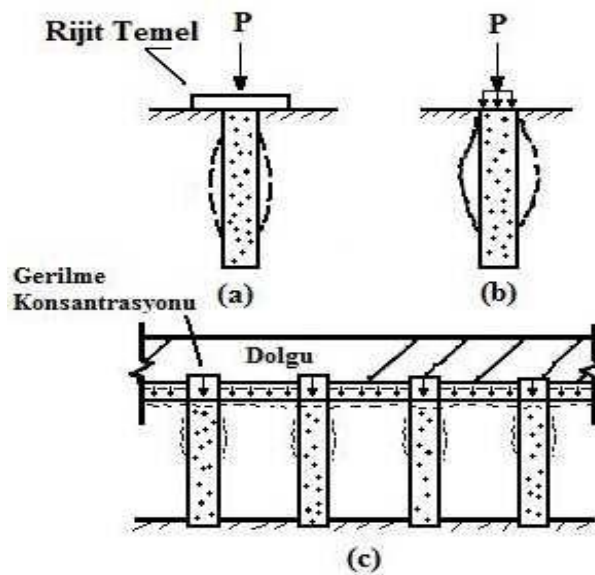
Tekil taş kolonların göçme türleri Şekil 2.11'de detaylı olarak gösterilmiştir. Bunlardan birincisi Şekil 2.11a'da da gözüktüğü üzere, taş kolonun uzun olduğu durumda kolon malzemesinin dışa doğru kabarması ve sonrasında kolon çapının genişlemesi şeklinde olabilir. İkincisi, Şekil 2.11b'de verildiği gibi, taş kolonun kısa ve sağlam tabakaya

oturduğu durumda, yüzeyde taş kolonu da içine alan bir genel ve yerel göçmeler söz konusu olabilir. Son olarak da Şekil 2.11c'de taş kolonun kısa ve yumuşak tabaka içerisinde yüzdüğü durumda, kolon ucunda göçmeler meydana gelebilir.



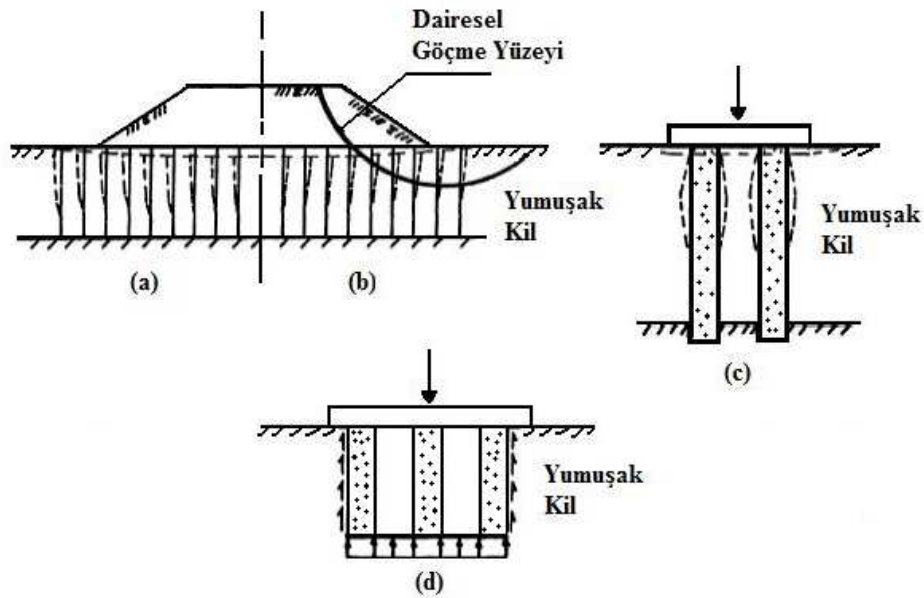
Şekil 2.11 Tekil taş kolon göçme mekanizmaları [15]

Tekil taş kolon elemanları ile yapılan çalışmalar ve model yükleme deneyleri, kolonun taşıma gücünün ve oturma davranışının önemli oranda yükün uygulanma şekline bağlı olduğunu göstermektedir (Şekil 2.12). Yükün kolon çapında geniş rijit bir plaka ile aktarılması durumunda yanal genişleme engellenir ve böylece oturmalar azaltılıp, taşıma gücü arttırılmış olur (Şekil 2.12a). Yükün kolon çapı ile aynı boyutta oturmalar küçük bir miktar fazla olabilir (Şekil 2.12b). Yükün kolon ve mevcut zemin tarafından birlikte taşınması ile oturmalar önemli ölçüde azaltılır (Şekil 2.12c).



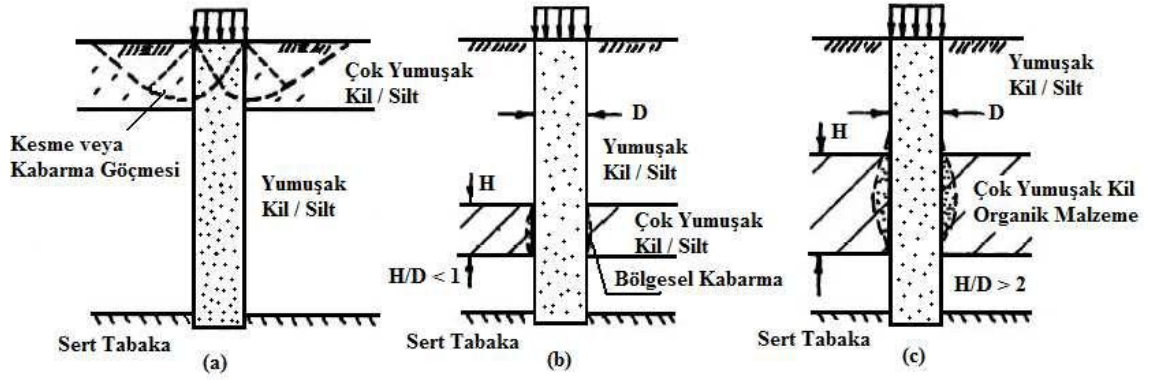
Şekil 2.12 Taş kolona etkiyen farklı yükler [15]

Tekil bir taş kolon elemanı ile taş kolon grubu karşılaştırıldığında nihai yüklemeye kapasitesi grup taş kolonunkine göre daha düşüktür. Tekil taş kolonun yanına bir başka kolon uygulaması yapılarak yeni bir kolon daha oluşturulduğunda bu iki kolon arasında kalan zemin, kolonlar ile çevrelendiğinden kolonun hareketi de sınırlandırılmış olmaktadır. Böylece her iki kolonunda taşıma kapasitesinde bir artış gözlenir. Zayıf zeminlerde dolgu inşaatına bağlı olarak temel altında ki zemin yanal olarak ötelenir (Şekil 2. 13a - Şekil 2.13b) Bu durum zemin ile taş kolon arasındaki ilişki yanal desteği azaltmaktadır. Yumuşak zemin içinde oluşturulan grup kolonlarda, tekil kolonlarda olduğu gibi uç kısımda taşıma kapasitesinin aşılması ya da yanal genişlemeye maruz kalabilirler (Şekil 2. 13c - Şekil 2.13d).



Şekil 2.13 Grup taş kolonlarının göçme mekanizmaları [15]

Taş kolonların arazide uygulamalarından yola çıkılarak, tabakalı zeminlerde yumuşak kohezyonlu birimlerin yer alması durumunda grup ya da tekil taş kolonlarda yanal genişleme şeklinde göçme olduğu bilinmektedir (Şekil 2.14). Ayrıca arazi deneyimlerinden yola çıkılarak tabaka kalınlıklarının kolon çapından büyük olduğu durumlarda stabilite problemlerinin de oluştuğu bilinmektedir.

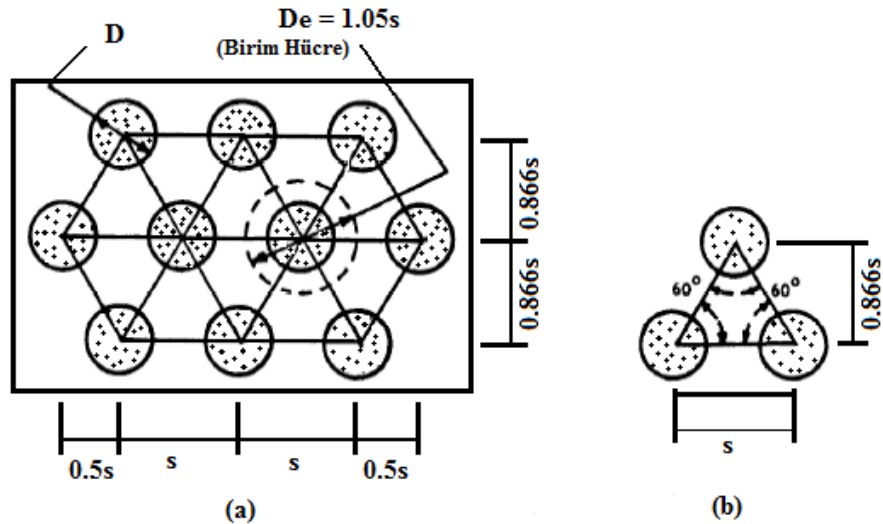


Şekil 2.14 Homojen olmayan kohezyonlu zeminlerde taş kolon göçme mekanizmaları [15]

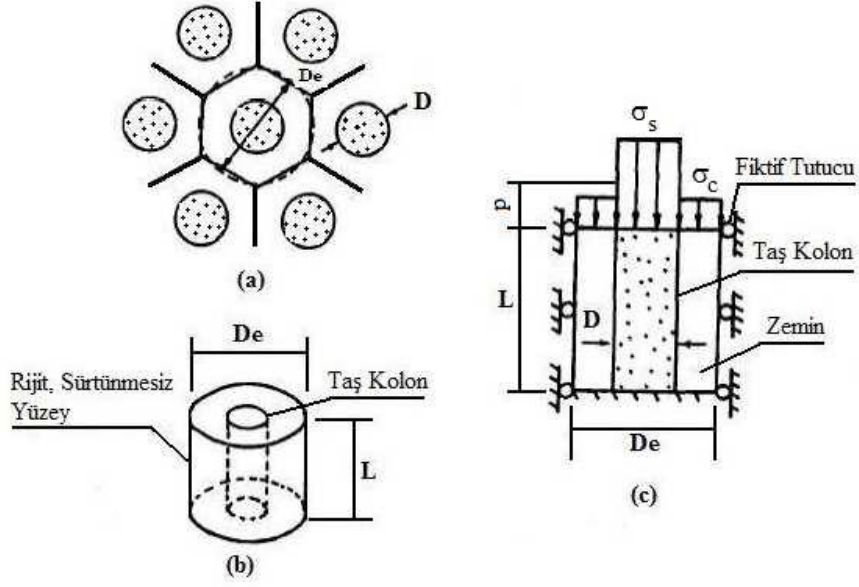
2.7.1 Birim Hücre Kavramı

Birim hücre kavramı üzerinde etkili olan faktörler 3 elemana bağlıdır. Bunlar eşdeğer çap, alan değişim oranı ve gerilme konsantrasyonu şeklinde sıralanabilir.

Eşdeğer Çap: Stabilitate ve oturma analizlerini hesaplayabilmek için her bir kolonu çevreleyen zemin, kolon ile bir bütün gibi düşünülmelidir. Bu bakımdan taş kolon yerleşimi ve çevreleyen zemin alanı Şekil 2.15 ve Şekil 2.16 da gösterilmiştir. Bu şekillerde gösterildiği gibi bu kolonu çevreleyen zemin alanı düzgün altıgen olduğundan, bu alan aynı değere sahip bir daire olarak kabul edilebilir. Eşkenar üçgen dizilimli kolonlar için eşdeğer çaptır.



Şekil 2.15 Taş kolonlarda eşkenar üçgen dizilimi (a) plan, (b) geometrisi [15].



Şekil 2.16 Birim hücre tanımlaması (a) plan, (b) birim hücre, (c) kesit [15]

Bu dairenin çapı sırası ile eşkenar üçgen ve kare yerleşime göre;

$$D_e = 1.05s \quad (2.20)$$

$$D_e = 1.13s \quad (2.21)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır [15]. Bu formüllerde verilen s, kolon merkezleri arasındaki mesafedir. Sonuç olarak D_e çapına sahip birim hücre olarak adlandırılır.

Alan Değişim Oranı: İyileştirilmiş zeminin performansında taş kolon ile değiştirilen zeminin hacmi önemli bir role sahiptir. Değiştirilen zeminin hacmini belirlemek amacıyla, alan değişim oranı kavramı ortaya atılmıştır. Bu oran,

$$a_c = \frac{A_c}{A} \quad (2.22)$$

olarak gösterilebilir. Burada,

A_c : Sıkıştırmadan sonra taş kolonun alanı

A : Birim hücrenin toplam alanı

olarak tanımlanır. Zemin alan oranı ise,

$$a_s = \frac{A_s}{A} \quad (2.23)$$

$$a_c = 1 - a_s \quad (2.24)$$

formülleri yardımıyla hesaplanabilir.

bu formüllerin dışında alan değişim oranı,

$$a_s = c_1 \left(\frac{D}{s} \right)^2 \quad (2.25)$$

bağılantısıyla bulunabilir. Burada kullanılan ifadeler:

D : Sıkıştırılmış taş kolon çapı

s : Merkezden merkeze taş kolonlar arası mesafe

c_1 : Taş kolon dizilimine göre saptanan sabit bir katsayı

şeklinde ifade edilebilir. c_1 katsayısı, kare dizilim için $\pi/4$; eşkenar üçgen dizilim için $\pi/2\sqrt{3}$ olarak alınır. Eşkenar üçgen dizilimine göre a_s ;

$$a_s = 0.907 \left(\frac{D}{s} \right)^2 \quad (2.26)$$

şeklinde de hesaplanabilir.

Gerilme Konsantrasyonu: Taş kolon üzerinde bir dolgu veya temel yerleştirildiğinde, taş kolonda önemli bir miktarda gerilme artışı oluşur ve çevresinde bulunan zeminde oluşan gerilme miktarında azalma olmaktadır. Taş kolon, zemine göre daha rijit olduğundan ve düşey oturmalar aynı olduğundan gerilme konsantrasyonu taş kolon üstünde olmaktadır. Birim hücre kavramına uygun, kabul edilebilir genişlikte, göreceli olarak üniform yükün etkidiği, eşkenar üçgen veya kare yerleşimli bir taş kolon göz önüne alındığında, Şekil 2.16c'de gösterilen düşey gerilme dağılımı gerilme konsantrasyonu (n) ile ifade edilir.

$$n = \sigma_c / \sigma_s \quad (2.27)$$

Burada;

σ_c : Taş Kolon İçerisindeki Gerilme

σ_s : Kohezyonlu Zemin İçerisindeki Gerilme

olarak tanımlanır. Kısaca temelden gelen yük nedeniyle kolondan ve zeminde oluşacak gerilme miktarının oranı konsantrasyon faktörü olarak (n) olarak tanımlanır.

Birim hücre içerisinde verilen bir derinlikte olması gereken ortalama gerilme, birim hücre içerisindeki düşey kuvvetlerin dengesi için verilen alan oranı ile;

$$\sigma = \sigma_c a_c + \sigma_s (1 - a_c) \quad (2.28)$$

Bu denklemden kohezyonlu zemindeki ve taş kolondaki gerilmeler, gerilme konsantrasyon faktörü (n) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{[1 + (n-1)a_c]} = \mu_s \sigma \quad (2.29)$$

$$\sigma_c = \frac{n\sigma}{[1 + (n-1)a_c]} = \mu_c \sigma \quad (2.30)$$

Burada, μ_s ve μ_c , zemindeki taş kolondaki gerilme oranıdır. Uygulanan yüke bağlı olarak taş kolondaki ve zemindeki gerilmeyi veren bu eşitlikler, oturma ve stabilite analizlerinde oldukça kullanışlıdır.

2.7.2 Taş Kolonların Taşıma Gücü Hesabı

2.7.2.1 Tekil Taş Kolonların Taşıma Gücü

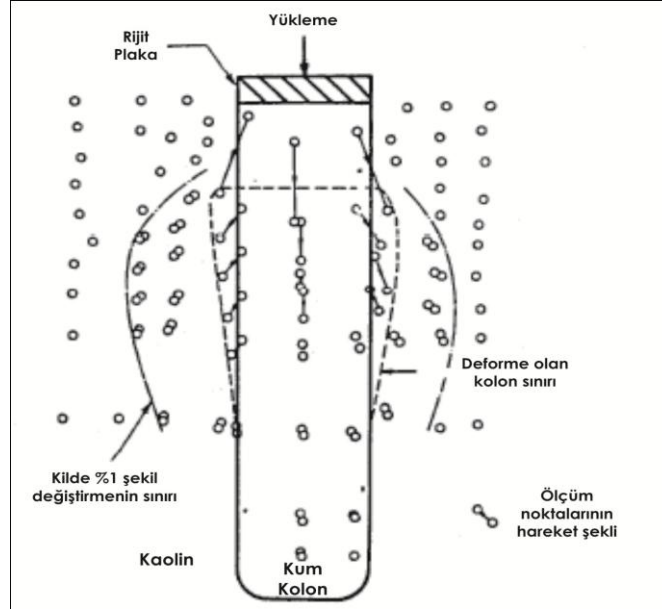
Taş kolon uzunluğunun, çapa oranı 4-6 ya da daha büyükse genellikle taş kolonda dışa doğru bir genişleme şeklinde göçme meydana gelmektedir. Taş kolonun ucun yumuşak sağlam tabakaya ulaşması ya da tabaka içerisinde yüzmesi fark etmez (Şekil 2.17).

Hughes ve Withers tarafından [16] da kayma mukavemeti 19.1 kPa olan bir yumuşak kilde yapılan bir model deneyde göçmenin yüzeyden, çapın iki veya üç katı derinlikte meydana geldiği görülmüştür. Tekil bir kolona yük geldiği zaman, gelen yükün zemine aktarıldığı saptanmıştır. Uygulanan yük sonucunda kolonda dışa doğru bir kabarma olmuş ve aşağıya doğru bir hareket gözlenmiştir. Taş kolon içerisindeki granüler malzemenin de, çevresindeki zemine baskı yaptığı gözlenmiştir.

Kolonun göçme durumunda olduğu gibi düşünülerek, en büyük asal düşey gerilme σ_1 , en küçük asal yanal gerilme σ_3 alınırsa Rankine klasik toprak basıncı teorisinden pasif itki katsayısı K_p aşağıdaki denklem ile elde edilir:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \quad (2.31)$$

ϕ_c : Taş kolon içsel sürtünme açısı



Şekil 2.17 Tek bir kolonun kabarma göçmesi [15]

Boşluk Genişleme Teorisi

Çevre zeminde oluşacak nihai pasif direnç, simetri eksenini etrafında genişleyebilen sonsuz uzun bir silindire karşı oluşan pasif direnç olarak modellenilebilir. Hughes ve Withers [16] da, bu yaklaşımdan yola çıkılarak taş kolonu çevreleyen zeminde oluşan basıncı incelemişlerdir. Bu araştırma sonucunda, taş kolon iki veya üç çap kadar dışarıya taşmasına rağmen mühendislik açısından sonsuz, uzun ve genişleyebilir silindir teorisi mantıklı sonuçlar vermektedir.

Hughes ve Withers [16] da, tek bir taş kolonda meydana gelen genişleme göçmesinin pressiometre testi sırasında gelişen boşluk ile benzer özellikler taşıdığını düşünmüşlerdir. Buna göre sürtünmesiz bir malzeme ve sonsuz uzunlukta genişleyebilen bir silindirik boşluk için geliştirilen elasto-plastik teori, çevreleyen zeminde oluşacak drenajsız nihai yanal gerilme değerini bulmak için kullanılabilir:

$$\sigma_3 = \sigma_{ro} + c \left[1 + \ln \frac{E_s}{2c(1+\nu)} \right] \quad (2.32)$$

Burada kullanılan terimler;

σ_3 : Nihai Drenajsız Yanal Gerilme

$\sigma_{\gamma\phi}$: Kolon İmalatından Sonrası Toplam Radyal Gerilme

E_s : Zeminin Elastik Modülü

c : Drenajsız Kayma Mukavemeti

ν : Poisson Oranı

şeklinde tanımlanabilir. Yukarıdaki eşitliğin yardımıyla da $q_{ult}=\sigma_I$ kabul edilerek;

$$q_{ult} = \left\{ \sigma_{ro} + c \left[1 + \ln \frac{E}{2c(1+\nu)} \right] \right\} \left(\frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \right) \quad (2.33)$$

formülü elde edilir. Bu formül ile de taş kolona uygulanabilecek nihai gerilme hesaplanabilir.

Vesic Boşluk Genişleme Teorisi

Genel silindirik boşluk genişleme teorisi Vesic tarafından [17] de verildiği gibi sürtünmeli ve kohezyonlu zeminleri de içerecek şekilde genişletilmiştir. Yine sonsuz uzun bir silindir alınmış ve zemin elasto-plastik kabul edilmiştir. Buna göre taş kolonu çevreleyen zeminden dolayı oluşacak nihai yanal direnç σ_3 :

$$\sigma_3 = c_u F'_c + q F'_q \quad (2.34)$$

yardımıyla bulunabilir. Burada kullanılan terimler;

c_u : Kilin Drenajsız Kayma Mukavemeti

q : Ortalama Normal Gerilme

F'_c, F'_q : Boşluk genişleme faktörleri

şeklinde açıklanabilir. Şekil 2.18'de zeminin içsel sürtünme açısına bağlı olarak boşluk genişleme teorisi faktörleri F'_c ve F'_q değerlerinin rijitlik indeksi olan I_r 'ye bağlı değişimi gösterilmiştir. Rijitlik indeksi de şu formül yardımıyla hesaplanabilir;

$$I_r = \frac{E}{2(1+\nu)(c + qtg\phi_s)} \quad (2.35)$$

Burada kullanılan terimler;

E : Zeminin Elastisite Modülü

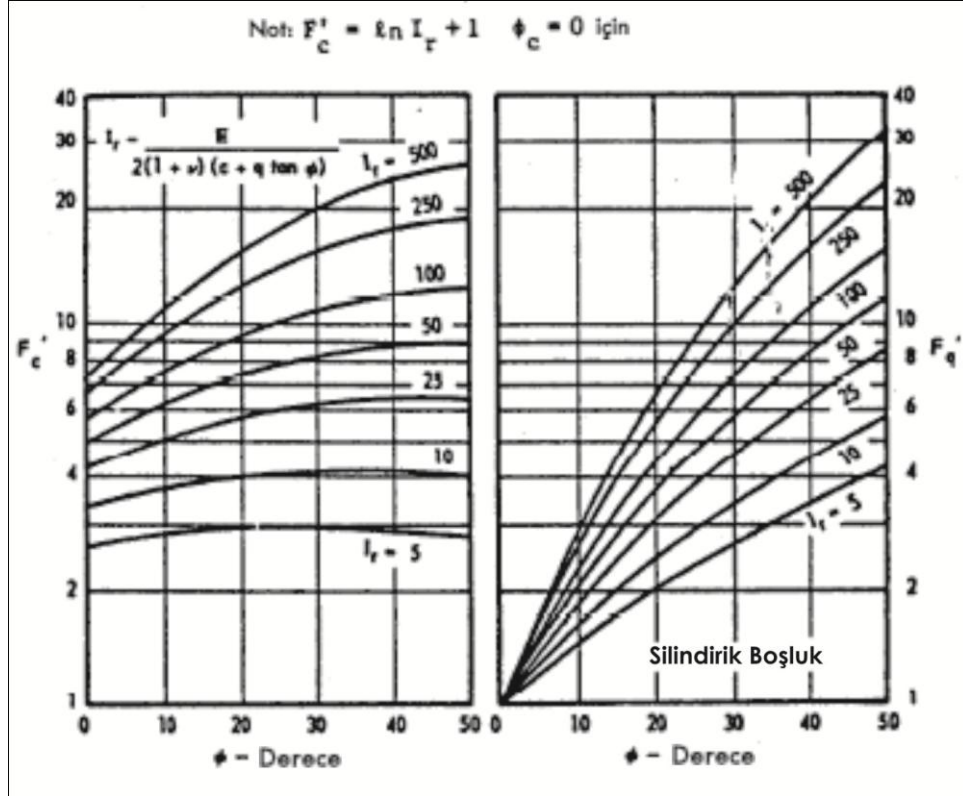
ϕ_s : Zeminin İçsel Sürtünme Açısı

c : Zemin Kohezyonu

ν : Poisson Oranı

q : Göçme Bölgesindeki Ortalama Normal Gerilme

şeklinde açıklanabilir.



