

واکنش دینا میکی شمعهای منفرد تحت اثر بارهای جانبی و زلزله

* امیر مسعود کنیا

چکیده

در این مقاله اثر متقابل خاک و شمعهای منفرد دریک لایه خاک ویسکوالاستیک و همگن تحت ارتعاشات جانبی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مدل تحلیلی مورداستفاده در این تحقیق مبتنی بر تئوری تیربربریستر ارجاعی و مفهوم مدول عکس العمل دینا میکی زمین است. برای این منظور مدول عکس العمل دینا میکی زمین برای ارتعاشات هارمونیک دائمی با استفاده از یک مدل اجزاء محدود معروف به مرز عبوردهنده به صورت یک کمیت مختلط بدست آمده و عبارات تقریبی و ساده‌ای برای محاسبه آن در محدوده پائین و بالای فرکانس ارائه می‌شوند. با استفاده از این روابط تقریبی، سختیهای دینا میکی افقی و چرخشی شمعهای منفرد با اடکاء انتهایی به صورت عبارات بسته بدست می‌آیند و دقت آنها در مقایسه با نتایج تئوریک نشان داده می‌شوند. همچنین تعمیم مدل فوق برای مطالعه واکنش شمعهای تحت اثر زلزله با استفاده از تکنیک زیرسازه ارائه می‌شود و ابتدا لازم برای محاسبه تغییر مکان و چرخش راس شمع بدست می‌آیند.

مقدمه

آنالیز شمعهای تحت بارهای قائم وافقی از موضوعات تحقیقاتی پرسابقه در مهندسی بی است. در گذشته، مطالعه در این زمینه تنها معطوف به آنالیز استاتیکی بوده است و در این راستا مطالعات تحلیلی و تجربی متنوعی نیز صورت گرفته است. غالب مطالعات تحلیلی مبتنی بر مفهوم

* استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

تیربربسترا رتاجاعی یا مدل وینکلر^۱ بوده است، که در آن وجود خاک دور شمع به کمک فنرها گسترده مدل می‌شود [۲، ۶، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱]. برای استفاده عملی از این روش نیاز به مقدار سختی زمین یا مدول عکس العمل زمین^۲ است که برای تعیین آن اندمازه گیریها محلی در خاکها مختلف صورت گرفته است [۱۰، ۹، ۸]. این مطالعات تجربی نشان داده است که مدول عکس العمل زمین نه تنها به عمق بلکه به میزان تغییر مکان خاک بستگی دارد و به عبارت دیگردا رای را بخطء غیرخطی با تغییر شکل دارد.

روش دیگری که برای آنالیز شمعهای تحت بار جابی بکار گرفته شده است استفاده از تئوری میندلین [۱۱] است. به کمک این تئوری تغییر مکانهای ناشی از بازمترکز در داخل یک نیم فضا^۳ (محیط نیمه بی نهایت) بدست آمده و با استفاده از روش‌های ازنوع المانهای مرزی در آنالیز شمع بکار می‌رود [۱۳، ۱۲].

پیدا یش صنعت انرژی هسته‌ای و نیاز به طراحی و ساخت راکتورهای بزرگ و اهمیت بررسی رفتار دقیق آنها در شرایط زلزله از یک سو و پیش‌رفت صنعت استخراج نفت از دریا و لزوم احداث سازه‌های دریائی استوار بر شمعها، که تحت اثر ارتعاشات حاصل از امواج و زلزله قراردارند، از سوی دیگر محققین را متوجه لزوم بررسی رفتار دینا می‌کرد. این موضوع در محدوده داشت جدیدی به نام اثر متقابل خاک و سازه^۴ است. از آنجاکه اولین نتایجی که از چنین مطالعاتی بدست آمده بود پدیده‌های جدیدی را در رفتار سازه‌آشکار می‌کرد تحقیق در مطالعه جنبه‌های دینامیکی رفتار پی‌های شمعی در سالهای اخیر بشدت گسترش یافت.

پنزین و همکارانش [۱۴] و تا جیمی [۱۵] از جمله اولین محققینی بوده‌اند که واکنش شمعها را تحت اثر زلزله مورد بررسی قرارداده‌اند. مطالعات تا جیمی مبتنی بر حل معادلات انتشار موج در یک لایه خاک واقع بر بستر صلب است. با این روش اموفق شد برای تغییر مکان شمع روابط

-
- | | |
|------------------|---------------------------------|
| 1. Winkler Model | 2. Modulus of Sudgrade Reaction |
| 3. Half-Space | 4. Soil - Structure Interaction |

تحلیلی به فرم بسته بdst آورد. از سوی دیگر، پنزین از یک روش اجزاء محدود برای تحلیل مجموعه سیستم سازه - شمع - خاک استفاده کرد. با این روش پنزین توانست اثرات غیرخطی و هیستریک رفتار خاک را در مدل خود منعکس کند. اگرچه این روش امکان یک آنالیز غیرخطی را فراهم میکند مشکلات عدم قطعیت‌ها در تعیین پارامترهای لازم، کاربرد آن را برای مقاصد مهندسی محدود میکند.

