

YERALTI YAPILARININ DEPREM ESNASINDAKİ DAVRANIŞI

**HAZIRLAYAN
JEOFİZİK MÜH. – GEOTEKNİK Y.LİS
ELİF BAŞHAN**

ÖZET

Geçtiğimiz 20 yıl, yeraltı yapılarının deprem davranışlarının anlaşılması konusunda büyük gelişmelere sahne olmuştur. Yeraltı yapıları için sismik yük tasarımları, bu yapıları çevreleyen zemindeki deformasyonlara göre nitelendirilir. Buna karşılık, Yerüstü yapıları, zemin ivmelenmelerinin yarattığı atıl güçlere göre tasarlanır. Yeraltı yapılarının sismik yüklerinin ölçülmesi için tasarım metodları geliştirilmiştir. Bu metodlar, yeraltı yapısına serbest-alan hareketinin uygulandığı basit statik analizi ile dinamik zemin-yapı etkileşimi analizini içermektedir. Sismik bir olaya bağlı serbest-alan zemin deformasyonları, yerel zemine özel tepki analizleri aracılığıyla ölçülür. Tarih boyunca, yeraltı tesisleri yer üstü yapılarına oranla daha az zarar görmüştür. Buna karşılık, son dönem yeraltı yapılarında yakın tarihte meydana gelen depremlerle ortaya çıkan tasarım hataları, sismik yaklaşıma yeraltı yapılarının tasarım ayrıntılarında da yer verilmesi gerektiğini hatırlatmıştır.

GİRİŞ

Yeraltı yapıları, gittikçe şehirleşen dünyada altyapının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu yer altı boşlukları; metrolar, otoyollar, depolar, su ve atık su nakli için kullanılmaktadır. Deprem faaliyetlerine maruz kalan alanlarda inşa edilen yeraltı tesisleri, aynı anda hem sismik, hem de statik yüke dayanmalıdır.

Yeraltı yapıları deprem davranışları, yerüstü yapılarından ayıran özelliklere sahiptir;

- ✖ Yer altı yapılarının tamamen toprak veya kaya ile çevrelenmiş olmaları
- ✖ Kayda değer uzunlukları (örn. tüneller); Bu açıdan bakıldığında yeraltına gömülü, özellikle küçük hacimli yapılarda depremden kaynaklanan önemli zorlamalar oluşmamaktadır. Ancak metro, tünel gibi uzun yapılarda durum küçük hacimli yeraltı yapılarına göre biraz daha farklıdır. Yeryüzüne göre noktasal sayılabilecek küçük hacimli yapılar, içinde bulundukları ortamın deformasyonları eşit olduğundan yapı kendi içinde bir bütün olarak sallanmakta buna bağlı olarak da yapı içinde zeminin deformasyonlarından kaynaklanan zorlanmalar oluşmamaktadır. **Oysa, metro veya tünel gibi uzun yeraltı yapıları zemin ile birlikte deforme olduklarından, zeminin kendi içindeki farklı deformasyonlar doğrudan yeraltı yapısına deformasyon olarak iletilmekte ve bu da yeraltı yapısı üzerinde önemli kuvvetler oluşturabilmektedir.**

Büyük yeraltı yapıları, her biri ayrı tasarım özelliklerine ve inşa yöntemlerine sahip üç yaygın kategoride gruplanabilir:

- ✗ Delinerek veya kazılarak açılmış tüneller,
- ✗ Aç-kapa tüneller,
- ✗ Batırma tüp tüneller (Power, et. al, 1996).

Bu yapılar genel olarak metro yapıları, otoyol tünelleri ve büyük su-atık su nakil kanalları için kullanılmaktadır.

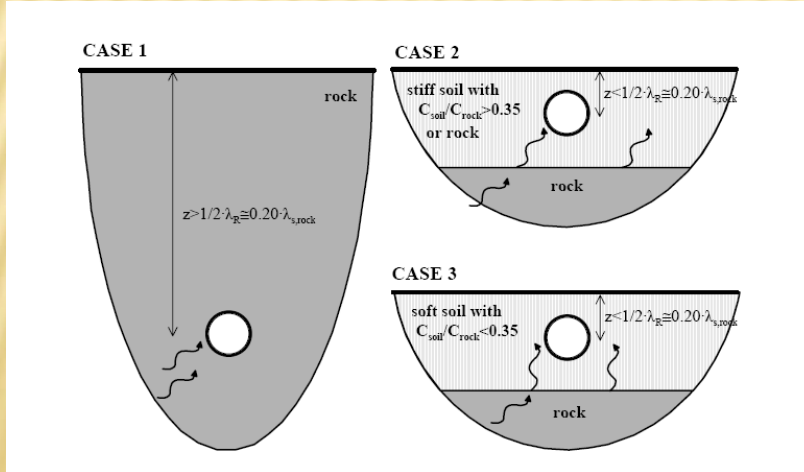
YERALTI YAPILARININ SİSMİK DAVRANIŞLARI İÇİN TANIM ÇERÇEVESİ

Yer altı yapıları üzerindeki deprem etkileri iki kategoride gruplanabilir:

- Yer Sarsıntısı
- Sıvılaşma, faydan kaynaklanan yer değiştirme ve yamaç instabilitesi (dayanıksızlığı) gibi zemin kusurları.

Bu araştırmanın öncelikli konusu olan yer sarsıntısı, yerküre kabuğunda yayılan sismik dalgaların yol açtığı zemin deformasyonu anlamına gelir. Sarsıntıdan kaynaklanan zararları tetikleyen ana etmenler şunlardır:

1.Yapının şekli ve boyutu, derinliği ve zemin koşullarına göre sınıflandırılması



2. Yapıyı çevreleyen zemin veya kaya ortamının özellikleri;

Geoteknik parametreler

- Vs/Cs dalgasının görünen hızı (m/s)
- Zemin Birim Ağırlığı, γ_n (kN/m³)
- Zeminin Poisson Oranı, ν veya μ
- Rijit kaya üzerindeki zemin kalınlığı, h (m)

3. Yapının özellikleri

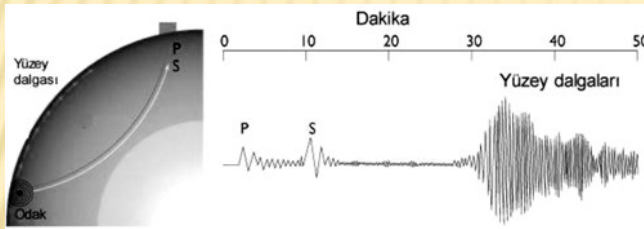
Yapısal parametreler

- Tünel kalınlığı, t (m)
- Tünel ortalama çapı, d (m)
- Tünel uzunluğu L (m)
- Tünel en-kesitinin çatlamış kesit atalet momenti (bürüt kesit atalet momentinin yarısı), I_c
- Tünel en kesit alanı, A_c (m²)
- Beton elastisite modülü E_c (MPa)
- Beton dayanımı, f_c (MPa)
- Eksenel basınç ve eğilme altındaki betonun max birim deformasyonu, ϵ_{cu}

