ÖYBKDB ÖN YÜZ PLAKALARINDAKİ ÇATLAMANIN İNCELENMESİ

Y. Arici[1]
[1] *Y. Doçent Dr., İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, Ankara*

ÖZET

Bu çalışmanın temel amacı, bir ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajın önyüz plakasının çatlama davranışını incelemektir. Analizler, barajın inşaat, su tutma aşamalarında ve deprem yüklemesinde, uygun doğrusal olmayan bünye ilişkileri kullanılarak ardışık aşamalarda yapılmıştır. Deprem yüklemesinin beton yüz için önemli bir yükleme durumu olarak görülmüş, plaktaki çatlakların yer sarsıntısı sonrası önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: ÖYBKDB, Deprem, Arayüz, Çatlama genişliği

1. GİRİŞ

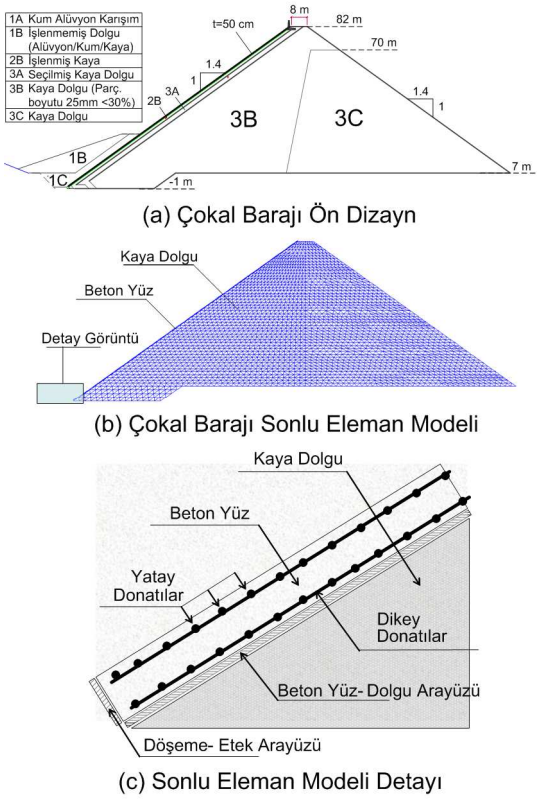
Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlar (ÖYBKKDB), kil çekirdekli toprak dolgu barajlara göre daha hızlı ve kolay inşa edilebilir olduğundan gelişmekte olan ülkelerde tercih edilmektedir. Bu barajların tasarımında genellikle ampirik yöntemler kullanılmakta, tepe oturması ve yüz plakası kalınlığını çeşitli formüllerle tahmin edilmektedir. Mohale [1], Ziping Pu [2], Gouhou [3] gibi yeni yapılan barajlardaki deneyimler bu barajların saha ve laboratuvar incelemelerinin öneminin altını çizmiş, özellikle su tutumu ve deprem sonrası ön yüz performansı üzerinde analitik çalışmanın gerekliliğini göstermiştir. Analitik olarak ÖYBKDB´ler üzerinde çeşitli çalışmalar bulunsa da [4-6], bu çalışmalar plağın kırılgan yapısını dikkate almamaktadır .

Bu yazının temel amacı, su tutulmaya bağlı deformasyon ve deprem yüklemesi sırasında bir ÖYBKDB'nin yüz plakasının doğrusal olmayan davranışını araştırmaktır. Toplam birim uzama çatlak modeli, beton plakanın çatlama evrelerini tahmin etmek için kullanılmış, su tutulmasında ve inşaat aşamalarında kaya dolgunun davranışının modeli, doğrusal olmayan plastisite modeli kullanılarak modellenmiştir. Kaya dolgunun lokal basınca dayalı davranışı deprem yükü için Ramberg Osgood modeli ile simüle edilmiştir. Beton plağın dolgu üzerinde hareketi de modifiye edilmiş bir sürtünme/kalkma modeli ile simüle edilmiştir.

2. ÇOKAL BARAJI

Çokal Barajı, Trakya yarımadasında Gelibolu-Gökbuet projesi kapsamında sulama ve taşkın önleme amacıyla inşa edilen, kret uzunluğu 605 m olan 83 m yüksekliğindeki bir ÖYBKKDB'dir. Baraj sahası, Marmara Denizi'nin altındaki Kuzey Anadolu Fay hattına 10 km uzaklıkta, geniş bir kanyon içindedir. Yüz plakası,% 0.3 donatı oranı ile tasarlanmış olup 50 cm kalınlığında ve her iki yüz 1.4D: 1Y eğimindedir.

