

Donatılı zemin duvar yapılarının depremde davranışı

Behavior of reinforced earth structures under earthquakes

Turgut Kaya, M. Özbatır

REAŞ Reinforced Earth İnşaat Proje ve Ticaret A.Ş., İstanbul, Türkiye

H.Turan Durgunoğlu

ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş., İstanbul, Türkiye

ÖZET: Donatılı zemin istinat duvarları –toprakarme-, 1960’ların sonundan bu yana yaklaşık 35-40 yıldır dünya çapında, 1980’li yıllardan itibaren de ülkemizde pek çok projede yaygın olarak başarı ile uygulanmaktadır. Donatılı zemin istinat yapıları ekonomik oluşları, imalatlarının hızlı yapılması, özellikle deprem yükleri altında oluşabilecek büyük deplasmanları ve yükleri tolere edebilmesini sağlayan esnek davranabilme özellikleri ve estetik görünüşleri sayesinde klasik betonarme istinat yapıları yerine, özellikle sismik aktivite yüksek olduğu yerlerde tercih edilmektedirler. Bu bildiride, donatılı zemin istinat duvarlarının genel prensiplerinden, daha önceki depremlerdeki performanslarından ve vaka analizi olarak “Davutpaşa Kavşağı ve Bağlantı Yolları İnşaatı” kapsamındaki toprakarme duvarlardan birine ait statik ve deprem yükleri altındaki numerik analizlerden bahsedilmektedir. Bu amaçla, sonlu elemanlar yöntemini kullanan –PLAXIS– programı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İstinat duvarı, donatılı zemin, deprem

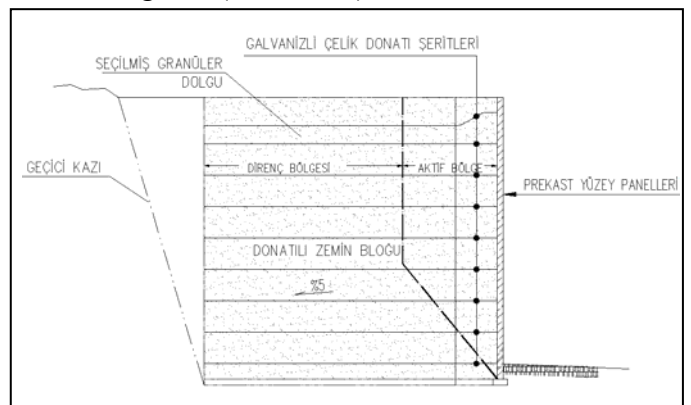
ABSTRACT: Reinforced earth retaining walls have been applied commonly in many projects since 1960s approximately 35-40 years throughout the world, since 1980s in Turkey. Economic feasibility, fast construction, high resistance to earthquakes due to the flexibility of reinforced earth structures and aesthetic appearance are the main reasons for the preference of reinforced earth especially in highly seismic regions instead of the conventional retaining structures. In this article, general concepts of reinforced earth structures, performance of them during previous earthquakes and static and seismic numerical analyses of one of the RE-walls in the content of “Construction of Davutpaşa Interchange and Connection Roads” as a case study are presented. For this purpose, -PLAXIS- program which is utilizing the finite element method is used.

Keywords: Retaining wall, reinforced earth, earthquake

1 GİRİŞ

Donatılı zemin istinat duvarlarının –toprakarme duvarlar- temel çalışma prensibi, duvar bloğunu oluşturan seçilmiş dolgu malzemesi ile donatı olarak kullanılan şeritlerin kompozit bir şekilde çalışmasıdır (Şekil 1). Zemine değişik malzemeler eklenerek yapının mukavemetinin artırılması amaçlanmıştır. Bunun için günümüze kadar tahta kirişlerden, metalik ya da polimerik şeritlere kadar değişik pek çok malzeme donatı olarak kullanılmıştır. Fransız mimar-mühendis Henry Vidal 1960’ların ortalarında, çekme dayanımlı donatılarla güçlendirilmiş zemin kullanımı üzerine rasyonel dizayn prosedürleri ortaya koymuştur. Kısa süre içerisinde, donatılı zemin yapılarının klasik istinat yapılarına göre daha hızlı ve kolay imal edilebilmeleri, estetik görünüşleri, esnek yapıları ve daha ekonomik oluşları sayesinde klasik yapılara

göre ön plana çıktığı görülmüştür (Whitcomb and Bell, 1979). Aynı zamanda betonarme prensibinde olduğu gibi zemine eklenen donatılardan sağlanan fayda, donatının çekme mukavemetine ve donatı ile zemin arasındaki sürtünmenin kesmeye karşı dayanımına bağlıdır (Lee, 1973).



Şekil 1. Tipik RE-Donatılı zemin duvar kesiti

Sistemin yaygın kullanım alanları içerisinde karayollarındaki dolgu ve yarmalardaki istinat duvarları, köprü kenar ayakları ve yaklaşım duvarları, su yapıları, demiryolları sayılabilir.