4. Yersarsıntısının Şiddeti

DEPREMLERİN OLUŞTURDUĞU DALGA HAREKETLERİ

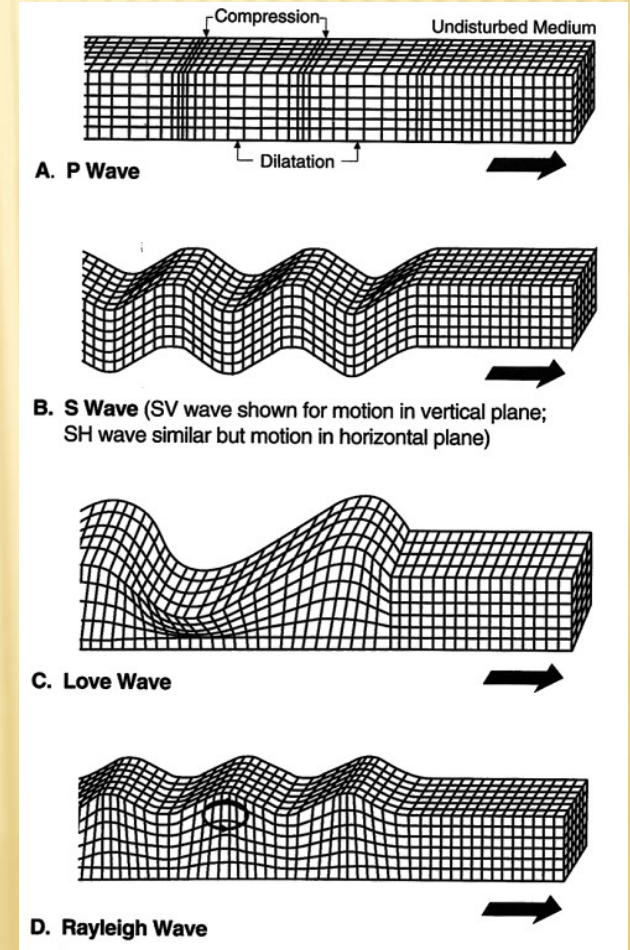
- ✗ Depremler sırasında oluşan yer sarsıntıları; deprem odağında oluşan gerilimler ve hareketler sonucunda oluşan dalga hareketlerinden meydana gelir. Yani deprem odağındaki potansiyel enerji kinetik enerjiye dönüşür. Deprem sırasında açığa çıkan enerji, ses veya su dalgalarına benzeyen ve sismik dalgalar adı verilen dalgalar ile yayılır. Başlıca üç türlü deprem dalgası vardır.



•**Boyuna Dalgalar:** Bunlara P dalgaları adı da verilir. En hızlı yayılan bu yüzden deprem kayıt aletlerinde (sismograf) en önce görülen dalgalardır. P dalgalarında, titreşim hareketi yayılma doğrultusu ile aynıdır. Genellikle yıkım etkisi düşüktür.

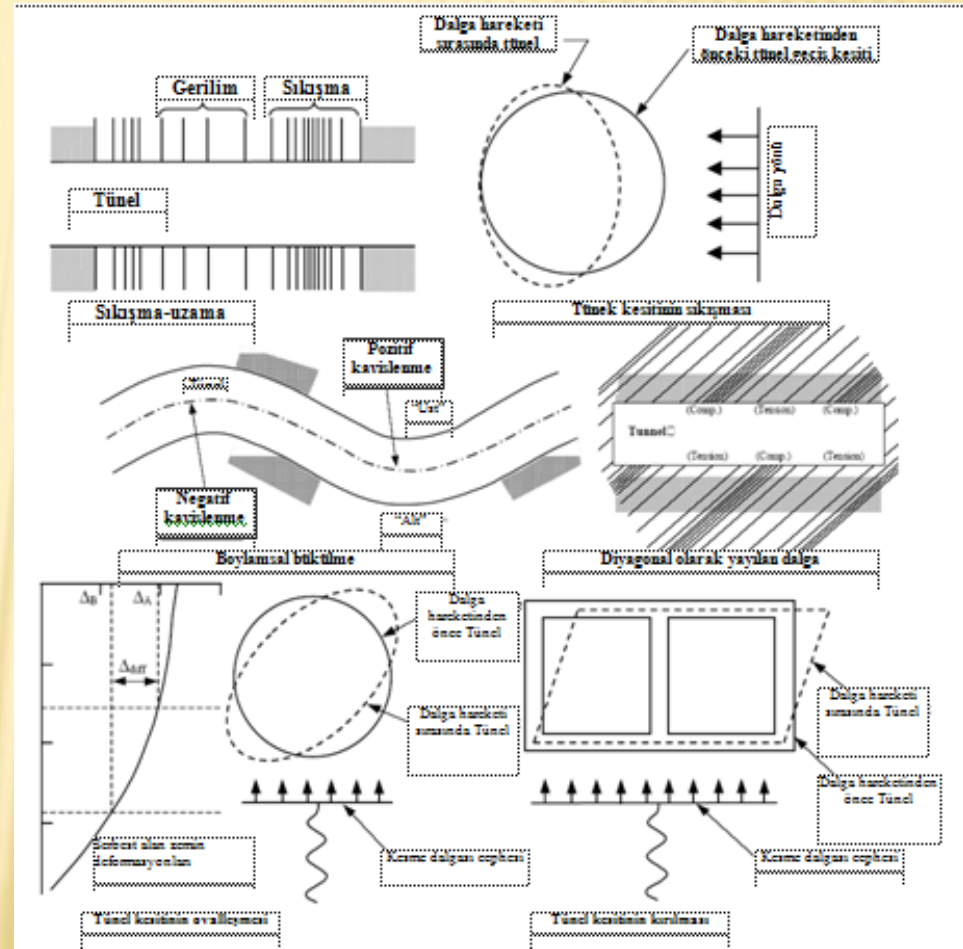
•**Enine Dalgalar:** Boyuna dalgalardan daha yavaş yayılan bu dalgalara S dalgaları'da denir (B). Kayıt aletlerinde ikincil olarak görülen ve titreşim hareketi yayılma doğrultusuna göre dik olarak meydana gelen salınım hareketleridir. Yayılma hızları düşüktür. Hızı P dalgası hızının % 60'ı ile % 70'i arasında değişir. Genellikle yapılarda yıkıma yol açan dalgalar S dalgaları ile yüzey dalgalarıdır.

•**Yüzey Dalgaları:** Diğer dalgalara göre daha yavaş yayılırlar ancak genlikleri daha büyüktür. Hızı daha fazla olan Love (C) ve genliği daha büyük olan Rayleigh (D) dalgaları olarak ikiye ayrılırlar.



