Pamukkale Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi
Cilt 16, Sayı 1, 2010, Sayfa 121-129

Tamburlardan Oluşan Antik Mermer Sütunların Deprem Etkisi Altındaki Davranışı

Behavior of Ancient Multi-Drum Marble Columns Under Earthquake Effects

Bengi ARISOY*, Ayhan NUHOĞLU ve Emre ERCAN

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir

Geliş Tarihi/Received : 27.07.2009, Kabul Tarihi/Accepted : 18.12.2009

ÖZET

Bu çalışmada, antik yapıların taşıyıcı sistemini olan sütun elemanların deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Deneysel ve nümerik olarak yürütülen çalışmada, çok parçalı mermer sütun eleman sarsma tablasında farklı ivmeler ile sarsılmıştır. Deney sırasında sütunun yer değiştirmeleri potansiyometreler ile kaydedilmiştir. Uygulanan ivmeler etkisinde sütun davranışı belirlenmiştir. Deneysel çalışmanın yanısıra sütun sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek nümerik olarak da analiz edilmiştir. Nümerik analizlerde MSC Marc Mentat paket programı kullanılmıştır. Deneysel ve nümerik çalışmaların sonuçları kıyaslanmış ve nümerik olarak elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların örtüştüğü görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : *Antik sütunlar, Sonlu elemanlar modellemesi, Dinamik analiz.*

ABSTRACT

In this study, behavior of multi-drum columns of the ancient structures is investigated. The study is carried out both experimental and analytical. In the experimental study multi-drum column is tested in shaking table with different accelerations and displacements of the column are recorded using potentiometers. Behavior of the column is determined for the different accelerations and at the same time, the column is analyzed using finite element method. For the finite element analysis MSC Marc Mentat package programming is used. Experimental and analytical results are compared and it is seen that results are compatible.

Keywords : *Ancient columns, Finite element modeling, Dynamic analysis.*

1. GİRİŞ

İlk çağ uygarlıklarına, özellikle eski Yunan ve Roma dönemlerine ait eserler antik eserler olarak isimlendirilir. Bu zaman diliminde inşa edilmiş olan yapılar genelde yıkılmış ve bunlardan bir kısmı harabe olarak günümüze ulaşmıştır. Yıkık olan bu antik yapıların restorasyon ve yeniden inşa çalışmaları arkeologların gözetim ve denetiminde yapılmaktadır. Ancak antik yapıların birer mühendislik yapısı olduğu, gerek restorasyon aşamalarında gerek sonraki zamanlarda meydana gelebilecek depremlerden (veya diğer sebeplerden) dolayı hasar görmesini engellemek amacıyla mühendislik açısından da değerlendirilmesi ereklidir.

Antik yapıların görkemli ve büyük olması, kullanılan taşıyıcı elemanlarında büyük olmasını gerektirmektedir. Birçok uygulamada yükseklikleri 15 m'ye ulaşan sütunlar tek parça olarak imal edilememiş, tambur olarak isimlendirilen, dairesel kesitli kısa silindir elamanların bir araya getirilmesi suretiyle inşa edilmişlerdir. Yapıların düşey stabilitesi kullanılan büyük elemanların kendi ağırlıklarından dolayı kolaylıkla sağlanmaktadır. Yatay stabilite ise düşey taşıyıcı eleman olan sütunları oluşturan tamburların metalik yada ahşap kenetler ile bağlanması ile süreklilik ve stabilite sağlanmıştır. Kenetler taşıyıcı elemanı oluşturan parçaları bir arada tutan en yaygın donatılandırma tekniğidir. Bu kenetler, sütunun deprem yükleri altında sürekli bir kolon gibi davranmasını sağlamaktadır. Ancak tamburlara göre oldukça zayıf elemanlar olmalarından dolayı büyük kesme kuvvetleri etkisinde kırılmakta yada sıyrılmaktadırlar. Bu çalışmada antik sütunların davranışı ve kenetlerin hangi yüklerde kırıldığı, sütunların farklı ivmelerde sarsma tablasında sarsılması ile belirlenmiştir.

* Yazışılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail address : bengi.arisoy@ege.edu.tr (B. Arısoy)

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Antik yapıların taşıyıcı sistemi, taşıyıcı sistemin çalışma prensipleri, yatay-düşey yükler etkisindeki davranışı, kullanılan malzeme, antik yapıların yeniden inşası konularında yapılan çalışmalar, kısaca antik yapıların mühendislik açısından incelendiği çalışmalar son 20 yılda hız kazanmıştır. Antik yapılar genellikle sütun-kiriş elemanlardan oluşan taşıyıcı sistemlere sahiptir. Sütunlar birçok tamburun üst üste yerleştirilmesi ile elde edilen düşey taşıyıcı elemanlardır. Tamburlar arasındaki kenetler, antik yapının tarihine bağlı olarak ahşap, bronz, kurşun veya demir gibi malzemelerden imal edilebilmektedir. Tamburlar genel olarak sarsıntı sırasında birbirleri üzerinde sallanarak kayma ve çarpma etkileri oluşturmaktadır. Tamburların bu hareketi rijit blokların sallanma/çarpması (rocking) olarak bilinir (Yim v.d., 1980). Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, rijit blokların hareketi temel alınmış, gelişmiş metotlar bu analitik metot üzerine kurulmuştur. Konu hakkında yapılan ilk çalışmanın Newmark tarafından 1965 yılında yapıldığı rapor edilmektedir (Wartman v.d., 2003, Konstandinitis ve Makris, 2005). Newmark bu çalışmasında rijit blokların dinamik yükler etkisinde eğik yüzeylerdeki davranışını modellemiştir. Bu yaklaşım literatürde Newmark'ın kayan rijit blok anolojisi olarak anılmaktadır (Wartman v.d., 2003, Konstandinitis ve Makris, 2005). Bu çalışma temel alınarak, rijit blokların sallanma/çarpma hareketi yapması, başlıca Cundall (Cundall, 1971), Priestley v.d. (Pristley v.d., 1978), Yim v.d. (Yim v.d., 1980), Alsam v.d. (Alsam v.d., 1980), Wong ve Tso (Wong ve Tso, 1989) tarafından (ve daha birçok diğer çalışmalarda) detaylı olarak incelenmiştir.

