Yapı-Temel-Zemin Sismik Etkileşim Probleminin Adapazarı Bölgesi İçin Empedans Fonksiyonları Yardımıyla Analizi

Mustafa Yavuz ÇETİNKAYA[1], Erkan ÇELEBİ[2], Osman KIRTEL[3*]

[1]İnşaat Mühendisi, USA

[2]Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya

[3]Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya

(Geliş/Received : 20.06.2016; Kabul/Accepted : 09.07.2016)

ÖZ

Yumuşak zemin koşullarında meydana gelen depremler göstermiştir ki, zemin ortamının özellikleri üst yapının dinamik davranışını büyük oranda değiştirmektedir. Bu çalışmada, temel empedans fonksiyonları kullanılarak yapı-temel-zemin dinamik etkileşimi dikkate alınmıştır. Adapazarı bölgesi zemin özellikleri göz önünde bulundurularak köprü ayağı-zemin sisteminin, deprem etkisindeki davranışı temel sönümüne bağlı olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Empedans Fonksiyonları, Yapı-Zemin Etkileşimi, Temel Ortamının Sönümü.

Analysis of Seismic Soil-Foundation-Structure Interaction Problem for Adapazarı Region by Using Impedance Functions

ABSTRACT

Earthquakes occurring in the soft ground conditions show that the soil medium alters substantially the dynamic behavior of the structure. In this study, the impedance functions are used for considering the dynamic structure-foundation-soil interaction. The seismic response of bridge footing-soil system is investigated depending on the foundation damping by taking into consideration of soil characteristics for Adapazarı region.

Keywords: Impedance Functions, Soil-Structure Interaction, Foundation Damping.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sismik riskin yüksek olduğu bölgelerde yumuşak zemin koşullarında inşa edilecek olan önemli mühendislik yapılarının deprem performanslarını daha ayrıntılı incelemek ve depreme karşı tam güvenliği sağlayabilmek için yapı-zemin dinamik etkileşiminin problemin çözüm sürecine katılması zorunlu hale gelmektedir. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrası önemli can ve mal kaybına yol açan yapısal hasarların zeminin geoteknik özelliklerine bağlı dağılımı incelendiğinde, kalın alüvyol tabakalardan oluşan yumuşak zeminler üzerinde kurulmuş kentlerde yoğunlaştığı görülmektedir. Zemin ortamının şekil değiştirebilme özelliğinin hesap sürecine katılması, yapıların titreşim davranışının birbirine bağlı üç ortak sistemin dinamik etkileşimi altında değerlendirilmesini gerektirir. Bunlar üstyapı, yapı temeli ve temelin çevresini saran jeolojik zemin ortamıdır. Yapı-zemin birlikteliğinin sayısal araçlarla idealleştirilmesinde, doğrudan çözüm yöntemi [1-3] ve altsistem yaklaşımı [4-6] kullanılarak, sismik yüke bağlı olarak zemin şartlarının yapının dinamik tepkisi üzerindeki etkileri yönetici anahtar parametrelere bağlı incelenmektedir. Yapıların sismik performansının analizinde yerel zemin koşullarının etkisinin hesap ilkelerinde doğrudan yer alması hususunda yakın zamanda önemli birçok araştırma raporu tavsiye kararları yayınlamıştır [7-8].

Bu çalışmanın amacı, serbest yüzey deprem yer hareketiyle zorlanan yapı-zemin ortak sisteminin karşılıklı etkileşimini ve zeminin üstyapıların dinamik davranışı üzerindeki etkilerini altsistem yaklaşımıyla yapı temeli-zemin arakesitinde tanımlanan empedans fonksiyonlarına bağlı analiz etmek, değerlendirmek ve sonuçlarını tartışmak şeklinde özetlenebilir. Sayısal araştırmalar için, sonuçların sağlıklı ve doğru yorumlanabilmesi açısından üstyapı olarak seçilen köprü ayağı örneğine farklı büyüklüklerde deprem senaryoları uygulama yoluna gidilmiştir. Örnek modelin temel-zemin arakesitinde zemin ortamının şekil değiştirme özelliğini ve geometrik sönümünü temsil etmek üzere yaylar ve söndürücüler kullanılmıştır. Yapı-zemin dinamik etkileşim problem-lerinde temel ortamında oluşan ilave sönümün nasıl deprem yer hareketini değiştirdiğini, daha etkili ve kritik olduğunu göstermek için analizlerde

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta: okirtel@sakarya.edu.tr
Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 325-332

Adapazarı merke-zinde farklı noktalarda gerçekleştirilen geoteknik saha deneylerinden elde edilen zemin mekanik özellikleri genelleştirilerek kullanılmıştır.

