

Rezonant Kolon Deney Sistemi ve Deneyin Teorisi

Seyfettin Umut Umu¹

Özet

Depremler gibi hareketler zemin ve yapılara gelen tekrarlı dinamik yüklemelerdir. Dolayısıyla bu hareketlerin zeminlerde ve yapılarda oluşturduğu etkileri ölçmek zeminlerin davranışını bilmek açısından önemlidir. Zeminlerin dinamik parametrelerinin saptanması dinamik yüklemeler altındaki davranışını belirlemede önemli bir aşamadır. Dinamik zemin parametrelerini belirlemek amacıyla gerek sahada gerekse laboratuvar ortamında kullanılan çok sayıda deney sistemi geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları çeşitli ampirik ilişkiler ile sonuca ulaşırken bazıları ise zeminin dinamik etkiler altındaki davranışını modelleyerek doğrudan sonuca ulaşmamızı sağlar. Düşük ve orta seviye birim kayma deformasyon genliği ($\gamma = \%0,0001 - \%0,1$) arasındaki seviyelerde zemin davranışını belirlemede laboratuvar ortamında kullanılan test sistemlerinden birisi Rezonant Kolon deneyidir. Bu testte, katı veya içi boş silindirik bir zemin örneği üç eksenli bir hücreye yerleştirilir ve örneğe burulma veya boyuna yükleme uygulanır. Elektrik motoru veya elektromanyetik yükleme sistemi aracılığıyla zemin örneğine rezonans frekans değerine ulaşana kadar tekrarlı dinamik yük uygulanır ve hem zemin geometrisine bağlı hem de test sistemi sınır koşullarına bağlı olarak zeminin kayma dalgası hızı ve kayma modülü değerleri belirlenir. Sonrasında zemin kolonundan yük kaldırılarak serbest titreşime bırakılır ve sönüm oranı değeri de belirlenmiş olur. Zemin örneğinin alt veya üst ucundaki deformasyonlarını kısıtlayan farklı Rezonant Kolon deney sistemleri mevcuttur. Literatürde en fazla kullanılan Rezonant Kolon modelleri, için dolu örneklere üst kısımdan yük uygulayan, alt kısmı tutulu olan ve zemine burulma yükü uygulayan modellerdir. Bu çalışmada Rezonant kolon deney sisteminin çalışma prensibi ve teorisi aktarılmıştır.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, suumu@eskisehir.edu.tr, 0000-0002-5901-2626

1. Giriş

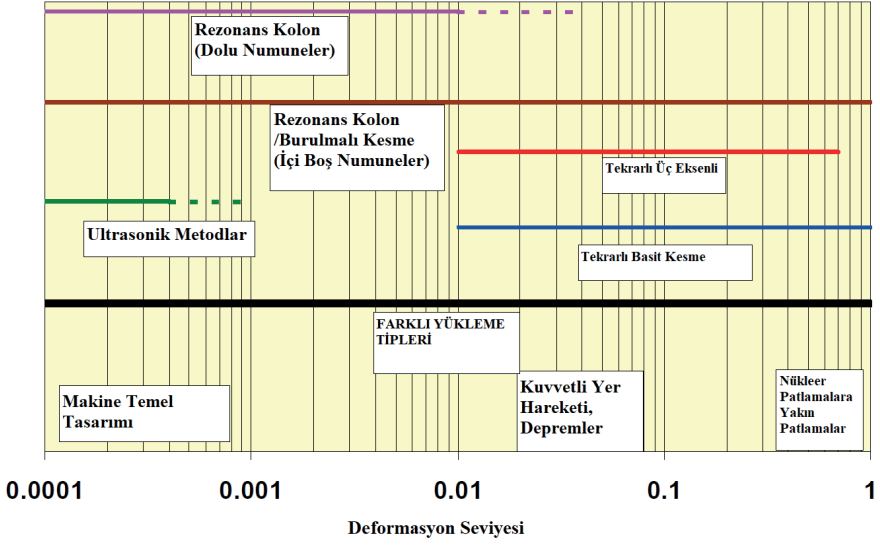
Dinamik zemin özellikleri, deprem sarsıntısı, makine titreşimi, trafik yüklemesi gibi dinamik yüklere karşı koyması gereken yapıların analizi ve tasarımı için önemli parametrelerdir. Dinamik zorlama ve yüklemelere sebebiyet veren bu olayların her biri zemin-yapı sistemini çok farklı genlik ve frekanslara maruz bırakır.

Zeminlerin mekanik davranışı efektif gerilme, boşluk oranı, su içeriği, gerilme seviyesi ve gerilme veya şekil değiştirme yolu gibi diğer bazı faktörler tarafından belirlenir. Tüm bu faktörler hem statik hem de dinamik yükleme koşulları altında eşit derecede önemlidir ve bu nedenle normalde statik davranıştan farklı olarak dinamik davranışı karakterize eden unsurlar olarak değerlendirilmez. Bu durumda bu parametrelere ek olarak dinamik davranışı statik davranıştan ayıran özellikler ise dinamik yüklemenin hızı ve yüklemenin çevrimidir (tekrarıdır).

