

T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

RİJİD KOLONLARIN FARKLI ZEMİN ORTAMLARINDAKİ
PERFORMANSI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hatice KANMAZ

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Geoteknik

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. ERSİN AREL

EKİM 2014

ÖNSÖZ

İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın amacı rijid kolonların farklı zemin ortamlarındaki performansını değerlendirmektir.

Çalışmanın başından itibaren bana her konuda yardımcı olan hiçbir zaman bilgisini ve yardımını esirgemeyen, kendisinden her türlü desteği gördüğüm, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyduğum değerli danışman hocam Yrd.Doç.Dr. Ersin AREL'e teşekkür ederim.

Tüm çalışmam süresince desteklerini esirgemeyen ve öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyduğum değerli hocam Prof.Dr. Akın ÖNALP'e teşekkür ederim.

Ayrıca eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen abim ve anneme, tez yazım sürecinde yanımda olan ve beni destekleyen eşime teşekkür ederim.

Ekim 2014

Hatice KANMAZ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET.....	1
ABSTRACT	2
1 GİRİŞ	3
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Genel.....	3
2 TAŞ KOLONLAR (TK)	5
2.1 Genel.....	5
2.2 Literatür Araştırması.....	5
2.2.1 Birim Hücre İdealleştirmesi	9
2.2.2 Gerilme Yoğunlaşma Faktörü	11
2.2.3 Oturma Azalma Oranı	14
2.2.4 Sonlu Elemanlar yöntemi	15
2.3 Taş Kolon Yapım Yöntemleri	16
2.3.1 Titreşimli Kompaksiyon Yöntemi (Vibro Compaction)	16
2.4 Taş Kolon Yapımında Önemli Faktörler	19
2.4.1 Taş Kolon Çapı.....	19
2.4.2 Taş Kolon Uzunluğu	19
2.4.3 Taş Kolonlar Arası Mesafe	20
2.4.4 Alan Değişim Oranı	20
2.4.5 Gerilme Yoğunluk Faktörü	20
2.4.6 Taş Kolon Malzemesinin Dane Çapı Dağılımı	20
2.4.7 Yapım Yönteminin Etkisi.....	21
2.4.8 Zemin Tipi ve Konsolidasyon Etkisi.....	21
2.5 Taş Kolonlarda Yük Transfer Mekanizmaları.....	21
2.5.1 Uç Dirençli Taş Kolon	21
2.5.2 Yüzen Taş Kolonlar	22
2.6 Taş Kolonların Göçme Mekanizmaları	22

2.6.1	Tekil Taş Kolonların Göçme Mekanizmaları.....	22
2.6.2	Grup Taş Kolonların Göçme Mekanizmaları.....	23
2.7	Taş Kolonların Taşıma Gücü.....	23
2.7.1	Tekil Taş Kolonların Taşıma Gücü.....	23
2.7.2	Kısa Taş Kolonların Taşıma Gücü.....	26
2.8	Taş Kolonlarda Oturma Hesaplanması.....	27
2.8.1	Priebe Yöntemi.....	27
2.8.2	Hughes Yöntemi.....	27
2.8.3	Konsolidasyon Hızı.....	28
2.9	Taş Kolon İyileştirmesinin Faydaları.....	29
2.9.1	Taşıma Gücünün Artırılması.....	29
2.9.2	Oturma Oranının Azaltılması.....	29
2.10	İyileştirilmiş Zemin Parametreleri.....	29
2.10.1	İyileştirme Faktörü Hesabı.....	29
2.10.2	Kolon Sıkışabilirlik Etkisinin Değerlendirilmesi.....	30
2.11	Taş Kolonla İyileştirme Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları.....	31
2.11.1	Taş Kolonla İyileştirme Yönteminin Avantajları.....	31
2.11.2	Taş Kolonla İyileştirme Yönteminin Dezavantajları.....	32
3	DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLAR (DKK).....	33
3.1	Genel.....	33
3.2	Literatür Araştırması.....	33
3.3	Darbeli Kırmataş Kolon Yapım Yöntemleri.....	42
3.3.1	Geopier Sistemi (Yerdeğiştirme Yöntemi-Replacement Method).....	42
3.3.2	Impact Sistemi (Öteleme Yöntemi -Displacement Method).....	43
3.4	Darbeli Kırmataş Kolon Yapımında Önemli Faktörler.....	44
3.4.1	Darbeli Kırmataş Kolon Çapı.....	44
3.4.2	Darbeli Kırmataş Kolon Boyu.....	44
3.4.3	Darbeli Kırmataş Kolon İçsel Sürtünme Açısı.....	44
3.4.4	Darbeli Kırmataş Kolon Malzemesinin Dane Çapı.....	45
3.5	Darbeli Kırmataş Kolonlarda Oturma Hesabı.....	45
3.5.1	Üst Bölge Oturması.....	46
3.5.2	Alt Bölge Oturması.....	48
3.6	Darbeli Kırmataş Kolonların Taşıma Gücü.....	49
3.6.1	Tekil darbeli kırmataş kolon elemanının yanal genişlemesi.....	50

3.6.2	Tekil darbeli kırmataş kolon elemanının kayma yenilmesi.....	51
3.6.3	Darbeli kırmataş kolon elemanı ile iyileştirilmiş zemin bölgesinde kayma yenilmesi	52
3.6.4	Darbeli kırmataş kolon elemanı ile iyileştirilmiş zemin bölgesi altında kayma yenilmesi	52
3.7	Darbeli Kırmataş Kolonların ile Taş Kolonların Karşılaştırılması.....	53
4	DARBELİ KIRMATAŞ KOLON TASARIM ÖRNEKLERİ (GEOPIER FOUNDATION)	54
4.1.1	Şaft Uzunluk Hesaplamaları.....	54
4.1.2	Döşeme Yüklerine Göre Kolon Hesabı.....	56
4.1.3	Temel Oturma Hesabı	59
5	TAŞ KOLON İLE İYİLEŞTİRİLMENİN YATAY DEPREM İVMESİ ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI.....	62
5.1	Sonlu elemanlar programı	62
5.2	Modelde Kullanılan Malzeme ve Zemin Özellikleri	63
5.2.1	Malzeme Özellikleri.....	63
5.2.2	Zemin Özellikleri	63
5.3	Analiz Sonuçları İçin Seçilen Noktalar	65
5.4	Uygulanan Yatay Deprem İvmesi	65
5.5	Taş Kolon Özellikleri	66
5.6	Doğal Durum için Sonlu Elemanlar Analizi.....	66
5.6.1	Model Geometrisi.....	66
5.6.2	Doğal Durum için Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	67
5.7	Sağlam Tabakaya Soketlenmiş Durum için Sonlu Elemanlar Analizi	69
5.7.1	Model Geometrisi.....	69
5.7.2	Sağlam Tabakaya Soketlenmiş Durum için Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	69
5.8	Yükleme Altında Sağlam Tabakaya Soketlenmiş Durum	71
5.8.1	Model Geometrisi.....	71
5.8.2	Yükleme Altında Sağlam Tabakaya Soketlenmiş Durum İçin Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	72
6	SONUÇ VE ÖNERİLER	74
	KAYNAKLAR.....	76

KISALTMALAR

<i>CPT</i>	Koni Penetrasyon Deneyi
<i>DKK</i>	Darbeli Kırmataş Kolon
<i>SPT</i>	Standart Penetrasyon Deneyi
<i>SPT – N</i>	Standart Penetrasyon Deneyi Darbe Sayısı
<i>TK</i>	Taş Kolon

TABLO LİSTESİ

Tablo 2-1 Taş Kolonlarda Gerilme Yoğunlaşma Faktörü üzerine yapılan araştırmalar (Barksdale ve Bachus, 1983)*	13
Tablo 2-2 Brown uygunluk numaraları	21
Tablo 3-1 Çalışmada kullanılan 10 projenin darbeli kırmataş kolon ile iyileştirme öncesi ve sonrası tahmin edilen oturma değerleri (Lawton ve Fox, 1994)	34
Tablo 3-2 Tahmin edilen ve gerçekleşen oturma değerleri	36
Tablo 3-3 DKK ile TK uygulanan zemin özelliklerinin değerlendirilmesi (White ve diğerleri (2002)	38
Tablo 3-4 Kil zemin tabaksının tasarım parametreleri	39
Tablo 3-5 Darbeli kırmataş kolon sistemlerinin yapım yöntemleri (Geopier foundation Company, 2010)	42
Tablo 3-6 Darbeli kırmataş kolon sistemlerin uygulanabilir zemin sınıfları (Geopier Foundation Company, 2010)	42
Tablo 4-1 Kolon Tasarımı İçin Ön Değerler	58
Tablo 5-1 Taş Kolon ve Temel için Malzeme Özellikleri	63
Tablo 5-2 Doğal durumdaki kil, iyileştirilmiş durumdaki zemin ve GW zemin parametreleri	64

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2-1 Taş kolonlarda birim hücre idealleştirmesi.....	10
Şekil 2-2 Titreşimli kompaksiyon yöntemiyle yapılan taş kolonların zeminde oluşturduğu sıkıştırma etkisi (Anonymous, 2004)	16
Şekil 2-3 Titreşimli yer değiştirme yöntemi yapım aşamaları (Url -1).....	17
Şekil 2-4 Alttan beslemeli yöntemin yapım aşamaları (Url -2)	18
Şekil 2-5 Tekil taş kolon göçme mekanizmaları (Juran ve diğerleri, 1988)	22
Şekil 2-6 Tabakalı zeminlerde gerçekleşen taş kolon göçme mekanizmaları (Barksdale ve Bachus, 1983).....	23
Şekil 3-1 İdealleştirilmiş zemin profilleri (a) Kuzey kule (b) Güney kule	35
Şekil 3-2 Darebli kırmataş kolonların yapım aşamaları	37
Şekil 3-3 Geopier sistemlerinin imalat adımları (Geopier Foundation Company, 2010)	43
Şekil 3-4 Impact sistemlerin imalat aşamaları (Geopier Foundation Company, 2010)	44
Şekil 3-5 Darbeli kırmataş kolon gerilme konsantrasyonu için geliştirilen yay modeli (Fox ve diğerleri, 1998).....	46
Şekil 3-6 Meydana gelebilecek göçme mekanizmaları	50
Şekil 4-1 Döşeme plakası hesaplamasında kullanılan zemin profili	56
Şekil 4-2 Zemin profili	59
Şekil 5-1 Problemin geometrik şekli ve arazideki doğal durum	63
Şekil 5-2 Modelde seçilen referans noktaları “A ve B”	65
Şekil 5-3 Modelde kullanılan yatay deprem ivmesi (Adapazarı Depremi, 1999).....	65
Şekil 5-4 Arazideki doğal durum	66
Şekil 5-5 Taş kolon yerleşimi.....	66
Şekil 5-6 Taş kolon uygulamasının ardından zemin iyileşmesi	67
Şekil 5-7 Uygulanan yatay deprem ivmesi sonrasında doğal durumda meydana gelen toplam yer değiştirme	67
Şekil 5-8 Uygulanan yatay deprem ivmesi sonrasında doğal durumda meydana gelen yatay yer değiştirme	68
Şekil 5-9 Uygulanan yatay deprem ivmesi sonrasında meydana gelen yatay ivme grafiği	68
Şekil 5-10 Arazideki doğal durum	69
Şekil 5-11 Sağlam tabakaya soketlenmiş taş kolon yerleşimi.....	69
Şekil 5-12 Uygulanan yatay deprem ivmesi sonrasında sağlam tabakaya soketlenmiş durumda meydana gelen toplam yer değiştirme	70

Şekil 5-13 Uygulanan yatay deprem ivmesi sonrasında sağlam tabakaya soketlenmiş durumda meydana gelen yatay yerdeğiştirme	70
Şekil 5-14 Uygulanan yatay deprem ivmesi sonrasında sağlam tabakaya soketlenmiş durumda meydana gelen yatay ivme grafiği	71
Şekil 5-15 Arazideki doğal durum	71
Şekil 5-16 Taş kolonların yerleşimi ve aktifleştirilmesi	72
Şekil 5-17 Yükleme altında sağlam tabakaya soketlenmiş durumda meydana gelen toplam yerdeğiştirme	72
Şekil 5-18 Yükleme altında sağlam tabakaya soketlenmiş durumda meydana gelen yatay yerdeğiştirme	73

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2-1 Priebe 1993 ve 1x1 taş kolon düzenlemesinde İyileştirme oranı'na karşı alan oranı (Clemente ve diğerleri, 2005).....	7
Çizelge 2-2 Priebe 1993 ve 2x2 taş kolon düzenlemesinde iyileştirme oranı'na karşı alan oranı (Clemente ve diğerleri, 2005).....	8
Çizelge 2-3 Priebe 1993 ve 5x5 taş kolon düzenlemesinde iyileştirme oranı'na karşı alan oranı (Clemente ve diğerleri, 2005).....	8
Çizelge 2-4 Gerilme Yoğunlaşma Faktörünün Değişimi (Bachus ve Barksdale, 1989).....	12
Çizelge 2-5 Titreşimli yer değiştirme için tasarım grafiği (Priebe, 1995)	15
Çizelge 2-6 Kayma direncinin kolon çapına etkisi (Besancon ve diğerleri, 1984).....	19
Çizelge 2-7 Silindirik boşluk genişleme katsayıları (Vesic, 1972).....	25
Çizelge 2-8 Taş kolon taşıma güçlerinin karşılaştırılması (Greenwood ve Kirsch, 1984)	25
Çizelge 2-9 Kısa taş kolonların taşıma gücü katsayıları (Madhav ve Vitkar, 1978).....	26
Çizelge 2-10 Poisson oranı 1/3 olan zeminlerde sıkışabilirlik düzeltilmesi (Priebe, 1995)	31
Çizelge 3-1 Darbeli kırmataş kolonları üzerinde uygulanan arazi kesme deneyi (Fox ve Cowell, 1998).	45
Çizelge 4-1 Westergaard etki faktörü.....	61

SEMBOL LİSTESİ

a_s	Alan Oranı
A	Toplam Alan
A_c	Agrega Kolon Alanı
A_t	Toplam Temel Alanı
A_p	Temeli Destekleyen Toplam Agrega Kolon Alanı
c	Kohezyon
c_u	Drenajsız Kayma Direnci
C_c	Matris Zeminin Sıkışabilirlik Modülü
C_v	Düşey Yöndeki Konsolidasyon Katsayısı
C_w	Radyal Yönde Konsolidasyon Katsayısı
D	Agrega Kolon Çapı
D_c	Agrega Kolon Sıkışma Modülü
D_s	Zemin Sıkışma Modülü
D_e	Birim Hücre Eşdeğer Daire Çapı
D_f	Temel Gömme Derinliği
D_{50}	Elekten 50% Geçen Ağırlık
D_{20}	Elekten 20% Geçen Ağırlık
D_{10}	Elekten 10% Geçen Ağırlık
E_c	Taş Kolon Elastisite Modülü
E_s	Zemin Elastisite Modülü
e_0	Başlangıç Boşluk Oranı
F_v	Düşey Kuvvet
Fq', Fc'	Boşluk Genişleme Kat Sayıları

H_{lz}	Alt Bölge Kalınlığı
H_d	Drenaj Boyu
H_n	Tabaka Kalınlığı
GW	İyi Derecelendirilmiş Çakıl
k	Yay Sabiti
k_{c-rij}	Darbeli KıрмаTaş Kolon Rijitlik Modülü
k_{s-rij}	Matris Zemin Rijitlik Modülü
k_s	İyileştirilmiş Zeminde Yatak Katsayısı
k_c	Taş Kolonların Yatak Katsayısı
K_{ac}	Taş Kolon Malzemesinin Aktif İtki Sayısı
K_p	Pasif Direnç Kat Sayısı
L	Kolon Uzunluğu
n	Gerilme Yoğunlaşma Faktörü
n_0	İyileştirme Faktörü
n_1	Düzeltilmiş İyileştirme Faktörü
N_c, N_γ, N_q	Taş Kolon Taşıma Gücü Katsayısı
P	Temele Etkiyen Kuvvet
R_a	Alan Oranı
R_s	Zemin Yatak Katsayısı Oranı
s	Kolonlar Arası Mesafe
S	Temel Oturması
S_s	Toplam Oturma
S_{uz}	Üst Bölge Oturması
S_{lz}	Alt Bölge Oturması

S_t	İyileştirilmiş Zeminde Oturma Miktarı
S_0	İyileştirilmemiş Zeminde Oturma Miktarı
t	Geçen Süre
T_r	Radyal Yöndeki Zaman Faktörü
T_v	Zaman Faktörü
U	Düşey ve Radyal Yöndeki Konsolidasyon Yüzdesi
U_z	Düşey Yöndeki Ortalama Konsolidasyon Yüzdesi
U_r	Radyal Yöndeki Ortalama Konsolidasyon Yüzdesi
μ_s	Poisson Oranı
Q	Düşey Tasarım Yüğü
q	Temel Taban Basıncı
q_{ort}	Ortalama Taşıma Basıncı
q_c	Taş Kolonlara Uygulanan Taşıma Basıncı
q_s	İyileştirilmiş Zemine Uygulanan Taşıma Basıncı
q_{ult}	Taş Kolon Azami Taşıma Gücü
z_c	Kritik Derinlik
σ	Toplam Gerilme
σ_1	Düşey Gerilme
σ_3	Yanal Gerilme
σ'_0	Düşey Efektif Gerilme
σ_s	Zemin Gerilmesi
σ_c	Agrega Kolon Gerilmesi
σ_{ort}	Hesap Yapılan Derinlikteki Ortalama Gerilme
σ_{r0}	Kolon Yapımından Sonraki Radyal Gerilme

Δq	DüŖey Gerilme ArtıŖı
δ_n	Her Bir Tabakanın DüŖey Ötelenmesi
δ_m	Her Bir Tabakanın Yatay Ötelenmesi
δ	Meydana Gelen Çökme
ρ_s	Birim Hacim Ağırlık
β	Oturma Azalma Oranı
ϕ_c	TaŖ Kolon Malzemesinin Kayma Direnci Açısı

ÖZET

Zayıf zemin tabakalarında yapılacak yapılar için çeşitli iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında rijid kolonların (taş kolonlar ve darbeli kırmataş kolonlar) farklı zeminlerdeki performansı değerlendirilmiştir.

Taş kolonlar zayıf zeminlerde oturmaları azaltmak, konsolidasyonu hızlandırmak, taşıma gücünü artırmak ve sıvılaşma problemlerini azaltmak için kullanılmaktadır. Darbeli kırmataş kolonlar ise yumuşak ve dolgu zeminlerde taşıma gücü artışı ve oturmaların azaltılması amacıyla kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında taş kolonların ve darbeli kırmataş kolonların tasarım yöntemleri, tasarım kriterleri ve göçme mekanizmalarına değinilmiştir.

Darbeli kırmataş kolonlarda tasarım örnekleri verilerek shaft uzunluğunun, döşeme yükleri altında kolon hesaplarının ve temel yükü altında oturma hesabının yapılışına yer verilmiştir. Darbeli kırmataş kolonlarla yapılan iyileştirme sonrasında zeminde hesaplanan oturma değerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Taş kolonlarda ise deprem davranışı 3 farklı durum için sonlu elemanlar programında modellenmiş ve taş kolonun yatay deprem ivmesi altında davranışına yer verilmiştir. Zeminde iyileştirme öncesi ve sonrası kıyaslanarak yerdeğıştirmeler gözlemlenmiş ve iyileştirme sonrası yer değıştirmelerin azaldığı görülmüştür.

ABSTRACT

For structures to be built in weak soil layers various improvement techniques has been developed. In this study improvement techniques with rammed aggregate columns and stone columns have been studied.

Stone columns have been used to reduce settlements in weak soil layers, accelerating consolidation, increasing bearing capacity and to reduce the liquefaction problems. Rammed aggregate columns have been used in soft and backfill layers reducing the settlements and to increasing the bearing capacity.

In this study, design methods, design criterias and failure mechanisms for stone columns and rammed aggregate columns, have been explained.

By giving design examples of rammed aggregate stone, shaft length, columns calculation under the plate and settlement calculation under the foundation are explained. After the improvement done by using rammed aggregate stone, reduction of the settlement of the soil has been observed.

Utilizing the finite element programme for stone columns, 3 different situations has been analyzed under the horizontal seismic acceleration. By comparing natural soils and improvement soils has been investigated the displacement of soils, after applying improvement techniques reduction of the soil settlements has been observed.

1 GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada, zayıf zemin tabakalarında kullanılan arazi iyileştirme yöntemlerinden taş kolon ve darbeli kırmataş kolon elemanlarının yapım yöntemleri, tasarım kriterleri ve hesap yöntemleri değerlendirilmiştir. Darbeli kırmataş kolonlarda shaft uzunluğu, döşeme yüklerine göre kolon tasarımı ve temel altı oturma hesabı için elle çözülmüş örneklere yer verilmiş, taş kolonlar için sonlu elemanlar programında 3 farklı durum için (1.Durum: Doğal Durum, 2.Durum: Sağlam Tabakaya Soketlenmiş Durum, 3.Durum: Yükleme Altında Sağlam Tabakaya Soketlenmiş Durum) yatay deprem ivmesi altında taş kolonların davranışı analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalarla taş kolon veya darbeli kırmataş kolon ile yapılacak iyileştirmenin sonuçları değerlendirilmiştir.

1.2 Genel

Sanayileşme ve nüfus artışları yerleşim alanlarını zayıf zemin şartlarının bulunduğu parsellere doğru kaydırmaktadır. Bunun sonucu olarak kötü zemin şartlarında güvenli yapılar inşa etmek için ya derin temeller kullanılmalı ya da zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmalıdır. Zemin iyileştirme yöntemlerini iki başlık altında incelemek mümkündür. Bunlardan biri zemine herhangi bir katkı malzemesi eklemeyen, kimyasal reaksiyon oluşturmadan, farklı dane dağılımına sahip zeminlerle karıştırarak ve sıkıştırma yöntemi uygulayarak zeminde mekanik iyileştirme sağlamaktır. Diğer ise zemine katkı maddesi ekleyerek kimyasal reaksiyon oluşturup zeminde kimyasal iyileştirme sağlamaktır (Aytekin, 2004).

Zemin iyileştirme yöntemleri (Van Impe, 1989);

- ✓ Geçici etkili,
- ✓ Katkı maddesi kullanılmadan sağlanan kalıcı etkili,
- ✓ Katkı maddesi kullanılarak sağlanan kalıcı etkili,

şeklinde 3 gruba ayrılırken bir diğer gruplandırma (Hausmann, 1990);

- ✓ Mekanik,
- ✓ Hidrolik,
- ✓ Fiziksel - kimyasal,
- ✓ Katkılı - yapısal destekli,
- ✓ Kitleyi kısıtlayarak özellikleri iyileştiren,

şeklinde yapılmaktadır. Mitchell ve Katti (1981), zemin iyileştirme yöntemlerinin seçiminde dane boyutlarını dikkate almak gerektiğini öne sürmüşlerdir.

Zemin iyileştirme yöntemlerinden taş kolon ve darbeli kırmataş kolonlar bu tez kapsamında ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Taş kolonlar kullanımını açısından yumuşak ve orta yumuşak killerde, siltlerde ve siltli kumlarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Kohezyonsuz ve ince daneli zeminlerde sıvılaşıma potansiyelini düşürmek için taş kolon uygulaması önerilmektedir

(Ergun, 1992). Taş kolonlar zeminde taşıma gücünü ve düşey drenler gibi çalışarak oturma hızını artırır. Taş kolonların başlıca kullanım amaçları;

- ✓ Taşıma gücünü artırmak,
- ✓ Sıvılaşma potansiyelini azaltmak,
- ✓ Konsolidasyonu hızlandırmak,
- ✓ Toplam ve farklı oturma miktarlarını azaltmak,
- ✓ Şev stabilizesini artırmak,

şeklinde özetlenebilir.

Darbeli kırmataş kolonlar kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde kullanılabilir. Kohezyonsuz zeminlerde amaç; kolon etrafındaki zeminin sıkıştırılarak, kohezyonlu zeminlerde ise zemin içerisinde nispeten daha rijit kolonların oluşturulması ile iyileştirme yapılması sağlamaktır. Darbeli kırmataş kolonların başlıca kullanım amaçları;

- ✓ Zayıf zeminde taşıma gücünün artırılması,
- ✓ Toplam ve farklı oturmayı azaltmak,
- ✓ Konsolidasyonun hızlandırılması,
- ✓ Sıvılaşabilen zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin azaltılması,

şeklinde özetlenebilir.

2 TAŞ KOLONLAR (TK)

2.1 Genel

Taş kolonlar 1830'lu yıllarda Fransa'da, 1950'den sonra Avrupa'da, 1972'den sonra ise Amerika'da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizde ise son 10 yıldır kullanılmaktadır, öncelikle taşıma gücünü artırmak ve oturmaları azaltmak amacıyla kullanılmıştır. 1999 depreminde Sakarya bölgesinde meydana gelen sıvılaşma problemine karşın sıvılaşma riskini azaltmak amacıyla da kullanılmaya başlanmıştır. Taş kolon uygulaması ile iyileştirilen zeminde aşağıdaki özelliklerin kazanılması beklenir (Demir, 2011).

- ✓ Taş kolon yapımı sırasında meydana gelen titreşim ve yer değiştirme sayesinde zeminin sıklık derecesinde artış sağlamaktadır.
- ✓ Taş kolonlar iyileştirme yapılan zemine yüksek dayanım ve yoğunluk katarak taşıma gücünü artırmaktadırlar.
- ✓ Taş kolonlar zeminde oluşan aşırı boşluk suyu basıncını en aza indirirler.
- ✓ Taş kolon yapımı esnasında kolon çevresindeki zeminde yanal gerilme artışı meydana gelmektedir.

Taş kolon yapımında malzeme olarak çoğunlukla 20,0 – 75,0 mm arasında kırmataş kullanılmasına rağmen, kaba çakıl agrega veya kum - çakıl karışımları da kullanılmaktadır. Malzemeye karar verildikten sonra zemine 0,6 - 1,0 m çapları arasında düşey olarak 20,0 metreye kadar derinliklerde çeşitli yöntemlerle yerleştirilmektedir (Jebe ve Bartels, 1983). Yerleşim planına göre kare veya üçgen yerleştirildiğinde merkezden merkeze uzaklıklar 1,5 - 5,0 m arasında değişmektedir. Taş kolonların imalatı ve yerleştirme esnasında çevre zeminde meydana gelen sıkışma derecesi zemin cinsine, ince dane oranına, vibratörün şekline ve taş kolonlar arası mesafeye göre değişmektedir.

Taş kolon uygulamasında zemin ile kolon arasındaki davranışı etkileyen faktörler aşağıdaki gibi özetlenebilir (Demir, 2007; Demir, 2011);

- ✓ Zeminin drenajsız kayma direnci,
- ✓ Taş kolonun raydal gerilmesi,
- ✓ Birim boy değiştirme özellikleri,
- ✓ Kolonun başlangıç boyutu,
- ✓ Taş kolon yapımı bittiğinde kolon boyutu,
- ✓ Taş kolon malzemesinin özellikleri.

Taş kolon imalatının ardından zeminde istenilen iyileştirme sağlanıp sağlanmadığı SPT, CPT, pressiyometre arazi deneyleri ile kontrol edilebilmektedir.

2.2 Literatür Araştırması

Barksdale ve Bachus (1983) ile Alamgir ve diğerleri (1996), taş kolonların; zeminin taşıma gücünü artırmada, toplam ve farklı oturmayı azaltmada, konsolidasyon hızını artırmada ve kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşmaya karşı etkili olduğunu söylemişlerdir.

Greenwood (1970); Hughes ve diğerleri (1975); Barksdale ve Bachus (1983), McKenna ve diğerleri (1975), taş kolonların taşıma güçlerinin onları çevreleyen çevre zeminin yanal basıncından kaynaklandığını açıklamışlardır. Taş kolon çevresindeki zeminin pasif direnci taş kolonun yük altındaki performansını belirlemektedir. Taş kolonlar aşırı yumuşak zeminlerde veya tabakalı zeminlerin üst tabakasının yumuşak tabaka olduğu zemin profillerinde yatay basınç yetersizliğinden dolayı aşırı kabarmalara (yanal genişlemeye) sebebiyet verecektir. McKenna ve diğerleri (1975), aşırı kabarmanın (yanal genişlemenin) yanı sıra taş kolon yapısındaki boşluklara yumuşak zeminin sızması sonucu taş kolon taşıma gücünün de azalacağını öne sürmüşlerdir.

Taş kolon yenilmeleri üzerine yapılan çalışmalarda yenilme türlerine dair, kabarma (yanal genişleme) (Hughes ve diğerleri, 1975), genel kesme yenilmesi (Madhav ve Vitkar, 1978) ve kayma yenilmesi (Aboshi ve diğerleri, 1979) gözlemlendiği araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur. Fakat yumuşak killerde kabarma (yanal genişleme) daha yaygın görülmektedir (Madhav ve Miura, 1994). Buna ilaveten kritik boydan daha uzun taş kolonlar (kritik boy genellikle kolon çapının 4,0 katı şeklinde tanımlanmaktadır) her ortamda kabarma (yanal genişleme) şeklinde yenilir (IS 2003).

Datye (1982), yaptığı araştırmada taş kolon yerleştirme yöntemlerini üç ana grup altında toplamıştır;

- ✓ Titreşimli flot ekipmanı kullanılarak zemini ıslak yöntemle titreşimli sıkıştırma.
- ✓ Taban kapalı muhafaza ilave edilmiş güçlü bir titreşim aleti kullanılarak titreşimli sıkıştırma.
- ✓ Sondaj deliklerinden taşların yerleştirilmesi ve ağır çekiçler kullanılarak sıkıştırma yöntemi.

Barksdale ve Bachus (1983), taş kolon tasarım yönlerini özetlemişlerdir:

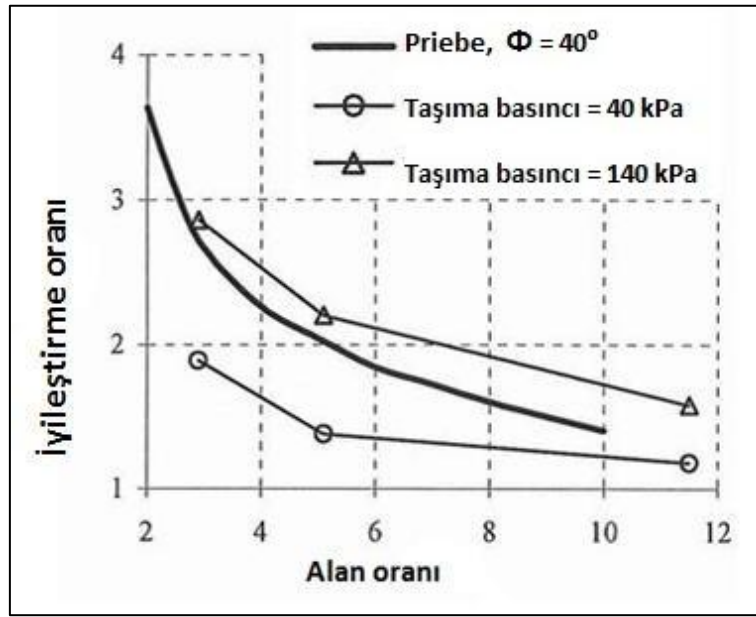
- ✓ Taş kolon tasarım yükleri 15,0 – 60,0 ton arasındadır.
- ✓ İyileştirilen tabaka kalınlığı 6,0 ila 9,0 metre' den fazla olduğu durumda taş kolon yöntemi ile iyileştirme yöntemi ekonomik bir yöntem olmaktan uzaklaşmaktadır.
- ✓ Killi zeminlerde kesme dayanımının 7,0 kPa'dan daha az olduğu ve hassasiyetin 5,0'den az olduğu zeminlerde iyileştirme yöntemi olarak taş kolon uygulaması önerilmez, kesme dayanımının 7,0 ila 19,0 kPa olduğu zeminlerde taş kolon yöntemi dikkatle uygulanmalıdır.
- ✓ Eğer uygulama alanında 1,0 metreden fazla turba zemin kalınlığı varsa iyileştirme yöntemi olarak taş kolon uygun değildir.
- ✓ Teorik analizlerde gerilme yoğunlaşma faktörü genellikle 2,0 ila 2,5 arasında ve kolonun kayma direnci açısı 38° ile 45° arasında değişmektedir.

