

**YATAY DESTEK SİSTEMLERİNDE ZEMİN YAPI
ETKİLEŞİMİNİN DEFORMASYON ESASLI YAKLAŞIMLA
TAKİBİ**

İlknur BOZBEY

Yrd. Doç. Dr.
İstanbul Ü., İnşaat Müh. Böl.
İstanbul, Türkiye

S. Feyza ÇİNİCİOĞLU

Prof. Dr.
İstanbul Ü., İnşaat Müh.Böl.
İstanbul, Türkiye

Sedat KUTU

İnşaat Yük. Müh.
İstanbul Ü., İnşaat Müh. Böl.
İstanbul, Türkiye

ÖZET

Yatay destekli derin kazıların inşaatı farklı aşamalardan oluştuğu için (ıksa duvarının yapılması, hafriyat, yatay desteklerin öngerilmesi, vb..) her inşaat kademesinde farklı gerilme ve deformasyon durumları meydana gelir. Bu çalışma kapsamında literatürde yer alan ve imalatı sırasında detaylı bir aletsel göziemeleme çalışması yapılmış olan yatay destekli bir derin kazıdan alınan deformasyon değerleri zeminde oluşan gerçek davranışı tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Davranış deformasyonlara göre ve deformasyon değerlerini kullanarak elde edilen gerilme değerlerine göre incelenmektedir. Uygulanan yaklaşımlarla duvar arkasındaki zeminin değişik bölgelerinde davranış değişiklikleri anlamlı bir şekilde tespit edilebilmektedir.

AMAÇ

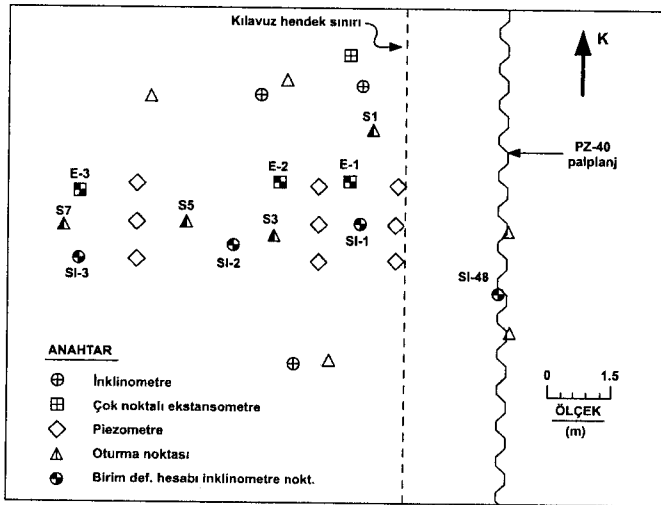
Yatay destek sistemlerinin inşası her biri ayrı bir deformasyon ve gerilme durumuna sahip çok sayıda aşamadan oluşmaktadır. Bu nedenle bu tür sistemlerin teorik olarak çözümü oldukça zordur ve tasarımlar genellikle tüm inşaat aşamalarında oluşan gerilme durumunu kapsayan zarflar kullanılarak yapılmaktadır. Bu tür yöntemler pratik olmakla beraber zeminde herhangi bir inşaat aşamasında gelişen davranışı tanımlama kabiliyetine sahip değildir. Halbuki inşaat sürecinde zeminde oluşan davranışı yorumlama yetisine sahip yöntemler, destekleme sistemlerinin güvenli ve ekonomik inşası açısından önemlidir. Bu ise ancak çok iyi planlanmış bir aletsel gözlemlene ve bu verilerin doğru değerlendirilmesi ile mümkün olabilir.

Bu çalışmada yatay destekli bir derin kazıda beş farklı inşaat aşamasında gelişen zemin davranışını tanımlamak amaçlanmıştır. Bu amaçla killi bir zeminde imal edilmiş olan yatay destekli palplanş bir duvar arkasında yapılan detaylı arazi ölçüm verisinden yararlanılmıştır (1, 2). Bu çalışmalarda sunulan yatay, düşey ve kayma birim deformasyonları, boşluk suyu basınç verileri iki ana yaklaşım çerçevesinde kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla; davranışı sadece deformasyonlara göre ve deformasyon değerlerini kullanarak elde edilen gerilme değerlerine göre yorumlamaktır. Zeminde farklı bölgelerde ölçülmüş olan yatay, düşey birim deformasyon ve boşluk suyu basıncı değerleri bu iki yaklaşım çerçevesinde kullanılarak inşaatın farklı aşamalarında ve zeminin farklı bölgelerinde uyanan (mobilize olan) içsel sürtünme açıları, yanal toprak basınç katsayıları ve yanal gerilmeler bulunmuştur (3). Elde edilen değerlere dayanarak zeminde gelişen davranış tanımlanmıştır.

