

RİJİT OBJELERİN DEPREM ETKİSİYLE SALLANMA HAREKETLERİ

ROCKING RESPONSE OF THE RIGID BLOCKS UNDER EARTHQUAKE EXCITATION

Uğur Kadakal¹, Mustafa Erdik²

SUMMARY

In this study rocking response of rigid blocks is studied analytically and experimentally. The governing equations of rocking motion are formulated based on three parameters: equivalent circular frequency of the block (p), its slenderness ratio (r), and the coefficient of restitution (e). Analytical solutions to rocking response problem under constant acceleration and half sine wave pulse excitations are determined. Experimental studies on the problem are fulfilled by a shaking table setup, thus providing the opportunity for comparison between experimental and analytical results. The effect of p , r and e on the overall response of a block is also studied.

ÖZET

Rijit objelerin deprem altındaki davranışları genel olarak sallanma, kayma, ya da hem sallanma hem kayma şeklinde tanımlanabilirler. Çok şiddetli depremlerde düşey ivmenin $1g$ 'yi geçtiği durumlarda zıplama hareketi de bunlara dahil edilebilir. Bu çalışmada davranışlarından en tehlikeli ve devrilme ile sonuçlanabileni olan sallanma hareketi üzerinde durulmuştur. Öncelikle sallanma hareketinin denklemleri çıkartılmış, ardından lineer olmayan bu denklemlerin çözüm yöntemleri sunulmuştur. Bu yöntemler doğrultusunda bir bilgisayar programı yazılarak sarsma masası deneyleri ile doğruluğu test edilmiştir. Bilgisayar programı sayesinde farklı depremler altında değişik objelerin sallanma hareketleri incelenmiş ve bu hareketin genliğini düşürebilmek doğrultusunda sistem parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Bu doğrultuda sallanma hareketinin etken parametrelerini değiştirerek devrilme riskini azaltacak yöntemler irdelenmiştir.

¹ Arş. Gör. Northeastern Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Boston, A.B.D.

² Prof. Dr. B.Ü., K.R.D.A.E., Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, Çengelköy, İstanbul

GİRİŞ

Son yıllarda rijit bir zemin üzerinde duran rijit objelerin deprem hareketi altındaki davranışları konusunda bir çok araştırmalar yapılmıştır. Bu konuya özel bir önem verilmesinin nedenlerinden biri kuşkusuz ABD ve Japonya'daki müzelerde korunan tarihi eserlerin deprem sırasında büyük zarar görmeleridir. Japonyada özellikle Tokachi depremi sırasında müzelerde sergilenen eserlerin büyük zarar görmesi üzerine Tokyo Milli Müzesi ve Japonya Kültür Bakanlığı tarafından bu eserlerin deprem esnasında görebilecekleri zararı minimuma indirmek doğrultusunda çalışmalar başlatılmıştır (Washizuka, 1985). Benzer çalışmalar özellikle 1989 Loma Prieta depremi sırasında müzelerdeki eserlerin 10 milyon doların üzerinde bir zarar gelmesi üzerine ABD'de başlatılmıştır (Nigbor, Masri, Agbalian, 1994). Yapılan çalışmaların sonuçları doğrultusunda Los Angeles şehrindeki Paul Getty müzesindeki eserlerin korunması amacıyla bazı önlemler alınmıştır. Tokyo ve Los Angeles şehirleri ile karşılaştırıldığında deprem riski daha az olmasına rağmen İstanbul şehri barındırdığı müzeler ve sergilenen eserler açısından belkide dünyanın en zengin şehirlerinden biridir. Bu nedenle bu müzelerdeki eserlere deprem zararlarına karşı en az Los Angeles ve Tokyo'dakiler kadar hassasiyetle korunmalıdırlar.

