

Kompaksiyon Enjeksiyonuna Teorik Ve Pratik Yaklaşımlar

Fatih TUNÇDEMİR*

ÖZ

Henüz Türkiye’de uygulanmamakla beraber, kompaksiyon enjeksiyonu dünyada ve özellikle Amerika’da yaklaşık 50 yıldan beri temel mühendisliği alanında zeminin boşluk oranının azaltılmasında, farklı oturmalara maruz kalmış binaların tekrar eski seviyelerine yükseltmelerinde, döşeme ve sömellerin alttan desteklenmelerinde, oturma kontrolünde ve son 10 – 15 yıllık bir süre içerisinde de sıvılaştırılabilir zeminlerin sıvılaştırma potansiyellerinin azaltılmasına yönelik olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada kompaksiyon enjeksiyonuna ilişkin teorik yaklaşımlarda bulunulmuş, enjeksiyon parametreleri ile kullanılan enjeksiyon malzemesinin reolojik özelliklerinden bahsedilmiş ve bu tekniğin özellikle zeminin sıvılaştırma direncini artırmasına yönelik olmak üzere diğer pratik uygulamaları üzerinde durulmuştur.

ABSTRACT

Theoretical and Practical Aspects of Compaction Grouting

Although not applied in Turkey, compaction grouting has been used widely in many parts of the world and especially in the USA in foundation engineering for reducing the void ratio of soils, releveling of settled buildings, underpinning of footings and slabs, controlling settlements, and for mitigation of liquefaction potential of the soils in the last 10 to 15 years. In this study, a theoretical approach regarding compaction grouting has been presented, injection parameters and rheological properties of the grout has been correlated and practical applications, especially for increasing liquefaction resistance, have been discussed.

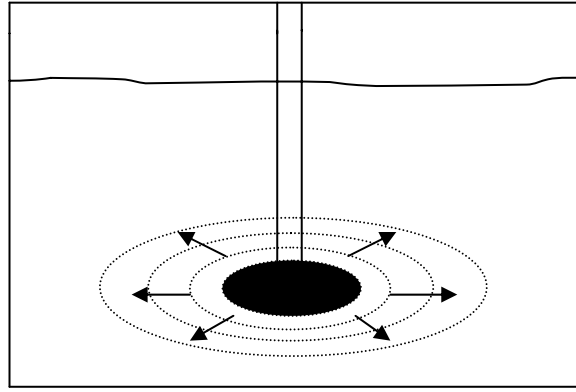
Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 28.06.2005 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2007 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara – tfatih@metu.edu.tr

1. GİRİŞ

1980 yılında ASCE Enjeksiyon Komitesi [1] kompaksiyon enjeksiyonunu çökme değeri 25 mm (1 inch)'den düşük olan, plastisiteyi sağlayacak kadar silt ve içsel sürtünmeyi sağlayacak kadar da kum içeren zemin ve çimento karışımı enjeksiyon malzemesinin çok yüksek basınçlarda zemin içerisindeki boşluklara girmeksizin, enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen bir kütle halinde kalacak şekilde enjekte edildiği ve bu sayede enjeksiyon noktası etrafındaki zeminlerin sıkıştırıldığı veya üzerindeki yapıların kontrollü bir şekilde kaldırılabilirdiği bir enjeksiyon tekniği olarak tanımlamıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Kompaksiyon enjeksiyonunun şematik gösterimi [2]

Gevşek veya yumuşak zeminlerin derin sıkıştırma yöntemlerinden biri olan kompaksiyon enjeksiyonunun kullanımı, çok derinlerdeki bölgesel zemin tabakalarını efektif olarak sıkıştırabilmesi, kullanılan ekipmanın dar bölgelerde hatta bina bodrum katlarında bile çalışabilmesi, yapım esnasında nispeten daha az atık ve kirlilik oluşturması ve mevcut yapılar üzerindeki titreşim etkilerinin asgari olması nedeniyle giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle son 15 yıllık bir süre içerisinde, her ne kadar uygulamalar sınırlı olsa da, sıvılaşma potansiyelini azaltmada kullanılmaya başlanmıştır. Boulanger ve Hayden [3] gevşek ve derin dolgu zeminlerin kompaksiyon enjeksiyonuyla sıkıştırıldığı ve bu sayede sıvılaşma dirençlerinin artırıldığı geniş bir vaka analizleri raporunu sunmuşlardır. Baker [4] mevcut iki baraj dolgusu altındaki gevşek sıvılaşabilir zeminin, Orense, v.d. [5] ise mevcut bina temelleri altında sıvılaşma riski taşıyan zeminlerin kompaksiyon enjeksiyonuyla iyileştirilmesini araştırmışlardır.

