KARAKAYA DEMİRYOLU KÖPRÜSÜNÜN DEPREM GÜÇLENDİRME VE KARAYOLU EKLENTİSİ İLE KAPASİTE ARTIRIMI ÇALIŞMASI

Barbaros Sarıcı[1], Nick Marionos[2], Alp Caner[3]

[1] Genel Müdür, RUA Mühendislik, Ankara
[2] Uzman Demiryolu Köprü Mühendisi, Texas, ABD
[3] Y. Doç. Dr., ODTÜ İnşaat Mühendisliği, Ankara
e-mail: acaner@metu.edu.tr

ÖZET:

Karakaya Baraj Gölü üzerinde inşa edilen ve 16 Haziran 1986 tarihinde tek şeritli demiryolu taşımacılık hizmetine açılan Karakaya Demiryolu Köprüsü 29 adet kafes kirişten oluşmaktadır. Toplam uzunluğu 2030 metre olan köprünün aynı zamanda karayolu trafiğine açılması da zaman zaman gündeme gelmiş ve bu yönde çeşitli mühendislik gruplarının çalışmalarda bulunduğu fakat üretilen çözümlerin ekonomik ve pratik olmadığı duyulmuştur. Köprünün karayolu trafiğine açılması durumunda iki ilin baraj kıyıları arasındaki karayolu taşımacılığı ulaşım zamanın yaklaşık olarak 1 saat kadar kısalacağı düşünülmektedir. Günümüz değişen yöresel deprem etkilerine göre mevcut köprü değerlendirilmiş ve güçlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Yapılan teknik mühendislik hesapları sonucunda iki şeritli karayolu geçişinin köprünün üstüne eklenmesi durumunda köprünün ihtiyacı olan rijitliği kazanacağı ve aynı zamanda depreme karşı dayanımının günümüz deprem şartlarını sağlayacağı tespit edilmiştir. Bu makale içerisinde özel uzmanlık gerektiren karayolu köprüsü eklentisi ve deprem güçlendirme mühendislik uygulamalarının pratikte uygulanabilir ve ekonomik olarak da uygun olduğu gösterilmiştir. Bu kapsamda köprü üzerinde test treni geçişleri yapılırken köprünün yapısal davranışını belirlemek amacıyla alınan çeşitli ölçümler bilgisayar modellemesinin doğrulanmasında kullanılmıştır. Çelik malzeme testleri yapılarak direnim ve süneklik ölçülmeye çalışılmıştır. Perçinli bağlantılar gözden geçirilmiş, ve mevcut ve önerilen durum için köprünün yorulma analizleri yapılmıştır. Avrupa normlarına uygun olarak güvenirlik endeksi analizleri yapılmıştır. Köprüye eklenen ağırlık sadece iki lokomotif ağırlığı kadar olduğu için masif temel yapısında yeni deprem etkileri altında olumsuzluk oluşmadığı tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: köprü, demiryolu, güçlendirme, karayolu

1. GİRİŞ

Karakaya Baraj Gölü üzerinde inşa edilen ve 16 Haziran 1986 tarihinde hizmete açılan köprü, Türkiye'nin en uzun demir yolu köprüsüdür. 2.030 m uzunluğundaki köprü, yaklaşık olarak 60 m yüksekliğinde olup, 30 adet betonarme ayağın üzerine, her biri 366 ton ağırlığında ve 65 m boyundaki 29 adet çelik kirişten oluşturulmuştur (Şekil 1). 70 cm çapında 420 m kaya ankaraj kazığı kullanılmıştır. Ayrıca ayaklar altında ϕ120 ve ϕ200 cm çaplı kazıklarda bulunmaktadır.

Köprünün hemen yakınında bulunan feribot geçişleri sırasında yaklaşık 7-8 sene önce çok ölümlü bir kaza olmuştur. Bu kazadan sonra demiryolu köprüsünden karayolu geçişi gündeme gelmiş ve çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmadan önceki çalışmalar ekonomik bir mühendislik çözümü getirmekten aciz kalmıştır. Bu çalışma kapsamında karayolunun demiryolu köprüsünün üzerine getirilmesi önceki çalışmalarda gösterilen maliyetleri önemli derecede düşürmüş ve projenin olabilirliğini göstermiştir. Önerilen sistem sadece ekonomik değil aynı zamanda köprünün deprem etkisi altındaki davranış zaafiyetlerinide ortadan kaldırmıştır.