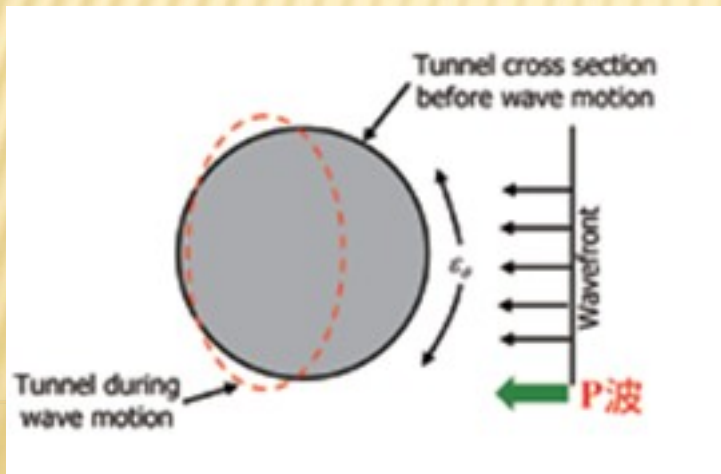
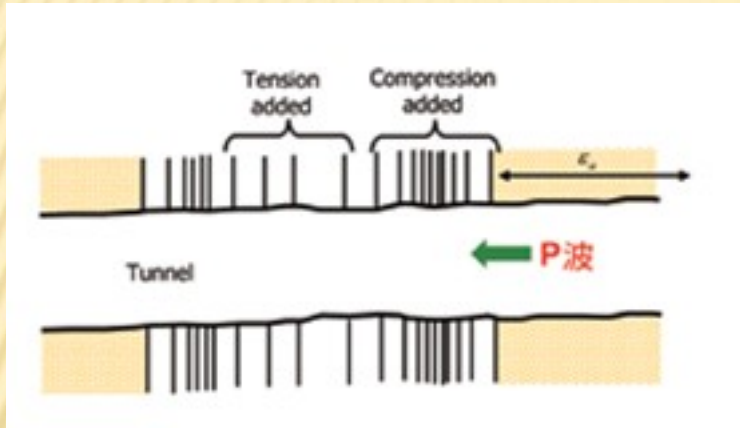
YERALTI YAPILARININ SİSMİK HAREKETLERE TEPKİSİ

- ✖ Yeraltı yapılarının sismik tasarımı birçok açıdan kendine özgüdür. Yeraltı yapılarının çoğu için yapıyı çevreleyen toprağın ataleti büyük ölçüde yapının ataleti ile bağıntılıdır. Okamoto et al. (1973) tarafından, birkaç deprem esnasında, bir batırma tüp tünelin sismik tepkilerine dair yapılan ölçümler, tünelin tepkisinin kendi yapısının atalet özellikleri tarafından değil, kendisini çevreleyen zeminin tepkisi tarafından belirlendiğini gözler önüne sermiştir. Bu yüzden, yeraltı sismik tasarımının odak noktası, zeminin serbest saha deformasyonu ve bunun yapıyla etkileşimidir. Yer değiştirme üzerine yoğunlaşan bu yaklaşım, yapının kendi atalet özelliklerine odaklanan (yeraltı yapısı göz önüne alınmadan) yer üstü yapılarının tasarımlarına bütünüyle tezat oluşturmaktadır.
- ✖ Yer altı yapılarının sismik hareketlere tepkisi, üç tip deformasyonla (Owen ve Scholl, 1981) açıklanır:
 - Eksensel esneme ve sıkışma
 - Boylamsal/Boyuna bükülme
 - Ovalleşme / kırılma
- ✖ Bu üç deformasyon tipi yandaki Şekil de toplu olarak gösterilmiştir.



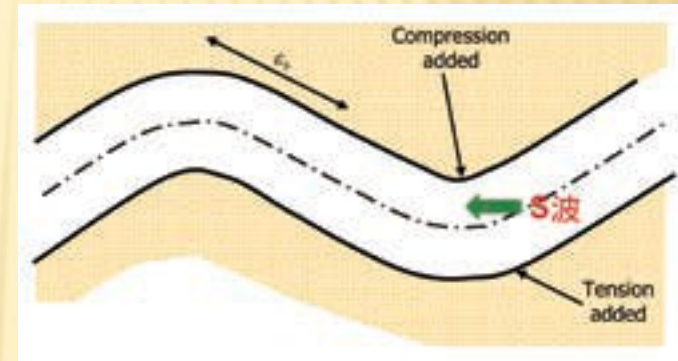
TÜNELLERDEKİ EKSENSEL DEFORMASYONLAR;

Tünelin eksenine paralel hareketler üreten sismik dalga bileşenlerinden kaynaklanır ve değişken sıkışma ve gerilimlere yol açar.



TÜNELLERDEKİ BÜKÜLME DEFORMASYONLARI

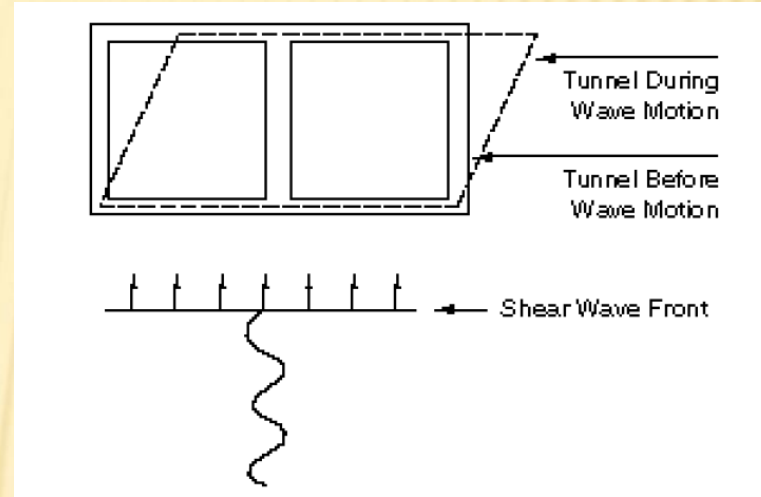
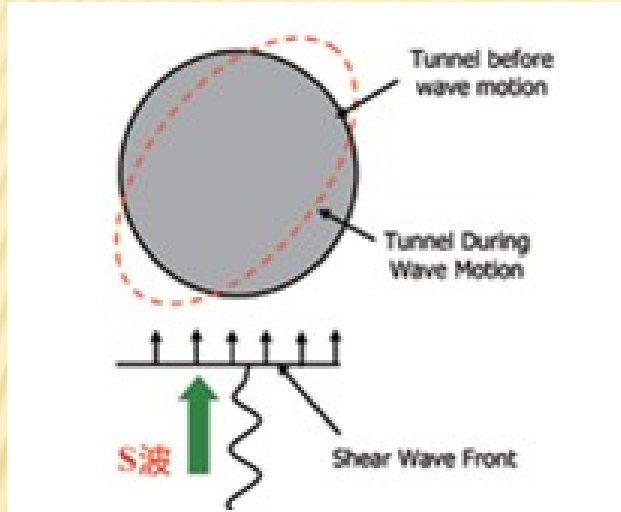
Boylamsal eksene yönelik tekil dikey hareketler üreten sismik dalga bileşenlerinden kaynaklanır.



Eksensel deformasyonlara ve bükülme deformasyonlarına hazırlıklı tünel kaplaması tasarımları, genellikle tünel boyunca uzanan eksen yönüne yoğunlaşır (Wang, 1993).