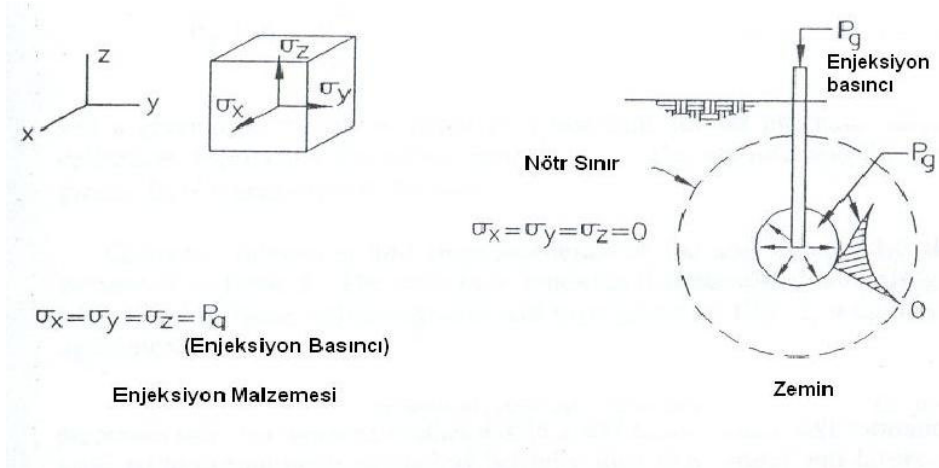
2. TEORİK YAKLAŞIM

Kompaksiyon enjeksiyonunda kritik nokta enjekte edilen malzemenin enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen küresel bir kütle olarak kalabilmesidir. Kullanılan malzemenin çok akışkan (düşük viskoziteli) olması durumunda etraftaki zemin hidrolik çatlamaya maruz kalır ve sıkıştırma işlemi üzerindeki kontrol kaybedilebilir. Daha da fazlası bu durum enjeksiyon noktası üzerindeki binalara veya yakındaki yeraltı yapılarına zarar

verebilir. Kompaksiyon enjeksiyonu hemen hemen bütün tip zeminlerde uygulanmakla beraber yumuşak killerde enjeksiyondan kaynaklanan aşırı boşluk suyu basınçları çok yavaş sönmüneceğinden özel önlemlerin alınması gerektiği unutulmamalıdır.

Graf [6] teknik hakkındaki ilk teorik tanımlamayı yapmış ve enjekte edilen kütle genellikle küresel olarak genişleyeceğini ve zemini radyal olarak her yönde sıkıştıracağını belirtmiştir. Warner ve Brown [7] tam ölçekli yaptıkları deneylerin kazılıp enjekte edilmiş kütle için açığa çıkarılması sonucunda gerçek mekanizmayı açıklamaya ilişkin ilk raporu sunmuşlardır. Bu ilk çalışmalardan sonra zemin içerisine enjekte edilen birçok kütle gerçekleştirilen projelerin ön çalışmalarıyla bağlantılı olarak açığa çıkarılmış ve mekanizmayı etkileyen enjeksiyon parametreleri, etraftaki yeraltı yapılarına etkileyen yanal kuvvetler, ve iyileştirme öncesi ve sonrasında yapılan standart penetrasyon ve koni penetrasyon deneyleri yardımıyla zeminin rölatif sıkılığında meydana gelen artış belirlenmeye çalışılmıştır.

Zeminin homojen ve eşyönlü kabul edilmesi durumunda enjeksiyon basınçları zemin içerisinde merkezi enjeksiyon borusunun ucu olan küresel bir sınır boyunca yayılacaktır. Bu sınır (nötr sınır) üzerinde enjeksiyon işleminden kaynaklanan gerilme ve birim deplasmanlar sıfırdır. Bu durumda enjeksiyon malzemesi ve zeminde Şekil 2’de gösterilen gerilme durumu oluşacaktır.



Şekil 2. Enjeksiyon malzemesi ve zemindeki gerilme durumları

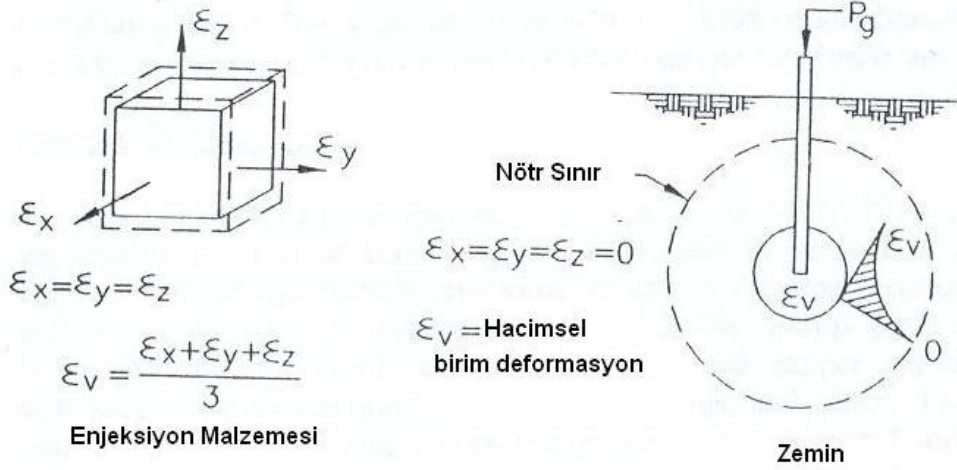
Zemin ve enjeksiyon malzemesi için birim deformasyonlar ise Şekil 3’de gösterilmektedir. Homojen, lineer, elastik ve eşyönlü bir malzeme için hacimsel birim deformasyon, enjeksiyon malzemesi hacminin nötr sınır içerisindeki zemin hacime bölümü olup 1 no’lu denklemde görüldüğü gibi formüle edilebilir.