Çokal Barajı´nın analizleri DIANA [7] isimli genel amaçlı sonlu eleman analizi programı ile yapılmıştır. Barajın kret uzunluğu / yükseklik = 600 m/83 m = 7.2oranı düzlemsel birim uzama modelleri ile analizin yapılabilirliğini sağlamaktadır. Barajın dolgu kısmı 6 noktalı, 3 integrasyon noktalı üçgen izoparametrik elmanlarla, beton plaka kısmı ise 3 noktalı üçgen elemanlar ile modellenmiştir. Donatılar ise beton yüz içine serbestlik dereceleri olmadan gömülerek modellenmişlerdir. Donatıların uzamaları içine gömülü oldukları malzemenin uzaması ile anlatılmış bu da beton ile donatının bağının mükemmel olduğu düşünülerek modellenmiştir. Arayüz malzemesi ise beton yüzey ile kaya dolgu arasında çizgi geometrisinde tanıtılmış, ve ikinci derece enterpolasyon ile basınç ve kesme aktarımı sağlanmıştır. Çokal Barajı coğrafyası itibariyle, oturduğu yüzey orta derece sert kaya olduğu için barajın temeli ayrıca hesaba katılmamış ve onun yerine ankastre mesnetler kullanılmıştır. Çokal Barajı'nın modelinin resimleri Şekil 1'de gösterilmiştir



Şekil 1 Çokal Barajı ve Sonlu Eleman Modeli.

3. MALZEME MODELİ

Bu bölümde Çokal Barajı'nın hesaplarında kullanılan çeşitli temel malzeme modeleri anlatılmıştır.(Bu çalışmada basınç değerleri negatif, çekme gerilmeleri ise pozitif olarak verilmektedir)

3.1 BETON VE DONATI

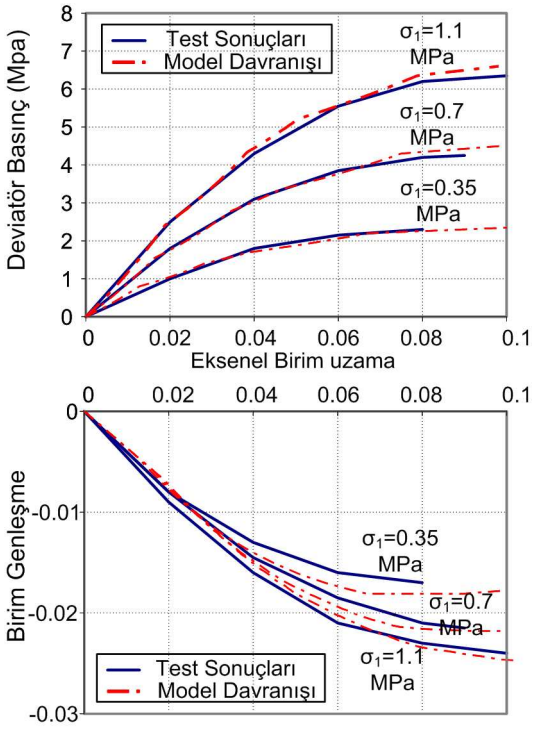
Bu çalışmada kullanılan beton yapı modeli toplam uzama bazlı kırık modeli olup betonun hem basınç hem çekmede ekstrem davranışlarını (kırılma ve çatlamayı) simüle edebilmektedir. Betonun basınç ve çekme davranışlarının tepe noktalarını sırası ile f_c=20 MPa ve f_t=1.5 MPa stresleri belirlemektedir. Basınçta ve çekmede oluşacak maksimum birim uzamayı ise basınç enerji katsayısı G_c ve çekme enerji katsayısı G_f belirlemektedir. Bu katsayıların verilmesi ile *h*, yani sonlu eleman büyüklüğüne bağlı olarak maksimum birim uzama hesaplanabilmektedir. Çelik için S420 kullanılmış olup malzeme özellikleri ise; f_y=420 MPa kayma gerilmesini ε_y=0.0021 de kayma birim uzamasını göstermektedir.

3.2.1 KAYA DOLGU YAPISAL MODELİ: STATİK YÜKLEME

Üç eksenli zemin deneyleri, dolgu yapısının doğrusal davranmayıp davranışının üzerine etkiyen kıstırma basıncına bağlı olduğunu, çökme anında kıstırma basıncının, eksenel uzamanın ve hacimsel genişlemenin artmasına neden olduğunu göstermiştir.[8] Değiştirilmiş Mohr-Coulomb formülü [7] kaya dolgudaki, hacimsel deformasyonları ve mekanik özelliklerin kıstırma basıncına bağlılığını modellemek için kullanılmıştır. Göçme bölgesi boyunca, doğrusal olmayan elastisite uygulanmıştır.

