İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE BİLGİSAYAR KULLANIMI V. SEMPOZYUMU

17-19 Haziran 1996

Düzenleyen
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
İNŞAAT FAKÜLTESİ

PROGRAM

17 Haziran 1996 , Pazartesi

09:00 -09:45 Kayıt (İTÜ Büyük Toplantı Salonu, Ayazağa Kampüsü)

OTURUM I
(İTÜ Büyük Toplantı Salonu, Ayazağa Kampüsü)

09:45 Açılış

10:00 G. Özmen
Elektronik Tablolar ile Ardışık Yaklaşım

11:00 Ara

OTURUM II
(İTÜ Büyük Toplantı Salonu, Ayazağa Kampüsü)
Başkan : N. Kumbasar

11:30 T.A. Erkaya, E. Sağlam, H. Boduroğlu
Betonarme Çerçeve Yapılarda Dolgu Duvarların Deprem Davranışına Etkisi

12:00 F. Demir, Z. Celep
Betonarme Yüksek Kirişlerde Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulaması

12:30 B. Temel, E. Kiral
İmpulsif Yükler Altında Yapı Zemin Etkileşimi Problemlerinin Sonlu ve Sonsuz Elemanlar ile Çözümü

OTURUM III
(İTÜ Büyük Toplantı Salonu, Ayazağa Kampüsü)
Başkan : E. Özer

14:30 G. Özmen
Bağımsız Programların Bütünleşik Olarak Kullanılması

15:00 M. Bakioğlu
İnce Elastik Çubukların Taşıma Matrisi ile Çözümünde Sayısal Bir Yaklaşım

15:30 R. Artan
Değişken Kesitli Düzlem Çubukların Taşıma Matrislerinin Bulunması

16:00 E. Tüfekçi, A. Arpacı
Yayılı Yük Altındaki Düzlemsel Eğri Eksenli Çubukların Kayma Deformasyonu ve Eksensel Uzama Etkisinde Eğilmesi: Kesin Çözüm

16:30 Kokteyl

İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı V. Sempozyumu
İstanbul Teknik Üniversitesi

11 Mart 1996

Sayın yazar, Erhan Kiral ve Beytullah Temel

İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı V. Sempozyumuna gönderdiğiniz Impulsif Yükler Altında Yapı-Zemin Etkileşimi Problemlerinin Sonlu ve Sonsuz Elemanlar ile Çözümü

adlı bildirinin sempozyumda sunulması hakemler tarafından uygun görülmüştür.

Bildiriler için sempozyum kitabında en fazla 10 sayfalık yer ayrılmıştır. 10 sayfayı geçen bildirilere kitapta yer verilmeyecektir. Laser veya 24 pin dot matrix yazıcı kullanılmasına özen gösterilmelidir. Bunların dışında uyulması gereken yazım kuralları arkada verilmiştir.

Bildiri metinlerinin en geç *19 Nisan 1996* tarihine kadar yazışma adresine ulaştırılmasını saygı ile dilerim.

Boduroğlu

Prof. Dr. M. Hasan BODUROĞLU
Sempozyum Başkanı

Not: Habitat II Konferansı nedeniyle Sempozyum 17-19 Haziran 1996 tarihlerine ertelenmiştir.

Prof.Dr. M.Hasan Boduroğlu
İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı V. Sempozyumu
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi
Maslak 80626 İstanbul
Tel: (212)-285-3997 Fax: (212)-285-6587

İmpulsif Yükler Altında Yapı-Zemin Etkileşimi Problemlerinin Sonlu ve Sonsuz Elemanlar İle Çözümü

Beytullah TEMEL **Erhan KIRAL**

Ç.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ADANA

Abstract

2-Dimensional or axially symmetric soil-structure interaction problems are analysed by discretizing the near field with standart finite elements and the far field with infinite elements. Arbitrary transient loading cases are considered and formulation is performed in the Laplace transform space. Solution is then obtained in the time domain by an appropriate numerical inverse Laplace transformation method. Solutions of several example problems obtained by the computer programs are in a good agreement with those available in the literature.