$$\varepsilon_v = \frac{V_e}{V_{ns}} \dots\dots\dots(1)$$

Kompaksiyon Enjeksiyonuna Teorik ve Pratik Yaklaşımlar

Burada:

V_e = enjeksiyon malzemesinin hacmi
 V_{ns} = nötr sınır içerisindeki zemin hacmidir.



Şekil 3. Enjeksiyon malzemesi ve zemindeki birim deformasyonlar

Eğer zeminin hacim modülünü $E_b = \frac{P_g}{\epsilon_v}$ şeklinde tanımlayacak olursak

$$\epsilon_v = \frac{P_g}{E_b} \dots \dots \dots (2)$$

olur. 1 ve 2 no'lu denklemleri birleştirirsek,

$$\frac{V_e}{V_{ns}} = \frac{P_g}{E_b} \dots \dots \dots (3)$$

olur.

Zeminin birim hacim ağırlığında meydana gelen artış ($\Delta\gamma$) şu şekilde formüle edilebilir:

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta_m}{V_{ns}}$$

burada Δ_m zemin içerisine enjekte edilen kütledir.

3 no'lu denklemden V_{ns} 'nin yukarıdaki denkleme yazılmasıyla

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta_m}{V_e} \cdot \frac{P_g}{E_b} \text{ elde edilir.}$$

Fakat burada enjekte edilen kütle enjeksiyon malzemesinin hacmiyle birim hacim ağırlığının çarpımı olarak algılanamaz. Nötr sınır içindeki (V_{ns}) zemin içerisine enjekte

edilen ve nötr sınır içindeki zeminin yoğunluğunu efektif olarak artıran kütle enjekte edilen malzeme hacmiyle *zeminin* birim hacim ağırlığının çarpımına eşittir. Bunu daha iyi açıklayabilmek için şöyle bir örnek verebiliriz: Zemin içindeki bir balon içerisine enjeksiyon malzemesi olarak basınçlı hava verildiğini düşünelim. Bu durumda hava ve balonun zemin içinde oluşturduğu deformasyon enjeksiyon malzemesinin (yani havanın) hacmiyle zeminin birim hacim ağırlığının çarpımı olacaktır. Görüldüğü gibi sonuçta enjeksiyon malzemesinin birim hacim ağırlığı etkili olmayacaktır. Bu durumda:

$\Delta_m = V_e \cdot \gamma_s$ burada γ_s enjeksiyon noktasında zeminin birim hacim ağırlığıdır.

Dolayısıyla zeminin birim hacim ağırlığında meydana gelen artış

$$\Delta\gamma = \gamma_s \cdot \frac{P_g}{E_b} \text{ veya } E_b = \gamma_s \cdot \frac{P_g}{\Delta\gamma} \dots\dots\dots(4)$$

olacaktır. Pratik amaçlar için zeminin birim hacim ağırlığı, γ_s , sabit kabul edilebilir. Bir zemin özelliği olan E_b ise tanımından dolayı enjeksiyon malzemesinin hacmi ile basıncı arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir.

Değişik zemin tiplerinde uygulanan kompaksiyon enjeksiyonu basınçlarıyla zeminlerin yoğunluğunda meydana gelen artışlar Tablo 1’de gösterilmiştir [8].

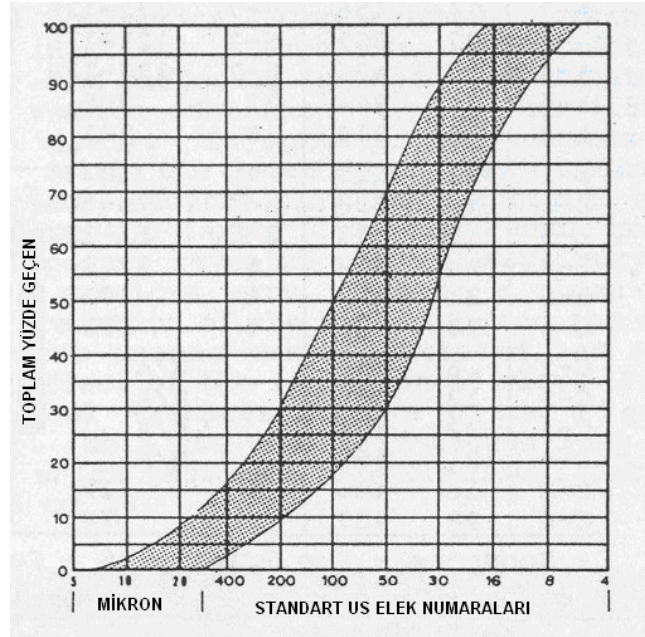
Zeminin homojen, eşyönlü, lineer ve elastik olduğuna dair başlangıçta yapılan varsayımlardan ötürü, herhangi bir uygulamada hataya düşmemek için zemin tipi, kalınlığı ve birim deformasyon seviyeleri göz önünde bulundurularak gerekli değişiklikler yapılmalıdır.

