INTERNATIONAL EARTHQUAKE SYMPOSIUM KOCAELI 2007
22-26 OCTOBER 2007

DEPREM ETKİSİNDEKİ KABLOLU KÖPRÜLERİN STOKASTİK SONLU ELEMAN ANALİZİ

STOCHASTIC FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CABLE STAYED BRIDGES TO EARTHQUAKES

BAYRAKTAR A , ÇAVDAR Ö., ÇAVDAR A., SOYLUK K.

***Posta Adresi*:** * KTÜ Gümüşhane Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl. 29000 GÜMÜŞHANE

***E-posta*:** ozlem_cavdar@hotmail.com

Anahtar Kelimeler: Perturbation yöntemi, Monte Carlo Simülasyon yöntemi, Kablolu köprü, Stokastik sonlu elemanlar yöntemi

ÖZ: Kablolu köprüler özellikle malzeme ekonomisi ve hesap kolaylığı yönünden tercih edilmektedirler. Bu çalışmada iki boyutlu, iki açıklıklı, tek kuleli deprem etkisindeki bir kablolu köprünün stokastik sonlu eleman analizi Perturbation ve Monte Carlo Simülasyon (MCS) yöntemlerine göre gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre Perturbation yönteminden elde edilen yerdeğiştirme ve kesit tesiri değerleri MCS yönteminden elde edilen yerdeğiştirme ve kesit tesiri değerlerine oldukça yakın çıkmaktadır.

ABSTRACT: *Cable stayed bridges to earthquakes are preferred especially for its material economy and calculation simplicity. In this study, stochastic finite element analysis of a two-dimensional cable stayed bridge that have two spans and one pylon are realized according to Perturbation and Monte Carlo Simulation (MCS) methods. In respect of the conclusions obtained from this study, the displacements and sectional forces from Perturbation method is closest to the displacements and sectional forces from MCS method.*

GİRİŞ

Kablolu köprüler, genel itibariyle sürekli kirişler, taşıyıcı kuleler ve kirişlere destek olan kablolardan oluşmaktadır. Kablolu köprüler diğer köprü tiplerine göre maliyet ve malzeme ekonomisi açısından önemli avantajlara sahiptir (Kulkarni vd., 2006). Bunlar, özellikle 150 m ila 600 m arasındaki açıklıkları geçmek için tercih edilirler.

Kablolu köprülerin çözümlemesi de diğer yapısal sistemlerin çözümlemesinde olduğu gibi genellikle geometrik yerleşimin ve malzeme özelliklerinin belirli olduğu varsayımı esas alınarak yapılmaktadır. Ancak bu tasarım değerlerinin kesin olarak belirlenememesinden dolayı yapıdan beklenen davranış ile yapının gösterdiği gerçek davranış arasında farklılıklar ortaya çıkabilmektedir. Bu tip belirsiz parametreler dikkate alınarak yapılan yapısal çözümlemelere stokastik çözümleme denilmektedir. Perturbation ve Monte Carlo yöntemi yaygın olarak kullanılan iki stokastik yöntemdir. Perturbation yöntemi yapısal özelliklerdeki küçük istatistiksel değişimleri ele alarak problemin çözümüne gitmektedir. Monte Carlo yöntemi ise yapısal özelliklerdeki büyük istatistiksel değişimleri ele almaktadır. Her iki tekniğinde problemin doğasına bağlı olarak bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Soyluk ve Dumanoğlu (2000) kablolu bir köprünün eş zamanlı olmayan stokastik dinamik analizini sonlu eleman yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda yer hareketi hızının önemli ölçüde köprünün tepkilerini etkilediğini görmüşlerdir. Cheng vd. (2004) çalışmalarında tepki yüzey metodunu kullanarak sabit yükler altındaki kablolu köprülerin başlangıç kablo kuvvetlerini belirlemek için Monte Carlo simülasyon metodunu kullanmışlardır. Yaptıkları olasılıklı analiz sonucunda sabit yükler altındaki bir kablolu köprünün başlangıç kablo kuvvetlerinin olasılıklı olarak belirlenmesinin mümkün olduğunu göstermişlerdir.

Bu çalışmada deprem etkisindeki iki boyutlu, iki açıklıklı, tek kuleli, kablolu bir köprünün stokastik dinamik analizi Perturbation ve Monte Carlo yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Malzeme özelliklerinden elastisite modülünün rastgele değişken olarak seçildiği kablolu köprü modeli için değişim katsayısı (COV) %10 olarak seçilmiştir. Her iki analiz sonucundan elde edilen yerdeğiştirme ve tepki değerleri birbirleriyle karşılaştırılmakta ve böylece bu iki yöntemin hesap ilkeleri ortaya konulmakla birlikte ayrıca Perturbation yönteminin MCS yönteminin yerine kullanılabilirliği de bir ölçüde tartışılmış olmaktadır.