HAREKET DENKLEMİ

Şekil.1 de görülen bloğun yanal yönde a_h ve düşey yönde a_v yer ivmesine maruz kaldığında sallanma

$$a_h > \frac{g}{r} \left(1 + \frac{a_v}{g}\right) \quad (1)$$

burada r bloğun narinlik oranı (h/b) olarak tanımlanmıştır. Sallanma hareketi başladıktan sonra blok O ve O' noktaları etrafındaki sallanmayı sırasıyla aşağıdaki denklemler doğrultusunda yapar

$$I_o \ddot{\theta} + MgR \left(1 + \frac{a_v}{g}\right) \sin(\theta_c - \theta) = -MRa_h \cos(\theta_c - \theta) \quad (2)$$

$$I_o \ddot{\theta} - MgR \left(1 + \frac{a_v}{g}\right) \sin(\theta_c + \theta) = -MRa_h \cos(\theta_c - \theta) \quad (3)$$

burada I_o bloğun kütle atalet momenti, M kütlesi, θ_c ise aşağıdaki şekilde tanımlanan kritik

dönme açısıdır.

$$\theta_c = \tan^{-1}\left(\frac{1}{r}\right) \quad (4)$$

Denklem 2 ve 3 ile tanımlanan hareket sırasında dönme açısı θ' 'nin kritik açığı geçtiği durumda blok devrilmiş olarak kabul edilebilir. Denklem 2 ve 3 daha basit ve tek bir denkleme dönüştürülebilir

$$\ddot{\theta} + p^2 S(\theta) \left(1 + \frac{a_v}{g}\right) \sin(\theta_c - |\theta|) = -p^2 \frac{a_h}{g} \cos(\theta_c - |\theta|) \quad (5)$$

burada $S(\theta)$ signum fonksiyonudur ve θ' 'nin pozitif olduğu durumlarda 1 negatif olduğu durumlarda -1 değerini alır. Yine aynı denklemdeki p ise eşdeğer açısal frekans olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$p^2 = \frac{MgR}{I_o} \quad (6)$$

Sallanma hareketi esnasındaki enerji kaybı açısal dönme θ' 'nin sıfıra eşit olduğu an yani bloğun hem O hemde O' noktasının yerle temasta olduğu çarpışma esnasında anlık olarak gerçekleşir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır

$$\dot{\theta}^+ = e\dot{\theta}^- \quad (7)$$

burada θ^+ çarpışmadan hemen sonraki, θ^- ise çarpışmadan hemen önceki açısal hızları ifade eder. Denklemdeki e ise sıçrama katsayısı olarak adlandırılır ve çarpışma anındaki enerji kaybının bir göstergesidir. Şunu tekrar belirtmek gerekir ki, sallanma hareketi sırasında enerji kaybı sadece çarpışma anında oluşur, diğer anlarda enerji kaybı yoktur.

Denklem 5 lineer olmamasından dolayı 4'üncü derece Runge-Kutta integrasyon algoritması kullanılarak çözülmüştür (Kadalkal, 1994). Stabilite problemleri dolayısıyla integrasyon zaman aralığı 0.001 saniye kadar küçük bir değer seçilmesi zorunda kalmıştır. Yazılan bilgisayar programı bazı basit analitik çözümler kullanılarak ve özellikle sarsma tablası testleri (Kadalkal, 1994, Kadalkal, Durukal, Erdik, 1994) sonuçlarına dayanılarak test edilmiş ve denklem 5 ile 7'da tanımlanan hareketi yüksek hassasiyetle tanımladığı görülmüştür. Analitik sonuçların deney sonuçları ile karşılaştırılması sırasında karşılaşılan zorluklardan birisi sıçrama katsayısı (e) değerinin doğru olarak tespit edilememesi, bir diğeri de denklem 5'in dayandığı varsayımlardan biri olan sadece salınım hareketi varsayımının deneyler sırasında her zaman sağlanamamasıdır. Özellikle yüksek frekanslı

salınımlar sırasında sallanma hareketinin yani sıra kayma hareketi de gözlenmektedir.

PARAMETRİK ÇALIŞMA

Sallanma hareketinin parametreleri olan narinlik oranı r , eşdeğer açısız frekans p ve sıçrama katsayısı e 'nin, aynı yer hareketi altında sallanma hareketinin genlikleri üzerine etkileri bu bölümde incelenmiştir. Bu amaçla her bir parametrenin etkisi o parametreyi değiştirip diğerlerini sabit tutmak yoluyla araştırılmıştır. Sonuçları daha rahat karşılaştırabilmek için direkt açısız dönme (θ) yerine boyutsuz olan açısız dönmenin kritik açığına oranı (θ/θ_c) hesaplanmıştır. Bu oranın 1 değerine eşit olduğu anda bloğun devrildiği varsayılmıştır. Input olarak şekil.2 deki deprem hareketi kullanılmıştır.

