



Procedure analitiche e numeriche per la valutazione degli effetti di interazione terreno-struttura nella risposta sismica dei ponti

Michele Morici¹, Sandro Carbonari², Francesca Dezi³, Graziano Leoni¹

¹ *Università di Camerino*

² *Università Politecnica delle Marche*

³ *Università degli Studi di San Marino*



Outline

- **Metodologie per l'analisi SSI**
- **Modello per l'analisi dinamica di fondazioni profonde**
- **Modello per l'analisi dinamica di rilevati**
- **Conclusioni**

Outline

- **Metodologie per l'analisi SSI**
- Modello per l'analisi dinamica di fondazioni profonde
- Modello per l'analisi dinamica di rilevati
- Conclusioni

Approccio DIRETTO

- La risposta del terreno e della struttura è valutata contemporaneamente
- Definizione dei vincoli assorbenti al contorno (semispazio infinito)
- Modellazione agli Elementi Finiti o con Boundary Elements dell'intero dominio
- Approccio che permette di considerare le non linearità meccaniche

Approccio per SOTTOSTRUTTURE

Dominio
Frequenze

Dominio
Frequenze/Tempo

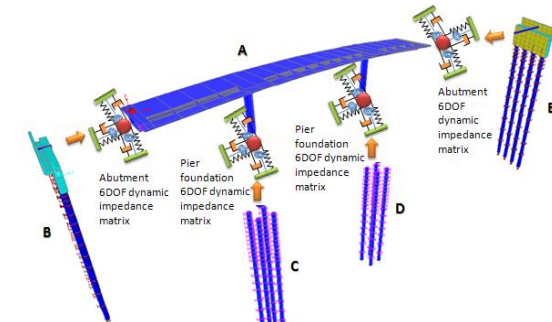
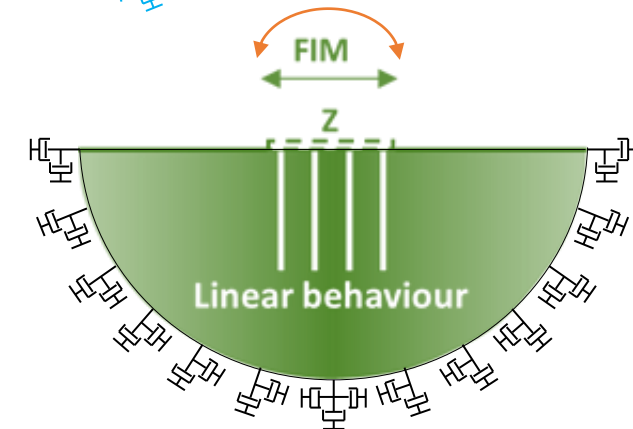
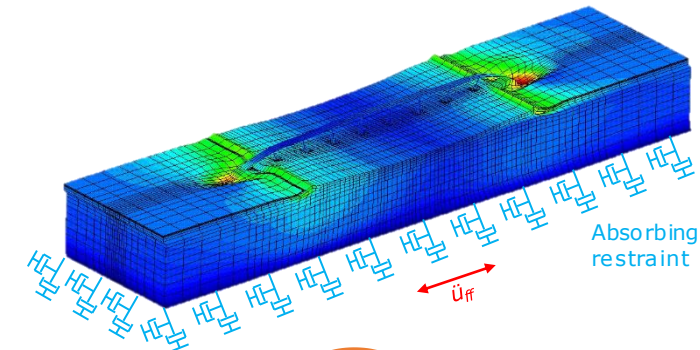
Analisi di interazione Cinematica

- Foundation Input Motion (FIM) – Moto di Fondazione
- Sollecitazioni cinematiche nella fondazione

Funzioni di Impedenza Dinamica (Z)

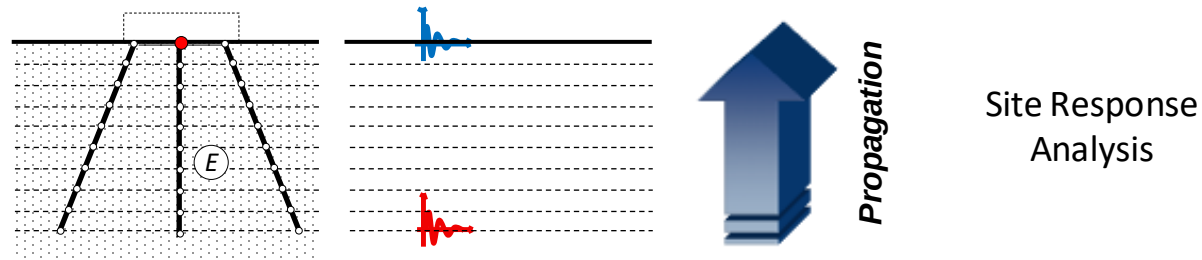
Analisi Inerziali

- Analisi lineare o non lineare delle strutture su base cedevole
- Sollecitazioni negli elementi strutturali
- Sollecitazioni in fondazione dovute all'azione inerziale

