

DÜŞÜK DÖŞEMELİ ÖNGERİLMELİ YAYA KÖPRÜLERİNİN YATAY ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI

Eray BARAN*, Arturo SCHULTZ**, Catherine FRENCH**

*Atılım Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl., Ankara

**Minnesota Üniversitesi, Minneapolis, Minnesota, ABD

ÖZET

Örnek bir düşük döşemeli öngerilmeli yaya köprüsü sisteminin yatay çarpma yükleri altındaki davranışı deneysel ve sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir. Çalışmanın deneysel kısmı, bu çeşit köprülerde kullanılan bağlantı detaylarının ve birleşim elemanlarının dayanım ve süneklik seviyelerinin belirlendiği üç grup statik yükleme testlerinden oluşmaktadır. Bu testlerden elde edilen yük-deformasyon davranışları, köprü sisteminin üç boyutlu doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin kullanıldığı sonlu eleman modellerinde kullanılmıştır. Statik sonlu eleman analizi sonuçları, öngerilmeli kirişlerin uçlarında kullanılan sınır koşullarının, köprünün yatay yük altındaki davranışını önemli ölçüde etkilediğini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, yatay yüklerin uygulama bölgesine bağlı olarak, köprü elemanları arasında farklı yük aktarım mekanizmaları olduğu gözlenmiştir. Statik sonlu eleman analizleri ile ayrıca çeşitli alternatif bağlantı detaylarının performansları da incelenmiştir. Dinamik sonlu eleman analizleri ile değişik çarpma hızları, çarpan cismin ağırlığı, ve öngerilmeli kirişlerin uçlarında kullanılan sınır koşullarının etkileri incelenmiştir. Bu analizler, çarpan cisim ile köprü arasındaki çarpma sürelerinin, incelenen bütün değişkenler için çok kısa süreli olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, köprü sisteminin, dinamik analizlerde, statik analizlerde olduğundan farklı şekillerde deformasyona uğradığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yaya köprüsü, çarpma, öngerilme

ABSTRACT

The behavior of a typical prestressed concrete through-girder pedestrian bridge system under vehicular impact loads has been investigated through an integrated experimental and numerical study. Three series of tests have been performed on connection details, as well as bridge subassemblages, to determine the strength and ductility characteristics. Information obtained from the laboratory tests have been incorporated into the three-dimensional finite element models of a typical bridge system. The static finite element analyses indicated significantly different bridge response depending on whether or not the flexibility of the girder supports were included in the models. Results from these analyses also showed that the lateral load and deformation capacities of the bridge system could be improved by modifying the existing connection detail between the girders and the floor beams. The dynamic impact analyses indicated relatively small impact durations. These analyses revealed a different deformation pattern of the bridge system than those observed in the static analyses.

Keywords: Pedestrian bridge, impact load, prestressed concrete

GİRİŞ

Son yıllarda yayınlanan araştırma sonuçları, Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) her yıl çok sayıda otoyol ve yaya köprüsünün aşırı yüksek araçların çarpma yüklerine maruz kaldığını ortaya koymuştur. Bu tür kazalar yalnızca köprü sisteminde yapısal hasara sebep olmakla kalmayıp çoğu durumlarda yaralanmalara ve ölümlere de yol açmaktadır. 1980 yılında yayınlanan bir NCHRP raporuna göre sadece ABD'de yılda ortalama 200 öngerilmeli beton köprü hasara uğramakta ve bu hasarların %80'i aşırı yüksek araçların yada yüklerin köprülere çarpmasından kaynaklanmaktadır [1]. Wardhana ve Hadipriono, ABD'de 1989 ve 2000 yılları arasında 503 köprü'nün hasara uğradığını ve bunlardan 59 tanesinin genel olarak araçların köprülere çarpmasından, 14 tanesinin de aşırı yüksek kamyonların köprülere çarpmasından kaynaklandığını belirtmiştir [2]. 1987 ve 1992 yılları arasında yapılan bir araştırmanın sonuçları Feldman ve diğerleri tarafından yayınlanmıştır [3]. Bu çalışmaya göre yalnızca ABD'nin Teksas eyaletinde çarpmaların yol açtığı köprü hasarları bir yılda %50 artış göstermiştir. Maryland eyaletinde yapılan bir çalışmaya göre de, bu eyaletteki yaklaşık her beş köprüden bir tanesi köprü'nün hizmet süresi boyunca en az bir kez aşırı yüksek araçların çarpmasına maruz kalmaktadır ve bu köprülerin yaklaşık 1/6'sı onarım gerektirmektedir [4]. Feldman ve diğerlerine göre ABD'de aşırı yüksek araçların otoyol ve yaya köprülerine çarpmalarından kaynaklanan kazaların sayısı son yıllarda artan bir eğilim göstermektedir [3]. Bu duruma sebep olarak otoyollarda yapılan köprülerin ve otoyolu kullanan araçların sayısındaki artış gösterilmektedir.

Köprülerin, yüksek araçların çarpmalarından kaynaklanan hasara uğraması sorunu, ABD'deki yerel karayolları departmanları tarafından basit önlemler alınarak azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu tür basit önlemlere örnek olarak; büyük boyutlarda uyarı levhaları kullanmak ve köprü yüksekliklerini gerçekte olduğundan daha az göstermek sayılabilir. Ayrıca, köprülerin yüksekliklerini arttırmak gibi daha pahalı yöntemler de alınabilecek önlemler arasında sayılabilir. Ancak, bu sayılan önlemlerden hiçbirisi köprülerin yüksek araç çarpmalarına maruz kalmasını kesin olarak engellemediğinden, köprü sistemlerinin yatay çarpma yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi gerekmektedir.

