

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLARIN İMALATINDA ZEMİN
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

SERPEN DEMİR

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 KIRMATAŞ KOLONLARIN İMALATINDA ZEMİN
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Serpen DEMİR tarafından hazırlanan tez çalışması 07.03.2011 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

Yrd. Doç. Dr. Havvanur KILIÇ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

İstanbul Üniversitesi

ÖNSÖZ

Günümüzde düşük kayma mukavemeti ve yüksek sıkışabilirliğe sahip zemin tabakalarının yerinde iyileştirilmesi için çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Zeminleri yerinde iyileştirme yöntemlerinden darbeli kırmataş kolon (DKK) kullanımı son yirmi yıldır kullanılmaya başlayan yöntemlerden bir olup dünyada ve ülkemizde kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır.

Bu yüksek lisans tezinde darbeli kırma taş kolonların sayısal ve model deneylerle incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında imal ettirilen darbeli kırma taş makinesi ile sahada yapılanların 1/3 oranında ölçeklendirilen 10 cm çapta 100 cm uzunlukta darbeli veya standart kolon üretilmesi mümkündür. Bu makinenin geliştirilmesi ve deney tankına yerleştirilen killi zeminin konsolide edilerek darbeli kırmataş kolon üretilmesine hazır hale getirilmesi planlanandan daha fazla sürede gerçekleştirilebildiğinden istenilen sayıda deneylerin yapılması maalesef mümkün olamamış, sadece bir tam deney yapılabilmektedir. Tez kapsamında ilk olarak toplanan kuramsal ve pratik bilgiler ile danışmanlarım Doç.Dr. Mehmet Berilgen ve Öğr. Gör. Dr. Cem Akgüner önderliğinde bir darbeli kırma taş kolon makinesi geliştirme çabasına girilmiş ve Elek. Müh. Sayın Mustafa Aydın'ın da katkıları ile bu amaca ulaşılmıştır. Bu süreçte PLAXIS yazılımı kullanılarak parametrik sayısal analizler yapılmış ve darbeli kırmataş kolonların davranışı hakkında yararlı bilgiler elde olunmuştur. Darbeli kırmataş kolon makinesi imalatı tamamlandıktan sonra deney tankında likit limit kıvamında hazırlanan 10 kPa konsolidasyon basıncında hazırlanan kil tabakası üzerinde darbeli kırma taş kolon makinesi ile bir darbeli kırma taş kolon üretilmiş ve yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyden elde edilen yük-yer değiştirme ilişkisi PLAXIS yazılımı ile modellenmiştir. Bu modelde zemin tabakası içine boşluk veya zemin basıncı ölçer yerleştirilemediği için darbeli taş kolonun imalatı sırasında kolonda oluşan hacimsel değişimler ölçülememiştir. Sayısal analizlerden elde edilen yük-yer değiştirme sonuçları ile model deneyden ölçülenlerle kolonlara %0, %2, %5 ve %10 hacim değişimi uygulanarak model deneyde gerçekleşen hacim değişimi belirlenmiştir.

Tez çalışmam boyunca destekleri, ilgileri ve sabırları ile bana daima yardımcı olan Öğr. Gör. Dr. Cem AKGÜNER ve Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN'e teşekkürlerimi sunarım. Yine tez çalışmam boyunca ve öncesinde bana kattıklarını asla geri ödeyemeyeceğim, her konuda bir hocadan çok daha fazlasını bizlere sunan çok kıymetli Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN ve Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM'a teşekkürlerimi ve saygılarımı iletmek isterim. Yüksek lisans tez çalışmam boyunca değerli ilgilerini benden esirgemeyen ve her zaman moral aşılayan değerli hocalarım Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM'a, Araş. Gör.

Dr. Murat TONAROĞLU'na, Araş. Gör. Murat Ergenekon SELÇUK'a, Araş. Gör. Dr. Tayfun ŐENGÜL'e ve arkadaşım Araş. Gör. Mustafa KİRKİT'e, yardımları ve ilgileri ile her zaman moral aşılayan değerli arkadaşlarım Alphan ÜNDER'e, Jeol. Müh. Can TATAR'a, İnş. Müh. H. Emrah NAMAL'a, Jeol. Müh. Fatih BİCE'ye, Geoteknik Müh. Emre AKINAY'a, Gökhan SİPAHİ'ye, İnş.-Jeof. Müh. Lale ÖNER'e, Jeol. Müh. Murat BİLGİÇ'e, İnş. Müh. Őamil ATAMAN'a, Geoteknik Müh. Zeynep Tuğçe YÜKSEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Bütün bu zorlukları aşarken hep yanımda olan, bana destek ve güç veren, haklarını asla ödeyemeyeceğim çok sevgili anneme ve çok sevgili babama, en büyük moral kaynağım olan kuzenlerime, uzak mesafelerden de olsa desteklerini ve sevgilerini her zaman hissettiren, daima moral veren aileme, en derin ve en içten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Mart, 2011

Serpen DEMİR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT.....	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	4
1.3 Hipotez.....	4
BÖLÜM 2	
TAŞ KOLONLAR.....	6
2.1 Genel.....	6
2.2 Zemin Tabakalarının Yerinde İyileştirilmesi.....	7
2.3 Taş Kolon İnşası	11
2.4 Vibratör	11
2.5 Taş Kolon Uygulama Yöntemleri.....	12
2.5.1 Vibrokompaksiyon.....	12
2.5.2 Vibro Yer Değiştirme	13
2.5.2.1 Islak, Tepeden Beslemeli Yöntem.....	14
2.5.2.2 Kuru, Dipten Beslemeli Yöntem	15
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.....	17

2.6.4	İyileştirilmiş Zemin Parametreleri	18
2.6.4.1	İyileştirme Faktörü Hesabı	18
2.6.4.2	Kolon Sıkışabilirlik Etkisinin Değerlendirilmesi	20
2.6.4.3	Jeolojik Yük Etkisinin Dikkate Alınması	21
2.6.4.4	Uyumluluk Kontrolleri	24
2.6.4.5	Tekil ve Şerit Temellerde Oturma Hesapları	25
2.6.5	Taş Kolonlarla İyileştirilmiş Zeminde Taşıma Gücü Hesabı	27
2.6.5.1	Taş Kolon Yerleşimi	30
2.6.5.2	Birim Hücre Kavramı	31
2.6.6	En Büyük Taşıma Gücü Hesabı	33
2.6.6.1	Boşluk Genişleme Teorisi	34
2.6.6.2	Taş Kolon Gruplarının Nihai Taşıma Gücü	37
BÖLÜM 3		
DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLAR		40
3.1	Genel	40
3.2	Yapım Aşamaları	40
3.3	Darbeli Kırmataş Kolon Çeşitleri	43
3.4	Kırmataş Kolonlar İle Diğer Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması	44
3.5	Kırmataş Kolon Destekli Temellerde Oturma Hesabı	44
3.5.1	Üst Bölge Oturmaları	45
3.5.2	Alt Bölge Oturmaları	49
3.6	Darbeli Kırmataş Kolonlar İle İyileştirilmiş Zeminlerde Temel Taşıma Gücünün Bulunması	51
3.6.1	Tekil Kolonun Taşıma Kapasitesi	51
3.6.1.1	Tekil Kolonda Genişleme Göçmesi	52
3.6.1.2	Tekil Kolon Ucunda Meydana Gelebilecek Göçme	53
3.6.2	Kolon Gruplarının Taşıma Kapasitesi	56
3.6.2.1	Kolon Gruplarında Genişleme Göçmesi	57
3.6.2.2	Kolon Gruplarında Kayma Göçmesi	58
3.6.2.3	Kolon Gruplarında Zımbalanma Göçmesi	58
3.6.2.4	Kolon Gruplarında Zemin-Kolon Bölgesi Altında Göçme	58
BÖLÜM 4		
DARBELİ KIRMATAŞ KOLON SAYISAL MODELİ		60
4.1	Giriş	60
4.2	Darbeli Kırmataş Kolonun Geometrik Modeli	60
4.2.1	Sonlu Eleman Analizinde Kullanılan Zemin Modelleri	62
4.3	Parametrik Analizler	63
BÖLÜM 5		
DARBELİ KIRMATAŞ KOLON LABORATUAR MODELİ		69
5.1	Giriş	69
5.2	Deney Sistemi	69
5.3	Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	73
5.3.1	Kaolin	73
5.3.2	Kum	73
5.3.3	Çakıl	74
5.4	Zemin Numunesinin Hazırlanması	75

5.5	Model DKK Üretimi	78
5.6	Yükleme Deneyi	80
5.7	Deney Sonrasında Model DKK’da Meydana Gelen Deformasyonlar.....	81
5.8	Model DKK’nın Sayısal Analizi.....	83
5.9	Model DKK’nın Taşıma Gücü Hesabı	86
BÖLÜM 6		
SONUÇLAR.....		88
KAYNAKLAR		90
ÖZGEÇMİŞ.....		92

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 Eklenerak 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

$[tg\phi]_{avg}$	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

DKK	Darbeli Kırmataş Kolon
CPT	Koni Penetrasyon Testi
SPT	Standart Penetrasyon Testi
BST	Kuyu Kesme Testi
OİO	Oturma İyileştirme Oranı

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Dolgu yüksekliğine göre oturma miktarları.....	3
Şekil 2.1 Vibroflatasyon yöntemi ile taş kolon üretimi	8
Şekil 2.2 Klasik foraj ile taş kolon üretimi	8
Şekil 2.3 Vibroprob ve iç elemanları [8]	10
Şekil 2.4 Taş kolon yapım aşamaları	11
Şekil 2.5 Vibratörün hareket şekli ve şeması.....	12
Şekil 2.6 Islak, tepeden beslemeli yöntem ile taş kolon yapımı [10]	14
Şekil 2.7 Kuru, dipten beslemeli yöntem ile taş kolon imalatı [10]	15
Şekil 2.8 Derin vibro tekniklerin zemin sınırları [10]	17
Şekil 2.9 $\mu_s = 1/3$ için iyileştirme faktörü, n_0 [12].....	20
Şekil 2.10 $\mu_s = 1/3$ için kolon sıkışabilirlik düzeltmesi eğrileri [12].....	21
Şekil 2.11 $\mu_s = 1/3$ için derinlik faktörü [12].....	23
Şekil 2.12 Derinlik faktörü limit değerleri [12].....	25
Şekil 2.13 Tekil temellerin oturması [12].....	26
Şekil 2.14 Şerit temellerin oturması [12].....	26
Şekil 2.15 Tekil taş kolon göçme mekanizmaları [13]	27
Şekil 2.16 Taş kolona etkiyen farklı yükler [13]	28
Şekil 2.17 Taş kolon gruplarının göçme mekanizmaları [13]	29
Şekil 2.18 Homojen olmayan kohezyonlu zeminlerde taş kolon göçme mekanizmaları[13].	30
Şekil 2.19 Taş kolonlarda eşkenar üçgen dizilimi [13].....	30
Şekil 2.20 Birim hücre tanımlanması [13].....	31
Şekil 2.21 Tek bir kolonun kabarma göçmesi [13].....	33
Şekil 2.22 Vesic silindirik boşluk genişleme faktörleri [13]	36
Şekil 2.23 Taş kolon grup analizleri [13]	37
Şekil 3.1 Darbeli kırmataş kolonun inşa edilmesi	41
Şekil 3.2 Darbeli kırmataş kolonunun açılması [20]	41
Şekil 3.3 Kırmataş kolon malzemesinin yerleştirilmesi [20].....	42
Şekil 3.4 Kolonun sıkıştırılması [20].....	42
Şekil 3.5 Kırmataş kolon çeşitleri.....	43
Şekil 3.6 RAP (Rammed aggregate piers) ile desteklenmiş temelerde oturma hesabı.....	44
Şekil 3.7 Kırmataş kolonlarda yay modeli.....	47
Şekil 3.8 Westergaard etki faktörü.....	50
Şekil 3.9 Tekil kırmataş kolonda göçme mekanizmaları.....	51
Şekil 3.10 Kolon gruplarında göçme mekanizmaları	57
Şekil 4.1 Analizlerde kullanılan elemanlar, düğüm noktaları ve gerilme noktaları (PLAXIS, 2009).....	61
Şekil 4.2 Darbeli kırmataş kolon nümerik modeli.....	61

Şekil 4.3	Standart bir üç eksenli basınç deneyi için birincil yüklemde hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (PLAXIS, 2010).....	62
Şekil 4.4	Poisson oranı değişiminin, hacimsel sıkışma oranı ile yanal toprak basıncı arasındaki ilişki üzerindeki etkisi	64
Şekil 4.5	Kayma mukavemeti açısı değişiminin, hacimsel sıkışma oranı ile yanal toprak basıncı arasındaki ilişki üzerindeki etkisi ($v=0.2$).....	65
Şekil 4.6	Kayma mukavemeti açısı değişiminin, hacimsel sıkışma oranı ile yanal toprak basıncı arasındaki ilişki üzerindeki etkisi ($v=0.35$).....	66
Şekil 4.7	Drenajlı analizlerde yanal toprak basıncının değişimi (Etkatif gerilmeler)	67
Şekil 4.8	Drenajlı analizlerde yanal toprak basıncının değişimi (Toplam gerilmeler)	67
Şekil 4.9	Drenajsız analizlerde yanal toprak basıncının değişimi (Etkatif gerilmeler)	68
Şekil 5.1	Deney sistemi ana elemanları	70
Şekil 5.2	Dokunmatik kontrol paneli	71
Şekil 5.3	Deney sisteminin ön cepheden görünümü	71
Şekil 5.4	Deney sisteminin yandan görünümü	72
Şekil 5.5	Model deney tankı	72
Şekil 5.6	Kum malzemenin granülometresi	74
Şekil 5.7	DKK modeli için kullanılan çakıl malzemenin granülometresi	75
Şekil 5.8	Kova içerisinde hazırlanan zemin numunesi	76
Şekil 5.9	Tank tabanına çakıl ve üzerine geotekstil filtre yerleştirilmesi	76
Şekil 5.10	Model tanka akışkan malzemenin yerleştirilmesi	77
Şekil 5.11	DKK üretilecek zeminde cep penetrometresi ile mukavemet ölçümü	78
Şekil 5.12	Model deney tankında DKK üretimine başlamadan önceki görünüş	79
Şekil 5.13	DKK makinesinin çakıl haznesi	79
Şekil 5.14	Yükleme plakasının yerleşimi	80
Şekil 5.15	Rezistif lineer pozisyon ölçerin konumu	80
Şekil 5.16	Yük-deplasman grafiği	81
Şekil 5.17	Deney sonucunda elde edilen darbeli kırma taş kolon	82
Şekil 5.18	Oluşturulan darbeli kırma taş kolonun kesiti	82
Şekil 5.19	DKK model deneyi SE modeli	83
Şekil 5.20	Yük – düşey yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması	85

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1	Yükleme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması [3] 2
Çizelge 1.2	Oturma sonuçları [3] 2
Çizelge 2.1	Vibroprob çeşitleri [9]..... 10
Çizelge 2.2	Deney sahaları zemin özellikleri..... 16
Çizelge 4.1	Parametrik çalışmalarda kullanılan malzeme parametreleri 63
Çizelge 5.1	Kumun indeks özellikleri 74
Çizelge 5.2	Çakılın indeks özellikleri 74
Çizelge 5.3	Analizde kullanılan malzeme parametreleri 84

DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLARIN İMALATINDA ZEMİN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Serpen DEMİR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN

Darbeli kırmataş kolonlar (DKK) ile zemin iyileştirme yöntemi yumuşak olarak nitelendirilen düşük kayma mukavemetine ve yüksek sıkışabilirliğe sahip zeminlerde tercih edilen bir yerinde iyileştirme yöntemidir. DKK yöntemi derin temel zemini iyileştirme alternatifleriyle kıyaslandığında %20 ile %50 arasında değişen maliyet avantajı sunmaktadır. DKK üretimi sırasında düşey darbeler uygulandığından yüksek yoğunluklu granüler kolon elemanları elde edilmekte ve bundan dolayı uygulandığı zeminin kayma mukavemeti ve taşıma gücünü artırmakta sıkışabilirliğini azalmaktadır.

Darbeli kırmataş kolonlar, gerek kohezyonlu gerekse kohezyonsuz zeminlerde uygulanabilirler. Zemin tabakaları ve özelliklerine göre değişik boylarda ve dizilimlerde planlanabilen kırmataş kolonlar, taşıma kapasitesini artırma, sıvılaşma potansiyelini azaltma, oturma kontrolü sağlama gibi avantajlar sunmaktadır.

Bu çalışmada, darbeli kırmataş kolonların üretimi ve eksenel yükleme durumlarında zemin davranışı incelenmiştir. Bu inceleme neticesinde, zeminde kırmataş kolon yapılmadan önce meydana gelen oturmalar ile kırmataş kolon yapıldıktan sonra meydana gelen oturmaların karşılaştırılıp, kırmataş kolonun sabit yük altında ne kadar deformasyona uğradığı grafiklerle anlatılmıştır. Bu şekilde elde edilen veriler ile hazırlanan zemin ortamında yapılan kırmataş kolonun, o zemin ortamında ne kadar bir iyileştirme yaptığı, oluşturulan kolonun belli yükler altındaki deformasyonu ortaya çıkartılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Taş kolon, zemin iyileştirmesi, darbeli kırmataş kolon, GeoPier, sayısal analiz, model deney.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SOIL BEHAVIOR IN CONSTRUCTION OF RAMMED AGGREGATE PIERS

Serpen DEMİR

Department of Civil Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet BERİLGEN

In compressible soft soils, rammed aggregate piers (RAP) are the preferred soil improvement method and compared with other deep foundation alternatives, RAPs offer a cost advantage ranging from 20% to 50%. Elements of high-density granular columns are obtained through compaction, which translates to increased bearing capacity.

Rammed aggregate piers can be applied to both cohesive and cohesionless soils. Rammed aggregate piers can have differing lengths and layouts based on soil layering and soil properties with the purpose of increasing bearing capacity, reducing liquefaction potential, and controlling settlement.

In this study, the behavior of soils improved with rammed aggregate piers is investigated. The settlements before and after the construction of rammed aggregate piers are compared and the deformations of rammed aggregate piers under constant loads are graphically shown. In the light of these findings, the improvement of the rammed aggregate piers constructed within the clayey soil in the laboratory and the load-displacement behavior is examined.

Keywords: Stone column, ground improvement, rammed aggregate piers, GeoPier, numerical modeling, model testing.

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE

1.1 Literatür Özeti

Durgunoğlu vd.'nin [1]'de verilen Türkiye'de ilk olarak Borçelik Gemlik Soğuk Hadde Fabrikası'nda uygulanan taş kolonların projelendirilmesi, yapılan deneyler ve bunların sonuçları ele almıştır. Bu amaçla, doğal zemin kotundan itibaren 12.0 m derinliğe kadar olan zemin tabakalarının taş kolonlar ile ıslah edilmesi projelendirilmiştir. Ayrıca tesis dahilindeki yüksek stok sahası yüklerini taşımak ve oturmaları azaltmak için de bazı bölgelerde sağlam (taşıyıcı) zemine kadar taş kolon uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Wissmann vd. [2]'de darbeli kırmataş kolonların tasarımını oturma ve genel stabilite yönünden incelemiştir. Kırmataş kolon yapımında kullanılan malzemenin yüksek kayma dayanımı, şev ve dolgu zeminlerde kayma direncini artırarak 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.

White vd. [3]'te, Iowa'daki bir otoyol alanında komşu iki dolgu sahasından birinin taş kolonlar ile diğerinin de darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirilmesini araştırmışlardır. Bu komşu iki dolgu sahasının 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 ve darbeli kırmataş kolon yapılan bu sahalarda yükleme deneyleri de

yapılmış olup, bunun sonuçları Çizelge 1.1’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1.1’de gerilme deformasyon eğrisinin eğimi olarak rijitlik ve Şekil 1.1’de ölçülen oturma değerleri gösterilmiş olup, sonuçlar Çizelge 1.2’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 (4.8 cm), kırmataş kolon ile iyileştirilmiş zemindeki oturma miktarına (1.5 cm) oranı, 6 m’lik dolgu için 3.2 olarak hesaplanmıştır.
- Taş kolon yapılan zeminde meydana gelen oturmalar, kırmataş kolon uygulanan zeminde meydana gelen oturmalarından daha büyüktür. Bunun nedeni de taş kolon ile yeniden şekillendirilen zeminin kolonları sınırlandırmaması ve kolonların genişlemesi olarak açıklanabilir [4].

Çizelge 1.1 Yükleme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması [3]

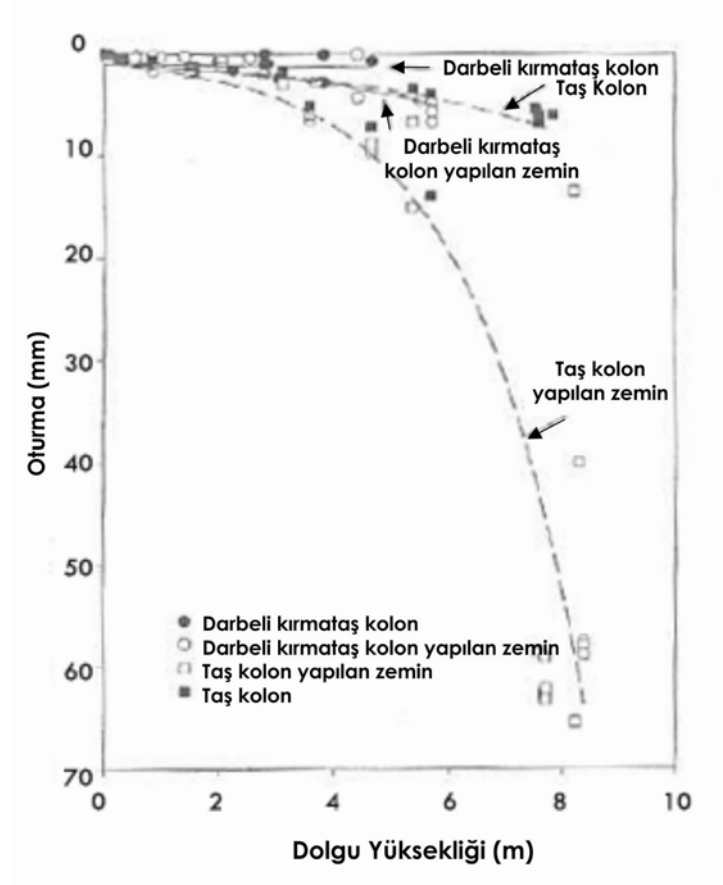
Uygulanan Gerilme (kPa)	Taş Kolon Rijitliği (MPa) (R1)	Darbeli Kırmataş Kolon Rijitliği (MPa) (R2)	Rijitlik Oranları (R1/R2)
25	84	196	2.4
50	44	171	3.9
100	21	132	6.3
200	-	40	-
400	-	18	-

Çizelge 1.2 Oturma sonuçları [3]

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 [3]'te yapmış olduğu bu çalışmaların sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

- CPT verilerine göre taş kolon yapılmış olan saha, darbeli kırmataş kolon yapılmış olan sahaya göre nispeten daha dayanımlı ve az kohezyonludur.
- SPT sonuçlarına göre ortalama N değeri taş kolon yapılan sahada 11 iken darbeli kırmataş kolon yapılan sahada 17 olarak bulunmuştur.



Şekil 1.1 Dolgu yüksekliğine göre oturma miktarları

- İnşaat sonrası yanal gerilme, darbeli kırmataş kolon yapılan zeminde, taş kolon yapılan zeminin iki katı olarak hesaplanmıştır.
- Taş kolon yapılan zeminde meydana gelen oturma, darbeli kırmataş kolon yapılan zemine oranla üç kat daha fazla çıkmıştır.
- Yükleme deneyleri sonuçlarına göre, uygulanan gerilmeye bağlı olarak, darbeli kırmataş kolonların rijitliğinin taş kolonların rijitliğine oranı iki ile dokuz arasında değişmektedir.

Jian-Feng Chen vd. [5]'te, FLAC 3D programını kullanarak nominal çapı 0.76 m ve nominal boyu 5.05 m olan tek bir darbeli kırmataş kolonun (DKK), zemin içerisine

yerleştirilmesini ve ardından gerçekleştirilen yükleme deneyini 3 boyutlu olarak modellemişlerdir. Ayrıca aynı çap ve uzunlukta sıkıştırılmamış kırmataş kolon da modellenmiş olup yerleştirme yönteminin etkileri incelenmiştir. Bunun neticesinde sonlu farklar yöntemi ile çözüm yapan FLAC 3D yazılımının, kırmataş kolon oluşturma yöntemine göre değişen yerleştirme etkilerini dikkate alabildiği ve arazi sonuçları ile örtüşen değerler verdiği görülmüştür.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, darbeli kırmataş kolonların yapımında zemin davranışı incelenmiştir. Bu inceleme neticesinde, zeminde kırmataş kolon yapılmadan önce meydana gelen oturmalar ile kırmataş kolon yapıldıktan sonra meydana gelen oturmaların karşılaştırılıp, kırmataş kolonun sabit yük altında ne kadar deformasyona uğradığı grafiklerle anlatılmıştır. Bu şekilde elde edilen veriler ile hazırlanan zemin ortamında yapılan kırmataş kolonun, o zemin ortamında ne kadar bir iyileştirme yaptığı, oluşturulan kolonun belli yükler altındaki deformasyonu ortaya çıkartılmıştır.

Bu yüksek lisans tezinde, darbeli kırmataş kolonların imalatı sırasında çevre zeminde meydana gelen gerilme oranlarındaki değişimler ile aksenal yükleme aşamalarında zeminle etkileşiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için, sayısal analizler yapılmış ve bir kırmataş kolon makinesi geliştirilerek çok yumuşak killi bir zemin üzerinde laboratuvar model deneyi gerçekleştirilmiştir. Buna göre tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalara göre tez organizasyonu aşağıda sunulmuştur.