Tablo 1. Farklı zemin tipleri için elastisite modülü değerleri

Zemin Tipi	Zeminin Birim Hacim Ağırlığı, kN/m^3	Enjeksiyon Basıncı, kPa	Yoğunluktaki artış, %	Elastisite Modülü, E_b, $kPa \times 10^6$
Turba	9700	1500	0.30	4.8
Yumuşak kil/siltli kil	13000	2000	0.20	19.5
Orta sıkı kil/siltli kil	14500	3500	0.15	33.8
Yumuşak kumlu silt/kil	13000	3500	0.15	30.3
Orta sıkı kumlu silt/kil	14500	4100	0.10	59.5
Gevşek siltli kum/kum	13000	4100	0.08	66.6
Orta sıkı siltli kum/kum	16000	5500	0.07	125.7

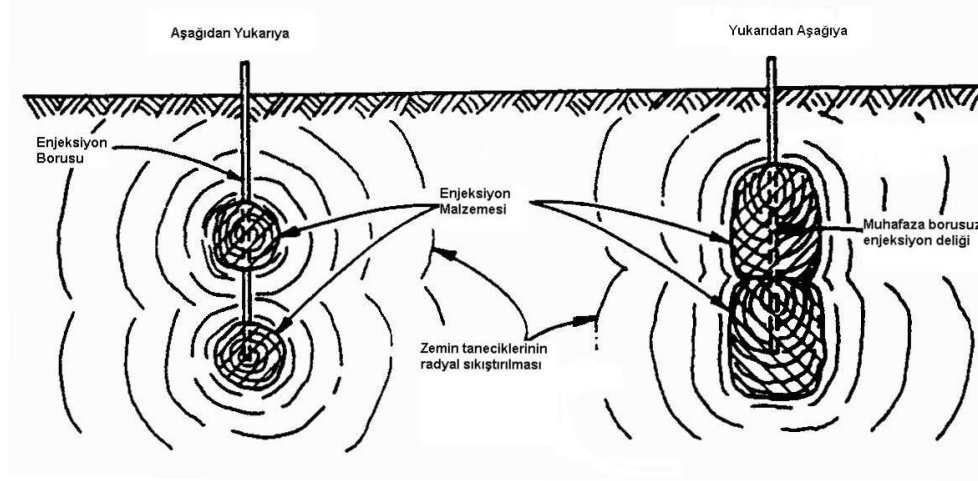
3. ENJEKSİYON MALZEMESİ VE ZEMİN İÇERİSİNE YERLEŞTİRİLMESİ

Zemin içerisinde oluşan enjeksiyon kütlelerinin şekli ve bunun elde edilen iyileştirme derecesine olan etkisi ilk olarak Warner ve Brown [7] tarafından rapor edilmiştir. 100'den fazla kompaksiyon enjeksiyonu test kolonu oluşturulmuş ve daha sonra bunlar zemin kazılarak açığa çıkarılmıştır. Farklı karışım oranlarına ve reolojik özelliklere sahip enjeksiyon malzemeleri farklı hızlarda enjekte edilmiştir. Sonuç olarak ince kumlu ve yaklaşık %12 çimento ve su içeren çok katı karışımların en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Ayrıca raporda enjeksiyon hızının yavaşlaşmasının daha fazla enjeksiyon alımına yol açtığı belirtilmiştir. Aynı araştırmacılar enjeksiyon karışımı içerisindeki kil miktarını sınırlamanın tekniğin başarısı için önemli olduğunu vurgulamışlardır. Bunun nedeni kilin enjeksiyon karışımına aşırı akışkanlık sağlaması ve bu sayede zemini çatlatma riskinin doğmasıdır. Gerçekten karışım içerisinde kullanılacak kum malzemesi için Şekil 4'de gösterilen gradasyona bakıldığında kil yüzdesinin sıfır olduğu görülür. Aynı zamanda çok katı, plastik kıvamda bir enjeksiyon malzemesinin elde edilebilmesi için mümkün olan en az miktarda suyun kullanılması önerilmektedir. Kısacası karışım ne kadar katı olursa enjeksiyon işlemi o kadar verimli olacaktır. Ayrıca, karışımın zemin içerisine yüksek hızlarda enjekte edilmesi zemini çatlatarak yarma riski doğurduğundan bu durum sıkı bir şekilde kontrol edilmelidir. Bu nedenle dakikada 0.06 m³'ü geçen enjeksiyon hızları önerilmemektedir.



