

2300 Metre Uzunluğundaki Bolu Viyadüğünün Dizayn Felsefesi ve Deprem Davranışı

Ç. Yılmaz

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Ankara 06531, Türkiye*

A. Türer

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Ankara 06531, Türkiye*

ÖZET: 2300 metre uzunluğunda, 58 ve 59 açıklıklı çift köprüden oluşan Bolu Viyadüğü, toplam yüksekliği 50 metreyi bulan ayakları ve üzerinde kurulu olduğu bölgenin depremselliği açısından Anadolu Otobanı'nın en önemli yapılarından. Bu viyadük, 12 Kasım 1999 Düzce depreminde büyük hasar görmüştür.

Bu makalede Düzce depreminin karakteristik özellikleri, köprü tipi seçiminde izlenen yol, dizayn kriterleri ve göz önünde bulundurulmuş sismik konular işlenecektir. Köprünün ve enerji yutucu ünitelerin deprem sırasındaki performansı değerlendirilecektir.

Anahtar Kelimeler : Viyadük, Bolu, Deprem, Davranış

ABSTRACT: Dual span 2300-meters long viaduct is one of the most important engineering structures along the Anatolian Motorway in Turkey because of its total length, pier heights (up to 50 m) and the seismicity of the region. This bridge underwent extensive damage during the November 12, 1999 Duzce Earthquake.

In this paper, the characteristics of the strong ground motion of Duzce Earthquake, the background in selecting the type of the bridge, the design criteria utilized and seismic considerations will be outlined. The performance of the bridge and the energy dissipating devices will be evaluated.

Giriş

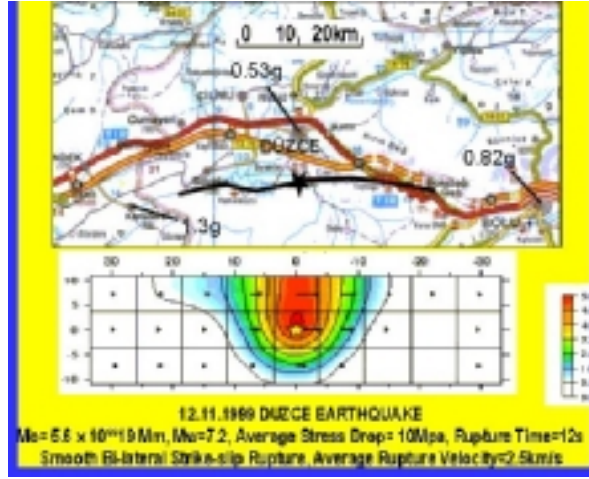
Söz konusu Viyadük (No:1) 1999 yılında iki büyük deprem geçirmiştir. Bunlardan ilki, 17 Ağustos 1999 tarihli Marmara depremidir. Düzce istasyonu deprem merkezinden (epicenter) 107 km uzaklıkta olmasına rağmen fay hattına 11 km mesafedir. Bu depremde Düzce İstasyonunda kaydedilen en büyük yer ivmesi değeri 0,35g dir. 12 Kasım 1999'da gerçekleşen Düzce depremi merkezi ise Düzce'nin 6 km güneyindedir.

Kasım 1999 Düzce depremi 1939 yılında Erzincan depremiyle başlayan ve 1942, 1943, 1944, 1951, 1957, 1967 ve son olarak 1999 Kocaeli depremleri ile devam eden Kuzey Anadolu Fay Sistemi yer hareketlerini sonucudur. Bu deprem sırasının tarihte en az bir kez daha aynı sırayı takip ettiği hakkında tarihsel veriler bulunmaktadır. $M_w=7.2$ ölçekli Düzce depreminin sismolojik özellikleri aşağıda verilmiştir:

12 Kasım 1999 Düzce Depremi:

Merkez üssü: 40,768 31,148 $m_b=6,5$ $M_S=7,3$
 Sismik moment: $M_0=4,5*10^{19}$ N.m $M_w=7.1$

Yagi, Y. ve M. Kikuchi (1999) telesismik p-dalgaları verilerini kullanarak Düzce depreminde 70km x 25km lik bir fay kırığı oluştuğunu hesaplamıştır (Şekil 1). Bu modele göre oluşan kayma, merkez üssünden (epicenter) 10km doğuya ve 20km batıya kadar uzanır. Hesaplanan fay kırığı, uzunluk ve yön açısından Düzce depreminde gözlenen yüzey kırığı ile güzel uyum göstermektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Merkez üssü (epicenter), yüzey çatlağı ve gerilim dağılımı

Düzce, Bolu ve iki Karadere istasyonlarında toplanan ivme verileri Erdik (2000) ve Barka (1993)'den elde edilebilir. Bu depremlerde elde edilen en büyük değerler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1 – Depremlerde elde edilen en büyük değerler

İstasyon	Fay mesafesi (Km)	PGA (mg)	EPA (mg)	PGV (m/s)	PGD (cm)
Bolu NS	19.9*	737	520	50	18
Bolu EW	19.9*	806	440	66	11
Bolu UD	19.9*	199	-	18	7
Düzce NS	8.3*	393	290	50	27
Düzce EW	8.3*	517	360	69	41
Düzce UD	8.3*	335	-	17	10
496 NS	-	736	815	39	17

496 EW	-	736	640	38	11
496 UD	-	324	-	15	9
375 NS	10**	108	920	47	8
375 EW	10**	629	450	21	4
375 UD	10**	235	-	7	3

* Anderson ve Diğerleri, (2000)

** Seeber ve Diğerleri, (2000)

Bolu Viyadüğü 1

İkinci kısım Anadolu otoyolu Gümüşova-Gerede kesiminde bulunan Viyadük No:1 yaklaşık 2400-metre uzunluğunda çift köprüden oluşur ve Asarsuyu nehrinin yakınından geçer. Bu viyadük toplam yüksekliği 50 metreyi bulan ayakları ve üzerinde kurulu olduğu bölgenin depremselliği açısından Anadolu Otoyolunun en önemli yapılarındandır. Bu viyadük, 12 Kasım 1999 Düzce depreminde büyük hasar görmüştür. Köprünün genel görünümü Şekil 2’de verilmiştir. Köprü planda kavisli ve İstanbul tarafına doğru yaklaşık %3 düşey eğimlidir.



Şekil 2 Viyadük 1’in Genel Görünüşü

Ön Boyutlandırma

Köprü projenin yapıldığı yıllarda geçerli olan AASHTO Karayolu Köprüleri Sismik Dizayn Kuralları Kitapçığına (1983) göre sismik katsayı $A=0.4$ alınarak yapılan ön boyutlandırma sonucu çok büyük kuvvetlerin yapıya geldiği hesaplanmıştır. Bulunan değerler kullanılarak yapılacak bir dizayn normal dışı ve kabul edilemez büyüklükte temel ve ayak boyutları gerektirmektedir. Yapıya gelecek deprem yüklerini azaltmak için birçok alışık olunmayan çözüm senaryoları geliştirilmiştir. (45.110/R/996 numaralı rapor – Haziran 1991). Olası birçok alternatif içinden aşağıdaki yaklaşım daha detaylı incelenmek üzere seçilmiştir.

