مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۸، شماره‌ی ۲، ص. ۳۵-۴۳

Original Article

بررسی آثار برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه در بارگذاری لرزه‌یی سازه‌ها بخش دوم: حرکت‌های ورودی پی

محمدرضا فلامرز شیخ‌آبادی (کارشناس ارشد)
محسن غفوری آشتیانی* (استاد)
پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

در این نوشتار، با درنظرگرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه، رابطه‌یی برای تعیین تحریک لرزه‌یی سازه‌های مستقر بر دو نوع سیستم پی گسترده و منفرد ارائه شده است. برای این منظور، ابتدا تأثیرات شکل هندسی پی بر حرکت ورودی این دو نوع سیستم پی به‌صورت پارامتریک بررسی و سپس توابع تبدیل متناظر با حرکات ورودی این پی‌ها استخراج شده‌اند. همچنین بحثی پارامتریک برای مقایسه‌ی مؤلفه‌های دورانی و انتقالی ورودی دو نوع سیستم پی گسترده و منفرد انجام شده است. نتایج عددی نشان می‌دهند که مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی ورودی سازه با سیستم پی منفرد که دارای طبقات با دیافراگم صلب است، تقریباً برابر با مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی سازه‌یی مشابه با پی گسترده‌ی صلب است.

واژگان کلیدی: مؤلفه‌های دورانی، سرعت فاز، محورهای اصلی، هم‌گرائی، برهم‌کنش سینماتیک.

m.falamarz@gmail.com
mohsen.ashtiany@gmail.com

۱. مقدمه

برای تعیین پاسخ دینامیکی سازه‌ها ناشی از تحریکات لرزه‌یی معمولاً از حرکت‌های زمین در میدان آزاد به‌منظور بارگذاری دینامیکی سازه‌ها استفاده می‌شود. این در حالی است که برای سازه‌های با پی گسترده‌ی صلب، معمولاً ناشی از آثار برهم‌کنش خاک و سازه، تفاوت قابل‌توجهی بین حرکت‌های میدان آزاد زمین و حرکت‌های پی سازه‌ها وجود دارد،[۱و۲] که ماهیت و میزان این برهم‌کنش نه فقط به خصوصیات دینامیکی خاک و سازه، بلکه به سختی و ابعاد پی نیز بستگی دارد. چنانچه برهم‌کنش فقط ناشی از تفاوت در خصوصیات دینامیکی خاک و سازه باشد به «برهم‌کنش دینامیک» و چنانچه به شکل هندسی و صلبیت پی سازه مربوط باشد به «برهم‌کنش سینماتیک» معروف است.[۳-۶] برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه ناشی از تغییرات مکانی حرکت زمین در میدان آزاد است. درواقع، هنگامی‌که سازه‌یی با پی گسترده‌ی صلب بر روی سطح زمین ساخته می‌شود، به دلیل صلبیت پی نسبت به خاک مجاورش و عدم قابلیت تطابق خاک با حرکت میدان آزاد، پی سازه میانگینی از حرکت‌های میدان آزاد خاک را تجربه می‌کند که به این حرکت تغییریافته، «حرکت ورودی پی» می‌گویند. اثرات برهم‌کنش سینماتیک باعث کاهش محتوای بسامدی بخش بسامدهای بالای حرکت‌های انتقالی ورودی پی و منجر به تولید حرکت‌های دورانی در پایه‌ی سازه می‌شود. از این رو برهم‌کنش سینماتیک می‌تواند منجر به کاهش (افزایش) پاسخ‌های لرزه‌یی سازه‌های سخت و کوتاه (بلند) شود. این تغییر بارگذاری سازه‌ها هنگامی‌که پی در خاک مدفون باشد، حتی بیشتر هم خواهد شد و درنظرنگرفتن آن در طراحی‌ها را می‌توان به‌منزله‌ی نقصی در بارگذاری سازه‌یی درنظر گرفت.[۷و۸]

هدف این نوشتار، محاسبه‌ی مؤلفه‌های ورودی پی‌ها با درنظرگرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه در دو حوزه‌ی تاریخچه‌ی زمانی و بسامدی است. از این رو ابتدا فرایندی برای تعیین کلیه‌ی مؤلفه‌های ورودی پی، براساس نوع سیستم آن ارائه می‌شود. سپس به‌صورت پارامتریک، تأثیر شکل هندسی و نوع سیستم پی در چگونگی تغییر مؤلفه‌های ورودی بررسی و ارزیابی خواهد شد.

۲. تعیین «شتاب ورودی پی‌ها» با درنظرگرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه

در این بخش فرایند محاسبه‌ی مؤلفه‌های شتاب ورودی پی‌ها برای دو نوع سیستم پی ارائه می‌شود:

۱. سازه‌های با سیستم پی گسترده؛

۲. سازه‌های با سیستم پی منفرد.

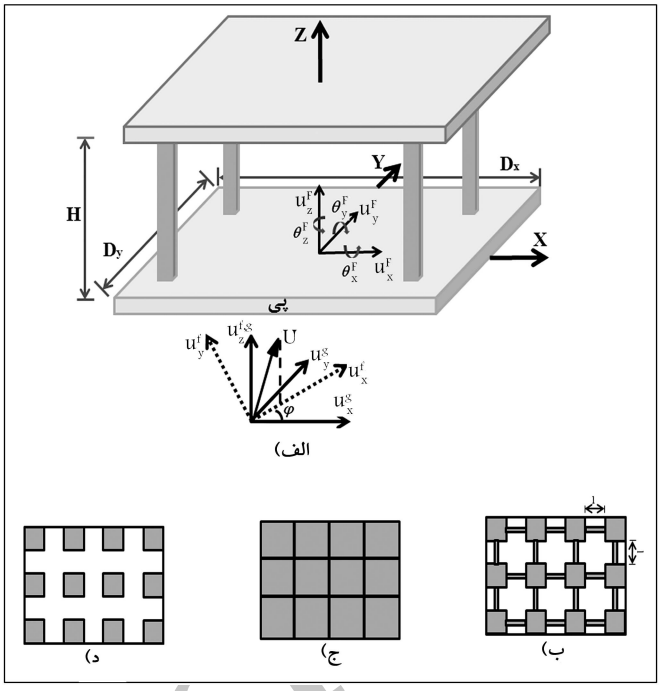
۱.۲. شتاب ورودی سازه‌های با سیستم پی گسترده

در صورتی‌که مجموعه‌یی از پی‌های منفرد همانند شکل ۱ب. با کلاف‌بندی مناسب

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۱۲/۱۰، اصلاحیه ۱۳۸۹/۶/۳، پذیرش ۱۳۸۹/۹/۲.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱. مدل پی و سازه‌ی درنظر گرفته شده.

و قوی به یکدیگر متصل باشند، می‌توان فرض کرد که این نوع سیستم پی، رفتاری سینماتیک تقریباً مشابه یک پی گسترده دارد. با فرض صلب‌بودن پی، پی گسترده‌ی شکل ۱ج را می‌توان حالت خاصی از پی‌های منفرد (مش‌ها) پیوسته با فاصله‌ی $l = 0$ فرض کرد و در هر دو حالت می‌توان شتاب ۶ مؤلفه ی ورودی را به‌صورت یکسان تخمین زد. اگر ۶ مؤلفه‌ی حرکتی در نقطه‌یی روی سطح پی (نقطه‌ی مرجع) $\{u^F\}^T = \{u_x^F, u_y^F, u_z^F, \theta_x^F \theta_y^F \theta_z^F\}$ باشند، جابجایی پی منفرد pاُم (مش pاُم) مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه خواهد شد:

$$U_p^F = \begin{Bmatrix} U_{xp}^F \\ U_{yp}^F \\ U_{zp}^F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_x^F - y_p\theta_z^F + z_p\theta_y^F \\ u_y^F + x_p\theta_z^F - z_p\theta_x^F \\ u_z^F - x_p\theta_y^F + y_p\theta_x^F \end{Bmatrix} \qquad (۱)$$