Zemin-yapı tasarımında tipik olarak dikkate alınan yükleme hızı veya yükleme süresi, sismik yükleme için 0,1 ila 3,0 saniye arasında ve 10 ila 100 tekrar için değişmektedir. Demiryolları ve karayolu kaplamalarının altındaki zeminler genellikle yaklaşık 0,1 ila 1,0 saniye arasında bir hızda ancak çok fazla sayıda tekrarlı yüklenir. Kazık çakma ve makine temeli, 0,1 ila 0,01 saniye arasında çok yüksek hızlarda yük uygulayabilir. Patlatma, 0,001 saniyeye varan hızlarda şok veya darbe yükleri uygulayabilir.

Dinamik zemin özelliklerini araştırmak için laboratuvar ortamında çok sayıda teknik kullanılmaktadır. En yaygın olanlarından bazıları dinamik üç eksenli deney, dinamik basit kesme deneyi, rezonant kolon deneyi, burulmalı kesme deneyi ve ultrasonik hız deneyidir. Her biri, sahadaki zemin sınır koşullarının yanı sıra gerilme yolları, yük genlikleri ve farklı olay türlerinin yük frekanslarına mümkün olduğunca yakın olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 1'de, gerilme genliğine göre en yaygın dinamik cihazların tipik gerilme aralıkları görülmektedir.

Maksimum kayma modülü, zeminin elastik davranışını değerlendirmek için önemli bir parametre olan G_{maks} ile ifade edilir. Bu parametre, lineer ve lineer olmayan elastik zemin davranışının karakterizasyonunda kullanılır ve genellikle arazi veya laboratuvar ortamında kayma dalgası hızından hesaplanır (Richart, et al., 1970; Vigianni, 1991; De Alba and Baldwin, 1991; Youn, et al., 2008; Umu, 2013). Rezonant kolon deney sistemi de zeminlerin dinamik parametrelerinin bulunmasını sağlayan laboratuvar deneylerinden birisidir. Deney sistemi, prizmatik çubuklarda dalga yayılım teorisine dayalıdır ve dinamik zemin parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılır.



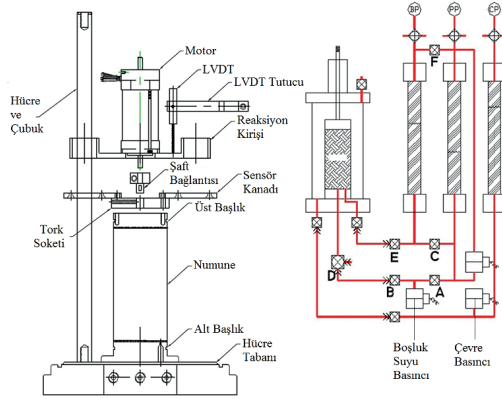
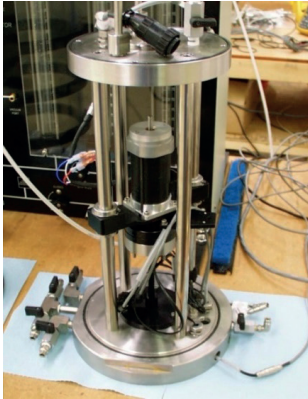
Şekil 1. Farklı laboratuvar testleri ve saba etkinlikleri ile ilişkili tipik gerilme seviyesi. (Ishihara, 1996, GCTS CATS, 2007)

RC deney sisteminde genellikle birim kayma genliği $\gamma = \%0,0001 - \%0,1$ arasında değişmektedir ve ilgili aralıkta dinamik zemin parametrelerinin ölçümünde kullanılır. Deney sistemine eklenebilecek farklı deformasyon ölçüm aparatları ile kayma deformasyon seviyeleri genişletilebilir. Rezonant kolon deney sistemi öncelikle Japonya'da geliştirilmiş ve 1930'lu yıllardan itibaren zeminlerin ve kayaların dinamik davranışını analiz etmek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır (Ishimoto and Iida, 1937; Iida, 1938,1940). Rezonant kolon testinde zemin kolonuna boyuna veya burulma tipinde titreşim uygulanır ve zemine ait kayma (v_s) ve basınç dalga (v_c) hızları belirlenmektedir (Wilson and Dietrich, 1960; Hardin and Richart, 1963; Hall and Richart, 1963).

Deney sistemi öncelikle granüler zeminlerde (özellikle kumlarda) kullanılmaya başlanmış ve kuru kum örnekler kullanılarak geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, zeminlerin dinamik tepkilerinin efektif gerilme, birim kayma deformasyon genliği, boşluk oranı ve dinamik yükün çevrim sayısı gibi özelliklerden etkilendiği bulunmuştur. Yükleme frekansının, dinamik yükün çevrim sayısının ve uygulanan deformasyonun genliğinin sabit olduğu durumlarda, zeminin dinamik özellikleri üzerinde etkili olmadığı görülmüştür (Hardin and Drnevich, 1972).