2. ÇÖZÜM YÖNTEMİ (ANALYSIS METHOD)

2.1. Genel Bakış (Overview)

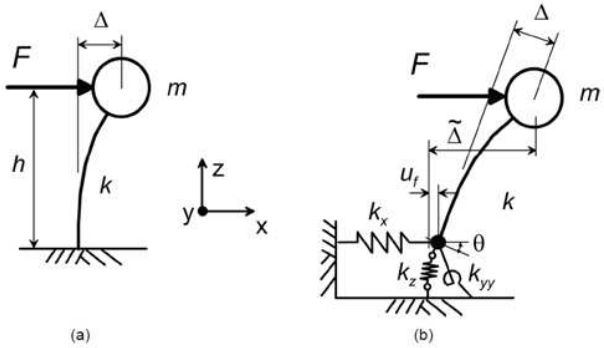
Yapı-temel-zemin ortamlarının birbirleriyle etkileşimleri arasında iki mekanizma yer alır:

- *Eylemsizlik Etkileşimi:* Titreşim etkisindeki bir yapıda burulma, eğilme momenti ve kesme kuvveti oluşur. Bu kuvvet ve momentler temel-zemin etkileşim arakesitin-de yerdeğiştirme ve dönme meydana getirir. Tüm yapı-sal sistemin şekil değiştirmesine önemli katkı sağlayan bu yerdeğiştirme ve momentler yalnız temel-zemin sisteminin şekil değiştirebilirliğinde mümkündür (Yapı periyodunun artması). Aynı zamanda bu yerdeğiştir-meler histerezis zemin sönümü ve geometrik sönüm vasıtasıyla enerji tüketimine yol açar ve bu durum sistemin sönümünü önemli derecede etkiler. Bu etkilerin yapısal ataletten kaynaklanmasından dolayı eylemsizlik etkileşimi olarak adlandırılır.
- *Kinematik Etkileşim: Zemin* içinde veya üzerinde rijit temel elemanlarının varlığı temel girdi hareketini ser-best zemin hareketinden farklılaştırmasına kinematik etkileşim denir. Kinematik etkiler serbest zemin hareketiyle ilişkili frekansa bağlı transfer fonksiyonları yardımıyla ifade edilir.

2.2. Yapı-Temel-Zemin Sisteminin Davranışı (Behavior of Structure-Foundation-Soil System)

Dış yük etkisinde yapı temelinin davranışı üzerine iki yaklaşım bulunmaktadır:

- *Rijit Taban Yaklaşımı:* Temelin oturduğu zemin ortamının sonsuz rijit kabul edilmesi durumunda üst yapının dış yük etkisi altında sadece ötelenme yaptığı gözlemlenir (Şekil 1a).
- *Esnek Taban Yaklaşımı:* Zemin ortamının şekil değiştirmesi söz konusu olduğunda temelin dönmesi ve ötelenmesi sonucunda üst yapının toplam yer değiştirmesinin değiştiği gözlemlenir (Şekil 1b).



Şekil 1. Üstyapının kuvvet etkisinde yaptığı deformasyonlar: (a) üstyapının zemine rijit bağlı durumu (b) üstyapının yapı temelinin esnekliğiyle yaptığı dönme ve ötelenmeler [7]. (Structure deformation under lateral forces: (a) fixed base (b) flexible base)

Şekil 1a'daki gibi rijitliği *k ve* kütlesi *m* olan rijit taban yapısının statik kuvvet etkisinde yaptığı yer değiştirme Δ:

$$\Delta = \frac{F}{k} \tag{1}$$

Yapı dinamiğinden bilinen yapının periyodu, *T*:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{2}$$

Şekil 1b deki gibi rijitliği *k* ve kütlesi *m* olan esnek taban yapısının statik kuvvet etkisinde yaptığı yer değiştirme $\tilde{\Delta}$:

$$\tilde{\Delta} = \frac{F}{k} + u_f + \theta.h \tag{3}$$

Bu durumda esnek taban yapısının periyodu, $\tilde{T}$:

$$\tilde{T} = (2\pi)\sqrt{\frac{m}{k} + \frac{m}{k_x} + \frac{mh^2}{k_{yy}}} \tag{4}$$

Denklem (4) ve (2) birbirine oranlandığında:

$$\frac{\tilde{T}}{T} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_x} + \frac{kh^2}{k_{yy}}} \tag{5}$$

Burada, u_f temelin yatay yerdeğiştirmesini, θ temelin dönmesini, k_x temel ortamının yanal ötelenme rijitliğini ve k_{yy} ise temel ortamının dönme rijitliğini ifade etmektedir. Denklem (5); esnek taban yapısının rijit taban yapısına göre periyod oranını gösteren bir ifadedir [9]. Yapı-zemin etkileşimini dolayısıyla $\tilde{T}/T$ 'yi kontrol eden anahtar parametreler aşağıda verilmiştir [10,11].

$$\frac{h}{V_s T},\quad \frac{h}{B},\quad \frac{B}{L},\quad \frac{m}{\rho_s 4BLh},\quad \text{ve}\ \nu \tag{6}$$