در صورتی‌که فرض شود خاک درکشش هم کار می‌کند و نیروی اصطکاک بین خاک و پی آن‌قدر زیاد است که لغزشی بین خاک و پی رخ نمی‌دهد، با اختصاص ۶ درجه‌ی آزادی به مرکز هر پی منفرد (مش)، معادله‌ی انرژی حاکم بر حرکت کلی پی با فرض بی‌جرم‌بودن آن مطابق رابطه‌ی ۲ است:

$$E = \sum_{p=1}^{N} \left[\frac{1}{2} k_{xp} \left(U_{xp}^F - u_{xp}^g \right)^2 + \frac{1}{2} k_{yp} \left(U_{yp}^F - u_{yp}^g \right)^2 + \frac{1}{2} k_{zp} \left(U_{zp}^F - u_{zp}^g \right)^2 \right] + \sum_{p=1}^{N} \left[\frac{1}{2} k_{\theta xp} \left(\theta_x^F - \theta_{xp}^g \right)^2 + \frac{1}{2} k_{\theta yp} \left(\theta_y^F - \theta_{yp}^g \right)^2 + \frac{1}{2} k_{\theta zp} \left(\theta_z^F - \theta_{zp}^g \right)^2 \right] \qquad (۲)$$

که در آن:

$$\{u_p^g\}^T = \{u_{xp}^g, u_{yp}^g, u_{zp}^g, \theta_{xp}^g, \theta_{yp}^g, \theta_{zp}^g\}$$

و $\{k_{xp}, k_{yp}, k_{zp}, k_{\theta xp}, k_{\theta yp}, k_{\theta zp}\}$ به‌ترتیب مؤلفه‌های حرکتی زمین در راستای محورهای اصلی سازه و سختی‌های متناظر با مش pاُم هستند. با استفاده از اصل کمینه‌ی انرژی، بهینه‌ترین حرکت پی که به ازای آن کمترین انرژی مصرف شود، به‌صورت رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial E}{\partial u_x^F} = \frac{\partial E}{\partial u_y^F} = \frac{\partial E}{\partial u_z^F} = \frac{\partial E}{\partial \theta_x^F} = \frac{\partial E}{\partial \theta_y^F} = \frac{\partial E}{\partial \theta_z^F} = 0 \qquad (۳)$$

با حل معادلات حاصل از رابطه‌ی ۳، روابط محاسبه‌ی حرکت‌های ورودی پی مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شوند:

$$[K] \cdot \left\{u^F\right\} = \{F^g\} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 & 0 & \sum_{p=1}^{N} z_p k_{yp} & -\sum_{i=1}^{N} y_p k_{xp} \\ & K_y & 0 & -\sum_{p=1}^{N} z_p k_{yp} & 0 & \sum_{p=1}^{N} x_p k_{yp} \\ & & K_z & \sum_{p=1}^{N} y_p k_{zp} & -\sum_{p=1}^{N} x_p k_{zp} & 0 \\ & & & K_{\theta x} & -\sum_{p=1}^{N} y_p x_p k_{zp} & -\sum_{p=1}^{N} z_p x_p k_{yp} \\ & Symmetric & & & K_{\theta y} & -\sum_{p=1}^{N} z_p y_p k_{xp} \\ & & & & & K_{\theta z} \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{Bmatrix} u_x^F \\ u_y^F \\ u_z^F \\ \theta_x^F \\ \theta_y^F \\ \theta_z^F \end{Bmatrix} = \sum_{p=1}^{N} \left(\left[\hat{K}_p\right] \cdot \{u_p^g\} \right) \qquad (۴)$$

که در آن درایه‌های روی قطر اصلی ماتریس مشخصه‌ی پی $[K]$ طبق روابط ۵ برابرند با:

$$K_x = \sum_{p=1}^{N} k_{xp} \qquad K_{\theta x} = \sum_{p=1}^{N} \left(k_{\theta xp} + z_p^2 k_{yp} + y_p^2 k_{zp} \right)$$

$$K_y = \sum_{p=1}^{N} k_{yp} \qquad K_{\theta y} = \sum_{p=1}^{N} \left(k_{\theta yp} + z_p^2 k_{xp} + x_p^2 k_{zp} \right)$$

$$K_z = \sum_{p=1}^{N} k_{zp} \qquad K_{\theta z} = \sum_{p=1}^{N} \left(k_{\theta zp} + x_p^2 k_{yp} + y_p^2 k_{xp} \right) \qquad (۵)$$

و ماتریس تأثیر پی منفرد pاُم $[\hat{K}_p]$، نیز مطابق رابطه‌ی ۶ برابر است با:

$$\left[\hat{K}_p\right] = \begin{bmatrix} k_{xp} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{yp} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{zp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_{yp}z_p & k_{zp}y_p & k_{\theta xp} & 0 & 0 \\ k_{xp}z_p & 0 & -k_{zp}x_p & 0 & k_{\theta yp} & 0 \\ -k_{xp}y_p & k_{yp}x_p & 0 & 0 & 0 & k_{\theta zp} \end{bmatrix} \qquad (۶)$$

حال درصورتی‌که جهت غالب انتشار امواج زلزله مطابق با شکل ۱الف به‌طور مایل و با زاویه‌ی φ نسبت به محور x سازه باشد، کافی است راستای معادل حرکت زمین در امتداد محورهای اصلی سازه محاسبه شود. برای این منظور اگر مؤلفه‌های حرکتی زمین (میدان

Archive of SID
www.SID.ir

آزاد) در جهت انتشار برابر $\{u_p^f\}^T = \{u_{x'p}^f, u_{y'p}^f, u_{z'p}^f, \theta_{x'p}^f \theta_{y'p}^f \theta_{z'p}^f\}$، و $T(\varphi)$ ماتریس کسینوس هادی باشد، مؤلفه‌های حرکتی زمین در راستای محورهای اصلی سازه $\{u_p^g\} = [T(\varphi)] \cdot \{u_p^f\}$ و چگالی طیفی‌های متناظر با آن‌ها $\{S_{pq}^g(\omega)\}_{۶\times۶} = [T(\omega)] \cdot \{S_{pq}^f(\omega)\}_{۶\times۶} \cdot [T(\varphi)]^T$ خواهند شد.

با توجه به این فرضیات، چگالی طیفی ورودی پی مطابق رابطه‌ی ۷ محاسبه خواهد شد:

$$\left\{S_\varphi^F(\omega)\right\}_{۶\times۶} = [K]^{-۱}_{۶\times۶} \cdot \left\{\sum_{p=۱}^{N}\sum_{q=۱}^{N}\left(\left[\hat{K}_p\right]_{۶\times۶} \cdot \left\{S_{pq}^g(\omega)\right\}_{۶\times۶} \cdot \left[\hat{K}_q\right]_{۶\times۶}^T\right)\right\} \cdot \left[[K]^{-۱}_{۶\times۶}\right]^T \quad (۷)$$

در حالت خاص، برای یک پی سطحی هنگامی‌که حرکت زمین در راستای محورهای اصلی سازه ($\varphi = ۰$) باشد، با بازنویسی رابطه‌ی ۴ برحسب شتاب ورودی پی و با فرضیات یکسان‌بودن سختی‌های متناظر مش‌ها و قرارگرفتن مبداء دستگاه مختصات در محل مرکز سختی پی، درایه‌های غیرقطری ماتریس $[K]$ همگی صفر خواهند شد.

در این‌صورت شتاب ورودی پی از رابطه‌ی ۸ محاسبه خواهد شد:

$$\left\{\ddot{u}^F\right\} = \left\{\begin{array}{c} \frac{۱}{N}\sum_{p=۱}^{N}\ddot{u}_{xp}^g \\ \frac{۱}{N}\sum_{p=۱}^{N}\ddot{u}_{yp}^g \\ \frac{۱}{N}\sum_{p=۱}^{N}\ddot{u}_{zp}^g \\ \frac{k_{\theta x}}{K_{\theta x}}\sum_{p=۱}^{N}\ddot{\theta}_{xp}^g + \frac{k_z}{K_{\theta x}}\sum_{p=۱}^{N} y_p\ddot{u}_{zp}^g \\ \frac{k_{\theta y}}{K_{\theta y}}\sum_{p=۱}^{N}\ddot{\theta}_{yp}^g - \frac{k_z}{K_{\theta y}}\sum_{p=۱}^{N} x_p\ddot{u}_{zp}^g \\ \frac{k_{\theta z}}{K_{\theta z}}\sum_{p=۱}^{N}\ddot{\theta}_{zp}^g - \frac{k_x}{K_{\theta z}}\sum_{p=۱}^{N} y_p\ddot{u}_{xp}^g + \frac{k_y}{K_{\theta z}}\sum_{p=۱}^{N} x_p\ddot{u}_{yp}^g \end{array}\right\}_{۶\times۱} \quad (۸)$$