Bu yaklaşımda, üst yapı ve ayaklar arasına konulacak bir elasto-plastik enerji yutucu sistem kullanımı sonucu üst ve alt yapı arasında oluşacak kuvvetlerin azaltılması öngörülmüştür. Böylelikle köprü elemanlarında gerilmeler elastik sınırlar içinde kalacak ve temel ve kazıklar bu elastik kuvvetlere göre boyutlandırılacaktır. Başka bir deyişle deprem davranış katsayısı $R=1$ almaya eşit bir durum oluşturulmuştur.

Bu dizayn yaklaşımında, bir kuvvetli deprem sonrası enerji yutucu aletlerin gözden geçirilerek denetlenmesi, gerekiyorsa değiştirilmesi gerektiği öngörülmüştür.

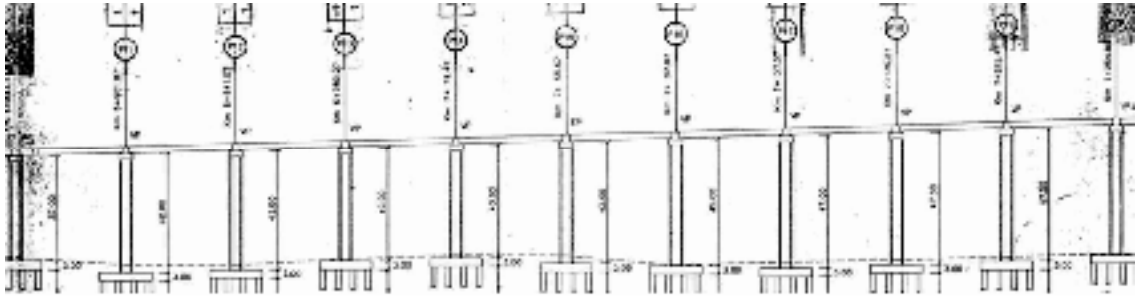
Bu yaklaşımda viyadüğün tüm ayaklarında, her bir kirişin altında, çok yönlü kayar mesnetler (çelik-teflon kaplı neopran plakalar) kullanılmıştır. Yatay hareketleri engelleyebilmek için her ayakta bir tane olmak üzere elasto-plastik özellikleri olan mekanik enerji yutucu aletler döşeme ve ayaklar üzerine yerleştirilmiştir.

Enerji tutucu mekanizmanın çalışma prensibi şöyledir: Sıcaklık değişimlerinde yaratacağı düşük rijitlik ile hareket etmeye olanak sağlayacak, fakat deprem sırasında üst ve alt köprü yapıları arasında bağlantısı sırasında histerik davranışı ile enerji emecek şekildedir.

Köprünün Tanımı

Sol köprü 6+470.94 km'de başlar ve 8+783.97 km'de biter. Köprülerin toplam uzunluğu sol ve sağ yapılar için sırasıyla 2313.03 metre ve 2273.75 metredir. Sol ve sağ köprü açıklık adetleri sırasıyla 59 ve 58 dir. Ayaklar Düzce tarafından Bolu'ya doğru büyüyerek numaralandırılır.

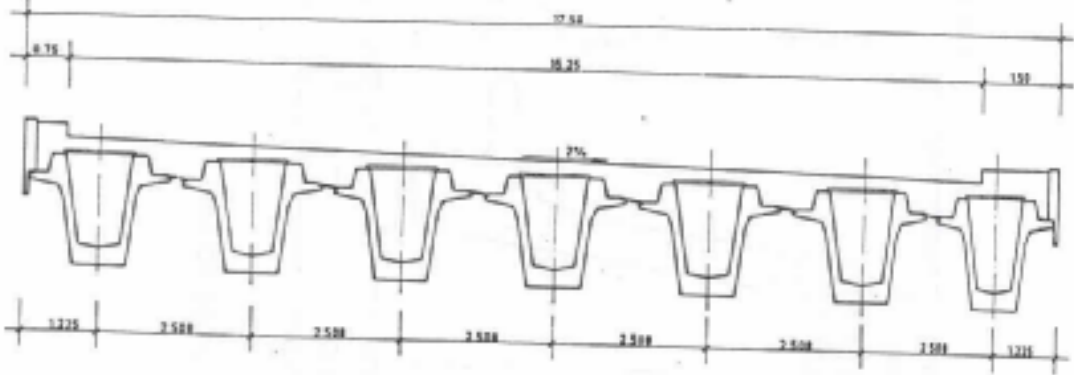
10'uncu ve 20'inci ayak arası tipik bir kesit Şekil 2'de görülmektedir. Bu kesitteki ayak yükseklikleri 37 ila 47 metre arasında değişmektedir. İki ayak eksenleri arası açıklık mesafesi 39.2 metredir. Bütün ayaklar 180cm çaplı kazıklı temeller üzerinde bulunmaktadır.



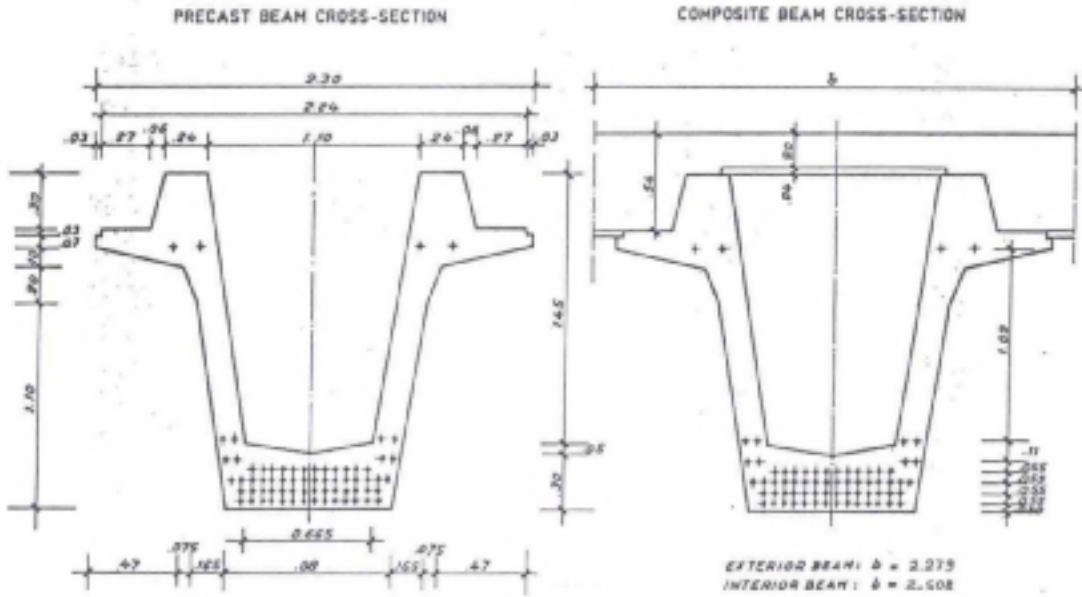
Şekil 2. P10 ve P20 arası kesit.