Rezonant kolon test cihazında (Şekil 2) zemin numunesi alt tarafta sabit, üst tarafta ise serbesttir. Farklı tipte olan deney sistemleri de mevcuttur. Serbest olan üst tarafta başlık bulunur ve bu başlık sayesinde dinamik yük zemin örneğine aktarılır. Öncelikle zemin örneği test cihazı içinde belirlenen gerilme altında konsolidasyon sürecine bırakılır. Sonrasında üst başlık ve dinamik yükleme sistemi yardımıyla burulma yükü uygulanır. Deney sırasında yüksek frekansta uygulanan dinamik yüklemelerle birim kayma deformasyon genliği maksimum değerine ulaşmaya kadar frekans kademeli olarak artırılır. Zemin örneğinin frekans değeri birim kayma deformasyon genliğinin en büyük durumundaki en düşük frekans değeridir. Bu noktada aynı zamanda deformasyonlar sonsuza uzar. Zemin örneğinin frekans değeri aynı zamanda zeminin rezonans frekansı olarak da adlandırılır. Rezonans frekans değeri öncelikle zemin örneğinin dayanımına, örneğin çap ve yükseklik değerlerine ve kullanılan RC test sistemine bağlıdır. Zemin örneğinin sönüm oranı, serbest titreşimden (free vibration decay) ve yarı güç bant genişliğinden (half power bandwidth) hesaplanabilmektedir.

Rezonant kolon test sisteminden elde edilen sonuçlar, test sisteminin ve zemin örneğinin birlikte bulunduğu deneysel sistemin davranışına bağlıdır ve bu davranışın geri analizinin sonucudur. Bu nedenle hem deney sisteminin sınır şartları hem de zemin örneğinin davranış sonuçları üzerinde etkilidir. Bu verilerin doğru bir şekilde yorumlanması için deney sisteminin özellikleri göz önüne alınmalı ve zemin-cihaz etkileşimi dikkate alınarak analiz yapılmalıdır.



Şekil 2. Rezonant kolon deney sistemi ve deney sistemi kesiti (Fixed-Free System) (GCST CATS, 2007)

2. Deney Sisteminin Teorisi

Rezonant Kolon deneyinde öncelikle, boşluk oranı, doygunluk durumu, efektif gerilme vb. arazi koşulları belirlenen bir silindirik (içi boş ya da dolu) zemin numunesi, test hücresine yerleştirilerek arazideki koşullarına bağlı olarak konsolide edilir. Deney sisteminde dinamik yükün frekans ve frekans genliği kontrol edilebilmektedir. Rezonant Kolon test sisteminde, elektromanyetik bir yükleme sistemi veya motor tarafından numunenin üst kısmına harmonik bir burulma uyarımı uygulanır. Sabit genlikli bir burulma harmonik yükü, bir dizi frekans üzerinden uygulanır ve birim kayma deformasyon genliğinin yanıtı ölçülür. Sonrasında, dalga yayılım teorisine bağlı olarak öncelikle zeminin rezonans frekans değeri test sisteminden ölçülür. Bu frekansa ve deney sisteminin sınır şartlarına, zemin numunesinin boyutlarına ve deney sisteminin polar atalet moment değerlerine bağlı olarak zemin numunesinin kayma dalgası hızı hesaplanır. Titreşimin frekansından titreşim sırasındaki birim kayma deformasyon ivme genliği hesaplanır. Rezonant kolon testlerinde (alttan sabit üstten serbest olanlarda) zemin kolonunun üst tarafında elektrik veya manyetik güç ile çalışan yükleme sistemi mevcuttur ve zemine istenen frekans ve genlikte dinamik tork uygulanmaktadır. Rezonant kolon deneyinde düşük ve orta birim kayma deformasyon genliklerinde ölçümler yapılabilmektedir ve genellikle deformasyon miktarı $\gamma = \%0,0001 - \%0,1$ arasında değişkenlik gösterir (ASTM D4015-87, 2000).

Kayma Modülü

Kelvin-Voigt zemin modelinden türetilmiş alt tarafı tutulu ve üst tarafı serbest (fixed-free) olarak idealize edilmiş silindirik ve diferansiyel örnek Şekil 3'de verilmiştir ve hareket denklemi aşağıda verilen Denklem 1'deki gibi yazılabilir (Ishihara, 1996). Tork T , elastik zemin örneğine uygulanır. İlgili eşitlikte dz boyunca artan dönme açısı $d\theta$ ile gösterilir ve aynı zamanda örnek doğrultusunda değişen açı fazladan tork üretir.

$$T = GJ \frac{d\theta}{dz} \quad (1)$$

Burada T , torku, J ise kesit alanın polar momentini, G , kayma modülünü ifade etmektedir. Şekil 3b'de ise her iki yüzüne tork uygulanmış zemin örneğinin diferansiyel diyagramı verilmiştir T ve $T + \frac{\partial T}{\partial z} dz$

$$\theta(z,t) = \left[A \sin\left(\frac{\omega}{v_s} z\right) + B \cos\left(\frac{\omega}{v_s} z\right) \right] e^{i\omega t} \quad (5)$$

İlgili eşitlikte, doğal açısal frekans ω ile gösterilir. Zemin numunesine bağlı sınır koşulları ise A ve B olarak gösterilir.

Aşağıda, alt tarafı tutulu üst tarafı serbest (fixed-free) Rezonant kolon deney testinin sınır koşulları verilmiştir.

➤ Numune alt kısımda tutuludur. Bu sebeple zemin örneğinin alt kısmında açısal yer değiştirme 0 (sıfır)'dır.

➤ Zemin örneği üst tarafta serbesttir. Dolayısıyla bu kısımda oluşan tork üst başlık ve motor (drive system) sistemin atalet torkuna eşittir. Fakat ters yönlüdür.