ÇALIŞMA YÖNTEMİ

Derin Kazının ve Bölgelerin Tanıtılması

Finno ve diğ. (1) ve Finno ve Nerby (2) Şikago metro inşaatı için yapılan derin kazılar sırasında bir test bölgesi belirlemiş ve burada yoğun ve kapsamlı bir aletsel gözleme çalışması yapmıştır. Yazarlar derin kazının farklı aşamalarında (palplanşın çakılması, hafriyatın yapılması, yatay desteklerin yerleştirilmesi, vb..) zeminde farklı bölgelerde oluşan yatay, düşey ve kayma birim deformasyon, boşluk suyu basıncı değerlerini sunmuş ve zemin yüzeyinde oluşan çatlaklar ve aldıkları ölçümlere dayanarak tahmini kayma düzlemleri belirlemiştir. Bu veriler detaylı olarak 1 ve 2 nolu kaynaklarda sunulmaktadır. Test bölgesine ait enstrümantasyon şeması Şekil 1'de görülmektedir.



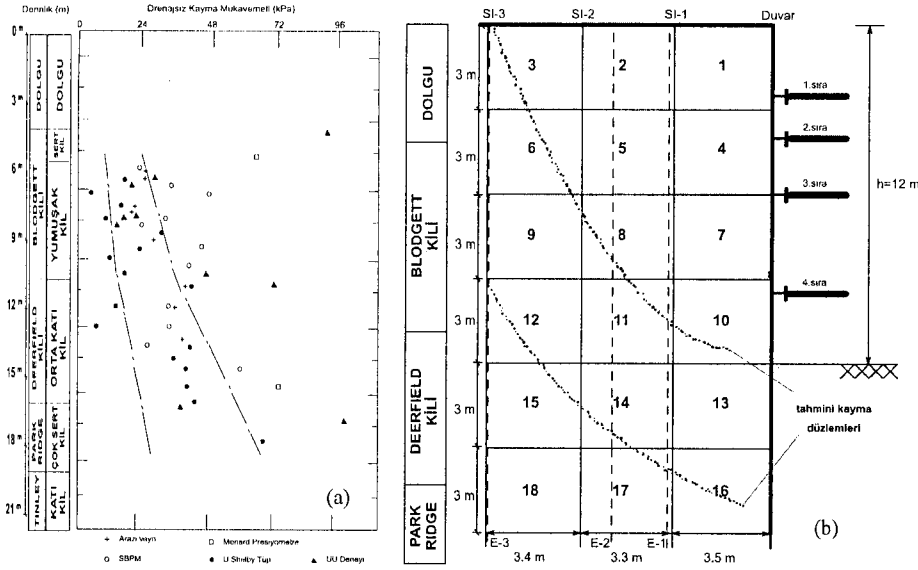
Şekil 1. Test bölgesinde kullanılan enstrümantasyon şeması (1)

Bölgedeki zemin profili ve farklı değerlerle elde edilmiş olan drenajsız kayma mukavemeti değerleri Şekil 2a'da sunulmaktadır. Bu çalışmada drenajlı kayma mukavemeti değerleri kullanılmış ve $\phi' = 33^\circ$ olarak seçilmiştir. Bu değer tüm zemin profilini temsil edebildiği düşünülmüş ve

böylece çalışılan kesit basitleştirilmiştir. Çalışma kapsamında duvar arkasındaki zemin 18 bölgeye bölünmüş ve her bölgedeki davranış değişiklikleri araştırılmıştır. Böylece bütünsel davranışı oluşturan küçük bölgelerdeki davranışın ayrı ayrı analizi ve aralarındaki etkileşimi daha iyi görmek mümkün olmuştur. Bu tür inceleme (4) tarafından dolgu temelleri için başarıyla uygulanmıştır. Zemin profili, yatay destekler, inklinometre ve ekstansometre yerleri, oluşturulmuş bölgeler ve (2) tarafından verilen tahmini kayma düzlemleri Şekil 2b'de gösterilmektedir. Test bölgesinde düzlem deformasyon durumunun geçerli olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışma kapsamında Tablo 1'de sunulan beş anahtar inşaat günü için uygulama yapılmıştır.