Narinlik oranı r , direkt olarak hareket denkleminde girmemesine rağmen devrilme kriteri olan kritik açığı (θ_c) tanımladığından dolayı önemlidir. Daha önceki araştırmacıların da gösterdiği gibi narinlik oranının artması, stabiliteyi azaltmaktadır (Aslam, 1980). Burada eşdeğer açısız frekansı ($p=4$) ve sıçrama katsayısı ($e=0.925$) değerleri sabit olup narinlik oranı değişen ($r=4, 4.5, 5, 5.5, \dots, 9, 9.5, 10$) bloklar için maksimum genlikler hesaplanmıştır (şekil.3). Sonuçlar göstermiştir ki, genel olarak narinlik oranındaki artış sallanma genliklerini arttırmaktadır.

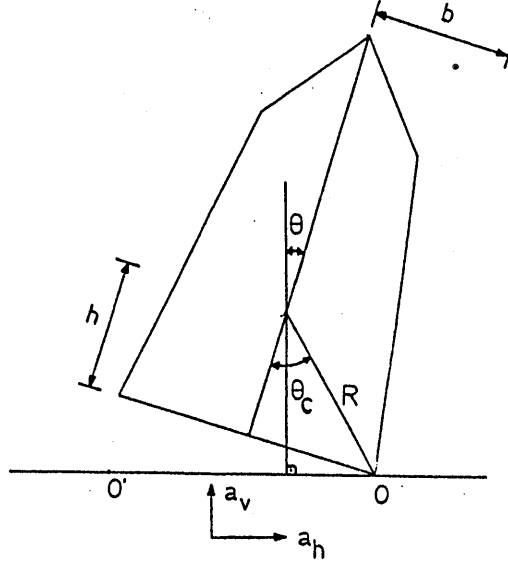
Sallanma hareketinin bir diğer önemli parametresi de eşdeğer açısız frekans (p) değeridir ve boyut parametresi olan R 'nin karekökü ile doğru, kütle atalet momentinin karekökü ile ters orantılıdır. Bu nedenle bir boyut parametresi olarak düşünülebilir. Genellikle bloğun büyüklüğü arttıkça eşdeğer açısız frekans (p) azalır. Direkt olarak formül 4'deki hareket denkleminde girdiği için sallanma genlikleri üzerine etkisi büyüktür. Birçok araştırmacı (Yim, 1980, Aslam, 1980, Tso ve Wong, 1989) göstermiştir ki eşdeğer açısız frekans arttıkça sallanma genliğide artmaktadır. Ya da bloğun büyüklüğü arttıkça (narinlik oranı sabit), stabilitesi de artmaktadır. Şekil.2'deki depremin narinlik oranı ($r=6$) ve sıçrama katsayısı ($e=0.925$) sabit olup eşdeğer açısız frekans değerleri değişen ($p=0.4, 0.8, 1.2, 1.6, \dots, 7.2, 7.6, 8.0$) bloklara uygulanması sonucu elde edilen maksimum genlikler karşılaştırılmıştır. Şekil.4'den açıkça görülmektedir ki p değerinin artması sallanma genliklerini arttırmaktadır.

Sıçrama katsayısı da enerji kaybını tanımladığı için sallanma genlikleri üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Daha öncede açıklandığı gibi sadece çarpışma esnasında anlık olarak enerji kaybı oluşmaktadır. Bu nedenle sallanma genlikleri üzerindeki etkisi diğer iki parametreye göre daha az olacağı varsayılabilir. Yim (1980) ve Aslam (1980) in çalışmaları da bu varsayımın doğruluğunu göstermektedir. Diğer iki parametre için olduğu gibi aynı yer hareketi altında, narinlik oranı ($r=6$) ve eşdeğer açısız frekans ($p=4$) sabit bırakılıp, sıçrama katsayısı değiştirilerek ($e=0.2, 0.3, \dots, 0.9, 0.925, 0.950, 0.975, 1.0$) maksimum sallanma genlikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir (şekil.5). Sonuçlar göstermektedir ki enerji kaybının olmadığı durum ($e=1$) hariç, sıçrama katsayısının sallanma hareketi üzerine etkisi çok düşüktür. Şekil.3, 4, 5 için kullanılan analiz sonuçları sırasıyla (şekil.6), (şekil.7) ve (şekil.8)'den görülebilir.