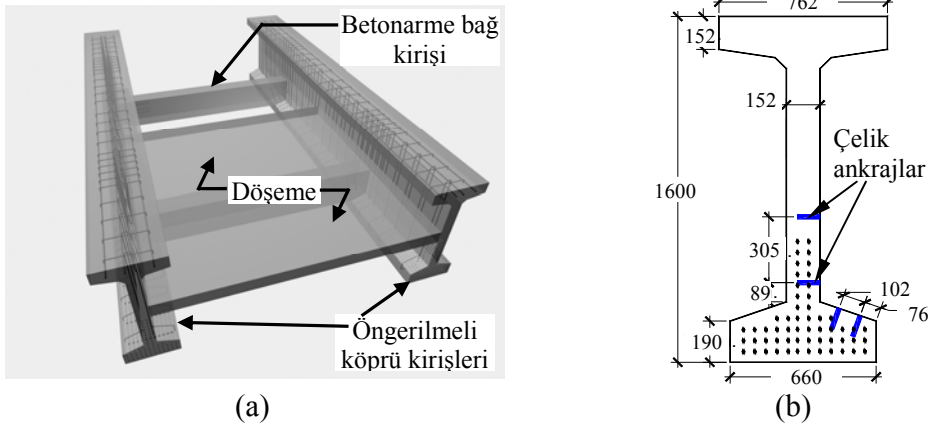
Sengupta ve Breen, küçük ölçekli modelleri test etmek suretiyle değişik diyafram tiplerinin, öngerilmeli beton otoyol köprülerinin yatay çarpma yükleri altındaki davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir [5]. Bu çalışmanın sonucunda, diyaframların öngerilmeli beton köprü kirişlerinin enerji soğurma kapasitelerini düşürdüğü ve kirişlerin daha kırılğan bir davranışa sahip olmasına sebep olduğu belirlenmiştir. Değişik diyafram tip ve konumlarının öngerilmeli beton otoyol köprülerin statik yatay yükler altındaki davranışları üzerindeki etkileri Abendroth ve diğerleri tarafından araştırılmıştır [6]. Bu çalışmada, tek açıklıklı üç kirişten oluşan tam ölçekli bir köprü modeli test edilmiş ve test sonuçları doğrusal malzeme özelliklerinin kullanıldığı sonlu eleman modellerinin kalibre edilmesinde kullanılmıştır. Bu çalışma, köprüye uygulanan yatay yüklerin kirişler arasındaki dağılımının, kullanılan diyafram tipine önemli ölçüde bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Değişik diyafram tiplerinin yatay yükler altındaki performansını belirlemek amacıyla, Andrawes mevcut iki adet öngerilmeli beton otoyol köprüsünün sonlu eleman modellerini hazırlamıştır [7]. Modellerde yatay çarpma yükleri ile birlikte doğrusal malzeme özellikleri kullanılmıştır. İncelenen bütün diyafram tipleri için, yüklemenin diyaframların bulunduğu bölgelerde uygulandığı durumlarda maksimum çekme zorlanmalarının kirişlerin alt başlıklarında ve diyaframların kirişlere bağlandığı bölgelerde gerçekleştiği görülmüştür. Çelik diyaframlar yerine beton diyaframlar

kullanıldığında yatay yük etkilerinin daha lokal kaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, beton diyaframlar kullanıldığında uygulanan yatay yükün diğer kirişlere daha yüksek oranda aktarıldığı belirlenmiştir.

Otoyol köprülerinin yatay yükler altındaki davranışları üzerine yapılmış olan çalışmalar, bu çeşit köprülerde, uygulanan yatay yüklerin köprüdeki diğer elemanlara aktarılabilirliğini deneysel ve analitik olarak ortaya koymuştur. Bu davranış sayesinde, yatay çarpma yüklerine maruz kalan bir otoyol köprü sisteminde alternatif yük taşıma mekanizmaları oluşur ve çarpmadan kaynaklanan yüklerin güvenli bir şekilde köprü ayaklarına aktarılması sağlanmış olur. Otoyol köprülerinden farklı olarak, yaya köprüleri nispeten hafif yapılardır ve köprü elemanları arasında nispeten daha basit ve az sayıda bağlantı içerirler. Bu özelliklerinden dolayı genel olarak yaya köprüleri, araç çarpmalarından kaynaklanan yatay yüklerin etkisi altında kısmi yada tamamı göçmeye karşı otoyol köprülerine kıyasla daha hassastırlar.

Düşük Döşemeli Öngerilmeli Yaya Köprüsü Sistemi

Şekil 1(a)'da görüldüğü üzere, düşük döşemeli öngerilmeli köprü sistemi temel olarak, betonarme bağ kirişlerinin köprünün eksenli boyunca iki adet öngerilmeli beton kirişin alt başlıkları tarafından taşınmasından oluşan bir sistemdir. Betonarme bağ kirişleri de daha sonra üzerlerine yerleştirilen betonarme döşemeyi taşımaktadırlar. Bu tip köprülerde çoğunlukla kullanılan öngerilmeli kirişlerin kesiti de Şekil 1(b)'de görülmektedir. Şekilde belirtildiği üzere, kirişler 160 cm yüksekliğinde olup, öngerilme halatları kirişlerin alt başlığı ve gövdesi içerisine yerleştirilir. Kiriş açıklıkları 40 metre civarında olup, iki öngerilmeli kiriş arasındaki açıklık genellikle 3.5 ile 4.5 metre arasındadır. Bağ kirişleri, 30 cm genişliğinde ve 50 cm yüksekliğindedir ve köprünün eksenli boyunca iki öngerilmeli kiriş arasında 4 ile 4.5 metre aralıklarla yerleştirilir. Bu tip köprülerde kullanılan döşemenin kalınlığı da 15 cm ile 18 cm arasındadır.



Şekil 1. Düşük döşemeli öngerilmeli kiriş yaya köprüsü sistemi: (a) tipik köprü sistemi; (b) öngerilmeli kiriş boyutları (milimetre cinsinden)

Düşük döşemeli öngerilmeli köprü sisteminde, betonarme döşeme ile öngerilmeli prekast kirişler arasında herhangi bir bağlantı bulunmamakta, döşeme sadece bağ kirişlerine çelik donatı vasıtası ile bağlanmaktadır. Betonarme bağ kirişleri ile öngerilmeli prekast kirişler arasındaki bağlantı da öngerilmeli kirişlerin içerisine yerleştirilen çelik ankrajlar tarafından sağlanmaktadır. Şekil 1(b)'de bu ankrajların öngerilmeli kiriş kesiti içerisindeki yerleri

belirtilmektedir. Her bir bağ kirişinin öngerilmeli kirişlere bağlantı noktasında, iki tanesi kirişin alt başlığında ve dört tanesi de kirişin gövdesinde olmak üzere toplam 6 adet çelik ankraj bulunmaktadır.

Öngerilmeli kirişlerin bir ucunda kayar mesnet, diğer ucunda da destekli mesnet bulunmaktadır. Bu iki mesnet çeşidi arasındaki farklardan biri kayar mesnette, destekli mesnete oranla daha kalın bir elastomerik yastık kullanılmasıdır. Kayar mesnetle destekli mesnet arasındaki ikinci fark ise, destekli mesnette öngerilmeli kirişlerin altında bulunan çelik plakaların iki adet 38 mm çapında çelik çubuklarla köprü ayağına sabitlenmiş olmasıdır.

Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, düşük döşemeli öngerilmeli yaya köprüsü sisteminin yatay çarpma yükleri altındaki dayanım ve süneklik davranışlarının fiziksel laboratuvar deneyleri tarafından desteklenmiş sonlu eleman analizleri ile incelenmesidir. Yatay çarpma yükleri köprü elemanları arasında aktarılırken, bu elemanlar arasındaki bağlantılar da yüksek zorlanmalara maruz kalırlar. Bu bağlantıların yeterli seviyede dayanım ve süneklik değerlerine sahip olmaması durumunda köprü sisteminin yapısal bütünlüğü azalır ve bu da köprünün kısmi yada tamamı göçmeye maruz kalmasına sebep olabilir. Bu çalışmada, mevcut yaya köprülerinde kullanılan bağlantı ve kiriş mesnet detaylarını incelemek üzere üç seri laboratuvar deneyi yapılmış ve bu deneylerden elde edilen yük-deformasyon davranışlarının sonlu eleman modellerinde kullanılması suretiyle köprü sisteminin gerçeğe yakın davranışının modellenmesi sağlanmıştır[8]. Tipik bir düşük döşemeli öngerilmeli yaya köprüsü sisteminin yatay çarpma yükleri altındaki davranışı, üç boyutlu tam ölçekli doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin kullanıldığı sonlu eleman modelleri ile incelenmiştir.