با استفاده از تئوری تیربربرسترا رتجاعی، نوواک [۱۶] موفق شد سختی‌های دینا میکی قائم، افقی^۱ و چرخشی^۲، شمعهای منفرد با اتفاقهای^۳ را بdst آورد. در مدل بکار رفته توسط نوواک مدول عکس العمل زمین یک کمیت مختلط^۴ است که جزء حقیقی آن معرف سختی و جزء موهومی آن معرف استهلاک تشعشعی^۵ یا هندسی است. استهلاک هندسی نشان دهنده تشعشع انرژی از طریق امواج ساطع شده در اثرا رتعاش شمع است. مدول مختلط عکس العمل زمین نیز برای ارتعاش یک شمع در محیط بی‌نهایت بdst آمده‌اند [۱۷]، یعنی با این فرض که حرکت خاک در اثرا رتعاش شمع متشكل از امواج استوانه‌ای است که بطور افقی منتشر می‌شوند. با استفاده از همین روش نوواک وابوالعلاء [۱۸، ۱۹] ماتریس سختی دینا میکی یک جزء از شمع را بdst آورده و با سوارکردن ماتریس سختی هر لایه واکنش دینا میکی یک شمع را در محیط‌های لایه‌ای خاک مورد مطالعه قراردادند. لازم به تذکر است که با توجه به ماهیت مدولهای مختلط عکس العمل زمین، این نتایج برای محدوده فرکانس‌های کوچک (کوچکتر از فرکانس‌های اصلی لایه) مناسب نیستند ولی با افزایش فرکانس دقیقاً نیز بهبود می‌یابد.

روش‌های تحلیلی و تئوریک مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته نیز توسط محققین متعددی بکار برده شده است، که از آن جمله می‌توان به کارهای انجام شده توسط نوگامی و نوواک [۲۰، ۲۱] اشاره کرد. در این مطالعات نوگامی و نوواک ابتداً با حل معادله موج برای یک لایه

-
1. Swaying 2. Rocking 3. End Bearing Piles
4. Complex 5. Radiation Damping

ویسکوا الاستیک گا مهای^۱ انتشار موج را در لایه بست آور دند و سپس با استفاده از آنها نیروهای وارد بر شمع را در هرگام محا سبه کرده و سرانجام واکنش شمع را در اثرای نیروها تعیین کردند. برای محیط‌های نیمه بی‌نهایت (نیم فضا) نیز در سالهای اخیر نتایج جدیدی بر اساس خلل معا دلات موج به وسیله تکنیک‌های تبدیل انتگرال و حل عددی معا دلات حاصل بست آمده‌اند [۲۳، ۲۲].

به موازات این روش‌های تئوریک روش‌های استفاده از مدل‌های جزاء محدود نیز برای مطالعه اثر متقابلاً شمع و خاک بکار گرفته شده است. در این ارتباط میتوان به تحقیقات انجام گرفته توسط کوهلمیر [۲۴]، بلینی و همکارانش [۲۵] و کی نیا و کاوسل [۲۶] اشاره کرد. مزیت این روش‌ها بر روش‌های کاملاً تحلیلی این است که به وسیله آنها میتوان رفتار شمعها را در محیط‌های غیرهمگن نیز مورد مطالعه قرارداد. در اینجا لازم است مختصرًا "توضیح داده شود که سختی $\frac{d}{dt}$ دینا میکی کمیت‌های وابسته به فرکانس آنند. علاوه بر این، چون در محیط‌های ویسکواستیک، استهلاک ازنوع هیسترتیک است در آنالیز دینا میکی شمعها (یا به طور کلی پی‌ها) مناسب تراست از نیروی هارمونیک $P = P_0 e^{i\omega t}$ استفاده شود (P_0 حدا کثر نیرو، ω فرکانس ارتعاش و $\omega = \sqrt{-1} \zeta$ است). اگر واکنش داعمی در ارجمندین نیرویی به صورت $u = u_0 e^{i\omega t}$ باشد در این صورت نسبت $\frac{u}{u_0} = p$ که یک کمیت مخلوط است سختی دینا میکی نظیر تغییر مکان u است. امروزه غالباً نتایجی که در ارتباط با سختی پی‌ها ارائه می‌شود به صورت سختی دینا میکی مختلط، یعنی کمیتی به صورت $K = k + i\zeta$ است که در آن قسمت حقیقی مفهوم سختی و قسمت موهومی مفهوم استهلاک را دارد.

