

Zeminlerin İyileştirilmesi: Yöntemlere Genel Bir Bakış

Doç. Dr. Sadık Öztoprak

İstanbul Üniversitesi - İnşaat Mühendisliği Bölümü

oztoprak@istanbul.edu.tr ; sadikoztoprak@gmail.com

Tel: 0533 489 0916

Giriş

Son yıllarda büyük projelerin artması (çok katlı yapılar, barajlar, köprüler, kıyı yapıları, vs), bununla birlikte artık daha problemli zeminlerin üzerine inşaat yapılıyor olması çoğu projede derin temeller ve/veya zemin iyileştirmesini gündeme getirmektedir.

Yumuşak veya gevşek zeminlerdeki inşaatlar sırasında **stabilite (taşıma gücü)** ve **deformasyon** problemleri ortaya çıkmaktadır. Bu tür zeminlerde zemin iyileştirmesine gidilmezse bazen yüksek deformasyonlar bazen de kayma göçmeleri sonucunda yapı kullanılamaz hale gelebilmektedir.

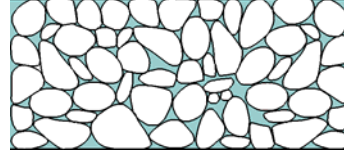
☑ *Gevşek kum zeminlerde taşıma gücünü artırmak ve sıvılaşma potansiyelini azaltmak için*

☑ *Yumuşak kil zeminlerde ise genelde taşıma gücünü artırmak, konsolidasyon oturmalarını azaltmak veya sınırlandırmak için zemin iyileştirmesine gidilmektedir.*

Giriş

İri taneli zeminler – Kum, çakıl, blok

SIVILAŞMA – DÜŞÜK TAŞIMA GÜCÜ

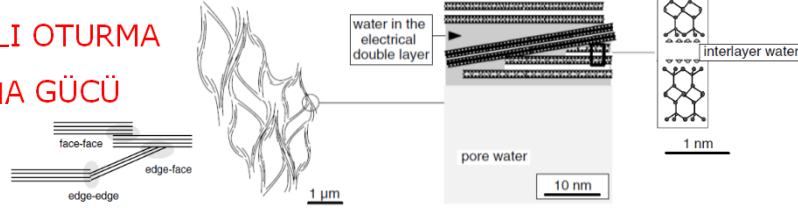


İnce taneli zeminler – Killer, siltler

ZAMANA BAĞLI OTURMA

DÜŞÜK TAŞIMA GÜCÜ

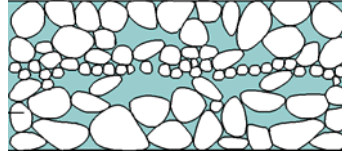
HEYELAN



Kontrolsüz dolgular, alüvyon –

ÇÖKME – OTURMA

HEYELAN



Zemin İyileştirmesinin Amacı

Zemin iyileştirmesinin amaçlarını aşağıdaki gibi 4 maddede toparlayabiliriz. İyileştirmede hedef, bu maddelerden birini veya birkaçını sağlamaktır.

- [1] Taşıma gücünü arttırmak (kayma mukavemetini arttırmak)
- [2] Boşluk oranını azaltmak
- [3] Permeabiliteyi (geçirgenliği) azaltmak
- [4] Birim hacim ağırlığını arttırmak

Zemin iyileştirme yöntemlerini zemin tipine ve iyileştirme esaslarına göre uygunluğunu hesaba katarak 4 kategoride toparlayabiliriz. A ve B grupları kalıcı, C grubu ise geçici amaçlar içindir.

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| [1] Killi zeminler için | [3] Geçici amaçlar için |
| [2] Kumlu zeminler için | [4] Diğer yöntemler |

Killi Zeminler için Zemin İyileştirme Yöntemleri

A. Killi Zeminler için

1. Yerdeğiştirme ————— Mekanik yöntem
 2. Önyükleme —————
 3. Kum dren —————
 4. Plastik dren —————
 3. Kum dren ————— Düşey dren —————
 4. Plastik dren —————
 5. Vakum konsolidasyonu —————
 6. Ozmotik basınç —————
 7. Elektro ozmoz —————
 8. Kireç kazıkları —————
 9. Zemin kolonları —————
 9. Zemin kolonları ————— Derin karıştırma yöntemi —————
 9. Zemin kolonları ————— Jet-grout kolonları —————
 9. Zemin kolonları ————— Kum kompaksiyon kazıkları —————
 9. Zemin kolonları ————— Taş kolon ve darbeli kırmataş kolon —————
 10. Isıl ve elektro-kimyasal işlemler —————
- Yüklemeye ile kilin konsolidasyonuna dayanan yöntemler
- Dış yük olmadan konsolidasyona dayanan yöntemler
- Kil ile harç arasındaki kimyasal reaksiyon
- Mekanik
- Kimyasal reaksiyon

Kumlu Zeminler için Zemin İyileştirme Yöntemleri

B. Kumlu Zeminler için

1. Kompaksiyon kazığı —————
 2. Zemin kolonları —————
 2. Zemin kolonları ————— Kum kompaksiyon kazığı —————
 2. Zemin kolonları ————— Vibroflotasyon (taş kolon) —————
 2. Zemin kolonları ————— Darbeli kırmataş kolonu —————
 2. Zemin kolonları ————— Jet-grout kolonu —————
 3. Patlatma kompaksiyonu —————
 4. Elektro şok kompaksiyonu —————
 5. Dinamik konsolidasyon —————
 6. Çakıl dren —————
 7. Enjeksiyon —————
 7. Enjeksiyon ————— Permeasyon enjeksiyonu —————
 7. Enjeksiyon ————— Kompaksiyon enjeksiyonu —————
 7. Enjeksiyon ————— Çatlatma enjeksiyonu —————
- Sıkılaştırma, kazıklar veya vibrasyon ile özellikle yatay sıkılaştırma
- Sıkılaştırma, özellikle darbe ile düşey sıkılaştırma
- Düşey drenaj
- Boşlukları doldurma

Diğer Amaçlar için Zemin İyileştirme Yöntemleri

C. Bütün Zeminler İçin

1. Sıkıştırılmış granüler şilte — Tampon tabaka
2. Geotekstil ve geogrid serme — Donatılandırma

D. Geçici Amaçlar için

1. Well point yöntemi — Su alarak su seviyesini düşürme
2. Dondurma — Boşluk suyunu geçici olarak dondurma

Killi Zeminlerde İyileştirme – Yerdeğiştirme, Önyükleme

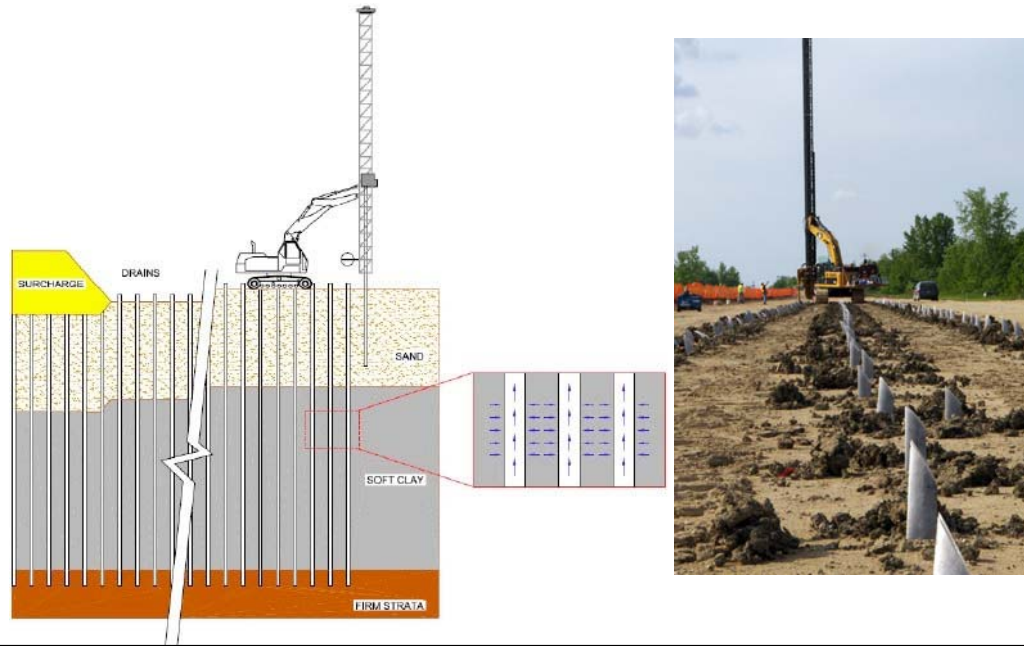
(1) Yerdeğiştirme

- Yumuşak killi zeminler kazılır ve iyi kalitede kum ile yer değiştirilir.
- Bu yöntem az miktardaki zemin kütlesi için ekonomiktir.

(2) Önyükleme

- Tasarım yüküne eşdeğer veya bundan fazla bir yük zemine uygulanır
- Yumuşak zemin için gerekli olan konsolidasyon derecesi elde edilene kadar yük bırakılır
- Kayma mukavemetinde artış, kalıcı oturmalarda ise azalma elde edilir.