Bir tünel yapısındaki **OVALLEŞME VEYA KIRILMA DEFORMASYONU**,

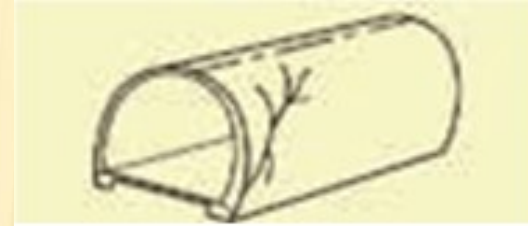
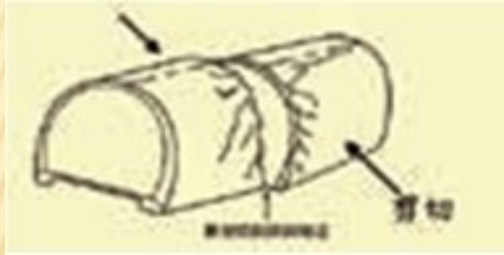
Enine (kesme) dalgalar tünel eksenine normal veya hemen hemen normal olarak yayıldığında ortaya çıkar ve tünel kaplamasının kesitsel őrklnde bozulmalara (distorsiyon) yol açar. Bu tip deformasyonlara yönelik olarak, çaprazlama yönde (enlemesine) tasarım yaklaőımları bulunmaktadır.



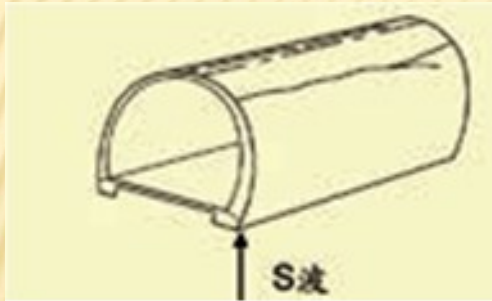
DİYAGONAL (ÇAPRAZLAMA) OLARAK YAYILAN DALGALAR İSE,

Yapının farklı bölümlerini tutarsız yer deđiőtirmelere maruz bırakır ve bu yapı boyunca dolaőan bir boylamsal sıkışma-seyrelme dalgasına yol açar. Genel olarak, daha büyük yer değiştirme genlikleri daha uzun dalgalarla iliőkilendirilirken, kavislenmeler küçük yer değiştirme genliklerine sahip daha kısa dalga boylarından kaynaklanır (Kuesel, 1969).

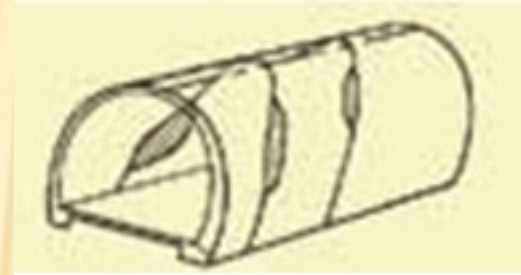
Tünellerde Sismik hareketler sonucunda oluşan deformasyonlar aşağıdaki model tünel kesitleri üzerinde gösterilmiştir.



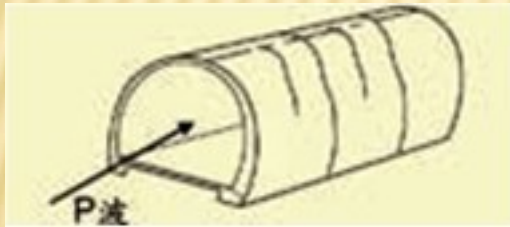
Diyagonal (çapraz) dalgalar sıkışma



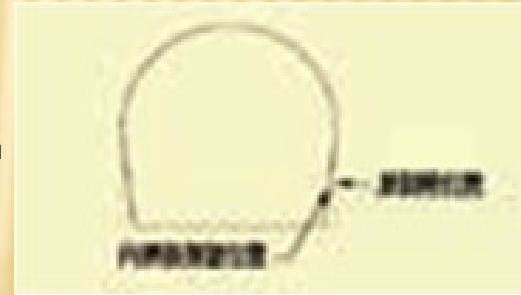
Enine kesme dalgaları $\phi=45^\circ$



Diyagonal dalgalar gevşeme



Boylamsal P dalgaları sıkışma



Enine dalgalar ovalleşme

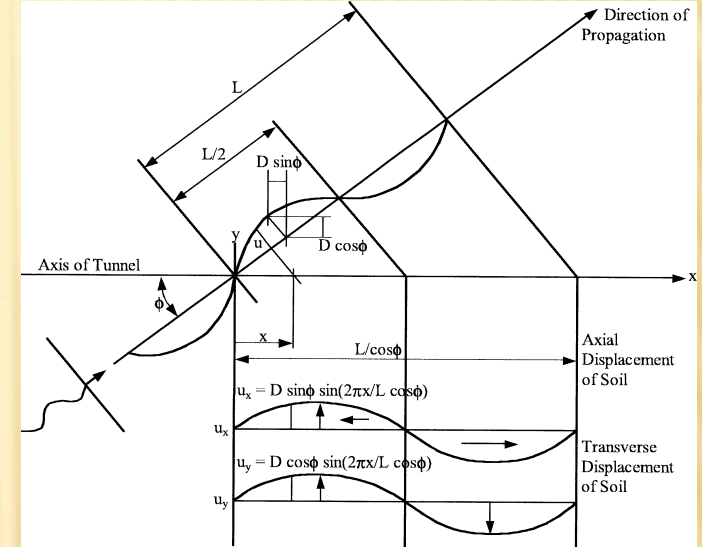
ZEMİN TEPKİSİ VE SERBEST YÜZEY DEFORMASYONLARI

- ✘ Yapıyı çevreleyen zemindeki deformasyonlar, yeraltı yapısı üzerindeki sismik etkinin tahmininde belirleyicidir. Beklenen serbest yüzey deformasyonlarını tahmin etmek için, zemine özel tepki analizine ihtiyaç vardır. Araştırmacılar uzun süredir yer hareketlerinin yerel zemin yapısına göre değiştiğini kabul etmektedir.
- ✘ Yatay enine dalgaların (SH Dalgalar) yatay katmanlı zemin çökelleri boyunca dikey olarak yayılması problemini çözmek için, tek boyutlu zemin tepki analizi kullanılır. Seed, Idriss vd., zeminin doğrusal olmayan döngüsel tepkisini tespit etmek için, eşdeğer doğrusal tahmin metodunu ortaya koymuşlardır. Dalga yayılım denklemlerinin çözümü, frekans bölgesinde yapılır. Bu yaklaşım mühendislik uygulamalarında (örn. SHAKE, Schnabel et. al., 1972) yaygın biçimde kullanılmaktadır.
- ✘ Eşdeğer doğrusal yaklaşımın hesaplama açısından kullanımı ve uygulaması kolaydır. Buna karşılık, başta yüklenme döngülerinin sayısına bağlı katsayı alçalması, zeminin sürekli (kalıcı) gerilimi ve fazla boşluk basıncı üretimi olmak üzere, zeminin döngüsel davranışını bütün yönleriyle ele almaz. Zemin davranışının bu önemli öğelerinin tespit edilmesinde doğrusal olmayan analiz kullanılır.
- ✘ Hashas ve Park (2000) yanal (çevresel) basıncın zemin katsayısı ve sönümleme özellikleri üzerindeki etkisini açıklamak için Matasoviç'in modeline yeni bir boyut getirmişlerdir. Haşhaş ve Park (2001) yanal basıncın, zemin tepki analizindeki hesaplanmış yer hareketi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır. Haşhaş ve Park bu çalışmalarında, yer hareketinin yüksek frekanslı öğelerininin kayda değer kısımlarının derin zemin katmanlarında yayıldığını ve çok derin zemin katmanlarındaki sismik dalga yayılımının uzun süreli yer hareketlerinin gelişmesine yol açtığını göstermişlerdir. Yayılan yer hareketlerinin izgesel genlikleri, geleneksel dalga yayılım analizleriyle elde edilebilecek olanlardan daha yüksektir.
- ✘ Tek boyutlu zemin tepki analizi, yeraltı yapılarındaki kırılma deformasyonu analizleri için faydalı veriler sağlar ve metro istasyonu gibi kısa yapıların analizi için de genellikle yeterlidir. Üç boyutlu dalga yayılımı analizi, zemin koşullarındaki değişkenliğin doğru olarak açıklanması için bir tünelin uzunluğu boyunca zemin deformasyonları elde edilmesi açısından gereklidir. Ancak bu tip analizler görece karmaşıklıkları sebebiyle genel olarak uygulanmaz.