Birinci sınır koşula bağlı olarak; $\theta = 0$, $z = 0$ olduğundan dolayı $B = 0$ değerini alır ve zamana göre ikinci türevi alınırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 [A \sin(\omega z / v_s) e^{i\omega t}]}{\partial t^2} = -\omega^2 A \sin\left(\frac{\omega z}{v_s}\right) e^{i\omega t} \quad (6)$$

İkinci sınır koşula bağlı olarak, serbest uçtaki tork aşağıdaki gibi yazılır.

$$T_{z=h} = -I_0 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \right) \quad (7)$$

Burada, I_0 ; sürücü sistemin kütle atalet momentini (mass moment of inertial of drive system) ve h ; zemin numunesinin yüksekliğini göstermektedir.

Denklem 6'daki $\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}\right)$ ifadesi denklem 7'de ilgili yere konulduğundan denklem 8 elde edilir.

$$T_{z=h} = I_0 \omega^2 A \sin\left(\frac{\omega z}{v_s}\right) e^{i\omega t} \quad (8)$$

Denklem 1 ve 8 birleştirildiği takdirde Denklem 9'da verilen eşitlik el edilir.

$$GJ \frac{\partial \theta}{\partial z} = I_0 \omega^2 A \sin\left(\frac{\omega z}{v_s}\right) e^{i\omega t} ; z=h \quad (9)$$

θ , değeri $z = h$ koşuluna bağlı olarak denklem 5'den türevi alınırsa aşağıdaki eşitlik bulunur.

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_{z=h} = \frac{A\omega}{v_s} \cos\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) e^{i\omega t} \quad (10)$$

Denklem 9 ile 10 birleştirilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$GJ \frac{\omega}{v_s} \cos\left(\frac{\omega z}{v_s}\right) = I_0 \omega^2 \sin\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) \quad (11)$$

Kayma dalgası hızı ile kayma modülü $G = \rho v_s^2$ ilişkisi Denklem 11'de yerine konulursa Denklem 12'deki eşitlik elde edilir.

$$\rho v_s J \omega \cos\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) = I_0 \omega^2 \sin\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) \quad (12)$$

Denklem 12 $I = \rho J h$ ilişkisi bağlı olarak yeniden yazılırsa aşağıdaki eşitlik bulunur.

$$\frac{I}{h} v_s \omega \cos\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) = I_0 \omega^2 \sin\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) \quad (13)$$

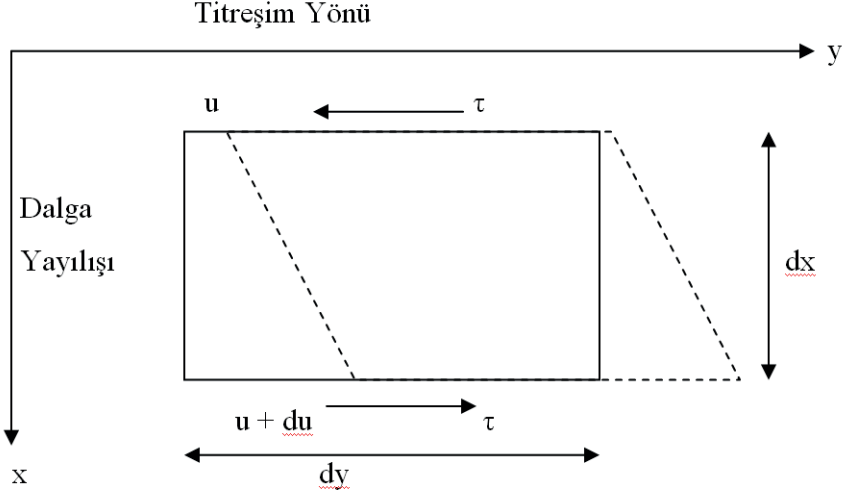
Denklem 14, denklem 13'ün düzenlenmesi ile elde edilir ve aşağıdaki gibidir.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega h}{v_s} \tan\left(\frac{\omega h}{v_s}\right) \quad (14)$$

İlgili denklemde zemin örneğinin kütle atalet momenti I , üst başlık ve dinamik yükleme sisteminin kütle atalet momenti I_0 , ile gösterilmektedir. Kayma dalgası hızı rezonant kolon testinden elde edilebilir. Buradan $G = \rho v_s^2$ bağıntısı kullanılarak zeminin önemli dinamik parametrelerinden biri olan kayma modülü de bulunmaktadır.

Kayma Dalgası Hızı

Kayma modülünün hesaplanmasında kullanılan Kelvin-Voight modeli kayma dalgası hızını belirlemek için de kullanılabilir. Rezonant kolon deneyinden bulunan zeminin rezonans frekansı kullanılarak kayma dalgası hızı hesaplanabilir (Ishihara K., 1996). Şekil 4'de diferansiyel zemin örneğinde kayma dalgası ilerleme yönü gösterilmiştir.



Şekil 4. Kayma dalgası ilerleme yönü (Umu, 2013)

Sırasıyla, du , kayma deformasyonu ve $d\tau$, kayma gerilmesi değişimleri aşağıdaki denklemlerde verildiği şekilde yazılabilir.