Cundall, dinamik yükler etkisi altında rijit blokların davranışını analitik ve nümerik olarak incelemiş ve konu üzerindeki ilk bilgisayar programını yazmıştır. Daha sonra Cundall'ın programlaması ayrık elemanlar metoduna (DEM, Distinct Element Method) esas teşkil edecektir (Papantonopoulos v.d., 2002).

Rijit blokların dinamik davranışı konusunda sonradan yapılmış olan çalışmalar antik sütunların davranışlarının incelenmesinde kullanılmıştır. Bu arada programlama ve sayısal analiz yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte rijit blokların dinamik davranışı sonlu elemanlar metodu ile de çözülmüş ve konu hakkında birçok analiz programları oluşturulmuştur. Newmark'ın rijit blok analojisi, Papastamatiou ve Psycharis'in (Papastamatiou ve Psycharis, 1993) çalışmalarında antik sütunların dinamik davranışının, Psycharis'in çalışmalarında antik sütunların deprem etkisi altındaki stabilitesinin incelenmesinde kullanılmıştır (Psycharis v.d., 2000). Psycharis ve ekibi (Mouzakis v.d., 2002, Papantonopoulos v.d., 2002) çalışmalarını deneysel olarak sürdürmüş ve aynı elemanların aynı sismik hareketler altındaki davranışının tekrarlanamaz olduğunu tespit etmiştir.

Yapılan çalışmaların çoğunda, antik sütun elemanları oluşturan tamburların aralarında bulunan kenetlerin ilk yatay yükler altında göçtüğü dikkate alınmış ve Newmark'ın rijit blok analojisi olduğu gibi kullanılmıştır. Sadece Konstantinidis ve Makris (Konstantinidis ve Makris, 2005) kenetlerin etkisini dikkate alacak şekilde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Adı geçen çalışmada Konstantinidis ve Makris, Yunanistan ve İtalya'da yer alan antik yapılara ait sütunların yıkılma gerekçelerinin gerçekten depremlerin olup-olmadığını belirlemek için, seçtikleri bir antik sütunu 12 adet gerçek deprem kayıtlarını kullanarak analiz etmişlerdir. Deneylerin sonucunda bu depremlerin hiçbirinin bu yapıları yıkacak güçte olmadıklarını tespit etmişlerdir. Ancak kenetlerin etkisinin ne olduğu konusunda vurgu yapmamışlardır. Taniguchi yatay ve düşey yer hareketlerinin etkisi altında serbest rijit blokların lineer olmayan davranışlarını incelemiştir (Taniguchi, 2001).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3. 1. Antik Mermer Sütunların Dinamik Davranışı

Antik yapıları oluşturan sütunlar genellikle mermer malzemeden inşa edilmişlerdir. Yapının özelliğine ve önemine bağlı olarak bazı yapılarda sütun yükseklikleri 15 m'ye kadar ulaşabilmektedir. Bu boyuttaki sütunlar istenilen çaplarda ancak çok daha kısa silindir elemanların (tambur) üst üste yerleştirilmesi ile inşa edilmiştir. Sütunları oluşturan tamburların kesimi son derece düzgündür böylelikle tamburlar arasında sıva veya harç benzeri herhangi bir bağlayıcı eleman olmadan birbirleri üzerine tamamen otururlar. Sütunda sürekliliğin ve yatay stabilitenin sağlanması için tamburlar birbirlerine metalik yada ahşap kenetler ile bağlanır. Şekil 1'de antik bir kolona ait bir tambur görülmektedir. Tamburun çapından geçen eksen üzerine kenetlerin dökülecegi yada çakılacağı karesel ve dairesel açıklıklar görülmektedir.



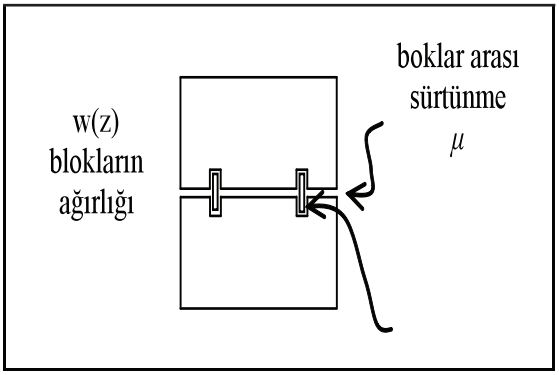
Şekil 1. Sütunu oluşturan dairesel kesitli tambur.

Kenetler kullanılan tamburların kesit alanlarına ve ağırlıklarına (dolayısı ile alacakları kesme kuvvetlerine) kıyasla oldukça zayıf elemanlardır ve kuvvetli depremlerde kolayca ezilip işlevlerini kaybetmektedirler. Kenetler bağlayıcı işlevlerini kaybettikten sonra tamburlar birbirleri üzerinde serbest olarak sallanma/çarpmaya başlarlar. Bu sırada kenetlerin etkisini tamamen ihmal etmek doğru değildir. Ancak bu etkinin ne kadar olduğunun tespiti oldukça zordur. Bununla birlikte kenetler işlev görmez hale geldiğinde sistem hala ayakta durabilmekte ancak daha büyük genlikte salınım yapmaktadır. Bu salınımlar tamburların sarsılıp birbirlerine çarpması sonucunu doğurmaktadır.