Killi Zeminlerde İyileştirme – Yerdeğiştirme, Önyükleme



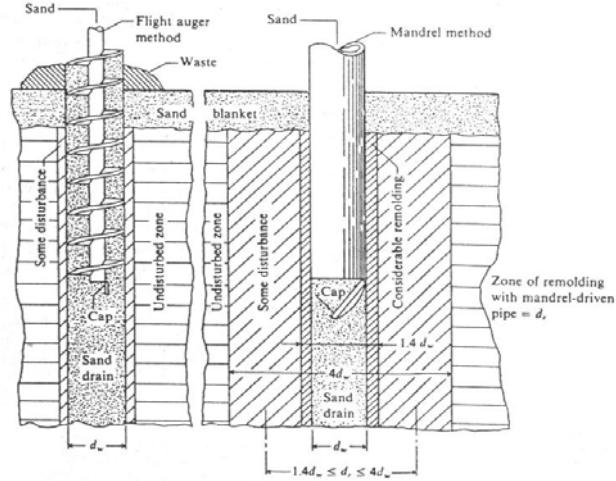
Killi Zeminlerde İyileştirme – Kum Drenler

(3) Kum Drenler

- ➔ Permeabilitesi çok düşük veya çok kalın yumuşak kil tabakasına önyükleme tekniği tek başına uygulandığı zaman etkili olamaz. Çünkü önemli sıkışmaların meydana gelebilmesi için çok uzun zaman gereklidir.
- ➔ Konsolide edilen kilde drenaj boyunu kısaltan düşey drenlerin yerleştirilmesi sonucunda önyükleme yapıldığında radikal bir iyileştirme sağlayacaktır. Bu uygulama genelde yumuşak killere has bir olaydır.
- ➔ Kum drenler ise kumdan oluşan kazıkların yumuşak zemin içinde oluşturulması ile elde edilir. Tipik çaplar 30-50 cm. arasında değişmektedir.
- ➔ İki yöntemle teşkil edilirler: Kapalı ve açık mandrel yöntemleri
- ➔ Çok büyük derinliklere kadar uygulanabilirler.

Killi Zeminlerde İyileştirme – Kum Drenler

➔ Açık mandrel (auger) yöntemi daha az örselenmeye neden olmaktadır.



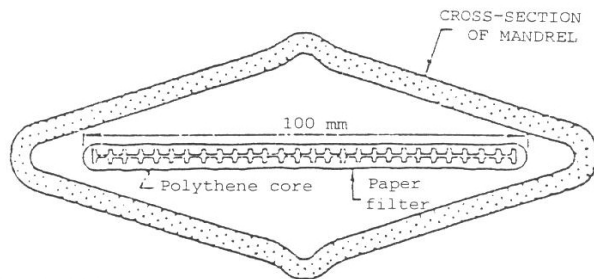
Killi Zeminlerde İyileştirme – Plastik Drenler

(4) Plastik Drenler (düşey, şerit, fitil (wick) dren)

➔ Plastik drenler son zamanlarda mukavva drenlerin en popüler olan düşey drenlerdendir. Özellikle en çok bilineni Geodren'dir.

➔ Geodren 100 mm. genişliğinde ve 3 mm. kalınlığında her iki tarafı boyunca kanalları bulunan kağıt kaplı polietilen şerittir. Geodrenin yerleştirilmesi için mandrel kullanılır.

➔ Kum drenlere göre oldukça az örselenmeye neden olan plastik drenlerin büyük oturmalarla sürekliliği bozulmaz.



Killi Zeminlerde İyileştirme – Vakum Konsolidasyonu

(5) Vakum Konsolidasyonu

- ➔ İyileştirmenin temeli önyüklemeye ve düşey drende olduğu gibi yumuşak killerin konsolidasyonudur.
- ➔ Önyüklemeye yönteminde uygulanan yük zemin içerisindeki toplam gerilmeyi yükseltir. Toplam gerilmenin artışı ilk başta boşluk suyu basıncı ile taşınır. Sonra aynı toplam gerilme halinde fazla boşluk suyu basıncı giderek sönmölenir. Sonuçta, uygulanan yük tamamen efektif gerilme ile taşınır. Bu işlem konsolidasyonun olağan formudur.
- ➔ Vakum konsolidasyonu halinde dış yük uygulamaya gerek yoktur. Bu yöntemde zemin yüzeyine membranlar serilir ve zemin yüzeyi ve membranlar arasındaki basınç vakum seviyesine kadar düşürölür. Değişmeyen toplam gerilme ve azalan boşluk suyu basıncı efektif gerilmede artışa neden olacaktır. Konsolidasyonun hızlanması için kum drenler yöntemde kullanılabilmektedir.

Killi Zeminlerde İyileştirme – Ozmotik Basınç

(6) Ozmotik Basınç

- ➔ Yöntem temel olarak kum drenlerle yapılan vakum yöntemi ile aynıdır. Burada, yarı geçirgen membranlardan yapılmış silindirler yumuşak kil içine yerleştirilirler ve yüksek konsantrasyondaki herhangi bir solüsyon ile doldurulur. Su molekülleri yarı-geçirgen membran içinden geçebilirler ancak büyük moleküller geçemezler. Bu temele dayanarak farklı konsantrasyonlardaki iki solüsyon arasında yarı-geçirgen membran bulunursa ozmotik basınç oluşur.
- ➔ Ozmotik basınçtan dolayı zemin içerisindeki boşluk suyu basıncı azalır ve böylece dış yük olmadan efektif gerilme artırılır.
- ➔ Bu yöntem Japonya’da geliştirilmiştir, fakat halen deneme aşamasındadır.

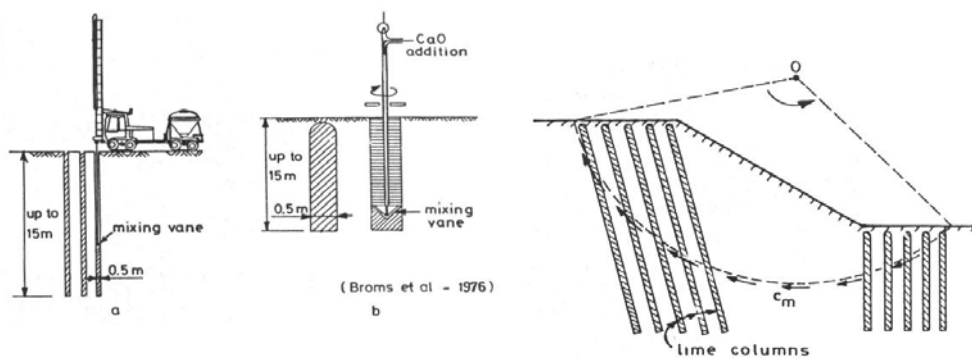
Killi Zeminlerde İyileştirme – Sönmemiş Kireç Kazıkları

(8) Sönmemiş Kireç Kazıkları

- ➔ Bu yöntem de kum drenlerle vakum yöntemi ile aynıdır.
- ➔ Su muhtevası %50'nin üzerindeki ince taneli zeminlerde konsolidasyonu hızlandırmak amacıyla uygulanmaktadır.
- ➔ İyileştirilecek zeminde 1-1.5 m. Aralılarla 30-50 cm. çapında ve 10-15 m. derinlikte açılan kuyulara sönmemiş kireç sıkıştırılarak doldurulmaktadır.
- ➔ Sönmemiş kireç (CaO) kimyasal aktif bir malzemedir ve hidrate kireç oluşturmak için ağırlığının %32'si kadar suyu emer. Hidratasyon sırasında kirecin hacmi orjinal hacminin iki katına çıkmaktadır.
- ➔ Diğer taraftan hidratasyon ile ortaya çıkan yüksek sıcaklık suyun viskozitesini azaltarak reaksiyonları hızlandırır. Drenajın ve sıkışmanın yönü radyaldır.

Killi Zeminlerde İyileştirme – Sönmemiş Kireç Kazıkları

- ➔ Kolay ve ucuz olan bu yöntem son zamanlarda çok kullanılmaktadır.
- ➔ Uzun dönemde kirecin nasıl davranacağı ve ilk başlardaki etkisini sürdürüp sürdüremeyeceğinin tam olarak cevabı yok.



Killi Zeminlerde İyileştirme – Derin Karıştırma Yöntemi

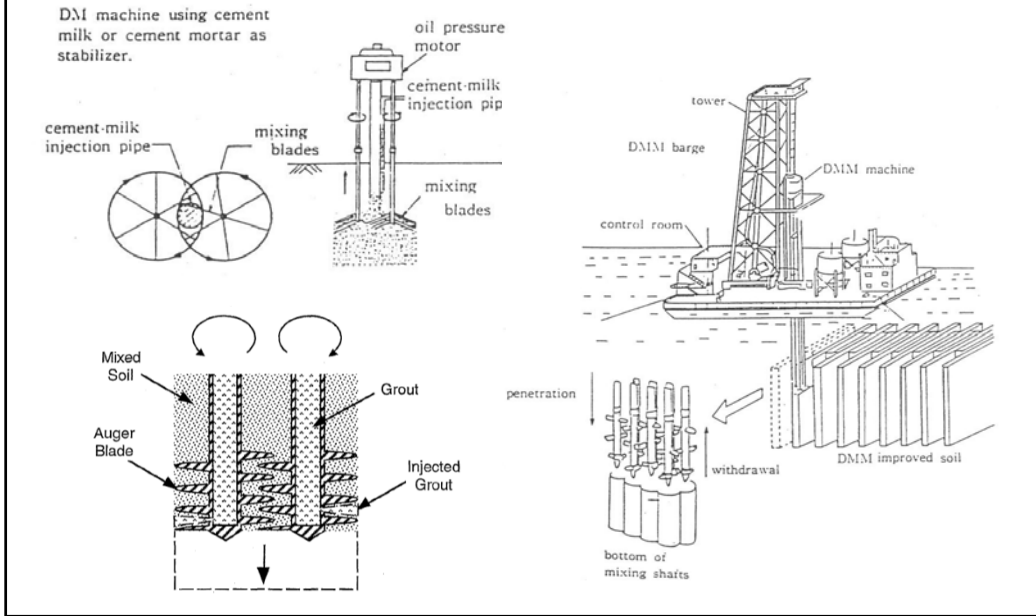
(9) Zemin Kolonları - Derin Karıştırma Yöntemi (DMM)

- DMM 1960'lerde Japonya'da geliştirilen ve 1970'lerden beri yaygın olarak gevşek kum zeminlerin deprem sırasındaki sıvılaşmasına karşı kullanılan iyileştirme yöntemidir. Günümüzde daha çok killerde uygulanmaktadır.
- Arazide kanatlı dev bir makina kimyasal maddeyi (kireç veya çimento) zemine vermek ve zemin ile maddeyi karıştırmak için kullanılır.
- Yöntemin tasarım esasları diğer geleneksel yöntemlere göre çok farklıdır ve çoğu durumda iyileştirilen zemin kütlesi gömülü bir yapı gibi davranır.
- Prototip göçme deneyi ve geoteknik santrifüj model deneyini kapsayan arazi ve laboratuvar deneyleri kadar sonlu elemanlar yöntemi gibi nümerik analizler ve sismik davranış analizi yöntemin rasyonelleşebilmesi için önemlidir.