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) dx \quad (15)$$

$$d\tau = \left(\frac{\partial \tau}{\partial x} \right) dx \quad (16)$$

$$d\tau = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \rho dx \quad (17)$$

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{\text{Kuvvet}}{\text{Alan}} = \frac{\text{Kütle} \times \text{ivme}}{\text{Alan}} = \frac{\rho dx \partial^2 u}{dx \partial t^2} \quad (18)$$

$$\frac{d\tau}{dx} = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \rho \quad (19)$$

Yukarıda verilen diferansiyel eşitlikler ile Hooke yasası birleştirilirse aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\tau = G \frac{\partial u}{\partial x} \quad (20)$$

$$\frac{d\tau}{dx} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (21)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_s^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (22)$$

Kayma dalgası hızının zemin yoğunluğu ve kayma modülü ile tanımlandığı eşitlik 23; eşitlik 20, 21 ve 22'den elde edilmiştir.

$$v_s = \sqrt{G/\rho} \quad (23)$$

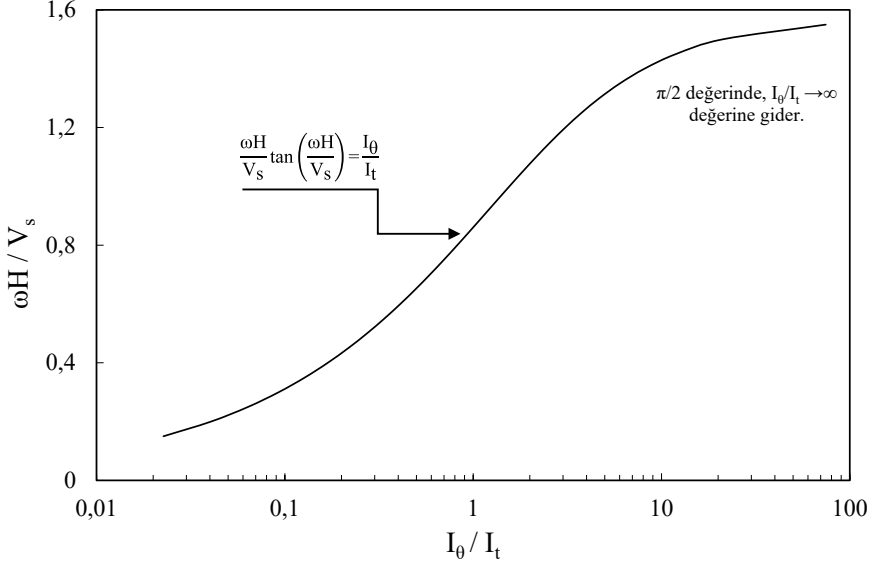
Kayma dalgası hızı (v_s) aynı zamanda Rezonant kolon deney sisteminden bulunan zemin rezonans frekans değeri (f) ile de aşağıda verilen şekilde hesaplanabilir. Verilen denklemlerde I , zeminin kütle atalet momenti, I_0 sürücü sistemin kütle atalet momenti ve L ise zemin kolonunun yüksekliğidir.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{2\pi f L}{v_s} \tan\left(\frac{2\pi f L}{v_s}\right) \quad (24)$$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega h}{v_s} \tan\left(\frac{\omega h}{v_s}\right), \quad \frac{\omega h}{v_s} = \beta \quad (25)$$

Zemin numunesinin polar atalet momenti ile deney sisteminin polar atalet momenti ve β değeri arasında eşitlik 26 da verilen ilişki yazılabilir. Ayrıca Şekil 5'de I/I_0 arasındaki ampirik ilişki verilmiştir.

$$\beta = 0,9548 \times \left[\left(\frac{I}{I_0} \right)^{0,4892} \right] \quad (26)$$



Şekil 5. I/I_0 atalet momentlerinin deneysel ilişkisi (Richart, et al., 1970; Ishihara,1996, Umu, 2013)

Kayma Deformasyon Genliği

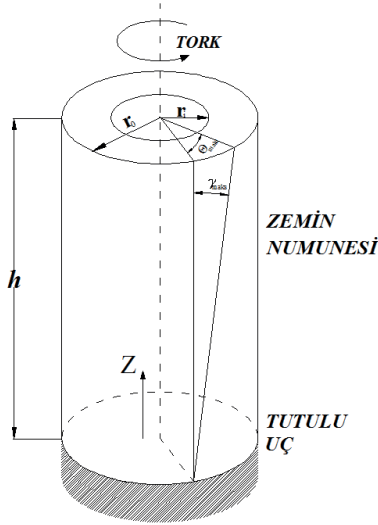
Şekil 6'da burulma yüküne maruz kalmış katı zemin kolonunun üzerindeki kayma deformasyon durumu verilmiştir. Kayma deformasyon genliği numunelerin merkez noktasında içi dolu numunelerde sıfır(0) ve boş numunelerde ise minimum değerdedir. Diğer taraftan kayma deformasyon genliği zemin dış yüzeyinde ise maksimum büyüktükdür (Şekil 6). Eşitlik 27'de birim kayma deformasyon genliğine ait eşitlik verilmiştir.

$$\gamma = \frac{r\theta_{maks}}{h} \quad (27)$$

İlgili eşitlikte, r ; zemin numunesinin ekseninden olan uzaklığı, θ_{maks} ; maksimum dönme açısını ve h ; örnek yüksekliğini ifade etmektedir.