Mermer sütunların yukarıda belirtilen özelliklerinden dolayı dinamik yükler etkisi altındaki davranışını analitik olarak belirlemek hareket denkleminin her bir mod için farklı olmasından dolayı neredeyse imkânsızdır. Sütuna ait mod hareketleri sütunu oluşturan tambur (blok) sayısına bağlı olarak logaritmik olarak artar. Bununla beraber kenetlerle bağlanmış rijit bloklardan oluşan sistemlerin davranışı lineer bir sütun davranışına benzemektedir ve sistemi oluşturan tamburların (ya da blokların) arasındaki sürtünme kuvvetlerinin incelenmesi ile elde edilir. Şekil 2'de gösterilen birbirlerine kısa pimler (kenet) ile bağlanmış iki rijit bloğun arasında, yatay yük etkisinde oluşacak olan kesme kuvvetleri:

$$T = \frac{\mu w(z) + q}{w(z)} \qquad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (1)'de μ rijit bloklar arasındaki sürtünme katsayısı, w(z) rijit bloğun ağırlığı, q kenetlerin taşıdığı kesme kuvvetidir (Yim v.d., 1980, Alsam v.d., 1980, Konstantinidis ve Makris, 2005).



Şekil 2. Rijit Blok kenetli kayma mekanizması modellemesi.

Kenetlerin taşıdığı kesme kuvveti, q

$$q = A\tau \qquad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada; A kullanılan kenetin kesit alanı, τ kenetlerin kayma gerilmesi dayanımı, üg(t) yer hareketi ivmesidir.

Birbirlerine kenetlerle bağlı rijit blokların sallanma/çarpma hareketleri dikdörtgen taban ivmesi (sabit ve belli süreli ivme) için analizleri Newmark tarafından yapılmıştır (Wartman v.d., 2003, Konstandinitis ve Makris, 2005). Konu üzerinde yapılan diğer detaylı araştırmalar Yim (Yim v.d., 1980), Alsam (Alsam v.d., 1980), Zang ve Makris (Zang ve Makris, 2001) tarafından yapılmıştır. Hem kaymanın hem de sallanma/çarpma hareketinin birlikte gerçekleştiği durum için bir analoji geliştirilmemiştir.

Genel olarak incelendiğinde, bloklar arasındaki kenetler kırılıncaya kadar sütun lineer bir davranış sergiler. Bu durumda sütuna ait titreşim modları elde edilebilir. Bloklar arasındaki kenetler kırıldıktan sonra bloklar birbirleri üzerinde kayma ve sallanma/çarpma hareketi yapacaktır. Bu davranış sunulan çalışma haricindedir.

3. 2. Ayrık Sistemler İçin Sonlu Elemanlar Metodu

Rijit bloklar (tamburlar) arasındaki süreksizlik ve yüklemenin zamana bağlı olması, sistemi sınır koşulları açısından lineer olmayan hale getirmekte ve lineer olmayan analiz talep etmektedir. Tamburlar arasındaki süreksizlik dolayısı ile sütunun yatay yükler altındaki davranışı yani yük-yer değiştirme ilişkisi o andaki yük, yer değiştirme ve gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisine bağlıdır. Genelleştirilmiş yer değiştirme vektörü u, genelleştirilmiş yük vektörü P, genelleştirilmiş sütunun rijitlik matrisi K olmak üzere lineer olmayan davranışta yük-yer değiştirme ilişkisi

$$P = K(P,u)u \qquad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Yani rijitlik matrisi hem yükün hem de yer değiştirmenin bir fonksiyonudur.

Problemin çözümü için yukarıda ifade edilen (3) numaralı denklem, verilen bir u ve belli sayıda iterasyonlar için çözülür. Analiz sonucunda elde edilen yer değiştirme miktarı, verilen yer değiştirme vektörüne yakınsıyorsa analiz tamamlanır. Ayrık sistemlerin nonlineer analizi Jing ve Stephanson (Jing ve Stephanson, 2007), Zienkiewicz, Taylor ve Zhu (Zienkiewicz v.d., 2005), Munjiza (Munjiza, 2004), Thavalingam ve arkadaşlarının (Thavalingam v.d., 2001) ve Zienkiewicz ve Taylor'un (Zienkiewicz ve Taylor, 1997) çalışmalarında detaylı olarak yer almaktadır.

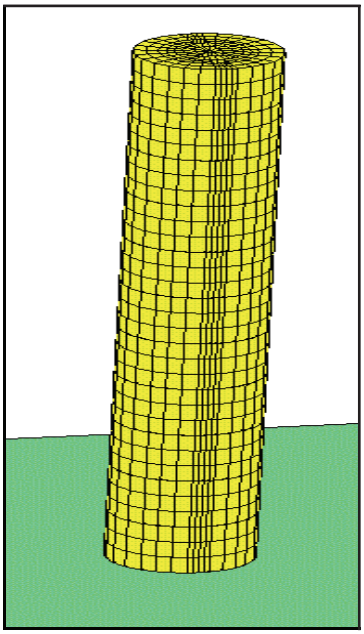
3. 3. Çok Parçalı Antik Sütun

Antik yapıların taşıyıcı sistemi genellikle mermer sütunlardır. Yapının çatı örtüsü mermer kirişlere aktarılıp sütunlar tarafından taşınmaktadır. Sütun-kiriş bağlantıları sadece kurşun kenetler ile

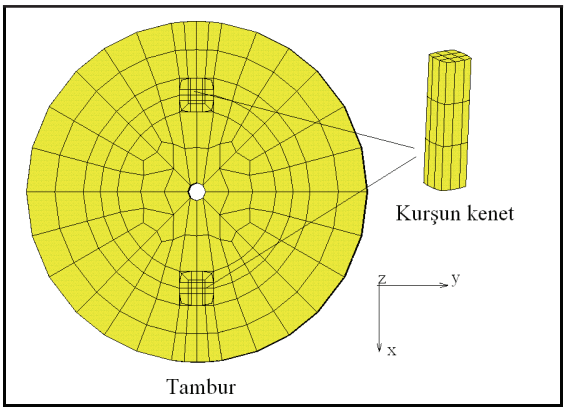
sağlandığından dolayı kirişlerin sütunlar üzerine mafsallı olarak bağlandığı kabul edilmektedir. Sütunların temele olan bağlantısı tekrar sadece kurşun kenetler ile sağlandığından dolayı sütunlar moment taşımayan ve sadece düşey yüklerin taşınmasında etkili olan elemanlar haline dönüşmektedir. Deprem yüklerinin etkimesi halinde yatay stabilite sadece yapının ağırlığının oluşturduğu atalet olarak kabul edilmektedir. Antik yapıların büyüklüğü, dolayısı ile ağırlığı dikkate alındığında bu atalet kuvvetleri oldukça büyük olmaktadır. Sunulan çalışmada analiz edilen sütun model de tabanda mafsallı olarak bağlandığı kabul edilmiştir.

