İMO Teknik Dergi, 2015 7279-7286, Yazı 444 ***Teknik Not***

Betonarme Köprü Kolonlarında Plastik Mafsal Bölgelerinin Modellenmesi

Zeynep FIRAT ALEMDAR[1]

ÖZ

Çok eksenli dinamik yükler etkisindeki betonarme köprü yapılarında, yüklemenin farklı aşamalarında elastik olmayan şekil değiştirmelerin dağılımının incelenmesi önemli ve zor bir problemdir. Betonarme bir köprü kolonunun doğrusal olmayan 3 boyutlu detaylı bilgisayar modeli ABAQUS sonlu elemanlar programında geliştirilmiş ve deprem sarsma tablalarında iki eksenli dinamik yükler altında köprü kolonunda ölçülen deformasyon değerleri model ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, betonarme köprü sistemine şiddeti giderek artan bir seri deprem yüklemesi uygulanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde kolonlardaki plastikleşme bölgesinin yayılmasındaki değişiklikleri incelemek için tüm deprem şiddetleri için analizler yapılmıştır. Değerlendirme sonucu, kolonlarda oluşan plastikleşme bölgelerinin uzunluğunun kolondaki boyuna donatının uzama miktarına bağlı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Betonarme köprü kolonu, sonlu elemanlar modeli, fotoğrametrik ölçümler, plastikleşme boyu.

ABSTRACT

Modeling Plastic Hinging Regions in Reinforced Concrete Bridge Columns

Examining the spread of plastic deformations at various stages of loading is a complicated problem for bridge structures under multi axial dynamic loading. A detailed three dimensional nonlinear finite element model of a bridge column was developed using the computer program ABAQUS and the model was compared with the measured displacement results along the column of a bridge system subjected to dynamic biaxial loadings in an earthquake simulator. The bridge system was subjected to a series of test trials with increasing earthquake intensities. Computer simulations were performed for complete trials in order to provide information about the variation in the spread of plasticity. According to the results, it was observed that changes in the length of plastic hinging regions on the bridge column depend on the strain in the longitudinal reinforcement.

Keywords: Reinforced concrete bridge column, FE modelling, photogrammetry, spread of plasticity.

Not: Bu yazı
- Yayın Kurulu'na 06.03.2014 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2015 gününe kadar tartışmaya açıktır.

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - zalemdar@yildiz.edu.tr

1. GİRİŞ

Betonarme köprüler üstyapının zarar görmesini önlemek amacıyla elastik olmayan deformasyonların kolonlarda oluşmasını sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu tasarım şekli bina türü yapılarda kullanılan düşey yükü taşıyan sistemi korumak için elastik olmayan deformasyonların kirişlerde oluşmasını sağlayan tasarım yaklaşımından tamamen farklıdır. Bu nedenle deprem yüklemesi altında köprülerin hareketlerini tam olarak yansıtan gelişmiş bilgisayar modellerini oluşturmak için elastik olmayan deformasyon bölgelerindeki köprü kolonlarının davranışlarının doğru tanımlanması önemlidir. Köprülerin çok eksenli yüklemeye maruz kalması ve yapısal bileşenlerinin karmaşık bir geometrik şekle sahip olması durumunda detaylı 3 boyutlu analiz yöntemleri önem taşımaktadır. Detaylı bilgisayar modeli ABAQUS sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak geliştirilmiş ve dinamik davranış sırasında kaydedilen deformasyon ve açı ölçümlerinin iyi tahmin edilebilmesi için çeşitli analiz parametrelerinin etkisi incelenmiştir [1,2].

Bu çalışmada köprü üst kirişinde oluşacak en büyük yatay (öteleme) deformasyonun köprü kolonlarındaki plastikleşmenin yayılışı üzerindeki etkisi, farklı şiddetteki depremlerde kolon yüksekliğince boyuna donatıdaki zorlanmaya bağlı olarak incelenmiştir.