Hughes ve Withers (1974), ilk kez taş kolonların karmaşık davranışlarını incelemişlerdir. Tekil taş kolonların laboratuvar çalışmalarında ortaya çıkan ana sonuç, taş kolonlar kabarma yenilmesi (yanal genişleme) ile yenilmektedir. Tekil taş kolonların taşıma güçlerini tahmin etmek için birim hücre kavramını geliştirmişlerdir. Tekil taş kolonların taşıma gücü toplamı grup taş kolonların sağladığı taşıma gücüne eşit çıkmaktadır. Priebe (1976), Goughnour ve Bayuk (1979), Balaam ve Booker (1981), Barksdale ve Bachus (1983), Poorooshab ve

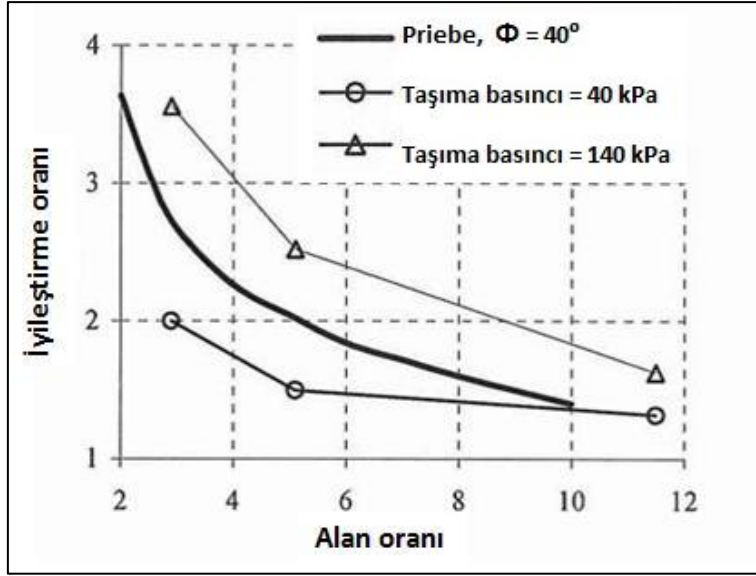
Meyerhof (1997), ve diğer birçok araştırmacı birim hücre kavramını kullanarak teorik modeller geliştirmişler, grup içinde kolon etkileşim ihtimalini göz ardı etmişlerdir.

Madhav ve Miura (1994), taş kolonların zeminin birim hacim ağırlığını artırdığını (yapım aşamasında çevre zeminde sıkıştırma meydana geldiğinden dolayı), zeminde fazla boşluk suyu basıncını azalttığını ve zemine yüksek kayma gerilmesi kazandırdığını öne sürmüşlerdir. Çalışmalarında gevşek kumdan kile kadar bir çok zemin türünde taş kolon davranışını incelemişlerdir.

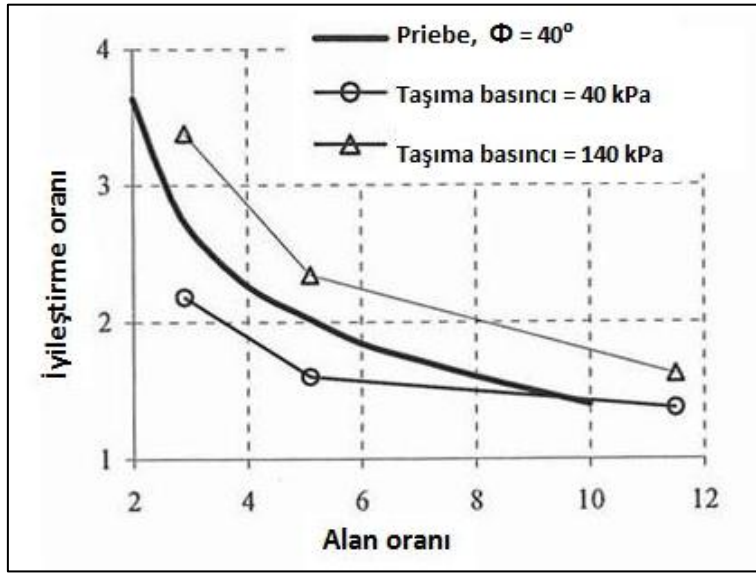
Clemente ve diğerleri (2005), taş kolon ve zeminin taşıma gücü ve temel boyutu gibi mekanik özelliklerini hesaba katarak, alan oranı ve oturma iyileştirme faktörü arasındaki ilişkiyi sayısal olarak geliştirmek için FLAC-3D sonlu farklar yazılımını kullanarak, üç boyutlu sayısal analiz yapmışlardır. Araştırmada taş kolonları farklı aralıklarla (L/d (3,0 - 6,0 - 9,0) - s/d (1,5 - 2,0 - 3,0)) ve farklı boyutlardaki rijit kare temel ile yüklemişlerdir. Zemin ve taş kolonu $E_c / E_s = 6,9$ oranına sahip Mohr Coulomb malzemesi ile modellemişlerdir. Üç boyutlu sonlu farklar (FLAC) analizinden alınan oturma iyileştirme oranı ve alan oranı grafikleri farklı taş kolon grupları için Çizelge 2-1, Çizelge 2-2 ve Çizelge 2-3'de gösterilmiştir.



Çizelge 2-1 Priebe 1993 ve 1x1 taş kolon düzenlemesinde İyileştirme oranı'na karşı alan oranı (Clemente ve diğerleri, 2005)



Çizelge 2-2 Priebe 1993 ve 2x2 taş kolon düzenlemesinde iyileştirme oranı'na karşı alan oranı (Clemente ve diğerleri, 2005)



Çizelge 2-3 Priebe 1993 ve 5x5 taş kolon düzenlemesinde iyileştirme oranı'na karşı alan oranı (Clemente ve diğerleri, 2005)

Ambiliy ve Gandhi (2007), sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel çalışmalar yaparak zeminin kayma direncinin, taş kolonun kayma direnci açısının ve taş kolonlar arasındaki mesafenin taş kolonları nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Deneylerinde 210,0 ile 835,0 mm çapındaki 500,0 mm yüksekliğindeki tanklarda; 100,0 mm çapında taş kolon, zemin olarak yumuşak kil kullanmışlardır. PLAXIS sonlu elemanlar programını kullanarak deneyleri modellemişlerdir. Zemin ve taş kolonun elasto plastik davranışını Mohr Coloumb's eksenel simetri kriterini kullanarak tanımlamışlardır. Model deneylerden elde edilen yükleme oturma eğrileri ile sonlu elemanlar yönteminden elde edilen değerlerin birbirleriyle örtüşüklerini öne sürmüşlerdir.

Castro ve Karstunen (2010), taş kolonların yerleştirilme aşamasında sonlu elemanlar tekniği kullanılarak yumuşak zeminin etkilerini araştırmışlardır. Plaxis yazılımında, Bothkenner kil zemin modelini kullanarak zemin davranışını modellemişlerdir. Boşluk basıncı ve yatay basıncın artışı rapor etmişlerdir.

McCabe ve diğerleri (2010), taş kolonların arazi performanslarını incelemişlerdir. İki tane sonuç ortaya çıkarmışlardır; birincisi Castro ve Karstunen sonuçlarıyla aynı fikri ortaya sürmüşlerdir. İkincisi; taş kolon imalatının tamamlanmasından hemen sonra sağlanan yatay basınç artışının kaybolmasıdır.

Shivashankar ve diğerleri (2011), tabakalı zeminlerde taş kolon davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında zayıf yumuşak kil tabakası altında görece daha sağlam siltli zemin profili kullanmışlardır. Zayıf zeminin tabaka kalınlığını artırarak taş kolonun dayanım, sertlik ve kabarma (yanal genişleme) özelliklerini incelemişlerdir. Homojen zeminlerde taş kolonla zemin iyileştirmesinin çevreleyen zeminin dayanımına bağlı olduğu bilinmektedir. Yapılan deneyde, sertlik ve taşıma gücü yumuşak tabaka kalınlığının artması ile azalmaktadır. Yumuşak tabaka kalınlığı kullanılan taş kolon çapının iki katından fazla olduğu zaman alt tabakanın özellikleri önemini yitirmektedir.

Alonso ve Jimenez (2012), yaptıkları araştırma ile taşıma gücünün artmasının sebebinin kayma direncinin artmasına, oturma miktarlarının azalmasına sebebi zeminde kıvam artışına, kohezyonlu zeminlerde konsolidasyonun hızlanması ile kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma hassasiyetinin azalmasına sebebi ise zemin kütlelerinin geçirimsizliğinin artmasına dayandığını belirterek taş kolon uygulamasının zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanılmasının etkili bir yöntem olduğunu açıklamışlardır.

2.2.1 Birim Hücre İdealleştirilmesi

Barksdale ve Bachus (1983), yaptıkları çalışmada oturma ve denge problemleri için birim hücre kavramını açıklamışlardır. Her bir kolonu çevreleyen zemin kolon ile bir bütün gibi düşünülmelidir. Her bir kolonu çevreleyen zeminin etki alanı birim hücre kavramıyla alakalıdır. İki kolonun merkezden merkeze uzaklığına "s" denirse kare veya üçgen olarak idealleştirilen birim hücre kavramında dairenin çapı "D_e"; karede 1,13s üçgende ise 1,05s olarak değiştirmektedir. Sonuç olarak bir kolon ve etki alanından oluşan eşdeğer silindirin çapı "D_e"; tanımı ise birim hücredir. Şekil 2-1'de taş kolonlarda birim hücre idealleştirilmesi gösterilmiştir.

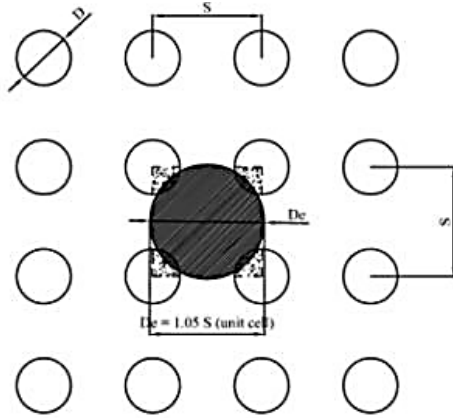
Taş kolon alanının zeminin etki alanına bölünmesi ile alan değiştirme oranı (a_s) bulunmaktadır. Zemin iyileştirmesinin etkinliği alan değişim oranına bağlı olarak değişmektedir. Taş kolon uygulamalarının çoğunda alan değişim oranı (a_s) yaklaşık olarak % 15 - 35 arasında değişmektedir. Uygulama alanında değiştirilen zemin hacmini belirlemek amacıyla, alan değişim oranı;

$$a_s = \frac{A_s}{A} \quad 2.1$$

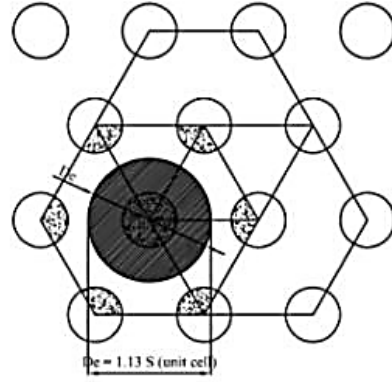
bağıntısı ile bulunmaktadır. Burada “ A_s ” taş kolon alanı, “ A ” toplam birim hücre alanını temsil etmektedir. Bu oran birim hücre çaplarını kullanarak aşağıdaki denklemlerle de bulunmaktadır.

$$a_s = 0,907\left(\frac{D}{S}\right)^2 \quad (\text{üçgen yerleşim}) \quad 2.2$$

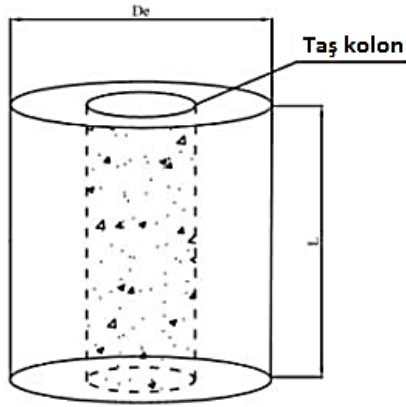
$$a_s = 0,783\left(\frac{D}{S}\right)^2 \quad (\text{kare yerleşim}) \quad 2.3$$



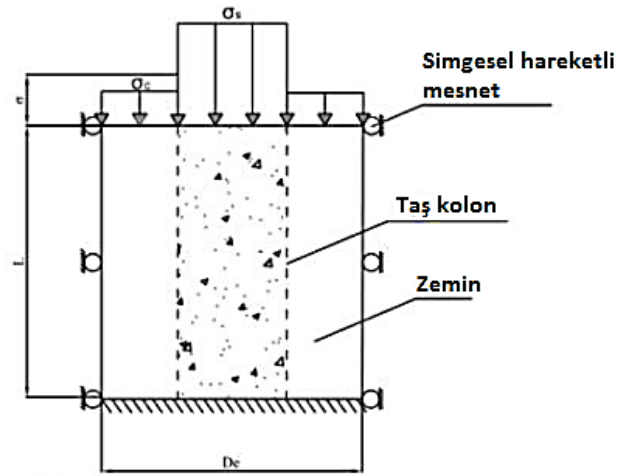
a) Grup kolonlarda kare birim hücre idealleştirilmesi



b) Grup kolonlarda üçgen birim hücre idealleştirilmesi



c) Birim hücre



d) Birim hücre kesit görünümü

Şekil 2-1 Taş kolonlarda birim hücre idealleştirilmesi

Taş kolonun azami taşıma gücü onu çevreleyen zeminin kayma direncine bağlıdır. Bu yüzden, denklem 2.4’de taş kolonu çevreleyen zeminin kayma direnci ele alınarak, bir grup içerisindeki taş kolonun veya tekil taş kolonun azami taşıma gücünü ifade etmek için uygundur.

$$q_{ult} = c \times N_c \quad 2.4$$

q_{ult} = Taş kolonun azami taşıma gücü

c = Taş kolonu çevreleyen kohezyonlu zeminin drenajsız kayma direnci

N_c = Taş kolonun taşıma gücü katsayısı ($18 \leq N_c \leq 22$)

Mitchell ve Katti (1981), titreşimli yer değiştirme metoduyla üretilen kolonlar için $N_c = 25,0$ değerini, Datye (1982), ise aynı durumdaki taş kolonlar için 25,0 ila 30,0 arasında değişen değerlerin kullanılmasının daha doğru sonuçlar vereceğini söylemiştir.

2.2.2 Gerilme Yoğunlaşma Faktörü

Taş kolona yük uygulandığı zaman, uygulanan yük kolonda kesme dayanımının artmasına ve kolonu çevreleyen zeminde meydana gelebilecek oturma miktarlarının azalmasına sebep olmaktadır. Kolondaki gerilme yoğunluğu, taş kolon ve zemin arasındaki rijitlik farkından kaynaklanmaktadır. Kolonda ve zeminde meydana gelebilecek dönme miktarları eşittir. Bu eşitliğin sağlanması için kolondaki gerilmenin taş kolonu çevreleyen zeminden daha fazla olması gerekmektedir.

Aboshi ve diğerleri (1979), taş kolon çaplarının genellikle 60,0 cm ila 80,0 cm arasında değiştiğini kimi durumlarda 200,0 cm'ye kadar arttığını söylemişlerdir. Gerilme yoğunlaşma faktörü ile taş kolon ve temelin oluşturduğu karmaşık temelin özelliklerini açıklamışlardır. Karmaşık temele yükleme yapıldığı zaman, kolonu çevreleyen zemin ve kolonun deformasyon özellikleri farklı olduğu için gerilme kolon üzerinde yoğunlaşmaktadır. Gerilme yoğunlaşma faktörü kohezyonlu zeminlerde denklem 2.5'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \quad 2.5$$

$$\sigma = \sigma_s \times \alpha_s + \sigma_c \times (1 - \alpha_s) \quad 2.6$$

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{1 + (n-1)\alpha_s} = \mu_c \sigma \quad 2.7$$

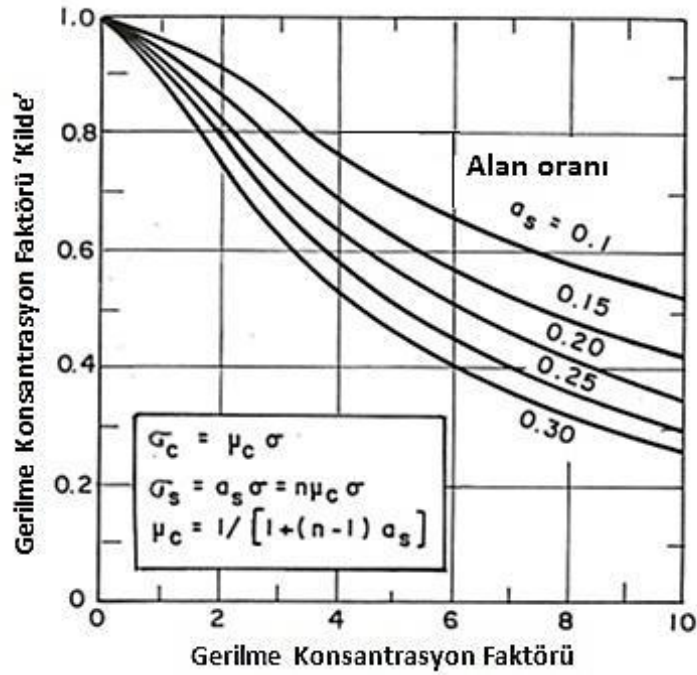
$$\sigma_s = \frac{\sigma n}{1 + (n-1)\alpha_s} = \mu_s \sigma \quad 2.8$$

Yukarıdaki denklemlerde “n” gerilme yoğunlaşma faktörü, “ σ ” uygulanan toplam gerilme, “ σ_s ” taş kolon gerilmesi, “ σ_c ” kohezyonlu zemin gerilmesi, “ μ_s / μ_c ” zemin ve kolondaki gerilme oranını temsil etmektedir.

Barksdale ve Bachus (1983), yukarıdaki denklemlerin geliştirilmesinde yapılan kabulleri aşağıdaki gibi sıralamışlardır.

- ✓ Genişletilmiş birim hücre kavramı geçerlidir.
- ✓ İstatistiksel sonuçlar memnun edicidir.
- ✓ Gerilme yoğunlaşma değeri bilinebilir veya tahmin edilebilir.

Gerilme yoğunlaşma faktörünün taş kolonu çevreleyen zeminin aldığı gerilmeye etkisi Çizelge 2-4'de gösterilmiştir (Bachus ve Barksdale, 1989).



Çizelge 2-4 Gerilme Yoğunlaşma Faktörünün Değişimi (Bachus ve Barksdale, 1989)

Gerilme yoğunlaşma faktörü "n", zemin ve taş kolon arasındaki görece rijitlik farkından, taş kolon uzunluğundan, alan oranından ve taş kolon üzerine serilen daneli malzemenin özellikleri gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Taş kolonlarda gerilme yoğunlaşma faktörü üzerine yapılan araştırmalar Tablo 2-1'de gösterilmiştir (Barksdale ve Bachus, 1983). Gerilme yoğunlaşma faktörü genellikle 2,5 ile 5,0 arasında ölçülmektedir.

Tablo 2-1 Taş Kolonlarda Gerilme Yoğunlaşma Faktörü üzerine yapılan araştırmalar (Barksdale ve Bachus, 1983)*

Deney Türü	Taş Kolon Tasarımı	Konum	Gerilme Yoğunlaşma Faktörü (n)	Gerilme Yoğunlaşma Faktörünün Zamanla Değişimi	Taş Kolon Uzunluğu (m)	Yeraltı Durumu
Toprak Set	Kare Şeklinde; s=1,7m d=0,9m as=0,25	Rouen, Fransa Vautrain, 1977	2,8 (ort)	Yaklaşık olarak sabit	6,6-7,8	Yumuşak Kil c=19-29 kN/m ²
Yükleme Deneyi (45 Taş kolon)	Üçgen Şeklinde; s=1,4m d=1,2m as=0,43	Hampton, Virginia Goughnour ve Bayuk, 1979	3,0 (başlangıç) 2,6 (final)	Azalan	6,15	Çok yumuşak ve yumuşak silt ve kil ile kum c=9,6-38 kN/m ²
Dolgu Deneyleri (14 Taş kolon)	Kare Şeklinde; s=2,1m d=1,125m as=0,26	Jourdan Road Termial, New Orleans	2,4-2,6 (başlangıç) 4,0-4,5 (final)	Artan	19,5	Çok yumuşak kil ile organik, silt ve kum, gevşek killi kum, yumuşak kumlu kil
Toprak Set	as=0,1-0,3	Japanese Studies -Kum Sıkıştırma Kazıkları Aboshi ve diğerleri, 1979	2,5-8,5 4,9 (ort)	Artan	Değişken	Çok yumuşak ve yumuşak çökeller
Model Deneyleri	d=2,9m as=0,07-0,4	GaTech Model Deneyleri - birim Hücre Yaklaşımı Kum Kolon	1,5-5,0	Hafifçe artan sabit	Değişken	Yumuşak kil, gerilme konsantrasyonu as'nin artması ile ortaya çıkar

Aksi belirtilmedikçe, yüklemenin hemen altında ölçülen düşey gerilme*

2.2.3 Oturma Azalma Oranı

Çoğu araştırmacı taşıma gücü ve oturma miktarlarını tahmin etmek için teorik çözümler geliştirmişlerdir (Greenwood, 1970; Hughes ve diğerleri, 1976; Madhav ve Vitkar, 1978; Aboshi ve diğerleri, 1979; Jellali ve diğerleri, 2005); son taşıma gücü ve oturma miktarları hesaplarında homojenlik (iyileştirilen zemin aynı özelliklere sahip homojen bir malzeme olarak kabul edilir) kabulü yapmışlardır.

Bergado ve diğerleri (1991), yaptıkları araştırma sonucu oturma azalma oranını;

$$\beta = \frac{S_t}{S_0} \quad 2.9$$

ile bulunmaktadır. Denklemden;

S_t = İyileştirilmiş zeminde oturma miktarı,

S_0 = İyileştirilmemiş zeminde oturma miktarı,

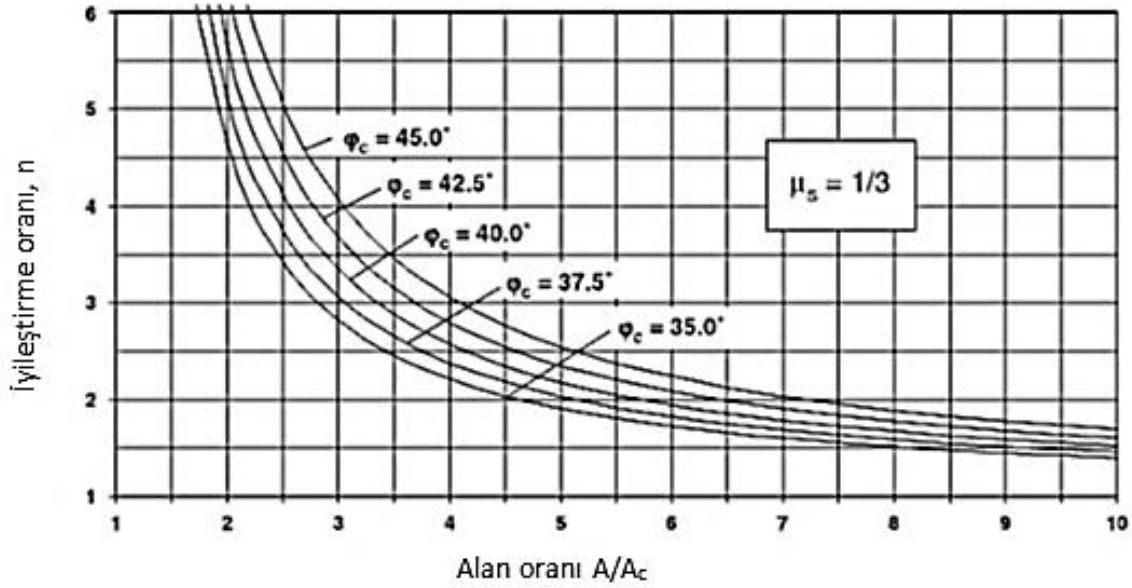
olarak temsil edilmektedir.

Oturma azalma oranı; alan değişim oranı, kayma direnci açısı, gerilme yoğunlaşma faktörü ve benzeri parametreler kullanılarak da hesaplanabilmektedir.

Priebe (1995), taş kolon ile zemin iyileştirmesinde oturma oranını tahmin etmek için analiz yöntemi geliştirmiştir. Literatürde bu yöntem Priebe yöntemi olarak bilinmektedir. Bu teoriyi geliştirirken bazı kabuller yapmıştır. Bu kabulde zemin elastik davranış gösterirken taş kolonun plastik davranış sergilediğini varsaymıştır. Yapılan diğer varsayımlar;

- ✓ Zemin ve taş kolonun oturma miktarları eşittir.
- ✓ İki malzemedeki de üniform gerilme mevcuttur.
- ✓ Kolon ve zeminin kütle yoğunluğu ihmal edilmiştir, bunun anlamı; zemin ve kolon arasındaki başlangıç gerilmesi farkı sadece temel üzerindeki yük dağılımına göre değişmektedir.
- ✓ Kolon sağlam tabakaya oturmaktadır.

Poisson oranı 1/3 iken seçilen kayma direnci açısı 35°-45° olduğunda önerilen tasarım grafiği Çizelge 2-5'de gösterilmiştir.



Çizelge 2-5 Titreşimli yer değiştirme için tasarım grafiği (Priebe, 1995)

2.2.4 Sonlu Elemanlar yöntemi

Taş kolonlar doğal zeminden daha yüksek geçirimsizlik, kayma direnci ve sertliği zemine ilave ederler bu üç iyileştirmenin zemindeki etkilerini görmek için birçok farklı çözüm geliştirilmiştir. Taşıma gücünü (Bergado ve diğerleri, 1996; Vesic, 1972; Hughes ve Withers, 1974), oturma iyileştirmesini (Priebe, 1995) ve radyal konsolidasyonu (Barron, 1948) analitik olarak incelemişlerdir.

Ambiliy ve Gandhi (2004), PLAXIS sonlu elemanlar programı ile zemini ve taş kolonu Mohr Coloumb's aksinel simetrik analiz yöntemini kullanarak incelemişlerdir ve farklı kayma direncine sahip kil zeminlerde model deneyler yaparak iki çalışmanın sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda; yükleme alanı olarak sadece taş kolon alanı kullanıldığında yüzeyden kolon çapının 0,5 ile 1,0 katı kadar derinlikte kabarma yenilmesi (yanal genişleme / bulging) ile yenilme gerçekleşmektedir.

Shahu ve Reddy (2011), ABAQUS yazılımını kullanarak üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır. Modelde malzeme özellikleri kil zeminde değiştirilmiş Cam-Clay modeli, taş kolonda ise Mohr Coulomb's elastik-mükemmel plastik modeli kullanmışlardır. Yaptıkları araştırma sonuçlarında taş kolonun kenarlarında eğilmenin arttığını dahası kolon merkezinde eğilme olmadığını söylemişlerdir. Bunun yanı sıra, oturmanın kolon merkezinde daha büyük olduğunu ve merkezden uzaklaştıkça oturmanın azaldığını ileri sürmüşlerdir.

Taş kolonun sayısal analizlerinde genellikle taş kolon ve zeminden oluşan kompleks bir modele ihtiyaç vardır. Canizal ve diğerleri (2012), taş kolonların sayısal modellenmesi için beş ana yaklaşım belirtmişlerdir:

- ✓ Düzlem Gerilme Yöntemi: Silindir kolonlar taş dolu çukur olarak modellenmektedir ve genellikle uzun dönemli yüklemelerde kullanılmaktadır (Van Impe ve De Beer, 1983).

- ✓ Eksenel Simetri Tekniği: Tanklar gibi dairesel yük altındaki silindirik kolonlar yerine taş halka şeklinde modellenmiştir (Elshazly ve diğeleri, 2008).
- ✓ Homojenizasyon Tekniği: Karma zemin parametreleri taş kolonlar ile iyileştirilmiş homojen zemini modellemek için kullanılır (Schweiger, 1989).
- ✓ 3D Model: Taş kolon ile iyileştirilmiş zemin sisteminin 3D modellenmesi (Weber ve diğeleri, 2008).
- ✓ Birim Hücre Yaklaşımı: Eksenel simetrik modellerde sadece bir kolon ve onu çevreleyen zemini içeren birim hücre modelidir (Balaam ve Booker, 1981).

2.3 Taş Kolon Yapım Yöntemleri

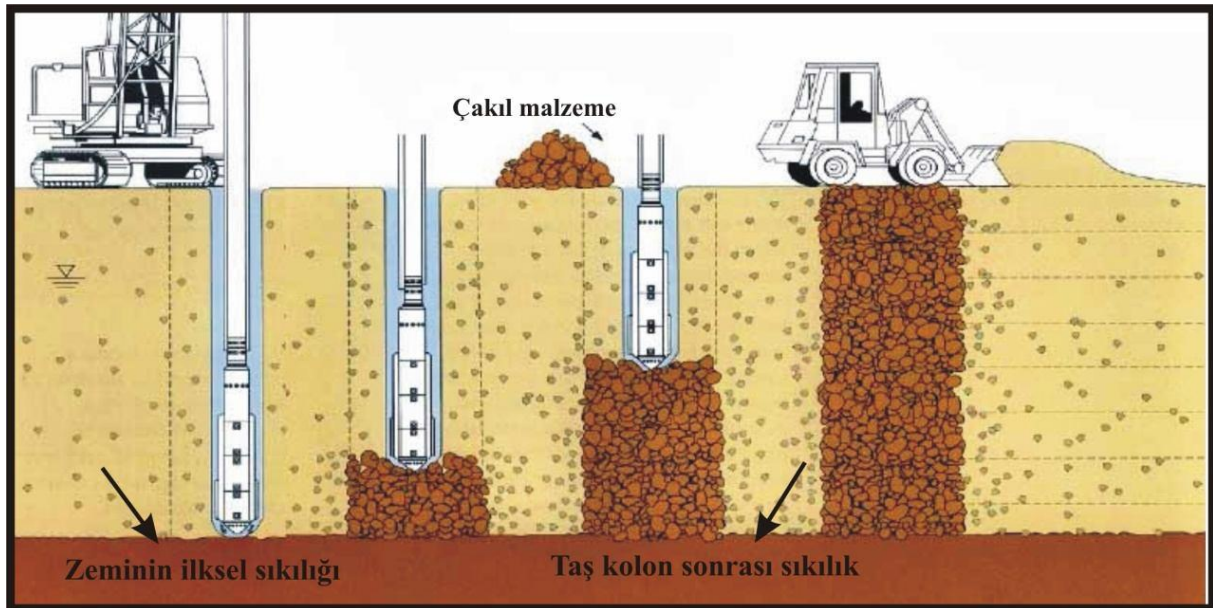
Taş kolon uygulamasında farklı yapım yöntemleri geliştirilmesine rağmen;

- ✓ Zemin içerisinde tasarımda belirtilen deliğin oluşturulması,
- ✓ Taş kolon malzemesinin yerleştirilmesi,
- ✓ Sıkıştırma,

olarak 3 temel aşamadan oluşmaktadır. Taş kolon performansını yapım yöntemleri etkilemektedir. İyileştirmeden beklenen sonuçlar göz önüne alınarak yapım yöntemi seçilmelidir.

2.3.1 Titreşimli Kompaksiyon Yöntemi (Vibro Compaction)

Titreşimli kompaksiyon yöntemi, ince dane oranı % 10'dan az olduğu (kohezyonsuz) zeminlerde derinlik titreşim aletleri sayesinde sıklığın artırılmasında kullanılır. Titreşim aleti istenilen derinliğe su veya hava jetleri (basıncılı su veya hava) sayesinde indirildikten sonra kademeli olarak (0,5 m aralıklarla) geri çekilmeye başlanır. Titreşimli kompaksiyon yerinde yapılan veya üstten beslenen geri dolgu ile tamamlanır. Titreşimli kompaksiyon yapım yöntemi Şekil 2-2'de gösterilmektedir.