درایه‌های قطری ماتریس چگالی طیفی شتاب ورودی $\{S_۰^F(\omega)\}$ متناظر با رابطه‌ی ۸، در صورتی‌که تابع هم‌گرائی γ_{pq} و هم‌بستگی ρ_{xy}، به‌ترتیب برابر با $S_{pq}/\sqrt{S_{pp}S_{qq}}$ و $S_{xy}/\sqrt{S_{xx}S_{yy}}$ درنظرگرفته شوند، طبق تعریف رابطه‌ی ۹:

$$\begin{aligned} A_N &= \left(N + ۲\sum_{p=۱}^{N-۱}\sum_{q=p+۱}^{N}\mathrm{Re}\,al\,(\gamma_{pq})\right) \\ A_x &= \left(\sum_{p=۱}^{N} x_p^۲ + ۲\sum_{p=۱}^{N-۱}\sum_{q=p+۱}^{N} x_p x_q\,\mathrm{Re}\,al\,(\gamma_{pq})\right) \\ A_y &= \left(\sum_{p=۱}^{N} y_p^۲ + ۲\sum_{p=۱}^{N-۱}\sum_{p=q+۱}^{N} y_p y_q\,\mathrm{Re}\,al\,(\gamma_{pq})\right) \\ A_{xy} &= \left(\sum_{p=۱}^{N}\sum_{q=۱}^{N} x_p y_q \gamma_{pq}\right) \end{aligned} \quad (۹)$$

و با فرض ناهمبسته بودن مؤلفه‌های دورانی و انتقالی زلزله نسبت به هم ($E[\ddot{\theta}^g\ddot{u}^g] = ۰$)، برابر با رابطه‌ی ۱۰ خواهند شد:

$$diag\left\{S_۰^F(\omega)\right\}_{۶\times۶} = \left\{\begin{array}{c} \frac{S_x^g(\omega)}{N^۲}\cdot A_N \\ \frac{S_y^g(\omega)}{N^۲}\cdot A_N \\ \frac{S_z^g(\omega)}{N^۲}\cdot A_N \\ \frac{k_{\theta x}^۲ S_{\theta x}^g(\omega)}{\left(K_{\theta x}|_{z=۰}\right)^۲}\cdot A_N + \frac{k_z^۲ S_z^g(\omega)}{\left(K_{\theta x}|_{z=۰}\right)^۲}\cdot A_y \\ \frac{k_{\theta y}^۲ S_{\theta y}^g(\omega)}{\left(K_{\theta y}|_{z=۰}\right)^۲}\cdot A_N + \frac{k_z^۲ S_z^g(\omega)}{\left(K_{\theta y}|_{z=۰}\right)^۲}\cdot A_x \\ \left[\begin{array}{c} \frac{k_{\theta z}^۲ S_{\theta z}^g(\omega)}{K_{\theta z}^۲}\cdot A_N + \frac{k_x^۲ S_x^g(\omega)}{K_{\theta z}^۲}\cdot A_y + \frac{k_y^۲ S_y^g(\omega)}{K_{\theta z}^۲}\cdot A_x \\ -\rho_{xy}\frac{k_x k_y\sqrt{S_y^g(\omega)S_x^g(\omega)}}{K_{\theta z}^۲}\cdot A_{xy} \end{array}\right] \end{array}\right\} \quad (۱۰)$$

که در آن $S_x^g(\omega), S_y^g(\omega), S_z^g(\omega)$ به‌ترتیب چگالی طیفی مؤلفه‌های افقی زلزله در راستای محورهای z، y و x هستند. در صورت نبود چگالی طیفی مؤلفه‌های دورانی زلزله می‌توان چگالی طیفی مؤلفه‌های شتاب گهواره‌یی زلزله را برابر با $S_{\theta x}^g(\omega) = S_{\theta y}^g(\omega) = \omega^۲ S_z^g(\omega)/V_A^۲$ و چگالی طیفی مؤلفه‌ی شتاب پیچشی زلزله را نیز برابر با $S_{\theta z}^g(\omega) = (\omega^۲/۴V_A^۲)(S_x^g(\omega) + S_y^g(\omega))$ درنظر گرفت،[۹] که در آن‌ها V_A سرعت ظاهری متناظر امواج زلزله است. به این ترتیب می‌توان ۶ مؤلفه‌ی چگالی طیفی ورودی پی را محاسبه کرد. همچنین در صورتی‌که فرض شود راستای انتشار امواج لرزه‌یی، هم‌امتداد با محورهای اصلی تحریک باشد؛ ρ_{xy} برابر صفر می‌شود. با وجود این، با توجه به اینکه در حال حاضر تحلیل سازه‌ها در حوزه‌ی بسامدی تحت تحریک اثر هم‌زمان ۶ مؤلفه‌ی زلزله ممکن نیست، از این رو در ادامه، روشی در حوزه‌ی تاریخچه‌ی زمانی برای محاسبه‌ی ۶ مؤلفه‌ی ورودی با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ ارائه می‌شود. ابتدا با توجه به رابطه‌ی ۱۱ و با فرض $\rho_{xy} = ۰$، رابطه‌ی ۱۰ به‌صورت رابطه‌ی ۱۱ بازنویسی می‌شود:

$$T^F(\omega) = \left\{\begin{array}{c} \left(T_x^F(\omega)\right)^۲ \\ \left(T_y^F(\omega)\right)^۲ \\ \left(T_z^F(\omega)\right)^۲ \\ \left(T_{\theta x}^F(\omega)\right)^۲ \\ \left(T_{\theta y}^F(\omega)\right)^۲ \\ \left(T_{\theta z}^F(\omega)\right)^۲ \end{array}\right\} \equiv \left\{\begin{array}{c} \frac{S_x^F(\omega)}{S_x^g(\omega)} \\ \frac{S_y^F(\omega)}{S_y^g(\omega)} \\ \frac{S_z^F(\omega)}{S_z^g(\omega)} \\ \frac{S_{\theta x}^F(\omega)}{S_z^g(\omega)} \\ \frac{S_{\theta y}^F(\omega)}{S_z^g(\omega)} \\ \frac{S_{\theta z}^F(\omega)}{S_y^g(\omega)} \end{array}\right\}$$

$$= \left\{\begin{array}{c} \frac{A_N}{N^۲} \\ \frac{A_N}{N^۲} \\ \frac{A_N}{N^۲} \\ \frac{k_{\theta x}^۲\omega^۲}{V_A^۲\left(K_{\theta x}|_{z=۰}\right)^۲}\cdot A_N + \frac{k_z^۲}{\left(K_{\theta x}|_{z=۰}\right)^۲}\cdot A_y \\ \frac{k_{\theta y}^۲\omega^۲}{V_A^۲\left(K_{\theta y}|_{z=۰}\right)^۲}\cdot A_N + \frac{k_z^۲}{\left(K_{\theta y}|_{z=۰}\right)^۲}\cdot A_x \\ \frac{k_{\theta z}^۲\omega^۲\left(۱+r_{xy}^۲(\omega)\right)}{۴V_A^۲K_{\theta z}^۲}\cdot A_N + \frac{k_x^۲ r_{xy}^۲(\omega)}{K_{\theta z}^۲}\cdot A_y + \frac{k_y^۲}{K_{\theta z}^۲}\cdot A_x \end{array}\right\} \quad (۱۱)$$

که در آن نسبت $r_{xy}(\omega)$ برابر با $\left|\ddot{u}_x^g(i\omega)\right| / \left|\ddot{u}_y^g(i\omega)\right|$ است. با فرض اینکه فاز