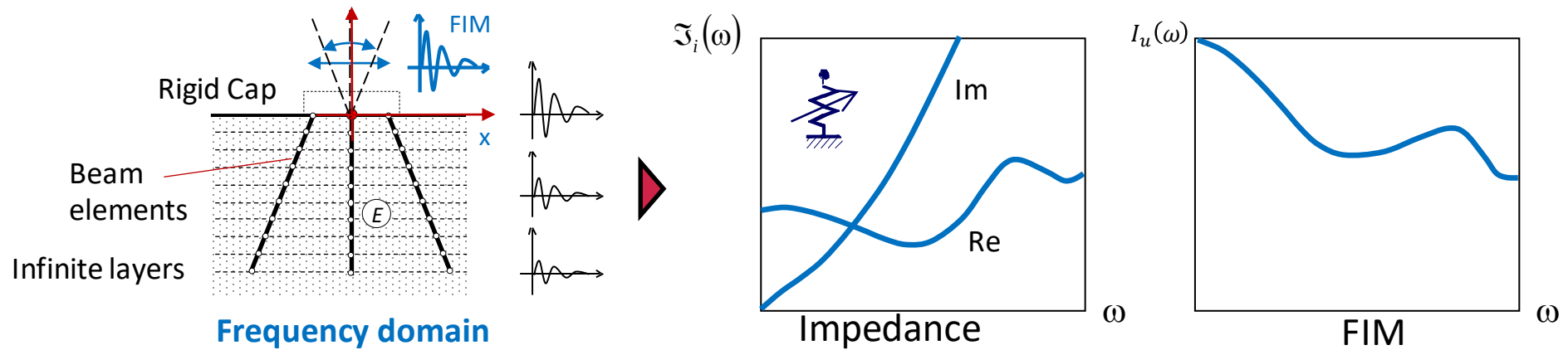


L'analisi SSI considerando l'approccio per sottostrutture nel dominio del tempo richiede i seguenti steps:

1. Definizione dell'Input sismico, i.e. valutazione del moto di free-field lungo i pali

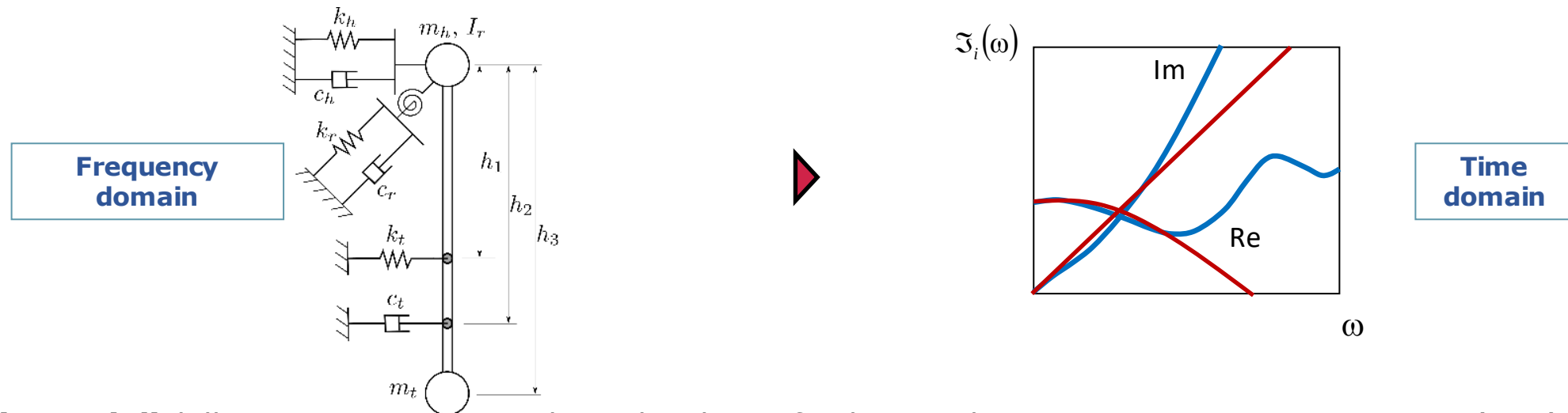


2. Analisi del Sistema Terreno-Fondazione destinato a valutare: il FIM (kinematic interaction analysis) e le matrici complesse di impedenza dinamica dei sistemi terreno-fondazione



L'analisi SSI considerando l'approccio per sottostrutture nel dominio del tempo richiede i seguenti steps:

3. Lumped Parameter Models (LPMs) per approssimare la risposta dipendente dalla frequenza dei sistemi terreno-fondazione necessaria per le analisi inerziali della struttura nel dominio del tempo



4. Analisi Inerziali della sovrastruttura introducendo ad ogni fondazione il sistema a parametri concentrati (LPM) definiti allo step 3 e soggetto al moto di Fondazione valutato allo step 2

Dominio del Tempo: analisi lineari/non lineari della sovrastruttura

Carbonari S., Morici M., Dezi F., Leoni G. (2018). A lumped parameter model for time-domain inertial soil-structure interaction analysis of structures on pile foundations. EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, 1-25.

Morici M., Minnucci L., Carbonari S., Dezi F., Leoni G. (2019). Simple Formulas for Estimating a Lumped Parameter Model to Reproduce Impedances of End-Bearing Pile Foundations. SOIL DYNAMICS AND EARTHQUAKE ENGINEERING.