Şekil 2-2 Titreşimli kompaksiyon yöntemiyle yapılan taş kolonların zeminde oluşturduğu sıkıştırma etkisi (Anonymous, 2004)

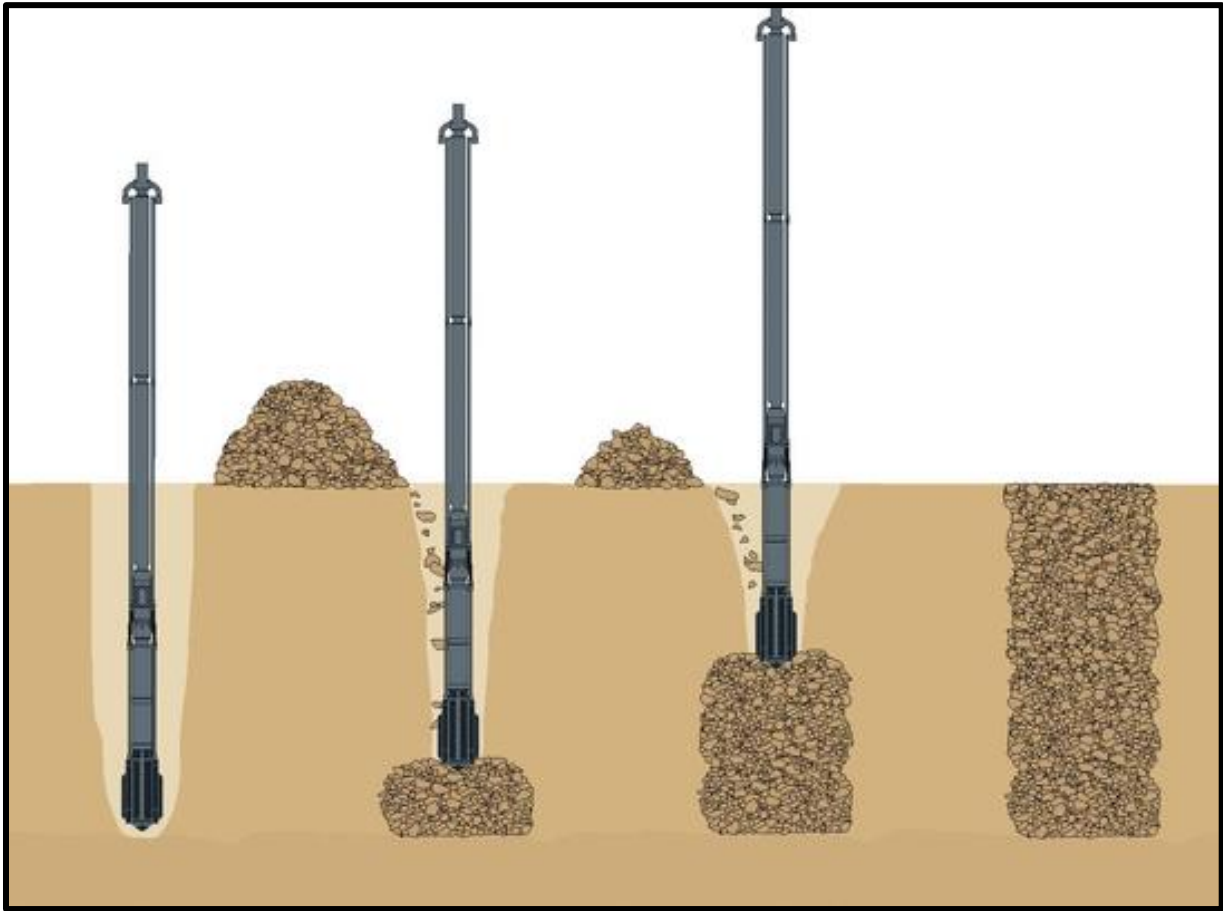
Titreşimli kompaksiyon yöntemi kullanılarak zemine yaklaşık % 70 - 80 oranında rölatif sıklık kazandırılır. Bu yöntem kullanıldığı zaman zeminde yapılan sıkıştırma işlemi zeminde hacim kaybına sebebiyet vermektedir, bu azalmayı dengelemek için kum takviyesi yapılarak arazi seviyesinin korunması gerekmektedir. Titreşimli kompaksiyon yöntemi kullanılarak zeminde 240,0 - 480,0 kPa civarında taşıma gücünde artış sağlanmaktadır (Keller, 2010).

Titreşimli kompaksiyon yöntemi uygulama bakımından ikiye ayrılır:

- ✓ Üstten beslemeli – Islak yöntem (Top feed – Wet Method)
- ✓ Alttan beslemeli – Kuru yöntem (Bottom feed – Dry Method)

2.3.1.1 Üstten beslemeli – Islak yöntem (Top feed – Wet Process)

Karışık kohezyonlu ve tabakalı zeminlerde sıkıştırma yapabilmek için üstten beslemeli - ıslak yöntem) kullanılmaktadır. Titreşim ve su jeti (basınçlı su) kullanılarak zeminde istenilen derinlikte uygun boyutlarda delik açılır. Prob etrafını su jeti (basınçlı su) ile temizlerken yüzeyden taş kolon malzemesi ilave edilerek taş kolon oluşturulur. Taş kolon imalatının tamamlanmasından sonra zemin yüzeyi silindir ile düzeltilir. Titreşimli yer değiştirme yöntemi Şekil 2-3’de gösterilmektedir.



Şekil 2-3 Titreşimli yer değiştirme yöntemi yapım aşamaları (Url -1)

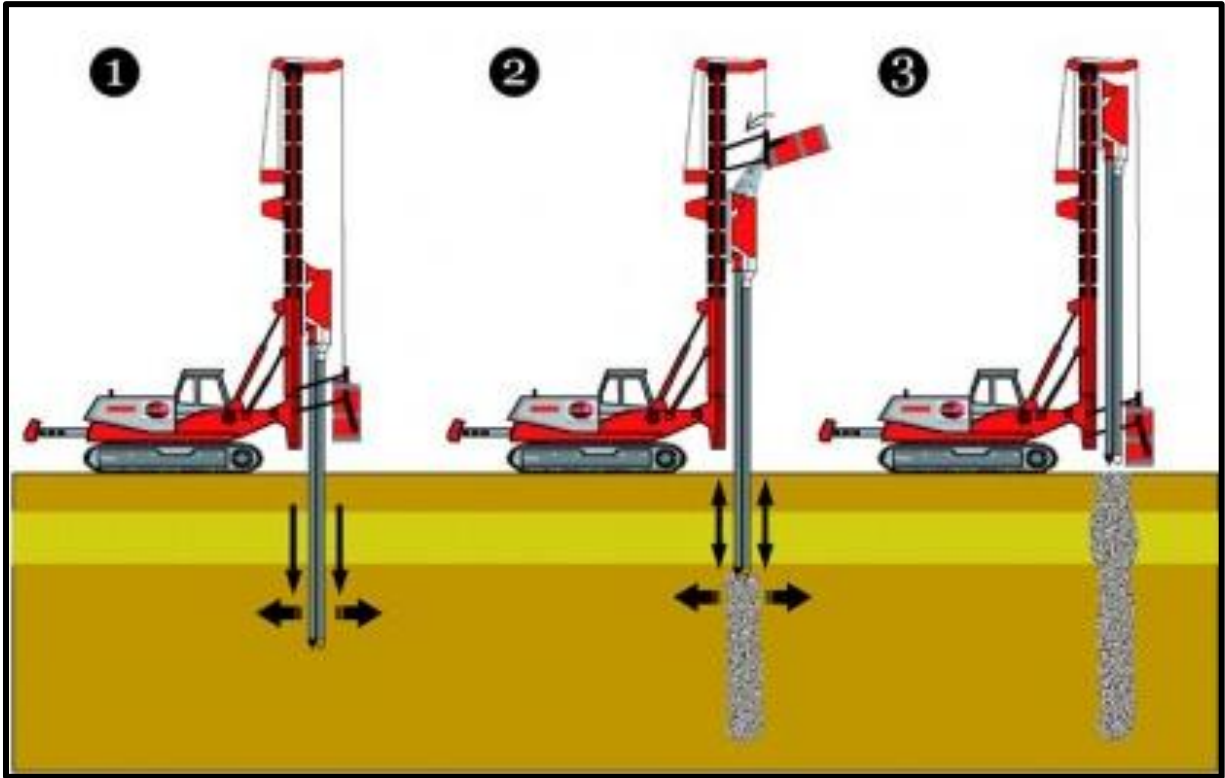
Taş kolonun kademeli oluşturulmasından dolayı, taş kolon delik çeperinde dengeye ulaşana kadar genişleme yapması söz konusudur. Bu nedenle taş kolonun çapı derinlik ile değişiklik gösterebilir. Bu yöntemde en önemli etken su jetidir. Su jeti, zemin içerisindeki ince daneli

zeminin taş kolonun içine sızmasını önleyerek geçirimsiz hale gelmesini engellemektedir ve açılan deliğin stabilizasyonunu sağlamaktadır.

Titreşimli yer değiştirme yöntemi yer altı su seviyesinin yüksek olduğu, zemin cinsi olarak yumuşak ile katı kıvamlı zemin ($c_u=15 - 50$ kPa) koşullarında iyi bir zemin iyileştirme yöntemidir. Yöntemin ıslak yöntem olarak adlandırılmasının nedeni önemli ölçüde su kullanılmasıdır. Bu yüzden uygulama alanında yeterli su kaynağı bulunmalıdır. Aynı zamanda kullanılan suyu uygulama alanından uzaklaştırılması gerekmektedir.

2.3.1.2 Alttan beslemeli – Kuru yöntem (Bottom feed – Dry Process)

Altan beslemeli - kuru yöntem (bottom feed-dry process), zayıf zemin veya dolgu zeminde istenilen derinliğe probun zemini titreşim ve kendi ağırlığı ile yanal olarak ötelemesi sonucunda taş kolon boyutlarına uygun delik oluşturulur. Probu belirli bir miktar yukarı çekilmesinin ardından taş kolon malzemesi kademeli olarak yerleştirilir. Her bir kademe ardından prob zemine tekrar indirilerek kuvvet uygulanır. Uygulanan bu kuvvet taş kolonun düşey olarak ve kuyu çeperine doğru radyal sıkışmasını sağlamaktadır. Bu yöntem üstten beslemeli-ıslak yöntemle göre daha sağlam tabakalarda ($c_u= 30 - 60$ kPa) ve yeraltı su seviyesinin derinlerde olduğu ortamlarda daha uygun olmaktadır. Şekil 2-4'da alttan beslemeli yöntemin yapım aşamaları gösterilmektedir.

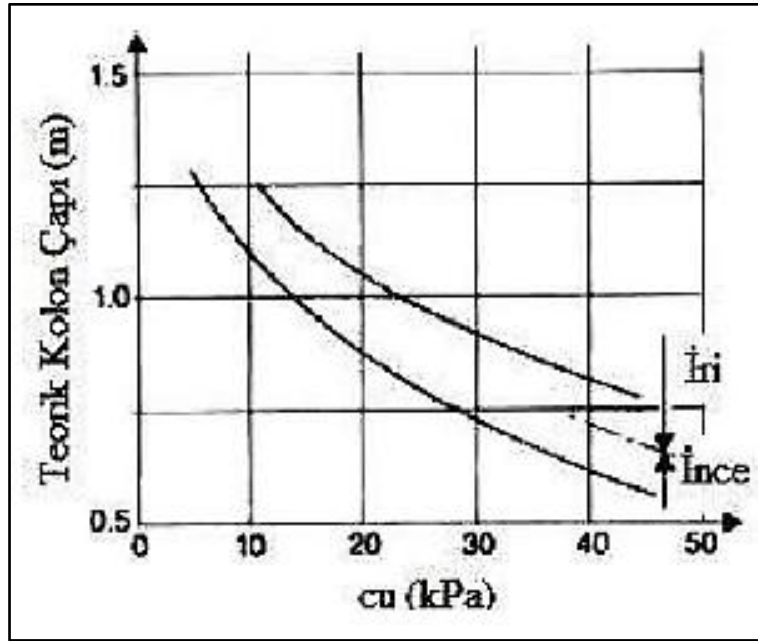


Şekil 2-4 Altan beslemeli yöntemin yapım aşamaları (Url -2)

2.4 Taş Kolon Yapımında Önemli Faktörler

2.4.1 Taş Kolon Çapı

Zemin dayanımı, imalat yöntemi ve istenilen iyileştirme oranı taş kolon çaplarının seçimini etkileyen faktörlerdir. Titreşimli kompaksiyon yöntemlerinde kolon çapları 100,0 cm, darbeli yöntemin kullanıldığı projelerde kolon çapları 80,0 cm ya da daha küçük çaplar tercih edilmektedir. Yapılan araştırmalar sonucu etkili kolon çapı ve kohezyonlu zeminlerin kayma direnci arasında Çizelge 2-6'da gösterilmektedir.



Çizelge 2-6 Kayma direncinin kolon çapına etkisi (Besancon ve diğerleri, 1984)

Taş kolon malzemesinin yerleştirilmesi esnasında uygulanan titreşim malzemenin zeminde yanal yer değiştirmesinden dolayı taş kolon çapı belirlenen çaptan daha büyük olmaktadır. Titreşimli yapım yönteminde kolon çapları sert kilde 0,6 m ve yumuşak kohezyonlu zeminde 1.1 m'ye kadar değişiklik göstermektedir (Ranjan, 1989).

2.4.2 Taş Kolon Uzunluğu

Taş kolonların uygulandığı zemin iyileştirme projelerinde taşıma gücünün artırılması ve oturmaların azaltılması için kolon boyunun sağlam tabaka derinliğine kadar indirilmesi istenmektedir. Sağlam tabakaya inmekteki amaç taş kolona uç direnci özelliği kazandırmaktır. Sağlam tabaka derinliğine indirilemediği durumlar da olabilmektedir, fakat böyle durumlarda taş kolonlarda uç direnci olmadığı için yüzen kolon davranışı göstereceklerdir. Bu gibi durumlarda taş kolonlar sadece çevre sürtünmesinden faydalanarak taşıma gücü ve oturma oranını azaltmaktadırlar.

Hugher ve Withers (1974) yaptıkları model çalışmalarda kolonlarının taşıma gücünün $L/D=4,1$ oranına kadar arttığını, bu orandan sonra kolonun taşıma gücüne bir etkisi olmadığını söylemişlerdir.

Najjar ve diğeri (2010), yaptıkları deneysel araştırmalarda kritik kolon boyunun kolon çapının 6 katına denk geldiği hipotezini savunmuşlardır.

2.4.3 Taş Kolonlar Arası Mesafe

Taş kolonlar arası mesafe herhangi bir kaynakta minimum veya maksimum olarak belirtilmemektedir. Taş kolonlar arası mesafe uygulanan yükler altında oluşacak kabul edilebilir oturma miktarlarına göre belirlenmektedir (Greenwood, 1970).

Buna ilaveten, taş kolonlar arasındaki mesafe zemin durumu, yükleme durumu, yerleştirme ve benzeri sebeplere dayanarak genellikle kolon çapının 2 veya 3 katı mesafe seçilmektedir. (IS 2003).

2.4.4 Alan Değişim Oranı

Taş kolon malzemesi ile değiştirilen zemin hacmi iyileştirilen zeminin performansını etkilemektedir. Taş kolonlarla iyileştirme yapılmış zeminde taşıma gücünün maksimum düzeyde olması için alan değişim oranının 0,25 veya daha fazla olması gerekmektedir (Wood ve diğeri, 2000).

2.4.5 Gerilme Yoğunluk Faktörü

Taş kolon iyileştirmesi yapılmış olan zeminde yükleme yapıldığı zaman, zeminin taş kolonla arasındaki rijitlik farkından dolayı çevre zeminde gerilme yoğunluğu azalırken taş kolondaki gerilme yoğunluğu artmaktadır. Gerilme yoğunluk faktörü konsolidasyon ile birlikte artmakta (Juran ve Guermazi, 1988; Han ve Ye, 1991) ve taş kolon uzunluğu boyunca azalmaktadır.

Bergado ve diğeri (1988), yaptıkları araştırmada uygulanan yükün artması ile gerilme yoğunluk faktörünün azalmakta olduğunu öne sürmüşlerdir.

Shahu ve diğeri (2000), alan değişim oranının artması gerilme yoğunluk faktörünü de artırılmaktadır diyerek alan değişim oranı ile gerilme yoğunluk faktörü arasındaki bağlantıyı açıklamışlardır.

2.4.6 Taş Kolon Malzemesinin Dane Çapı Dağılımı

Taş kolon malzemesi olarak kırmataş veya çakıl kullanıldığı zaman malzemenin temiz, organik malzemelerden veya istenmeyen malzemelerden ayrılmış olması gerekmektedir (Barksdale ve Bachus, 1983). Taş kolon yapımında kullanılacak malzemenin seçim kriterlerinde bulunabilirliği, uygunluğu ve ekonomik olması önemlidir. Üstten beslemeli yöntemlerde, maksimum dane çapı 40 mm olarak seçilmelidir çünkü makineyi tıkasından kaçınılmalıdır (Greenwood ve Kirsch, 1984).

Brown (1977) kullanılacak dane çapı dağılımı için aşağıdaki uygunluk denklemini önermiştir.

$$\text{Brown uygunluk numarası} = 1,7 \sqrt{\frac{3}{D_{50}^2} + \frac{1}{D_{20}^2} + \frac{1}{D_{10}^2}} \quad 2.10$$

Denkleimde yer alan D_{50} , D_{20} ve D_{10} ; elekte %50, %20 ve %10'dan geçen ağırlıklardır. Uygunluk numaraları ve değerlendirme değerleri Tablo 2-2'de gösterilmektedir.

Tablo 2-2 Brown uygunluk numaraları

Uygunluk numarası	0-10	10-20	20-30	30-50	>50
Değerlendirme	Mükemmel	İyi	Orta	Kötü	Uygun Değil

2.4.7 Yapım Yönteminin Etkisi

Taş kolon uygulaması esnasında tercih edilen yapım yöntemi taş kolon davranışlarını etkilemektedir. Yöntem değişikliği taş kolonu çevreleyen zeminde farklı yoğrulmalar oluşturmaktadır bu da iyileştirilmiş zeminin kayma direncini etkilemektedir. İnce daneli zeminlerde taş kolon uygulamasının dezavantajı, taş kolon içerisine ince daneli malzeme girerek, kolon direncini ve geçirimsizliğini azaltmaktadır. Titreşimli-yer değiştirme yönteminde su jeti (basınçlı su) ince daneli zeminleri uzaklaştırır. Darbeli yöntemde muhafaza kullanılması zemin etkilenmesini en aza indirir ve muhafaza borusu ince daneli zeminlerin taş kolona girişini de engellemektedir.

Taş kolon yapım yönteminde kullanılan titreşim aleti kolon yapımı esnasında çevre zeminde yatay yer değiştirmeye sebebiyet vererek sıkışmasını da sağlamaktadır.

Alamgir ve Zaherr (2001), iyileştirme yapılmamış ve taş kolonlarla iyileştirilmiş zeminde SPT deneyleri yaparak iyileştirmenin ne kadar etkili olduğunu araştırmışlardır. Yumuşak zeminlerde yapılan deneyde arazideki SPT değerinin taş kolon yapımından sonra artığı gözlemlenmiştir. İyileştirme yapılmamış zeminde SPT-N değerleri 2,0 ile 7,0 arasında değişirken taş kolonlarla iyileştirme yapıldığında SPT-N değerlerinin 5,0 ila 12,0 arasında artmaktadır.

2.4.8 Zemin Tipi ve Konsolidasyon Etkisi

Taş kolon davranışında zemin geçirimsizliği etkilidir. İyileştirilmiş zemine yükleme yapıldığında zemin sıkışabilirliği düşük ise yük, zemin ile kolon arasında hemen hemen eşit paylaşılır. Taş kolon düşey dren olarak çalıştığında yüklenen zemin oturma yapar, taş kolon yükü yavaş yavaş alır.

Taş kolonun direnci zemin direncine bağlı olarak değişmektedir. Taş kolon ile zemin arasındaki gerilme yoğunluğu oranı, yaklaşık olarak zemin ile kolon arasındaki sıkılık oranına eşittir.

2.5 Taş Kolonlarda Yük Transfer Mekanizmaları

2.5.1 Uç Dirençli Taş Kolon

Taş kolonların tasarım aşamasında sağlam zemine oturtulmaları öngörülür. Sağlam zemine oturan taş kolonlarda, kolon ile zemin arasında gerilmeler, yanal basınçlar ve ara kesit

sürtünmesi oluşur. Yüzeyle temas durumunda tekil taş kolon yanıl genişlemeye çalışır bunun sonucu olarak kolon-zemin ara kesitinde pasif basınçlar oluşur. Yükleme taş kolon üzerine yapıldığında zemin ve taş kolonun farklı oturması sonucu ara kesit boyunca kayma gerilmeleri oluşur ve kolondaki düşey gerilmeler derinlikle azalır. Ara kesitte oluşan kayma gerilmeleri dikkate alınmadan tahmin edilen oturmalar gerçekleşen oturmalarından yüksek olur.

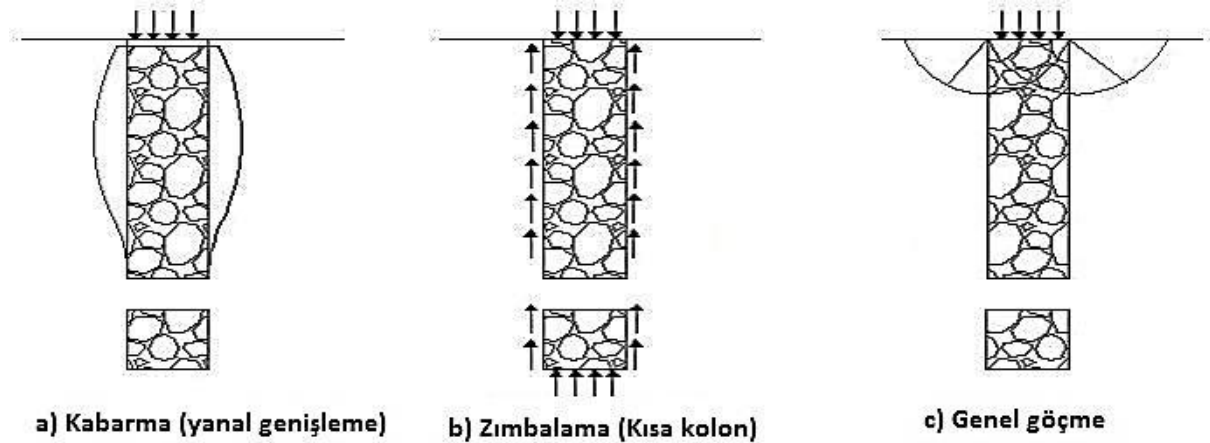
2.5.2 Yüzen Taş Kolonlar

Yüzen taş kolonların yük transfer mekanizması yüzen kazıklara benzetilerek ana yük taşıma mekanizması yüzeyle temasından kaynaklanmaktadır. Kolon çapının 3 - 4 katına karşılık gelen taş kolon boylarında yük transferi söz konusu değildir.

2.6 Taş Kolonların Göçme Mekanizmaları

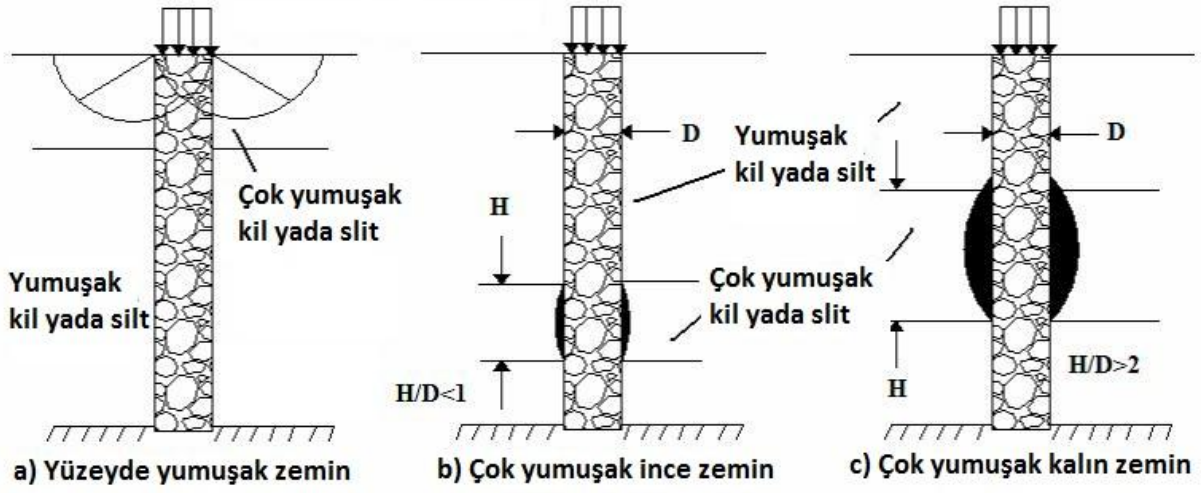
2.6.1 Tekil Taş Kolonların Göçme Mekanizmaları

Hughes ve Withers (1974), yüzen kolonlarda kolon çapının 3 - 4 katı fazla uzunlukta olan kolonların yanıl genişleme yaparak (kabarma/şişme) yenildiğini Şekil 2-5 (a)'da göstermişlerdir. Kolon boyunun çapın 2 - 3 katı kadar olduğu durumlarda kolon ucunda taşıma gücünün aşılması olarak yenilme meydana gelmektedir ve Şekil 2-5 (b)'de gösterilmiştir. Sağlam tabakaya oturan kısa kolonların göçme mekanizması yüzeyle yakın kısımda taşıma gücünün aşılması olarak genel yada yerel göçme olarak Şekil 2-5 (c)'de gösterilmiştir (Juran ve diğerleri, 1988).



Şekil 2-5 Tekil taş kolon göçme mekanizmaları (Juran ve diğerleri, 1988)

Tabakalı zeminlerde gerçekleşen göçme mekanizmaları Şekil 2-6'da gösterilmektedir.



Şekil 2-6 Tabakalı zeminlerde gerçekleşen taş kolon göçme mekanizmaları (Barksdale ve Bachus, 1983)

2.6.2 Grup Taş Kolonların Göçme Mekanizmaları

Grup taş kolonlardaki her bir kolonun taşıma gücü tekil taş kolonun taşıma gücünden daha fazladır. Rijit temeller ve geniş alanlarda yüklenmiş dolgularda taş kolon uygulamasında taş kolon ve zemindeki oturmalar yaklaşık olarak eşittir. Fakat iki durumda davranış farklılıkları bulunmaktadır. Rijit temelde kesme dayanımı hemen yüzye oluşur ve yanal genişlemeyi azaltmaktadır. Dolgularda yanal toprak basıncı zemindeki yanal ötelenmeye katkı sağlamaktadır.

Barsdale ve Bachus (1983), grup taş kolonlardaki komşu kolonların ilişkisini irdellemek için laboratuvar deneyleri yapmışlardır. 2×3 şeklinde oluşturulan grup taş kolonların deney sonuçlarına göre kabarma (şişme/yanal genişleme), taş kolonların iç yüzeyine değil dış yüzeyine doğru meydana gelmiştir.

Rao ve diğerleri (1997), grup taş kolonların davranışları üzerine laboratuvar deneyleri yapmış ve taş kolonlar arasındaki mesafenin taş kolonların davranışını önemli derecede etkilediğini görmüşlerdir. Taş kolonlar arasındaki mesafe taş kolon çapının 3 katından az olduğu durumda taş kolonların birbirlerini etkilediği sonucuna varmışlardır.

2.7 Taş Kolonların Taşıma Gücü

2.7.1 Tekil Taş Kolonların Taşıma Gücü

Taş kolonlar yumuşak kil zeminde uygulandığında üç eksenli gerilme durumunda kolon ile zeminin limit gerilme durumunda olduğu varsayılan limit analiz yöntemi kullanılmaktadır. Limit analiz yönteminde taş kolonu destekleyen yanal çevre gerilmesi " σ_3 " kolonu çevreleyen zeminde pasif direnç olarak alınır. Kolon yenilme durumunda düşey gerilme " σ_1 ", taş kolon malzemesinin pasif direnç katsayısı " K_p ", toplam gerilmesi " σ_3 " olarak alınırsa plastik teori kavramına göre denklem 2.11 yazılabilmektedir.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = K_p = \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \quad 2.11$$

“ ϕ_s ” taş kolon malzemesinin kayma direnci açısıdır.

Hughes ve Withers (1974), taş kolonda meydana gelen kabarma (yanal genişleme) yenilmesinin presiyometre deneyinde gelişen boşluk ile benzer özellikler taşıdığını öne sürmüşlerdir. Gibson ve Anderson’un (1961), sürtünmesiz ve sonsuz uzunlukta genişleyebilir bir silindirik boşluk için geliştirdikleri elasto-plastik teori, taş kolonu çevreleyen zeminde oluşacak drenajsız kayma gerilmesi hesaplamak için kullanılabilir.

$$\sigma_3 = \sigma_{r0} + c_u \left(1 + \ln \frac{E_s}{2c(1+\nu)} \right) \quad 2.12$$

σ_3 = Drenajsız toplam gerilme

σ_{r0} = Kolon yapımından sonraki radyal gerilme

E_s = Zeminin elastisite modülü

olarak tanımlanmaktadır. Taş kolonu çevreleyen zemindeki gerilme değeri $q_{ult} = \sigma_1$ kabul edilerek;

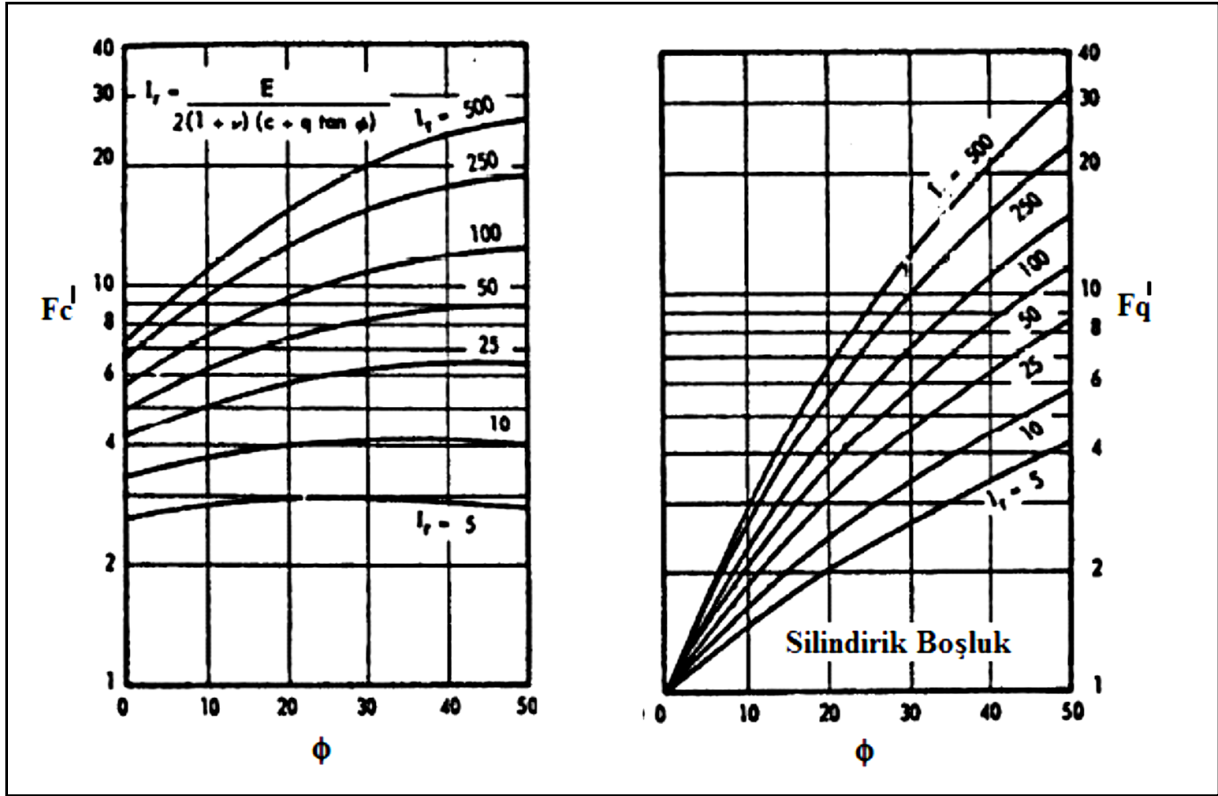
$$q_{ult} = \sigma_{r0} + c_u \left(1 + \ln \frac{E_s}{2c(1+\nu)} \right) \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \quad 2.13$$

Denklem 2.13 ile taş kolona uygulanabilecek nihai gerilme hesaplanabilmektedir.

Vesic (1972), tarafından geliştirilen silindirik boşluk gerilme teorisi, sürtünmeli ve kohezyonlu zeminleri de kapsamaktadır. Zemin elasto-plastik ve sonsuz bir silindir kabul edilerek taş kolonu çevreleyen zeminden dolayı oluşan yanal gerilme “ σ_3 ”;

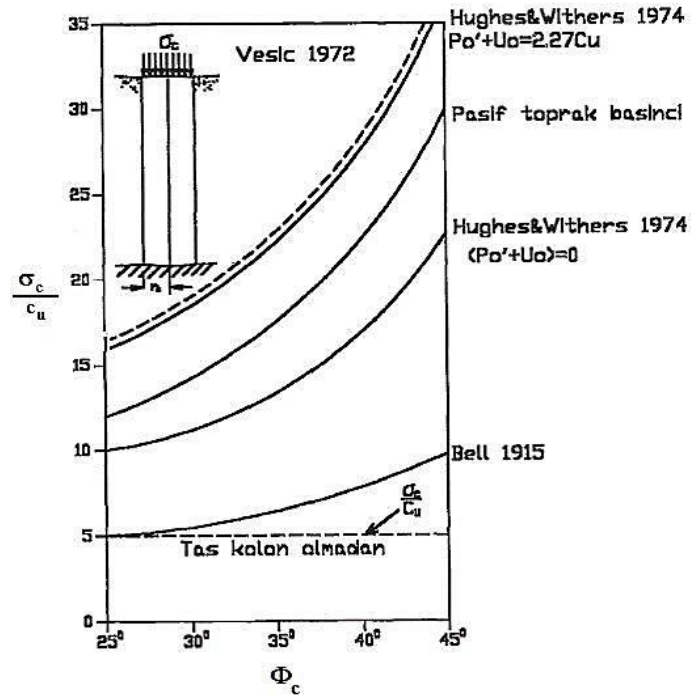
$$\sigma_3 = Fc' \times c_u + Fq' \times q \quad 2.14$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. “q” hesap yapılan derinlikteki ortalama gerilme, “ Fq' ” ile “ Fc' ” boşluk genişleme katsayılarını göstermektedir. “ Fq' ” ve “ Fc' ” için oluşturulmuş abaklar Çizelge 2-7' de gösterilmektedir.