Archive of SID

www.SID.ir

حرکتی مؤلفه‌های ورودی پی برابر با رابطه‌ی ۱۲ باشد:

$$\varphi^F(\omega)=\varphi^g(\omega)\pm\psi\varphi^T(\omega) \qquad (۱۲)$$

که در آن $\varphi^g(\omega)$ فاز حرکتی مؤلفه‌های میدان آزاد، ψ عددی از بازه‌ی $0\le\psi\le 1/2$، و $\varphi^T(\omega)$ بیان‌گر تغییرات فاز ورودی پی برابر با: $\omega D_x/V_A$ است (D_x بُعد پی در جهت انتشار امواج است). به این ترتیب تبدیل فوریه‌ی مؤلفه‌های ورودی پی مطابق رابطه‌ی ۱۳ خواهند شد:

$$\begin{Bmatrix}\ddot{u}_x^F(i\omega)\\ \ddot{u}_y^F(i\omega)\\ \ddot{u}_z^F(i\omega)\\ \ddot{\theta}_x^F(i\omega)\\ \ddot{\theta}_y^F(i\omega)\\ \ddot{\theta}_z^F(i\omega)\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}T_x^F(\omega)\cdot\ddot{u}_x^g(i\omega)\cdot e^{\pm i\psi\varphi_x^T(\omega)}\\ T_y^F(\omega)\cdot\ddot{u}_y^g(i\omega)\cdot e^{\pm i\psi\varphi_y^T(\omega)}\\ T_z^F(\omega)\cdot\ddot{u}_z^g(i\omega)\cdot e^{\pm i\psi\varphi_z^T(\omega)}\\ T_{\theta x}^F(\omega)\cdot\frac{\left|\ddot{u}_z^g(i\omega)\right|}{\left|\ddot{\theta}_x^g(i\omega)\right|}\cdot\ddot{\theta}_x^g(i\omega)\cdot e^{\pm i\psi\varphi_{\theta x}^T(\omega)}\\ T_{\theta y}^F(\omega)\cdot\frac{\left|\ddot{u}_z^g(i\omega)\right|}{\left|\ddot{\theta}_y^g(i\omega)\right|}\cdot\ddot{\theta}_y^g(i\omega)\cdot e^{\pm i\psi\varphi_{\theta y}^T(\omega)}\\ T_{\theta z}^F(\omega)\cdot\frac{\left|\ddot{u}_y^g(i\omega)\right|}{\left|\ddot{\theta}_z^g(i\omega)\right|}\cdot\ddot{\theta}_z^g(i\omega)\cdot e^{\pm i\psi\varphi_{\theta z}^T(\omega)}\end{Bmatrix} \qquad (۱۳)$$

با محاسبه‌ی معکوس تبدیل فوریه‌ی رابطه‌ی ۱۳، مجموعه‌یی از ۶ مؤلفه‌ی تاریخچه‌ی زمانی ورودی پی به‌دست می‌آیند، که از آن‌ها می‌توان برای تحریک سازه‌ی موردنظر و تعیین بحرانی‌ترین پاسخ اعضای سازه در هر بارگذاری استفاده کرد.

۲.۲. شتاب ورودی سازه‌های دارای سیستم پی منفرد با کلاف‌بندی ضعیف

برای سازه‌هایی با سیستم پی منفرد مطابق شکل ۱د، در صورتی‌که طبقات سازه دارای دیافراگم صلب در صفحه نباشند، تحریک چنین سازه‌هایی در حالت کلی مشابه سازه‌های چندتکیه‌گاهی انجام می‌گیرد. در غیر این‌صورت می‌توان مؤلفه‌های حرکتی ورودی سازه را با میانگین‌گیری بر روی مؤلفه‌های حرکتی اولین طبقه‌ی آن محاسبه کرد. به این ترتیب با فرضیات و روشی مشابه حالت پی گسترده، مؤلفه‌های شتاب شبه‌استاتیک سازه با فرض اینکه سختی‌های پیچشی و انتقالی ستون pام به‌ترتیب برابر با $k_{xp}=k_{yp}=k, k_{\theta p}=k_\theta$ باشند، مطابق رابطه‌ی ۱۴ محاسبه خواهند شد:

$$\left\{\ddot{U}^{qs}\right\}=\begin{Bmatrix}\ddot{u}_x^{qs}\\ \ddot{u}_y^{qs}\\ \ddot{\theta}_z^{qs}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\frac{\sum_{p=1}^{N}\left(\ddot{u}_{xp}^g+h_1\ddot{\theta}_y^g\right)}{N}\\ \frac{\sum_{p=1}^{N}\left(\ddot{u}_{yp}^g+h_1\ddot{\theta}_x^g\right)}{N}\\ \frac{k}{K_\theta}\sum_{p=1}^{N}\left(\left[\ddot{u}_{yp}^g+h_1\ddot{\theta}_x^g\right]\cdot x_p+\left[\ddot{u}_{xp}^g+h_1\ddot{\theta}_y^g\right]\cdot y_p\right)+\frac{k_\theta}{K_\theta}\sum_{p=1}^{N}\left(\ddot{\theta}_{zp}^g\right)\end{Bmatrix} \qquad (۱۴)$$

که در آن h_1 ارتفاع طبقه‌ی اول با دیافراگم صلب سازه از تراز پایه است و $\sum_{p=1}^{N}\left(kx_p^2+ky_p^2+k_\theta\right)$، نیز برابر با K_θ درنظر گرفته می‌شود. با فرض $k_\theta=GJ/h_1$ و $k=12EI/h_1^3$ که در آن‌ها E,G,J,I به‌ترتیب ممان سطح حول محور x و یا y، ممان قطبی سطح، مدول برشی و مدول کشسانی هر ستون هستند و به این ترتیب با تعریف نسبت‌های $K_\theta/k=\sum_{p=1}^{N}(x_p^2+y_p^2)+Nh_1^2/12(1+\nu)$ که به‌ترتیب برابر با $1/r_{k_\theta}, 1/r_k$ و $K_\theta/k_\theta=(12(1+\nu)/h_1^2)\cdot\sum_{p=1}^{N}(x_p^2+y_p^2)+N$ هستند (ν ضریب پواسون ستون است)، چگالی طیفی مؤلفه‌های شتاب شبه استاتیک متناظر با رابطه‌ی ۱۴ با فرض ناهمبسته‌بودن مؤلفه‌های حرکتی زمین، مطابق رابطه‌ی ۱۵ محاسبه خواهند شد:

$$S^{qs}(\omega)=\begin{Bmatrix}\frac{S_x^g(\omega)+h_1^2S_{\theta y}^g(\omega)}{N^2}A_N\\ \frac{S_y^g(\omega)+h_1^2S_{\theta x}^g(\omega)}{N^2}A_N\\ \begin{bmatrix}r_k^2\left(\left[S_y^g(\omega)+h_1^2S_{\theta x}^g(\omega)\right]\cdot A_x\right.\\ \left.+\left[S_x^g(\omega)+h_1^2S_{\theta y}^g(\omega)\right]\cdot A_y\right)\\ +r_{k_\theta}^2S_{\theta z}^g(\omega)A_N\end{bmatrix}\end{Bmatrix} \qquad (۱۵)$$

به‌سادگی می‌توان نشان داد که تابع تبدیل متناظر با رابطه‌ی ۱۵ مطابق رابطه‌ی ۱۶ است:

$$T^{qs}(\omega)=\begin{Bmatrix}\left(T_x^{qs}(\omega)\right)^2\\ \left(T_y^{qs}(\omega)\right)^2\\ \left(T_{\theta z}^{qs}(\omega)\right)^2\end{Bmatrix}\equiv\begin{Bmatrix}\frac{S_x^{qs}(\omega)}{S_x^g(\omega)}\\ \frac{S_y^{qs}(\omega)}{S_y^g(\omega)}\\ \frac{S_{\theta z}^{qs}(\omega)}{S_y^g(\omega)}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\frac{1+h_1^2\omega^2r_{zx}^2(\omega)/V_A^2}{N^2}A_N\\ \frac{1+h_1^2\omega^2r_{zy}^2(\omega)/V_A^2}{N^2}A_N\\ \begin{bmatrix}r_k^2\left(\left[1+h_1^2\omega^2r_{zy}^2(\omega)/V_A^2\right]\cdot A_x\right.\\ \left.+\left[r_{xy}^2(\omega)+h_1^2\omega^2r_{zy}^2(\omega)/V_A^2\right]\cdot A_y\right)\\ +\frac{r_{k_\theta}^2\omega^2\left(1+r_{xy}^2(\omega)\right)}{4V_A^2}A_N\end{bmatrix}\end{Bmatrix} \qquad (۱۶)$$

که در آن نسبت‌های $r_{zx}(\omega), r_{zy}(\omega)$ به‌ترتیب برابر با $\left|\ddot{u}_z^g(i\omega)\right|/\left|\ddot{u}_y^g(i\omega)\right|$ و $\left|\ddot{u}_z^g(i\omega)\right|/\left|\ddot{u}_x^g(i\omega)\right|$ هستند. به این ترتیب با توجه به رابطه‌ی ۱۶، تبدیل فوریه‌ی ۳ مؤلفه‌ی شتاب اولین طبقه با دیافراگم صلب سازه مطابق رابطه‌ی ۱۷ محاسبه خواهد شد:

$$\begin{Bmatrix}\ddot{u}_x^{qs}(i\omega)\\ \ddot{u}_y^{qs}(i\omega)\\ \ddot{\theta}_z^{qs}(i\omega)\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}T_x^{qs}(\omega)\cdot\ddot{u}_x^g(i\omega)\cdot e^{\pm i\psi\varphi_x^T}\\ T_y^{qs}(\omega)\cdot\ddot{u}_y^g(i\omega)\cdot e^{\pm i\psi\varphi_y^T}\\ T_{\theta z}^{qs}(\omega)\cdot\frac{\left|\ddot{u}_y^g(i\omega)\right|}{\left|\ddot{\theta}_z^g(i\omega)\right|}\cdot\ddot{\theta}_z^g(i\omega)\cdot e^{\pm i\psi\phi_{\theta z}^T}\end{Bmatrix} \qquad (۱۷)$$

