

12 KASIM 1999 DÜZCE DEPREMİNİN BOLU TÜNELLERİNE DEFORMASYON ETKİSİNİN ÖLÇÜLMESİ VE SİSMİK PROJELENDİRME

ASSESSMENT OF DEFORMATION EFFECTS OF 12 NOVEMBER 1999 DÜZCE EARTHQUAKE ON BOLU TUNNELS AND SEISMIC DESIGN

Selami IŞIK¹ ve Dr.Murat ÖZBEN²

ÖZET

Anadolu Otoyolu'nun İstanbul-Ankara bağlantısını oluşturan Gümüşova-Gerede kesimi, TEM otoyolunun bir parçasıdır. Otoyolun Gümüşova-Gerede kesimi toplam 115 km. uzunluğunda 3 şeritli olup, Bolu dağı geçişini oluşturan viyadükler ve tünel, İstanbul-Ankara istikametinde 23 Ocak 2007 tarihinde hizmete açılmıştır.

Bolu Tüneli inşaa halindeki Gümüşova-Gerede otoyolunun bir bölümünü teşkil eden iki tüplü tüneldir. Tüneller fazlaca tektonik ve faylaşmış kaya dizilerinde açılmıştır. Bu bölgedeki ana fay sistemleri 1. derecede aktif sismik faylar olarak sınıflandırılmaktadır. Killi matriks oranı, en kötü zeminin üniform bir halde fay kili malzemesini içermiş olduğu gibi önemli ölçüde farklı jeoteknik birimler arasında değişiklik göstermektedir. Killi matriks içerisindeki oran hacimsel olarak yaklaşık %30 ile %100 arasındadır. Bazı kısımlarda ise en az elverişli şartları kapsayan hiç bir sağlam malzeme bulunmayan üniform fay malzemesi bulunan zemin yer almaktadır. Tünel güzergahı boyunca 50 m ve üzerinde kalınlığa haiz buna benzer zeminlerle karşılaşmıştır. Ve ayrıca düşey olarak tünel üst kotuna kadar da çıkmaktadır. Dolayısıyla Tünel güzergahı boyunca örtü kalınlığı 80 ile 120 m arasında zayıf malzemedenden oluşmaktadır. Bu olumsuz nedenler tünellerde aşırı ve beklenmedik ani deformasyonlara neden olmuştur. Araştırma sonuçlarına göre, tünel çevresindeki plastik zon'un genişliği (plastikleşme yarıçapı 50m'yi geçmektedir) ve gelişimi, tünelin radyal ötelenmeleri, kayacın eksen ötelenmeleri tünel kaplaması üzerinde ki radyal basıncı doğrudan etkilemektedir. Bu da tünellerde istenmeyen aşırı deformasyonlara neden olmuştur. Tünel çevresindeki bu plastikleşme yarıçapı birçok iksa önlemleriyle azaltılmıştır. Bolu tünellerinde karşılaşılan istisnai zor zemin koşullarının neden olduğu deformasyonun tünel beton kabuğuna etkisini izleyebilmek için yoğun bir ölçme destekleme sistemi kurulmuştur.

Otoyolun tünel kesimini kapsayan bu metin, 12 Kasım 1999 Düzce depreminin yarattığı sarsıntı etkisinin tünel beton kabuğuna yaptığı deformasyon-basınç değerlerinin ölçülmesi ve tünelin sismik projelendirilmesine etkisini kapsamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tünel, Jeolojik Şartlar, Deformasyon, Kazı Destek Sınıflar, Sismik

ABSTRACT

The Anatolian Motorway Gümüşova-Gerede Section, a portion of the (TEM) Trans-European Motorway network, is linking Ankara to Istanbul and Turkey to Europe. Stretch-2 of the Gumusova-Gerede motorway, a portion of which is under construction comprises twin tunnels of approximately 2926m long each.. The twin tunnels are being excavated in a faulted and heavily tectonics sequence. Being in the first degree seismic environment close to the North Anatolian Fault Zone, the tunnels were significantly affected by Duzce Earthquake of 12th Nov.1999. This paper describes detailed studies undertaken as part of this re-assessment of the effects of the 1999 Düzce earthquake having the magnitude of Mw=7,2 on a 18m diameter highway tunnels. Following the earthquake, detailed seismic design studies have been carried

¹ Jeo.Müh., Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., Gümüşova Gerede Otoyolu Bolu, selami_isik@yahoo.co.uk

² KGM Teknik Araştırma Daire Başkanlığı, Jeolojik Hizmetler Şube Müdürü, mozben@kgm.gov.tr

out. The aim for seismic design should allow for serviceability of tunnels for emergency usage and easily repairable in a short time. The new designs strike a balance between too stiff a lining and too soft a lining (which might attract excessive ground loads). To verify the new design, a comprehensive instrumentation program was implemented to monitor actual tunnel performance. Some instrumentation results are presented which provide an insight into tunnel behavior in such poor ground conditions.

Keywords: Tunnel, Geological Condition, Deformation, Support Class, Seismic

1. GİRİŞ

Anadolu Otoyolu'nun İstanbul-Ankara bağlantısını oluşturan Gümüşova-Gerede kesimi, TEM otoyolunun bir parçasıdır. Otoyolun Gümüşova-Gerede kesimi toplam 116 km. uzunluğunda 3 şeritli olup, 23.01.2007'de sağ ve 08.05.2007'de sol taşıt yolu ile birlikte Bolu dağı geçişi hizmete açılmıştır.

Gümüşova-Gerede otoyolunun 2. kesiminde inşaatı devam eden bölümün uzunluğu 25.6 km dir. Otoyolun açık kesiminin %25'i viyadük, %75'i dolgu olarak inşa edilmiştir. Yeni yol güzergahına göre Bolu Tünelinin sol tüp 2953 m ve sağ tüp 2790 m uzunluğundadır. İki tünel eksenleri arasındaki mesafe 50 m dir. Tüneler çoğunlukla 100-150 m zemin örtüsü altında olmakla birlikte maksimum örtü kalınlığı 250 m dir. Ve Tünel öncesi yeraltı suyu seviyeleri, tünel tavanı üzerindeki örtünün % 45-85 kadardır. Zemin koşullarına, kaplama kalınlığına ve deformasyon toleranslarına bağlı olarak Tünel kazı aynasının alanı 133 m² ve 260 m² arasında değişmektedir. Eşdeğer kazı çapları 13 ile 18.2 m arasındadır. Her iki tünelde, faylanmış ve fazlaca tektonik bir kesimde kazılmaktadır. Tünel tasarımları, standart Avusturya kaya sınıflama sistemine dayanılarak geliştirilmiştir. Orjinal Tünel dizaynı NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) prensiplerine göre yapılmıştır. Orijinal tünel tasarımı NATM tünel prensiplerine göre yapılmasına rağmen, tünel kazılarında karşılaşılan aşırı olumsuzluklar ve 1m'ye varan radyal konverjans hareketlerinin yarattığı deformasyonlar nedeniyle, 1998 yılı içerisinde orijinal tünel tasarımında geniş çaplı değişikliklere gidilmiştir. Bu nedenle NATM prensipleri dışına çıkmış ve zeminin jeo-mekanik özelliklerine göre farklı bir tünel tasarım sistemi ve metodolojisi geliştirilmiştir. Bu amaçla 1994 sonuna kadar Asarsu (İstanbul) girişinden 919 m'ye, Elmalık (Ankara) girişinden de 154 m. ye ulaşıldığında tünel kazıları (07/12/1994 – 26/11/1996) tarihleri arasında durdurulmuş, bozulan zemin koşullarına göre yeni ve güvenli projelerin geliştirilmesi için Müteahhit, Mühendis ve İdarenin de katılımı sonucunda NATM felsefesinden tamamen farklı, Seçenek-3 ve Seçenek-4 olarak adlandırılan yeni tünel iksa sistemleri projelendirilmiştir.

