

itüdergisi/d**mühendislik**

Cilt:5, Sayı:2, Kısım:2, 27-34

Nisan 2006

Kazıklı temellerin deprem performanslarının üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi

Ertuğrul ORDU*, **M. Tuğrul ÖZKAN***İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul*

Özet

Bu çalışmada; özellikle kayma modülleri arasında belirgin fark olan zemin tabakalarındaki zeminlerin doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi amacıyla deprem yükleri altındaki kazıklı temellerin doğrusal olmayan bir dinamik analiz işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın yardımıyla, deprem sarsıntıları sırasında kazıklarda meydana gelen gerilmelere, diğer yapısal ayrıntılar aynı kalırken, zemin şartlarında değişik koşulları temsil eden basitçe iki durum göz önünde bulundurularak, zemin tabakasının etkisinin çok belirgin olduğu gösterilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sayısal sonuçlar, zayıf zemin koşullarındaki kazık tasarımlarında, yerin deformasyon davranışının etkilerini yeterince göz önünde bulundurulmasına gereksinim duyulduğunu sergilemektedir.

Anahtar Kelimeler: *Sonlu elemanlar, kazık-zemin etkileşimi, kazıklı temeller, üç boyutlu, sismik davranış, kesme kuvveti, eğilme momenti.*

Three-Dimensional Finite Element analysis of the seismic behavior of pile foundations

Abstract

In this study a general nonlinear dynamic analysis procedure for pile foundations has been applied successfully to investigate the nonlinear behaviors of soils, being particularly large at interfaces soil layers which sharply differing shear module, under earthquake loads. Generally, long piles penetrating deep layered deposit, particularly when there is a sudden change in soil stiffness are likely to be exerted by large ground response forces. However, such as ground forces are termed simply as "ground response effects" in dynamic pile-soil interaction, which are generally neglected in the pile design practice. Investigations on damage to piles during the past earthquakes provide some basic information concerning the nature of failures in piles at locations with deep soil deposit under strong ground shaking. Remarkably significant instance of the damage is reported to have occurred at deeper parts along the pile, particularly in relatively longer piles. Evidently, the location of pile damage at the intermediate part in longer piles also tends to coincide with changes in soil layering, giving rise to stiffness contrast interface. By means of this study, considering two simple variations in soil condition, other structural details remaining the same, it is shown that the influence of soil layering on the stresses developed in piles during earthquake shaking can be very dominant. Numerical results obtained from this study show the need for adequate consideration of the ground deformation response effects in the pile design in relatively soil conditions.

Key Words: *Finite elements, pile-soil interaction, pile foundations, three dimensional, seismic behavior, shear force, bending moment.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ertuğrul ORDU. seymao@corlu.edu.tr; Tel: (282) 652 94 75.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Tabakalı zeminlerde kazıklı temellerin deprem etkisindeki doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 03.06.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 06.09.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Yapı yükleri; taşıma gücünün yetersizliği yanında çoğu kez oturma şartlarının sağlanamamasından dolayı, derin temel sistemi kullanılarak zemine aktarılmaktadır. Böylece yüzeydeki zayıf tabakalar geçilerek, derindeki taşıyıcı tabakalara ulaşılmakta ve bu anlamda kullanılan yapı elemanları, kazık olarak nitelendirilmektedir. Temel sistemi de adını kullandığı yapı elemanından almakta ve kazıklı temel olarak nitelendirilmektedir (Özkan ve Sağlamer, 1995).

Kazıklar ve kazıklı temeller çok eski zamanlardan beri kullanılmaktadır. İsviçre'nin neolitik insanının günümüzden 12.000 yıl önce sığ göl tabanlarında ahşap kazık çakarak üzerlerine barınak inşa ettikleri belirlenmiştir (Sowers, 1979).

Kazıklı temeller; düşey doğrultudaki yükler ile rüzgar, deprem ve benzeri üst yapıya etkileyen yanal yüklerin temel zeminine aktarılmasında kullanılmaktadır (Kulaç ve Durgunoğlu, 1992).

Genel anlamda, yanal yüklenmiş kazıklı temellerin davranışları, eksenel yüklenmiş kazıklı temellerin davranışlarından farklıdır. Zemin davranışının doğrusal olmaması sonucu kazıklarda büyük deformasyonlar oluşmaktadır. Bu davranışların değerlendirilmesinde, çok daha karmaşık zemin-yapı etkileşimi analizlerine ihtiyaç gösteren yanal deplasmanların ince duyarlılıkla tahmin edilmesi yoluna gidilmektedir.