با محاسبه‌ی معکوس تبدیل فوریه‌ی رابطه‌ی ۱۷، مجموعه‌یی از ۳ مؤلفه‌ی تاریخچه‌ی زمانی ورودی پی به‌دست می‌آید. برای محاسبه‌ی حرکت‌های ورودی طبقات دیگر

Archive of SID

www.SID.ir

این سازه، می‌توان از تابع تبدیل رابطه‌ی ۱۸ استفاده کرد:

$$T_j^{qs}(\omega)=\left\{\begin{array}{c}\left(T_{xj}^{qs}(\omega)\right)^{2}\\ \left(T_{yj}^{qs}(\omega)\right)^{2}\\ \left(T_{\theta zj}^{qs}(\omega)\right)^{2}\end{array}\right\}= \left\{\begin{array}{c}\frac{1+h_j^2\omega^2 r_{zx}^2(\omega)/V_A^2}{N^2}A_N\\ \frac{1+h_j^2\omega^2 r_{zy}^2(\omega)/V_A^2}{N^2}A_N\\ \left[\begin{array}{c} r_k^2\left(\left[1+h_1^2\omega^2 r_{zy}^2(\omega)/V_A^2\right]\cdot A_x\right.\\ \left.+\left[r_{xy}^2(\omega)+h_1^2\omega^2 r_{zy}^2(\omega)/V_A^2\right]\cdot A_y\right)\\ +\frac{r_{k_\theta}^2\omega^2\left(1+r_{xy}^2(\omega)\right)}{4V_A^2}A_N\end{array}\right]\end{array}\right\} \qquad (18)$$

که در آن زیرنویس j بیان‌گر شماره‌ی طبقه‌ی سازه و h_j نیز ارتفاع طبقه‌ی jاُم از تراز پایه است. به این ترتیب از رابطه‌ی ۱۸ می‌توان برای تعیین مؤلفه‌های حرکت سینماتیک طبقات سازه‌های دارای دیافراگم کف صلب و مستقر بر روی سیستم پی منفرد (با کلاف‌بندی ضعیف) استفاده کرد.

۳. بررسی تأثیر ابعاد پی بر شتاب ورودی سازه‌ها

با توجه به تأثیر نوع و شکل هندسی پی بر مؤلفه‌های انتقالی و دورانی، در این بخش تأثیرات طول، نسبت ابعادی پی‌ها و جهت تحریک بر ورودی سازه‌ها، برای پی‌های با مشخصات داده‌شده در جدول ۱، تحت تأثیر ۶ مؤلفه‌ی زلزله بررسی شده‌اند. برای بررسی اثرات نسبت ابعادی بر ورودی پی‌ها، از پی‌های A، C، E و F استفاده شده است که به‌ترتیب دارای نسبت طول به عرض ۱، ۲، ۳ و ۴ هستند. همچنین برای بررسی اثرات طول بُعد بر ورودی پی‌ها، ورودی پی‌های A و B، و به‌منظور بررسی جهت انتشار امواج نیز ورودی پی‌های C و D با هم مقایسه شده‌اند.

در این مطالعه محور x هم‌راستا با جهت اصلی انتشار امواج لرزه‌یی فرض شده و از تابع هم‌گرائی در رابطه‌ی ۱۹، برای تخمین تغییرات مکانی حرکت زمین و همبستگی بین دو نقطه‌ی p و q روی سطح زمین، استفاده شده است:[۱۰]

$$\gamma_{pq}(x,y,i\omega)=|\gamma_{pq}|\exp\left(-\frac{i\omega x}{V_A}\right)$$
$$=\exp\left[-\left(\alpha_1(\omega)x^2+\alpha_2(\omega)y^2\right)\omega\right]\exp\left(-\frac{i\omega x}{V_A}\right) \qquad (19)$$

که در آن $|\gamma_{pq}|$ و $\exp(-i\omega x/V_A)$ به ترتیب بیان‌گر فقدان همبستگی و اختلاف فاز بین دو نقطه‌ی p و q است و:

$$\alpha_l(\omega)=\frac{a_l}{\ln(\omega)+b_l}\qquad \omega\geq 0.314\,\mathrm{rad/s}\qquad l=1,2 \qquad (20)$$

جدول ۱. مشخصات پی‌های بررسی‌شده.

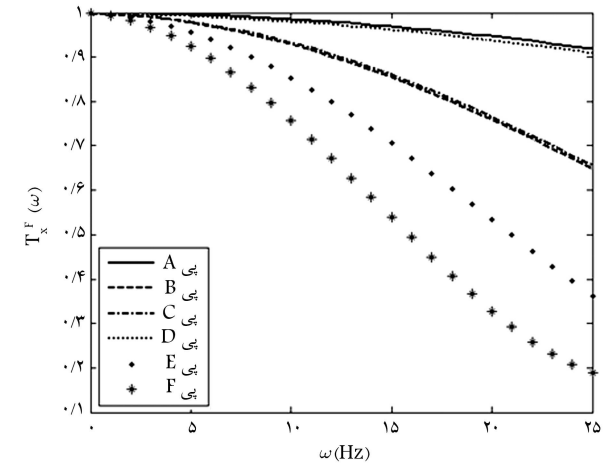
مشخصات پی‌ها	پی A	پی B	پی C	پی D	پی E	پی F
D_x-m	۲۰	۴۰	۴۰	۲۰	۶۰	۸۰
D_y-m	۲۰	۴۰	۲۰	۴۰	۲۰	۲۰
N_x	۲	۴	۴	۲	۶	۸
N_y	۲	۴	۲	۴	۲	۲
N	۴	۱۶	۸	۸	۱۲	۱۶

در این‌جا $b_l=2$ و $a_l=5\times10^{-6}$ (کم‌ترین همگرائی) فرض شده و سرعت ظاهری برابر با $V_A=1-2\,\mathrm{Km/s}$ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین $r_{xy}(\omega)=r_{zy}(\omega)=r_{zx}(\omega)=1$ فرض می‌شوند (شایان ذکر است استفاده از فرضیاتی به جز آن‌هایی که در این نوشتار درنظرگرفته شده‌اند، نتایج به‌دست‌آمده در ادامه می‌تواند متفاوت باشد).

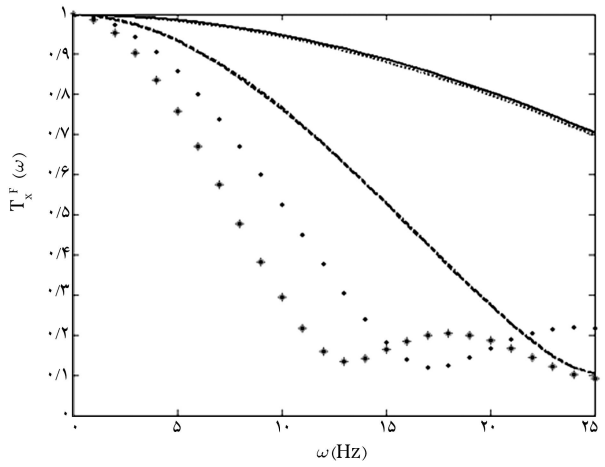
به‌منظور مقایسه بین ورودی‌های حالت سازه با پی گسترده و سازه با پی منفرد (با کلاف‌بندی ضعیف)، تعداد پی‌های منفرد برابر با تعداد مش‌های پی گسترده و هم‌مرکز با آن‌ها درنظرگرفته شده است (جدول ۱). همچنین برای محاسبه‌ی سختی فنرهای زیر هر پی منفرد (مش) فرض شده است که پی‌ها بر روی ساختگاه با خاک نرم به مشخصات $\nu_s=0.38, G=74\,\mathrm{Mpa}$ مستقر شده‌اند[۱۱] و همچنین فرض می‌شود ارتفاع طبقه‌ی اول سازه دارای طبقات با دیافراگم صلب و برابر با ۵ متر و ستون‌های سازه، بتنی و دارای ضریب پواسون برابر با $\nu_c=0.2$ باشند.