1.3 Hipotez

Darbeli kırmataş kolonlar (DKK) ile zemin iyileştirme yöntemi yumuşak olarak nitelendirilen düşük kayma mukavemetine ve yüksek sıkışabilirliğe sahip zeminlerde tercih edilen bir yerinde iyileştirme yöntemidir. DKK yöntemi derin temel alternatifleriyle kıyaslandığında %20 ile %50 arasında değişen maliyet avantajı sunmaktadır. DKK üretimi sırasında iyileştirme yapılan zeminde açılan delgilere yerleştirilen çakıl, düşey darbeler uygulanarak yüksek yoğunluklu ve rijit granüler kolon elemanları elde edilmektedir. DKK yönteminde rijit kolonlar 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. Diğer yandan DKK ile iyileştirilmiş bir zeminde inşa edilen dolgularda dolgu yüksekliğine bağlı olarak ortaya çıkan kemerlenme etkisi ile dolgu yükünün önemli bir miktarı kolonlar tarafında karşılanmakta ve kayma mukavemeti çok düşük zeminlerde bile ekonomik dolgu inşa edilmesi mümkün olmaktadır.

Darbeli kırmataş kolonlar, gerek kohezyonlu gerekse kohezyonsuz zeminlerde uygulanabilirler. Zemin tabakaları ve özelliklerine göre değişik boylarda ve dizilimlerde planlanabilen kırmataş kolonlar, taşıma kapasitesini artırma, sıvılaşma potansiyelini azaltma, oturma kontrolü sağlama gibi avantajlar sunmaktadır.

Tezin birinci bölümünde kırmataş kolonlar hakkında kısa bir giriş yapıldıktan sonra tezin amacı ve tez organizasyonu, ikinci bölümde literatürde taş kolonlar hakkında yer alan çalışmalar özetlenmiştir. Üçüncü bölümde darbeli kırma taş kolonlar hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde darbeli kırma taş kolon üretimi sırasında çevre zeminde meydana gelen gerilme değişimleri farklı malzeme parametreleri ve bünye modelleri ile araştırılmıştır. Beşinci bölümde laboratuarda darbeli kırma taş kolon modeli üretmek için tez kapsamında geliştirilen makine ve bu makine ile üretilen bir DKK üzerinde yapılan eksenel yükleme deneyi sonucunun taş kolondaki farklı hacim değişimi uygulanarak yapılan sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla karşılaştırılması verilmiştir. Altıncı ve son bölümde ise yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular ışığında ulaşılan sonuçlar verilmiştir.

TAŞ KOLONLAR

2.1 Genel

Zemin koşullarının kötü olduğu arazilerde inşa edilecek yapılarda geleneksel temel inşaatı yöntemleri pahalıya mal olmakta ve ekonomikliğini yitirmektedir. Bundan dolayı bu tür zeminlerde, yerinde iyileştirme yoluna gidilmektedir. Bu yöntemlerinden biri olan taş kolonlar ile zemin iyileştirmesi genelde yumuşak ve orta yumuşak killi zeminlerde kullanılırlar. Bunun amacı, zemin üzerine gelen yükleri zeminle ortaklaşa taşımaktır. Taş kolonlar, hem taşıma gücüne hem de oturmaların azalmasına katkıda bulunurlar. Bunun yanı sıra zemin içerisindeki su, hidrolik eğim nedeniyle, yüksek enerji seviyesinden düşük enerji seviyesine hareket eder ve taş kolonlar tıpkı bir düşey dren gibi çalışarak zeminin oturma hızını arttırır. Kohezyonu az ve ince daneli zeminlerde de sıvılaşma riskine karşı taş kolonlar önerilmektedirler [6]. Sıvılaşma potansiyeline sahip olan bir zemine taş kolon uygulaması yapıldığında zeminin şu özellikleri kazanması beklenmelidir:

- 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 arttırırlar.
- Taş kolonlar aşırı boşluk suyu basıncı oluşmasını engeller.
- Taş kolon uygulaması ile kolon etrafındaki zeminde yanal gerilme artışları meydana gelir.
- Alüvyon ve değişken zeminlerde vibrokompaksiyon ile birlikte kullanılmaktadırlar.

2.2 Zemin Tabakalarının Yerinde İyileştirilmesi

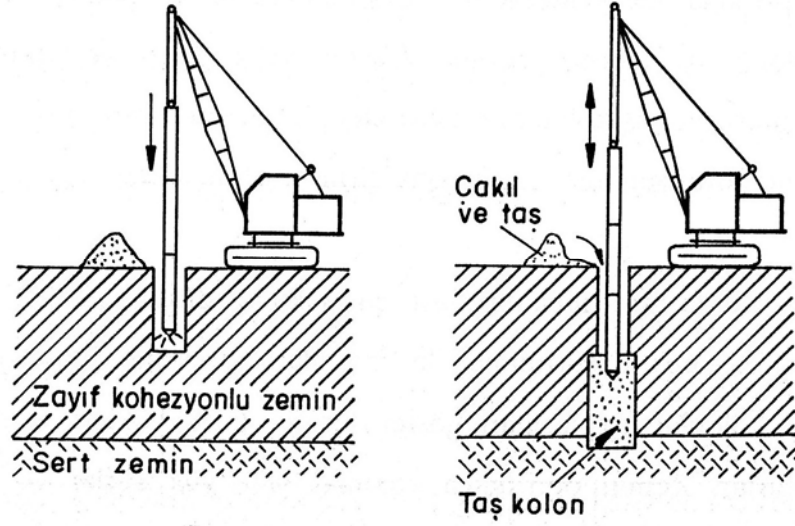
Yumuşak veya sıkışabilir zeminler ile başa çıkmanın bir yolu da onları iyileştirmektir. Yüzeyde meydana gelen taşıma gücü ve oturma sorunları gibi ve zemin tabakalarında meydana gelen sıvılaşma veya zemin yer değiştirmesi gibi problemlerin çözümü olarak zeminleri yerinde iyileştirme yoluna gidilebilir. Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde olmak üzere ikiye ayrılan bu iyileştirmeyi yaparken dikkat edilmesi gereken bazı noktalar bulunmaktadır:

- Zemin cinsi,
- İyileştirilmesi amaçlanan zeminin özelliği,
- Ulaşılmayı hedeflenen iyileştirme derecesi,
- Uygulama için gerekli ekipman ve iş gücü,
- Uygulamanın ve sonuçlarının kontrolü.

İyileştirme yöntemlerini de belli başlı başlıklar altında şu şekilde sıralanabilir:

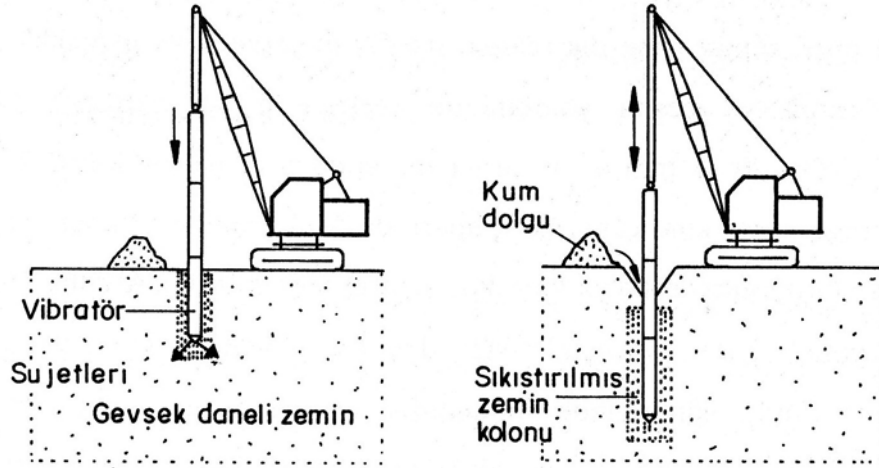
- Önyükleme ve sürsarj,
- Düşey drenler,
- Temel enjeksiyonu,
- Rijit kolonlarla zemin güçlendirilmesi (taş kolonlar, vibro kompaksiyon, jet grout, deep mixing)
- Geotekstilller,
- Diğer yöntemler (dondurma, elektro-ozmoz, v.b.)

Taş kolon yapımında kullanılacak malzeme, zemin içine düşey olarak 0.6-1.0 m çapında ve 20 m'ye kadar derinliklere çeşitli yöntemlerle yerleştirilir ve sıkıştırılır [7]. 20-75 mm arası kırma taş daha çok kullanılmasına rağmen tabii kaba çakıl agrega veya kum-çakıl karışımları da kullanılabilir. Taş kolonların yapım yöntemleri olarak Şekil 2.1'de görüldüğü gibi vibroflotasyon veya Şekil 2.2'de görüldüğü gibi klasik foraj (burgu ile delgi) yöntemleriyle zeminin delinip açılan kuyunun agrega ile doldurularak vibratör ile sıkıştırılması teknikleri kullanılmaktadır. Foraj yönteminde açılan kuyuyu koruma ve kuyuya konulan agreganın sıkıştırılması işlemlerine önem verilmelidir.



Şekil 2.1 Vibroflasyon yöntemi ile taş kolon üretimi

Yumuşak killerde boru çakma ve kuyuyu doldururken çekme işlemi de uygulanmaktadır. Borular su jeti ve vibratör yardımıyla da sokulabilmektedir. Bu teknik gevşek daneli zeminlerde uygulandığında çevre zeminlerde kompaksiyon yaparak zemin iyileştirdiğinden literatürde vibrokompaksiyon yöntemi olarak anılmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Klasik foraj ile taş kolon üretimi

Taş kolon projelerinde yaklaşık 0.3 m kalınlıkta daneli zeminden bir yastık, sahada kolonların üzerine serilir. Üçgen veya kare yerleşim planında merkezden merkeze taş kolon ara uzaklıkları 1.5-5.0 m arasında değişmektedir. Eğer mümkünse kolonların uç

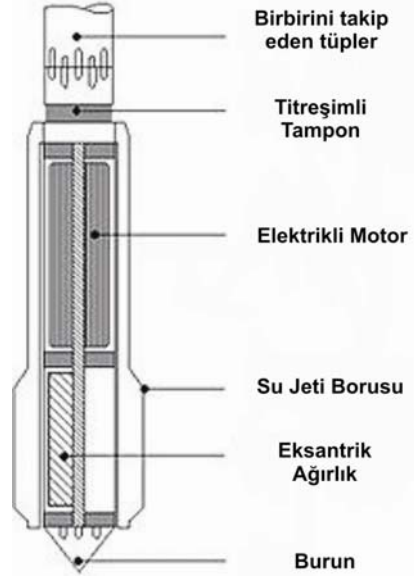
kotta sert bir formasyona girmesi istenmektedir.

Zemin-kolon davranışını etkileyen faktörler arasında şunlar sayılabilir:

- Zeminin drenajsız mukavemeti,
- Jeolojik gerilme,
- Kolon radyal gerilmesi-birim boy değiştirme özellikleri,
- Başlangıçtaki kolon boyutu,
- Kolon malzemesinin özellikleri sayılabilir.

Taş kolon iyileştirilmesi, yüzeydeki uygun olmayan zeminin genellikle zayıf tabakaya taş kolonlar yardımı ile sabitlenip, kısmi olarak yer değiştirmesini içerir. Eğer iyileştirme sırasında su kullanılıyorsa buna “vibro-replacement” veya “ıslak metot” adı verilir. Bu metotta titreşimin yanı sıra basınçlı su jeti yardımıyla vibroflotun zeminde ilerlemesi sağlanmaktadır. Kontrolsüz dolgulu zeminler gibi kısmen suya doymuş zeminlerde su kullanılmadan yapılan işleme ise “vibro-displacement” veya “kuru metot” adı verilir. Kuru metotta zemine basınçlı hava enjekte edilerek zeminin yanal olarak yer değiştirmesi sağlanır ve prob zayıf tabakada ilerlemiş olur.

Taş kolon imalatı sırasında kullanılan titreşimli prob, gövde içerisindeki eksantrik ağırlık ve elektrik veya hidrolik güç kullanılarak uç kısımda yanal titreşimler oluşturmaktadır. Firmadan firmaya değişse de genel bir tanım olarak “Vibroflot” veya “Poker” terimleri kullanılmaktadır. Şekil 2.3’te bir adet Vibroprob örneği gösterilmiştir. Bu konuda dünya çapında ünlü firmalar tarafından tercih edilen Vibroprob çeşitleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.3 Vibroprob ve iç elemanları [8]

Çizelge 2.1 Vibroprob çeşitleri [9]

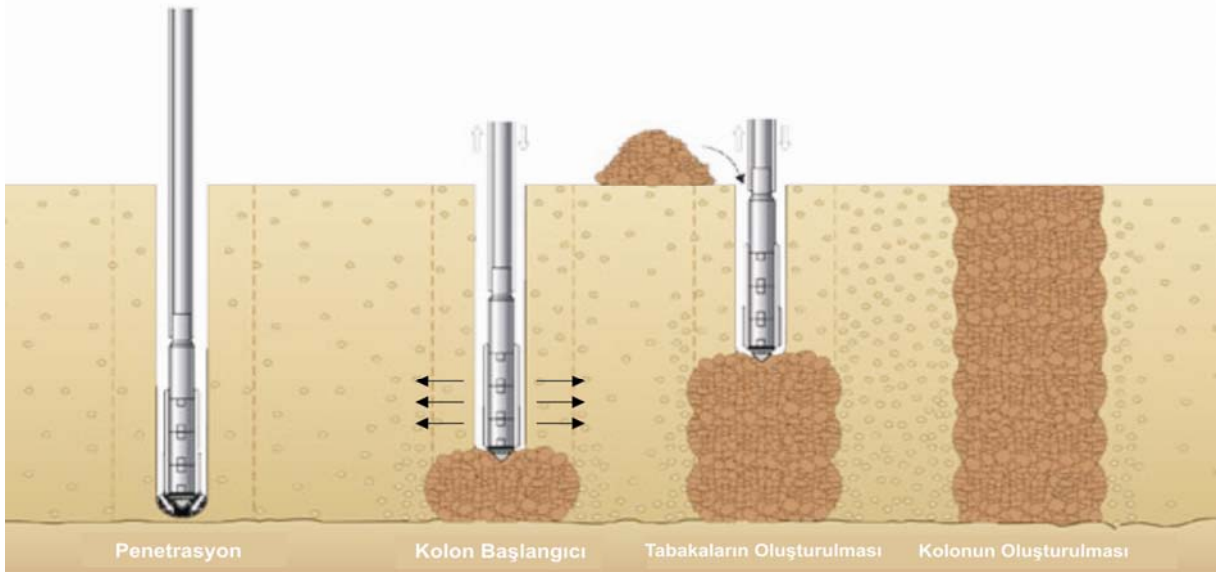
Üretici	Bauer	Bauer	Keller	Keller	Keller	Keller	Vibro	Vibro
Makine İsmi	TR13	TR85	M	S	A	L	V23	V32
Uzunluk (m)	3.13	4.20	3.30	3.00	4.35	3.10	3.57	3.57
Çap (mm)	300	420	290	400	290	320	350	350
Ağırlık (kg)	1000	2090	1600	2450	1900	1815	2200	2200
Motor (kW)	105	210	50	120	50	100	130	130
Hız (min ⁻¹)	3250	1800	3000	1800	2000	3600	1800	1800
Genlik (mm)	6	22	7.2	18	13.8	5.3	23	32
Dinamik Kuvvet (kN)	150	330	150	280	160	201	300	450

Oluşturulan taş kolonların faydalarını şöyle sıralayabiliriz:

- Temel altı oturmaların azaltılması,
- Şev stabilizasyonu,
- Dolgu zeminlerde inşaat imkanı,
- Taşıma gücü artışı ve dolayısıyla temel boyutlarında düşme,
- Sıvılaşma riskinin azaltılması.

2.3 Taş Kolon İnşası

Bir taş kolonun yapılabilmesi için öncelikli olarak titreşim ve su ve/veya hava jeti ile birlikte vibroprob kullanılarak istenilen derinlikte bir kuyu oluşturulur. Kuyu, kazı sırasında içinde meydana gelebilecek göçme veya yanal sıkışmalar için probdan biraz daha geniş tutulur. Taş kolonun yapımı, kuyu içinde 30-120 cm arasında değişen kalınlıklardaki tabakalar halinde geri dolgularla yüzeye kadar çıkılarak oluşturulur. Kolonu oluşturan taşlar, zemin yüzeyinden kuyuya bırakılır ve prob ile zemin arasındaki boşluğa düşmesi sağlanır. Açılan kuyuda göçme oluşması beklenmiyor ise prob geri çekilip taş eklenebilir. Oluşturulan tabakalardaki malzemeyi sıkıştırmak ve malzemenin zemine tam olarak yerleşmesi için vibroprob tabakaya bastırılıp çıkarılır. Bu esnada vibroprob bir süreliğine tabaka üzerinde bırakılarak, tam sıkışma elde edilebilir. Bu şekilde zemin yüzeyine kadar birbirini takip eden, sıkıştırılmış tabakalardan oluşan taş kolonlar elde edilir (Şekil 2.4):

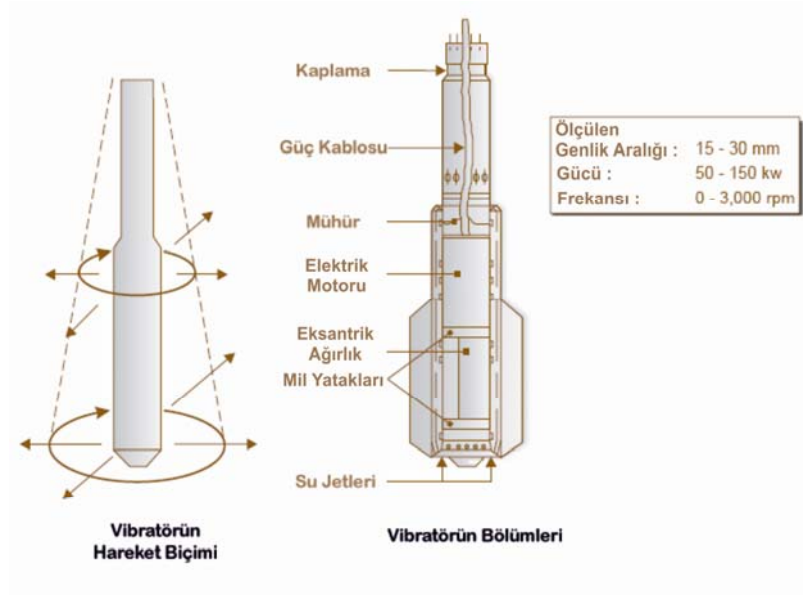


Şekil 2.4 Taş kolon yapım aşamaları

2.4 Vibratör

Vibratör kendi ağırlığı altında, meydana getirilen titreşimlerle birlikte zemine batırılır ve bu işlemin daha kolaylaştırılması için de gerektiğinde su jeti veya hava kullanılır. Arzu edilen derinliğe gelindiğinde ise elektrik motoru ve eksantrik ağırlık ile birlikte yanal vibrasyon oluşturulur. Vibratör hareketini dairesel olarak yatay düzlemde yapar

ve zayıf zeminler içerisinde dinamik kuvvetlerin oluşmasını sağlar. Bu durum üretilen vibrasyon enerjisinin en verimli şekilde kullanılmasını sağlayıp optimum sıkışma elde edilir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Vibratörün hareket şekli ve şeması

2.5 Taş Kolon Uygulama Yöntemleri

Taş kolon, değişik metotlarla birlikte farklı uzunluk ve çaplarda yapılabilir. Aşağıda taş kolon yapılacak zemine göre değişen uygulama yöntemlerinden vibro kompaksiyon ve vibro yer değiştirme yöntemleri hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

2.5.1 Vibro kompaksiyon

Vibro kompaksiyon, ince dane oranı %10'dan az olan zeminlerde derinlik vibratörleri yardımı ile sıklığın artırılmasında kullanılır. Vibratör, genelde su jetleri yardımı ile hareketi desteklenerek zemin daneleri arasındaki kuvvetleri yener ve daha sıkı bir hale getirir. Bu yöntem genel olarak % 70 - %80 oranında rölatif sıklık (D_r) sağlar.

İyileştirme sonucu elde edilen zeminin özellikleri, zemin tipine ve derecelenmesine, penetrasyon mesafesine ve uygulama sonrası geçen zamana bağlıdır. Vibro kompaksiyon merkezler arası mesafe 1.8 ile 4.3 m arasında ve dizilimi kare veya eşkenar üçgen olacak şekilde uygulanır.

Vibratör istenilen derinliğe indirildikten sonra işlem başlar. Kompaksiyon sırasında zemin hacminde meydana gelen azalma, zemin yüzeyinden eklenen kum ile dengelenmeye çalışılır. Bundaki amaç arazi kotunu korumaktır. Fakat bazı durumlarda bu işleme rağmen temel kotunun altında bir kot elde edilebilir. Kompaksiyon sırasında bazen zemin yüzeyinin çökmesine izin verildiği gibi bazen de yüzeye yakın yerler geri dolgu malzemesi olarak kullanılabilir.

Vibro kompaksiyon işlemi ekonomik olarak 240 kPa ile 480 kPa arasında değişen temel taşıma gücü sağlamaktadır [10].

2.5.2 Vibro Yer Değiştirme

Karışık, kohezyonlu ve tabakalı zeminler vibrasyon işlemi ile istenildiği gibi sıkıştırılamayabilir. Bu amaçla taş kolonlar oluşturularak zeminde iyileştirme yapılabilir.

Bu yöntemle taş kolon yapımında titreşimli bir prob kullanılır. Bu prob, zeminde ilerlerken aynı zamanda da radyal yer değiştirme meydana getirir. Arzu edilen derinliğe gelince prob dışarı alınır ve kuyu agrega ile tekrar doldurulur. Daha sonra prob tekrar kuyuya indirilerek agreganın sıkışıp, radyal olarak yayılması sağlanır. Yapılacak taş kolonun nitelikleri elde edilene kadar bu işleme devam edilir.

Oluşturulan taş kolonlar yüksek kesme dayanımı ve düşük sıkışabilirliğe sahip olduklarından, aşırı boşluk suyu düşey drenler varmış gibi taş kolonlar yardımı ile dağıtılabilir.

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 performansına bağlı olarak izin verilebilir yükler değişiklik gösterebilir. Kohezyonlu zeminlerde bu değer 48 kPa ile 240 kPa arasında olurken, granüler zeminlerde veya konsolidasyonun hızlı olması istenilen zeminlerde 96 kPa ile 480 kPa arasında olması istenir.

Vibro taş kolonlar 2 farklı yöntem ile yapılabilir. Bunlar;

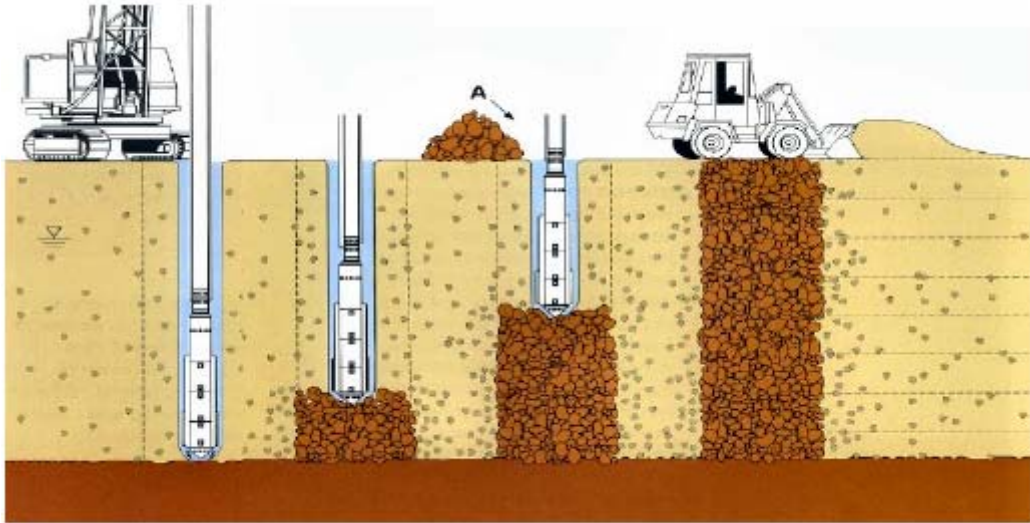
- Islak, tepeden beslemeli yöntem ve
- Kuru, dipten beslemeli yöntemdir.

2.5.2.1 Islak, Tepeden Beslemeli Yöntem

Bu yöntemde su jeti yardımıyla yumuşak malzemeler kaldırılır ve açılan çukurun stabilizasyonu sağlanır. Çok yaygın ve ucuz maliyetli bir yöntemdir. Eğer ortamda su jeti için gerekli su varsa ve çıkan atıklar çevre kirliliğine yol açmıyorsa kuru yöntemden ziyade bu yöntem tercih edilir.

Taş kolon imalatı tamamlanınca bunun kontrolü için arazide yükleme deneyi, presiometre deneyi, dilatometre deneyi, standart penetrasyon deneyi ve koni penetrasyon deneyi veya bunlardan birkaçı birlikte yapılır.

Islak tepeden beslemeli vibro-yer değiştirme yönteminin nasıl yapıldığı Şekil 2.6'da gösterilmiştir. İlk aşamada, tam su basıncı altında tasarım derinliğine kadar inilir ve vibratörün etrafındaki bölge bu basınç altındaki su ile yıkanır. İkinci aşamada vibratör yukarı çekilirken, yukarıdan kolon malzemesi bu boşluğa doldurulur ve sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Üçüncü aşama boyunca kolon, yüzeye kadar oluşturulmaya devam edilir. Dördüncü ve son aşamada ise kolon yüzeyi silindir ile düzeltilir.