Derin temeller, statik ve dinamik koşullar altında yanal yüklenmeye maruz kalabilmektedirler. Genelde statik yükleme; uzun açıklıklı köprüler ile iletim hatları gibi durumlarda kilit rol oynarken, dinamik yükleme; rüzgar, okyanus dalgaları veya deprem yükleri altındaki durumlarda, yapılar için önemlidir. Derin temellerin deprem altındaki davranışları, günümüzde ülkemiz açısından çok araştırılan bir konu olmakla beraber son zamanlarda Kocaeli, Düzce Depremleri gibi büyük sismik olaylar, araştırma çabalarını bu alana yönlendirmiştir.

Kuvvetli yer hareketlerinin, özellikle zayıf zemin koşullarında yapılan kazıklı temel sistemlerini önemli ölçüde etkilediği, yakın zamanlarda

meydana gelmiş Marmara gibi yıkıcı depremlerle gözlemlenen yapısal hasar ve aletsel ölçümlerce açıkça ortaya konulmuştur. Deprem sırasında oluşan yer hareketleri, yapılara etkileyen sismik kuvvetleri doğrudan etkilediği gibi, aynı zamanda zeminin malzeme olarak göçmesine ve zeminin taşıdığı yapının fonksiyonuna zarar verecek şekilde temel hareketlerine yol açabilmektedir. Bu nedenle, zemin tabakalarının davranışlarının ve bu tabakalar üzerinde bulunan yapılara etkilerinin incelenmesi önem kazanmaktadır.

Genelde, uzun kazıklarla derin zemin tabakaları geçilirken, ani değişen mukavemet ve rijitlikteki zemin tabakaları ile karşılaşabilmektedir (Karkee vd. 1998). Bilhassa kayma modülleri arasında önemli fark olan iki zemin tabakası sınırında, göreceli deformasyondan dolayı, kazığın tabaka geçişlerine karşı gelen noktalarında, kesme ve eğilme çatlakları ile plastik mafsallar oluşabilmektedir (Aydınöğlu vd. 2000).

Uygulamada pek bilinmeyen ve genellikle ihmal edilen kinematik kazık-zemin etkileşimi, kazıklarda büyük zorlanmalara neden olabilmektedir. Bu durum, kazıklı temel sistemlerinin tasarımında göz önüne alınması gerekli bir olgudur.

Genellikle deprem büyüklüğünü göz önüne almadan maksimum yatay zemin ivmesine göre bir sismik katsayı seçimine dayalı statik benzeşimli bir analiz, kısa süreli sismik kuvvetin sürekli etkilediği varsayımı nedeniyle bizlere fazla tutucu sonuçlar vermektedir (Wakai ve Ugai, 1997). Sismik tasarım için dinamik analizin çok yararlı olduğu bilinmektedir. Geoteknik mühendisliğinde sismik tasarım, sadece yapıyla ilgili olmayıp, bunun yanında hem temel, hem de temel zemini ile ilgilidir. Temel zemini, temel ve yapının oluşturduğu sistemin, dinamik analiz sırasında birlikte ele alınması uygun bir yaklaşım olacaktır (Kimura vd. 1997). Bu durumda, temel zemini ve yapının, doğrusal olmayan davranışlarının dikkate alındığı, zaman tanımlı bir analizde, tüm sistemi değerlendirmek oldukça güçtür. Büyük hesap yükü getirmesi, işlem hacminin fazla olması nedeniyle, hem bilgisayar programlama tekniği açısından, hem de belleğin ekonomik kullanılması açısından uygunluğu tar-

tıılmaktadır. Böyle bir durumda, kazıklı temel ile zemin arasındaki doğrusal olmayan etkileşimin uygun bir biçimde değerlendirilmesi de ayrıca önemlidir.

Bu çalışmada, bilinen yöntemlerdeki gelişmeler ile yeni çözümler üzerinde durulmuş ve zemin-kazık-yapı sistemini kapsayan bir analizin gerçekleştirilebilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Lusas sonlu elemanlar programı kullanılarak, deprem yükleri altında, zemin ve kazıklı temel arasındaki doğrusal olmayan bu etkileşimin dik-kate alınabilme olanağı kullanılmıştır.

Aşağıdaki bölümde, üst yapı-kazıklı temel-zemin sistemi için kullanılan model ve parametrelerin kısa bir tarifi yapılmaktadır.