هدف از این مقاله مطالعه رفتار دینا میکی شمعهای منفرد تحت اثر بارگانبی و تحت اثر زلزله در یک محیط ویسکوالاستیک است. در این مقاله با استفاده از روش اجزاء محدود روابط ساده‌ای برای تعیین سختی

1. Modes

دینا میکی شمعها تحت با رجائبی و نیز واکنش شمعها تحت اثر زلزله ارائه میشود. مزیت این روش برروشهای مبتنی بر مکانیک محیطهای پیوسته و اجزاء محدود، گذشته از سادگی آن، امکان استفاده از نتایج آزمایشهای صحرائی برای تعیین مدول عکس العمل زمین برای انواع خاکهاست.

مدول عکس العمل زمین برای ارتعاشات جانبی

هدف از این مقاله تعیین واکنش شمعها با استفاده از مفهوم مدول عکس العمل زمین است. بنا بر این لازم است ابتدا مقدار این کمیت تعیین شود. برای این منظور با استفاده از روش کاوس [۲۷] در فرموله کردن یک مرز عبوردهنده برای مسائل آنالیز با تقارن محوری در دینامیک خاک، یک برنامه کامپیوتری توسط نگارنده تووین شد [۲۶]. در اینجا مناسب است قبل از ارائه نتایج حاصل از این برنامه اشاره مختصری به مدل فوق بشود. مشخصه مهم مدل‌های اجزاء محدود برای مسائل اثربر متقابل خاک و سازه نحوه منظور کردن تشعشع امواج حاصل از ارتعاش پسی به محیط خارج است. چنانچه از مدل‌های متداول اجزاء محدود استفاده شود لازم است مرزهای مدل در فاصله دوری از پی گرفته شوند تا امواج صادر شده از پی در انعکاس و برگشت از این مرزها در اثر استهلاک داخلی خاک مستهلاک شده و اثری بر رفتار پی نگذارند. این مسئله سبب افزایش حجم حافظه موردنیاز نیز کا هش دقت جوابها میشود. برای اجتناب از این مشکلات ابزار تحلیلی مناسبی به صورت یک ماتریس مرزی آبداع شده است که به کمک آن میتوان مرزهای اجزاء محدود را در فاصله بسیار کمی از پی قرارداد. خاصیت این ماتریس مرزی این است که امواج صادر شده از پی به بیرون از محیط را جذب کرده و آنها را برگشت نمیدهد. این ماتریس مرزی در واقع رابطه‌ای است بین نیروها و تغییر مکانها در گره‌های این مرزو طبیعتاً "کمیتی" است تابع فرکانس. در یک مسئله اجزاء محدود این ماتریس مرزی مستقیماً "به ماتریس سختی محیط افزوده میشود (برای

1. Transmitting Boundary

جزئیات کامل محاسبه این ماتریس مرزی به مرجع شماره ۲۷ مراجعه شود).

با استفاده از برنامه فوق یک نیروی جانبی یکنواخت به بزرگی واحد را ارتفاع مرز عبوردهنده اعمال شد و مقدار متوسط تغییر مکان گره های این مرز ب دست آمد و سپس با معکوس کردن آن مدول عکس العمل مختلف لایه خاک به صورت $k_x + i c_x$ برای فرکانس های مختلف ارتعاش محاسبه شد. براساس نتایج حاصل، مدول عکس العمل مختلف خاک را میتوان با روابط تقریبی ذیل تعریف کرد:

برای فرکانس های بزرگتر از ω_s :

$$k_x + i c_x = 3.5G + i(10 \frac{\omega_R}{C_s})G \quad (1)$$

برای فرکانس های کوچکتر از ω_s :

$$k_x + i c_x = 3.5G + i(7\beta)G \quad (2)$$

که در آنها $(4h)^{-1} = 2\pi C_s / \omega_s$ فرکانس اصلی امواج برشی در لایه خاک، C_s ، h ، G ، β به ترتیب ارتفاع، سرعت امواج برشی، مدول برشی و نسبت استهلاک هیستریک لایه خاک، R شعاع شمع ω فرکانس ارتعاش است.