Nihai gerilme de $q_{ult} = \sigma_I$ kabul edilirse;

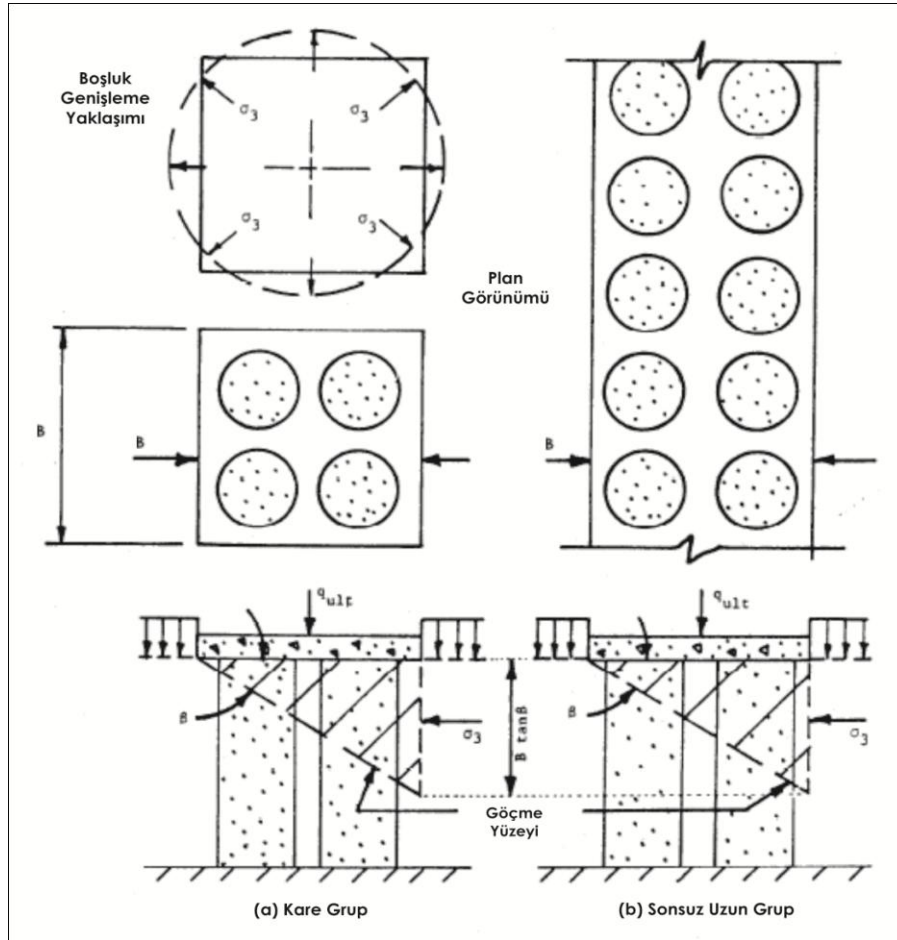
$$q_{ult} = [cF'_c + qF'_q] \left[\frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \right] \quad (2.36)$$

formülü ile hesaplanabilir.

Vesic'in [17] de ortaya koyduğu bu yöntem, sürtünmesiz zeminlerde nihai yükleme altında Gibson ve Anderson tarafından [18] da geliştirilen boşluk genişleme teorisi ile aynı sonuçları vermektedir. Normal gerilme q , başlangıç gerilmelerinin ve etkiyen yükten dolayı meydana gelecek gerilme değişiminin toplamı olarak adlandırılır. Gerilme konsantrasyonuna bağlı olarak taş kolonun kısa ve uzun dönem için nihai kapasitesi boşluk genişleme teorisi yardımıyla bulunabilir.

2.7.2.2 Taş Kolon Gruplarının Taşıma Gücü

Şekil 2.19' da gösterildiği gibi taş kolon ile iyileştirilmiş kohezyonlu bir zemine oturan kare veya sonsuz uzun, rijit beton bir temelin taşıma gücünü hesaplayabilmek için yükün çok çabuk bir şekilde yüklendiği kabul edilir. Bundan dolayı kohezyonlu zeminde drenajsız kesme meydana gelir ve içsel sürtünme açısı da ihmal edilir. Taş kolon grubunun nihai taşıma gücü yaklaşık olarak iki düz kopma çizgisi tarafından meydana getirilmiş bir göçme yüzeyi olarak belirlenebilir.



Şekil 2.19 Taş kolon grup analizleri [15]

Bu teori ilk olarak Bell tarafından ortaya konmuş ve Terzaghi ve Sowers tarafından geliştirilmiştir. Homojen zeminler için Bell'in geliştirdiği taşıma kapasitesi teorisi ile Terzaghi'nin yerel göçme teorisi birbirine çok yakın sonuçlar vermektedir.

Şekil 2.19'da kompozit zeminin dayanabileceği nihai gerilme q_{ult} bloğun yanal harekete karşı nihai direnci σ_3 ve eğimli olan kesme yüzeyinde meydana gelecek kompozit kesme direncine bağlıdır. Blok içindeki ortalama kesme dayanım parametreleri;

$$[tg\phi]_{avg} = \mu_c a_c tg\phi_c \quad (2.37)$$

$$c_{avg} = (1 - a_c)c \quad (2.38)$$

formülleri ile bulunabilir. Burada kullanılan terimler;

$[\phi]_{avg}$: Kompozit İçsel Sürtünme Açısının Tanjantı

c_{avg} : Temel Altı Kesme Yüzeyinin Kompozit Kohezyonu

a_c : Alan Değişim Oranı

μ_c : Taş Kolon İçin Gerilme Konsantrasyon Faktörü

şeklinde açıklanabilir. Göçme yüzeyi temel ile bir β açısı yapmaktadır. Kompozit zemin için bu açı;

$$\beta = 45 + \frac{\phi_{avg}}{2} \quad (2.39)$$

şeklinde ifade edilebilir. Nihai yanal gerilme de suya doymun killerde sonsuz bir temel için;

$$\sigma_3 = \frac{\gamma_s B tg \beta}{2} + 2c \quad (2.40)$$

ile hesaplanabilir. Burada;

σ_3 : Ortalama Yanal Çevre Basıncı

γ_s : Kohezyonlu Zeminin Islak Veya Doymun Birim Hacim Ağırlığı

B : Temel Genişliği

β : Göçme Yüzeyi Eğimi

c : İyileştirilmesi Yapılmamış Zeminin Drenajsız Kesme Dayanımı

şeklinde tanımlanabilir. Nihai düşey gerilme q_{ult} ve nihai yanal gerilme σ_3 asal gerilmeler olarak düşünülürse;

$$q_{ult} = \sigma_3 tg^2 \beta + 2c_{avg} tg \beta \quad (2.41)$$

olarak formülize edilebilir. Taş kolon gruplarının nihai taşıma gücünün bulunması için bu yöntemde temel şekli, boyutları, taş kolonun içsel sürtünme açısı, taş kolonla iyileştirilmiş kompozit zeminin kayma mukavemeti ve üzerine etkiyen jeolojik yük ile sıkışabilirlik göz ardı edilmektedir.

2.8 Taş Kolon Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Siltli kumların yumuşak killerin, vibroflotasyon ya da derin sıkıştırma teknikleri ile verimli şekilde sıkıştırılmayan gevşek granüler ve dolgu zeminlerin iyileştirilmesinde etkin bir yöntem olan taş kolonların diğer zemin iyileştirme yöntemlerine göre üstünlükleri ve sınırlayıcı yanları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Taş kolon uygulaması etkin bir drenaj sistemi olduğundan kohezyonlu birimlerde konsolidasyon sürelerini azaltarak yumuşak zeminlerin mukavemetini arttırmaktadırlar. Diğer zemin iyileştirme yöntemlerinde aynı sonuca ulaşabilmek için birkaç sistemin birlikte çalıştırılmasına (kum dren +ön yükleme gibi) ihtiyaç vardır.
- Taş kolon uygulaması, derin temel sistemleri (fore ya da çakma kazık), tamamen yer değiştirme veya enjeksiyon gibi geleneksel zemin iyileştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, imalatta kullanılan malzemenin kolay temin edilebilir ve ucuz olması sebepleri ile oldukça ekonomik çözümler sunar.
- Taş kolon uygulamasında kullanılan malzeme doğal zemin olduğundan yöntemin çevreye olumsuz etkisi (ıslak yöntemde kullanılan suyun deşarjı hariç) bulunmaktadır.
- Taş kolonların uygulanabilirliği önemli ölçüde zemin koşullarına bağlı olduğundan yöntemin uygulanması için tecrübeli mühendis gruplarının çalışmalarına ve detaylı zemin araştırmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.
- Kayma mukavemeti ≤ 15 kPa olan zeminlerde ve organik ya da turba zemin tabaka kalınlığının kolon çapının iki katından fazla olduğu durumlarda yöntem verimliliğini kaybetmektedir.

DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLAR

3.1 Giriş

Darbeli kırmataş kolonlar (DKK), yirmi yıldan fazla süredir özellikle Amerika'da zemin oturmalarının istenilen düzeyde olması ve yumuşak zeminlerde temel taşıma gücünün artırılması amacıyla kullanılmaktadır [19]. Darbeli kırmataş kolonlar önceden kazılmış kuyulara sağlam agrega tabakalarının özel tasarlanmış, konik uçlu çekiç ile tokmaklanarak sıkıştırılması ile oluşturulur [20].

Darbeli kırmataş kolon yapılırken kuyunun içine bırakılan sağlam kolon agregaları sıkıştırıldıkça zemin içine yayılarak diğer tabakalar için sağlam bir tabaka oluşturur. Bu şekilde yataklanma katsayısı arttırılır. Darbe ile sıkıştırılan bu tabakalar kolon boyunca yanal olarak ve uç kısımlarda da aşağıya doğru genişleyerek kolon çevresinde ki zeminde öngerilme ve şekil değiştirme oluşmasına sebep olur [19], [21].

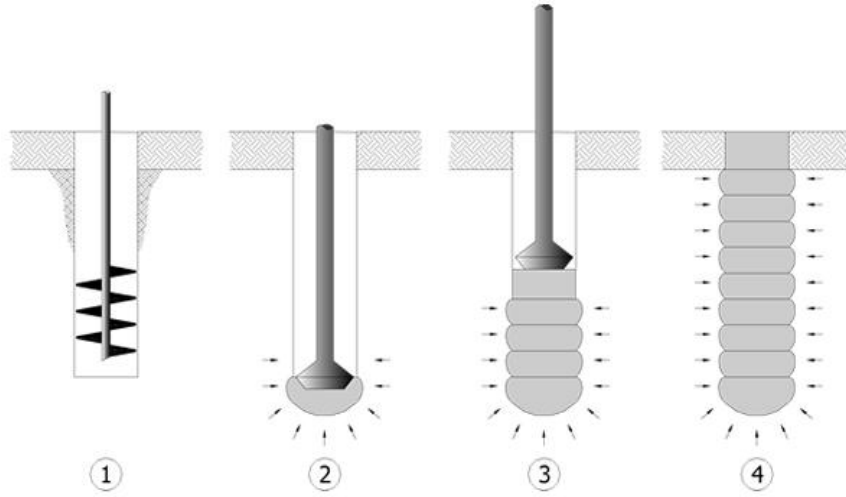
3.2 Darbeli Kırmataş Kolon Yapım Aşamaları

Darbeli kırmataş kolon aşamaları Şekil 3.1' de gösterildiği gibi sıralanmaktadır [20].

- Uygun bir kazı aleti ile bir kuyu açılır. Zeminin kendini tutamadığı durumlarda kılıf yardımıyla bir kuyu açılır.

- Kırmataş malzeme kuyunun dibine yerleştirilerek ince tabakalar halinde sıkıştırılır. Genellikle 30 cm veya daha düşük kalınlıkta tabakalar oluşturulur. Yüksek frekanslı 45 derecelik konik uçlu tokmak ile tabakalar sıkıştırılır.
- Sıkıştırma işlemi uygulanan tabakanın çapı artar ve bu zemin tabakasında öngerilme ve şekil değiştirmeye sebep olur.
- Tabaka tabaka uygulanan bu işlem ile darbeli kırmataş kolon imal edilmiş olunur.

Arazide yapılan darbeli kırmataş kolona ait fotoğraflar Şekil 3.2 - Şekil 3.5' de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Darbeli kırmataş kolon yapım aşamaları [20].



Şekil 3.2 Darbeli kırmataş kolonun açılması[22]



Şekil 3.3 Kılıf yardımıyla darbeli kırmataş kolon açılması [22]



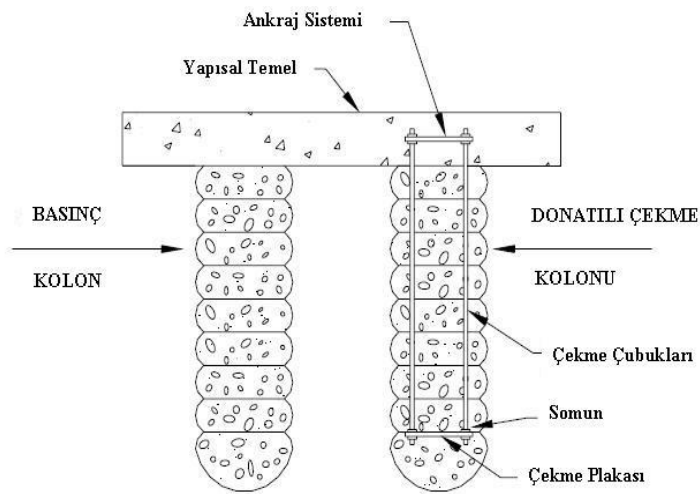
Şekil 3.4 Kırmataş kolon malzemesinin yerleştirilmesi [22]



Şekil 3.5 Darbeli kırmataş kolon sıkıştırılması [22].

3.3 Darbeli Kırmataş Kolon Çeşitleri

Darbeli kırmataş kolonlar basınç kolonları (taşıyıcı) ve donatılı çekme kolonları olarak iki türde inşa edilebilir. İki kolonun yapılış aşamaları da aynıdır ama çekme kolonlar için birkaç işlem daha gerekmektedir. Kuyu dibinde şişkin tabaka oluşturulduktan sonra donatı düzeyi kuyu dibine indirilir. Bu düzenek, çekme çubuklarından, alta konan çelik plakadan meydana gelmektedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Darbeli kırmataş kolon çeşitleri [20]

3.4 Darbeli Kırmataş Kolonlar İle Taş Kolonların Karşılaştırılması

Darbeli kırmataş kolonlar ile taş kolonlar aynı gibi gözükmesine karşı birçok farklılıklar bulunmaktadır.

- Darbeli kırmataş kolonlar tasarlanırken ilk amaç alt tabakayı pekiştirmektir. Bazı uygulamalarda önemli olan radyel drenajı arttırmakta olabilir. Fakat alt tabakayı güçlendirme ikinci plandadır.
- Darbeli kırmataş kolonlar genellikle kısa kolonlardır. Boyları genellikle genişliklerinin 2 ile 8 katı arasında değişmektedir.
- Darbeli kırmataş kolonlar, yatay ya da düşey titreşimlerle yer değiştirmek yerine kazılarak imal edilirler. Kolonun etrafını saran zemin bu yüzden kaybetmez.
- Darbeli kırmataş kolonlar vibrasyon tekniği yerine özel tasarlanmış yüksek frekanslı tokmaklar yardımıyla imal edilirler.
- Darbeli kırmataş kolonlar, ince tabakalar halinde inşa edilirler. Bu şekilde kolon çevresinde ki zeminde ön gerilme, ön şekil değiştirme ve sıkışmayı sağlar.

3.5 Darbeli Kırmataş Kolon Elemanlarının Özellikleri

Darbeli kırmataş kolon elemanlarının çapları, boyları, içsel sürtünme açıları ve kullanılan malzeme dane çapı dağılımı hakkında bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

3.5.1 Darbeli Kırmataş Kolon Çapı

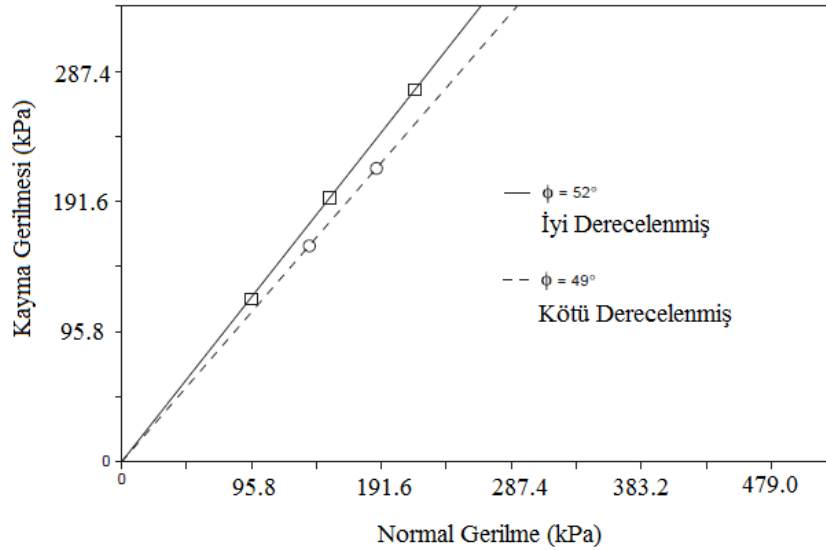
Darbeli kırmataş kolonların çapı uygulama yapılacak proje türüne değişiklik göstermekle beraber genel olarak geopier (kazı yapıp doldurulan) sistemler için bitmiş çap 76 cm, impact (kılıf yardımıyla kazı yapıp doldurulan) sistemlerde bitmiş çap 50 cm civarında bulunmaktadır.

3.5.2 Darbeli Kırmataş Kolon Boyu

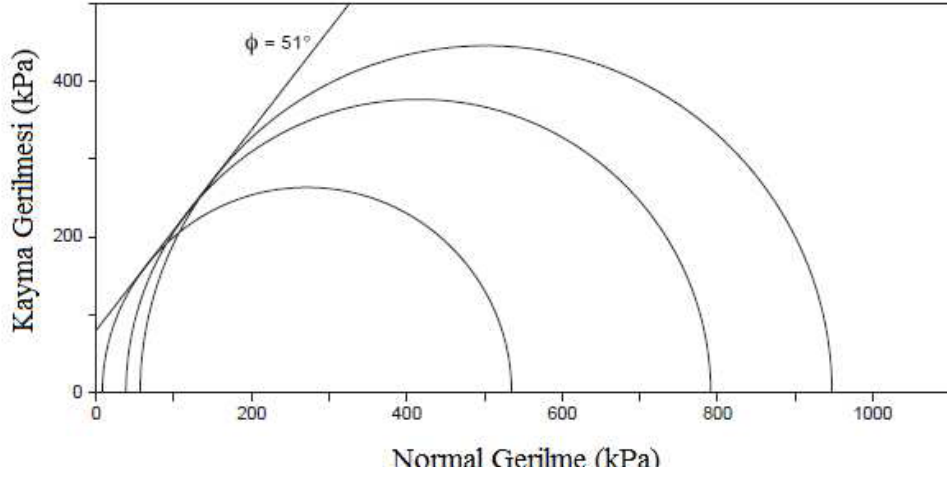
Darbeli kırmataş kolon boyları da proje türüne göre değişiklik göstermektedirler. DKK elemanları boyları genel olarak kısadır. Uzunlukları genişliklerinin 2 ile 8 katı arasında değişmektedir. Bunun dışında geopier sistemde maksimum 8 m, impact sistemde maksimum 18 m olmaktadır.

3.5.3 Darbeli Kırmataş Kolon İçsel Sürtünme Açısı

Darbeli kırmataş kolonların özelliklerini belirleyebilmek için arazide tam ölçekli kesme deneyleri, laboratuvar ortamında temsili numuneler ile üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. DKK elemanı üzerinde uygulanan tam ölçekli kesme deneyi sonuçları; ince dane oranı % 0 olan malzeme ile imal edilmiş kolonların bulunduğu bölgede içsel sürtünme açısının 49° , ince dane oranı %5-10 olan malzeme ile imal edilmiş kolonların bulunduğu bölgede ise içsel sürtünme açısının 52° civarında olduğunu göstermektedir (Şekil 3.7). Iowa Üniversitesi'nde gerçekleştirilen küçük ölçekli üç eksenli basınç deneyi sonuçları ise, ince dane oranı %5-10 olan malzeme ile imal edilmiş kolon için içsel sürtünme açısının 51° olduğunu göstermektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.7 DKK üzerinde uygulanan arazi kesme deneyi [20]



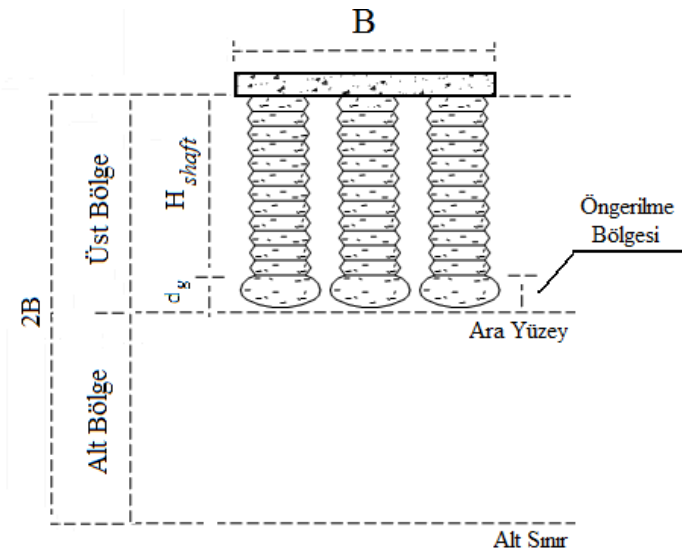
Şekil 3.8 DKK üzerinde uygulanan üç eksenli basınç deneyi [23]

3.5.4 Darbeli Kırmataş Kolon Malzemesinin Dane Çapı

Darbeli kırmataş kolonda kullanılacak malzeme çapının maksimum dane çapı 38 mm, minimum dane çapı 13 mm olmalıdır. Kullanılan bu malzeme yükleme ve akma deneylerinde başarıyla kullanılmış olmalıdır. Yumuşak ve gevrek zemin koşullarında inşaatı kolaylaştırmak için gerekli deney şartlarını geçmiş dane çapı 50 mm ve üstünde olan agregalarda kullanılabilir.

3.6 Darbeli Kırmataş Kolon Destekli Temelerde Oturma Hesabı

Darbeli kırmataş kolon ile iyileştirilmiş zeminde ki oturma miktarını tahmin etmek, iyileştirilmemiş zeminde ki oturmaya tahmin etmekten çok daha zordur. Şekil 3.9'da DKK sistemi hesabı için bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.9 DKK ile desteklinmiş temelerde oturma hesabı [20]

Şekilde de gösterildiği gibi zemin üst bölge ve alt bölge olarak ikiye ayrılmıştır. Üst bölge tabaka kalınlığı (H_{shaft}); kolon boyu (H_0) ve kolon çapının (d_{shaft}) toplamı olarak tanımlanabilir. Lawton ve Warner'a göre [24]'de kırmataş kolonlar ile destekli rijit temellerde meydana gelecek oturma,

$$S_r = S_{UZ} + S_{LZ} = S_{UZ} + S_{i,LZ} + S_{c,LZ} + S_{s,LZ} \quad (3.1)$$

olarak tanımlanır. Burada;

S_U : Üst Bölgedeki Ani Oturma Miktarı

S_{LZ} : Alt Bölgedeki Toplam Oturma Miktarı

$S_{i,LZ}$: Alt Bölgedeki Ani Oturma Miktarı

$S_{c,LZ}$: Alt Bölgedeki Birincil Konsolidasyon Oturması

$S_{s,LZ}$: Alt Bölgedeki İkincil Konsolidasyon Oturması

gibi adlandırılabilir. Bunlarda ikincil konsolidasyon oturması değeri çok küçük olacağından dolayı ihmal edilebilir. Dolayısıyla formül şu şekilde ifade edilebilir:

$$S_r = S_{UZ} + S_{i,LZ} + S_{c,LZ} \quad (3.2)$$

3.6.1 Üst Bölge Oturmaları

Üst bölgedeki oturmalar, kolon ve kolon etrafındaki sıkıştırılmış zeminin kompozit rijitliğine bağlıdır. Bu bölgede meydana gelen oturma kolon modülü, kolon malzemesindeki gerilme, zemin modülü ve zeminde meydana gelen gerilmenin bir sonucudur. Zeminde meydana gelen oturmalar üst bölge oturmalarına dahil edilmezler. Şekil 3.10' da yay modeli üstünde kolonda meydana gelen gerilmeler gösterilmiştir. Rijit yay rijit kolon materyalini, yumuşak yay ise zemini temsil etmektedir. Rijit bir temel ve merkeze etkileyen bir P yükü için bütün yaylar δ miktarı kadar çökme gösterecektir. Buna göre;

$$P = -k \cdot \delta \quad (3.3)$$

olarak yazılabilir. Burada k, yay sabitidir. Kolonlar yardımıyla iyileştirilen zeminde temelden doğan yük nedeniyle kolonun üst kısmında oluşacak olan gerilme q_p , zemine etkileyen q_m gerilmesinden daha büyüktür. Yay sabiti olarak kolonun ve zeminin

yataklanma katsayısı alınabilir. Eğer temel tam olarak rijitse zeminde meydana gelecek oturma, kolon içerisinde meydana gelecek oturmaya eşit olacaktır. Buna göre eşitlik;

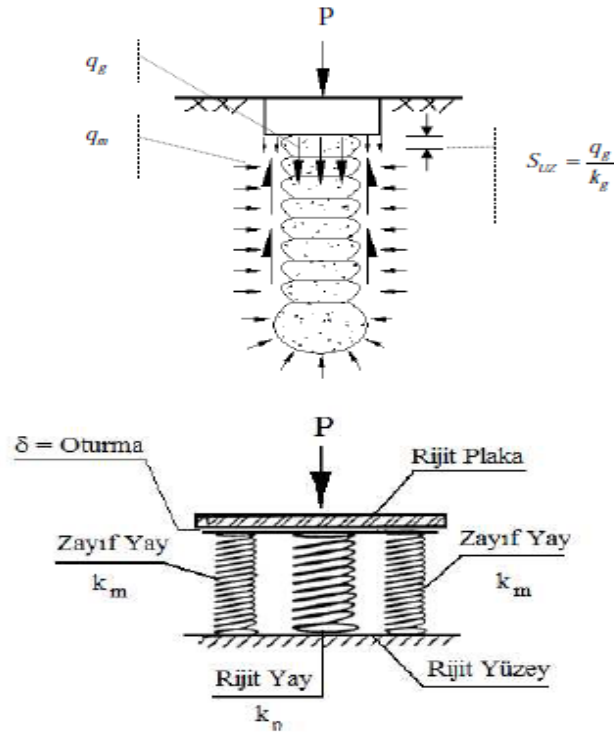
$$S_{UZ} = \frac{q_p}{k_p} = \frac{q_m}{k_m} \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

q_p : Kolon Elemanı Üzerindeki Gerilme (kN/m²)

k_p : Kolon Elemanı Yataklanma Katsayısı

şeklinde açıklanabilir. k_p değeri genellikle inşaat arazisinde oluşturulup, izole edilmiş bir kolon üzerinde yapılan deney ile elde edilir.