Çizelge 2-7 Silindirik boşluk genişleme katsayıları (Vesic, 1972)

Brauns (1978), geliştirilen analitik yaklaşımları karşılaştırmışlardır. Greenwood ve Kirsch (1984), yapılan karşılaştırmayı tekrardan değerlendirmişlerdir ve çalışma sonuçları Çizelge 2-8'de gösterilmektedir.



Çizelge 2-8 Taş kolon taşıma güçlerinin karşılaştırılması (Greenwood ve Kirsch, 1984)

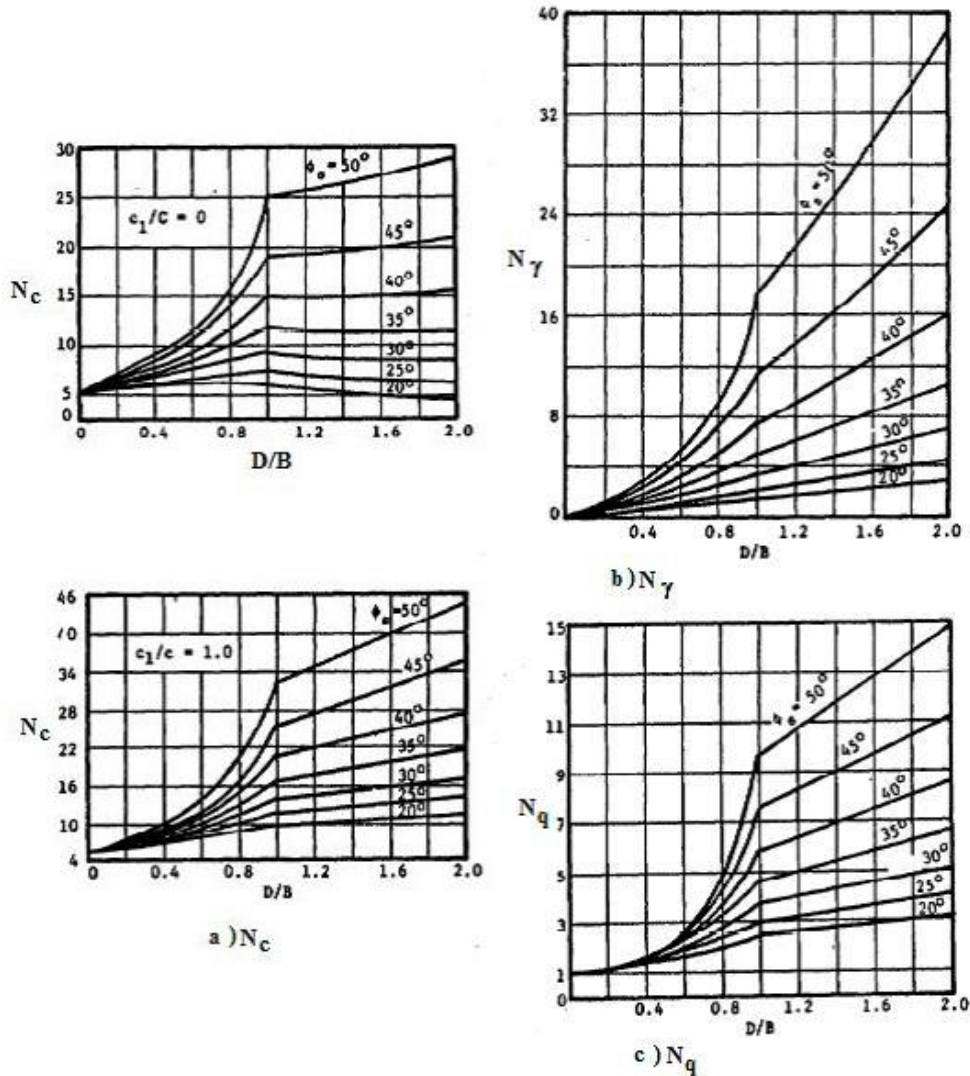
2.7.2 Kısa Taş Kolonların Taşıma Gücü

Kısa taş kolonlarda göçme mekanizmalarından biri zeminde veya kolonda genel ya da yerel olarak taşıma gücünün aşılması şeklinde meydana gelmektedir. Meydana gelebilecek diğer göçme mekanizması ise taş kolonun alttaki yumuşak zemine doğru zımbalama göçmesidir. Zımbalama göçme mekanizması klasik kazık tasarımındaki gibi uç taşıma gücü ve yanıl çevre sürtünmesi ile hesaplanmaktadır.

Madhav ve Vitkar (1978), taş kolonlar için sürtünmesiz zeminde düzlem şekil değiştirme çözümü geliştirmişlerdir. Şerit yükleme uygulandığında taşıma gücü, zemine veya taş kolona uygulanabilir;

$$q_{ult} = (\gamma_c \times B/2) \times N_\gamma + c_u \times N_c + \gamma_c \times D_f \times N_q \quad 2.15$$

N_γ , N_c ve N_q Çizelge 2-9'dan bulunabilmektedir.



Çizelge 2-9 Kısa taş kolonların taşıma gücü katsayıları (Madhav ve Vitkar, 1978)

2.8 Taş Kolonlarda Oturma Hesaplanması

2.8.1 Priebe Yöntemi

Priebe taş kolonlarda oturma hesaplanması için geliştirdiği yöntemde birim hücre kavramı için kabuller yapmıştır. Bu kabuller;

- ✓ Zemin ve taş kolonun düşey oturmaları eşittir.
- ✓ Zemin elastik, taş kolon plastik davranmaktadır.
- ✓ İki malzemede de üniform gerilme mevcuttur.
- ✓ Kolon ve zeminin kütle yoğunluğu ihmal edilmiştir, bunun anlamı; zemin ve kolon arasındaki başlangıç gerilmesi farkı sadece temel üzerindeki yük dağılımına göre değişmektedir.
- ✓ Kolon sağlam tabakaya oturmaktadır.
- ✓ Elastik zemindeki radyal deformasyon, sonsuz uzunluktaki içi boş silindir kabulü ile elastik model ile belirlenir.
- ✓ Zemindeki hacim değişikliği kolonun düşey kısalması ile ilgilidir.

Priebe yönteminde oturma azaltım faktörü, alan değişim oranı ve taş kolon malzemesinin kayma direnci açısının bir fonksiyonu olarak bulunmaktadır.

2.8.2 Hughes Yöntemi

Hughes de geliştirdiği yöntemde kabuller yapmıştır. Bu kabuller;

- ✓ Taş kolon sıkışmazdır.
- ✓ Taş kolonda düşey ve yanal gerilme değişmez.
- ✓ Yanal basınç başlangıçtaki yanal basınçtan daha az olduğu durumda taş kolonun yatay ötelenmesi sıfırdır.

Hughes yaptığı oturma hesabını iki durumda incelemektedir. Birinci durumda taş kolon ile zemin arasındaki kayma direnci gerilmeleri ihmal edilmektedir. İkinci durumda ise taş kolon ile zemin arasındaki kayma gerilmeleri dikkate alınmaktadır.

Taş kolon ile zemin arasındaki kayma gerilmelerinin ihmal edildiği durumda, zemin tabakalandırılmıştır. Taş kolonda oluşan aksenal gerilmeyi kullanarak radyal gerilme hesaplanmaktadır. Radyal ötelenmenin bulunabilmesi için presiyometre deneyi kullanılarak tabakalı zeminin gerilme şekil değiştirmelerinden tabakaların radyal ötelenmesi bulunmuştur. Kolonun sıkışmaz kabulü ile düşey ve yatay ötelenmeler arasında;

$$\delta_n = \frac{2 \times H_n \delta_m}{r} \quad 2.16$$

denklem 2.16 kullanılarak tabakaların düşey ötenlenmesi bulunmaktadır. Denklem 2.16'da;

δ_n = Her bir tabakanın düşey ötelenmesini,

H_n = Tabaka kalınlığını,

δ_m = Her bir tabakanın yatay ötelenmesini,

temsil etmektedir.

Taş kolon ile zemin arasındaki kayma gerilmesi kolonun en üst noktasından maksimum gerilme noktasına kadar artar, yük artışının olması ile kolon kenarlarındaki kayma gerilmeside maksimum değere ulaşır ve 5,0 m derinlikte sıfırlanır. Ara kesitte meydana gelen kayma gerilmelerinin hesaba katılması eksenel gerilmelerde derinlikle azalma sağlamaktadır. Kayma gerilmelerinin hesaba katıldığı ikinci durum birinci duruma göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir.

2.8.3 Konsolidasyon Hızı

Taş kolon iyileştirme tekniğinin kullanıldığı durumda zemindeki konsolidasyon hızı kum dren kullanımında olduğu gibi düşey ve radyal yönde olmaktadır. Konsolidasyon yüzdesi;

$$U = 1 - (1 - U_z) \times (1 - U_r) \quad 2.17$$

bağıntısı ile bulunmaktadır. Burada;

U = Düşey ve radyal yöndeki konsolidasyon yüzdesi,

U_z = Düşey yöndeki ortalama konsolidasyon yüzdesi,

U_r = Radyal yöndeki ortalama konsolidasyon yüzdesi ,

olarak verilmektedir. Zaman faktörü ise;

$$T_v = \frac{C_v t}{H_d^2} \quad 2.18$$

bağıntısı ile bulunmaktadır. Burada;

C_v = düşey yöndeki konsolidasyon katsayısı,

t = Geçen süre,

H_d = Drenaj boyu,

olarak verilmektedir. Radyal yöndeki konsolidasyon için boyutsuz zaman faktörü;

$$T_r = \frac{C_w t}{D_e^2} \quad 2.19$$

bağıntısı ile bulunmaktadır. Burada;

T_r = Radyal yöndeki zaman faktörü,

C_w = Radyal yönde konsolidasyon katsayısı,

D_e = Birim hücre eşdeğer çapı,

olarak hesaplanmaktadır.

2.9 Taş Kolon İyileştirmesinin Faydaları

2.9.1 Taşıma Gücünün Artırılması

Zeminin kayma direnci açısı ve kohezyon değeri taş kolonların taşıma gücünü etkilemektedir. Taş kolon yapımında titreşimli sistemlerin kullanılması zeminde meydana gelen sıkışma ile zeminin kayma direnci açısını yükselterek taşıma gücünü artırmaktadır.

2.9.2 Oturma Oranının Azaltılması

Zeminde meydana gelebilecek oturma miktarını zeminin sıkışma katsayısı ve konsolidasyon derecesi etkilemektedir. Taş kolon ile oturma oranının azaltılması sağlanmak isteniyorsa zeminde sıkışma katsayısını artırmak gerekmektedir.

Taş kolonların kullanıldığı zeminlerin iyileştirilmesinde oturma hesapları Priebe'nin geliştirdiği yöntem ve diğer yöntemlerle hesaplanabilmektedir. Priebe yönteminde alan değiştirme oranına ve taş kolonun kayma direnci açısına bağlı bir iyileştirme faktörü belirlenmektedir.

İyileştirilmemiş bölgedeki oturmanın iyileştirilmiş bölgedeki oturmaya oranı hedeflenen oturma iyileştirmesi oranını vermektedir (Clemente ve Davie, 1999). Taş kolonun oturmalara etkisini ve taş kolon tasarımının nasıl yapıldığını Clemente ve Davie (1999) incelemiştir. Çalışmada kullanılan granüler, suya doygun kohezyonlu ve aşırı konsolide zeminlerin bulunduğu deney bölgelerinde oturma sonuçları elde edilmiştir. Yapılan deneylerin değerlendirilmesi sonucunda taş kolon tasarım koşullarının oturma ve sıvılaşmaya bağlı olduğu söylenebilmektedir.

2.10 İyileştirilmiş Zemin Parametreleri

Taş kolonlarla iyileştirme yapılırken önemli olan taş kolon uygulamasının yapıldığı zemin ile taş kolon yapımında kullanılan malzemenin zeminde oluşturacağı yeni parametreler ile zeminde ne kadarlık bir iyileştirme sağlayacağıdır. Priebe'e (1995) göre taş kolon uygulaması ile sağlanan davranışın belirlenebilmesi için geniş çaplı arazi deneylerine ihtiyaç olmaktadır. İyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zemin parametreleri karşılaştırılarak iyileştirme derecesine bakılmalıdır.

Priebe (1995), iyileştirilmiş zemin parametrelerinin belirlenebilmesi için taş kolonun iyileştirme etkisi ile zeminin başlangıçtaki durumunu karşılaştırmaktadır. Buradan da bir iyileştirme faktörü elde etmektedir.

2.10.1 İyileştirme Faktörü Hesabı

Priebe (1995), tarafından önerilen yöntemde, kolonun sağlam tabakaya oturtulduğu, kolon ve zeminin sadece yatay deformasyonlar sonucu oturduğu kabul edilmiştir. Kolon yapımı sırasında taş kolonu çevreleyen zeminin yer değiştirmeye zorlanmasından dolayı yanal

direncin yanal toprak basıncı katsayısının $K=1$ olduğu varsayılmaktadır. Buradan çıkarılan iyileştirme fakörü “ n_0 ”;

$$K_{ac} = \tan^2\left(45 - \frac{\phi_c}{2}\right) \quad 2.20$$

$$f(\mu_s, A_c / A) = \frac{(1 - \mu_s)(1 - A_c / A)}{1 - 2\mu_s + A_c / A} \quad 2.21$$

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \left(\frac{1/2 + f(\mu_s, A_c / A)}{K_{ac} f(\mu_s, A_c / A)} - 1 \right) \quad 2.22$$

bağıntısı ile bulunmaktadır.

Burada;

K_{ac} = Taş kolon malzemesinin aktif itki sayısı,

ϕ_c = Taş kolon malzemesinin kayma direnci açısı,

μ_s = Zeminin poisson oranı,

A_c = Taş kolon alanı,

A = Toplam alan,

temsil etmektedir.

2.10.2 Kolon Sıkışabilirlik Etkisinin Değerlendirilmesi

Taş kolonda kullanılan malzeme, üstüne yapılacak yapının yükü etkisiyle oturmalar oluşturabilir. Teoride alan değiştirme oranının 1,0 olmasından dolayı iyileştirme faktörü sonsuz hesaplanmakta fakat iyileştirme faktörü kolon sıkışabilirliğinden etkilenmektedir. Taş kolon ve taş kolonu çevreleyen zeminin tek eksenli sıkışma modülleri (D_c / D_s) oranı Priebe'e (1995) göre iyileştirme fakörünü etkilemektedir. Örneğin; aşağıdaki ifade de $\mu_s = 1/3$ değeri minimum pozitif sonuç vermektedir ($n_0 = D_c / D_s$).

$$(A_c / A)_1 = -\frac{4K_{ac}(n_0 - 2) + 5}{2(4K_{ac} - 1)} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{4K_{ac}(n_0 - 2) + 5}{(4K_{ac} - 1)}\right)^2 + \frac{16K_{ac}(n_0 - 1)}{4K_{ac} - 1}} \quad 2.23$$

$$\Delta(A / A_c) = \frac{1}{(A_c / A)_1} - 1 \quad 2.24$$

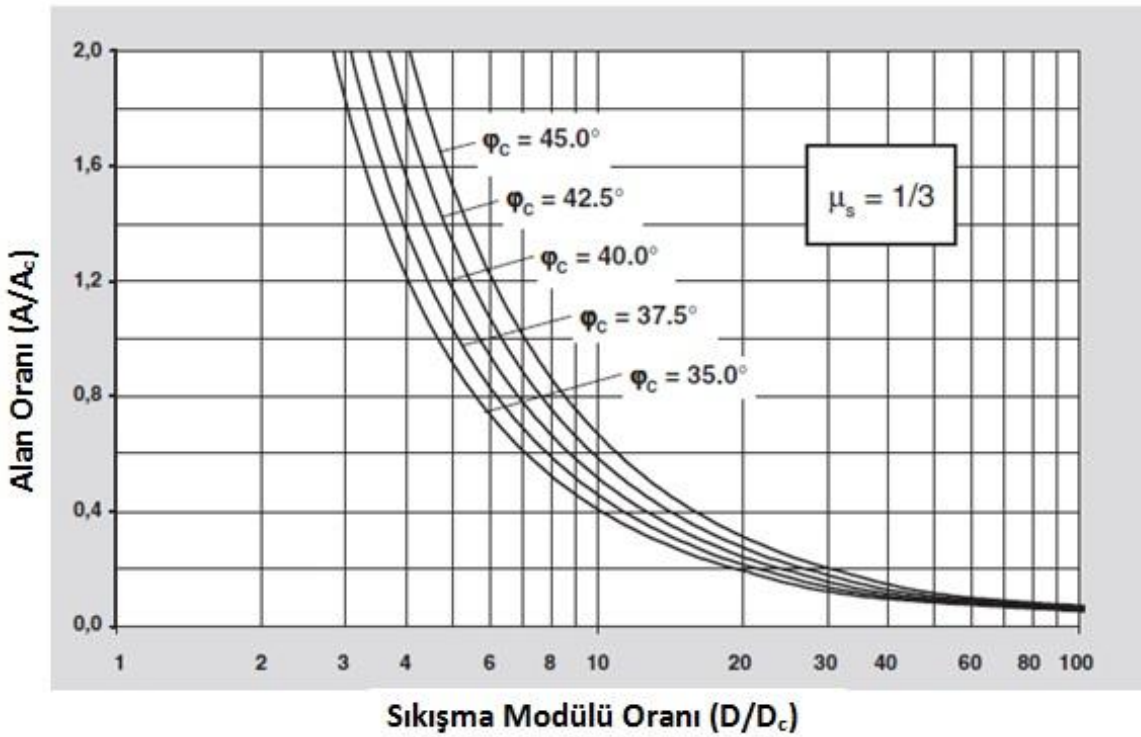
poisson oranı $\mu_s = 1/3$ olduğu durumda düzeltilmiş alan oranı;

$$\left(\frac{\bar{A}_c}{A}\right) = \frac{1}{\frac{A}{A_c} + \Delta\left(\frac{A}{A_c}\right)} \quad 2.25$$

düzeltilmiş iyileştirme oranıda;

$$n_1 = 1 + \left(\frac{\bar{A}_c}{A}\right) \left(\frac{1/2 + f(\mu_s, \bar{A}_c/A)}{K_{AC} f(\mu_s, \bar{A}_c/A)} - 1 \right) \quad 2.26$$

Poisson oranı 1/3 olan zeminlerde farklı taş kolon malzemeleri için kayma direnci açıları ile tek eksenli sıkışma modülleri oranı için alan düzeltme faktörü Çizelge 2-10'da gösterilmektedir.



Çizelge 2-10 Poisson oranı 1/3 olan zeminlerde sıkışabilirlik düzeltilmesi (Priebe, 1995)

2.11 Taş Kolonla İyileştirme Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları

2.11.1 Taş Kolonla İyileştirme Yönteminin Avantajları

- ✓ Yapım süresi oldukça kısadır.
- ✓ Taş kolonda kullanılacak malzeme temin edilebiliyorsa yumuşak kil, killi silt veya killi kum zeminlerde oldukça ekonomiktir.
- ✓ Taş kolon uygulaması yumuşak zeminlerde zemin direncini ve kıvamını artırmaktadır.
- ✓ Bunun yanısıra dren sistemi gibi çalıştığından konsolidasyon süresini kısaltmaktadır.

2.11.2 Taş Kolonla İyileştirme Yönteminin Dezavantajları

- ✓ Taş kolonda kullanılacak dolgu malzemesi yetersizliği.
- ✓ Yüzen taş kolonları ile ilgili yeterli teorik ve deneysel araştırma var olmadığı için 20,0 m'den daha derin durumlarda uygulama sakıncalı olabilir.
- ✓ Taş kolon yönteminin uygulanmasında kullanılan ekipmanlarda tecrübeli personel sıkıntısı.

3 DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLAR (DKK)

3.1 Genel

Amerika'da Dr. Fox tarafından 1980'li yılların başında geliştirilen darbeli kırmataş kolonlar ile oturmaların uygun seviyelere indirilmesi ve temel altında yumuşak zeminin taşıma gücünün artırılması sağlanmıştır (Lawton ve Fox, 1994; Lawton ve diğerleri, 1994; Wissmann ve diğerleri, 2001).

Darbeli kırmataş kolonların yapımı kısaca önceden hazırlanmış kuyulara kırmataş agregaların tabaka halinde yerleştirilmesi ve bu esnada özel tasarlanmış konik uçlu çekiç ile tokmaklanarak sıkıştırılması şeklinde özetlenmektedir (Fox ve Cowell, 1998).

Darbeli kırmataş kolon yapımında kullanılan sağlam agregalar sıkıştırma işlemi sırasında zemin içine yayılarak sağlam tabaka oluşumuna katkı sağlarlar ve bu sayede zeminin yataklanma katsayısı artırılır. Kolon boyunca yanal ve uç kısmında aşağıya doğru genişleme çevre zeminde ön gerilme ve şekil değiştirmelere sebebiyet vermektedir (Lawton ve Fox, 1994; Lawton ve diğerleri, 1994).

Darbeli kırmataş kolonlar kohezyonsuz zeminlerde imalat aşamasında sağlanan darbe ile kolon etrafında sıkışma sağlanarak iyileştirme yapılmış olunur. Kohezyonlu zeminlerde ise görece daha rijit bir eleman zemin içine yerleştirildiği için iyileştirme sağlanmaktadır. Darbeli kırmataş kolon ile iyileştirme yapılan alanda;

- ✓ Taşıma gücünün artırılması,
- ✓ Toplam ve farklı oturmaların azaltılması,
- ✓ Dolgu ve şevlerin stabilitesinin artırılması,
- ✓ Zemin permeabilitesinin artırılması,
- ✓ Konsolidasyon hızının artırılması,
- ✓ Sıvılaşma potansiyelinin azaltılması,

sağlanmaktadır.

3.2 Literatür Araştırması

Lawton ve Fox (1994), derin temellere alternatif olarak kısa agregata kolonların elverişsiz zeminlerin kaldırılıp yerine sağlam dolgu yerleştirilmesiyle iyileştirme yöntemi olarak kullanılmasının avantajını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma ile agregata kolonlar ile desteklenmiş 10 projeyi incelemişlerdir. Proje verileri ile zemin iyileştirme öncesi ve sonrası oturmalar Tablo 3-1'de gösterilmiştir.

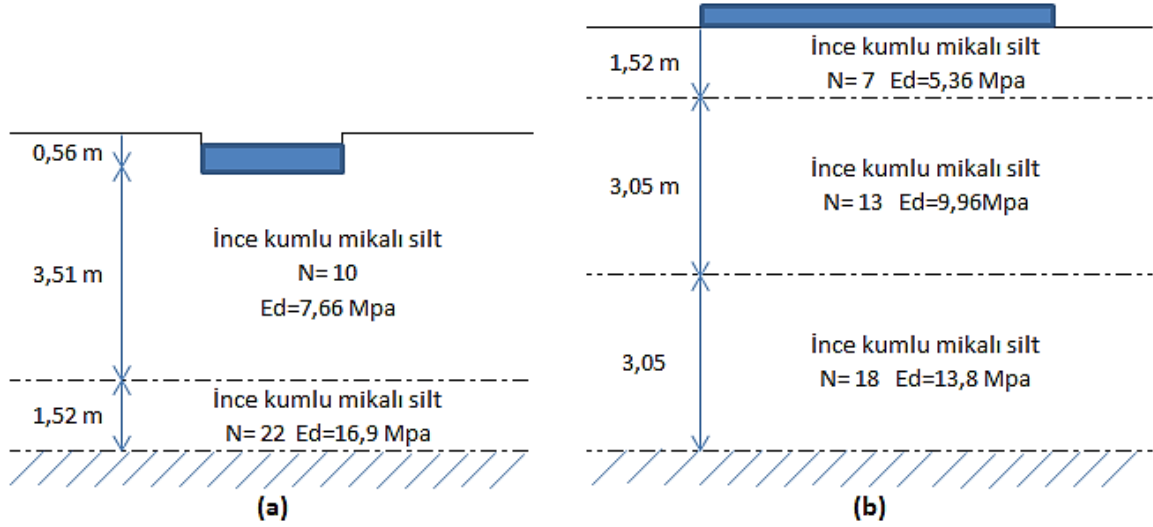
Tablo 3-1 Çalışmada kullanılan 10 projenin darbeli kırmataş kolon ile iyileştirme öncesi ve sonrası tahmin edilen oturma değerleri (Lawton ve Fox, 1994)

Proje Tanımı	Temel Tanımı	Yük (kN)	Taşıma Kapasitesi (kPa)	Oturma (mm)		
				Tahmin edilen		Gerçekleşen
				İyileştirilmemiş Zeminde	DKK ile İyileştirilmiş Zeminde	
5 katlı bina, Columbia- SC	3,66 m kare tekil temel	3560	266	33-102	18	<1,5
12 m Süt Silosu, Atlanta-GA	4,57 m kare tekil temel	3010	144	48-104	13	<1,8
Sera 46mx91m, Atlanta -GA	0,91m dairesel temel	160	244	58-79	5	<6
Sanayi Deposu, Winterset -IA	1,52m kare tekil temel	445	193	150-230	23	<19
Ofis binası, Orangeburg -SC	1,07mx2,13m tekil temel	801	352	41-112	13	<13
Hastane binası, Hickory -NC	2,74m kare tekil temel	1824	242	30-104	13	<6
16 katlı kule, Atlanta -GA	15,2mx30,5m radye temel	66720	144	20-89	10	3-8 ort=6
7 katlı otopark, Marietta -GA	4,27m kare tekil temel	5782	318	124-188	38	20-33

Yaptıkları çalışma esnasında kullanılan projelerden biri, 12,0 m yüksekliğinde inşa edilmek istenen süt silosu için yapılan araştırmayı kapsamaktadır. Bu çalışmada süt silosunun inşasından önce yükleme deneyleri yapılmamıştır, inşa edilmesi planlanan süt silosu tam ölçekli bir yükleme testini gerçekleştirmektedir. Yapılan SPT deney verilerine göre vuruşlar 8,0 – 10,0 m derinliklere doğru artmaktadır, zemin profili kumlu silt (ML) olarak verilmektedir. Projede kullanılan agrega kolonlar 0,61 m çapında ve 1,5 m boyundadır. Yapılan analizlere göre 144,0 kPa'lık gerilme altında tahmin edilen oturma miktarı 13,0 mm olarak bulunmaktadır. Daha sonraki aşamada silolar doldurulmuş ve okumalar alınmıştır. Alınan okumalar, oturmaların 1,5 mm ile 1,8 mm arasında değiştiğini göstermektedir.

Lawton ve diğerleri (1994); yaptıkları çalışma kapsamında iki tane projede kısa agrega kolonlar kullanılarak yapılan iyileştirmeleri incelemişlerdir.

Çalışmaların biri Georgia'da hastane geliştirmesinde uygulanmıştır. Hastane alanında uygulanacak iki kulenin (Güney ve kuzey kuleleri) arazi deney sonuçları incelenmiş ve Şekil 3.1'de gösterildiği şekilde idealize edilmiştir.



Şekil 3-1 İdealleştirilmiş zemin profilleri (a) Kuzey kule (b) Güney kule

Yüzeysel temelerde kısa agrega kolonlarla iyileştirme sonrası oturma hesabı için zemin öncelikle iki bölgeye ayrılmaktadır. İyileştirmenin yapıldığı agrega kolon boyunun oluşturduğu alan ile iyileştirme sonrası çevre zemini içine alan üst bölge ve iyileştirmenin yapılmadığı alt bölge olarak tanımlanmaktadır. Üst bölge oturmasının bulunabilmesi için geliştirilen denklem 3.3 ile aşağıda belirtilmektedir.

$$q_p = \frac{q \times R_s}{(R_a \times R_s - R_a + 1)} \quad 3.1$$

$$q_m = \frac{q_p}{R_s} \quad 3.2$$

$$S_{uz} = \frac{q_p}{k_p} = \frac{q_m}{k_m} \quad 3.3$$

Burada;

q_p = Agrega kolonlara uygulanan taşıma basıncı,

q_m = İyileştirilmiş zemine uygulanan taşıma basıncı,

S_{uz} = Üst bölge oturması,

q = Ortalama taşıma basıncı = $\frac{Q}{A}$,

R_s = Zemin yatak katsayısı oranı = $\frac{k_p}{k_m}$,

R_a = Alan oranı = $\frac{A_p}{A}$,

Q = Düşey tasarım yükü,

A = Temel toplam alanı,

A_p =Temeli destekleyen toplam agrega kolon alanı,

k_m =İyileştirilmiş zeminde yatak katsayısı,

k_p = Agrega kolonların yatak katsayısı,

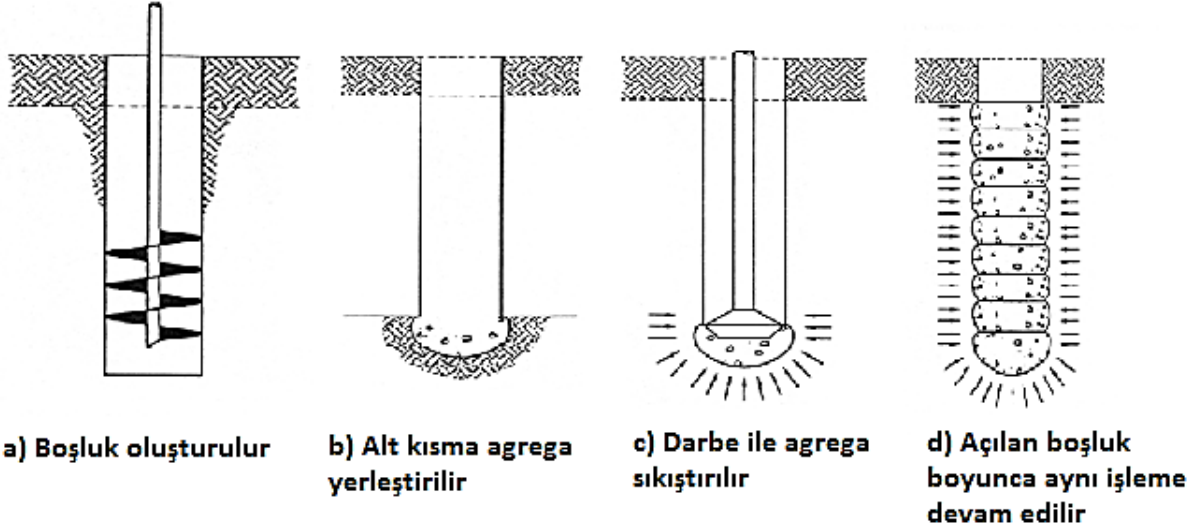
olarak tanımlanmaktadır.

Zemin yatak katsayılarının kolonlarda ve zeminlerde bulunması için, statik yük deneyleri ya da arazi verilerine bakılarak tahmin edilmelidir. Bu projede, uygulanan herhangi bir yükleme deneyi yapılmadığı için kullanılan yatak katsayıları daha önce bölgede yapılan deneylerden tahmini değerler alınmıştır. Tablo 3-2’de tahmin edilen değerler ile hesaplanan değerler verilmektedir.

Tablo 3-2 Tahmin edilen ve gerçekleşen oturma değerleri

	Oturma (mm)		
	Tahmin edilen		Gerçekleşen
	İyileştirilmemiş zemin	İyileştirilmiş zemin	
Güney kule yuvarlak temel	40-43	08.Ara	<6
Güney kule kare temel	52-58	Eki.16	<10
Kuzey kule büyük temel	29-71	13-38	<10
Kuzey kule küçük temel	62-98	24-48	<20

Wissmann ve diğerleri (2000), yaptıkları çalışmada 6 katlı kapalı otopark için 23,0 m uzunluğunda uzun çelik borularla iyileştirme yerine shaft uzunluğu 2,1 m ile 2,7 m arasında değişen uzunluklarda darbeli kırmataş kolonlar kullanmışlardır. Projenin uygulama sahasına bakıldığında yüzeyden 6,1 m derinliğe kadar gevşek siltli ince kum ve kumlu silt bulunmaktadır. 6,1 m ile 15,2 m derinlikleri arasında da orta sıklıkta siltli ince kum bulunmaktadır. Projede kullanılması planlanan darbeli kırmataş kolonların çapları 0,84 m olarak seçilmiştir. Şekil 3-2’de darbeli kırmataş kolonların yapım aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 3-2 Daireli kırmataş kolonların yapım aşamaları

Agrega kolonların yapılaşmaya uygun olmayan zeminlerde başlıca yapım amacı taşıma gücünü artırmak ve oturmaları azaltmaktır. Oturma hesaplamaları diğer kaynaklarda da belirtildiği gibi zemini üst bölge ve alt bölge diye iki bölgeye ayırarak yapılmaktadır.