Şekil 2.6 Islak, tepeden beslemeli yöntem ile taş kolon yapımı [10]

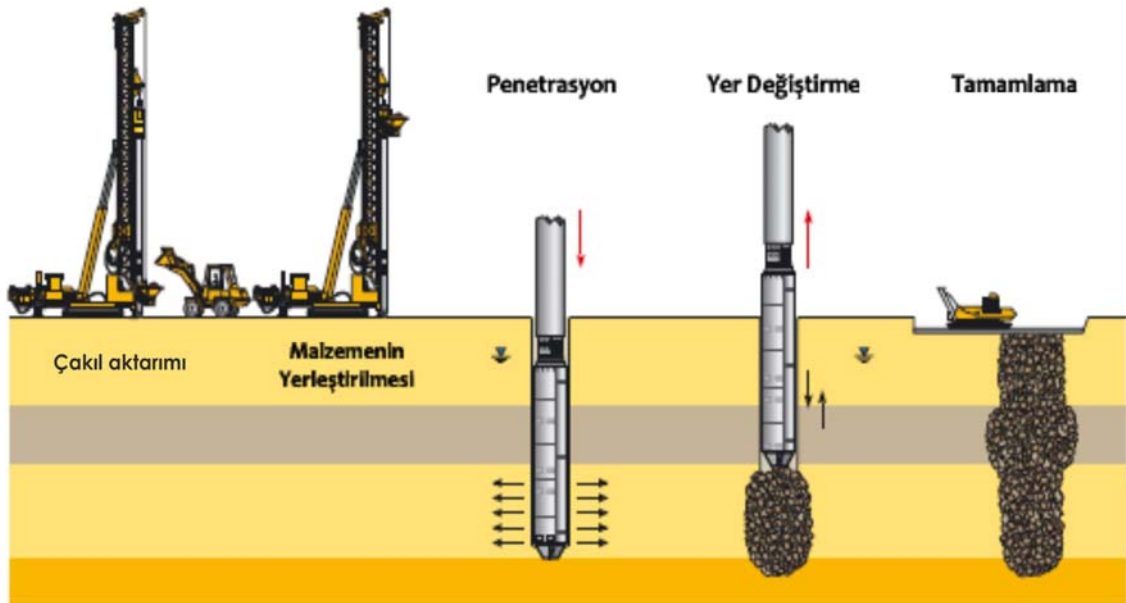
2.5.2.2 Kuru, Dipten Beslemeli Yöntem

Bu yöntemde probun zemin içerisinde ilerlemesini ve zeminin yanıl yönde yer değiştirmesini sağlamak amacıyla basınçlı hava kullanılır. Probuñ yanıl sıra dolgunun vibratörün uç kısmından yapılmasını sağlamak için bir huni ve koruyucu tüp bulunur. Dipten beslemeli yöntem tamamen kuru bir yöntem olup kolon imalatı sırasında vibratör kuyu içerisinde durabilir. Bu işlem sırasında 24 metreden daha derine inilebilir ve ortamda yer altı suyunun olması kolon yapımı için bir engel teşkil etmemektedir.

Islak yönteme göre avantajları şöyle sıralanabilir:

- Kullanılacak taş hacminin bilinebilmesi taş dolgu tasarrufu sağlar.
- Suyla bir ilişki olmadığı için çevreye daha az atık çıkmaktadır.

Şekil 2.7’de kuru, dipten beslemeli yöntemin nasıl yapıldığı gösterilmiştir. İlk aşamada, alete çakıl aktarımı yapılarak, ikinci aşamada konulan çakılın yerleştirilmesi yapılır. Üçüncü aşamada ise penetrasyon işlemine geçilerek vibrasyon ve basınçlı hava ile istenilen derinliğe inilir. Dördüncü aşamada, prob içine yerleştirilen çakıl malzemesi, probun yukarı çekilmesi ile boşluğa dolar ve kompaksiyon ile de sıkıştırılmaya başlanır. Beşinci aşamada ise bir önceki yöntemde olduğu gibi kolon yüzeyi bir silindir yardımı ile düzeltilir.



Şekil 2.7 Kuru, dipten beslemeli yöntem ile taş kolon imalatı [10]

2.6 Taş Kolon Tasarımı

2.6.1 Tasarım Koşulları

Taş kolon dizilimi, iyileştirilmemiş zeminin temel oturmasının, iyileştirilmiş zeminin temel oturmasına oranı olarak tarif edilen, hedeflenen oturma iyileştirme oranı (OİO) ile yapılır [11]. Elde edilmek istenen OİO, zemin koşullarına göre hesaplanan oturmaya göre bulunabilir. Clemente ve Davie'nin [11] de yapmış oldukları çalışmada taş kolonların oturmalarına etkisini ve taş kolon tasarımının nasıl yapıldığını incelemişlerdir. İncelemede 4 adet deney sahası bulunmaktadır. Granüler, suya doygun kohezyonlu ve aşırı konsolide zeminlerde meydana gelen oturmaların sonuçları elde edilmiştir. Çizelge 2.2'de bu deney sahaslarının özellikleri yer almaktadır. Örnek olarak 2 numaralı deney sahası incelendiğinde, taş kolonların 8 metre uzunluğunda, 0.9 metre çapında ve 2.0 metre aralıklı olarak tasarlandığı anlaşılmaktadır. Bu deney sahası için elde edilen bulgular:

- İyileştirilmemiş zeminde 200 kPa yük altında 4 m²'lik temelde 45 mm oturma gerçekleşmiştir. Bu değer yükleme testi neticesinde 59 mm olarak bulunmuştur.

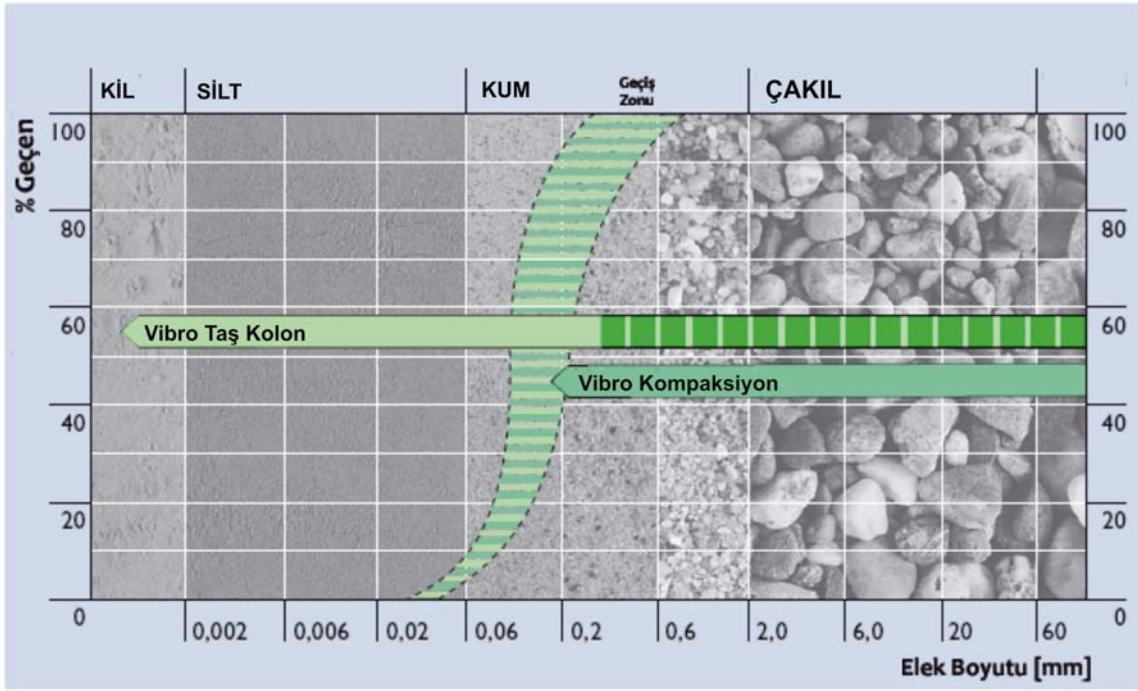
Bunun neticesinde ise tasarım kriterlerinin oturma ve sıvılaşmaya bağlı olduğu söylenebilmektedir.

Şekil 2.8'de de vibrasyon kullanılarak yapılan uygulamalardaki zemin sınırları gösterilmiştir. Dane boyutu azaldıkça taş kolon uygulamasına geçilmesi daha uygun olmaktadır.

Çizelge 2.2 Deney sahasları zemin özellikleri

1. Deney Sahası		
Zemin Cinsi	H (m)	E (Mpa)
Kum	2	10
Silt / kil	6	7
Kum ve Mercan	15	60
	>15	100
2. Deney Sahası		
Zemin Cinsi	H (m)	E (Mpa)
Siltli kil	3	17.2
Siltli kum □ kumlu silt	1.5	5.2
Kum	8	25.8
Çakıllı kum	>12.5	75.8

3. Deney Sahası		
Zemin Cinsi	H (m)	E (Mpa)
Dolgu	4.1	15.0
Alüvyon	2.5	34.4
	5.5	77.5
Kum ve çakıl	5.0	86.1
4. Deney Sahası		
Zemin Cinsi	H (m)	E (Mpa)
Kahverengi karbonatlı kum	1.5	17.2
	□.0	34.4
Siltli kum / kumlu silt	1.5	5.2
	2.0	1.7
	1.0	34.4



Şekil 2.8 Derin vibro tekniklerin zemin sınırları [10]

2.6.2 Taşıma Kapasitesinin Arttırılması

Taşıma kapasitesi, zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ) ve/veya kohezyonu (c) ile elde edilir. Vibro sistemler, izin verilebilir taşıma kapasitesini efektif içsel sürtünme açısını yükselterek arttırmaları. Vibro kompaksiyon, kohezyonsuz granüler zeminleri sıkıştırırken içsel sürtünme açısının da artmasına sebep olur. Artan içsel sürtünme açısı ile de izin verilebilir taşıma kapasitesi geleneksel yöntemler ile hesaplanabilir. Vibro yer değiştirme uygulanmak istenen arazide ise taş kolonlar imal edilir. İzin verilebilir taşıma kapasitesi çok çeşitli yöntemlerle hesaplanabilir. Ayrıca zeminde granüler malzeme varsa tasarım için o granüler malzemenin iyileştirilmiş parametreleri de hesaplanmalıdır.

2.6.3 İyileştirilmiş Zeminde Oturma

Oturma, zeminin konsolidasyon derecesine ve sıkışma katsayısına bağlı gerçekleşmektedir. Vibro sistemlerin bir özelliği de yapılacak temel altında meydana gelebilecek oturmaları azaltmaktır. Bunun için de yüksek modüllü vibro taş kolonlar yapılır veya sahadaki zeminin sıkışma katsayısında artış sağlanır.

Vibro kompaksiyon, granüler ve kohezyonsuz zeminleri sıkıştırdığı için zeminin

sıkışma katsayısı değerinde bir artış meydana gelir. Bu durumda oturma hesabı iyileştirilmiş katsayı değeri kullanılarak tekrarlanır.

Vibro yer değiştirme ile iyileştirilmesi gereken alanda yüksek modüllü sıkı vibro taş kolonlar inşa edilir. 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. Bu konu daha detaylı olarak ilerleyen bölümlerde anlatılmıştır. 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 artırılması neticesinde zeminin iyileşmesini sağlayan vibro kompaksiyon yönteminin aksine vibro yer değiştirmede zeminde iyi sıkıştırılmış ve iyi derecelendirilmiş granüler malzemedan meydana gelen kolonlar oluşturulur. Buradaki asıl sorun zemin ile zeminde oluşturulan taş kolon malzemelerinin bir araya geldiği zaman oluşacak yeni parametrelerin ve zeminde ne derecede bir iyileşme sağlandığının saptanmasıdır. Priebe'ye göre [12]'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. Dolgu malzemesinin nitelikleri ve yerleşim planı geometrisi bilindiği takdirde bu durum mümkün olabilir.

İyileştirilmiş zemin parametrelerinin belirlenebilmesi için Priebe tarafından [12] de önerilen yöntem aşağıda açıklanmıştır. Bu yöntemde zeminin başlangıçtaki durumu ile taş kolonun iyileştirme etkisi 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 [12] de önerilen taş kolonların tasarım yöntemine göre, kolonun rijit bir tabaka üzerine yerleştirildiği ve kolon – zemin sisteminin sadece yatay deformasyonlar sonucunda oturduğu kabul edilmiştir. Başından beri kolon malzemesinin kesildiği, çevresindeki zeminin de elastik davrandığı varsayıldığı ve taş kolonların imalatı aşamasında çevredeki zeminin aşırı bir şekilde yer değiştirmeye

zorlanmasından ötürü, yanal toprak basıncı katsayısının $K=1$ olduğu düşünülmüştür. 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

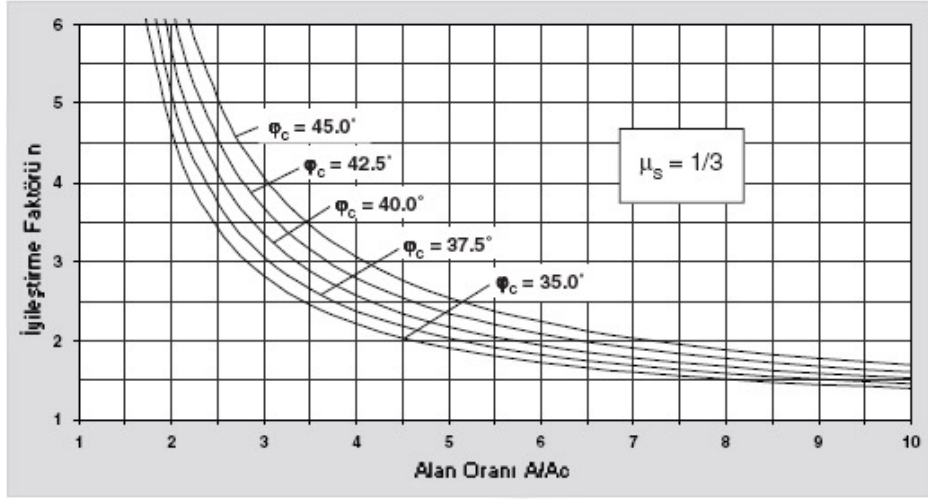
A_c : Taş kolon alanı

A : Toplam alan

olarak tanımlanır. Bir çok durumda son oturma miktarı için Poisson oranının $1/3$ alınması 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 2.9).



Şekil 2.9 $\mu_s = 1/3$ için iyileştirme faktörü, n_0 [12]

2.6.4.2 Kolon Sıkışabilirlik Etkisinin Değerlendirilmesi

Pratikte, sıkıştırılmış dolgu malzemesi hala sıkışabilme olanağına sahiptir. Bundan dolayı, kolon üzerine gelecek olan bir yük neticesinde kolon dışarıya doğru genişleyip, oturmalar meydana gelebilir. Teorik olarak A/A_c oranı 1 olduğu 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 bir düzenleme yaparak, düzeltilmiş iyileştirme faktörü hesaplanabilir.

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

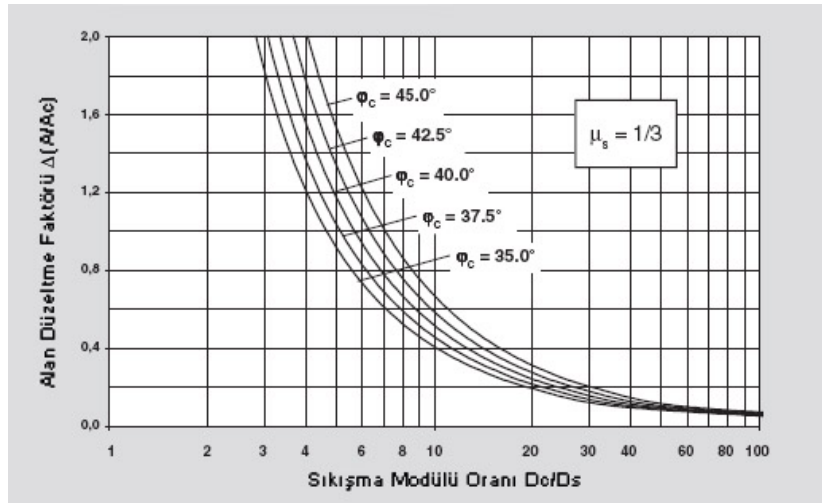
Düzeltilmiş alan oranı;

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

bulunur. Buradan da son olarak 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 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 $\mu_s = 1/3$ için kolon sıkışabilirlik düzeltmesi eğrileri [12]

2.6.4.3 Jeolojik Yük Etkisinin Dikkate Alınması

Zemin ve taş kolon arasındaki baştaki basınç farklılıkları, zemin ve taş kolon birim hacim ağırlıklarını ihmal ederek kolonun dışa doğru genişlemesine sebep olur. Bu durum da yalnızca temelden gelen P yükünün zemin ve taş kolonlar arasında dağıtımına bağlı ve derinlikle sabit olduğunu düşünmek anlamına gelmektedir. Nitekim, zeminin ve taş kolonun ağırlıkları dıştaki yüke eklenmesi gerekmektedir. Bu ağırlıklar göz önüne alındığında başlangıç basınç farklılığı derinlikle birlikte asimptotik olarak düşecek ve de yanal genişlemelerin azalmasına neden olacaktır. Başka bir anlatımla 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 lineer 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 $n_2 = f_d \cdot n_1$ 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 $(P_c + \gamma_c d)K_{ac}$ ve $(P_c + \gamma_{sd})(K_s = 1)$ yanal basınç çizgilerinden bulunabileceği kabul edilmektedir. Ayrıca, 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.

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

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

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

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

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

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

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

Burada 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

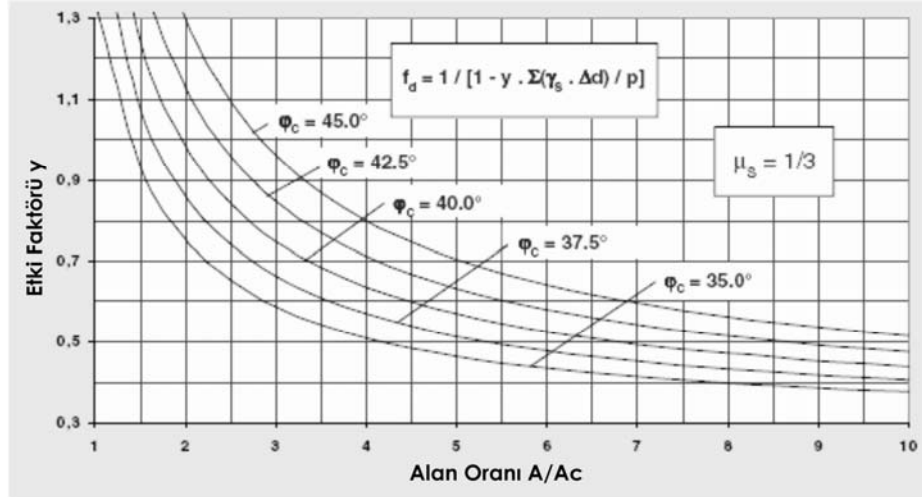
K_{oc} : Taş kolon malzemesinin sükkûnetteki toprak basıncı katsayısı

şeklinde tanımlanabilir.

Şekil 2.11’de gösterilen sadeleştirilmiş diyagramda zemin ile taş kolon malzemesi için aynı birim hacim ağırlık değerleri kullanılmıştır. Güvenlik sebebiyle 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 2.11’de $\mu_s = 0.33$ için etki faktörünün (y) alan oranı ve taş kolon malzemesinin içsel sürtünme açısı ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.11 $\mu_s = 1/3$ için derinlik faktörü [12]

2.6.4.4 Uyumluluk Kontrolleri

Tasarımdaki adımlar birbirleriyle matematiksel olarak bağlantılı bulunmayıp, çeşitli kabuller ve sadeleştirmeler içermektedirler. Bundan dolayı sınır koşullarında bulunan kolonların sıkışabilirliklerine bağlı olarak fazla yük taşımamaları için uygunluk kontrolü yapılmalıdır.

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

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

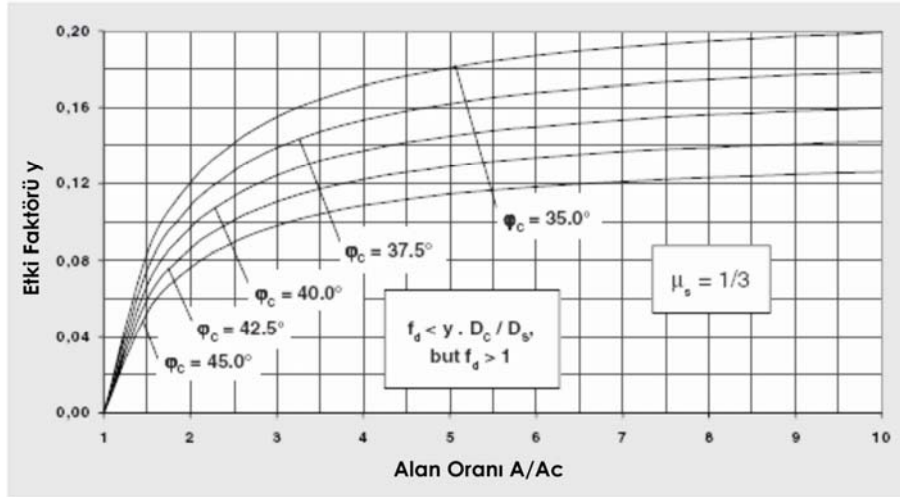
şeklinde olmalıdır. Burada kullanılan ifadeler de şu şekilde tanımlanabilir:

D_c : Taş Kolon Malzemesi Tek Boyutlu Sıkışma Modülü

D_s : Zeminin Tek Boyutlu Sıkışma Modülü

Şekil 2.12'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 $f_d < 1$ şeklinde bulunursa, bu sonuç dikkate alınmamalıdır. Bu şartlarda iyileştirme faktörünün maksimum değeri ile alakalı ikinci bir uygunluk kontrolü gerekmektedir. Bu kontrol, ilki ile benzer şekilde yapılır. 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 2.12 Derinlik faktörü limit değerleri [12]

2.6.4.5 Tekil ve Şerit Temellerde Oturma Hesapları

Taş kolonların tekil veya şerit temel altındaki davranışları net bir şekilde açıklanabilmiş değildir. Tasarım, limitsiz yükleme alanı 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;

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

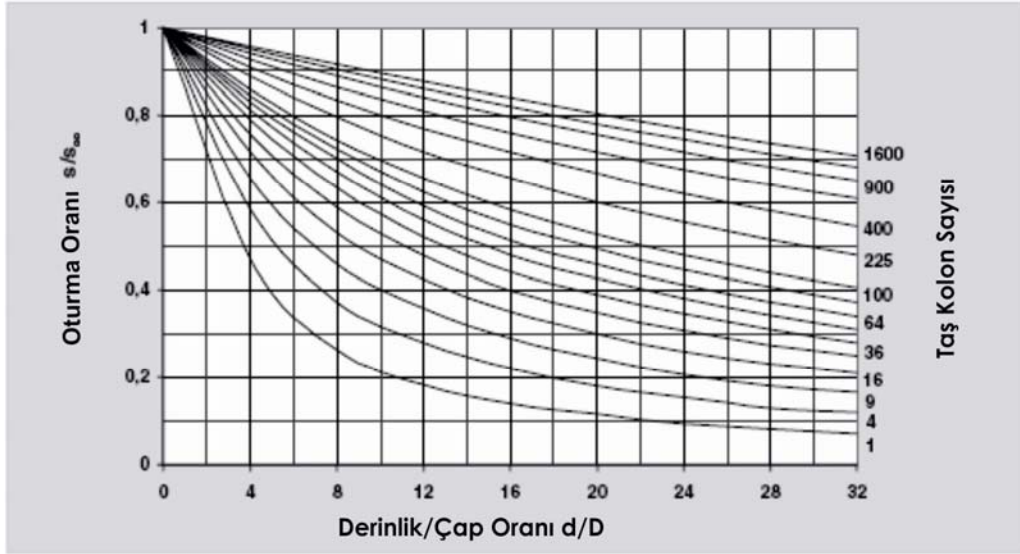
eşitliği ile hesaplanabilir. Burada kullanılan ifadeler şu şekilde tanımlanabilir:

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

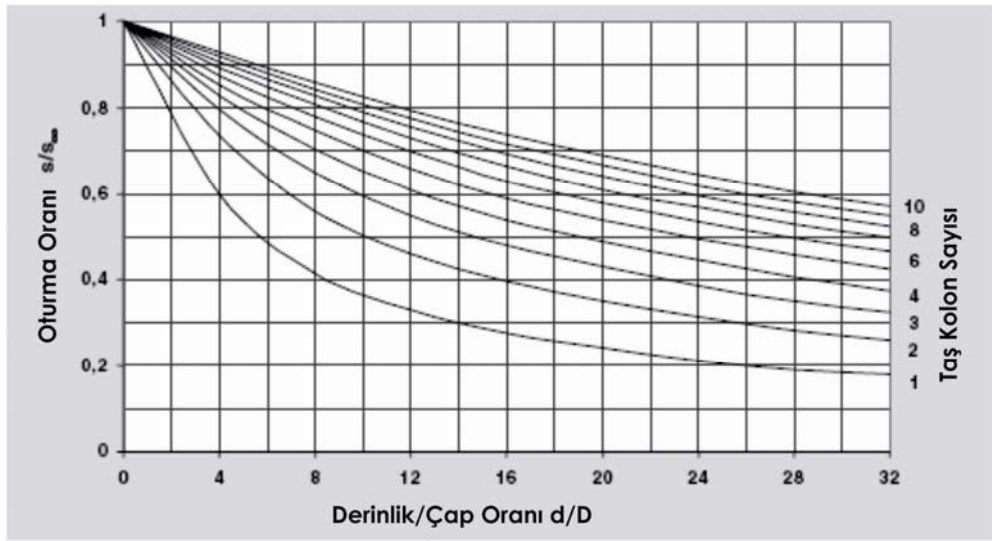
p : İyileştirilmiş Zemine Uygulanan Temel Tabanı Basıncı

d : Derinlik

Aşağıda Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'te 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 de dikkate alındığı hesaplamalara dayanmaktadır.