Tablo 1. Bu çalışmada incelenen inşaat aşamaları

| İnşaat günü | Faaliyet |
|-------------|---|
| 66 | Palplanş çakılmıştır. |
| 143 | 5 m'ye kadar kazı yapılmış ve bu bölgede maksimum konsol durum oluşmuştur. |
| 152 | 144. günde birinci destek yerleştirilmiş, ön yükleme yapılmış ve kazı 152. günde 8 m'ye kadar ulaşmıştır. |
| 163 | 157. günde üçüncü sıra destek yerleştirilmiş ve önyükleme yapılmıştır. 163. günde ikinci sıra destekler yerleştirilmiş ancak önyükleme yapılmamıştır. Kazı yüzeyden itibaren 10 metrededir. |
| 169 | 165. günde dördüncü sıra destek yerleştirilmiş ve kazı 13 metreye inmiştir. |



Şekil 2. (a) Test bölgesindeki zemin profili ve drenajsız kayma mukavemeti değerleri (1)
 (b) Zemin profili, yatay destekler, inklinometreler (SI) ekstansometreler (E) ve oluşturulan bölgeler (3)

Davranışın Mohr Birim Deformasyon Daireleri ve Birim Deformasyon İzleri Kullanılarak Takibi

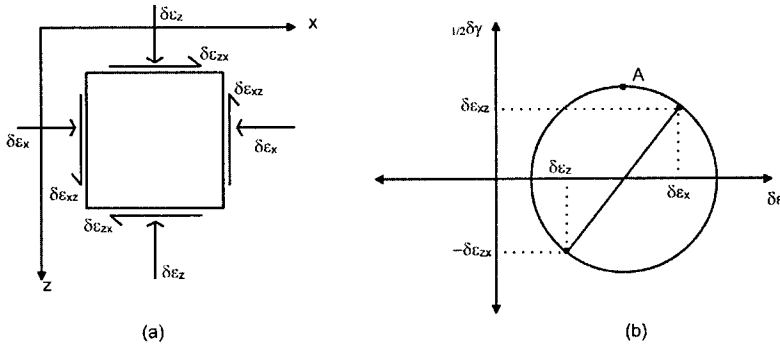
Mohr birim deformasyon daireleri birim deformasyonların analizi için kullanılabilir. Bu dairelerin yapısal özelliklerinden yararlanarak asal birim deformasyonlar ve kayma düzlemleri elde edilebilir veya birim deformasyon izleri çizilerek zemin bölgesinde farklı günlerde oluşan deformasyon durumu tek bir grafik ile takip edilebilir.

Bu çalışmada birinci yaklaşımda arazide oluşan davranışın takibi sadece Mohr birim deformasyon daireleri ile yapılmıştır. Bunun için (2)'de verilen birim deformasyonlardan yola çıkarak her bölgenin köşe noktalarındaki yatay ve düşey deplasmanlar hesaplanmış ve bu çalışma kapsamında

oluşturulmuş olan ve Şekil 2b'de görülen 18 adet bölgeye ait yatay, düşey ve kayma birim deformasyon değerleri bulunmuştur. Daha sonra bu bölgeler için Mohr birim deformasyon daireleri çizilmiştir. Bu işlem Tablo 1'de verilen beş gün için tekrar edilmiş ve böylelikle her bölgenin birim deformasyon durumunu temsil eden beş adet Mohr birim deformasyon dairesi elde edilmiştir. Bölgeye ait birim deformasyon durumu ve bunun Mohr dairesine aktarımı şematik olarak Şekil 3a ve 3b'de görülmektedir. Mohr birim dairelerinden birim deformasyon izlerine geçiş için de Mohr dairesinin tepe noktası (A) kullanılmıştır. Mohr dairelerinin tepe noktalarına ait değerler biraraya getirilerek birim deformasyon izleri elde edilmiştir.

