

Benzeşik Dinamik Deney Tekniği ve Bir Uygulama

Ercan YÜKSEL*
Hasan ÖZKAYNAK**
Melih SÜRMEİ***

ÖZ

Benzeşik dinamik deney tekniği, numunelerin deprem etkisindeki davranışını belirlemek üzere, etkileşimli olarak gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çözümü kapsamaktadır. Deneysel olarak belirlenen numune tepki kuvveti ile öngörülen kütle ve viskoz sönüm özellikleri kullanılarak, sistemin dinamik denge denklemi oluşturulmakta ve seçilmiş bir sayısal integrasyon yöntemi ile bir sonraki adımda numuneye etkitilecek yerdeğiştirme vektörü belirlenmektedir. Yükleminin duraklamalı olarak uygulanması sebebi ile numune üzerinde hasar oluşumu ve gelişimi izlenebilmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemler için geliştirilen benzeşik dinamik deney algoritması, betonarme çerçeve deneylerinde kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Benzeşik dinamik deney, dinamik benzeri yükleme, hibrit deney.

ABSTRACT

Pseudo Dynamic Testing Methodology and an Application

Pseudo dynamic testing methodology which aims to simulate the earthquake behavior of specimens consists of both numerical and experimental analyses in an interactive manner. The dynamic equilibrium equation is generated with the restoring forces measured from the specimen and the predefined mass and viscous damping properties. The displacement vector to be applied to the specimen in the next step is calculated by a proper numerical integration technique. Due to application of the loading function in a quasi-static manner, local behavior and damage propagation of the test structure could be traced. The pseudo-dynamic testing algorithm developed for single-degree-of-freedom systems was used in the tests of reinforced concrete frames.

Keywords: Pseudo dynamic test, simulated dynamic loading, hybrid test.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 31.03.2009 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2011 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - yukselerc@itu.edu.tr

** Okan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İstanbul – hasan.ozkaynak@okan.edu.tr

*** İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul – melihsurmeli@yahoo.com

1. GİRİŞ

Benzeşik dinamik deneş tekniği 1970 lerden günümüze kadar gelişimini sürdürmüştür. Seçilmiş bir ivme kaydı etkisinde, numunenin deneşsel ve sayısal çözümünün etkileşimli olarak birlikte gerçekleştirildiği hibrit bir deneş yöntemidir. Numunenin değişen rijitlik özellikleri doğrudan ölçülmekte ve dinamik denge denklemleri sayısal olarak çözülmektedir. Sarsma tablası deneylerine göre oldukça ekonomik ve kolay uygulanabilen bir yöntem olduğundan, farklı özellik ve boyutlardaki yapıların deşrem etkisindeki davranışlarının belirlenmesinde tercih edilmektedir.

Benzeşik dinamik deneş tekniği 1969 yılında, tek serbestlik dereceli bir sistemin deşrem yükleri etkisinde incelenmesi ile ortaya çıkmıştır, [1]. Sayısal bilgisayarların ve servo-kontrol sistemlerinin gelişmesiyle, Takanashi [2] benzeşik dinamik deneş tekniğini bugünkü haline yaklaştırmıştır. Sonraki dönemde yapılan çalışmalar ile benzeşik dinamik deneş tekniğinin, sarsma tablası deneş tekniğine karşı etkin ve güçlü bir alternatif olması sağlanmıştır, [3]. Dinamik denge denkleminin adım adım sayısal çözümü ve deneyin uygulanması işlemleri birlikte ve etkileşimli olarak gerçekleştirilmektedir. Deneş numunesinin kütle ve viskoz sönüm özellikleri giriş bilgisi olarak verilmektedir. Sayısal integrasyon ile hesaplanan hedef yerdeğiştirme, hassas optik yerdeğiştirme ölçer kontrolünde numuneye tatbik edilmektedir. Numunenin uygulanan yerdeğiştirmeye cevabı da hidrolik veren gövdesine bağlı olan yük ölçer ile okunup, kontrol ünitesi üzerinden bilgisayar yazılımına gönderilmektedir, [4].

Mevcut kaynaklardan yararlanarak; tek serbestlik dereceli sistemlerin dinamik benzeri yükler etkisinde incelenebilmesi için, basit ancak etkin çalışan bir benzeşik dinamik deneş sisteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Oluşturulan deneş düzeneği ve algoritma ile betonarme çerçevelerin güçlendirilmesini konu alan bir deneşsel çalışma tamamlanmış olup, burada sadece yalın çerçeve sonuçlarına yer verilmiştir.

2. BENZEŞİK DİNAMİK DENEŞ ALGORİTMASI

İncelenecek yapı sistemine ait dinamik denge denklemleri matris formunda (1) de verilmiştir.