Killi Zeminlerde İyileştirme – Derin Karıştırma Yöntemi

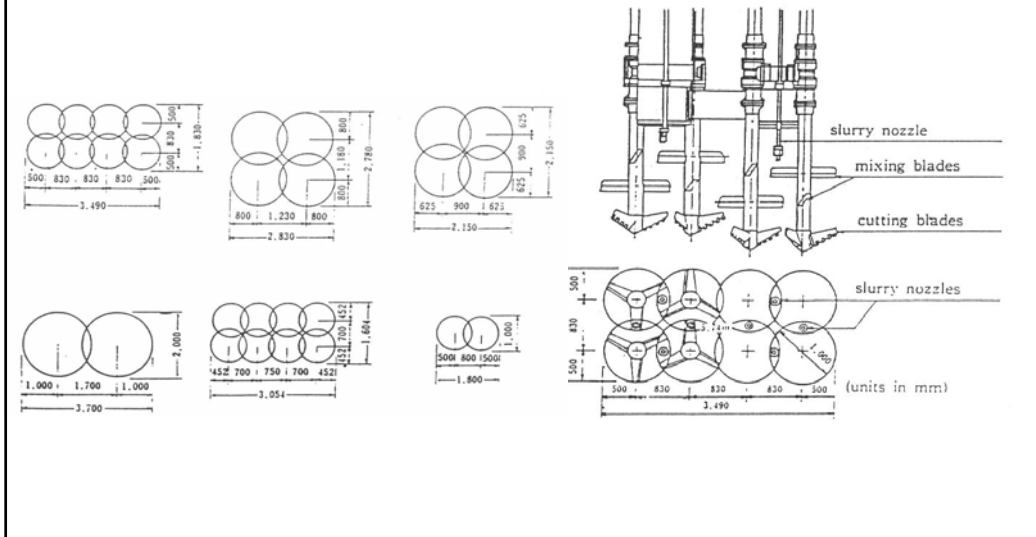
- DMM yönteminin özellikleri şu şekilde özetlenebilir:
 1. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, iyileştirilmiş zeminin mukavemeti çok yüksek ve sıkışabilirliği düşüktür.
 2. Kür süresi çoğu zaman bir aydır ve imalat süresi çok kısadır
 3. Uygulama sırasındaki gürültü, titreşim ve su kirlenmesi minimum düzeydedir.
 4. Bu yöntemde yerindeki zemin kullanılır. Yerdeğiştirme, kum kompaksiyon kazıkları ve kum dren yöntemlerindeki gibi çok kuma ihtiyaç duymaz.
 5. İmalat masrafları bazı durumlarda diğer yöntemlere göre biraz yüksektir.
- Japonya'daki liman, demiryolu, nehir ve havaalanı yapıları için 10 yılda 12 milyon m³'ten fazla yumuşak zemin bu yöntemle iyileştirilmiştir.

Killi Zeminlerde İyileştirme – Derin Karıştırma Yöntemi



Killi Zeminlerde İyileştirme – Derin Karıştırma Yöntemi

DMM'de kullanılan kanat çeşitleri



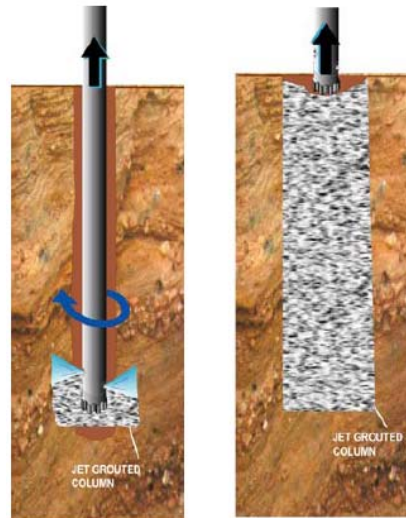
Killi Zeminlerde İyileştirme – Derin Karıştırma Yöntemi

- ➔ DMM’de iyileştirme yapılacak derinliğe makinanın penetrasyonu sırasında karıştırıcı shaftın alt ucunda bulunan karıştırıcı kanatlar yumuşak zemini, mukavemetini azaltmak için keser ve örseler.
- ➔ Daha sonra makina yumuşak zemine kendi ağırlığı ile batabilir. Makinanın geri çekilişi sırasında düşey hareket hızı sabit tutulur. Bu sırada stabilizer, zemine sabit hızla, basınçlı olarak verilir. Yatay düzlemde dönen karıştırıcı kanatlar yumuşak zemini hem keser hem de stabilizer ile karıştırılır. Böylece stabilizer-zemin karışımı kolonu oluşur.
- ➔ Makinanın tipine göre, stabilizerin uygulanması hem penetrasyon hem de geri çekilişte yapılabilir.
- ➔ Günümüzde DM makinaları ile 1.5 m²’den 9.5 m² kesit alanına kadar geniş kolonlar yapabilmektedir. İyileştirmenin yapılabileceği derinlik ise su yüzeyinden 70 m’ye ulaşabilmektedir.

Killi Zeminlerde İyileştirme – Jet-Grout Kolonları

(9) Zemin Kolonları – Jet-Grout Kolonları (JK)

- ➔ 9-10 cm çapında açılabilen delikte, istenilen derinlikte, yüksek basınçla (300-900 bar) harç verilerek uygulanan yöntemdir.
- ➔ Su: çimento oranı genelde 1:1
- ➔ Oluşacak kolon çapı zemin cinsine bağlı olduğu kadar aşağıdaki faktörlere bağlıdır:
 - Dönüş hızı (10-20 dev/dak)
 - Çekme hızı
 - Her kademedede 4 cm ilerlenir
 - Kademe 6-10 sn beklenir
 - Harç basıncı
 - Harç debisi (stroke sayısı)
 - Nozzle çap ve adedi

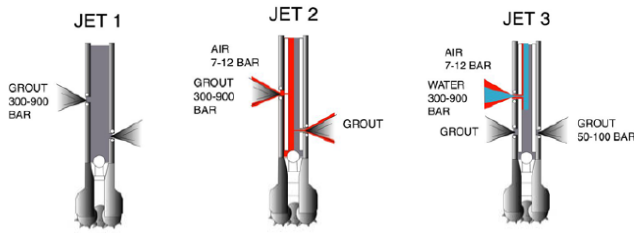


Killi Zeminlerde İyileştirme – Jet-Grout Kolonları

(9) Zemin Kolonları – Jet-Grout Kolonları (JK)

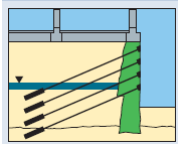
➔ Yüksek modülleriyle kompozit zemin oluştururlar. Zeminin taşıma gücünü artırır, oturmalar azaltırlar.

Zemin tipi	Kil ve silt	Kum	Çakıl
Basınç dayanımı (kg/cm ²)	< 50	< 100	< 250

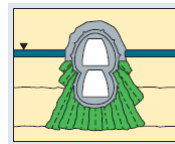


	Test 1	Test 2
Su:Çimento oranı	1:1	1:1
çekme hızı (cm/dk)	44	52
ripple (devir/dk)	18-21	24-27
basınç (kg/cm ²)	450	450
nozzle (mm)	2*2.4	2*2.6

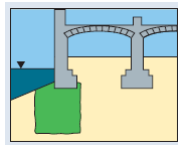
Killi Zeminlerde İyileştirme – Jet-Grout Kolonları



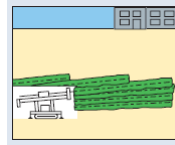
Temel altına girme
(underpinning)



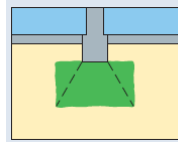
Tünel koruma



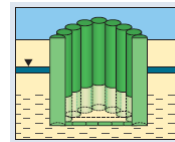
Temel restorasyonu
(özellikle tarihi yapıların temellerinde)



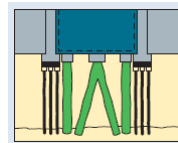
Yatay kolonlar
(Horizontal Soilcrete)



Temel modifikasyonu

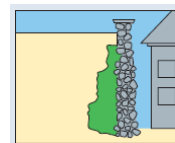


Kazı desteklemesi



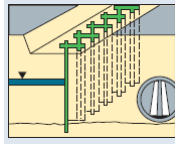
Derin Temel

Keller'den yararlanılmıştır

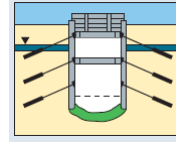


Toprak basıncı azaltma

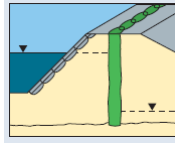
Killi Zeminlerde İyileştirme – Jet-Grout Kolonları