Şekil 2.13 Tekil temellerin oturması [12]

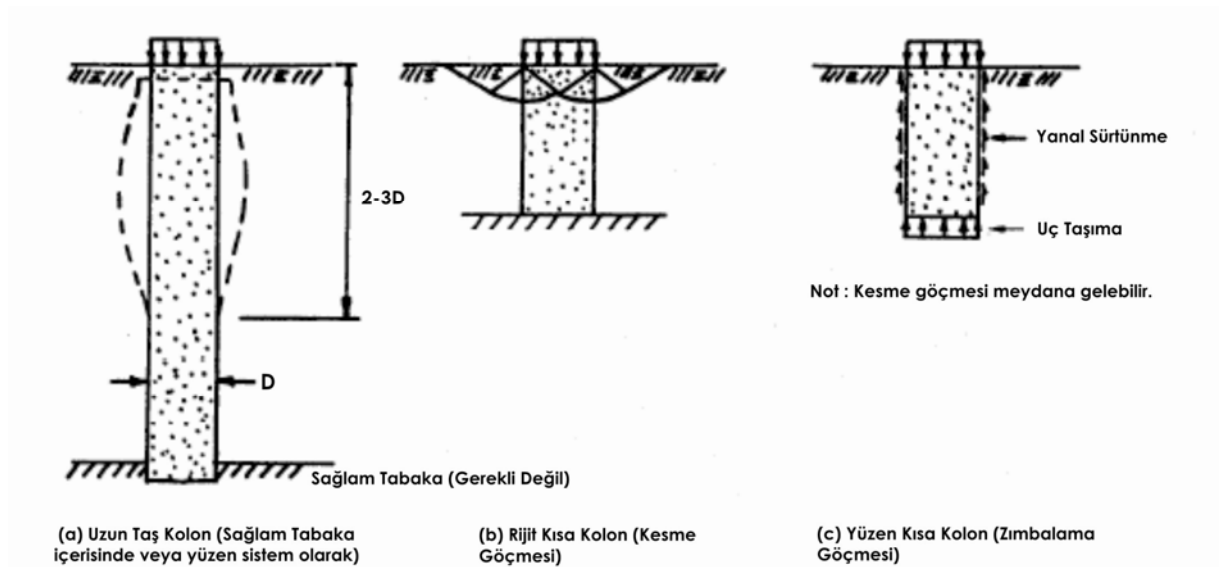


Şekil 2.14 Şerit temellerin oturması [12]

2.6.5 Taş Kolonlarla İyileştirilmiş Zeminde Taşıma Gücü Hesabı

Taş kolonların imalatı yumuşak tabaka içerisinde ya sağlam tabakaya kadar uzatılır ya da sağlam tabakaya ulaşmadan kolonun ucu yumuşak tabaka içerisinde kalacak şekilde imal edilebilirler.

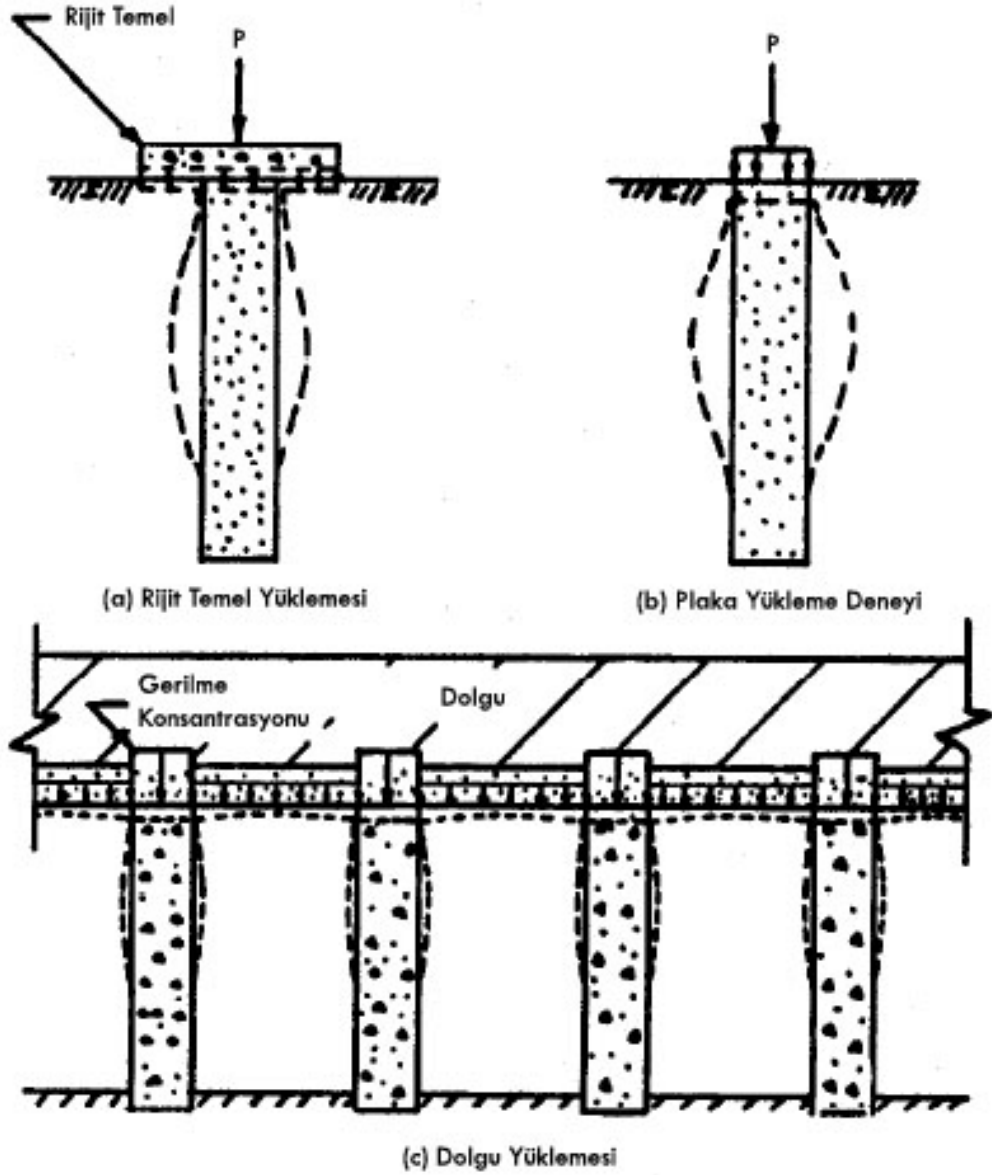
Tekil taş kolonların göçme türlerini 3 farklı şekilde sınıflandırabiliriz (Şekil 2.15). Bunlardan ilki Şekil 2.15a'da da gözüktüğü üzere, taş kolonun uzun olduğu durumda kolon malzemesinin dışa doğru kabarması ve sonrasında kolon çapının genişlemesi şeklinde olabilir. Bir diğeri, Şekil 2.15b'de verildiği 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 2.15c'de taş kolonun kısa ve yumuşak tabaka içerisinde yüzdüğü durumda, kolon ucunda göçmeler meydana gelebilir.



Şekil 2.15 Tekil taş kolon göçme mekanizmaları [13]

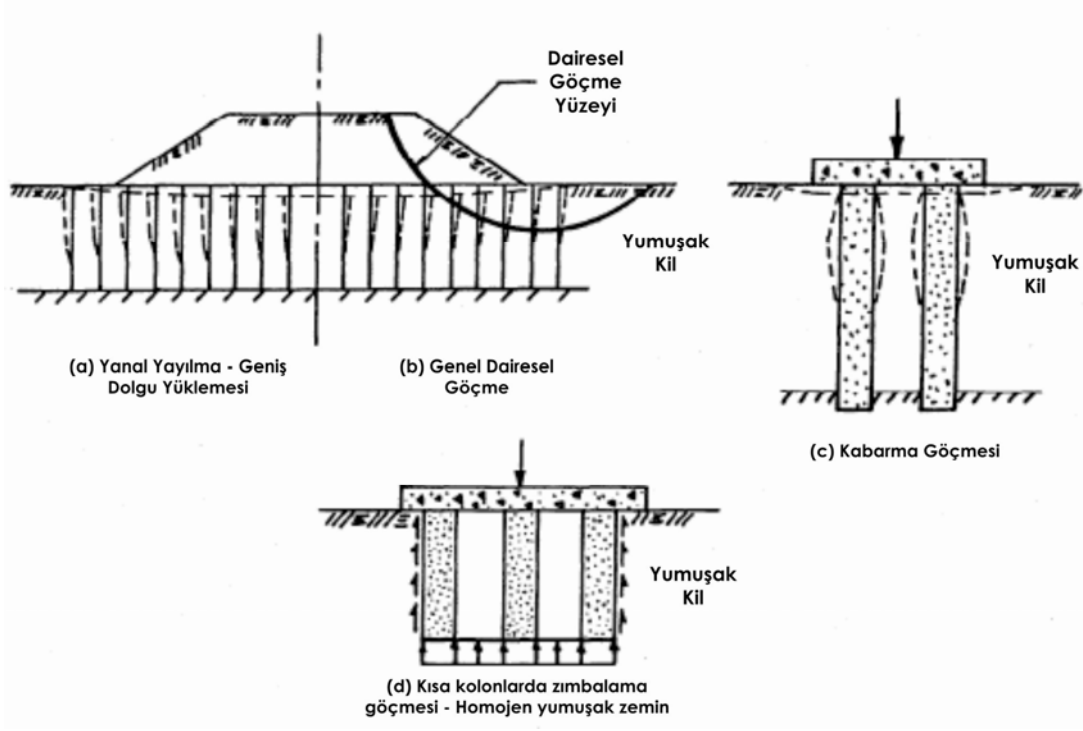
Taş kolon grubu ile tek bir taş kolon kıyaslandığında, nihai yükleme kapasitesi grup içindeki bir kolona oranla bir miktar daha düşüktür. Çevredeki kolonların bulunması ile içte yer alan kolonun hareketi kısıtlandırılır ve çevredeki zemin sıkılaştırılır. Bu sebepten dolayı her bir kolonun nihai taşıma gücünde ufak bir miktar artış gözlenir.

Model deneyler, tekil bir kolonun davranışının, yükün uygulama yönteminden daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Farklı yükleme türleri için taş kolonun göstereceği yanıl genişlemeler Şekil 2.16'da gösterilmektedir.



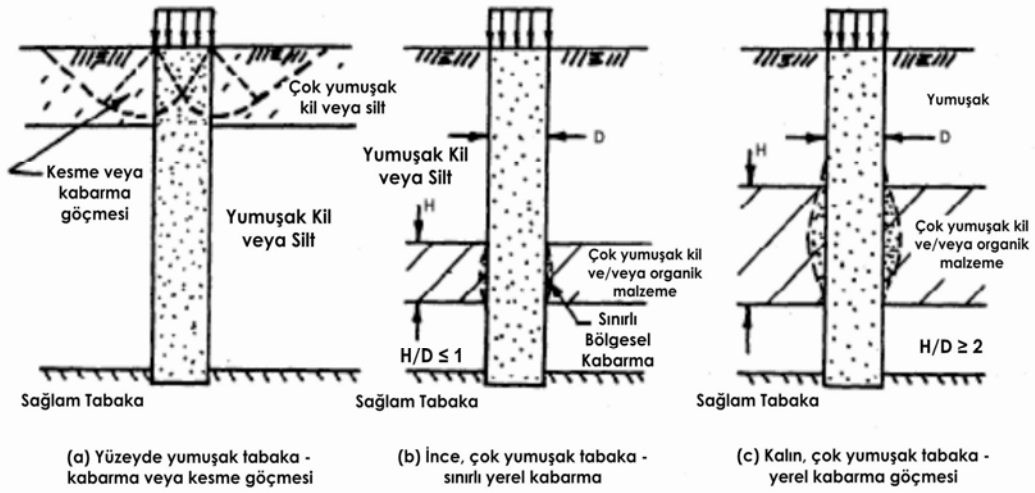
Şekil 2.16 Taş kolona etkiyen farklı yükler [13]

Şekil 2.16c'deki dolgu yüklemede ve Şekil 2.17a'daki gibi geniş bir alanda yükleme yapılırsa, alanın taş kolonlar ile iyileştirilmesi neticesinde sıkışabilir zemin ve taş kolonda oluşacak oturma, dolgu altında yaklaşık olarak birbirine eşit miktarda olmaktadır. Zayıf zeminlerde temel altındaki zemin Şekil 2.17a ve Şekil 2.17b'deki gibi yanal olacak şekilde ötelenir. Bu duruma "yanal yayılma" adı verilir. Yanal yayılma zemin ile taş kolon arasındaki yanal desteği de azaltmaktadır. Ayrıca da dışa doğru bir genişleme olacağından dolayı bir miktar da kolonun göçme olasılığını arttırmaktadır.



Şekil 2.17 Taş kolon gruplarının göçme mekanizmaları [13]

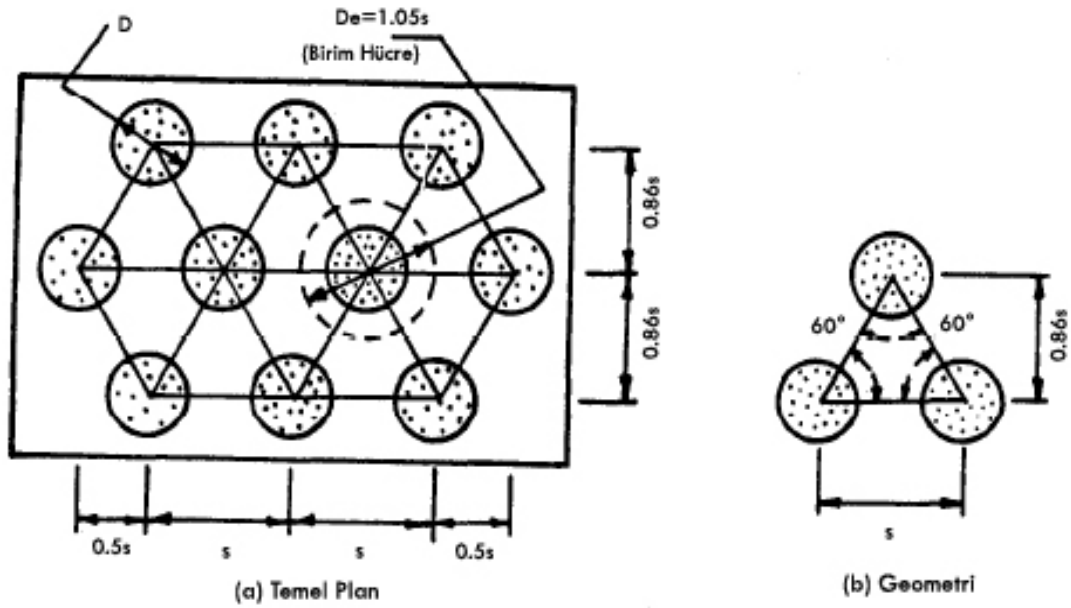
Arazi deneyimlerinden yola çıkılarak zemin tabakaları içerisinde sınırlandırılmış, çok yumuşak zeminlerin bulunması, yapılacak olan taş kolon ve taş kolon gruplarının Şekil 2.18'deki gibi dışa doğru kabarak göçmesine neden olabilmektedir. Yine arazi gözlemleri neticesinde, bu tabakanın kalınlığı eğer taş kolon çapından çok büyük olursa, taş kolonda stabilite sorunlarının olabileceği ortaya konmuştur.



Şekil 2.18 Homojen olmayan kohezyonlu zeminlerde taş kolon göçme mekanizmaları [13]

2.6.5.1 Taş Kolon Yerleşimi

Taş kolonlar genel olarak eşkenar üçgen, bazen de kare dizilim şeklinde inşa edilirler. Yalnız eşkenar üçgen dizilim, aralarındaki açının daha küçük olması sebebiyle, daha sıkı bir taş kolon tasarımı ortaya koymaktadır. Şekil 2.19’da bu dizilim şekli gösterilmiştir.



Şekil 2.19 Taş kolonlarda eşkenar üçgen dizilimi [13]

2.6.5.2 Birim Hücre Kavramı

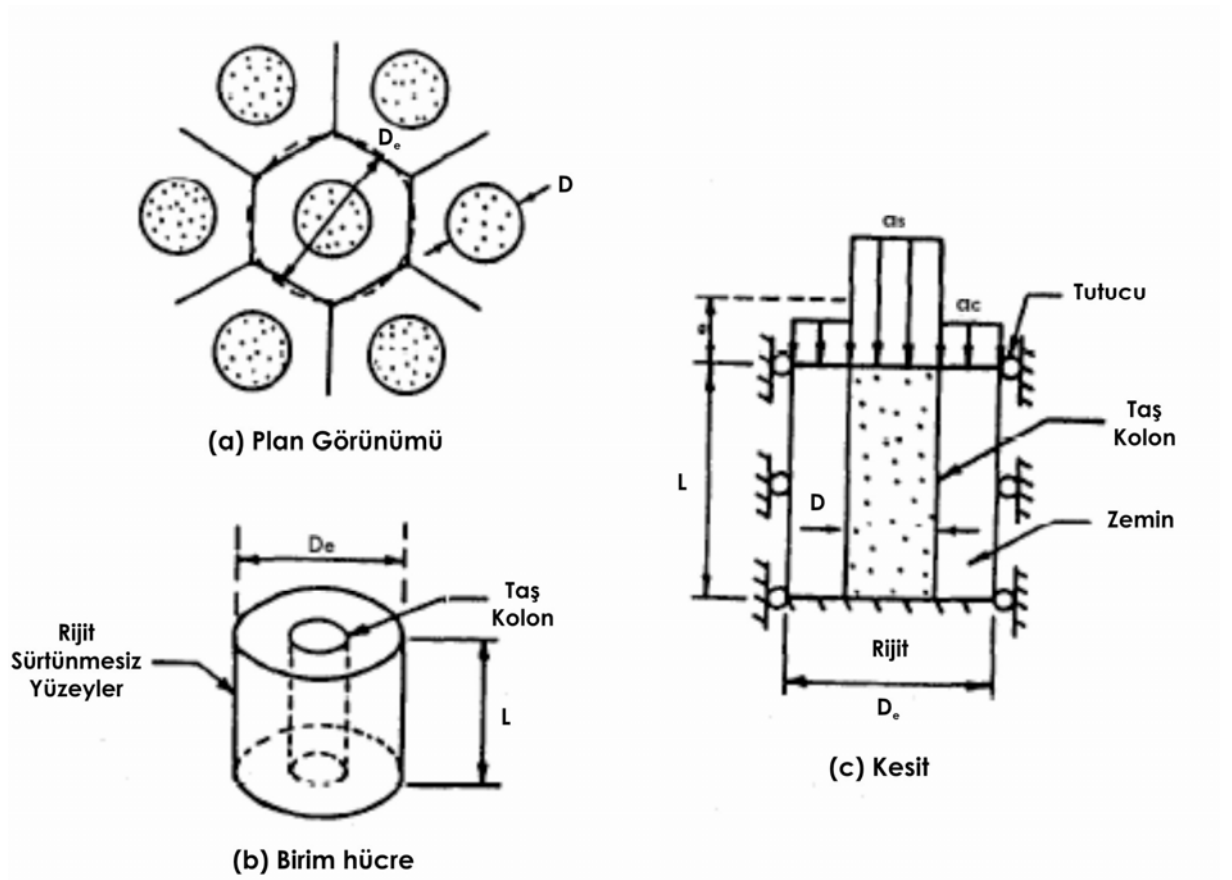
Stabilite ve oturma analizlerini hesaplayabilmek için her bir kolonu çevreleyen zemin, kolon ile bir bütün gibi düşünülmelidir. Bu kolonu çevreleyen zeminin alanı Şekil 2.20a gibi bir altıgen veya ona yakın bir daire olarak kabul edilebilir. Bu dairenin çapı eş değer çap olarak adlandırılır. Eşkenar üçgen dizimli kolonlar için eşdeğer çap,

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

olarak hesaplanırken kare dizilim için,

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

eşitliği ile hesaplanmaktadır [13]. Bu formüllerde verilen s , kolon merkezleri arasındaki mesafedir. Sonuç olarak D_e çapına sahip olup, hesap yapılan alanı içerisinde alan silindirik birim içerisindeki taş kolon ve zeminden oluşan yapı, birim hücre adını almaktadır.



Şekil 2.20 Birim hücre tanımlanması [13]

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 : Sıkıştırılmadan 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. Alan değişim oranı,

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

bağıntısıyla 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 $\frac{\pi}{4}$; eşkenar üçgen dizilim için

$\frac{\pi}{2\sqrt{3}}$ olarak alınır. Eşkenar üçgen dizilimine göre a_s ;

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

şeklinde hesaplanır.

2.6.6 En Büyük Taşıma Gücü Hesabı

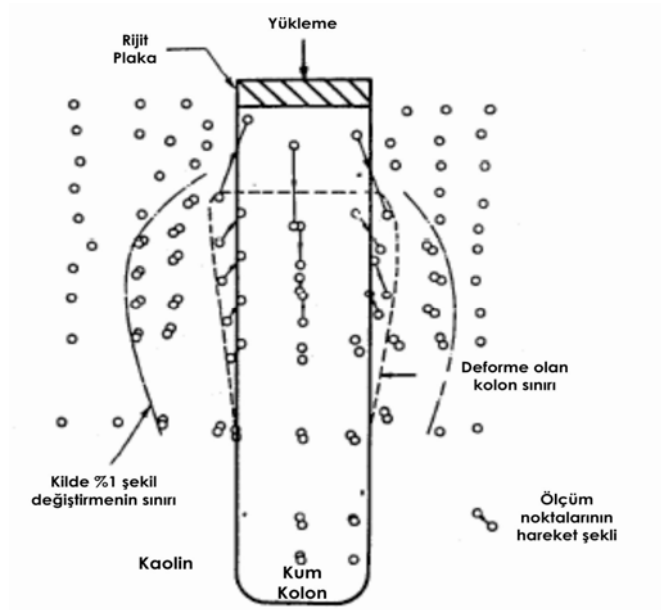
Taş kolon uzunluğunun, çapa oranı 4-6 ya da daha büyükse genellikle taş kolonda dışa doğru bir genişleme şeklinde göçme meydana gelmektedir. Taş kolonun yumuşak tabaka içerisinde yüzmesi ya da sağlam tabakaya kadar uzatılmış olması fark etmez (Şekil 2.21).

Hughes ve Withers tarafından [14] te 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 taşma ve aşağıya doğru bir hareket gözlenmiştir. Ayrıca da taş kolon içerisindeki granüler malzemenin, çevresindeki zemine baskı yaptığı gözlenmiştir.

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

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \quad (2.27)$$

ϕ_c : Taş kolon içsel sürtünme açısı



Şekil 2.21 Tek bir kolonun kabarma göçmesi [13]

2.6.6.1 Boşluk Genişleme Teorisi

Çevre zeminde oluşacak nihai pasif direnç, simetri eksenini etrafında genişleyebilen sonsuz uzun bir silindire karşı oluşan pasif direnç olarak tasarlanabilir. Hughes ve Withers [14] te, bu yaklaşımdan hareketle taş kolonu çevreleyen zeminde oluşan basıncı incelemişlerdir. Bunun neticesinde, taş kolon iki veya üç çap kadar dışarıya taşmasına rağmen mühendislik açısından sonsuz, uzun ve genişleyebilir silindir teorisi mantıklı sonuçlar vermektedir.

Hughes ve Withers [14] te, 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:

$$\sigma_3 = \sigma_{ro} + c \left[1 + \ln \frac{E_s}{2c(1+\nu)} \right] \quad (2.28)$$

Burada kullanılan terimler;

σ_3 : Nihai Drenajsız Yanal Gerilme

σ_{ro} : Kolon İmalatından Sonrası Toplam Radyal Gerilme

E_s : Zeminin Elastik Modülü

c : Drenajsız Kayma Mukavemeti

ν : Poisson Oranı

şeklinde tanımlanabilir. Yukarıdaki eşitliğin yardımıyla da $q_{ult} = \sigma_1$ kabul edilerek;

$$q_{ult} = \left\{ \sigma_{ro} + c \left[1 + \ln \frac{E}{2c(1+\nu)} \right] \right\} \left(\frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \right) \quad (2.29)$$

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

Vesic Boşluk Genişleme Teorisi

Genel silindirik boşluk genişleme teorisi Vesic tarafından [15] te verildiği gibi sürtünmeli ve kohezyonlu zeminleri de içerecek şekilde genişletilmiştir. Bu sefer 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 :

$$\sigma_3 = c_u F'_c + q F'_q \quad (2.30)$$

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 2.22'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;

$$I_r = \frac{E}{2(1+\nu)(c + qtg\phi_s)} \quad (2.31)$$

Burada kullanılan terimler;

E : Zeminin Elastisite Modülü

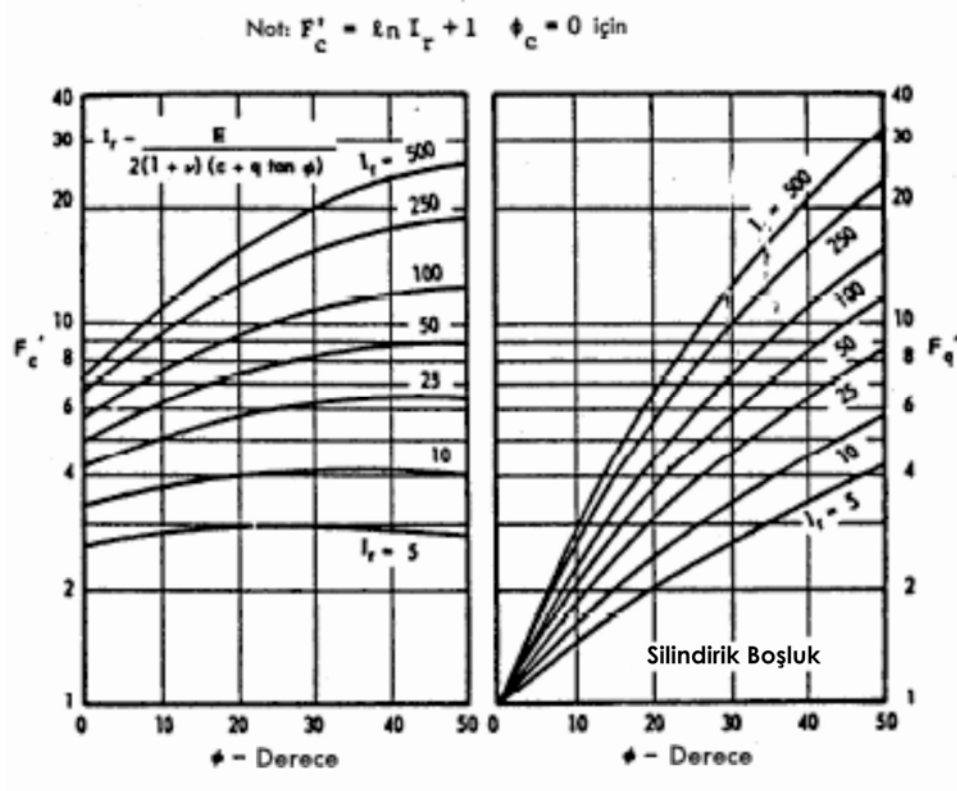
ϕ_s : Zeminin İçsel Sürtünme Açısı

c : Zemin Kohezyonu

ν : Poisson Oranı

q : Göçme Bölgesindeki Ortalama Normal Gerilme

şeklinde açıklanabilir.