Kayma gerilmesi radyal (çap) mesafe boyunca sabit olmadığından, ortalama kayma gerilmesini temsil etmek için eşdeğer bir kayma gerilmesinin tanımlanması γ gereklidir. Kayma gerimindeki bu değişim, katı numuneler yerine içi boş numunelerin test edilmesinin daha avantajlı olduğunu göstermektedir. İçi boş numunelerde, numune boyunca kayma gerinimi genliğindeki değişim daha küçüktür ve hata payı daha azdır. Lakin içi boş

numunelerin deneye hazırlanma süreci dolu olanlara göre daha uzun ve zordur.



Şekil 6. Zemin numunesindeki birim kayma deformasyon genliği (Umu, 2103)

Numunenin dolu ya da boş olmasına bakılmaksızın hesaplanan kayma modülü ile ilişkin tek veya benzersiz birim kayma deformasyon genliği gereklidir. Aşağıdaki tabloda katı ve silindirik örneklerin eşdeğer yarıçap değerleri verilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Eşdeğer yarıçap değerleri

Numune tipi	Eşdeğer yarıçap
İçi dolu	$r_{eşdeğer} = \frac{2r_o}{3}$
İçi boş	$r_{eşdeğer} = \frac{r_o + r_i}{2}$

Chen ve Stokoe (1979) tarafından yapılan çalışmalarda eşdeğer yarıçapın birim kayma deformasyon genliğine bağlı olduğu düşünülerek farklı eşdeğer yarıçap eşitlikleri önerilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Chen ve Stokoe (1979) tarafından önerilen eşdeğer yarıçap değerleri

Kayma deformasyon genliği	Eşdeğer yarıçap
$\gamma < \%10^{-3}$	$0,82r_0$
$\gamma = \%10^{-1}$	$0,79r_0$

Fixed-free deney sistemleri, zemin kolonunun üst bölümündeki dönme açısı olan θ_{maks} 'ı, gerek akselerometre (ivmeölçer) gerekse $r_{sensör}$ yarıçapında monte edilmiş proksimetre (proximeter) ile ölçülebilmektedir. Kayma deformasyonu ölçülürken deney sisteminde akselerometre kullanılıyorsa, burulma deformasyonu (x) ölçülür ve ivmenin zamana göre iki kat integrali alınır. Burulma deformasyonuna ait eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$x = -\frac{\ddot{x}}{\omega^2} = -\frac{\ddot{x}}{4\pi^2 f^2} \quad (28)$$

İlgili eşitlikte,

ω ; dairesel frekansı,

f ; lineer frekans değerini ifade etmektedir.

Alıcıların ölçümlediği deplasman değeri ve $r_{sensör}$ arasındaki eşitlikten üst başlıgım dönme açısı aşağıda verildiği şekliyle hesaplanabilir.

$$\theta_{maks} = \frac{x}{r_{sensör}} \quad (29)$$

$$\gamma = \frac{r_{eşdeğer} \theta_{maks}}{h} \quad (30)$$

Sönüm Oranı

Zemin numunesinin elastik parametrelerinden olan sönüm oranı da Rezonant Kolon deney sisteminden hesaplanabilen diğer malzeme özelliğidir. Malzemelerin sönümünü tanımlamak oldukça zordur ve bu sebeple yaklaşımlarda eşdeğer viskoz sönüm oranı hesaplanır ve böylelikle zeminin sönümü tanımlanır. Tek serbestlik dereceli sistemin serbest davranışının matematiksel ifadesi eşitlik 31 de verilmiştir.

$$0 = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (31)$$

Eşitlik 31'de; \ddot{x} , \dot{x} , x sırasıyla *ivme*, *hız ve yer değiştirmeyi* ifade etmektedir, *kütle*, *viskoz sönüm ve yay sabiti* ise sırasıyla m , c ve k harfleri ile gösterilmiştir.

D , c_c ve ω_n ifadeleri sırasıyla *viskoz sönüm oranı*, *kritik sönüm katsayısı*, *sönümlenmemiş doğal frekans* olarak tanımlanır.

$$D = \frac{c}{c_c} \quad (32)$$

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad (33)$$

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (34)$$

İlgili ilişkiler eşitlik 31'de verilen tek serbestlik dereceli sistemin serbest davranış denkleminde yerine konulursa eşitlik 35 elde edilir.

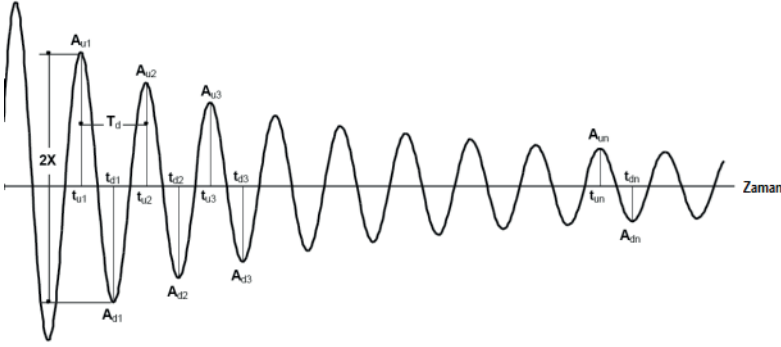
$$0 = \ddot{x} + 2D\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x \quad (35)$$