Burada *h* modal yapı yükseliğidir, *B* ve *L* sırasıyla temel yarı genişliği ve temel yarı uzunluğudur, ρ_s zemin birim hacim kütlesi, ν zeminin Poisson oranı, h/B yapı modal yüksekliğinin temel yarı genişliğine oranı, B/L temel yarı genişliğinin temel yarı uzunluğa oranı, $m/\rho_s 4BLh$ yapı modal yüksekliğine eşit bir derinliğe uzanan bir hacimde üst yapının kütlesinin zeminin kütlesine oranıdır. Kütle oranının etkisi küçüktür ve 0.1-0.2 arasında alınır [12]. $h/(V_s T)$ yapının zemine rijitlik oranını temsil eder. $h/(V_s T)$ oranı çerçeve yapılar için 0.1 den daha azdır. Perde duvar ve çaprazlı yapılar için yaklaşık olarak 0.1 ve 0.5 arasında değişmektedir [13].

2.3. Temel Sönümü (Foundation Damping)

dış yük etkisindeki esnek tabanlı bir yapıda artan periyod oranına ek olarak temel-zemin etkileşimiyle ortaya çıkan bir sönüm meydana gelir ve bu sönüme temel sönümü adı verilir β_f. Temel sönümü iki

parçadan oluşur (1) zeminin birim şekil değiştirmesine bağlı olarak meydana gelen sönüm katkısı (histerezis sönüm) ve (2) zemin ortamının sınırsızlığı nedeniyle enerji kaybına eşdeğer anlamda karşı gelen fiktif zemin sönümü diğer bir adıyla geometrik sönümdür.

Temel sönümünün tanımlanması için geliştirilen birçok analitik yaklaşımdan bir tanesi de Wolf'un önerdiği formülasyondur [14]. Bu yaklaşımda;

- Temel rijitlik terimlerinin frekansa bağımlı olmadığı
- Temel geometrik sönümünün doğrusal viskoz olduğu

kabullerine göre sönümü hesaplar.

$$\beta_f = \left[\frac{\left(\tilde{T}/T\right)^{n_s} - 1}{\left(\tilde{T}/T\right)^{n_s}}\right]\beta_s + \frac{1}{\left(\tilde{T}/T_x\right)^{n_x}}\beta_x + \frac{1}{\left(\tilde{T}/T_{yy}\right)^{n_{yy}}}\beta_{yy} \tag{7}$$

Burada β_s zemin histerezis sönümü, β_x ve β_{yy} ötelenme ve dönme titreşim modları için geometrik sönümdür. T_x ve T_{yy} fiktif titreşim periyodlarıdır. Eğer titreşim kaynağı sadece ötelenme ve dönme yapıyorsa fiktif titreşim periyodları;

$$T_x = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k_x}}\ ,\ T_{yy} = 2\pi\sqrt{\frac{mh^2}{k_{yy}}} \tag{8}$$

formülleriyle hesaplanır. Denklem (7)'de kullanılan n_s, n_x, n_{yy} katsayılarının 2 alınması önerilir [15]. Hesap edilen temel sönümü β_f'e üstyapının sönümünün eklenmesiyle yapı-temel-zemin sisteminin sönümü;

$$\beta_0 = \beta_f + \frac{1}{\left(\tilde{T}/T\right)^{n}}\beta_i \tag{9}$$

elde edilir. Burada β_i tipik yapısal sistemler için genellikle %5 alınan rijit taban yapı sönümüdür. Denklem (9)'da $\left(\tilde{T}/T\right)^{n}$ ifadesinde *n,* doğrusal viskoz yapı sönümü için 3 aksi durumlar için 2 alınır (örneğin histerezis sönüm) [15].

2.4. Dikdörtgen Yüzeysel Bir Temelin Empedansı için Teorik Model (Theoretical Model for Rectangular Surface Foundation Impedance)

Empedans fonksiyonları temel-zemin etkileşiminin frekansa bağlı sönüm ve rijitlik karakterlerini temsil eder. Klasik çözümler kompleks değerli empedans fonksiyonu için şu şekilde yazılabilir [16,17]:

$$\bar{k}_j = k_j + i\omega c_j \tag{10}$$

Burada $\bar{k}_j$ kompleks değerli empedans fonksiyonu,

j ise ötelenme ve dönme modlarını belirtir. k_j ve c_j sırasıyla temel dinamik rijitliği ve temel-zemin etkileşimiyle ilgili sönümü temsil eder. Denklem (10) için alternatif bir form;

$$\bar{k}_j = k_j\left(1 + 2i\beta_j\right) \tag{11}$$

ifadesi ile verilir. Burada;

$$\beta_j = \frac{\omega c_j}{2k_j} \tag{12}$$

denklemi ile elde edilir. c_j yerine β_j alınmasının avantajı, yapı-temel-zemin sisteminin rezonans frekansının dikkate alınabilmesidir [18].