Şekil 2.22 Vesic silindirik boşluk genişleme faktörleri [13]

Nihai gerilme de $q_{ult} = \sigma_1$ kabul edilirse;

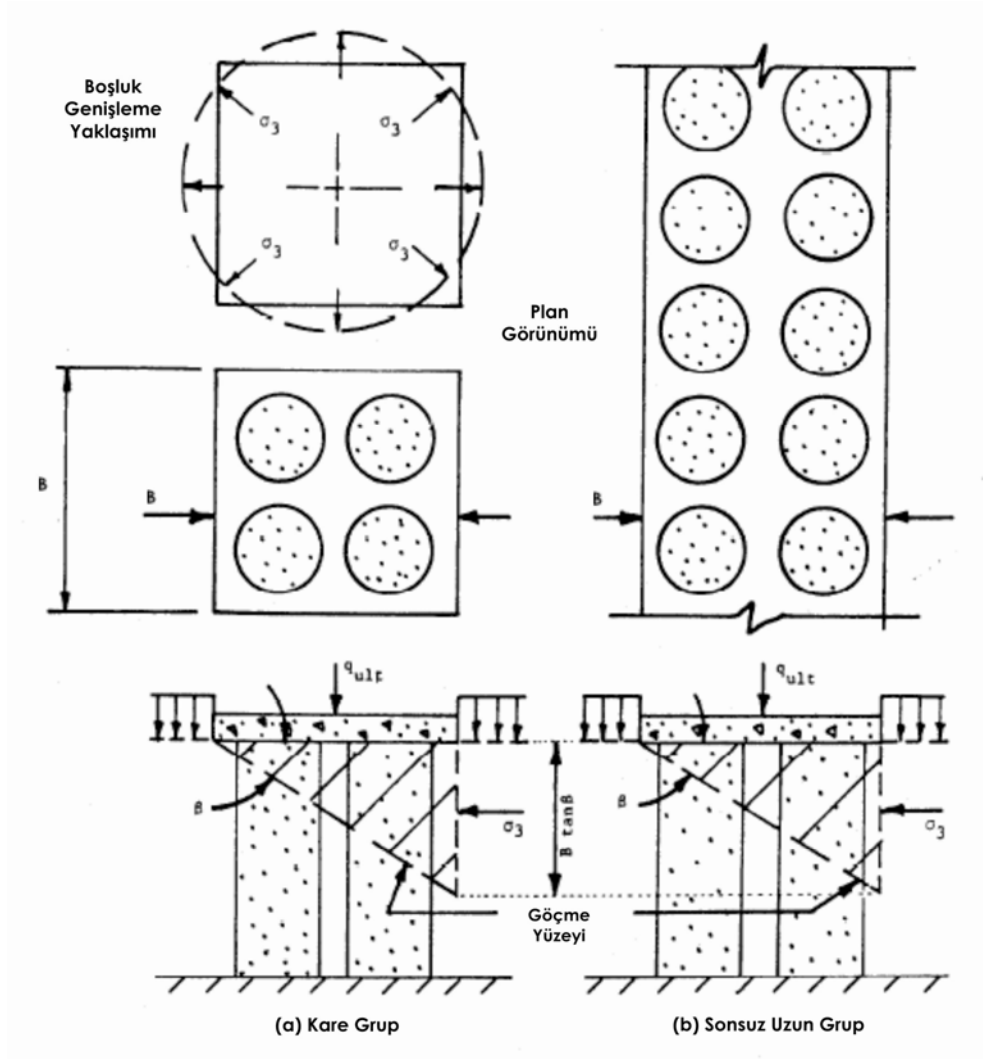
$$q_{ult} = [cF'_c + qF'_q] \left[\frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \right] \quad (2.32)$$

formülü ile hesaplanabilir.

Vesic'in [15] te ortaya koyduğu bu yöntem, sürtünmesiz zeminlerde nihai yükleme altında Gibson ve Anderson tarafından [16] 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.

2.6.6.2 Taş Kolon Gruplarının Nihai Taşıma Gücü

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 2.23).



Şekil 2.23 Taş kolon grup analizleri [13]

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

Şekil 2.23'de 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;

$$[tg\phi]_{avg} = \mu_c a_c tg\phi_c \quad (2.33)$$

$$c_{avg} = (1 - a_c)c \quad (2.34)$$

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;

$$\beta = 45 + \frac{\phi_{avg}}{2} \quad (2.35)$$

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

$$\sigma_3 = \frac{\gamma_s B tg\beta}{2} + 2c \quad (2.36)$$

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;

$$q_{ult} = \sigma_3 \tan^2 \beta + 2c_{avg} \tan \beta \quad (2.37)$$

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.

DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLAR

3.1 Genel

Darbeli kırmataş kolonlar (DKK), özellikle Kuzey Amerika'da zemin oturmalarının istenilen düzeyde olması ve yumuşak zeminlerde temel taşıma gücünün arttırılması amacıyla yirmi seneyi aşkın süredir kullanılmaktadır [17]. Önceden açılmış olan kuyulara ince ve sağlam agrega malzemelerinin, özel tasarlanmış konik uçlu bir çekiç yardımı ile tokmaklanarak, sıkıştırılması sonucu kırmataş kolonlar inşa edilir [18]. İnşa sırasında en alta konan agrega malzemesi yukarıdan darbe ile sıkıştırılınca alt tarafta yayılarak diğer tabakalar için sağlam bir temel oluşturmuş olur. Kuyu içerisinde sıkışan agrega malzemesi, iyileştirilmiş bölgedeki yataklanma katsayısının artmasına neden olur [17], [19].

3.2 Yapım Aşamaları

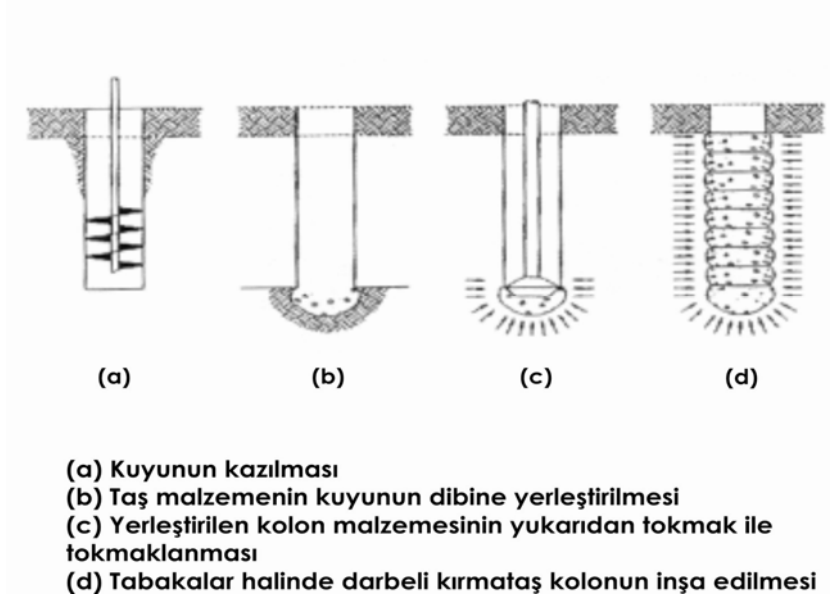
Darbeli kırmataş kolonlar için yapım aşamaları şu şekilde sıralanabilir [18] (Şekil 3.1):

- 1) Zeminin durumuna göre uygun bir kazı makinası ile kuyu açılır (Şekil 3.1a ve Şekil 3.2). Zeminin kendini tutamadığı durumlarda Şekil 3.2'de gösterildiği gibi bir kılıf yardımı ile zeminde delik açılabilir.
- 2) Agrega malzeme kuyunun dibine yerleştirilerek, ince tabakalar halinde sıkıştırılır (Şekil 3.1b). Uygulamada genel olarak 100 cm'lik agrega malzemesi kuyuya boşaltıldıktan sonra 33 cm'ye kadar yüksek frekanslı (0-3000 rpm), özel tasarım 45 derecelik darbe tokmağı ile sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 3.1c). Bu işlem neticesinde kolon çapı artarak, yanal ve düşey yöndeki

gerilmelerde de artış gözlenir.

- 3) Bu şekilde tabaka tabaka sıkıştırılan agrega malzemesi ile yüzeye kadar kırmataş kolonlar imal edilmiş olur (Şekil 3.1d).

Arazide yapım aşamalarına ait fotoğraflar Şekil 3.2- Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.1 Darbeli kırmataş kolonunun inşaa edilmesi



Şekil 3.2 Darbeli kırmataş kolonunun açılması [20]



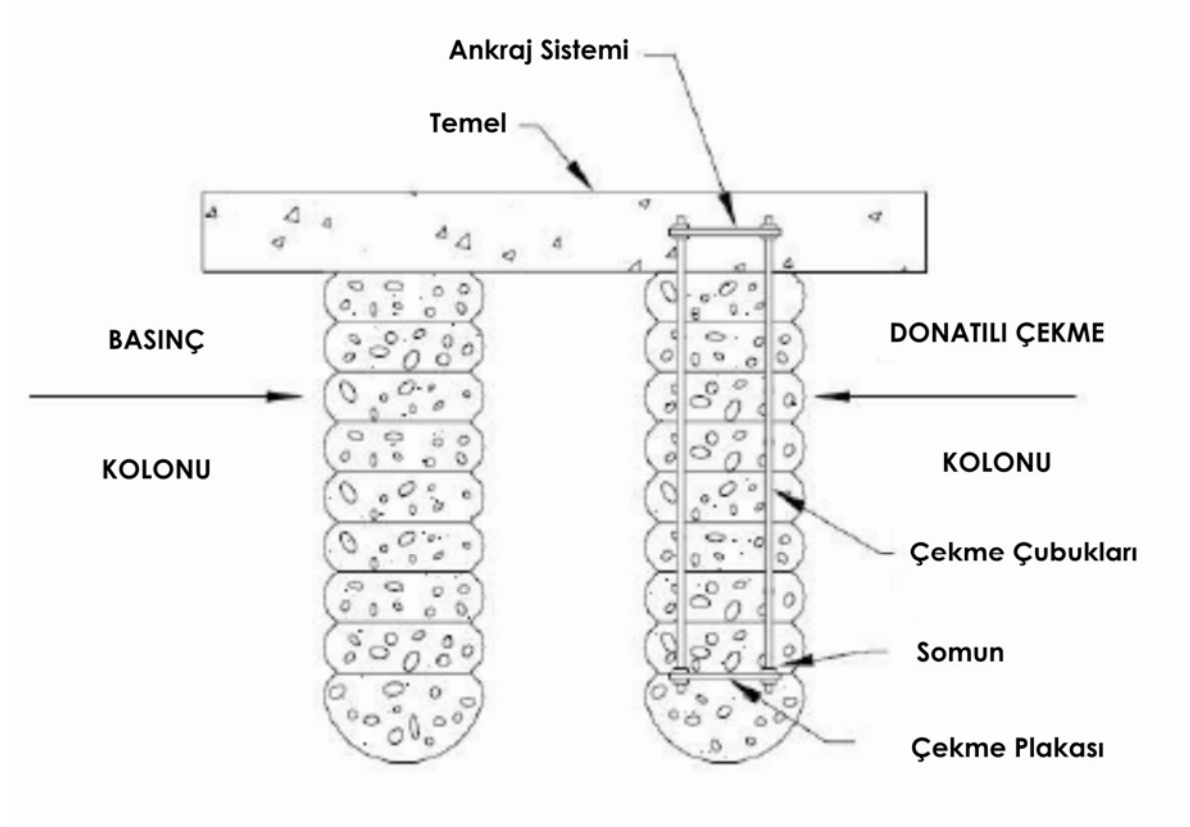
Şekil 3.3 Kırmataş kolon malzemesinin yerleştirilmesi [20]



Şekil 3.4 Kolonun sıkıştırılması [20]

3.3 Darbeli Kırmataş Kolon Çeşitleri

Darbeli kırmataş kolonlar, taşıyıcı (basınç) kolonlar ve donatılı çekme kolonlar olmak üzere iki çeşitte inşa edilir. Bu iki kolon tipinin de yapılışı aynı olmakla birlikte çekme kolonlar için ekstra birkaç işlem daha gerekmektedir. Çekme kolonlar imal edilirken, alt kısımda topuk bölgesinin oluşturulmasının ardından donatı düzeneği kuyuya indirilir. Bu düzenek, çekme çubuklarından, alta konan çelik plakadan meydana gelmektedir. Bunun dışında geriye kalan inşa adımları birebir aynıdır.



Şekil 3.5 Kırmataş kolon çeşitleri

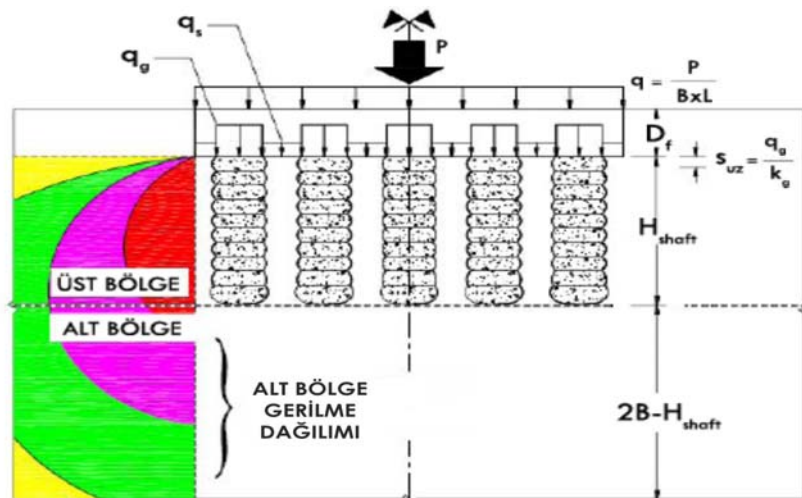
3.4 Kırmataş Kolonlar İle Diğer Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Darbeli kırmataş kolonlar ile taş kolonlar birbirleriyle benzer gibi görünebilir fakat önemli birkaç farklılıkları bulunmaktadır [17]:

- Kırmataş kolonların tasarlanma amacı öncelikli olarak alt tabakayı güçlendirmektir. Fakat bazı uygulamalarda önemli olan radyal drenajı arttırmaktır. Alt tabakayı güçlendirme ikinci planda yer almaktadır.
- Kırmataş kolonların boyları kısa olmakla birlikte genellikle genişliklerinin 2 veya 8 katı olacak şekilde ayarlanırlar.
- Kırmataş kolonlar titreşimle yer değiştirerek değil de kazılarak hazırlanırlar. Dolayısıyla çevreleyen zemin, yapısal özelliklerini kaybetmemiş olur.
- Kırmataş kolonlar vibrasyon ile değil de özel tasarlanmış yüksek frekansa sahip tokmak yardımıyla inşa edilir.
- Kırmataş kolonlar, ince tabakalar halinde inşa edilerek oluşturulurlar. Bu durum çevre zeminde ön gerilme, ön şekil değiştirme ve sıkışmayı sağlar.

3.5 Kırmataş Kolon Destekli Temelerde Oturma Hesabı

İyileştirilmemiş zeminlerin oturmasını tahmin etmek, kırmataş ile zemin iyileştirilmesi yapılmış taşıyıcı zeminlerin oturmalarını tahmin etmekten çok daha kolaydır. Şekil 3.6'da DKK (=Darbeli Kırmataş Kolon) sistem hesabı için bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.6 RAP (Rammed aggregate piers) ile desteklenmiş temelerde oturma hesabı

Görüldüğü üzere burada zemin üst 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 [21]'de kırmataş kolonlar ile destekli rijit temellerde meydana gelecek oturma,

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

şeklinde tanımlanır. Burada,

S_{UZ} : 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:

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

3.5.1 Üst Bölge Oturmaları

Üst bölge oturmaları, kolon ve kolon çevresinde bulunan sıkıştırılmış zeminin kompozit rijitliğine bağlıdır. Burada meydana gelen oturma kolon modülü, kolon malzemesindeki gerilme, zemin modülü ve zeminde meydana gelen gerilmenin bir sonucudur. Zeminde meydana gelen farklı oturmalar, üst bölge oturmaları hesabına dahil edilmez. Şekil 3.7'de kırmataş kolonlarda gerçekleşen gerilmeleri gösteren bir yay modeli gösterilmiştir. Bu şekilde, rijit yay, kolon malzemesini; yumuşak yay ise zemini temsil etmektedir. Rijit bir temel ve P yükü için bütün yaylar δ kadar çökme gösterecektir. Bu duruma göre;

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

olacaktır. Burada kullanılan k , yay sabitidir. Kolonlar yardımıyla iyileştirilen zeminde temelden doğan yük nedeniyle kolonun üst kısmında oluşacak olan gerilme q_p , zemine

etkiyen q_m gerilmesinden daha büyüktür. Yay sabiti olarak kolonun ve zeminin yataklanma katsayısı alınabilir.

Eğer temel tamamıyla rijitse zeminde oluşacak olan oturma, kolon içerisinde meydana gelecek oturmaya eşit olacaktır. Buna göre üst bölgedeki ani oturma miktarı;

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

şeklinde olacaktır. Burada kullanılan ifadelerden,

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 3.7’de 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;

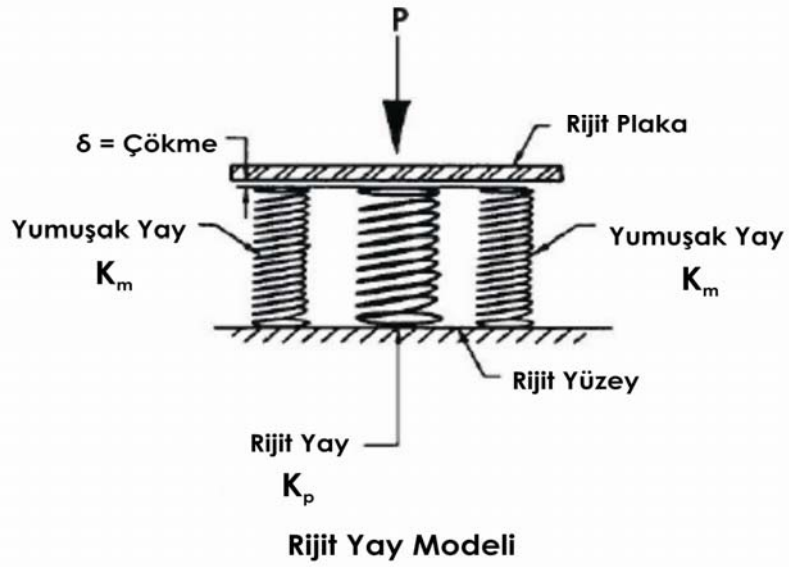
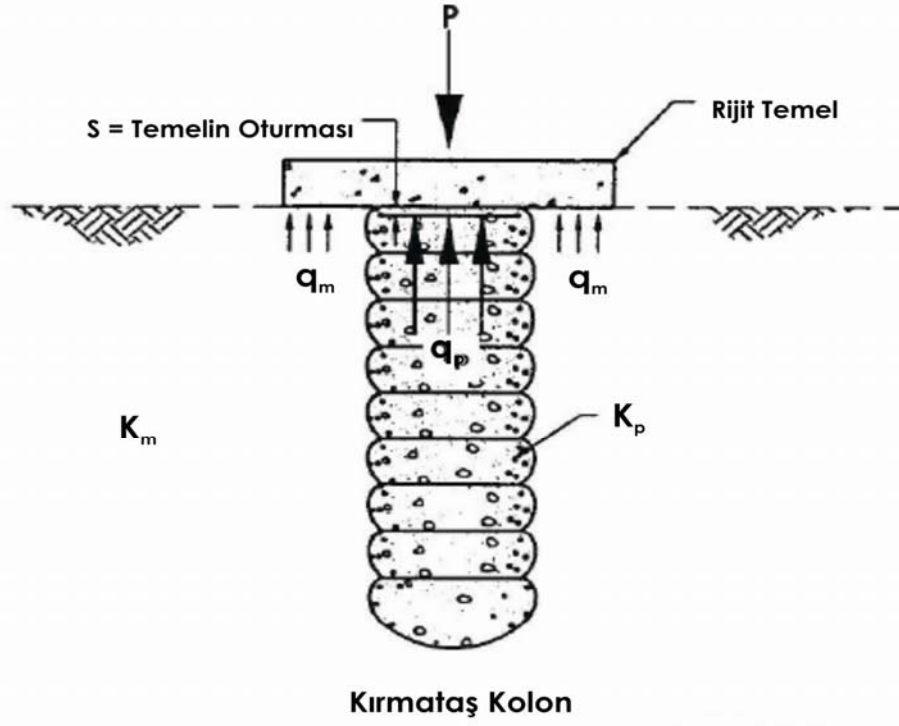
F_v : Düşey Kuvvet

q_0 : Ortalama Temel Tabanı Basıncı

A : Toplam Temel Alanı

q_p : Kolona Etkiyen Düşey Gerilme

A_g : Kırmataş Kolon Alanı



Şekil 3.7 Kırmataş kolonlarda yay modeli

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 açıklanabilir. 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;

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

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

3.5.2 Alt Bölge Oturmaları

Alt bölgede oluşacak ani oturma 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;

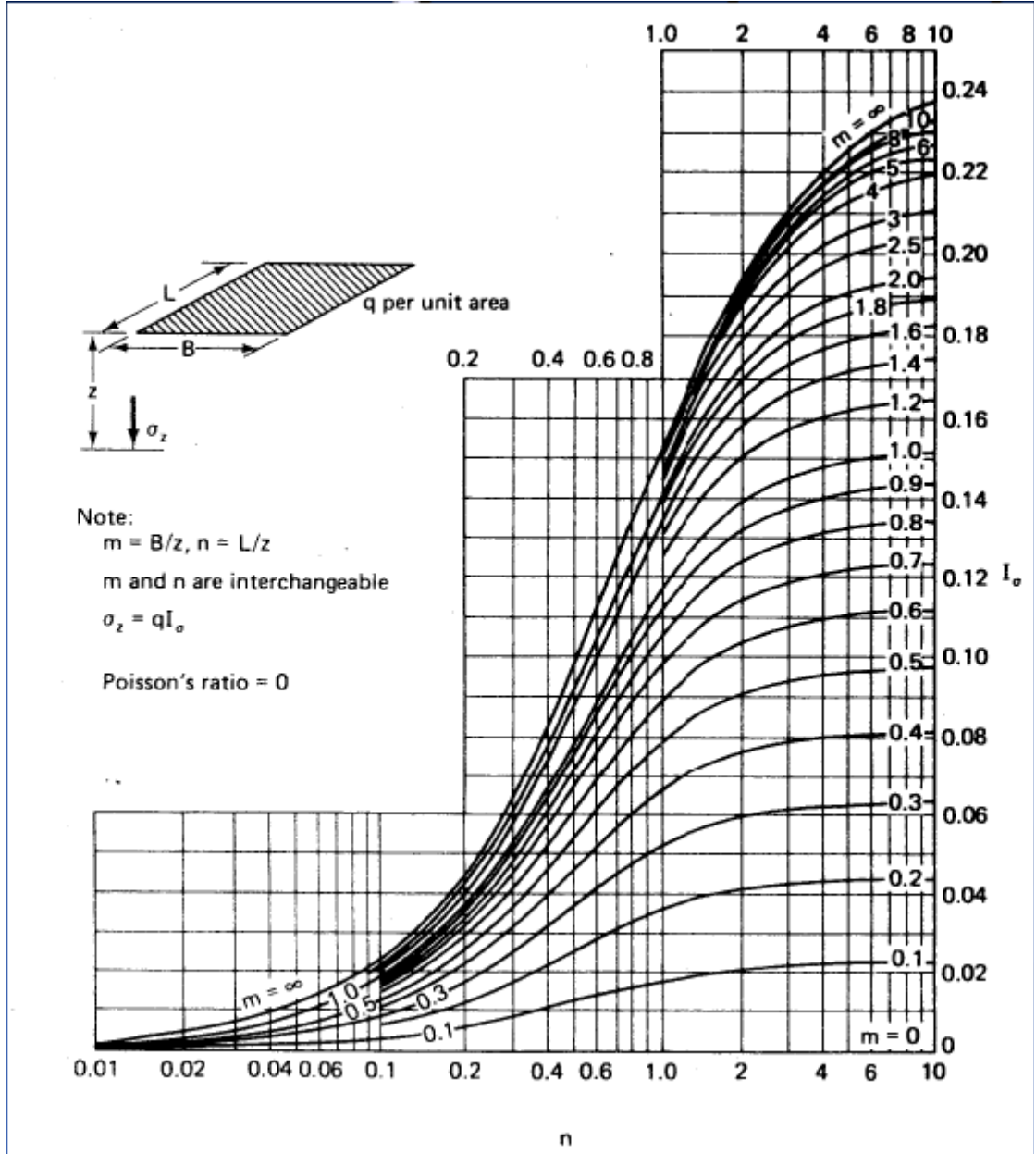
I_q : Westergaard Etki Faktörü (Şekil 3.8)

H_{LZ} : Alt Bölge Kalınlığı

E_{LZ} : Alt Bölge Elastisite Modülü

B : Temel Genişliği

olarak açıklanabilir.