۱.۳. بررسی مؤلفه‌ی شتاب انتقالی ورودی پی

شکل‌های ۲ و ۳ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌ی انتقالی سیستم پی گسترده و منفرد (سازه‌ی دارای طبقات با دیافراگم صلب) در راستای محور x،



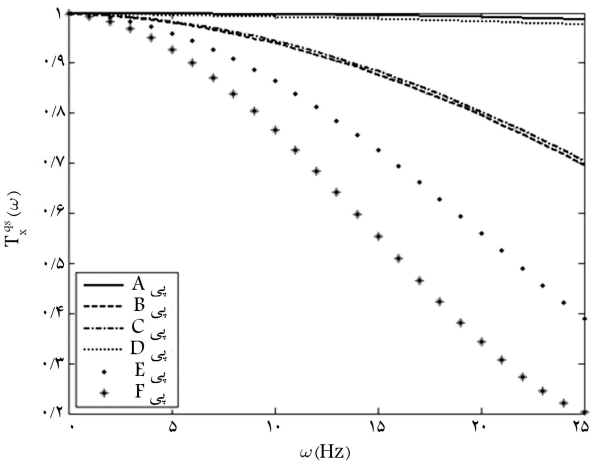
الف) V_A=۲ Km/s؛



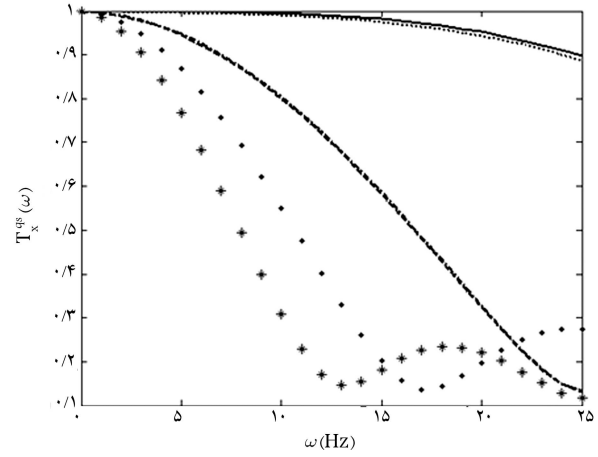
ب) V_A=۱ Km/s.

شکل ۲. بررسی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌ی انتقالی سیستم پی گسترده در راستای محور x براساس شکل هندسی سازه در پلان.

www.SID.ir



الف) V_A=۲ Km/s؛



ب) V_A=۱ Km/s.

شکل ۳. بررسی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌ی انتقالی سیستم پی منفرد دارای طبقه‌ی اول با دیافراگم صلب در راستای محور x براساس شکل هندسی سازه در پلان.

براساس شکل هندسی سازه در پلان و سرعت‌های فاز ۱ و ۲ کیلومتر بر ثانیه هستند. همان‌طورکه در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود به ازای یک سرعت ظاهری ثابت، با افزایش بسامد تحریک و بُعد پی در جهت انتشار امواج لرزه‌یی (D_x)، تابع تبدیل T_x روندی نزولی دارد. همچنین با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود هرچه بُعد پی در جهت انتشار امواج لرزه‌یی بیشتر باشد، روند کاهش سریع‌تر است و لذا می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش بُعد سازه، دامنه‌ی مؤلفه‌ی انتقالی ورودی پی با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد و مقدار این کاهش برای سیستم پی گسترده بیش از سیستم پی منفرد است.

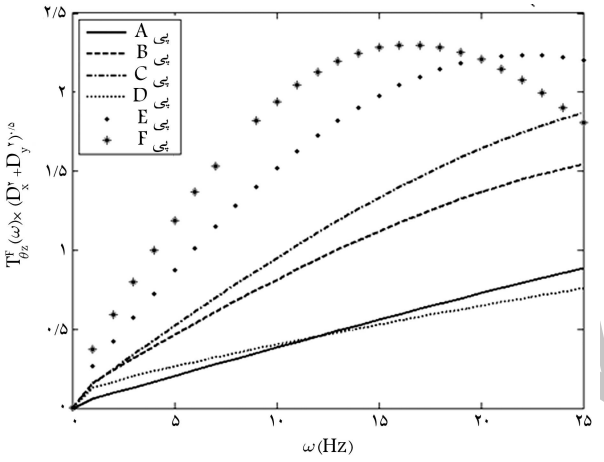
با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، اگرچه به‌نظر می‌رسد که برای سازه‌های با سیستم پی گسترده‌ی صلب یا سیستم پی منفرد (با دیافراگم صلب) با بُعد کمتر از ۴۰ متر، درنظرگرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه لزومی ندارد، ولی برای سازه‌های با طول بُعد بیش از ۴۰ متر، درنظرگرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه حائز اهمیت است و می‌تواند منجر به کاهش قابل‌توجه سطح نیروی وارد بر این سازه‌ها شود.

همچنین چنان که مشاهده می‌شود تفاوت بین مقادیر T_x در دو نوع سیستم پی چندان قابل‌توجه نیست، از این رو به نظر می‌رسد که بتوان با توجه به محدوده‌ی معمول و غالب بسامدی حرکت شدید زمین، مؤلفه‌های شتاب انتقالی ورودی دو نوع سیستم پی گسترده و منفرد (با دیافراگم طبقه‌ی صلب) را یکسان فرض کرد.

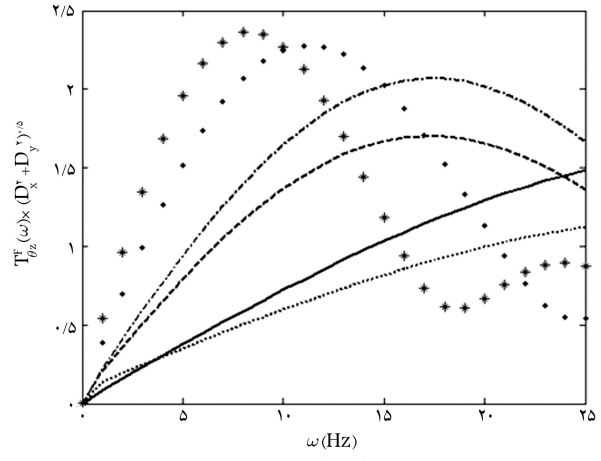
۲.۳. بررسی مؤلفه‌ی شتاب پیچشی ورودی پی

شکل‌های ۴ و ۵ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی تغییرات تابع تبدیل نرمال‌شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی $T_{\theta z}\cdot(D_x^2+D_y^2)^{1/2}$، سیستم پی گسترده و منفرد (با طبقه‌ی دارای دیافراگم صلب) در راستای محور z، براساس شکل هندسی سازه در پلان و سرعت‌های فاز ۱ و ۲ کیلومتر بر ثانیه هستند. همان‌طورکه در این شکل‌ها مشاهده می‌شود رفتار کلی تابع تبدیل نرمال‌شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی برای هر دو نوع سیستم پی مشابه و مقادیر تابع تبدیل نرمال‌شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی متناظر با سیستم پی منفرد بیش از سیستم پی گسترده است.

همچنین با توجه به این شکل‌ها واضح است که به ازای یک سرعت ظاهری ثابت، با افزایش بسامد تحریک، پی‌هایی که طول بیشتری در جهت غالب انتشار امواج لرزه‌یی (D_x) داشته باشند؛ سریع‌تر به بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسند (مانند پی F) و برای پی‌های با طول مساوی در جهت x مانند پی‌های B و C، هرچه



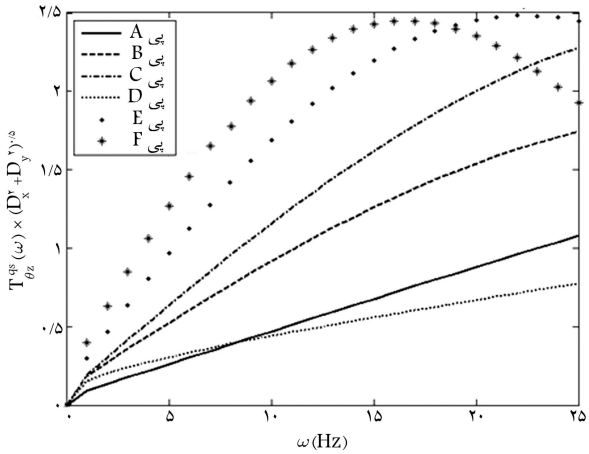
الف) V_A=۲ Km/s؛



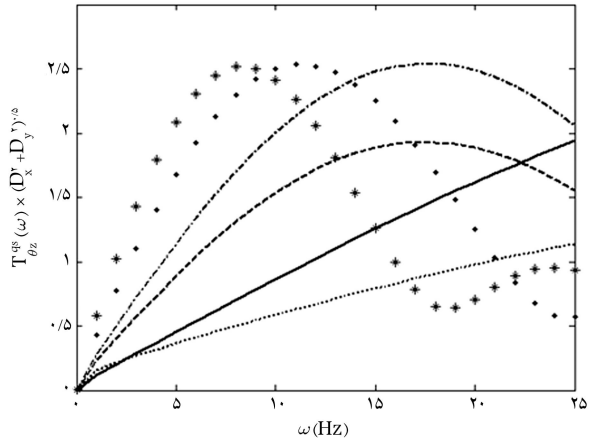
ب) V_A=۱ Km/s.