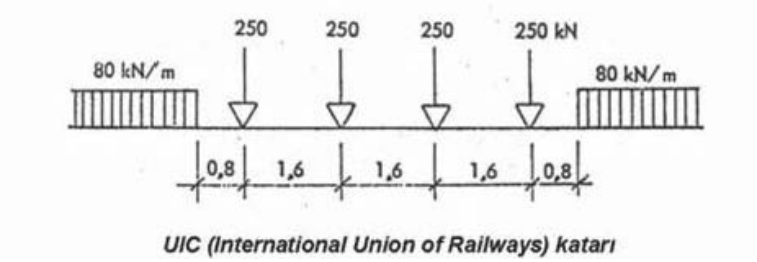
Şekil 1 - Karakaya Köprüsü Malatya Kenarı

2. TASARIM YÜKLERİ VE KISTASLARI

Mevcut köprü, üzerinden ayni anda tren ve karayolu geçişi olacak şekilde incelenmiştir. Köprü hakkındaki tüm bilgiler, TCDD' den sağlanan çizimlerden ve köprü hakkındaki dokümandan elde edilmiştir. Proje kapsamında, köprü statik düşey yükler için Avrupa Şartnamesi - 3 (Eurocode 3) – Kısım 2 (Çelik Köprüler İçin Avrupa Standart Kodu), dinamik yani deprem yükleri içinse ülkemizde sıklıkla kullanılan AASHTO (Otoyollar ve Köprüler için Amerikan Standart Kodu) ve kullanılarak incelenmiştir. Proje kapsamında kullanılan yükler aşağıdaki gibidir.

2.1 Tren Yükü

Tren yükü olarak güncel tasarımlar için kullanılması öngörülen UIC-LM71 treni kullanılacaktır (Şekil 2). Tren yükü için kullanılması gereken dinamik etki faktörü Eurocode EN 1991-2, Bölüm 6.4.5' den hesaplanmıştır. Trenin raydan çıkması durumunda köprü üzerinde oluşacak yükler, EN 1991-2 Bölüm 6.3.5 den hesaplanmıştır.

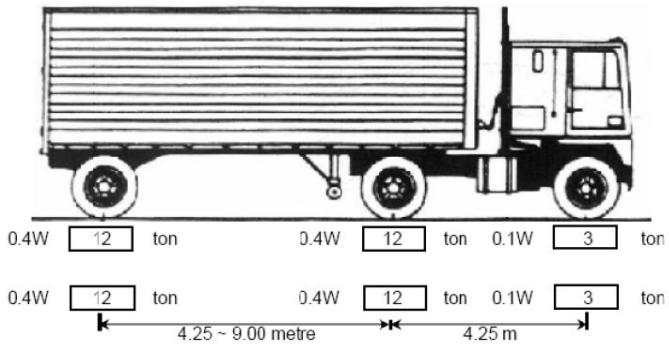


Şekil 2 - Tren Yükü

2.2 Karayolu Taşıt Yükü

Köprü üzerinde geçmesi öngörülen en ağır araç yükü H_{30}-S_{24}, yani 54 tonluk kamyondur (Şekil 3). Platform genişliliği iki aracın ayni anda geçmesini sağlayacak şekilde toplam 7m genişliğinde tasarlanmıştır. Kamyon için kullanılması gereken dinamik etki faktörü AASHTO-LFD den hesaplanmıştır. Kamyonun bariyerlere çarpması durumunda oluşacak yükler, 1,2 m uzunluğunda bir alan için, köprüye dik yönde 12 Ton. m, köprüye paralel yönde 4 Ton. m olarak alınmıştır. Çarpma kuvveti AASHTO-LFD de belirtilen hızlı bir araba çarpmasını veya yavaş hızda giden bir kamyon çarpmasını temsil etmektedir.

Karayolu üst yapısı her ne kadar standart hızda geçişe uygun olsa da köprünün uzun ve dar olması, ayrıca emniyet şeridinin de bulunmamasından dolayı, geçişlerin kontrollü olarak ve maksimum 50 km/saat hızda yapılacağı varsayılmıştır.