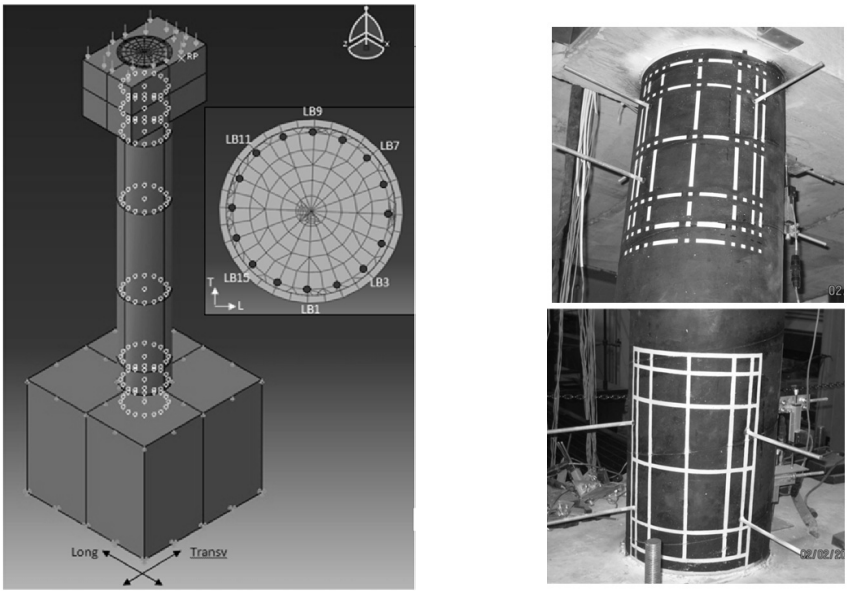
2. KÖPRÜ KOLONUNUN SONLU ELEMANLARLA MODELLENMESİ

Modellemede ele alınan betonarme köprü kolonu Amerika Birleşik Devletleri Nevada Üniversitesi Deprem Laboratuvarında giderek artan şiddette tek ve iki eksenli deprem hareketleri altında test edilen köprü sistemindeki 3 numaralı köprü ayağının doğu bölgesinde bulunan kolondur. Kolonun 3 boyutlu sonlu elemanlarla modelinde iki kolonlu köprü ayağının yarısı dikkate alınmış ve bir dairesel kolon, üst kirişin bir bölümü (584 mm), ve temel bloğu olmak üzere modellenmiştir (Şekil 1a). Modelin davranışı kesin (implicit) statik çözüm yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir [2].

2.1. Malzeme Modelleri

Başlık kirişi ve temel bloğunun taşıma kapasiteleri kolonun kapasitesinden daha büyük olduğundan ve deprem testleri sırasında bu elemanlarda herhangi bir hasar meydana gelmediğinden elemanlardaki beton malzeme özellikleri doğrusal elastik olarak modellenmiştir. Kolon, kolon-başlık kirişi ve kolon-temel bloğu birleşim bölgelerindeki beton malzeme özellikleri için ABAQUS programında bulunan plastik hasara uğramış malzeme modeli kullanılmıştır. Basınç ve çekme gerilme-şekil değiştirme eğrileri Nevada Üniversitesi tarafından hazırlanan deneysel raporuna uygun tanımlanmıştır [3]. Kolon yüksekliği boyunca bulunan spiral donatının sargılama etkisini dikkate almak için, betonarme kolonun iç (çekirdek) ve dış (kabuk) bölgelerindeki beton malzeme tanımı için iki farklı malzeme özellikleri kullanılmıştır. Çekirdek bölgesi sargılı beton basınç modeli için Mander [4] tarafından bulunan düşük birim şekil değiştirmeler ile monotonik yükleme altında elde edilen gerilme-şekil değiştirme modeli esas alınmıştır [5].

Çatlamadan sonra tek eksenli çekme gerilmesi altında betondaki en iyi yumuşama eğrisini elde etmek için Bhide [6] modeli betonun çekme gerilme-şekil değiştirme davranışını tanımlamak için seçilmiştir.