Elastik bir yarı-uzaya oturan dikdörtgen rijit temellerin empedans fonksiyonlarının hesabı için ampirik bağıntılar literatürde sunulmuştur [5]. Yüzeysel dikdörtgen temelin geometrisi Şekil 2'de verilmiştir. Denklem (11)'de j indisi *x, y, z* ekseni boyunca ötelenme rijitliğini ve bu eksenler etrafındaki dönme rijitliklerini ise *xx, yy, zz* olarak tanımlar. Sönüm çözümleri ayrıca elde edilir. Dinamik rijitlik (k_j) temel boyutunun, zemin kayma modülünün *G*, zemin Poisson oranının ν ve dinamik düzeltme katsayısı α_j'nin bir fonksiyonudur.

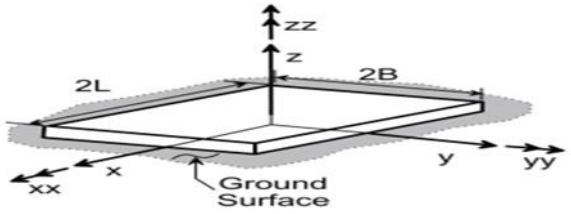
$$k_j = K_j \text{ x } \alpha_j \tag{13}$$

$$K_j = GB^m f\left(B/L, \nu\right),\ \ \alpha_j = \alpha_j\left(B/L, a_0\right) \tag{14}$$

Burada K_j, j modu için frekanstan bağımsız temel statik rijitliğidir. Ötelenme ve dönme modu için sırasıyla m değerleri 1 ve 3 alınmaktadır. Statik rijitliğin dinamik düzeltme katsayısı α_j boyutsuz frekans parametresi a_0'a bağlıdır.

$$a_0 = \frac{\omega B}{V_s} \tag{15}$$

Zaman tanım alanı analizi için, a_0'a bağlı olan temel yay ve sönüm katsayıları için tek bir açısal frekans ω seçilir. Bu ω seçilirken esnek tabanlı yapının baskın tepkisinin oluşacağı andaki açısal frekansı $\bar{\omega}$ kullanılabilir [7].



Şekil 2. Dikdörtgen yüzeysel temel geometrisi [7]. (Figure 2. Foundation geometry)

3. ADAPAZARI ZEMİN YAPISI VE DEPREM SENARYOLARI (SOIL PROPERTIES OF ADAPAZARI REGION AND EARTHQUAKE SCENARIOS)

3.1. Adapazarı Zemin Yapısı (Soil Properties of Adapazarı)

Temel-zemin arakesitinde tanımlanan dinamik rijitlik fonksiyonlarında zemin ortamı 3 parametre ile ele alınmaktadır. Bu 3 parametre zemin ortamının; (ρ), birim hacim kütlesi [t/m^3], (V_s) kayma dalga hızı [m/s] ve (ν), Poisson oranı [-] dır. Bilindiği üzere bir bölgedeki zemin özellikleri o bölgede yapılacak olan arazi deneyleriyle belirlenir. Adapazarı bölgesi için bölge merkezinde farklı noktalarda 1999 Kocaeli depremi sonrası yapılan SPT ve CPT deneyleri sonucunda, ilgili 3 parametre elde edilmiştir [19]. Analizlerde Adapazarı bölgesi için 11 farklı noktada yapılan deneylerin yerleri Şekil 3'de, çalışmalar sonucunda elde edilen zemin özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

3.2. Deprem Senaryoları (Earthquake Scenarios)

Herhangi bir deprem ivme kaydının üstyapıya etkisi araştırılmak istenildiğinde; deprem ivme kaydının kaydedildiği yerdeki zemin özellikleri ile üstyapının oturduğu zemin özelliklerinin benzer olması gerekmektedir. Adapazarı bölgesinde Çizelge 1. de verilen zemin özelliklerinde bir deprem ivme kaydı mevcut değildir. Bu sebeple Adapazarı zemin özelliklerine yakın Adapazarı bölgesi dışında kaydedilmiş olan deprem ivme kayıtları kullanılmıştır. Deprem ivme kayıtlarının bulunmasında kuvvetli yer