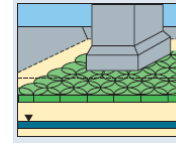
Panel duvar
imalatı



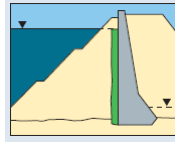
Taban koruma



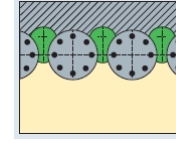
Kolon duvar
imalatı



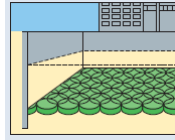
Sızdırmazlık
kaplaması



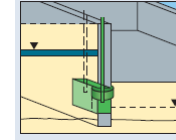
Baraj yalıtımı



Birleşim yeri
sızdırmazlığı



Taban yalıtımı

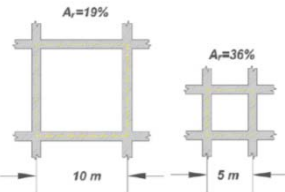
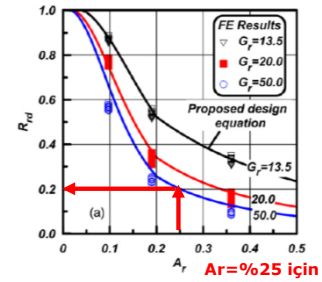
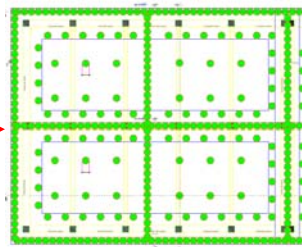
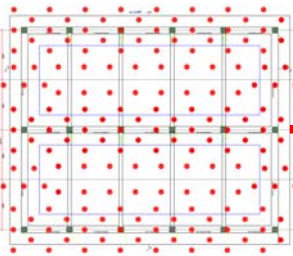


Geçici yeraltı suyu
bariyeri

Keller'den yararlanılmıştır

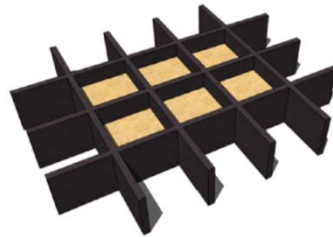
Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Jet-Grout Kolonları

Nguyen et al. (2013) klasik ızgara şeklinde JG imalatı yerine hücreleme sistemi DM veya JG imalatı öneriyor.



$$FS = \frac{CRR}{CSR \cdot R_{red}} = \frac{0.11}{0.346 \cdot 0.20} \sim 1.51$$

FS, 031'den 1.51' yükselmiştir



Killi Zeminlerde İyileştirme – Kum Kompaksiyon Kazıkları

(9) Zemin Kolonları - Kum Kompaksiyon Kazıkları (KKK)

- Yöntem 1957’de Japonya’da geliştirilmiştir ve günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Bu yöntemde zemine önce ucu bir plaka ile kapatılan kaplama borusu çakılmakta, bilahare taban plakası zemin içerisinde bırakılmakta, kaplama borusu içerisine konan granüler dolgu malzemesi sıkıştırılırken kaplam borusu geri çekilmektedir.
- Yöntem gevşek kumlu zeminleri kompakte etmek için orjinal olarak geliştirilmiştir ancak killi zeminlere de uygulanmaktadır. En iyi sonuç fazla ince malzeme içeren suya doymuş kum zeminlerde alınmaktadır. Suya doymuş killi zeminleri bu yöntem ile sıkıştırmak mümkün değildir.
- Kompaksiyon kazıkları arasındaki uzaklık çoğunlukla 1.2-1.5 m. dolayında seçilmektedir.

Killi Zeminlerde İyileştirme – Kum Kompaksiyon Kazıkları

- Killi zemin ve kum kazıkları kompozit zemin oluşturmaktadır. Bu yapma zemin iyi karakteristikler göstermektedir. Kompozit zemine yük etkidiği zaman rijitliğin farklı olması yüzünden gerilme, kum kazıklarında konsantre olmaktadır.
- Kum kompaksiyon kazıkları yöntemi, deniz işlerinde çoğu durumda %70 deplasman oranıyla uygulanır. Bununla birlikte bazı durumlarda, ekonomik açıdan %30 deplasman oranıyla uygulanması arzu edilir.
- Kum kazıkların yükü paylaşımı, konsolidasyonu hızlandırmada kazıkların verimliliği ve kazıkların taşıma kapasitesi karakteristikleri gibi konular detaylı araştırma gerekmektedir.

Killi Zeminlerde İyileştirme – Taş Kolon ve DKK

(9) Zemin Kolonları – Taş Kolon ve DKK

- ➔ Taş kolonlar ve DKK'lar ekonomik, hızlı ve etkili bir zemin iyileştirmesi uygulamasıdır.
- ➔ Taş kolonlar dren gibi de çalışmaktadır. Konsolidasyonu hızlandırırlar.



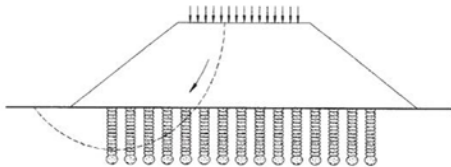
Taş kolon

DKK

Killi Zeminlerde İyileştirme – Taş Kolon ve DKK

(9) Zemin Kolonları – Taş Kolon ve DKK

- ➔ DKK'lar kalın yumuşak zemin tabalarının bulunduğu yerlerde uygun.
- ➔ Zira anakayayı bulmaya gerek yok!!!
- ➔ Boylar kısa.
- ➔ Çok hızlı, ekonomik, etkili



Killi/Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Granüler Kolonlar

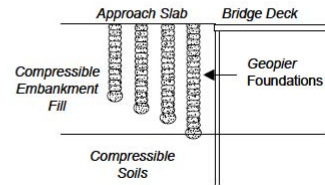
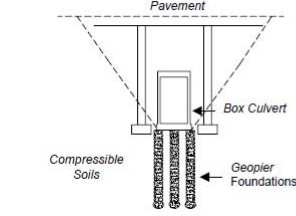
(9) Zemin Kolonları – Taş Kolon ve DKK

➔ DKK'ların uygulama alanları çok geniş

➔ DKK'lar taş kolonlara göre 3-9 kat daha rijittir.

➔ Dolayısıyla yük altında daha iyi sonuç vermektedir.

➔ DKK'lar yapı altında da kullanılır.

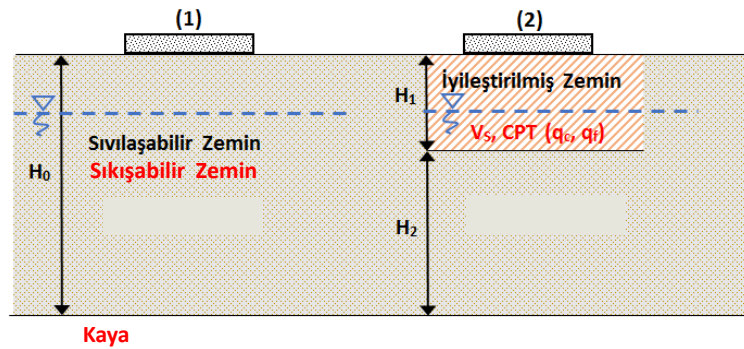


Killi/Kumlu Zeminlerde İyileştirme-DKK'lar

(9) Darbeli Kırmataş Kolon (DKK)

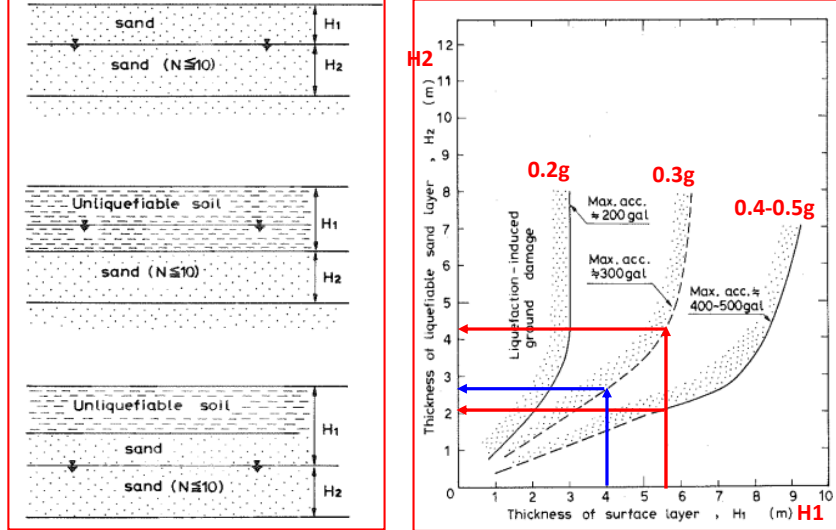
➔ Derin bir iyileştirme gerekmiyor.

➔ Sıvılaşmada en etkili yöntemlerden biri



Kumlu Zeminlerde İyileştirme-Darbeli Kırmataş Kolonlar

(9) Darbeli Kırmataş Kolon (DKK)



Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Kompaksiyon Kazıkları

(1) Zemin Kolonları - Kompaksiyon Kazıkları

➡ Yöntem, betonarme kazığın kumlu zemine çakılmasıyla gerçekleşmektedir.