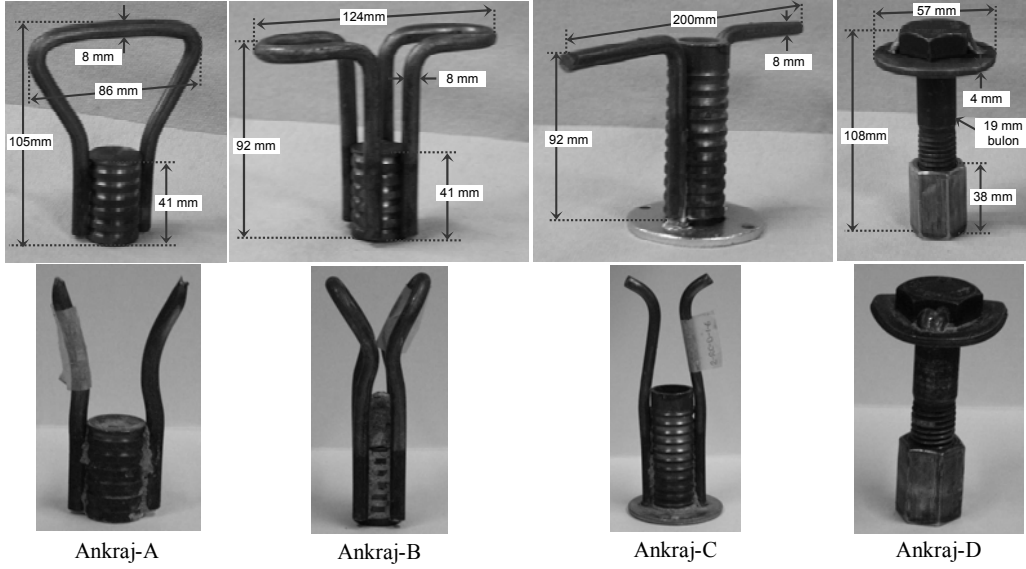
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Daha önceden belirtildiği üzere, deneysel çalışmaların amacı, sonlu eleman modellerinde kullanılmak üzere köprü sisteminin değişik birleşim bölgelerinin ve kiriş mesnet detaylarının yük-deformasyon eğrilerinin elde edilmesidir. Bu amaçla, (1) çelik ankraj çekme deneyleri, (2) bağ kirişi-öngerilmeli kiriş bağlantı deneyleri ve (3) öngerilmeli kiriş mesnet deneyleri yapılmıştır.

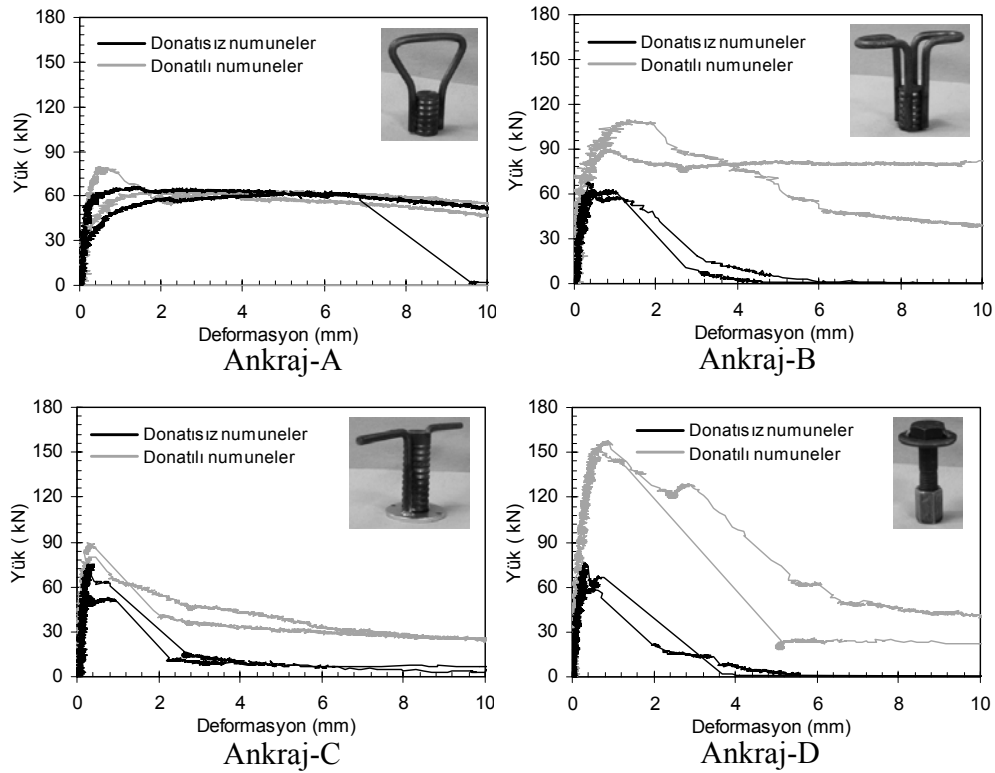
Çelik Ankraj Çekme Deneyleri

Düşük döşemeli öngerilmeli köprü sisteminde bağ kirişleri ile öngerilmeli kirişler arasındaki tek bağlantı, kirişlerin içerisine yerleştirilen çelik ankrajlar vasıtası ile sağlanır. Bu durumda köprü sisteminin yatay yükler altındaki davranışı büyük ölçüde, kullanılan çelik ankrajların davranışı tarafından belirlenir. Bu tür köprülerde kullanılan çelik ankraj tiplerinin dayanım ve süneklik davranışlarını incelemek üzere, 32 adet çekme numunesi test edilmiştir [9]. Bu çekme testlerinde, bir tanesi halen bu tür köprülerde kullanılmakta olan ankraj çeşidi olmak üzere dört farklı tip ankraj test edilmiştir. Her bir deney numunesi, 51 cm genişliğinde ve 25 cm yüksekliğinde beton blok içerisine yerleştirilmiş bir yada iki çelik ankrajdan oluşmuştur. Ankrajların beton blok içerisindeki yerlerini değiştirmek sureti ile beton kenar mesafesinin ankrajların davranışları üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Numunelerin 8 tanesi donatısız beton bloklardan oluşurken, geri kalan numunelerde beton blokların içerisine 12 mm çapında çelik çubuklar yerleştirilmiştir. Ayrıca, köprü kirişlerinin içerisindeki öngerilme kuvvetinin çelik ankrajlar üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, çekme deneylerinde kullanılan

numunelere üç farklı seviyede eksenel basınç (0 MPa, 6.9 MPa ve 13.8 MPa) uygulanmıştır. Deneyler statik yük altında 2mm/dakika yükleme hızı ile yapılmıştır.