Daha sonra, Seçenek-3 ve Seçenek-4 iksa sistemleri ile tünel kazısına büyük bir hız ile devam edilirken, 12 Kasım 1999 Düzce depremi (M_Nω=7.2) ve artçı şoklarının yaratmış olduğu sarsıntı nedeniyle tünelin Elmalık tarafında her iki tüneli de kesen, fay zonu içerisinde göçük meydana gelmiştir. Tünelin Elmalık tarafında henüz nihai kaplaması yapılmamış kesimde oluşan göçüğün artçı depremler sonucu yayılması nedeniyle yaklaşık 400m'lik kesimde hasar oluşmuştur. Sigortalı olan tünelin göçen kesimi için ilgili sigorta şirketinden hasar tazminatı alınmıştır.

12 Kasım 1999 Düzce depreminin merkez üssü otoyola yaklaşık 5 km mesafededir. Proje sahasında Deprem kaynaklı maksimum yer ivmesi 0.81g dir. Göçen kesimin onarımının yeni yapıma nazaran daha uzun zaman alacağı, jeolojik bazı sakıncalar doğuracağı, tünel örtü kalınlığının tamamının konsolide edilmesi ve maliyetinin çok yüksek olacağı hususları dikkate alınarak yeni bir güzergah belirlenmiş ve projelendirilerek İdare tarafından onaylanmıştır. By-pass projesine göre tünel boyunda ortalama 413m kısalma olmuştur. Ancak mevcut otoyol parçası ile yeni tünel porteli arasındaki yaklaşık 2 km. bağlantı yolunun geometrik standardı düşmüştür. Otoyolun tünel kesimini kapsayan bu metin, 12 Kasım Düzce depremi sonrası, tünellerin deprem performansı ve sismik değerlendirmelerini kapsamaktadır.

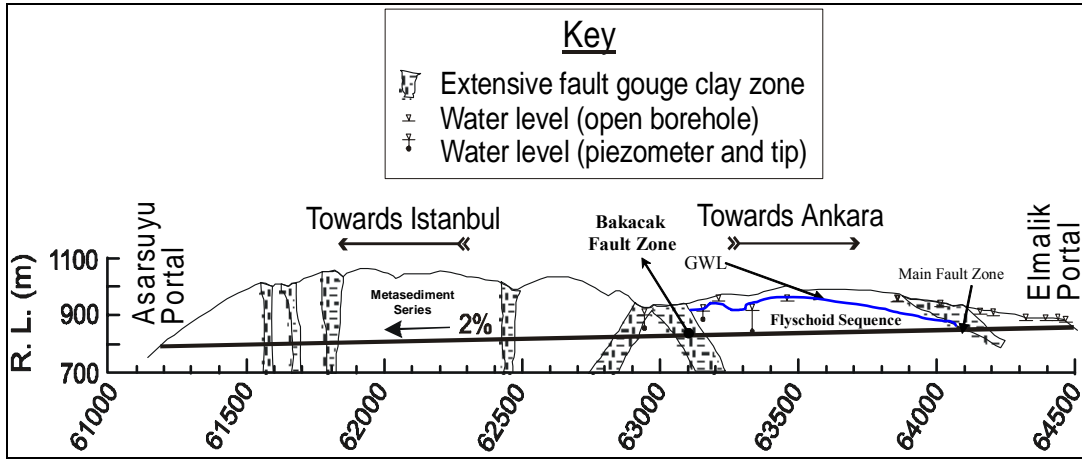
2. ZEMİN ŞARTLARI

Tüneler fazlaca tektonik ve faylanmış kaya dizilerinde açılmıştır. Bu bölgedeki ana fay sistemleri 1. derecede aktif sismik faylar olarak sınıflandırılmaktadır.

Zemin genellikle killi ortamlar içerisinde yarı-köşeli sert malzeme bloklarından oluşmaktadır. Killi ortamların yoğunluğu değişik jeoteknik birimlerde farklılıklar göstermektedir, öyle ki en kötü zemin koşullarında büyük bölgeler halinde fay kili bulunmaktadır. Zemin genellikle killi ortamlar içerisinde yarı-köşeli sert malzeme bloklarından oluşmaktadır. Killi ortamların yoğunluğu değişik jeoteknik birimlerde farklılıklar göstermektedir, öyle ki en kötü zemin koşullarında büyük bölgeler halinde fay kili bulunmaktadır. Killi ortamlardaki hacimsel oran % 30 ile %100 arasında değişmektedir. En kötü zemin koşullarını taşıyan bazı bölümler, içerisinde hiç sert zemin bulundurmayan sürekli faylaşma kilinden oluşan litolojik dizilimlerden oluşmaktadır. Tünel güzergâhı üzerinde örtü kalınlığı 50 m' yi bulan bu gibi zayıf litolojilerle karşılaşmıştır. Tünelin bazı kısımları boyunca bu tür yüzeyler üzerinde potansiyel kayar büyük bloklar ile aynaya doğru cilalı-kaygan yüzeyli tünel kazı yönünde dalım olduğu görülmekte ve bu duruma kazı hattı boyunca sık rastlanılmaktadır. Bu olumsuz nedenler tüneller de aşırı ve beklenmedik ani deformasyonlara neden olmuştur. Bu risklerden dolayı tahkimat sisteminde değişikliğe gidilmiştir. Bu riski azaltmak içinde tünel kazı aynasında bulonlama uygulanmıştır.

Bu jeolojik birimler Bakacak fay geçişine kadar devam etmektedir. Prof. A. Barka ve ekibi tarafından yapılan çalışmalar ve hazırlanan rapor neticesinde Bakacak fayı yaklaşık 10 ile 15 km uzunluğundadır ve Bolu tünellerini 200 m genişliğinde bir fay zonu içerisinde kesmektedir (Barka, Lettis 2000) (şekil1). Bu kısımdaki fayın yönelimi yaklaşık olarak doğu-batı yönündedir ve tünel güzergâhını neredeyse dik bir açıda kesmektedir. Bu fay zonu malzemesi Asarsuyu-Elmalık jeolojik formasyonlarının birleşiminde bulunmaktadır.

Bolu Tünellerinin jeolojik şartları, Elmalık ve Asarsu olmak üzere iki ayrı ana grupta ele alınmıştır (Özben, 2003). Tünelin Elmalık tarafında; fay zonunda ve çevresinde kil taşları, silt taşları ve kireçtaşları karışımı ve oldukça tektonize olmuş, cilalı-kaygan yüzeyli, plastik özellikli fay kili malzemelerinden oluşan Fliş serileri yer almaktadır. Asarsu tarafı, genelde Metasediman seriler ve bu serilerin oluşturduğu ezik zonlarla geçilmektedir. Genelde, tünellerde karşılaşılan Metasedimanlar; metasilttaşı, kristalize kireçtaşı, kaygan ve cilalı yüzeyli kumlu siltli fay kili matriksi, amfibolit ve metakristalin kayalardır. Fay kili matriksi metasediman ve metakristalin kayalar arasında yer almaktadır.