Şekil 3.10 DKK için yay modeli [20]

Şekil 2.29'da düşey yönde olan kuvvetlerin toplamı şu şekildedir,

$$\Sigma F_v = 0 = q_0 \cdot A - q_p \cdot A_g - q_m A_m \quad (3.5)$$

Burada;

F_v : Düşey Kuvvet

q_0 : Ortalama Temel Tabanı Basıncı

A: Toplam Temel Alanı

q_p : Kolona Etkiyen Düşey Gerilme

A_g : Kırmataş Kolon Alanı

q_m : Zemine Etkiyen Düşey Gerilme

A_m : Zemin Alanı

şeklinde açıklanabilir. (3.5) eşitliğinden kolon ve zemine gelen gerilme değerleri,

$$q_p = \frac{q \cdot n_s}{R_a(n_s - 1) + 1} = q_0 \cdot \mu_p \quad (3.6)$$

$$q_m = \frac{q}{R_a(n_s - 1) + 1} = q_0 \cdot \mu_m \quad (3.7)$$

$$R_s = \frac{q_p}{q_m} \quad (3.8)$$

$$R_a = \frac{A_p}{A} \quad (3.9)$$

$$R_s = n_s = \frac{k_p}{k_m} \text{ (Tamamen rijit olan temeller için geçerlidir)} \quad (3.10)$$

Rijit temeller için $R_s = n_s$ olduğu için kolon ve temellere gelen gerilmeler;

$$q_p = \frac{q \cdot R_s}{R_a(R_s - 1) + 1} = q_0 \cdot \mu_p \quad (3.11)$$

$$q_m = \frac{q}{R_a(R_s - 1) + 1} = q_0 \cdot \mu_m \quad (3.12)$$

şeklinde bulunabilir. Burada;

q : Temelden Gelen Ortalama Düşey Gerilme

R_s : Kolon-Zemin Gerilme Oranı

n_s : Gerilme-Konsantrasyon Oranı

R_a : Alan Değişim Oranı

k_m : Zeminin Yataklanma Katsayısı

olarak tanımlanır.

Gerilme konsantrasyon oranının (n_s), yapılan ölçümlere göre rijit temellerde 4 ile 45 arasında değiştiği bulunmuştur. Dolgu ve geosentetik donatılı duvarlar, rijit bir yapı

olmadıklarından dolayı, gerilme konsantrasyon oranı rijit temeller için bulunan değerlerden daha düşük olmalı ve daha dikkatli seçilmelidir.

Zeminin yatak katsayısı k_m ; zeminin elastisite modülü E_s , Poisson oranı ν , temel genişliği B ve etki katsayıları I_s, I_f ile şu şekilde hesaplanır;

$$k_m = \frac{1}{BE'_s I_s I_f} \quad (3.13)$$

$$E'_s = \frac{(1-\nu^2)}{E_s} \quad (3.14)$$

3.6.2 Alt Bölge Oturmaları

Alt bölge oturması, geleneksel oturma analizi yöntemlerini içeren elastik oturma ve konsolidasyon oturması hesaplamalarına dayanmaktadır. Elastik oturma analizleri için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Matris zeminin elastisite değeri, SPT veya CPT sonuçlarına göre ampirik yaklaşımlar olarak belirlenebilir. Alt bölgede oluşacak ani oturmalar şu şekildedir;

$$S_{i,LZ} = \frac{qI_q H_{LZ}}{E_{LZ}} \quad (3.15)$$

Kare veya dairesel temeller için ise;

$$H_{LZ} = 2B - H_{shaft} = 2B - H_0 - d_{shaft} \quad (3.16)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

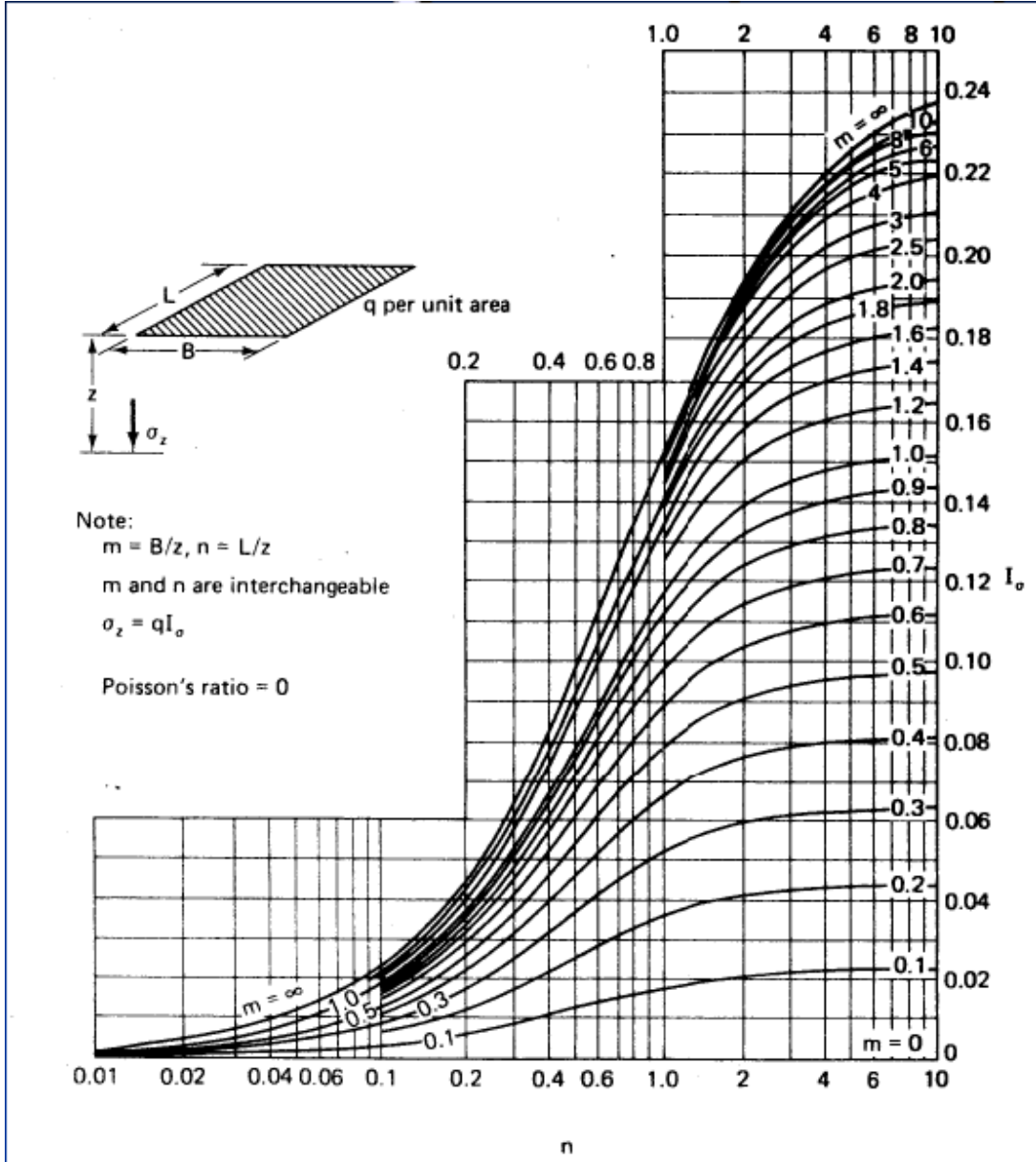
I_q : Westergaard Etki Faktörü (Şekil 3.11)

H_{LZ} : Alt Bölge Kalınlığı

E_{LZ} : Alt Bölge Elastisite Modülü

B : Temel Genişliği

olarak açıklanabilir.



Şekil 3.11 Westergaard etki faktörü [24]

Alt bölgede ki ani oturma hesabı için literatürdeki her hangi bir eşitlikten faydalanılabilir. Elastik modül değerleri, kum ve killer için ayrı olarak ampirik yaklaşımlar yardımıyla elde edilir. Alt bölgede oluşacak olan birincil konsolidasyon oturması ödometre deneyinden çıkan sonuçlar ile;

$$S_{c,LZ} = \frac{C_c H_{LZ}}{1+e_0} \log \left(\frac{P'_0 + \delta P}{P'_0} \right) \quad (3.17)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada;

C_c : Sıkışabilirlik indisi

P^1_0 : Başlangıç Düşey Efektif Gerilme

δP : Düşey Gerilmedeki Artış

e_0 : Başlangıç Boşluk Oranı

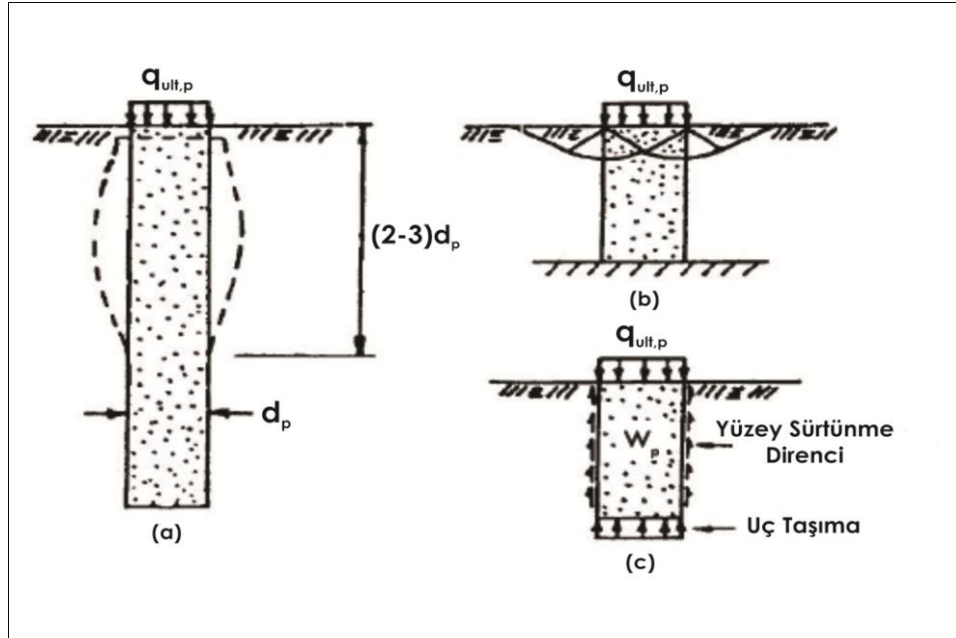
şeklinde ifade edilebilir.

3.7 Darbeli Kırmataş Kolon İle İyileştirilmiş Zeminlerde Temel Taşıma Gücünün Bulunması

Darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminlerin taşıma kapasitesi analizleri çok açık değildir. Taşıma gücü analizleri için grup kolonlardan önce tek kolonların davranışlarının incelenmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

3.7.1 Tekil Darbeli Kırmataş Kolonun Taşıma Kapasitesi

Homojen zeminlerde tekil bir kolonun göçme mekanizması incelendiğinde 3 tür göçme mekanizması ile karşılaşılmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Tekil kırmataş kolonda göçme mekanizmaları [24]

Genişleme göçmesi (Şekil 3.12.a) daha çok yumuşak zeminlerde gözlenmektedir. Kolon kohezyonsuz zeminden oluşturulmuştur ve içerisindeki yatay gerilme eğer zemin içerisindeki yanal gerilmeden daha büyükse meydana gelir. Genişleme sınırları, kolon üst sınırı ile kolon çapının 2 veya 3 kat aşağısında gerçekleşebilir, eğer zemin yumuşak tabakalı ise bu sefer de zeminin en zayıf olduğu yerde genişleme gözlenir.

Yerel veya genel göçme (Şekil 3.12.b) hem kolondan hem de zeminden geçerek meydana gelir. Bu durum;

- Eğer çok kısa bir kolon ($H_p < (2\text{veya}3)d_p$) sağlam tabakaya kadar uzatılmışsa,
- Kolon, çevresindeki zeminden daha dirençli değil ise

gerçekleşebilir.

Zımbalama göçmesi veya kolon altı göçmesi, (Şekil 3.12.c) uygulanan yük kolon boyunca oluşacak yüzey sürtünmesinden ve uç taşıma direncinden veya her ikisinin toplamından büyükse meydana gelebilir. Daha çok sağlam zemine oturmamış çok kısa kolonlarda gözlenir.

3.7.1.1 Tekil Darbeli Kırmataş Kolonda Genişleme Göçmesi

Kolon yeterince uzunsa, kolon başına etkiyen gerilme, kolon içerisindeki malzemede uç kısma iletilmeden önce kesme kuvvetinin tamamen yer değiştirmesine yol açabilir. Kolon üstüne etkiyebilecek nihai gerilme $q_{ult,p}$, sınır radyal gerilme ve kolona ait Rankine pasif toprak basıncı katsayısına bağlıdır. Hughes ve Withers [16] da bunu şu formül ile ifade etmişlerdir:

$$q_{ult,p} = \sigma_{r,lim} \tan^2(45 + \frac{\phi_g}{2}) \quad (3.18)$$

Burada;

$\sigma_{r,lim}$: Sınır Radyal Gerilme

ϕ_g : Kolon Malzemesi İçsel Sürtünme Açısı

şeklinde tanımlanır. Hughes ve Withers [16] da bu eşitliği aşağıdaki kriterlere dayandırmaktadırlar:

- Kolon malzemesinde kohezyon bulunmamaktadır.
- Kolon ve zemin ara yüzeylerinde oluşacak kesme kuvvetleri hesaba katılmaz.
- Asal gerilmeler hem düşey hem yatay etkiyen gerilmelerdir.

Hughes ve Withers [16] da kolonda meydana gelen genişlemeyi, kil içerisindeki silindirik bir boşluğun genişlemesi şeklinde düşünmüşlerdir.

Toplam radyal gerilme σ_{r0} , boşluk suyu basıncı ve efektif düşey gerilmeden,

$$\sigma_{ro} = \sigma'_{vo} K_p + u_o \quad (3.19)$$

şeklinde bulunabilir. Burada,

K_p : Zeminin Pasif Toprak Basıncı Katsayısı

σ'_{vo} : Düşey Efektif Gerilme

u_o : Boşluk Suyu Basıncı

olarak tanımlanır. Zemin hakkında yeterli bilgi bulunmuyorsa, E_u ve s_u oranı 200; poisson oranı da 0.5 şeklinde kullanılabilir. Hughes ve Withers tarafından [16] da yapılan arazi çalışmaları neticesinde $\sigma_{r,lim}$ formülünün,

$$\sigma_{r,lim} = \sigma'_{ro} + 4s_u + u \quad (3.20)$$

şeklinde sadeleştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Temel altı zemin eğer homojen ise genişleme derinliği z_b , temel derinliği D_f ve kolon içsel sürtünme açısı ϕ_g yardımıyla,

$$z_b = D_f + \frac{1}{2} d_{shaft} \tan(45 + \frac{\phi_g}{2}) \quad (3.21)$$

şeklinde yazılabilir.

3.7.1.2 Tekil Darbeli Kırmataş Kolon Ucunda Meydana Gelebilecek Göçme

Tekil bir kolonun ucunda meydana gelebilecek göçme kolon üstünde etkiyen nihai gerilme, çevre sürtünmesi ve uç taşıma kapasitesinin birleşimidir.

$$\Sigma F_v = 0 = q_{ult,p} \cdot A_p + W_g - q_{ult,bot,g} \cdot A_g - \sum_{i=1} f_{si} \cdot p_i \cdot \Delta z_i \quad (3.22)$$

gibi tanımlanabilir. Burada;

W_g : Kırmataş Kolon Ağırlığı

f_{si} : i.Tabakadaki Kolon Çevre Yüzeyindeki Sürtünme

p_i : i. Tabakadaki Kolonun Çevre Uzunluğu

Δz_i : i.Tabakada Kolon Uzunluğu

$q_{ult,bot,g}$: Kırmataş Kolon Uç Taşıma Kapasitesi

A_g : Kırmataş Kolon Kesit Alanı

n : Tabaka Sayısı

olarak tanımlanır. Wissmann [25] de, kolon ağırlığını göz ardı ederek, A_p 'deki artışı göz önüne almış ve formülü,

$$q_{ult,g} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{si} \cdot A_{shaft}}{A_g} \right) + q_{ult,bot,g} \quad (3.23)$$

şekline dönüştürmüştür. Burada,

A_{shaft} : Kolon Yapımında Meydana Gelen Genişlemeden Sonraki Kolon Yüzey Alanı

olarak açıklanabilir. Genişleyen kolon çapı da $d_{shaft}=d_p+76.2mm$ (3 in.) denklemi ile hesaplanabilir.

Çevre sürtünmesi her bir tabakadaki ortalama yatay gerilmeye ve malzemenin sürtünme karakteristiğine bağlıdır. Buna göre çevre sürtünmesi;

$$f_{si} = \left(d_f + \frac{\Delta z_i}{2} \right) \gamma_m K_p \tan(\phi_m) \quad (3.24)$$

Burada,

d_f : İlk Tabakanın Tepe Noktasından Uzaklığı

γ_m : Zemin Birim Hacim Ağırlığı

ϕ_m : Zemin İçsel Sürtünme Açısı

K_p : Kolon Malzemesi İçin Rankine Pasif Toprak Basıncı Katsayısı

olarak tanımlanır. Kayma gerilmeleri ihmal edilmektedir.

Eğer inşa edilen kolon kısa kolon ise kolon üstüne gelen gerilme kolon ucuna aktarılabilir. Uç kısma aktarılan bu gerilme de göçmeye neden olabilir. Bu şartlar altında nihai taşıma kapasitesi;

$$q_{ult,g} = \frac{1}{A_g} (f_s A_{shaft} + q_{tip,g} A_g) = \frac{4}{d_{shaft}^2} f_s d' H_{shaft} + q_{tip,g} \quad (3.25)$$

olacaktır. Drenajlı durumda,

$$f_s = \sigma'_{v,ave} \cdot \tan \phi_s \cdot K_p = \left(D_f + \frac{H_{shaft}}{2} \right) \cdot \gamma \cdot \tan \phi_s \cdot \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_s}{2} \right) \quad (3.26)$$

$$q_{tip,g} = c' \cdot N_c + \frac{1}{2} \cdot d_{shaft} \cdot \gamma \cdot N_\gamma + \sigma'_v \cdot N_q \quad (3.27)$$

Drenajsız durumda,

$$f_s = s_u \quad (3.28)$$

$$q_{tip,g} = s_u N_c \quad (3.29)$$

olacaktır. Burada,

$q_{tip,g}$: Kolon Ucu Taşıma Gücü

f_s : Kolon Çevre Yüzeyi Boyunca Birim Taşıma Gücü

d' : Kolon Efektif Çapı

N_c, N_q, N_γ : Taşıma Gücü Faktörleri

$\sigma_{v,avg}$: Ortalama Düşey Efektif Gerilme

ϕ_s : Zemin İçsel Sürtünme Açısı

γ : Zemin Birim Hacim Ağırlığı

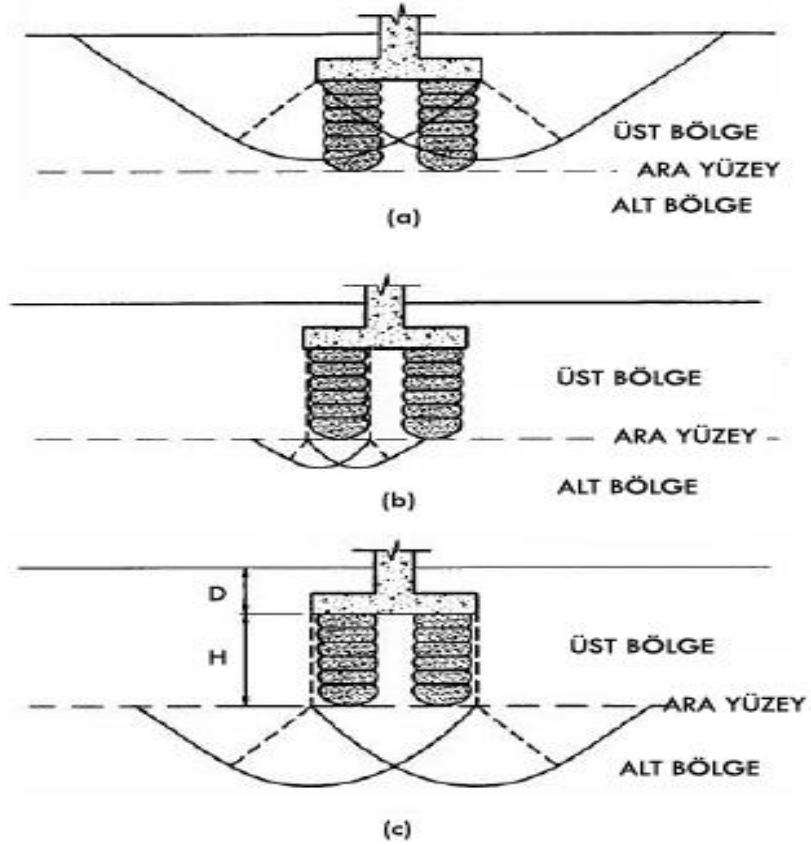
σ'_v : Kolon Ucundaki Düşey Efektif Gerilme

olarak tanımlanabilir.

3.7.2 Darbeli Kırmataş Kolon Gruplarının Taşıma Kapasitesi

Şekil 3.13' de DKK gruplarında meydana gelebilecek göçme mekanizmaları gösterilmiştir. DKK gruplarında meydana gelebilecek göçmeler tekil kolonlarda meydana gelebilecek göçmelerle benzerlik göstermektedir. Zemin-kolon bölgesi yerel

göçme, tekil kolon altında zımbalama göçmesi ve kolon zemin bölgesi altında göçme durumları şeklinde incelenebilir.



Şekil 3.13 DKK gruplarında göçme mekanizmaları [25]

3.7.2.1 Darbeli Kırmataş Kolon Gruplarında Genişleme Göçmesi

Darbeli kırmataş kolon grupları içerisinde genişleme, temelin sınırlayıcı etkisine, kolonlar arasındaki mesafeye ve zemin özelliklerine bağlı olarak meydana gelebilir. Hughes ve Withers [16] da, kolonlar arasındaki mesafenin $2.5d_p$ 'den büyük olması durumunda (d_p : Merkezden merkeze kolon uzaklığı) kolonların birbirlerinden bağımsız olarak hareket edeceğini söylemişlerdir. DKK grubunda temelin nihai taşıma kapasitesi genişleme göçmesine bağlı olarak;

$$q_{ult} = \frac{q_{ult,g}}{\mu_g} \quad (3.30)$$

formülünden hesaplanabilir.