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + \{\bar{f}\} = -[m]\{1\}\ddot{x}_g \quad (1)$$

Bu denklemdede x , m , c , \bar{f} ve \ddot{x}_g sırası ile yerdeğiştirme, kütle, viskoz sönüm, numune tepki kuvveti ve zemin ivmesine karşı gelmektedir. Bu denklem takımı, Δt hesap adım aralıkları için adım adım çözülmektedir. (i). adım için denklem takımı (2) de verilmiştir.

$$[m]\{\ddot{x}_i\} + [c]\{\dot{x}_i\} + \{\bar{f}_i\} = -[m]\{1\}\ddot{x}_{g,i} \quad (2)$$

Geliştirilen algoritmada, *merkezi farklar yöntemi* kullanılarak sayısal integrasyon gerçekleştirilmiştir, [5]. Hız ve ivme büyüklükleri, merkezi fark ifadeleri ile yerdeğiştirmelere bağlı olarak (3) nolu denklemden hesaplanabilir.

$$\{\dot{x}_i\} = \frac{\{x_{i+1}\} - \{x_{i-1}\}}{2\Delta t} \quad \{\ddot{x}_i\} = \frac{\{x_{i+1}\} - 2\{x_i\} + \{x_{i-1}\}}{(\Delta t)^2} \quad (3)$$

(3) numaralı denklemler, (2) de yerine konulduğunda ($i+1$). *adım*a adıma ait yerdeğiştirme büyüklüğü hesaplanabilmektedir.

$$\{x_{i+1}\} = \frac{2[m]\{x_i\} + \left(\frac{\Delta t}{2}[c] - [m]\right)\{x_{i-1}\} - (\Delta t)^2 \left(\{\bar{f}_i\} + [m]\{1\}\ddot{x}_{gi}\right)}{[m] + \frac{\Delta t}{2}[c]} \quad (4)$$

(4) nolu denklemde, ($i+1$). *adım*a ait yerdeğiştirme büyüklüğü o adıma kadar hesaplanmış büyüklüklere bağlı olarak belirlenebilmektedir. Bu durum, merkezi farklar yönteminin genel olarak çok kararlı olmasını sağlamaktadır. Hesaplanan $\{x_{i+1}\}$ yerdeğiştirmesi, çok yüksek çözünürlüklü optik yerdeğiştirme ölçer kontrolünde numuneye etkilenmektedir. Hedef yerdeğiştirmeye ulaşıldığında, numunedeki tepki kuvvetleri ölçülmektedir. Doğrusal olmayan davranıştan kaynaklanan çevrimsel sönüm deneysel olarak dikkate alındığı için, c sadece viskoz sönüm kuvvetlerini temsil etmektedir, [6].

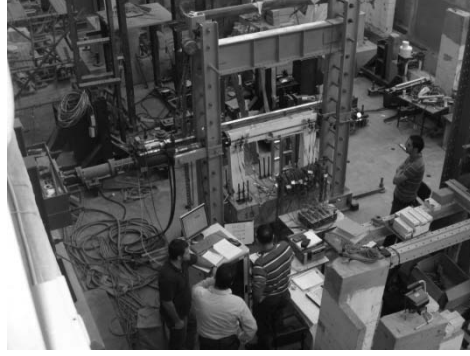
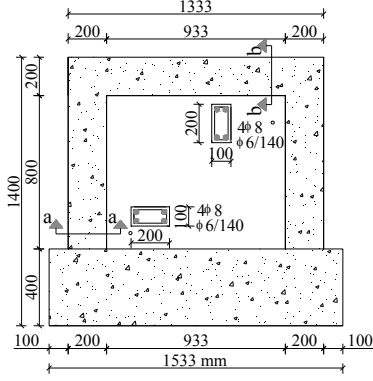
Benzeşik dinamik deneyin uygulanması için gereken toplam süre, her adımda harcanan $t_{adım}$ zamanlarının toplamı kadardır. Her adımda gerçekleştirilen görevler; bir önceki adımın hareket bitiminin beklenmesi, tanımlanmış bazı özel görevlerin gerçekleştirilmesi, veri kaydının alınması, hareket sınırlarının kontrol edilmesi, hareket denkleminin çözülmesi, hidrolik verenin hedefe gitmesi şeklinde sıralanabilir, [7].