Şekil 1. (a) ABAQUS modeli ve kolon kesit görünüşü (b) Alt ve üst karelaj sistemi

Boyuna donatının davranışını modellemek için birleşik izotropik ve kinematik pekleşme özelliklerine sahip tek eksenli çelik modeli tanımlanmıştır. İzotropik özellikleri tanımlamak için ASTM A706 Sınıf 60 [7] çeliğine ait gerilme-şekil değiştirme değerleri kullanılmıştır. Dinamik yükler altında artan birim şekil değiştirme değerlerinin etkisini dikkate almak için dinamik büyütme faktörleri kullanılarak çeliğin dayanım değerleri %10 oranında arttırılmış ve ABAQUS modelinde bu değerler yeniden düzenlenmiştir. Periyodik şekil değiştirme-yumuşama ilişkisini dikkate almak için kinematik pekleşme özellikleri modele eklenmiştir [8]. Beton malzeme için dinamik dayanım artış katsayısı Watstein (1953) tarafından yapılan farklı dayanıma sahip beton numunelerin dinamik yükler altında testlerinden elde edilen sonuçların Mander tarafından regresyon analizi kullanarak bulunan değerler olarak dikkate alınmıştır. Elastisite modülü üzerine dinamik davranış etkisi Wakabayashi, Hosoya ve ark., ve Mahin ve ark. tarafından yapılan dinamik testlerde elde edilen maksimum şekil değiştirme oranları dikkate alınarak şeçilmiş olan bir değer için betonun dayanımına bağlı olarak elde edilmiş ve analizde dikkate alınmıştır.

2.2. Yükler ve Sınır Koşulları

Kolonun eksenel yük değeri (210 kN) sonlu elemanlar modelinde başlık kirişinin üst yüzeyine düzgün yayılı basınç gerilmesi olarak uygulanmıştır. Temel bloğunun alt

yüzeyine yatay yönde deprem testlerinden elde edilen deformasyon değerleri ve başlık kirişinin içindeki kolonun üst yüzeyine Lineer Düşey Deformasyon Ölçerler (LVDT) ile kaydedilen deformasyon değerleri uygulanmıştır. Temel bloğunun alt yüzeyi sarsma tablasına çelik plakalar ve ardgerme kabloları ile bağlandığından temel bloğunun düşey hareketi engellenmiştir.

Sonlu elemanlar modelinde kullanılan deprem kayıtları, 1994'de California'da olmuş Century City Country Kulübünde kaydedilmiş deprem kayıtlarından ölçeklendirilerek elde edilmiştir. 6 adet tek yönde (köprünün boyuna doğrultusunda) ve 5 adet hem boyuna hem enine doğrultuda uygulanmak üzere 11 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Uygulanan deprem testleri sonucunda köprü kolonunda boyuna ve enine doğrultularda % 4 oranında yanal ötelenme meydana gelmiştir.

3. FOTOĞRAMETRİK ÖLÇÜMLER İLE KÖPRÜ KOLONUNUN İNCELENMESİ

Bu çalışmada sonlu elemanlar ile modellenen betonarme köprü kolonuna deprem testleri sırasında oluşacak deformasyonları takip edebilmek için iki farklı karelaj sistemi uygulanmıştır. Alt bölgedeki karelaj sistemi belirli aralıklarla çizilmiş yatay ve düşey çizgilerden, üst bölgedeki karelaj sistemi ise aynı aralıklara sahip yatay ve düşey çizgiler ve noktalardan oluşmaktadır. 2 adet DXB-9212EF Starlight 600 TVL model yüksek çözünürlüklü kameralar kullanılarak deprem yüklemeleri sırasında alt ve üst karelaj bölgeleri kayıt altına alınmıştır. Kamera kayıtlarından elde edilen resimler kullanılarak karelaj bölgelerindeki deformasyonlar IDL (Veri Görüntüleme Programı) ile hesaplanmıştır.

Fotoğrametrik analizler ile hesaplanan yatay ve düşey deformasyonlar LVDT ile elde edilen değerler ile karşılaştırılmış ve video görüntülerinden elde edilen değerlerin LVDT sonuçlarına en yakın değerler verdiği görülmüştür [9]. Ayrıca, kolondaki dönme değerleri düşey ve yatay çizgiler yardımı ile hesaplanmıştır. Yatay ve düşey çizgilerden hesaplanan kesit dönme değerleri sonlu elemanlar modelinden elde edilen dönme sonuçları ile karşılaştırılmış ve test sırasında birleşim bölgelerinde çok sayıda çatlaklar oluşmasına, yüzey betonunun dökülmesine ve hatta boyuna donatıların açığa çıkmasına rağmen fotoğrametrik ölçümler ile hesaplanan dönme değerleri ABAQUS modeline çok yakın sonuçlar vermiştir.