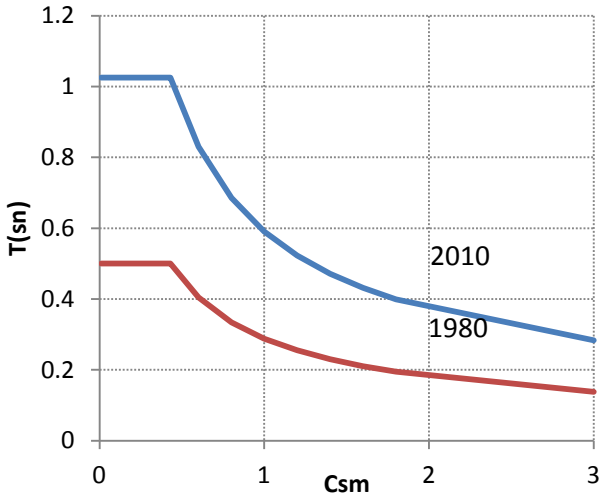


Sekil 3 H_{30}-S_{24} Kamyon Aks Yükleri

2.3 Deprem Etkisi

Deprem etkisi 1993 senesinde Türkiye için hazırlanmış ve halen T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün de kullandığı DMAM 93-01 numaralı rapordan alınmıştır. Bu raporda göre, proje kapsamında incelenecek olan, 38.57 N boylam ve 38.45' enlemindeki Karakaya Köprüsü için 475 senelik tasarım depremine karşılık gelen kuvvetli yer hareketi ivmesi (PGA) 0.41g dir. Mevcut köprünün tasarımıyla ilgili dokümanların incelenmesi sonucu, 1980 li yıllarda bu değerin 0.2g olarak alındığı tespit edilmiştir. AASHTO-LRFD (2007) denklem

3.10.6.1-1 ' e göre deprem davranış spektrası olarak aşağıda gösterilen eğri kullanılmıştır (Şekil 4). Düşey yönde deprem davranış eğrisi, ATC-32 göre yatay yöndeki değerin 2/3 olarak alınmıştır.



Şekil 4 - Deprem Davranış Spektraları

2.4 Rüzgar ve Sıcaklık Etkileri

Rüzgâr etkisi AASHTO-LFD den 3,6 kN/m^2 olarak hesaplanmıştır. Sıcaklıkda yükselme ve azalma miktarları yapım sırasında kabul edilen bir ısı derecesine bağlı olarak ve yapının bulunduğu bölgeye göre saptanmıştır. Meteoroloji bülteni değerlerine göre sıcaklık artışı +27 ^{o}C, sıcaklık azalması -12 ^{o}C olarak alınmıştır. Betonarme ve çelik için sıcaklık artışında ve düşmesinde farklılıklara bakılmıştır.

2.5 Tasarım Kıstasları

Proje kapsamında kullanılmış olan tasarım kıstasları Tablo 1 de özetlenmiştir.

Tablo 1 - Tasarım Kıstasları

Malzeme Özellikleri (Mevcut Yapı İçin)	
Çelik (Mevcut çizimlerden faydalanarak)	St37
İzin verilebilir gerilme	2.4 ton/cm^2
Beton	C18
Malzeme Özellikleri (Yapılacak Olan Güçlendirme ve Karayolu Bağlantı Yapıları İçin)	
Beton	C30
Demir Donatı	St420
Çelik (Güçlendirme/Yeni Yapı)	St37/St50
Cıvatalar	A325 8.8 Grade, fy=640 MPa
Karayolu Platform Genişliği	7 metre
Malzeme Özellikleri (Kazıklar – ϕ120 cm/ ϕ200 cm)	

İzin Verilebilir Düşey Yük Taşıma Kapasitesi	1600 Ton/4000 Ton
İzin Verilebilir Kesme Yükü Taşıma Kapasitesi	82 Ton/222 Ton
Tasarım Yükleri	
Tren Yükü	• UIC-LM 71 Treni • Dinamik Etki: 1.1
Trenin Raydan Çıkması	Tren yükünün 1.2m ötelenmiş hali, EN 1991-2 Bölüm 6.3.5.
Kamyon Yükü	• H30-S24 Kamyonu • 54 Ton • Dinamik Etki: 1.15
Kamyonun Bariyerlere Çarpma Yükü	1,2 m uzunluğunda bir alan için, köprüye dik yönde 12 Ton.m, köprüye paralel yönde 4 Ton.m.
Deprem Yükü	PGA =0.41g
Yapıya Etkiyen Rüzgâr	3,6 kN/m^2
Isısal Değişimler	• Betonarme için -12^{o}C ve +27^{o}C sıcaklık değişimi • Çelik elemanlar için -18^{o}C ve +50^{o}C sıcaklık değişimi

2.6 Yük Kombinasyonları

Analizler sırasında kullanılan yük kombinasyonları, Eurocode EN-1990 a göre aşağıdaki şekilde belirlenmiştir. Deprem için %100 boyuna+%30 enine ve %100 enine+%30 boyuna olmak üzere iki farklı durum incelenmiştir (Tablo 2).