این نتایج نشان میدهد که قسمت حقیقی مدول مختلف خاک مقداری تقریباً ثابت دارد. قسمت موهومی مدول عکس العمل خاک، از سوی دیگر، در فرکانس های کوچکتر از ω_s تقریباً ثابت بوده و معرف استهلاک هیستریک است و در فرکانس های بزرگتر از ω_s تقریباً به طور خطی افزایش می‌یابد و معرف استهلاک تشبعی یا هندسی است. (علت ظهور این پدیده در قسمت موهومی عکس العمل خاک این واقعیت است که در فرکانس های کوچکتر از ω_s امواج ایجاد شده در اثر ارتعاش شمع امکان خروج از محیط را پیدا نکرده و در محیط محصور می‌شوند و در نتیجه تنها منبع اتلاف انرژی در دستگاه استهلاک هیستریک خاک است، در حالی که در فرکانس های بزرگتر از ω_s امواج برشی از محیط به خارج صادر می‌شوند و سبب اتلاف انرژی قابل

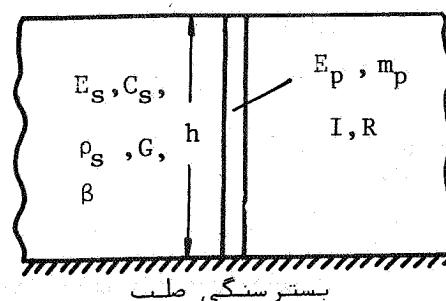
واکنش دینا میکی شمعهای منفرد ...

۱۱

ملاحظه‌ای از دستگاه میشوند). نتایج فوق با نتایج بدست آمده توسط با رانو [۲۸] یا نوواک [۱۷] در فرکانس‌های بزرگتر از ω مشابه است ولی در فرکانس‌های کوچکتر از ω نتایج بدست آمده توسط این دو محقق صحیح نیستند زیرا همانطور که قبلاً نیز اشاره شداین نتایج بر اساس یک محیط بی‌نهایت، و نه یک محیط محدود مثل یک لایه خاک روی بستر صلب، بدست آمده‌اند.

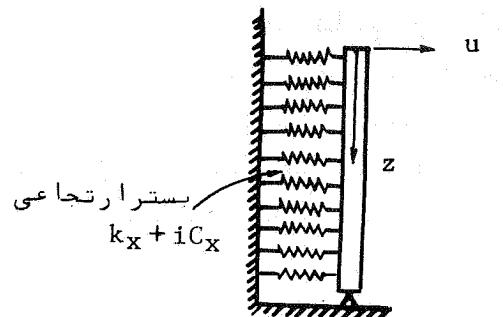
سختی دینا میکی شمعهای منفرد تحت ارتعاشات جانبی
شکل (۱) یک شمع با اتکاء انتہائی در لایه خاک و یسکواستیک و همگن نشان میدهد. در شکل (۲) همین شمع به صورت یک تیر بر بستر رتاجاعی با مدول عکس العمل مختلف $K_x = k_p + iC_p$ مدل شده است. اگر E_p , I_p , R_p , m_p به ترتیب شعاع، ممان اینرسی مقطع، مدول الاستیسته، جرم و واحد حجم و جرم واحد طول شمع باشد و تغییر مکان جانبی شمع با u نمایش داده شود، معادله دیفرانسیل ارتعاش یکالمان از شمع عبارت است از:

$$E_p I \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + K_x u = -m_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (۳)$$



شکل ۱ - شمع با اتکاء انتہائی در لایه خاک

استقلال



شکل ۲ - مدل برای مطالعه ارتعاشات جانبی

با فرض یک حرکت‌ها رمونیک به صورت :

$$u(z, t) = \bar{u}(z) e^{i \omega t} \quad (4)$$

و فرازدا دن این رابطه در معادله (۳) نتیجه ذیل حاصل می‌شود :

$$\frac{E_p I}{4} \frac{d^4 \bar{u}}{dz^4} + [(k_x - m_p \omega^2) + i c_x] \bar{u} = 0 \quad (5)$$

جواب عمومی معادله فوق عبارت است از :

$$\begin{aligned} \bar{u}(z) = & e^{\alpha z} (A_1 \cos \alpha z + A_2 \sin \alpha z) \\ & + e^{-\alpha z} (A_3 \cos \alpha z + A_4 \sin \alpha z) \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن :

$$\alpha = \frac{\sqrt[4]{(k_x - m_p \omega^2) + i c_x}}{\sqrt[4]{4 E_p I}} \quad (7)$$

برای بدست آوردن ماتریس سختی دینامیکی شمع، که در واقع رابطه بین نیروی برشی و لنگرخمی در اس شمع با تغییر مکان افقی و چرخش شمع در همین نقطه ($z = 0$) است، کافی است با اعمال تغییر مکان واحد یا چرخش واحد در راس شمع، نیروی برشی و لنگرخمی نظیر که همان اعضاء

واکنش دینا میکی شمعهای منفرد ...