Eşitlik 35 için tek serbestlik dereceli sistemin az sönümlü, kritik sönümlü veya aşırı sönümlü olmasına bağlı olan üç genel çözümü vardır. Rezonant kolon testinde zemin numunelerinin serbest titreşimi normalde sönümsüz bir davranış sergiler ve bu durum için genel çözümde serbest titreşimin $D < 1$ olduğu durum göz önüne alınır ve bu durum eksik sönüm olarak tanımlanmaktadır. Sonuç olarak denklem 35'in çözümü eşitlik 36'da verilmiştir. İlgili eşitlikte C sabit ve ω_d : *sönümlenmiş rezonans frekansı* göstermektedir.

$$x = Ce^{-\omega_n D t} \sin \omega_d t + \varphi \sin \left(\frac{\omega_n h}{v_s} \right) \quad (36)$$

Tipik bir serbest sönüm eğrisi Şekil 7'de verilmiştir. Bu egride herhangi iki tepe noktasının oranı aşağıdaki şekildedir.

$$\frac{x_n}{x_{n+1}} = e^{-\omega_n D (t_n - t_{n+1})} = e^{\frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}}}, t_{n+1} = t_n + 2\pi / \omega_n \quad (37)$$



Şekil 7. $D < 1$ durumu için logaritmik azalım eğrisi (GCTS CATS, 2007)

10 ile 50 çevrim arasında serbest sönüm eğrisi kullanılarak ve eşitlik 37'nin doğal logaritması alınarak **Logaritmik azalım**, δ , değeri hesaplanabilir.

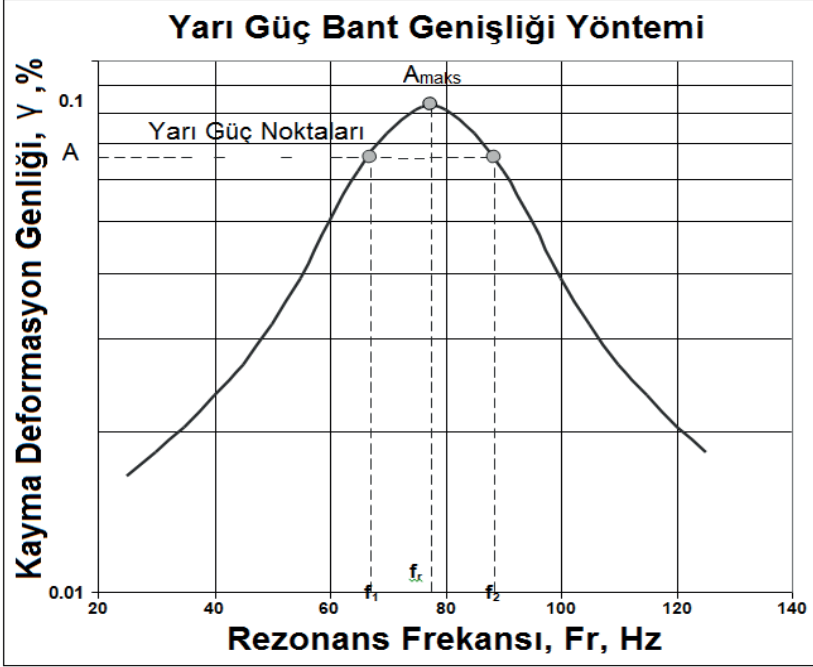
Zemin numunesine ait viskoz sönüm oranı eşitlik 38'de verilen bağıntıdan hesaplanabilir.

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (38)$$

Rezonant kolon testinde zeminlerin sönüm oranını ölçmek için kullanılan ikinci bir yöntem "**yarı güç bant genişliği**" hesabıdır. Logaritmik azalım değeri, zorlanmış titreşim sonucu rezonans yakınındaki frekans tepki eğrisinin genişliği ölçülerek hesaplanır (Denklemler 39). Öncelikle A (**birim kayma deformasyon genişliği**) değeri $A = \frac{A_{maks}}{\sqrt{2}}$ eşitliği kullanılarak hesaplanır. Sonrasında, Şekil 8'de görülen f_1 , A deformasyon seviyesine karşılık gelen ve rezonans frekans değeri altındaki frekans değeri ve sonrasında f_2 değeri yani A deformasyon seviyesine karşılık gelen ve rezonans frekans değeri üstündeki frekans değeri hesaplanır. Zeminin rezonans frekans değeri f_r ise doğrudan rezonant kolon testinden elde edilir. Zemin örneğine ait ve yarı güç bant genişliği yaklaşımı kullanılarak hesaplanan D ise malzemenin sönüm oranıdır. Eşitlik 40'da zeminin sönüm oranı hesabı verilmiştir.

$$\delta = \frac{\pi(f_2^2 - f_1^2)}{2f_r^2} \sqrt{\frac{x^2}{x_{\text{maks}}^2 - x^2}} \frac{\sqrt{1 - 2D^2}}{1 - D^2} \quad (39)$$

$$D = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \quad (40)$$



Şekil 8. Yarı güç bant genişliği yöntemi (HPBW) (GCTS CATS, 2007)