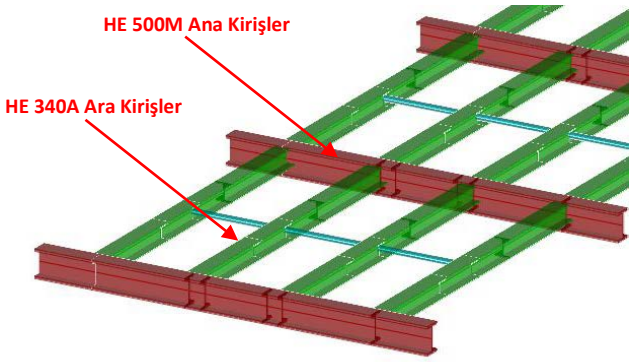
Tablo 2. Yük Kombinasyonları

	Ölü Yük	**Tren Yükü**	**Kamyon Yükü**	**Deprem**	**Rüzgar**	**Sıcaklık**
Sabit+Hareketli (tren)	1,05	1,45				
Sabit+Hareketli (tren)+Deprem	1,0	0,5		1		
Sabit+Hareketli	1,05	1,45	1,35			
Sabit+Hareketli+Rüzgar	1,05	1,45	1,35		1,125	
Sabit+Hareketli+Deprem	1	0,5	0,5	1		
Sabit+Hareketli+Isı	1,05	1,45	1,35			0,9
Sabit+Tren Çarpma	1,0	1,0				
Sabit+Kamyon Çarpma	1,0		1,0			

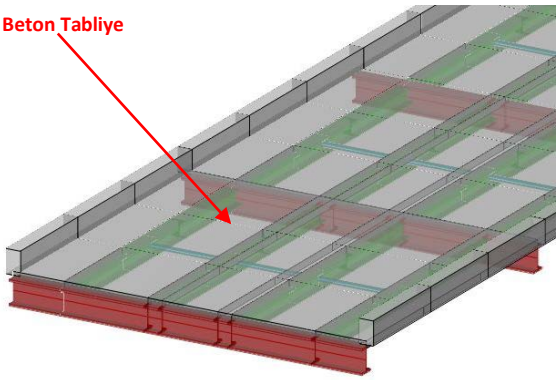
3. KARAYOLU KÖPRÜ TABLİYESİ

Köprünün üzerine inşa edilecek olan karayolu tabliyesi için fizibilite çalışması sırasında geliştirilen alternatifler arasından, en ekonomik, pratik, hafif ve köprünün deprem performansına katkıda bulabilecek olan alternatif ile uygulama projesi hazırlanmıştır,(Şekil 5, 6, 7 ve 8). Yapım aşamasını kısaltabilmek için, tabliyenin çelik çerçevesiyle birlikte atölyede üretilerek sahaya sevk edilmesi ve montajının yapılması mümkün olacak şekilde geliştirilmiştir. Tabliye üzerinde herhangi bir kaplama malzemesi uygulaması gerekmeyeceğinden, montaj sonrası köprü hızlıca karayolu trafiğine açılabilecektir.

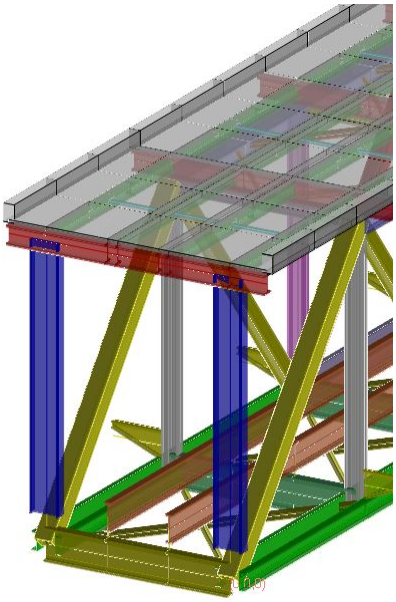
Yeni tabliyeyi taşıyacak çelik çerçevenin sadece köprünün düşey elemanları üstüne oturtulması ve böylece mevcut köprüye müdahalenin en az seviyede olması sağlanmıştır, Şekil 8. Deprem yükünün etkin bir şekilde ayaklara aktarılabilmesi için gereken diyafram etkisi 15 cm lik beton tabliye tabliyenin sürekli olması ile sağlanmıştır.