ما تریس سختی میباشد را محاسبه کرد. در این ارتباط باید توجه داشت که شرایط مرزی نظریه انتها شمع، با فرض مفصلی عمل کردن انتها، عبارت است از:

$$\begin{aligned} \bar{u}(z = h) &= 0 \\ \bar{u}''(z = h) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

این محاسبات نتایج ذیل را برای ما تریس سختی دینا میکی شمع بدست میدهد:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{x\phi} \\ K_{\phi x} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$K_{xx} = 4E_p I_\alpha^3 \frac{\cosh 2\alpha h + \cos 2\alpha h}{\sinh 2\alpha h - \sin 2\alpha h} \quad (10)$$

$$K_{x\phi} = K_{\phi x} = -2E_p I_\alpha^2 \frac{\sinh 2\alpha h + \sin 2\alpha h}{\sinh 2\alpha h - \sin 2\alpha h} \quad (11)$$

$$K_{\phi\phi} = 2E_p I_\alpha \frac{\cosh 2\alpha h - \cos 2\alpha h}{\sinh 2\alpha h - \sin 2\alpha h} \quad (12)$$

برای بررسی دقیقی دقت روش تقریبی فوق، نتایج این روش با نتایج بدست آمده توسط نوواک و نوگامی [۲۱] در اشکال (۳) و (۴) مقایسه شده است. منحنی‌های ترسیم شده در این اشکال تغییرات قسمتهای حقیقی و موهومی K_{xx} و $K_{\phi\phi}$ (یعنی سختی‌های افقی و چرخشی شمع) را نسبت به سختی استاتیکی نظری بدست میدهند. یعنی اگر سختی استاتیکی (مقدار سختی به ازاء $\omega = 0$) برای حرکت افقی و چرخش به ترتیب با k_{xx}° و $k_{\phi\phi}^\circ$ نمایش داده شوند، در این صورت:

$$K_{xx} = k_{xx}^\circ (k_{xx}' + i c_{xx}') \quad (13)$$

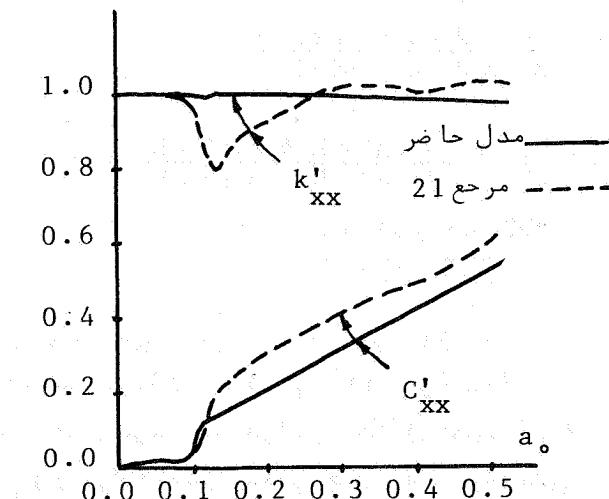
$$K_{\phi\phi} = k_{\phi\phi}^\circ (k_{\phi\phi}' + i c_{\phi\phi}') \quad (14)$$

در شکل (۳) تغییرات k'_{xx} و c'_{xx} و در شکل (۴) تغییرات $k'_{\phi\phi}$ و $c'_{\phi\phi}$ بر حسب $a_0 = \frac{w d}{G_s}$ ترسیم شده‌اند (دقت رشمع است). سایر پارامترهای این اشکال به قرار زیرند:

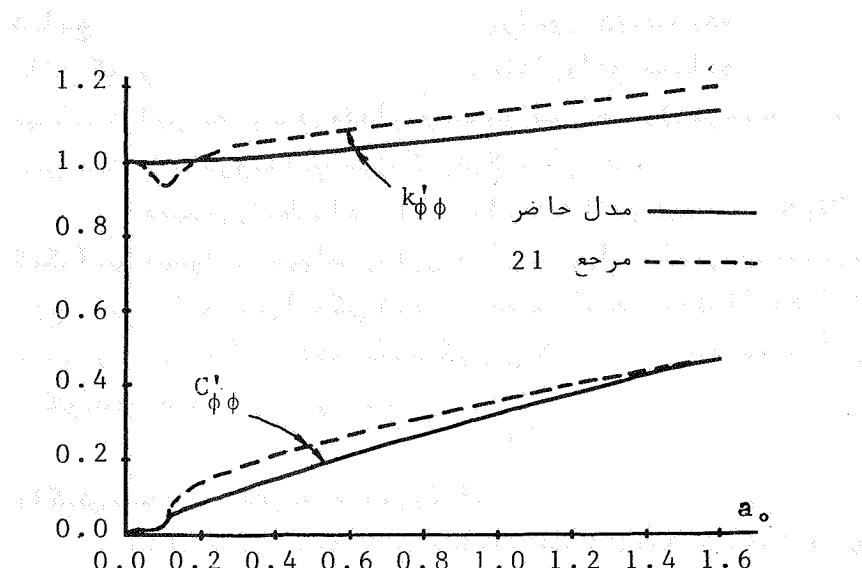
$$\frac{h}{d} = 15$$

$$\bar{\rho} = \rho_s / \rho_p = 0.6$$

$$\bar{v} = \frac{c_s}{v_p} = \frac{\sqrt{G_p \rho_p}}{\sqrt{E_p \rho_s}} = 0.01$$



شکل ۳- سختی دینامیکی افقی شمع منفرد



شکل ۴- سختی دینا میکی چرخی شمع منفرد

همانطورکه در این اشکال مشاهده میشود روابط پیشنهادی (روابط ۱۱ و ۱۲) برای سختی دینا میکی شمع برای ارتعاشات جانبی با دقیق خوبی این کمیتها را بدست میدهد. قسمتی از تفاوت بین این نتایج در اثرا این مسئله است که نسبت استهلاک در نتایج ارائه شده توسط نوواک و نوگا می برابر $\beta = 0.01$ است درحالی که مقادیر مدول عکس العمل زمین (روابط ۱۳ و ۱۴) برای نسبت استهلاک $\beta = 0.05$ بدست آمده اند. نسبت استهلاک تنها بر واکنش دینا میکی در حوالی فرکانس اصلی امواج برشی در لایه (s_s) اثربوده است. هر قدر نسبت استهلاک کمتر باشد سختی دینا میکی در محدوده w_s نزول موضعی شدیدتری دارد. این مسئله در اشکال (۳) و (۴) بخوبی مشاهده میشود. اما لازم به تذکر است که این خاصیت موضعی تساوی محسوسی بر واکنش دینا میکی کلی شمع ندارد. همچنین،

نتایج نوواک ونوجا می برای ضریب پواسون $\nu = 0.5$ بdest آمده است در حالی که روابط ۱ و ۲ مبنی بر یک مقدار واقع بینانه تر $\nu = 0.4$ میباشند و این تفاوت در مقدار ضریب پواسون مسئول در صدیگری تفاوت بین نتایج حاضر و نتایج نوواک ونوجا می باشد.

اهمیت روابط ساده^{۱۰} (۱۲) تا (۱۵) از دوجه است. اولاً به کمک آنها میتوان بسهولت و بدون نیاز به ابزار تحلیلی پیچیده روابط لازم برای آنالیز دینا میکی شمعه را بدست آورد، ثانیا "به کمک آنها میتوان صحت روش‌های تئوریک دیگری را که برای محاسبه سختیها ارائه میشوند مورد بررسی قرارداد.

واکنش شمعهای منفرد تحت اثر زلزله

به طورکلی، برای انجام یک آنالیز اثراورتکابل خاک و سازه علاوه بر سختیهای دینا میکی شمع با ید حرکت راس شمع را نیز بدون حضور سازه بدست آورد. به چنین تحلیلی اصطلاحاً "اثرمتقابل سینما تیکی" گفته میشود. نتیجه چنین تحلیلی تعیین توابع انتقالی^۲ حرکات راس شمع در اثریک حرکت‌ها را مونیک است. با استفاده از نتایج مربوط به سختیهای دینا میکی و توابع انتقالی، برای آنالیز کاملاً مل سازه (مستقر بر شمعها)، با توجه به مسئله اثراورتکابل خاک و سازه، کافی است سازه روی فترهایی که سختی آنها برآ بر سختی شمع است قرارداده شده، مجموعه آنها تحت اثر حرکات بدست آمده از اثراورتکابل سینما تیکی تحلیل شود. در مقایله حاضر فرض میشود که حرکات ناشی از زلزله در محیط آزاد^۳ (یعنی قبل از قراردادن شمع) یک تغییر مکان افقی ها را مونیک بادامنه و احده در سطح زمین باشد. به علاوه فرض میشود که این حرکات در اثراورتکابل بر شی افقی که از بستر سنگی به بالا منتشر میشوند ایجاد شده باشند. با توجه به آنچه در برابر اشاره شد، هدف از اثراورتکابل سینما تیکی تعیین تغییر مکان افقی

-
- 1. Kinematic Interaction 2. Transfer Functions
 - 3. Free-Field

واکنش دینا میکی شمعهای منفرد ...