TASARIM VE ANALİZ METODLARI

Yeraltı yapılarının sismik tasarım prosedürleriyle ilgili geniş çaplı incelemeler st. John & Zahra (1987) ve Wang (1993) tarafından Ortaya konmuştur.

- Serbest alan deformasyon metodu;** Yeraltı yapısında oluşan deformasyonlar yeraltı yapısının olmadığı varsayılarak hesaplanan zemin deformasyonlarına eşit alınmaktadır. Yani yapının zemininde oluşan deformasyonlara hiç karşı koyamadığı ve zemin deformasyonlarının şeklini aldığı varsayılmaktadır. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği bu yaklaşımda genellikle ön tasarım aşamasında kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda hesapların doğruluğu, yapının zemine göre rijitliğine bağlı olmaktadır. Buna rağmen bu yaklaşım düşük titreşimlerin beklendiği bölgelerde veya yer altı yapısı kaya gibi rijit zeminlerde oluşturulduğunda veya yeraltı yapısı fleksibl olarak yapıldığında yeterince doğru sonuçlar verebilmektedir. Ancak yumuşak zeminler için bu hesap yöntemi kullanıldığında, zeminde beklenen büyük deformasyonlara bağlı olarak aşırı güvenli yönde konservatif sonuçlar elde edilebilmektedir. Newmark (1968) ve Kuesel (1969), yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği durumda zemin (dolayısıyla yapı) deformasyonlarının hesabı için basit bir yöntem önermişlerdir. Yöntemde dalga hareketinin harmonik olduğu ve dalganın homojen, izotropik ve elastik bir ortamda yayıldığı varsayılmıştır. Hesap basit olmasına rağmen dalganın yayılma doğrultusu ile yapı ekseninin aynı olması gerekmektedir. Buna rağmen hesaplar, güvenli yanda kalarak, en büyük gerilmeyi verecek en kritik dalga yayılma doğrultusuna göre yapılmaktadır. Böylece zemine ait belirsizlikler kısmen de olsa telafi edilebilmektedir.



Belirli bir geliş açısıyla yayılan harmonik deprem dalgasının sebep olduğu deplasmanlar

St. John ve Zahrah (1987), Newmark'ın deformasyon hesapları için önerdiği yaklaşımı kullanarak boyuna, enine deformasyonlar ile kayma ve eğilme deformasyonlarını hesaplamıştır. Bu hesabın sonuçları özet olarak aşağıdaki Çizelge de verilmiştir. Genellikle hangi tip dalganın baskın olduğu ve tasarımda göz önüne alınması gerektiğine karar vermek zor bir iştir. Ancak ele alınan herhangi bir dalganın zeminde (dolayısıyla yapıda) oluşturacağı boyuna deformasyonlar, tüneli elastik bir kiriş gibi düşünüp süperpozisyon kuralı ile hesaplanabilmektedir. Aşağıda bu deformasyonların Çizelgedeki değerlerden nasıl elde edileceği verilmiştir. Süperpozisyon yapılırken eğriliklerin boyuna deformasyonlara katkısı, eğriliğin tarafsız eksen derinliği olan “r” ile çarpılarak bulunmuş ($K=e/r$) ve süperpozisyon buna göre yapılmıştır.

Cisim ve yüzey dalgalarından oluşan deformasyon ve eğrilikler (St. John and Zahrah, 1987)

Dalga Tipi	Boyuna deformasyon	Enine deformasyon	Kayma deformasyonu	Eğrilik
P-Dalgası	$\varepsilon_l = \frac{V_p}{C_p} \cos^2 \phi$ $\varepsilon_{lm} = \frac{V_p}{C_p} \quad (\phi=0^\circ \text{ için})$	$\varepsilon_n = \frac{V_p}{C_p} \sin^2 \phi$ $\varepsilon_{nm} = \frac{V_p}{C_p} \quad (\phi=90^\circ \text{ için})$	$\gamma = \frac{V_p}{C_p} \sin \phi \cos \phi$ $\gamma_m = \frac{V_p}{2C_p} \quad (\phi=45^\circ \text{ için})$	$\frac{1}{\rho} = \frac{a_p}{C_p^2} \sin \phi \cos^2 \phi$ $\frac{1}{\rho_{\max}} = 0.385 \frac{a_p}{C_p^2}$ ($\phi=35^\circ 16'$ için)
S-Dalgası	$\varepsilon_l = \frac{V_s}{C_s} \sin \phi \cos \phi$ $\varepsilon_{lm} = \frac{V_s}{2C_s} \quad (\phi=45^\circ \text{ için})$	$\varepsilon_n = \frac{V_s}{C_s} \sin \phi \cos \phi$ $\varepsilon_{nm} = \frac{V_s}{2C_s} \quad (\phi=45^\circ \text{ için})$	$\gamma = \frac{V_s}{C_s} \cos^2 \phi$ $\gamma_m = \frac{V_s}{C_s} \quad (\phi=0^\circ \text{ için})$	$K = \frac{a_s}{C_s^2} \cos^3 \phi$ $K_m = \frac{a_s}{C_s^2} \quad (\phi=0^\circ \text{ için})$
Rayleigh Dalgası (Boyuna bileşen)	$\varepsilon_l = \frac{V_{RP}}{C_R} \cos^2 \phi$ $\varepsilon_{lm} = \frac{V_{RP}}{C_R} \quad (\phi=0^\circ \text{ için})$	$\varepsilon_n = \frac{V_{RP}}{C_R} \sin^2 \phi$ $\varepsilon_{nm} = \frac{V_{RP}}{C_R} \quad (\phi=90^\circ \text{ için})$	$\gamma = \frac{V_{RP}}{C_R} \sin \phi \cos \phi$ $\gamma_m = \frac{V_{RP}}{2C_R} \quad (\phi=45^\circ \text{ için})$	$K = \frac{a_{RP}}{C_R^2} \sin \phi \cos^2 \phi$ $K_m = 0.385 \frac{a_{RP}}{C_R^2}$ ($\phi=35^\circ 16'$ için)
Rayleigh Dalgası (Enine bileşen)		$\varepsilon_n = \frac{V_{RS}}{C_R} \sin^2 \phi$ $\varepsilon_{nm} = \frac{V_{RS}}{C_R} \quad (\phi=90^\circ \text{ için})$	$\gamma = \frac{V_{RP}}{C_R} \cos \phi$ $\gamma_m = \frac{V_{RS}}{C_R} \quad (\phi=0^\circ \text{ için})$	$K = \frac{a_{RS}}{C_R^2} \cos^2 \phi$ $K_m = \frac{a_{RS}}{C_R^2} \quad (\phi=0^\circ \text{ için})$