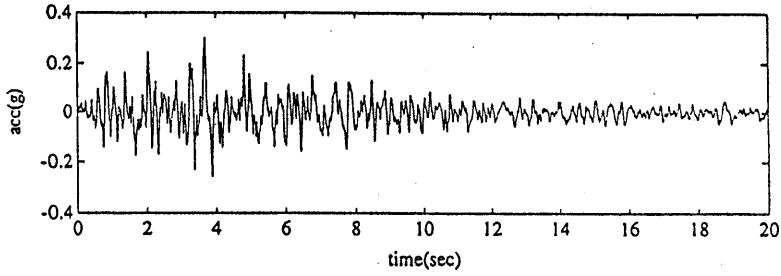
KAYNAKLAR

- 1.Agbabian, M.S., Masri, S.F., Nigbor, R.L. (1990). Evaluation of seismic mitigation measures for art objects. Getty Conservation Inst., Marina del Rey, California.
- 2.Aslam, M., Godden, W.G., Scalise, F.T. (1980). Earthquake rocking response of rigid bodies. J. of Struct. Div., ASCE, Vol.106, pp.377-392
- 3.Erdik, M., Kadakal, U. (1994). Müzelerde sergilenen eserlerin depremlerden korunması. Ara rapor, Deprem Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Boğaziçi Üniversitesi.
- 4.Kadakal, U, Durukal, E., Erdik, M. (1994). Application of the rocking response of the Egyptian Obelisk in Istanbul to the probabilistic estimate of peak earthquake accelerations experienced in the region. Proc. of ERCAD.
- 5.Kadakal, U. (1994). Rocking response of rigid bodies. Internal report, Department of Earthquake Engineering, Boğaziçi University, Istanbul.
- 6.Nigbor, R.L., Masri, S.F., Agbabian, M.S. (1994). Seismic vulnerability of rigid objects. Proc. of 5th US Nat. Conf. on Earthquake Eng., Vol.4, pp.725-734
- 7.Tso, W.K., Wong, C.M. (1989). Steady state rocking response of rigid blocks, Part I: Analysis. J. of Earthquake Eng. & Struct. Dyn., Vol.18, pp.89-106.
- 8.Washizuka, H. (1985). Protection against earthquakes in Japan. Museum, UNESCO, Vol.146, pp.119-122.
- 9.Yim, C.S., Chopra, A.K., Penzien, J. (1980). Rocking response of rigid blocks to earthquakes. J. of Earthquake Eng. & Struct. Dyn., Vol.8, pp.565-587.

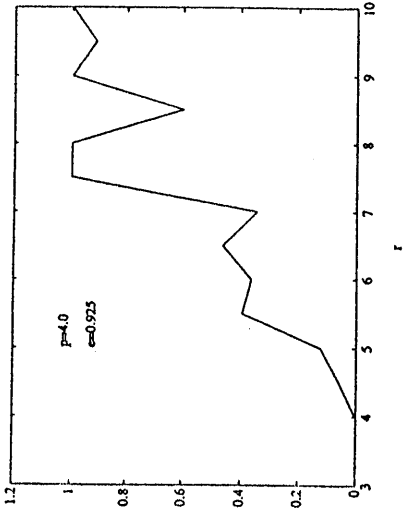
Şekil 1. Sallanan blok



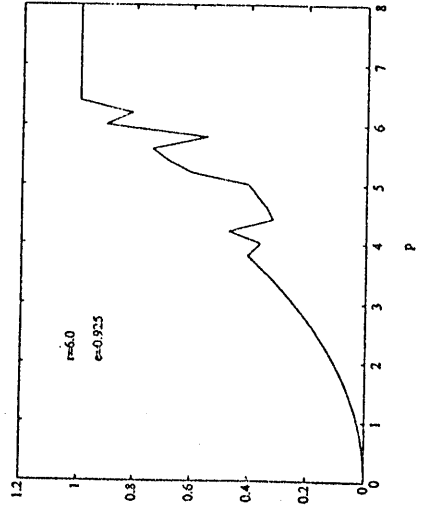
Şekil 2. Analizlerde kullanılan deprem hareketi