Çokal Barajı dolgusu için test sonuçlarının mevcut olmaması sebebi ile, kaya dolgu modeli aşağıda gösterilen test sonuçlarından [8] benzeştirilmiştir. Model, değişik kıstırma basınçlarında yapılan bu üç

eksenli testlere göre kalibre edilmiştir. Deviatör gerilme ile eksenel birim uzama ve hacimsel ve eksenel birim uzama arasında test ve model simülasyonu arasındaki karşılaştırma Şekil 2´de verilmektedir.



Şekil 2. Üç Eksenli Test Sonuçları [8] ile Model Öngörülerinin Karşılaştırılması.

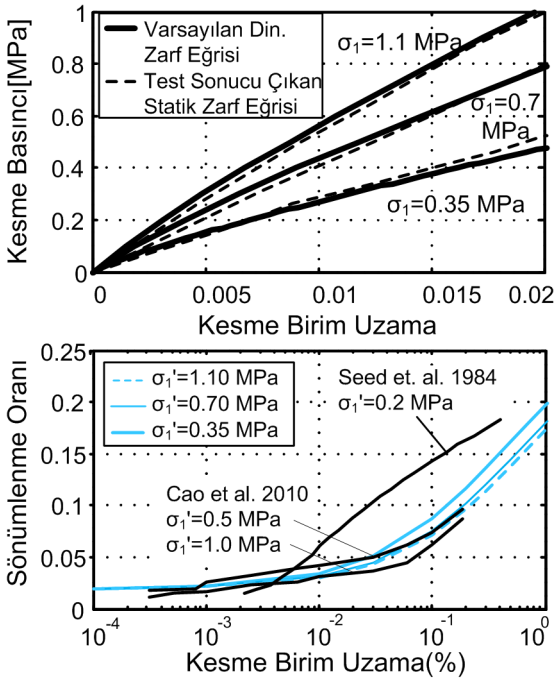
3.2.3 KAYA DOLGU YAPISAL MODELİ: DİNAMİK YÜKLEME

Değiştirilmiş Ramberg-Osgood formülü [7] ile döngüsel kesme yüklemesi altındaki kaya dolgunun rijiditesindeki azalma ve histeretik sönümlenme modellenmiştir. Kaya dolgunun zarf eğrisi (1) α ve β ile belirlenmekte olup bu parametreler birim uzama parametresi (γ_r) ve maksimum sönümlenme değeri ($\xi_{\max}$) kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\gamma_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G}\left(1+\alpha\left|\tau_{xy}\right|^{\beta}\right) \quad (1)$$

$$\alpha = \left(\frac{2}{\gamma_r G}\right)^{\beta} \;\&\; \beta = \frac{2\pi\xi_{\max}}{2-\pi\xi_{\max}} \quad (2)$$

$G = G_{ref}\left(p'/p_a\right)^{0.5}$ ise teğet kesme modülü olarak tanımlanmıştır. Bu denklemle kayanın kesme rijiditesi ortalama kıstırma basıncı p', atmosferik basınç p_a ve referans kesme modülü $G_{ref} = 30MPa$ cinsinden tanımlanmaktadır. Yükleme ve boşaltma döngüsel bağıntısı ise Masing kuralı ile [9] tanımlanmıştır.



Şekil 3. Dinamik Modelin Performansı.

Eşitlik 2'de verilen referans kesme birim uzaması ($\gamma_r = a\exp(bp')$) averaj kıstırma basıncı p' ile bağlantılı olarak tanımlanarak sönümleme oranı ve rijitlik değişiminin kıstırma basıncına bağlantısı simüle edilmiştir. [12] Zarf eğrilerinin üç değişik kıstırma basıncında kalibre edilmesi sonucu a=0.0038 ve b=0.0040 bulunmuştur (Şekil 3). Sönümlenme oranı eğrileri Changheba Barajı [13] dolgusu için yapılan testlerde elde edilen sonuçları ile benzer elde edilmiştir. Oroville Barajı dolgusu [12] için yapılan deney sonuçlarına göre ise mevcut sönümlenme oranları daha azdır.

3.3 ARAYÜZ MODELLEMESİ:

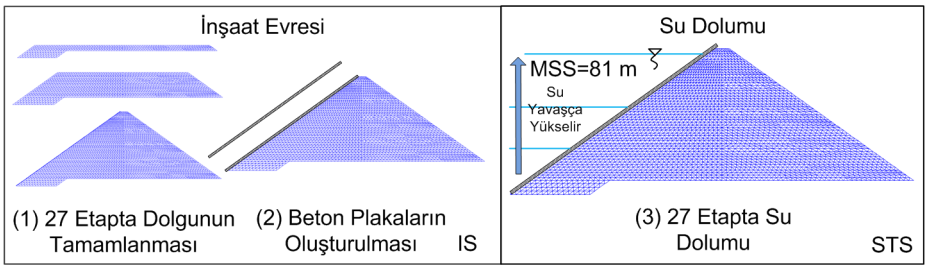
Beton-kaya dolgu veya beton-çakıl/kum arayüzleri için yapılmış olan detaylı test çalışmaları sınırlıdır [5,12]. Bu iki çalışmada da arayüzdeki davranışın aslen sürtünme ve sürtünme aşıldığında kayma olduğu belirtilmektedir. Elde edilen sürtünme katsayıları 0.6 ila 0.8 arasında değişmektedir. Bu testlere benzeşik olarak davranış elde edilmesi için arayüzde Mohr-Coulomb sürtünme modeli kullanılacaktır [7].
Arayüz ve malzeme özellikleri ile ilgili detaylı bilgiler Arıcı (2011)´de sunulmaktadır.