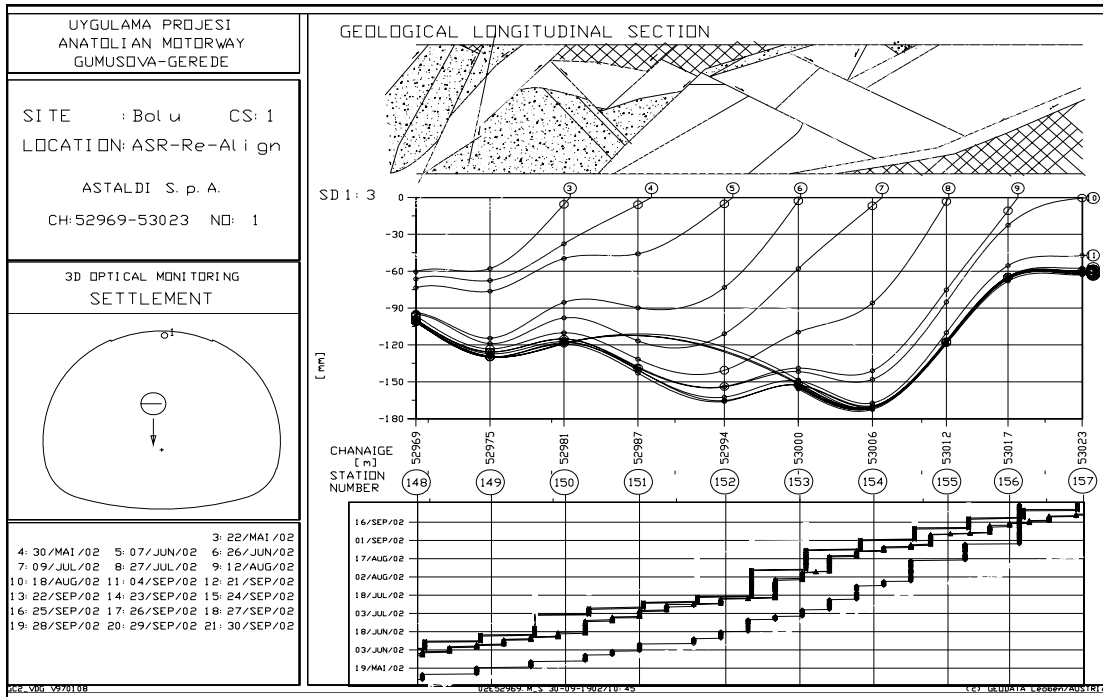
Şekil 1. Tünel güzergâhının basitleştirilmiş jeolojik boy kesit ve yeraltı su seviyesi.

2.1 Jeoteknik Şartlar Başlık

Bolu tünellerinde kazı sırasında karşılaşılmış olan jeoteknik şartlar gerek Asarsu, gerekse Elmalık aynalarında tünellerin projelendirilmesi ve inşasında büyük zorluklara sebep olmuştur. Bölgesel jeoloji hakkında yapılan saha araştırmaları sonuçlarına dayanarak, farklı jeoteknik şartlar için öngörülen tünel davranışı nümerik ve analitik metotlar ve benzer ortamlarda yaşanmış olan önceki tecrübeleri kullanarak tayin edilmiştir. Kayaların beklenen farklı davranış parametrelerine göre tünel destekleme ve kazı sistemleri tasarlanmıştır. Jeolojik dizilimler bir düzen içinde ÖNORM B 2203 kaya sınıflandırma sistemine göre sınıflandırılmıştır. ÖNORM B 2203'e göre kaya sınıflarına

tekabül eden projeye özgün destekleme tipleri potansiyel tünel davranışını kapsar ve beklenen jeoteknik şartlarla birlikte NATM uygulama safhasının çerçevesini oluşturur. İnşaat sırasında, tünellerin gerçek davranışı gözlem ölçüm sonuçlarının tespiti ve jeolojik yüzey haritalandırmasıyla belirlenir. Özellikle yüksek tektonizmaya uğramış jeolojik ortamlardaki derin tünellerde, fiili şartlar saha araştırma sonuçlarına göre öngörülen durumdan önemli derecede farklılık göstermiştir. Bu durum, projenin inşaat sırasında yeniden değerlendirme yapılması gerekliliğini doğurmuştur.

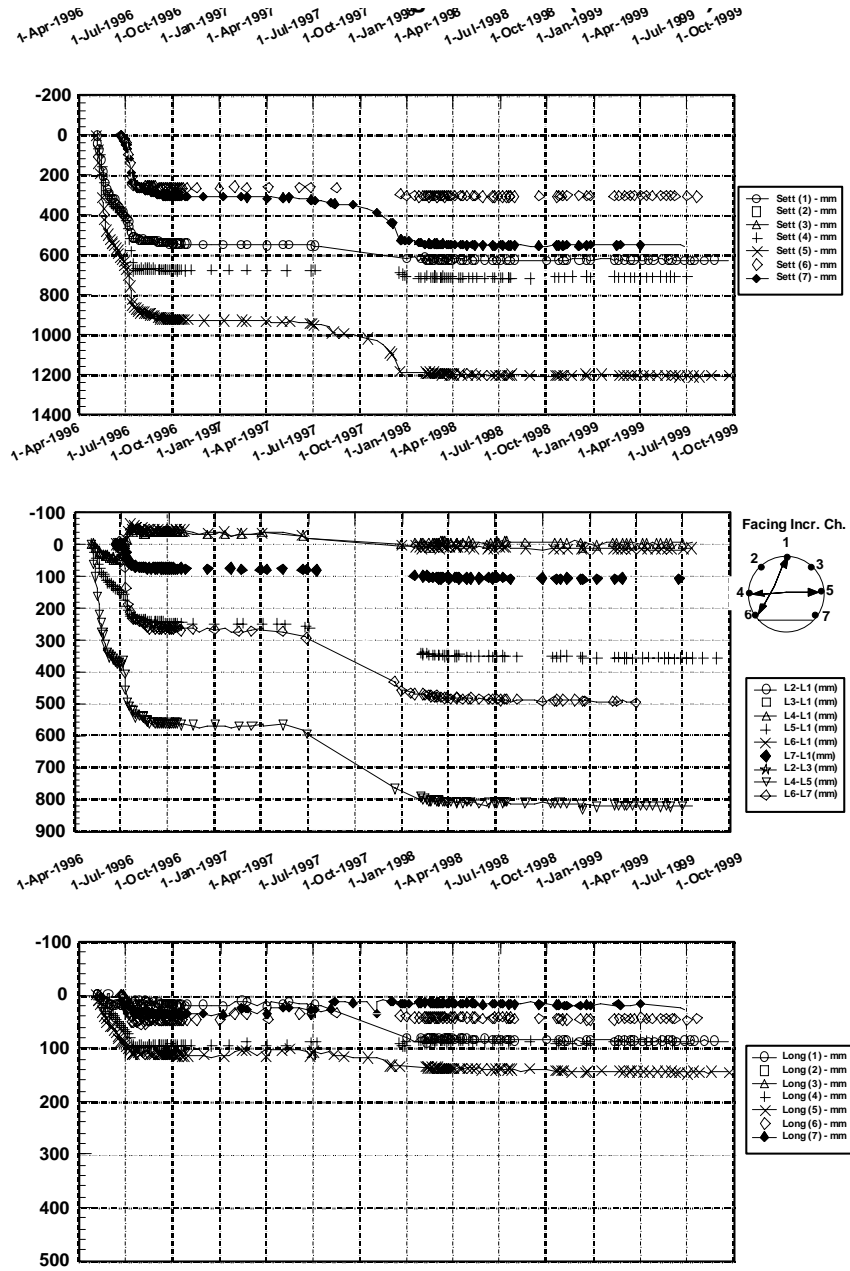
Elmalık girişinde, marn ve kumtaşları serileri içerisinde kireçtaşı tabakaları ile karşılaşmıştır. Sedimanter seriler, kireçtaşları, kumtaşları ve marn bloklarına sahip killi tabakaların egemen olduğu malzemeler arasında bölümler şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bütün seri, oldukça faylı olup kil dolguludur. Bu durum Km.64+340'a kadar yoğun biçimde gözlenmiştir (şekil 1). Km.64+200 ile 64+150 arasında Güneye doğru dalım gösteren bir düşük açılı fay ile karşılaşmıştır. Tünel, bu kesimde koyu kahverengi-kırmızımsı kahverengi renkte dominant fay dolgusu boyunca kazılmıştır. Laboratuvar test sonuçlarına göre malzemenin %80'i kil fraksiyonlarından oluşmaktadır. Bu kilin oluşturmuş olduğu kuşağın boyutları 50 m'ye kadar genişlemektedir. Bu kesimde fay, tabandaki kristalize ana kaya tabakasını, yan duvarlarda oldukça tektonize olmuş sedimanter serilerden ayırmıştır. Bu durum sol tünelde Km.64+210'a kadar devam eder. Km.64+315'e kadar kumtaşları ve marn'dan oluşan bir bölüm, kireçtaşı ara tabakalarla birlikte yan duvarlara giriş yapmıştır. Bu blok büyük ölçüde yumuşak killi fay dolgusu ile çevrilmiştir. Karşılaşılan jeolojik şartlar ve beklenmeyen düşük açılı fayların oluşturduğu deformasyonlar ve etkisi şekil-2'de gösterilmektedir. Elmalık tarafındaki tünelin, sedimanter ve kristalin seriler arasında kalan bölgede bulunan düşük açılı fay olan yerlerde, tünel tavanında oturmalar önemli oranda artmıştır. Elmalık Tünelleri km 64+150 – 64+340 arasında her iki tünel killi fay dolgusu ihtiva eden açık bir geniş fay zonu içinde kazılmıştır. Kazının yapıldığı bu kesimde karşılaşılan jeolojik şartlar, bilhassa sağ tünelde olmak üzere deformasyonlarda hızlı bir yükselişe yol açmıştır. Sağ tüneldeki hareketlenmelere paralel olarak, sol tünelde de alışılmadık bir şekilde deformasyonlar meydana gelmiştir. 150 m'den fazla olan bir tünel bölümü boyunca, oturmalar 50 mm ila 600 mm'ye kadar artışlar göstermiştir (şekil 3).