Davranışın Mukavemet Parametreleri ile Takibi

Yapılara etkiyen yanal toprak basınçları, yapıda oluşan deformasyonun miktarına ve yönüne bağlıdır ve genellikle aktif veya pasif yanal toprak basınçları kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak çalışmalar, zeminin göçme noktasına ulaşmadığı durumlarda, klasik aktif ve pasif yanal toprak basıncı katsayılarını kullanmanın tam anlamıyla gerçekçi olmadığını göstermektedir. Klasik toprak basıncı teorileri, göçme anındaki zemin parametrelerinin bilinmesi veya kolay elde edilebilmesi nedeniyle zeminde sınır denge durumuyla ilgilendir. Arazide pek çok durumda özellikle pasif durum için gerekli olan deformasyonlara ulaşamamaktadır.



Şekil 3. a) Bölgenin birim deformasyon durumu b) Mohr Birim Deformasyon dairesinde gösterimi (3)

Zhang ve diğ. (6) tarafından geliştirilen bir yöntem ise herhangi bir deformasyon durumu için yanal toprak basıncı katsayılarını hesaplayabilmektedir. Zhang ve diğ. (6) yaptıkları araştırmada, üç eksenli basınç deneylerinden elde ettikleri değişik sabit deformasyon izlerinin sonuçlarına göre, toprak basıncı katsayısının deformasyon artış oranına son derece bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar bu bulguyla, herhangi bir sınır deformasyon kısıtlaması altındaki zemin basınçlarının çözümü için yeni bir metodoloji geliştirmişlerdir. Bu yöntemle, Rankine ve Coulomb teorileri formülleri genişletilerek yeni toprak basıncı denklemleri elde edilmiştir. Çalışmalarında deformasyon oranı (R_e) küçük asal birim deformasyonun büyük asal birim deformasyona oranı

$$R_e = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1}$$

olarak tanımlanmış ve uyanan sürtünme açısının bu deformasyon oranının bir fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. Yanal toprak basıncını bulmak üzere tanımlanan R parametresi ise aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$R = \begin{cases} R_e & (K \leq 1) \\ 2 - R_e & (K \geq 1) \end{cases}$$

Burada "K" toprak basıncı katsayısını göstermektedir ve aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$K = \frac{1 - \sin \phi'}{1 - \sin \phi' \cdot R} \quad (-1 \leq R \leq 1)$$

$$K = 1 + \frac{\sin \phi'}{1 - \sin \phi'} (R - 1) \quad (1 \leq R \leq 3)$$

Zeminde herhangi bir deformasyon durumunda uyanan ϕ'_{mob} açısı yeni deformasyon parametresi R kullanılarak 5 ve 6 nolu formüller ile bulunur. Limit gerilme durumlarında ise uyanan içsel sürtünme açısı ϕ'_{mob} , ϕ' 'ye eşit olacaktır.

$$\sin \phi'_{mob} = \frac{\sin \phi'(1-R)}{2 - \sin \phi'(1+R)} \quad (-1 \leq R \leq 1)$$

$$\sin \phi'_{mob} = \frac{\sin \phi'(R-1)}{2 - \sin \phi'(3-R)} \quad (1 \leq R \leq 3)$$

Bu çalışmada (6) tarafından geliştirilen bu formüller ile her bölge için yatay ve düşey deformasyon oranlarına bağlı olarak yanay toprak basıncı katsayısı değerleri (K) bulunmuştur. Böylelikle deformasyon değerlerinden gerilme değerlerine geçilmiştir. Elde edilen gerilme değerleri kullanılarak Mohr gerilme dairelerine geçilmiş ve bölgelerin göçme durumları yorumlanmıştır.