P, S ve Rayleigh dalgalarının geliş açısına göre, maksimum Birim deformasyon değerleri

P-Dalgası durumu;

$$\varepsilon^{ab} = \left[\frac{V_p}{C_p} \cos^2 \phi + r \frac{a_p}{C_p^2} \sin \phi \cos^2 \phi \right] \quad (1)$$

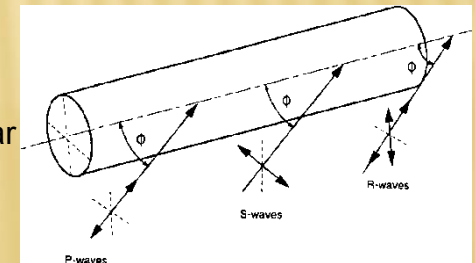
S-Dalgası durumu;

$$\varepsilon^{ab} = \left[\frac{V_s}{C_s} \sin \phi \cos \phi + r \frac{a_s}{C_s^2} \cos^3 \phi \right] \quad (2)$$

Rayleigh Dalgası durumu (boyuna bileşen için);

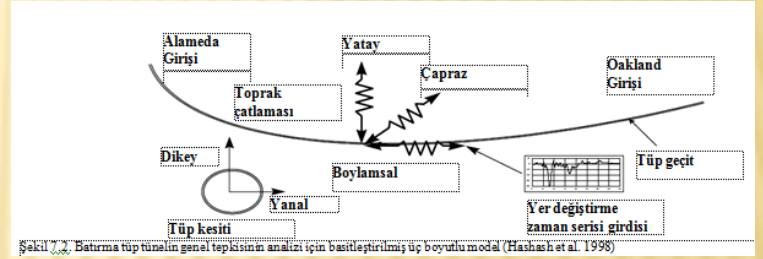
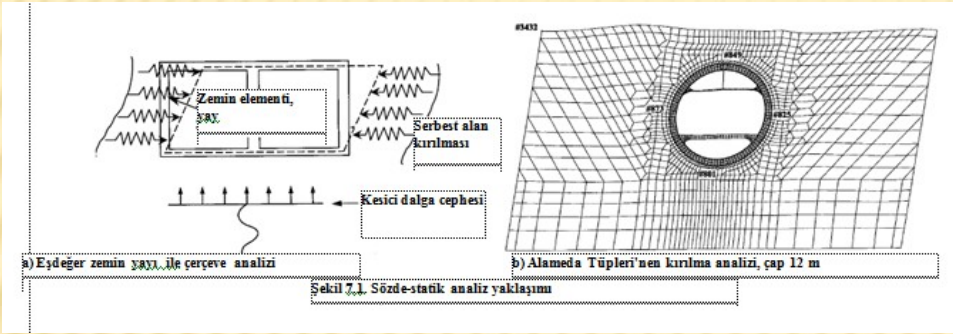
$$\varepsilon^{ab} = \left[\frac{V_R}{C_R} \cos^2 \phi + r \frac{a_R}{C_R^2} \sin \phi \cos^2 \phi \right] \quad (3)$$

Boylamsal, eksenel ve eğrisel sismik hızlar



2) Basit statik zemin-yapı etkileşimi metodu

- Basit statik analiz metodu, zemin-yapı etkileşim etkilerinin açıklanmasında yaygın olarak kullanılır. St. John ve Zahrah (1987) tarafından tasvir edilen prosedürde, tünel çevresindeki zemini temsil eden esnek bir dayanak üzerindeki esnek bir ışın olarak basitleştirilmiştir. Oval deformasyonların dairesel tüeller üzerindeki kaplama sertliği etkisini hesaplamak için kapalı şekil çözümleri geliştirilmiştir. Bu çözümlerde, esnek zemin sertliği ile esnek tünel kaplaması sertliğinin esneklik orantısı kavramı kullanılır (Einstein and Schwartz, 1979, and Peck et. al, 1972). Bu çözümler dik açılı tüellerde ise, yapısal kırılma deformasyonları, serbest alan kırılma deformasyonlarının bir çerçeve analizine uygulanmasıyla hesaplanır. Burada zemin esnek yaylarla temsil edilir. Aşağıdaki Şekil 7.1 de de görüldüğü gibi; Deformasyonlar, bir sonlu eleman veya sonlu fark analizi içindeki sınır yer değişikliği olarak değerlendirilebilir.

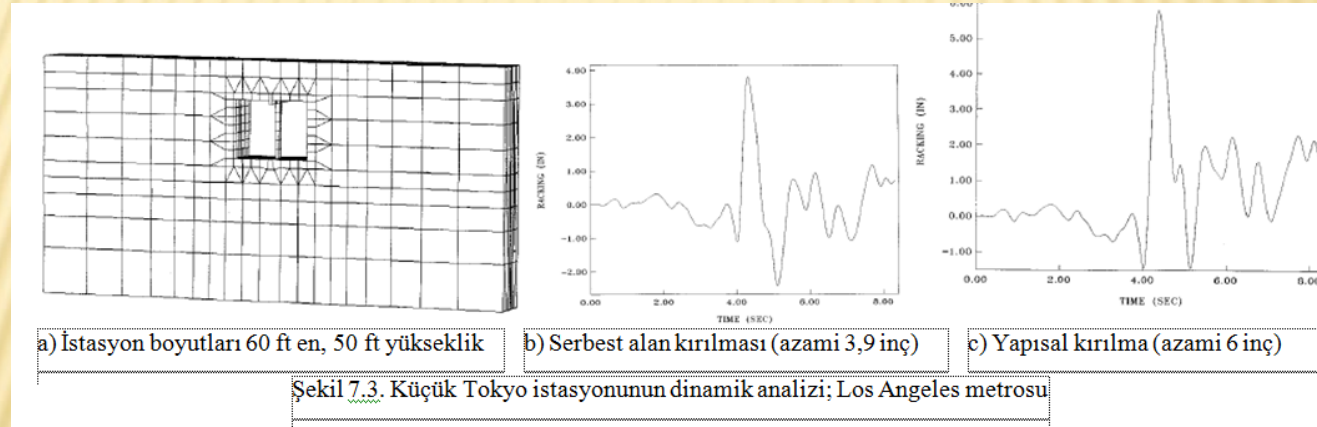


- Şekil 7.2 Basit statik yaklaşımın bir tünelin boylamsal analizinde kullanılışını örneklemektedir. Bu analizde zorlayıcı fonksiyon, serbest alan yer değiştirme zaman serisidir. Tünel-zemin etkileşimi ise boylamsal ışın elementleri ve zemin yayı arasındaki etkileşimle temsil edilir.
- Basit statik yaklaşım, deformasyonların esnek olduğu zayıf yer hareketlerinde geçerli olabilir. Güçlü yer hareketlerinde ve savurma etkili hareketlerde ise zemin tepkisi büyük ölçüde doğrusal değildir.

3) Dinamik zemin-yapı etkileşimi metodu

Zemin kadar yeraltı yapılarının da sonlu elemanlar kullanılarak temsil edildiği dinamik zemin-yapı analizlerinin yeraltı yapılarındaki kullanımı giderek artmaktadır. Weng (1993) dik açılı tünel kısımlarını analiz etmek için FLUSH programını kullanmıştır.