Fotoğrametrik yöntem ile istenilen noktalardaki deformasyonlar kaydedilerek kolon yüzeyinde oluşan ötelenmeler kolon yüksekliği boyunca elde edilebilmektedir. Testler sırasında kolon yüzeyinde çok büyük hasarlar meydana gelmesi halinde LVDT ölçüm aygıtları doğru ölçüm yapamayabilir, fakat karelaj sistemi ile kolonda oluşan deformasyonlar hesaplanabilmektedir. Seçilen bir deprem testi (boyuna doğrultuda 0,6g ve enine doğrultuda 0,5g maksimum ivme değerlerine sahip) sırasında kolonda oluşan en büyük tepe deformasyonu ölçüldüğü anda, karelaj bölgesinde test boyunca çekilen video görüntüleri ve sonlu eleman modelinden elde edilen deformasyon değerleri karşılaştırılmış ve çok yakın değerler elde edilmiştir. Kolon birleşim bölgelerinde meydana gelen ters eğrilik oluşumu ABAQUS modelinden elde edildiği şekilde fotoğrametrik sonuçlarla doğrulanabilmektedir [9].

4. SONLU ELEMAN MODELİ İLE DENEYSEL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Sonlu eleman modeli (ABAQUS) ile hesaplanan ve LVDT aygıtları ve video kayıtları ile ölçülen yatay ve düşey deformasyonlar ve yatay dönme değerleri Dragovich ve Lepage tarafından geliştirilen Frekans Alanı Hata (FDE) göstergesi metodu kullanılarak karşılaştırılmıştır [10]. FDE göstergesi iki sinyalin bileşimini karşılaştırmak için Fourier spektrumu kullanmaktadır. FDE göstergesi titreşim genliğinin ve fazının uygun olup olmadığını belirtir ve 0 ile 1 arasında değerler almaktadır (0=çok iyi korelasyon).

Dijital video kayıtlarından ve sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen deformasyonlar arasındaki FDE metodu ile yapılan en iyi eşleştirme kolonun alt birleşim bölgesinde yatay deformasyonların karşılaştırılması durumunda elde edilmiştir. FDE genliğindeki hata indeksi %4 ve faz hatası indeksi %12 olarak toplam %16 hata indeksi elde edilmiştir. Bu hata değerleri kolonun alt birleşim bölgesindeki deformasyon karşılaştırmalarının çok iyi olduğunu göstermektedir. Kolonun üst karelaj kısmında başlık kirişine en yakın bir noktadaki dijital kayıtlar ile hesaplanan yatay deformasyonlar, köprü kirişi üzerindeki ve köprünün kuzey ayağındaki deformasyon ölçerler kullanılarak elde edilen analog deformasyon değerleri ile karşılaştırılmıştır. Titreşim genliği %9 ve faz hatası indeksi %31 olmak üzere toplam %40 FDE hata değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan hata değerleri kolonun alt bölgesindeki deformasyon karşılaştırmalarının, kolonun üst bölgesindeki sonuçlardan daha iyi olduğunu göstermektedir. Deformasyon ölçerlerin okumaları arasındaki büyük farklılıklar bağlantı elemanlarının esnekliğinden veya başlık kirişinin dönmesinden kaynaklanabilmektedir. Bu farklılıklar dijital video kayıtlarını veya deprem analizlerinden elde edilen deformasyonları etkilemeyen analog okumalardaki deneysel hataların varlığını göstermektedir.

Sonlu eleman modeli ve LVDT aygıtları ile elde edilen ölçümlerden hesaplanan kolon dönme değerleri başlık kirişinin eksenine dik yöndeki eksen etrafında hesaplanmıştır. Bu eksen etrafında oluşan dönme değerlerinin başlık kirişinin kolona göre daha yüksek dayanım ve rijitliğe sahip olmasından ve kolonun üst yüzeyinin başlık kirişi ekseni etrafında serbest dönebilme özelliğinden dolayı daha önemli olduğu düşünülmüştür. Hesaplanan dönme değerleri FDE metodu ile karşılaştırılmış ve hata indekslerinin çok iyi korelasyon sınırı (%17) içinde kaldığı tespit edilmiştir.