BULGULAR

Bölgelere ait Mohr Birim Deformasyon Daireleri ve Deformasyon İzleri

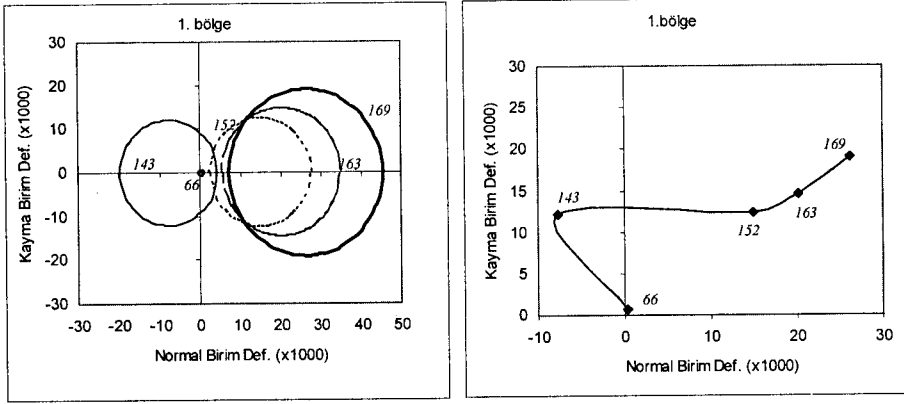
Bu bölümde farklı bölgeler için elde edilen Mohr birim deformasyon daireleri ve deformasyon izleri sunulmaktadır. Arka zemindeki davranış farklılığını yansıtabilmek amacıyla palplanşa komşu olan ve kayma düzlemi üzerinde olan bölgeler örnek olarak seçilmiştir. Palplanşa komşu olan bölgelerden birinci bölgeye ait Mohr birim deformasyon daireleri ve deformasyon izi Şekil 4'de verilmektedir. Dairelerden de görüldüğü gibi, incelenen inşaat aşamalarında bölgede gelişen deformasyon davranışı farklıdır. Palplanşın önünde hafriyat yapılması ile (143. gün) bölge hacımsal olarak genişlemektedir. Yatay desteklerin yerleştirilmesi ile (152, 163, 169) birlikte ise sıkışmaktadır. Tüm bu aşamalarda meydana gelen deformasyonlar palplanşın çakılması sırasında oluşan deformasyonlardan çok fazladır. Bu davranış birim deformasyon izlerinden de takip edilebilir. Palplanşa komşu olan dördüncü, yedinci, onuncu ve onüçüncü bölgelerdeki davranış birinci bölge ile benzeşmektedir. Bu bölgelere ait birim deformasyon izleri Şekil 5a'da birarada sunulmaktadır. Her bölgeye ait grafikler üzerindeki noktalar sırasıyla 66, 143, 152, 163 ve 169. günlere

aittir. Tüm bölgelerde hafriyat ile birlikte genişleme, yatay desteklerin öngerilmesi ile birlikte sıkışma davranışı görülmektedir. İmalat bittiğinde palplanşa komşu olan tüm bölgeler başlangıç durumlarına göre daha küçük hacme sahiptirler. Daha derinde olan bölgelerde (örneğin 10 ve 13) kayma birim deformasyon değerleri, yüzeye yakın bölgelerden daha büyüktür ve bu bölgelerde asal eksenler yer değiştirmektedir.

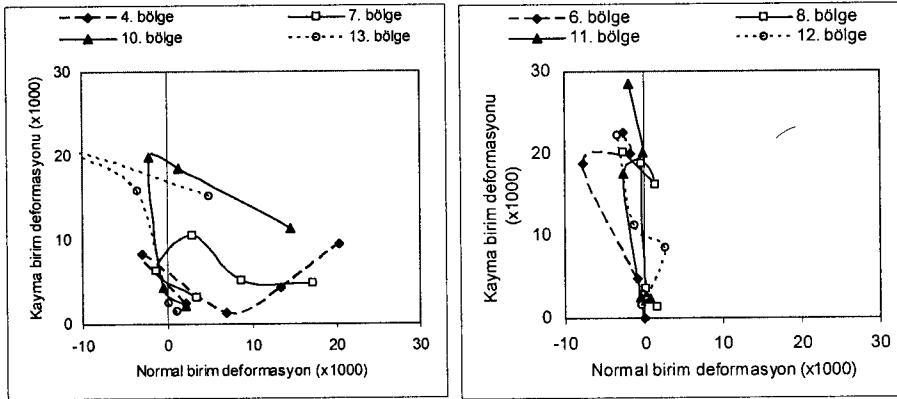
Özel olarak incelenmesi gereken diğer bir bölge grubu da Finno ve diğ. (1989) tarafından tahmini olarak verilen kayma yüzeyi üzerinde yer alan bölgelerdir. Şekil 2b'de de görüldüğü gibi bu gruba giren 6, 8, 11 ve 12 nolu bölgelere ait birim deformasyon izleri Şekil 5'de verilmektedir. Kayma düzlemi üzerinde bulunan bölgelerin yatay desteklerin sıkıştırıcı etkisinden yararlanamadıkları görülmektedir. Bu bölgelerde yüksek kayma birim deformasyon değerleri mevcuttur ve hacımsal olarak sıkışma ve gevşeme davranışı sınırlıdır. Bu bölgelerin sabit hacimlerini korudukları söylenebilir. Bu da yatay destekli palplanş sisteminin yapımı sırasında kayma düzlemlerinin oluşmamasına önem verilmesi gerektiği ve oluşan kayma düzlemlerinin bu destekleme sistemi ile düzeltilemeyeceğini göstermektedir.