Outline

- Metodologie per l'analisi SSI
- **Modelli per l'analisi dinamica di fondazioni profonde**
- Modello per l'analisi dinamica di rilevati
- Conclusioni

Ipotesi del Modello

- Gruppo generico di n pali circolari con lo stesso diametro d e differenti angoli di inclinazione
- Ogni palo è ipotizzato come una trave di Eulero-Bernuolli
- Il terreno è costituito da layer orizzontali indefiniti con comportamento viscoelastico lineare
- Formulazione del problema nel dominio delle frequenze

Formulazione del Modello

Condizione di Equilibrio in forma debole (Lagrange-D'Alembert)

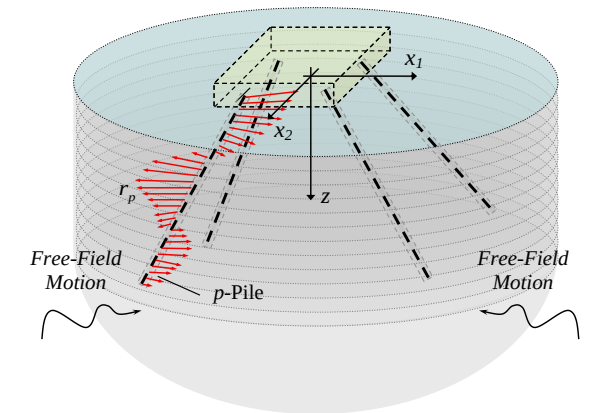
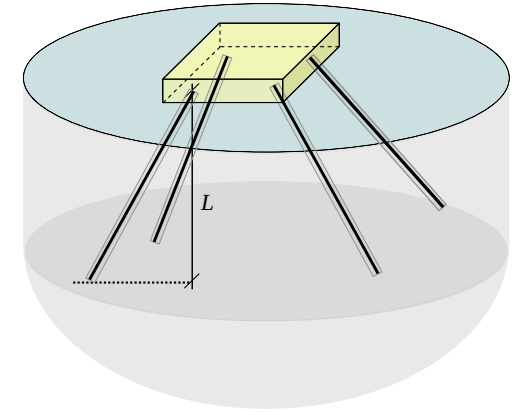
$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^L \mathbf{BKDRu}(\omega; z) \cdot \mathbf{DR}\hat{\mathbf{u}}(z) dz - \int_0^L \mathbf{r}(\omega; z) \cdot \hat{\mathbf{u}}(z) dz - \omega^2 \int_0^L \mathbf{BMu}(\omega; z) \cdot \hat{\mathbf{u}}(z) dz = 0 \\ \mathbf{u}(\omega; z) = \mathbf{u}_{ff}(\omega; z) - \int_0^L \mathbf{D}(\omega; \kappa, z) \mathbf{r}(\omega; \kappa) d\kappa \end{array} \right. \quad \forall \hat{\mathbf{u}} \neq \mathbf{0}$$

Condizioni di compatibilità

LAYER VISCOELASTICI INDIPENDENTI DI TERRENO

$$\mathbf{u}(\omega; z) = \mathbf{u}_{ff}(\omega; z) - \hat{\mathbf{D}}(\omega; z) \mathbf{r}(\omega; z)$$

$$\int_0^L \mathbf{BKDRu} \cdot \mathbf{DR}\hat{\mathbf{u}} dz + \int_0^L \tilde{\mathbf{D}}^{-1} \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{u}} dz - \omega^2 \int_0^L \mathbf{BMu}(\omega; z) \cdot \hat{\mathbf{u}}(z) dz = \int_0^L \tilde{\mathbf{D}}^{-1} \mathbf{u}_{ff} \cdot \hat{\mathbf{u}} dz \quad \forall \hat{\mathbf{u}} \neq \mathbf{0}$$



Soluzione del Modello

- La soluzione è ottenuta numericamente con il metodo degli elementi finiti interpolando gli spostamenti locali:

$$\mathbf{R}_p \mathbf{u}_p(z; \omega) \cong \mathbf{N}_p(z) \mathbf{L}_p \mathbf{d}_p^e(\omega)$$

- Le procedure standard di soluzione agli elementi finiti consentono di ottenere:

$$(\bar{\mathbf{K}}_p - \omega^2 \bar{\mathbf{M}} + \bar{\mathbf{K}}_s) \mathbf{d} = \mathbf{f}$$

- Introducendo un vincolo rigido in testa ai pali e definendo un nodo master M con 6 Dofs generalizzati:

$$\mathbf{d}_F^T(\omega) = [U_x \quad U_y \quad U_z \quad \Phi_x \quad \Phi_y \quad \Phi_z]$$

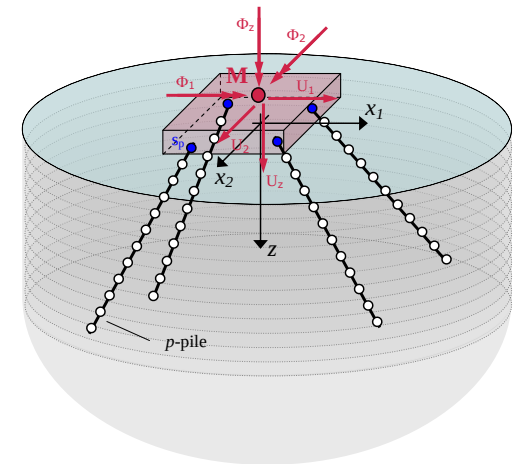
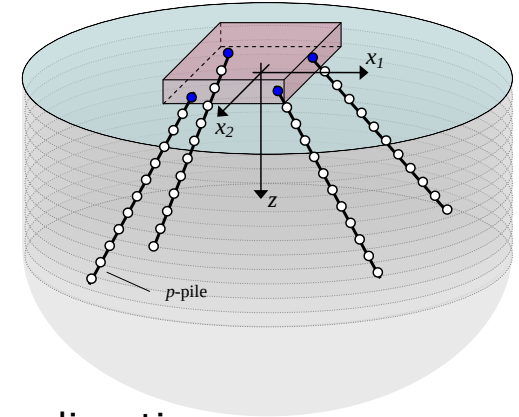
Il sistema di equilibrio globale si trasforma in:

Matrici di Impedenza Dinamica

$$\mathfrak{Z}(\omega) = (\mathbf{Z}_{FF} - \mathbf{Z}_{FE} \mathbf{Z}_{EE}^{-1} \mathbf{Z}_{EF})$$

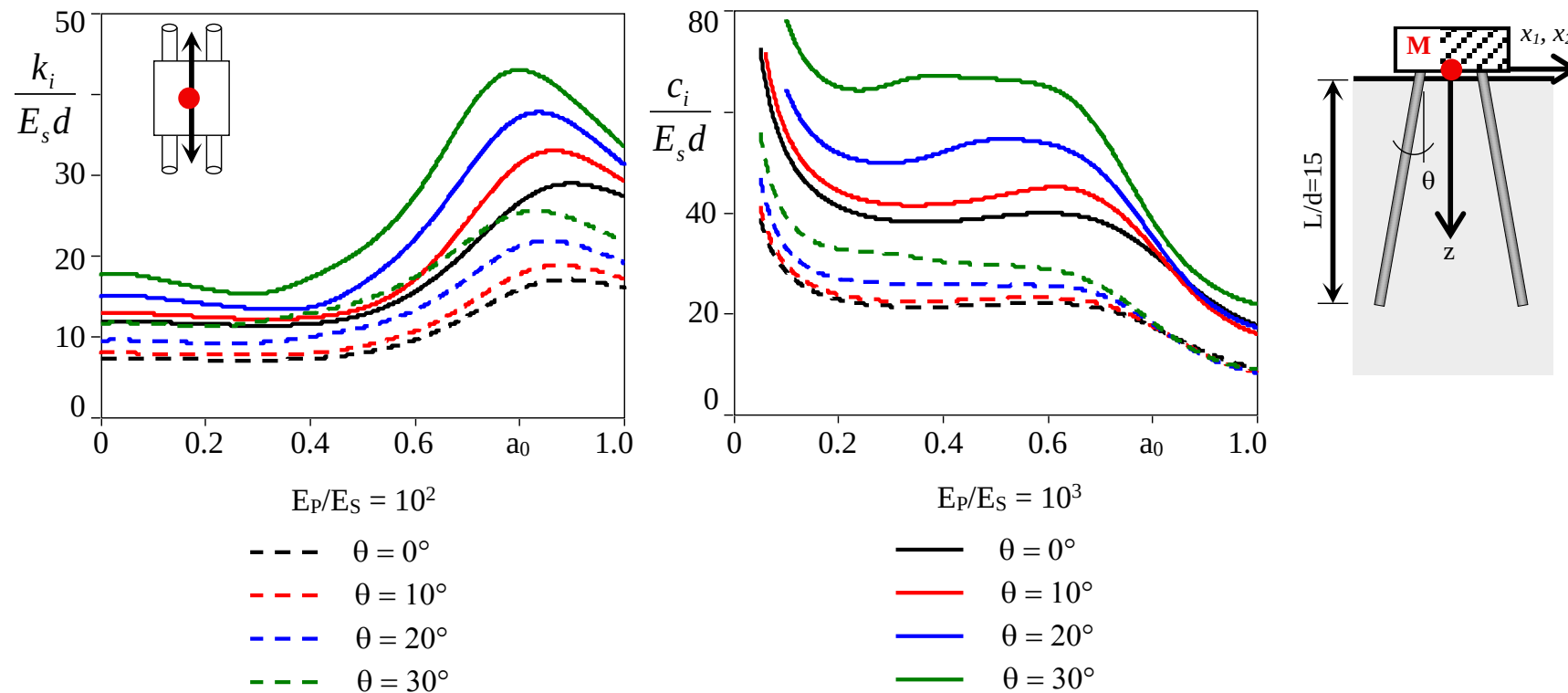
Moto del Nodo Master (FIM)

$$\mathbf{d}_F(\omega) = \mathbf{Z}_F^{-1} [\mathbf{f}_F - \mathbf{Z}_{FE} \mathbf{Z}_{EE}^{-1} \mathbf{f}_E]$$