Şekil 4. Kompaksiyon enjeksiyonu karışımındaki kum için öngörülen dane çapı dağılım aralığı [9]

Enjeksiyonun zemin içerisine yerleştirilmesi bütün arazi koşullarını (zemin, yapı, mülkiyet hakkı sınırlamaları) göz önüne almayı gerektirmekte ve genellikle yukarıdan aşağıya, aşağıdan yukarıya ve bazen de her ikisi birden gerçekleştirilmektedir (Şekil 5). Yüzeysel uygulamalar ve farklı oturmuş sömellerin kaldırılmaları yukarıdan aşağıya, yüzeysel kabarmaların asgari tutulması gereken stabilizasyon işleri ise aşağıdan yukarıya gerçekleştirilmektedir. Enjeksiyonun yularıdan aşağıya yapılmasının avantajı ilk olarak üst tabakaların sıkıştırılması ve bu sayede aşağıya doğru ilerledikçe daha yüksek enjeksiyon basınçlarının kullanılabilmesidir. Fakat her enjeksiyon aşamasında ek delgi gerektiğinden maliyetin artması bu yöntemin dezavantajını oluşturmaktadır. Şayet yukarıdan aşağıya gerçekleştirilen enjeksiyon işlemi derin formasyonlarda oturma problemine yol açacaksa ilk olarak aşağıdan yukarıya yapılan birkaç enjeksiyondan sonra işlem yukarıdan aşağıya tabandaki son enjeksiyon kütesine ulaşılan kadar devam ettirilir.

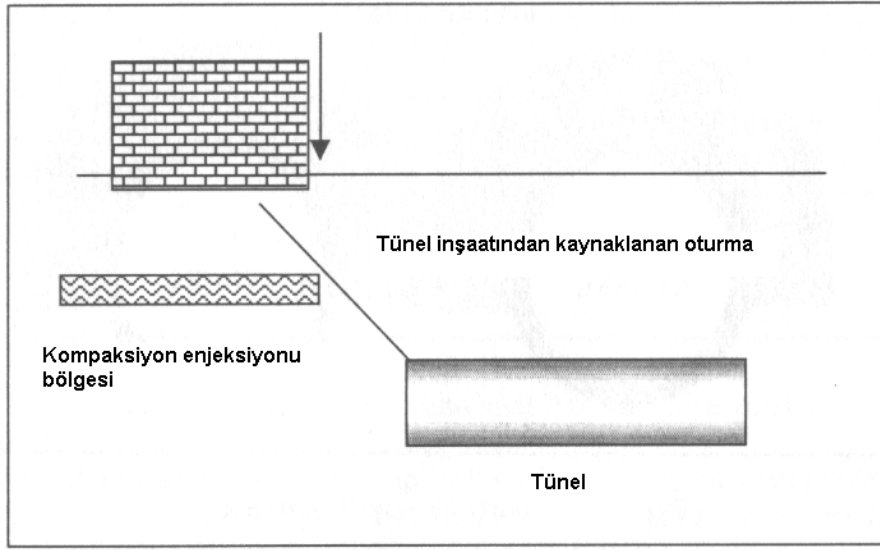


Şekil 5. Aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya gerçekleştirilen kompaksiyon enjeksiyonu işlemleri [10]

Enjeksiyon sondaj deliklerinin aralıkları ve yerleşimi büyük önem arz etmektedir. Zemin tipi, su muhtevası, zeminin mevcut rölatif sıklığı ve istenilen iyileştirme derecesi, geostatik gerilmeler, mevcut yapısal elemanlar v.b. gibi faktörler enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine yerleştirilme şeklini ve dolayısıyla elde edilen nihai iyileştirmeyi etkilemektedir. Enjeksiyon delikleri aralığı temel merkezi altında genellikle 2.5 m civarında olup tercihen üçgensel konum seçilir. Yapının çevresi etrafında bir veya iki sıra ek enjeksiyon bölgesi oluşturmak etraftaki yapısal elemanlara yanıl yüklemeye nedeniyle zarar vermemek açısından uygun görülmektedir. Enjeksiyon noktaları arasındaki yatay aralıklar yüksek geostatik gerilmelerin olması durumunda (ya derin formasyonlarda ya da yapısal yükler altındaki enjeksiyon noktaları) daha yüksek enjeksiyon hacmi ve basınçları gerektireceğinden daha geniş tutulmaktadır. Gevşek zeminler içerisinde gerçekleştirilen enjeksiyon işlemi daha sıkı zeminlerdekine göre daha büyük enjeksiyon kütesi oluşturduğundan yatay aralık daha büyüktür.