4. ÇOKAL BARAJI'NIN AŞAMALI ANALİZİ

ÖYBKKDB deformasyon davranışı yapım sürecinden tam kapasite doluma kadar değişik etkenlere bağlı olarak meydana gelmektedir. Bu etkenlerin en önemlileri, tane mukavemeti, kaya dolgunun tane boyut dağılımı, mineraloji, temel durumu ve barajın yapım tekniği ve yükleme olarak sıralanabilir. İlk ÖYBKKDB yapılarda belirli bir yükseklikten dolgu malzemesinin serpilmesi ile sıkışma sağlanması beklendiği için oturma seviyeleri çok yüksek olarak elde edilmiştir; bu tip sistemlerin 5.5 – 6%H arası oturma göstermesi olağan olarak görülmektedir. Yeni ekipmanlar ve iyi hazırlanmış malzemeler ile mevcut ÖYBKKDB sistemleri için bu oturma seviyesi 0.5% seviyesine düşürülmüştür [13]. Su tutma aşamasında, ÖYBKKDB'lerde deformasyonlar küçüktür, tepe noktasındaki oturmalar ise yüksek mukavemetli malzemeler için 0.02 – 0.05%, daha zayıf malzemeler için ise 0.1 - 0.15% civarında elde edilmiştir [14].].

ÖYBKDB'lerin performansını belirleyen en önemli etken, beton yüzlerin kaya dolgunun deplasmanı sırasındaki davranışıdır. Dolgudaki oturma, dolgu ile beton yüz arasındaki tampon bölge sayesinde, beton yüzey üzerinde gerilmelere yol açmaktadır, bu sebeple yapım ve yükleme aşamalarının doğrusal olmayan bu

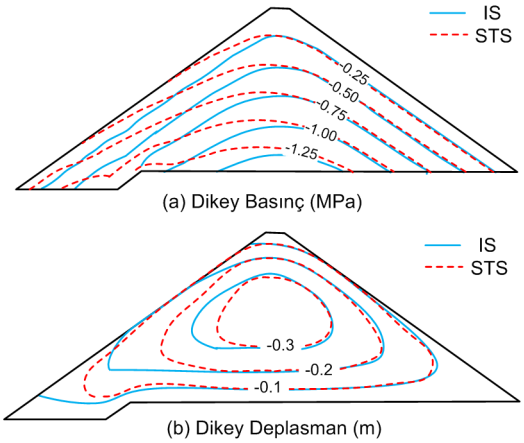
plak üzerindeki etkisini belirlemek için yapım aşamaları ve yükleme seviyelerinin ayrı ayrı modellenmesini gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada yapım aşaması 3 m'lik 27 aşamada simüle edilmiş, bu aşamadan sonra beton plaka kaya dolgunun üzerine arayüz ile bağlanıp yine 27 etapta rezervuarın yavaş yavaş yükselmesi modele yansıtılmıştır. Modelleme dizisi Şekil 4'te gösterilmiştir. İnşaat sonu (İS) ve su tutumu sonu (STS) baraj davranışındaki aşamaları temsil etmektedir.



Şekil 4. Analiz Şemaları.

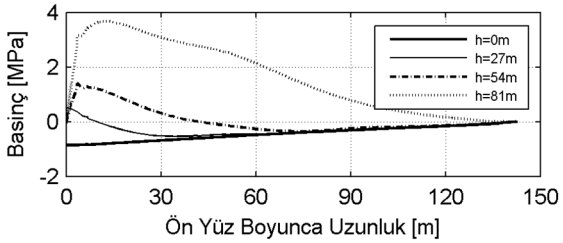
4.1 ÇOKAL BARAJI'NIN İNŞAAT VE SU TUTMA EVRELERİNDEKİ DAVRANIŞI

Yapım ve rezervuar dolumu aşamalarında elde edilmiş basınç kuşakları Şekil 5'de gösterilmiştir. Rezeruvarın yükselmesinin, barajın memba tarafındaki gerilmeler üzerinde etkisi farkedilir düzeydedir. Maksimum oturma dolgunun ortasında ve 30 cm olarak gözlenmiştir.