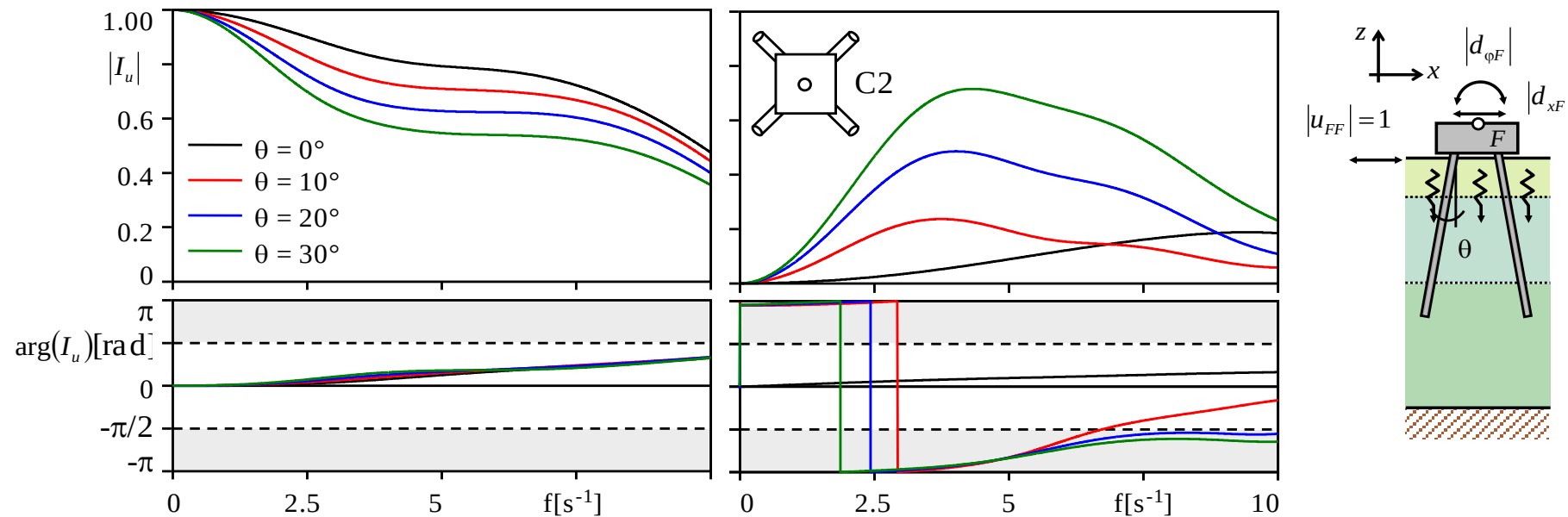
Coefficienti della Matrice di Impedenza Dinamica

Coefficienti di Rigidezza e Smorzamento (Dynamic Impedance functions) della matrice di rigidezza dinamica ottenuti applicando un input armonico nel nodo master della Fondazione



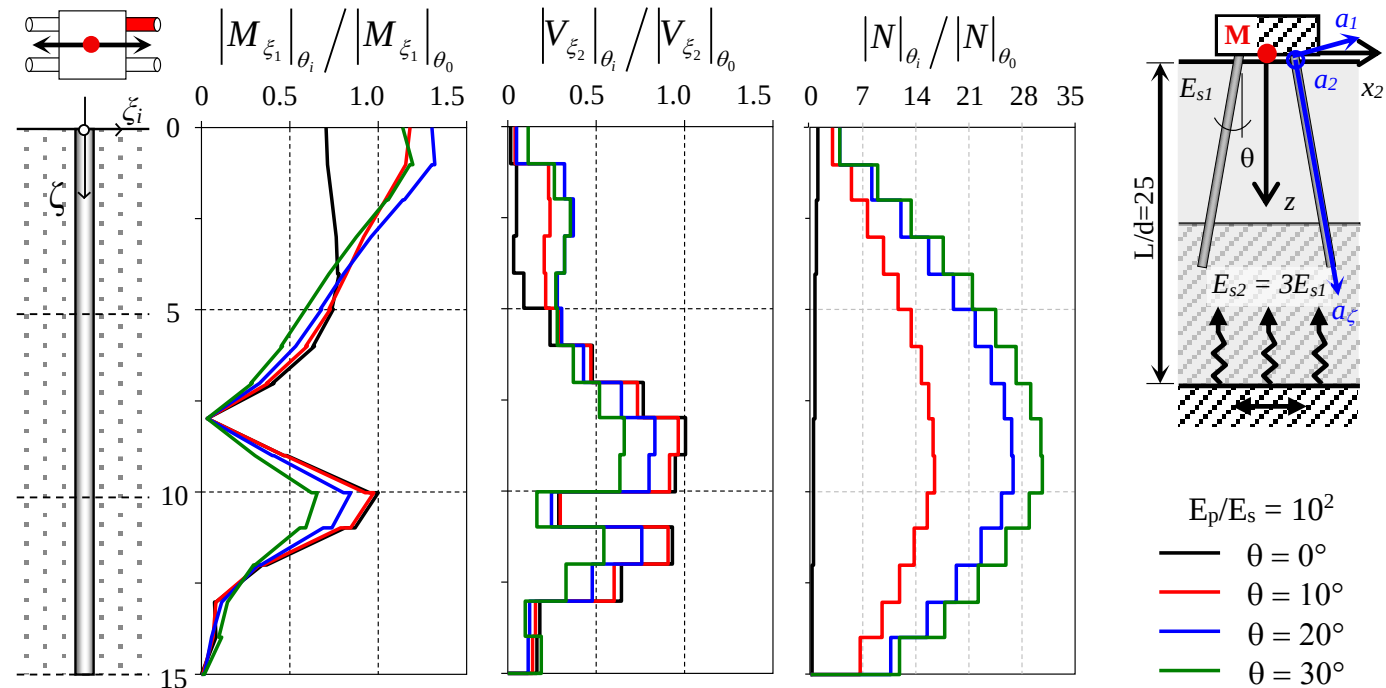
Funzioni di Trasferimento

Modulo e fase delle funzioni di trasferimento traslazionale e rotazionale ottenute applicando un input armonico in superficie del deposito



Sollecitazioni cinematiche

Sollecitazioni cinematiche che nascono lungo il fusto del palo dovute ad una eccitazione armonica applicata alla base del deposito con frequenza prossima alla frequenza fondamentale del deposito