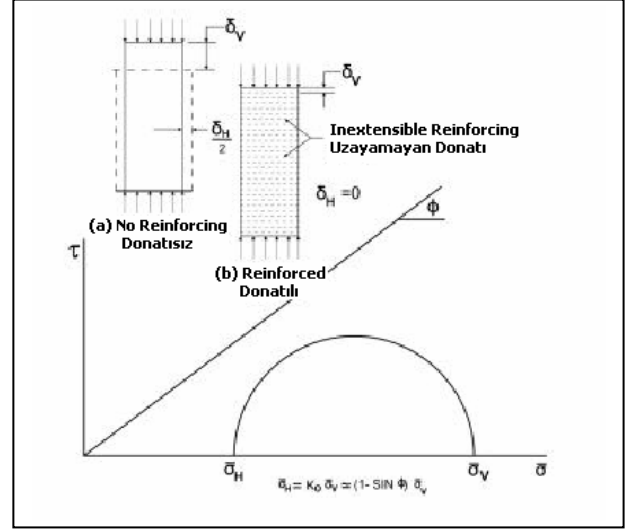
2 DONATILI ZEMİN İSTİNAT DUVARLARI

Reinforced Earth®-RE (donatılı zemin-toprakarme) sisteminin dünya çapında kısa sürede gördüğü ilgi ve yaygın kullanımı, bu sistemin inşaat mühendisliği alanında son otuz beş yılın en dikkate değer gelişmelerinden biri olarak kabul edilmesine neden olmuştur. Donatılı zemin istinat yapıları, son 20 yıl içerisinde sadece Türkiye’de 400.000m²’nin üzerinde imal edilmiştir. Karayollarında özellikle dolgulardaki istinat duvarları ve köprü yaklaşım rampaları uygulamalarında söz konusu yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, donatılı zemin kenarayak yapıları diğer tiplerin uygulamalardaki toplamlarına bakıldığında çok daha az imal edilmiştir. Bu durumun sebepleri olarak kenarayak toprakarme duvarların kiriş yüklerini taşıması gerekliliği nedeni ile mühendisler tarafından kuşku ile algılanması gösterilebilir. Halbuki, günümüzde imal edilmiş binden fazla donatılı zemin kenarayak yapısı mevcuttur (Anderson, 2004).

2.1 Donatılı Zemin Yapıları Temel Prensipleri

Sistemin esası, zemin ile donatının birlikte kullanımına dayanmaktadır. Yeterli sayıda özel aderanslı çelik şeritlerin, dayanım özellikleri ve gradasyonu standartlara uygun granüler geri dolgu ile birlikte yerleştirilmesi sayesinde, çelik şeritlerin esas olarak çekmeye çalıştığı güçlü ve esnek bir kompozit malzeme elde edilmektedir. Donatılı zemin istinat yapılarının temel prensibi, Şekil 2’de özetlenmektedir. Şekil 2a’da gösterildiği gibi granüler malzemeler üzerine etkitilecek aksenal yüklenme sonucu yanal deplasmanlar meydana gelecektir. Dilatasyon ile meydana gelen bu deplasmanlar yüklenme yapılan düzlemdeki deformasyon değerlerinin yarısından fazla olacaktır. Ancak zeminin içine uzayamayan “inextensible” -teorik olarak- türde yatay donatılar yerleştirilirse, Şekil 2b’de gösterildiği gibi, zeminle donatı arasındaki sürtünmeden yararlanarak sistem yatay deplasmanları engelleyecektir. Bu kompozit yapıyı sisteme yanal yük etkitilmiş ya da sistem yanal olarak desteklenmiş gibi düşünmek de mümkündür. Bu eşdeğer yanal yük sükunet durumundaki zemin itkisi kadar olacaktır ($\sigma_h = K_0 \sigma_v$). Bu durumda kompozit malzemenin içerisinde yeralan her donatı eşdeğer yatay zemin itkisi kadar yük almak durumundadır. Bu yüzden düşey toprak itkisi arttıkça eşdeğer yatay itki de doğru orantılı olarak artacaktır (Kittrick, 1978). Buradan yola çıkılarak donatılı zemin yapılarının, basınç ve kesme mukavemetini kullandıkları granüler malzemeler ile

çekme dayanımı yüksek donatıların birleşiminden oluşan kompozit yapılar olduklarını söylemek mümkündür.

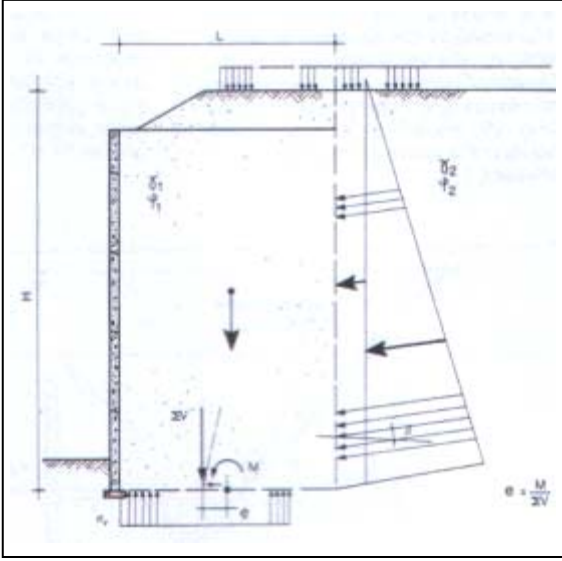


Şekil 2. Donatısız ve donatılı zeminlere aksenal yüklenme (Kittrick, 1978)

Şekil 2’den yola çıkarak pratikte donatılı zemin yapılarının üzerindeki sürsarj yükleri arttıkça dayanımlarının da arttığını söylemek mümkündür. Donatılı zemin istinat yapılarının dayandığı temel prensipleri ve sistemin doğasında yeralan dayanım ve esneklik prensiplerini anlayarak, yüzey kaplama panellerinin de katılımıyla oluşan sistemin, köprü kenarayak yapıları için ve diğer yüksek sürsarjlı yapılar için uygun olacağını söyleyebiliriz (Anderson, 2004). Bu çerçevede sürsarj yükleri arttığında dayanımı da eşdeğer olarak artırabilmek için klasik betonarme kenarayak yapılarında da olduğu gibi zemin içine yerleştirilecek donatı miktarının da artırılması gereği ve bu tip yapıların tasarımı için özellikle deprem yükleri altında özel geliştirilmiş programlar kullanılması gereği unutulmamalıdır (Ekli, 2006).