Stokastik Sonlu Elemanlar Yöntemi (SFEM)

Değişken sistem parametreleriyle, olasılıklı çözümleme yapma yöntemlerinden biri olan stokastik sonlu elemanlar yöntemi (SFEM), değişken özellikli yapıların tepki frekanslarını tahmin etmek için geliştirilmiştir. SFEM yaklaşımı rastgele değişkenlerin bir serisi olarak stokastik alanın temsili esasına dayanmaktadır (Kleiber ve Hien, 1992).

Perturbation Yöntemi

Tek rastgele değişkenli sistemin dinamik davranışını tanımlayan Perturbation esaslı stokastik sonlu eleman denklemleri aşağıda verilmektedir (Kleiber ve Hien 1992):

Sıfırıncı-derece $((q_\alpha^0 (b_l^0;\tau), \alpha = 1,2,...,N)$ için N lineer eşzamanlı sıradan fark denklemlerinin bir sistemi, ϵ^0 terim)

$$M_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0;\tau) + C_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0;\tau) + K_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0;\tau) = Q_\alpha^0(b_l^0;\tau) \tag{1}$$

Birinci-derece $((q_\alpha^{,\rho} (b_l^0;\tau), \rho = 1,2,...,N^-, \alpha = 1,2,...,N)$ için N lineer eşzamanlı sıradan fark denkleminin $\overline{\mathrm{N}}$ sistemleri, ϵ^1 terim)

$$\begin{aligned} &M_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^{,\rho}(b_l^0;\tau) + C_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^{,\rho}(b_l^0;\tau) + K_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^{,\rho}(b_l^0;\tau) = Q_\alpha^{,\rho}(b_l^0;\tau) \\ &-\left[M_{\alpha\beta}^{,\rho}(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0;\tau) + C_{\alpha\beta}^{,\rho}(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0;\tau) + K_{\alpha\beta}^{,\rho}(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0;\tau)\right] \end{aligned} \tag{2}$$

İkinci-derece $((q_\alpha^2 (b_l^0;\tau), \alpha = 1,2,...,N)$ için N lineer eşzamanlı sıradan fark denklemlerinin bir sistemi, ϵ^2 terim)

$$\begin{aligned} &M_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^{,\rho}(b_l^0;\tau) + C_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^{,\rho}(b_l^0;\tau) + K_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^{,\rho}(b_l^0;\tau) = \{Q_\alpha^{,\rho\sigma}(b_l^0;\tau) \\ &-2\left[M_{\alpha\beta}^{,\rho}(b_l^0)q_\beta^{,\sigma}(b_l^0;\tau) + C_{\alpha\beta}^{,\rho}(b_l^0)q_\beta^{,\sigma}(b_l^0;\tau) + K_{\alpha\beta}^{,\rho}(b_l^0)q_\beta^{,\sigma}(b_l^0;\tau)\right] \\ &-\left[M_{\alpha\beta}^{,\rho\sigma}(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0;\tau) + C_{\alpha\beta}^{,\rho\sigma}(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0;\tau) + K_{\alpha\beta}^{,\rho\sigma}(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0;\tau)\right]\}S_b^{\rho\sigma} \end{aligned} \tag{3}$$

Bu formülasyonlarda $b_{\ell}^{0}, q_{\alpha}, \tau, M_{\alpha\beta}^{0}, C_{\alpha\beta}^{0}, K_{\alpha\beta}^{0}, Q_{\alpha}^{0}, q_{\beta}^{0}$, ve $S_{b}^{\rho\sigma}$ sırasıyla düğüm noktası rastgele değişkenlerinin vektörü, düğüm noktası yerdeğiştirme tipi değişkenlerin vektörü, ileri zaman değişkeni, sistem kütle matrisi, sönüm matrisi, sistem rijitlik matrisi, yük vektörü, yerdeğiştirme ve düğüm noktası rastgele değişkenlerinin kovaryans matrisi. $\bar{N}$ düğüm noktası rastgele değişkenlerinin sayısını ve N ise sistemdeki serbestlik derecelerinin sayısını göstermektedir.