Üst bölge hesaplamaları yay modeline (Lawton ve Fox, 2011; Lawton ve diğerleri, 1994) dayandırılarak aşağıda belirtilen hesap aşamalarını oluşturmaktadır.

- ✓ Temel zemine göre oldukça rijit kabul edilmektedir. Bu yüzden, iyileştirilmiş zemine uygulanacak olan basınç bağımlı rijitliğe ve alan oranına göre değişmektedir. Uygulanan toplam düşey kuvvet (Q), iyileştirilmiş kompozit zeminin basınç (q) ve alanı (A) olarak tariflenebilir ve bu kuvvet agrega kolonlar (Q_g) ile zeminin gösterdiği (Q_s) karşı kuvvete eşittir.

$$Q = q \times A = Q_g + Q_s = q_g \times A_g = q_s \times A_s \quad 3.4$$

- ✓ Kolonlarda meydana gelecek oturmalar çevre zeminde meydana gelecek oturmalarla birbirine eşittir. Temel oturması (s), agrega kolonların basıncı ve agrega rijitlik modülü veya kompozit zeminin basıncı ve rijitlik modülü ile ifade edilmektedir.

$$s = q_s / k_s = q_g / k_g \quad 3.5$$

- ✓ Denklem 3.5'den kompozit zeminin basıncı, kolon basıncı ve kompozit zemin modülü kullanılarak yazılırsa;

$$q_s = q_g \times (k_s / k_g) = q_g / (k_g / k_s) = q_g / R_s \quad 3.6$$

- ✓ Denklem 3.4 ile 3.6 ve alan değişim oranı R_a birleştirilerek;

$$q = \left\{ q_g \times (A_g / A) + q_g \times (A_s / (A \times R_s)) \right\} = \left[q_g \times R_a + q_g \times (1 - R_a) / R_s \right] = \left\{ q_g \times \left[R_a + (1 / R_s) - (R_a / R_s) \right] \right\} = \left\{ q_g \times \left[((R_a \times R_s) + 1 - R_a) / R_s \right] \right\} \quad 3.7$$

✓ Denklemi q_g cinsinden yazdığımızda:

$$q_g = \left\{ qR_s / [R_a R_s + 1 - R_a] \right\} \quad 3.8$$

olarak bulunmaktadır.

Hesaplanan oturma değerleri sonucunda darbeli kırmataş kolonlarla desteklenen temel oturmaları 2,5 cm değerini geçmemektedir. Başlangıçta düşünülen 23,0 m uzun çelik çubuklar yerine darbeli kırmataş kolon kullanılarak iyileştirme yapılması projede %50 oranında maliyet azalmasını sağlamıştır.

Wissmann ve diğerleri (2002), yaptıkları çalışma ile darbeli kırmataş kolonları oturma ve stabilite yönünden incelemiştir. Kolon malzemesi olarak kullanılan malzemenin kayma dayanımı zeminde kayma direncini artırarak göçmeye karşı iyileştirme sağlamaktadır. Kolonların davranışlarını inceleyebilmek için arazi ve laboratuvar deneyleri yapmışlardır.

Darbeli kırmataş kolonların arazide imalatı sırasında sağlanan yanal gerilme artışları ve kolon elemanlarının sağladığı rijitlikle arazide oluşturulan kompozit sistemin rijitliği artmakta ve oturmalar azalmaktadır. Darbeli kırmataş kolon imalatı ile sağlanan drenaj oturmaların daha hızlı olmasını sağlamaktadır. İyileştirme yapılan bölgelerde yapılan oturma ölçümleri yaklaşık 2,5 cm olarak çıkmaktadır. İyileştirme yapılmayan bölgeye oranla oturmalar % 10 civarında azalmaktadır.

White ve diğerleri (2002) yaptıkları çalışmada otoyol inşaatında iki dolgu sahadan birinde taş kolon diğerinde darbeli kırmataş kolon kullanarak iyileştirmeyi araştırmışlardır. Dolgu sahalarından birinde taş kolonlar kullanılarak sıkışabilirliğin azaltılması ve kayma dayanımının artırılması hedeflenmiş diğerinde ise oturma hızı artırılarak oturmaların azaltılması hedeflenmiştir. İyileştirme sonrası durumu incelemek için arazide Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve yükleme deneyleri yapılmıştır.

Taş kolon ve darbeli kırmataş kolon uygulanan zemin özellikleri ve kolon elemanlarının özellikleri benzerlikler göstermenin yanı sıra kimi farklılıklar bulunmaktadır. Tablo 3-3'de taş kolon ve darbeli kırmataş kolon özellikleri ile zeminde yapılan CPT deneyinin özellikleri verilmektedir.

Tablo 3-3 DKK ile TK uygulanan zemin özelliklerinin değerlendirilmesi (White ve diğerleri (2002))

	DKK	TK
Alan değişim oranları (%)	14	23
Kolon sayısı	234	871
Dolgu tabakası yüksekliği (m)	8	9
Kolonlar arası mesafe (m)	1.8 (kare)	1.8 (üçgen)
Kolon çapı (m)	0.76	0.91
Kolon boyu (m)	4.5-6.5	3-14
CPT sürtünme oranı (%)	3.8-6.7	1.7-2.9
CPT uç direnci	400-950	650-1000
Sağlam tabaka mesafesi (m)	4-6	3-13

Taş kolon ve darbeli kırmataş kolon imalatından sonra imal edilen 6,0 m dolgu serildikten sonra ölçülen oturmalar taş kolon ile zemin iyileştirme yapılan alanda 19,5 cm civarındayken, kırmataş kolon ile zemin iyileştirme yapılan bölümde 5,4 cm civarındadır. Taş kolon ile kırmataş kolon imalatının ardından değerlendirilen oturma miktarları arasındaki farkın sebebi; taş kolon imalatında kolonların sıkıştırma esnasında yanal genişlemeye sebebiyet vermesi olabilir (McKenn ve diğerleri, 1975).

Wong ve diğerleri (2004), yaptıkları çalışmada darbeli kırmataş kolon kullanarak zayıf zemini donatılandırmış, dolgu ile dayanma duvarları altındaki oturmaları kontrol etmişlerdir. Dayanma duvarının yüksekliği 9,0 m olmakla birlikte Teksas ulaştırma departmanının taşıma gücü tasarım yaklaşımına göre tahmin edilen ortalama taban basıncı 182,0 kPa ve maksimum taşıma gücü 273,0 kPa olarak alınmıştır (Teksas DOT, 2000). Proje alanındaki arazi verilerine göre 12,0 m'ye kadar yumuşak kille katı kil bulunmaktadır, altında ise orta yoğunlukta kum, silt ve kumlu silt bulunmaktadır. Yeraltı su seviyesi 4,6 m bulunmaktadır. Kil tabakasının tasarım parametreleri Tablo 3-4'de verilmektedir.

Tablo 3-4 Kil zemin tabakasının tasarım parametreleri

Zemin Parametreleri	Arazi / Laboratuvar Değerleri
Toplam Birim Hacim Ağırlık	19,6 kN/m ²
Batık Birim Hacim Ağırlık	9,9 kN/m ²
Ortalama Drenajsız Kesme Dayanımı	72 kPa
Drenajlı Sürtünme Açısı	18
Drenajlı Kohezyon	9,6 kPa
Tahmini Radyal Konsolidasyon Sayısı	0,01 cm ² /s

Projede inşa edilmesi planlanan duvarın denge hesaplamaları GSLOPE (Mitre Software Corporation, 1999) programı kullanılmıştır. Duvar yüksekliği 8,2 m'den fazla ve uzun dönem (drenajlı) güvenlik katsayısı 1,3'den küçük seçilmiştir. Temelin taşıma dayanımını artırmak için ve duvarın denge problemini çözmek için uygulanabilecek iyileştirme yöntemleri; a) zemini kaldırmak ve daha sağlam zeminle yer değiştirmek, b) titreşimli yer değiştirme ile taş kolon ve darbeli kırmataş kolon sistemleri kullanılabilir. Projede darbeli kırmataş kolon iyileştirme yönteminin seçilmesi maliyet ve yapım hızı açısından tercih edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda; taş kolonların sağladığı yüksek kayma dayanımı taş kolon ve zeminden oluşan kompozit yapının kayma dayanımı yükselterek denge problemine karşın yüksek güvenlik katsayısı elde edilir. Aynı zamanda kompozit yapının kıvamı artırılarak toplam oturma azaltılmış olunur. Taş kolon elemanları ile sağlanan radyal drenaj oturma oranlarını azaltır. Bu çalışma kapsamında darbeli kırmataş kolonların denge problemlerinde, taşıma gücü çözümünde ve toplam oturmaya azaltmada ekonomik bir çözüm olduğu ileri sürülmüştür.

Wissmann ve diğerleri (2007), yapmış oldukları çalışmada darbeli kırmataş kolonların grup etkisini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında iki ayrı yerde grup kolonlar ile desteklenen temel ve desteklenmeyen temellerin davranışlarını buna ilaveten yapılan tam ölçekli arazi yüklenme testleri ile tekil kolonların sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Araştırmanın yapıldığı ilk

bölgede yapılan CPT deney sonuçları; uç direnci 1,0 MPa olarak bulunmuş ve 5,0 m derinliğe kadar kil – silt birimlerden oluşmaktadır. Çalışmada;

- ✓ 0,60 m çapında ve 2,40 m boyunda tekil kolonlar üzerinde yükleme testi
- ✓ 2,0 m kare temel altında 5 adet darbeli kırmataş kolon üzerinde grup yükleme testi,
- ✓ 2,0 m kare temelin darbeli kırmataş kolon ile desteklenmediği zaman tam ölçekli yükleme testi

yapılmıştır. Araştırmanın yapıldığı ikinci bölgede yapılan CPT deney sonuçları; uç direnci 0,30 - 0,40 MPa arasında değişen çok yumuşak siltli kil birimlerinden oluşmaktadır. Çalışmada;

- ✓ 0,76 m çapında ve 2,30 m boyunda tekil kolonlar üzerinde yükleme testi,
- ✓ 2,30 m kare temel altında 4 adet 2,3 m boyunda darbeli kırmataş kolon üzerinde grup yükleme testi,
- ✓ 0,76 m çapında ve 4,6 m boyundaki tekil kolonların üzerinde yükleme testi,
- ✓ 2,3 m kare temel altında 4 adet 4,6 m boyunda darbeli kırmataş kolon üzerinde grup yükleme testi,

yapılmıştır. Araştırma kapsamında elde edilen sonuçlar;

- ✓ Projede kullanılan kısa ve uzun kolonlarla desteklenen temeller de yapılan tekil veya grup yükleme test sonuçlarına göre kolonun üst bölgesinden elde edilen gerilmeye karşı oturma grafikleri oldukça yakın sonuçlar vermiştir.
- ✓ Darbeli kırmataş kolon ile iyileştirme yapılan bölgede tahmin edilen darbeli kırmataş kolon rijitliği yapılan yükleme deneyleri sonrası teyit edilmiştir.
- ✓ Kısa kolonlarda tekil ve grup yükleme testlerinin her ikisinde de ortaya çıkan sonuç oluşan deformasyonun uç yenilmesi şeklinde olduğu gözlemlenmiştir.
- ✓ Uzun kolonlarda tekil ve grup yükleme testlerini her ikisinde de ortaya çıkan sonuç oluşan deformasyonun yanal genişleme (bulging) şeklinde olduğu gözlemlenmiştir.
- ✓ Darbeli kırmataş kolon ile iyileştirilen temelde 25 mm oturma kriteri için verilen taşıma gücü, darbeli kırmataş kolon ile iyileştirilmemiş zemindekine oranla üç kat daha fazladır.

White ve diğerleri (2007), yaptıkları araştırmada tekil darbeli kırmataş kolon ile grup darbeli kırmataş kolonlara uygulanan yükleme testleri sonuçlarını kullanarak grup etkisinin oturma ve taşıma gücü üzerindeki etkisini, aletsel gözlemleri kullanarak (gerilme hücreleri, inklinometre, oturma okuma plakası) kolon üzerindeki gerilme yoğunluğu ve gerilmenin derinlikle değişimini yorumlamışlardır.

Yükleme testi sonuçları değerlendirildiğinde daha uzun kolon boyuna sahip olan kolonların alt kotlarında oluşan deformasyon daha fazla çıkmaktadır. Tekil kolonların taşıma gücü bakımından değerlendirilmesi ile uzun olan kolonun daha rijit davrandığı görülmektedir. Grup taş kolonların davranışları karşılaştırıldığında 820 kN dan daha fazla yük uygulandığı zaman yine uzun kolonların daha rijit davranış sergilediği görülmektedir.

Aletsel gözlemin sonuçları ise aşağıda özetlenmiştir:

Büyük yükler altında kısa kolonlar uç yenilmesi, uzun kolonlarda ise yanal genişleme yenilmesi oluşmaktadır. Yenilme türünü kolon altı oturma plakalarına bakarak söylemek mümkündür. Bunun yanı sıra yerleştirilen inklinometre sonuçları çevre zeminde elde edilen yatay deformasyon sonuçları da yenilme türlerini de doğrulamaktadır.

Akyüzoğlu ve diğerleri (2011), yaptıkları çalışmada Uşak - Afyon devlet yolu Balmahmut üst geçit köprüsü ve yaklaşım dolguları kapsamındaki temel zeminin darbeli kırmataş kolonlarla iyileştirilmesi hedeflenmiş, imal edilen darbeli kırmataş kolonların sekizi üzerinde yükleme deneyleri yapılmıştır. Temel zemini profili 2,7 m derinliğe kadar orta katı kıvamda, 15,5 m derinliğe kadar ise yumuşak - orta katı - katı kıvamda kumlu - siltli kil tabakası bulunmaktadır. Yapılan ilk çalışmalar sonucunda 9,0 m yüksekliğindeki dolgu altında yaklaşık 70,0 cm oturma oluşabileceğinden zemin iyileştirmesi yapılması gerektiği anlaşılmaktadır. Üst geçit ve dolgu altında 8,0 – 16,0 m boylarında ve 1 x 1 ile 1,7 x 1,7 arasında kare yerleşim ve 50,0 cm çaplı darbeli kırmataş kolon imal edilmesi ile oturmaların 5,0 – 10,0 cm mertebelerine inmesi öngörülmüştür. Yerleşim planlarının farklılık göstermesi etki alanının değişim göstermesini sağlamıştır. Zemin türü ve zemindeki SPT değerlerine göre kolon için hücre taşıma gücü, 180,0 kN ve darbeli kırmataş kolon rijitlik modülü 27,0 MN/m³ olarak seçilmiştir (Fox ve Cowell, 1998).

Sonuç olarak; darbeli kırmataş kolon elemanlarının zeminin rijitlik modülünü artırdığı ve kontrol deneyleri sonucunu geçtiği gösterilmektedir. Dolgu yükleri altında zemin ve darbeli kırmataş kolon sisteminden oluşan kompozit yapının oturma miktarı 10,0 cm civarında olduğu ve bu oturmaların dolgu yapım esnasında ivedilikle tamamlandığı rapor edilmiş ve saha ölçümleri ile desteklenmiştir. Teorik olarak hesaplanan darbeli kırmataş kolonların taşıma gücü ve oturma değerleri ile uyumlu sonuçlar veren yükleme deneyleri sonuçları üzerine, 8,0 – 16,0 m değişen boylardaki darbeli kırmataş kolon elemanlarının imalat sırasındaki yoğun sıkıştırma ile 8,0 – 13,5 ton servis yükleri altında yüksek rijitlikte imal edilebileceği görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında darbeli kırmataş kolonların grup etkisine değinilmemiş ama fikir vermesi bakımından bazı önemli hususlara değinilmiştir. Dolgu yükleri altındaki darbeli kırmataş kolon grupları esnek dolgu yükleri sebebi ile; i) daha yüksek yatay gerilmelere maruz kalırlar, yanal gerilme değerindeki artış darbeli kırmataş kolonların taşıma gücünü de artırmaktadır, ii) dolgunun eğimli olması darbeli kırmataş kolon ve zemin elemanlarında makaslama gerilmeleri üretmektedir, literatürde yanal yayılma (lateral spreading, Barksdale ve Bachus, 1983) olarak adlandırılan bu davranış kabarma ve dolgu ağırlığı altında artış gösteren yatay gerilmelerin azalmasına sebep olur. Darbeli kırmataş kolonların grup etkisinde sıralanan bu iki etkinin birbirlerini sıfırladığı ve grup kapasitelerinin genel olarak tekil darbeli kırmataş kolon mertebesinde veya bir miktar üzerinde olduğu yönünde görüşleri ortaya çıkarmıştır (Barksdale ve Bachus, 1983).

3.3 Darbeli Kırmataş Kolon Yapım Yöntemleri

Darbeli kırmataş kolon yapımında temel prensip; projede belirtilen derinlik boyunca gerekli kazı aleti ile darbeli kırmataş kolon için gerekli olan çapta delik açılır, daha sonra yüzeyden kırmataş kolon malzemesi kuyu dibine indirilerek genellikle 30 cm ve daha düşük tabaka kalınlıklarında konik uçlu tokmak ile sıkıştırma işlemi uygulanarak tabakalar halinde kırmataş kolon yapımı sonlandırılıp zeminde istenilen iyileştirme miktarını sağlamaktır.

Darbeli kırmataş kolon sistemleri yapım yöntemlerinin çeşitleri Tablo 3-5'de ve uygulanabilir zemin sınıfları da Tablo 3-6'de gösterilmektedir.

Tablo 3-5 Darbeli kırmataş kolon sistemlerinin yapım yöntemleri (Geopier foundation Company, 2010)

Sistem	Zemin Türü	Delgi Çapı (cm)	Darbe Tokmağı Çapı (cm)	İmalat Çapı (m)	Maksimum Darbe Tokmağı Uzunluğu (m)	Yerleşim Aralığı
Geopier	Silt, Kil, Organik	76	66	76+	7,6	1,07
Pyramid	Silt, Kil, Organik	61	üst 15, alt 56	61+	7,6	0,92
Geopier3	Silt, Kil, Organik	51-61	46-52	51-61+	7,6	0,92
Impact	Çakıl, Kum, Silt, Kil, Organik	-	36	50+	13,7+	1,22
ImpactR	Çakıl, Kum, Silt, Kil, Organik	-	31	50+	13,7	1,22
Rampact3	Çakıl, Kum, Silt	-	üst 38, alt 46	46+	5	1,22

Tablo 3-6 Darbeli kırmataş kolon sistemlerin uygulanabilir zemin sınıfları (Geopier Foundation Company, 2010)

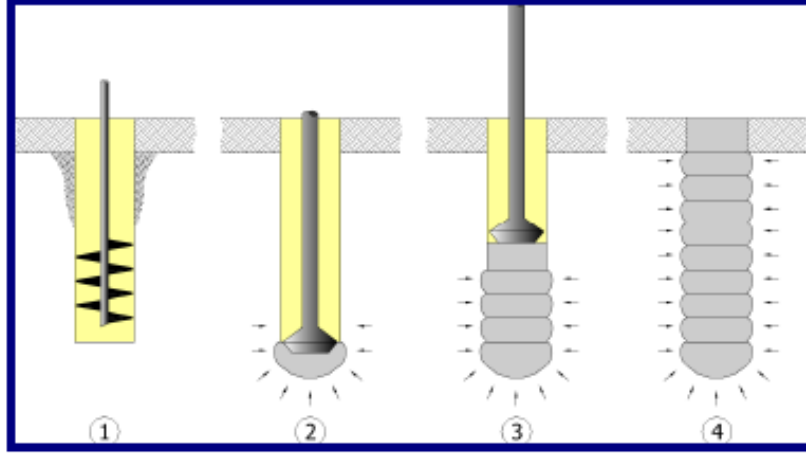
Sistem					
Geopier					
Pyramid/ Geopier					
Impact/ ImpactR					
Rampact/Rampact3					
Zemin türü	Çakıl	Kum	Silt	Kil	Organik

3.3.1 Geopier Sistemi (Yerdeğiştirme Yöntemi-Replacement Method)

Geopier; iyileştirme yapılacak alanda zayıf zeminin çıkarılması ve yerine kırmataş kolonların doldurulup sıkıştırması ile imal edilir. Delgi ile istenilen derinliğe indirilmesi ve kırmataş

kolonların darbeleme ile sıkıştırılması sonucu zeminde toplam ve farklı oturmaların azaltılması ile zeminin taşıma gücünün de artırılması sağlanır.

Geopier sisteminin imalatı dört aşamadan oluşmaktadır (Lawton ve Fox, 1994, Lawton ve diğerleri, 1994, Wissmann ve Fox, 2000, Wissmann ve diğerleri, 2000). Birinci aşamada delgi ile istenilen derinliğe kadar bir kuyu açılmaktadır açılan kuyunun içinde projede kullanılması uygun görülen çaplarda kırmataş kolon malzemesi indirilir sıkıştırma sonrası tabaka kalınlığının 30 cm civarında olması istenmektedir. Her tabakanın tamamlanmasının ardından tekrar kırmataş ilave edilerek zemin yüzeyine kadar tabakalar haline tamamlanır. Şekil 3-3'de imalat aşamaları gösterilmektedir.

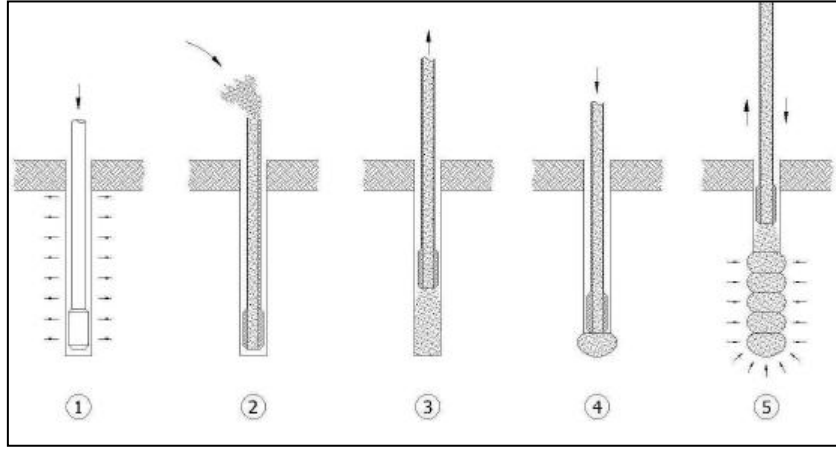


Şekil 3-3 Geopier sistemlerinin imalat adımları (Geopier Foundation Company, 2010)

İmalat aşamasında uygulanan sıkıştırma işlemi kırmataşları düşey olarak sıkıştırmanın yanı sıra kırmataşı yanıl olarak da itmektir. Zeminde oluşan yanıl gerilmelerin zemin sıkışması üzerindeki etkisi darbili kırmataş kolonlar ile oturma kontrolü yapılmasını sağlamaktadır. Zayıf zemine ilave edilen rijit elemanların çekme donatıları ile beraber kullanıldığı zaman rüzgar ve deprem yükleri altında ilave çekme direncide sağlamaktadır.

3.3.2 Impact Sistemi (Öteleme Yöntemi -Displacement Method)

Ucuna sarf plaka yerleştirilmiş mandrel, zemine itme kuvveti ve darbe ile istenilen derinliğe kadar indirilir ve kırmataş malzemesi doldurulur. Mandrel 1,0 m yukarı kaldırılır ve darbe ile kırmataş sıkıştırılarak 30,0 cm kalınlığında sıkıştırılmış kırmataş tabakası oluşturulur. İşlem yüzeye kadar devam edilir ve imalat tamamlanır. Şekil 3-4'de imalat aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 3-4 Impact sistemlerin imalat aşamaları (Geopier Foundation Company, 2010)

Özel ekipman kullanılarak imal edilen Impact sistemde düşey itme ve darbelemenin etkisi ile zemin yanlara doğru itilir sağlanan bu kuvvet ile çevre zeminde sıkışma meydana gelir. Geopier sistemde olduğu gibi dışarıya zayıf zemin çıkarılmadığından görece daha basit bir imalat yöntemidir. Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu zeminlerde muhafaza borusuna ihtiyaç olmadığı için pratik ve ekonomik bir zemin iyileştirme yöntemi olmaktadır.

3.4 Darbeli Kırmataş Kolon Yapımında Önemli Faktörler

3.4.1 Darbeli Kırmataş Kolon Çapı

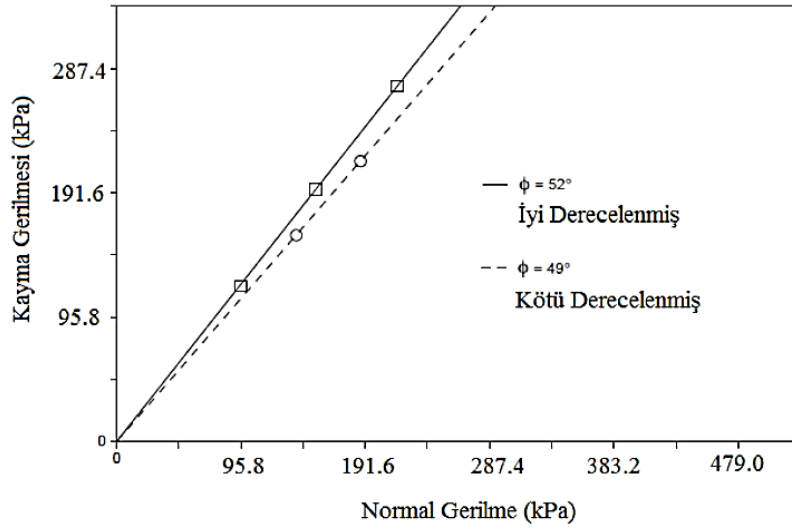
Kırmataş kolonların çapları uygulanacak olan projeye göre değişmekle beraber kazı yapıp imal edilen (Geopier) taş kolonlar çaplar 76,0 cm, kılıf kullanılarak imal edilen (Impact) taş kolonlar 50,0 cm civarında değişmektedir.

3.4.2 Darbeli Kırmataş Kolon Boyu

Darbeli kırmataş kolon boyu iyileştirilmek istenilen zemin derinliğine göre projeden projeye farklılık göstermektedir. Kazı yapılarak imal edilen (Geopier) taş kolon maksimum boyu 8,0 m, kılıf kullanılarak imal edilen (Impact) taş kolon maksimum boyu 18,0 m olarak bilinmektedir. Boy çap oranları genellikle 2 ile 8 arasında değişmektedir.

3.4.3 Darbeli Kırmataş Kolon İçsel Sürtünme Açısı

Darbeli kırmataş kolonların özelliklerini tanımlayabilmek için arazi ve laboratuvar deneylerine ihtiyaç vardır. Temsili numuneler üzerinde laboratuvarda üç eksenli basınç deneyleri ve arazide tam ölçekli kesme deneyleri yapılarak darbeli kırmataş kolonların özelliklerini belirleyebilmek mümkündür. Arazide uygulanan tam ölçekli kesme deneyi sonuçlarına göre ince dane oranı % 0 olan malzeme kullanılarak imal edilen kolonların içsel sürtünme açıları 49° , ince dane oranı % 5 - 10 olduğunda ise içsel sürtünme açısı 52° olduğu bulunmuştur (Fox ve Cowell, 1998). Çizelge 3-1'de arazi kesme deney grafiği gösterilmektedir.



Çizelge 3-1 Darbeli kırmataş kolonları üzerinde uygulanan arazi kesme deneyi (Fox ve Cowell, 1998).

Darbeli kırmataş kolonların laboratuvar ve arazi deney sonuçlarına göre yüksek içsel sürtünme açılarının bulunması, taş kolon yapımında kullanılan kırmataş kolon malzemesinin darbeleme sonucu yanal olarak genişlemesi ve yüksek yoğunluğa sahip olması şeklinde açıklanabilir.

3.4.4 Darbeli Kırmataş Kolon Malzemesinin Dane Çapı

Darbeli kırmataş kolon yapımında kullanılması planlanan malzemenin yükleme ve akma deneylerinden geçmesi gerekmektedir. Kullanılabilecek malzemenin maksimum çapı 38,0 mm, minimum çapı 13,0 mm civarında değişmektedir.

3.5 Darbeli Kırmataş Kolonlarda Oturma Hesabı

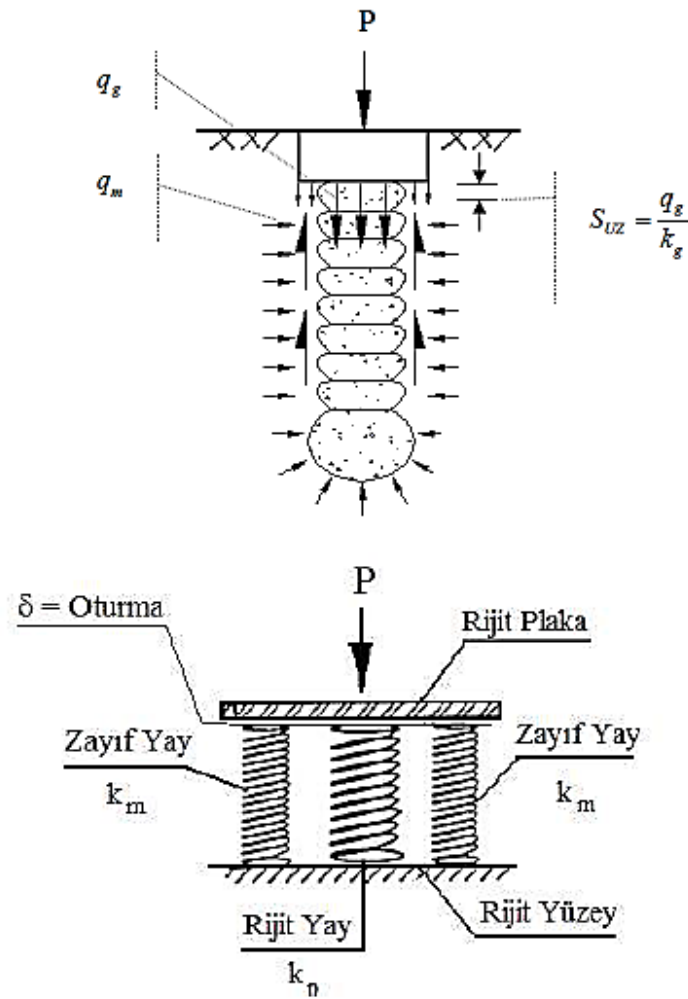
Zayıf zeminlerde karşımıza çıkan oturma problemlerine karşılık darbeli kırmataş kolonlar kullanılarak iyileştirme yapılması sonucunda karşımıza; temel, zemin ve darbeli kırmataş kolon sistemlerini içeren kompozit bir sistemi zemin yapı etkileşimi ortaya çıkmaktadır. Darbeli kırmataş kolon elemanları ile iyileştirme sonrası oturma hesapları için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirme yapılan zeminde oturma hesabı için en pratik yöntem gerilmelerin sönümlendiği etki derinliğine kadar yer alan bölgenin iki tabakalı olarak değerlendirilmesidir. (Lawton ve diğerleri, 1994, Lawton ve Fox, 1994, Fox ve Cowell, 1998 ve Wissmann ve diğerleri, 2002). Tabakalardan biri "üst bölge" olarak adlandırılan darbeli kırmataş kolonların imal edildiği, sıkışabilirliğin azaltıldığı zemin iyileştirmesinin sağlandığı bölgedir. Diğer tabaka da "alt bölge" olarak adlandırılan ve bilinen oturma analizleri yaklaşımı kullanılan iyileştirmenin yapılmadığı iyileştirme yapılan bölgenin altında kalan alandır. Üst bölge oturması (s_{uz}) ile alt bölge oturmasının (s_{lz}) toplamı projede meydana gelebilecek toplam oturmayı (s_{tot}) vermektedir.

3.5.1 Üst Bölge Oturması

Üst bölge olarak adlandırılan alan temel alt kotundan darbeli kırmataş kolon boyu kadar olan mesafeyi kapsamaktadır.

Üst bölgedeki oturma miktarı, kolon ve kolon imalatı sırasında sıkıştırılan iyileştirilmiş zeminden oluşan kompozit yapının rijitliğine bağlıdır. Bunun yanı sıra üst bölgede meydana gelebilecek oturma kolon modülüne, kolonda meydana gelen gerilmeye, zemin modülüne ve zeminde meydana gelen gerilmeye göre değişmektedir. Darbeli kırmataş kolonlarda meydana gelen gerilmeyi anlamak için yay modeli geliştirilmiştir. Şekil 3-5' de geliştirilen yay modeli gösterilmektedir.