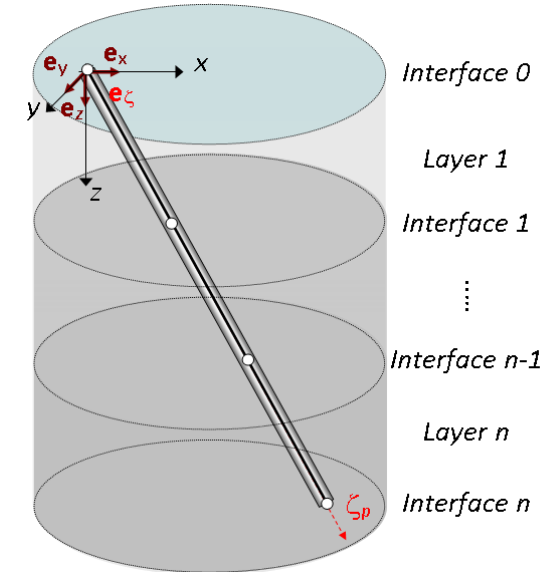
Risultati adimensionalizzati rispetto alle sollecitazioni relative alla configurazione con pile verticali

Dezi F., Carbonari S., Leoni G. (2009). A model for the 3D kinematic interaction analysis of pile groups in layered soils. EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, 38(11).

Dezi F., Carbonari S., Morici M. (2016). A Numerical Model for the Dynamic Analysis of Inclined Pile Groups. EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, 45 (1), 45–68.

Modello per pali singoli

- La soluzione è analitica
- La discretizzazione in elementi è correlata al numero di strati omogenei di presenti nel terreno
- L'instabilità numerica è legata solo alla valutazione della matrice esponenziale



La soluzione si ottiene introducendo il seguente vettore di incognite (spostamenti e derivate di ordine superiore)

$$\mathbf{x}^T(\omega; \zeta) = [\mathbf{u}_t \quad u_\zeta \quad \mathbf{u}'_t \quad u'_\zeta \quad \mathbf{u}''_t \quad \mathbf{u}'''_t]$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{E}(\omega; \zeta) \mathbf{g}(\omega) \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{E}(\omega; \zeta) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \mathbf{B}^k(\omega) \zeta^k \\ \mathbf{g}(\omega) \end{array} \right.$$

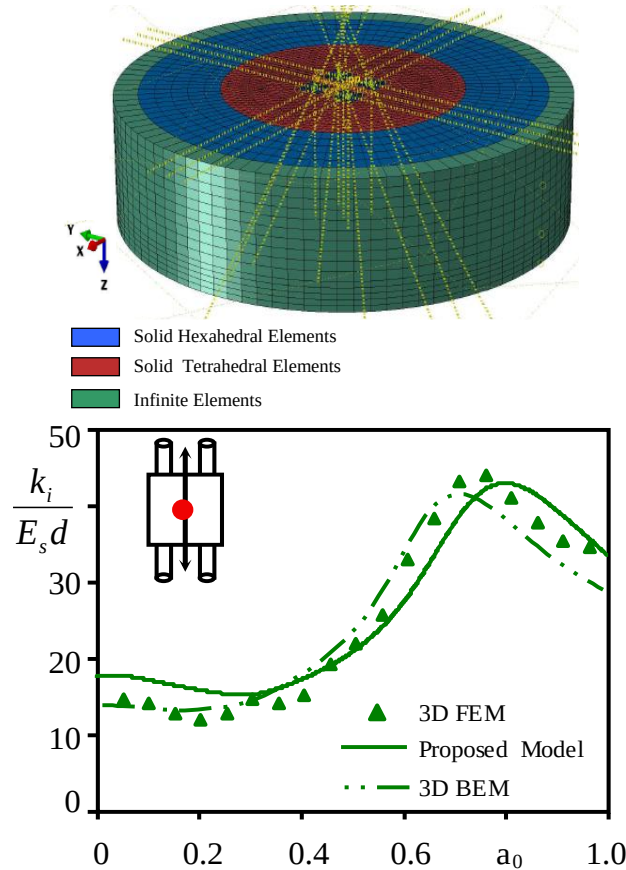
Matrice Esponenziale

Vettore delle costanti di integrazione ottenuto dalla condizione al contorno

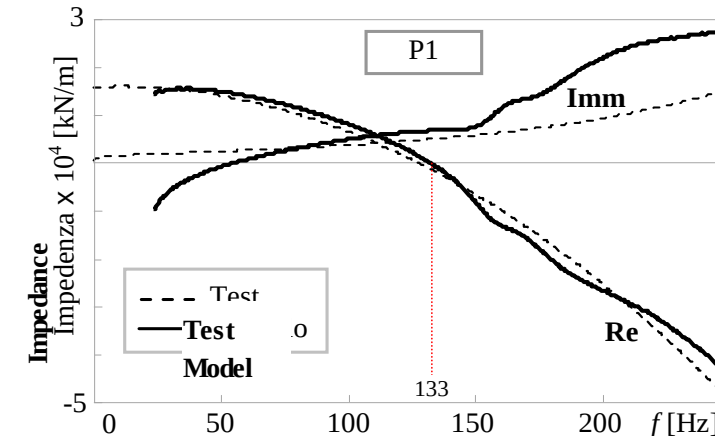
Carbonari S., Morici M., Dezi F., Leoni G. (2016). Analytical evaluation of impedances and kinematic response of inclined piles. ENGINEERING STRUCTURES, vol. 117,

I modelli proposti sono stati validati confrontando i risultati ottenuti in termini di funzioni di risposta cinematica (FIM) e impedenze dinamiche con:

- **Modelli numerici raffinati (FEM 3D, BEM 3D)**



- **Prove sperimentali**



Dezi F., Roia D., Capatti M.C., Carbonari S., Gara F., Morici M., Leoni G. (2019) Evaluation of dynamic soil-pile interaction based on both full scale in situ tests and numerical simulations. In Proceedings of the 7th ICEGE International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Rome, Italy.