3. 4. Taşıyıcı Sistemin Modellenmesi

Çalışma kapsamında sadece bir adet sütunun davranışı incelenecektir. Sonlu elemanlar ile modellemede tamburlar ve kurşun kenetler için 8 düğüm noktalı quadratik solid eleman kullanılmıştır. Bir sütunda 6172 eleman, 6928 düğüm noktası tanımlanmıştır. Her bir kurşun kenette 27 eleman ve 56 düğüm noktası tanımlanmıştır. Şekil 3'de bütün bir sütun, Şekil 4'de tambur kesiti ve bir kurşun kenetin elemanlara bölünmüş şekilleri görülmektedir. Söz konusu sütunu oluşturan tamburlar arasında kurşun kenetlerden başka bağlayıcı eleman kullanılmamıştır. Tamburların birbirlerine temas ettikleri temas yüzeylerinde, eleman süreksizlikleri vardır. Ancak bu yüzeylerde tamburların ağırlığı nedeni ile sürtünme kuvvetleri ve kenetlerden dolayı kesme kuvvetleri oluşmaktadır. Bu sürtünme ve kesme kuvvetleri Bölüm 3.1'de verilen 1 ve 2 numaralı denklemler esas alınarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 3. Sütun sonlu elemanlar modeli.



Şekil 4. Tambur kesiti ve kenet sonlu elemanlar modeli.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneylerde kullanılan mermer sütun 10 adet 15 cm çapında, 9 cm yüksekliğinde dairesel kesitli mermer tamburlardan (bloktan) oluşmaktadır. Her bir mermer tamburun kütlesi yaklaşık 4.38 kg'dır. Mermer tamburlar birbirlerine 0.5 cm çapında 4cm yüksekliğinde iki adet kurşun pim (kenet) ile bağlanmıştır.

Kurşun pimlerin çapları mermer tambur ve kurşun kenetlerin kütleleri oranında azaltılarak belirlenmiştir. Kurşun pimler önceden eritilip dökülerek hazırlanmış, daha sonra test mahallinde epoksi yapıştırıcı ile tamburlara önceden açılmış olan oyuklara yapıştırılmıştır. Epoksi yapıştırıcının tambur yüzeylerine bulaşmamasına özen gösterilmiştir. Şekil 5'de tambur ve kenetler görülmektedir.

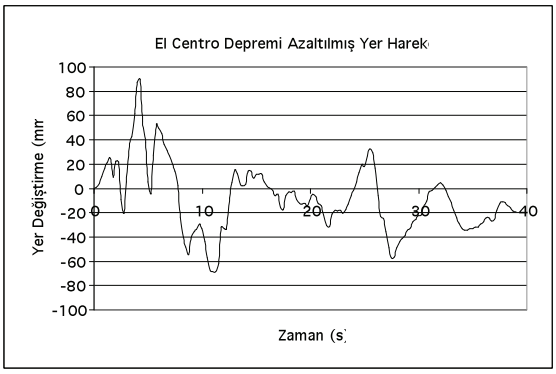


Şekil 5. Deneylerde kullanılan 1/10 ölçekte mermer tambur ve kurşun kenetler.

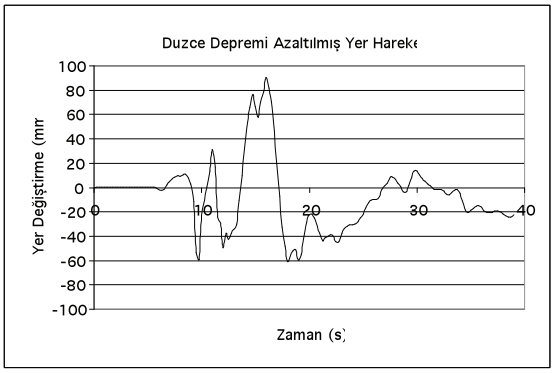
Sarsma tablasında yapılan deneyde deprem yükü olarak Düzce (Afet İşleri, Ulusal deprem kayıtları)

ve El Centro (El Centro deprem Kaydı) deprem kayıtları kullanılmıştır. Düzce depremi kaydı Bolu istasyonunda ölçülen kuzey-güney yönü hareketedir. El Centro deprem kaydı California Üniversitesi sitesinden alınmıştır.

Deneylerde kullanılan sarsma tablasının yapabileceği yer değiştirme kapasitesinin sınırlı ve, Düzce ve El Centro depremlerinin oluşturduğu yer değiştirmeler kullanılan sarsma tablasının yapabileceği en büyük yer değiştirmelerden büyük olmasından dolayı verilen titreşimlerin ivmeleri sarsma tablasının hareketini düzenleyen program tarafından azaltılmıştır. Bu düzenlemeye göre Düzce deprem ivme kaydı 0.57 ve El Centro deprem ivme kaydı 0.265 oranında azaltılarak uygulanmıştır. Uygulanan titreşimlerin yer değiştirme grafikleri Şekil 6 ve 7'de verilmiştir.

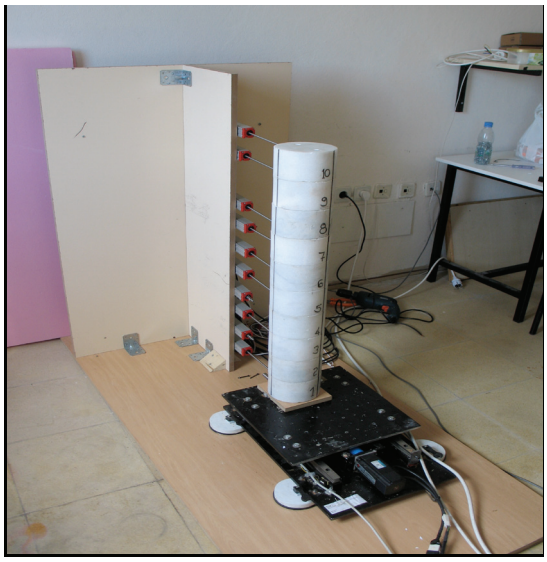


Şekil 6. Tablaya uygulanan El Centro depremi titreşimi.