3. Sonuç

Sonuç olarak, depremler gibi sismik olaylar tekrarlayan dinamik yükler oluşturarak hem zeminlere hem de yapılara kuvvet uygulamaktadır. Zemin davranışlarının derinlemesine anlaşılması için bu tekrarlı yüklemelerin incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu noktadaki en önemli adım, tekrarlı dinamik yükleme koşullarının etkisi altındaki zemin tepkilerinin karmaşık özelliklerini anlamada vazgeçilmez bir aşama olan dinamik zemin parametrelerinin titizlikle belirlenmesini içerir. Hem geniş saha araştırmaları hem de titizlikle kontrol edilen laboratuvar ortamlarını kapsayan sayısız deneysel sistem, zemin davranışının zor dinamiklerini çözme hedefiyle tasarlanmıştır. Bu metodolojilerden bazıları ampirik ilişkilere dayanırken,

diğerleri dinamik yükler altındaki zeminin karmaşık hareketini simüle ederek hızlı ve somut sonuçlar verir. Bu çalışmada Rezonant kolon deney sistemi ve sistemin teorik altyapısı aktarılmıştır.

Düşük ve orta kayma gerilmesi genliklerinin ($\gamma = \%0,0001 - \%0,1$) sınırları içindeki zemin davranışını ayırt etmek için tasarlanmış laboratuvar teknikleri arasında, Rezonant Kolon testi önemli bir konuma sahiptir. Rezonant kolon deneyi, katı veya içi boş silindirik bir zemin numunesinin özenle hazırlanarak üç eksenli bir hücreye yerleştirilmesi ile başlar. Numune, kendine has özelliklerine özgü bir frekansta rezonansa girene kadar burulma veya boylamasına yüklemeye maruz bırakılır. Zemin numunesinin geometrik özelliklerinden ve test sisteminin sınır koşullarından etkilenen kayma dalgası hızı ve kayma modülü değerleri belirlenir. Daha sonra, burulma yükü zemin örneği üzerinden kaldırılarak zemin serbest titreşime bırakılır ve zemine ait bir başka önemli parametre olan sönüm oranı hem serbest titreşim azalmından hem de rezonans frekansa bağlı olarak yarı güç bant genişliği değerinden hesaplanabilir. Literatürde yaygın olarak, katı numunelere üst uçtan burulma yükleri uygularken alt ucu kısıtlayan Rezonant Kolon testleri kullanılmaktadır.

Referanslar

- ASTM D4015-87, 2000, Standard test methods for modulus and damping of soils by the resonant-column method, American National Standards Institute.
- Chen, A.T.F. and Stokoe, K.H., 1979, Interpretation of strain-dependent modulus and damping from torsional soil tests, Report No. USGS-GD-79-001, NTIS No. PB-298479, US. Geological Surves, Menlo Park, CA 94025.
- De-Alba, P. and Baldwin, K.C., 1991, Use of bender elements in soil dynamics experiment, Recent Advances in Instrumentation, Data Acquisition and Testing in Soil Dynamics, Geotechnical Special Publication, ASCE, 29, 86-101.
- GCTS Testing Systems (2007), CATS Resonant Column & Torsional Shear Test Mode 1.8, User Guide and Reference, Tempe, Arizona 85285 USA
- Hall, J.R. and Richart, F.E., 1963, Dissipation of elastic wave energy in granular soils, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 89, SM6, 27-56.
- Hardin, B.O. and Richart, F.E., 1963, Elastic wave velocities in granular soils, Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, 89, SM1, 33-65.
- Hardin, B.O. and Drenevich, V.P., 1972, Modulus and damping of soils I: measurements and parameters effects, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 98,
- Iida, K., 1938, The velocity of elastic waves in sands, Bulletin of Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University, 131-144.
- Iida, K., 1940, On the elastic properties of soil, particularly in relation to its water content, Bulletin of Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University, 18, 657-690.
- Ishihara, K., 1996, Soil behaviour in earthquake geotechnics, Clarendon-Oxford University Press, 385 p.
- Ishimoto, M. and Iida, K., 1937, Determination of elastic constants of soils by means of vibration methods. Part 2. Modulus of rigidity and poisson's ratio, Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 15, 67-85.
- Kramer, S.L., 1996, Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall Inc., New Jersey, 653 p.
- Umu, S. U., 2013, Kum – atık lastik karışımlarının lineer olmayan dinamik davranışı, Eskişehir, Doktora Tezi, ESOGÜ.
- Richart, F.E., Hall, J.R. and Woods, R.D., 1970, Vibration of soils and foundations, Prentice Hall International Series in Theoretical and Applied Mechanics, 414 p.

- Viggiani, G., 1991, Dynamic measurements of small strain stiffness of fine grained soils in the triaxial apparatus, *Experimental Characterization and Modeling of Soils and Soft Rocks*, Proceedings of the Workshop in Napoli, 75-97.
- Wilson, S.D. and Dietrich, R.J., 1960, Effect of consolidation pressure on elastic and strength properties of clay, *Proc. ASCE Res. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils*, University of Colorado, 419-35, Discussion 1086-92.
- Youn, J., Choo, Y. and Kim, D., 2008, Measurement of small-strain shear modulus G_{\max} of dry and saturated sands by bender element, resonant column and torsional shear tests, *Canadian Geotechnical Journal*, 45, 1426-1438.