Şekil 5. Kaya Dolgunun Dikey Yöndeki Stresleri ve Deplasmanları.

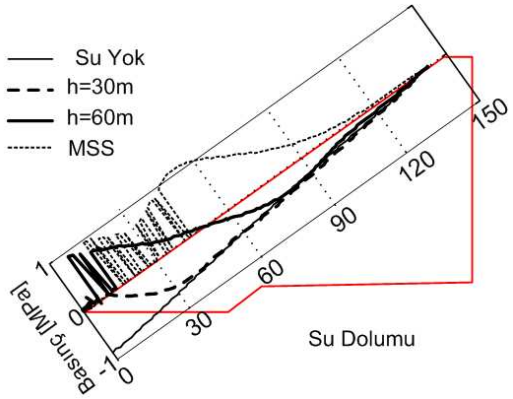
Baraj gövdesinin davranışının plak üzerinde etkisinin yalın olarak anlaşılması için ilk olarak analizlerde beton yüz malzeme modeli lineer elastik olarak kullanılmıştır. Bu şekilde beton yüz ile kaya dolgu arasındaki yük transferinin gözlenebilmesi amaçlanmaktadır. Şekil 6'da beton plak üzerindeki gerilme dağılımının rezervuar dolumu evresindeki sonuçları verilmektedir. Beton plak, rezervuar boşken kendi ağırlığıyla basınç altındayken, rezervuar yükselirken plak üzerindeki basınç, çekme gerilmesine dönüşmektedir. Bu durum nedeniyle maksimum su seviyesinde beton plak plintten ayrılmaktadır.Maksimum su seviyesinde beton plak üzerindeki gerilme kuvvetleri 4 MPa'a ulaşmaktadır. Betonun direk çekme gerilmesinin ortalama olarak 1.5 MPa olduğu düşünülürse bu elemanın analizi için doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin gerekliliği anlaşılabilir.



Şekil 6. Beton Plakadaki Eksenel Gerilmeler.

4.2 YÜZEY PLAĞININ DOĞRUSAL OLAMAYAN DAVRANIŞI VE ÇATLAMA

Çokal Barajının yüzey plağının rezervuar yükselmesi sırasındaki davranışı betonarme plağın çatlamasının doğrusal olmayan modellerle simüle edilmesi ile belirlenmiştir. Rezervuar dolumu sırasında çeşitli rezervuar derinliklerindeki ön yüz plağı üzerindeki basınç dağılımı Şekil 7'de gösterilmiştir. Doğrusal olmayan çatlama davranışının ilk etkisi plintten ayrılma olarak kendini belli etmektedir. Su seviyesi yükseldikçe gerilme bölgesi plakada yüksek seviyelere yayılmaktadır. Maksimum su seviyesinde (MSS) çatlaklar plağın 45´m lik bölümünde görülmektedir. Çatlakların arasında çeşitli bölgelerin hala çekme gerilmesi taşıdığı da gözlenmektedir.



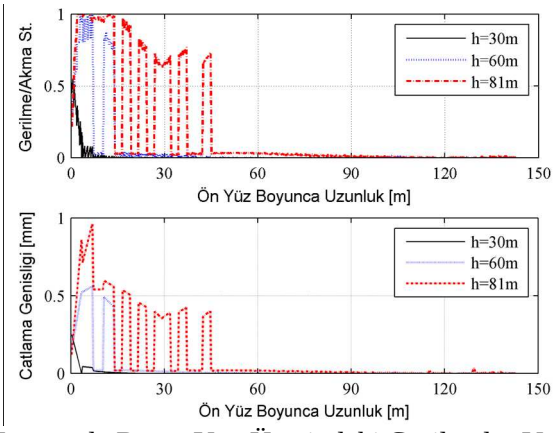
Şekil 7. Su Tutma Esnasında Beton Yüzdeki Gerilmeler.

Ön yüz plağı üzerindeki çatlakların genişliği çok kullanılan Gergely-Lutz [15] yöntemi ile hesaplanabilir. Bu yöntem ile çatlak genişliği çatlama bölgesindeki donatı birim uzaması, beton kaplaması ve donatının etrafındaki betonun alanı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$w_{\max} = 2.2\beta_{GL}\varepsilon_{scr}\sqrt[3]{d_c A} \qquad (3)$$

Bu eşitlikte $w_{\max}$ maksimum çatlama genişliğine eşittir. β, ε_{scr}, d_c ve A sırasıyla birim uzamadaki değişim miktarı katsayısı, çatlama bölgesindeki donatının birim uzaması, en uç gerilme elemanı ile ona en yakın boyuna donatı arasındaki mesafe ve donatının çevresindeki betonun efektif alanıdır.