Şekil 2. Çekme deneylerinde kullanılan ankrajlar



Şekil 3. Ankraj çekme deneyi sonuçları

Deneyler sırasında numunelerde beton, çelik ve kaynak hasarları gözlenmiştir. Genel olarak, A-tipi ankraj içeren numuneler çelik ve kaynak hasarlarına maruz kalırken, diğer üç ankraj

tipinde yük taşıma kapasitelerinin azalması beton bloklarda oluşan hasarlardan kaynaklanmıştır. Test edilen dört tip ankrajın çekme deneylerinden önceki ve sonraki durumlarını gösteren fotoğraflar Şekil 2’de verilmiştir. Bu fotoğraflarda görüldüğü üzere A-tipi ankrajda, ankraji oluşturan çelik çubuklar köşe bölgelerinde plastik deformasyona uğramış ve kopma meydana gelmiştir. Ayrıca, donatısız beton blok kullanılan numunelerde oluşan beton kırılma konilerinin eğim açıları ölçülmüş ve bu açıların 30 derece ile 45 derece arasında değiştiği blirlenmiştir.

Test edilen dört tip ankrajdan elde edilen yük-deformasyon eğrileri Şekil 3’de verilmiştir. Bu şekilde her bir ankraj çeşidi için, iki tanesi donatılı beton blok iki tanesi de donatısız beton blok olmak üzere toplam dört numune gösterilmektedir. A-tipi ankraj içeren numunelerin, diğerlerine göre daha sünek yük-deformasyon davranışına sahip oldukları şekilde gözükmektedir. Bunun sebebi, daha önce belirtildiği gibi, A-tipi ankrajda, ankraji oluşturan çelik çubukların, köşe bölgelerinde yüksek düzeyde plastik deformasyona uğraması ve bu bölgelerde kopma meydana gelmiş olmasıdır. Diğer üç çeşit ankrajda ise, numuneler genellikle beton hasarına maruz kalmış ve ankraj çeliklerinde sınırlı miktarda plastik deformasyon oluşmuştur. Bu davranışın bir sonucu olarak, A-tipi ankraj içeren numunelerde beton bloklara donatı eklenmesi, numunenin yük-deformasyon davranışında ihmal edilebilecek seviyede küçük değişikliklere sebep olmuştur. Diğer taraftan, D-tipi ankrajlarda donatılı numuneler donatısız numunelere oranla yaklaşık iki kat daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olmuşlardır.

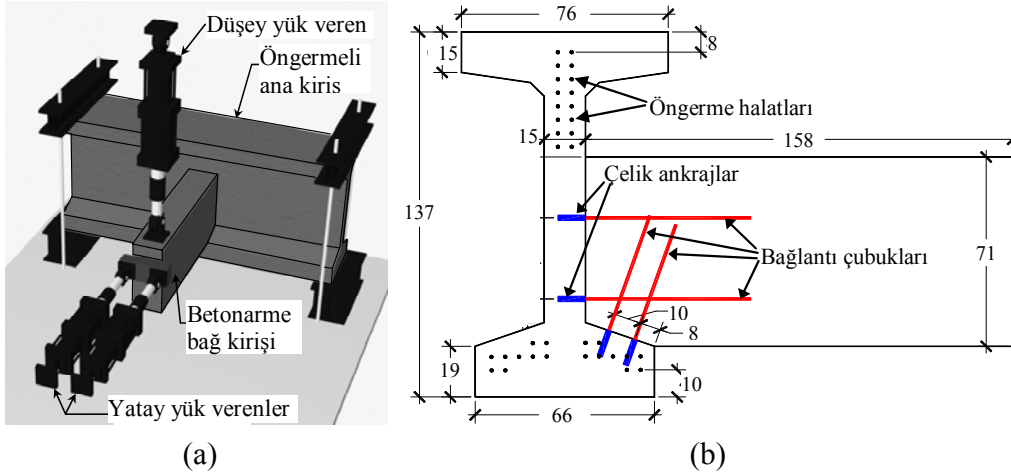
Bağ Kirişi-Öngerilmeli Kiriş Bağlantı Deneyleri

Düşük döşemeli öngerilmeli yaya köprüsü sisteminde bağ kirişleri ile öngerilmeli ana kirişler arasında kullanılan bağlantı detaylarının gerçeği yansıtan yüklemeler altındaki davranışlarının incelenmesi amacıyla 6 adet tam ölçekli bağlantı numunesi statik yükleme altında test edilmiştir [10]. Şekil 4(a)’da görüldüğü üzere, numuneler 305 cm uzunluğunda ve 137 cm derinliğinde prekast öngerilmeli kiriş parçası ile 158 cm uzunluğunda ve 71 cm derinliğinde betonarme bağ kiriş parçasının birleştirilmesinden oluşmuştur. Bağ kirişi ile öngerilmeli kiriş arasındaki bağlantı, öngerilmeli kiriş içerisine yerleştirilen ankrajlar ile bağ kirişi içerisine yerleştirilen ve bu ankrajlara bağlanan çelik bağlantı çubukları ile sağlanmıştır. Her bir numune, iki tanesi öngerilmeli kirişin alt başlığında, iki tanesi de gövdesinde olmak üzere toplam altı tane ankraj içerir (Şekil 4(b)).

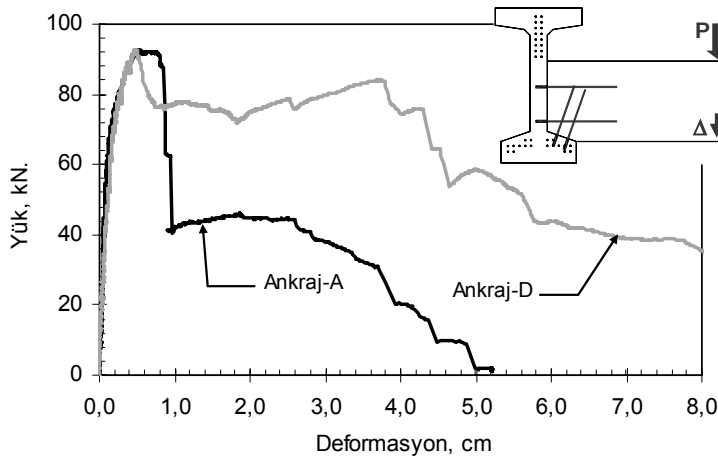
Bağ kirişi-öngerilmeli kiriş bağlantı numuneleri ile üç farklı ankraj tipi iki farklı yükleme altında incelenmiştir. Numunelerde kullanılan üç ankraj tipinden ikisi, çekme deneylerinde kullanılan A-tipi ve D-tipi ankrajlardır. Daha önceden bahsedildiği üzere A-tipi ankrajlar, çekme deneyleri ile test edilen ankraj tipleri içerisinde en sünek davranışa sahip olan ankraj, D-tipi ankraj da en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olan ankraj olarak belirlenmiştir. Bağlantı numunelerinde kullanılan üçüncü çeşit ankraj ise A-tipi ankraja alternatif olarak sunulmuştur ve ankrajın bağlantı çubuğuna bağlandığı bölge dışında A-tipi ankraj ile aynı geometriye sahiptir.