Şekil 7. Tablaya uygulanan Düzce depremi titreşimi.

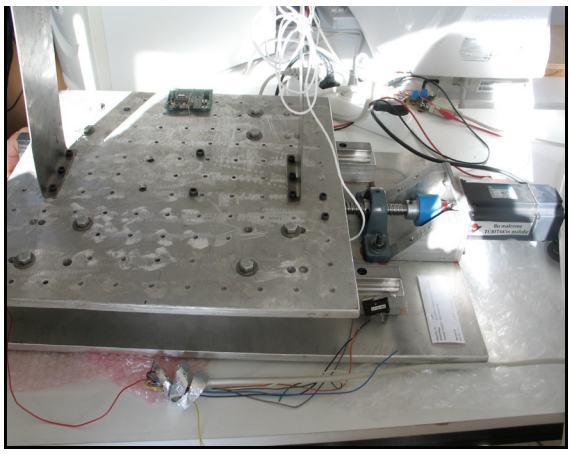
Deney kurulumunda, tamburlar tabladan itibaren yukarı doğru 1'den 10'a kadar numaralanmıştır. Sadece sekiz kanallı veri okuma kartının mevcut olmasından dolayı potansiyometreler sarsma tablasına, 2., 4., 5., 6., 7., 9. ve 10. tamburların en üst noktalarında okuma yapacak şekilde bağlanmış ve bu noktalardan okuma alınmıştır. Potansiyometrelerin bağlanacağı noktalar sürekli kolonun yatay yer hareketi etkisinde yapacağı 1. ve 2. mod davranışına uygun olarak yerleştirilmiştir. Deney kurulumu Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. Deney elemanı sütun, sarsma tablası ve potansiyometrelerin görünümü.

4. 1. Sarsma Tablasının Özellikleri

Deneysel çalışmalarımızda kullanılan sarsma tablası İYTE, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı laboratuarına ait sarsma tablasıdır. Sarsma tablasının tabla boyutu 40x40cm, ve toplam boyutları 60x40 cm'dir. Cihazın toplam ağırlığı 30 kg'dır. Sarsma tablasının genel görünüşü Şekil 9'da verilmiştir. Sarsma tablasının servo motoru 400 Watt gücündedir ve daimi olarak şaft üzerinde 1.274 Nm'lik dönme üretebilmektedir. Sonsuz vidanın adım uzunluğu 5 mm/devirdir ve buna göre 1600 N'luk kuvvet oluşturulabilmektedir. Bu kuvvet ile 80 kg'lık bir kütle 2g'lik ivme ile hareket ettirilebilir. Cihaz tamamen İYTE İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Gürsoy TURAN tarafından imal edilmiştir.



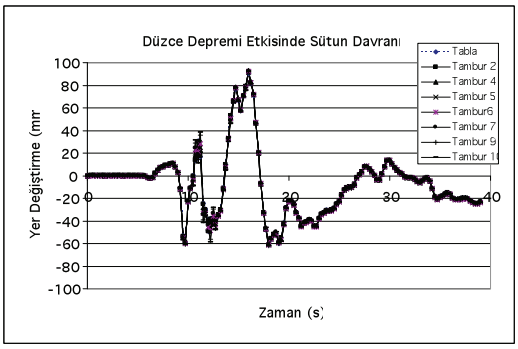
Şekil 9. Sarsma tablası genel görünüşü.

4. 2. Deney Sonuçları

Test elemanı ayni ivme etkisi altında birçok kez test edilmiştir. Bazı sarsma sonucunda kurşun kenetlerin yerlerinden sıyrıldığı gözlenmiştir. Bu sıyrılmaların

her defasında sütunun farklı bölgelerinde oluşması yatay zorlanmalar dolayısı ile değil yeteri kadar iyi yapıştırılamadığı kanaati uyandırmıştır. Kenetler iyi bağlandığı takdirde verilen ivmenin kenetleri sıyıramadığı veya koparamadığı tespit edilmiştir Doğru sonuçlar alabilmek için her test sonucunda tamburlar arasındaki kenetler kontrol edilmiş sıyrılan veya kopan kenetler tamir edilmiştir. Kenetlerin kırılmadan veya sıyrılmadan testlerin tamamlandığı ölçümler birbirlerine benzer olmuştur. Bu kontroller bütün testlerde yapılmıştır.

10 adet tamburdan imal edilmiş sütunun sarsma tablasında Düzce deprem kaydının 0.57 oranında küçültülmüş olan 3.37m/s^2 ivmeye karşılık gösterdiği davranış yer değiştirme-zaman olarak Şekil 10'da verilmiştir.

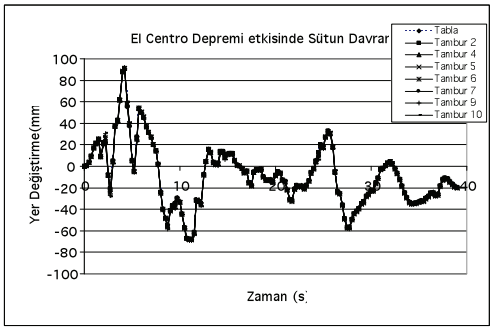


Şekil 10. Düzce depremi azaltılmış yer hareketi etkisi altında sütunun deney sonucu yer değiştirmesi.

Grafikten de anlaşıldığı gibi sütuna uygulanan titreşim etkisinde rijit blok gibi davranarak kenetlerinde herhangi bir kırılma olmadan deneyi tamamlamıştır. Uygulanan ivmeye karşılık elde edilen en büyük yer değiştirme 92.3 mm'dir.

Aynı sütunun sarsma tablasında ElCentro deprem kaydının 0.265 oranında küçültülmüş olan 2.31m/s^2 ivmeye karşılık gösterdiği davranış yer değiştirme zaman olarak Şekil 11'de verilmiştir.