3.7.2.2 Darbeli Kırmataş Kolon Gruplarında Kayma Göçmesi

Kayma göçmesi düzleminin kolon ve zemini kapsayacak bir bölgeden geçtiği varsayılır (Şekil 3.13.a). Göçme yüzeyi boyunca kesme dayanımı, kolon tarafından oluşturulan göçmeye karşı sürtünme direnci τ_g ve zeminin kesme kuvvetine karşı sürtünme direnci $\tau_{s'}$ 'e bağlıdır. Zemin parametreleri Priebe'ye göre [14] de,

$$\phi_{comp} = \tan^{-1} \left[n_s \cdot R_a \cdot \tan \phi_g + (1 - R_a n_s) \cdot \tan \phi_s \right] \quad (3.31)$$

$$c_{comp} = (1 - R_a n_s) c_m \quad (3.32)$$

şeklinde; Wiessmann'a göre de,

$$\phi_{comp} = \tan^{-1} \left[\mu'_g \cdot R'_a \cdot \tan \phi_g + \mu'_m \cdot (1 - R'_a) \cdot \tan \phi_m \right] \quad (3.33)$$

$$c_{comp} = c_c \cdot R'_a + c_m \cdot (1 - R'_a) \quad (3.34)$$

$$\gamma_{comp} = \gamma_c R'_a + \gamma_m \cdot (1 - R'_a) \quad (3.35)$$

formülleri ile bulunabilir. Burada,

R'_a : İndirgenmiş Alan Değişim Oranı ($0.4R_a$)

R'_s : İndirgenmiş Gerilme Konsantrasyon Oranı (n_s)

μ'_g : (3.11) Eşitliğinden R'_a ve R'_s Kullanılarak Elde Edilen Değer

μ'_m : (3.12) Eşitliğinden R'_a ve R'_s Kullanılarak Elde Edilen Değer

olarak tanımlanır. R_s değerindeki azaltma, gerilme ve göçme yüzeyi boyunca meydana gelen değişimi hesaplamak içindir. Wiessmann [25] de, n_s değerinin 2.8 alınmasını tavsiye etmektedir.

3.7.2.3 Darbeli Kırmataş Kolon Gruplarında Zımbalama Göçmesi

Darbeli kırmataş kolon grupları içerisindeki zımbalama göçmesi, tekil kolonlardaki zımbalama göçmesi ile aynı şekilde hesaplanır. Tekil kolondaki taşıma kapasitesi (3.23) eşitliği kullanılarak belirlenir. Belirlenen bu eşitlikten sonra (3.30) eşitliği kullanılarak $q_{ult,g}$ ' den q_{ult} , hesaplanır.

3.7.2.4 Darbeli Kırmataş Kolon Gruplarında Zemin-Kolon Bölgesi Altında Göçme

Darbeli kırmataş kolon grupları zemin-kolon bölgesi altında meydana gelen bu göçmenin önüne, izin verilebilir bir taşıma gücü basıncı belirlenerek geçilebilir. Temel altındaki gerilmenin 2:1 oranıyla arttığı kabulü ile alttaki gerilme,

$$L' = L + H_{UZ} \quad (3.36)$$

$$B' = B + H_{UZ} \quad (3.37)$$

$$q_{ult} = \frac{q_{bottom}(B + H_{UZ})(L + H_{UZ})}{B \cdot L} \quad (3.38)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada,

H_{UZ} : Kolon Boyuna Kolon Çapı Eklenerek Bulunan Uzunluk

q_{bottom} : Kırmataş Kolon Yapılmış Tabakanın Altında Oluşan Gerilme

olarak açıklanabilir.

ZEMİN ÖZELLİKLERİ

4.1 Giriş

Darbeli kırma taş kolon ve taş kolon modelinin üretileceği zemin yatağı için laboratuarda kil ve kumun karışımından oluşan bir zemin malzemesi kullanılmıştır. Bu zemin karışımında kil malzemesi kaolin olup karışımın % 40'nı oluşturmuştur. Model deneylerde kullanılan kil, kum ve çakıl malzemelerinin özellikleri yapılan laboratuvar deneyleri ile belirlenmiş olup ayrıntıları aşağıda verilmiştir.

4.2 Malzeme Özellikleri

4.2.1 Kaolin Kili

Kaolin, granit kayacının ayrışması sonucu elde edilen, genel olarak beyaz renkli bir kil türüdür. Bazı seramik ve porselenlerin yapımında hammadde olarak kullanılır. Deney için kullanılan kaolin ise Bulgaristan'dan getirilmiştir. Malzeme özellikleri şu şekildedir:

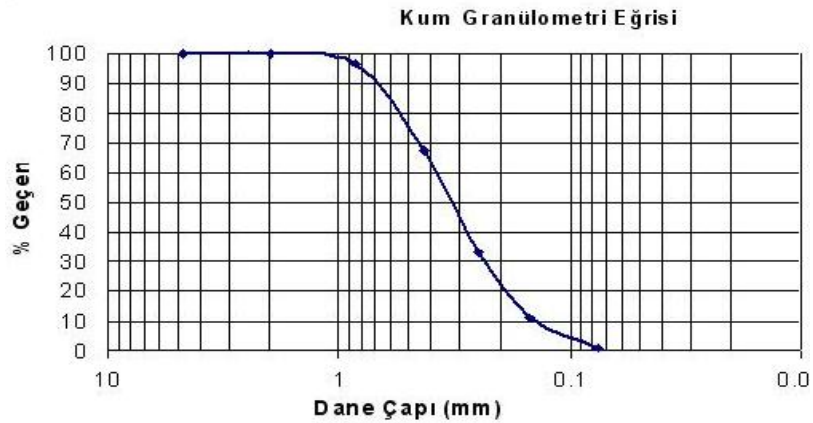
- Beyazlık : %89.38 (Elrepho 2000 standartına göre),
- Tane boyutu (μm cinsinden ve SediGraph 5100 ile yapılan analiz sonuçlarına göre);
 - D50 : 1.3
 - $< 10 \mu\text{m}$: 97.1
 - $< 2 \mu\text{m}$: 60.8

- Kimyasal içeriği : (% olarak ve XRF, AES-ICP ile yapılan analiz sonuçlarına göre);
 - SiO_2 : 57.40
 - Al_2O_3 : 38.74
 - Fe_2O_3 : 0.86
 - TiO_2 : 0.33
 - Ağırlık Kaybı: 0.63
- Nem : % 0.37
- pH: 6.83
- Özgül ağırlık : 2.60 g/cm³

Yapılan kıvam limitleri deneylerine göre bu kilin plastik limiti w_p =%35, likit limiti w_L =%57 olarak belirlenmiş olup plastisite indisi I_p =%22'dir. Bu sonuçlara göre kil, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre (CH) olarak sınıflandırılmaktadır.

4.2.2 Kum

Deneyde kullanılan kum Şile civarından alınmış olup granülometrisi Şekil 4.1' de, indeks özellikleri de Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1' den görüldüğü gibi deney için kullanılan kum, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre kötü derecelenmiş kum (SP) zemin sınıfına girmektedir.



Şekil 4.1 Kum malzemenin granülometresi

Çizelge 4.1 Kumun indeks özellikleri

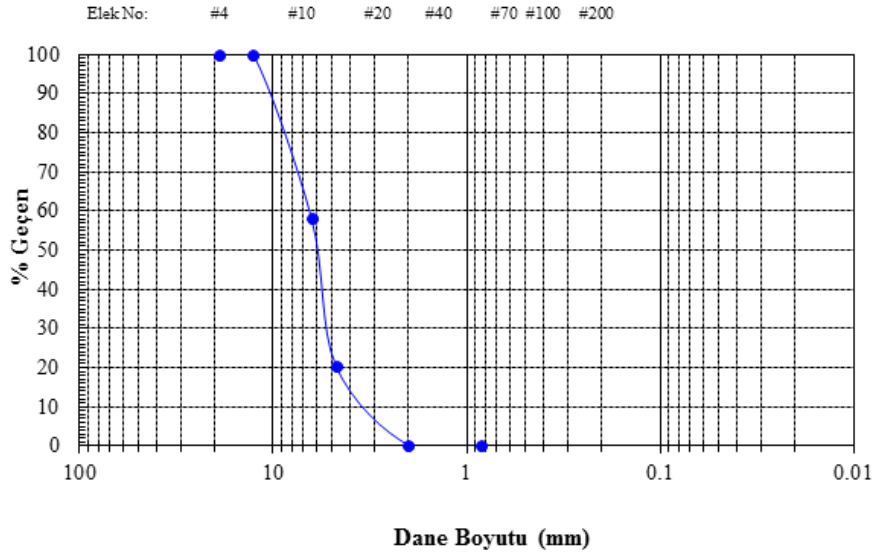
Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sembolü	SP
Özgül Yoğunluk, G_s	2.65
Maksimum Boşluk Oranı, e_{max}	0.88
Minimum Boşluk Oranı, e_{min}	0.50
Ortalama Dane Çapı, D_{50} (mm)	0.31
Efektif Çap, D_{10} (mm)	0.15

4.2.3 Çakıl

Darbeli kırmataş kolonu laboratuvar ortamında modellemek için kullanılan çakıl malzemesi üzerinde yapılan elek analizi sonucunda elde edilen dane çapı dağılımı (granülometresi) Şekil 4.2' de, indeks özellikleri ise Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre çakıl, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre (GW) olarak sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 4.2 Çakılın indeks özellikleri

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sembolü	GW
Uniformluk Sayısı (C_u)	2.26
Derecelenme Sayısı (C_c)	1.275
Ortalama Dane Çapı, D_{50} (mm)	6.0
Efektif Çap, D_{10} (mm)	3.1



Şekil 4.2 Taş kolonlar için kullanılan çakılın granülometresi

4.3 Model Deneylede Kullanılan Kil kum Karışımın İndeks, Mukavemet ve Sıkışabilirlik Özellikleri

%60 kum %40 kil kullanılarak yapılan kıvam limitleri deneylerine göre karışımın plastik limiti w_p =%16, likit limiti w_L =%27 olarak belirlenmiş olup plastisite indisi I_p =%11'dir. Bu karışımla yapılan piknometre deneyinde ise danelerin özgül yoğunluğu 2.63 g/cm³ olarak bulunmuştur. Çizelge 4.3'te karışım indeks özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Deneyde Kullanılan Karışımın İndeks Özellikleri

Plastik Limit	%16
Likit Limit	%27
Plastisite İndisi	%11
Danelerin özgül yoğunluğu	2.63 g/cm ³

Mukavemet ve sıkışabilirlik özelliklerini belirlemek için Rowe hücre ile numune hazırlanmış ve bu deneyden elde edilen örnekler üzerinde mukavemet ve sıkışabilirlik deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler Rowe hücresi deneyi, ödometre deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve serbest basınç deneyleridir.

4.3.1 Rowe Hücresi ile Konsolidasyon Deneyleri

Rowe hücresi Manchester Üniversitesi'nde Prof. P.W. Rowe [26] tarafından büyük çaptaki numuneleri konsolide ederek santrifüj deneylerinde kullanmak için ve klasik ödometre aletinin yarattığı olumsuzlukları ve problemleri gidermek amacı ile geliştirilmiş olan bir tür hidrolik konsolidasyon hücresidir. Klasik ödometre deneylerinde karşılaşılan bu olumsuzluklar genel olarak düşük permeabiliteye sahip zeminlerde ve özellikle uniform olmayan çökeller üzerinde yapılan konsolidasyon deneyinde karşılaşılan zorluklardan ibarettir.

Rowe hücresi konsolidasyon aletinin geleneksel ödometre aletinden ayrılan en önemli özelliği, numune üzerine uygulanan gerilmelerin mekanik bir yükleme sistemi yerine su basıncı vasıtası ile lastik bir diyafram kullanılarak etkilmesidir. Deney aletinin bu şekilde düzenlenmesi büyük çaptaki numunelerde deney yapılabilmesine ve deney sırasında büyük deformasyonların oluşabilmesine imkan vermektedir. Fakat, deney

sisteminin en önemli avantajı, konsolidasyon deneyi sırasında drenajın kontrol altında tutulabilmesi ve boşluk suyu basınçlarının ölçülebilmesidir. Numuneye ters basınç uygulanarak numunenin suya doygunluğu sağlanabilmekte ve farklı yatay ve düşey drenaj koşulları uygulanabilmektedir.

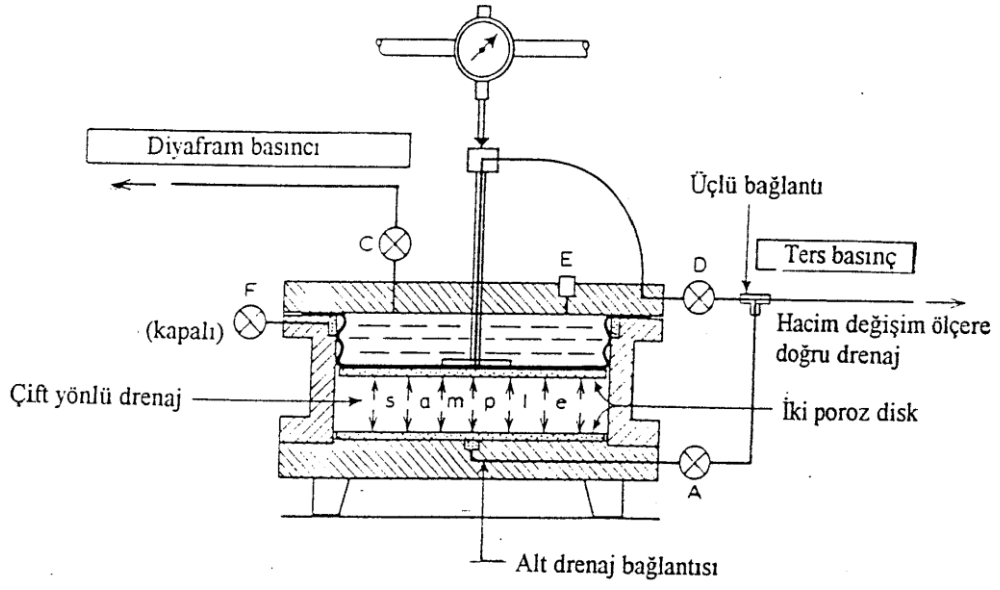
Özellikle drenaj koşullarının kontrol altında tutulabilmesi, drenajsız koşullar altında yükleme yapılabilmesine ve dolayısı ile numune içerisinde oluşan boşluk suyu basınçlarının gözlenebilmesine imkan tanımaktadır. Drenaj koşullarının isteğe bağlı olarak ayarlanabiliyor olması, başlangıçta meydana gelen ani oturmanın konsolidasyon oturmasından ayrı olarak belirlenebilme avantajını da vermektedir. Bununla birlikte homojen olmayan killerde zemin iç yapısının etkileri de Rowe hücresi konsolidasyon aletinde incelenebilmektedir.

Rowe konsolidasyon aletinde büyük çapta numuneler kullanılarak deney yapma olanağı oturma analizleri için klasik ödometrelerde yapılan küçük çaptaki numunelere göre daha güvenilir ve arazide meydana gelen üç boyutlu konsolidasyon durumu için daha fazla bilgi sağlamaktadır. Benzer şekilde Rowe hücresinde özellikle küçük gerilmeler altında konsolide edilen büyük boyutlardaki numunelerden elde edilen c_v değerleri, geleneksel ödometrelerde küçük çaplı deney numuneleri üzerinde yapılan konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen konsolidasyon katsayısı c_v değerlerine göre daha doğru ve daha güvenilir olduğu yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur [26].değerler vermektedir. Ayrıca, Rowe hücresinde yapılan konsolidasyon deney sonuçları arazide gözlenen ve belirlenen oturma hızları ve büyüklükleri ile oldukça iyi bir uyum göstermektedir. Bu durumun, zemin iç yapısının etkisinden ayrı olarak büyük numunelerde oluşan yapısal vizkozitenin bir sonucu olduğu da araştırmacılar tarafından belirtilmektedir [27].

İndeks özellikleri belirlenen kum ve kaolin karışımına, su muhtevaları likit limitlerinin yaklaşık 1,5 katı olacak şekilde saf su ile karıştırılarak bulamaç haline getirilmiştir. Hazırlanan bulamaçlar yaklaşık olarak 1 hafta süre ile bir kapta bekletilerek ve zaman zaman mikserle karıştırılarak danelerin segragasyonu önlenmiş ve numunelerin homojen hale gelmesi sağlanmıştır. Böylece numune suya doygun hale de getirilmiştir.

Bulamaç halindeki numuneler, Rowe hücresine yerleştirilmeden önce yarım saat karıştırılarak konsolidasyona hazır hale getirilmiştir. Bulamacın başlangıçtaki konsolidasyonu sırasındaki hacim değişiminin çok fazla olacağı göz önünde bulundurularak, konsolidasyon sırasında üst üste iki hücre gövdesi kullanılmıştır [27].

Sulu çamur kıvamında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan düşey yönlü konsolidasyon aşamasında yukarıda da bahsedildiği gibi iki adet hücre gövdesi kullanılmıştır. Rowe hücresinin tek gövde kullanılarak düşey drenajlı konsolidasyon deneyleri için düzenlenmiş hali Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Hücre tabanında yer alan poroz diskin tıkanmasını önlemek amacı ile hücrenin alt kısmına iki adet poroz kağıt konularak bulamaç halindeki numune hücreye boşaltılmıştır. Numune üzerine düşey yönde drenajı sağlamak amacı ile poroz disk ve numune kalınlığının uniform ve konsolidasyon sonunda numune üst yüzeyinin düzgün bir şekilde olabilmesi için rijit bir plaka yerleştirilmiştir. Drenajın üstten olabilmesi için ise rijit plakanın ortasındaki delik açık bırakılmıştır. Rowe hücresinin üst başlığı sıkıca kapatılarak tüm gövde boyunca yer alan bütün bağlantılar sıkıca vidalanmıştır. Rowe hücresi üst başlığında yer alan lastik körüğün içersi su ile doldurulmuştur. Lastik körüğün su ile doldurulmasından sonra sisteme C vanasından gerekli konsolidasyon basıncı uygulanarak sulu çamur halindeki numunenin düşey yönlü olarak konsolide olması sağlanmıştır. Konsolidasyon sırasında F vanası kapalı kapalı tutulmuş, çift yönlü drenajı sağlamak için ise A ve D vanaları açık tutulmuştur. Konsolidasyon esnasında oluşan düşey deformasyonlar ve drenaj sırasında çıkan su miktarları belirli zaman aralıklarında ölçülmüştür. (Şekil 4.4) Konsolidasyon sırasında meydana gelen düşey yer değiştirmeler bir lvd (yer değiştirme ölçer) aracılığıyla ölçülmüştür. Numunenin belirli bir konsolidasyon basıncı altında konsolidasyonunu tamamlamadığına karar verebilmek için konsolidasyon sırasında oluşan oturma miktarları zamana karşı çizilmiştir. Rowe hücresinde örnek hazırlama sırasında da yükleme aşamaları halinde uygulanarak laboratuarda gerilme tarihçesi belirli blok örnekler elde edilmiştir. Konsolidasyon sonucu elde edilen tipik oturma-zaman grafikleri Şekil 4.5'te sunulmaktadır. Gerçekleştirilen bütün deneyler için farklı yükleme kademelerine ait oturma-zaman grafikleri ekler bölümünde verilmiştir.

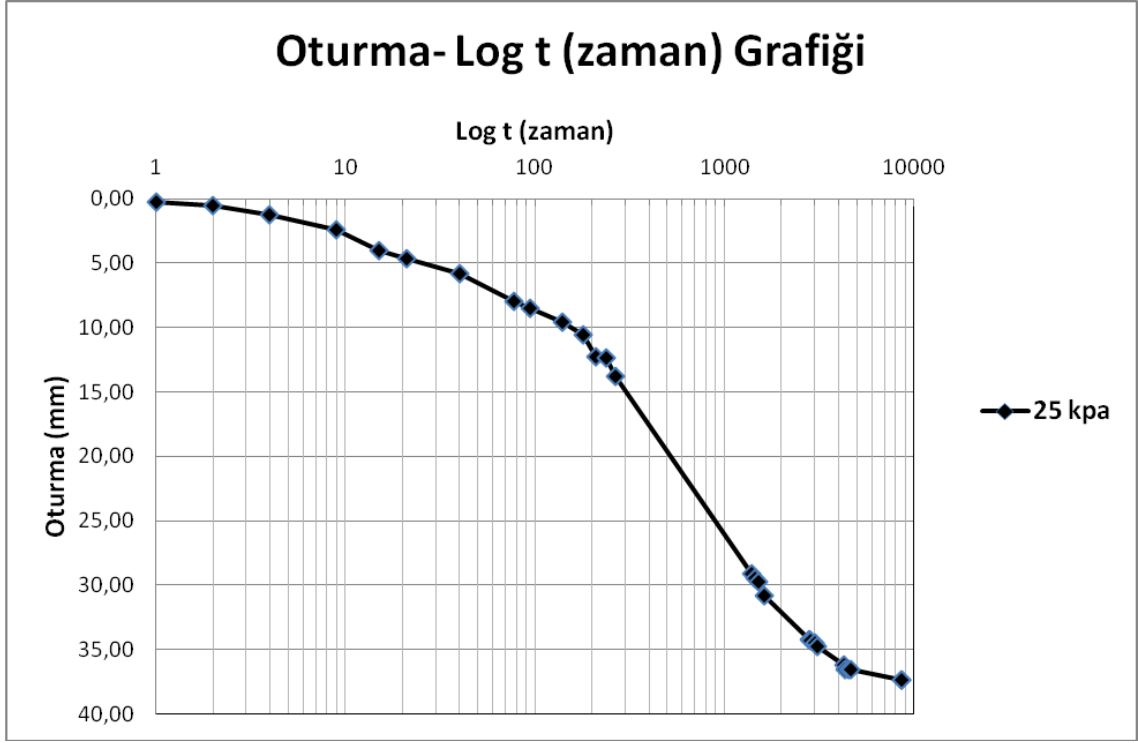


Şekil 4.3 Rowe hücresinin düşey yönlü konsolidasyon deneyleri için düzenlenmiş hali

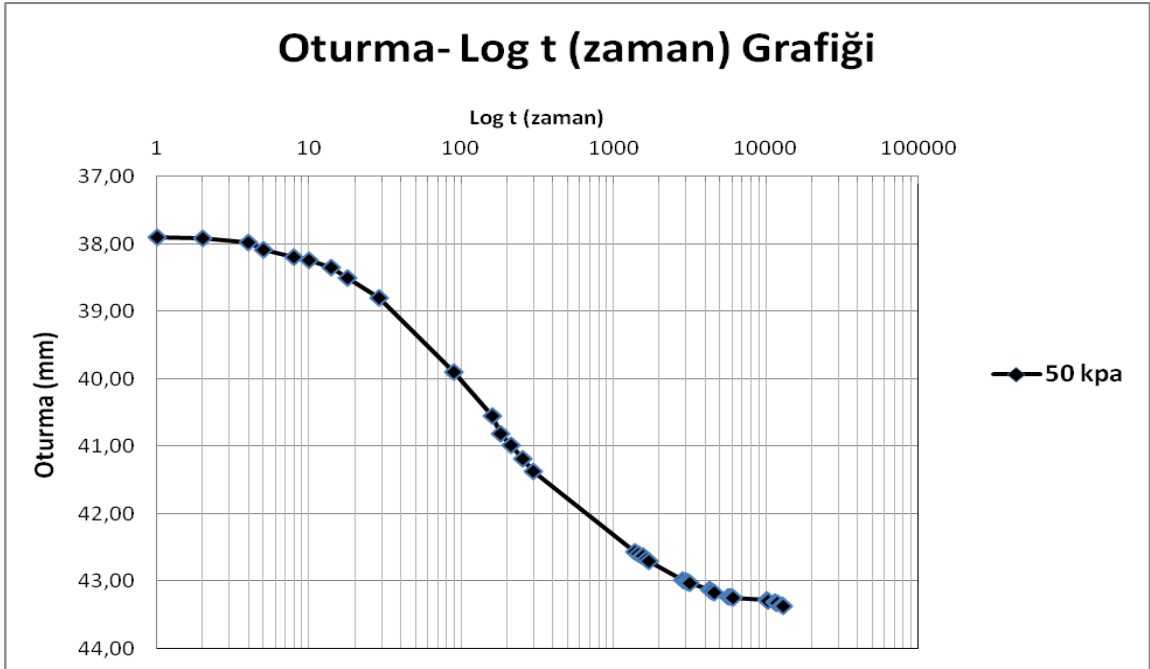


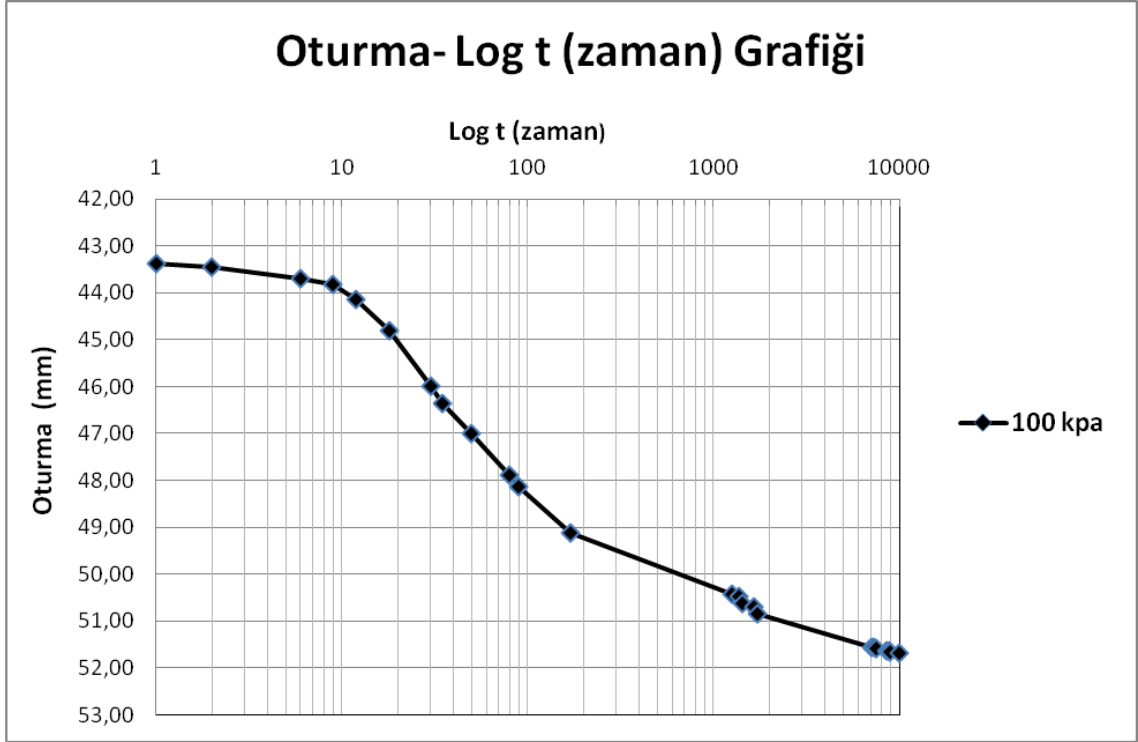
Şekil 4.4 Rowe hücresi ve konsolidasyon deneyi