3. BETONARME ÇERÇEVE DENEYLERİ

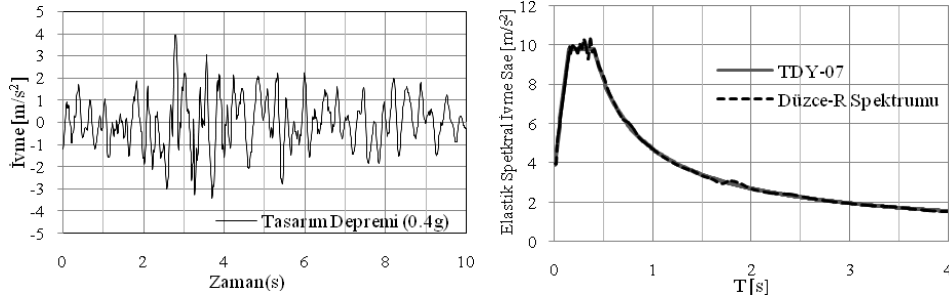
Geometrik özellikleri Şekil 1 de verilen iki adet özdeş betonarme çerçeve; iki farklı atalet kuvveti için, farklı genliklerdeki ivme kayıtları etkisinde benzeşik dinamik deney tekniği ile incelenmiştir, [5]. Numunelerde standart beton basınç dayanımı 17.3 MPa, enine ve boyuna donatı akma dayanımı da 478 MPa olarak gerçekleşmiştir. Numuneler, rijit temelleri ile Şekil 1 deki deney düzeneğine ankastrelik koşullarını sağlayacak biçimde bağlanmıştır. Yatay yüklemeyi, numune giriş eksenine hizasında bağlı olan ± 280 kN ve ± 94 mm kapasiteli DARTEC hidrolik veren yapmaktadır.

Düzce İvme Kaydının [8] (8-18) saniyeler arasındaki bölümünün, Deprem Yönetmeliğinde [9] Z2 türü zeminler için tanımlanan tasarım ivme spektrumuna benzer spektrum verecek biçimde değiştirilmesiyle elde edilen *DUZCE-R* deprem kaydı kullanılmıştır, [10]. Şekil 2 den görüldüğü gibi, kaydın en büyük ivme değeri $PGA=0.4g$, nokta adım aralığı 0.01 saniyedir.

Yapılan ön deneylerde, her iki betonarme çerçevenin *başlangıç yatay rijitliği* 9.0 kN/mm, *viskoz sönüm oranı* da %5 olarak belirlenmiştir. Bu değerler; geliştirilen benzeşik dinamik deney uygulama programında giriş bilgisi olarak kullanılmıştır. Hesap adım aralığı 0.005 saniye olarak seçilmiştir. Birinci numune $M_1=0.0085 \text{ kNsn}^2/\text{mm}$, ikinci numune ise $M_2=0.0221 \text{ kNsn}^2/\text{mm}$ lik atalet kuvveti etkisinde denenmiştir.