Üst yapı-kazıklı temel-zemin modeli

Yapısal Özellikler

Analizlerde seçilen modeller, planda 18.0 m boyunda, kenar uzunluğu 1.0 m olan kare kesitli, 3.0 m ara mesafe ile yerleştirilmiş 4 adet betonarme kazığın bağlandığı 1.5 m kalınlığında planda 6.0 m x 6.0 m boyutlarında kazık başlığına oturan 6.0 m yüksekliğinde 1.5 m x 1.5 m kesitli bir ayağın üzerinde kütlesi 150 t olan 1.5 m x 1.5 m kesitli bir üst yapıdan oluşmaktadır (Şekil 1).

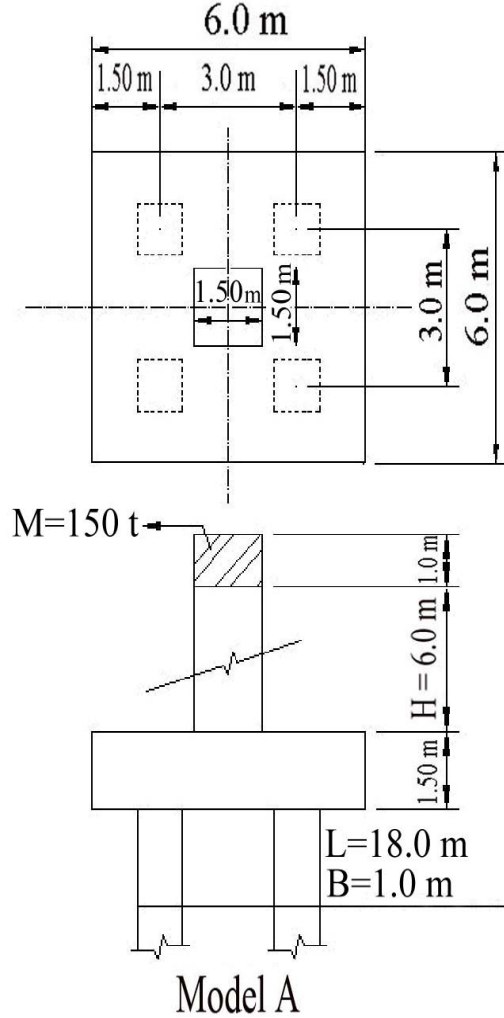
Malzeme modelleri ve parametreleri

Malzemedeki akma yüzeyi sınırları aşıldığı takdirde malzeme davranışının doğrusal olmayan esaslara göre şekillendiği Drucker-Prager elasto-plastik modeli, tüm zeminler için kullanılmıştır.

Tüm yapısal elemanlar, doğrusal sınırı aşmayan ve akma gerilmelerine yaklaşmayan, elastik malzemeler olarak modellenmiştir.

Zemin-yapı ara yüzeyini modellemede kullanılan ince kalınlıklı ara elemanların doğrusal olmayan analizlerde, çözümünü olanaksızlaştırmamasından dolayı, kazıklar ile zemin arasında ara elemanlar kullanılmamıştır.

Analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri ve parametreleri Tablo 1 ve 2’de özetlenmektedir.



Şekil 1. Üst yapı-kazıklı temel sistemi

Tablo 1. Analizlerde kullanılan zeminlerin malzeme özellikleri

Malzeme Cinsi	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Birim hacim ağırlığı (ton/m ³)	Poisson oranı	Kohezyon (kN/m ²)	İçsel sürtünme açısı (°)
Çok Gevşek Kum	11 000	16.68 (1.70)	0.35	-	28.5
Yumuşak-Orta Katı Kil	47 000	15.70 (1.60)	0.40	44	-
Ayrışmış Kayaç	922 000	23.54 (2.40)	0.20	200	30

Tablo 2. Analizlerde kullanılan yapısal malzeme özellikleri

Malzeme Cinsi	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Birim hacim ağırlığı (ton/m ³)	Poisson oranı
Üstyapı	6.50E+08	654.03 (66.67)	0.15
Ayak	3.00E+07	24.53 (2.50)	0.20
Kazık	2.50E+07	24.53 (2.50)	0.20
Radye	3.00E+07	24.53 (2.50)	0.20