Donatılı zemin istinat yapılarının, pratikte iç ve dış stabilite hesapları yapılırken “limit durum” yaklaşımına göre gerilme ve kuvvet dengesi bazında oluşturulmuş programlar kullanılmaktadır. Çelik şerit donatılar, seçilmiş dolgu malzemesi ve prekast cephe panellerinden oluşan kompozit yapı toprakarme bloğunu meydana getirmektedir. Dış stabilitede toprakarme bloğunun kendi ağırlığı, gerisindeki dolgunun toprakarme bloğu üzerindeki etkileri ve duvar bloğu üzerindeki sürsarj yükleri göz önünde bulundurularak kayma, dönme, oturma –taşıma gücü hesapları- ve genel stabilite –toptan göçme- tahkikleri yapılmaktadır. Genel olarak, toprakarme bloğu arkasındaki geri dolgunun yatay olarak etkileyeceği toplam zemin basıncı belli bir eğimle uygulanmaktadır: $\beta = (1.2 - L/H) \Phi_2$, Φ_2 geri dolgunun içsel sürtünme açısıdır. Zemin basıncı, Coulomb katsayısı kullanılarak hesaplanmaktadır (Şekil 3). Coulomb katsayısının yatay bileşeni şu şekildedir:

$$K_h = \frac{\cos^2 \Phi_2}{\left[1 + \sqrt{\sin(\Phi_2 + \beta) \sin \Phi_2 / \cos \beta}\right]^2} \quad (1)$$



Şekil 3. Donatılı zemin yapısı dış stabilite hesap yaklaşımı

Donatılı zemin istinat duvarlarında iç stabilite hesapları için hesap yaklaşımı şu şekildedir: Temel seviyesi ve aralardaki donatı seviyelerindeki düşey basınç σ_v , Meyerhof formülü kullanılarak bulunan toplam $-\Sigma V$ - düşey yüklerden hesaplanmaktadır. Bu yüklerin temel seviyelerinin orta noktalarına göre oluşturduğu $-M$ - eğilme momenti ile, aşağıdaki formül ile düşey basınç hesaplanır:

$$\sigma_v = \frac{\Sigma V}{L - 2M / \Sigma V} \quad (2)$$

Maksimum yatay basınç σ_h , $\sigma_h = K\sigma_v$ bağıntısından hesaplanmaktadır. K katsayısı, yüzey seviyesinde $K_0 = 1 - \sin \Phi_1$ 'den; yüzeyden 6m derinlikteki $K_a = \tan^2(\pi/4 - \Phi_1/2)$ ile hesaplanan değere kadar değişiklik göstermektedir. Φ_1 , toprakarme duvar dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı olup 36° veya daha büyük değerlere sahip olabilmektedir (Şekil 4) (AFNOR, 1992).

İç stabilitede çelik şeritlerin çekme dayanımları ve sıyrılmaya karşı dirençleri kontrol edilmektedir. Donatı şeritlerindeki maksimum çekme gerilmesi, hesap yapılacak donatı seviyesinde birim yüzey alandaki donatı sayısına bölünerek bulunmaktadır. $\tau_{maks.} = \sigma_h / N$ bağıntısıyla elde edilir. Her donatı sırasındaki maksimum gerilmelerin olduğu yerleri birleştiren maksimum gerilme çizgisi, donatılı zemin yapısının panellerle tesviye betonunun kesiştiği noktasından başlamaktadır (Şekil 5) (AFNOR, 1992).

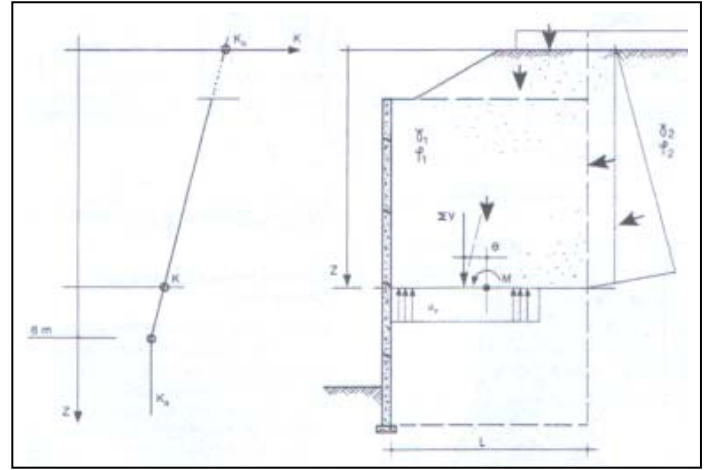
Daha sonra, donatı şeritlerinin uzunluğu, genişliği ve yoğunluğunun -birim alandaki sayısı-, Şekil 1'de

görülen direnç bölgesinde elde edilmesi gereken minimum aderansı sağlayıp sağlayamadığı kontrolü yapılmaktadır. Sürtünme katsayısı ile ilgili araştırmalar, şartnamelere uygun seçilmiş ve iyi sıkıştırılmış donatılı zemin dolgusu ile yüksek aderanslı donatılar arasındaki sürtünme katsayısının $-f^*$ - yüzeyde sahip olduğu maksimum değer $f_0^* = 1.5$ 'den, yüzeyden 6m ve daha aşağıdaki derinliklerde $\tan \Phi_1$ değerine kadar azaldığını göstermektedir (Şekil 6) (AFNOR, 1992).

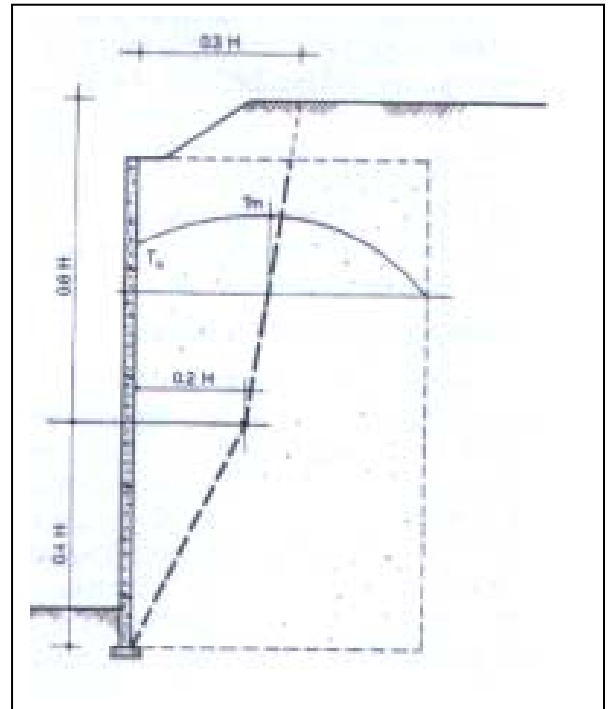
İç stabilite hesaplarının tamamlanabilmesi için aşağıdaki eşitliğin sağlanması gerekmektedir:

$$T_m \leq T_{allowable} = 2bf^*(L - D)\gamma_1 Z / F \quad (3)$$

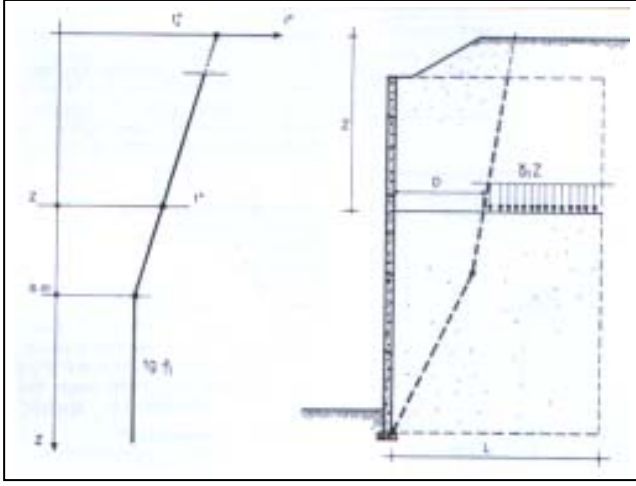
burada F bir güvenlik faktörü, L-D direnç bölgesinde yer alan donatı şeritinin uzunluğu ve $\gamma_1 Z$ donatı seviyesi üzerindeki dolgunun ağırlığını göstermektedir.



Şekil 4. Düşey ve yatay basınçların hesaplanması (AFNOR, 1992)



Şekil 5. Maksimum gerilme çizgisi (AFNOR, 1992)



Şekil 6. Aderans kapasitesi (AFNOR, 1992)

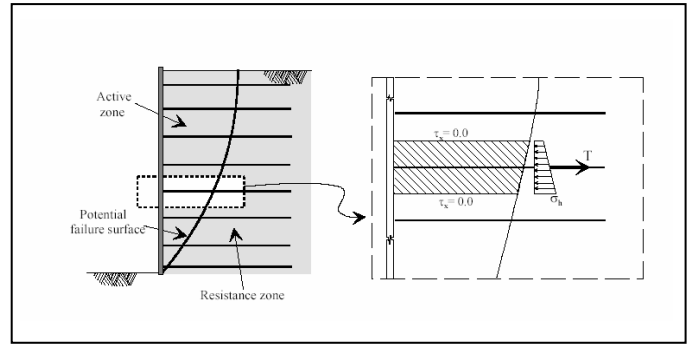
2.2 Donatılı Zemin Yapıları Bileşenleri

Donatılı zemin istinat yapıları dört elemandan oluşmaktadır. Bunlar yüzey kaplama panelleri, donatılar (çelik şeritler), granüler dolgu malzemesi ve panel-donatı birleşim parçalarıdır. Yüzey panelleri Şekil 7’de görülebileceği üzere prekast olarak imal edilmekte ve imalat sahasına götürülmektedir. Normal yüklemeye altındaki bir istinat yapısı için 14cm kalınlığında imal edilen paneller, kenarayak yapıları ya da yüksek yapılar için projesine göre 18cm kalınlığında da dökülebilmektedir (Ekli, 2006).

Donatılar için değişik malzemeler kullanılmaktadır. Günümüzde yaygın olarak uzayamayan-“inextensible” (çelik şeritler) malzemelerin yanında uzayan-“extensible” (polimer şeritler ve geotekstilller) malzemeler de kullanılmaktadır. Donatıların çalışma prensibi, Şekil 8’de gösterilmektedir. Buna göre aktif bölge dediğimiz potansiyel kayma yüzeyinin duvar tarafında kalan bölge, panellerin üzerine yanal yönde bir itki oluştururken, kayma yüzeyinin gerisinde kalan bölge donatıların sürtünmeyle çalıştığı dolayısıyla direnç oluşturduğu bölge olarak gözükmektedir.

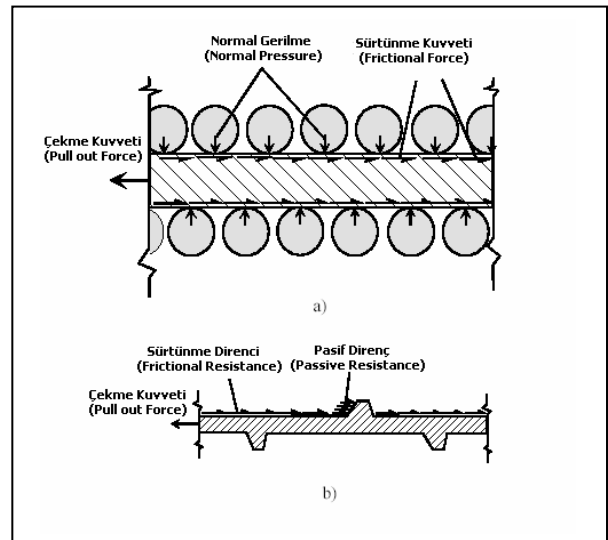


Şekil 7. Prekast beton paneller (Reinforced Earth A.Ş., 2006)



Şekil 8. Çelik şerit donatıların çalışma prensibi (Liang,2004)

Deformasyona izin vermeyen uzayamayan-“inextensible” donatıların kayma yüzeyi de, uzayan-“extensible” donatıların kayma yüzeyi de duvar dibinden geçmektedir. Ancak limit durum yaklaşımı ile yapılan tasarımlarda extensible donatıların kayma yüzeylerinin daha yataya yakın oldukları dolayısıyla aktif yüzeylerinin arttığı ve donatı boylarının daha uzun kullanılması gereği ortaya çıkmaktadır. Yüksekliği az olan istinat yapılarında bu durum önemli bir fark yaratmamakla birlikte yüksek istinat yapılarında donatı boyları önemli ölçülerde farkedebilmekte ve böylece extensible donatılarla daha büyük bir maliyet söz konusu olmaktadır. Donatılar için diğer önemli faktör, zeminle etkileşimlidir. Özellikle çelik şeritlerin çekme dayanımlarının fazlalığı ancak yeterli sürtünme sağlanabilirse kullanılabilir. Bu konuda salt sürtünme yerine zeminin pasif itkisini de kullanan donatı sistemleri geliştirilmiştir. Şekil 9a’da sadece sürtünme ile çalışan Şekil 9b’de ise hem sürtünme hem pasif itkiyi kullanarak çalışan donatılar görülmektedir bu donatılar literatürde tırnaklı çelik şeritler “ribbed steel strips” şeklinde de geçmektedir. Limit durum yöntemi ile yapılan donatılı zemin istinat yapıları tasarımlarında bu etkiyi gözönüne alabilmek için deneysel yöntemlerle desteklenmiş eşdeğer sürtünme değerleri kullanılmaktadır. Bu bakımdan bu yapıların imal edilmesinde aşağıda bahsedilecek dolgu malzemesi standartlarına uygunluğu büyük önem taşımaktadır.