Los Angeles Metrosu Red Line'ın Doğu Yakası uzantıları için, **zaman bölgesi doğrusal olmayan** sismik zemin-yapı etkileşim analizi kullanılarak, henüz yayınlanmamış bir analitik çalışma yapılmıştır. Şekil 7.3 (a), bu analizde kullanılan tipik ağı göstermektedir. Analizler, yapısal kırılma deplasmanlarının serbest alandaki kırılma deplasmanlarını aştığını göstermiştir (Şekil 7.3). Bu sonuç şaşırtıcı olduğu kadar, geleneksel tasarım yaklaşımlarına da tezat oluşturmaktadır. Bu analizler, zemin yer değiştirmelerinin istasyonun varlığına bağlı olarak arttığını ima etmektedir.

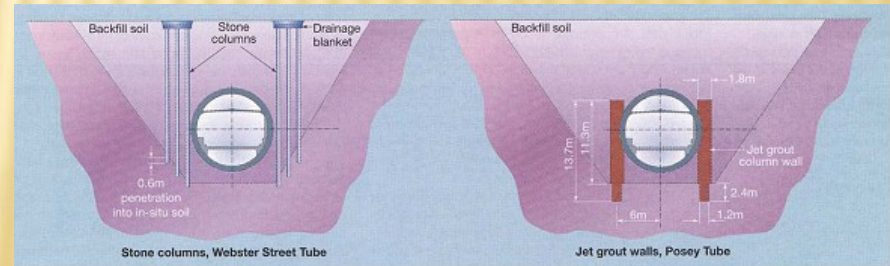
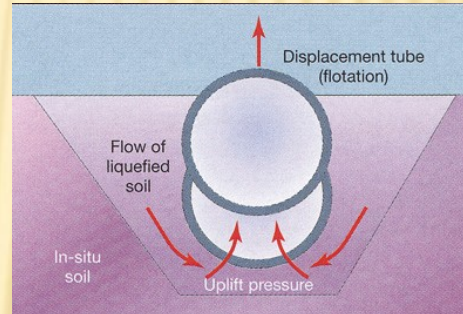
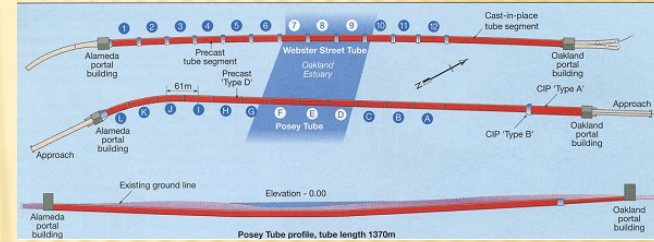
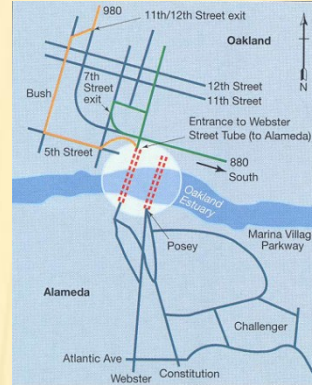


YERALTI YAPILARININ GÖZLEMLENEN SİSMİK TEPKİLERİ

✘ Tünellerde meydana gelen hasarlar yüzeysel jeolojik yükün (yoğunluğun) artışıyla büyük ölçüde azalmaktadır, ancak toprak zeminlerde ortaya çıkan hasar, sağlam kayalardakinden daha büyüktür. Daha yakın tarihte, bazı büyük depremler, önemli şehir merkezlerindeki modern yeraltı yapılarına zarar vermiştir.

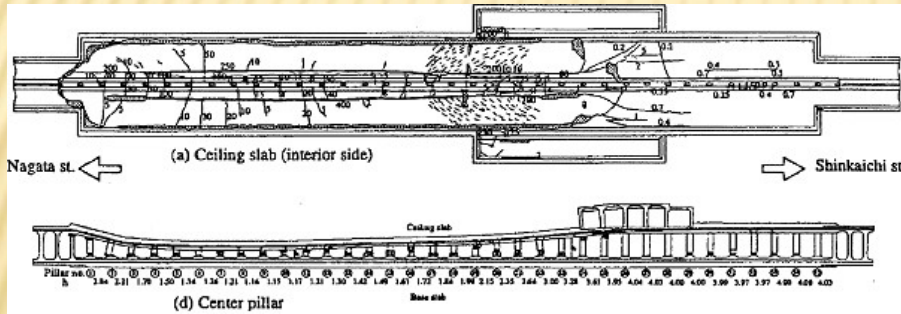
✘ Alameda Tüp Geçitleri, Oakland-Alameda, California: Alameda Tüp Geçitleri Alameda Adası ile Oakland'ı birbirine bağlayan, 1930'lu ve 1950'li yıllarda inşa edilmiş bir çift batırma tüp tüneldir. 1989 yılında Mw=6.9 büyüklüğündeki Loma Prieta Depremi sırasında, bu tüp geçitlerde ve havalandırma binalarında, tünellerin içine çok miktarda su sızıntısı olmasına yol açan bazı yapısal çatlamalar ortaya çıkmıştır. Özellikle yaklaşık 18.3 m derindeki tüp geçitlerde sıvılaşmadan kaynaklanan deformasyonlar da gözlenmiştir.

✘ Bu tüplerin çevresinde deformasyonları önlemek amacıyla taş kolon ve jet grout duvar yöntemleri ile zemin ıslahı yapılmıştır.



Japonya'nın kobe şehrindeki yeraltı yapıları & 1995 Hyogoken-Nambu depremi

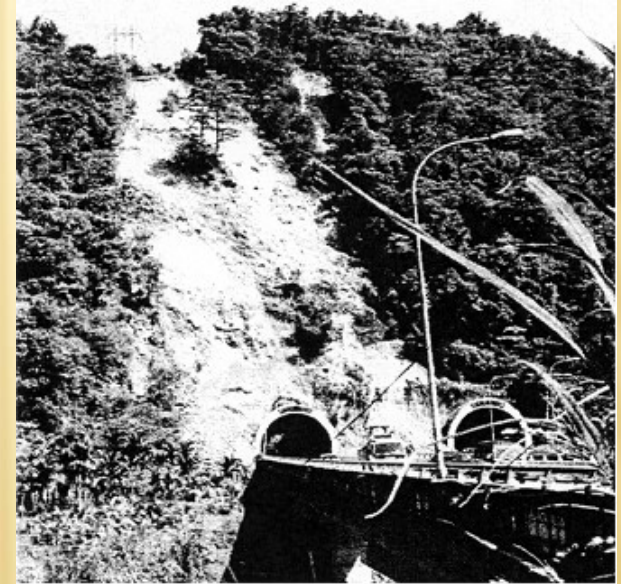
- ✧ 1995'deki Hyogoken-Nambu depremi Rokko, Bantaki ve Naruo-Mikage Tünelleri'ne büyük zarar vermiş ve Kobe şehrindeki Daikai metro istasyonunda çökmeye yol açmıştır (Nakamura, et. al, 1996). İstasyonun merkez kolonlarında yaşanan çöküntüyle birlikte, tavan kaplamaları da çökmüş ve zemin kaplaması ise 2,5 metreden fazla çökmüştür. 1962'de yapılan istasyon tasarımı, belli bir sismik önlem içermemektedir.