Şekil 3-5 Darbeli kırmataş kolon gerilme konsantrasyonu için geliştirilen yay modeli (Fox ve diğerleri, 1998).

Temel etkiyen P yükü altında temel altına yerleştirildiği varsayılan yaylarda δ miktarı kadar çökme meydana gelecektir. Buna göre P kuvveti;

$$P = -k\delta$$

3.10

olarak yazılmaktadır. Burada; “k” yay sabiti olarak tanımlanmaktadır.

Darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirme yapılan zeminde temel yükü nedeniyle kolonun üst kısmında meydana gelen gerilme “ q_g ”, zeminde meydana gelen gerilmeden “ q_m ” daha büyük olacaktır. Eğer temel tam olarak rijit bir davranış gösterirse bu durumda zemin ve kolon içerisinde meydana gelecek oturmalar birbirine eşit olmaktadır. Bu durumda üst bölge oturması;

$$s_{uz} = \frac{q_g}{k_g} = \frac{q_m}{k_m} \quad 3.11$$

şeklinde hesaplanabilmektedir. Burada;

k_g = Darbeli kırmataş kolon rijitlik modülü,

k_m = Matris zemin rijitlik modülü,

olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 3-5'de gösterilen düşey kuvvetlerin toplamı denklem 3.4'deki eşitliği vermektedir.

$$\sum F_v = 0 = qA - q_g A_g - q_m A_m \quad 3.12$$

Burada;

F_v = Düşey kuvvet,

q = Temel taban basıncı,

A = Toplam temel alanı,

q_g = Darbeli kırmataş kolon üzerindeki gerilme,

A_g = Darbeli kırmataş kolon alanı,

q_m = Matris zemin üzerindeki gerilme,

A_m = Zemin alanı,

olarak tanımlanmaktadır. Bu eşitlik kullanılarak darbeli kırmataş kolon ve zemin üzerine gelen gerilmeler;

$$q_g = \frac{qn_s}{R_a(n_s - 1) + 1} = q\mu_g \quad 3.13$$

$$q_m = \frac{q}{R_a(n_s - 1) + 1} = q\mu_m \quad 3.14$$

$$R_a = \frac{A_g}{A} \quad 3.15$$

$$R_s = \frac{q_g}{q_m} = \frac{k_g}{k_m} \quad 3.16$$

Denklemleri ile ifade edilir. Burada;

n_s = Gerilme yoğunlaşma oranı,

R_a = Darbeli kırmataş kolon alan oranı,

R_s = Darbeli kırmataş kolon ve matris zemin rijitlik modülü oranı,

olarak tanımlanmaktadır. Rijit temeller için $R_s = n_s$ olduğundan kolon ve zemine gelen gerilme değerleri;

$$q_g = \frac{qR_s}{R_a(R_s - 1) + 1} = q\mu_g \quad 3.17$$

$$q_m = \frac{q}{R_a(R_s - 1) + 1} = q\mu_m \quad 3.18$$

denklemleri ile hesaplanabilmektedir. Burada;

q = Temelden gelen ortalama düşey gerilme,

R_s = Kolon- zemin gerilme oranı,

n_s = Gerilme yoğunlaşma oranı,

R_a = Alan değişim oranı,

k_m = Zeminin yataklanma katsayısı,

olarak tanımlanmaktadır. Rijit temellerde gerilme yoğunlaşma oranı yapılan ölçümler sonucu 5 ile 45 arasında değişmektedir.

3.5.2 Alt Bölge Oturması

Alt bölge oturması, elastik oturma ve konsolidasyon oturması hesaplamalarına dayanmaktadır. Elastik oturma hesaplamaları için geliştirilen çeşitli yöntemlerden herhangi biri kullanılabilir. Matris zeminin elastisite değeri, SPT (Bowles, 1977 – Martin, 1987) ya da CPT (Schmertmann, 1975) deney sonuçlarına bağlı olarak ampirik yaklaşımlar ile hesaplanabilmektedir. Konsolidasyon oturmalarının hesaplanabilmesi içinde ödometre deney sonuçlarına bağlı değerlendirmeler yapılabilmektedir.

Normal konsolide kohezyonlu zeminler için alt bölge oturması;

$$s_{lz} = H_{lz} \left(\frac{c_c}{1+e_0} \right) \times \log \left(\frac{P'_0 + \Delta q}{P'_0} \right) \quad 3.19$$

denklemi ile bulunmaktadır. Kohezyonsuz ve aşırı konsolide kohezyonlu zeminler için alt bölge oturması;

$$s_{lz} = \frac{qI_q H_{lz}}{E_{lz}} \quad 3.20$$

Denklemi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Burada;

H_{lz} = Alt bölge kalınlığı,

E_{lz} = Matris zeminin elastisite modülü,

c_c = Matris zeminin sıkışabilirlik modülü,

Δq = Düşey gerilme artışı,

e_0 = Başlangıç boşluk oranı,

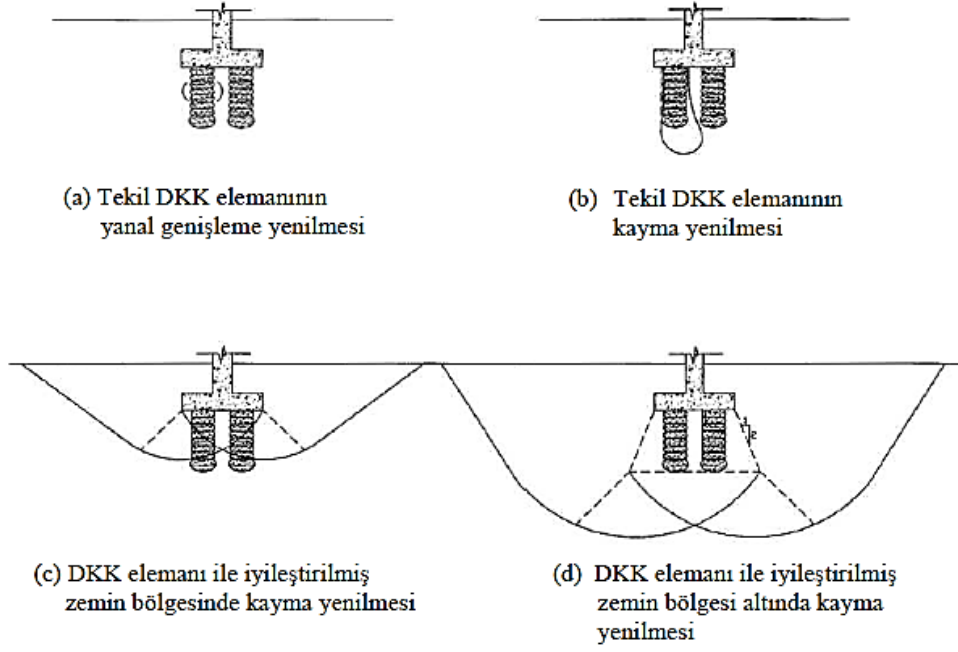
P'_0 = Düşey efektif gerilme,

olarak tanımlanmaktadır.

3.6 Darbeli Kırmataş Kolonların Taşıma Gücü

Darbeli kırmataş kolonlarla iyileştirme yapılan zeminde taşıma gücü oturma limitleri ile kontrol edilmektedir. Darbeli kırmataş kolonların muhtemel göçme mekanizmalarına göre çeşitli tasarım yaklaşımları bulunmaktadır. Şekil 3-7'de darbeli kırmataş kolonların yenilme mekanizmaları gösterilmektedir.

- ✓ Tekil darbeli kırmataş kolon elemanının yanal genişlemesi
- ✓ Tekil darbeli kırmataş kolon elemanının kayma yenilmesi
- ✓ Darbeli kırmataş kolon elemanı ile iyileştirilmiş zemin bölgesinde kayma yenilmesi
- ✓ Darbeli kırmataş kolon elemanı ile iyileştirilmiş zemin bölgesi altında kayma yenilmesi



Şekil 3-6 Meydana gelebilecek göçme mekanizmaları

3.6.1 Tekil darbeli kırmataş kolon elemanın yanal genişlemesi

Kohezyonlu zeminlerde imal edilen tekil darbeli kırmataş kolonların yanal genişleme yenilmesi Mitchell (1981) tarafından tanımlanmıştır. Kolon boyu yeterince uzun olduğunda kolona gelen gerilme kolonun uç kısmına transfer edilmeden önce kolonda kayma mukavemetinin tamamen uyanmasını sağlamaktadır. Kolon içerisinde gelişen kayma yüzeyi kolon elemanın dışa doğru taşarak göçme yenilmesine sebebiyet vermektedir.

Hughes ve Withers (1974), yaptıkları çalışmada tekil kolonların yanal göçme mekanizmalarını boşluk genişleme teorisi ile açıklamışlardır. Kolon üzerine gelecek nihai gerilme, kolonu çevreleyen sınır radyal gerilme ve Rankine pasif toprak basıncı katsayısına bağlıdır.

$$q_{ult,g} = \sigma_{r,lim} \tan^2\left(45 + \frac{\phi_g}{2}\right) \quad 3.21$$

Burada;

ϕ_g : Darbeli kırmataş kolon içsel sürtünme açısı,

$\sigma_{r,lim}$: Kolonu çevreleyen sınır radyal gerilme,

olarak tanımlanmaktadır.

Hughes ve Withers (1974), geliştirdikleri eşitliği aşağıdaki kriterlere dayandırmaktadırlar.

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

Temel altı zemin eğer homojen ise yanal genişlemenin beklendiği kritik derinlik “ z_c ”, darbeli kırmataş kolon elemanının içsel sürtünme açısına “ ϕ_g ”, çapına “ d_g ” ve temel derinliğine “ D_f ” bağlı olarak;

$$z_c = D_f + d_g \tan(45 + \frac{\phi_g}{2}) \quad 3.22$$

denklem 3.22 ile tanımlanmaktadır.

3.6.2 Tekil darbeli kırmataş kolon elemanının kayma yenilmesi

Darbeli kırmataş kolon üzerine uygulanan toplam yük “ $Q_{top,g}$ ”, çevre sürtünmesi “ Q_{shaft} ” ve uç direnci “ $Q_{tip,g}$ ” tarafından karşılanmaktadır. Burada;

$$Q_{top,g} = Q_{shaft} + Q_{tip,g} \quad 3.23$$

denklemleri ile bulunmaktadır. Denklem 3.23 gerilmeler cinsinden yazıldığında;

$$q_{ult,g} A_g = f_s A_{shaft} + q_{tip,g} A_g \quad 3.24$$

denklemleri elde edilmektedir. Burada;

$q_{ult,g}$ = Darbeli kırmataş kolon zerindeki nihai gerilme,

A_g = Darbeli kırmataş kolon alanı,

f_s = Kolon boyunca ortalama birim sürtünme,

A_{shaft} = Darbeli kırmataş kolon çevre alanı,

$q_{tip,g}$ = Darbeli kırmataş kolon çevre direnci,

olarak tanımlanmaktadır.

Eğer kolon boyu yeteri uzunlukta değilse kolon üzerine gelen gerilme kolon uç kısmına aktarılabilir. Uç kısımda meydana gelen gerilme göçme meydana gelmesine sebebiyet verebilmektedir. Bu durumda taşıma gücü;

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

denklem 3.25 ile hesaplanabilmektedir. Burada;

H_{shaft} = Darbeli kırmataş kolon boyu,

d_{shaft} = İmalattan sonra oluşan darbeli kırmataş kolon çapı,

d = Darbeli kırmataş kolon çapı,

olarak tanımlanmaktadır.

Darbeli kırmataş kolonların uç taşıma gücü Terzaghi-Buisman denklemi ile;

$$q_{tip,g} = q_{ult} = cN_c + 0,5d_{shaft}\rho N_\gamma + \sigma_v^3 N_q \quad 3.26$$

hesaplanabilmektedir. Burada;

N_c, N_γ, N_q = Taşıma gücü faktörleri,

ρ = Zeminin birim hacim ağırlığı,

σ_v = Efektif gerilme ,

olarak tanımlanmaktadır.

3.6.3 Darbeli kırmataş kolon elemanı ile iyileştirilmiş zemin bölgesinde kayma yenilmesi

Bu yenilme mekanizmasında göçme düzleminin kolon ve zeminden oluşan bölge içerisinden geçtiği kabul edilmektedir. Kayma düzlemi boyunca kayma dayanımı, matris zeminin sürtünme direnci “ t_s ” ve darbeli kırmataş kolon elemanlarının sürtünme direnci “ t_g ” değerlerine bağlıdır.

Darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirilmiş olan zemin bölgesinde meydana gelecek yerel göçme, kompozit zemin parametreleri ve geleneksel Terzaghi-Buisman taşıma gücü eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir. Kompozit zemin parametreleri Priebe (1978)'e göre;

$$\phi_{com} = \tan^{-1} \left[n_s R_a t_g \phi_g + (1 - R_a n_s) t_g \phi_m \right] \quad 3.27$$

$$c_{com} = (1 - R_a n) c \quad 3.28$$

denklemleri ile hesaplanabilmektedir.

3.6.4 Darbeli kırmataş kolon elemanı ile iyileştirilmiş zemin bölgesi altında kayma yenilmesi

Darbeli kırmataş kolon elemanlarında meydana gelebilecek bir diğer göçme mekanizması iyileştirilmiş bölge altında kalan alanda göçme meydana gelmesidir. Bu göçme mekanizmasının engellenebilmesi için geleneksel yollarla hesaplanan değerler denklem 3.18'de hesaplanan değerle karşılaştırılarak izin verilebilir taşıma gücü belirlenmelidir. Temel altında ki gerilme oranı 2:1 oranında arttığı kabulüyle kolon ile iyileştirilmiş bölge altındaki gerilme;

$$q_{ult} = q_{bottom} \left\{ (B + H)(L + H) \right\} / BL \quad 3.29$$

denklemi ile hesaplanabilmektedir. Burada;

q_{bottom} = İyileştirilmiş tabaka altında oluşan gerilme,

B = Temel genişliği,

L = Temel uzunluğu,

H = İyileştirilmiş tabaka kalınlığı,

olarak tanımlanmaktadır.

3.7 Darbeli Kırmataş Kolonların ile Taş Kolonların Karşılaştırılması

- a. Darbeli kırmataş kolonlar yatay ya da düşey titreşimlerle yer değiştirmek yerine kazılarak ya da titreşim + düşey darbelerle yer değiştirme sağlanarak imal edilir.
- b. Darbeli kırma taş kolon yapımında kullanılan tokmağın konik uçlu olması düşeyde ve yanarda sağlanan zemin sıkılığını ve yer değiştirme oranını artırarak zeminde ön gerilme, ön şekil değiştirme ve sıkışmayı sağlamaktadır.
- c. Bahsi geçen iki iyileştirme yöntemi içinde en iyi sonuçlar; mukavemeti 15,0 -50,0 kPa arasında değişen, sıkışabilir zeminlerde elde edilmektedir.
- d. İyileştirme sisteminde imalat yöntemi seçmenin önemi unutulmamalıdır. Örneğin hassas kil ve silt zeminlerde titreşimli imalat esnasında titreşimin boşluk suyu basınçlarını artırması sonucu zeminde mukavemet kaybı gözlenmektedir.
- e. Çok yumuşak zeminlerde dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri de yanıl genişleme göçmesidir. Malzemenin drenajsız kayma mukavemeti tabaka kalınlıkları kolon uygulamasını etkilemektedir. Bu sebeple zayıf zemin tabakalarının kalınlığı kolon çapının iki katını geçmemesi gerekmektedir.
- f. İyileştirme yöntemlerinin ikisinde; toplam ve faklı oturma kontrollerinde, konsolidasyon sürelerini hızlandırmada, şev stabilitesinde, taşıma gücü artırımın da ve sıvılaşma problemi olan zeminlerde kullanılmasının ekonomik ve hızlı çözümler olduğu bilinmektedir.

4 DARBELİ KIRMATAŞ KOLON TASARIM ÖRNEKLERİ (GEOPIER FOUNDATION)

4.1.1 Şaft Uzunluk Hesaplamaları

3 katlı ticari bir binanın temel desteklenmesi için darbeli kırmataş kolonlar kullanılacaktır. Temel 1,1 m derinliğe oturtulacaktır. Zemin cinsi kil olup direnajlı kayma direnci açısı ϕ 24° 'dir. Kil zeminin birim hacim ağırlığı $17,2 \text{ kN/m}^3$ 'dür. Darbeli kırmataş kolonların tasarım basıncı 663 kPa olarak verilmiştir. Şaft uzunluğu tasarımda 2,1 olarak belirlenmiş ve izin verilebilir oturma miktarı $2,5 \text{ cm}$ 'dir. Verilen şaft uzunluğu yeterlidir değilse uzunluk ne olmalıdır?

Cözüm:

Darbeli kırmataş kolon yükü;

$$Q_g = q_g \times A_g = 600 \text{ kPa} \times 0,5 \text{ m}^2 = 300 \text{ kN}$$

Toplam şaft uzunluğu;

$$(D_f + H_s) = (1,1 \text{ m} + 2,1 \text{ m}) = 3,2 \text{ m}$$

Şaftın altındaki toplam efektif gerilme;

$$(\gamma_s + (D_f + H_s)) = 17,2 \text{ kN/m}^3 \times 3,2 \text{ m} = 55 \text{ kN/m}^2$$

Rankine pasif toprak basıncı katsayısı;

$$K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{24^\circ}{2} \right) = 2,37$$

Şaftın altındaki Pasif toprak basıncı;

$$(\sigma'_v \times K_p) = 2,37 \times 55 \text{ kN/m}^2 = 130 \text{ kN/m}^2 > 120 \text{ kN/m}^2$$

↑
yapıdan gelen maksimum
yatay basınç

Şaft altındaki pasif toprak basıncı yapıdan gelen maksimum basınçtan fazla olduğu için, pasif toprak basıncının 120 kN/m^2 'ye eşit olduğu derinlik olan kritik derinliği (z_{crit}) hesaplamak gerekmektedir.

$$120 \text{ kN/m}^2 = 17,2 \text{ kN/m}^3 \times (z_{crit}) \times 2,37$$

$$z_{crit} = 2,9 \text{ m}$$

Ortalama efektif yatay basınç;

$$\sigma_{h-avg} = \frac{(D_f \times \gamma_s \times K_p + 120kN / m^2)}{2}$$

$$\sigma_{h-avg} = \frac{(1,1 \times 17,2kN / m^3 + 2,37 \times 120kN / m^2)}{2} = 82,4kN / m^2$$

Temel altı ile kritik derinlikte sağlanan shaft direnci;

$$Q'_g = \sigma_{h-avg} \times \tan \phi \times \pi \times D \times (z_{crit} - D_f)$$

$$Q'_g = 82,4kN / m^2 \times \tan 24^0 \times \pi \times 0,76m \times (2,9m - 1,1m) = 158kN$$

Kritik derinlik ile shaft uzunluğunda sağlanan shaft direnci;

$$Q''_g = \sigma_h \times \tan \phi \times \pi \times D \times (H_s - (z_{crit} - D_f))$$

$$Q''_g = 120kN / m^2 \times \tan 24^0 \times \pi \times 0,76m \times (2,1m - (2,9m - 1,1m)) = 38,3kN$$

Toplam shaft direnci;

$$Q_g = Q'_g + Q''_g$$

$$Q_g = 158kN + 38,3kN = 196,3kN < 300kN$$

Toplam shaft direnci kolon kapasitesinden (300 kN) daha düşük olduğu için shaft derinliği artırılmalı

Şaft derinliği $H_s = 2,1$ m olarak verilmişti bu derinliği 3,0 m olarak değiştirdiğimizde shaft dirençleri tekrar hesaplanır.

$$Q'_g = 158kN \text{ (hesabında shaft uzunluğu olmadığı için değişmeyecektir)}$$

$$Q''_g = \sigma_h \times \tan \phi \times \pi \times D \times (H_s - (z_{crit} - D_f))$$

$$Q''_g = 120kN / m^2 \times \tan 24^0 \times \pi \times 0,76m \times (3,0m - (2,9m - 1,1m)) = 153kN$$

$$Q_g = 158kN + 153kN = 311kN > 300kN$$

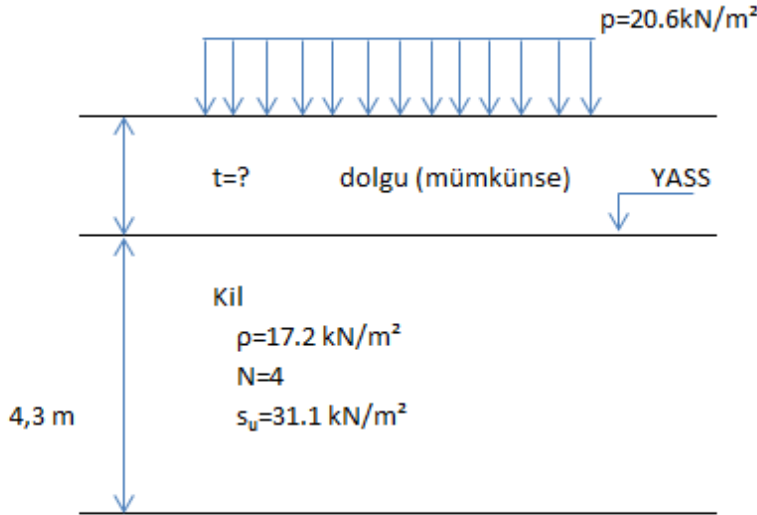
Şaft direnci kolon direncini aştığı için shaft direnci 3 m olarak değiştirilmelidir.

4.1.2 Döşeme Yüklerine Göre Kolon Hesabı

Büyük bir yemek firması Ambar yapmak istemektedir. Ambarda kolon yükleri hafif fakat döşeme yükleri ağırdır. Tasarımda döşeme basıncı $20,6 \text{ kN/m}^2$ olarak verilmektedir. Ambarın yapılacağı alanda orta sıkılıkta silitli kum tabakası üzerinde $4,3 \text{ m}$ yumuşak, sıkışabilir kil tabakası bulunmaktadır.

Kil tabakasının birim hacim ağırlığı $17,2 \text{ kN/m}^3$, SPT-N değeri 4 ve drenajsız kesme dayanımı $31,1 \text{ kN/m}^2$. Yeraltı su seviyesi yüzeindedir. Zemin profili Şekil 3-8'de gösterilmektedir.

Kolon çapı $0,76 \text{ m}$ olan kolon tasarımını yapınız.



Şekil 4-1 Döşeme plakası hesaplamasında kullanılan zemin profili

Cözüm:

Öncelikle kolonlar arası mesafe (s_{\max}) hesaplanmalıdır. Tablo 4-1'de $N=4$;

$$Q_{cell} = 311 \text{ kN} \quad \text{ve} \quad k_g = 47,5 \text{ MN} / \text{m}^3$$

Kabul edilen $k_m = 2,7 \text{ MN} / \text{m}^3$;

$$s_{\max} = \sqrt{\frac{Q_{cell}}{p}} = \sqrt{\frac{311 \text{ kN}}{20,6 \text{ kN} / \text{m}^2}} = 3,75 \text{ m}$$

Dolgu için gerekli olan (t) kalınlık hesaplanmalıdır. Bu dolgu tabakası döşemeyi destekleyecek ve kolonların üst kısmı için tam bir kemerlenme (arching) etkisi sağlayacaktır.

$$t = (s - d) / 2 = (3,75 - 0,76) / 2 = 1,5 \text{ m}$$

Üst bölge oturmasını hesaplamak için;

$$\text{Alan oranı ; } R_a = \frac{A_g}{s^2} = \frac{0,46^2}{3,75^2} = 0,333$$

$$\text{Rijitlik oranı; } R_s = \frac{k_g}{k_m} = \frac{47,5MN / m^3}{2,7MN / m^3} = 17,6$$

Kolon üst kısım gerilmesi;

$$q_g = q \left[\frac{R_s}{R_s R_a - R_a + 1} \right] = 20,6kN / m^2 \left[\frac{17,6}{17,6 * 0,333 - 0,333 + 1} \right] = 234kN / m^2$$

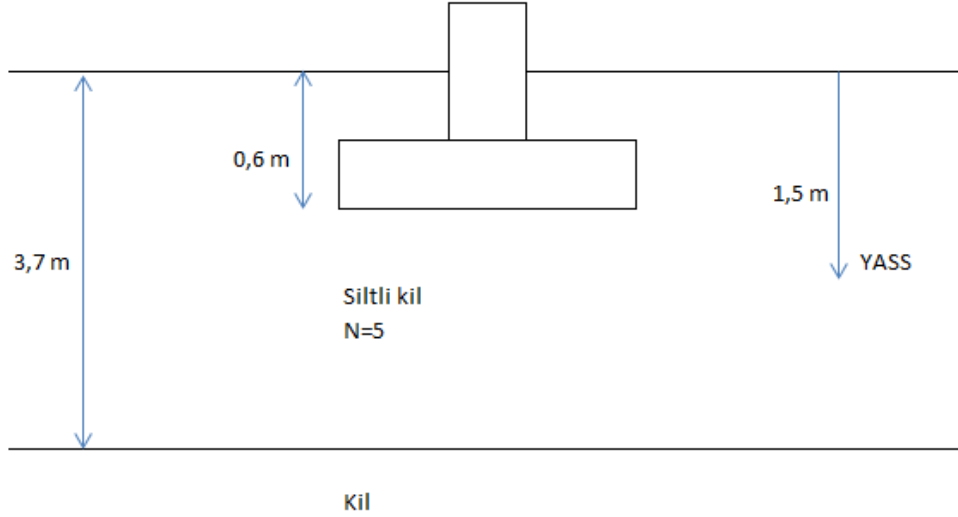
$$\text{Üst bölge oturması; } s_{uz} = \frac{q_g}{k_g} = \frac{237kN / m^2}{47,5MN / m^3} = 5,0mm$$

Tablo 4-1 Kolon Tasarımı İçin Ön Değerler

SPT-N	UCS, (kN/m ²)	Kum ve Kumlu Silt			Kil ve Silt			Turba		
		İzin verilebilir kompozit temelin taşıma basıncı (kN/m ²) <i>q_{all}</i>	kolon ve temel kapasitesi (kN) <i>Q_{cell}</i>	kolon elemanı rijitlik modülü (MN/m ³) <i>k_g</i>	İzin verilebilir kompozit temelin taşıma basıncı (kN/m ²) <i>q_{all}</i>	kolon ve temel kapasitesi (kN) <i>Q_{cell}</i>	kolon elemanı rijitlik modülü (MN/m ³) <i>k_g</i>	İzin verilebilir kompozit temelin taşıma basıncı (kN/m ²) <i>q_{all}</i>	kolon ve temel kapasitesi (kN) <i>Q_{cell}</i>	kolon elemanı rijitlik modülü (MN/m ³) <i>k_g</i>
1 - 3	10-48	240	290	45	216	222	33	168	133	21
4 - 6	48-110	288	400	61	240	311	48	192	200	30
7 - 9	110-168	335	467	71	287	378	57	240	245	34
10 - 12	168-220	383	512	77	335	445	68	-	-	-
13 - 16	220-287	407	556	84	335	467	70	-	-	-
17 - 25	287-383	431	579	88	360	489	74	-	-	-
25 ve üstü	383 ve üstü	479	645	98	383	534	81	-	-	-

4.1.3 Temel Oturma Hesabı

Zemin profilinin üst bölgesinde 3,7 m derinliğinde siltli kil bulunmaktadır. SPT-N değeri $N=5$ 'dir. Siltli kil zemin altında aşırı konsolide kil zemin bulunmaktadır. Bu zemine ait yükleme-boşaltma sıkışma indisi $c_{er}=0,03$ 'tür. Yeraltı su seviyesi yüzeyden 1,5 m derindedir. Zemin profili Şekil 4-2'de gösterilmektedir. Maksimum kolon yükü 2157 kN olarak verilmiştir. Temel Franklinde inşa edilecektir bu yüzden donmaya karşı önlem için 0,6 m derinliğine gömülecektir.



Şekil 4-2 Zemin profili

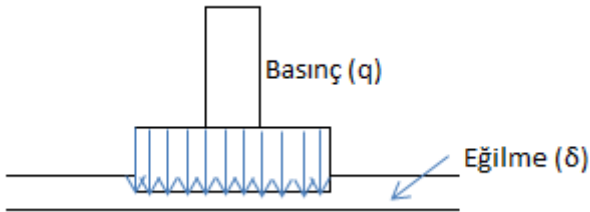
0,76 m çapında ve 3,0 m uzunluğunda yapılması planlanan kolonlar için temel tasarımı nasıl olmalıdır?

Cözüm:

Tablo 4-1 kullanılarak üst bölge için kolon parametre değerleri bulunur. $N=5$;

$$q_{\max} = 240 \text{ kN} / \text{m}^2, \quad Q_{\text{cell}} = 311 \text{ kN} \quad \text{ve} \quad k_g = 47,5 \text{ MN} / \text{m}^3$$

Matris zemin rijitliği;



$$k = \frac{\text{Basınç}(q)}{\text{Eğilme}(\delta)}$$

Matris zeminin $96 \text{ kN} / \text{m}^2$ basınç altında maksimum 2,5 cm oturma yapacağı kabul edilerek;

$$k_m = \frac{\text{Basınç}}{\text{Eğilme}} = \frac{96kN / m^2}{0,025m} = 3,8MN / m^3$$

Üst bölge oturması;

$$\text{Kolon sayısı (N)} = \frac{P_{\max}}{Q_{\text{cell}}} = \frac{2157kN}{311kN} = 6,9 \cong 7$$

$$\text{Gerekli temel alanı (A)} = \frac{P_{\max}}{q_{\max}} = \frac{2157kN}{240kN / m^2} = 9m^2$$

$$\text{Gerekli temel genişliği (B)} = \sqrt{A} = \sqrt{9m^2} = 3m$$

$$\text{Uygulanan temel basıncı (q)} = \frac{P_{\max}}{B^2} = \frac{2157kN}{(3m)^2} = 240kN / m^2$$

$$\text{Alan oranı } R_a = \frac{A_g}{A_f} = \frac{7 \times (0,46m^2)}{(3m)^2} = 0,36$$

$$\text{Rijitlik oranı } R_s = \frac{k_g}{k_m} = \frac{47,5MN / m^3}{3,8MN / m^3} = 12,5$$

Kolon üst kısmı gerilmesi;

$$q_g = q \left[\frac{R_s}{R_a R_s - R_a + 1} \right] = 240kN / m^2 \left[\frac{12,5}{12,5 \times 0,36 - 0,36 + 1} \right] = 584kN / m^2$$

$$\text{Üst bölge oturması; } s_{uz} = \frac{q_g}{k_g} = \left(\frac{584kN / m^2}{47,5MN / m^3} \right) \left(\frac{1MN}{1000kN} \right) = 1,2cm$$

Alt bölge oturması;

$$\text{Gerilme dağılım derinliği (kabul); } 2 \times B = 2 \times 3m = 6m$$

$$\text{Şaft uzunluğu (kabul); } H_s = 3m$$

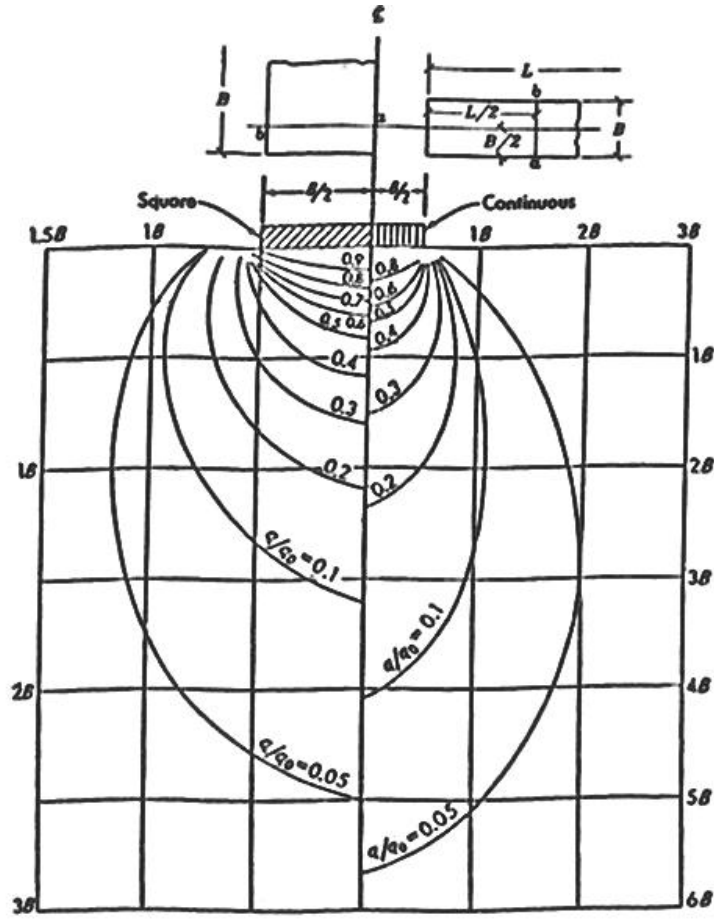
$$\text{Üst bölge kalınlığı; } H_{uz} = (H_s + d) = (3 + 0,76) = 3,76m$$

$$\text{Alt bölge kalınlığı; } H_{lz} = (2B - H_{uz}) = (2 \times 3m - 3,76m) = 2,24m$$

$$\text{Alt bölgenin orta noktasının derinliği; } z = \left(H_{uz} + \frac{H_{lz}}{2} \right) = \left(3,76m + \frac{2,24m}{2} \right) = 4,88m$$

$$\text{Derinlik / Temel genişliği oranı; } z/B = 4,88m/3,0m = 1,63$$

$$\text{Westergaard etki faktörü (Çizelge 4-1); } I_{\sigma}; \text{Çizelgeden } z/B = 1,63 \Rightarrow 0,1$$



Çizelge 4-1 Westergaard etki faktörü

Alt tabaka ortasındaki düşey stresin tahmini değeri; (birim hacim ağırlık=18kN/m³ kabulü ile)

$$p_0 = (\gamma_s (D_f + z)) - (\gamma_w)(D_f + z - D_{gw})$$

$$p_0 = (18kN / m^3 (0,6m + 4,88m)) - (10kN / m^3)(0,6m + 4,88m - 1,5m)$$

Alt bölge oturması;

$$s_{l_z} = H_{l_z} c_{er} \log \left(\frac{P'_0 + qI_\sigma}{P'_0} \right) = 2,24m \times 0,03 \times \log \left(\frac{58,8kN / m^2 + (240kN / m^2 \times 0,1)}{58,8kN / m^2} \right) = 0,01m = 1cm$$

Toplam oturma; $s_T = s_{uz} + s_{l_z} = 1,2cm + 1cm = 2,2cm$
 $2,2cm < 2,54cm$

5 TAŞ KOLON İLE İYİLEŞTİRİLMENİN YATAY DEPREM İVMESİ ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI

Taş kolonların yatay deprem ivmesi altında zemin davranışını incelemek için üç farklı durum değerlendirilmiştir. Bunlar;

1. Durum: Arazide doğal durumda bulunan kil tabakası içerisine taş kolonların yerleştirilmesi,
2. Durum: Sağlam tabakaya soketlenmiş taş kolonların yerleştirilmesi,
3. Durum: Yükleme altında sağlam tabakaya soketlenmiş taş kolonların yerleştirilmesi,

ile yatay deprem ivmesi altında yatay ve toplam yerdeğiştirme miktarlarını belirlemek için denenmiştir.