Şekil 2. Deformasyon Etki Eğrilerinin, Jeolojik Yapıya bağlı olarak gelişim diyagramı (Düşük Açılı Fay Etkisi, L1 Yönünde, Destekleme sistemleri için çok önemli)

Üst Yarı kazı aynasına yakın hareketler tünel ilerlemesinin bir sonucu iken, aynaya göre daha uzak mesafede olan hareketlerin her iki tüneli kapsayan bir bölgedeki yaygın basıncın sebep

olduğu anlaşılmıştır. Bu esnada her iki tünelde temel betonlarında önemli ölçüde kabarma oluşmuştur. Temel betonlarında sağ tüpte 60 cm, sol tüpte 80 cm'lik kabarma değerleri gözlenmiştir.



Şekil 3. Zemin davranışının tünel kesitinde üç boyutlu (3D) izlenimi.

İlk kaplamaları (çelik kuşak + püskürtme betonu + bulon) tamamen tamamlanmış olan tünel aynasından portala doğru 150 mm'ye kadar olan boyuna hareketler ölçülmüştür. Karşılaşılan bu deformasyon karşısında, her iki tünel aynasındaki ilerleme durdurulmuş, buna rağmen düşey yöndeki oturmalar 1000 mm. ye kadar yükselmiştir. Yapılan ilave araştırmalar tünellerin plastik kil malzemeleri (fault gouge) içerisinde yer aldığı ve bu zon içerisinde kazı yapılacağını ortaya koymuştur. Tünel üzerindeki zeminin gevşek ve plastik zonun genişliğinin ≥ 50 m'nin üzerinde olması ve tünelin radyal ötelenmeleri, zeminin eksen ötelenmeleri tünel kaplaması üzerinde ki radyal basıncı doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle Tünel çeperindeki basıncın artması tünellerde istenmeyen aşırı deformasyonlara neden olmuştur. Bolu tünellerindeki zemin koşullarının oluşturduğu sorunların üstesinden gelebilmek için, özel bir planlama ile çözüm araştırılmıştır.

Tünel kazılarında yaşanan bu aşırı olumsuzluklar ve deformasyonlar neticesinde, orijinal tünel tasarımında geniş çaplı değişikliklere gidilmiştir.

3. BOLU TÜNELLERİNİN DEPREM PERFORMANSI

12 Kasım 1999 Düzce depreminden sonra Asarsuyu tünellerinin incelenmesi sonucunda ve aşağıdaki hasar durumları tespit edilmiştir.

3.1 Deprem Sonrası Saha Gözlemleri

Tünel hattını kesen yüzeyde kırıkları görülmemiştir. Herhangi bir atım (off-set) deplasmanı görülmemesine karşın, tünellerdeki hasarın yalnızca zemin sarsıntısından kaynaklandığı düşünülmektedir. 30 cm kalınlığındaki püskürtme beton kaplama ile desteklenen orta derecede ayrılmış bir zemin grubunda yer alan, 5.8 m çapındaki yaya yolu geçiş tüneline hasar oluşmamıştır. 13.5 m uzunluğundaki kaplama beton blokları arasında inşaat derzlerindeki iç kaplamada açılmalar şeklinde (1-5 mm genişliğinde) hafif hasar mevcuttur. Derz açılmaları yanında, tünel tavanında yapısal olmayan saç teli inceliğinde çatlaklar ve köşelerde oyuklar mevcuttur. Bernold ara kaplama bloklarında, depremin neden olduğu yüklenmeyle 150mm yatay (convergence) hareket ölçülmüştür.

Bakacak Fay kilindeki, Asarsuyu sol tüp alt yarı pilot tünelde orta-şiddetli hasar gözlenmiştir. Çelik kuşaklarda bükülme (buckling) meydana gelmiştir. Bükülme yapısından çelik kuşakların 0.3-0.4 m kısaldığı anlaşılmaktadır.

Her iki Asarsuyu ana tünellerinde; monolitik temel betonlarında eksene doğru giden çekme tipi çatlaklar ve ara sıra görülen eksenden yanlara doğru dağılan kesme tipi çatlaklar gözlenmiştir. Çatlak genişlikleri zemin koşullarına, invert kalınlığına ve destek seviyesine göre 0.5-5.0 cm arasında değişmektedir. Depremden önce iç kaplamaya takılan geoteknik izleme aletlerinden yer sarsıntısından dolayı kaplamada önemli derecede çevrel (hoop) gerilmeler görülmüştür. Orta derecede ayrılmış (metasedimentler) zeminlerde çevrel kaplama yükü 10 Mpa'ya kadar çıkmaktadır ki bu da gömülü yükün % 17 sine eşittir (Menkiti vd., 2001).

Genel olarak Asarsuyu tünellerinde yapılan gözlemler sonucunda mevcut tahkimat sisteminin en kritik zayıf alanı, Bakacak ana fay kilinde seçenek-3 sisteminde herhangi bir çekme ya da kesme çatlağının oluşmasını başarıyla önlediği görülmüştür. Bu da tam olarak donatılandırılmış Seçenek-3 ve seçenek-4 temellerinin tasarım depremi yüküne dayanacak yeterlikte olabileceği güvenini vermiştir (Lombardi, 2001).

Tünelin Elmalık tarafında; 12 Kasım 1999 Düzce depremi ile her iki tüneline kesen kalın fay kilinin oluşturduğu düzlemde kısmi bir göçük oluşmuştur. Meydana gelen bu göçük 50m civarındadır. Çok zayıf mekanik özelliklere sahip malzemelerden oluşan bu ana fay zonunda eski projelere (NATM) göre kazısı yapılmış ancak önlenemeyen deformasyon hızları sebebi ile henüz iç kaplaması yapılamamış kesimde kısmi bir göçük meydana gelmiştir.