Üst yapı 10'ar açıklık mesafede döşemeler birleştirilerek sürekli hale getirilmiştir. 10'uncu ve 20'inci açıklıklarda uygun şekilde yerleştirilen derzler ile geri kalan döşemelerden ayrılmıştır.

Köprünün döşemesi 7 adet ön-dökümlü ön-germeli kirişlerin birbirine sürekli ve yerinde dökme döşeme ile bağlanması sonucu oluşmuştur (Şekil 3).



Şekil 3 Köprü kiriş ve döşemesi



Şekil 4. Kiriş Enkesitleri

Kirişler yerlerine ilk yerleştirildiklerinde uçlarından basit mesnetli ve toplam 36.8 m uzunluğundadır. Kirişlerin kesitleri ve germe halatlarının yerleri Şekil 4'de görülmektedir.

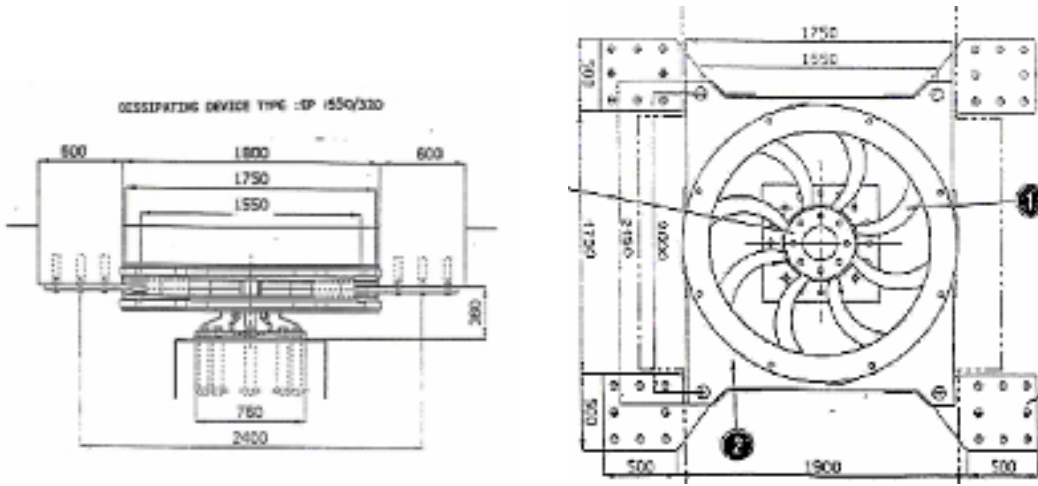
Kirişlerin dizayn hesapları 1983 tarihli AASHTO 13'üncü versiyon ışığında gerçekleştirilmiştir. Ön germeli betonun küp dayanım kapasitesi transfer sırasında 40 MPa ve 28 gün dayanımı 52.5 MPa olarak öngörülmüştür. İç kirişlerdeki ölü yük 2.13 ton/m dir. AASHTO 3.23.2'e göre belirlenen aşınma yüzeyi, kurp ve korkuluklar kirişlere eşit olarak dağıtılmıştır. Yerinde dökülen döşeme sürekli ve kirişler ile bütünleşiktir. Döşeme kalınlığı kirişler üzerinde 24cm, kirişler arasında ise 54 cm dir. Döşeme tüm ayaklar üzerinde çok yönlü kayar mesnetler (çelik-teflon kaplı neopran plakalar) ile desteklenmektedir. Sismik yükleme sırasında yanallı kaymayı Enerji Yutucu Üniteler (EYÜ) (Energy Dissipating Unit) sağlar.

Üst yapı ve ayaklar arasına yerleşmiş olan EYÜ'ler:

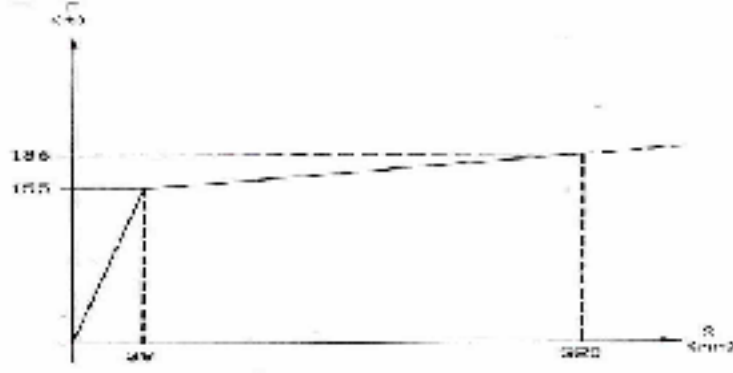
- Onlu grup köprüünün orta ayağındaki merkez grup (P15) döşemeye doğrudan bağlıdır; Bu tip bağlantıya "EP" adı verilir.
- Diğer ayaklarda bağlantı boyuna paralel yönde yerleştirilen EYÜ'leri Akışkan Bağlantı Birimleri (ABB) ile küçük boyuna hareketlere izin verecek şekilde bağlanmıştır. Bu tip bağlantılara "VP" ismi verilir.
- Derzlerin bulunduğu P10 ve P20 ayaklarında bulunan EYÜ'ler ise boyuna yönde döşemelerden birine bağlanırken ABB'ler aracılığıyla ayaklara tutunur. Derzin diğer kenarındaki döşeme ise boyuna kılavuz üzerinde hareket etmekte serbesttir. Boyuna dik (yanal) yönde ise iki döşeme de EYÜ'lere sabit olarak bağlıdır. Döşeme uçlarının birbirine göreceli hareketleri kılavuz vasıtasıyla engellenir. Bu tür bağlantıya "VPJ" adı verilir.

Yukarda açıklanan bağlantı sistemi üst yapının boyuna yönde sünme, büzüşme, sıcaklık değişimleri gibi etkilere karşı hareket etmesini serbest kılar. Sıcaklık etkilerine karşı sadece orta ayakta sabit birleştirme yapılmıştır. Yavaş hareketlere izin verme özelliğinin aksine hızlı göreceli (örneğin deprem) hareketleri engelleyecek şekilde tasarlanmıştır. Deprem sırasında EYÜ'ler çalışmaya başlayacak ve üst yapı ile ayaklar arasında elasto-plastik bağlantılar zinciri oluşturacaktır.