Özet

İki boyutlu veya eksenel dönel simetrik yapı-zemin etkileşimi problemleri, yakın bölgelerde standart sonlu ve uzak bölgelerde sonsuz eleman kullanılarak analiz edilmektedir. Zamanla değişen keyfi yükleme halleri ele alınmakta ve formülasyon Laplace dönüşüm uzayında yapılmaktadır. Uygun bir sayısal ters Laplace dönüşüm yöntemi ile zaman uzayına geçilmektedir. FORTRAN dilinde hazırlanan programlar ile çözülen örneklere ait sonuçların literatürde mevcut çözümlere yakın olduğu gösterilmiştir.

Giriş

Makina temelleri, hareketli trafik yükleri, zemin sıkıştırmaları gibi inşaat aktiviteleri sebebi ile yer yüzeyinde meydana gelen titreşim zemin içinde yayılan çeşitli tipte dalgalar oluşturmaktadır. Titreşim kaynağı yakınında yüksek olan genlikler, geometri ve malzeme sönümleri nedeni ile, kaynaktan uzaklaştıkça azalmaktadır.

Yeraltı iletişim hatları, tüneller, kanalizasyonlar, hassas aletlerin yerleştirildiği kanallar gibi yeraltı yapıları inşa edilegelmektedir. Böylece, yer yüzünde meydana gelen titreşimden dolayı yeraltı yapılarında, titreşim düzeyinin tahmini önemli bir mühendislik problemini oluşturmaktadır. Benzer şekilde, yeraltında oluşan patlamalar da yer yüzünde mevcut üst yapıları etkilemektedir.

Sonsuza uzanan ve tabii haldeki zeminlere daha rasyonel bir yaklaşım, yakın bölgeden sonra sonsuz eleman kullanılması olmuştur (Bettess, 1977). Değişik şekil fonksiyonları seçilerek, sonlu-sonsuz dinamik eleman uygulamaları, iki boyutlu harmonik yükleme için (Chuhan ve Chongbin, 1987) ve üç boyutlu harmonik hal için (Chongbin ve Valliappan,1993) de verilmektedir.

Bu çalışmada, iki boyutlu düzlemsel veya eksenel dönel simetrik geometriye sahip zemin-yapı etkileşimi problemleri incelenmektedir. Zemin tabakalı, elastik ve/veya visko-elastik malzeme olarak ele alınmaktadır. Yarı sonsuz zemin ise, kaynağa yakın bölgelerde kuadratik sonlu elemanlar ile uzak bölgelerde ise sonsuz elemanlar ile modellenmektedir.

Bu çalışmada, azalan fonksiyonlu sonsuz eleman için rijitlik ve kütle matrisleri elde edilmektedir. Sonsuz elemanlar için deplasman kabulü dalga yayılışının özelliklerini taşımaktadır.

Sonsuz elemanların rijitlik ve kütle matrisleri hesabı için ihtiyaç duyulan integrasyon Gauss-Laguerre yöntemi modifiye edilerek kullanılmaktadır.

Laplace dönüşüm uzayından zaman uzayına geçiş için Durbin'in sayısal ters Laplace dönüşüm yöntemi uygulanmaktadır.

Sonlu Eleman Formülasyonu

Düzlem elastisite halinde, hareket denklemleri deplasmanlar cinsinden,

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(c_{11}\frac{\partial u}{\partial x}+c_{12}\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left[c_{33}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]+f_x-\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[c_{33}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left(c_{12}\frac{\partial u}{\partial x}+c_{22}\frac{\partial v}{\partial y}\right)+f_y-\rho\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}=0 \qquad (2)$$

şeklinde verilmektedir. Burada, f_x ve f_y, x ve y doğrultularında, yayılı hacim (alan) kuvvetleri, ρ, kütlesel yoğunluk ve u ve v, sırasıyla, x ve y doğrultusunda deplasman bileşenleridir.

Lineer elastik ve izotrop malzemeler için c_{ij}, malzeme sabitleri, düzlem şekil değiştirme halinde,

$$c_{11} = c_{22} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad c_{12} = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad c_{33} = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{3a}$$

düzlem gerilme halinde,

$$c_{11} = c_{22} = \frac{E}{(1-\nu^2)}, \qquad c_{12} = \frac{\nu E}{(1-\nu^2)}, \qquad c_{33} = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{3b}$$

olarak alınmaktadır. Burada, E, Elastisite modülünü, ν, Poisson oranını ve G, kayma modülünü göstermektedir.