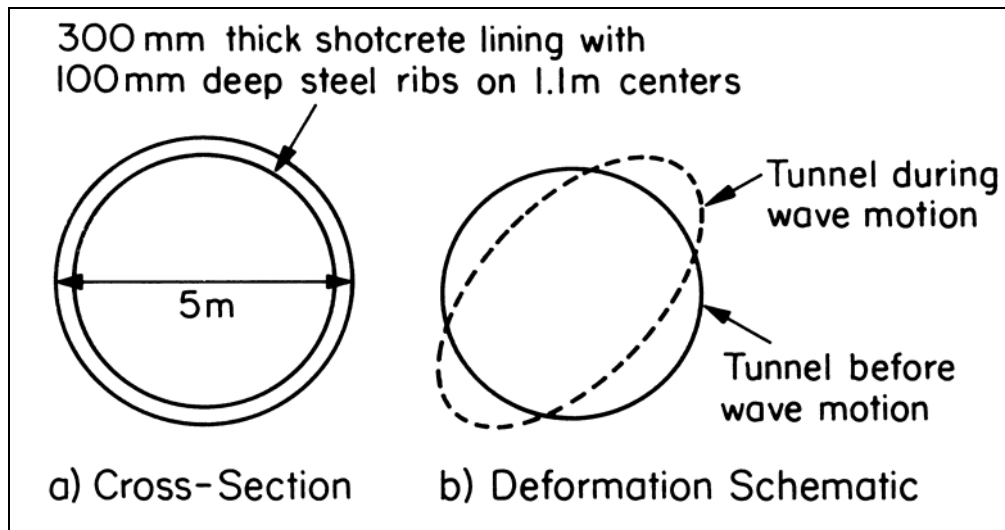
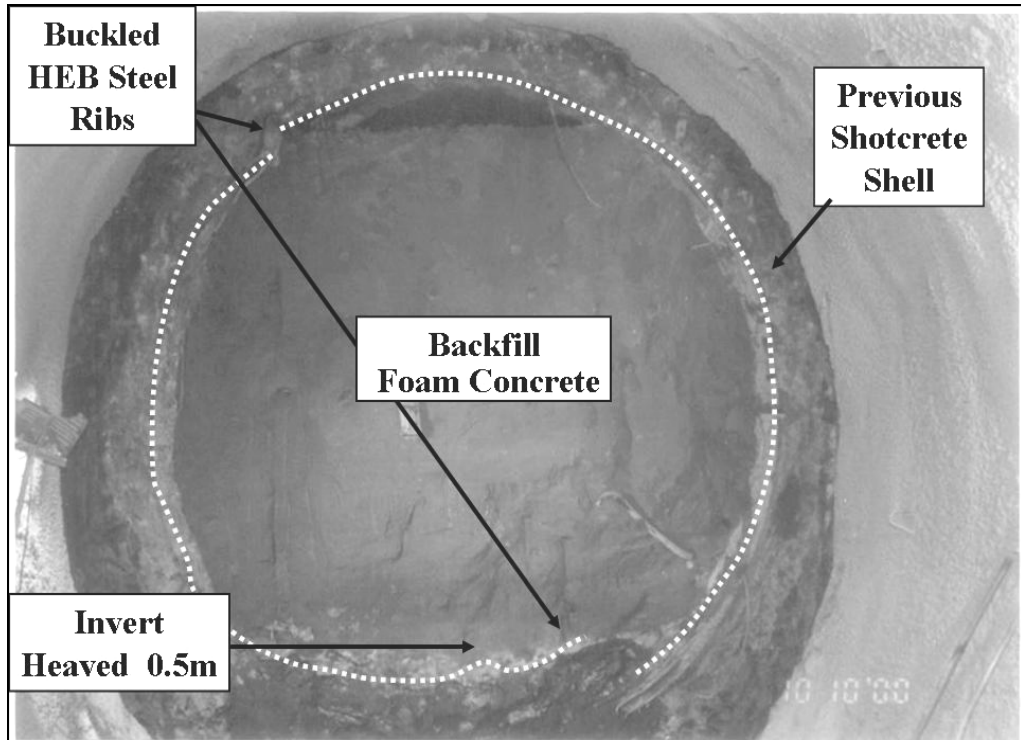
12 Kasım 1999 Düzce depremi esnasında Elmalık tarafında fay zonunun geçtiği kesimde göçüğe bağlı olarak yüzeyde tüneli kesen bölgelerde büyük çatlamlar ve zeminde oturmalar meydana geldi. Deprem sırasında 16,5 m çapındaki iki paralel ana tünel tamamen göçme şeklinde ciddi şekilde hasar aldığı görülmüştür. Tüneller eksenden eksene 54m mesafeli ve 45cm-75cm püskürtme beton ile desteklenen (20/30 MPa) ana fay zonu içerisinde kazılmıştır. Sağ tüp üzerinde yaklaşık 9-10m. Çapında, hareket yönü tünel içine yönelimli ve koni şeklinde bir çukur oluşmuştur. Ayrıca 24 Şubat 2000 tarihinde sol tünel üzerinde km.63+860 da ilk etapta yaklaşık 5-8 m. çapında (ilerleyen günlerde çap 15-20 m.yi bulmuştur) ikinci bir çukur oluşmuştur. Daha sonra sol tüpte depremden 4.5 ay gibi süre sonrasında örtü kalınlığı içerisinde 8m çapında 122m ye kadar yayılan tasman oluşmuştur (Menkiti, 2000). Oluşan bu çukurlar tünel içindeki göçük mekanizmasının anlaşılması ve açıklanabilmesi, yaklaşık olarak tünel içindeki ilk etapta oluşan göçüğün nereye kadar olduğu gibi bilgilerin edinilmesi açısından son derece önemlidir.

Üst yarı alt yarı Birleşimi;

Asarsuyu sol tünel alt yarı pilot tünelleri fay zonu kili içerisinde orta derecede ciddi hasar gözlemlendi. Tabanda 0.50ila 1.00m arası kabarmalar meydana geldi, bunlarla birlikte püskürtme beton

içerisinde dökülme, basınç kırılması ve tavan kısımlarında ve omuz ve alt yarı kısımlarında (şekil4) bunlarla ilişkili olarak çelik kuşakta burkulma oluşumu gibi püskürtme beton kemer kaplamasında hasarlar oluşmuştur (O'Rourke vd., 2001).

Asar suyundaki her iki tünelde de boyuna çekme tipi çatlaklar şeklinde monolitik beton invertte çatlaklar tespit edilmiştir. Eksen hattına yakın olarak uzanmakta ve eksen hattından kenarlara doğru sapan bazı kesme tipi çatlaklar görülmüştür. Zemin şartlarına, temelin kalınlığı ve donatı seviyelerine bağlı olarak çatlak genişlikleri 0.5 cm 5cm arasında değişmektedir. Asarsuyu sağ tüpte fay zonu malzemesi içinde kantitatif bir değerlendirilmenin yapılabilmesini olanaklı kılan-invert içerisinde çeşitli seviyelerde donatı kullanılmıştır. Killi metasedimanlar içerisinde temellerin yan taraflarında 51cm²/kesme çelik kafesler kullanılmış ve bunların kesme tipi çatlakları önlediği görülmüştür. Ancak benzer zemin şartlarında temelin üst kısımlarına yakın yerlere konulan 25cm²/m' lik çekme donatı hasır çeliği, çekme çatlağını dağıtıp sınırlandırabilir (fakat önlemez).