Daikai yeraltı istasyonundaki hasarlı kısımların krokisi
(a-iç kısmı, b-merkezindeki sütunlar)

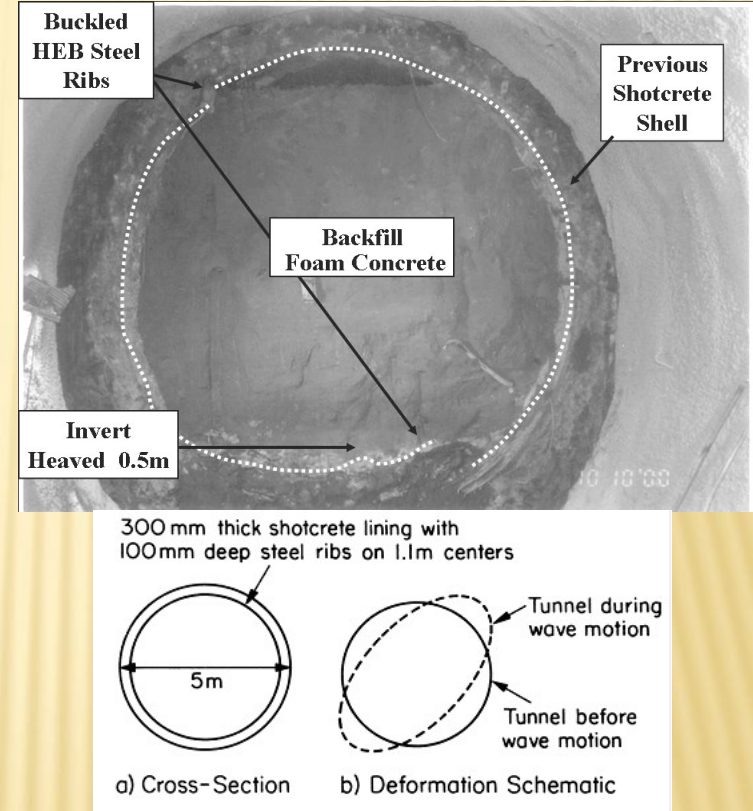
Tayvan 21 Eylül 1999 Chi-Chi Depremi'ndeki tünel performansı

- ✧ Orta Tayvan'daki tünellerin çoğu, $M=7.3$ büyüklüğündeki şiddetli sallantılardan hiçbir hasar görmemiştir. Tünellerde kısıtlı sayıda parçalanma ve çatlama gözlenmiştir. En büyük hasar, tünel giriş-çıkışlarındaki eğim hatalarından kaynaklanmış ve bunlar tünellerin tıkanmasına yol açmıştır.



Türkiye 1999, Kocaeli Depremi'ndeki tünel performansı

- ✘ Püskürtme beton destekli ikiz tünellerin 100 metrelik bir bölümü depremde çöktü. Tüneller yapım aşamasındaydı.
- ✘ 1999 Kocaeli depreminde Asarsuyu sol tünel alt yarı pilot tünellerinde, fay zonu kili içerisinde orta derecede ciddi hasar gözlenmiştir. Tabanda 0.50 ila 1.00 m arası kabarmalarla birlikte püskürtme beton içerisinde dökülme, basınç kırılması ve tavan kısımlarında ve omuz ve alt yarı kesimlerinde 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 uzanan ve eksen hattından kenarlara doğru sapan bazı kesme tipi çatlaklarda görülmüştür. Çatlak genişlikleri zemin şartlarına, temelin kalınlığı ve donatı seviyelerine bağlı olarak 0.5 cm ila 5.0 cm arasında değişmektedir.



Asarsuyu sol alt yarı pilot tünelinin deprem sonrası yeniden kazılması sırasında tipik taban kabarması ve çelik kuşak burkulması, (a-b) sismik bozulma ile oluşan en kesitin şematik gösterimi.

BUGÜNKÜ ZORLUKLAR VE GELECEĞİN ARAŞTIRMA ALANLARI

- ✧ ABD'deki yeraltı yapıları Nothridge depreminde sınırlı hasar görmüştür ancak, sarsıntı seviyesi beklenen azamî olayların çok çok altındadır. Japonya'nın Kobe şehrinde ve Türkiye'de Kocaeli'nde meydana gelen daha yakın tarihli büyük depremler bazı tünel yapılarına büyük zararlar vermiştir. Yüksek sarsıntı seviyelerine karşı, depreme dayanıklı yeraltı yapıları tasarlamak için bilgilerin genişletilmeye ihtiyacı vardır.
- ✧ Geleceğe baktığımızda, ABD, Çin ve diğer ülkelerdeki kentsel gelişim planlarının büyük yeraltı ulaşım/metro sistemlerinin inşasını içerdiğini görüyoruz. Bu gibi sistemlerin tasarımında sismik etkilerin göz önünde bulundurulması gereklidir. Gelecekteki araştırmalar için önerilerinden bir kısmı şunlardır:
 - *Tünellerin ve yeraltı yapılarının yer sarsıntıları sırasındaki tepkilerini ölçecek cihazlarla donatılması:* Bu donanımlar, tünel boyunca dikey ve yanıl deformasyonları ölçme özelliğine sahip olacak. Bu, yer hareketinin tünel tepkisi üzerindeki uzlamsal tutarsızlık ve yönlülük etkisi kadar, yapısal deformasyonların da anlaşılması için faydalı olacaktır.
 - *Yüksek dikey hızlanımların tünel kaplamaları ve metro istasyon kolonlarındaki büyük basınç yükü üzerindeki etkilerine dair çalışma:* Daikai İstasyonu'nda ve Japonya ve Türkiye'deki diğer tünel yapılarında, çöküşün etmenleri arasında büyük dikey güçler yer alıyor olabilir.
 - *Tünel, tünel giriş-çıkışları ve metro yapılarındaki dinamik zemin-yapı sorunlarını simüle edecek üstün sayısal modellerin geliştirilmesi:* Bu modeller, yeraltı yapılarında, faya yakın kaynakların tetiklediği yüksek hız titreşimlerin araştırılması açısından faydalı olacaktır.
 - *Yer hareket tutarsızlığı:* Yer hareket tutarsızlığının, tünel uzunluğu boyunca farklı hareketlerin ortaya çıkması üzerindeki öneminin değerlendirilmesi (Power et al., 1996). Yer hareketi, özellikle tünel ile toprak arasındaki kayma potansiyelinin yüksek olduğu yumuşak topraklarda ve sık tünellerde önemlidir.
 - *Tünel Bileşenleri:* Tünelin sismik performansını geliştirmek amacıyla sismik eklemlerde kullanılabilecek sıra dışı kaplama, cıvatalama ve su yalıtım materyallerinin araştırılması.
 - *Zemin tepkisi:* Bir yerel yapı çevresindeki zemin deformasyonunun tahmininde, yerel zemine dair gelişmiş çözümlemeler önemli olabilir.
- ✧ ***Bu çalışma ana hatları ile Y.M.A. Hashash'ın (Illinois Üniversitesi, Urbana-Champaign, Urbana, IL, ABD) Yeraltı yapılarının deprem davranışı ve zemin tepkisi ile ilgili makalesi esas alınarak derlenmiştir.***