Formülasyon dönüşüm uzayında yapılacağı için, zamana bağlı bir f(t) fonksiyonun Laplace dönüşümü, $\bar{F}(s)$

$$L[f(t)] = \bar{F}(s) = \int_0^\infty f(t)\, e^{-st}\, dt \tag{4}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. s, kompleks Laplace parametresini göstermektedir.

Visko-elastik malzeme olması durumunda Kelvin tipi sönüm olduğu vasayılarak, c_{ij}, malzeme sabitlerindeki elastisite modülü, Laplace uzayında kompleks karşıtı ile değiştirilmektedir.

$$E^* = E(1 + g\,s) \tag{5}$$

Burada, g viskoz sönüm oranıdır. (1) ve (2) hareket denklemlerinin Laplce dönüşümleri alınıp, hacim kuvvetleri ihmal edilip başlangıç şartlarında göz ardı edilerek, herhangi bir h kalınlıklı eleman için ağırlıklı artıklar yöntemi uygulandığında,

$$h\iint_{A_e}\left[\frac{\partial\psi_1}{\partial x}\left(c_{11}^*\frac{\partial\bar{u}}{\partial x}+c_{12}^*\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}\right)+\frac{\partial\psi_1}{\partial y}\left[c_{33}^*\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}+\frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right)\right]+\psi_1\rho s^2\bar{u}\right]dA - h\int_{s_\sigma}\psi_1\bar{t}_x ds = 0 \tag{6}$$

$$h\iint_{A_e}\left[\frac{\partial\psi_2}{\partial x}\left[c_{33}^*\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}+\frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right)\right]+\frac{\partial\psi_2}{\partial y}\left(c_{12}^*\frac{\partial\bar{u}}{\partial x}+c_{22}^*\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}\right)+\psi_2\rho s^2\bar{v}\right]dA - h\int_{s_\sigma}\psi_2\bar{t}_y ds = 0 \tag{7}$$

diferansiyel denklemler integral formda yazılmaktadır. Burada, ψ_1, ψ_2 ağırlık fonksiyonları ve A_e elemanın alanıdır. $\bar{t}_x$, $\bar{t}_y$ ise, dönüşmüş uzayda sınır şartlarını temsil etmekte olup deplasmanlar cinsinden,

$$\bar{t}_x=\left(c_{11}^*\frac{\partial\bar{u}}{\partial x}+c_{12}^*\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}\right)n_x+c_{33}^*\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}+\frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right)n_y\ ,\ \bar{t}_y=c_{33}^*\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}+\frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right)n_x+\left(c_{12}^*\frac{\partial\bar{u}}{\partial x}+c_{22}^*\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}\right)n_y \tag{8}$$

şeklinde yazılmaktadır. Elemanın herhangi bir noktasındaki deplasmanlar,

$$\begin{Bmatrix}\bar{u}\\ \bar{v}\end{Bmatrix}=[N]\{\bar{\Delta}\} \tag{9}$$

dır. Burada, [N], şekil fonksiyonları matrisi ve $\{\bar{\Delta}\}$, dönüşmüş uzayda eleman düğüm deplasmanları vektörüdür. Galerkin ağırlık fonksiyonları olarak,

$$\psi_1=\delta\bar{u}\ ,\ \psi_2=\delta\bar{v} \tag{10}$$

deplasmanların varyasyonları seçilmektedir. (6-10) denklemleri yardımıyla [B] şekil değiştirme matrisi oluşturulmaktadır. Buradan,

$$[k^e]=h\iint_{A_e}[B]^T[C][B]dxdy\ ,\ [m^e]=\rho h\iint_{A_e}[N]^T[N]dxdy\ ,\ \{\bar{f}^e\}=h\int_{S_\sigma}[N]^T\begin{Bmatrix}\bar{t}_x\\ \bar{t}_y\end{Bmatrix}ds \tag{11}$$

tarifleri yapıldığında sonuçta eleman hareket denklemi,

$$s^2[m^e]\{\bar{\Delta}\}+(1+gs)[k^e]\{\bar{\Delta}\}=\{\bar{f}^e\} \tag{12}$$

elde edilmektedir. Burada, $[k^e]$, eleman rijitlik matrisi, $[m^e]$, eleman kütle matrisi ve $\{\bar{f}^e\}$ ise, eleman yük vektörü olarak adlandırılmaktadır.