Şekil 9. Sadece sürtünme&sürtünme+pasif direnç (Liang,2004)

Donatılı zemin istinat yapılarında dolgu malzemesi özel seçilmiş malzemedir. Malzemenin seçiminde değişik standartlar bulunmaktadır. Esas olan malzemenin sıkışabilir olmasının yanısıra çok fazla ince malzeme barındırmamasıdır. Çelik şeritlerin kullanıldığı istinat yapıları için kullanılan standartlara göre kullanılacak granüler dolgunun elek analizi Tablo-1'deki gibi olmalıdır. Tavsiye edilen standartlarda belirtilen %95 izafi sıkışma değerini yakalayabilmek adına %5-10 arasında ince malzeme (#200=75 Micron) bulunmasıdır.

Tablo 1. Dolgu malzemesi spesifikasyonu (Karayolu Teknik Şartnamesi, KGM, 2006)

Elek Boyutu (mm)	% Geçen
125 (5")	100
75 (3")	85-100
12.5 (1/2")	25-100
2 (No.10)	15-100
0.59 (No.30)	10-65
0.075 (No.200)	<15

Donatılı zemin yapılarının bir diğer önemli parçası da yüzey kaplaması prekast paneller ile çelik şeritlerin bağlandığı birleşim noktasıdır. Bu kısım Şekil 10'da görülebilmektedir. Şekil dikkatli incelenirse bu kısımda kritik noktanın yine çelik şeritin kendisi olduğu görülebilir. Reinforced strip denilen şeritlerde bu kısım kalınlaştırılarak enkesit kaybından doğan dayanım kaybının önüne geçilebilmektedir. Bunun yapılamadığı durumlarda "limit durum" yöntemi ile tasarım yapılırken şeritlerin uçlarındaki gerilmeleri hesaplayabilmek için deneysel yöntemlerle desteklenmiş ampirik bağıntılardan yararlanır. Genellikle buradaki çekme gerilmesi şeritin üzerindeki maksimum çekme gerilmesinin %85'i kadardır. Bu gerilmeye göre bağlantı noktasındaki kesit alanı kontrol edilir. Numerik analizlerde ise bağlantı noktalarındaki gerilmeler tam olarak tespit edilebilmektedir.

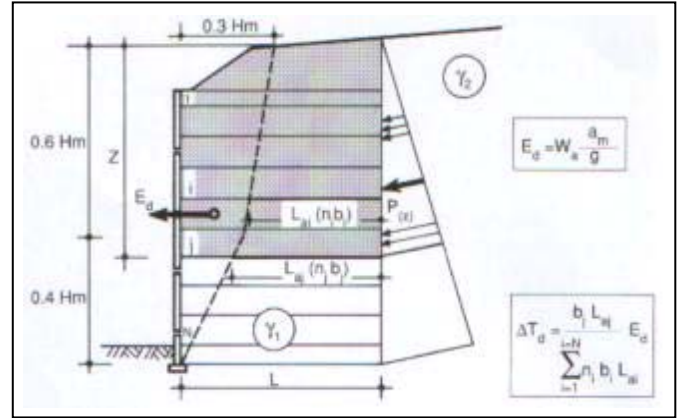


Şekil 10. Çelik şerit bağlantı Detayı (REAS, 2006)

2.3 Donatılı Zemin Yapıların Deprem Tasarımı

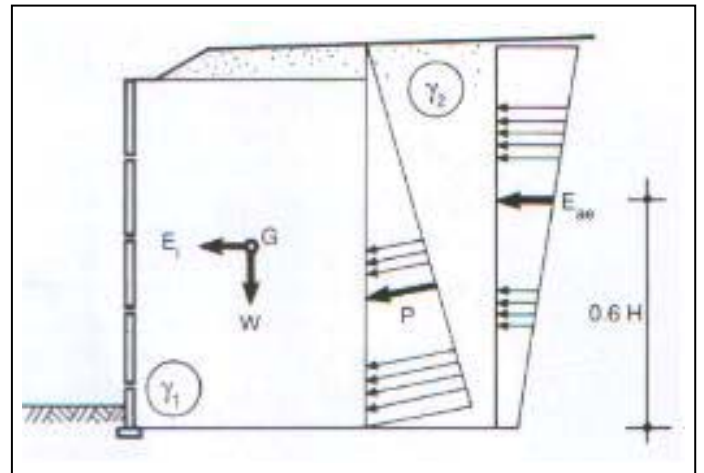
RE-donatılı zemin yapıları sismik koşullara göre dizayn edilirken genel olarak quasi-statik dizayn yükleri kullanılmaktadır. Bu tasarım prensipleri yapının boyutlandırmasının, bulunduğu sismik bölgedeki yatay deprem ivmesinin iç ve dış stabilite gereklerine uygun güvenlik faktörleri ile artırılarak etkilmesi mantığına dayanmaktadır.

İçsel stabilite analizleri sırasında donatılı zemin bloğunda bulunan yüksek aderanslı ve galvanizli çelik şeritler aktif bölgedeki dolgunun ataletiyle oluşan statik ve dinamik kuvvetlere dayanacak şekilde dizayn edilir. Deprem yükleri altında çelik şeritlerin çekme mukavemetinin 0.4g'ye varan yer ivmeleri sonucunda yaklaşık %20 oranında azaldığı, yapılan analitik ve deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Bu nedenle, şeritlerin çekme mukavemeti konzervatif olarak statik durumdaki mukavemetin %80'i olarak alınmaktadır (Şekil 11).