➡ Böylece kazığın hacmine denk hacimde sıkışır. Ayrıca kazığın çakılması ile oluşan titreşimler, kumlu zeminin daha fazla sıkışmasını sağlamaktadır.

(2) Zemin Kolonları - Kum Kompaksiyon Kazıkları

➡ Yöntem kumlu zemini sıkıştırmak için ya titreşim ekipmanı ya da çekikle gevşek kumlu zeminde büyük çaplı kompakte kum kazıkları etmeyle oluşmaktadır.

Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Vibroflotasyon

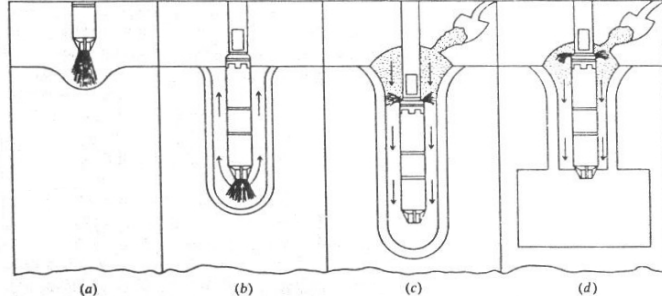
(2) Zemin Kolonları – Vibroflotasyon (Taş Kolon)

- Vibroflotasyon yöntemi kalın ve gevşek kum depoziti içine sokulan özel bir sondanın hızla sürülmesi ile gerçekleşir. Uygulamada herbiri patente bağlı çeşitli sondalar kullanılmaktadır. **Vibroflot** bunlardan biridir.
- Buradaki sıkıştırmanın amacı zeminin taşıma kapasitesini arttırmak ve deprem sırasında oluşabilecek sıvılaşmayı ortadan kaldırmaktır.
- Silt yüzdesi %20'yi veya kil yüzdesi %10'u geçmeyen kum ve/veya çakıllı zeminlerde kullanılan en popüler yöntem vibroflotasyon yöntemidir.
- Bu yöntemde 432 mm. Çapında 1.83 m. Uzunluğunda ve 17.8 kN ağırlığında bir silindirik sonda kullanılır. Aletin uç ve arka kısmında su jetleri vardır.

Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Vibroflotasyon

- Sonda vibrasyonla ve ucundan püskürtülen su jeti ile zemine itilmektedir. Alet zemine sokulurken ucundaki su jetinden, sıkıştırma sırasında ise üstündeki su jetinden yararlanılır.
- İstenilen derinliğe inildikten sonra sonda ucundaki su jeti kesilir, üstten atılan taneleri aşağıya doğru itecek şekilde sonda üstünde su jeti meydana getirilir. Bu arada sonda üzerindeki vibratör çalıştırılır. Vibratör sonda çevresinde 3-3.5 m. çapındaki bir kesimin sıkışmasını sağlar. Sıkıştırma işlemi sırasında dakikada yaklaşık 30 cm hızla sonda yukarı doğru çekilir. Böylece bütün derinlik boyunca çok katı bir çekirdek oluşur.
- Yöntem suya doygun gevşek zeminlerde, su altındaki uygulamalarda özellikle de kıyı inşaatlarında çok kullanışlıdır. Sondanın açtığı çukurda 6-40 mm. arasındaki çakıllar kullanılarak taş kolonlar oluşturulabilmektedir.

Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Vibroflotasyon (Taş Kolon)



Vibroflot is positioned over spot to be compacted, and its lower jet is then opened full.

Water is pumped in faster than it can drain away into the subsoil. This creates a momentary "quick" condition beneath the jet which permits the Vibroflot to settle of its own weight and vibration. On typical sites the Vibroflot can penetrate 15 to 25 ft in approximately 2 min.

Water is switched from the lower to the top jets, and the pressure is reduced enough to allow water to be returned to the surface, eliminating any arching of backfill material and facilitating the continuous feed of backfill.

Compaction takes place during the one-foot-per-minute lifts which return the Vibroflot to the surface. First, the vibrator is allowed to operate at the bottom of the crater. As the sand particles densify, they assume their most compact state. By raising the vibrator step by step and simultaneously backfilling with sand, the entire depth of soil is compacted into a hard core.

Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Vibroflotasyon (Taş Kolon)

(2) Zemin Kolonları – Taş kolon ve DKK

- ➔ Taş kolonlar gevşek kumlu zeminlerde sıvılaşmayı önlemek için çok tercih edilen bir yöntemdir.
- ➔ Vibroflotasyon ile imal edilirse daha etkindir.
- ➔ DKK'lar da taş kolonlar gibi kompozit bir zemin oluştururlar. Zeminin taşıma gücünü azaltırlar, modüllerini artırırılar.

(2) Zemin Kolonları – Jet-grout Kolonları

- ➔ Türkiye'de sıvılaşma için kullanılan yöntemlerden biridir.
- ➔ Taş kolonlardan farkı drenaja yardımcı olmazlar. Ancak DKK'ye taş kolonlar gibi kompozit bir zemin oluştururlar. Zeminin taşıma gücünü ve modüllerini artırırılar.

Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Patlatma Kompaksiyonu

(3) Patlatma Kompaksiyonu

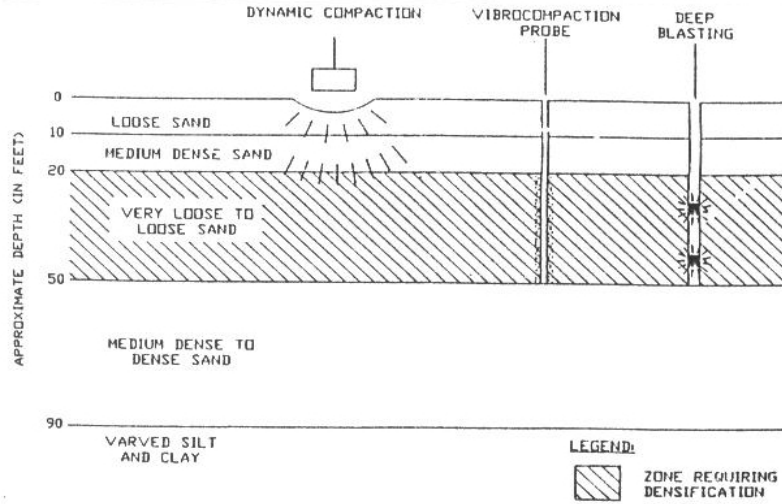
- *Eskiden beri uygulanan bu yöntemde, iyileştirilecek zemin tabakaları içerisine yerleştirilen sınırlı miktardaki patlayıcılar ardışık ateşlemelerle patlatılmakta ve bu şekilde hızlı basınç dalgaları oluşturulmaktadır.*
- *Patlatma kaynağı yakınında meydana gelen şok dalgaları ile gevşek kum zeminde önce sıvılaşma ortaya çıkmakta bilahare başlangıçtakine oranla daha kompakt bir zemin yapısı elde edilmektedir.*
- *Bu yöntemle kalınlığı 20 m'ye varan gevşek granüler zeminler %70-80 relatif sıkılığa kadar sıkıştırılabilmektedir.*
- *Yöntem, yerleşim bölgelerinde uygulanamamaktadır.*

Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Dinamik Konsolidasyon

(5) Dinamik Konsolidasyon

- *Bu yöntemde büyük ağırlıklar özellikle kohezyonsuz zeminler üzerine düşürülmekte, zeminde şok dalgaları ve sıvılaşma meydana getirilerek zeminin sıkışması sağlanmaktadır.*
- *Yöntemin ekonomik olabilmesi için iyileştirilecek zemin alanının kumlarda 5000 m²'den, suya doymun olmayan ince daneli zeminlerde ise 15000 m²'den büyük olması gerekmektedir.*
- *Yöntem hızla tatbik edilebilmekle beraber, özellikle kil ve siltlerde yapılan sıkıştırmanın üniformluğu tartışma konusudur.*
- *Dinamik konsolidasyonun bir sakıncası bu yöntemin mevcut binalara yakın yerlerde uygulanamamasıdır.*

Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Dinamik Konsolidasyon

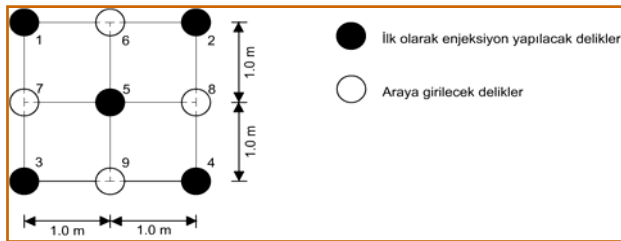


Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Enjeksiyon

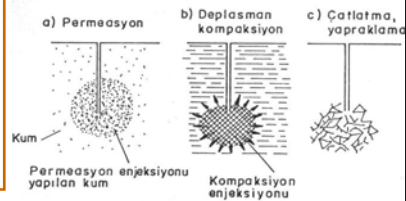
(7) Enjeksiyon

- ➔ Enjeksiyon, zemin içerisine süspansiyon, emülsiyon veya solüsyon halindeki maddelerin basınç altında verilmesi işlemidir.
- ➔ Zeminin kayma mukavemetini arttırmak ve permeabilitesini azaltmak için uygulanır.
- ➔ İlk olarak, barajlarda sızdırmazlığı sağlamak ve mukavemet özelliklerini iyileştirmek için uygulanmıştır.
- ➔ Kullanım alanı çok geniştir.
- ➔ Enjeksiyonda önemli olan kriterler;
 1. Zeminin tane çapı, tabakaların durumu, kayanın ayrışmışlığı
 2. Yeraltı suyunun durumu
 3. Zemin ve kayanın permeabilitesi, süreksizliklerin durumu

Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Enjeksiyon



Enjeksiyon çeşitleri



Bir karışım örneği

Su : 100 litre
Mikro-çimento: 35-60 kg
Bentonit : 1 kg
Naftalin sülfonat : 200-400 gr
Silika fume : 2-5 kg

Kil yüzdesi %20'den fazla ile permeasyon enjeksiyonu yapılamaz.