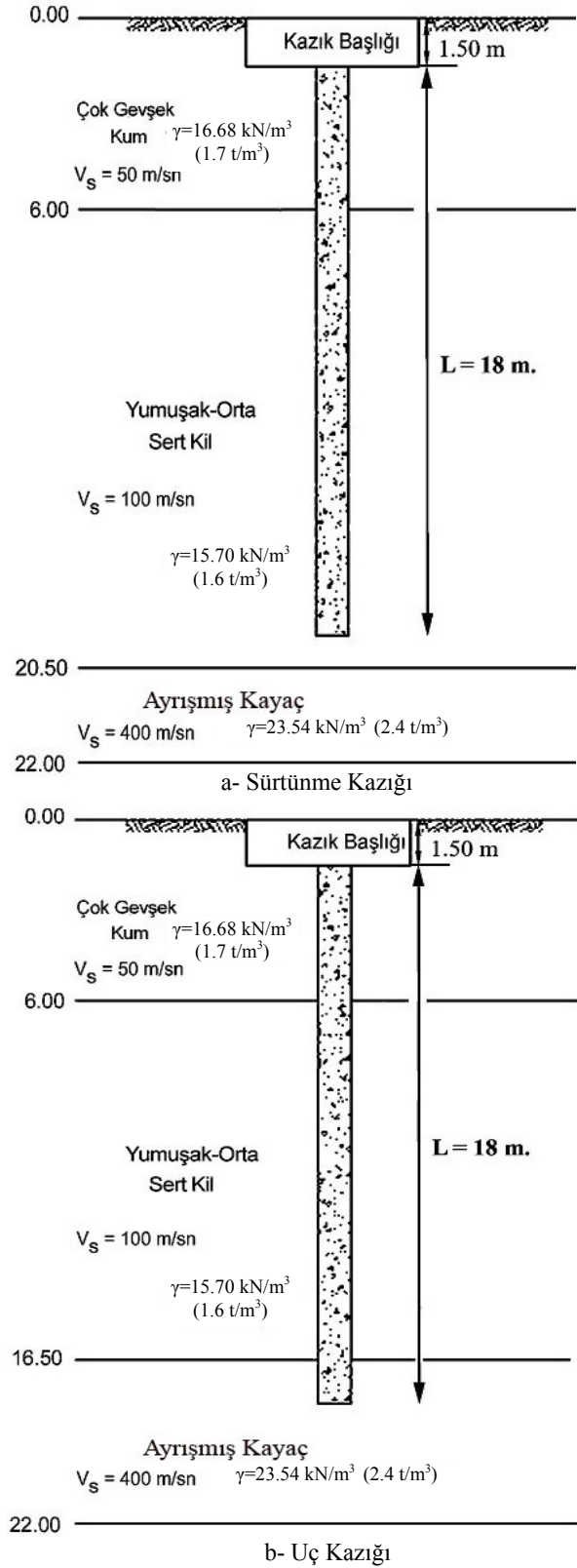
Zemin profili

Analizlerde, Şekil 2’de görüldüğü gibi 2 farklı zemin profili kullanılmıştır. Sürtünme kazığının temsil etmesi amacıyla ilk durumdaki (a) zemin profili seçilirken, ikinci durumdaki (b) profil yardımıyla da uç kazığı modellenmiştir.

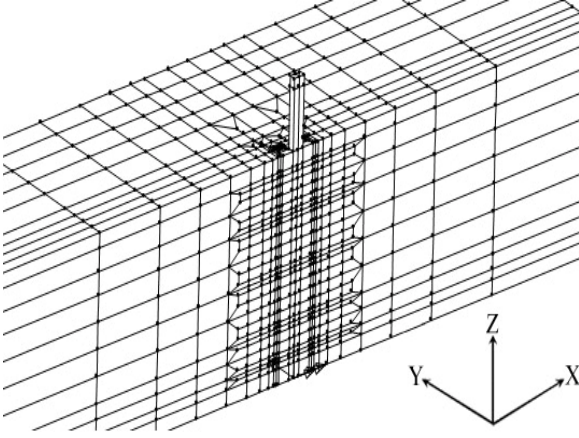
Temel zemini üç tabakadan oluşmaktadır. Sürtünme kazıklarında kullanılan zemin profili, yüzeyde 6.0 m kalınlıkta çok gevşek kum, bu tabakanın altında 14.5 m kalınlıkta yumuşak-orta sert kil tabakası ve tabanda 1.5 m kalınlığında ayrılmış kayaç tabakasından oluşurken, uç kazıklarının kullanıldığı zemin profilinde, yüzeyde 6.0 m kalınlıkta çok gevşek kum, bu tabakanın altında 12.5 m kalınlıkta yumuşak-orta sert kil tabakası ve tabanda 3.5 m kalınlığında ayrılmış kayaç yer almaktadır. Sürtünme kazığının uzunluğu, çok gevşek kum tabakasında 3.5 m olup yumuşak orta-sert kil içerisinde 14.5 m’dir. Uç kazığının uzunluğu, çok gevşek kum tabakasında 3.5 m, yumuşak orta-sert kil içerisinde 12.5 m ve ayrılmış kayaça 2.0 m girecek şekilde soketlenmektedir.