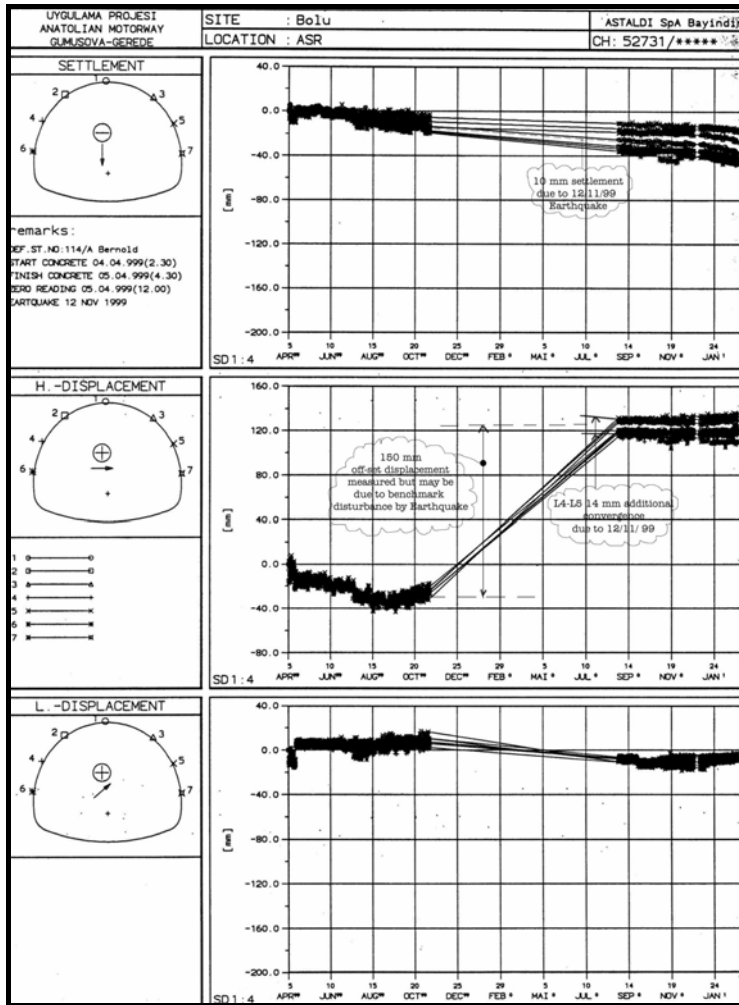
Şekil 4. Alt Yarı tünelli Seçenek-4 sisteminin deprem sonrası yeniden kazılması sırasında tipik taban kabarması ve çelik kuşak burkulması, Çelik Kuşak+Püskürtme Beton kabuğu. (a-b) BPT sismik bozulma ile oluşan en kesitin şematik gösterimi.

Bu bölgedeki, araştırma çukurları 36mm çapındaki demirin çekme kırılması/eğilmesinden çok çelik-beton adalansının kırılması mekanizmasını göstermiştir. En kritik olanı ise, seçenek 3 iksa sistemi için kullanılan donatının zayıf olan Asursu/Elmalık ana fay zonu kili içerisindeki temellerde herhangi bir çekme yâda kesme çatlaklarının oluşmasını başarı ile önlemesidir.

Genel olarak, gözlenen hasar paterninin düşey olarak yayılan deprem kesme dalgalarının aldığı yük ile uyumlu olduğunu saha gözlemleri teyit etmiştir. Buda yapılan dinamik analizlerin temel kabullerini desteklemektedir.

3.2 Geoteknik Ölçüm Alet Sonuçları Üçüncü Kademe Başlıklar

Deformasyona çalışan ara kaplama betonu (bernold) 2 de Depremden sonra düşük taban kısımlarında betonun ezilmesi, kesme çatlakları ve atım şeklinde deplasmanlar gözlenmiştir. Bernold bloklarının sönümediği deformasyonların hesabını yapmayı sağlayan deprem öncesi ve sonrası deformasyon okumaları mevcuttur. Şekil 5, ara kaplama betonundaki deprem öncesi ve sonrası 3-D deformasyon değerlerini göstermektedir. 3-D grafikten de görüldüğü gibi, bernold betonunda (50cm, B40 MpA) yatay yönde tünel içine 150 mm, düşey oturma yönünde 10 mm deformasyon ölçülmüştür.



Şekil.5 Deprem öncesi ve deprem sonrası Deformasyona Çalışan Ara Kaplama betonunda (B40 MPa, ds=60cm) üç boyutlu (3D) deformasyon grafiği (istasyon 114/A, ASR tünel).

Bu ölçme sistemi hassasiyetinin 2 mm ile sınırlı olduğu kabul edilmektedir. Yaklaşık 10 mm bir oturma ve 14mm'lik bir konverjansın deprem tarafından sönülmüş olduğu görülebilir. Ayrıca 3-D verilerinin 150mm'lik rijit bir gövde atım deplasmanını da göstermektedir. Killi

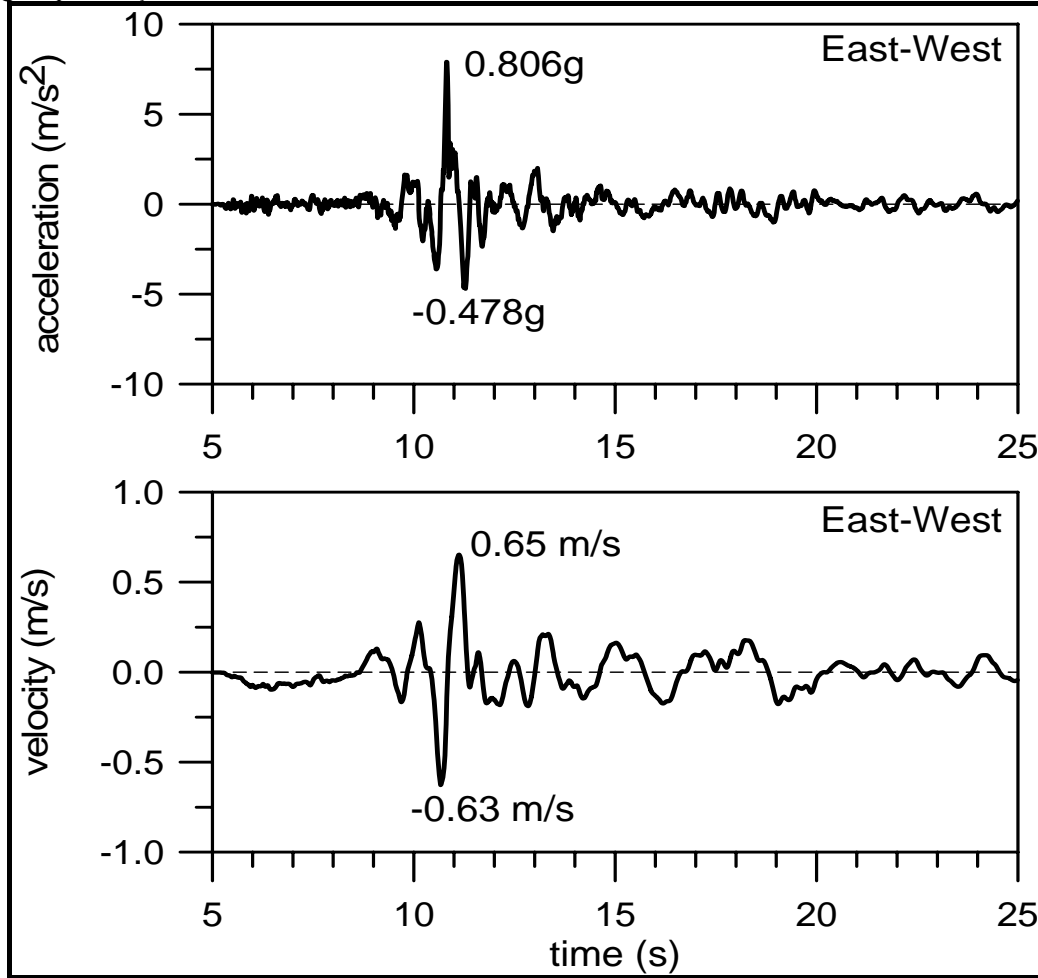
4. 17 AĞUSTOS 1999 GÖLCÜK VE 12 KASIM 1999 DÜZCE DEPREMLERİNİN SİSMİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

17 ağustos ve 12 Kasım 1999 düzce depremlerinden sonra tünelin sismik yükünün tahmin edilmesi ve kaplama donatısının saptanması için bir temel teşkil etmek üzere detaylı dinamik analizler yapılmıştır. Bu dinamik analizlerde bir girdi olarak bir saha özel sismik tehlike hesabı çalışması yapılmıştır. Bu çalışma iki bölüm halinde gerçekleştirilmiştir.