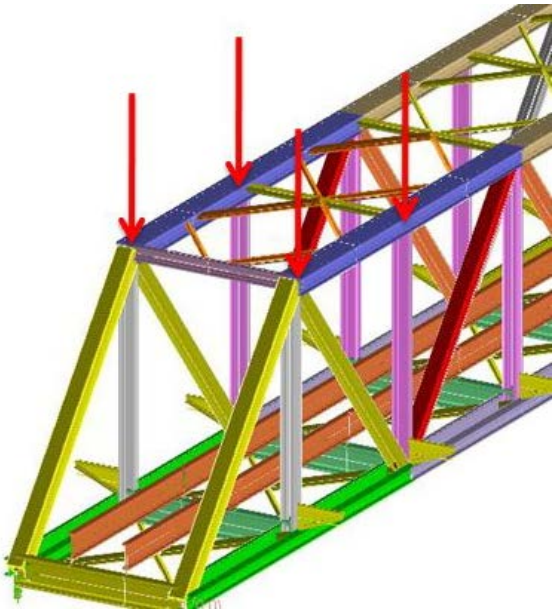
Şekil 5 - Çelik Çerçeve



Şekil 6 - Beton Tabliye ve Çelik Çerçeve



Şekil 7 - Mevcut Köprü ve Karayolu Tabliyesi



Şekil 8 - Karayolu Tabliyesinin Mevcut Köprüye Oturma Noktaları

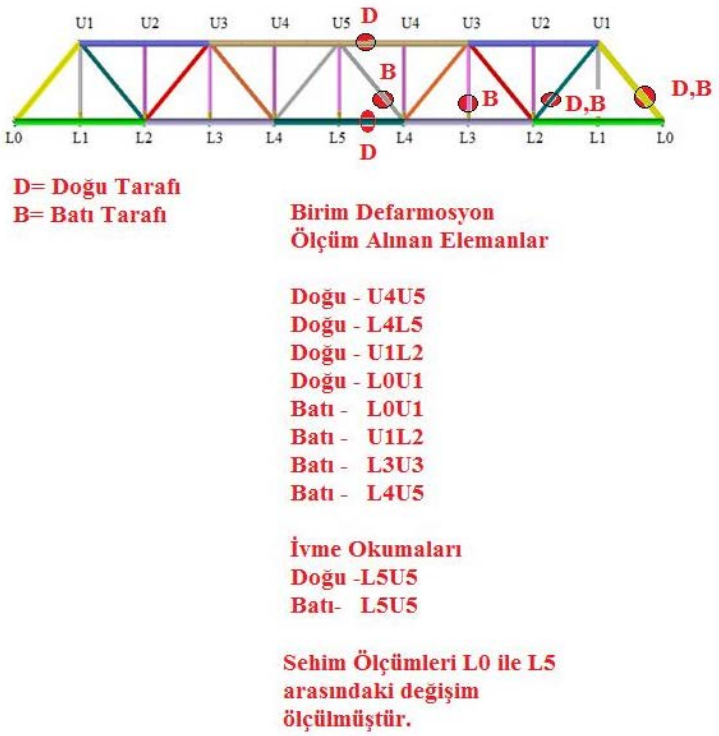
4. ANALIZLER VE SAHA TESTLERİ

Köprü, genel olarak ve tüm elemanlar tek tek olmak üzere, üzerine gelebilecek tüm yükler ve bu yüklerin kombinasyonları altında aşağıda belirtilen statik ve dinamik analizlerle incelenmiştir. Analizler sonrası, hesaplar mevcut durum ve karayolu ilavesi için karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

1. Saha Testleri ile Bilgisayar Modelinin Doğrulanması
2. Sabit Yük
3. Hareketli Yük (Tren ve kamyon yükü için, dinamik faktörlerle birlikte)