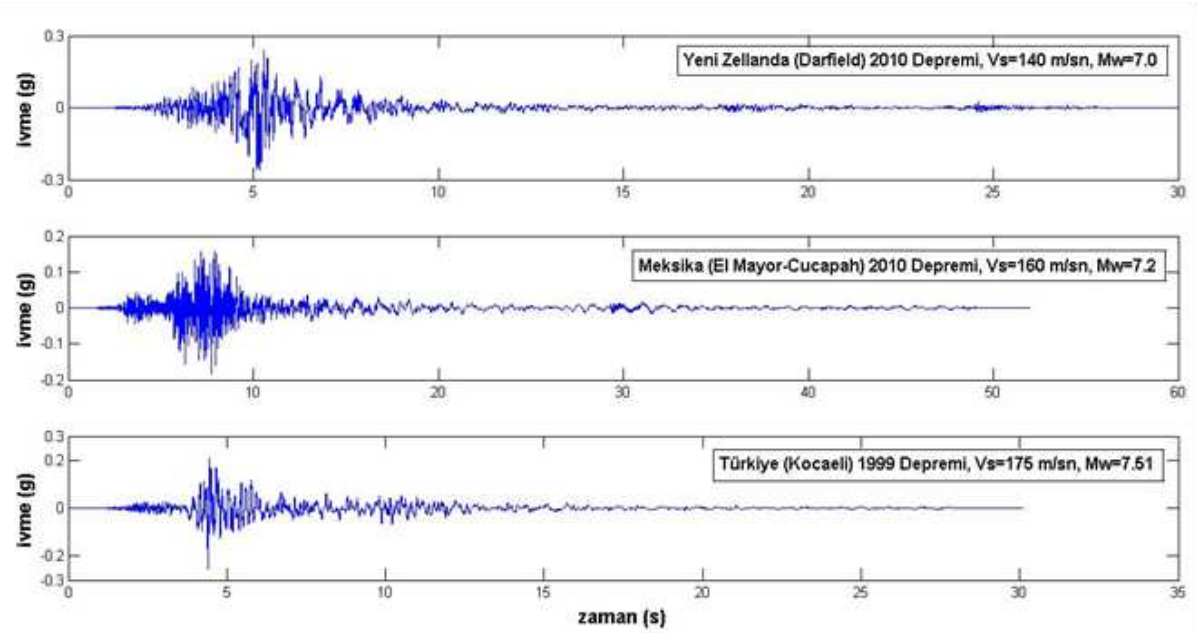
Şekil 3. Zemin özellikleri için deney yapılan noktalar [20]. (Figure 3. Test site for soil properties)

Çizelge 1. Saha deneylerinden elde edilen geoteknik parametreler [19]. (Geotechnical parameters obtained from site investigations)

Deney Bölgesi	$\rho\left[t/m^3\right]$	$V_s\left[m/s\right]$	ν[-]
Adapazarı_A	2	85	0.4984
Adapazarı_B	2	185	0.4923
Adapazarı_C1	2	180	0.4927
Adapazarı_C2	2	155	0.4946
Adapazarı_D	2	145	0.4953
Adapazarı_G	2	120	0.4968
Adapazarı_J	2	135	0.4959
Adapazarı_1-11	2	140	0.4956
Adapazarı_1-24	2	150	0.4949
Adapazarı_1-41	2	170	0.4935
Adapazarı_1-42	2	135	0.4959

hareketi veri tabanından faydalanılmıştır [21]. Veri tabanı arama motorunda bölge zemininin kayma dalga hızı aralığı $V_s = 85\text{-}185\,(\text{m/s})$, bölgedeki etkin fay tipi ve istenilen deprem büyüklüğü (moment magnitude) aralığı girilerek uygun 3 ivme kaydı seçilmiştir. Seçilen ivme kayıtları ile ilgili özellikler şekil 4. de verilmiştir.

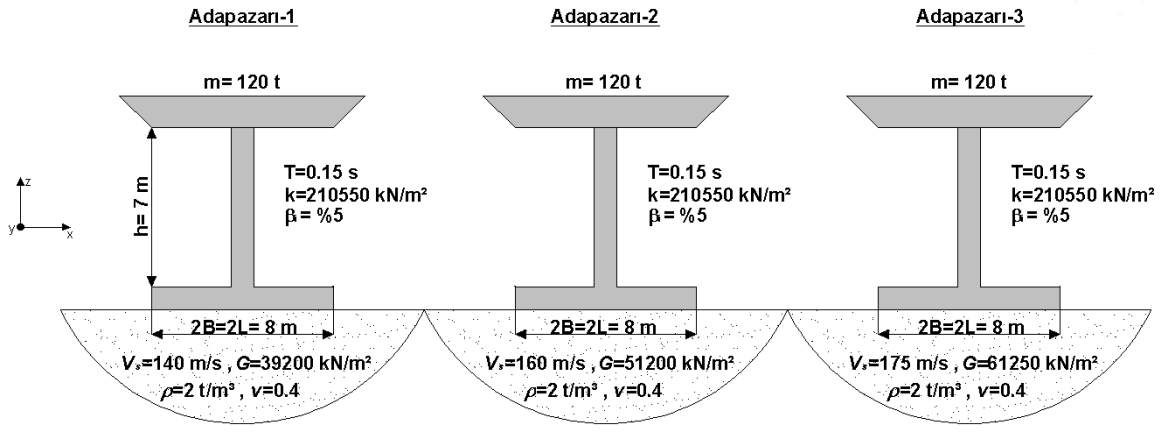
çizelgelerde daha iyi ifade edilebilmesi açısından Yeni Zellanda (Darfield) depremi için Adapazarı-1, Meksika (El Mayor-Cucapah) depremi için Adapazarı-2 ve Türkiye (Kocaeli) depremi için Adapazarı-3 zemin bölgesi olarak adlandırılmıştır. Yapılan bu adlandırmalar ve köprü ayağı modeli Şekil 5. de verilmiştir. Köprü ayağı modelinde dikkate alınan temel