Rowe Hücresi Deney Sonuçları



Şekil 4.5a Rowe Hücresinde 25 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği





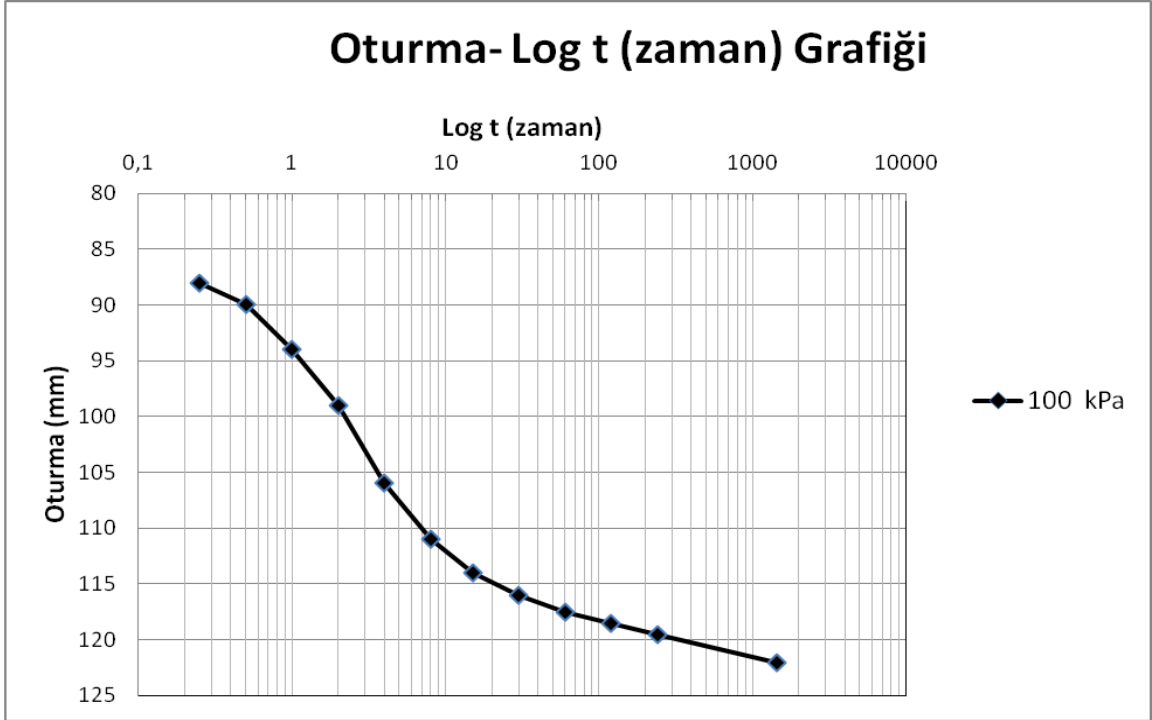
Şekil 4.5c Rowe Hücresinde 100 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği

4.3.2 Ödometre Deneyleri

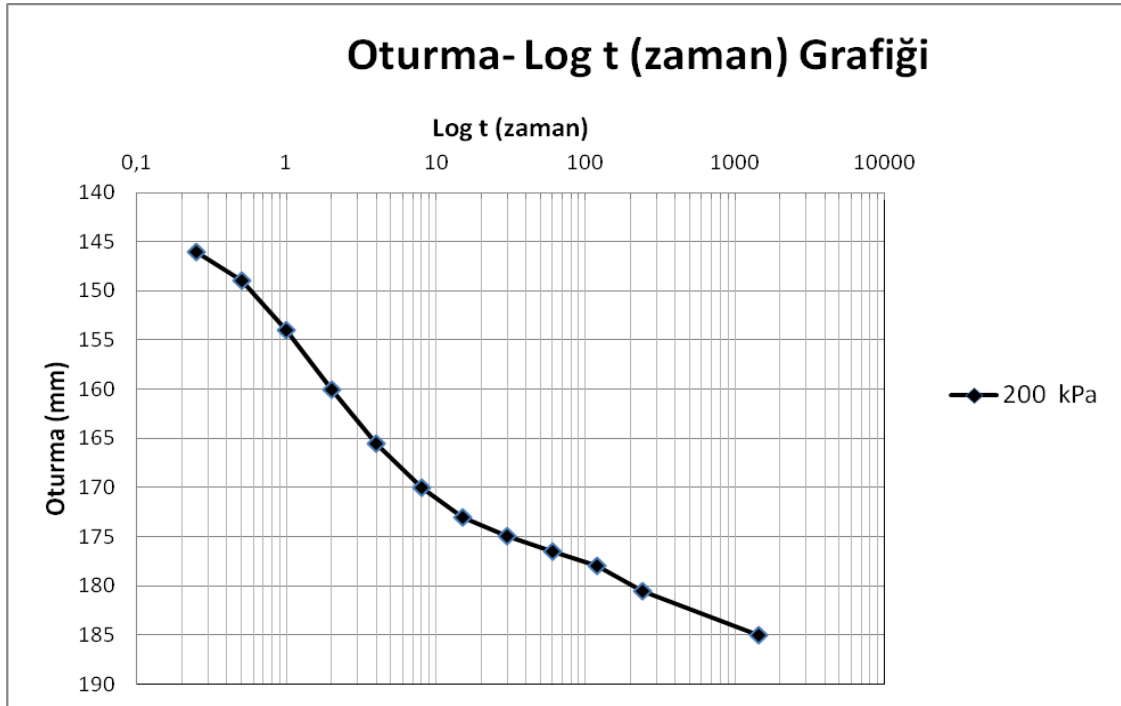
Yumuşak çökellerin yük altında yapacağı oturmanın ne kadar sürede gerçekleşeceğini tahmini, konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Rowe hücresi deneyi sonunda alınan numunelerle ödometre deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından saptanan hacimsel sıkışma katsayısı, sıkışma indisi ve konsolidasyon katsayıları aşağıda verilmiştir. Konsolidasyon katsayısı ve hacimsel sıkışma katsayısının konsolidasyon basıncı ile değişimi Şekil 4.6'de verilmektedir.

Rowe hücresi deneyi ve ödometre deneylerinden elde sonuçlar model deney tankının konsolidasyon süresinin belirlenmesi hakkında fikir vermektedir.

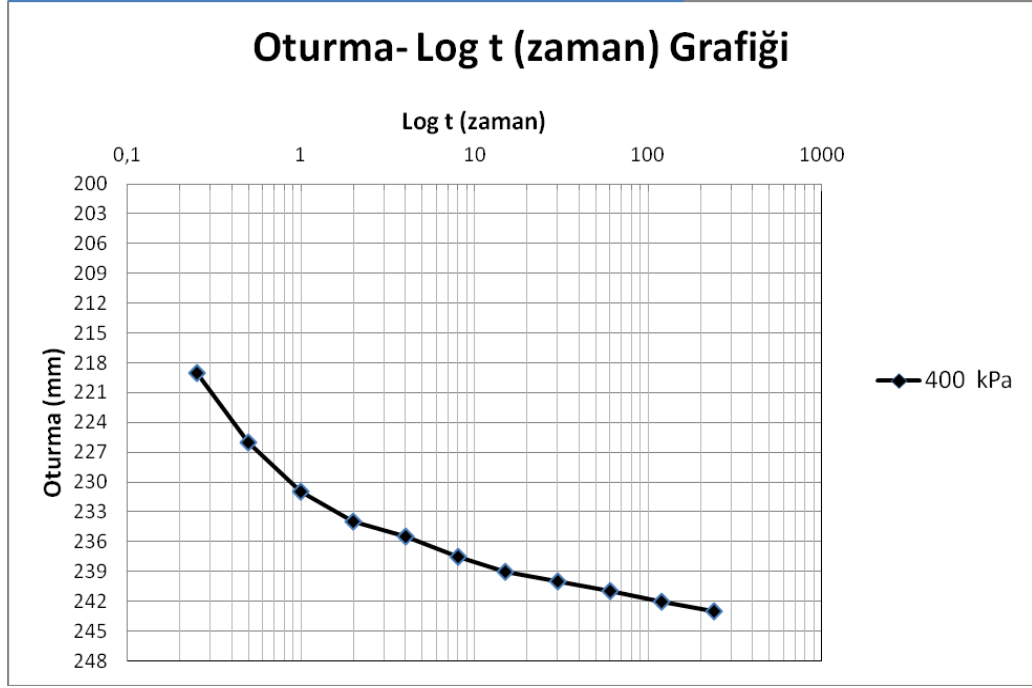
Ödometre Deneyi Sonuçları



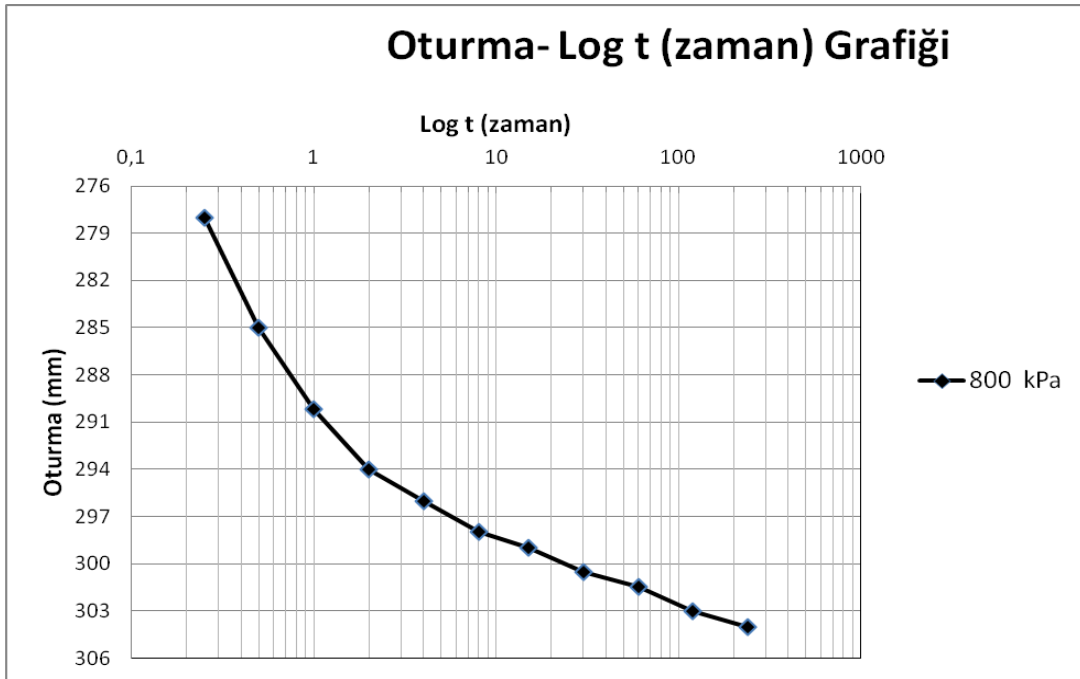
Şekil 4.6a Ödometre deneyinde 100 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği



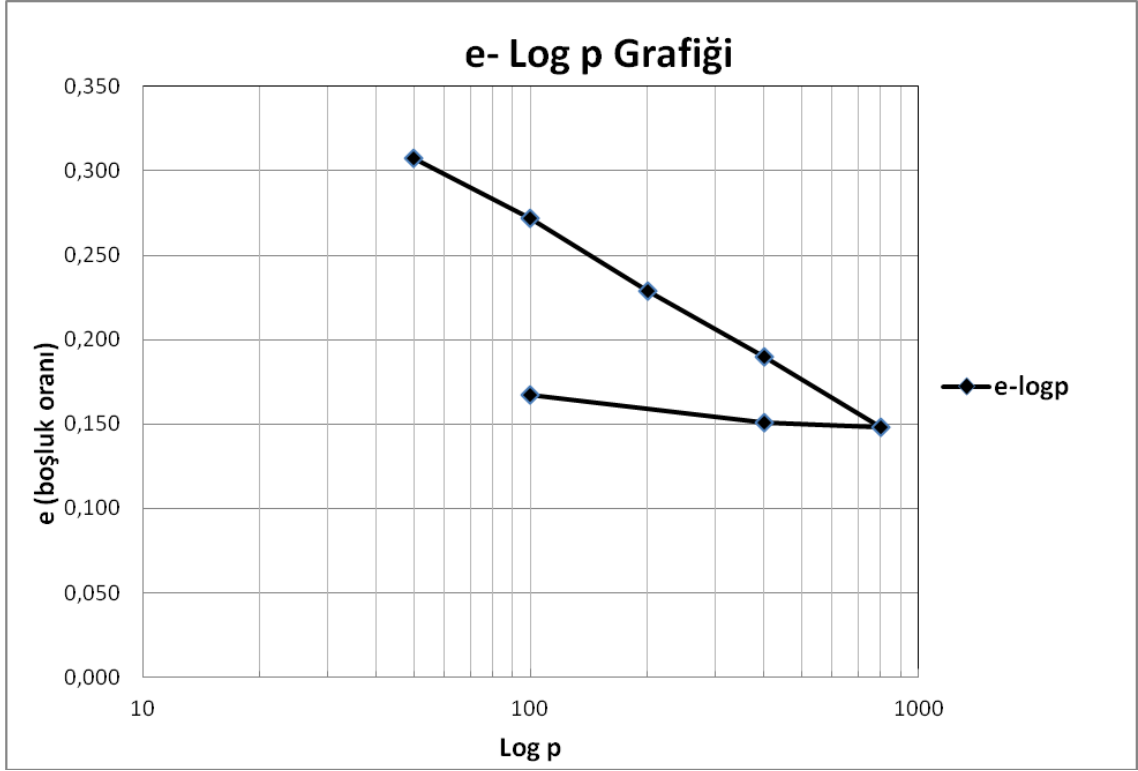
Şekil 4.6b Ödometre deneyinde 200 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği



Şekil 4.6c Ödometre deneyinde 400 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği



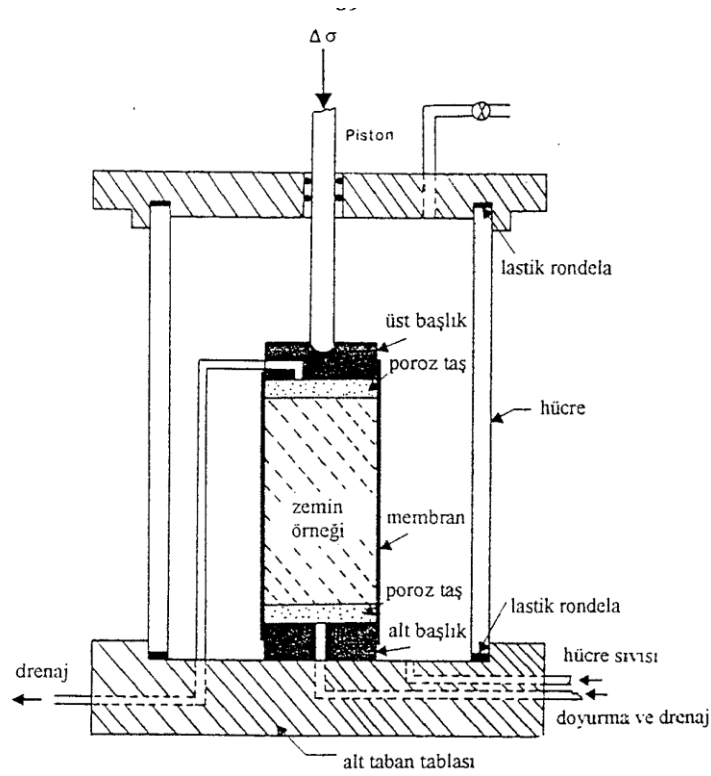
Şekil 4.6d Ödometre deneyinde 800 kPa basınç altında konsolide edilen numunenin oturma zaman grafiği



Şekil 4.6e Ödometre e-log p eğrisi

4.3.3 Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Rowe hücresinde konsolidasyon sonucu hazırlanan zeminlerden alınan blok örneklerden elde edilen üç eksenli deney örnekleri tüpler vasıtasıyla örselemeye izin verilmeden 5 cm çapında 10-12 cm boyunda silindirik olarak hazırlanmıştır. Laboratuarda deformasyonların belirlenmesi için yapılan çalışmada Şekil 4.7' de gösterilen üç eksenli deney aleti kullanılmıştır. Deney örnekleri hücreye yerleştirildikten sonra izotropik kademeli yükleme altında konsolidasyonu gerçekleştirilerek yükleme programı uygulanmıştır. Şekil 4.7' de deney hücresinde drenaj ve boşluk suyu basıncı ölçüm vanaları gösterilmiştir. Bütün deneyler boyunca aksenal deformasyon, boşluk suyu basıncı ve hücre basıncı ölçümleri transdüserler yardımıyla bilgisayara bağlı elektronik bir sistemle ölçülüp kaydedilmiştir. Deney örneklerinin doygunluk yüzdesini kontrol etmek için deneylerin başlangıcında doygunluk kontrolü yapılmıştır.

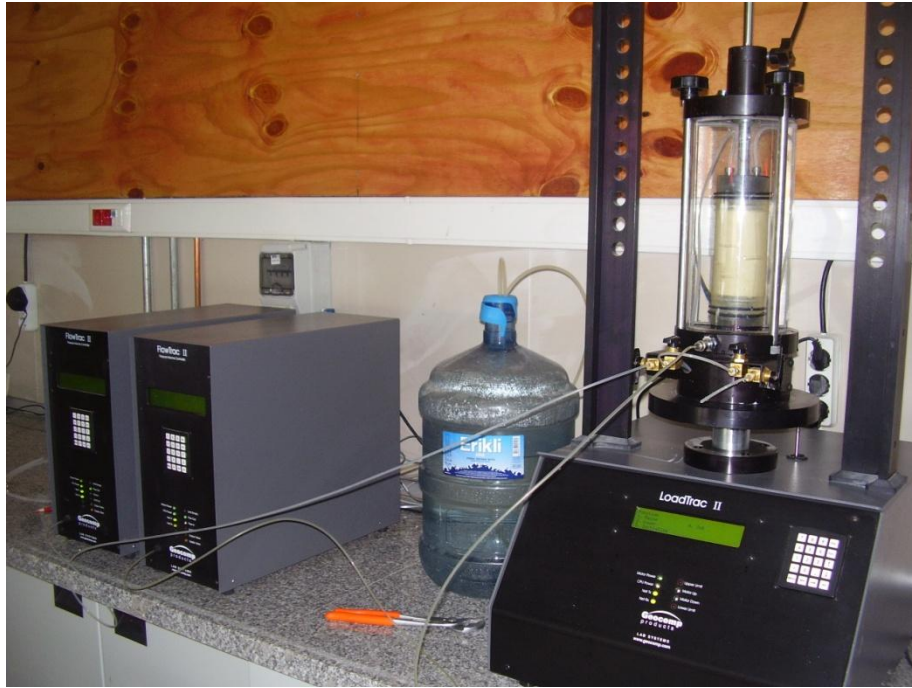


Şekil 4.7 Üç eksenli hücrede drenaj ve boşluk suyu basıncı ölçüm vanaları

Temel zeminin mukavemet parametrelerinin belirlenmesi için laboratuarda elde edilen zemin numuneleri üzerinde konsolidasyonlu drenajsız (CU), ve konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Rowe hücrelerinde konsolide olan numuneden örselenmemiş numune alabilmek için 5cm çapında 12 cm boyunda tüp numune alıcı yaptırılmıştır (Şekil 4.8). Rowe hücrelerinde 100 kPa basınç altında konsolidasyon sonucu elde edilen blok numunelerden alınan örnekler üzerinde 100 kPa ve 200 kPa hücre basıncı altında CU, ve UU deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.9). Deneyler sonuçlarından elde edilen verilerin grafikleri Şekil 4.10- Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



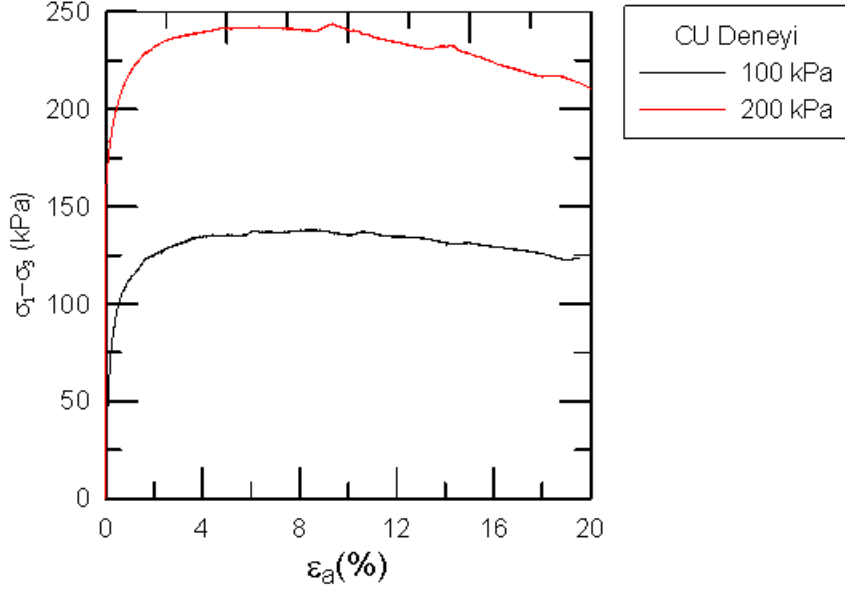
Şekil 4.8 Rowe Hücresinden üç eksenli deneyi için numune alımı



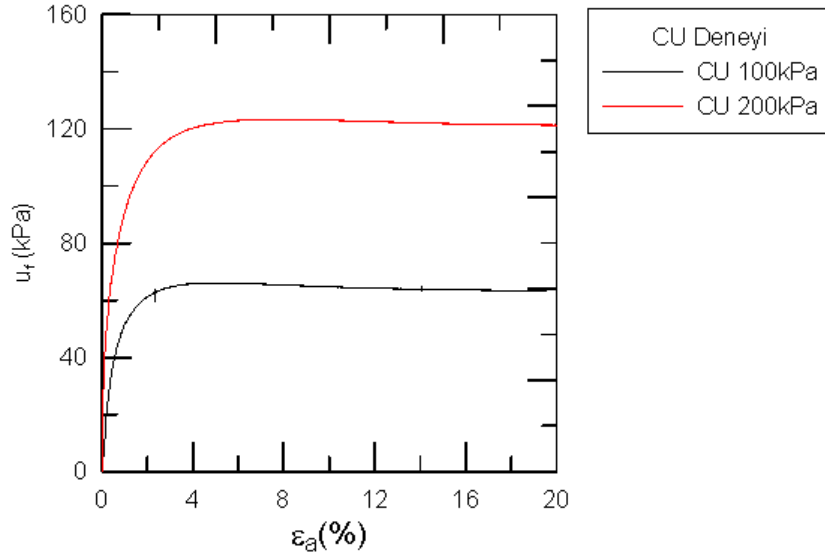
Şekil 4.9 Üç eksenli basınç deneyi düzeneği