- * Deprem yer sarsıntısının olasılık saha spesifik hesabı (Erdik ve Yılmaz 2000),
- * Saha civarındaki fay yırtığı tehlikesi hesabı (Barka ve Letis 2000).

Proje felsefesi proje depremi sırasında ilk iksanın aşırı olarak gerilebileceği fakat iç kaplamanın hasara uğramadan kalacağı şeklindeydi. Yeni proje depremi 2000 yıllık dönüş periyodu olarak tanımlanmıştır. Erdik, ve Yılmaz (2000) tarafından gerçekleştirilen sismik tehlike olasılık saha spesifik güncel etüdüne dayanarak bu proje olayı 0.81g'lik bir maksimum yer ivmesine tekabül edecek şekilde hesaplanmıştır (Şekil 7).

Otoyol tüneli, doğu batı istikametinde Anadolu KAF baseni içerisinde yer almaktadır. Yapılan çalışmada proje bölgesindeki potansiyel fayların otoyolun proje ömrü içerisindeki yırtılmasını hesap yöntemi ile tahmin etmiştir. Tünel güzergâhını kesebilecek 2 adet potansiyel aktif fay saptanmıştır. Bakacak fayı bu aktif faylardan bir tanesidir. Bu faylar boyunca meydana gelişebilecek bir yırtılma durumunda bunların oluşturacağı depremin orta derecede ($M_w 6 \frac{1}{4} - 6 \frac{1}{2}$) olacağı saptanmıştır.



Şekil 8. Kuvvetli yer hareketlerine ait kayıtlar. Bolu istasyon kaydı 12.11.99 $M_w=7,2$ Earthquake E-W.

İlişkili fay sistemine kuzey Anadolu fay zonu (NAFZ) denilmektedir. NAFZ sağ yanal dönüşümlü bir fay olup Karadeniz ile Anadolu plakası arasında bir sınırı temsil etmektedir. Doğudan batıya uzanarak yaklaşık 1500 km toplam uzunluğa ulaşmaktadır. Bakacak fayı Bolu bölgesindeki (yani kuzey Düzce kolu ve güney Mudurnu kolu) iki büyük NAF kolu (Mudurnu ve Düzce fay kolu) arasında sıçrama bölgesindeki ikincil bir kısa fay olarak tanımlanmaktadır. Bakacak fayının yeri uzmanlar tarafından sol tünel km.62+800–63+000 arasında olduğu belirtilmektedir. Fay malzemesinin bu tabakası, Asursuyu ve Elmalık jeolojik etkili alanı arasında bir ara yüzey geçiş zonudur. Yapılan tünel sismik proje etütlerinin sonuçlarına göre tünelleri etkileyen iki adet potansiyel deprem tehlikesi olduğu düşünülmektedir (Menkiti, Mair, O'Rourke and Russo, 2000).

Tehlike bölgesi:

- Güçlü yer sarsıntısı
- Fay yırtığı deplasmanı

Yer sarsıntısı konusunda, $M=6\frac{1}{4}-6\frac{1}{2}$ büyüklüğünde potansiyel depremlerin beklediğini görüyoruz. Yer sarsıntısı ile ilgili olarak tünelin tamamını tahmin veya etüd edip daha detaylı çalışma için kritik bölgeler tespit edilmiştir. Etüt çalışmalarında, iyi zeminlerde tünel kaplaması için hazırlanmış olan orijinal statik projenin uygun olduğu doğrulanmıştır. Zayıf zeminlerde ise, çelik fiber kullanmak suretiyle püskürtme betonunun (≥ 700 jul) ve deformasyona çalışan ara kaplama (bernold) betonlarının (≥ 800 jul) kalitesi arttırılmıştır (Menkiti ve Işık 2001). Fay zonunda yer alan tünel kesitlerinde ise çelik fiber donatısı sismik şartları karşılamaya yeterli gelmediğinden kaplama betonlarında tamamıyla yapısal donatı kullanılmıştır.

İdarenin sismik performans şartnamesine uygun biçimde, sismik kaplama proje yükleri; statik yüklenme+yer sarsıntısı şeklinde alınmıştır. Saha koşullarını yansıtan ve yakın saha etkilerini taşıyan 11 deprem kaydının oluşturduğu havuzdan en şiddetli yükler proje için seçilmiştir. Görülmüştür ki, sürekli aşırı ezik ve fay kili olan bölgelerde seçenek-3 ve seçenek-4 destekleme sistemlerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bakacak Fayının tüneli kestiği bölümde projede aşağıdaki yük durumları göz önünde bulundurulmuştur;

- **Statik yük + şiddetli yer sarsıntısı (2000 yıllık proje depremi)**
- **Statik yük + orta şiddetli yer sarsıntısı ($M=6 - 6.5$) + kalıcı fay sıçraması.**

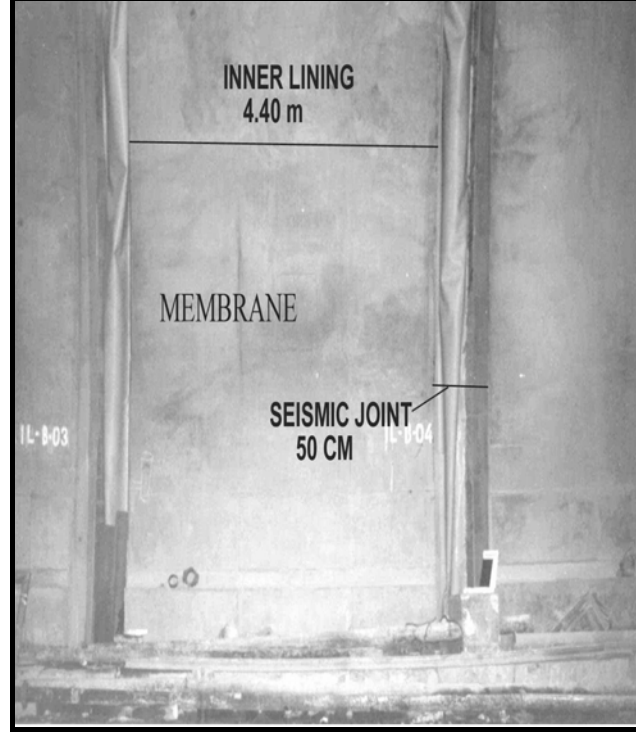
Bakacak fay bölgesi seçenek-4 projesi kullanılarak geçilmiştir.

1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinden sonra düzenlenen yeni deprem proje kriterlerine uymak üzere Op.3 ve Op.4 projelerinde bazı değişiklikler gerekmiştir. Bakacak Fayı geçiş bölgesinde Op.3 ve Op.4 destek sınıfları için Şiddetli yer sarsıntısı ($M_w=7,2$) ve fay kırığı durumunda statik yükler ve tasarım depremi için detaylı dinamik analizler yapılmıştır. Saha şartlarını yansıtan ve yakın saha etkilerini kapsayan 11 deprem kaydının toplandığı bir havuzdan en şiddetli yükler proje için yapılan detaylı FLAC analizlerinde girdi olarak kullanılmıştır. Seçenek-3 ve Seçenek-4 için, şiddetli yer sarsıntısındaki ($M_w=7,2$) yük durumları için yapılan detaylı dinamik analizlerde, elde edilen yüklerin orta büyüklükteki bir depremin yaratacağı deplasman etkisinden daha kritik olduğu görülmüştür.

Zayıf zemin koşulları, statik yüklerin büyük olacağı ve sağlam bir genel projenin gerekli olduğu anlamına gelmektedir. Sismik yer sarsıntısı durumunda mevcut tünel destekleme sistemleri yüksek dinamik yüklere ve büyük dinamik gerilmelere maruz kalacaktır. Bu nedenle, mevcut statik yüklere negatif dinamik yükleme uygulanmıştır. Bu sebeplerden, Bakacak fayının tüneli kestiği her iki tüpte ilave demir donatı uygulanmıştır. Dinamik analizler seçenek-3 için büyük miktarlarda demir donatı gerektiğini ortaya koymuştur. Doğal olarak deprem yüklerine daha dayanıklı olan seçenek-4 için ise daha az güçlendirme gerektiği tespit edilmiştir. Her iki durumda da iç kaplama ve Bernold Kaplama betonlarının kalitesi B30 dan B40 a yükseltilmiştir. Bernold (ara) Kaplamada çelik fiberler kullanılmaktadır. Bunlar, yalnızca statik yükleme durumuna göre ciddi miktarda destek artışı demektir.