شکل ۴. بررسی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌ی پیچشی سیستم پی گسترده در راستای محور z براساس شکل هندسی سازه در پلان.

www.SID.ir



الف) V_A=۲ Km/s؛



ب) V_A=۱ Km/s.

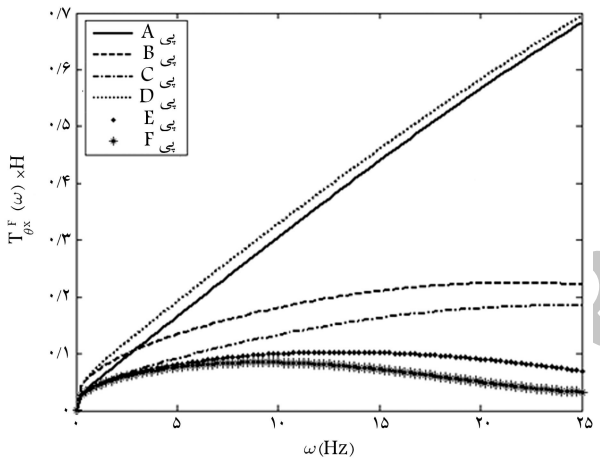
شکل ۵. بررسی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌ی پیچشی سیستم پی منفرد دارای طبقه‌ی اول با دیافراگم صلب در راستای محور z براساس شکل هندسی سازه در پلان.

طول پی در جهت عمود بر راستای غالب انتشار امواج لرزه‌یی (D_y) کمتر باشد، بیشینه‌ی مقدار تابع تبدیل نرمال‌شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی بیشتر خواهد بود. با این حال، به‌طورکلی حساسیت تابع تبدیل نرمال‌شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی به تغییرات بُعد پی در راستای محور x بیش از محور y است که دلیل آن ناشی از بیشتربودن تغییرات مکانی حرکت زمین در راستای محور x نسبت به محور y است. با مقایسه‌ی تابع تبدیل نرمال‌شده در شکل‌های ۴ و ۵ به ازای مقادیر متفاوت سرعت فاز مشاهده می‌شود که با کاهش سرعت فاز، بیشینه‌ی مقدار تابع تبدیل نرمال‌شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی به سمت بسامدهای کوچک‌تر انتقال می‌یابد. از این رفتار تابع تبدیل و وابستگی آن به سرعت فاز، نتیجه‌یی مهم حاصل می‌شود و آن این است که نمی‌توان فقط براساس طول بُعد پی یک سازه، نحوه‌ی رفتار تابع تبدیل آن را پیش‌بینی کرد و این واقعیت ناشی از وابستگی بسامدی قابل‌توجه تابع تبدیل نرمال‌شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی به سرعت فاز متناظر با تحریک لرزه‌یی است. از این رو بدون مشخص‌بودن تحریک لرزه‌یی یک سازه، نمی‌توان نحوه‌ی تأثیرگذاری تابع تبدیل مؤلفه‌ی پیچشی متناظر با پی را بر بسامدهای مختلف تحریک لرزه‌یی ورودی برآورد کرد.

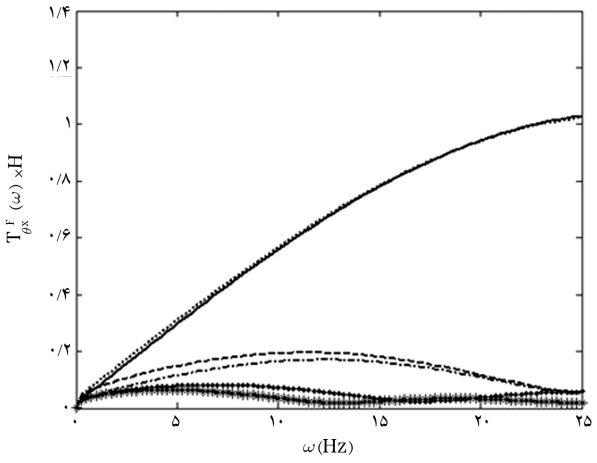
۳.۳. بررسی مؤلفه‌ی شتاب گهواره‌یی ورودی پی

شکل‌های ۶ و ۷ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌های گهواره‌یی نرمال‌شده $T_{\theta x-y}(\omega)\cdot H$، سیستم پی گسترده براساس شکل هندسی پی حول محورهای x و y، و به ازای سرعت‌های فاز ۱ و ۲ کیلومتر بر ثانیه هستند، که در آن‌ها H به‌منزله‌ی ارتفاع معادل سازه‌یی تعریف شده و برابر با ۲۰ متر درنظرگرفته شده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که هرچه پی دارای طول بیشتری در راستای محور y و طول کمتری در راستای محور x باشد، $T^F_{\theta x}$ بزرگ‌تری خواهد داشت. از این رو همان‌طور که مشاهده می‌شود پی F کمترین و پی D بیشترین مقادیر $T^F_{\theta x}$ را دارند. این درحالی است که $T^F_{\theta y}$ برخلاف $T^F_{\theta x}$، چندان به تغییرات بُعد پی در جهت y حساس نیست. همچنین هرچه بُعد پی در راستای محور x بیشتر باشد، $T^F_{\theta y}$ سریع‌تر به بیشینه‌ی مقدار خود میل می‌کند و این مقدار بیشینه، از بیشترین مقدار $T^F_{\theta y}$ پی‌های با بُعد کوچک‌تر در راستای محور x، کمتر است.

همچنین با مقایسه‌ی شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که به ازای کلیه‌ی بسامدها، $T^F_{\theta y}$ همواره به‌صورت قابل‌توجهی بزرگ‌تر از $T^F_{\theta x}$ است. دلیل این امر را می‌توان ناشی از بیشتر و غالب‌بودن تغییرات مکانی حرکت زمین در راستای محور x نسبت به محور y دانست (با فرض اینکه جهت غالب انتشار امواج لرزه‌یی در راستای محور x باشد). همچنین با مقایسه‌ی شکل ۲ با شکل‌های ۴، ۶ و ۷ مشخص می‌شود که برای سیستم پی گسترده، مؤلفه‌های دورانی ورودی پی



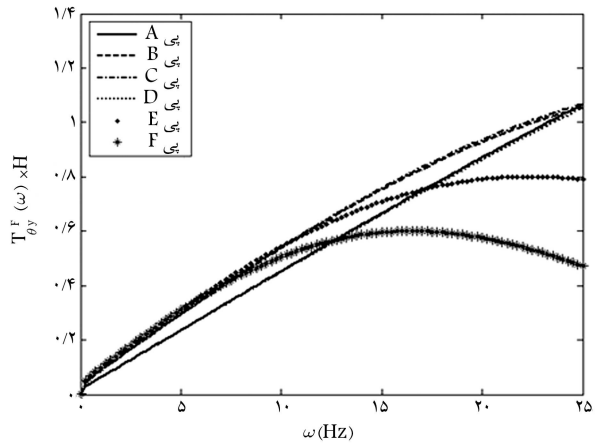
الف) V_A=۲ Km/s؛



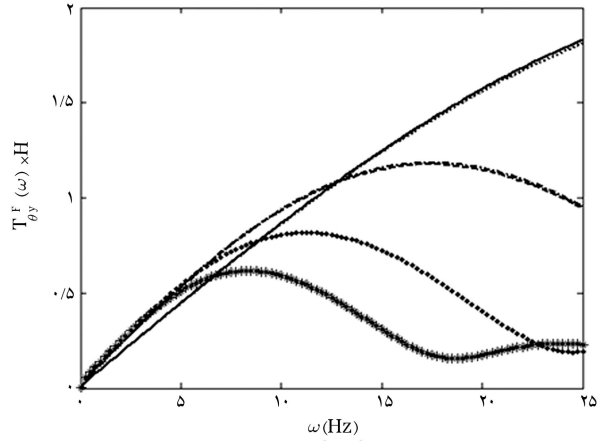
ب) V_A=۱ Km/s.