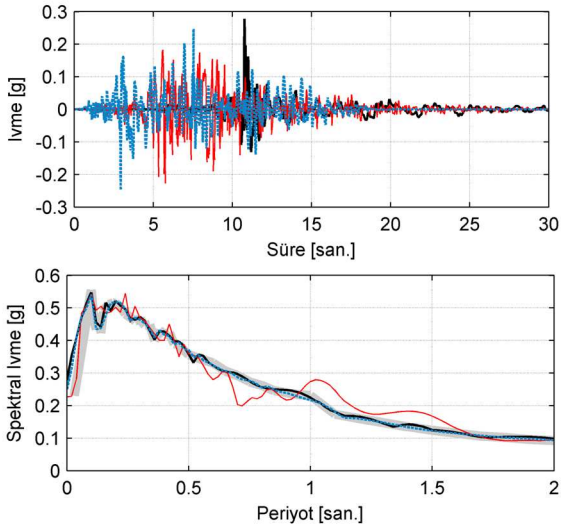
Şekil 8 da Gergely-Lutz yöntemi ile beton plak üzerinde belirlenen çatlak genişlikleri verilmektedir. Plağın alt ucundaki betonarme demirlerinin üzerindeki gerilme rezervuar yükselmesi sırasında artmakta ve maksimum su seviyesinde akma seviyesine çok yaklaşmaktadır(Şekil 8). Görüldüğü üzere plağın alt ucunda çatlama sebebi ile betonarme demirleri akma dayanımına yaklaşan çekme istemlerine maruz kalmaktadır. Bu aşamada kırılma genişlikleri ise aşağıda görüldüğü üzere yaklaşık 1 mm'dir,



Şekil 8. Su Dolumu Esnasında Beton Yüz Üzerindeki Gerilmeler Ve Kırılma Genişlikleri.

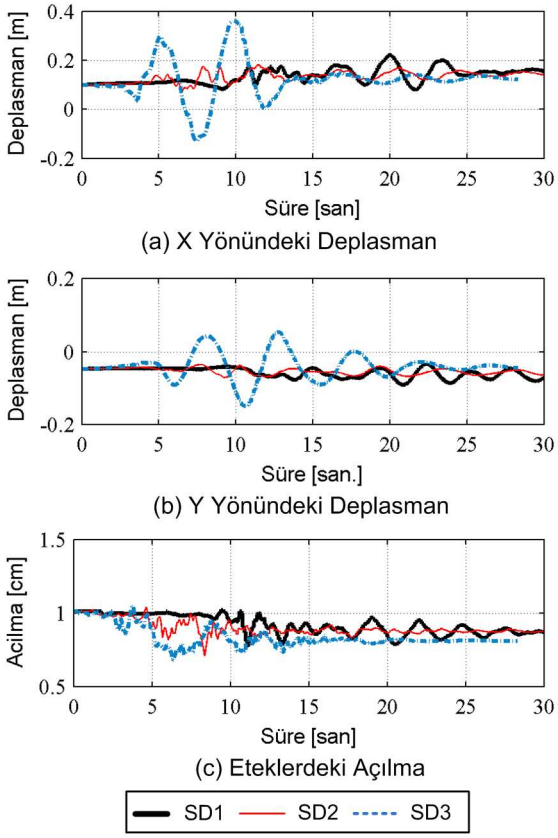
5. DEPREM YÜKÜNÜN ÇOKAL BARAJI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Çokal Barajı Kuzey Anadolu Fay Hattı'na yakın bir bölgede bulunmaktadır. Barajın sismik analizleri 144 yılda bir olabilecek 3 farklı yer hareketine göre yapılmıştır. SD1, SD2 and SD3 olarak kısaca verilen bu yer hareketlerinin tepe yer ivmeleri sırasıylan 0.28, 0.22 and 0.25 g'dir (Şekil 9). Bu deprem hareketleri mevkiye özel olarak oluşturulmuş olan yerel sismik risk spektrumuna uygunlaştırılmış olup [16] hedef spektrum ile hareketlerin spektrumu da aşağıda karşılaştırılmaktadır.