Her bir ankraj tipi için iki farklı bağlantı numunesi test edilmiştir. Bu numunelerden birincisinde bağ kirişinin ucunda aşağı yönde düşey yer değiştirme uygulanmıştır. İkinci numunede ise bağ kirişinin ucunda yukarı yönde düşey ve dışarı yönde yatay olmak üzere eğik yer değiştirme uygulanmıştır. Bu iki yükleme tipi, köprü sisteminin yatay yükleme altında

sonlu eleman modelleri ile incelenmesi sonucunda elde edilmiştir. Şekil 4(a)'da gösterildiği üzere, numuneler test edilirken öngerilmeli kiriş parçasının iki ucu yer değiştirmeye ve dönmeye karşı sabitlenmiş, ve bağ kirişinin ucuna yer değiştirmeleri uygulamak üzere bir adet düşey ve iki adet yatay yük veren bağlanmıştır.



Şekil 4. Tam ölçekli bağlantı numunesi: (a) yükleme detayları; (b) numune boyutları



Şekil 5. Bağ kirişi-öngerilmeli kiriş bağlantı deney sonuçları

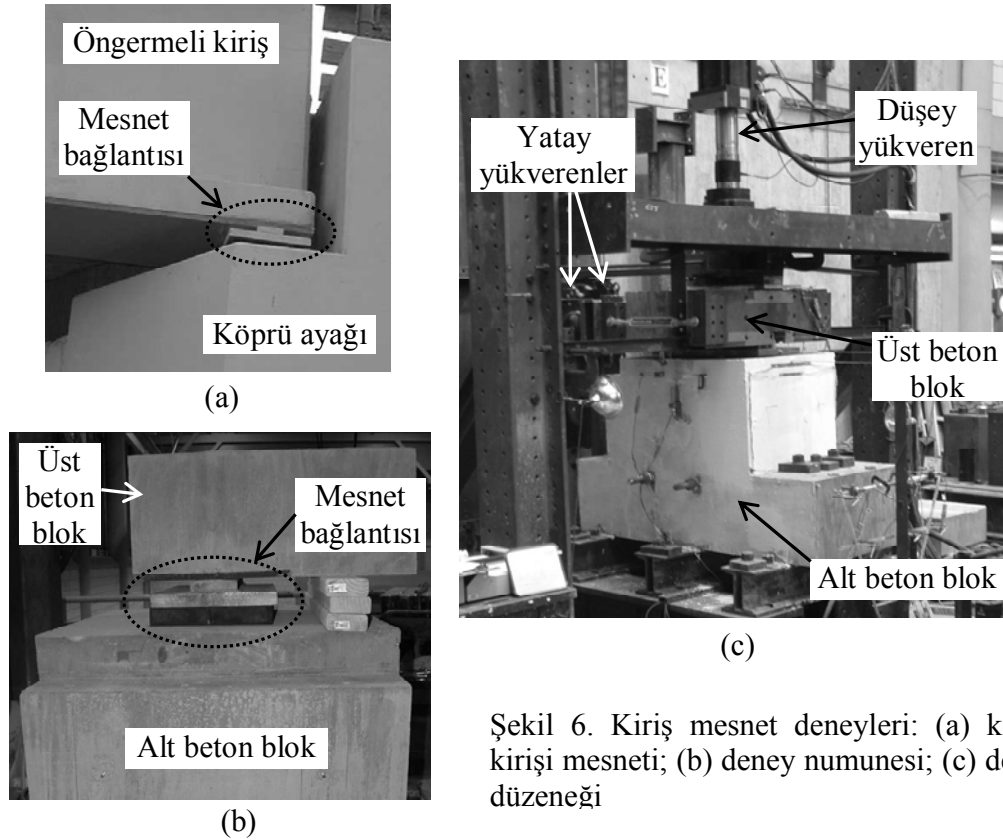
Deneyler sırasında, öngerilmeli kirişlerde bağ kirişlerinin bağlantılarına yakın bölgelerde çatlamlar gözlenmiş ve bağlantı bölgelerindeki ankrajlarda oluşan deformasyonlar sunucunda numunelerin yük taşıma kapasitelerinde ani düşüşler oluşmuştur. Şekil 5'de, aşağı yönde düşey yükleme altında test edilmiş A-tipi ve D-tipi ankrajlar içeren numunelerin yük-deformasyon eğrileri verilmiştir. Şekilde

görüldüğü üzere, iki numune de benzer yük taşıma kapasitelerine sahip olmalarına rağmen, numunelerin deformasyon kapasitelerinde önemli farklılıklar kaydedilmiştir. Bir önceki bölümde bahsedilen ankraj çekme deneylerinde elde edilen sonuçların aksine, bağlantı deneylerinde D-tipi ankraj içeren numune, A-tipi ankraj içeren numuneden daha sünek bir yük-deformasyon davranışı sergilemiştir. İki tür deneyden elde edilen davranışlar arasındaki bu farklılığın, bağlantı numunelerinde kullanılan öngerilmeli kirişlerin yapımı aşamasında takip edilen metoddan kaynaklandığı düşünülmektedir. Öngerilmeli kirişler fabrikada imal edilirken, bağ kirişi-öngerilmeli kiriş bağlantı bölgelerinde kullanılan ankrajlardan kirişlerin gövdesine yerleştirilen dört ankraja kısa çelik çubuklar kaynak yapılmış ve bu suretle ankrajlar birbirlerine sabitlenmiştir. Aynı işlem, kirişlerin alt başlığına yerleştirilen iki adet ankraj için de

uygulanmıştır. Bağlantı deneyleri sırasında, A-tipi ankrajlarda oluşan kopmaların, bu kısa çelik çubukların kaynak yapıldığı noktalarda oluştuğu ve kopma bölgesinde gevrek kopma belirtilerinin olduğu belirlenmiştir. Bu gözlemler göstermiştir ki, çelik çubukların ankrajlara kaynak yapıldığı noktalarda ankrajların kesit alanı küçülmüş ve ayrıca kaynak işleminden dolayı ankraj çeliklerinin yapısı değiştiğinden A-tipi ankraj içeren numuneler beklenen sünek davranışı gösterememiştir. Diğer taraftan, D-tipi ankraj içeren bağlantı numunelerinde, ankrajlara kaynaklanan çelik çubuklar, ankrajların betona daha sağlam tutunmalarına imkan vermiş ve D-tipi ankraj içeren numunelerin beklenilenden daha sünek bir yük-deformasyon davranışı göstermelerini sağlamıştır. Eğik yükleme altında test edilen numunelerde de ankrajlar kaynak işleminden benzer şekilde etkilenmiş ve numuneler yukarıda açıklanan davranışa benzer davranış sergilemiştir.