Üç Eksenli Basınç Deneyleri Sonuçları

Konsolidasyonlu Drenajsız (CU) Üç Eksenli Basınç Deneyi

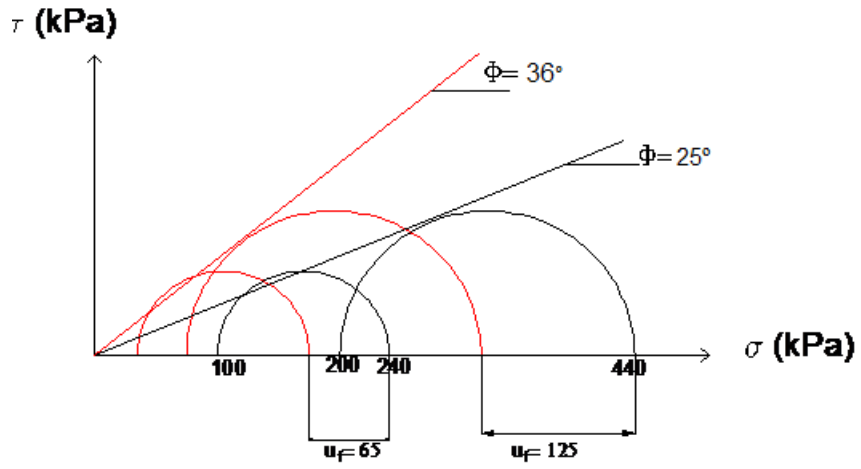


Şekil 4.10 Şekil değiştirme - deviator gerilme grafiği



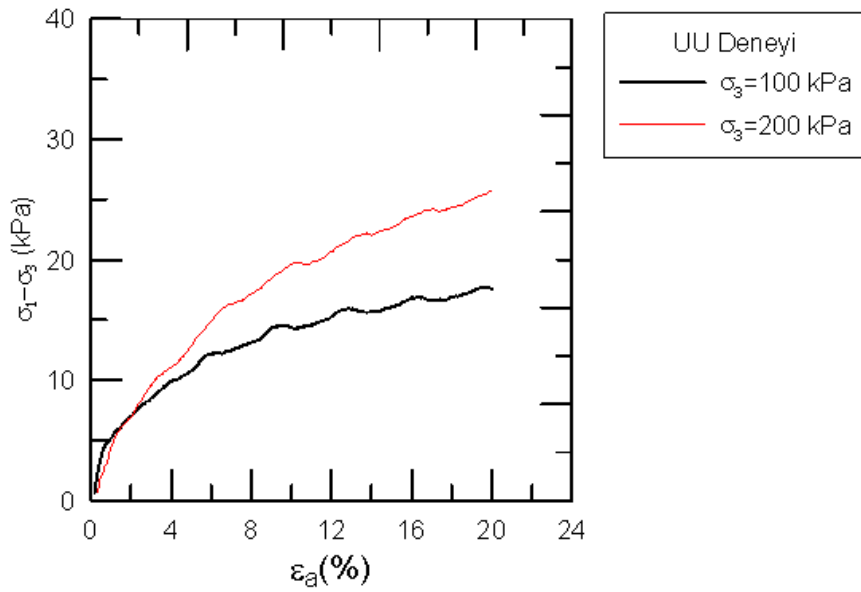
Şekil 4.11 Şekil değiştirme - boşluk suyu basıncı grafiği

CU Deneyi



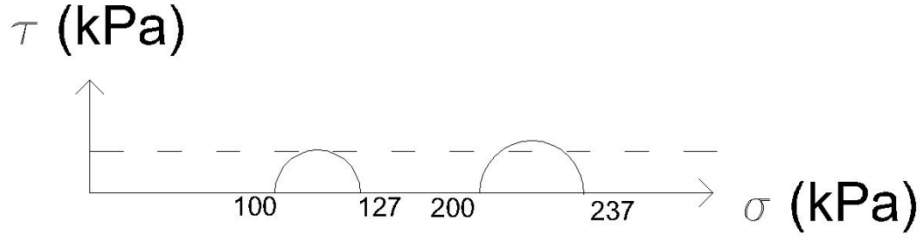
Şekil 4.12 CU deneyi Mohr Dairesi

Konsolidasyonsuz Drenajsız (UU) Üç Eksenli Basınç Deneyi



Şekil 4.13 Şekil değiştirme - deviator gerilme grafiği

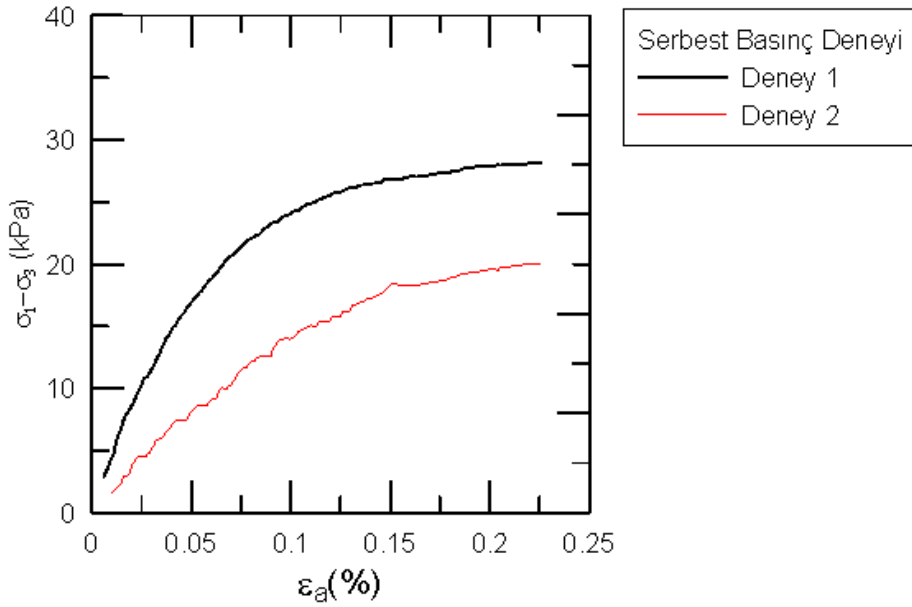
UU Deneyi



Şekil 4.14 UU deneyi Mohr Dairesi

4.3.4 Serbest Basınç Deneyleri

Temel zeminin mukavemet parametrelerinin belirlenmesi için laboratuarda 100 kPa basınç altında konsolide edilen zemin numuneleri üzerinde farklı yükleme halkalarında serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deney sonuçları aşağıdaki grafikte gösterilmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Şekil değiştime - deviatör gerilme grafiği

4.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu b3l3mde indeks 3zellikleri belirlenen zemin ile yapılan Rowe h3cresi deneyi sonucunda elde edilen numunelerle 3dometre deneyleri, 3 eksenli basınç deneyleri (CU, UU) ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyde ulaşılan sonuçlar aşağıda 3zetlenmiştir.

Kil-kum karışımından oluşturulan zeminde likit limit %27, plastik limit %16 ve bu karışım oluşturan danelerin 3zg3l ağırlığı 2.63 g/cm^3 olarak bulunmuştur. CU deneyinde toplam gerilmelere g3re $\phi = 25^\circ$ efektif gerilmelere g3re $\phi = 36^\circ$ bulunmuştur. UU deneyinde ise drenajsız kayma mukavemeti 14 kPa olarak bulunmuştur. Serbest basınç deneyleri sonucunda da $c_u = 13 \text{ kPa}$ olarak bulunmuştur.

DARBELİ TAŞ KOLON LABORATUAR MODEL DENEYLERİ

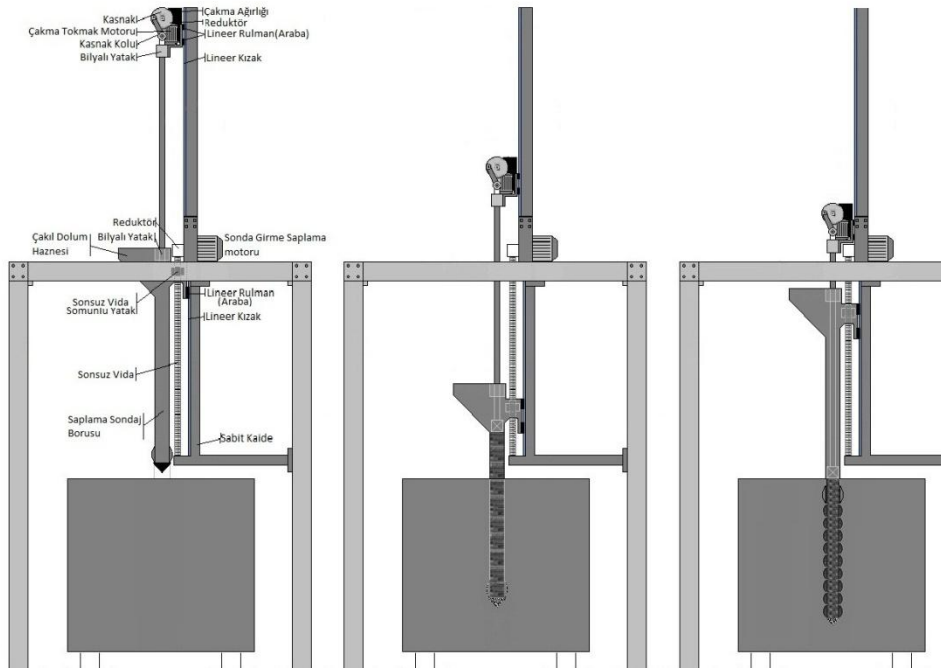
5.1 Giriş

Bu tez çalışmasında, darbeli kırmataş kolonların üretimi ve düşey yük altında çevre zeminle etkileşimini inceleyerek tasarım ve uygulamada kullanılacak yararlı bilgiler edinmek amacıyla gerçekleştirilmek için tez kapsamında model deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde darbeli taş kolon üretimini gerçekçi yapabilmek için laboratuvar YTÜ Geoteknik Laboratuvarında bulunan bir darbeli kırma taş kolon makinesi kullanılmıştır. Bu makine, laboratuvar ortamında model taş kolon üretmek amacıyla geliştirilmiş olup halen pratikte kendini tutamayan yumuşak zeminlerdeki uygulamalarda olduğu gibi bir kılıf (impact sistem) ile delgi yaparak darbeli kırma taş kolonlar üretebilmektedir.

Darbeli taş kolonun imalatı ve yük altında zemin davranışını belirlemek için gerçekleştirilen model deneylerde kolonun oluşturulduğu zeminde gerilme ve boşluk suyu basıncı değişimleri ölçülmüştür. Bu ölçümler model deney tankına likit limit mertebelerindeki su muhtevalarında yerleştirilen killi kum zemine yerleştirilen gerilme ve boşluk suyu basıncı ölçerler vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, geliştirilen darbeli taş kolon makinesi, bununla laboratuvar ortamında oluşturulan darbeli taş kolon, kolon yapı sırasında zemin içindeki ölçümler ve ardından yapılan kolon yükleme deneyi hakkında bilgi verilecektir.

5.2 Model Deney Sistemi

Model taş kolonlar üretmek için geliştirilen deney sistemi 1400 x 1400 x 2000 mm boyutlarında profillerden oluşan bir çerçeve, yukarıda kolonu tokmaklamak için kullanılan bir elektrikli motor, ortada kolonun zemin içerisine girmesini sağlayan diğer bir motor ve zemin içerisinde kuyu açıp, tokmalama yaparak kolonu oluşturacak 10 cm çapında probtan meydana gelmektedir (Şekil 5.1). Deney sistemi, düşey olarak 10 ton yük uygulayabilme kapasitesine sahiptir ve üzerine yerleştirilen bir adet yük hücresi (load cell) vasıtası ile kılıfa uygulanan basınç ölçülebilmektedir. Bunun yanında taş kolon makinesi darbeli taş kolon imalatı için darbe (tokmalama) özelliğine de sahiptir. Model taş kolon üretimi sırasında makinenin yeterli güce ulaşabilmesi için deney çerçevesi dört noktadan yere sabitlenmiştir. Kolon malzemesinin itilen kılıf ile oluşturulan kuyuya yerleştirilmesi ise kılıf üzerinde yer alan bir haznedan yapılmaktadır.



Şekil 5.1 Deney sistemi ana elemanları

Model taş kolon makinesinde yapılacak işlemler bilgisayar kontrollü olup dokunmatik bir ekran tarafından kontrol edilmektedir (Şekil 5.2). Bu ekran aracılığı ile toplam inilecek derinlik, kolonun delme işlemi yapıldıktan sonra ne kadar yukarı (mm cinsinden) çıkacağı ve kolon malzemesini ne kadar aşağıya sıkıştıracağı gözlemlenebilir. Bunun yanında inerken ve yukarı çıkarken hızının ne olduğu (devir/dakika cinsinden) ve

kılıfa uygulanan yük takip edilebilmektedir. Şekil 5.3' de darbeli taş kolon deney sisteminin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 5.2 Dokunmatik kontrol paneli



Şekil 5.3 Deney sisteminin ön cepheden görünümü

Model darbeli taş kolonlar laboratuar ortamında model deney tanklarında üretilmiştir. Bu tanklar 1100 mm çapa ve 1350 mm yüksekliğinde silindirik olarak sacdan imal ettirilmiş olup içerisine yerleştirilen zeminin konsolide etmek için bir hava yastığı ile bunu hapseden bir üst kapak ile montaj çubuklarına sahiptir. Konsolidasyon işlemi zemin üzerine yerleştirilen hava yastığının tankın ağzı kapatılarak mesnetlenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Konsolidasyon işleminde sınır koşullarını kontrol edebilmek için altında, üstünde ve çevresinde vanalar bulunmaktadır. Tankın alt kısmı I profiller ile güçlendirilmiştir (Şekil 5.4). Model deney tankının içerisine yerleştirilmiş zemin ve ölçüm aygıtları ile birlikte kesiti Şekil 5.5 'de gösterilmiştir. Şekil 5.4 ve 5.5'den de görüldüğü gibi model deney tankının bir genişleme başlığı bulunmaktadır. Bu başlık taş kolonların likit limit kıvamında yerleştirilen deney malzemesinin konsolidasyonu ile sıkışarak 1 m yüksekliğinde olmasını sağlamak için kullanılmaktadır.



Şekil 5.4 Model deney tankı

imcStudio tarafından üretilen 4'ü dijital olmak üzere toplamda 16 kanallı bir veri toplama cihazı (data acquisition device) kullanılmıştır (Şekil 5.6). Deneyler sırasında veri toplamayı hassas ve kolay bir şekilde yapabilmek ve sensörlerden alınan sinyalleri sayısal değerlere dönüştürmek için cihazın üreticisi tarafından geliştirilen bilgisayar programı kullanılmıştır.



Şekil 5.6 imcStudio veri toplama cihazı

Model deneyler sırasında taş kolonun üretildiği zeminde meydana gelecek gerilme değişimlerini belirlemek için toprak basıncı sensörleri (earth pressure transducers) kullanılmıştır. Bu sensörler titreşim telli olup yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmeler titreşimler vasıtasıyla toprak basıncı hücresine gönderilir. Hücreye oluşan bu titreşimler bir gösterge aracı faktörü kullanılarak basınç değerlerine dönüştürülür. Toprak basıncı ölçen sensörler 200 kPa basınç değerine kadar ölçüm alabilmekte ve 1/10000 hassasiyetinde sonuçları gösterebilmektedir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Toprak basıncı ölçer (soil pressure transducer)

Boşluk suyu basıncı sensörü olarak DRUCK tarafından üretilen ve Şekil 5.8' de gösterilen PDCR81 tipi boşluk suyu basıncı sensörü kullanılmıştır. Sensörlerin doğru ölçüm alıp almadıkları sabit basınç uygulayan bir sistem kullanılarak test edilmiştir. Boşluk suyu basıncı sensörleri 100 kPa basınç değerine kadar ölçüm alabilmekte ve doğruluğu +%2 ve -%2 arasında değişmektedir.



Şekil 5.8 Boşluk suyu basıncı ölçer

DTK yükleme deneyi sırasında oluşacak oturma değerlerinin ölçülebilmesi için TML tarafından üretilen Displacement Transducer kullanılmıştır. Bu deplasman ölçer 5 m'lik bir kablo yardımıyla 20 cm değerine kadar deplasman değişimleri 1/10000 oranında hassasiyet ile göstermektedir. Alınan değerler veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayarlara kaydedilmiştir.

5.4 Model Taş Kolonlar İçin Zemin Yatağı Hazırlanması

Model taş kolonları üretileceği zeminin model deney tankına yerleştirilmesi 10 günlük bir sürede laboratuarda yapılan çalışmalar ile gerçekleştirilmiştir. Bunun için kuru ağırlığının %40'ı kil (kaolin) ve %60'ı kum olan bir karışım laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Karıştırma işlemi Şekil 5.9'da gösterilen mikser yardımı ile bu zemin karışımının likit limitinin 1.5 katı (kuru ağırlıkların da %40'ı) kadar olan su ilave edilerek yapılmıştır. Karıştırma işlemi sonunda homojen bir karışım elde etmek için su, kademeli olarak eklenmiştir. Her bir aşamada hazırlanan karışımın su muhtevası belirlenerek ortalama su muhtevasının (w_{ort}) %40 olması sağlanmıştır. Bu değer literatürde önerildiği gibi tanka kolay yerleştirilebilecek viskoziteye sahip bir akışkan (slurry) kıvamındadır.



Şekil 5.9 Mikser içerisinde hazırlanan zemin numunesi

Model deney tankında yumuşak killi bir zemin tabakası elde etmek için hazırlanmış akışkan malzeme tanka dökülmeden önce Şekil 5.10'da görüldüğü gibi tank tabanına 5 cm kalınlığında bir çakıl tabakası serilmiştir. Bu tabakayı oluşturmanın amacı killi malzemenin konsolidasyonu için tank tabanında geçirimli bir tabaka elde ederek çift yönlü drenajı sağlamaktır. Bu çakıl tabakasının üstündeki killi zeminin konsolidasyonu sırasında tıkanmasını önlemek için üzerine filtre görevi yapan bir geotekstil şilte yerleştirilmiştir.



Şekil 5.10 Tank tabanına çakıl ve üzerine geotekstil filtre yerleştirilmesi

Model deney tankı tabanında drenaj tabakası oluşturduktan sonra hazırlanan akışkan kıvamdaki kil-kum karışımı tanka dökülmüştür. Bulamaç halindeki malzemeyi tanka dökme işlemi 75 cm yüksekliğe gelinceye kadar devam edilmiş ve bu seviyelerde boşluk suyu basıncı ve toprak basıncı ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 5.11). Boşluk suyu basıncı ölçerler tank çeperinde sırasıyla 15 cm ve 30 cm uzaklığında, toprak basıncı ölçerler ise 20 cm uzaklığında düşey şekilde yerleştirilmiştir. Yerleştirme işlemi tank içinde 105 cm yüksekliğe (tankın üst seviyesi) ulaşıldığında sonra sonlandırılmıştır (Şekil 5.12).



Şekil 5.11 75 cm seviyesinde tankın içine yerleştirilen sensörler.



Şekil 5.12 Tankın 105 cm yüksekliğine kadar doldurulan zemin

Tank doldurulduktan sonra konsolidasyon sırasında drenajın sağlanması için tabanda olduğu gibi geotekstil filtre serilerek üzerine 5 cm kalınlığında bir çakıl tabakası yerleştirilmiştir(Şekil 5.13). Çakıl tabakasının üstüne, üniform ve konsolidasyon sonunda numune üst yüzeyinin düzgün bir şekilde olabilmesi için 1 cm kalınlığında ve merkezinden drenajı sağlayacak çelik bir plaka yerleştirilmiştir.



Şekil 5.13 Hazırlanan zemin numunesine geotekstil ve çakıl serilmesi.

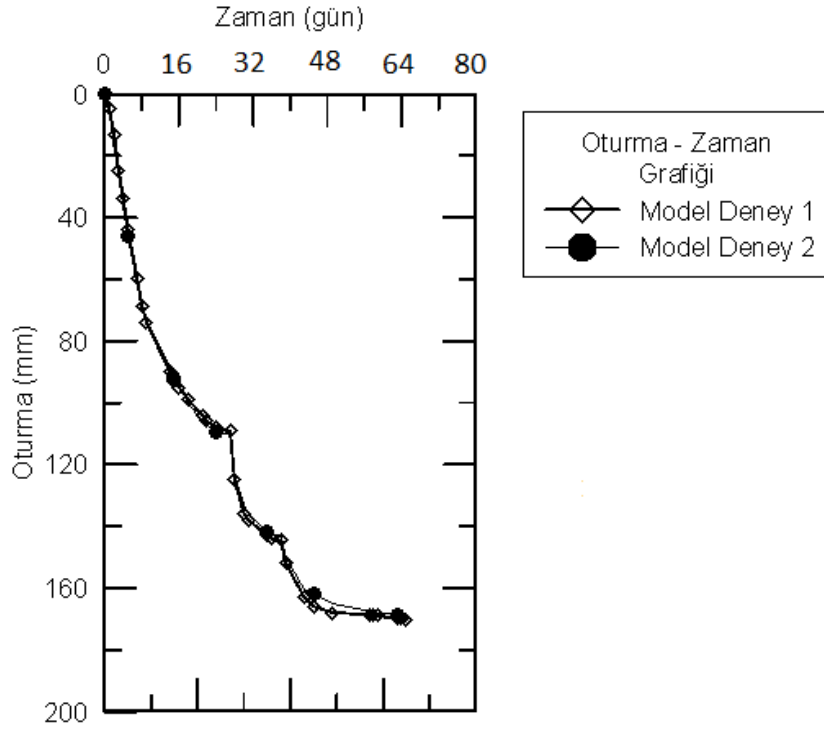
Model taş kolonun üretileceği zemin tabakası deney tankına yerleştirildikten sonra kendi ağırlığı altında 10 gün süreyle konsolide edilmiştir. Kendi ağırlığıyla konsolide edildikten sonra zemin üstüne plaka ve hava yastığı konulmuştur (Şekil 5.14). Hava yastığı yerleştirilen tankın kelepçeli bir sisteme sahip olan metal bir plaka ile sıkıca kapatılmıştır (Şekil 5.15). 60 ile 75 gün arasında sırasıyla 10 kPa, 30 kPa, 60kPa ve 100 kPa basınç uygulanarak tank içindeki zemin numunesinin konsolide edilmesi sağlanmıştır. Konsolidasyon sırasında tankın altında bulunan musluk ve tankın üstünde bulunan drenaj borusuna vakum uygulanarak su çıkışı sağlanmıştır. Basınç kademelerinde ki konsolidasyon süreleri düşey deplasman ölçerlerle kontrol edilip kaydedilmiştir (Şekil 5.15). Konsolidasyon süresince ölçülen oturma-zaman değişimi Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.14 Tank içine yerleştirilen hava yastığı



Şekil 5.15 Üstü kapatılıp, düşey deplasman ölçerler yerleştirilen tanklar.



Şekil 5.16 Model tankta ölçülen oturma - zaman değişimi

5.5 Model Darbeli Taş Kolon Üretimi

Tank içerisinde yaklaşık 2 ay süreyle 100 kPa basınç altında konsolide edilen zemin numunesinin, üzerindeki basınç kaldırıldıktan sonra, yüksekliğinin 90 cm'ye indiği gözlemlenmiştir. Konsolidasyonu tamamlanan zemin üzerinde Şekil 5.17'de gösterildiği şekilde çeşitli noktalarda drenajsız kayma mukavemeti belirlenmiştir. Bu deney sonuçları ve tankın 3 farklı yüksekliğinden alınan sonuçlar ilerleyen bölümlerde anlatılmıştır. Drenajsız kayma mukavemeti deneyleri tamamlanan model deney tankı DTK makinesi altına sürülmüştür (Şekil 5.18).



Şekil 5.17 Cep penetrometresi ve veyn ölçümleri.



Şekil 5.18 Model deney tankında DTK üretimine başlamadan önceki görünüş

Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi DTK makinesi ile, planlanan derinliğe kadar delgi yapıldıktan sonra prob, 100 cm yukarı çekilirken, oluşan boşluğa yukarıdaki haznedeki çakıl dolmakta ve daha sonra bu çakıl 33 cm'ye sıkıştırılmaktadır. Model DTK üretiminde bu oranlara ve yapım sırasına dikkat edilerek prob, 80 cm derinliğe kadar indirilmiştir. Sonrasında 20 cm yukarıya çekilmiş ve yukarıdaki çakıl haznesinden çakıl doldurulmuştur (Şekil 5.19). Aşağıda oluşan boşluğa dolan çakıl da titreşim uygulanarak 7 cm' ye sıkıştırılmış ve bu işlemler 4 kez yinelenerek darbeli taş kolon elde edilmiştir (Şekil 5.20).