Şekil 11. İç stabilite: İçsel dinamik kuvvetlerin dağılımı

Dış stabilite hesaplarında ise Mononobe-Okabe pseudo-statik metodu kullanılmaktadır. Bu metoda göre statik yükler dinamik zemin basıncının 1/2'si ve duvarın atalet kuvvetinin %50'si ile birleştirilmektedir. Kaymaya ve dönmeye karşı olan güvenlik faktörleri statik durum için kullanılan faktörlerin %75'ine denk gelecek şekilde azaltılmaktadır (Şekil 12).



Şekil 12. Dış stabilite: Deprem etkilerinin duvara etkilmesi

3 ÇELİK ŞERİT DONATILI ZEMİN YAPILARININ DEPREMLERDEKİ PERFORMANSLARI

Sistemin en büyük avantajı, çelik şerit donatılarla teşkil edilen istinat yapısının klasik rijit duvarlara göre daha esnek davranışı nedeni ile sistemin çok daha büyük deplasmanları ve yükleri tolere edebilmesidir. Bu nedenle, inşaa edilmeye başladığı dönemlerden günümüze RE-duvarlar, dünyanın pek çok bölgesinde maruz kaldığı büyük depremlerde oldukça başarılı performans sergilemişlerdir. Gemona-İtalya, 1976; Liege-Belçika, 1983; Mexico City-Meksika, 1985; San Francisco, 1989, Nothridge, 1994-Amerika Birleşik Devletleri; Kobe-Japonya, 1995 ve ülkemizde 1999 yılında meydana gelen İzmit depremlerinde merkez üsse yakın yerlerde inşaa edilmiş olan donatılı zemin duvarlar, esnek yapıları sayesinde yıkıma uğramamış, ayakta kalabilmeyi başarmıştır (RE Structures in Seismic Regions, Reinforced Earth®; Earthquake Spectra, 2000).

3.1 1999 Gölcük Depremi

Depremin merkezine oldukça yakın bir bölgede bulunan Arifiye Köprüsü'ne (Şekil 13) ait RE-donatılı zemin yaklaşım duvarlarında gözlenen performans oldukça çarpıcıdır. 1988 yılında Adapazarı'nda, 40x5 mm kesitli yüksek aderanslı galvanizli şeritler kullanılarak inşa edilen yaklaşım duvarları maksimum 10 m yüksekliğe ulaşmaktadır. Depremin ardından köprünün kendisi göçmesine rağmen, RE-donatılı zemin yaklaşım duvarları az veya hiç hasar görmemiştir (Şekil 14)(Martin, 1999). Farklı oturmalarından dolayı, zeminden yukarıya doğru yayılan kesme deformasyonları bazı bölümlerde duvarı 75mm'ye kadar ayırmıştır. Arifiye köprüsüne yaklaşık 250 m uzaklıkta bulunan bir betonarme istinat duvarında ise 1m'lik bir deplasman gözlenmiştir. Arifiye köprüsü RE-donatılı zemin yaklaşım duvarları 0.1g'lik yer ivmesine göre tasarlanmıştır. Bu tasarım statik analize göre belirlenen şerit boylarında oldukça düşük bir artışa neden olmuştur. Depremin gerçek yer ivmesinin 0.4g olduğu göz önüne alındığında yapının bu yer ivmesine göre tasarımının yapılması halinde şerit miktarının yaklaşık olarak mevcut durumun %40'ı kadar fazla olacaktır.



Şekil 13. Arifiye Köprüsü yaklaşım RE-Duvarları, Adapazarı

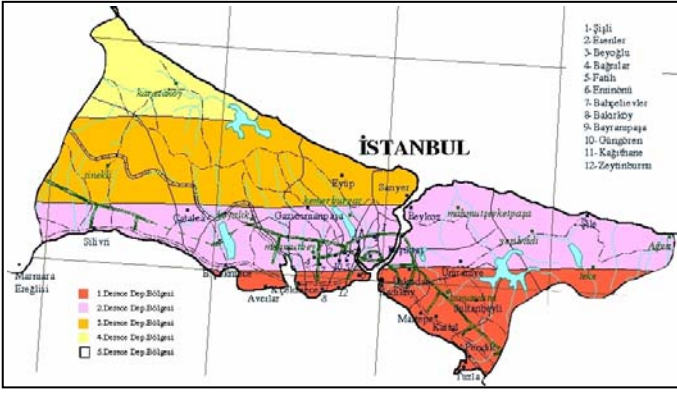
Bu performans analizleri, artırılmış yüksek dayanımlı galvanizli şeritlerin gerekli olmadığını ortaya koymakta ve hem RE-donatılı zemin teknolojisinin güvenliği hakkında önemli bir gösterge olurken hem de mevcut tasarım prensiplerinin oldukça konservatif olabileceğini göstermektedir (Segrestin, 2000).



Şekil 14. RE-duvar ve Arifiye Köprüsü (1999 Gölcük Depremi sonrası). Yatay deplasman 350cm, düşey deplasman 45cm.

4 VAKA ANALİZİ

“Davutpaşa Kavşağı ve Bağlantı Yolları İnşaatı” kapsamındaki RE-donatılı zemin duvarlardan 6.73m yükseklik için dizayn hesapları yapılmıştır. Duvarların imal edileceği yer 1. derece deprem bölgesinde yer aldığından, maksimum yatay yer itkisi 0.4 ($a_0/g=0.4$) olarak alınmıştır (Şekil 15). Hesaplarını “limit durum” yaklaşımına göre yapan -VALDEZ- programı kullanılarak, şerit uzunluğu ve donatı yoğunluğunu içeren sonuçlar elde edilmiştir. Bu değerler, -PLAXIS- programında 1m genişlik için yapılan hesaplarda kullanılmıştır. Yatay ve düşey deplasmanlar ile şeritlerde oluşan eksenel kuvvetler hesaplanmıştır.