Viyadük 1'de kullanılan EYÜ'ler ALGA S.p.A. tarafından üretilmiştir. Sekiz adet "C" şekilli çelik çubuktan oluşan 1.80 x 1.80 metrelik EYÜ Şekil 5'de görülmektedir. Bu boyutta bir EYÜ ilk kez Viyadük 1 için üretilmiştir ve prototipi 1992 yılında test edilmiştir. Mekanik özellikleri Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 5. EYÜ detayları



Şekil 6. EYÜ mekanik özellikleri

Deprem Analizi ve Bölgenin Sismik Özellikleri

Bölgenin depremselliği iki ayrı raporda detaylı olarak incelenmiştir. Bunlardan birincisinde Viyadük 1'in inşa edileceği bölgenin depremselliği probabilistik ve deterministik olarak değerlendirilmiştir. Bölgedeki geçmiş depremler ve viyadüğün faya uzaklığı dikkate alınarak bölgede beklenen en büyük yer ivmesi ile etkili yer ivmesi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın sonunda elde edilen tekerrür aralığı ve ivme ilişkisi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 - Yer İvmesi Tekerrür Aralığı İlişkisi

Yıllar	En büyük yer ivmesi (%g)	Etkili yer ivmesi (%g)
10	0.115	0.077
50	0.346	0.242
110	0.506	0.337
500	0.603	0.402
1050	0.620	0.416
5720	0.650	0.433
10530	0.655	0.437

Tabloda geliştirilen değerler kullanılarak proje yapanlar, kontrol mühendisleri ve işin sahibi olan Karayolları AASHTO'da önerilen 500 yıllık tekerrür aralığına karşılık gelen 0.4 g'yi etkili yer ivmesi olarak kullanmaya karar vermişlerdir.

İkinci rapor Prof. Aykut Barka ve Prof. Mustafa Erdik tarafından hazırlanmıştır. Raporun başlığı "Site Specific Fault Rupture Hazard Investigation for Viaduct #1 and 1/a of the Gumusova-Gerede Motorway – Gümüşova-Gerede Otoyolu 1 ve 1/A Viyadükleri için Fay Yırılması ve Atım Tehlikesi" ismini taşımaktadır ve Ocak 1993 tamamlanmıştır. Bu çalışmada bölgenin depremselliği, faylanma durumu ve heyelan potansiyeli deterministik ve probabilistik tehlike değerlendirmelerine bir temel teşkil edecek şekilde belirlenmiştir. Geçişlerin ekonomik hayatları boyunca oluşması beklenen fay atımları özel bir incelemeye tabi tutulmuştur.

Bu raporda, Kuzey Anadolu Fayı üzerinde meydana gelebilecek atımların hesaplanması için Bonilla ve Diğerleri (1985) tarafından tüm dünyadaki yanal atımlı faylar için derlenen aşağıdaki Tablo 3'deki fay atımı ve manyitüd regresyon ilişkileri kullanılmıştır.

Tablo 3 - Manyitüd Regresyon İlişkisi

MANYİTÜD	FAY ATIMI (cm)
6	10-30
6.5	20-80
7	100-170
7.5	300-400
8	700-2000

Bu çalışmanın sonunda aşağıdaki öneri yapılmıştır:

“Düzce fayı ile Kuzey Anadolu fayının ana çizgisi arasındaki geçiş kompleks faylardan meydana gelmiştir. Bu sebeple, Düzce fayı üzerinde beklenen 1.5 metre yer değiştirmenin Viyadük'ün yer aldığı bu kompleks faylara dağılması beklenmektedir”

Dinamik Analiz

Köprüde kullanılacak olan model seçildikten sonra Enerji Yutucu Sistemlerin doğrusal olmayan davranışını dikkate alan basit bir matematik model geliştirilmiştir. Bu model sentetik olarak geliştirilen akselogramlar kullanılarak zaman tanım alanında çözümlenmiştir. Uygulama çözümlerinden önce veri ve model üzerinde parametrik bir çalışma yapılmıştır. Bu parametrik çalışmanın amacı:

- Sentetik akselogramların AASHTO'da verilen spektrumu sağlaması ve etkilerinin araştırılması;
- Enerji Yutucu sistemlerin histerik davranışının incelenmesi ve alette meydana gelebilecek en büyük yer değiştirmenin bulunması;
- Değişik yükseklikteki köprü ayaklarında enerji yutucu sistemlerin verimliliğinin araştırılması;
- Değişik zemin özellikleri için yapı zemin etkileşiminin araştırılmasıdır.

Akselogramların Geliştirilmesi

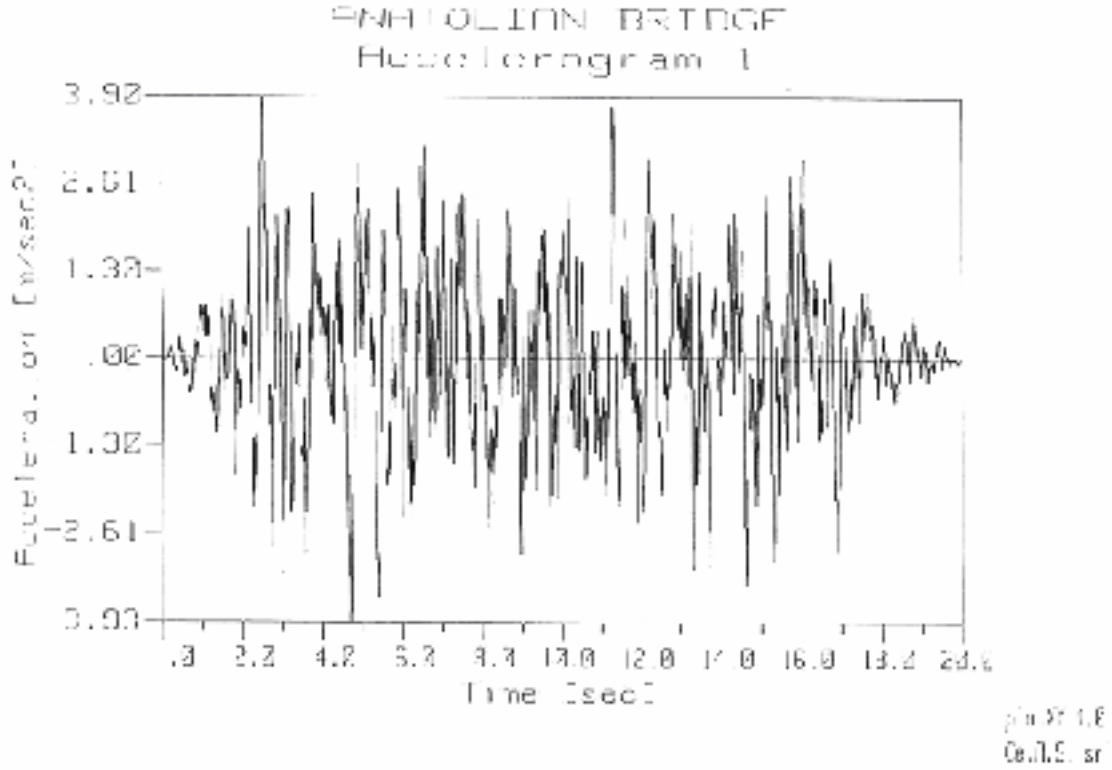
Köprünün sismik analizi için yedi değişik akselogram geliştirilmiştir. Bu akselogramlar M.I.T (Massachusetts Institute of Technology) de geliştirilen SIMQKE bilgisayar programının çıktılarından elde edilmiştir. Programa veri olarak kullanılan parametreler aşağıda özetlenmiştir:

- En büyük etkili yer ivmesi 0.4 g;
- Davranış spektrumu AASHTO'da tarif edilen ve Şekil 8'de verilen şekilde olmasının sağlanması. Davranış Spektrumun önemli noktaları (periyot, spektrum değeri) şeklinde; (0.0,0.4), (0.2,1.0), (0.6,1.0) olarak belirlenmiştir. Spektrum T=0.6 saniyeden sonra aşağıdaki gibi tariflenmiştir

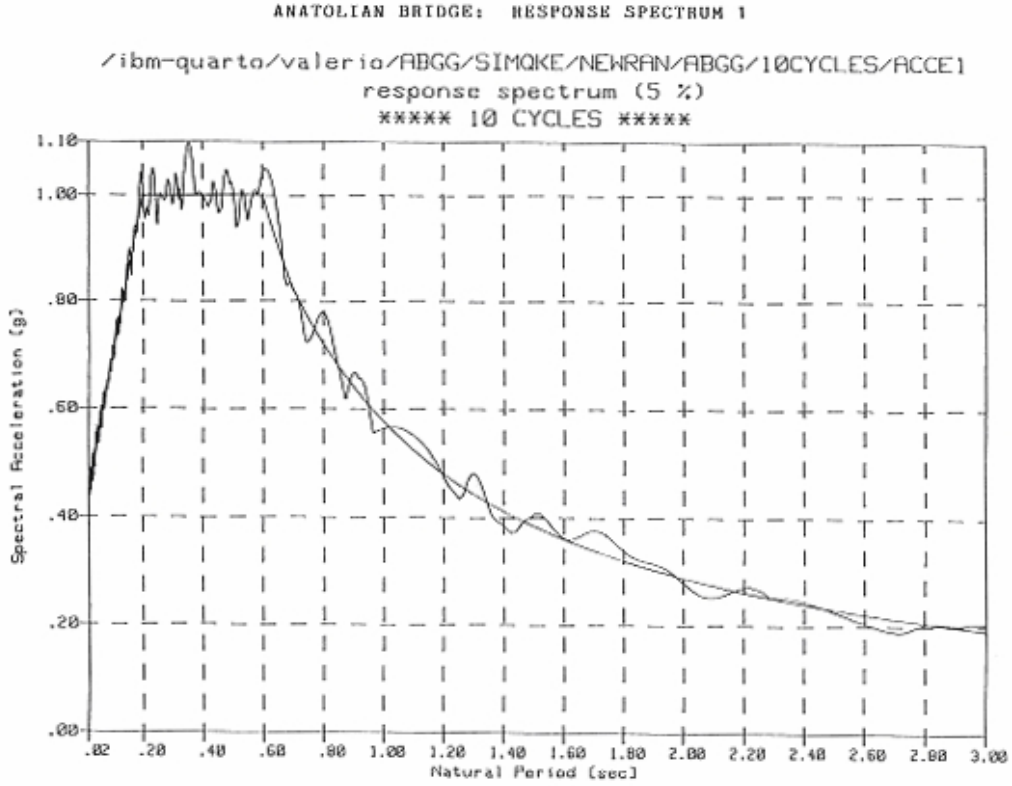
$$S = 1.2 \times 0.4 \times 1.2 / T = 0.576 / T;$$

- Simülasyon süresi 20 saniyedir.
- Sönüm katsayısı kritik sönümün % 5'i olarak seçilmiştir.

Akselogramın zaman dilimi 0.01 saniye olarak kullanılmıştır. Bunun sonucunda sentetik akselogramlar 20 saniye için 2001 noktada tanımlanmıştır. Bu akselogramlardan bir tanesi örnek olarak Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 8'de ise bu akselogramın davranış spektrumu ile AASHTO spektrumu karşılaştırılmıştır.



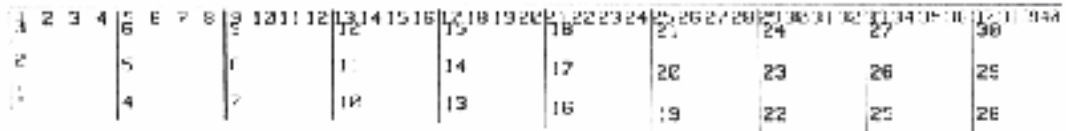
Şekil 7 - SIMQKE Programından Elde Edilen Sentetik Akselogram



Şekil 8 - AASHTO ve Sentetik Akselogram Karşılaştırması

Sonlu Elemanlar Yöntemi

Köprünün modellenmesinde ve sismik yükler için analizinde, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yapabilen “ADINA” isimli bilgisayar programı kullanılmıştır. Döşeme bağlantı noktalarının ve ayakların iki yönde farklı davranması sebebiyle ve ‘boyuna’ ve ‘enine’ yönde analiz yapmak için iki değişik model hazırlanmıştır. On açıklıkta bir bulunan sınır elemanlarının fiziksel durumu sebebiyle, ‘boyuna’ modelde son açıklık mesnedi yatay yönde serbestçe hareket edebilecek şekilde modellenmiştir. Şekil 9’da 10’uncu ve 20’inci ayaklar arası için oluşturulan model görülmektedir. Enine modelde ise 11 ayak ve 10 açıklık kullanılmıştır. Her açıklık ayaklara EYÜ’ler ile birleştirilmiştir. Bir sonraki açıklık ile olan devamlılığın sağlanabilmesi için uçlarda bulunan ayakların, zemin rijitliğinin, ve kütlelerin yarısı alınmıştır.



Şekil 9 - Boyuna yönde sismik analiz için oluşturulan model

Her ayak 3 adet kiriş elemanı ve her açıklık 4 adet kiriş elemanı kullanılarak tanımlanmıştır. Yapı-zemin etkileşimini modelleyebilmek için zemin seviyesinde

kayma ve dönme yönünde elastik yaylar dikkate alınmıştır. Dikine yöndeki elevasyon farklarını tanımlayabilmek için rijit bağlantı elemanları kullanılmıştır (Şekil 9).

Bilgisayar modelinde ayak ve döşeme elemanlarının kütleleri yayılı olarak tanımlanmıştır. Bu kütlelere ek olarak ayak tepelerinde konsantre kütleler kullanılmıştır. Ayak ve döşeme arasındaki EYÜ'ler elasto-plastik özellikleri olan çubuk elemanları olarak modellenmiştir.