۱۷

وچرخش راس شمع در اثر چنین امواجی است. برای این منظور میتوان از قضیه زیرسازه^۱ استفاده کرد. مطابق این قضیه، واکنش شمع در شکل (۲) را تحت اثر امواج برشی میتوان با اعمال نیروهای خاصی به شمع بدبست آورد. معادلات دیفرانسیل یک المان شمع با مشخصات شکل (۱) را میتوان با استفاده از این قضیه به صورت ذیل نوشت:

$$E_s I \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + K_x u + \frac{m}{P} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = K_x u^* - P^* \quad (15)$$

در این معادله u^* تغییر مکان محیط آزاد است که با حل معادله^۲ یک بعدی تشدید^۳ ارتعاش در خاک به صورت ذیل بدبست می‌آید:

$$u^*(z, t) = u_0^* e^{i\omega t} \cos \frac{\omega}{c_s} z \quad (16)$$

که در آن u^* تغییر مکان دائمی در سطح زمین ($z=0$) است که مقدار آن برابر با حد فرض میشود. نیروی P^* در معادله (۱۵) برای اساس بدبست می‌آید که معادله (۱۵) شرایط محیط آزاد و قوتی خاک جایگزین شمع میشود بوجود آورد. بنابراین میتوان نوشت:

$$P^* = - (E_s I \frac{\partial^4 u^*}{\partial z^4} + \pi R^2 \rho_s \frac{\partial^2 u^*}{\partial t^2}) \quad (17)$$

که در آن ρ_s و E_s به ترتیب جرم واحد حجم و مدول الاستیسته خاک است چنانچه $u^*(z, t)$ و $u(z, t)$ به صورت ذیل بیان شوند:

$$u(z, t) = \bar{u}(z) e^{i\omega t} \quad (18)$$

$$u^*(z, t) = \cos \omega \sqrt{\frac{\rho}{G(1+2i\beta)}} z e^{i\omega t} = \cos \xi z e^{i\omega t} \quad (19)$$

وروابط (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) در معادله (۱۵) قرار داده شوند معادله ذیل نتیجه میشود:

1. Substructure Theorem . 2. One-Dimensional Amplification

$$\frac{d^4 \bar{u}}{dz^4} + \left(\frac{\frac{K_x - m_p \omega^2}{E_p I}}{\frac{E_s I}{E_p I}} \right) \bar{u} = \frac{\frac{K_x - \pi R^2 \rho_s \omega^2 + E_s I \xi^4}{E_p I}}{\frac{E_s I}{E_p I}} \cos \xi z \quad (20)$$

جواب عمومی این معادله را میتوان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \bar{u}(z) = & A_1 e^{\alpha z} \cos \alpha z + A_2 e^{\alpha z} \sin \alpha z + A_3 e^{-\alpha z} \cos \alpha z \\ & + A_4 e^{-\alpha z} \sin \alpha z + \frac{\frac{K_x - \pi R^2 \rho_s \omega^2 + E_s I \xi^4}{E_p I}}{\frac{E_s I (4\alpha^4 + \xi^4)}{E_p I}} \cos \xi z \end{aligned} \quad (21)$$

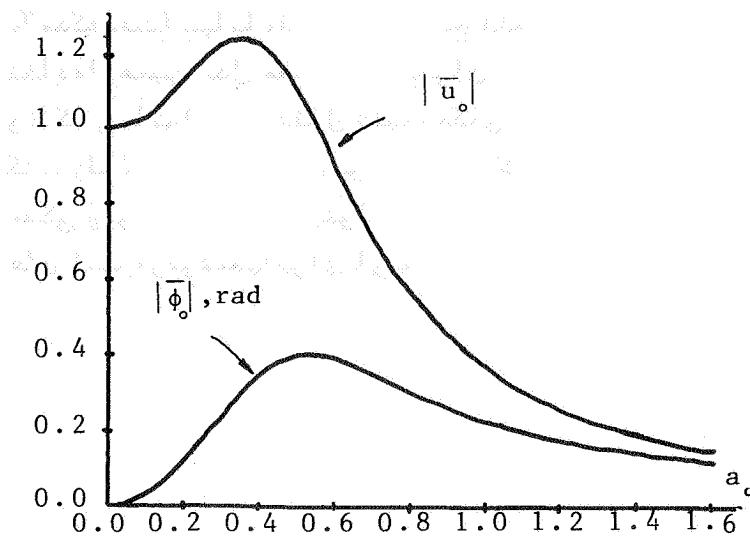
که در آن α بارابه (2) تعیین میشود.