Sonlu elemanlar ağı

Mevcut simetrik durum kullanılarak, kazıklı temelin yarısı modellenmiştir (Şekil 3). Böylece eleman sayısı azaltılarak analizlerin ve buna bağlı olarak çözüm zamanı kısmen de olsa azaltılmıştır.



Şekil 2. Analizlerde yer alan zemin koşullarının detayları



Şekil 3. Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli

Gerçekleştirilen analizlerde kullanılan modellerde, toplam serbestlik derecesi 19548, düğüm noktası sayısı 24777 ve kullanılan eleman sayısı 5864'tür.

Sınır şartları

Dinamik analizlerde sonlu eleman sınırlarının belirlenmesi önemli sorunlardan birisidir. Sonlu eleman analizlerinde, kullanılan bilgisayar ve program kapasitesinden dolayı zemin yanal olarak istenildiği kadar geniş alınamaz. Zemin ortamı üst yapıya belirli bir uzaklıkta bir miktar hataya sebep olabilese de, kesilerek sınırlar oluşturulur. Yayılan dalgaların, bu zemin bölgesinin sınırlarından yansıyıp geri dönmelerinin önlenmesi gerekir. Ayrıca bu sınırlardaki hareketin "serbest alan"daki harekete benzemesi de istenmektedir.

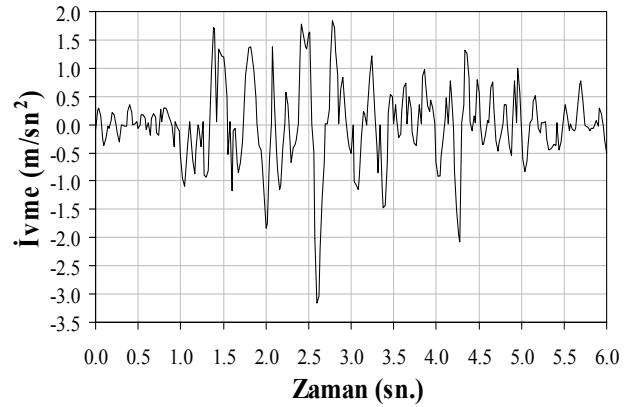
Analizlerde kullanılan modellerle ilgili sınırların belirlenmesinde, y doğrultusundaki genişlik kazık başlığı altındaki zemin kalınlığına eşit alınırken, x doğrultusundaki genişlik sınır etkisinin ortadan kaldırılması amacıyla, yapının her iki kenarından 200 m uzatılması gerekmiştir. Sadek ve Shahrour (2002) ve Zheng ve Takeda (1995) çalışmalarında benzer yaklaşımlar kullanılmış olup, Zheng ve Takeda'nın çalışmasında 12xtemel genişliği ve Sadek ve Shahrour'un çalışmasında ise 200xkazık çapı alınmıştır. Modellerden de görüleceği gibi, ağ (mesh), kazıklar etrafında daha sık ve sınırlara yaklaştıkça daha seyrek olarak sonlu eleman ağı oluşturulmuştur.

Deprem hareketi

Bu amaçla, 02.09.1971 tarihli San Fernando depreminin taban kayasındaki Golden Gate Park ivme kaydı (büyüklüğü 6.5, faya uzaklığı 30 km, en büyük yer ivmesi 0.316 g) seçilmiştir (Şekil 4).

Analizlerde ana kayaya uygulanacak deprem verisi, uygun frekans sınırları içerisinde filtrelenmiş ve temel çizgisi hataları (baseline errors) ortadan kaldırılmıştır. Bu düzeltmeler yapılarak elde edilen deprem verilerindeki kuvvetli kısımların 6 saniyelik bölümleri (toplam deprem süresince zaman adımları 0.02 sn. uygulanarak), analizlerde kullanılmıştır.