Bölgelere ait Mukavemet Parametreleri

Bölgelere ait Mohr birim daireleri ve birim deformasyon izleri bölgelerin farklı aşamalarda farklı tepkiler verdiğini göstermektedir. Deformasyon davranışına bağlı olarak bölgedeki gerilme durumu da sürekli olarak değişecektir. Deformasyon değerlerinden mukavemet ve gerilme parametrelerine geçiş için (6) nolu kaynakta geliştirilen ve bu çalışmada da anlatılan yöntem kullanılmıştır. Her bölge için farklı inşaat aşamalarında uyanan içsel sürtünme açıları (ϕ'_{mob}) ve yanal toprak basıncı katsayıları (K) bulunmuştur. Son aşamada ise her bölge orta noktası için düşey gerilmeler ve buna bağlı olarak yatay gerilmeler hesaplanmış ve Mohr gerilme daireleri çizilmiştir.



Şekil 4. Birinci bölgeye ait Mohr birim deformasyon daireleri ve birim deformasyon izi

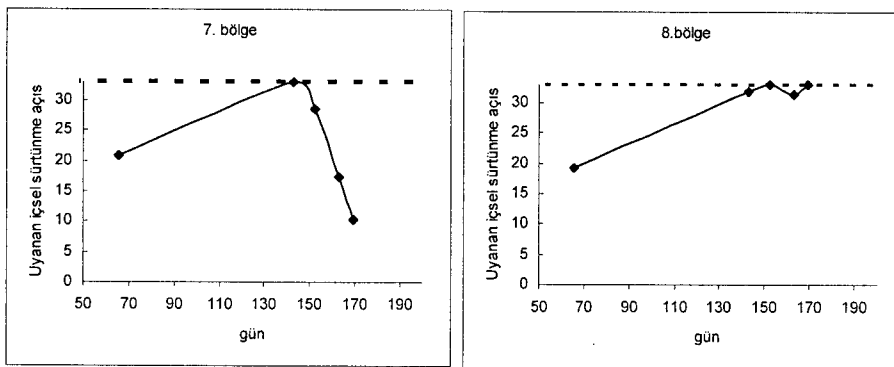


Şekil 5. (a) Palplanşa komşu olan (b) kayma düzlemi üzerinde olan bölgelere ait birim deformasyon izleri

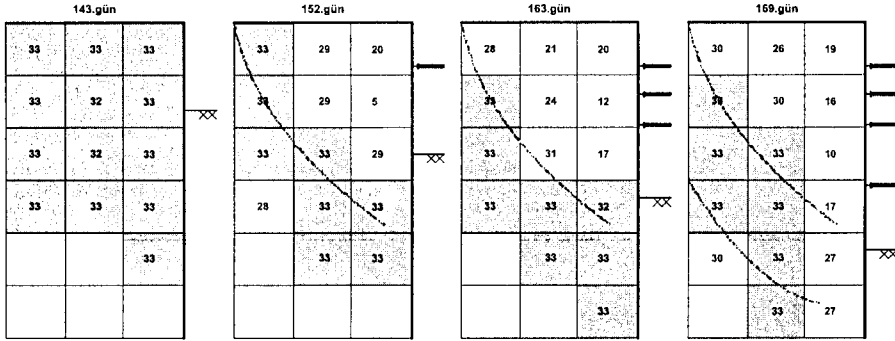
Uyanan İçsel Sürtünme Açıları

Palplanşa komşu olan yedinci bölge ve kayma düzlemi üzerinde bulunan sekizinci bölge için farklı günlerde uyanan içsel sürtünme açıları Şekil 6'da