4. UYGULAMA ALANLARI

Kompaksiyon enjeksiyonu en çok farklı oturmaların düzeltilmesinde, temel ve döşemelerin alttan desteklenmesinde [11, 12, 10] kullanılmakla birlikte sıvılaşma ve sismik problemlerin önlenmesinde [3], yumuşak veya gevşek zeminlerde açılan tünel kazılarında dolayı meydana gelecek yüzeysel oturmaların karşılanmasında [13; 14], (Şekil 6), yeraltı boru hatları veya menfez temellerinin güçlendirilmesinde [15] ve baraj temellerinde yeraltı boşluklarının (sinkhole) oluşumunun önlenmesinde [16] de yaygın olarak kullanılmıştır.



Şekil 6. Kompaksiyon enjeksiyonuyla tünel inşaatından kaynaklanan oturmaların önlenmesi [2]

Boulanger ve Hayden [3] kompaksiyon enjeksiyonunun sıvılaşmayı önlemek için kullanıldığı geniş bir vaka analizleri özeti hazırlamışlardır. Vaka analizlerinde bu enjeksiyon tekniğinin siltli kumlarla siltli zeminlerin SPT ve CPT penetrasyon direnç değerlerini önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir. Fakat şu da unutulmamalıdır ki kompaksiyon enjeksiyonu sonucu zemin içerisinde oluşturulan kütlelerin uzun vadede de yeterli dayanımda olması gerekir. Ayrıca bu tekniğin çok yumuşak killerde uygulanması aşırı boşluk suyu basınçları oluşturacak bu da uzun vade oturmalarına yol açacaktır. Dolayısıyla bu hususların uygulama öncesinde enjeksiyon parametreleri ve enjeksiyon malzemelerinin tasarımı esnasında göz önünde bulundurulması gerekir.

Boulanger ve Hayden [3] killi silt ve siltli kumun sıvılaşma potansiyelinin azaltılmasına yönelik kompaksiyon enjeksiyonunun etkinliğini göstermekte, ayrıca zamanın enjekte edilmiş zeminin penetrasyon dirençleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu doğrultuda enjeksiyon işleminden bir hafta, bir ay ve 18 ay sonra CPT deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından kompaksiyon enjeksiyonunun silt ve kumların SPT ve CPT dirençlerini arttırmada başarılı olduğu sonucuna varılabilir. Siltli zeminde elde edilen iyileştirme

derecesi, diğer iyileştirme tekniklerinden çok azının bu tip zeminlerde uygulanabildiği göz önüne alındığında, gerçekten teşvik edicidir.

Enjekte edilmiş silt ve kumun penetrasyon dirençlerinde büyük bir artış gözlenmiştir. Fakat ortalama artışın %30'u takip eden 18 ay içerisinde kaybolmuştur (Şekil 7). Bu sonuç yanal gerilmelerin zamanla azaldığını göstermektedir. Bu nedenle kompaksiyon enjeksiyonuyla iyileştirilmiş zeminlerin sıvılaşıma direnci düşünüldüğünde uzun vadede yanal gerilmelerin azaldığı gözönüne alınmalıdır.

4.1 Ekipman

Çok katı çimento harçlarının kullanılmasından dolayı kompaksiyon enjeksiyonu için özel ekipman gerekmektedir. Karıştırıcı (mikser) düşük çökme değerli, çok katı çimento harcını homojen bir şekilde karıştırabilecek kapasitede olmalıdır. Kompaksiyon enjeksiyonu için gerekecek pompa:

- düşük çökme değerli çimento harcını işleyecek kapasitede,
- yüksek basınçlarda (4000 – 7000 kPa) çalışabilen,
- pompalama esnasında ayarlanabilen ve 20 m³/saat'e kadar pompalama hızı sağlayabilen ve
- enjeksiyon noktasında basınç ölçümü yapabilen tipte olmalıdır.

Çimento harcı enjeksiyon pompasından enjeksiyon noktasına genellikle 38-50 mm çapındaki borularla iletilmekte olup, katı, yüksek viskoziteli çimento harcı kullanıldığından boru içerisinde sürtünmeden kaynaklanan yüksek basınç kayıpları söz konusudur. Bu nedenle pompa ile enjeksiyon noktası arası mesafe kısa tutulmalıdır.

4.2 Tasarım için gerekli veriler

Kompaksiyon enjeksiyonu tasarımı için gerekli bilgiler diğer enjeksiyon işlemlerinde olduğu gibi şunları içermektedir:

- arazi jeolojisi ve geoteknik parametreler (zemin tipi, birim hacim ağırlığı ve yapısı),
- zeminin geçirimsizliği,
- uygulamanın geçici veya kalıcı olma durumu,
- izin verilebilir zemin veya yapı deplasmanları,
- arazi erişimi (açık arazide veya mevcut yapıların altında uygulamalar).