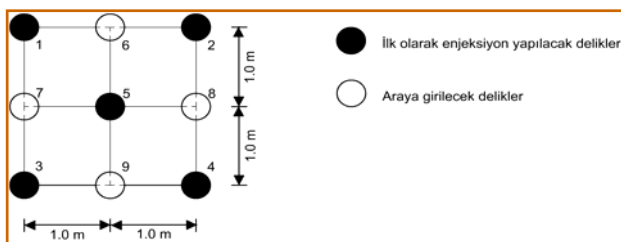
Az killi ve siltli zeminlerde kimyasa enjeksiyon yapılabilir.

Eğer enjeksiyon aralıkları 2.0 m x 2.0 karela yapılsa $D = 1.0$ m olacaktır. Tipik kumlu bir zemin için $e = 0.5$ seçilebilir ve etki faktörü $f = \%75$ alınabilir.

$$V = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h \right) \cdot (e \cdot f)$$

$$V = \left(\frac{\pi \cdot 1.0^2}{4} \cdot 1.0 \right) \cdot (0.50 \cdot 0.75) = 0.295 \text{ m}^3$$

Kumlu Zeminlerde İyileştirme – Enjeksiyon



$$V = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h \right) \cdot (e \cdot f)$$

Eğer enjeksiyon aralıkları 2.0 m x 2.0 karelerle yapılırsa $D = 1.0$ m olacaktır. Tipik kumlu bir zemin için $e = 0.5$ seçilebilir ve etki faktörü $f = \%75$ alınabilir.

Bir karışım örneği

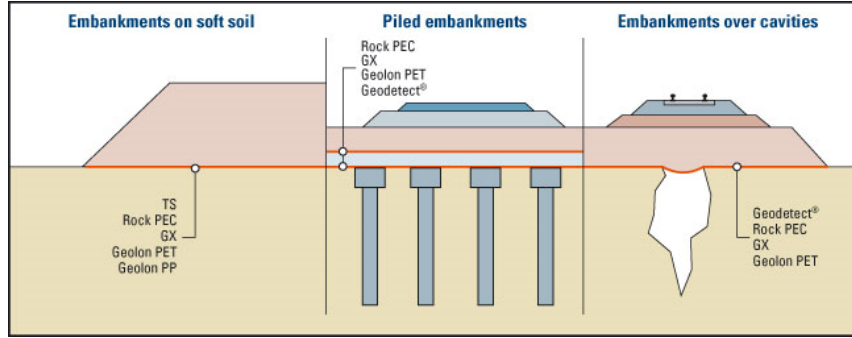
Su : 100 litre
Mikro-çimento: 35-60 kg
Bentonit : 1 kg
Naftalin sülfonat : 200-400 gr
Silika fume : 2-5 kg

$$V = \left(\frac{\pi \cdot 1.0^2}{4} \cdot 1.0 \right) \cdot (0.50 \cdot 0.75) = 0.295 \text{ m}^3$$

Diğer Amaçlarla İyileştirme – Bütün Zeminlerde

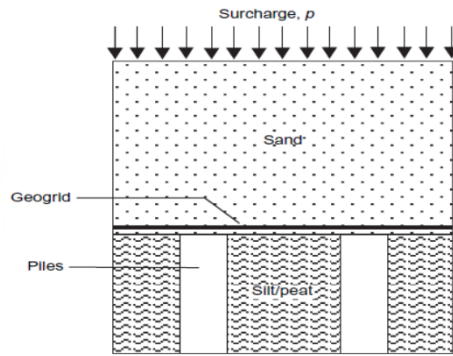
Geotekstil – Geogridli Granüler Şilteler

- ➔ Yumuşak kil yüzeyine geogrid veya geotekstil serdikten sonra kum koymak taşıma gücü açısından iyi sonuçlar vermektedir.
- ➔ Zemin kolonlarının üzerine, arasında geotekstil olan sıkıştırılmış granüler bir tabaka oluşturmak yükleri aktarmak çok iyidir.



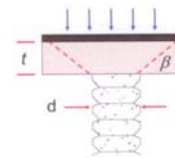
Diğer Amaçlarla İyileştirme – Bütün Zeminlerde

Geotekstil – Geogridli Granüler Şilteler



- t = şilte kalınlığı
s = kolonların merkezden merkeze aralığı
d = kolon çapı
b = kemerlenme açısı (kolonların aralığına göre belirlenebilir)

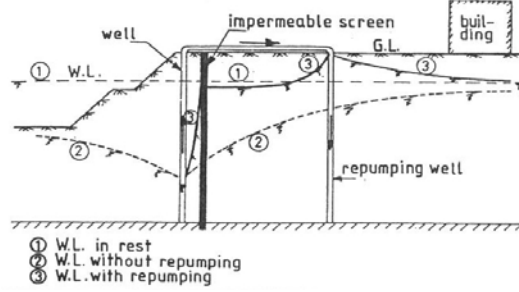
$$t > \frac{(s-d)}{2} \tan \beta$$



Geçici Amaçlı İyileştirme – Well Point ve Dondurma

(1) Well Point Yöntemi

➔ Su seviyesinin altında kuru çalışma alanı yaratmak ve kumlu zeminde su seviyesini düşürmek için kuyu açarak ve buradan suyu pompalarla çekerek uygulanan bir yöntemdir



(2) Dondurma

➔ Donan zemin yüksek mukavemetli ve geçirimsizdir. Bu karakteristikleri kullanmak için dondurma yöntemi, hem kumlu hem de killi zeminlerde geçici amaçlarla uygulanmaktadır.

Uygun Zemin İyileştirme Yönteminin Seçimi

Uygun zemin iyileştirme yönteminin seçimi için doğru karar aşağıdaki faktörler dikkate alınarak verilebilir.

➔ İnşaat alanındaki zemin tipine uygun zemin iyileştirme yöntemini seçmek

➔ İyileştirmenin amacına uygun yöntemi seçmek

Stabilitenin veya şekil değiştirmenin veya her ikisinin mi iyileştirileceği

➔ Yöntem için gerekli malzemenin uygunluğu

Drenaj için iyi kalitede kum, vb.

➔ Yöntem için gerekli makinalar ve teknik bilgi

➔ Yöntem için gerekli para ve zaman

➔ Çevresel koşullar (çevresel kısıtlamalar, çalışma koşulları)

Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Karakteristiği

Yöntem	Amaç				Zemin		Etkinlik	Uygula. Süresi	Maliyet	Uygula. Doğrulu.	Kontrol Gereklili.	Kirlenme Problemi	Pratikte Kullanım	Ölçek
	Mukav.	Oturma	Sıvılaş.	Permea.	Kil	Kum								
Yerdeğiştirme	O	O	Δ	x	O	x	orta	kısa	ucuz	yüksek	düşük	yüksek	çok	büyük
Önyükleme	O	O	x	x	O	x	orta	uzun	ucuz	yüksek	orta	düşük	çok	büyük
Düşey Dren	O	O	x	x	O	x	orta	orta	orta	yüksek	yüksek	düşük	çok	büyük
Kireç Kazığı	O	O	x	x	O	x	düşük	orta	orta	orta	orta	orta	orta	orta
Derin Karıştırma Yöntemi	O	O	O	Δ	O	O	yüksek	kısa	orta	orta	orta	düşük	çok	büyük
Kum Kompaksiyon Kazığı	O	O	O	x	O	O	yüksek	kısa	orta	orta	orta	orta	çok	büyük
Vibroflotasyon	O	Δ	O	x	Δ	O	yüksek	kısa	orta	orta	orta	orta	çok	orta
Dinamik Konsolidasyon	O	Δ	O	x	Δ	O	orta	orta	orta	orta	yüksek	yüksek	az	orta
Enjeksiyon	Δ	x	Δ	O	x	O	yüksek	kısa	yüksek	orta	yüksek	yüksek	çok	küçük
Well Point	Δ	Δ	x	x	Δ	O	orta	orta	orta	yüksek	düşük	orta	çok	büyük
Vakum Konsolidasyonu	O	O	x	x	O	x	orta	orta	orta	orta	orta	düşük	az	küçük
Dondurma	O	x	x	O	O	O	yüksek	orta	orta	orta	orta	orta	çok	orta

O = Etkili

Δ = Az etkili

x = Etkili değil

Zemin İyileştirmesinin Başarısı ve Etkileri

Şüpheli ve sorgulayıcı bakış gerekli

➡ Ön testler önemli

Değişik kriterlerle değişik testler yapılabilir

➡ Kalite kontrolü çok önemli

Arazi deneyleri (SPT, CPT, Pressiyometre, MASW, Diğer sismik deneyler önemli)

➡ Uygulama sonrasının başarısı araştırılmalı

Uygulama öncesi alanla karşılaştırmalar yapılabilir. Jeofizik yöntemler önemli

➡ Temel ve yapı tasarım parametreleri değişebilir.

Taşıma gücü ve yatak katsayıları artacaktır. Yerel zemin sınıfını değiştirmek pek önerilmez.