Toplam ve yatay yereğiştirme miktarlarını öğrenmek için sonlu elemanlar programı olarak Plaxis programı kullanılmıştır.

5.1 Sonlu elemanlar programı

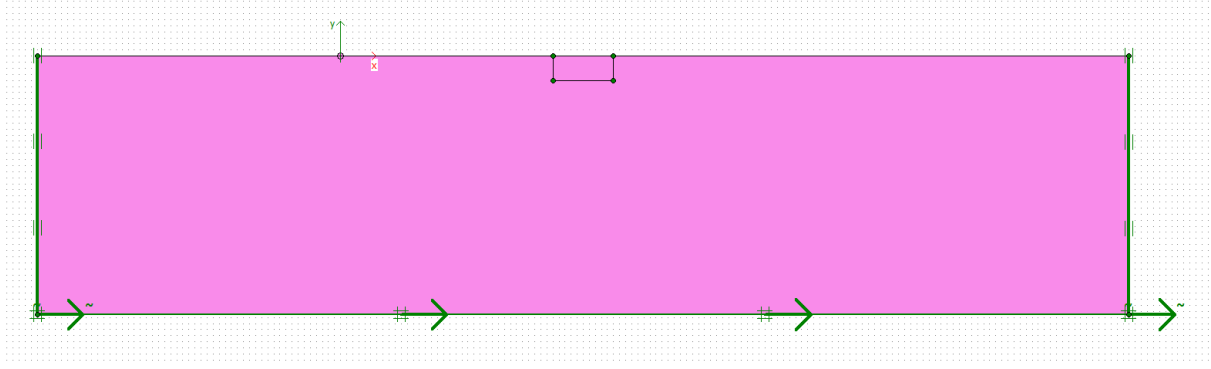
Bu çalışma kapsamında sonlu elemanlar programı olarak Plaxis programı kullanılmıştır. Program kendi içinde 4 bölümden oluşmaktadır. Bunlar;

1. Input: Modelin geometik özelliklerinin ve malzeme değerlerinin tanımlanması,
2. Output: Hesaplamanın ardından analiz sonuçlarının elde edilmesi,
3. Calculation: Modelin tamamlanmasının ardından hesaplamanın yapılması için geçilen aşama,
4. Curves: Analizin ardından istenilen grafiklerin çizilmesi,

şeklinde sıralanmaktadır.

Programın başlangıcında öncelikle geometrik model girilmelidir. Geometrik model temsili olarak yapılacak alanın çizilmesi ile başlamaktadır. Programda geometrik modeli oluşturmak için öncelikle noktalar (point), noktaların birleştirilmesi ile oluşan çizgiler (line) ve çizgilerin birbirine eklenmesi ve geometrik şeklin tamamlanması ile kapalı alanlar (cluster) oluşturulur.

Problemin geometrik şeklinin tamamlanmasının ardından zemin tabakaları, yapım aşamaları ve yüklerinin tanımlanması gerekmektedir. Şekil 5-1 problemin geometrik şeklini tanımlamasının yanı sıra arazide doğal durumda bulunan kil zemini de tanımlamaktadır. Daha sonraki aşamada modelde taş kolonlar tanımlanır.



Şekil 5-1 Problemin geometrik şekli ve arazideki doğal durum

Tüm verilerin tanımlanması ile modelin her aşamasının oluşturulmasının ardından program “calculation” kısmına geçer ve programda tanımlanan veriler altında hesaplamalar yapılır. Belirlenen referans noktalarında sonuç grafikleri alınmaktadır.

5.2 Modelde Kullanılan Malzeme ve Zemin Özellikleri

5.2.1 Malzeme Özellikleri

Modelde kullanılan taş kolon ve temel malzemesine ait özellikler Tablo 5-1’de gösterilmektedir.

Tablo 5-1 Taş Kolon ve Temel için Malzeme Özellikleri

Malzeme	Taş Kolon Lineer Elastik (non-porous)	Temel Lineer Elastik (non-porous)
w (kN/m/m)	6.4	24
EA (kN/m ⁹)	1447000	30000000
EI (kNm ² /m)	67490	-
v	0.25	0.1
Kalınlık (m)	0,748*	1.00
Rayleigh Damping α ve β	0.01	0.01

5.2.2 Zemin Özellikleri

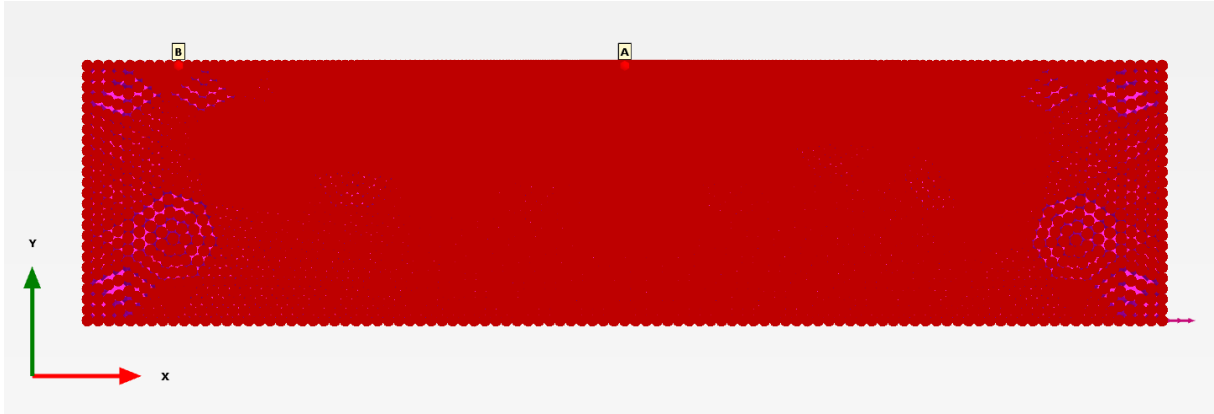
Modelde doğal durum için kullanılan kil zeminin, iyileştirilmiş durum için kullanılan zeminin ve sağlam tabaka olarak iyi derecelendirilmiş çakıl zeminin (GW) parametre değerleri Tablo 5-2’de gösterilmektedir. İki farklı zemin kullanılmasının amacı taş kolon davranışının farklı zeminlerde nasıl olacağını gözlemlemektir.

Tablo 5-2 Doğal durumdaki kil, iyileştirilmiş durumdaki zemin ve GW zemin parametreleri

İsim	Kil	İyileştirilmiş Durum	GW
MalzemeModeli	HS small	HS small	HS small
MalzemeTipi	Drenajlı (<i>drained</i>)	Drenajlı (<i>drained</i>)	Drenajlı (<i>drained</i>)
ρ_n (kN/m ³)	17,0	18,5	21,0
ρ_d (kN/m ³)	19,0	19,5	22,5
$E_{50}^{ref}; E'$ (kPa)	10000	15000	100000
E_{oed}^{ref} (kPa)	10000	15000	100000
E_{ur}^{ref} (kPa)	30000	45000	300000
Üstlük, m	1,0	1,0	0,5
c' (kPa)	20	30	10
ϕ' (°)	20	30	40
ψ (°)	0	0	10
v'_{ur}	0,2	0,2	0,2
$\gamma_{0.7}$	0,05	0,025	0,005
G_0^{ref} (kPa)	19000	55000	250000
Rayleigh Damping α ve β	0,01	0,01	0,01
p^{ref} (kPa)	100	100	100
$K_{0,NL}$	0,658	0,500	0,357
R_f	0,90	0,90	0,90

5.3 Analiz Sonuçları İçin Seçilen Noktalar

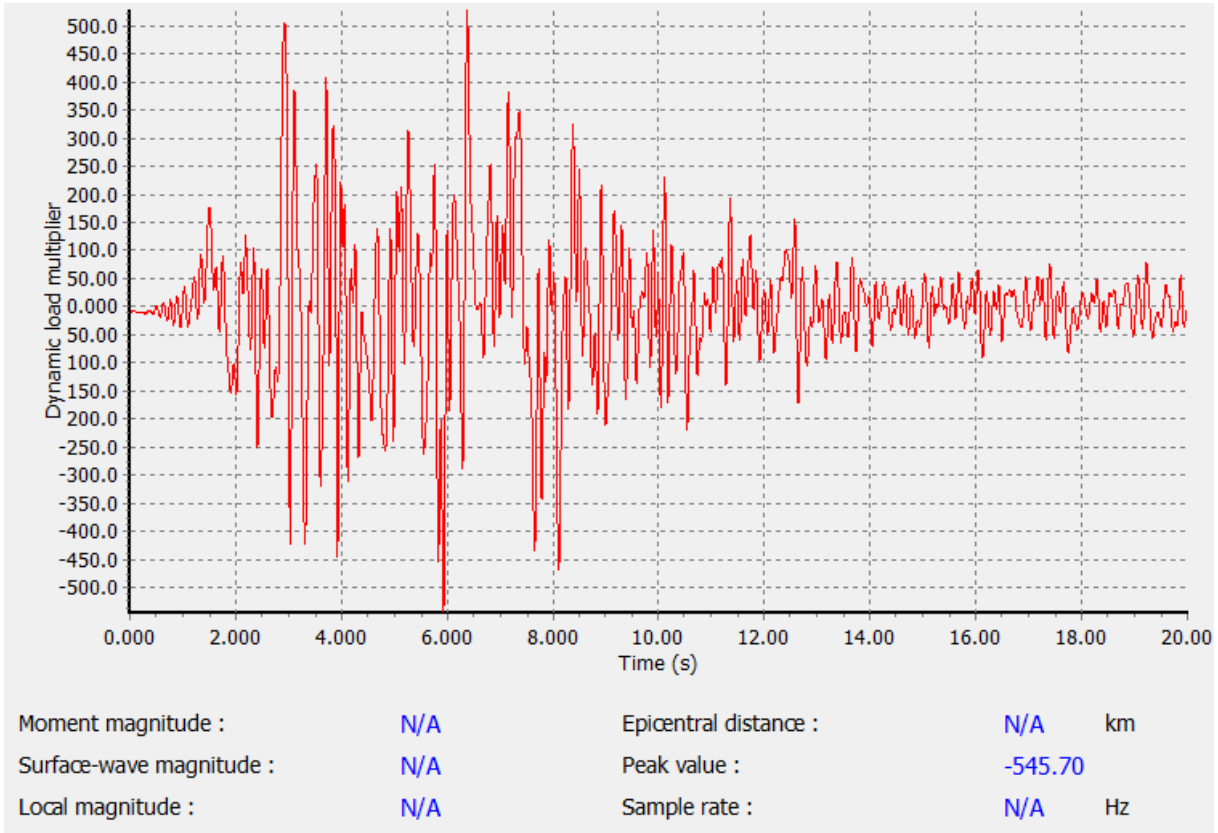
Analiz sonuçlarını değerlendirmek ve sonuç grafikleri için modelde seçilen referans noktaları "A ve B" Şekil 5-2'de gösterilmektedir.



Şekil 5-2 Modelde seçilen referans noktaları "A ve B"

5.4 Uygulanan Yatay Deprem İvmesi

Bu çalışmada yerleştirilen taş kolonların yatay deprem ivmesi altında davranışı inceleneceğinden modelde kullanılan yatay deprem ivmesi 1999'da Adapazarında gerçekleşen deprem kayıtlarından alınmış ve Şekil 5-3'de gösterilmektedir.



Şekil 5-3 Modelde kullanılan yatay deprem ivmesi (Adapazarı Depremi, 1999)

5.5 Taş Kolon Özellikleri

Yapılan analizlerde taş kolonlar; düzlem deformasyon durumunda $s_z=3,00$ m ve $D=1,00$ m çapına sahip (taş kolonlar için eşdeğer çap) taş kolonlar için yatay aralık $s_x=3,00$ m'dir. Taş kolon boyu $L=20,0$ m olarak modellenmiştir.

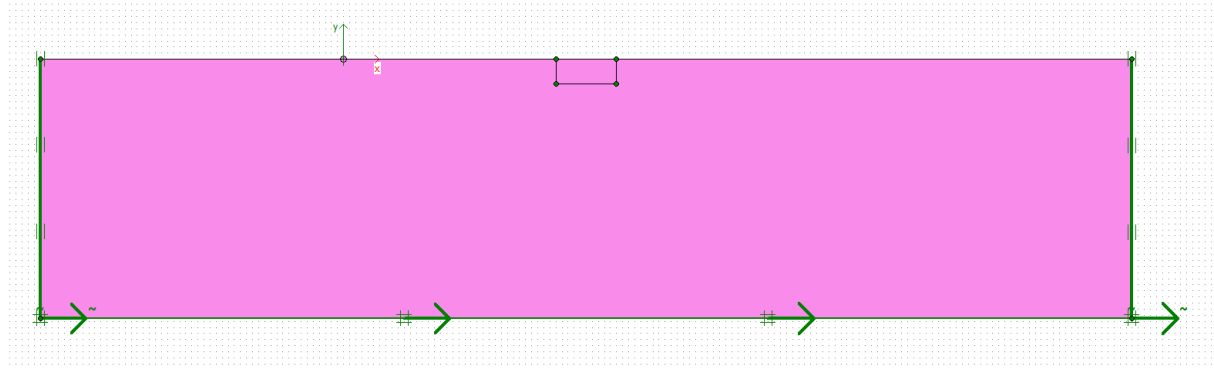
Sağlam tabakaya soketlenmiş durumda; taş kolonlar 17,0 m yumuşak kil tabakasını geçip 3,0 m sağlam çakıl tabakasına soketlenmiştir.

5.6 Doğal Durum için Sonlu Elemanlar Analizi

5.6.1 Model Geometrisi

5.6.1.1 Doğal Durum

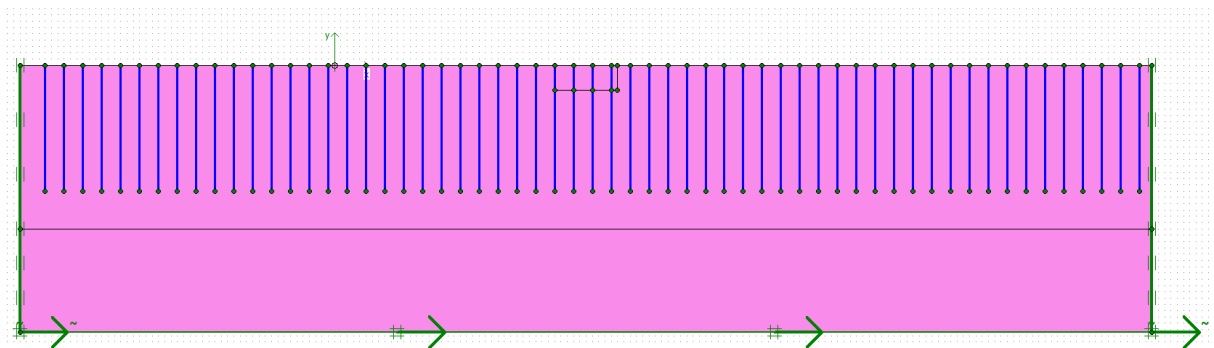
Kil doğal durumda Tablo 5-2'de özetlenen parametre değerleri girilerek Şekil 5-3'da gösterilen yatay deprem ivmesine tabi tutulmuştur. Şekil 5-4'de arazideki doğal durum gösterilmektedir.



Şekil 5-4 Arazideki doğal durum

5.6.1.2 Taş Kolonların Yerleşimi

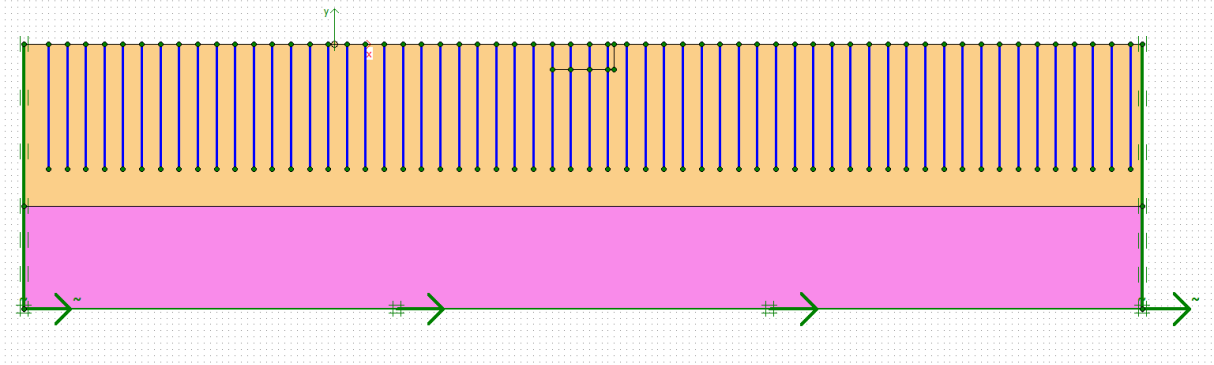
Şekil 5-5'de taş kolonların yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 5-5 Taş kolon yerleşimi

5.6.1.3 Taş kolon Uygulamasından Sonra Zemin

Taş kolonların yerleştirilmesinin ardından zeminde iyileşme sağlanacağı için iyileştirilmiş zemin özelliklerini* içeren model Şekil 5-6'da gösterilmektedir.



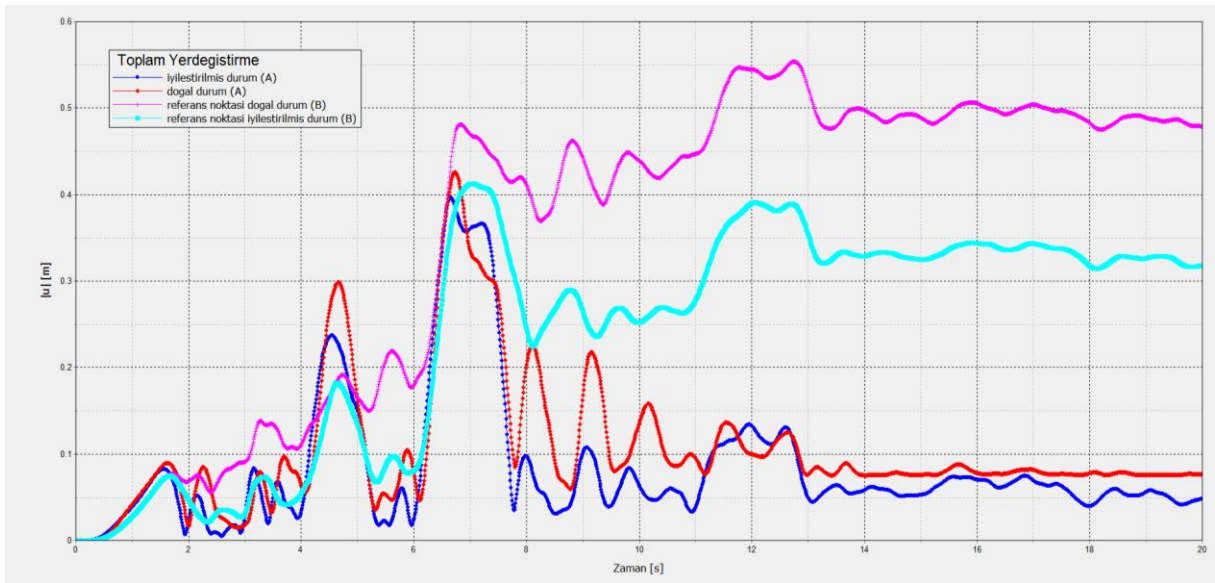
Şekil 5-6 Taş kolon uygulamasının ardından zemin iyileşmesi

*Bu modelde taş kolonların uygulandıkları derinlik için zeminin doğal rijitlik parametrelerini %50 artırdığı kabulü yapılmıştır.

5.6.2 Doğal Durum için Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

5.6.2.1 Toplam Yerdeğiştirme

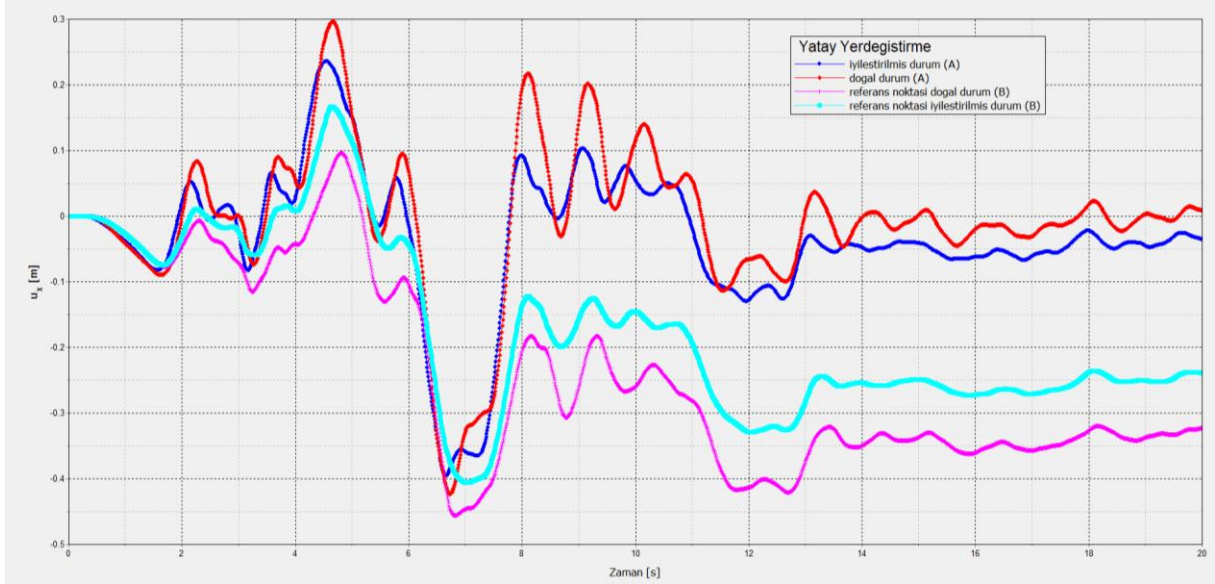
Belirlenen referans noktalarında alınan sonuç grafiklerinde A ve B noktalarında ki doğal durum ile iyileştirilmiş durum bir arada gösterilmektedir. Toplam yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi Şekil 5-7'de gösterilmektedir. Uygulanan taş kolon iyileştirmesi sonrası zeminde meydana gelen toplam yer değiştirmenin azalması deprem davranışının kararlı hale gelmesini sağlamakla üst yapıya aktarılacak kuvvetlerin azalmasını sağlamaktadır.



Şekil 5-7 Uygulanan yatay deprem ivmesi sonrasında doğal durumda meydana gelen toplam yer değiştirme

5.6.2.2 Yatay Yerdeğiştirme

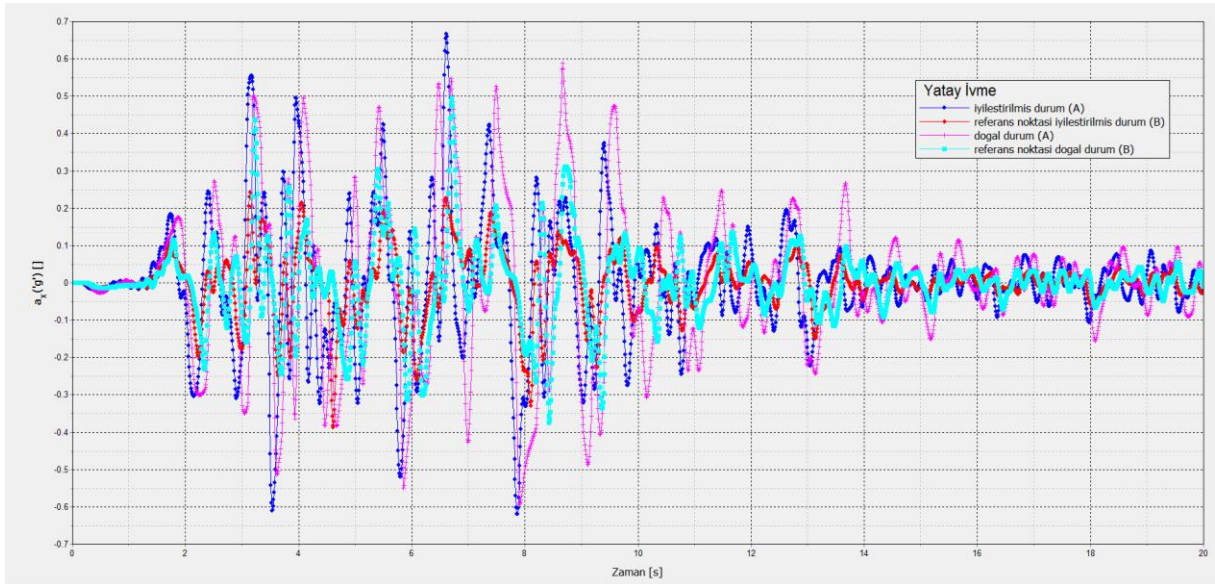
Yatay deprem ivmesi altında yatay yer değiştirmenin zamana bağlı grafiği Şekil 5-8'de gösterilmektedir. Verilen şekilde seçilen referans noktaları için arazideki doğal durum ve iyileştirilmiş durum yer almaktadır. Zemin iyileştirmesi olarak yerleştirilen taş kolonların uygulanan yatay deprem ivmesi altında yatay yer değiştirmeleri azalttığı görülmektedir.



Şekil 5-8 Uygulanan yatay deprem ivmesi sonrasında doğal durumda meydana gelen yatay yer değiştirme

5.6.2.3 Etkiyen Yatay İvme

Şekil 5-9'de etkiyen yatay ivme grafiği gösterilmektedir.



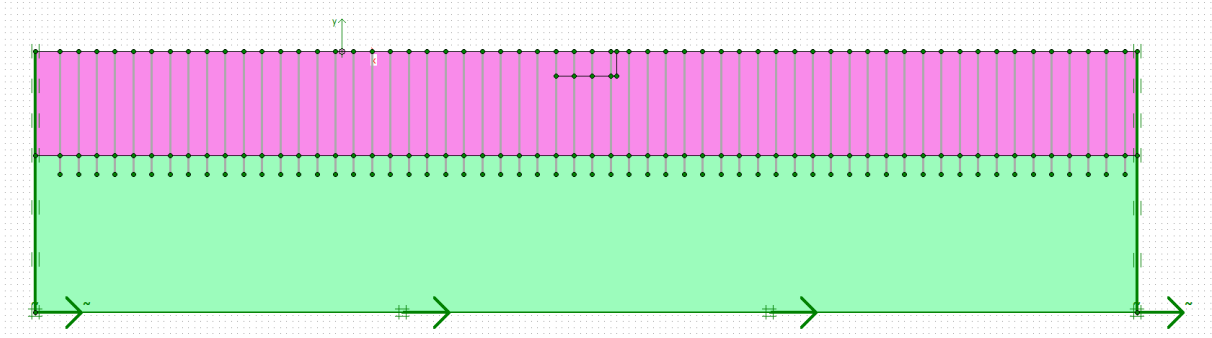
Şekil 5-9 Uygulanan yatay deprem ivmesi sonrasında meydana gelen yatay ivme grafiği

5.7 Sağlam Tabakaya Soketlenmiş Durum için Sonlu Elemanlar Analizi

5.7.1 Model Geometrisi

5.7.1.1 Doğal Durum

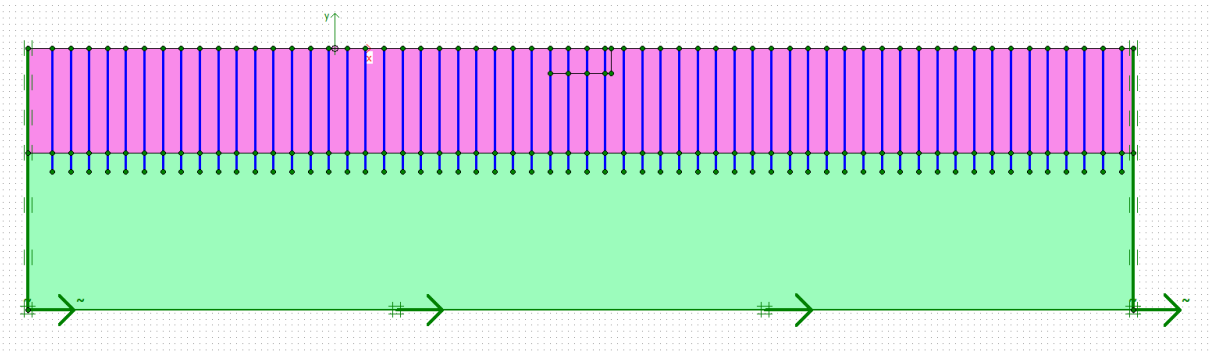
Arazideki doğal durum için; görece oldukça yüksek rijitliğe sahip iyi derecelendirilmiş çakıl (GW) tabakası üzerinde 17,0 m kalınlığında yumuşak kil tabakası bulunmaktadır. Arazideki doğal durum Şekil 5-10'da gösterilmektedir.



Şekil 5-10 Arazideki doğal durum

5.7.1.2 Taş Kolonların Yerleşimi ve Aktifleştirilmesi

Şekil 5-11'de taş kolonların yerleştirilmesi gösterilmektedir. Doğal durumda yerleştirilen taş kolon uygulamasından sonra zemin özelliklerinin değişimi bir önceki modelde belirtilmiştir. Sağlam tabakaya soketlenen durum için taş kolon iyileştirmesi ardından zemindeki iyileştirme ihmal edilecektir. Taş kolonların aktif edildiği durum Şekil 5-11'de gösterilmektedir.