Şekil 1 Numune geometrisi ve kullanılan deney düzeneği

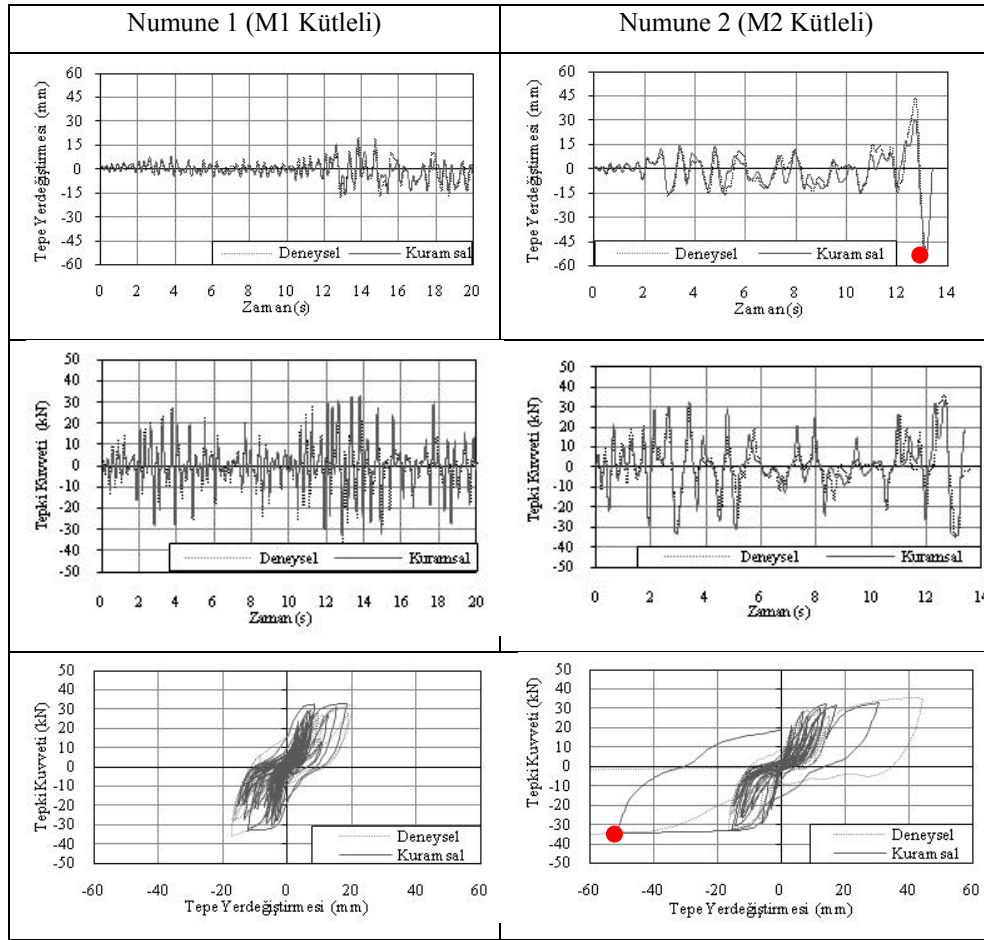


Şekil 2 DUZCE-R ivme kaydı ve spektrumu

Deney sonuçları ile karşılaştırmak üzere, betonarme çerçevelerin kuramsal çözümü IDARC2D programı [11] ile gerçekleştirilmiştir. Kolon ve kiriş moment eğrilik ilişkilerinin zarfları iki doğru parçalı olarak dikkate alınmıştır. Tersinir yükler etkisindeki kesit davranışı, programda mevcut olan SHM (*smooth hysteretic model*) ile temsil edilmiştir. Modelde kullanılan davranış parametreleri; $\alpha=2.5$, $\beta_1=\beta_2=0.12$, $R_s=0.23$, $\sigma=0.11$, $\lambda=0.03$, $N=2$, $\eta=0.50$ olarak seçilmiştir. $\alpha=2.5$ değeri, büyük rijitlik azalımına, $\beta_1=\beta_2=0.12$ değerleri ise küçük dayanım azalımına karşı gelmektedir. $R_s=0.23$, $\sigma=0.11$, $\lambda=0.03$ değerleri de kayma oyulması ile ilgili olup, orta düzeydeki kayma oyulmasını karşı gelmektedir. $N=2$ parametresi, doğrusal bölgeden ayrılma biçimini kontrol eden bir üssel bağıntıda kullanılmaktadır. $\eta=0.5$ değeri, boşaltma eğrisinin yaklaşık olarak doğrusal oluşmasını sağlamaktadır. Hesap adım aralığı, ivme kayıt aralığının 200 de biri olarak seçilmiştir. Ayrıca kritik sönüm oranı olarak 0.05 değeri kullanılmıştır.

Şekil 3 de yer alan tepe yerdeğiştirmesi ve tepki kuvveti geçmişlerinin 0-10 saniye arası bölümleri $PGA=0.2g$, 10-20 saniye arasındaki bölümleri ise $PGA=0.4g$ durumuna karşı gelmektedir. Birinci numunede; $PGA=0.2g$ yüklemesinde oluşan en büyük yatay tepki kuvveti ve tepe yerdeğiştirmesi 28.03 kN ve 7.06 mm olmuştur. Eleman uçlarında, genişliği

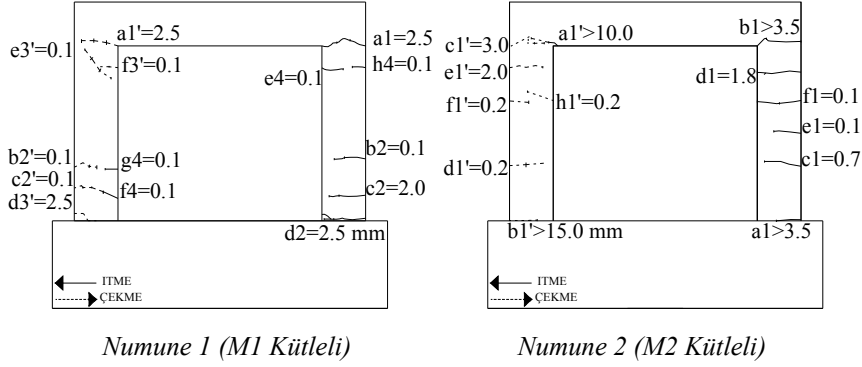
0.2 mm düzeyinde olan eğilme çatlakları gözlenmiştir. PGA=0.4g yüklemesinde 32.80 kN kuvvet ve 18.20 mm tepe yerdeğiştirmesi elde edilmiştir. Kolon uçlarında genişliği 2.5 mm ye varan eğilme çatlakları oluşmuştur. İkinci numunede; PGA=0.2g yüklemesinde, itme durumunda 29.25 kN kuvvet ve 13.22 mm tepe yerdeğiştirmesi, çekme durumunda ise -32.50 kN kuvvet ve -16.64 mm tepe yerdeğiştirmesi elde edilmiştir. Çekme kolonu alt ucunda 3.5 mm genişliğinde eğilme çatlakđı gözlenmiştir. PGA=0.4g durumunda; itmede 44.06 kN kuvvet ve 35.38 mm tepe yerdeğiştirmesi, çekmede ise -35.30 kN kuvvet ve -58.00 mm tepe yerdeğiştirmesi elde edilmiştir. Çatlak genişliklerinin kolon alt ucunda 15 mm ye, kolon üst ucunda ise 10 mm ye ulaştığı görülmüştür.