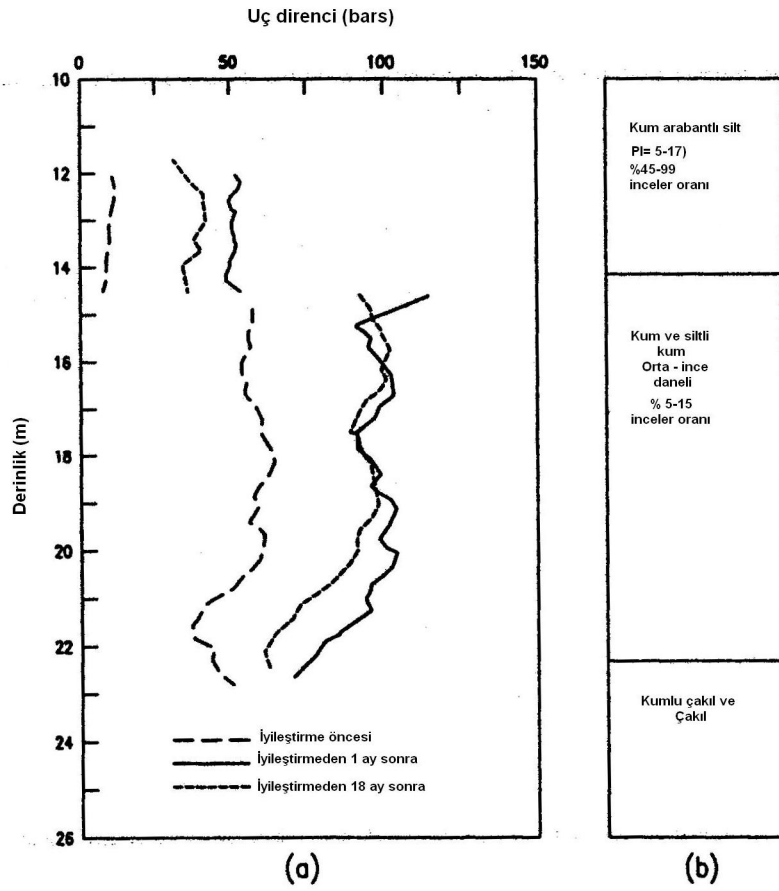
4.3 Enjeksiyon parametreleri

Enjeksiyon işlemi sırasında enjeksiyon basıncı hem pompada hem de enjeksiyon noktasında gözlenmelidir. Çünkü basınç – enjekte edilen hacim ilişkisi hem zemin koşulları hakkında hem de karşılaşılan herhangi bir problem hakkında bilgi sağlayacaktır. Örneğin basınçta meydana gelen bir düşme enjeksiyon malzemesinin ya bir boşluk veya yeraltı yapısı içine enjekte edildiğini veya zeminin hidrolik çatlatmaya maruz kaldığını veya bir dayanma yapısıyla sağlanan yanal direncin yenildiği anlamına gelebilir.

Genellikle enjeksiyon pompalamanın durdurulması gereken bir kriter belirlenir. Pompalama aşağıda belirtilenlerden hangisi ilk olarak gerçekleşirse durdurulur:

Kompaksiyon Enjeksiyonuna Teorik ve Pratik Yaklaşımlar

- Belli bir hızda pompalama esnasında basıncın ani olarak düşmesi ki bu durum zeminin kayma direncinin düştüğünü göstermektedir.
- Yüzeysel kabarmaların meydana gelmesi durumunda (enjeksiyonun oturmaların engellenmesi amacıyla uygulanması hariç).
- Önceden belirlenen azami enjeksiyon miktarının enjekte edilmesi durumunda (nadiren olur).
- Enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine enjekte edilememesi durumunda [10].



Şekil 7. Kompaksiyon enjeksiyonu öncesi ve sonrasında ortalama CPT uç dirençleri [3]

4.4 Enjeksiyon denemeleri

Büyük projelerde gerçek zemin koşullarında deneme enjeksiyonlarının yapılması önerilmektedir. Bu sayede önceden belirlenen enjeksiyon parametreleri, enjeksiyon deliklerinin yerleşimi ve enjekte edilme sırası ve enjeksiyon malzemesinin reolojik özellikleri hakkında gerekli değişiklikler yapılabilir. Ayrıca deneme sonucunda

kompaksiyon enjeksiyonunun proje için en uygun zemin iyileştirme tekniği olup olmadığına da karar verilmelidir.

4.5 Gözlem

Kompaksiyon enjeksiyonunun düzgün bir şekilde gerçekleştirilmesi için enjeksiyon esnasında gözlem şarttır. En azından enjeksiyon malzemesinin kıvamı, enjeksiyon hızı, enjeksiyon basıncı ve her aşamada enjekte edilen malzeme miktarı gözlenmeli ve kaydedilmelidir. Bu veriler zemin koşullarını ve enjeksiyon işleminin verimliliğini belirlemede kullanılabilir. Daha yumuşak ve gevşek zeminlerde enjeksiyon basınçları daha düşük, enjekte edilen hacimler ise daha fazladır. Birinci aşamada gerçekleştirilen enjeksiyon zeminin biraz olsun iyileştirilmesini sağladığından ikinci geçişte daha yüksek basınçlar ve daha az malzeme enjeksiyonu söz konusu olabilir.