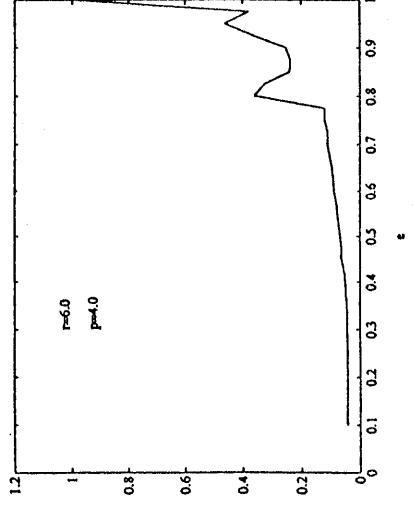
Şekil 3. Sallanma genliklerinin narinlik oranına (r) göre değişimi



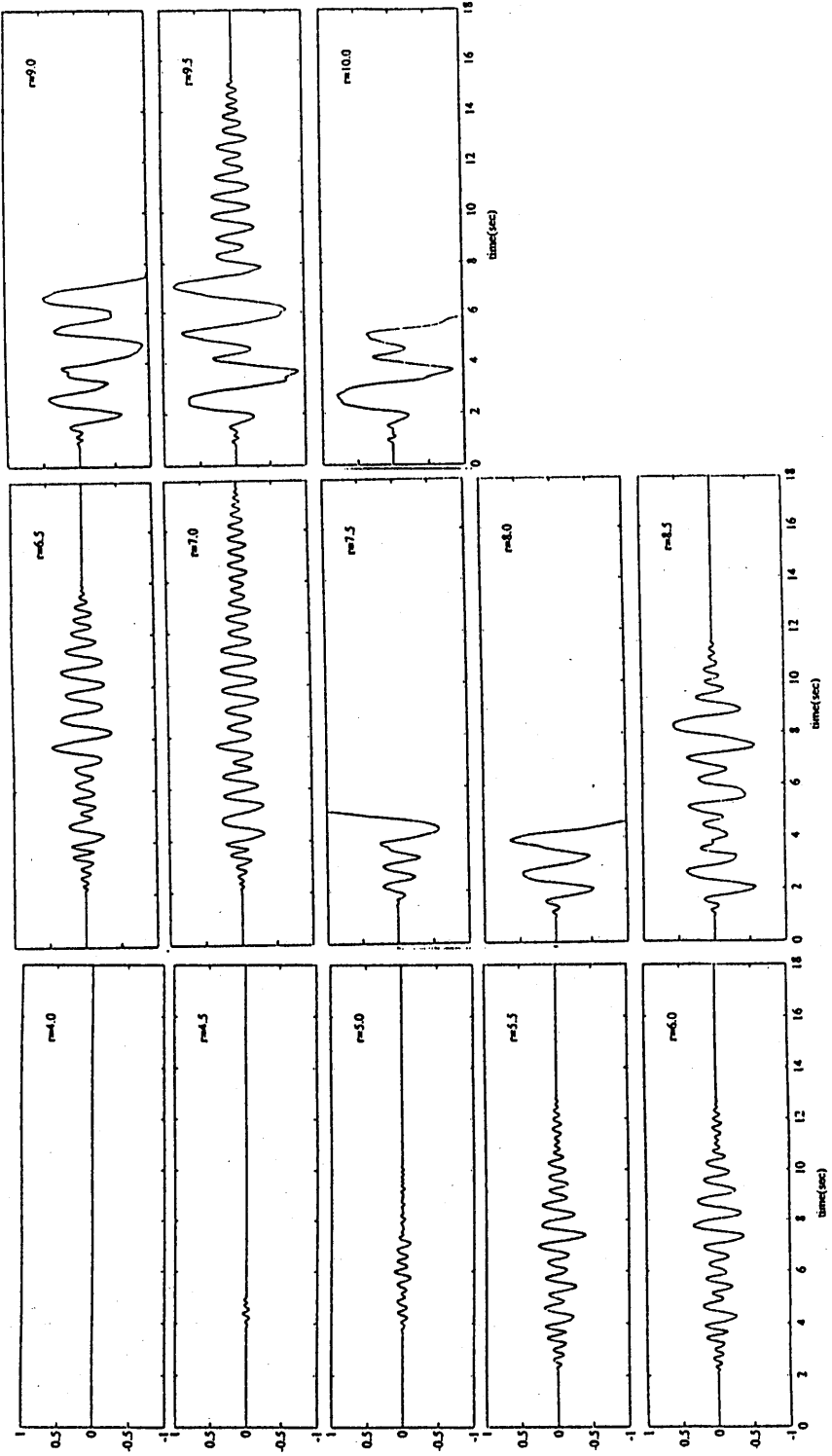
Şekil 4. Sallanma genliklerinin blok frekansı (p) ile değişimi