Zemin İyileştirmesi Uygulamalarından Örnekler

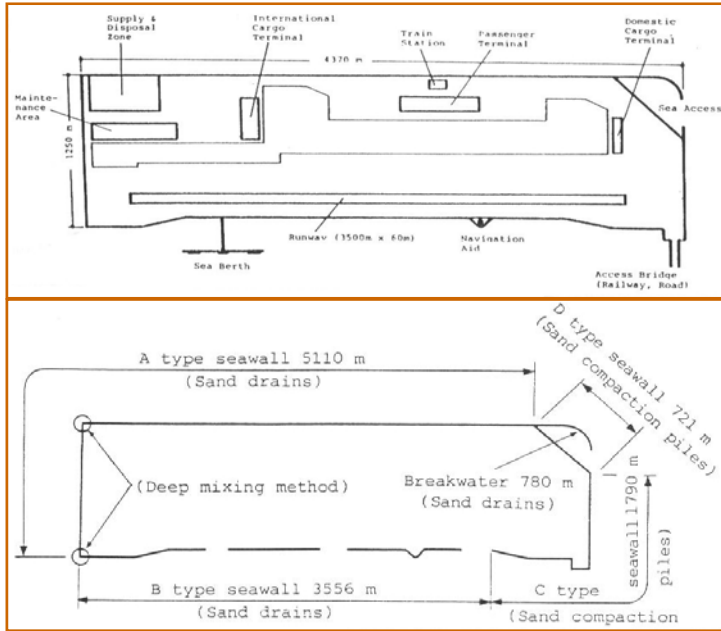
Uygulamalar

- *Kansai Uluslararası Havalimanı zemin iyileştirmeleri*
Kum kompaksiyon kazıkları, DMM ve kum drenler
- *Oakland Limanı Sismik Onarımı*
Vibro-kompaksiyon ile taş kolon imalatı
- *Maizuru Limanı Dalgakıranı model arazi deneyi*
Kum kompaksiyon kazıkları
- *Hoca Ahmet Yesevi Türbesi temel iyileştirmesi*
Jet-grout yöntemi
- *Ankara Metrosu tüneli zemin iyileştirmesi*
Jet-grout yöntemi

Jaoponya Kansai Havalimanı Zemin İyileştirmeleri

- *Havalimanı adası kıyıdan 5 km. açıktadır ve kıyıya 3.8 km'lik bir köprüyle bağlıdır.*
- *Havalimanının 1960-1986 yılları arasında mühendislik ve çevresel çalışmaları sürekli yapılmıştır. İnşaatına 1987'de başlanılmış, 1993'te açılmıştır.*
- *Deniz dibi kohezyonlu zeminler, kumlu veya kumlu çakıllı zeminlerin ardanması ile oluşmuştur. En üstte ise yumuşak kil bulunmaktadır.*
- *3 çeşit zemin iyileştirmesi kullanılmıştır. Kum kompaksiyon kazıkları %70 yerdeğıştirmeyle yapılmıştır. 36000 kum kompaksiyon kazığı yerleştirilmiştir. Bunun dışında kil zeminde çok miktarda DMM yöntemi uygulanmış ve kum drenler kullanılmıştır. Kum drenlerin çapı 40 cm'dir ve 2.5 m aralıklarla kare düzeninde oluşturulmuştur.*

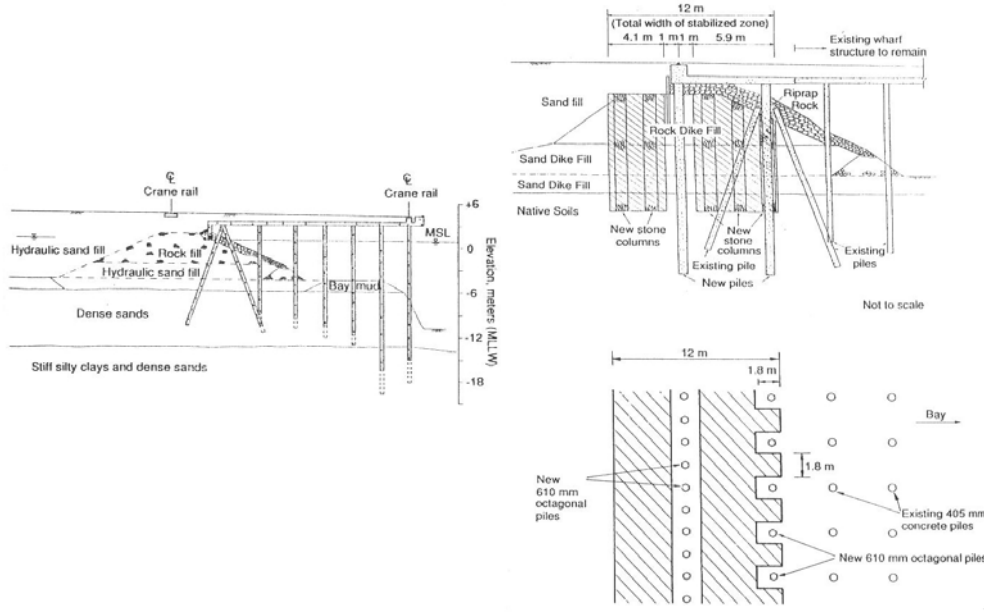
Kansai Havalimanı Zemin İyileştirmeleri



Oakland Limanı Sismik Onarımı

- ➔ San Francisco Oakland Limanı 1989 Loma Prieta depreminde hasara uğramıştır. Liman dolgusu ötelenmiş, vinç rayları oturmuş ve destekleyisi eğik kazıklar hasar görmüş ve kırılmıştır.
- ➔ Bu hasarların ana nedeni sıvılaşmadır. Sıvılaşmaya bağlı olarak kaya dolgu ve kum dolgu yanıl olarak yayılmıştır.
- ➔ Zemin iyileştirme alternatifleri gelecekteki depremler sırasında iskele yapısının uğrayacağı sıvılaşma tehlikesini hafifletme potansiyelleri bakımından değerlendirilmişlerdir.
- ➔ Vibro-kompaksiyon (vibroflotasyon) yöntemiyle taş kolon uygulaması gerçekleştirilerek yeni bir stabilize edilmiş bölge elde edilmiştir.
- ➔ Yöntemde 550 mm. çaplı, 2.9 m boyunda bir vibratör kullanılmış ve 10-38 mm.'lik dolgu malzemesiyle 18 adet taş kolon yapılmıştır.

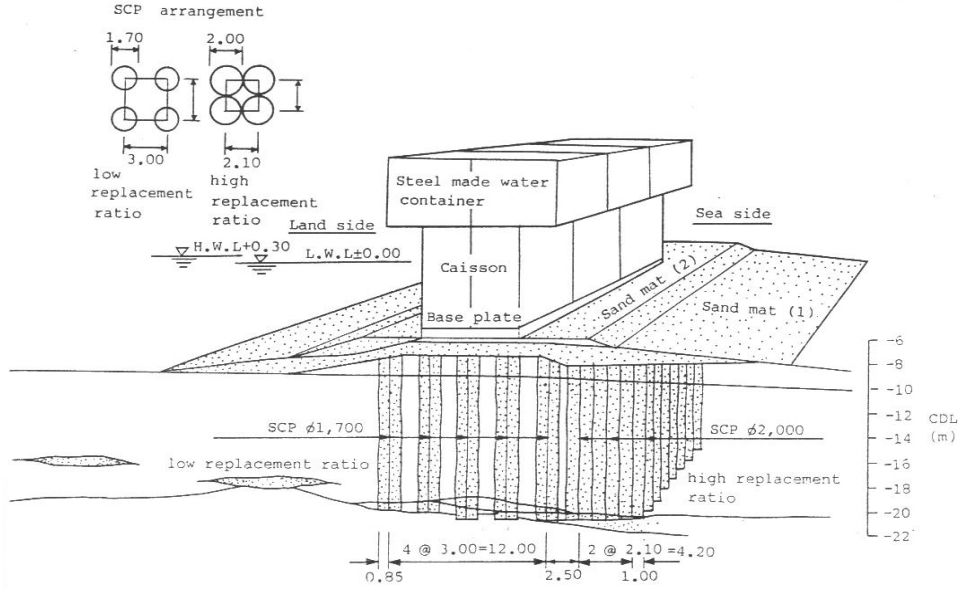
Oakland Limanı Sismik Onarımı



Maizuru Limanı Dalgakıranı Model Arazi Deneyi

- ➔ Maizuru Limanı'nda bir dalgakıran altında küçük deplasman oranlı ve büyük deplasman oranlı kum kompaksiyon kazıkları oluşturularak bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.
- ➔ Buradaki amaç kum kompaksiyon kazıklarında deplasman oranının önemini ortaya koymak ve drenajı hızlandırmadaki etkisini araştırmaktır.
- ➔ Sistem göçmeye gidecek şekilde yüklenmiştir ve dairesel bir göçme meydana gelmiştir.
- ➔ Kum kazıklar kile göre 2-4 kat daha fazla yük almışlardır.
- ➔ Deplasman oranının konsolidasyon hızına belirli bir etkisi olmamıştır.