Döşeme ve ayakların özellikleri aşağıdaki gibidir:

- AYAK: Kesit alanı = $14,30 \text{ m}^2$, Boyuna ve enine yönde kesit atalet momenti, sırasıyla $38,30 \text{ m}^4$ ve $106,30 \text{ m}^4$. Elastik modülü = $2,36 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, ve Özgül ağırlık = 2502 kg/m^3 .
- DÖŞEME: Kesit alanı = $12,88 \text{ m}^2$, Yatay plaka kesit atalet momenti = 314 m^4 , Elastik modülü = $3,12 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, ve Özgül ağırlık = 2867 kg/m^3 .
- HER AYAK ÜZERİNDE BULUNAN KONSANTRE KÜTLE = 428135 kg .
- EYÜ (veya MAKAS ELEMAN): Kesit alanı = $1,0 \text{ m}^2$, Elastik modülü = $60 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, Akma Sınırı = $1,48 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, $E_t = 1,829 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, ek olarak kinematik sertleşme ve Von Mises akma durumları da tanımlanmıştır.

Zemin modellemesinde kullanılan yayların rijitlik katsayıları zemin özellikleri değerlendirilerek hesaplanmıştır.

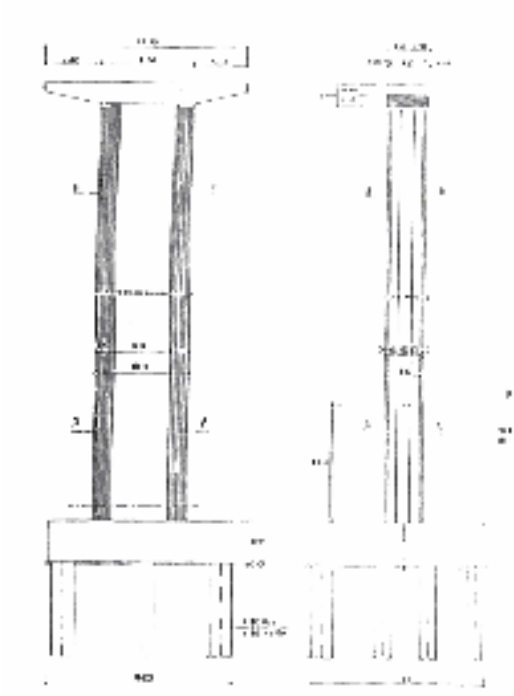
Ayak, Ayak-Başlığı, ve Temel Dizaynı

Ayakların dizaynı donatıdaki farklılıklar olarak yüksekliği boyunca 4 değişik parça olarak ele alınmıştır. Bu parçalar aşağıda belirtilen seviyelerden başlar:

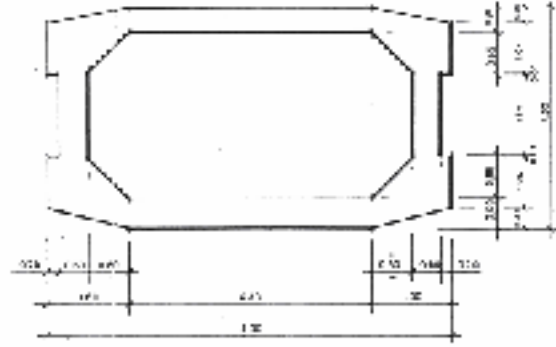
- Ayak tabanı,
- Ayak tabanından 8m yukarısı,
- Ayak tabanından yüksekliğin 1/3'ü
- Ayak tabanından yüksekliğin 2/3'ü

Boyuna ve/veya enine donatılar belirtilen bölgelerdeki dizayn yüklerine göre hesaplanmıştır. Hemen hemen tüm kesitlerde deprem yükleri dizaynı kontrol eden parametre olmuştur.

47 metre yüksekliğindeki ayakların tabanında $432 \phi 36 = 4906 \text{ cm}^2$ (%3,3) boyuna donatı ve $\phi 20 / 10 \text{ cm}$ kesme donatısı kullanılmıştır. Ayakların plan ve kesitleri Şekil 10a ve Şekil 10b'de görülmektedir.