verilmektedir. Bu iki bölge birbirine komşudur, ancak davranışları farklılaşmıştır. Her iki bölgede de 143. günde hafriyat ile konsol davranış oluşmakta ve $\phi'_{mob}=\phi'$ olmaktadır ve her iki bölgede de göçme meydana gelmiştir. Ancak palplanşa komşu olan bölgede 152., 163. ve 169. günlerde yatay desteklerin sisteme girmesi ile uyanan içsel sürtünme açıları azalmış ve göçme durumundan uzaklaşmıştır. Palplanşa daha uzak olan sekizinci bölgede ise uyanan mukavemet değerleri 143. günden sonraki aşamalarda da pik değere ya çok yakındır ya da eşittir. Yani bu bölgedeki göçme davranışına engel olunamamaktadır. Şekil 6'da gösterilen davranış biçimi diğer komşu bölgelerde ve kayma düzleminde olan bölgelerde de görülmektedir (3). Tüm bölgelerde farklı günlerde uyanan içsel sürtünme açıları Şekil 7'de verilmektedir. Bu değerlerin pik değerlere ulaştığı durumlarda kaymanın oluştuğu kabul edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan yöntemlerle göçme durumunda oldukları bulunan bölgeler Finno ve diğ. (1998) tarafından kayma düzlemleri olarak tanımlanan yüzeyler arasındaki büyük bir uyum görülmektedir. Bu uyum bu çalışmada kullanılan yöntemin zemin yapı etkileşimi yansıtılabilmekteki gücünü ve yeteneğini göstermektedir.



Şekil 6. Uyanan içsel sürtünme açısı değerleri (a) Palplanşa komşu olan yedinci bölgede (b) Kayma düzlemi üzerinde bulunan sekizinci bölgede



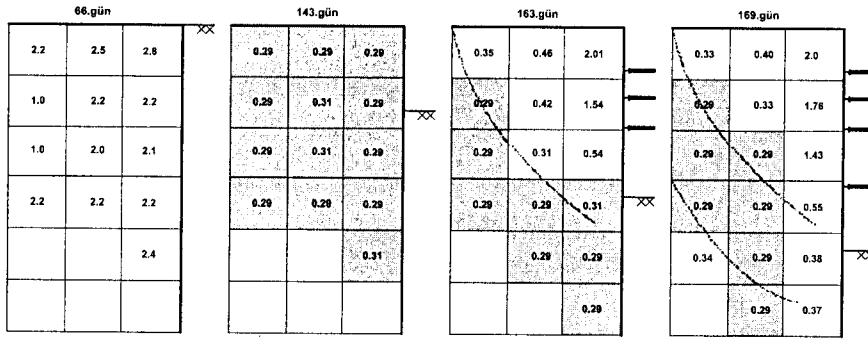
Şekil 7. İnşaatın farklı günlerinde göçme durumunda olan/ göçme durumuna çok yaklaşmış bölgeler ve Finno ve diğ.(1989) tarafından "tahmini kayma yüzeyleri" olarak tanımlanan yüzeyler

Yatay Toprak Basıncı Katsayıları ve Mohr Gerilme Daireleri

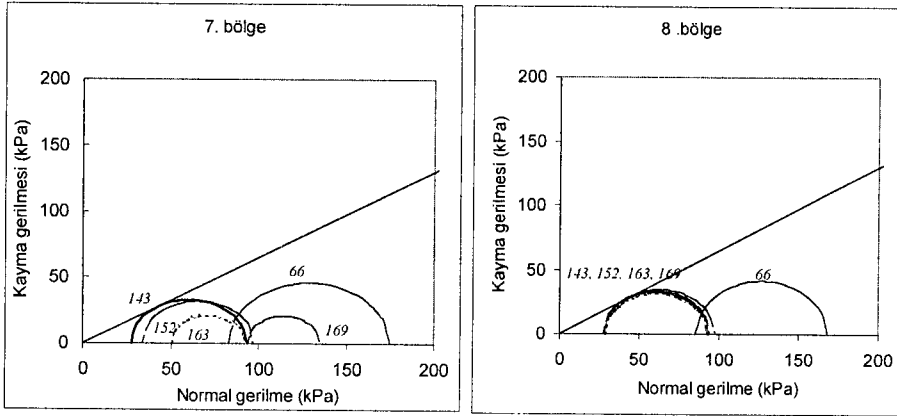
Şekil 8'de farklı inşaat günlerine ait yanal toprak basıncı katsayıları (K) verilmektedir. Bu değerler $\phi'=33^\circ$ için $K_a=0.29$, $K_o=0.46$ ve $K_p=3.39$ olduğu dikkate alınarak yorumlanmalıdır. İnşaatın her aşamasında yanal toprak basınçlarının değiştiği görülmektedir. Palplanşın çakıldığı aşamada arka zeminde toprak basınçlarının arttığı ve bu değerlerin durgun durum ile pasif durum arasında kaldığı görülmüştür. Maksimum konsol durumun olduğu 143. günde ise bir kayma kaması oluşturacak bir bölge içindeki tüm bölgelerde aktif basınçlara kadar inilmiştir. Yatay desteklere öngerilme uygulanan günlerde örneğin (163 ve 169) palplanşa komşu olan dördüncü bölgede oldukça yüksek yatay toprak basıncı katsayıları (sırasıyla 1.54 ve 1.76) mevcuttur ve bu bölgenin pasif durumda olduğu açıktır, başka bir deyişle bu bölgede bu günlerde asal gerilme eksenleri yer değiştirmiştir. Daha sonraki inşaat aşamalarında da bölgenin konumuna göre farklılaşan