Monte Carlo Simülasyon (MCS) Yöntemi

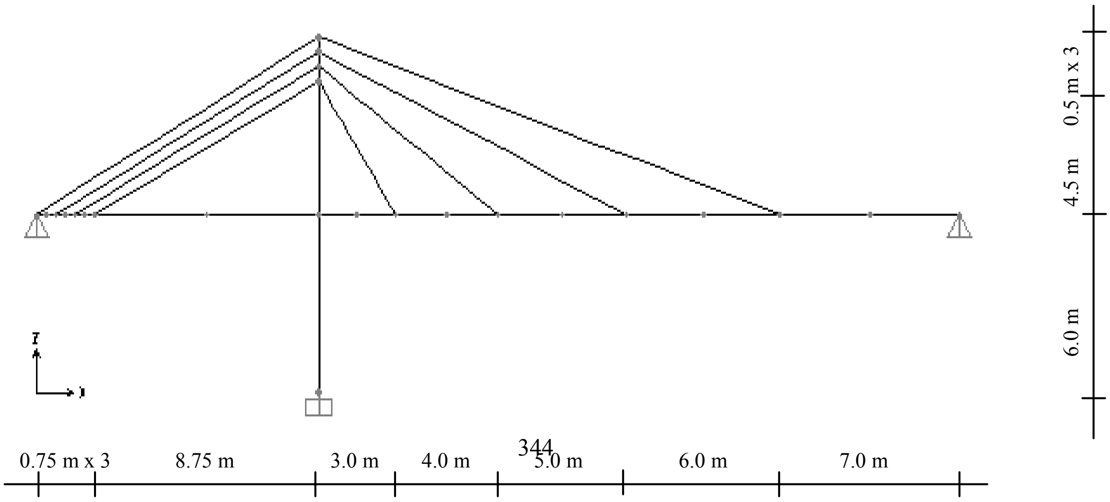
Monte Carlo Simülasyon (MCS) yöntemi, herhangi bir fiziksel test yapmadan sayısal olarak sonuç üretmek amacıyla kullanılan özel bir tekniktir. Bu yöntem, X değişkenine ait olasılık yoğunluk fonksiyonuna göre üretilen bir grup rastgele değerlerle işlem yapmaktadır. Değişken için seçilen rastgele değerler $X=\{x_1, x_2, x_3, \ldots x_N\}$ vektörü ile gösterilebilir. Burada N, simulasyon sayısını göstermektedir. Bu yöntemde, her bir X değeri için rijitlik ve kütle matrisleri oluşturulmakta ve yerdeğiştirme hesaplanmaktadır. N simulasyonun sonunda değişkene ait her bir rastgele değer için yerdeğiştirme vektörleri elde edilmektedir. $\{\{q_\beta\}_1, \{q_\beta\}_2, \{q_\beta\}_3, \ldots, \{q_\beta\}_N\}$ yerdeğiştirme vektörünü göstermek üzere yerdeğiştirmenin beklenen değerleri (ortalama değerleri);

$$\mu_{\{q_\beta\}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\{q_\beta\}_i \tag{4}$$

formülü ile hesaplanmaktadır.

SAYISAL UYGULAMA

Bu çalışmada, deprem etkisindeki, 36 m uzunluğunda, tek kuleli, iki açıklıklı, iki boyutlu bir kablolu köprü modeli (Şekil 1) stokastik sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözümlenmektedir. Köprünün 6 m genişliğinde ve araç trafiğine açık olduğu kabulüyle tabliyesinin 3 m'lik kısmından gelen yükler dikkate alınmaktadır. Stokastik çözümlemeler, Perturbation ve MCS yöntemlerine göre ayrı ayrı gerçekleştirilerek yerdeğiştirmeler ile kesit tesirleri bu iki yönteme göre karşılaştırılmaktadır. Elastisite modülünün rastgele değişken olarak seçildiği bu sistem için değişim katsayısı, kullanılan malzeme (çelik) için %10 olarak alınarak bu çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. Çözümlemelerde 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin YPT330 ivme bileşeni sisteme düşey doğrultuda etkittirilmiştir.