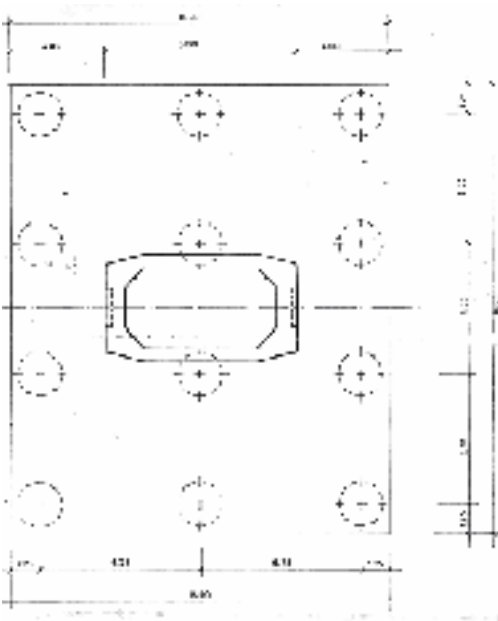


Şekil 10a Tipik Ayak Yan Görünüm



Şekil 10b Tipik Ayak Kesit

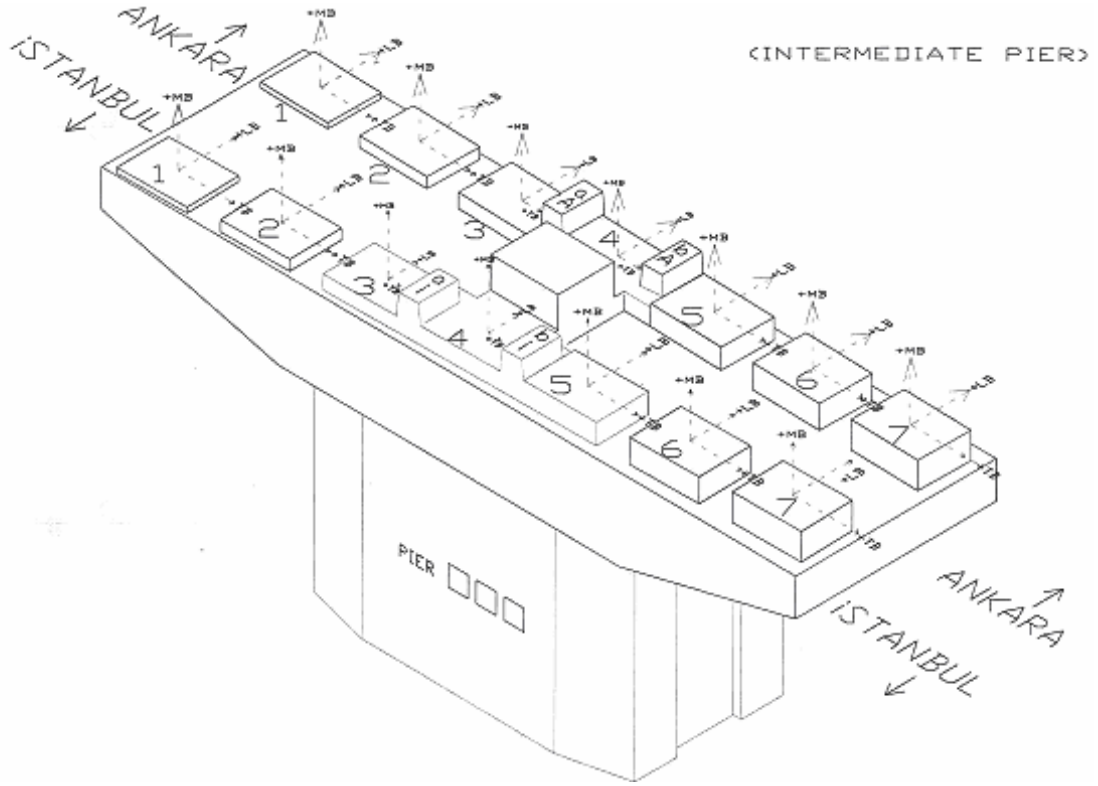
Ayaklar 180cm çapında 12 adet kazıktan oluşan temel üzerinde oturmaktadır (Şekil 10c). Kazıkların derinliği zemin özelliklerine bağlı olarak 15 metreden 40 metreye kadar değişmektedir. Deprem ile oluşan yüklemekten dolayı en büyük çekme kuvveti köşe kazıklarda oluşmakta ve 500 ton'a kadar çıkmaktadır. Ayak kirişinin derinliği orijinal dizaynda 4 metre olmasına rağmen daha sonra yapılan hesaplarla 3m'ye indirilmiştir.



Şekil 10c Tipik Kazık Temel Planı

Tipik ayak kirişi görünümü Şekil 11'de verilmektedir. Ayak kirişi ankastre olarak dizayn edilmiştir. Ayaklar ve kirişlerde en önemli kısım pabuç boyutları ve buna bağlı

çelik plakanın yerleştirilmesidir. Bu plakanın 75x75cm boyutlarında seçilmesi sebebiyle EYÜ'lerin 48.0 cm maksimum deplasmana göre tasarlanmasına rağmen ancak 37,5 cm'ye kadar hareket edebilmesine olanak vermektedir.

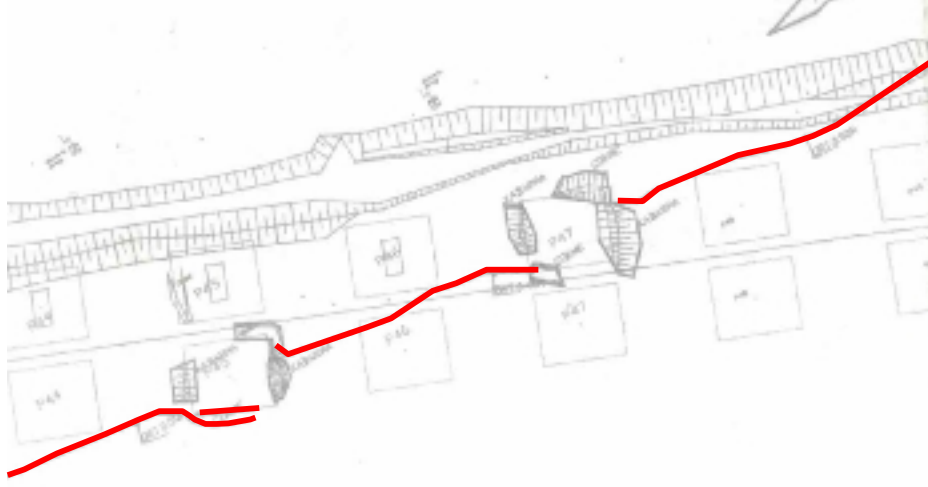


Şekil 11 - Orta ayak kirişinin izometrik (tipik) genel görünüşü

Viyadüğün Deprem Davranışı

1 No.lu Viyadük 1999 yılında iki büyük deprem geçirmiştir. 17 Ağustos Marmara depreminde Düzce istasyonu merkez üssünden (epicenter) 107 km uzakta olmasına rağmen fay kırığına oldukça yakındır (11 km). Köprü Düzce'nin oldukça yakınındadır. Köprü bu depremi elastik sınırlar içinde atlattır. EYÜ'ler 4,5 ila 8 cm kadar elastik deplasman yapmışlardır.

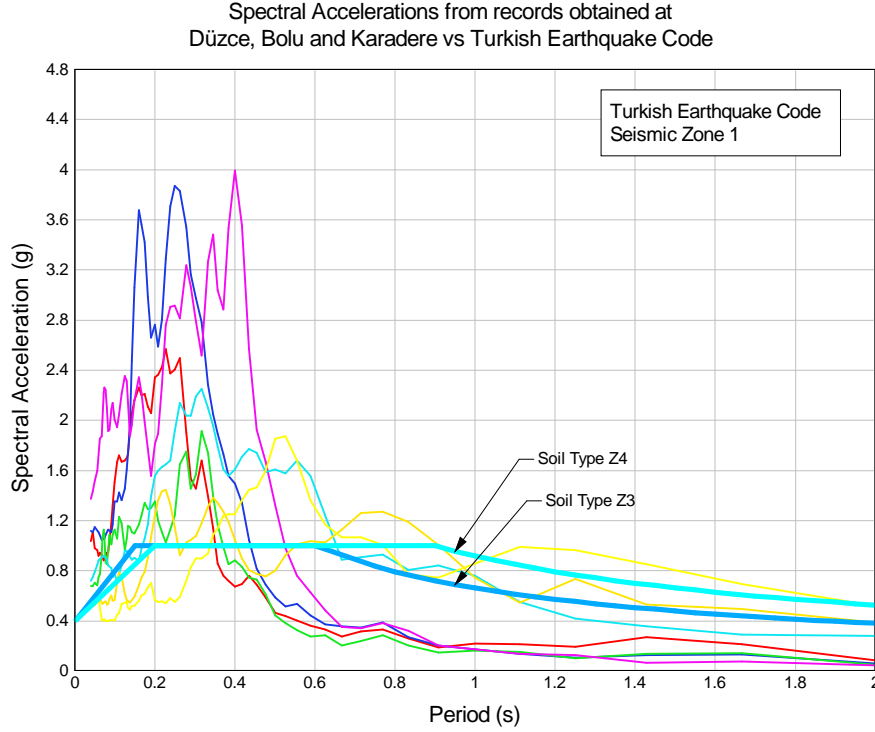
Düzce depremi merkez üssü ise Düzce'nin 6 km güneyinde bulunmaktadır. Fay Viyadüğün 45 ve 47 nolu ayakları arasında viyadüğün eksenine 20-30 derece yaparak geçmiştir. Yaklaşık 2-2,5 metre fay atımı oluşmuştur (Şekil 12). Deprem temeller ve ayaklar arasında önemli kaymalara sebep olmuştur. Fay hattının yakınındaki bazı ayaklar 10-15 derece dönmeye maruz kalmıştır.