Outline

- Metodologie per l'analisi SSI
- Modello per l'analisi dinamica di fondazioni profonde
- **Modello per l'analisi dinamica di rilevati**
- Conclusioni

Ipotesi del Modello

- Rilevato rettilineo di lunghezza L caratterizzato da una sezione trasversale trapezoidale e dotato di un piano verticale di simmetria
- Materiale del rilevato a comportamento viscoelastico lineare
- Formulazione del problema dinamico nel dominio delle frequenze

Spostamento di un punto generico di nel dominio D della frequenza

$$\mathbf{u}(\omega; \mathbf{x}) = [\mathbf{a}_i(x_1) \cdot \mathbf{d}_i(\omega; x_2, x_3)] \mathbf{e}_i \quad \forall \mathbf{x} \in D, \omega \in (-\infty, \infty)$$

- I polinomi di Legendre sono adottati per l'espansione attraverso lo spessore degli spostamenti di ordine superiore

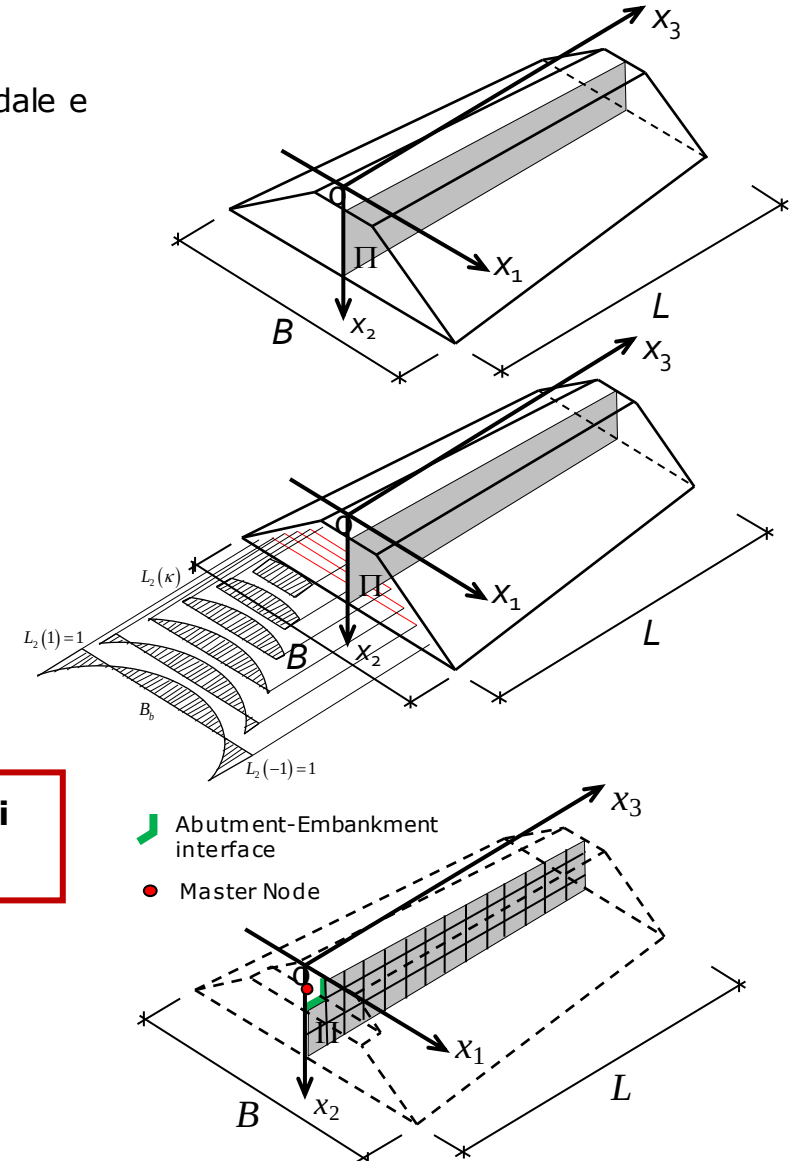
$$\mathbf{a}_i^T(x_1) = [L_0, L_1, L_2, \dots, L_l]^T$$