Deprem hareketi, tabandaki düğüm noktaları ile yanal sınırlara etkittirilmesi sonucu, x- doğrultusunda yanal hareket meydana gelmiştir.



Şekil 4 San Fernando depremi ivme grafiği

Yükleme durumları

Zeminin davranışı ile yapı-zemin sisteminin karşılıklı etkileşimlerinin irdelenmesi, sistematik olarak 3 aşamada ele alınmıştır:

- Statik Analiz,
- Özdeğer Analiz,
- Dinamik Analiz.

Statik analiz

Hazırlanan model, önce jeolojik yüklerin elde edilmesi için kendi ağırlığı ile yüklenmiştir. Bunun oluşturmada, sabit bünye yükü CBF (constant body force) özelliği kullanılmıştır. Buradan elde edilen gerilme değerleri, ağı oluşturan

elemanlara atanmıştır. Bu tip bir yükün tanımlanması, SSRE (rezidüel gerilme) komutu kullanılarak yapılmıştır. Bu atamalar yapılırken, zemin deformasyonları sıfırlanmakta, yalnızca zemin gerilmeleri elemanlara atanmaktadır.

Özdeğer analiz

Bir yapı deprem etkisinde rasgele titreşir. Bu titreşim, aslında harmonik olan modların birleşimidir. Bu modların analizi için bir özdeğer analizi gerekli olmaktadır. Sistemin özdeğer sayısı, sistemin serbestlik derecesine eşit olmaktadır. Bununla birlikte, bir yapının titreşimine ilk birkaç mod katkıda bulunmaktadır.

Titreşim frekansları ve karşı gelen mod şekillerinin hesaplanması bir karma Jacobian yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerekli sayıdaki özdeğerler ile bunlara bağlı öz vektörlerin bulunmasında, tüm gerekli öz parçaların hesaplanmasında bir iterasyon işleminden yararlanılmıştır.

Bu çalışmada, Rayleigh tipi bir sönüm uygulanmış olup yapısal elemanların sönüm sabiti % 5 ve zeminin sönüm sabiti % 10 seçilmiştir.

Yerin rijitliği olmasına rağmen, kazıklar ile ayaktaki malzemelerin doğrusal olmayan davranışları nedeniyle değişebilen viskoz matrisin, rijitlik matrisindeki değişikliklere rağmen değişmediği varsayımı yapılmıştır.

Özdeğer analizlerden; tüm sistemin yanında sadece zemin elemanlarının ve de sadece yapısal elemanların frekans ve periyotları ayrı ayrı bulunmuştur

Dinamik analiz

Yapı-zemin dinamik etkileşimi çözümlerinde yapı ve zemini içeren uygun modeli oluşturduktan sonra, sistemde dış yük olan deprem ivme kaydı için sistemin çözülmesi ve iç kuvvetler, yer değiştirmeler gibi mühendislikte kullanılan büyüklüklerin belirlenmesi gereklidir. Sistemin doğru olarak çözülmesi de en az modeli oluşturmak kadar güçtür.

Deprem gibi dinamik yük hareketine maruz kalan kazıklı radye-zemin alt sisteminin analizinde

dinamik denge eşitlikleri, matris formunda aşağıdaki biçimde yazılabilmektedir.

$$[M]\{\ddot{v}\}+[C]\{\dot{v}\}+[K]\{v\}=-[M]\{I\}\ddot{v}_0(t) \quad (1)$$

Burada;

$F(t)$: zamana-bağlı kuvvetler,

$\{\ddot{v}\}$, $\{\dot{v}\}$, $\{v\}$: ilgili nodlara göre ivme, hız ve yer değiştirmeler,

$[M]$, $[C]$, $[K]$: kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir.

Hareket denklemi, verilen başlangıç koşullarından itibaren artan zaman aralıkları için adım adım entegre edilmesi ve de hareketin başından sonuna kadar tüm anlardaki değerlerin bulunması esasına dayanan adım adım entegrasyon (doğrudan entegrasyon) tekniğiyle çözülmüştür. Bu yöntem ayrıca, sistem içerisinde doğrusal olmama özelliği ile gerçek fiziksel işlemleri yansıtmadaki yeteneğe de sahiptir. Bu çözüm tekniği ile deprem etkisi altında bulunan ortak sisteme ait yer değiştirmelerin taşıyıcı elemanlara ait kesit zorlarının, mod şekillerinin ve zemin gerilmelerinin zamana bağlı olarak çözümünün tek adımda hesabı amaçlanmıştır.