Şekil 15. İstanbul'un sismik risk haritası

PLAXIS programı için kullanılan zemin parametreleri Tablo 2'de özetlenmektedir. Değerler zemin etüt raporundan yola çıkılarak literatürdeki bağıntılar kullanılarak tespit edilmiştir. Zemin sondajları incelendiğinde zeminin SPT N değerlerinin 30'un altına düşmediği görülmüştür.

Tablo 2. Numerik analizde kullanılan zemin parametreleri

Zemin Tipi	Sürtünme Açısı- Φ	Elastik Modül, E (MPa)	Poisson Oranı
Az düşük plastisiteli killi, ince sıkı kum	30	80	0.3
Yer yer kil arabanlı, az çatlaklı kumtaşı	30	50	0.3
Donatılı zemin özel dolgusu	36	60	0.35

Analizlerde yapısal elemanlar için kullanılan parametreler ise Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Numerik analizdeki yapısal eleman parametreleri

Yapısal Eleman	Elastik Modül (GPa)	Kesit Alanı (m ²)	Atalet Momenti (m ⁴)
Yüzey Panelleri	32.7	0.18	4.86E-04
Çelik Şeritler	210	1.60E-04	-

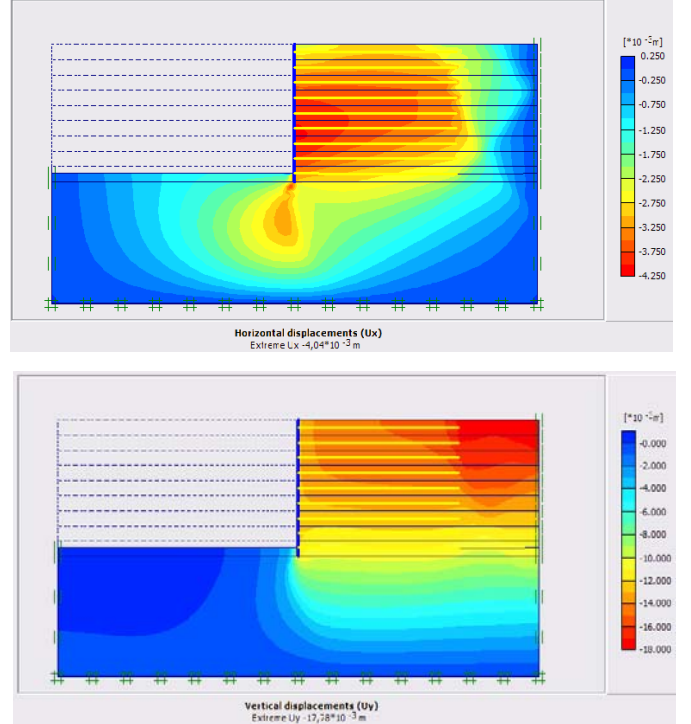
4.1 PLAXIS Programı Analiz Sonuçları

PLAXIS programı ile yapılan numerik analizlerde sondaj loglarından elde edilen parametreler kullanılarak temel zemini modellenmiş, sonrasında prekast beton paneller ve 40x4mm kesitli çelik şerit donatılar modele yerleştirilerek RE-donatılı zemin duvarına ait yapım aşamaları adım adım programa girilmiştir. Son olarak 1. derece deprem bölgesi şartları dikkate alınarak maksimum yatay yer itkisi deprem yükü olarak sisteme etkiletilmiştir. Elde edilen – PLAXIS- analiz sonuçları, statik ve sismik durumlar için Şekil 16 ve 17'de görüldüğü gibidir.

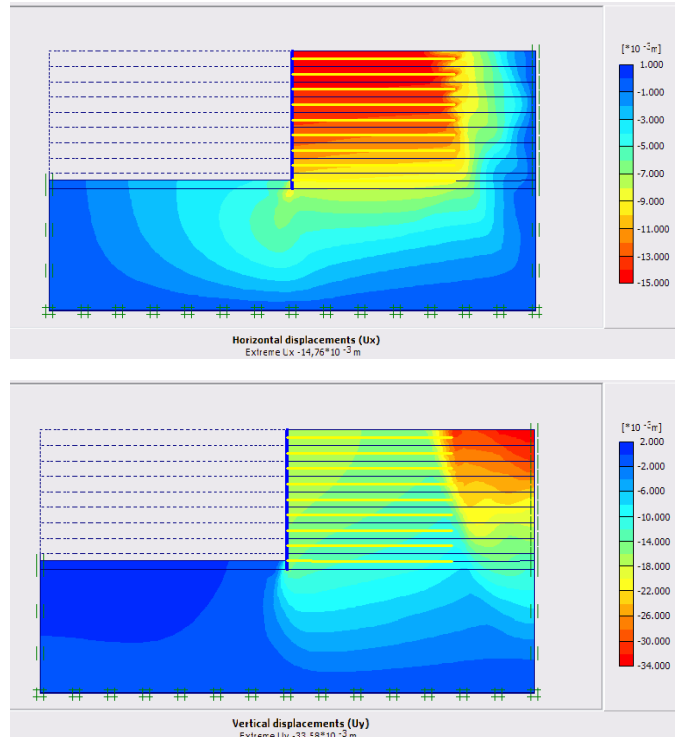
Böylelikle sistemi oluşturan noktaların yatay ve düşey doğrultulardaki deplasmanları ortaya çıkmıştır. Neticede x ve y yönlerindeki maksimum deplasmanları gösteren ekli sonuç grafiklerinden de görülebileceği gibi, statik durumdaki deplasmanlar: $\delta_x=0.40\text{cm}$ ve $\delta_y=1.78\text{cm}$ 'dir. Bu deplasmanların

özellikle inşaat sürecinde oluşması beklenmelidir. Bununla birlikte deprem yükü sisteme ilave edilince yeni deplasmanların $\delta_x=1.48\text{cm}$ ve $\delta_y=3.36\text{cm}$ şeklinde oluştuğu görülmüştür.