Öngerilmeli Kiriş Mesnet Deneyleri

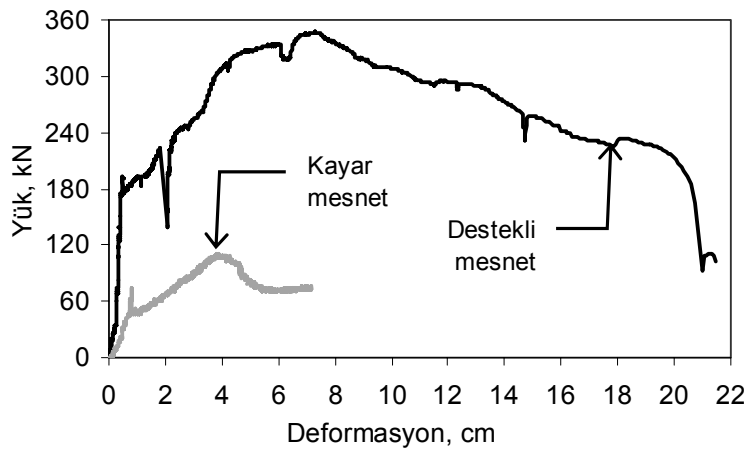
Köprü sistemleri yatay çarpma yüklerine maruz kaldıklarında köprü elemanlarında oluşacak hasarların yanı sıra, ana kirişlerin mesnetler üzerinde kayması da oluşması muhtemel deformasyon çeşitlerinden biridir. Düşük döşemeli öngerilmeli yaya köprülerinde, köprünün kendi ağırlığının az olması sebebi ile yatay yükler altında kiriş uçlarının mesnetler üzerinde kayması diğer köprü sistemlerine göre bu deformasyon şeklinin daha önemle incelenmesini gerektirir. Köprü ağırlığının küçük olmasının yanı sıra, düşük döşemeli öngerilmeli yaya köprülerinde yatay çarpma yüklerine karşı koyacak sadece iki tane ana kiriş olduğundan, bu tür köprülerde kiriş uçlarının mesnetler üzerinde kayma riski otoyol köprülerine oranla çok daha yüksektir.



Şekil 6. Kiriş mesnet deneyleri: (a) köprü kiriş mesneti; (b) deney numunesi; (c) deney düzeneği

Kiriş uçlarında kullanılan mesnet detaylarının yatay yöndeki yük ve deformasyon özelliklerini incelemek amacıyla, bir tanesi kayar mesnet diğeri destekli mesnet olmak üzere iki adet kiriş mesnet numunesi statik yükleme altında test edilmiştir. Daha önceden açıklandığı üzere, kayar mesnetle destekli mesnet arasındaki farklar kayar mesnette, destekli mesnete oranla daha kalın bir elastomerik yastık kullanılması ve destekli mesnette öngerilmeli kirişlerin altında bulunan çelik plakaların iki adet 38 mm çapında çelik çubukla köprü ayağına sabitlenmiş olmasıdır.

Kiriş mesnet numuneleri ve deney düzeneği Şekil 6’da gösterilmiştir. Her bir numune, üst beton blok, mesnet bağlantısı ve alt beton blok olmak üzere üç parçadan oluşmuştur. Şekil 6(a) ve 6(b)’de gösterildiği üzere, üst beton blok köprü kirişinin alt başlığını, alt beton blok da köprü ayağını temsil etmektedir. Deneyler düşey yönde yükleme ve yatay yönde yükleme olmak üzere iki aşamada uygulanmıştır (Şekil 6(c)). Birinci aşamada üst beton bloğa düşey bir yükveren yardımıyla köprünün kendi ağırlığını temsil eden düşey yük uygulanmıştır. İkinci aşamada ise üst beton bloğa bağlı iki adet yatay yükveren ile yatay çarpma yüklerini temsil eden yatay yer değiştirmeler uygulanmış ve bu yüklemeye numunelerin yatay yük taşıma kapasiteleri sone erinceye kadar devam edilmiştir.



Şekil 7. Kiriş mesnet deney sonuçları

yük kapasitesi yaklaşık 100 kN olarak ölçülmüştür. Bu yük kapasitesine ulaşıldığında, üst beton blok yaklaşık 4 cm yatay yer değiştirmeye uğramıştır.

Destekli mesnet numunesinde, üst beton bloğa uygulanan yatay yük, bu detayda kullanılan iki adet çelik çubuk vasıtasıyla alt beton bloğa aktarılmış ve bunun sonucu olarak da deney sırasında alt beton bloğun ön yüzünde çatlamlar ve beton kırılmaları oluşmuştur. Beton kırılmasını takiben çelik çubuklarda önemli miktarda eğilmeler gözlenmiştir. Şekil 7’de görüldüğü üzere, destekli mesnet numunesinde, mesnet bağlantısını köprü ayağına sabitlemek için kullanılan iki adet çelik çubuk, bu numunenin yük ve deformasyon kapasitesini kayar mesnet numunesine oranla büyük miktarda arttırmıştır.

SONLU ELEMEN ANALİZLERİ

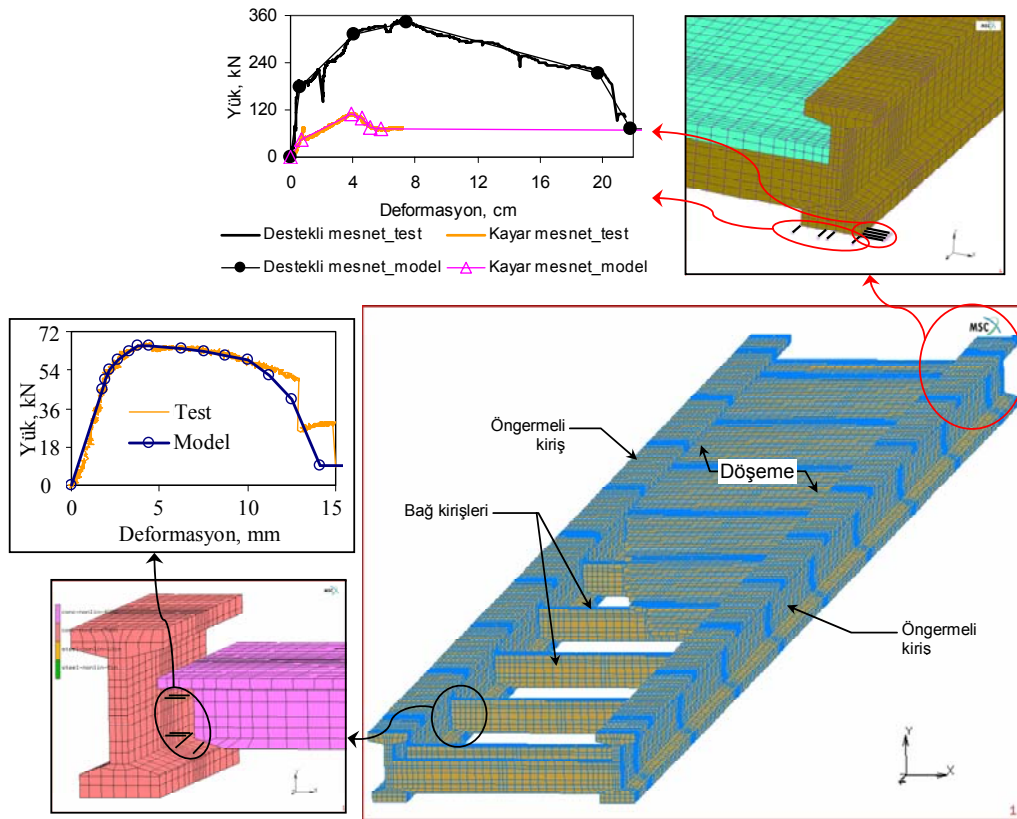
Laboratuvar deneylerinden elde edilen köprü sisteminin değişik bölgelerinin yük-deformasyon davranışları üç boyutlu tam ölçekli sonlu eleman modellerinde kullanılarak köprü davranışı