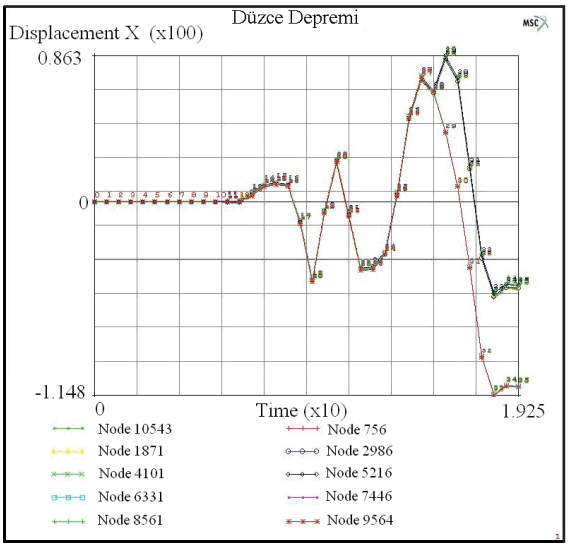
Şekil 11'de verilen grafikte görüldüğü gibi, uygulanan ivmeye karşılık sütun rijit bir blok davranışı sergilemiştir. Sütun davranışı lineerdir ve en üst (10. tambur) tamburun yaptığı en büyük yer değiştirme 91.8 mm'dir.



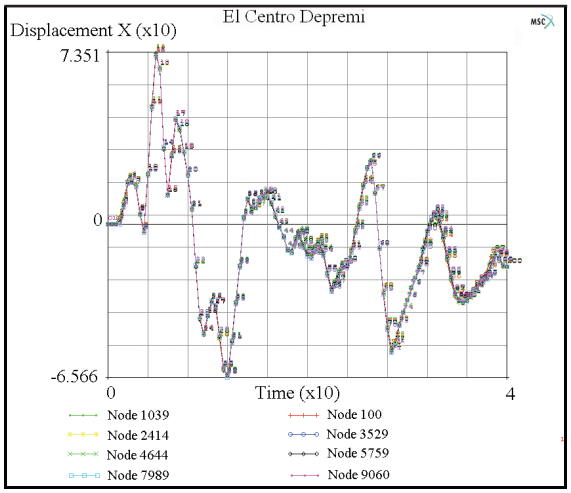
Şekil 11. El Centro depremi azaltılmış yer hareketi etkisi altında sütunun deney sonucu yer değiştirmesi.

5. ANALİTİK ÇALIŞMA

Çok parçalı sütun eleman, sütun gibi geometrik süreksizliği olan elemanların analizinde kullanılan bilgisayar programı kullanılarak da analiz edilmiştir. Analizlerde MSC Marc Mentat paket programı (MSC yazılım firması) kullanılmıştır. Bilgisayar analizlerinde Bölüm 3.4'de detayları verilen solid sonlu elemanlar ve Şekil 3 ve 4'de görülen modelleme kullanılmıştır. Sütun modellere deneylerde kullanılan titreşimler uygulanmıştır. Analiz sonucunda sütunun Düzce ve El Centro depremleri etkisinde gösterdiği davranış sırası ile Şekil 12 ve 13'de verilmiştir.



Şekil 12. Düzce depremi etkisinde sütun bilgisayar analizi sonucu yer değiştirmeleri.



Şekil 13. El Centro depremi etkisinde sütun bilgisayar analizi sonucu yer değiştirmeleri.

Şekil 12 ve 13'de verilen grafiklerde yatay eksen zamanı göstermektedir. Şekil 12'de görülen grafikte analiz 20s süre ile, Şekil 13'de ise 40s süre ile yapılmıştır. Grafiklerde yer değiştirmeler düşey eksende gösterilmiştir. Yer değiştirmelerinin gösterildiği noktalar, deneysel çalışmada potansiyometrelerin bağlandığı noktalardır.

Düzce depremi titreşimi ile yapılan bilgisayar analizlerinde en büyük ivmeye karşılık gelen en büyük yer değiştirme yaklaşık olarak 80mm'dir (Şekil 12). Sütun, 15. saniyeye kadar rijit bir blok gibi hareket etmiş sonra 6. ile 7. tambur arasındaki kenetler kırılmaya başlamış ve 20. saniyede tamamen kopmuştur. Kenetler koptuktan sonra analiz durmuştur. Kurşunların kırılması Düzce deprem kaydının en büyük ivme olan 3.37m/s^2 değerinde gerçekleşmiştir. Bu kırılma anında kurşun kenetlere gelen kesme kuvveti yaklaşık olarak 9.2N ve analiz boyunca elde edilen en büyük taban kesme kuvveti 23.24N'dur. Kenetlerdeki kırılma gerçekleştikten sonra serbest kalan üst tamburlar ile alt tamburlar arasındaki yer değiştirme farkı yaklaşık olarak 57 mm'dir (Şekil 12). Elde edilen bu yer değiştirme tamamen serbest kalan blokların hareketidir. Kırılma anından sonra analiz durduğundan serbest kalan tamburların daha sonra nasıl davranış sergileyecekleri görülememiştir.

Şekil 13'de görülen grafikte, sütunun en büyük 2,31 m/s^2 ivmeli El Centro depremi titreşimi ile sarsılması sonucunda tamburlar arasına yerleştirilen kenetlerin zarar görmediği, sütun göçmeden sarsıntının tamamlandığı görülmüştür. Bu ivmedeki bir sarsıntının kurşun kenetleri kıramadığı, dolayısı ile sütunun bütün sarsıntı boyunca lineer ve rijit blok olarak davrandığı gözlenmiştir. Şekil 13'de görüldüğü gibi tamburlar arasında göreceli olarak yer değiştirme farkı yoktur. Bu da tamburlar arasında yer alan kenetlerin çok güçlü olduğunu ve sütunun rijit blok şeklinde hareket ettiğini göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi bütün tamburlar tabla ile birlikte 2,31 m/s^2 ivmeye karşılık 73.5 mm yer değiştirme yapmış ve verilen ivmeye karşılık sütun rijit bir blok gibi davranmıştır. Bu sonuç iki şekilde değerlendirilebilir:

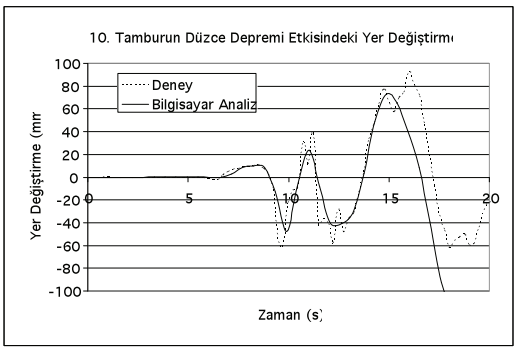
1. Uygulanan ivme sütunu etkileyecek kadar büyük değildir,

2. Tamburlar arasındaki kenetler çok güçlü tasarlanmıştır.

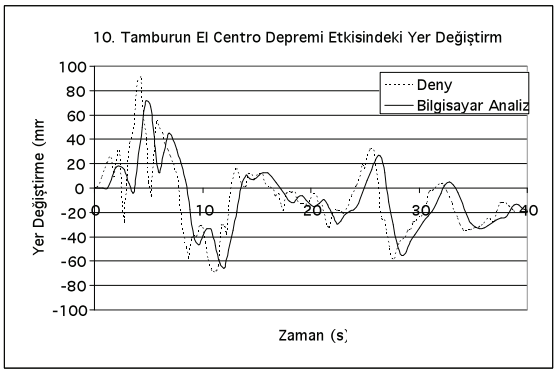
6. DENEY VE BİLGİSAYAR ANALİZLERİ SONUÇLARININ KIYASLANMASI

Düzce ve El Centro depremleri titreşimlerinin deney sonuçlarının ve bilgisayar analizlerinin sadece 10. tamburun yaptığı yer değiştirmeleri için hazırlanmış grafikler sırası ile Şekil 14 ve 15'de verilmiştir.

Düzce depremi bilgisayar analizlerinde kenetlerde kırılma oluşmasına rağmen yapılan deneylerde kenetler sağlam kalmıştır ve deney elemanlarının bilgisayar analizi modelinden daha dayanıklı hazırlanmış olduğu dolayısı ile kenetlerde kırılmalar oluşmadığı ortaya çıkmıştır (Şekil 14). Bu sonuç bir kez daha bilgisayar analizleri ile deneyler arasında kurulması beklenen ilişkide deneylerde kullanılan parametrelerin analizlere doğru olarak yansıtılması gerekliliğini ortaya koymuştur. Ayni titreşimde tekrarlanan deneylerde kenetlerde kırılma gözlenmiştir ancak hiç biri tekrarlayan şekilde olmamıştır. Kenetlerde oluşan kırılmaların yeri rasgeledir ve tekrarlanmamaktadır. Dolayısı ile kenetlerdeki kırılmaların imalat hatalarından oluştuğu varsayılmaktadır. Bu durumda eğer eleman deneylerde uygulanan titreşimi kenetlerde kırılma olmadan karşılayacak şekilde tasarlanabiliyorsa bilgisayar analizlerinde de ayni sonucun alınabilmesi için kenetlerle ve sürtünme kuvvetleri ile ilgili parametrelerin daha doğru belirlenmesi gereklidir.



Şekil 14. Düzce depremi yer hareketi etkisi altında tabla ve 10. tamburun davranışı.



Şekil 15. El Centro depremi yer hareketi etkisi altında tabla ve 10. tamburun davranışı.

Şekil 15'de verilen grafikten de görüldüğü gibi El Centro depremi yer hareketi için analiz ile deney sonuçları birbirine uyumludur. Ancak deneylerde elde edilen en büyük yer değiştirmeler bilgisayar analizinde elde edilenlerden daha küçüktür. Bu sonuç El Centro depremi titreşimi için tekrarlanmış deneylerde de elde edilmiştir. Bilgisayar analizleri ve deneylerin birbirine uyumlu olması uygulanan titreşimin sütunun rahatlıkla taşıyacağı bir yük oluşturduğu böylece hem bilgisayar analizlerinde hem de deneylerde kenetlerde kırılmaların oluşmadığı sonucunu çıkarmıştır.

El Centro depremi yer hareketi deneylerinde de Düzce depremi deneylerinde olduğu gibi tamburlar arasındaki kenetlerde kırılmalar gerçekleşmiş ancak kırılmaların her deneyde farklı yerlerde olması Düzce depremi deneyinde olduğu gibi rastlantısal olduğu sonucunu doğurmuştur.

7. SONUÇ

Sütun eleman sarsma tablasında Düzce 1999 ve El Centro 1947 deprem kayıtları kullanılarak sarsılmış ve sütunun davranışları incelenmiştir. Bazı sarsma sonucunda kurşun kenetlerin yerlerinden sıyrıldığı gözlenmiştir. Ancak bu sıyrılmaların gelişigüzel olması bağlantıların iyi yapılmadığı sonucunu doğurmuştur. Kenetler iyi bağlandığı takdirde verilen ivmenin kenetleri sıyıramadığı veya koparamadığı tespit edilmiştir. Bilgisayar analizlerinde en kuvvetli ivmenin olduğu Düzce depremi titreşimi etkisindeki analizlerde kenetler kopmuş ancak deneylerde herhangi bir kırılma ya da sıyrılma olmamıştır. Buna neden olarak deney elemanı fiziksel ve mekanik parametrelerinin bilgisayar analizlerinde kabul edilenlerden daha güçlü sonuç verecek şekilde gerçekleşmiş olmasıdır.

Hem deneylerde hem de bilgisayar analizlerinde sütun rijit bir blok gibi hareket etmiştir. Deney elemanının en büyük ivmeye karşılık gösterdiği yatay yer değiştirmeler bilgisayar analizlerinden daha büyük olarak elde edilmiştir. Bu sonuç deney elemanında kenetlerin daha elastik davrandığı sonucunu doğurmuştur. Deneyler sırasında kurşun kenetin kırılması veya kopması gerçekleşmemiştir. Deney elemanına verilen ivmenin yeteri kadar büyük olmadığı dolayısı ile tamburların hareketinin sınırlandırıldığı ve kenetlere sadece eksenel yük uygulandığı kesme yükü etkisine ulaşılamadığı sonucuna varılmıştır.