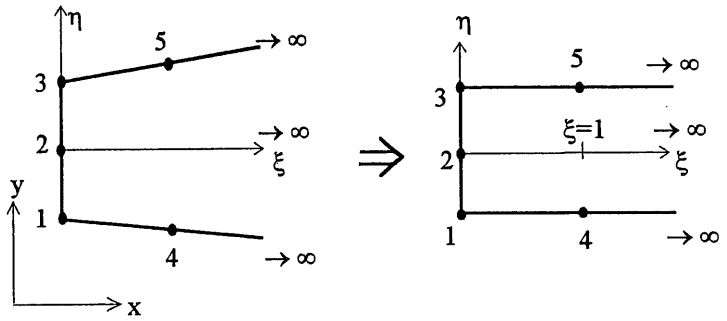
Zemin-yapı etkileşimi problemlerinde üst yapı sekiz düğümlü standart sonlu elemanlarla modellenmektedir. Yarı sonsuz zemin ise, binaya yakın bölgelerde sekiz düğümlü standart sonlu elemanlar ile uzak bölgeler de ise sonsuz elemanlar ile modellenmektedir.

Sonsuz Eleman Formülasyonu

Bu kısımda, azalan fonksiyonlu dinamik sonsuz eleman için formülasyon yapılırken hem düzlem gerilme/şekil değiştirme hem de eksenel dönel simetrik durumlar göz önüne alınmaktadır.

Azalan Fonksiyonlu Sonsuz Eleman

Şekil 1 de görülen iki boyutlu bir sonsuz eleman yine iki boyutlu sonsuz bir bölge ile tasvir edilmektedir.



(a) Gerçek eleman (b) Referans elemanı

Şekil 1 Sonsuz eleman

Eleman koordinat dönüşümü,

$$x = \sum_{i=1}^{5} M_i x_i \quad , \qquad y = \sum_{i=1}^{5} M_i y_i \tag{13}$$

ile tarif edilmekte ve burada M_i , geometrik şekil fonksiyonları,

$$M_1 = \frac{1}{2}(\xi - 1)(\eta - 1) \qquad M_4 = \frac{1}{2}\xi(1 - \eta)$$

$$M_2 = 0 \tag{14}$$

$$M_3 = \frac{1}{2}(1 - \xi)(\eta + 1) \qquad M_5 = \frac{1}{2}\xi(1 + \eta)$$

olarak verilmektedir(Chuhan ve Chongbin,1987). Sonsuz elemana ait deplasman yaklaşımı, Laplace dönüşüm uzayında,

$$\overline{u} = \sum_{i=1}^{3} N_i(\xi,\eta,s)\overline{u}_i \quad \text{ve} \quad \overline{v} = \sum_{i=1}^{3} N_i(\xi,\eta,s)\overline{v}_i \tag{15}$$

olup, N_i interpolasyon şekil fonksiyonları,

$$N_1 = P(\xi,s)\ \frac{1}{2}(-1+\eta)\eta$$
$$N_2 = P(\xi,s)\ (1-\eta^2) \qquad (16)$$
$$N_3 = P(\xi,s)\ \frac{1}{2}(1+\eta)\eta$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada, P(ξ,s), deplasman yayılma fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır.

$$P(\xi,s) = e^{-(\alpha+\frac{s}{c}L)\xi} = e^{-\alpha\xi}e^{-\beta\xi},\ \beta = (\frac{s}{c}L) \qquad (17)$$

α ve β, yerel koordinatlarda, sırasıyla, deplasman genlik azaltma faktörü ve dalga sayısıdır. Yine yerel koordinatlarda dalga yayılmasından dolayı, $e^{-\alpha\xi}$ genlikteki azalmayı gösterirken, $e^{-\beta\xi}$ terimi de faz gecikmesini ifade etmektedir. Burada, L karakteristik bir uzunluğu göstermektedir.

Visko-elastik zemin modeli olması halinde, Laplace uzayında Kelvin tipi viskoz sönüm göz önüne alınmaktadır. Bu durumda, visko-elastik kayma modülü ve Lame' sabiti,

$$G^*=G\,(1+g\,s)\ ,\ \lambda^*=\lambda\,(1+g\,s) \qquad (18)$$

şeklinde ifede edilmektedir. Burada, g viskoz sönüm oranını göstermektedir. Bunun yanında, visko-elastik malzeme için dalga hızı da,

$$c^* = c\sqrt{(1+gs)} \qquad (19)$$

şeklinde yazılabilmektedir.