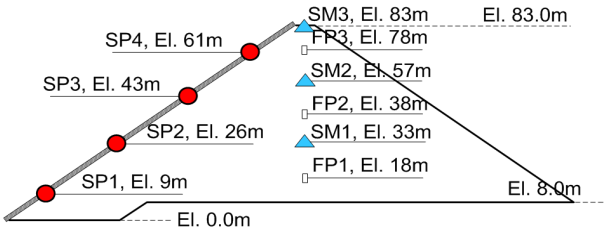
Şekil 9. Deprem Yer Hareketleri ve Hedef Spektrum Karşılaştırması

Şekil 10'da rezervuar dolumunun ardından uygulanan depremin etkisiyle barajın tepe noktasının dikey ve yatay deplasmanları gösterilmiştir. Maksimum yatay deformasyon SD3 hareketi için 40 cm olarak gözlenmiştir. Kalıcı yatay deplasmanlar 5 cm'yi geçmemektedir.. Maksimum dikey deplasman 10 cm olarak gözlenmektedir, kalıcı oturma ise önemsenmeyecek derecede küçük olarak elde edilmiştir. Şekil 12c'de plinte göre plağın alt ucunun davranışı verilmektedir. Görüldüğü üzere deprem öncesinde 1cm olan açılma, deprem sonrasında bütün hareketler için bir miktar azalmaktadır. Deprem hareketi plağı plinte yaklaştırmaktadır.

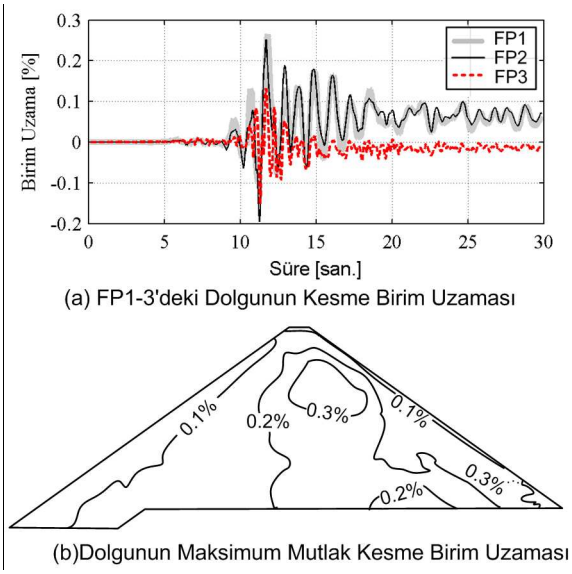


Şekil 10. SD Sırasında Zaman Geçmişi Karşılığı.

Şekil 11'de gösterilen baraj üzerindeki noktaların kesme birim uzamalarının zamana gore değişimi SD1 depremi için Şekil 12a'da verilmektedir. Şekil 12b'de ise maksimum mutlak kesme birim uzamaları konturları yine SD1 depremi için gösterilmiştir. Bu konturlar zaman içindeki maksimum değerlerin zarf birleşimi olarak verilmekte olup, SD2 ve SD3 depremleri için de benzer sonuçlar elde edilmiştir . Görüldüğü üzere kesme birim uzaması özellikle barajın orta kısmında yüksek olarak elde edilmektedir. Yine bu kısımda kalıcı birim uzamalar görülmektedir. OBE depremleri gövdede en çok 0.3% civarında birim uzamaya yol açmaktadır.

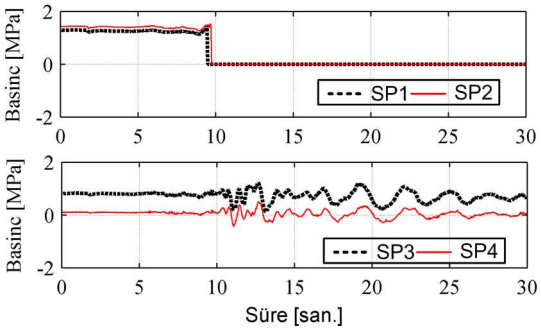


Şekil 11. Çokal Barajının Yüz Plakası ve Dolguda Seçilen Gözlem Yerleri.



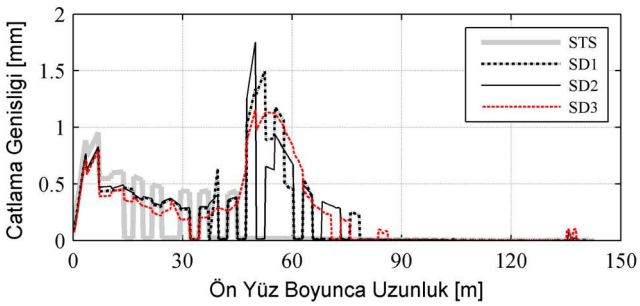
Şekil 12. SD1 için Kesme Birim Uzamaları Geçmişi ve Maksimum Kesme Birim Uzamaları

Şekil 13'de plak üzerindeki farklı yüksekliklerdeki noktaların (SP1, SP2, SP3, SP4, Şekil 11) basınç gerilmelerinin zamana göre değişimi gösterilmektedir. Görüldüğü üzere aşağı seviyelerde (SP1 ve SP2) plak depremin başında çekme dayanımına ulaşmakta ve üstündeki basınç sıfıra inmektedir. Daha yukarı seviyelerde ise basınç ve çekme arasında değişen bir davranış görülmektedir; bu seviyelerde plak üzerindeki gerilmeler çekme dayanımına ulaşmamaktadır.