Şekil 3.8 Westergaard etki faktörü

Ani oturma hesapları için literatürde olan herhangi bir eşitlikten yararlanılabilir. 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_0' : Başlangıç Düşey Efektif Gerilme

δP : Düşey Gerilmedeki Artış

e_0 : Başlangıç Boşluk Oranı

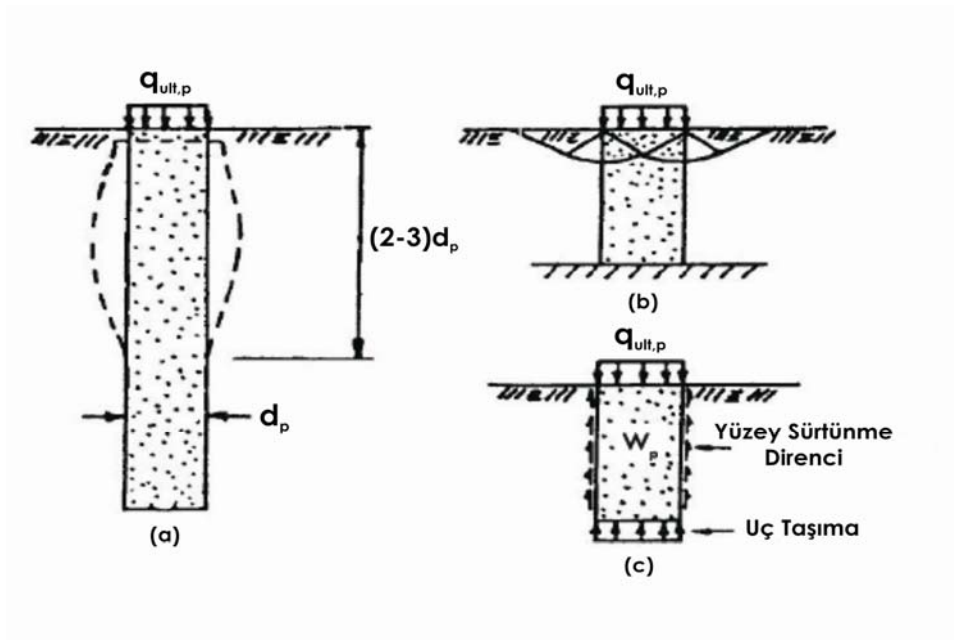
şeklinde ifade edilebilir.

3.6 Darbeli Kırmataş Kolonlar İle İyileştirilmiş Zeminlerde Temel Taşıma Gücünün Bulunması

Kırmataş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminlerde taşıma kapasitesi analizleri çok belirgin olmamakla birlikte grup kolon analizi yapmadan önce tek bir kolonun davranışının incelenmesi daha yerinde olacaktır.

3.6.1 Tekil Kolonun Taşıma Kapasitesi

Tekil bir kolonda 3 tip göçme görülmektedir (Şekil 3.9):



Şekil 3.9 Tekil kırmataş kolonda göçme mekanizmaları

Genişleme (Kabarma) göçmesi (Şekil 3.9a), daha çok yumuşak zeminlerde gözlenir. Kolon içerisindeki yatay gerilme eğer zemin içerisindeki yanal gerilmeden daha büyükse meydana gelir. Bu göçme, kolon üst sınırı ile kolon çapının 2 veya 3 kat aşağısında gerçekleşebilir. Eğer zemin tabakalı ise bu sefer de zeminin en zayıf olduğu yerde genişleme gözlenebilir.

Yerel veya genel göçme (Şekil 3.9b) 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 3.9c) 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.

3.6.1.1 Tekil Kolonda Genişleme Göçmesi

Uzun kolonda kolon başına etkiyen gerilme, kolon içerisindeki malzemede uç kısma iletilmeden önce kesme kuvvetinin tamamen yer değiştirmesine yol açabilir. Kolonda oluşan bu kesilme yüzeyi, kolonun dışa doğru hareket ederek göçmesine neden olur (Şekil 3.9a). Kolon üstüne etkiyebilecek nihai gerilme $q_{ult,p}$, sınır radyal gerilme ve kolona ait Rankine pasif toprak basıncı katsayısına bağlıdır. Hughes ve Withers [14] te bunu şu formül ile ifade etmişlerdir:

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

Burada;

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

ϕ_g : Kolon Malzemesi İçsel Sürtünme Açısı

şeklinde tanımlanır. Hughes ve Withers [14] te 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.

Ayrıca, kolonda meydana gelen genişlemeyi, kil içerisindeki silindirik bir boşluğun genişlemesi şeklinde düşünmüşlerdir. Daha önceleri yapılmış olan pressiyometre deneyleri de zeminin limit bir genişleme değerine kadar genişlemeye karşı direndiğini göstermektedir.

Toplam radyal gerilme σ_{ro} , 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

ile ifade edilir. Zemin hakkında yeterli bilgi bulunmuyorsa, E_u ve s_u oranı 200; poisson oranı da 0.5 şeklinde kullanılabilir. Hughes ve Withers tarafından [14]'te 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,

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

şeklinde yazılabilir.

3.6.1.2 Tekil Kolon Ucunda Meydana Gelebilecek Göçme

Kolon ucunda meydana gelebilecek göçme kolon üstüne etkiyen nihai gerilme, çevre

sürtünmesi ve uç taşıma kapasitesinin birleşimidir. Şekil 3.9c'de de görüldüğü gibi;

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

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

şeklinde açıklanabilir. Wissmann [22] 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 Yapımı Sırasında 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 kullanılan malzemenin sürtünme özelliğine ve her tabakadaki ortalama yatay gerilmeye bağlı olarak değişmektedir. Buna göre birim çevre sürtünmesi aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

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

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

şeklinde tanımlanır. Burada kayma gerilmeleri ihmal edilmektedir [17].

İnşa edilen kolon eğer 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

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

ϕ_s : Zemin İçsel Sürtünme Açısı

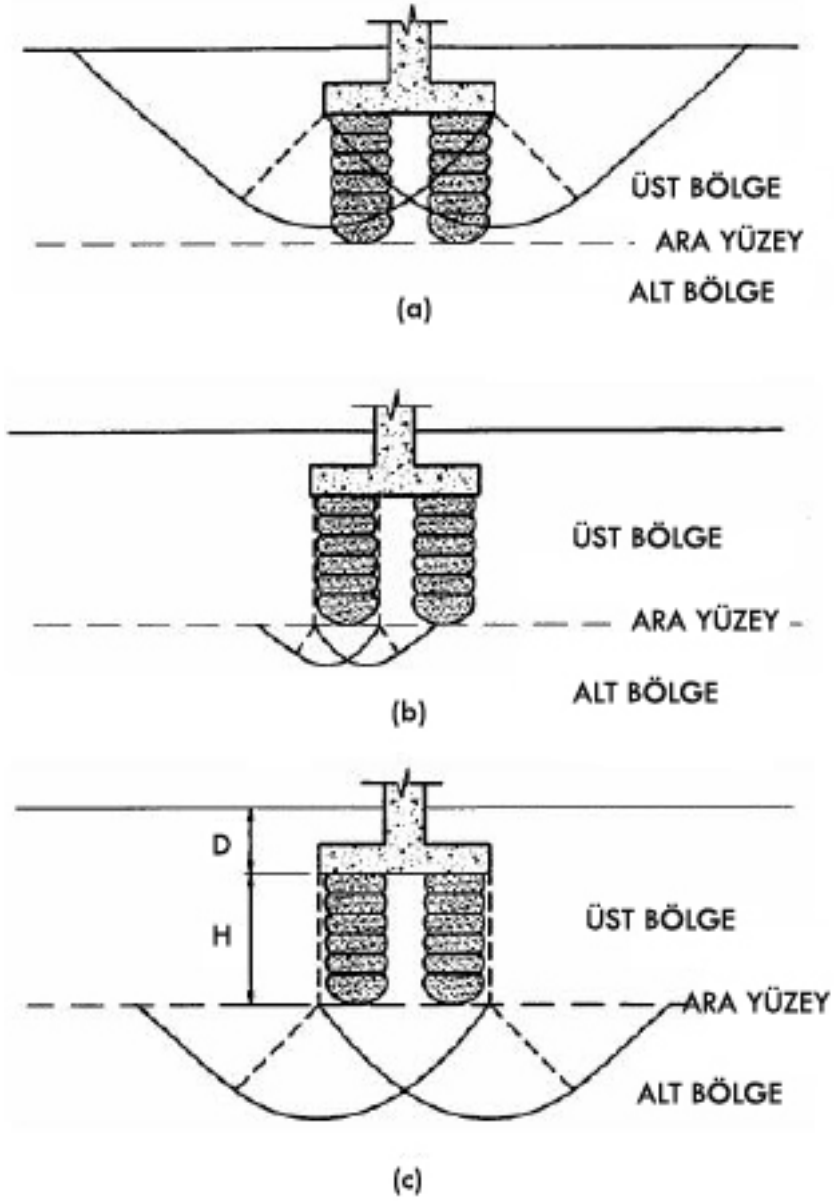
γ : Zemin Birim Hacim Ağırlığı

σ'_v : Kolon Ucundaki Düşey Efektif Gerilme

şeklinde tanımlanabilir.

3.6.2 Kolon Gruplarının Taşıma Kapasitesi

DKK gruplarında meydana gelebilecek göçme mekanizmaları Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Tekil kolonlarda olan göçmeler ile kolon gruplarında olan göçmeler birbirine benzemekle birlikte genişleme, zemin-kolon bölgesinde yerel göçme (Şekil 3.10a), tekil kolon altında zımbalama göçmesi (Şekil 3.10b) ve zemin-kolon bölgesi altında göçme (Şekil 3.10c) durumları şeklinde incelenebilir.



Şekil 3.10 Kolon gruplarında göçme mekanizmaları

3.6.2.1 Kolon Gruplarında Genişleme Göçmesi

Hughes ve Withers [14] te, kolonlar arasındaki mesafenin $2.5d_p$ 'den büyük olması durumunda (d_p : Merkezden merkeze kolon uzaklığı) kolonların birbirlerinden bağımsız olarak hareket edeceğini söylemişlerdir. Bir kırmataş kolon grubunda temelin nihai taşıma kapasitesi genişleme göçmesine bağlı olarak,

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

formülünden hesaplanabilir.

3.6.2.2 Kolon Gruplarında Kayma Göçmesi

Bu tür göçme türünde göçme düzleminin kolon ve zemini kapsayacak bir bölgeden geçtiği varsayılır (Şekil 3.10a). Göçme yüzeyi boyunca kesme dayanımı, kolon tarafından oluşturulan göçmeye karşı sürtünme direnci τ_g ve zeminin kesme kuvvetine karşı sürtünme direnci τ_s 'e bağlıdır. Zemin parametreleri Priebe'ye göre [12] 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,

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

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

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

denklemleri ile bulunabilir. Burada,

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

R'_s : İndirgenmiş Gerilme Konsantrasyon Oranı (n_s)

şeklinde açıklanabilir. R_s değerinde indirgeme yapılmasının sebebi, gerilme ve göçme yüzeyi boyunca meydana gelen değişimi hesaplamak içindir. Wiessmann [22] de, n_s değerinin 2.8 alınmasını tavsiye etmektedir.

3.6.2.3 Kolon Gruplarında Zımbalanma Göçmesi

Kolon grupları içerisinde tek bir kolonun zımbalanma göçmesi, tekil kolonların zımbalanma göçme hesabı ile aynı şekilde hesaplanmaktadır.

3.6.2.4 Kolon Gruplarında Zemin-Kolon Bölgesi Altında Göçme

Bu tür bir göçmenin meydana geldiği bölgede izin verilebilir bir taşıma gücü basıncı belirlenip, göçmenin önüne 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 Eklenererek Bulunan Uzunluk

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

olarak açıklanabilir.

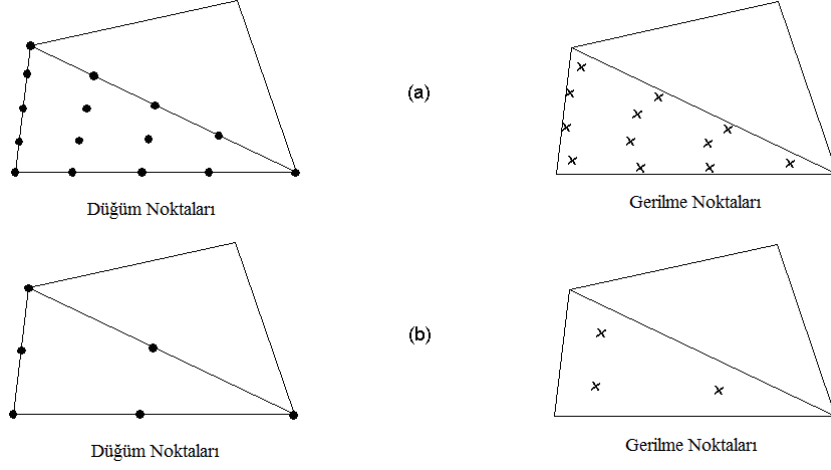
DARBELİ KIRMATAŞ KOLON SAYISAL MODELİ

4.1 Giriş

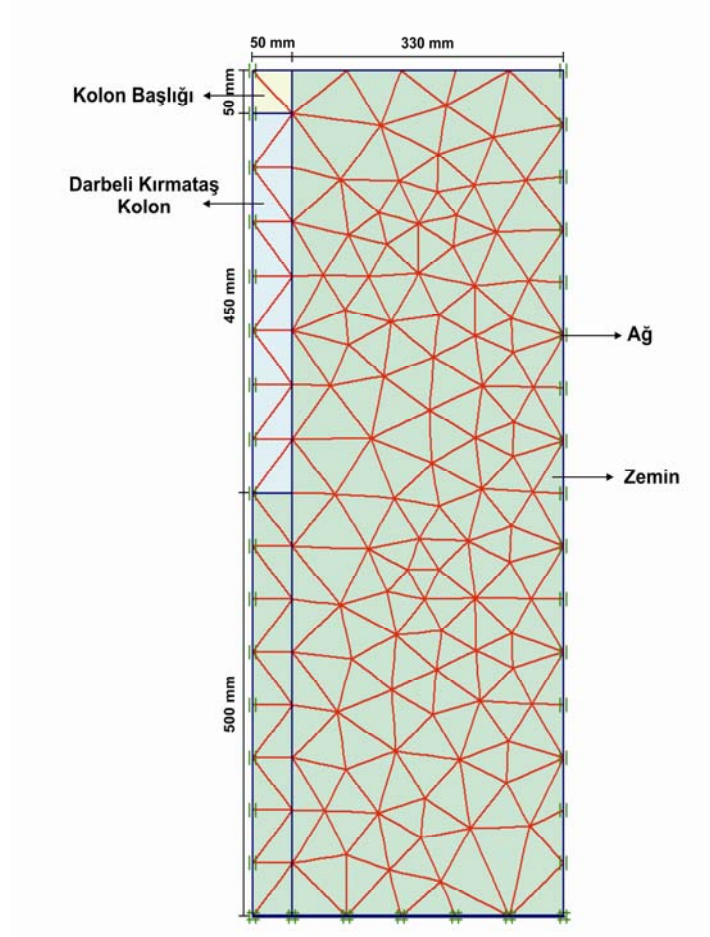
Bu bölümde, bir darbeli kırmataş kolon ve çevre zeminin davranışı sonlu elemanlar yöntemi yapılan parametrik analizlerle incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerde PLAXIS V9.02 ve V10.0 programı kullanılmıştır. Son yıllarda dünyada en yaygın kullanılan sonlu elemanlar yazılımı olan PLAXIS doğrusal olmayan zemin davranışını gerçekçi modelleyebilen malzeme bünye modellerine sahiptir. Bu çalışmada PLAXIS yazılımı kullanılarak bir DKK laboratuvar modelinin üretim aşamasının çevre zeminde meydana getirdiği değişimi belirlemek için nümerik analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda DKK üretimi sırasında komşu zeminde gerilme değişimini göstermek için yanal toprak basınçlarının kayma mukavemeti açısı ve Poisson oranı değerleri ile değişimleri incelenmiştir. Tez kapsamında yapılan nümerik çalışmalar aşağıda açıklanmıştır.

4.2 Darbeli Kırmataş Kolonun Geometrik Modeli

Nümerik model, eksenel simetri koşullarında (axisymmetry) ve 15 düğüm noktalı üçgen (15-node triangular) elemanlardan oluşturulmuştur (Şekil 4.1). Bu elemanlar kullanılarak geliştirilen DKK modeli Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu model, çalışma kapsamında laboratuvarda bir model tankında yapılan bir DKK'ya ait olup boyutları şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Analizlerde kullanılan elemanlar, düğüm noktaları ve gerilme noktaları (PLAXIS, 2009)



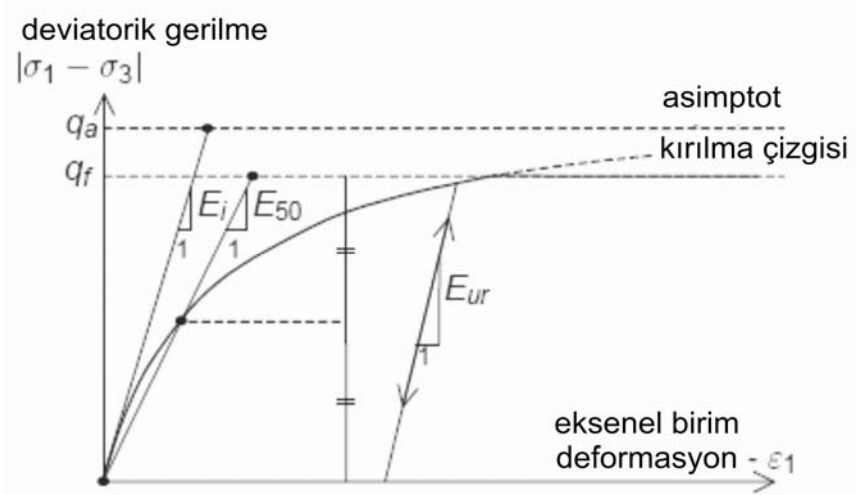
Şekil 4.2 Darbeli kırmataş kolon nümerik modeli

4.2.1 Sonlu Eleman Analizinde Kullanılan Zemin Modelleri

Darbeli kırmataş kolonların incelendiği bu çalışmada zeminler, Shanz vd. tarafından [23] te geliştirilen Hardening Soil Model (HS – Pekleşen Zemin Modeli) ve ayrıca Mohr – Coulomb Zemin Modeli kullanılarak analiz edilmiştir.

Pekleşen Zemin Modeli hiperbolik modelin yerini almış, gelişmiş bir bünye modelidir. Modelde plastisite teorisi kullanılmış, zeminin genişmesi dikkate alınmıştır. Bu model tüm zemin türlerinde kullanılabilir [23]. Modelin bazı temel özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

- m üst sayısına göre gerilmeye bağlı rijitlik
- Deviatorik gerilme – şekil değiştirme arasında hiperbolik ilişki
- Deviatorik yükleme ve boşaltma / tekrar yükleme arasında ayırım
- Mohr-Coulomb modeline göre göçme davranışı (Şekil 4.3)



Şekil 4.3 Standart bir üç eksenli basınç deneyi için birincil yüklemde hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (PLAXIS, 2010)

Laboratuarda üç eksenli basınç deneylerinden belirlenen E_{50} değerine bağlı olarak E_{50}^{ref} değeri (4.1) eşitliğinden belirlenebilir.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (4.1)$$

Eşitlikteki E_{50}^{ref} referans çevre basıncına (p^{ref}) göre belirlenen elastisite modülüdür ve m ise gerilme bağımlılığın miktarını belirleyen indistir. Genellikle $p^{ref} = 100$ kPa ve

granüler Mohr – Coulomb (MC) modelinde malzeme davranışı ideal elasto-plastik olarak alınır ve plastik davranışı modellemek için üç zemin parametresi c' (kohezyon), ϕ' (içsel sürtünme açısı), ψ (genleşme açısı) ve elastik davranışı modellemek için ise E' (elastisite modülü) ve ν' (Poisson oranı) kullanılmaktadır. Üç eksenli deneylerde genellikle gerilme-şekil değiştirme eğrisinde deviator gerilmenin %50'sine karşılık gelen rijitlik modülü sekant modülü olarak alınmaktadır.

4.3 Parametrik Analizler

Laboratuvar darbeli kırma taş kolon fiziksel modeli PLAXIS sonlu elemanlar programı ile sayısal olarak modellenerek farklı malzeme özellikleri ve imalat sırasında çevre zemininde meydana gelen gerilme değişimleri incelenmiştir. Bu amaçla toplamda 13 adet analiz yapılmış olup, bu analizlerde seçilen malzeme parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Analizlerde darbeli kırma taş kolonun imalatı sırasında oluşan hacimsel sıkışma oranı ile çevre zeminde oluşacak gerilme değiştirme oranları yanal toprak basıncı katsayılarındaki değişim ile belirlenmiştir.

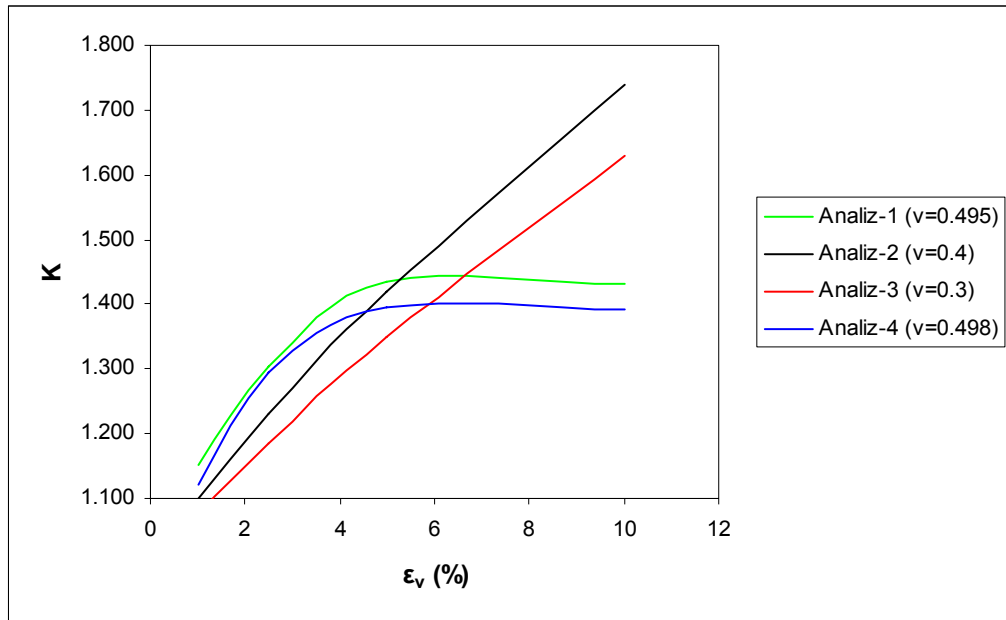
Çizelge 4.1 Parametrik çalışmalarda kullanılan malzeme parametreleri

Analiz Adı	Malzeme Modeli	Malzeme Davranışı	Kayma Mukavemeti Açısı, Φ (°)	Poisson Oranı, ν	Üstel Katsayı, m	Kohezyon, c (kPa)
Analiz 1	MC	Drenajlı ¹	0.01	0.495	-	25
Analiz 2	MC	Drenajlı	0.01	0.4	-	25
Analiz 3	MC	Drenajlı	0.01	0.3	-	25
Analiz 4	MC	Drenajlı	0.01	0.498	-	25
Analiz 5	HSM	Drenajsız ²	20	0.2	0.9	0.1
Analiz 6	HSM	Drenajsız	20	0.35	0.9	0.1
Analiz 7	HSM	Drenajsız	15	0.2	0.9	0.1
Analiz 8	HSM	Drenajsız	23	0.2	0.9	0.1
Analiz 9	HSM	Drenajsız	23	0.35	0.9	0.1
Analiz 10	HSM	Drenajsız	23	0.35	0.3	0.1
Analiz 11	HSM	Drenajsız	21	0.35	0.3	0.1
Analiz 12	HSM	Drenajsız	15	0.35	0.3	0.1
Analiz 13	HSM	Drenajsız	15	0.2	0.3	0.1

¹ Toplam gerilme parametreleriyle drenajsız durum için yapılan analiz (Plaxis 2D, V.10'de drenajlı)

² Efektif gerilme parametreleriyle drenajsız analiz (Plaxis 2D, V.10)

Analiz-1 – Analiz-4’te Mohr-Coulomb malzeme modeli ve drenajlı malzeme davranışı göz önüne alınarak kil tabakasının davranışı toplam gerilme parametreleri ile modellenmiştir. Bu analizlerde Poisson oranı (ν) değerinin 0.495 ve 0.498 olması suya doymun bir kilin drenajsız yükleme durumundaki davranışını modellemektedir. Buna göre farklı Poisson oranı değerleri ile taş kolonda %0, %1, %2, %5 ve %10 hacimsel şekil değiştirme oranı değerleri kullanılarak yapılan analizlerde hacimsel şekil değiştirme oranı ile yanal toprak basıncı arasındaki değişim belirlenmiştir. Yanal toprak basıncı katsayısı olarak taş kolonunun uzunluğunun yarısında komşu zeminde hesaplanan yatay ve düşey gerilmelerin oranı alınmış olup analizler sonucunda hacimsel şekil değiştirme değeri ile yanal toprak basıncı arasındaki ilişki Şekil 4.4’te gösterilmiştir.