Bakacak Fayı boyut itibariyle fay yırtılması ile birlikte 30–50 cm'lik ötelenmelere neden olacak ve $M_w=6.25-6.50$ büyüklüğünde deprem meydana getirebileceği uzmanlarca tespit edilmişti. Tünelin bu potansiyel hareketi alması için bir fay geçiş projesi / iyileştirme stratejisi geliştirilmiştir. Önlem olarak 0.5m deplasman proje değeri kullanılmıştır. Bu nedenle, fay hareketiyle kaplamaya yüksek zemin yükleri uygulanmıştır. Bu sebeplerdir ki sismik derzlerden

oluşan bir çözüm geliştirildi ve müteakiben sismik derzli geçiş projesi uygulanmıştır. Bu proje, kayma veya dönme şeklindeki fay yırtığını alacak olan fasıllı sismik derzler (her 4.4 m de bir) ve 50 cm'lik fay sıçrama deplasmanı kullanılarak geçilmiştir. Sismik derzler, eklemlemeyi sağlamak üzere 4,4 m aralıklarıyla, tüm kaplama, tünel beton elemanlarından oluşan ring içinde (Alt Yarı pilot tünellerde, Bernold kaplama, İç kaplama ve Temel) oluşturulmuştur. Şekil 8 tipik sismik derzli iç kaplamayı göstermektedir. Bu proje stratejisinde, büyük nispi hareketler sadece bir ya da iki sismik derzde yoğunlaşacak şekilde ve her bir sismik derz fay yırtığını alabilmesi için de, derzler zayıf ve geniş (0.50m) tutulmuştur.



Şekil 9. Bakacak Fay Geçişine inşaa edilen 4,40m ano boyu ve 0.50m sismik boşluklu Kemer yapısı.

SONUÇLAR

- Bolu Dağı tünellerinin kazısı, yüksek derecede tektonizmaya uğramış bir ortamda ve kaya formasyonlarının ardışık bir faylaşma silsilesi içerisinde yapılmıştır.
- Orijinal projede 25 cm. deformasyon toleransına izin veren normal destek sistemi uygulaması yer almakta iken hem Asarsuyu hem de Elmalık'ta yapılan uygulamaların tünel deformasyonunu kontrol etmede yetersiz kaldığı, kazının stabilitesini sağlayamadığı ortaya çıkmıştır.
- Tünel kazısı sırasında, projede öngörülen jeolojik dizilimden farklı bir jeolojik durumla karşılaşmış ve tünel destekleme sistemlerinin değişmesini zorunlu kılmıştır.
- Yapılan ilave etütler sonucunda, daha rijit destek sistemlerinin uygulanması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Yeniden projelendirme ve özel çözümler gerekli olmuştur.
- Orijinal Tünel Tasarımı NATM tünel prensiplerine göre yapılmıştır. Fakat tünel kazılarında yaşanan olumsuzluklar ve önlenemeyen deformasyonlar sonucunda NATM prensipleri dışına çıkmış ve zeminin jeo-mekanik özelliklerine göre farklı bir tünel tasarım sistemi ve metodolojisi geliştirilmiştir.
- Zayıf Filiş serilerinde ve 20m'den az killi fay zonlarında ve önlenemeyen aşırı deformasyonlarda, ara kaplamalı (60cm) Seçenek-3 iksalama sistemi uygulanmıştır.
- Çok daha elverişsiz zemin şartlarında, 20m'den fazla killi fay zonlarında alt yarı pilot tünelli, ara kaplamalı (80cm) seçenek-4 iksalama sistemi uygulanmıştır.

- 1999 depremleriyle, tamamlanan tünel bölümlerinin her ikisinden çok iyi deprem performansı tecrübesi kazanılmıştır. Çok yüksek seviyede sismik yüklenmeye ve fay deplasmanına rağmen, tünellerin çok iyi deprem performansı gösterdiği gözlenmiştir. Bunun sonucu olarak, Tünelin sismik yüklenmesini tahmin etmek ve kaplama desteğini belirlemede bir baz sağlamak için detaylı dinamik analizler yapılmıştır. Ve de, buradan geçen aktif fay için, yırtılmayla oluşacak yatay deplasmanlara karşılık eklem bölgeleri oluşturulmuştur.
- Sonuç olarak, Bolu Tünelleri, tünellerin sismik performansı için geliştirilen modellerin geçerliliği ve pratikliği açısından büyük öneme sahiptir. Gözlenen hasarların, jeolojik koşullarla ve uygulanan proje ile karşılaştırılması sonucu; bu çalışmaların, potansiyel hasarlı bölgelerin tanımlanması ve tünellerin performansının tespiti açısından bir temel oluşturabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Geo Consult, (July 15, 1998), Design Methodology Un-excavated Sections Gümüşova- Gerede Motorway, project report, No.45110/R/2149.
- Geo Consult, (May 28,1998) Experimental Investigations During Construction of Pilot Tunnel, Gümüşova-Gerede Motorway project report No.45110/R/2148.
- Lombardi, (May 2001), Gümüşova-Gerede Motorway Asarsuyu Tunnels, Detailed Seismic Analysis-Op.3+Op.4 and Active Fault Crossing-Design Philosophy and Joint Requirements.
- Menkiti C.O. & Işık S. (April 7,2001) Investigation of Toughness, Energy Absorption Capacity and Modulus of Elasticity Observations of Tunnel Steel Fibre Reinforced Shotcrete and Intermediate (Bernold) Lining Concrete in Bolu Tunnels of The Gümüşova-Gerede Motorway by Yüksel&Rendel JV.
- Menkiti C.O, Mair R.J, Miles R.(April 2001), “Tunnelling in Complex Ground Conditions in Bolu, Turkey” for Publication in the Proceedings of Underground Construction 2001.
- Menkiti C.O. (December 5, 2000), Review of Deformations of Bernold Lining Blocks in Asarsuyu Right Tube, Originally Damaged By the 12/11/99 Earthquake and Then Further Deformed By Recent Construction Works.
- Menkiti C.O, Kurzweil H.C, Golser W. (November 14, 2000), Minutes of Meeting on The Seismic Design Review of Bolu Tunnels (Fault Crossing).
- Menkiti C.O, Mair R.J, O’Rourke T, Russo M. (October 9, 2000), Minutes of Meeting on The Seismic Design Review of Bolu Tunnels.
- Menkiti C.O, Işık S. (June 8, 2000) Stiffness-Strain Relationships From Pressure meter Tests, Interface Fault Clay in Bolu Tunnels of The Gumusova-Gerede Motorway by Yuksel & Rendel JV)
- O’Rourke T.D, Goh S.H, Menkiti C.O, Mair R.J. (2001), Highway Tunnel performance during the 1999 Duzce earthquake.
- Özben M (2003), Engineering Geology of Bolu Mountain Tunnel and Encountered Geological and Geotechnical Problems During Excavation and Their Effect on Tunnel Excavation and Support System, Ph.D. Thesis.
- Tokgozoglu F, Isik S. (October 6, 2002), Seismic Consideration Of Bolu Tunnels After Duzce Earthquake and Possibile Soluation Proposal, International Conference/Workshope & Exhibition on Tunnelling & Underground Space Use
- William Lettis, Associates Inc. & A Barka, (September 30, 2000) Geologic Characterisation of Fault Rupture Hazard, Gümüşova-Gerede Motorway project report.