Kayar mesnet numunesinde alt ve üst beton bloklarda herhangi bir çatlama gözlenmemiştir. Bu numunede elastomerik yastık, yatay yükleme etkisi altında kesme deformasyonuna uğramış ve deneyin sonlarına yaklaşıldığında mesnet bağlantısını oluşturan çelik plakalarla elastomerik yastık arasında kaymalar meydana geldiği gözlenmiştir. Şekil 7’de görüldüğü üzere, kayar mesnet numunesinin yatay

yatay çarpma yükleri altında incelenmiştir. Modellerde, statik yatay yük analizleri ve dinamik yatay çarpma analizleri olmak üzere iki farklı çeşit analiz uygulanmıştır.

Sonlu Eleman Modellerinin Tanımlanması

Modellerin oluşturulması, analiz edilmesi ve sonuçların incelenmesi MSC Marc/Mentat programı ile IBM Power4 çalışma istasyonlarında çoklu işlemciler kullanılarak yapılmıştır. Köprünün değişik bölgelerinin modellenmesi için kullanılan teknikler Şekil 8’de gösterilmiştir. Öngerilmeli kirişler, bağ kirişleri ve döşeme birbirlerinden bağımsız parçalar olarak tanımlanmış ve bu parçaların birbirlerine bağlantıları gerçek köprülerdeki bağlantılara uygun olarak modellenmiştir. Şekilde gösterildiği üzere modellerde, bağ kirişleri ile öngerilmeli ana kirişler arasındaki bağlantı tek boyutlu elemanlar kullanılarak yapılmıştır. Bu bağlantı elemanlarının malzeme özellikleri, çelik ankraj çekme deneylerinden elde edilen yük-deformasyon eğrileri göz önüne alınarak tanımlanmıştır. Öngerilmeli ana kirişlerin uçlarındaki mesnetlerin davranışının modellenmesi her bir kiriş ucunda iki yönde tek boyutlu elemanlar kullanılarak yapılmıştır. Kiriş uçlarında kullanılan elemanların malzeme özellikleri tanımlanırken de, kiriş mesnet testlerinden elde edilen yük-deformasyon eğrilerinden faydalanılmıştır. Ayrıca, öngerilmeli ana kirişler, bağ kirişleri ve döşeme elemanları için kullanılan beton malzeme özellikleri, betonun basınç altında ezilmesi ve çekme altında çatlaması özelliklerini içermektedir.



Şekil 8. Sonlu eleman modelleri

Statik Yatay Yük Analizleri

Bu analizlerde, öngerilmeli ana kirişlerden birinin alt başlığına yatay yönde doğrusal olarak artan statik yer değiştirme uygulanmış ve köprü sisteminin bu yükleme altındaki davranışı değişik parametreler kullanılarak incelenmiştir. Bu analizler, yüklemenin birinci ana kirişin dış yüzünde veya ikinci ana kirişin i yüzünde uygulanması durumları arasında köprünün davranışında önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir. Buna göre, yüklemenin birinci kirişin dış yüzüne uygulandığı durumda, ana kirişlerde ezilmeler ve ana kirişlerde ve döşemede çatlamalar oluşmuştur. Yüklemenin, ikinci kirişin i yüzüne uygulandığı durumda ise, köprü elemanları arasındaki yük aktarımının genel olarak bağ kirişleri ile ana kirişler arasındaki bağlantılar vasıtası ile olduğu ve köprü sisteminin davranışının büyük ölçüde bu bağlantı elemanlarının davranışları tarafından kontrol edildiği gözlenmiştir. Bu durumda, köprü sisteminin yatay yük taşıma kapasitesinin, birinci yükleme durumuna oranla büyük ölçüde azaldığı da gözlenmiştir.

Köprü sisteminin, ikinci yükleme durumu altındaki yük taşıma ve deformasyon kapasitelerini geliştirmek amacı ile, ana kirişler ile bağlantı kirişleri arasında değişik bağlantı detayları incelenmiştir. Döşeme ile öngerilmeli ana kirişler arasında, bağ kirişleri ile ana kirişler arasındaki bağlantılara benzer bağlantılar kullanılması, köprü sisteminin yatay yöndeki yük taşıma kapasitesini arttırmış ancak yk-deformasyon eğrisinin şeklini değiştirmemiştir. İkinci alternatif bağlantı detayı olarak iki ana kirişin, herbir bağ kirişi içerisinden geçen elik çubuklar yardımı ile birbirlerine bağlanması incelenmiştir. Bu bağlantı metodu ile, kullanılan çubukların kesit alanları ve malzeme özelliklerine bağlı olarak, köprünün yatay yük taşıma ve deformasyon kapasitelerinde önemli artışlar sağlanmıştir.

Statik yatay yük analizleri ile, kiriş uçlarındaki mesnet özelliklerinin, köprü sisteminin yatay yük altındaki davranışına etkileri de incelenmiştir. Analizler sırasında, kiriş sınır koşulları, kiriş mesnet testlerinden elde edilen yük-deformasyon davranışları kullanılarak modellendiğinde, köprü sisteminin davranışı önemli ölçüde değişmiş ve kirişlerdeki ve döşemedeki çatlamalar ve ezilmeler yerine, köprünün mesnetler üzerinde yatay yönde kaydığı gözlenmiştir. Bu durumda, köprü sisteminin yatay yük taşıma kapasitesi, kiriş mesnet bağlantılarının kapasitesi ile sınırlı kalmıştır.

Dinamik Yatay arpma Analizleri

Dinamik arpma analizleri, köprü sisteminin, yatay çarpmaya maruz kaldığında sisteme etkiyecek yükleri belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu analizlerde, sabit bir ilk hıza sahip bir rijit kütlenin öngerilmeli ana kirişlerden bir tanesinin alt başlığına çarpması sonucu oluşan kuvvetler ve deformasyonlar incelenmiştir. Statik yatay yük analizlerinden farklı olarak, dinamik modellerde ana kirişler, bağ kirişleri ve döşeme birbirlerine rijit bir şekilde bağlanmış ve bütün malzemeler doğrusal-elastik olarak kabul edilmiştir. Bu basitleştirmeler, dinamik analizler için gereken bilgisayar analiz sürelerini kabul edilebilir seviyelerde tutmak amacı ile yapılmıştır.