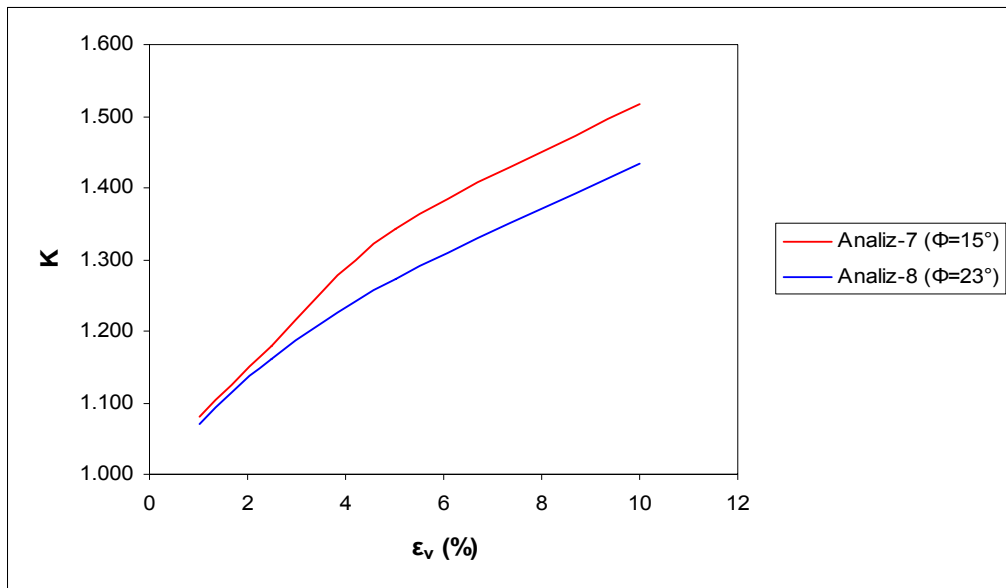


Şekil 4.4 Poisson oranı değişiminin, hacimsel sıkışma oranı ile yanal toprak basıncı arasındaki ilişki üzerindeki etkisi

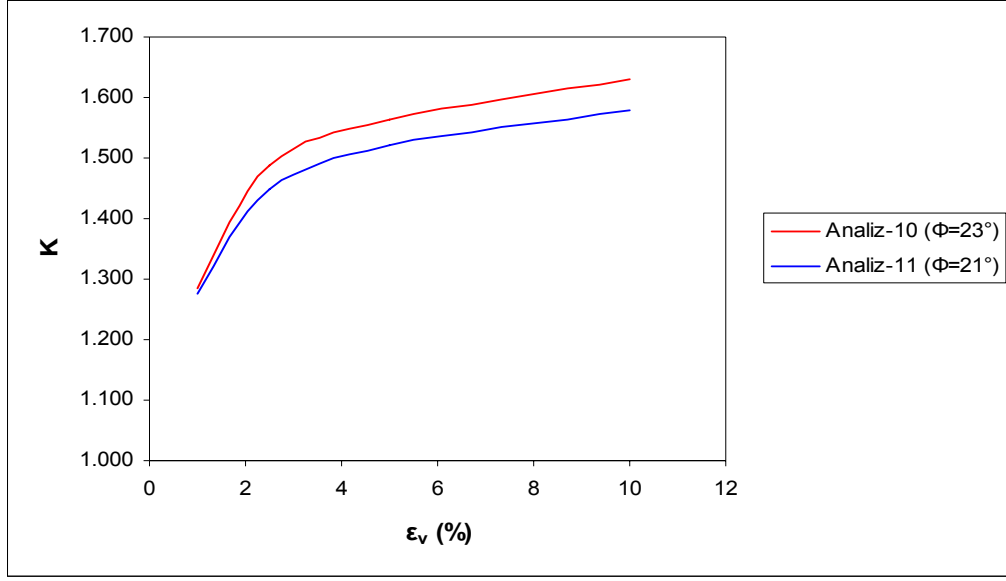
Şekil 4.4’te verilen grafikte Poisson oranı’nın azalan değerleri için hacimsel sıkışma oranı ile yanal toprak basıncı arasındaki ilişkinin doğrusala yakın olduğu görülürken drenajsız davranışta yani Poisson Oranı’nın 0.5 değerine yakın değerleri ($\nu=0.495-0.498$) için yanal toprak basınçlarının hacimsel şekil değiştirme oranı ilişkisinin non-lineer olduğu görülmektedir. Buna göre suya doymun killi bir zeminde darbeli kırma taş kolon imalatı yapılırken drenajsız malzeme davranışı beklendiğinden, kolon imalatı sırasında darbe etkisi ile yapacağı şekil değiştirme artışı %5 oranına ulaştıktan sonra

yanal toprak basıncı katsayısında artış olmadığı, bir miktar azaldığı gözlenmektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, darbeli kırmataş kolon imalatı ile zemin içinde belli bir hacim artışı değerine ulaştıktan sonra (%5) düşey yatay gerilmelerdeki artışa paralel düşey gerilmelerde de artış olduğunu göstermektedir.

Poisson Oranı'nın 0.2 olarak alındığı Analiz-7 ve Analiz-8'de, 0.35 olarak alındığı Analiz-10 ve Analiz 11'de Hardening Soil malzeme modeli ve drenajsız malzeme davranışı seçilmiştir. Kayma mukavemeti açısı (Φ) için farklı değerler seçilerek analizler tekrarlanmış ve parametre değişiminin hacimsel sıkışma oranı ile yanal toprak basıncı arasındaki ilişki üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hacimsel sıkışma oranı ile yanal toprak basıncı arasındaki ilişkinin kayma mukavemeti açısına göre değişimini belirlemek için yapılan analizlerde daha küçük Poisson oranı değerinin ($\nu'=0.2$) kullanıldığı Analiz-7 ve Analiz-8'den elde edilen sonuçlar Şekil 4.5'te, daha büyük Poisson oranı değerinin ($\nu'=0.35$) Analiz-10 ve Analiz-11 için Şekil 4.6'da verilmektedir. Bu analizlerde Poisson oranı için kullanılan 0.2 değeri Hardening Soil Model için önerilen değer olup malzemenin yükleme ve boşaltma durumlarındaki Poisson oranı değerlerinin ortalamasıdır. DKK üretimi sırasında komşu zeminde yük boşaltması olmayacağı düşüncesi ile drenajsız yükleme koşullarında suya doymun bir durum için kullanılması gereken Poisson oranı 0.35 olduğu için bu değer tercih edilerek bunun etkisi yapılan analizler sonucunda ortaya konmuştur.



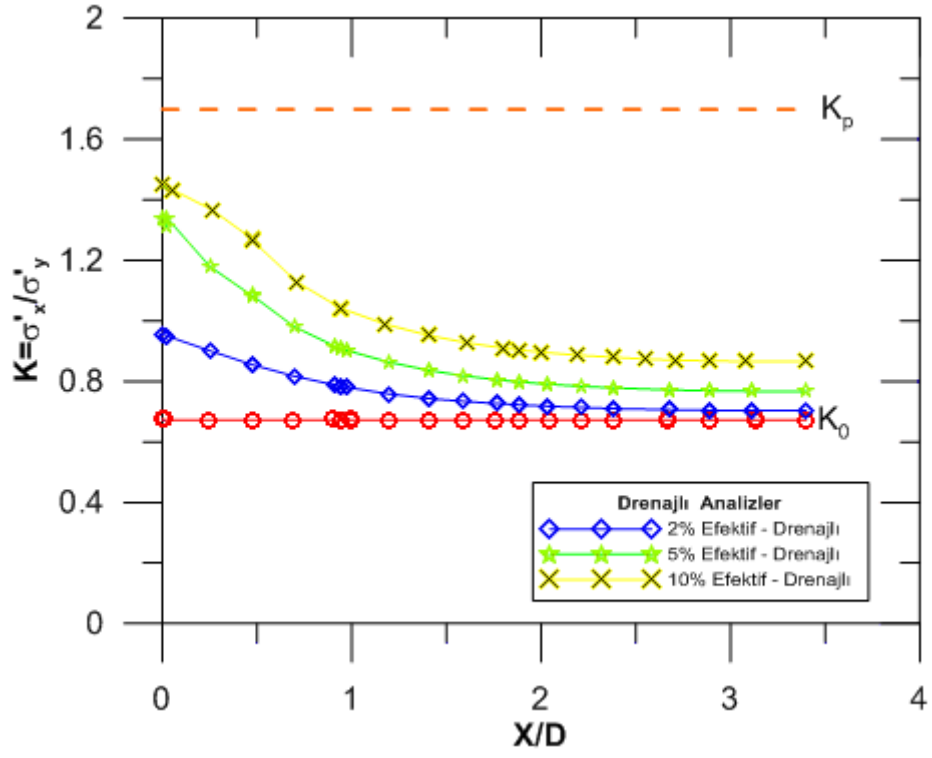
Şekil 4.5 Kayma mukavemeti açısı değişiminin, hacimsel sıkışma oranı ile yanal toprak basıncı arasındaki ilişki üzerindeki etkisi ($\nu=0.2$)



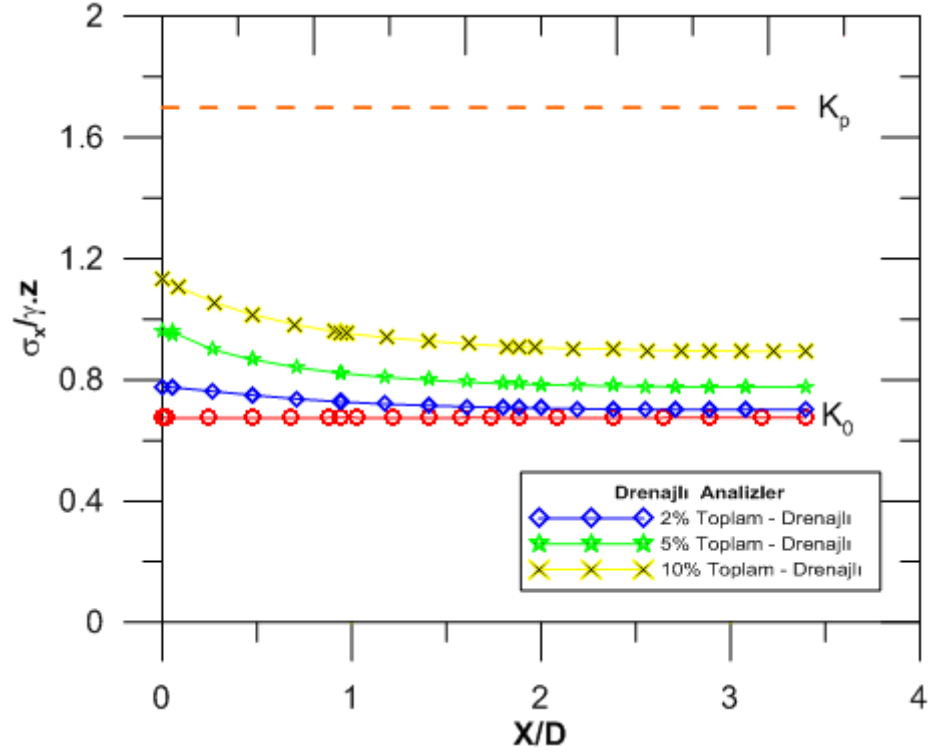
Şekil 4.6 Kayma mukavemeti açısı değişiminin, hacimsel sıkışma oranı ile yanıl toprak basıncı arasındaki ilişki üzerindeki etkisi ($\nu=0.35$)

Şekil 4.5'te ve Şekil 4.6'da verilen analiz sonuçları incelendiğinde, Poisson Oranı'nın 0.2 olarak alındığı analizler için yanıl toprak basıncının kayma mukavemeti açısı arttıkça azaldığı; 0.35 olarak alındığı analizler için ise yanıl toprak basıncının kayma mukavemeti açısı arttıkça arttığı görülmektedir.

Şekil 4.7'de efektif malzeme parametreleri ile yapılan drenajlı analizlerden elde edilen yatay ve düşey gerilmelerin oranı olarak yanıl toprak basıncı katsayısının kolon dışından itibaren komşu zemindeki değişimi kolon çapı ile normalleştirilerek verilmiştir. Şekil 4.7'de verildiği gibi darbeli kırma taş kolon üretimi sırasında uygulanan darbeler ile darbeli kırma taş kolon hacminin artırılması ile yanıl toprak basıncı katsayısı artmaktadır. Bu artış oluşturulan kolon çapının iki katı kadar uzaklığa kadar bir mesafede etkili olmaktadır. Bu uzaklıktan sonra yanıl toprak basınçlarının sabitlendiği görülmektedir. Bununla beraber yanıl toprak basınçları, hacimsel sıkışma oranı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Toplam gerilmelerin dikkate alındığı analizlerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.8'de görüldüğü üzere kil zeminde pasif itki, oluşturulan kolonun iki katı uzaklığından etkimekte; buna karşın oluşturulan kolon çevresinde yanıl gerilme artışlarının daha düşük değerlerde seyrettiği görülmektedir.

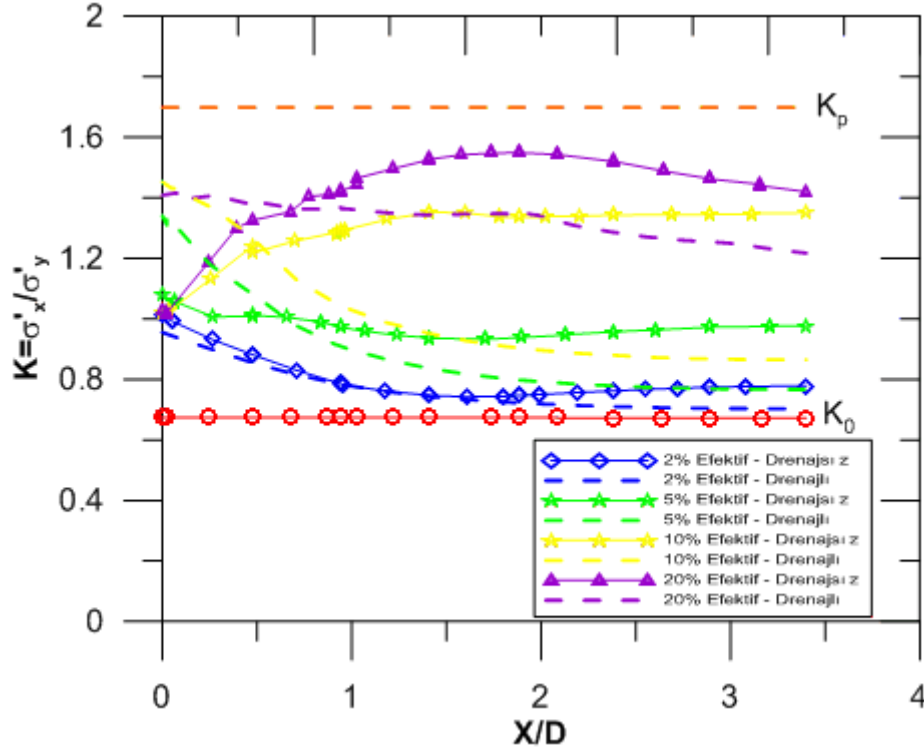


Şekil 4.7 Drenajlı analizlerde yanal toprak basıncının değişimi (Efektif gerilmeler)



Şekil 4.8 Drenajlı analizlerde yanal toprak basıncının değişimi (Toplam gerilmeler)

Şekil 4.9’da darbeli kırma taş kolon üretimi sırasında kolon hacmindeki değişiminin etkisini incelemek için efektif malzeme paramterleri kullanılarak yapılan drenajsız ve drenajlı analizler sonucunda elde edilen yanal toprak basınçlarının kolondan uzaklıkla değişimi gösterilmiştir. Buna göre darbeli kırmataş üretimi sırasında meydana gelen hacim değişimi değeri ve drenaj durumu çevre zemimindeki efektif gerilme artışlarını etkilemektedir. Bu değişimde artık boşluk suyu basınçlarının önemli rol oynadığı açıktır. Şekil 4.9’dan görüldüğü gibi drenajsız durumda taş kolonda %5’den daha büyük hacim artışı oluşması çevre zeminde gerilmelerin değişimini önemli ölçüde etkileyerek kolon çapının 2 katı çapı mesafeye kadar gerilme oranının (K) artmasına yol açmıştır. Drenajlı durum da ise %20 gibi yüksek hacim değişiminde K oranı kolondan itibaren lineer olarak azalırken, daha küçük hacim değişimlerinde parabolik bir azalma göstermektedir. Azalma miktarı genelde kolon çapının 2 katına kadar olup bu değerden sonraki mesafelerde sabitlenmektedir. Hacim değişiminin %2 ve daha az olması durumunda şekilden görüldüğü gibi efektif gerilme oranı değişimi toplam gerilme oranı değişimine çok yakın olmaktadır.



Şekil 4.9 Drenajsız analizlerde yanal toprak basıncının değişimi (Efektif gerilmeler)

DARBELİ KIRMATAŞ KOLON LABORATUAR MODELİ

5.1 Giriş

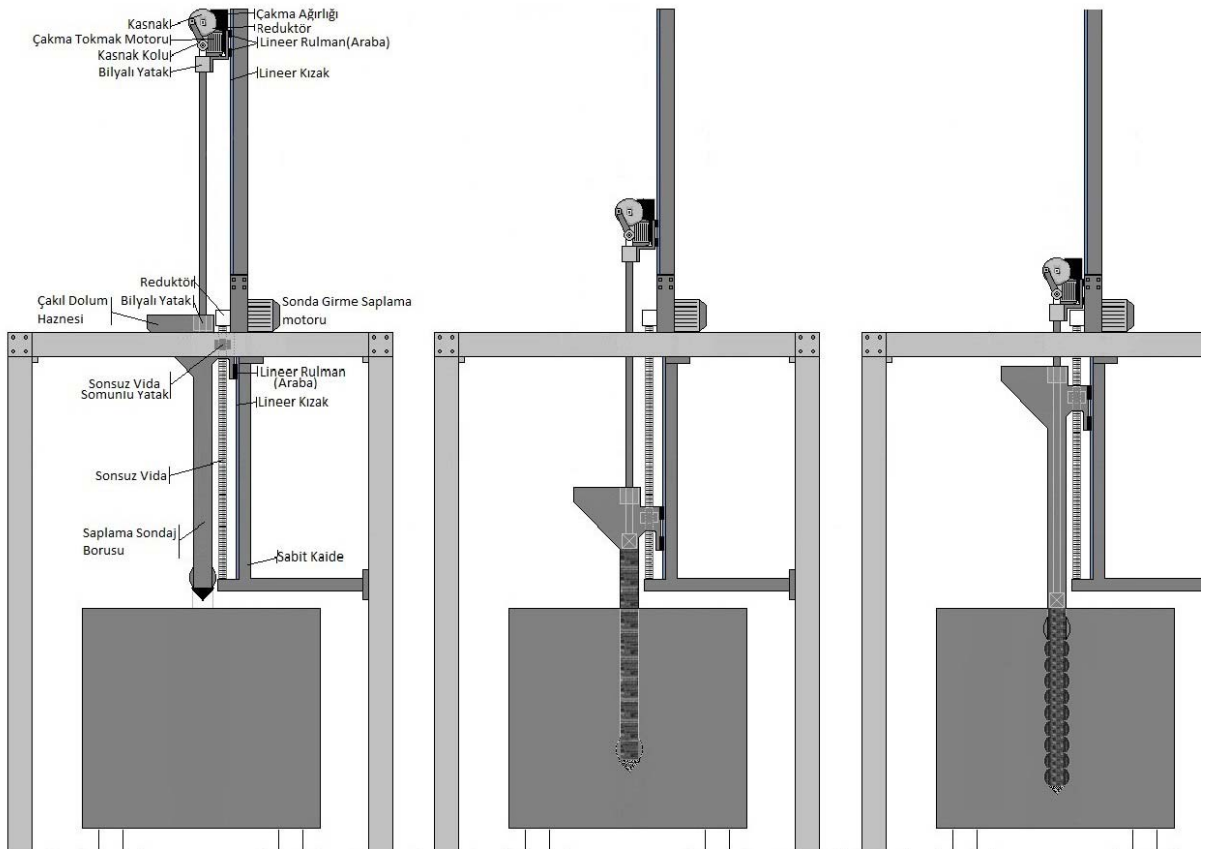
Darbeli kırma taş kolonların üretimi ve düşey yük altında çevre zeminle etkileşimini incelemek, tasarım ve uygulam sırasında yararlı bilgiler edinmek için tez kapsamında bir darbeli kırma taş kolon makinesi geliştirilmiştir. Bu makine halen pratikte kılıf kullanılarak yumuşak zeminlerde üretilen darbeli kırma taş kolonlar ile aynı koşullarda kolonlar üretebilmektedir. Bu bölümde, geliştirilen darbeli kırma taş kolon makinesi, bununla laboratuvar ortamında oluşturulan darbeli kırmataş kolon ve ardından yapılan kolon yükleme deneyi hakkında bilgi verilecektir.

5.2 Deney Sistemi

Model taş kolonlar üretmek için geliştirilen deney sistemi 1400 x 1400 x 2000 mm boyutlarında sac profillerden oluşan bir çerçeve, yukarıda kolonu tokmaklamak için kullanılan bir motor, ortada kolonun zemin içerisine girmesini sağlayan diğer bir motor ve zemin içerisinde kuyu açıp, tokmaklama yaparak kolonu oluşturacak 10 cm çapında probtan meydana gelmektedir (Şekil 5.1). Deney sistemi, düşey olarak 5 ton yük uygulayabilme kapasitesine sahiptir ve üzerinde bir adet yük hücresi (load cell) bulunmaktadır. Ayrıca, kolon yapımı sırasında titreşim de uygulamaktadır. Deney çerçevesi dört noktadan yere sabitlenmiştir ve trifaze bir prizten güç almaktadır. Sistemde bulunan sonsuz vida sayesinde delme işlemi gerçekleştirilmektedir. Kolon malzemesinin açılan deliğe yerleştirilmesi ise yukarıda yer alan bir haznedan yapılmaktadır.

Deney sistemi, 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 yukarıdan uygulanan baskı ağırlığı (kg cinsinden) takip edilebilmektedir.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te deney sisteminin sırasıyla ön cepheden ve yandan görünüşü gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Deney sistemi ana elemanları



Şekil 5.2 Dokunmatik kontrol paneli



Şekil 5.3 Deney sisteminin ön cepheden görünümü



Şekil 5.4 Deney sisteminin yandan görünümü

Bu deney sistemi ile birlikte laboratuvar ortamında içinde zeminin hazırlandığı bir adet de tank bulunmaktadır. Tank, 780 mm çapında, 1000 mm boyunda ve silindiriktir. Yan kısımlarında su çıkışları için vanalar bulunmaktadır ve alt kısmı I profiller ile güçlendirilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Model deney tankı

5.3 Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Darbeli kırma 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 %80'ni oluşturmuştur. Kullanılan zemin malzemelerin özellikleri yapılan laboratuvar deneyleri ile belirlenmiş olup ayrıntıları aşağıda verilmiştir.

5.3.1 Kaolin

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:

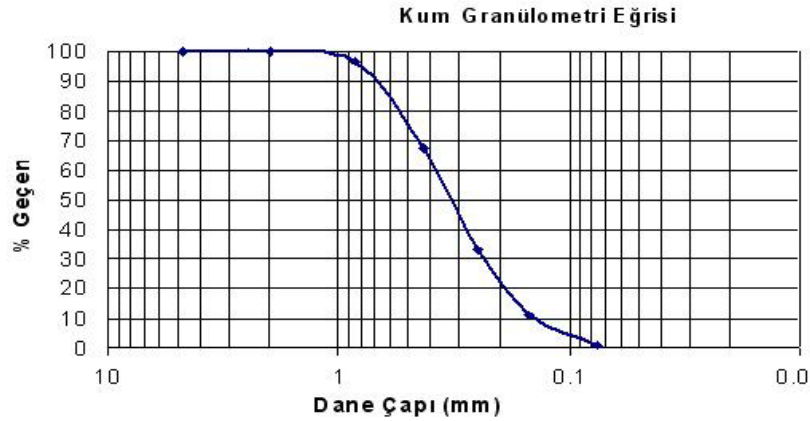
- Beyazlık : %89.38 (Elrepho 2000 standartına göre),
- Tane boyutu (μm cinsinden ve SediGraph 5100 ile yapılan analiz sonuçlarına göre);
 - D50 : 1.3
 - $< 10 \mu\text{m}$: 97.1
 - $< 2 \mu\text{m}$: 60.8
- Kimyasal içeriği : (% olarak ve XRF, AES-ICP ile yapılan analiz sonuçlarına göre);
 - SiO_2 : 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.

5.3.2 Kum

Deneyde kullanılan kum Şile civarından alınmış olup granülometrisi Şekil 5.6'da, indeks özellikleri de Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelge 5.1'den görüldüğü gibi deney için kullanılan kum, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre kötü

derecelenmiş kum (SP) zemin sınıfına girmektedir.



Şekil 5.6 Kum malzemenin granülometresi

Çizelge 5.1 Kumun indeks özellikleri

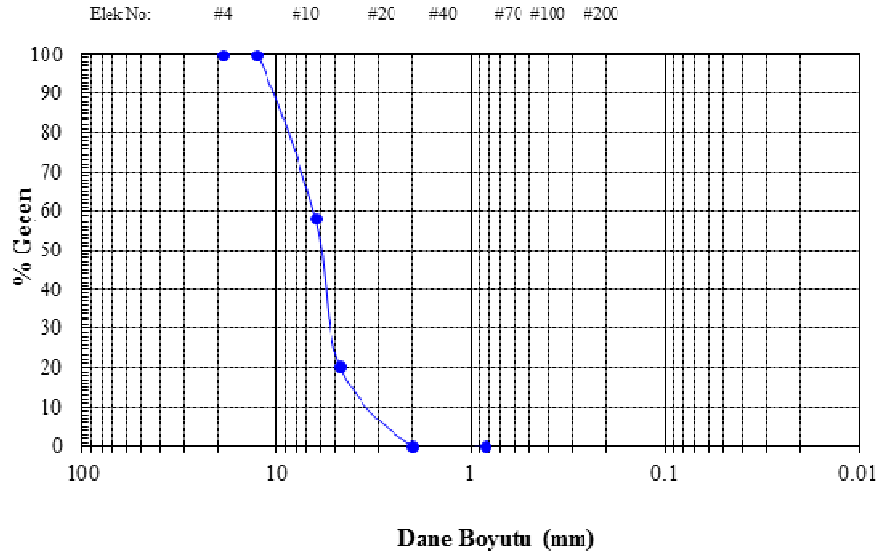
Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sembolü	SP
Özgül Yoğunluk, G_s	2.65
Maksimum Boşluk Oranı, e_{max}	0.88
Minimum Boşluk Oranı, e_{min}	0.50
Ortalama Dane Çapı, D_{50} (mm)	0.31
Efektif Çap, D_{10} (mm)	0.15

5.3.3 Çakıl

Darbeli kırmataş kolonu laboratuvar ortamında modellemek için kullanılan çakıl malzemesi üzerinde yapılan elek analizi sonucunda elde edilen dane çapı dağılımı (granülometresi) Şekil 5.7’de, indeks özellikleri ise Çizelge 5.2’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre çakıl, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi’ne göre (GW) olarak sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 5.2 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 5.7 DKK modeli için kullanılan çakıl malzemenin granülometresi

5.4 Zemin Numunesinin Hazırlanması

Model deneyde kullanılan zemin numunesi 10 günlük bir sürede laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Kuru ağırlığın %80'i kadar kaolin ve %20'si kadar da kum, kovalar içerisine yerleştirilerek bir karıştırıcı yardımı ile karıştırılmıştır. Ardından kuru ağırlıkların da %60'ı kadar su kademeli olarak bu karışıma ilave edilerek, karıştırma işlemine devam edilmiştir. Bu işlemler sırasında suyun tüm karışımın içerisine girmesine özen gösterilmiş ve homojen bir karışım elde edilmiştir. (Şekil 5.8). Her bir aşamada hazırlanan karışımın su muhtevası belirlenerek ortalama su muhtevasının (w_{ort}) %62 olması sağlanmıştır. Bu değer likit limit kıvamının %10 fazlasına karşılık gelmekte olup literatürde önerildiği gibi tanka kolay yerleştirilebilecek akışkan (slurry) kıvamdadır. Bu kıvamda tanka yerleştirilen malzeme DKK üretimi için yeterli dayanıma (mukavemete) ulaşabilmesi için yük uygulanarak konsolidasyonu sağlanmıştır.