Doğrusal olmayan zaman tanımlı analizlerde, her bir zaman adımının başında, rijitlik matrisinin yeniden yapılandırıldığı uyarlanmış Newton-Raphson yaklaşımından yararlanılmıştır. Her bir zaman adımı içerisindeki iterasyonların, gerilmelerin yakınsaması uygun akma yüzyelerine ulaşıncaya kadar analiz yürütülmüştür.

Sönüm matrisinin kütle ve rijitlik matrislerinin doğrusal bir kombinasyonu şeklinde değerlendirildiği Rayleigh sönüm modeli, modeldeki elemanlara uygulanış olup. zaman entegrasyonu işlemi için parametre değerleri $\alpha=0.25$, $\beta=(1-\alpha^2)/4=0.25$, $\gamma=(1-2\alpha)/2=0.5$ olan Hilber-Hughes entegrasyon şeması kullanılmıştır. Nümerik zaman-adımlaması algoritmasında kullanılan zaman adımı, deprem ivme kayıtlarındaki zaman aralıkları“ 0.02 saniye ” seçilerek uygulanmıştır. İvmeler, 6 saniyelik bir zaman alanı içerisinde, taban kayasına üniform olarak 300 adımda uygulanmakta ve böylece sonlu eleman hesapla-

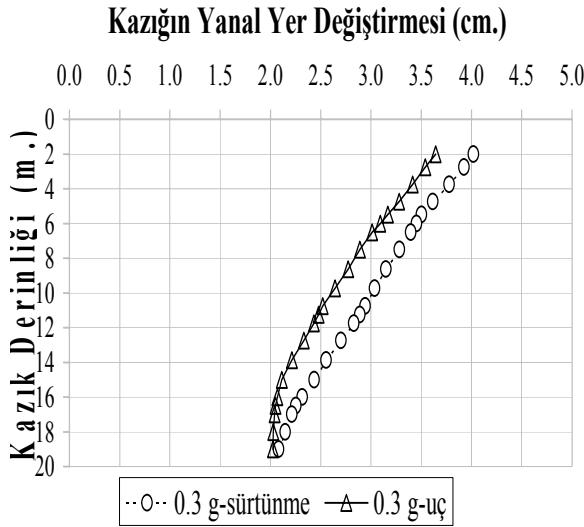
maları gerçekleştirilmektedir. Lusas Sonlu Elemanlar programıyla hazırlanan, üç boyutlu model üzerinde yapılan bir dinamik analiz yaklaşık 140 bilgisayar saatini gerektirmiştir.

Zamana bağlı grafiklerin çizilmesi

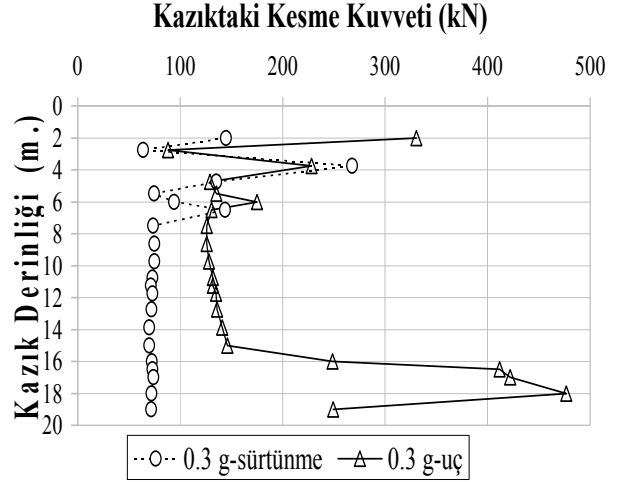
Analizlerde, sistemin rijitlik matrisi her iterasyonda yeniden yazılmıştır. Bir zaman adımını tamamlamak için, "artış" olarak adlandırılan çok sayıda iterasyon gerekmektedir. Genellikle, 1 ile 20 arasındaki iterasyon sayısında yakınsama güçlükleri nedeniyle bunda artma olabilmektedir. Çalışmamızda doğrusal olmayan çözüm içerisinde on beş iterasyon göz önüne alındığında sistemimiz yaklaşık 4500 kez çözülmüş olmaktadır. Ön hazırlık çalışmaları dışında, parametrik çıktı boyutu, her bir analiz için yaklaşık 4 GB'dır. Bütün bu çıktıları vermek hem imkansız hem de gereksizdir.