Dinamik analizlerde, köprüye çarpan kütle için iki farklı sabit hız değeri (97 km/h ve 48 km/h), üç farklı ağırlık değerinde (320 kN, 133 kN ve 44 kN) incelenmiştir. Bu analizlerde ayrıca, ana kiriş mesnet özellikleri ve çarpma noktasının köprünün eksen içerisindeki yeri de değişken parametreler olarak kullanılmıştır.

Dinamik çarpma analizleri, statik analizlerden çok farklı deformasyon şekilleri ortaya çıkarmıştır. Çarpmanın ilk olduğu anda, çarpan kütlenin öngerilmeli ana kirişlerde oluşturduğu hasarın, çarpma bölgesine çok yakın sınırlar içerisinde kaldığı gözlenmiştir. Belirli bir zaman sonra, çarpmanın etkisi hızlı bir şekilde ana kirişlerin uçlarına doğru ilerlemiştir. Ayrıca, yine statik analizlerden farklı olarak, kiriş mesnetlerinin sahip olduğu esnekliğin dinamik analizlerde önemli farklılıklara yol açmadığı anlaşılmıştır. Bunun sebebi, dinamik analizlerde köprü elemanlarında oluşan hasarın çok bölgesel kalmasıdır. İncelenen her hız ve kütle kombinasyonu için, köprü sisteminde oluşan maksimum dinamik kuvvetler (PDF) belirlenmiştir. Ayrıca, PDF değerleri, dinamik analizlerden hesaplanan itki değerleri kullanılarak eşdeğer statik yük değerlerine (EIF) dönüştürülmüştür. Bu analizler sonucunda, PDF ve EIF değerlerinin, statik analizlerden elde edilen köprü sisteminin yük taşıma kapasite değerlerinden önemli ölçüde büyük olduğu görülmüştür. Bu durumun sebeplerinden birisi dinamik analizlerde doğrusal-elastik malzeme özelliklerinin kullanılması ve böylece köprü sisteminde oluşacak hasarların yok sayılmış olmasıdır. Gerçek bir çarpma durumunda, köprü elemanlarında oluşacak hasarlar ile çarpan kütlenin enerjisi soğurulur ve köprü sisteminde oluşacak kuvvetler azaltılmış olur. Ayrıca, köprü elemanları arasında kullanılan bağlantıların sahip olduğu doğrusal olmayan deformasyon kapasitesi, köprü sisteminin herhangi bir bölgesine etkileyen çarpma yüklerinin köprü elemanları arasında paylaşılmasını mümkün kılar. Bu davranışın sonucu olarak, köprünün tamamı yada kısmi göçmeye uğraması engellenmiş olur.

SONUÇLAR

Bu çalışmada yapılan deneysel ve sayısal analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Çelik ankrajlar üzerinde yapılan çekme deneyleri, halen Minnesota Eyaleti'ndeki öngerilmeli beton köprülerde kullanılan ankraj tipinin test edilen bütün ankraj tipleri içerisinde en yüksek süneklik değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Bu tip ankrajın, ankrajı oluşturan çelik tellerin yüksek seviyede plastik deformasyona uğraması sonucu, yük kapasitesinde önemli azalmalar olmaksızın yüksek deformasyon kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir.
- Öngerilmeli beton köprü kirişleri imal edilirken, çelik ankrajların donatı demirine kaynaklanması işleminin, ankrajların yük-deformasyon davranışında önemli değişikliklere sebep olduğu belirlenmiştir. Kaynaklama işlemi, test edilen birinci ankraj tipinde deformasyon kapasitesinde önemli düşümlere sebep olurken, diğer ankraj tipinde ankraj ile ankrajın etrafındaki beton arasındaki yük transferini arttırmak sureti ile yük ve deformasyon kapasitelerinde artış sağlamıştır.
- Öngerilmeli kiriş mesnet deneyleri sırasında, sabit ve kayar mesnet bağlantılarının yüksek miktarlarda yatay yer değiştirmeye uğradığı görülmüştür. Bu davranış göstermiştir ki, öngerilmeli ana kirişlerin uçlarında, kirişlerin iki yanına beton duvarlar konulmak sureti ile kirişlerin yatay çarpma yükleri altında köprü ayağı üzerinde kayması sonucu oluşabilecek göçmeler önlenabilir.
- Statik sonlu eleman modelleri ile incelenen alternatif öngerilmeli kiriş-bağ kirişi bağlantı detayları kullanıldığında, köprü sisteminin yatay yükler altındaki davranışının geliştirilebileceği belirlenmiştir. Özellikle, iki ana kirişin her bir bağ kirişi içerisinden geçen çelik çubuklar yardımı ile birbirlerine bağlanması durumunda, kullanılan çubukların kesit alanları ve malzeme özelliklerine bağlı olarak, köprünün yatay yük taşıma ve deformasyon kapasitelerinde önemli artışlar sağlanmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] G. O. Shanafelt and W. B. Horn, 1980, "Damage Evaluation and Repair Methods for Prestressed Concrete Bridge Members", National Cooperative Highway Research Program, Report 226, Transportation Research Board, Washington, DC.
- [2] K. Wardhana and F. C. Hadipriano, 2003, "Analysis of Recent Bridge Failures in the United States", Journal of Performance of Constructed Facilities, V.117, No.3, pp.144-150.
- [3] L. R. Feldman, J. O. Jirsa and E. S. Kowal, 1998, "Repair of Bridge Impact Damage", Concrete International, V.20, No.2, pp. 61-66.
- [4] University of Maryland Bridge Engineering Software and Technology Center, 2001, "Vehicle Collisions with Highway Bridges", Research Report SP907B1, Maryland State Highway Administration, College Park, Maryland.
- [5] S. Sengupta and J. E. Breen, 1973, "The Effect of Diaphragms in Prestressed Concrete Girder and Slab Bridges", Research Report 158-1F, The University of Texas at Austin Center for Highway Research, Austin, Texas.
- [6] R. E. Abendroth, F. W. Klaiber and M. W. Shafer, 1995, "Diaphragm Effectiveness in Prestressed Concrete Girder Bridges", Journal of Structural Engineering, V.121, No.9, pp.1362-1369.
- [7] B. O. Andrawes, 2001, "Lateral Impact Response for Prestressed Concrete Girder Bridges with Intermediate Diaphragms", MS Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.
- [8] E. Baran, 2006, "Analysis of the Strength and Stability of Prestressed Concrete Through-Girder Pedestrian Bridges under Vehicular Impact", PhD Dissertation, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota.
- [9] E. Baran, A. E. Schultz and C. E. French, 2006, "Tension Tests on Cast-in-Place Inserts: The Influence of Reinforcement and Prestress", PCI Journal, V.51, No.5, pp.88-108.
- [10] E. Baran, A. E. Schultz and C. E. French, 2007, "Behavior of Girder-Floor Beam Connections in Prestressed Concrete Pedestrian Bridges Subjected to Lateral Impact Loads", ASCE Journal of Structural Engineering: Special Issue on Precast-Prestressed Concrete Structures under Natural and Human-Made Hazards, V.133, No.11, pp.1670-1681.