5. SONUÇ

Zemin iyileştirme (sıkıştırma) tekniklerinden kompaksiyon enjeksiyonu üzerine teorik ve pratik yaklaşımlarda bulunulmuş, tekniğin uygulama alanlarından ve özellikle son 10-15 yıl bir süre içerisinde sıvılaştırma riskini azaltma yöntemi olarak kullanıldığından bahsedilmiş, zemin ve enjeksiyon parametreleri üzerinde kısaca durulmuştur. Tekniğin yumuşak killerde uygulanması durumunda aşırı boşluk suyu basınçlarını sönmeyecek özel önlemlerin alınması gerektiği ve yanıl gerilmelerin uzun vadede azalmasından ötürü iyileştirilmiş zeminin penetrasyon dirençlerinde zamanla azalma meydana gelebileceği vurgulanmıştır.

6. SEMBOLLER

σ_x = x eksenindeki toplam gerilme
 σ_y = y eksenindeki toplam gerilme
 σ_z = z eksenindeki toplam gerilme
 P_g = Enjeksiyon basıncı
 ϵ_v = Hacimsel birim deformasyon
 V_e = Enjeksiyon malzemesinin hacmi
 V_{ns} = Nötr sınır içerisindeki zemin hacmi
 ϵ_x = x eksenindeki birim deformasyon
 ϵ_y = y eksenindeki birim deformasyon
 ϵ_z = z eksenindeki birim deformasyon
 E_b = Zemin hacim modülü
 Δ_γ = Zemin yoğunluğunda meydana gelen artış
 Δ_m = Zemin içerisine enjekte edilen kütle
 γ_s = Enjeksiyon noktasında zeminin birim hacim ağırlığı

Kaynaklar

- [1] Committee on Grouting of the Geotechnical Engineering Division, 1980, Preliminary Glossary of Terms Relating to Grouting, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT7, Proc. Paper 15581, pp. 803-815.
- [2] Essler, R.D., Drooff, E.R., and Falk, E., (2000), Compensation Grouting: Concept, Theory and Practice. Advances in Grouting and Ground Modification, ASCE, GSP No.104, pp. 1-15.
- [3] Boulanger, R.W. and Hayden, R.F. (1995), 'Aspects of Compaction Grouting of Liquefiable Soil', Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 12.
- [4] Baker, W.H. (1985). 'Embankment Foundation Densification by Compaction Grouting', Proceedings, Issues in Dam Grouting, ASCE, New York, NY, pp 104-122.
- [5] Orense, R.P., Morita, Y., and Masanori, I. (2000), 'Assessment and Mitigation of Liquefaction Risk for Existing Building Foundation', An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Australia.
- [6] Graf, E.D., 'Compaction Grouting Technique', Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 95, No. SM5, September, 1969.
- [7] Warner, J., and Brown, D.R. (1973), 'Compaction Grouting', Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 99, No. SM8, Proc. Paper 9908, August, 1973.
- [8] Al-Alusi, H.R. (1997), 'Compaction Grouting: From Practice to Theory', Grouting: Compaction, Remediation and Testing, ASCE, GSP No.66, pp. 43-53.
- [9] Warner, J., and Brown, D.R. (1974), 'Planning and Performing Compaction Grouting', Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.100, No. GT6, Proc. Paper 10606, pp. 653-666.
- [10] Graf, E., (1992). 'Compaction Grout, 1992'. Proceedings. Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, ASCE Geotechnical Special Publication No.30, Vol. 1, New Orleans, February 25-28, pp 275-287.
- [11] Mitchell, J.K., (1981). 'State-of-the-Art Report on Soil Improvement', Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.96, No.SM1.
- [12] Welsh, J.P., Anderson, R.D., Barksdale, R.P., Satyapriya, C.K., Tumay, M.T., and Wahls, H.E., (1987). 'Densification'. Proceedings, Soil Improvement – A Ten Year Update, ASCE Geotechnical Special Publication No.12, New Jersey, April 28.
- [13] Baker, W.H., Cording, E.J., and Macpherson, H.H. (1983), 'Compaction Grouting to Control Ground Movements During Tunneling', Underground Space, Vol.7, pp 205-212.
- [14] Harris, D.I., et al. (1994). 'Observations of Ground and Structure Movements for Compensation Grouting During Tunnel Construction at Waterloo Station', Geotechnique, Vol. 44, No. 4, pp 691-713.
- [15] McGovern, M.S. (1996). 'Grouting Combination Repairs Sewer Pipe', Concrete Repair Digest, pp 94-100.
- [16] Garner, S.J., Jefferies, M., and To, P. (1998). Compaction Grouting Project Completion Report, WAC Bennett Dam Sinkhole Remediation Project. BC HydroPower Supply Engineering.