Şekil 5.8 Kova içerisinde hazırlanan zemin numunesi

Model tankında yumuşak killi bir zemin tabakası elde etmek için hazırlanmış akışkan malzeme tanka dökülmünden önce Şekil 5.9'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 edilerek çift yönlü drenajı sağlamaktır. Bu tabakanın konsolidasyon sırasında tıkanmasını önlemek için filtre görevi yapan bir gotekstil şilte yerleştirilmiştir.



Şekil 5.9 Tank tabanına çakıl ve üzerine gotekstil filtre yerleştirilmesi

Tabanda bir drenaj tabakası oluşturulduktan sonra hazırlanan akışkan kıvamdaki kil-kum karışımı malzeme tanka yerleştirilmiştir. (Şekil 5.10). Yerleştirme işlemi tank içinde 83 cm yüksekliğe (tankın üst seviyesi) ulaşıldığında sonra sonlandırılmıştır.



Şekil 5.10 Model tanka akışkan malzemenin yerleştirilmesi

Model tanka akışkan kıvamdaki malzemenin yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra minyatür vane aleti ile drenajsız kayma mukavemeti ölçümleri yapılmıştır. İşlem iki ayrı noktada ve aynı derinlikte gerçekleştirilmiştir. Ölçülen drenajsız kayma mukavemeti değeri ortalama olarak $c_u=0.8$ kPa olup kontrol amacı ile cep pentrometresi ile de ölçümler yapılmıştır (Şekil 5.11). Bu ölçümlerde okunan serbest basınç mukavemetinin ortalama 0.6 kPa değerinde olduğu görülmüştür.

Tank doldurulduktan sonra üzerine aynı çapta ve 2.5 cm kalınlığında bir ahşap plak konularak 41 gün süreyle kendi ağırlığı altında konsolide edildikten sonra üzerine 10 kPa düşey basınç uygulanarak konsolide edilmiştir.



Şekil 5.11 DKK üretilecek zeminde cep penetrometresi ile mukavemet ölçümü

5.5 Model DKK Üretimi

Tank içerisinde 41 gün 10 kPa altında bekleyen zemin numunesinin, üzerindeki ağırlıklar kaldırıldıktan sonra, yüksekliğinin 73 cm'ye indiği gözlemlenmiştir.

Mukavemet ölçümleri tamamlandıktan sonra model deney tankı DKK üretmek üzere DKK makinesi altına sürülmüştür. Model deney tankında DKK üretimine başlamadan önceki durum Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.12 Model deney tankında DKK üretimine başlamadan önceki görüntü

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi arazide yapılan uygulamalarda kuyu planlanan derinliğe kadar delindikten sonra prob, 100 cm yukarı çekilirken, oluşan boşluğa yukarıdan çakıl dolmakta ve daha sonra bu çakıl 33 cm'ye sıkıştırılmaktadır. Model DKK üretiminde bu oranlara ve yapım sırasına dikkat edilerek prob, 65 cm derinliğe kadar indirilmiştir. Sonrasında 20 cm yukarıya çekilmiş ve yukarıdaki çakıl haznesinden çakıl doldurulmuştur (Şekil 5.13). Aşağıda oluşan boşluğa dolan çakıl da titreşim uygulanarak 7 cm'ye sıkıştırılmış ve darbeli kırmataş kolon elde edilmiştir.



Şekil 5.13 DKK makinesinin çakıl haznesi

5.6 Yükleme Deneyi

Taşıma kapasitesini tespit etmek amacıyla oluşturulan darbeli kırmataş kolon üzerinde plaka yükleme deneyi yapılmıştır. Yükleme deneyi 20 cm çapında, 2 cm kalınlığında, silindirik, alüminyum-çelik bir plaka DKK makinesine Şekil 5.14’de gösterildiği şekilde monte edilerek gerçekleştirilmiştir.



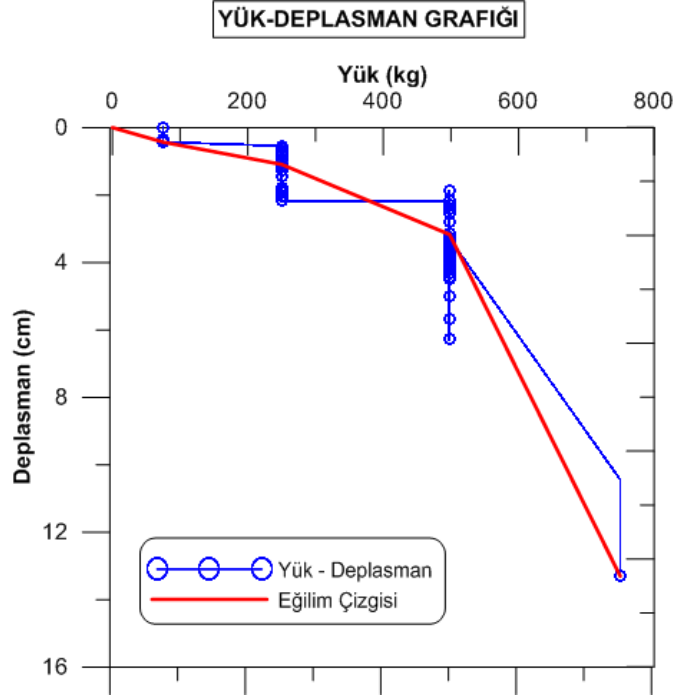
Şekil 5.14 Yükleme plakasının yerleşimi

Deplasman ölçümleri için yapılan bu silindirik plakanın üzerine 20 cm’lik rezistif lineer pozisyon ölçer Şekil 5.15’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Bu cihaz bir bilgisayara bağlanarak veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.15 Rezistif lineer pozisyon ölçerin konumu

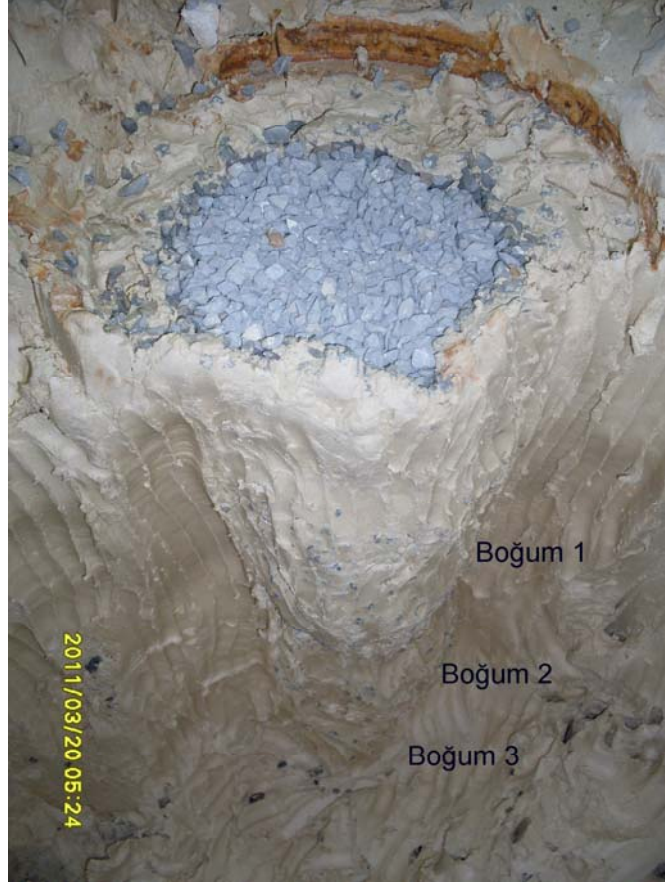
Yüklemeye deneyi kademeli olarak dört aşamada yapılmıştır. Kazığın hesaplanan dizayn yükü 1500 kg alınarak yüklemeye deneyinde sırasıyla bu yükün %5'i, %16.74'ü, %33.26'sı ve %50'si hesaplanarak yüklemeye yapılmış ve veriler kaydedilmiştir. %50 yüklemeye yapıldığı anda yüklemeye sonlandırılmış ve Şekil 5.16'daki yük-deplasman grafiği elde edilmiştir.



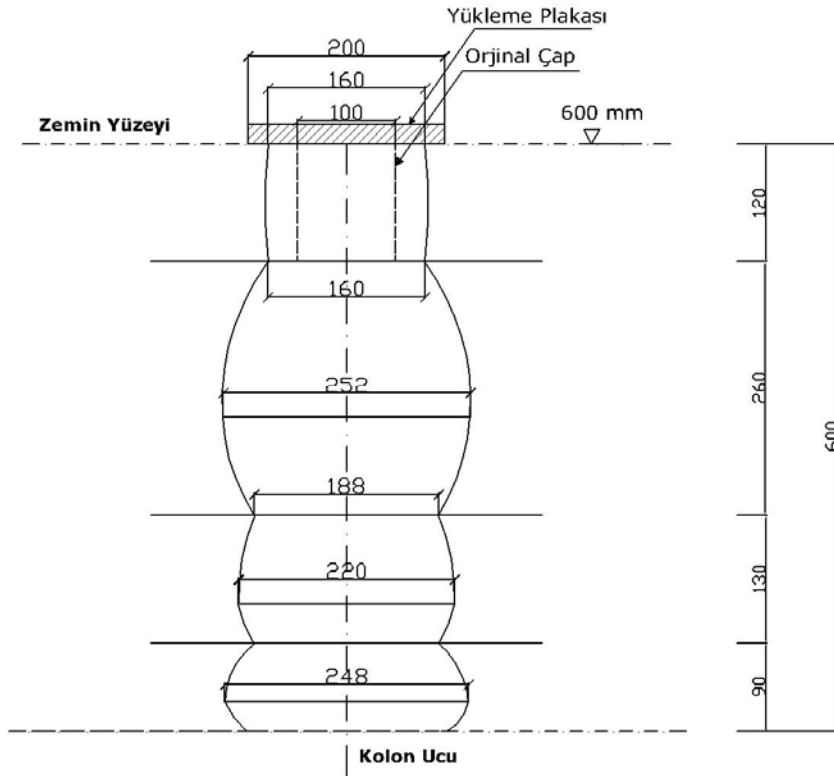
Şekil 5.16 Yük-deplasman grafiği

5.7 Deney Sonrasında Model DKK'da Meydana Gelen Deformasyonlar

Yapılan yüklemeye deneyinin tamamlanmasından sonra tankın içindeki kil malzemenin yaklaşık yarısı, DKK'un tüm tank yüksekliği boyunca kazılarak DKK oluşumunun gerçekleşebildiğini görebilmek için kazılarak çıkartılmıştır. Böylece yüklemeye sonrası model DKK'da oluşan hacim değişimlerinin miktarı, biçimi ve bombelenme şeklini belirlemek mümkün olmuştur. Elde edilen kesit Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de gösterilmektedir. Başlangıçta 10 cm çapa sahip olan DKK'nın yüklemeye deneyi sonrasında yüzeyde 16 cm genişliğe ulaştığı, aşağıya doğru en geniş 25.2 cm olan üç boğum oluşturduğu görülmüştür.



Şekil 5.17 Deney sonucunda elde edilen darbeli kırmataş kolon

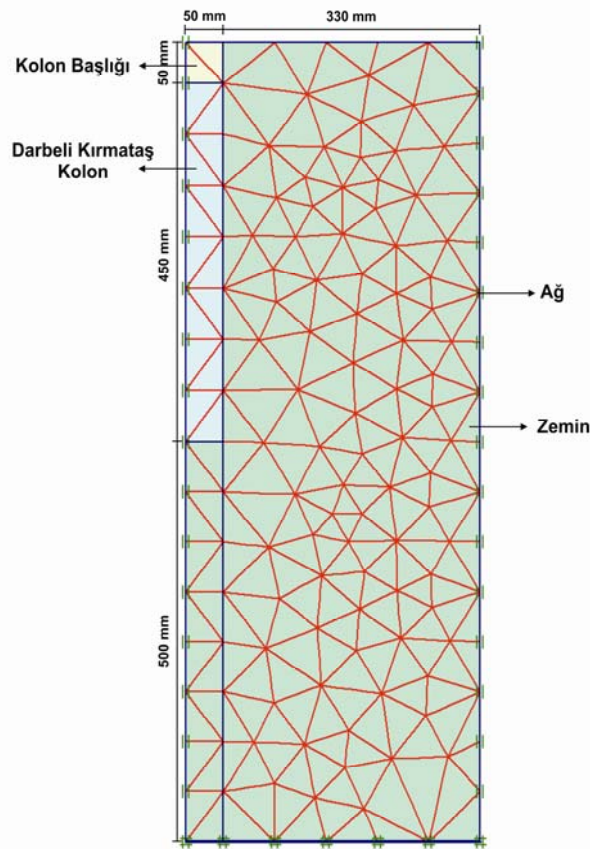


Şekil 5.18 Oluşturulan darbeli kırmataş kolonun kesiti

5.8 Model DKK'nın Sayısal Analizi

Model deney tankında hazırlanmış kil-kum karışımı çok yumuşak zemin içinde üretilen DKK üzerinde yapılan yükleme deneyi PLAXIS programı ile sayısal olarak da modellenmiştir. Yapılan analizlerde başlangıç zemin durumu (kolon yok), DKK üretimi ve yükleme aşamaları gözönüne alınmıştır. Analizler ile yükleme deneyinde elde edilen yük-yer değiştirme değişimini elde edebilmek için DKK üretimi sırasında meydana gelen hacim değişimi farklı değerler kullanılarak tahmin edilme yoluna gidilmiştir.

Sayısal analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli Şekil 5.19'da verildiği gibi olup kullanılan malzeme parameterleri Çizelge 5.3'te verilmiştir. Analizlerde taş kolon için Mohr Coluomb model, çevre zemin için Hardening Soil malzeme modeli kullanılırken kolon üzerinde bir elastik malzeme davranışı gösteren bir başlık göz önüne alınmıştır. DKK üretimi hesap aşamasında bu başlığın (aynı zamanda taş kolonun) üst sınırında düşey yer değiştirmenin olmadığı kabul edilerek hacim değişimi uygulanmıştır.

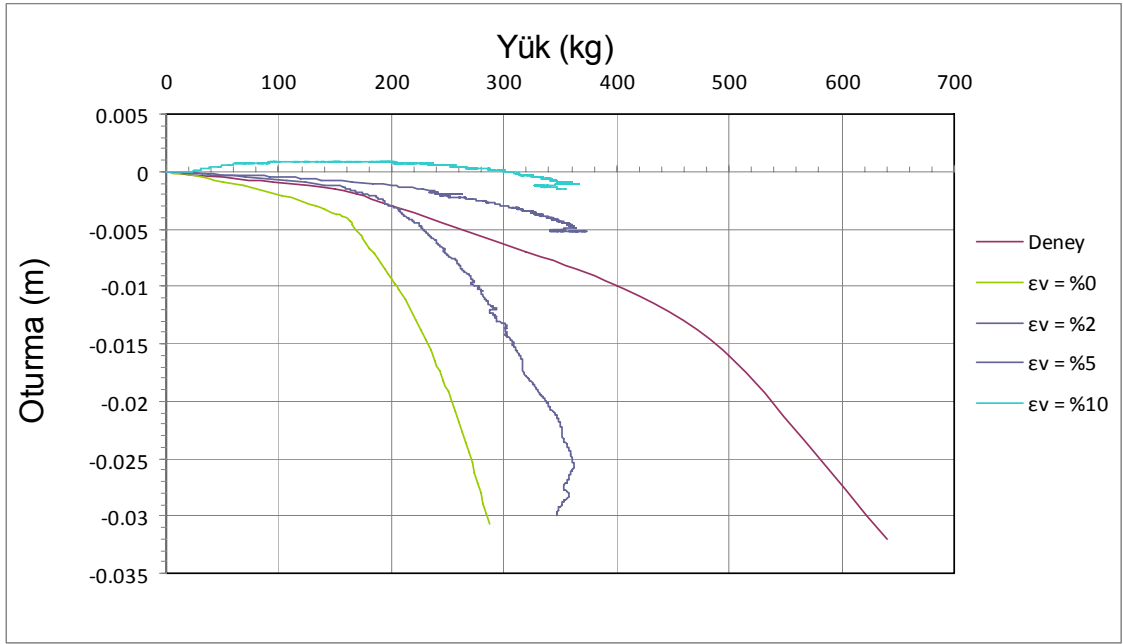


Şekil 5.19 DKK model deneyi SE modeli

Çizelge 5.3 Analizde kullanılan malzeme parametreleri

Parametreler	Kolon Malzemesi	Kolon Başlığı	Zemin	Kolon Altı Zemini
Malzeme Modeli	Mohr Coulomb	Lineer – Elastik	Hardening Soil Model	Hardening Soil Model
Malzeme Davranışı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajsız	Drenajsız
Birim Hacim Ağırlık	18 kN/m ³	18 kN/m ³	20 kN/m ³	20 kN/m ³
Elastisite Modülü (E)	-	50000 kPa	-	-
Poisson Oranı (ν , ν_u)	-	0.300	-	-
Kohezyon (c)	10.0 kN/m ²	-	0.100 kN/m ²	0.100 kN/m ²
Sürtünme Açısı (φ)	46°	-	15°	15°
Drenajlı üç eksenli deneyden elde edilen elastisite modülü (E_{50}^{ref})	100000 kN/m ²	-	1000.00 kN/m ²	20000.00 kN/m ²
Konsolidasyon yükleme deneyinden elde edilen tanjant elastisite modülü (E_{oed}^{ref})	82300 kN/m ²	-	923.257 kN/m ²	18470 kN/m ²
Yükleme/boşaltma elastisite modülü (E_{ur}^{ref})	300000 kN/m ²	-	3000.00 kN/m ²	60000.00 kN/m ²
Elastisite modülünün yükleme seviyesine bağlı katsayısı (m)	0.500	-	0.900	0.900
Yükleme/boşaltma için Poisson oranı (ν_{ur})	0.200	-	0.200	0.200
Elastisite modülü için referans gerilme (p^{ref})	100.00 kN/m ²	-	100.00 kN/m ²	100.00 kN/m ²
Normal konsolidasyon için K_0 değeri (K_0^{nc})	0.272	-	0.589	0.589

Farklı hacim artışı uygulanarak yapılan analizler sonucunda taş kolonda elde edilen yük-yer değiştirme ilişkisinin yükleme deneyinde yapılan ölçümlerle karşılaştırılması Şekil 5.20’de verilmiştir.



Şekil 5.20 Yük – düşey yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 5.20’de verilen uygulanan gerilme ile oturmalar arasındaki ilişki incelendiğinde farklı hacimsel sıkışma oranları ile yapılan analiz sonuçları ile laboratuvar ortamında yapılan yükleme deneyinin sonucu birbirine yakın değerler vermiştir.

5.9 Model DKK'nın Taşıma Gücü Hesabı

Model deney tankında üretilen DKK üzerinde yapılan yükleme deneyi sonucunda belirlenen taşıma gücü değeri Hughes ve Withers tarafından [14] te 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 σ_{ro} , boşluk suyu basıncı ve efektif düşey gerilmeden,

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

formülü ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma'_{vo} = \frac{1}{2}(1)(20 - 10) = 5kPa \text{ ve } \phi = 20^\circ \text{ ise } K_0 = (1 - \sin 20) = 0.66 \text{ elde edilir.}$$

$$S_u = 3kPa \text{ ve } \sigma_r = \sqrt{2}(0.66)(5) \cong 4.7kPa$$

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

$$\sigma_{r,lim} = 4.7 + 4(3) + 0 = 16.7kPa$$

Buradan taşıma gücü:

$$q_u = (16.7)(6) \cong 100kPa \text{ bulunur.}$$

$$S_u = 2kPa \text{ ve } \sigma_r \cong 3.3kPa \text{ alınır ise de taşıma gücü:}$$

$$q_u = (11.3)(6) \cong 67kPa \text{ olarak hesaplanır.}$$

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

Uygulanan kolon yülü $Q_u = 640kN$ olup $D=0.35$ m için $A=0.096m^2$ olduğuna göre:

$$q_u = 66.5kPa$$

değeri elde edilir. Bu sonuç, deneyde ölçülen taşıma gücü değerinin teorik bağıntı ile bulunan değere çok yakın olmakla birlikte SE analizinden elde edilen hacim değişimi değeri ile çelişmektedir.

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında darbeli kırmataş kolonların laboratuvar ortamında fiziksel olarak modellemek için bir kırmataş kolon makinesi geliştirilmiş ve bu makine ile bir kırma taş kolon üretilmiştir. Üretilen taş kolonun farklı malzeme parametreleri, hacim değişimi, malzeme modeli ve drenaj durumları için çevre zeminde meydana getirdiği değişiklik sayısal analizler ile incelenmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan drenajlı ve drenajsız elasto-plastik gerilme şekil değiştirme analizleri Poisson oranının darbeli kırma taş kolon üretiminin sırasında çevre zeminde yol açtığı iyileştirmenin derecesini etkilediğini göstermektedir.
- Poisson oranının 0.2 olarak alındığı analizler için yanal toprak basıncının kayma mukavemeti açısı arttıkça azaldığı; 0.35 olarak alındığı analizler için ise yanal toprak basıncının kayma mukavemeti açısı artışına bağlı olarak bağlı arttığı görülmüştür.
- Darbeli kırma taş kolon üretimi sırasında meydana gelen hacim artışı yanal toprak basıncı katsayısında artışa neden olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan elasto-plastik gerilme şekil değiştirme analizleri, bu artışın oluşturulan kolon çapının iki katı kadar uzaklığa kadar bir mesafede etkili olduğu görülürken, deneysel gözlemlerde bunun değişik katmanlarda oluşan boğumlarla 2.2 ile 2.5 katı arasında değiştiği belirlenmiştir. Bununla beraber genel olarak yanal toprak basınçları, hacimsel sıkışma oranı ile doğru orantılı olarak artmıştır.
- Plaxis sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen yük–yer değiştirme grafiği

yükleme deneyininki ile karşılaştırıldığında; yükleme deneyinde darbeli kırma taş kolonda, %5 civarında bir hacim artışı olduğunu göstermektedir.

- Deney tankında kil malzemenin çıkarılması neticesinde DKK makinesi ile üretilen taş kolonun boğumlu bir şekilde oluştuğu görülmüştür. Bu durum DKK makinesin amaçlandığı gibi arazidekiler gibi yumuşak zeminde yapılan delgiye yerleştirilen kırma taş üzerine darbe uygulayarak darbeli kırma taş kolonlar üretebildiğini göstermiştir.

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] J.F. Chen., Han J., Oztoprak S. ve Yang X., (2009). “Behaviour of single rammed aggregate piers considering installation effects”, Computer and Geotechnics 36, 1191-1199.
- [6] 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.
- [7] Jebe, W. ve Bartels, K. (1983). “The Development of Compaction Methods with Vibrators from 1976 to 1982”, Proc 8th ECSMFE, Helsinki, 259-266.
- [8] Pumyang E&C, Vibro Compaction,
http://www.pumyangenc.co.kr/03_technology/01_special_04.html, 24 Aralık 2010.
- [9] Demir, H., (2007). “Taş Kolon ve Geopier Uygulaması ile Zemin İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 14-58.
- [10] Keller, (2010). Deep Vibro Techniques, Brochure 10-02E, İngiltere.

- [11] Clemente, J.L. ve Davie, J.R., (1999). “Stone Columns for Settlement Reduction”, American Society for Testing and Materials, 1-2.
- [12] Priebe, H.J., (1995). “The Design of Vibro Replacement.”, Ground Engineering, 1-13.
- [13] 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.
- [14] Hughes, J.M.O. ve Withers, N.J. (1974). “Reinforcing of Soft Cohesive Soils With Stone Columns”, Ground Engineering, 7: 42-49.
- [15] Vesic, A.S., (1972). “Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass”, Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 98: 265-290.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Fox, N.S. ve M.J. Cowell (1998). “Geopier® Foundation and Soil Reinforcement Manual”, Geopier Foundation Company, Inc., Scottsdale, AZ.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Wissmann, K.J., (1999). “Bearing Capacity of Geopier Supported Foundation Systems”, Technical Bulletin No.2, Geopier Foundation Co., Inc., Arizona.
- [23] Schanz, T., Vermeer, P.A. ve Bonnier, P.G., (1999). “The Hardening-Soil Model: Formulation and Verification”, Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam, 281-290.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Serpen DEMİR
Doğum Tarihi ve Yeri : 25.02.1986 – İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : serpend@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnş. Müh. / Geoteknik	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lisans	Jeol. Müh.	İstanbul Üniversitesi	2008
Lise	Sayısal	Vefa Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi / Türü / Yeri
2009-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi / İnşaat Müh. Geoteknik ABD.	Asistan - Öğrenci
2008	Öztaş İnşaat A.Ş.	Bitirme Projesi
2007	Kamp Stajı	Çatalca
2006	Doğuş İnşaat / Ayson Sondaj	Saha Mühendisi