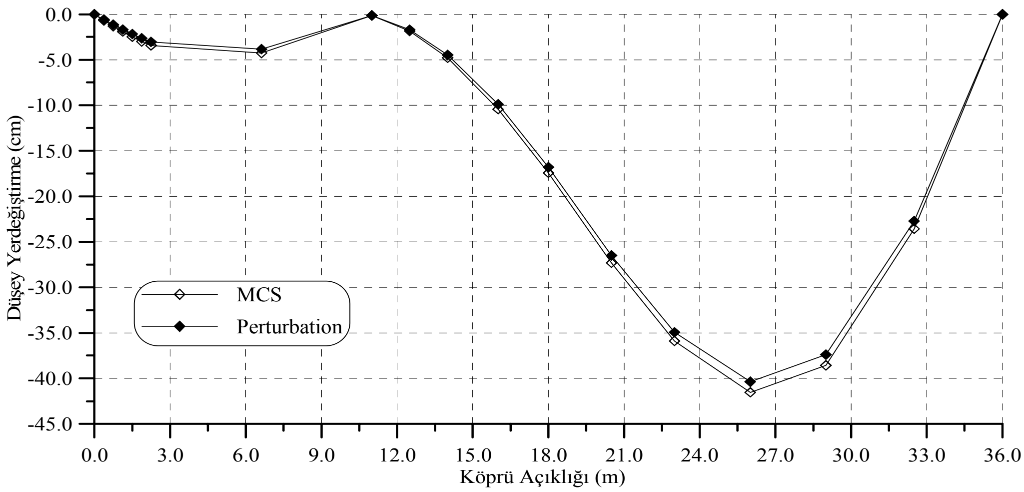
Şekil-1. Kablolu köprü modeli

Bu küçük sayılabilecek açıklığı (36 m) geçmek için kablolu bir köprünün tercih edilmesinin sebebi bu köprü tiplerinin çok büyük bütçeli projelerin yanında, küçük ve orta açıklıklı köprülerinin tasarımında da tercih edilebileceğini göstermek ve tasarım kolaylığını bir ölçüde ortaya koymaktır.

MCS yöntemi ile bir sistemin çözümlenmesi (programın koşması), sistem büyüklüğüne ve simülasyon sayısına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin bu çalışmada yer alan kablolu köprü modelinin çözümlenmesi 10000 simülasyon sayısı için bir saati aşkın bir zaman almaktadır. Aynı işlem süreçleri Perturbation yöntemi için ise saniyelerle ifade edilmektedir.

Yerdeğiştirmeler

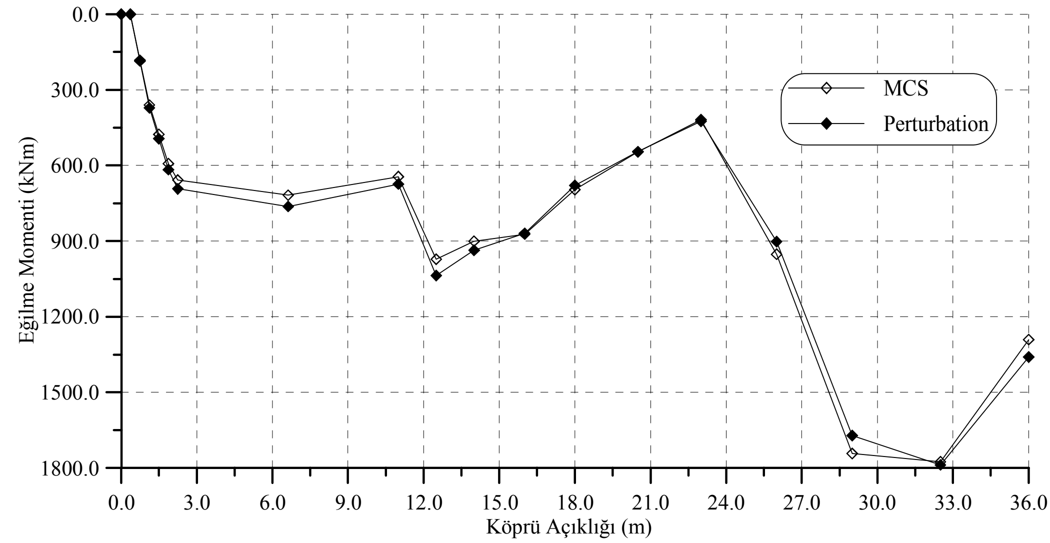
Şekil 2'de köprü açıklığı boyunca kirişlerde oluşan düşey yerdeğiştirme sonuçları yer almaktadır. Buna göre Perturbation yönteminden elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin MCS yönteminden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine çok yakın sonuç verdiği açıkça görülmektedir. Perturbation ve MCS yöntemlerinden elde edilen sonuçlar kendi içlerinde değerlendirildiğinde, sonuçlar arasında ortalama %3-4 oranında bir fark oluşmakla birlikte en büyük fark %13 oranında gerçekleşmektedir.



Şekil-2. Köprü açıklığı boyunca düşey yerdeğiştirmeler**.**

Eğilme Momenti

Köprü açıklığı boyunca kirişlerde oluşan mutlak değerce maksimum eğilme momenti sonuçları ise Şekil 3'te yer almaktadır. Buna göre Perturbation yönteminden elde edilen moment değerlerinin yerdeğiştirme değerlerine benzer olarak MCS yönteminden elde edilen moment değerlerine çok yakın sonuç verdiği açıkça görülmektedir.