Azalan fonksiyonlu elemana ait uzama oranı deplasman ilişkisi söyledir:

$$\{\bar{\varepsilon}\} = [B_1,B_2,B_3]\{\bar{u}_1,\bar{v}_1,\bar{u}_2,\bar{v}_2,\bar{u}_3,\bar{v}_3\}^T = [B]\{\bar{\Delta}\} \qquad (20)$$

Düzlem gerilme/şekil değiştirme hali için sonsuz eleman rijitlik ve kütle matrisleri ifadesi aşağıdaki şekli alır.

$$[k^e]_{(6x6)} = h\int_{\eta=-1}^{1}\int_{\xi=0}^{\infty}[B]^T[C]\,[B]\,\det[J]d\xi\,d\eta\ ,\ [m^e]_{(6x6)} = h\,\rho\int_{\eta=-1}^{1}\int_{\xi=0}^{\infty}[N]^T\,[N]\,\det[J]d\xi\,d\eta \qquad (21)$$

Bu hal için [C] matrisinin elemanları (3) de verilmektedir.

Eksenel dönel simetrik hale ait uzama oranı deplasman ilişkisi kullanılarak dönel simetrik sonsuz eleman rijitlik ve kütle matrisleri ifadesi aşağıdaki şekilde yazılmaktadır.

$$[k^e]_{(6x6)} = 2\pi \int_{\eta=-1}^{1} \int_{\xi=0}^{\infty} [B]^T [\overline{C}] [B] \, r \, \det[J] \, d\xi \, d\eta, \quad [m^e]_{(6x6)} = 2\pi \rho \int_{\eta=-1}^{1} \int_{\xi=0}^{\infty} [N]^T [N] \, r \, \det[J] \, d\xi \, d\eta \tag{22}$$

Burada, det[J], M_i geometrik şekil fonksiyonlarına bağlı olan Jacobian dönüşüm matrisinin determinantı, r dönel simetrik elemanda herhangi bir noktanın simetri eksenine olan uzaklığı ve $[\overline{C}]$ ise, bu hale ait malzeme matrisidir. Bu ifadeler, sonlu yönde Gauss-Legendre ile 3 Gauss noktası, sonsuz yönde ise modiye Gauss-Leguerre sayısal integrasyon yöntemi ile 17 Gauss noktası seçilerek hesaplanmaktadır.

Keyfi Değişen (Transient) Yükleme İçin Hareket Denklemleri

Visko-elastik bir ortamda sonlu ve sonsuz elemanların rijitlik ve kütle matristeri uygun bir şekilde birleştirilirse, Laplace dönüşüm uzayında ve sıfır başlangıç şartları altında sistem hareket denklemi,

$$s^2 [M]\{\overline{V}\} + (1 + gs)[K]\{\overline{V}\} = \{\overline{F}\} \tag{23}$$

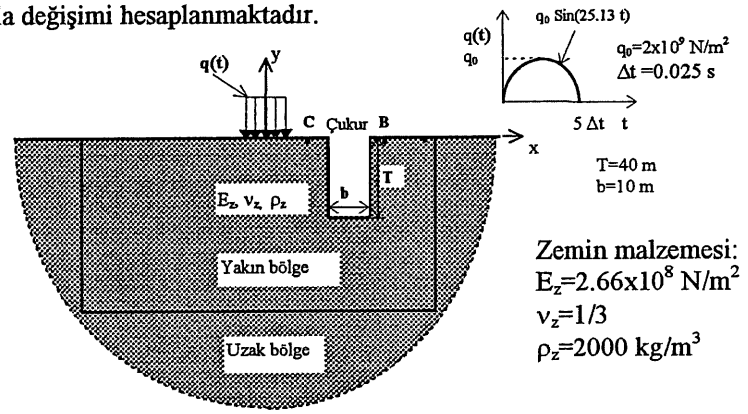
şeklinde yazılmaktadır. Burada, [M] ve [K], sırasıyla sistem kütle ve rijitlik matrisleridir. $\{\overline{V}\}$ ve $\{\overline{F}\}$, sırasıyla, düğüm deplasmanları ve sistem yük vektörlerinin Laplace dönüşümleridir. Sonlu elemanlar bölgesinde, eleman matrisleri s parametresine bağlı olmadığı için sonlu bölgeye ait sistem matrisleri bir kez oluşturulması yeterli olmaktadır.