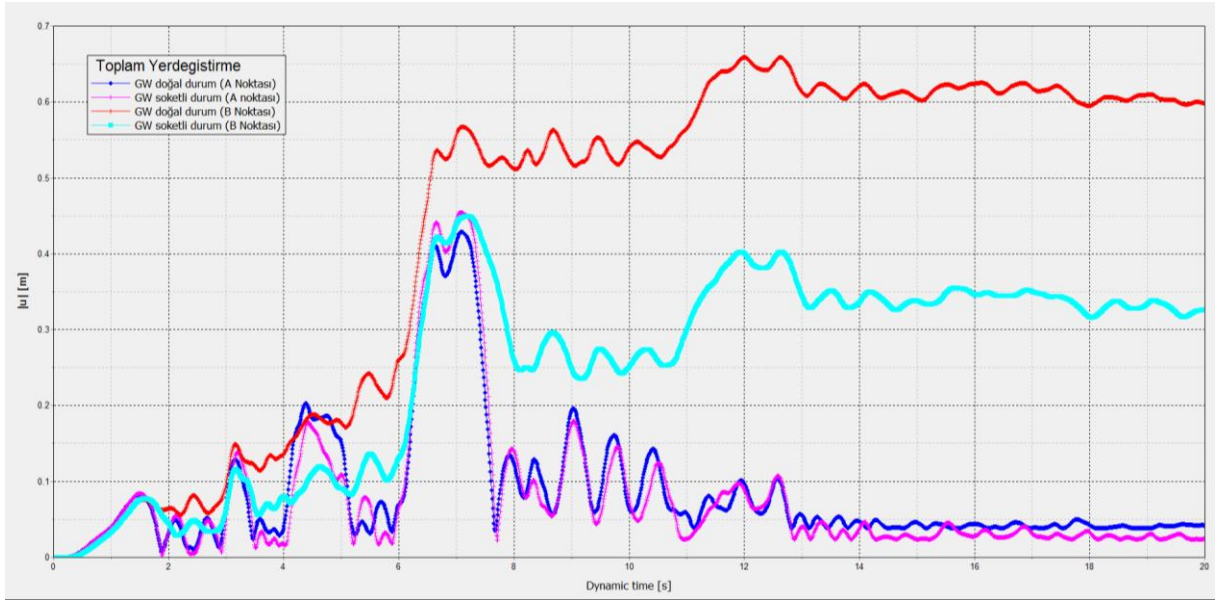
Şekil 5-11 Sağlam tabakaya soketlenmiş taş kolon yerleşimi

5.7.2 Sağlam Tabakaya Soketlenmiş Durum için Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

5.7.2.1 Toplam Yerdeğiştirme

Analiz sonuçlarını almak Şekil 5-2'de gösterilen "A" ve "B" referans noktalarından alınan toplam yer değiştirme miktarlarına bakılarak doğal durum ve iyileştirilmiş durum arasında kıyaslama yapılabilmektedir. Şekil 5-12'de arazide taş kolon iyileştirme öncesi ve sonrası

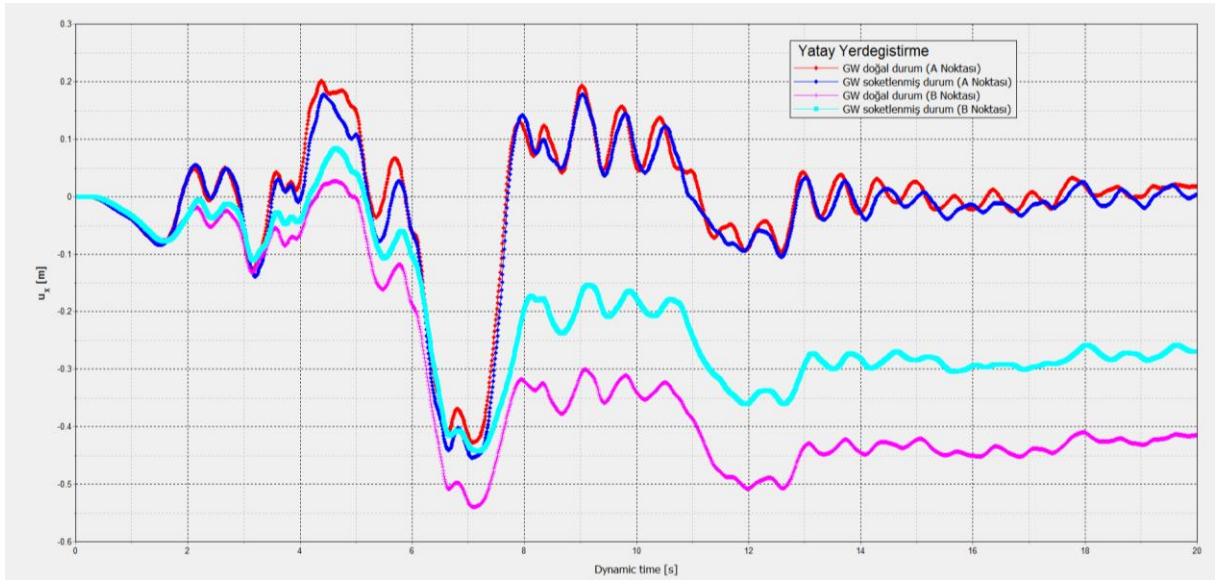
toplam yer değiştirme miktarları görülmektedir. Taş kolon uygulamasının ardından toplam yer değiştirme miktarlarında azalma olduğu görülmektedir.



şekil 5-12 Uygulanan yatay deprem ivmesi sonrasında sağlam tabakaya soketlenmiş durumda meydana gelen toplam yerdeğiştirme

5.7.2.2 Yatay Yerdeğiştirme

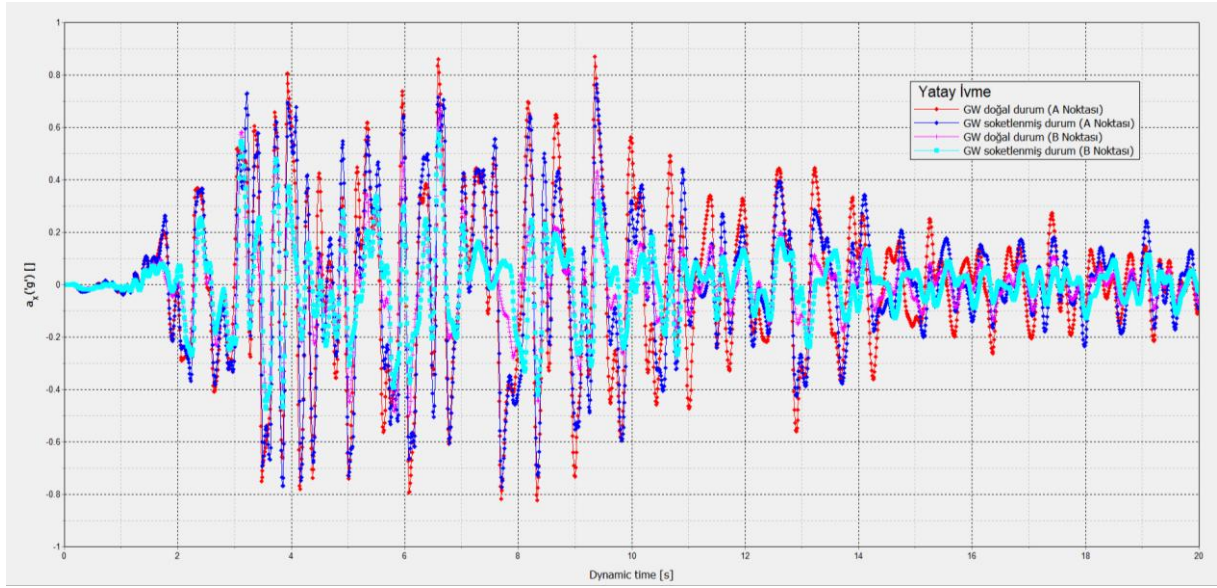
Arazide meydana gelen iyileştirme öncesi ve sonrası yatay yerdeğiştirme miktarları da şekil 5-13'de gösterilmektedir.



şekil 5-13 Uygulanan yatay deprem ivmesi sonrasında sağlam tabakaya soketlenmiş durumda meydana gelen yatay yerdeğiştirme

5.7.2.3 Etkiyen Yatay İvme

Şekil 5-14’de etkşyen yatay ivme grafiği verilmektedir.



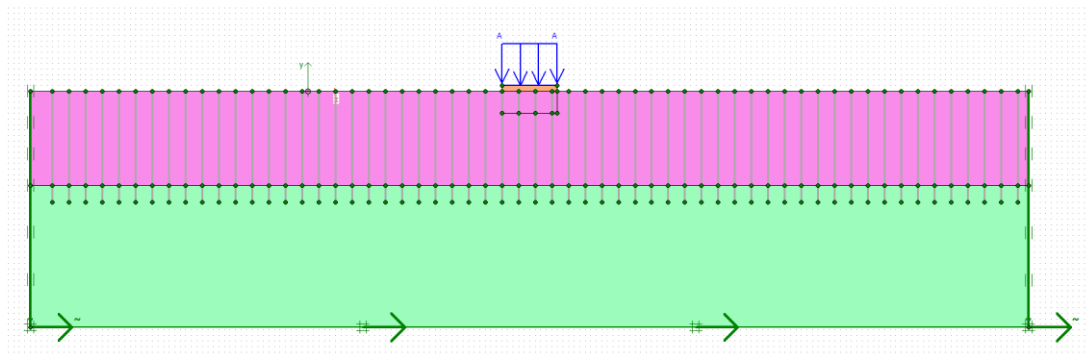
Şekil 5-14 Uygulanan yatay deprem ivmesi sonrasında sağlam tabakaya soketlenmiş durumda meydana gelen yatay ivme grafiği

5.8 Yükleme Altında Sağlam Tabakaya Soketlenmiş Durum

5.8.1 Model Geometrisi

5.8.1.1 Doğal Durum

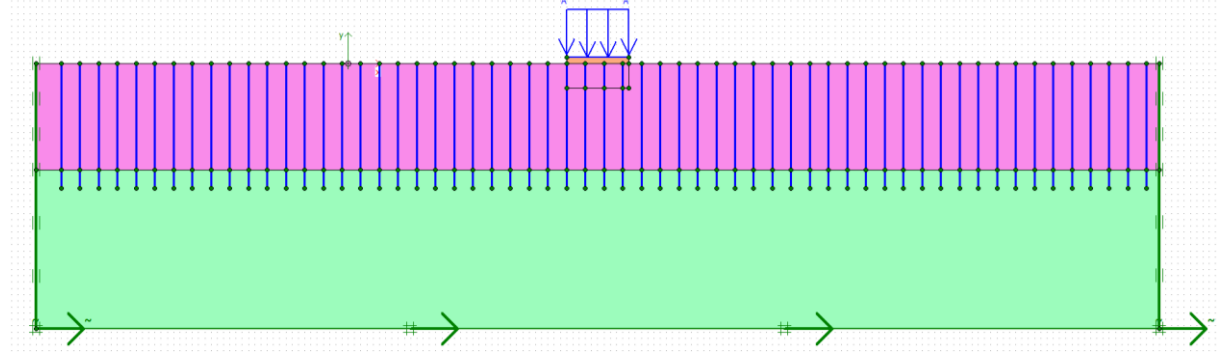
Bu modelde kullanılan zemin profili ve rijitlik parametreleri sağlam tabakaya soketlenmiş taş kolonların incelenmesinde kullanılan zemin profili ve rijitlik parametreleri ile aynı değerlerdir. Yükleme altında sağlam tabakaya soketlenmiş durum için yatay deprem ivmesi altındaki davranışında t=1000 m kalınlığında ve B=1000 m genişliğinde yüzeye oturtulmuş bir temelin uniform yükleme durumu incelenmiştir. Analiz için temel özellikleri “soil material” olarak modellenmiş ve lineer elastik davrandığı kabul edilmiştir. Şekil 5-15’de arazideki doğal durum gösterilmiştir.



Şekil 5-15 Arazideki doğal durum

5.8.1.2 Taş Kolon Yerleşimi ve Aktifleştirilmesi

Taş kolon yerleşimi sonrasında kil zeminde meydana gelmesi beklenen iyileştirme bu analiz için ihmal edilecektir. Doğal durum, taş kolonların olmadığı durum; iyileştirilmiş durum, taş kolonların iyi derecelendirilmiş çakıl (GW) tabakasına 3000 m soketlendiği durum olarak adlandırılmıştır. Şekil 5-16'da taş kolon yerleşimi ve aktifleştirilmiş durum gösterilmektedir.

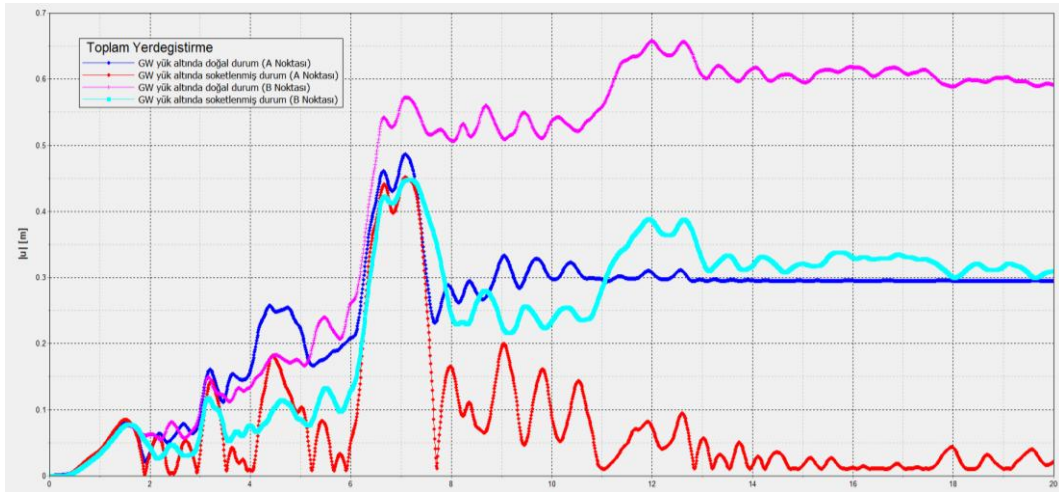


Şekil 5-16 Taş kolonların yerleşimi ve aktifleştirilmesi

5.8.2 Yükleme Altında Sağlam Tabakaya Soketlenmiş Durum İçin Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

5.8.2.1 Toplam Yerdeğiştirme

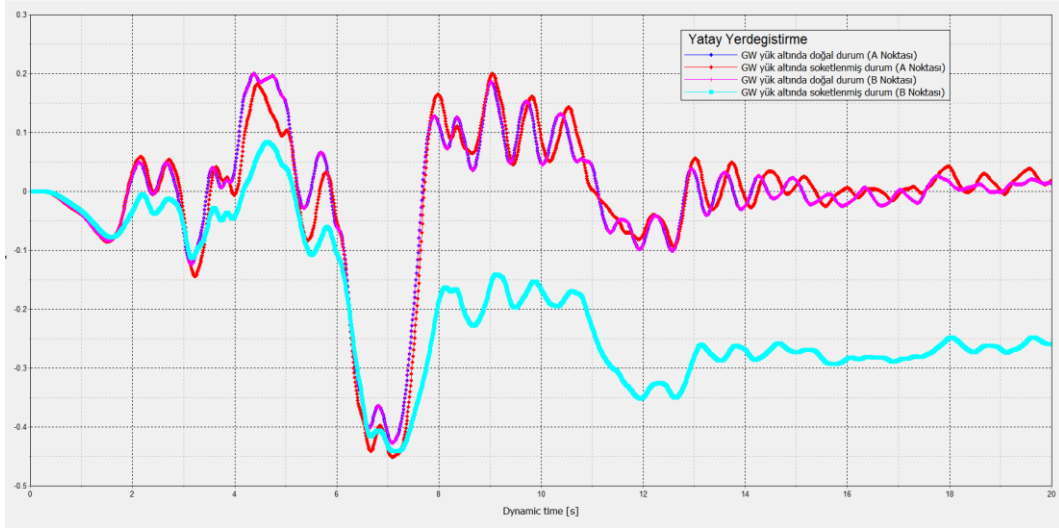
Referans noktaları olarak belirlenen "A" ve "B" noktalarına alınan toplam yer değiştirme grafiklerinde doğal ve iyileştirilmiş durum için değerler verilmektedir. Şekil 5-17'de gösterilen değerler altında ivme pik noktadan sonra yer değiştirme miktarlarında gözle görülür azalma meydana gelmektedir.



Şekil 5-17 Yükleme altında sağlam tabakaya soketlenmiş durumda meydana gelen toplam yerdeğiştirme

5.8.2.2 Yatay Yerdeğiştirme

Şekil 5-18’de referans noktalarında alınan doğal durum ve iyileştirilmiş durum için yatay yerdeğiştirme grafiği verilmiştir.



Şekil 5-18 Yükleme altında sağlam tabakaya soketlenmiş durumda meydana gelen yatay yerdeğiştirme

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında taş kolonlar ve darbeli kırmataş kolonlar için yerleştirme yöntemleri, göçme mekanizmaları ve hesap yöntemleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen taş kolon ile darbeli kırmataş kolon iyileştirme yöntemlerinin başlıca amaçları; taşıma gücünün artırılması ve meydana gelebilecek oturmaların azaltılmasıdır.

Darbeli kırmataş kolonlar için elle hesap yöntemleriyle ilgili örnek problemler verilmiştir. Verilen örnek problemlerde shaft uzunluğu, döşeme yüklerine göre kolon hesabı ve temel oturma hesabı yapılmıştır. Darbeli kırmataş kolonlarda oturma analizi için verdiğimiz örnek problemde zemin profili olarak 3,7 m siltli kil tabakasının altında killi zemin bulunmaktadır. YASS 1,5 m derinliğindedir ve uygulanması planlanan kolon boyutları 0,76 cm çapında ve 3,0 m uzunluğundadır. Yapılan hesaplamaların ardından verilen zemin profilinde meydana gelen oturma miktarları azaltılmıştır.

Taş kolonlar içinse; 3 farklı zemin durumu için yatay deprem ivmesi altında zeminde meydana gelen toplam ve yatay yer değiştirme miktarları incelenmiştir. İyileştirme için kullanılacak olan taş kolon boyutlarıda; 3,0 m aralıklarla 1,00 m çapında 20,0 m boyunda modellenmiştir. Analiz sonuç grafiklerini görmek için model üzerindeki düğüm noktalarından iki adet (A ve B) nokta belirlenmiştir. Belirlenen referans noktalarında arazideki doğal durum ve iyileştirilmiş durum karşılaştırılmıştır.

1. Durum: Arazideki kil zeminde uygulanan taş kolon iyileştirmesi ardından toplam yer değiştirme miktarlarına bakıldığında her iki referans nokta değeri içinde toplam yer değiştirme miktarları azalmıştır. Yatay yer değiştirme miktarları incelendiğinde toplam yer değiştirme miktarlarında olduğu gibi iyileştirme sonrası yatay yer değiştirme miktarları azalmıştır.

2. Durum: Arazideki kil zemin altında tabakalanmış görece rijit iyi derecelendirilmiş çakıl zemin tabakasına soketlenen taş kolonların yatay deprem ivmesi altında referans noktalarında alınan toplam yerdeğiştirme ve yatay yerdeğiştirme sonuçlarına bakıldığında iki değer içinde iyileştirilmiş durumda azalma görülmektedir.

3. Durum: Görece sağlam iyi derecelendirilmiş çakıl tabakasına soketlenmiş taş kolonların yükleme altındaki davranışlarının incelendiği durum için referans noktalarında alınan yerdeğiştirme grafiklerine bakıldığında yerdeğiştirme miktarlarında azalma görülmektedir.

Kolonların doğal ve sağlam tabakaya soketlenmiş durumlarda olduğu gibi yük altındaki durumda da “B” noktasının göstermiş olduğu hassasiyetin devam ettiği görülmektedir. Dikkat çeken asıl farklılık doğal durumda A noktasının pik ivme değerlerinden sonra toplam yerdeğiştirme grafiğinde görülen eğilimin B noktasının soketlenmiş durumdaki toplam yerdeğiştirme değerlerine çok yakın olmasıdır. Ayrıca, yükleme yapıldığında A noktasında zemin davranışının diğer iki modele göre yapılan uygulamadan çok daha fazla etkilendiği görülmektedir.

Bu model gerçek inşaat uygulamalarına daha yakın olmasından dolayı problemin farklı değişkenler ile analize tabi tutulmasının gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca, tüm modeller için

seçilen geometri için optimum değerlerinin belirlenmesinde idealleştirme çalışmaları da yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Aboshi, H., Ichimoto, E., Enoki, M. and Harada, K. (1979) "The composer-a method to improve characteristics of soft clay by inclusion of large diameter sand columns", Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and other techniques, Paris, Vol. 1, pp. 211-216.

Akyüzoğlu, M., Kiziroğlu, S., ve Kurt. E. (2011). "Üst Geçit Köprüsü & Yaklaşım dolguları Temel Zeminlerinin İyileştirilmesinde Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) Uygulaması",4. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Alamgir M., Miura, N., Poorooshasb. H.B., Madhav, M.R., (1996) "Deformation analysis of sof ground reinforced by columnar inclusions", Comput Geotech 18(4):267–290.

Alamgir, M., Zaheer, S.M., (2001) "Field investigation on a soft ground of Bangladesh reinforced by granular piles", In: Proceedings, international symposium on earth reinforcement. Land marks in earth reinforcement, pp 517–522,

Alonso, J.A., Jimenez, R., (2012) "Reliability-based Design of Stone Columns for Ground Improvement Considering Settlement and Bulging as Failure Modes", Proceedings of ISSMGE-TC211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels, Vol.III, pp.319-328.

Ambiliy, P.A., Gandhi, R.S., (2004) "Experimental and Theoretical Evaluation of Stone Column in Soft Clay", International Conference on Geosynthetics and Geo-environmental Engineering." ICGGE-2004 held at IIT Bombay during December 2004. pp 201-206.

Ambiliy, P.A., Gandhi, R.S., (2007) "Behavior of Stone Columns Based onExperimental and FEM Analysis", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, Vol.133. No. 4, pp.405-415.

Anonymous., (2004) "Vibro System", Hayward Baker Inc, p 1-15, Odenton, Maryland.Web sitesi. www.Haywardbaker.com. Erişim tarihi 05.08.2008.

Aytekin, M., (2004) "Deneysel Zemin Mekaniği", Genişletilmiş 2. Baskı, Teknik Yayınevi, Ankara, 624s.

Bachus, R.C., and Barksdale, R.D., (1989) "Design Methodology for Foundations on Stone Columns", Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, Proceedings of Settlement", 1994, Texas, ASCE Geotechnical Special Publication No.40, pp.244-257.

Balaam, N.P., and Booker, J.R., (1981) "Analysis of rigid raft supported by granular piles", Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., 5(4), 379-403.

Barksdale, R.D., (1981) "Site Improvement in Japan Using Sand Compaction Piles", Georgia Institute of Technology, Atlanta, July.

Barksdale, R.D., and Bachus, R.C., (1983) "Design and construction of stone columns", vol.1. Report no. FHWA/RD-83/026, Federal Highway Administration, Washington, DC.

- Barron, R.A., (1948) "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", Transactions ASCE, Vol.113, pp.718-742.
- Bergado, D.T., Panichayatum, Sampaco. C.L., (1988) "Reinforcement of soft bangkok clay using granular piles", In: Proceedings, international symposium on theory and practice of earth reinforcement, Kyushu, Japan, pp 179–184
- Bergado, D.T., Alfaro, M.C., Chai, J.C., (1991) "The Granular Pile: Its Present State and Future Prospects for Improvement of Soft Bangkok Clay", Journal of South Asian Society of Soil Engineering. Geotechnical Engineering. Vol. 22. pp. 143-171
- Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N., And Balasubramaniam, A.S., (1996). "Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments", ASCE, New York.
- Besancon, G., Iorio, J.P., and Soyez, B., (1984) "Analyses des parametres de Calcul Intervenant dans le Dimensionnement des Colonnes Ballastees", International Conference on In-Situ Soil and Rock Reinforcement, Paris, 119-126.
- Brauns, J., (1978) "Initial bearing capacity of stone columns and sand piles", Symposium on Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques, Sydney, 477-496.
- Brown, R.E., (1977) "Vibrofloatation compaction of cohesionless soils", J Geotech Eng Div, ASCE 103(12):1437–1451
- Canizal, J., Castro, J., Cimentada, A., Da Costa, A., Miranda, M., and Sagasetta, C., (2012). "Theoretical analyses of laboratory tests of kaolin clay improved with stone columns", Proceedings of ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels, Vol.III, pp.373-381
- Castro, J., Karstunen, M., (2010) "Numerical simulation of stone column installation", Can. Geotech. J., 47(10), 1127-1138.
- Clemente, J.L., ve Davie, J.R., (1999) "Stone Columns for Settlement Reduction", American Society for Testing and Materials, 1-2.
- Clemente, J.L.M., Senapathy, H., Davie, J.R., (2005) "Performance Prediction of Stone-Column-Supported Foundations", Proceedings of 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan, pp. 1327-1330
- Datye, K.R., (1982) "Settlement and Bearing Capacity of Foundation System", Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, pp.85-103.
- Demir, H., (2007). "Taş Kolon ve Geopier Uygulaması ile Zemin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, "Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 14-58.
- Demir, S., (2011). Darbeli Kırmataş Kolonların İmalatında Zemin Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 9-59.

- Elshazly, H.A., Hafez, D.H. and Mossaad, M.E., (2008). "Reliability of Conventional Settlement Evaluation for Circular Foundations on Stone Columns", *Geotec. Geol. Eng.*, Vol.26, pp.323-334
- Ergun, M.Ö., (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.
- Fox, N.S ve Cowell, M.J (1998). "Geopier Foundation and Soil Reinforcement Manuel", Geopier Foundation Company Inc. Scottsdale. AZ.
- Gibson, R. E. ve Anderson, W. F., (1961). In-Situ Measurements of Soil Properties with Pressumeter, *Civil Eng. and Pub. Work Rev.*, 56, 658, 615-618.
- Greenwood, D.A., (1970) "Mechanical improvement of soils below ground surfaces." In: *Proceedings of the ground Engineering conference*, Institution of Civil Engineers, London, pp 11-22.
- Greenwood, D.A., Kirsch K., (1984). "Specialist Ground Treatment by Vibratory and Dynamic Methods", *Satae of the Art Report, Piling and Ground Treatment*, Thomas Telford, London, 17-45.
- Goughnour, R. R., Bayuk, A. A., (1979). "Analysis of stone column soil matrix interaction under vertical load." *Proc., Int. Conf. on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and Other Techniques*, Vol. 1, Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, 271-278.
- Han, J., Ye, S.L., (1991) Field tests on clays stabilized by stone columns at coastal areas in China. *Proceedings of 4th International Conference on Piling and Deep Foundations*, Stresa, Italy
- Hausmann, M.R., (1990) "Engineering Princeples of Ground Modification" s.632 McGraw Hill, Newyork.
- Hughes, J. M. O., and Withers, N. J. (1974). "Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns." *Ground Eng.*, 7(3), 42-49.
- Hughes, J.M.O., Withers, N.J., and Greenwood, D.A. (1975) "A field trial of the reinforcing effect of a stone column in soil." *Geotechnique*, 25(1), p 31-44.
- Hughes, J. M. O., Withers, N. J., and Greenwood, D. A. (1976). "A field trial of reinforcing effect of stone column in soil." *Proc., Ground Treatment by Deep Compaction*, Institution of Civil Engineers, London, 32-44.
- Indian Standards (IS2003). "Indian standard code of practice for design and construction for ground improvement-guidelines. Part 1: Stone columns." IS 15284 (Part 1), New Delhi, India.
- Jebe, W. ve Bartels, K. (1983). "The Development of Compaction Methods with Vibrators from 1976 to 1982", *Proc 8th ECSMFE*, Helsinki, 259-266.

- Jellali, B., Bouassida, M., and De Buhan, P. (2005). "A homogenization method for estimating the bearing capacity of soils reinforced by stone columns." *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, 29(10), 989–1004.
- Juran I, Guermazi A (1988). "Settlement response of soft soils reinforced by compacted sand columns." *J Geotech Geoenviron Eng ASCE* 114(8):903–943
- Juran I, Chen, C. L., Acar Y. B. ve Guermazi, A., (1988). "A Comparative Study of Soil Improvement Techniques for Highway Embankments," Federal Highway Administration, Louisiana, 276 s.
- Keller, (2010). "Deep Vibration Techniques", Brochure 10-02E, İngiltere.
- Lawton, E.C. and Fow, N.S., (1994). "Settlement of Structures Supported on Marginal and Inadequate Soils Stiffened With Short Aggregate Piers". ASCE. Geotechnical Special Publication No. 40: Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments Volume II, College Station, Texas
- 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.
- Lawton, E. V. and Merry, S. M. (2000), "Performance of Geopiersupported Foundation During Simulated Seismic Tests on Northbound Interstate 15 bridge over South Temple, Salt Lake City Utah", Final Rep. No. UUCVEEN 00-03, University of Utah.
- Madhav, M.R. and Miura, N., (1994) Soil improvement—panel report on stone columns. In: Proceedings of the 13th international conference on soil mechanics and foundation Engineering, New Delhi, India, pp 163–164
- Madhav, M.R., and Vitkar, P.P., (1978) "Strip footing on weak clay stabilized with granular trench." *Canadian Geotechnical Journal*, 15(4), p 605-609.
- McCabe, B. A., Nimmons, G. J., and Egan, D. (2010). "A review of field performance of stone columns in soft soils." *Geotech. Eng.*, 162(GE6), 323-334.
- McKenna JM., Eyre WA., and Wolstenholme DR (1975), performance of an embankment supported by stone columns in soft ground", *Geotechnique*, 25(1), pp. 51- 59.
- Mitchell, J.K., and Katti, R.K., (1981). "Soil Improvement – State-of-the-Art Report", Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, pp.261-31.
- Mitre Software Corporation (1999). *GSLOPE User's Manual ver. 4*. Mitre Software Corporation. Edmonton, Alberta, Canada.
- Najjar, S.S., Sadek, S., Maakaroun, T. (2010) "Effect of sand columns on the undrained load response of soft clays." *J Geotech Geoenviron Eng, ASCE* 136(9):1263–1277

Poorooshasb, H. B., and Meyerhof, G. G. (1997). "Analysis of behavior of stone columns and lime columns." *Comput. Geotech.*, 20(1), 47-70.

Priebe, H. J. (1976). "Abschätzung des Setzungsverhaltens eines durch Stopfverdichtung verbesserten Baugrundes." *Bautechnik*, 53(H.5), 160-162 (in German).

Priebe, H. J. (1995). "The design of vibro replacement." *Ground Eng.*, 28(12), 31–37.

Ranjan, G. (1989) Ground treated with granular piles and its response under load. *Indian Geotech J* 19(1):1–86

Rao, N. S., Reddy, K. M. ve Rumar, P. H., (1997). Studies on Groups of Stone Columns in Soft Clays, *Geotechnical Engineering-Bangkok*, 28, 2, 165-182.

Schweiger, H.F., (1989). "Finite Element Analysis of Stone Column Reinforced Foundations", Thesis presented to the University of Wales, Swansea in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

Shahu JT, Madhav MR, Hayashi S (2000) Analysis of soft ground—Granular pile-granular mat system. *J Comput Geotech* 27(1):45–62

Shahu, J. T., Reddy, Y. R. (2011). "Clayey Soil Reinforced with Stone Column Group: Model Tests and Analyses." *Journal Of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*. 137(12), pp. 1265-1274.

Shivashankar,R., Dheerendra,M. R., Babu, Sitaram Nayak V. Rajathkumar (2011) "Experimental Studies on Behaviour of Stone Columns in Layered Soils". *Geotech Geol Eng.* 29:749–75.

Texas Department of Transportation (2000). *Geotechnical Manuel*. Texas Department of Transportation. syf. 9-17

Url-1 : <http://www.ice-holland.com/content/482/Technology/Vibroflots/>

Url-2 : <http://www.vibromenard.co.uk/techniques/stone-columns/>

Van Impe, W.F. (1989). "Soil Improvement Techniques and Their Evolution" 125s Balkema, Rotterdam.

Van Impe, W.F, De Beer, E., (1983). "Improvement of Settlement Behavior of Soft Layers by Means of Stone Columns", *Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, s.309-312, Rotterdam, Balkema.

Vesic, A.S., (1972). "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.98(SM3), s.265–290

Weber, T.M., Springman, S.M., Gäb, M., Racansky, V. and Schweiger, H.F., (2008). "Numerical Modelling of Stone Columns in Soft Clay under an Embankment", *Geotechnics of Soft Soils-Focus on Ground Improvement*, pp.305-311, London, Taylor & Francis.

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.

White, D.J., Pham, T.V. ve Hoevelkamp, K.K., (2007). "Support Mechanisms of Rammed Aggregate Piers. II : Numerical Analyses", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering © ASCE.

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.

Wissmann, K.J., White, D.J. and Lawton E.C., (2007). "Load Test Comparisons for Rammed Aggregate Piers and Pier Groups", GSP 172 Soil Improvement.

Wong, D., FitzPatrick, B. ve Wissman, K. (2004). "Stabilization of Retaining Walls and Embankments Using Rammed Aggregate Piers". Geo-Trans 2004: Geotechnical Engineering for Transportation Projects, GSP No. 126, Vol. 2

Wood, D. M., Hu, W., and Nash, D. F. T. (2000). "Group effects in stone column foundations: Model tests." Geotechnique, 50(6), 689-698.