Şekil 4. Kullanılan depremlere ait ivme-zaman ilişkiler (Acceleration time histories for applied earthquakes)

4. SAYISAL UYGULAMA (NUMERICAL APPLICATION)

Bu bölümde ele alınan bir köprü ayağı modeli Adapazarı zemin yapısına uygun 3 farklı zemin bölgesinde yapı-temel-zemin ortamlarının birbirleriyle etkileşimi sonucunda artan periyod ve esnek tabanlı yapının sönüm değerleri hesap edilmiştir. Daha öncede bahsedildiği üzere 3 depremin kaydedildiği istasyonların zemin özellikleri bakımından Adapazarı zemin yapısına uygunluğu ortaya konulmuştur, sonuçların karşılaştırılmalı olarak verileceği tipi dikdörtgen yüzeysel temel olmuştur. Kullanılan temelin gömülü olmaması, dikkate alınması gereken kinematik etkilerin ihmal edilebilecek seviyelere getirdiğinden, bu çalışmada kinematik etkileşim göz önünde bulundurulmamıştır. Kinematik etkiler ihmal edildiğinden dolayı Adapazarı zeminine uygun olan ivme kayıtları temel girdi hareketi olarak kullanılabilmiştir. Periyod oranı ve temel sönümü denklemleri içerisinde yer alan değişkenlerin hesabı için literatürde dikdörtgen yüzeysel temeller için tanımlanmış ampirik bağıntılar kullanılmış ve bu



Şekil 5. Üstyapı, temel geometrisi ve zemine ait özellikler (Properties of structure, foundation geometry and soil)

	Adapazarı-1	Adapazarı-2	Adapazarı-3
$T(s)$	0.150	0.150	0.150
$\tilde{T}(s)$	0.203	0.193	0.186
$\frac{\tilde{T}}{T}$	1.36	1.28	1.24
$\beta_s(\%)$	6.41	4.85	3.96

verilmiştir. Çizelge 3. de elde edilen değerlerin belirlenen depremler için davranış spektrumlarında gösterimi Şekil 6-9 ve taban kesme kuvvetine etkileri Çizelge 4-6 da verilmiştir.

Çizelge 3. Farklı zemin koşularının yapı-zemin ortak sisteminin dinamik parametreleri üzerindeki etkileri (The effect of different soil conditions on dynamic parameters of soil-structure coupled system)

Çizelge2. Dikdörtgen yüzeysel bir temelin empedans fonksiyonları ve geometrik sönüm denklemleri [5]. (Impedance function for rectangular surface function and radiation damping)

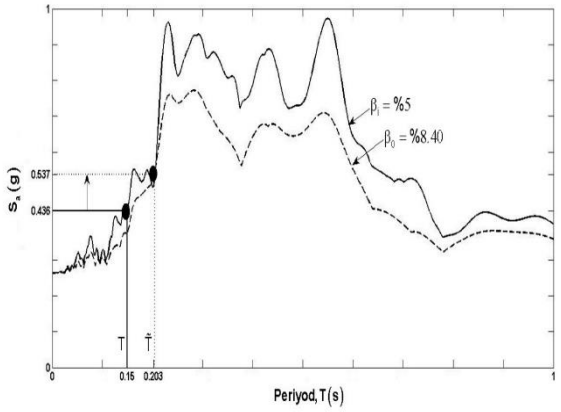
	***x* ekseni boyunca ötelenme**	***y* ekseni etrafında dönme**
Statik rijitlik	$K_x = \frac{GB}{2-\nu}\left[6.8\left(\frac{L}{B}\right)^{0.65} + 2.4\right]$	$K_{yy} = \frac{GB^3}{1-\nu}\left[3.73\left(\frac{L}{B}\right)^{2.4} + 0.27\right]$
Dinamik düzeltme katsayısı	$\alpha_x = 1.0$	$\alpha_{yy} = 1.0 - \left[\frac{0.55a_0^{\,2}}{\left(0.6 + \frac{1.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^{\,2}}\right]$
Geometrik sönüm	$\beta_x = \left[\frac{4(L/B)}{(K_x/GB)}\right]\left[\frac{a_0}{2\alpha_x}\right]$	$\beta_{yy} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B)^3\, a_0^{\,2}}{\left(\frac{K_{yy}}{GB^3}\right)\left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)}\right) + a_0^{\,2}\right]}\right]\left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}}\right]$
Not:	Burada $\psi = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}$; $\psi \le 2.5$, L= temel yarı uzunluğu, B= temel yarı genişliği, $a_0 = \frac{\omega B}{V_s}$	

bağıntılar Çizelge 2'de verilmiştir [5]. Sayısal uygulamanın çözüm sürecinde üstyapı-temel ve zeminin doğrusal davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Çizelge 1'de verilen zemin özelliklerinde histerezis zemin sönümü (β_s) % 4.5 - 6 aralığında değişmektedir [20]. Bu aralıktaki β_s değerlerinin temel sönümü (β_f) hesabında ciddi bir katkısı olmadığından, problemin çözümünde β_s =0 alınarak β_f değerleri hesaplanmıştır.