4. Eksantrik Hareketli Yük (Dinamik faktörlerle birlikte)
5. Zaman Tanım Alanında Hareketli Yük (Moving Force Analysis)
6. Rüzgar ve Deprem Yükleri Analizi
7. Trenin Raydan Çıkması – (Avrupa şartnamesine göre)
8. Taşıtların Bariyerlere Çarpması – (AASHTO şartnamesinden göre)
9. Yorulma Analizleri – (AREMA şartnamesine göre)
10. Güvenlik Endeksi Analizleri - (Avrupa şartnamesine göre)

Saha testlerinin yerleri ve tipleri Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Saha Testleri

5. SONUÇLAR

Yapılan detaylı 3-boyutlu analizler, mevcut köprünün hâlihazırda günümüz deprem yükü değerleri için yeterli kapasiteye sahip olmadığını göstermiştir. Daha öncede belirtildiği gibi, köprünün orijinal tasarımı 1980 yılı için geçerli olan 0.2g deprem yükü için yapılmıştır. Oysaki güncel şartnamelere göre, ayni bölge için öngörülen deprem değeri 0.41g dir. Yapılan değerlendirmeler aşağıdaki durumları kapsamaktadır.

- Mevcut durum ve 1993 deprem değerleri
- Karayolu ilavesi ve 1993 deprem değerleri için yapılmıştır.

Genel olarak karayolu tabliyesi için yapılan değişiklikler köprü performansının artmasına sebep olmakla birlikte halen bazı elemanların güçlendirilmesi gerekmektedir. Yapılması öngörülen güçlendirmede, mevcut elemanlara

çelik plakalar ekleyerek ve perçin yerine civata kullanarak eleman kapasitelerinin arttırılması planlanmıştır. Mevcut bağlantılar değerlendirilmiş ve herhangi bir güçlendirmeye gerek olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 3. Çelik Üst Yapı Birim Değerlendirme

Çekme Eleman	Birim Değerlendirme < 1,0	
	Mevcut	Güçlendirilmiş
FB1	1.89	0.98
FB2	1.05	0.62
L0U1	2.20	0.97
L2U3	0.82	0.88
L2U2	0.87	0.59
L4U4	0.36	0.67
L3U3	0.73	0.74
L4U5	0.55	0.86
U1U2	0.92	0.77
U2U3	0.97	0.53
U3U4	0.97	0.61
U4U5	0.93	0.53
Üst Çapraz	2.60	0.99

Basınç Eleman	Birim Değerlendirme < 1,0	
	Mevcut	Güçlendirilmiş
U1L2	0.90	0.77
U3L4	0.49	0.69
L1U1	1.36	0.70
L5U5	0.37	0.42
L0L1	1.06	0.75
L1L2	0.93	0.61
L2L3	0.94	0.84
L3L4	0.96	0.86
L4L5	0.81	0.79
U1RU1L	3.86	0.94
U2RU2L	1.94	0.66
Alt Çapraz	1.07	0.58

Mevcut köprü ile güçlendirilmiş köprünün güvenlik endeksinin karşılaştırılması aşağıdaki tabloda yapılmıştır. Güçlendirilmiş köprünün minimum güvenlik katsayısı, mevcut köprüden yüksek çıkmıştır. Mevcut durumda köprünün bazı elemanları EN şartnamesini sağlamamaktadır.

Tablo 4 - Güvenlik Katsayıları Karşılaştırması

Köprü	Güvenlik Katsayısı		
	Yorulma > 1,5	25. sene > 4,56	50. sene > 4,30
Mevcut	3,88	3,43	2,53
Güçlendirilmiş	3,97	5,39	4,73

Köprünün mevcut alt yapısının artan deprem etkisi altında kabul edilebilir tasarıma sahiptir. Bunun en büyük nedenlerinden biri alt yapının çok sağlam tasarlanmış olması yatmaktadır. Orjinal tasarımda tek açıklık için köprü çelik ağırlığı 366 ton iken köprü alt yapısı ağırlığı 9000 ton civarındadır.

Sahada yapılan ölçümler sonucunda köprünün doğrusal elastik davranış sergilediği sonucuna varılmıştır. Analitik hesaplamalar sahada ölçülen değerlerden yaklaşık olarak %10 fazladır, dolayısıyla oluşturulan bilgisayar modeli gerçek köprü davranışını modelleyebilecek kadar hassastır. Aradaki %10 oranındaki fark analitik modelin ve hesapların daha güvenli tarafta olduğunu göstermektedir.