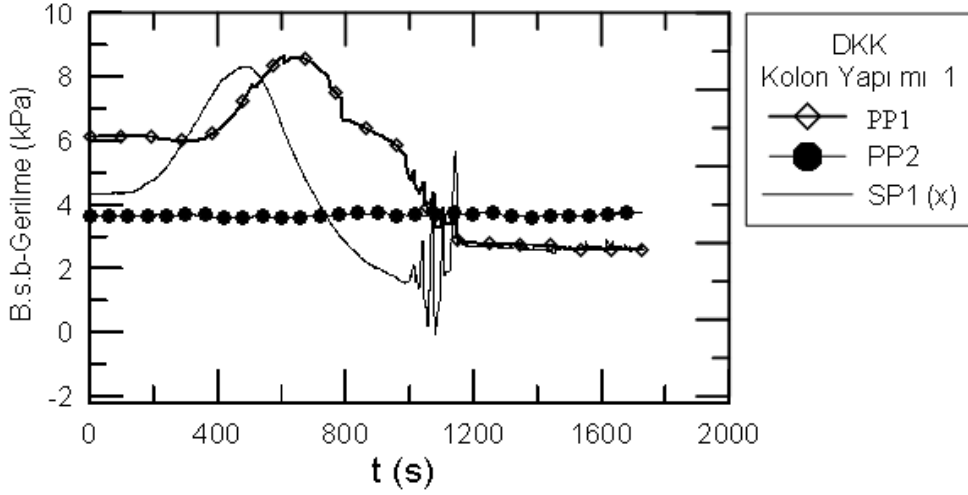


Şekil 5.19 DTK makinesinin çakıl haznesi

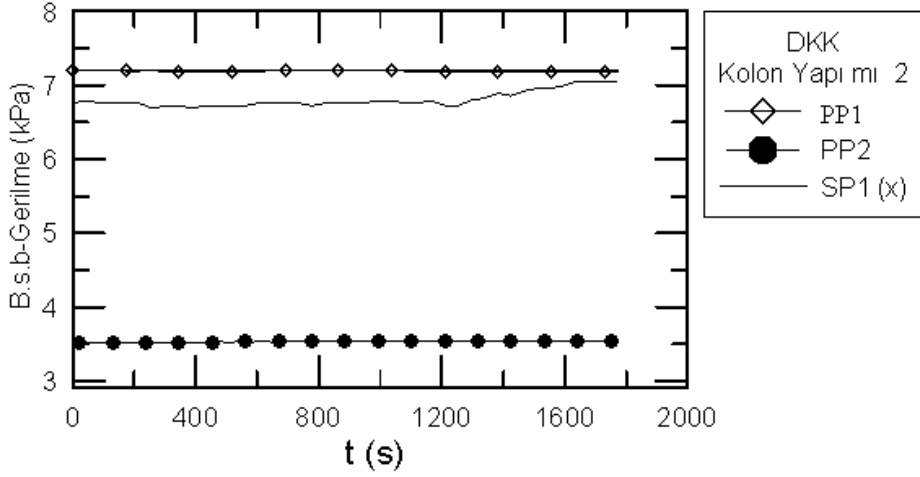


Şekil 5.20 Deney sonu tankta oluşan DTK.

Model deney tankı içine zemin hazırlanırken önceden yerleştirilen sensörler yardımı her iki model deney üretimi sırasında zeminde meydana gelen boşluk suyu basıncı değişimleri ve yanal gerilme değişimleri ölçülmüştür. DTK üretimleri sırasında alınan boşluk suyu basıncı ve yanal gerilme ölçümleri Şekil 5.21'de gösterilmiştir. Şekilde PP1 ve PP2 yüzeyden 45 cm derinlikte merkezden sırasıyla 15 cm ve 30 cm uzaklıkta DTK üretimi sırasında ölçülen boşluk suyu basıncı değişimlerini, SP1 ise zemin yüzeyinden 45 cm derinlikte merkezden 20 cm uzaklıkta konularak yanal gerilme değişimlerini göstermektedir (Şekil 5.21).



(a) Deney 1



(b) Deney 2

Şekil 5.21 (a) Deney 1 ve (b) Deney 2 için DTK üretimi sırasında sensörler tarafından alınan ölçümler.

Şekil 5.21'de de görüldüğü gibi DTK üretiminin delgi ve darbe uygulama aşamaları sırasında kolon merkezine yakın boşluk suyu basıncı ve gerilme sensörlerinde değişim görülürken 30 cm mesafede yer alan sensörde boşluk suyu basıncı değişimi gözlenmemiştir. Merkeze 15 cm mesafedeki PP1 ve SP1 sensörlerindeki boşluk suyu basıncı ve yanal gerilme değerleri probun sensörlerin seviyesine erişinceye kadar arttı, bu seviyenin altına inince azalmaya başladığı taş kolon üzerine darbe uygulandığı zaman tekrar artışa geçtiği ve darbe sonrası kararlı duruma geçtiği görülmektedir.

5.6 Yükleme Deneyi

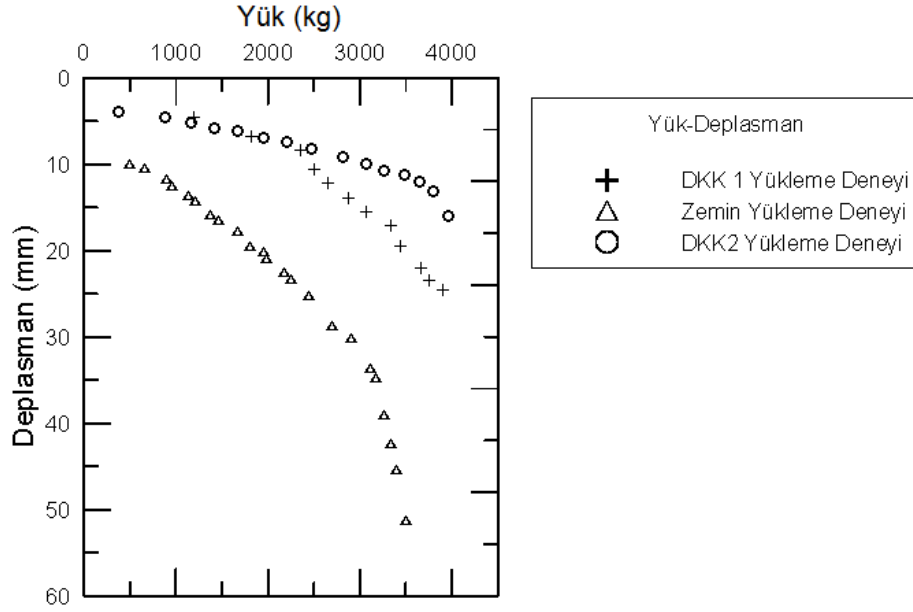
Yukarıda anlatıldığı şekilde üretilen darbeli taş kolonun taşıma kapasitesini belirlemek için plaka yükleme deneyi yapılmıştır. DTK'nın uygulanan darbeler ile delgi çapından daha fazla bir kolon çapına sahip olması ve buna ek olarak çevre zemini de iyileştirmesi göz önüne alınarak yükleme deneyinde 10 cm'lik kolon çapı yerine 20 cm çapında dairesel en kesite sahip bir plaka kullanılmıştır. Kullanılan plakanın 2 cm kalınlığında çelik bir malzemedan üretilmiş olup DTK makinesine Şekil 5.22'da gösterildiği şekilde monte edilmiştir. Yükleme deneyi sırasında oturma değerlerinin gözlemlenebilmesi için 20 cm'lik rezistif lineer pozisyon ölçer şekildeki gibi yerleştirilmiştir. Bu cihaz veri toplama cihazı ile bilgisayara bağlanarak düşey yer değiştirme ölçümleri alınmıştır.



Şekil 5.22 Yükleme plakasının ve deplasman ölçerinin yerleşimi

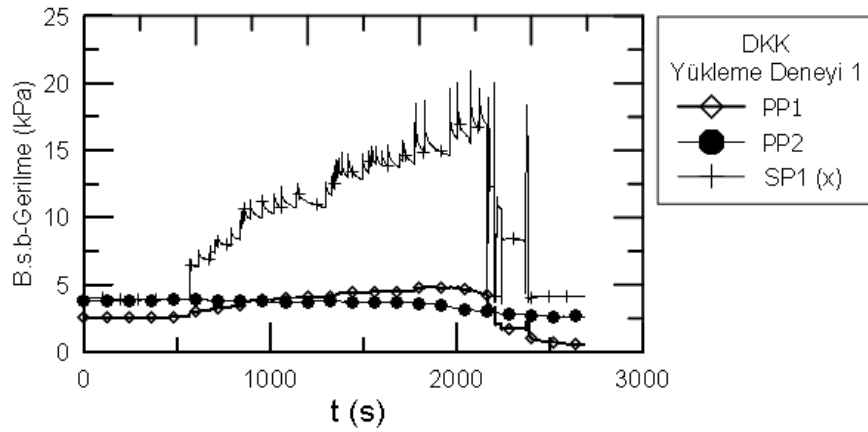
Deney 1 ve Deney 2'de yapılan yükleme deneyleri kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Deney 1'de DTK 1 kolonunun hesaplanan dizayn yükü güvenli bölgede kalınarak 35 kN alınıp yükleme deneyi yapılmıştır. Deney 2'de öncelikli olarak zemine yük uygulanarak bir miktar iyileştirme sağlanmıştır. Daha sonra iyileştirilen bu zemine DTK 2 kolonu oluşturulup bu kolon üzerinde yükleme deneyi yapılmıştır. Deneylerde taşıma kapasitesine kadar yüklenen kolonların (DTK 1 ve DTK 2) ve zeminin kademeli olarak verilen yükler altında yaptığı oturma miktarları kaydedilmiştir. Kaydedilen oturmaların uygulanan yükle değişimi Şekil 5.23'de verilmiştir. Yükleme aletinin maksimum

kapasitesi olan 40 kN değerine ulaşıldığında kolonların göçmediği ama sınır değerine yaklaştığı gözlenmiştir.

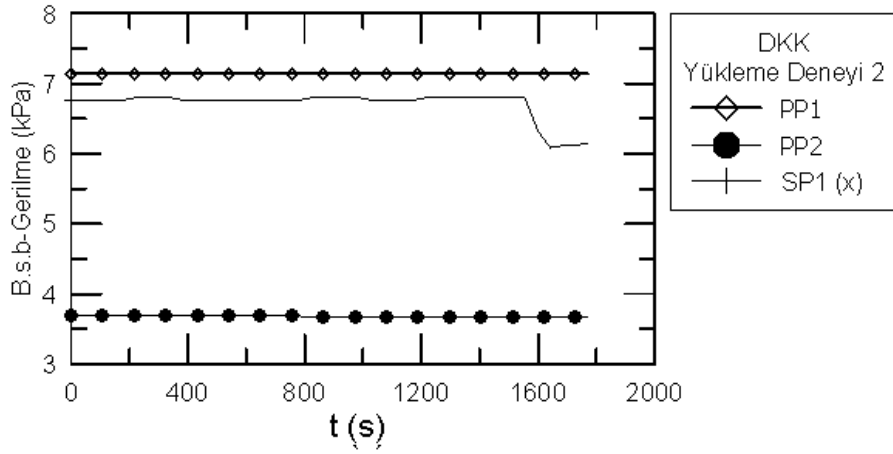


Şekil 5.23 Yük deplasman grafiği

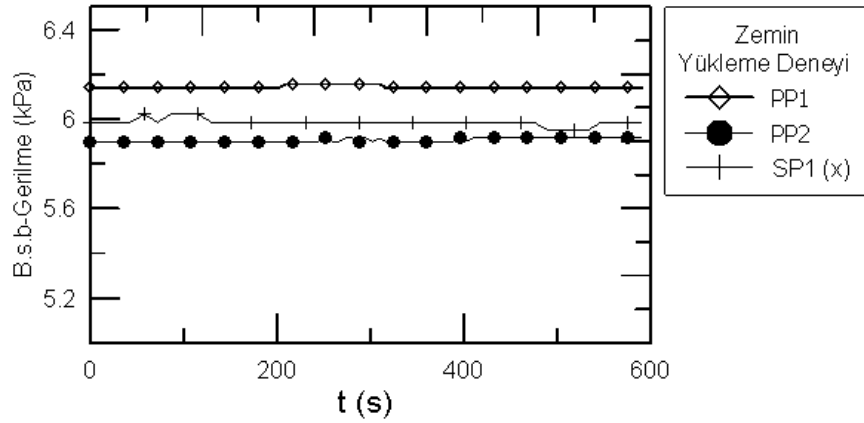
Darbeli kırmataş kolonlar yapılırken sensör ölçümleri alındığı gibi aynı şekilde kolon imalatları tamamlandıktan sonra yüklemeler yapılırken de sensörler tarafından veriler kaydedilmiştir. Yükleme deneyleri sırasında boşluk suyu basıncı ve yanal gerilme ölçümleri Şekil 5.24'de gösterilmiştir.



(a) DTK 1 yükleme deneyi



(b) DTK 2 yüklemeye deneyi

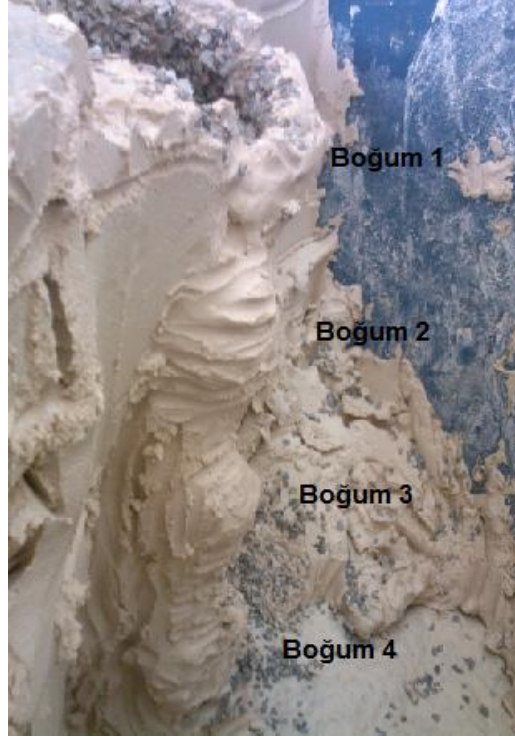


(c) Zemin yüklemeye deneyi

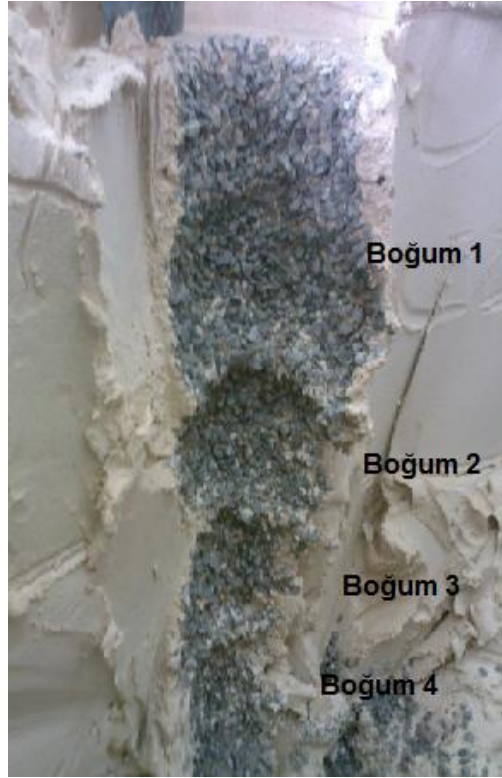
Şekil 5.24 (a) DTK 1, (b) DTK 2 ve (c) Zemin yüklemeye deneyleri sırasında sensör ölçümleri

Şekil 5.24'de görüldüğü gibi yüklemeye deneyinin başlamasıyla birlikte toprak basıncı ölçerler ve boşluk suyu basıncı ölçerlerde değişimler gözlenmiştir. Kademeli olarak yüklemeye yapılırken her yük arttırılışında sensörlerde ki basınç değeri artmaktadır. Toprak basıncı ölçen sensörler, boşluk suyu basıncı ölçerlere göre daha büyük değişimler göstermiştir.

Yapılan yüklemeye deneyinin tamamlanmasından sonra tankın içindeki kil malzemenin yaklaşık yarısı, DTK' un tüm tank yüksekliği boyunca kademeli olarak kazılmıştır. Bu şekilde yüklemeye sonrası model DTK' da oluşan hacim değişimlerinin miktarı, biçimi ve bombelenme şeklini belirlemek mümkün olmuştur. Elde edilen kesit Şekil 5.25 ve Şekil 5.26.'de gösterilmektedir. Başlangıçta 10 cm çapa sahip olan DTK' un yüklemeye deneyi sonrasında yüzeyde 16 cm genişliğe ulaştığı, aşağıya doğru en geniş 22 cm olan 4 boğum oluşturduğu görülmüştür.



Şekil 5.25 Deney sonucunda elde edilen darbeli kırma taş kolon tabakaları



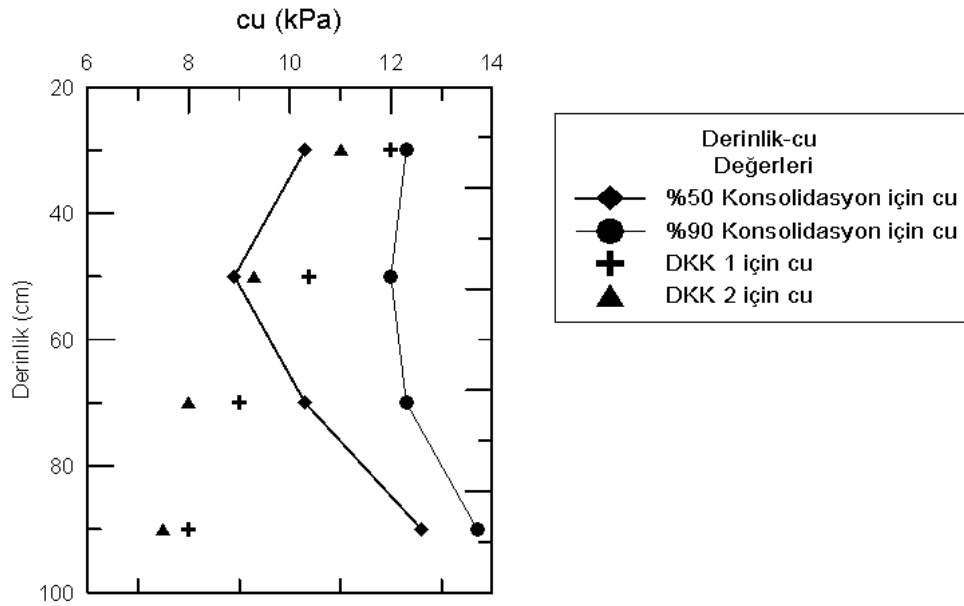
Şekil 5.26 Deney sonu kolon içinde oluşan boğumlar.

5.7 Model DTK' dan Alınan Numuneler Üstünde Yapılan Deneyler

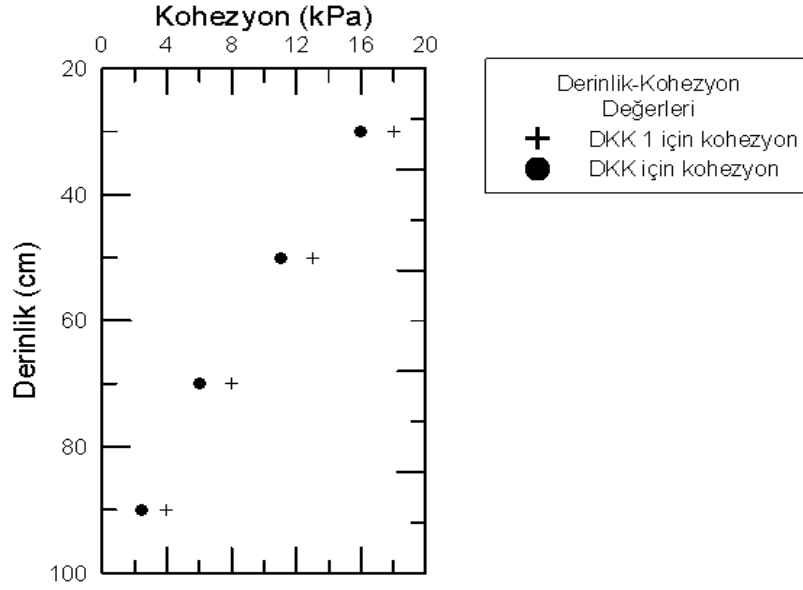
Model deney tankında hazırlanmış olan kil-kum karışımında yapılan DTK' da yükleme deneyi tamamlandıktan sonra kolon çevresindeki zeminden alınan numuneler üstünde laboratuvar mukavemet deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler üç eksenli basınç deneyi, serbest basınç deneyi, zeminin 4 farklı yüksekliğinde veyn ve cep penetrometresi deneyleridir. Yapılan bu deneyler sonucunda elde edilen veriler aşağıda gösterilmiştir.

5.7.1 DTK Yapılan Zemin Üzerinde Veyn ve Cep Penetrometresi Deneyleri

Model deney tankında yapılan DTK 1 ve DTK 2' den sonra kolon etrafındaki zemin kademeli olarak kaldırılmıştır. Kaldırılan bu zeminde tankın 90 cm, 70 cm, 50 cm ve 30 cm yüksekliklerinde, tankın 4 bir bölgesinde sırasıyla veyn ve cep penetrometresi deneyleri yapılmıştır. Tank yüzeyinin 4 bir bölgesinde yapılan bu deney sonuçları ve ortalamaları Şekil 5.27 ve Şekil 5.28' de verilmiştir.



Şekil 5.27 Veyn deneyi ölçümleri

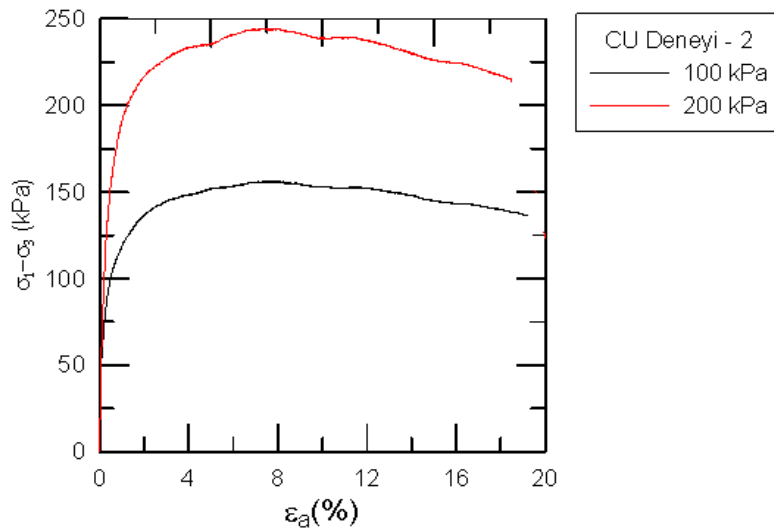


Şekil 5.28 Cep penetrometresi ölçümleri

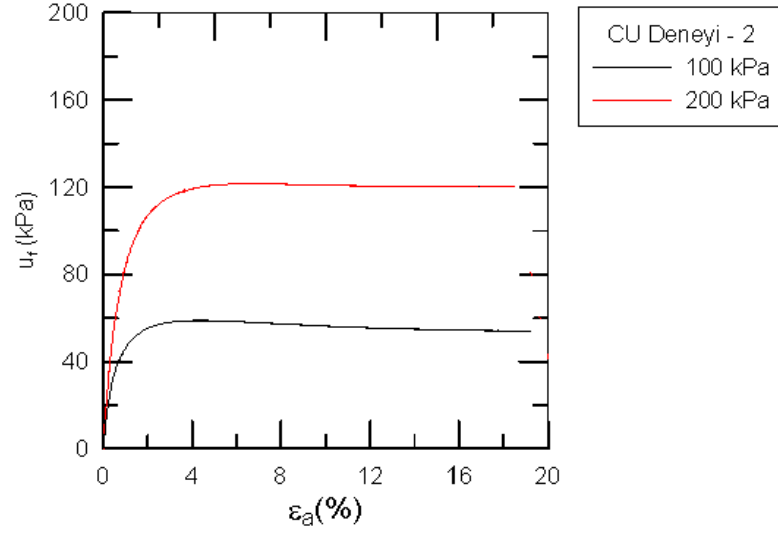
5.7.2 DTK Yapılan Zemin Tabaksından Alınan Örnekler Üzerinde Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Model deney tankında ki bu zemin üzerinde daha önce Rowe hücresinde yapılan deneylerle karşılaştırılması için numuneler alınmıştır. Rowe hücresinden numune almada kullanılan 5 cm çapında, 10-12 cm uzunluğunda ki tüplerle numuneler alınmıştır. Alınan bu numuneler üstünde yapılan deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 5.29- Şekil 5.33).