Sayısal uygulama için çözüm aşamaları kısaca özetlenecek olursa:

- $\frac{\tilde{T}}{T}$ ifadesinin hesabı için temel-zemin arakesitinde tanımlanan statik rijitlik terimlerinin her bir titreşim modu için elde edilmesi.
- Yapı-zemin ortak sisteminin yani esnek tabanlı yapının en büyük tepki vereceği açısal frekansa göre temel sönümünün hesabı.
- Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı sisteminin toplam sönümünün bulunması.
- Sönümdeki değişim ve periyodun artmasından ilişkili elde edilen spektral ivme üzerinde yapı-zemin etkileşim etkilerinin gösterilmesi.

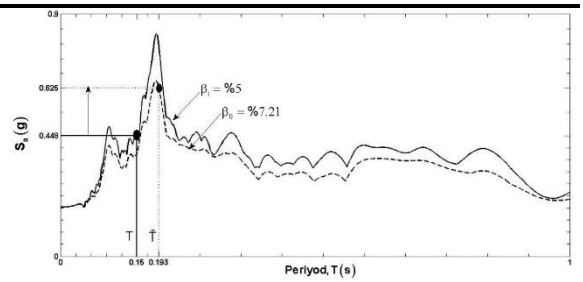
Verilen denklemler ve yapılan kabuller ışığında temel yapısının bu üç zemin bölgesi için periyod ve sönüm değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler rijit tabanlı yapı değerleri ile birlikte Çizelge 3. de



Şekil 6. Adapazarı-1 bölgesi için yapı-zemin etkileşiminin hesaba katıldığı problemde Darfield (2010) depremi için davranış spektrumu (Earthquake response spectra Darfield (2010) including SSI effect for Adapazari-1 region)

Çizelge 4. Köprü ayağı modelinin Adapazarı-1 zemin bölgesinde rijit veya esnek taban kabulüyle inşa edilmesi durumunda hesaplanan taban kesme kuvveti (Base shear force computed bridge pier on Adapazari-1 region in the case of for rigid and flexible base)

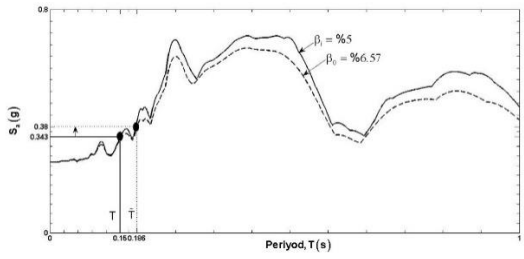
	Taban Kesme Kuvveti (V) $(\mathbf{kN};T,\beta_0)$	**Taban Kesme Kuvveti** $(\tilde{V})$ $(\mathbf{kN};\tilde{T},\beta_0)$	**Taban Kesme Kuvvetindeki artış (%)**
Adapazarı-1	52.4	64.4	%23



Şekil 7. Adapazarı-2 bölgesi için yapı-zemin etkileşiminin hesaba katıldığı problemde El-Mayor Cucapah (2010) depremi için davranış spektrumu (Earthquake response spectra El-Mayor Cucapah (2010) including SSI effect for Adapazari-2 region)

Çizelge 5. Köprü ayağı modelinin Adapazarı-2 zemin bölgesinde rijit veya esnek taban kabulüyle inşa edilmesi durumunda hesaplanan taban kesme kuvveti (Base shear force computed bridge pier on Adapazari-2 region in the case of for rigid and flexible base)

	Taban Kesme Kuvveti (V) $(\mathbf{kN};T,\beta_0)$	**Taban Kesme Kuvveti** $(\tilde{V})$ $(\mathbf{kN};\tilde{T},\beta_0)$	**Taban Kesme Kuvvetindeki artış (%)**
Adapazarı-2	53.7	75	%40



Şekil 8. Adapazarı-3 bölgesi için yapı-zemin etkileşiminin hesaba katıldığı problemde Kocaeli (1999) depremi için davranış spektrumu (Earthquake response spectra Kocaeli (2010) including SSI effect for Adapazari-3 region)

Çizelge 6. Köprü ayağı modelinin Adapazarı-3 zemin bölgesinde rijit veya esnek taban kabulüyle inşa edilmesi durumunda hesaplanan taban kesme kuvveti(Base shear force computed bridge pier on Adapazari-3 region in the case of for rigid and flexible base)

	Taban Kesme Kuvveti (V) $(\mathbf{kN};T,\beta_0)$	**Taban Kesme Kuvveti** $(\tilde{V})$ $(\mathbf{kN};\tilde{T},\beta_0)$	**Taban Kesme Kuvvetindeki artış (%)**
Adapazarı-3	41.2	45.6	%10