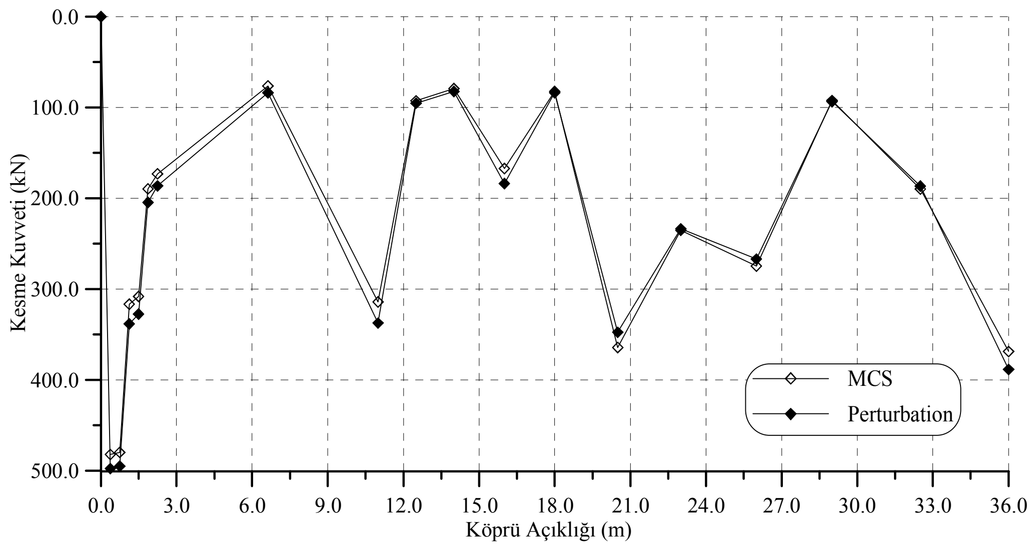


Şekil-3. Köprü açıklığı boyunca eğilme momentleri

Perturbation ve MCS yöntemlerinden elde edilen sonuçlar kendi içlerinde değerlendirildiğinde, sonuçlar arasında ortalama %5-6 oranında bir fark oluşmakla birlikte en büyük fark %10 oranında gerçekleşmektedir.

Kesme Kuvveti

Şekil 4'de ise köprü açıklığı boyunca kirişlerde oluşan kesme kuvveti sonuçları yer almaktadır. Yine bu grafikten de Perturbation yönteminden elde edilen kesme kuvveti değerlerinin MCS yönteminden elde edilen kesme kuvveti değerlerine çok yakın sonuç verdiği açıkça görülmektedir. Perturbation ve MCS yöntemlerinden elde edilen sonuçlar kendi içlerinde değerlendirildiğinde, sonuçlar arasında ortalama %3-4 oranında bir fark oluşmakla birlikte en büyük fark %9 oranında gerçekleşmektedir.



Şekil-4. Köprü açıklığı boyunca kesme kuvvetleri

SONUÇ

Bu çalışmada deprem etkisine maruz, iki boyutlu, iki açıklıklı, tek kuleli bir kablolu köprü modelinin stokastik dinamik çözümlemesi Perturbation ve MCS yöntemlerine göre gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada dikkate alınan kablolu köprü modelinde, gerek yerdeğiştirme, gerek eğilme momentleri ve gerekse kesme kuvvetleri için Perturbation ve Monte Carlo Simülasyon yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın değerler vermektedir. Bu sebeple MCS yönteminin işlem süresi de dikkate alındığında, bu yöntemin yerine Perturbation yönteminin kullanılabileceği bu çalışmanın en önemli sonucunu teşkil etmektedir.

KAYNAKLAR

Cheng, J., Xiao, R.C, Jiang, J.J, 2004, Probabilistic determination of initial cable forces of cable-stayed bridges under dead loads, **Structural Engineering and Mechanics**, 17, 2, 267-279.

Kulkarni, S.S., Ingle, R.K., ve Godbole, P.N., Modeling of cable stayed bridge, **Conferance on Advances in Bridge Engineering,** March 24-25, 2006, Uttaranchal, India.

Kleiber, M., ve Hien, T.D., 1992. The Stochastic Finite Element Method. Wiley, New York, USA.

Soyluk, K., ve Dumanoğlu, A.A., 2000, Comparison of asynchronous and stochastic dynamic responses of a cable-stayed bridge, **Engineering Structures**, 22, 435–445.