Sonuç olarak, deprem durumunda RE-donatılı zemin duvarında oluşması beklenen ilave deplasmanların $\Delta\delta_x=1.08\text{cm}$ ve $\Delta\delta_y=1.58\text{cm}$ olarak oluşacağı anlaşılmıştır. Toprakarme duvarların deplasmanlar açısından uygulanabilir limitler içerisinde yer aldığı görülmüş ve duvarların imalatı yapılmıştır (Şekil 18).



Şekil 16. PLAXIS analizi sonuçları statik durum için yatay ve düşey deplasmanlar



Şekil 17. PLAXIS analizi sonuçları sismik durum için yatay ve düşey deplasmanlar



Şekil 18. Davutpaşa Kavşağı RE-Donatılı zemin duvarları (Reinforced Earth İnşaat Proje ve Ticaret A.Ş., 2006)

Sismik aktivitenin yüksek olduğu, $a_0/g > 0.2$ olan yerlerde RE-kenarayak duvarlarda bu tarz deplasman hesaplarının yapılması ve hesaplanan deplasman değerlerinin tolere edilebilir olduğunun gösterilmesi CALTRANS tarafından da istenmektedir.

5 SONUÇLAR

Bu bildiri, RE-donatılı zemin duvar yapılarının genel özelliklerine ilişkin literatürde yer alan bilgilerin sunulması, özellikle metal şeritlerle donatılmış istinat duvarı yapılarının uygulamalarına, tasarım metodlarına, bileşenlerine ve deprem yükleri altındaki davranışlarına odaklanmıştır. Söz konusu yapıların daha önceki depremlerdeki performanslarını değerlendiren incelemeler ve depremselliğin ciddi rol oynadığı bir bölgede projesi yapılmış bir duvar örnek olarak incelenmiştir. Ayrıca, donatılı zemin –toprakarme- duvarların numerik analizlerinin nasıl yapıldığından bahsedilmiş ve bu tür yapılarda meydana gelen deplasmanlar değerlendirilmiştir.

6.73m yüksekliğe sahip donatılı zemin duvarı için, maksimum yatay yer ivmesi 0.4 ($a_0/g = 0.4$) olacak şekilde deprem yükü altında tasarım hesapları yapılmıştır. Hesapları limit durum yaklaşımına göre yapan VALDEZ programı kullanılarak, şerit uzunluğu ve donatı yoğunluğunu içeren sonuçlara ulaşılmıştır. İç ve dış stabilite analizleri yapılmıştır. Elde edilen şerit uzunluğu ve yoğunluğuna ait değerler, PLAXIS programında 1m genişlik için yapılan hesaplarda kullanılmıştır. Yatay ve düşey deplasmanlar ile şeritlerde oluşan çekme kuvvetleri hesaplanmıştır. Söz konusu deformasyonların ve kuvvetlerin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu görülmüştür (Kaya, 2007).

Yapılan incelemeler ışığında, sismik aktivitelerin yoğun olduğu bölgelerde, RE-donatılı zemin sisteminin güvenle uygulanabileceği gösterilmiştir. Sis-

teme bu avantajları sağlayan kilit özellikler sistemin esnekliği ve mukavemetidir.

Geçmişte izlenen vaka analizlerinde de RE-donatılı zemin yapılarında gözlenen deformasyonlar değişkenlik gösterse de, yapıların işlevselliğini bozacak düzeye çıkamamış ve duvar yüksekliğinin %3'lük bölümünde yoğunlaşmıştır. Deformasyonlarda gözlenen değişkenlikler sistem üzerindeki büyük etkisi bulunan temel ve dolguda zamanla oluşan durum değişiklikleri nedeniyle meydana gelmiştir. Deformasyona neden olan hareketin kendisi, RE-donatılı zemin sisteminin üzerine gelen kuvvete dayanıp daha fazla yük çekmek yerine, esnekliğini ve enerji soğurma kapasitesini kullanarak yükleri dinamik karakteri içinde karşıladığını göstermektedir.

Söz konusu RE-donatılı zemin yapılarının pek çoğunun maruz kaldıkları yüksek deprem ivmelerinden çok daha az ivmelere göre tasarlanmış olup buna rağmen gerek deformasyon gerekse mukavemet bakımından üstün performans göstermeleri, bu yapıların tasarımında kullanılan standartların konservatifiği ve ekonomik yönden geliştirilmesi gerekliliğini önemle vurgulamaktadır (Sankey & Segrestin, 2001).

REFERANSLAR

- Lee K.L., Adams B.D., & Vaneron J.J.. ASCE, Reinforced earth retaining walls, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, SM10, October 1973.
- Segrestin P., 2000, Performance of reinforced earth retaining walls near the epicenter of the Izmit earthquake. (Turkey, August 17th, 1999) *Soiltech Manograph*. Freyssinet, Velizy, France, 2000.
- McKittrick, D.P., 1978. Reinforced earth: application of theory and research to practice, *Symposium on Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques*, Sydney, Australia, October 16, 1978.
- William Whitcomb, & J.R. Bell, Analysis techniques for low reinforced soil retaining walls and comparison of strip and sheet reinforcements, *Proceedings of the 17th Engineering Geology and Soil Engineering Symposium*, April 1979, Moscow, Idaho.
- AFNOR, NF P 94-220, French Standard, July 1992.
- Ekli O., Durgunoğlu H.T. & Özbatır M., 2006. Donatılı zemin kenarayak duvarlarının numerik analizi – vaka analizi *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi*, 7-8 Eylül 2006, KTÜ, Trabzon.
- Sankey J.E., Segrestin P., 2001. Evaluation of seismic performance in mechanically stabilized earth structures. *International Symposium on Earth Reinforcement Practice*, IS Kyushu' 01
- Kaya T., 2007. Behavior of reinforced earth structures under earthquakes, M.S. Thesis, Boğaziçi University, Civil Engineering.
- Martin J., 2000. 1999 Kocaeli, Turkey reconnaissance report, Earthquake spectra,
- Peter L. Anderson, P.E., 2004. The reinforced earth company, Increased use of MSE abutments"
- Liang R.Y., 2004. MSE wall and reinforcement testing At Mus-16 Bridge Site, September
- Reinforced Earth Co., 2006. Reinforced earth retaining walls