5. PLASTİKLEŞME BOYUNUN İNCELENMESİ

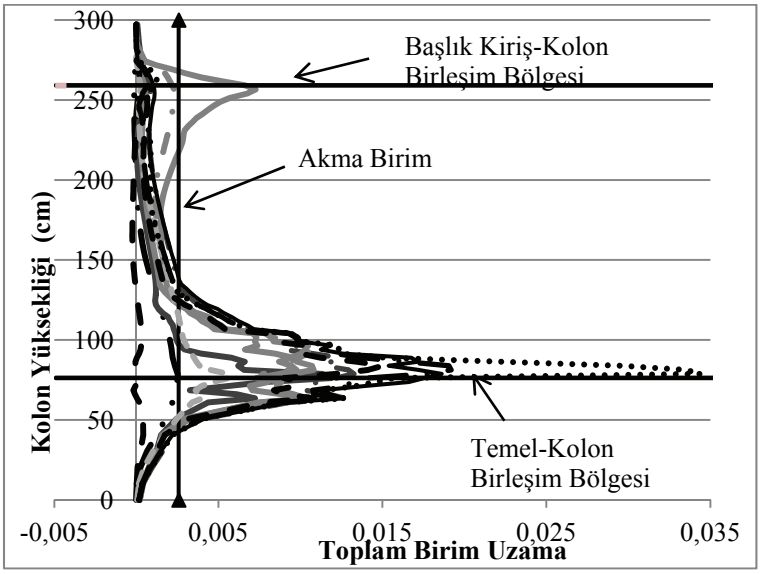
Deney çalışmalarındaki betonarme köprü giderek artan şiddetlerde 11 adet deprem yüklemesi altında test edilmiştir. Kolonda oluşan en büyük tepe deformasyonu değerine bağlı olarak kolon yüksekliği boyunca plastikleşmenin yayılışını incelemek için, farklı deprem kayıtları için analizler yapılmıştır. Her bir deprem yüklemesi için, plastikleşmenin oluşumu deprem kaydı boyunca oluşan göreceli öteleme oranının en büyük olduğu zamanda hesaplanmıştır. Öteleme oranı boyuna ve enine deformasyon oranlarının bileşkesi olarak belirlenmiştir. Hesaplanan deformasyon oranının doğrultusu bu iki deformasyon oranının birbirine göre değerlerine bağlı olarak tespit edilmiştir [11].

Plastikleşme boyu kolonda en büyük öteleme oranının oluştuğu zamanda boyuna donatıdaki birim uzamanın akma birim uzama değerini aştığı andaki kolon yüksekliği olarak tanımlanmıştır. Çekme ve basınçta en büyük birim uzamaya maruz kalan boyuna

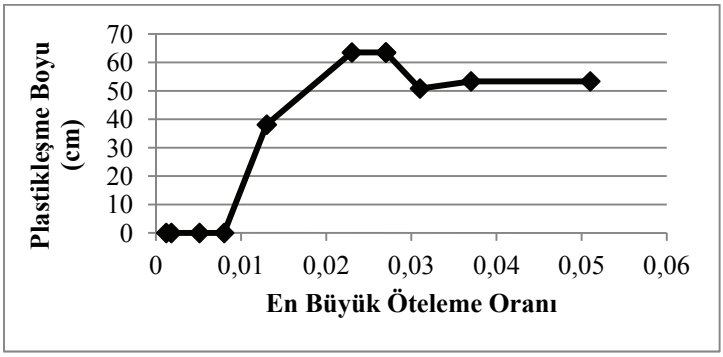
donatılar, hesaplanan deformasyon doğrultusuna benzer olarak kolonun birbirine zıt köşelerinde bulunmaktadır. Her bir deprem kaydı için en büyük öteleme oranının oluştuğu anda kolon yüksekliği boyunca sonlu elemanlar modelinden elde edilen çekme birim uzama değerleri Şekil 3 ile gösterilmiştir. Her bir deprem analizi için en büyük çekme birim uzamasına karşılık hesaplanan plastikleşme boyu Şekil 4'de gösterilmiştir [11]. Öteleme oranı arttıkça plastikleşme boyunun 635 mm (kolon çapının 2 katı) değerine kadar arttığı görülmüştür. Bu değer yaklaşık % 2,5 en büyük öteleme oranı oluştuğu andaki deprem kaydında elde edilmiştir. Boyuna donatıda oluşan en büyük birim uzama değeri yaklaşık 0,02 (akma birim uzama değerinin 10 katı) değerine ulaşmıştır ve öteleme oranı % 5,1 değerine kadar birim uzama 0,034 (akma birim uzama değerinin 15 katı) değerine kadar artmaya devam etmiştir. Daha büyük öteleme meydana getirebilecek deprem kayıtları için yatay deformasyonlardaki artışın plastikleşme bölgesi boyunca oluşacak deformasyonlar yerine boyuna donatıdaki aşırı bölgesel hasarlardan kaynaklandığı görülmüştür. Boyuna donatıların birim uzama değerlerinin yaklaşık 35 cm (kolon çapına eşit veya boyuna donatının çapının 37 katı) temel bloğunun içine doğru birim uzama elastik değerlerini aştığı görülmüştür.

6. SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan fotoğrametrik ölçümler ve sonlu eleman modeli ile köprü kolonunda oluşan plastikleşme davranışı incelenmiştir. Kolon birleşim bölgelerinde oluşan plastikleşme boyunun uzun yıllardır kabul edilen değerlerin (0,4-0,5*d) aksine kolon çapının 2 katı değerine ulaştığı saptanmıştır. Ayrıca Eurocode 3 Part 8 Ek A 3.2.4'de yer alan plastik mafsal bağıntıları dikkate alındığında plastikleşme boyu 1,25d olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 3. Boyuna donatılarda kolonda en büyük öteleme deformasyonu anında oluşan çekme birim uzamalar



Şekil 4. Plastikleşme boyu

Teşekkür

Yazar, bu çalışmadaki önemli katkılarından dolayı Kansas Üniversitesinde bulunan Prof. Dr. JoAnn Browning ve Adolfo Matamoros'a, ve Nevada Üniversitesindeki Prof. Saiid Saiidi ve laboratuvardaki tüm araştırmacılara teşekkürlerini sunar. Ayrıca, Editör ve hakem kuruluna teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

[1] Firat Alemdar, Z., Matamoros, A., Browning, J., Modeling Surface Deformations and Hinging Regions in Reinforced Concrete Bridge Columns, SL Report No. 11-2, University of Kansas Research Center, Lawrence, KS, 2011.

[2] Simulia, ABAQUS, Version 6.8-2, http://www.simulia.com, 2009.

[3] Nelson, R., Saiidi, M., Zadeh, S., Experimental Evaluation of Performance of Conventional Bridge Systems, Center for Civil Engineering Earthquake Research Report No. CCEER-07-04, University of Nevada, Nevada, 2007.

[4] Mander, J. B., Seismic Design of Bridge Piers, PhD. Thesis, University of Canterbury, Christ Church, New Zealand, 1983.

[5] Firat Alemdar, Z., Browning, J., Olafsen, J., Photogrammetric Measurements of RC Bridge Column Deformations, Journal of Engineering Structures, 33:8, 2407-2415, 2011.

[6] Bhide, S. B., Collins, M. P., Reinforced Concrete Elements in Shear and Tension, Report No. 87-02, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 1987.

[7] ASTM 706/A 706M-01, Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement, ASTM International, West Conshohocken, Pa., 2002.

[8] Ma, S-Y.M., Bertero, V.V., Popov, E.P., Experimental and Analytical Studies of the Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular and T-Beams, Report No. EERC-76-2, University of California, Berkeley, 1976.

[9] Firat Alemdar, Z., Evaluation of Plastic Hinge Regions in Reinforced Concrete Bridge Systems, PhD. Thesis, University of Kansas, Lawrence, KS, 2010.

[10] Dragovich, JJ., Lepage, A., FDE Index for Goodness-of-fit Between Measured and Calculated Response Signals, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 38:1, 751-1758, 2009.

[11] Firat Alemdar, Z., Matamoros, A., Browning, J., High-Resolution Modeling of Reinforced Concrete Bridge Columns under Seismic Loading, ACI Structural Journal, V. 110, No. 5, September 2013.