Şekil 3 Yerdeğiştirme ve numune tepki kuvveti geçmişleri

Kuramsal çözümlemede ulaşılan tepe yerdeğiştirmesi ve tepki kuvveti geçmişleri de Şekil 3 de yer almaktadır. Grafiklerden izlendiği gibi kuramsal sonuçlar genel olarak deneysel

sonuçlar ile örtüşmektedir. Numune 2 de; $PGA=0.4g$ için, 2.73 saniyede en büyük ivme etkimiş ve numune göçme durumuna erişmiştir, Şekil 3. $PGA=0.4g$ ivme kaydının etkilenmesinden sonra her iki numunedeki ulaşılan hasar durumları da Şekil 4 de verilmiştir.



Şekil 4 $PGA=0.4g$ için gözlenen hasar durumu

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yapı sistemi veya yapısal elemanların deprem etkisindeki davranışlarının daha gerçekçi olarak belirlenmesi için kullanılan benzeşik dinamik deney tekniği tanıtılmıştır. Benzeşik dinamik deneyin uygulanması için, tek dinamik serbestlik dereceli sistemlerde kullanılabilen bir algoritma geliştirilmiştir.

İki adet betonarme çerçeve, iki farklı atalet kuvveti için, benzeşik dinamik deney ile incelenmiştir. Seçilmiş ivme kaydı farklı genlikler ile etkiltilerek, numunelerin sergiledikleri davranışlar karşılaştırılmıştır. İncelenen deney numunelerinin IDARC2D programı ile yapılan kuramsal çözümlenmeleri, deneysel sonuçlar ile uyumlu sonuçlar vermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma; 106M050 nolu TÜBİTAK ve 31966 nolu İTÜ-BAP projelerinin sağladığı maddi imkânlar ile İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. İlgili kuruluşlara destekleri için teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Hakuno, M., Shidawara, M., Hara, T., Dynamic Destructive Test of a Cantilever Beam, Controlled by an Analog-Computer, Transactions of the Japan Society of Civil Engineers. 171:1-9, 1969.

- [2] Takanashi, K., Non-linear Earthquake Response Analysis of Structures by a Computer Actuator on-line System, Transactions of the Architectural Institute of Japan. 229: 77-83, 1975.
- [3] Shing, P.B., Nakashima, M., Bursi, O.S., Application of Pseudo-dynamic Test Method to Structural Research, Earthquake Spectra, 12(1):29-56, 1996.
- [4] Mahin, S.A., Shing, P.B., Pseudo-dynamic method for seismic testing, Journal of Structural Engineering, 111(7):1482-1503, 1985.
- [5] Tako, E.S., Bölme Duvarlı Betonarme Çerçevelerin Deprem Davranışlarının Belirlenmesinde Statik ve Benzeşik Dinamik Deney Karşılaştırmaları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [6] Williams, M.S., Blakeborough, A., Laboratory Testing of Structures Under Dynamic Loads: An Introductory Review, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 359: 1651-1669, 2001.
- [7] Magonette, G., Digital Control of Pseudo-Dynamic Tests, Experimental and Numerical Methods in Earthquake Engineering, Donea J, Jones PM (eds), Kluwer: Dordrecht, The Netherlands, 63-69, 1991.
- [8] PEER Strong Motion Data Base <http://www.peer.berkeley.edu/smcat/search.html>
- [9] TDY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [10] Oasys Sigraph, A Program for Generation, Manipulation and Graphical Display of Tabular X-Y Data, Oasys Ltd., 2006.
- [11] Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Valles, R.E., IDARC2D v6.1, A Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, USA, 1994.