Laplace dönüşüm uzayında çeşitli s parametreleri için çözümler sayısal olarak bulunmaktadır. Bu çözümlerden zaman uzayına geçiş için (Durbin,1974)'in sayısal ters Laplace dönüşüm yöntemi uygulanmaktadır.

Uygulamalar

Yarı Sonsuz Zemin Yüzeyinde Açılan Çukur İle Pasif Titreşim İzolasyonu

Elastik yarı sonsuz zemin yüzeyinde dikdörtgen bir çukur açılmaktadır. Çukurun bir tarafında sinüzoidal impulsif çizgisel bir yük bulunmaktadır (Şekil 2). Çukurun diğer tarafında verilen bir noktada yatay ve düşey deplasmanların zamanla değişimi hesaplanmaktadır.

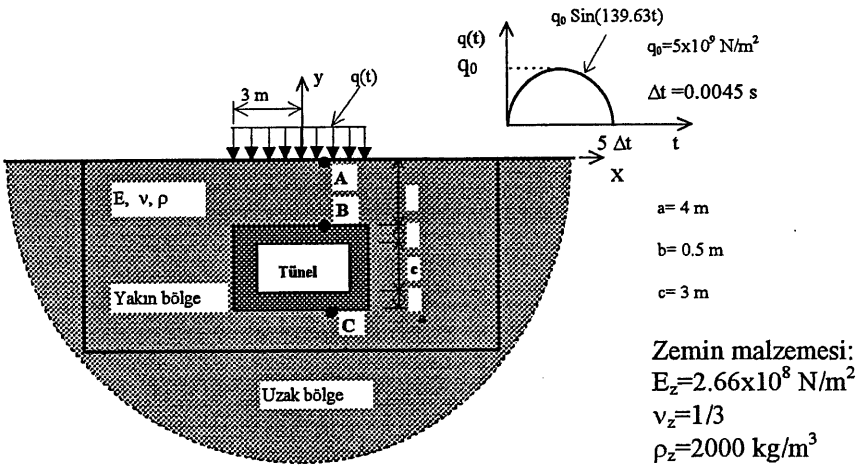


Şekil 2 Yarı sonsuz zemin yüzeyinde dikdörtgen çukur

Hazırlanan program ile, (T/b=4) çukur derinliği için A, B ve C noktalarındaki deplasmanların zamanla değişimi hesaplanmıştır. Yükün karşı tarafında bulunan A ve B noktalarındaki düşey deplasmanın maksimum değerlerinin, C noktasındaki maksimum değere göre oldukça azaldığı gözlenmektedir. Bunun yanında, dalganın çukur kenarını dolanması nedeni ile A ve B oktalarının harakete geçmesi gecikmektedir.

Yarı Sonsuz Zemin Üzerindeki İmpulsif Yük Nedeni İle Dikdörtgen Bir Tünelin Dinamik Davranışı

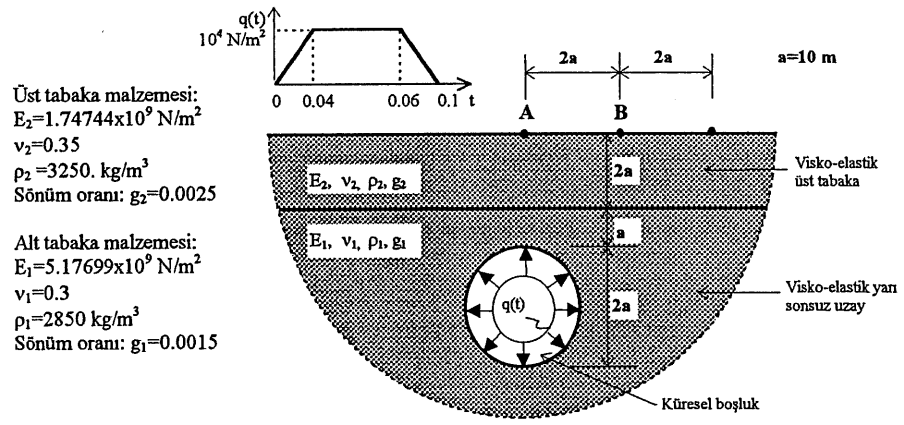
Elastik yarı sonsuz zemin yüzeyinde sinüzoidal impulsif üniform yayılı bir yük ve zemin içinde dikdörtgen bir tünel bulunmaktadır (Şekil 3). Yükün altında ve tünelin alt ve üst yüzeylerinde verilen noktalarda düşey deplasmanların zamanla değişimi hesaplanmaktadır. Tünel çevresinde beton bir zarf bulunmakta olup, Poisson oranı ve kütlesel yoğunluğu zemin malzemesi ile aynıdır. Tünel zarf betonu malzemesi için çeşitli rijitlikler (E_t=0, 6x10^9 N/m^2, 30x10^9 N/m^2) alınarak ve ayrıca tünelin mevcut olup olmamasına göre, A, B ve C noktalarındaki düşey deplasmanlar incelenmektedir.