شکل ۶. بررسی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌ی گهواره‌یی سیستم پی گسترده در راستای محور x براساس شکل هندسی سازه در پلان.

www.SID.ir



الف) V_A=۲ Km/s؛



ب) V_A=۱ Km/s.

شکل ۷. بررسی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌ی گهواره‌یی سیستم پی گسترده در راستای محور y براساس شکل هندسی سازه در پلان.

بیش از مؤلفه‌های انتقالی ورودی متناظر به شکل هندسی پی وابسته هستند که دلیل این امر را می‌توان با توجه به رفتار غیریکنواخت تابع‌های تبدیل مؤلفه‌های دورانی در مقایسه با تابع تبدیل مؤلفه‌ی انتقالی متناظر توجیه کرد. نکته‌ی حائز اهمیت دیگر این است که تابع‌های تبدیل مؤلفه‌های گهواره‌یی زلزله مشابه تابع تبدیل نرمال‌شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی زلزله، کاملاً به تغییرات سرعت فاز وابسته است و پیش‌بینی رفتار آن‌ها بدون توجه به سرعت فاز متناظر با مؤلفه‌های تحریک لرزه‌یی ورودی، ممکن نیست. درنظرگرفتن این مسئله درکنار توجه به بیشتربودن محتوای بسامدی مؤلفه‌های دورانی نسبت به مؤلفه‌های انتقالی نشان می‌دهد که درنظرگرفتن کامل اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه برای تعیین مؤلفه‌های دورانی ورودی پی‌ها الزامی است.

۴. نتیجه‌گیری

هدف نوشتار حاضر ارائه‌ی رویکردی برای تعیین تحریک لرزه‌یی سازه‌ها با درنظرگرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه است. از این رو، روشی برای درنظرگرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه برای تعیین کلیه‌ی مؤلفه‌های ورودی دو نوع سیستم پی (گسترده و منفرد)، به‌صورت بسامدی و تاریخچه‌ی زمانی ارائه شد. با استفاده از روابط به‌دست‌آمده، تأثیرات شکل هندسی و نوع سیستم پی‌ها در تغییر مؤلفه‌های دورانی و انتقالی ورودی پی‌ها بررسی و ارزیابی شدند. برای سیستم پی منفرد دو حالت رفتاری درنظرگرفته و فرض شد درصورتی‌که پی‌های منفرد با کلاف‌بندی مناسب و قوی به هم متصل شده باشند، رفتار سینماتیک مشابه پی گسترده دارند. همچنین بحثی روی تحریک ورودی سازه‌های مستقر بر روی سیستم پی منفرد با کلاف‌بندی ضعیف، ارائه شد. اهم نتایج این تحقیق با توجه به فرضیات انجام‌شده عبارتند از:

الف) به‌طورکلی درنظرگرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه برای محاسبه‌ی مؤلفه‌های انتقالی ورودی سازه‌های با پی گسترده و یا دارای طبقه‌ی اول صلب به ابعاد بزرگ‌تر از ۴۰ متر، باعث کاهش قابل‌توجه مؤلفه‌های انتقالی ورودی سازه و نتیجتاً کاهش نیروهای طراحی سازه می‌شود.

ب) با افزایش بُعد پی و کاهش سرعت فاز متناظر با انتشار امواج لرزه‌یی، مؤلفه‌های انتقالی ورودی پی کاهش می‌یابند. این کاهش برای سازه‌های با پی گسترده و یا دارای طبقه‌ی اول صلب به ابعاد بزرگ‌تر از ۴۰ متر، قابل‌توجه است. از این رو درنظرگرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه منجر به طراحی بهینه‌ی سازه‌هایی همچون سدها یا سازه‌ی راکتور هسته‌یی می‌شود.

ج) مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی ورودی سازه دارای طبقات با دیافراگم صلب که سیستم پی آن منفرد است، را می‌توان به‌طور تقریبی برابر با مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی ورودی سازه با پی گسترده‌ی صلب، به‌شرطی که ابعاد پلان دو سازه یکسان باشد، برابر فرض کرد.

د) مؤلفه‌های دورانی ورودی پی بیش از مؤلفه‌های انتقالی متناظر به شکل هندسی و سرعت فاز متناظر با مؤلفه‌های تحریک لرزه‌یی وابسته است و پیش‌بینی بزرگای مؤلفه‌های دورانی ورودی پی‌ها فقط براساس ابعاد پی و بدون درنظرگرفتن کامل اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه، برخلاف مؤلفه‌های انتقالی متناظر ممکن نیست.

منابع (References)

1. Li, B.; Al-Bermani, F.G.A. and Kitipornchai, S. "Maximum response of asymmetric structures subject to a multicomponent earthquake", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22**, pp. 1047-1066 (1993).
2. Veletsos, A.S.; Prasad, A.M. and Wu, W.H. "Transfer functions for rigid rectangular foundations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**, pp. 5-17 (1997).
3. Sarma, S.K. and Srbulov, M. "A simplified method for prediction of kinematic soil-foundation interaction effects on peak horizontal acceleration of a rigid foundation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**, pp. 815-836 (1996).

Archive
www.SID.ir

4. Hadid, M. and Berrah, M.K. "Structural response for stochastic kinematic interaction ", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* **30**, pp. 97-114 (2001).
5. Kim, S. and Stewart, J.P. "Kinematic soil-structure interaction from strong motion recordings", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* **129**, pp. 323-335 (2003).
6. Lin, Y.Y., *Kinematic Soil-Structure Interaction Effects on Maximum Inelastic Displacement Demands of SDOF System*, The 14th WCEE, Beijing China (2008).
7. Aviles, J.; Suarez, M. and Sanchez-Sesma, F.J. "Effects of wave passage on the relevant dynamic properties of structures with flexible foundation ", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* **31**, pp. 139-159 (2002).
8. Stewart, J.P.; Kim, S.; Beilak, J.; Dobry, R. and Power, S.M. "Revisions to soil-structure interaction procedures in NEHRP design provision", *Earthquake Spectra,* **19**, pp. 677-696 (2003).
9. Ghafory-Ashtiany, M. and Singh, M.P. "Structural response for six correlated earthquake components", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* **14**, pp. 103-119 (1986).
10. Hao, H. "Characteristics of torsional ground motions ", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* **25**, pp. 599-610 (1996).
11. Pais, A. and Kausel, E. "Approximate formulas for dynamic stiffnesses of rigid foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* **7**, pp. 213-227 (1988).

Archive of SID

www.SID.ir

EVALUATION OF THE EFFECTS OF KINEMATIC SOIL STRUCTURE INTERACTION ON SEISMIC LOADING OF STRUCTURES PART II: FOUNDATION INPUT MOTIONS

M. R. Falamarz-Sheikhabadi
m.falamarz@gmail.com
M. Ghafory-Ashtiany⋆
mohsen.ashtiany@gmail.com
International Institute of Earthquake Engineering and Seismology Tehran

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 28, Issue 2, Page 35-43, Original Article

© Sharif University of Technology

Abstract

As seismic waves pass through foundations, high frequency waves of free-field motions will be filtered by them. To obtain these filtered motions, called foundation input motions (FIMs), the effects of kinematic interaction between the foundation and surrounding medium, due to the spatial variation of earthquake ground motion (SVEGM), should be considered. For the structures supported on the large mat foundations, considering the effects of kinematic soil structure interaction may lead to filtering of the high-frequency components of the translational response and significant rotational motions. Therefore, the contribution of rotational components may be detrimental in the seismic response of structures, such as vertically irregular structures, short-period (stiff) structures such as nuclear reactors, and even secondary systems or equipment mounted on structures that are sensitive to high frequency components of motion.

The main objective of this paper is to present a new procedure for evaluating all six input components of structures supported on two foundation systems: rigid mat and single foundations. To achieve this objective, at first, the transfer functions of foundation input motions are derived. Then, a parametric study is performed on the rigid mat foundation system, in order to estimate the effects of the geometrical shape of such a foundation system on the foundation input motion. Moreover, a numerical study is performed on the two different foundation systems; mat and single, in order to compare relations between input rotational and translational components in the structural loading. The results imply that the input translational and torsional accelerations of structures with rigid floor diaphragms, which are supported on the single foundation system, are approximately equal to the same structures with rigid mat foundation systems.

Key Words: rotational components, phase velocity, principal axes, coherency, kinematic interaction.

⋆ corresponding author

Received 1 March 2010; received in revised form 10 October 2010; accepted 10 November 2010

Archive of SID

www.SID.ir