Bu yüzden, yer değiştirme, ivme ve gerilme grafikleri genel davranışın anlaşılması amacıyla zamana bağlı olarak çizilmiştir.

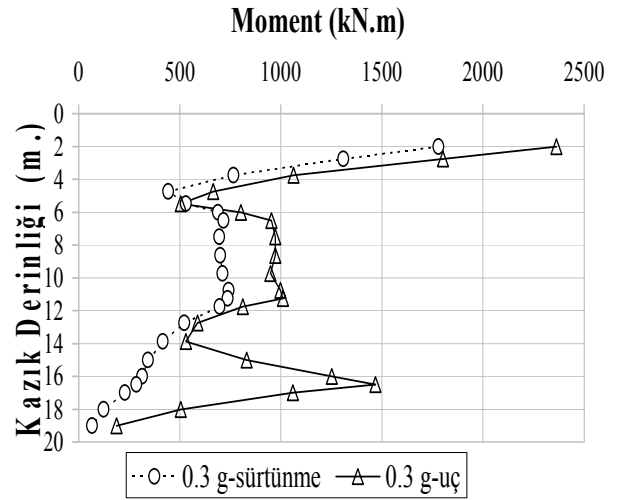
Üç boyutlu sonlu eleman analizinin sonuçları
Çalışmalardan elde edilen sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur. Kazıklı temeldeki kazıklarda elde edilen yer değiştirme profilleri Şekil 5'de, kesme kuvvetleri Şekil 6 ve moment diyagramları da Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 5. Kazıklardaki Yer Değiştirmeler



Şekil 6. Kazıklardaki, kazık boyunca kesme kuvveti dağılımları



Şekil 7. kazıklarda, kazık boyunca moment dağılımları

Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada; tabaka dayanımları arasında ani değişimler bulunan zeminlerde ön plana çıkan kinematik etkileşim problemi, sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Sistemi oluşturan zemin, kazıklı temel ve deprem karakteristikleri için değişik koşulları yansıtan parametreler kullanılmıştır.

Değişik zemin ve yapı koşullarını temsil eden bir model üzerinde, uç ve sürtünme kazıklarının

kullanıldığı iki farklı durum için 0.3 g büyüklüğündeki bir deprem kaydı kullanılarak analizler yapılmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen sayısal sonuçlar farklı katmanlardan oluşan zemin profillerinde deprem etkisindeki kazıklarda, kesme kuvvetleri ile momentlerin büyüklüğü ve dağılımının, zemin şartları ile deprem yüklerine bağlı olduğunu açıkça göstermektedir

Kaynaklar

- Aydinoğlu, M.N., Berilgen, M., ve Özeydin, K. (2000). Depremde kazık-zemin dinamik etkileşimi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8nci Ulusal Kongresi*, 2000, İTÜ, İstanbul, s. 427-436.
- Karkee, M.B., Sugimura, Y., Fujiwara, K. (1998). Design of piles considering the deformation response under the action of earthquake shaking, *Proc. UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, Menlo Park, Calif., Sep.22-23, 1-13*.
- Kimura, M., Natsukawa, K. ve Tanaka, A., (1997). Seismic evaluation of pile foundations, *Proc. 6th*

- Intern Sympos. On Numerical Models in Geomechanics.*, Canada, July 2-4, pp 545-548.
- Kulaç, F.H., Durgunoğlu, H.T., (1992). Yatay yüklü kazık analiz yöntemlerinin karşılaştırılması,” *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 3ncü Ulusal Kongresi*, 1992, İTÜ, İstanbul, s. 235-250.
- Özkan, M.T., Sağlamer, A., (1995). *Kazıklı Temeller*, Dünya İnşaat, No. 131/7, 35-38.
- Sadek, M. ve Shahrour, I. (2002). Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micropiles, *Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Mestat(ed.)2002*, Presses de l’ENPC/LCPC, Paris.
- Sowers, G.F. (1979). *Intoductory Soil Mechancs and Foundations: Geotechnical Engineering*, 4th Ed., MacMillan, New York.
- Wakai, A., Ugai, K. (1997). Three-dimensional seismic analysis of bridge-foundation-ground system, *Proc. 6th Intern Sympos. On Numerical Models in Geomechanics.*, Canada, July 2-4, pp 2177-2182.
- Zheng, J. ve Takeda, T. (1995). Effects of soil-structure interaction on seismic response of PC cable-stayed bridge, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 14, 427-437.