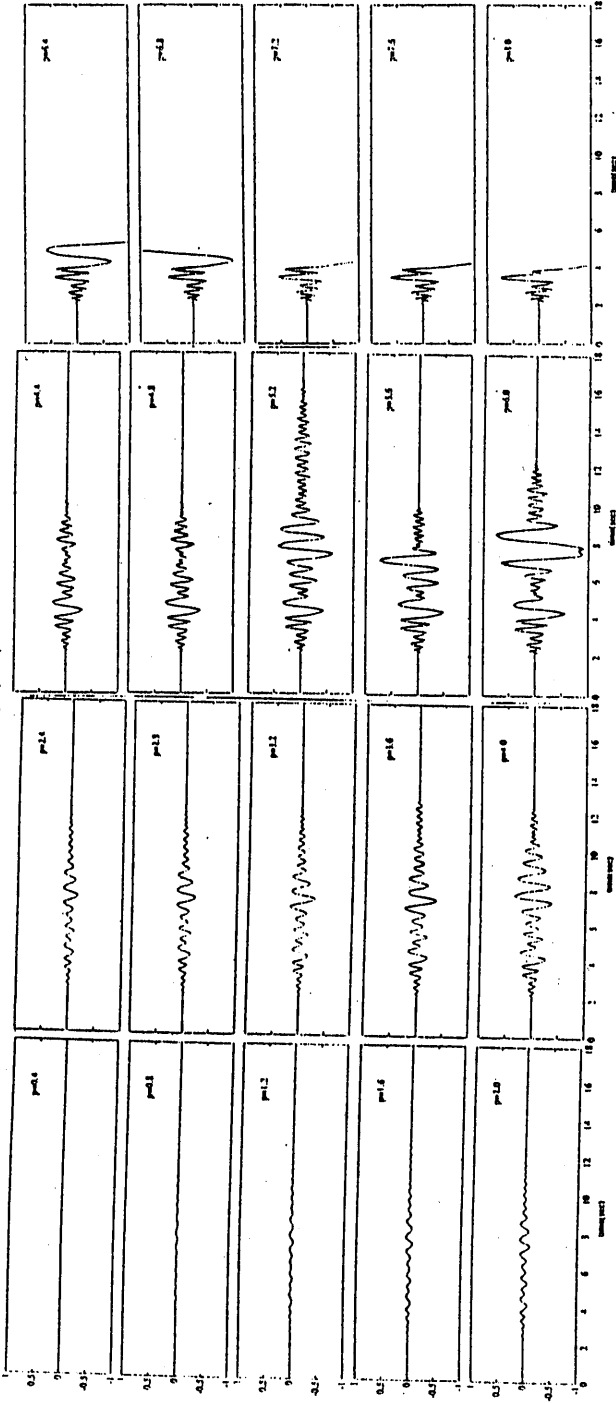
Şekil 5. Sallanma genliklerinin sıçrama katsayısı (e) ile değişimi



Şekil 6. Farklı narinlik oranlarındaki blokların aynı deprem (şekil.2) altındaki sallanma hareketleri



Şekil 7. Farklı frekanslara sahip blokların aynı deprem (şekil.2) altındaki sallanma hareketleri



Şekil 8. Farklı sığrama katsayılarına sahip blokların aynı deprem (şekil.2) altındaki sallanma hareketleri