Şekil 3 Yarı sonsuz zemin içinde dikdörtgen tünel

Tünel zarf betonu malzemesi rijitlikleri arttırılarak ve tünel boşluğunun mevcut olup olmamasına göre, A, B ve C noktalarındaki düşey deplasmanların zamanla değişimleri hesaplanmıştır. Tünel çeperine zarf betonu yapıldığında zemin yüzeyindeki düşey deplasmanın azaldığı gözlenmiştir. Dalganın tünel çevresini dolaşması nedeniyle, tünel alt yüzündeki C noktasına erişim süresinin üst yüzdeki B noktasına göre arttığı gözlenmektedir.

Tabakalı Yarı Sonsuz Visko-Elastik Zeminde Küresel Boşluk İçinde Patlama



Şekil 4 İki tabakalı visko-elastik zemin içinde küresel bir boşlukta patlama

İki tabakalı yarı sonsuz visko-elastik zemin içindeki küresel bir boşlukta impulsif bir basınç etkimektedir (Şekil 4). Bu örnek, eksenel dönel simetrik bir problemdir.

Beklendiği gibi, noktalar patlamanın bulunduğu yerden uzaklaştıkça genliklerin küçüldüğü gözlenmiştir. Basınç dalgasının iki tabakadan geçerek, A noktasına erişme zamanı, 0.028 saniye olup, çözümlerle uyum göstermektedir. Karşılaştırma amacıyla bu örnek, sonsuz elemanların başladığı yerden kesilerek bir kere viskoz sınır şartları ile bir kere de sadece sonlu elemanlar alınıp sınırları tutularak çözülmüştür. Viskoz sınır şartları ve sonlu-sonsuz model ile çözüm sonuçlarının uyumlu oldukları söylenebilir. Sedece sonlu eleman kullanılması halinde dalgaların sınıra çarparak yansıması nedeniyle belli bir süreden sonra davranışın karakteri bozulmaktadır.

Sonuçlar

Sadece sonlu elemanlar kullanılması ile kaynaktan uzak bölgelerde, yapay sınırlar oluşturulmakta ve dalganın yansıyarak geri dönmesine sebep olmaktadır. Bu durum, sonsuza uzanan bölgelerde dalganın gerçek davranışına uymamaktadır.

Sonsuza uzanan ortamlarda, sonlu-sonsuz eleman kullanımı, viskoz sınırlar ile çözüme göre daha etkin olmaktadır. Bunun yanında, standart sonlu eleman formülasyonu uygulanmakta, ayrıca, sistem matrisleri bant ve simetri özelliklerini korumaktadır. Ayrıca, yakın bölgede kullanılan sonlu elemanlar Laplace parametresine bağlı olmadığından dalayı bu bölgedeki eleman matrislerinin çözüm süresince bir kez hesaplanması yeterli olmaktadır.

Üst yapının çevresinde çukurlar açılarak, pasif bir titreşim izolasyonu sağlanabilmektedir.

Bunlara ilave olarak, sonlu-sonsuz eleman formülasyonu ile homojen olamayan ortamların kolaylıkla ele alınabildiği görülmektedir.

Kaynaklar

BETTESS, P., (1977), "Infinite Elements", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 11, 53-64.

CHUHAN, Z. and CHONGBIN, Z., (1987), "Coupling Method of Finite and Infinite Elements for Strip Foundation Wave Problems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 15., 839-851.

CHONGBIN, Z. and VALLIAPPAN, S., (1993), "A Dynamic Infinite Element for Three-Dimensional Infinite-Domain Wave Problems", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 36, 2567-2580.

DURBIN, F., (1974), "Numerical Inversion of Laplace Transforms: An Efficient Improvement to Dubner and Abate's Method", The Computer Journal, Vol. 17, No. 4, 371-376.