toprak basıncı katsayıları bulunmuştur. Yani zemin yapı ile sürekli bir etkileşim halindedir.

Her bölgeye ait yatay toprak basıncı katsayılarının bilinmesi Mohr gerilme dairelerinin de çizilebileceğini göstermektedir. Bu bildiride sadece yedi ve sekiz nolu bölgeler için bu daireler örnek olarak çizilmiştir. Mohr dairelerinin takibi ile bölgelerin hangi günlerde göçme davranışı gösterdiği, hangi günlerde göçmeden ne kadar uzaklaştığı görülebilir.



Şekil 8. İnşaatın farklı günleri için hesaplanmış olan yatay toprak basıncı değerleri



Şekil 9. Yedinci ve sekizinci bölgelere ait Mohr Gerilme Daireleri

SONUÇLAR

Bu çalışma bir derin kazı sürecinde zeminde gelişen davranışı modellemeye yönelik geliştirilen iki adet yaklaşımı içermektedir. Bu yaklaşımlar literatürde yer alan detaylı bir veri yardımı ile bir derin kazı için uygulanmıştır. Kullanılan modeller ile zeminde farklı bölgelerde farklı günlerde inşaat faaliyetlerine paralel olarak gelişen davranışın anlaşılması amaçlanmıştır. Her bölge için Mohr birim deformasyon daireleri, birim deformasyon izleri, yatay toprak basıncı katsayıları ve uyanan mukavemet değerleri bulunarak zeminde göçen veya göçmeye yaklaşan bölgeler belirlenmiştir. Zeminin yapı ile sürekli etkileşim içinde olduğu ve inşaat aşamasında yapılan faaliyetlere paralel olarak deformasyon ve gerilme durumunun değiştiği gösterilmiştir. Geliştirilen yaklaşımlarla duvar arkasındaki zeminin değişik bölgelerinde davranış değişiklikleri anlamlı bir şekilde tespit edilebilmiştir.

Bu tür yöntemlerin geliştirilmesi arazideki gerçek zemin davranışını modellemek, zeminde oluşan göçme bölgelerini yakalamak ve buna bağlı olarak ekonomik ve güvenli tasarımlar yapmak için çok önemli ve gereklidir.

KAYNAKLAR

1. Finno, R. J, Atmatzidis, D., K, Perkins, S., B (1989), "Observed Performance of a Deep Excavation in Clay", Journal of Geotechnical Engineering Vol 115, No 8, ASCE, p. 1045-1064.
2. Finno, R. J, Nerby, S. M, (1989), "Saturated Clay Response During Braced Cut Construction", Journal of Geotechnical Engineering Vol 115, No 8, p. 1065-1084.
3. Kutu, S. (2005), Yatay Destek Sistemlerinde Zemin Yapı Etkileşiminin Aletsel Gözleme Verileri ile Değerlendirilmesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 129 sayfa.
4. Öztoprak, S., Çinicioğlu, S. F. (2005), "Soil Behaviour Through Field Instrumentation," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42, No. 2, p. 475-490.
5. Atkinson, J., H., (1981), Foundation and Slopes, Mc Graw-Hill Book Company, ISBN 0-07-084118-7
6. Zhang, J. M., Shamoto, Y., Tokimatsu, K., (1998), "Evaluation of Earth Pressure Under Any Lateral Deformation" Soils and Foundations, Vol. 38, No. 1, 15-33, Mar. 1998.