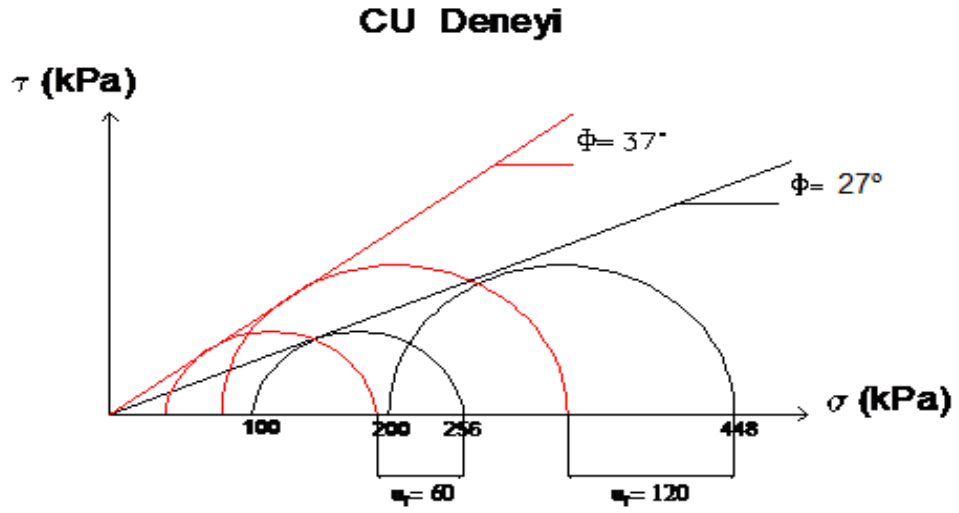
Konsolidasyonlu Drenajsız (CU) Üç Eksenli Basınç Deneyi



Şekil 5.29 Şekil değiştirme- deviator gerilme grafiği

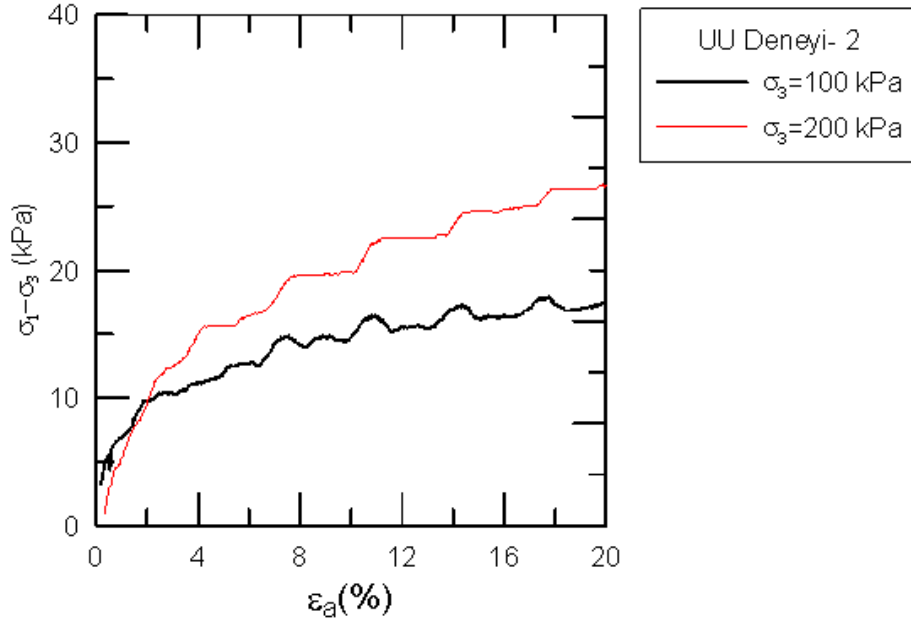


Şekil 5.30 Şekil değiştirme- boşluk suyu basıncı grafiği



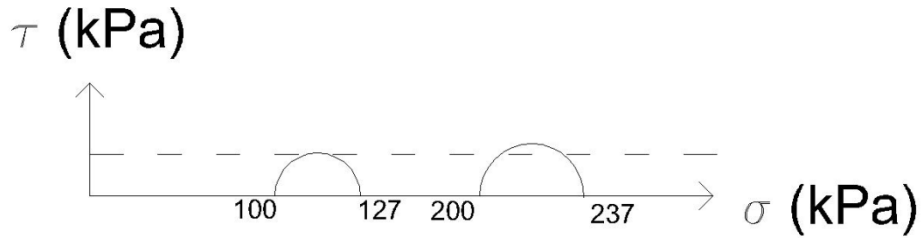
Şekil 5.31 CU deneyi Mohr Dairesi

Konsolidasyonsuz Drenajsız (UU) Üç Eksenli Basınç Deneyi



Şekil 5.32 Şekil değiştirme- deviatör gerilme grafiği

UU Deneyi

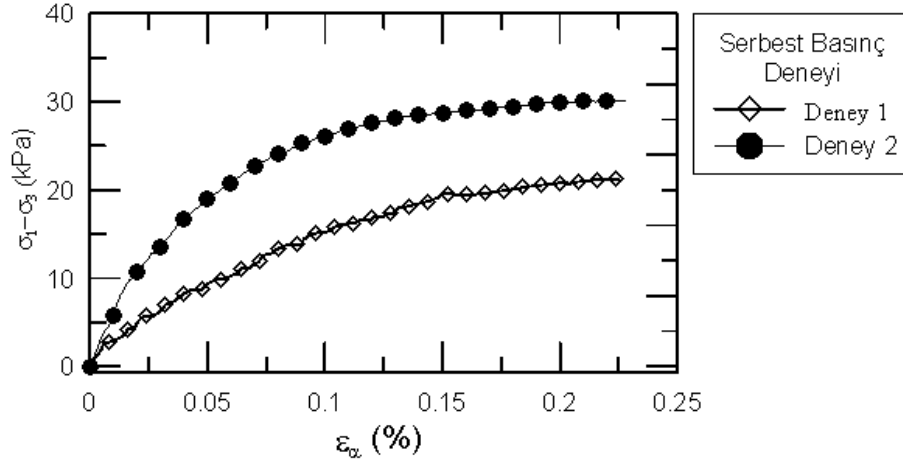


Şekil 5.33 UU deneyi Mohr Dairesi

Model deney tankından alınan numuneler ile yapılan üç eksenli basınç deneyi sonuçlarını, Rowe hücresinden alınan numunelerle yapılan deney sonuçları ile karşılaştırdığımızda benzer sonuçlar görülmektedir.

5.7.3 DTK Yapılan Zemin Tabakasından Alınan Örnekler Üzerinde Serbest Basınç Deneyi

5 cm çapında, 12 cm boyundaki tüpler vasıtasıyla alınan zemin numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları Şekil 5.34'de verilmiştir.



Şekil 5.34 Serbest basınç deneyi grafiği

5.8 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Model deney tankında DTK üretimi yapılarak iyileştirilen zeminde ve iyileştirilmiş zeminden alınan numuneler üstünde mukavemet deneyleri yapılmıştır. Bu bölümde yapılan bu deneyler ile daha önce bölüm 4'te anlatılan iyileştirilmemiş zemin üstündeki deneylerin karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalar aşağıda (Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de) gösterilmiştir. İyileştirilmiş zemin üzerinde yapılan deneyler model deney tankı içinden üretilen DTK'nun 20 cm uzaklığından alınmıştır.

Çizelge 5.1 İyileştirilmemiş Zemin Deneyleri Sonuçları

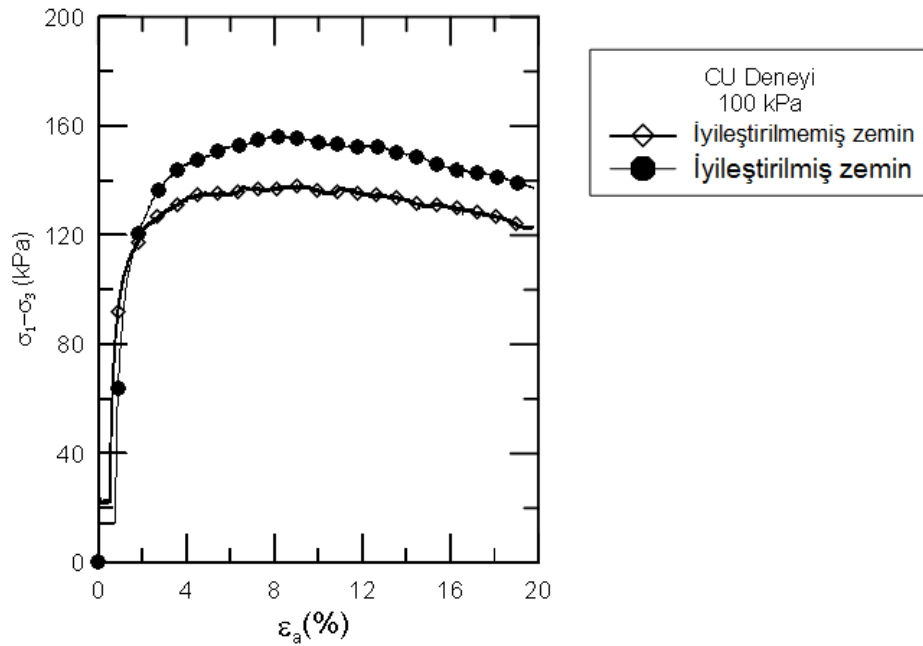
Parametreler	Serbest Basınç	UU	CU	Cep penetrometresi	Veyn Deneyi
c_u (kPa)	13	14	-	18	12
c' (kPa)	-	-	0	-	-
ϕ (°)	-	-	36	-	-
ϕ' (°)	-	-	26	-	-
E_u (kPa)	571	727	13300	-	-
E' (kPa)	513	654	11970	-	-

Çizelge 5.2 İyileştirilmiş Zemin Deney Sonuçları

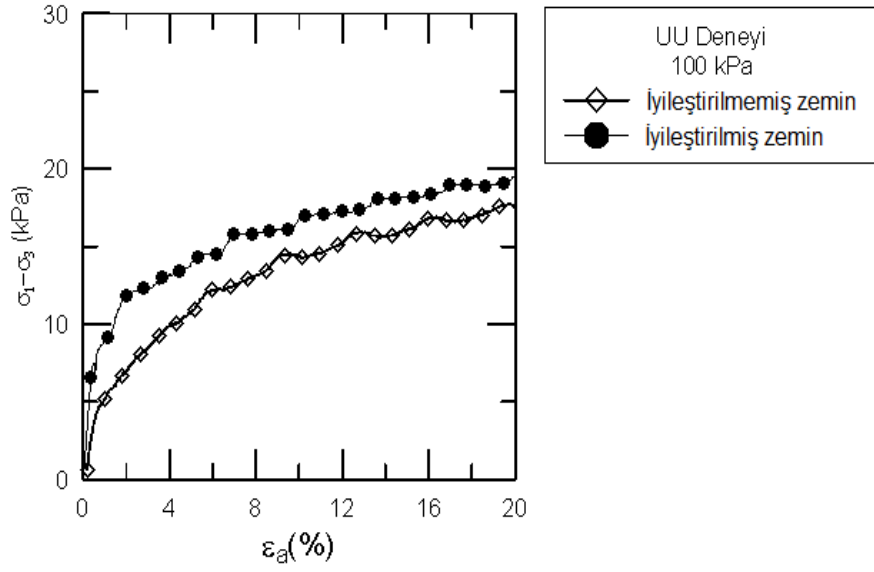
Parametreler	Serbest Basınç	UU	CU	Cep penetrometresi	Veyn Deneyi
cu (kPa)	13	15	-	19	12,3
c' (kPa)	-	-	0	-	-
ϕ (°)	-	-	37	-	-
ϕ' (°)	-	-	27	-	-
E_u (kPa)	680	875	16000	-	-
E' (kPa)	612	787	14400	-	-

Yukarıda özetlenen deney sonuçlarına göre serbest basınç deneyi, UU deneyi, cep penetrometresi ve veyn deneyleri ile yapılan birçok deneyin sonuçlarına genel olarak bakıldığında Cu değerlerinde %7'ye kadar bir artış olduğu gözlenmiştir.

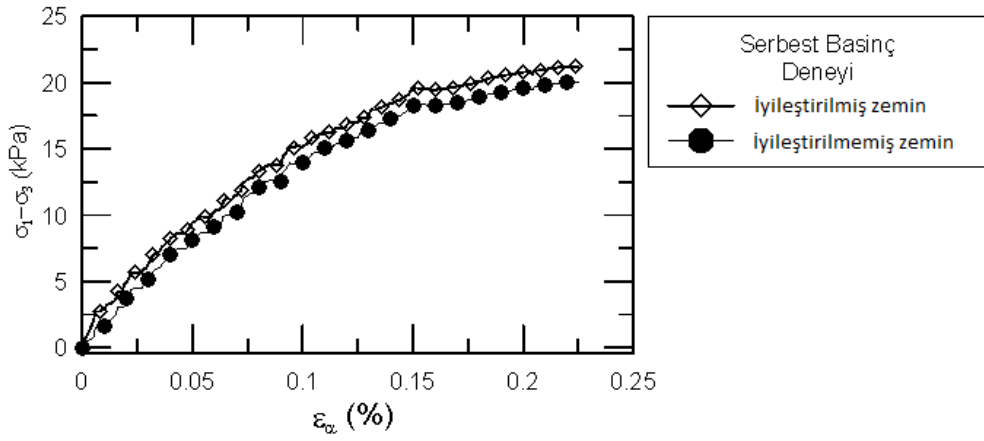
İyileştirilmiş zemin ile iyileştirilme yapılmayan zeminleri karşılaştırılmasında birçok numune ile yapılan üç eksenli (UU, CU,) deney sonuçlarından elde edilen E_u ve E' değerlerinde de %20'ye varan bir artış gözlenmiştir. Burada E_u değerleri üç eksenli deney sonuçlarının eğrilerinden elde edilerek bulunmuş, E' değeri bulunan bu E_u değeri ile $E'=E_u*2(1+\nu)/3$ bağlantısı kullanılarak bulunmuştur. $\nu=0,35$ olarak alınmıştır. DTK uygulaması ile meydana gelen iyileştirmesini gösterebilmek için yapılan üç eksenli UU ve CU deneyleri ile serbest basınç deneylerindeki karşılaştırmalar Şekil 5.35- Şekil 5.37 arasında gösterilmiştir.



Şekil 5.35 CU deneyi karşılaştırılması



Şekil 5.36 UU deneyi karşılaştırılması



Şekil 5.37 Serbest basınç deneyi karşılaştırılması

5.9 Model DTK'nın Taşıma Gücü

Model deney tankında üretilen DTK üzerinde yapılan yükleme deneyi sonucunda belirlenen taşıma gücü değeri Hughes ve Withers tarafından [16] da önerilen taşıma gücü eşitliği ile karşılaştırılmıştır. Kolon üstüne etkiyebilecek nihai gerilme $q_{ult,p}$:

$$q_{ult,p} = \sigma_{r,lim} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_g}{2} \right)$$

Buradan $\phi_g=46^\circ$ ve $K_p \approx 6$ çıkmaktadır.

Toplam radyal gerilme $\sigma_{\gamma 0}$, boşluk suyu basıncı ve efektif düşey gerilmeden,

$$\sigma_{ro} = \sigma'_{vo} K_p + u_o$$

formülü ile hesaplanmaktadır.

$\sigma'_{vo} = (1)(20-10) = 5$ kPa ve $\phi' = 22^\circ$ ise $K_o = (1 - \sin 22) = 0,63$ elde edilir.

$S_u = 15$ kPa ve $\sigma_{\gamma} = \sqrt{2}(0,63)(5) = 4,41$ kPa

$$\sigma_{r,lim} = \sigma'_{ro} + 4s_u + u$$

$$\sigma_{\gamma,lim} = 4.41 + 4(15) + 5 = 69,4 \text{ kPa}$$

Buradan taşıma gücü:

$$q_u = 69,4 (6) = 416 \text{ kPa bulunur.}$$

Model DTK' nun üretiminde zeminde 30 cm çapındaki delgi uygulanan darbelerle 35 cm' ye ulaşmıştır. Buna göre model deneydeki taşıma gücü

Uygulanan kolon yülü $D=0.35$ m için $A=0.096\text{m}^2$ olduğuna göre:

$$P = 416 (0.096) = 40 \text{ kN}$$

değeri elde edilir. Bu sonuç, deneyde ölçülen 40 kN'luk taşıma gücü değerine çok yakındır.

SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında darbeli taş kolonların laboratuvar ortamında modellenebilmesi için bir darbeli taş kolon makinesi geliştirilmiş ve darbeli taş kolon üretilmiştir. Darbeli taş kolonun imalatı sırasında gerçekleşecek iyileşme oranını belirlemek için imalat öncesi ve sonrasında örselenmeden alınan numuneler üzerinde üç eksenli ve basit kesme deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deney sonuçları karşılaştırılarak iyileşme oranları ortaya konulmuştur.

Model deney tankından alınan zemin numuneleri üstünde yapılan deneylerin dışında iyileştirme oranlarının karşılaştırılması için konsolide edilmiş zemin yük uygulanarak belirli bir miktar iyileştirme sağlanmıştır. Belirli miktarda iyileştirme sağlanan bu zemin üzerinde imal edilen darbeli taş kolonda eksenel yüklenerek göçmeye zorlanmıştır.

İyileştirilmiş zemin ve iyileştirilmemiş zeminden örselenmeden alınan numuneler üstünde yapılan deneyler ile, iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zemin üzerinde yapılan darbeli taş kolondaki deneyler ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- İyileştirilmiş zemin ve iyileştirilmemiş zemin numuneleri üstünde yapılan birçok serbest basınç, (UU) üç eksenli deneyi, cep penetrometresi ve veyn deneyleri sonucunda c_u değerlerinin %7'ye kadar bir artış gösterdiği görülmüştür (Çizelge 5.1- Çizelge 5.2).
- İyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zemin numuneleri üstünde yapılan (UU, CU,) üç eksenli deney sonuçlarına göre E_u ve E' değerlerinin %20'ye varan bir iyileştirme gösterdiği gözlenmiştir (Çizelge 5.1- Çizelge 5.2).

- Darbeli taş kolon üretimi sırasında hacim artışı meydana geldiği için yanal toprak basıncı katsayısında artışa neden olmaktadır. Üretilen model DTK üzerinde yapılan gözlemlerde boğumlarda oluşan hacim değişimi kolon çapının 1.5 ile 2.0 katı arasında değişmektedir.
- Model deney tankında oluşturulan darbeli taş kolon ile iyileştirilen zeminde, kolon çapından 30 cm uzaklıktan sonra çevre zemine olan iyileştirme oranının düştüğü gözlenmiştir.
- Darbeli taş kolon oluşturulan zeminde eksenel yükleme deneyi sonucunda oluşan deplasmanlar değerlendirildiğinde, zeminin darbeli taş kolona göre daha çabuk göçtüğü ve aynı yükleme koşulları altında 2 kat daha fazla deplasman yaptığı belirlenmiştir (Şekil 5.22).
- İyileştirme yapılmış zeminde üretilen darbeli taş kolon ile, iyileştirilme yapılmayan zeminde üretilen darbeli taş kolonda yapılan yükleme deneyi karşılaştırıldığında 1.5 - 2 kat arasında daha fazla iyileştirme sağlandığı görülmüştür (Şekil 5.22).
- İyileştirilmeyen zemin üzerinde yapılan yükleme deneyi ile iyileştirme yapılan zemin üzerinde oluşturulan darbeli taş kolondaki yükleme deneyi sonucunda oluşan deplasmanlara bakıldığında 3.5 ile 4 kat daha fazla deplasman yaptığı görülmüştür (Şekil 5.22).
- Darbeli taş kolon üretimi sırasında model deney tankının içinde bulunan sensör (gerilme ve boşluk suyu basıncı) ölçümleri göz önüne alındığında basınçların sensör seviyesine kadar arttığı, üretimin bu seviyeyi geçmesinden sonra sürşarj etkisi ile basınçların belirli bir miktar azaldığı ve daha sonra sabitlendiği gözlenmektedir (Şekil 5. 20a).
- Darbeli taş kolonun hesaplanan kapasitesi ve yükleme deneyi ile ulaşılan sonuçlar yaklaşık olarak aynı değerleri vermiştir. Bu değerler her iki aşama içinde 40 kN civarındadır.

KAYNAKLAR

- [1] Durgunoğlu, T., (1992). “ Taş Kolonlar ile Zemin Islahı Üzerine Bir Uygulama”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi, 21-22 Ekim 2002, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2: 2-4.
- [2] Raju, V.R., (1997), “The Behavior of Very Soft Soils Improved by Vibro Replacement.”, Ground Improvement Conference, London.
- [3] Wissmann, K.J., White, D.J., FitzPatrick, B.T. ve Lien, B.H., (2002). “Improving Global Stability and Controlling Settlement with Geopier Soil Reinforcing Elements”, Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement Techniques, 26-28 Mart 2002, Kuala Lumpur, Malasia, 8.
- [4] White, D.J., Wissmann, K.J., Barnes, A.G. ve Gaul, A.J., (2002). “Embankment Support: A Comparison of Stone Column and Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement”, Presented at Transportation Research Board, 81th Annual Meeting, 13-17 Ocak 2002, Washington D.C., 2-4.
- [5] McKenn, J.M., Eyre W.A., ve D.R. Wolstenholme (1975). “Performance of an Embankment Supported by Stone Columns in Soft Ground”, Geotechnique, 25: 51-59.
- [6] Liew, S.S. and Tan, S.K., 2007 Performance of Reinforced Soil Wall Supported on Stone Columns, Proc. 16th Southeast Asian Geotechnical Conferences, Malaysia.
- [7] Ergun, M.O., (1992). “Design and Performance of Two Port Silos on Improved Ground”, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, 23-25 Şubat 2002, New Orleans, 30: 842-854.
- [8] Jebe, W. ve Bartels, K. (1983). “The Development of Compaction Methods with Vibrators from 1976 to 1982”, Proc 8th ECSMFE, Helsinki, 259-266.
- [9] Demir, S., (2011). Darbeli Kırmataş Kolonların İmalatında Zemin Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 9-59.
- [10] Demir, H., (2007). Taş Kolon ve Geopier Uygulaması ile Zemin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 14-58.

- [11] Keller, (2010). Deep Vibro Techniques, Brochure 10-02E, İngiltere.
- [12] Kurt, E., (2011). Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon Elemanlarına Ait Yükleme Testlerinin Sayısal Analizi ve Sonuçlarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 19-70.
- [13] Clemente, J.L. ve Davie, J.R., (1999). "Stone Columns for Settlement Reduction", American Society for Testing and Materials, 1-2.
- [14] Priebe, H.J., (1995). "The Design of Vibro Replacement.", Ground Engineering, 1-13.
- [15] Barksdale, R.D. ve Bachus, R.C., (1983). "Design and Construction of Stone Columns: Vol.1-2", Report No. FHWA/RD-83/026, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 6-55.
- [16] Hughes, J.M.O. ve Withers, N.J. (1974). "Reinforcing of Soft Cohesive Soils With Stone Columns", Ground Engineering, 7: 42-49.
- [17] Vesic, A.S., (1972). "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 98: 265-290.
- [18] Gibson, R.E., ve Anderson, W.F. (1961). "In Situ Measurement Of Soil Properties With The Pressuremeter", Civil Engineering and Public Works Review, 56(658): 615-618.
- [19] Lawton, E.C. ve Fox, N.S., (1994). "Settlement of Structures Supported on Marginal or Inadequate Soil Stiffened with Short Aggregate Piers", Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE Geotechnical Special Publication, Yayın No: 40, 2: 962-974.
- [20] Fox, N.S. ve M.J. Cowell (1998). "Geopier® Foundation and Soil Reinforcement Manual", Geopier Foundation Company, Inc., Scottsdale, AZ.
- [21] Lawton, E.C., Fox, N.S. ve Handy, R.L., (1994). "Control of Settlement and Uplift of Structures Using Short Aggregate Piers", In-situ Deep Soil Improvement, Proc. ASCE National Convention, Atlanta, Georgia, 121-132.
- [22] Iowa State University, Institute for Transportation, Highway applications for aggregate columns, http://www.intrans.iastate.edu/ltap/tech_news/2005/may-jun/aggregate_columns.htm, 15 Ocak 2011.
- [23] White, D.J., Lawton, E.C. and Pitt, J.M., 2000. Lateral Earth Pressure Induced by Rammed Aggregate Piers, *53rd Annual Canadian Geotechnical Conference*, Montreal, Canada.
- [24] Lawton, E.C. ve Warner, B.J., (2004). "Performance of a Group of Geopier Elements Loaded in Compression Compared to Single Geopier Elements and Unreinforced Soil", Final Report, Rapor No: UUCVEEN 04-12, University of Utah, Salt Lake City, UT, USA.

- [25] Wissmann, K.J., (1999). "Bearing Capacity of Geopier Supported Foundation Systems", Technical Bulletin No.2, Geopier Foundation Co., Inc., Arizona.
- [26] Rowe, P.W., Barden, L., (1996) "A New Consolidation Cell", *Geotechnique*, 16(), 162-170.
- [27] İpekoğlu, P., (2003). Atık amur Sahalarının Rehabilitasyonu, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 92-126.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Şamil ATAMAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 31.08.1987 – Dursunbey- BALIKESİR
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : samilataman@gmail.com, samilataman@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnş. Müh. / Geoteknik	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lisans	İnş. Müh.	İstanbul Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Edremit Anadolu Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi / Türü / Yeri
2010-2011	Yıldız Teknik Üniversitesi / İnşaat Müh. Geoteknik ABD.	Asistan - Öğrenci
2006	Eston Yapı	Stajyer- Saha Mühendisi