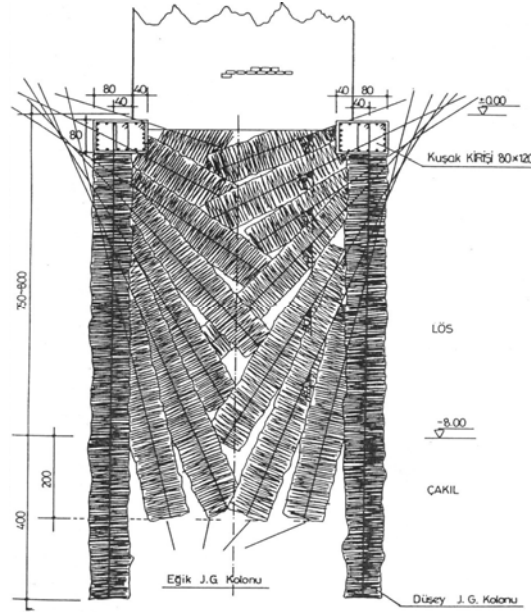
Maizuru Limanı Dalgakıranı Model Arazi Deneyi



Hoca Ahmet Yesevi Türbesi Temel İyileştirmesi

- ➔ Hoca Ahmet Yesevi Türbesi farklı oturmalar nedeniyle bir tarafa doğru yatmaya başladığından dolayı bir temel iyileştirmesine gidilmiştir.
- ➔ Yapı temelleri ince kum ve silt olarak nitelendirilen bir lős oluşumuna oturmaktadır. Bu tabakanın altında sıkı çakıl tabakası bulunmaktadır. YASS zemin yüzeyi ve 7.0 m arasında değişkendir.
- ➔ Temel takviyesi çakıl tabakasına giren "jet-grout" kolonları ile yapılmıştır.
- ➔ Önce bir deneme kolonu yapılmış, su:çimento oranı 1:1, enjeksiyon basıncı 10 Mpa olarak belirlenmiştir.
- ➔ Kolon boyları 15-23 m civarında olacak şekil tek akışkanlı yöntem uygulanmıştır.

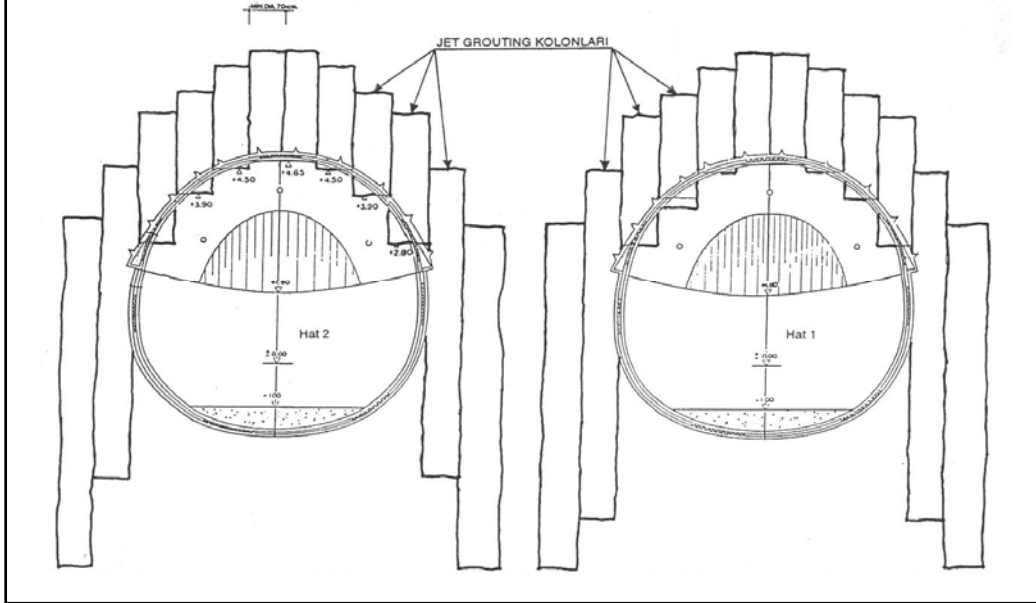
Hoca Ahmet Yesevi Türbesi Temel İyileştirmesi



Ankara Metrosu, Kızılay Tüneli Zemin İyileştirmesi

- ➔ Ankaray Projesi Kızılay tüneli karmaşık alüvyal zeminden geçmiştir. Zemin yumuşak killeri ve gevşek kumlardan oluşmaktadır.
- ➔ Tünel inşaatı için zemin sağlamlaştırması ve geçirimsizlik için hızlı ve pratik yöntem olan jet-grout yöntemi tercih edilmiştir.
- ➔ Yöntem tek akışkanlı olarak 40-60 MPa basınçlı enjeksiyon ile yapılmıştır. 80-85 cm çaplı kolonlar elde edilmiştir.
- ➔ Tünel tavanları ve yan duvarlarında oluşturulan kolonlarla yeraltı suyu sızıntısı en aza indirilmiştir.
- ➔ Yapılan kalite kontrollerinde 7-10 Mpa'lık serbest basınç mukavemeti ve 3000-10000 MPa değerleri bulunmuştur. %30-35 civarında enjeksiyon kolonunun oluştuğu görülmüştür. Enjeksiyonun granüler zemin içine yayıldığı düşünülmektedir.

Ankara Metrosu, Kızılay Tüneli Zemin İyileştirmesi



Uygulama - 1

		Potansiyel problemleri belirtiniz	En uygun 2 zemin iyileştirme yöntemi
(1)	0m 2m KUM, SP Temel derinliği=4.0 m. Vs=110 m/s 10m KİL, CH Vs=220 m/s 25m GROVAK qu=800 kPa	<u>Yerel Zemin Sınıfı</u> <u>I_A ve I_B</u>	
(2)	0m 2m Havaalanı dolgusu KİL, CH N=4-6 w_L=%90 12m KİL, CL N=8-11 25m KUM N=40-60	<u>Potansiyel problemleri belirtiniz</u> <u>Yerel Zemin Sınıfı</u> <u>I_A ve I_B</u>	En uygun 2 zemin iyileştirme yöntemi

N= SPT darbe sayısı, Vs= Kayma dalgası hızı, qu=Serbest basınç mukavemeti

Uygulama - 1

TABLO 6.1 – ZEMİN GRUPLARI

Zemin Grubu	Zemin Grubu Tanımı	Stand. Penetr. (N/30)	Relatif Sıkılık (%)	Serbest Basınç Direnci (kPa)	Kayma Dalgası Hızı (m/s)
(A)	1. Masif volkanik kayalar ve ayrılmamış sağlam metamorfik kayalar, sert çimentolu tortul kayalar.... 2. Çok sıkı kum, çakıl..... 3. Sert kil ve siltli kil.....	— > 50 > 32	— 85–100 —	> 1000 — > 400	> 1000 > 700 > 700
(B)	1. Tuf ve aglomera gibi gevşek volkanik kayalar, süreksizlik düzlemleri bulunan ayrılmış çimentolu tortul kayalar.... 2. Sıkı kum, çakıl..... 3. Çok katı kil ve siltli kil....	— 30–50 16–32	— 65–85 —	500–1000 — 200–400	700–1000 400–700 300–700
(C)	1. Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrılmış metamorfik kayalar ve çimentolu tortul kayalar..... 2. Orta sıkı kum, çakıl..... 3. Katı kil ve siltli kil.....	— 10–30 8–16	— 35–65 —	< 500 — 100–200	400–700 200–400 200–300
(D)	1. Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları..... 2. Gevşek kum..... 3. Yumuşak kil, siltli kil.....	— < 10 < 8	— < 35 —	— — < 100	< 200 < 200 < 200

TABLO 6.2 – YEREL ZEMİN SINIFLARI

Yerel Zemin Sınıfı	Tablo 6.1'e Göre Zemin Grubu ve En Üst Zemin Tabakası Kalınlığı (h_1)
Z1	(A) grubu zeminler $h_1 \leq 15$ m olan (B) grubu zeminler
Z2	$h_1 > 15$ m olan (B) grubu zeminler $h_1 \leq 15$ m olan (C) grubu zeminler
Z3	$15 < h_1 \leq 50$ m olan (C) grubu zeminler $h_1 \leq 10$ m olan (D) grubu zeminler
Z4	$h_1 > 50$ m olan (C) grubu zeminler $h_1 > 10$ m olan (D) grubu zeminler

Tablo 6.2'ye göre Yerel Zemin Sınıfı	T_A (saniye)	T_B (saniye)
Z1	0.10	0.30
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90

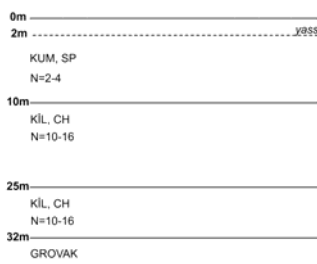
$$S(T) = 1 + 1.5 \frac{T}{T_A} \quad (0 \leq T \leq T_A)$$

$$S(T) = 2.5 \quad (T_A < T \leq T_B)$$

$$S(T) = 2.5 \left(\frac{T_B}{T} \right)^{0.8} \quad (T_B < T)$$

S(T) spektrum katsayısı

Uygulama - 2



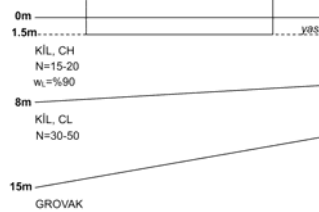
İnşa edilecek yapı = 2 katlı Villa

Potansiyel Problemler

- 1.
- 2.

Yapılabilecek zemin iyileştirmesi

- 1.
- 2.
- 3.



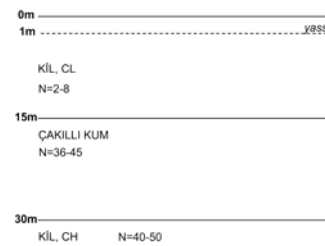
İnşa edilecek yapı = Bodrum
katsız 8 katlı yapı

Potansiyel Problemler

- 1.
- 2.

Yapılabilecek zemin iyileştirmesi

- 1.
- 2.
- 3.



İnşa edilecek yapı = 5 m
yüksekliğinde yol dolgusu

Potansiyel Problemler

- 1.
- 2.

Yapılabilecek zemin iyileştirmesi

- 1.
- 2.
- 3.