Şekil 13. SD3 için Ön Yüz Üzerindeki Eksenel Gerilmelerin Değişimi.

Deprem hareketleri sonrasında beton plak üzerindeki çatlakların son halleri Şekil 16'da gösterilmektedir. Açık gri ile verilen statik duruma göre plağın orta bölgesinde ciddi çatlak artışı olduğu görülmektedir. Depremin sonunda çatlama plak üzerinde yaklaşık 35 m tepeye doğru ilerlemiştir. Orta bölgede oluşan yeni çatlakların genişliği de oldukça yüksektir, bununla birlikte alt seviyelerdeki çatlak genişliklerinin bir miktar azaldığı gözlenmektedir. SD3 depreminde plakanın üst ucunda da ufak çatlakların oluştuğu gözlenmiştir.



Şekil 14. Deprem Sonrası Ölçülmüş Kırılma Genişlikleri.

6. ÖZET VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, ÖYBK bir barajın su tutma ve deprem yüklemesi sırasında ön yüz plağının davranışı incelenmiştir. Analiz sonuçları kısaca şöyle özetlenebilir:

- Beton plağın alt ucundaki betonarme demirlerinin üzerindeki gerilme rezervuar dolumu esnasında artmakta ve maksimum su seviyesinde akma seviyesine yaklaşmaktadır. Bu aşamada plak üzerindeki maksimum çatlak genişliği 1 mm olarak gözlenmiştir.
- OBE depremi yüklemesinde beton yüz boyunca çatlamanın önemli miktarda arttığı ve orta bölgeye doğru yayıldığı gözlenmiştir. Plağın alt seviyesinde çatlak genişliği azalsa da orta bölgede ciddi yeni çatlaklar oluşmaktadır.
- Servis sırasında plak üzerinde hatırı sayılır çatlama seviyeleri görülmektedir. Plak üzerindeki elde edilen bu çatlaklar sırası ile öncelikle baraj içinden sızıntının artmasına daha sonra ise ön yüz demirlerinin paslanmasına sebep olabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma MAG108M491 sayılı TÜBİTAK projesi aracılığı ile sağlanan finansman ile gerçekleştirilmiştir.

REFERANS

1) Johannesson P, Tohlang SL. Lessons learned from Mohale. Int Water Power and Dam Constr 2007; July feature.
2) Wieland M. CFRDs in highly seismic regions. Int Water Power Dam Constr 2010; April feature.
3) Cheng Q, Zhang LM. Three dimensional analysis of water infiltration into the Gouhou rockfill dam using saturated-unsaturated seepage theory. Can Geotech J 2006;43:449-461.
4) Uddin N. A dynamic analysis procedure for concrete-faced rockfill dams subjected to strong seismic excitation. Comput Struct 1999;72: 409-421.
5) Zhang G, Zhang JM. Numerical modelling of soil-structure interface of a concrete face rockfill dam. Comput Geotech 2009;36(5): 762–772.
6) Bayraktar A, Kartal ME. Linear and nonlinear response of concrete slab on CFR dam during earthquake. Soil Dyn Earthquake Eng 2010;30: 990-1003.
7) TNO DIANA. User's Manual R. 9.3; 2008.
8) Varadarajan A, Sharma KG, Venkatachalam K, Gupta AK. Testing and modeling two rockfill materials. J Geotech Geoenv Eng 2003;129(3):206–218.
9) Kramer SL. Geotechnical Earthquake Engineering, NJ: Prentice Hall; 1996.
10) Seed HB, Wong RT, Idriss IM, Tokimatsu K. Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils. Rep No 84/14 . EERC, Berkeley, California, 1984.
11) Cao X, He Y, Xiong K. Confining pressure effect on dynamic response of high rockfill dam. Front Arch Civ Eng China 2010; 4(1):116–126.
12) Uesugi M, Kishida H, Uchikawa Y. Friction between dry sand and concrete under monotonic and repeated loading. Soils Found 1990;30(1):115-128.
13) Kutzner C. Earth and rockfill dams. Rotterdam: Balkema; 1997.
14) Seo MW, Ha IS, Kim YS, Olson, SM. Behavior of concrete-faced rockfill dams during initial impoundment. J Geotech Geoenv Eng 2009;135(8):1070-1081.
15) Gergely P, Lutz LA. Maximum crack width in reinforced concrete flexural members. In: R.E. Philleo, editor. Causes, mechanism and control of cracking in concrete, SP20, Detroit: American Concrete Institute; 1968, p. 87-117.
16) Askan-Gundogan A, Ozturk N. Seismic Hazard Study for Cokal Dam. Earthquake Engineering Research Center, METU, Ankara, 2010.