5. SONUÇLAR (RESULTS)

Yumuşak zemin koşullarında inşa edilen bir yapının periyod ve sönüm değerleri yapı-temel-zemin etkileşiminden dolayı, üstyapının dinamik davranışını önemli derecede etkileyecek şekilde artmaktadır. Periyodu ve sönüm değerleri değişen yapı sisteminde dikkate alınacak tasarım kuvveti, yapının zemine rijit bağlı olması durumuna göre (yapı-zemin etkileşimsiz durum) % 40 a kadar artmıştır. Yapılan araştırmalarda özellikle bu değişimlerin zayıf zemin üzerine konumlanmış düşük periyoda sahip yapılarda ciddi boyutlara ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu yüzden binaların tasarım hesaplarında kullanılan davranış spektrum eğrilerinin bu etkileri göz önünde bulundurularak düzenlenmesi ve bu şekilde kullanılması önerilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1]. Celebi, E., Goktepe, F., ve Karahan, N., ‘’Non-Linear Finite Element Analysis for Prediction of Seismic Response of Buildings Considering Soil-Structure Interaction’’, ***Natural Hazards and Earth System Scıences*****,** 12: 3495-3505, (2012).

[2]. Lida, M., ‘’Three Dimensional Non-Linear Soil Buding İnteraction Analysis in Lakebed Zone of Mexico City During the Hypothetical Guerro Earthquake’’, ***Earthquake Engineering and Structural Dynamics*****,** 27: 1483-1502, (1998).

[3]. Halabian, A.M., and Naggar, M.H.E., ‘’Effect of Non Linear Soil-Structure Interaction on Seiscmic Response of Tall Slender Structures’’, ***Soil Dynamics and Earthquake Engineering*****,** 22: 639-658, (2002).

[4]. Çelebi, E., Fırat, S., Çankaya, İ., ‘’Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları’’, ***İmo Teknik Dergi*****,** 3827-3849, Yazı 252, Ankara, Türkiye, (2006).

[5]. Pais, A., and Kausel, E., “Approximate Formulas for Dynamic Stiffnesses of Rigid Foundations,” ***Soil Dynamics and Earthquake Engineering*****,** 7(4): 213-227, (1988).

[6]. Mylonakis, G., and Gazetas, G., “Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental,” ***Journal of Earthquake Engineering*****,** 4: 377-401, (2000).

[7]. NIST GCR 12-917-21, NEHRP Consultants Joint Venture; ''Soil-Structure Interaction for Building Structures'' ,NIST GCR 12-917-21, U.S. Department of Commerce National Institute of Standards and Technology, (2012).

[8]. FEMA, ''Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures'', FEMA 440, prepared by the Applied Technology Council for Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C (2005).

[9]. Veletsos, A.S., and Meek, J.W., "Dynamic Behavior of Building-Foundation Systems," ***Earthquake Engineering and Structural Dynamics*****,** 3: 121-138, (1974).

[10]. Veletsos, A.S., and Nair, V.V., "Seismic Interaction of Structures on Hysteretic Foundations," ***Journal of Structural Engineering*****,** 101: 109-129, (1975).

[11]. Bielak, J., "Dynamic Behavior of Structures With Embedded Foundations," ***Earthquake Engineering and Structural Dynamics*****,** 3: 259-274, (1975).

[12]. Veletsos, A. S., ''Dynamics of Soil-Foundation Systems'', in W.J. Hall (ed.), *Structural and Geotechnical Mechanics*, ***Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs,*** New Jersey, 333-361, (1977).

[13]. Stewart, J.P., Fenves, G.L., and Seed, R.B., "Seismic Soil-Structure Interaction in Buildings II: Empirical Findings," ***Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*****,** 125, 38-48, (1999).

[14]. Wolf, J.P., ''Dynamic Soil-Structure Interaction'', ***Prentice-Hall, Upper Saddle River,*** New Jersey, (1985).

[15]. Givens, M.J.,''Dynamic Soil-Structure Interaction of Instrumented Buildings and Test Structures*''*, ***Ph.D. Dissertation,*** Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, California (2013), (Advisor: Jonathan P. Stewart).

[16]. Luco, J.E., and Westmann, R.A., "Dynamic response of circular footings," **Journal of Engineering Mechanics,** 97(5): 1381-1395, (1971).

[17]. Veletsos, A.S., and Wei, Y.T., "Lateral and rocking vibrations of footings," ***Journal of Soil Mechanics and Foundations Division,*** 97(9): 1227-1248, (1971).

[18]. Clough, R.W., and Penzien, J.,''Dynamics of Structures'', ***McGraw Hill,*** NewYork (1993).

[19]. Youd, T.L., Bray, J.D., Önalp, A., Durgunoğlu, H.T., Stewart, J., ***''CPT Liquefaction Investigations, Adapazari, Turkey",*** PEER, USA (2000).

[20]. Kırtel, O., ''Doğrusal Olmayan Zemin Ortamında Rijit Şerit Temeller için dinamik empedans fonksiyonları'' , ***Doktora Tezi,*** Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Anabilim Dalı, Sakarya, Türkiye (2013), (Danışman: E. Çelebi).

[21]. http://Peer.berkeley.edu