Yukarıda belirtilen sonuçlar değerlendirildiğinde antik sütunların orijinaline uygun olarak yeniden inşa edilmesi ve inşa edildikten sonra olabilecek depremler karşısında ayakta kalabilmesi için aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

1. Yapılan deneylerde sütun uygulanan tabla hareketine uyumlu davranış göstermiş ve rijit bir blok gibi davranmıştır,

2. Deney sonuçları deneylerde kullanılan bağlantı elemanlarının daha dayanıklı olduğu sonucunu vermiştir, ancak bu sonucun deney elemanlarının hazırlanırken gösterilen özen bağlantı elemanlarının sürtünme parametrelerinin analizde kullanılanlardan daha iyi olacak şekilde oluşmasına neden olmuştur. Dolayısı ile bilgisayar analizlerinde kullanılan mekanik parametreler mümkün olduğu kadar gerçeğe yakın belirlenmelidir,

3. Deneysel çalışma ile bilgisayar analizlerinde sütunun deprem yüklerinin karşılanmasında benzer davranışı göstermesi ve yakınsak yer değiştirmeler yapmasına dayanarak 1/1 ölçekteki elemanların davranışı bilgisayar analizi ile tespit edilip değerlendirilebilir ancak fiziksel ve mekanik parametreler mümkün olduğu kadar gerçeğe uygun tasarlanmalıdır,

4. Tambur aralarında yer alan kenetlerde kullanılan kurşun malzeme yeterince iyi bir malzemedir ve kenetlerin kurşunla yapılması önerilir,

5. Tamburlar arasındaki bağlantı elemanlarının uygulanmasında yeterli özen gösterilmediği taktirde kenetlerdeki sıyrılma ve kırılma gelişigüzel gerçekleşmektedir ve kırılma şekilleri konusunda doğru tespitler yapılamaz,

6. İdeal hallerde kenetlerdeki sıyrılma ve kırılmalar tabana yakın olacak şekilde sütunun 1/3 bölgesinde gerçekleşmektedir.

8. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 107M202 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Laboratuar çalışmalarında İYTE İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi sayın Yrd.Doç.Dr. Gürsoy TURAN'ın kişisel desteği ile Yapı Laboratuarı cihazları kullanılmıştır. Kurumlara ve kişilere teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Kayıt Ağı, Çanakkale Kayıt İstasyonu.

Aslam, M., Godden, W.G., Scalise, D.T. 1980. Earthquake rocking response of rigid bodies, Journal of Structural Division of ASCE, 106 (ST2). 377-392.

Cundall, P.A. 1971. Computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. Proceedings of the Symposium International Society Rock Mechanics, Vol. 1, Paper No. II-8, Nancy, France. El Centro deprem kaydı, http://www.vibrationdata.com/elcentro.dat

Jing, L. and Stephansson, O. 2007. Fundamentalsof discrete element methods for rock engineering: theory and applications, Developments in geotechnical Engineering, Elsevier Science Publishing.

Konstantinidis, D. and Makris, N. 2005. Seismic response analysis of multidrum classical columns, Earthquake Engineering Structural Dynamics. (34), 1243-1270.

MSC Marc Mentat, MSC Software Corporation, Santa Ana, California, ABD.

Mouzakis, H. P., Psycharis, I. N., Papastamatiou, D. Y., Carydis, P. G., Papantonopoulos, C. and Zambas, C. 2002. Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column, Earthquake Engineering and Structural Dynamics. (31),1681-1698.

Munjiza, A. 2004. The combined finite-discrete element method, Wliley Publishers.

Papantonopoulos, C., Psycharis, I.N., Papastamatiou, D.Y., Lemos, J.V. and Mouzakis, H. 2002. Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the distinct element method, Earthquake Engineering and Structural Dynamics. (31), 1699-1717.

Papastamatiou, D.Y. and Psycharis, I.N. 1993. Seismic response of classical monuments. Terra Nova. (5), 591-601.

Priestley, M.J.N., Evison, R.J. and Carr, A.J. 1978. Seismic response of structures free to rock on their foundation, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering. 11 (3), 141-150.

Psycharis, I.N., Papastamatiou, D.Y. and Alexandris, A.P. 2000. Parametric investigation of the stability of classical columns under harmonic and earthquake excitations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics. (29), 1093-1109.

Tanigucki, T. 2001. Non linear response of rectangular rigid bodies subjected to horizontal and vertical ground motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics. (31), 1481-1500.

Thavalingam, A., Bicaic, N., Robinson, J.I. and Ponniah, D.A. 2001. Computational framework for discontinuous modeling of masonry arch bridges, Computers and Structures. 79 (19), 1821-1830.

Wartman, J., Bray, D.J. and Seed, R.B. 2003. Inclined Plane Studies of the Newmark Sliding Block Procedure, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. (129), 8.

Wong, C.M. and Tso, W.K. 1989. Steady state rocking response of rigid blocks, part 2: Experiment, Earthquake Engineering and Structural Dynamics. (18), 107-120.

Yim, C.K., Chopra, A.K. and Penzien, J. 1980. Rocking response of rigid blocks to earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics. (8), 565–587.

Zhang, J. and Makris, N. 2001. Rocking response of free-standing blocks under cycloidal pulses, J. of Engineering Mechanics (ASCE). 127 (5), 473-483.

Zienkiewicz, O.S. and Taylor, R.L. 1997. The finite element patch test revisited a computer test for convergence, validation, and error estimates, Computer methods in Applied Mechanics and Engineering. 149 (1-4), 223-254.

Zienkiewicz, O.S., Taylor, R.L. and Zhu, J.Z. 2005. Discrete element methods. The Finite Element Method Set, sixth ed. 245-277.