Riduzione del problema 3D a problema 2D

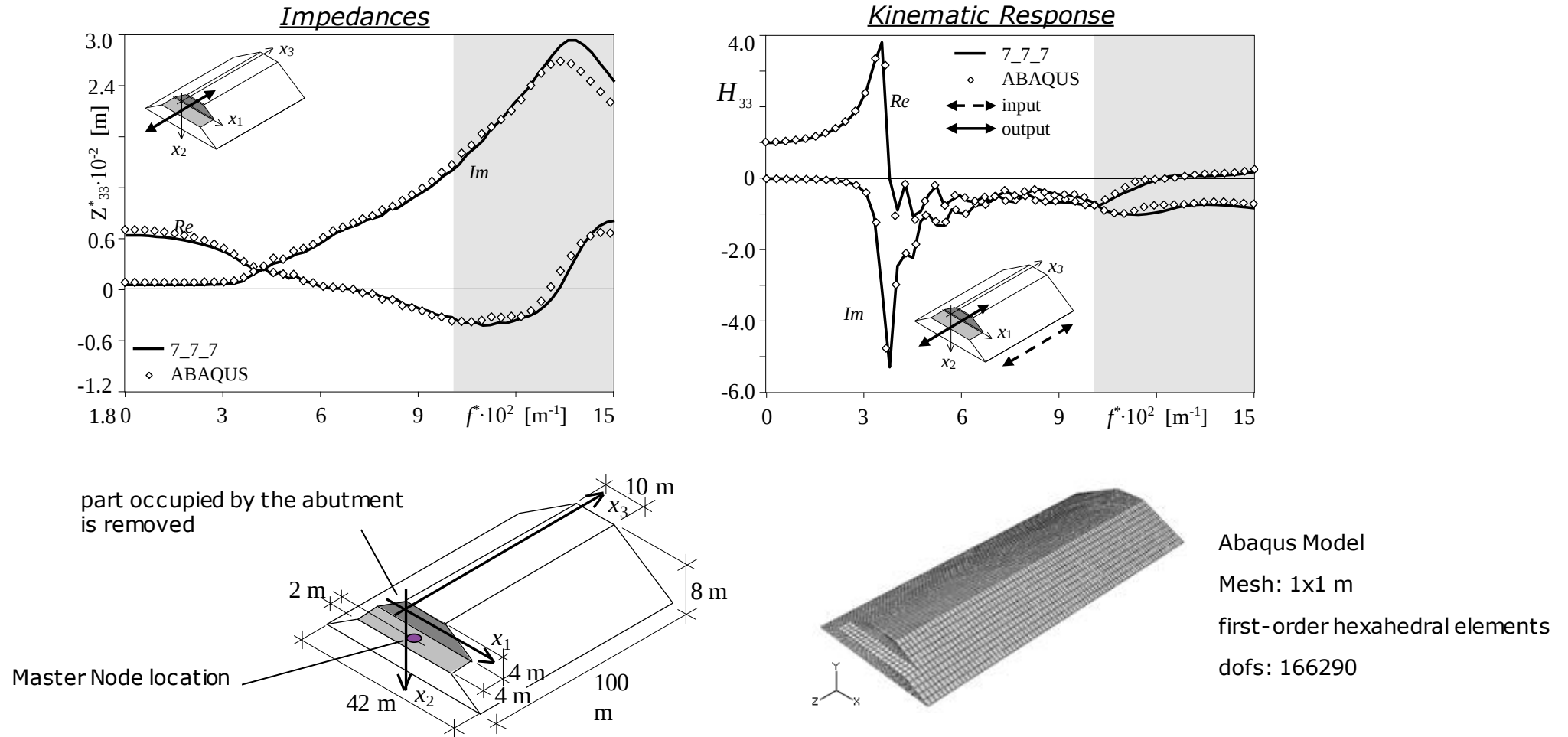
Soluzione del problema analitico attraverso la nuova formulazione 2D agli elementi finiti di ordine superiore

Il modello permette di valutare:

- Matrice di Impedenza Dinamica
- Moto del Nodo Master



Il modello è implementato in uno strumento Matlab e viene validato confrontando i risultati (funzioni di trasferimento e impedenza) con raffinati modelli 3D FEM:



Dezi F., Morici M., Carbonari S., Leoni G. (2012). Higher order model for the seismic response of bridge embankments. SOIL DYNAMICS AND EARTHQUAKE ENGINEERING, vol. 43

Outline

- Metodologie per l'analisi SSI
- Modello per l'analisi dinamica di fondazioni profonde
- Modello per l'analisi dinamica di rilevati
- **Conclusioni**

Modello per l'analisi dinamica di fondazioni profonde

- Il modello è in grado di riprodurre le funzioni di impedenza dinamica ottenute da raffinati modelli 3D ad elementi finiti
- Il modello è in grado di riprodurre la risposta cinematica del sistema terreno-fondazione, nonché le sollecitazioni cinematiche lungo i pali prodotte dalla propagazione delle onde sismiche sono valutate accuratamente
- Il modello costituisce uno strumento pratico che fornisce le funzioni di impedenza terreno-fondazione ed il moto di fondazione che possono essere utilizzati, nell'ambito dell'approccio per sottostrutture, per eseguire analisi dinamiche considerando gli effetti dell'interazione terreno-struttura

Modello per l'analisi dinamica di rilevati

- Il modello è in grado di riprodurre la risposta dinamica ottenuta dai modelli 3d ad elementi finiti riducendo l'onere computazionale in quanto la dimensione del problema numerico è sensibilmente inferiore a quella di un modello solido 3D agli elementi finiti
- Il modello permette di ottenere le impedenze dinamiche e le funzioni di risposta cinematica del rilevato e consente di eseguire analisi di interazione terreno-struttura considerando il contributo delle interazioni ponte-spalla-rilevato secondo un approccio per sottostrutture



Procedure analitiche e numeriche per la valutazione degli effetti di interazione terreno-struttura nella risposta sismica dei ponti

Michele Morici¹, Sandro Carbonari², Francesca Dezi³, Graziano Leoni¹

¹ *Università di Camerino*

² *Università Politecnica delle Marche*

³ *Università Degli studi di San Marino*