Şekil 12 - Viyadük 1'deki fay kırığı

Hemen hemen tüm kirişler doğrusal ve yanal yönlerinde yerlerinden oynamışlardır. Bu oynamaların köprünün boyuna yönde olanları yaklaşık 1 metre dolayında ve hepsi batı yönündedir. Birçok kiriş mesnetlerin üzerinden kaymıştır ve hatta bazıları ayak kirişinin dışına çıkmıştır. EYÜ'lerin ciddi hasar görmesi kirişlerin yerlerinden oynamasına neden olmuştur. Sürekli döşemenin bulunması kirişlerin yere düşmesini engellemiştir. EYÜ'ler 1.5 x (dizayn deplasmanı) için, yani $1.5 \times 32 = 48$ cm için tasarlanmıştır. Deplasmanlar bu değerden çok büyük olduğu için neredeyse tüm EYÜ'ler işlevselliklerini yitirmişlerdir.

Bolu ve Düzce'de ölçülen azami yer ivmeleri sırasıyla 0.8 g ve 0.5 g dir. Fay hattının diğer tarafında bulunan Karadere'de okuma istasyonları bulunan Columbia ve Paris Üniversitelerinin daha sonraları yaptıkları açıklamalara göre, bu bölgede ölçülen azami yer ivmeleri dizayn değerlerinin çok üzerinde olan 1.0-1.1 g mertebesinde oluşmuştur (Şekil 13).



Şekil 13 - Türk Deprem Yönetmeliği ve Bölgedeki Kayıtların Spektrumların Karşılaştırması

Eğer depremin büyüklüğü ve dizayn değerleri karşılaştırılacak olursa viyadükte oluşan hasarın çok büyük olmadığı görülmektedir. İlk incelemelere göre, eğer fay kırığının olduğu bölgedeki ayaklar sayılmazsa, ayaklar ve temelerde büyük bir problem görülmemektedir.

Dünyadaki birçok köprü şartnamesi yapının kuvvetli bir depremi aşırı yapısal hasar almadan ve halka zarar vermeden atlatmasını öngörür. Bu şartlar altında, depremden hemen sonra köprü işlevselliğini kısa bir süre için yitirebilir. Yine şartnamelerde yukarıda belirtilen dizayn depremi, tekrarlama aralığı 475-500 yıl olan depremlere karşı gelir. 12 Kasım 1999 depreminde hasar gören Viyadük 1 ve Akarsuyu vadisinin üst tarafında, Viyadük 1'den çok uzakta bulunmayan Viyadük 2'nin dizaynları Anadolu Otoyolu'nun önemi göz önünde bulundurularak en azından 2000 yıllık tekrarlama aralığı olan depreme göre yapılmalıdır. Ayrıca, şu andaki köprülerin dizayn ve onarımı hedeflenen depremin oluşması halinde dahi trafik akışının engellenmeyeceği şekilde yapılmalıdır.

Depremden sonra köprü alt ve üst yapısında detaylı yapısal inceleme yapılmıştır. Fay hattına yakın olan ayakların temelleri hariç kazık, kazık başlığı ve ayaklarda önemli bir yapısal hasara rastlanmamıştır. Üst yapı kirişlerin bazılarında özellikle deplasmanın fazla olduğu ve EYÜ'lere yakın kirişlerde yapısal hasarlar mevcuttur. Viyadüğün önemli bir otoyol üzerinde bulunması ve fay hattına yakın olmaları sebebiyle tamir ve güçlendirmesinde "yakın-deprem" etkilerinin de değerlendirmeye katılması gerekmiştir. Tamir ve güçlendirmede daha evvelki depremlerde öne çıkan kalıcı deplasman ve ayakların ve EYÜ'lerin deplasman ihtiyacını karşılamak üzere 10 açıklığın yalnız döşeme ile değil, her ayak üzerinde bir diyafram kirişi ile bağlanarak tam manası ile

mütemadi hale getirilmesi öngörülmüştür. Bu husus, hasar gören kirişlerin de tamir edilmesini sağlayacaktır.

Teşekkür

Köprü ile ilgili bilgilerin büyük bir çoğunluğu köprünün projesini yapan Ing. Paolo Versace'den elde edilmiştir. Bölgenin depremselliği ve kuvvetli yer hareketini içeren bilgilerin büyük bir çoğunluğu Bayındır-Astaldi Ortak Girişimi için Prof. Mustafa Erdik ve Prof. Çetin Yılmaz tarafından hazırlanan raporlardan alınmıştır. Ing. P. Versace ve Prof. M. Erdik ilaveten Bayındır-Astaldi Ortak Girişimine veri ve bilgileri sağlayıp kullanılmasına müsaade ettiği için sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

Referanslar

AASHTO Guide Specifications for Seismic Design of Highway Bridges 1983 Edition

Akyüz, H.S., A. Barka, E. Altunel, R. Hartleb, G. Sunal, 2000, Field Observations and Slip Distribution of The November 12, 1999 Düzce Earthquake M=7.1, Bolu-Turkey, *'The İzmit and Düzce Earthquakes: Preliminary Results'*, İstanbul Technical University Publications, pp. 63-70.

Anderson, J. et. al, 2000, Strong Ground Motions from The Kocaeli and Düzce, Turkey Earthquakes and Possible Implications for Seismic Hazard Analysis, *Earthquake Spectra*

Barka, A., Erdik, M., 1993, Site specific fault rupture hazard investigation for Viaduct #1 of Gumusova-Gerede Motorway, *Report prepared for Astaldi*.

Bonilla, M.G., Mark, R. K., Lienkaemper, V., 1985, Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length and surface fault displacement. *Bull. Seismological Society of America*, Vol 74.

Erdik, Mustafa, 2000, Report on 1999 Kocaeli and Duzce (Turkey) Earthquakes
<http://www.koeri.boun.edu.tr/eathqk/earthqk.html>

Seeber, L. et. al, 2000, The 1999 Earthquake Sequence Along The North Anatolian Transform at The Juncture Between The Two Main Ruptures, *The İzmit and Düzce Earthquakes: Preliminary Results'*, İstanbul Technical University Publications, pp. 209-223.

Standard Specification for Highway Bridges, 1989, *Fourteenth Edition The American Association of State Highway and Transportation Officials*

Yagi, Y. and Kikuchi, M. (Online), The 1999 Turkey Earthquake, ERI, University of Tokyo Japan, Available: <http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/yuji/trk2>