با استفاده از رابطه (21) و شوابط مرزی مربوط برآس و انتهای شمع میتوان ثابت کرد A_1 را بدست α و R و ξ و تغییر مکان و چوخش را سمع را با استفاده از رابطه (21) محاسبه کرد. به علت مفصل بودن این نتایج، در اینجا از رابطه روابط به فرم بسته صرف نظر میشود.

شکل (5) قدر مطلق توابع انتقال، یعنی تغییر مکان افقی $|\bar{u}_h|$ و چوخش $|\bar{\phi}|$ در راس شمع را بر حسب فرکانس برای پارامترهای زیر نشان میدهد:

$$\begin{aligned} \bar{\rho} &= 0.7, \quad \frac{h}{d} = 30 \\ \bar{v} &= \frac{c_s}{v_p} = \frac{1}{30}, \quad \beta = 0.05 \\ d &= 1^m, \quad \rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

نتایج نشان داده شده در شکل (5) از نظر صورت کلی مشابه نتایج بدست α مده توسط بلینی و همکارانش $[25]$ است. اصولاً برای تمام شمعها توابع انتقال صورت کلی فوق را دارند. بدین ترتیب کدشمع سبب فیلتر شدن و حذف فرکانسهای بزرگ و تشدید فرکانسهای کوچک و متواتر میشود. هر قدر خاک سخت تر باشد محدوده فرکانسهای که حرکت زلزله در



شکل ۵- قدر مطلق توابع انتقال برای تغییر مکان
و جرخیش راس شمع تحت اثر زلزله

آن محدوده تشدید می‌شود افزايش می‌باشد و عکس در خاکهای نرم فرکانس‌های کوچکتری فیلترو حذف می‌شوند. این مسئله در آنالیز دینامیکی سازه‌های استوار برشمع و تشدید واکنش آنها نقش مهمی دارد و با ید بدققت مورد توجه قرار گیرد.

خلاصه و نتیجه‌گیری

با استفاده از یک مدل اجزاء محدود، مدول عکس العمل زمین برای ارتعاشات جانبی شمعهای مدفون در یک لایه خاک و یسکوا استیک به صورت یک رابطه تقریبی ساده بدست آمد. با استفاده از این نتیجه‌گیری ساده‌ای برای سختی‌های دینامیکی شمعهای منفرد با انتکاء انتها ئی

بدست آمدکه دقیق نهایا با مقایسه با نتایج تئوریک نشان داده شد. همچنین با استفاده از همین مدل معادلات لازم برای تعیین اثر متقابل سینماتیکی شمع و خاک (یا توابع انتقال تغییر مکان و چرخش راس شمع) برای تحریکات زلزله به صورت امواج برخی افقی ارائه شد . به کمک این ساخته های دینامیکی و توابع انتقال میتوان اثر متقابل خاک و سازه را برای سازه های استوار بر شمعها برای ارتقاشات جانبی مورد مطالعه قرارداد.

واکنش دینا میکی شمعهای منفرد . . .

مراجع:

1. Borms, B. B., "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 90, No. SM2, proc. paper 3825, March 1964, PP. 27-63.
2. Borms, B. B., "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 90, No. SM3, paper 3909, May 1964, PP. 123-156.
3. Davisson, M. T., and Gill, H. L., "Laterally Loaded Piles in a Layered Soil System," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 89, No. SM3, paper 3509, May 1963, PP. 63-94.
4. Hetenyi, M., Beams on Elastic Foundation, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1946.
5. Matlock, H. and Reese, L. C., "Generalized Solution for Laterally Loaded Piles," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divesion, ASCE, vol. 86, No. SM5, Oct. 1960, PP.63-91.
6. McClelland, B., and Focht, J. A., Jr., "Soil Modulus for Laterally Loaded Piles," Transactions, ASCE, vol. 123, 1958, PP. 1049-1063.

7. Reese, L. C., and Matlock, H., "Nondimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed proportional to Depth," Proceedings, Eight Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Austin, Texas, 1956.
8. Matlock, H., "Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clays," paper No. OTC 1204, Proceedings, Second Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1970, vol 1, PP. 577-594.
9. Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D., "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand," paper No. OTC 2080, Proceedings, Sixth Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1974, vol. 2, PP. 473-483.
10. Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D., "Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles in Stiff Clays," paper No. OTC 2312, Proceedings 7 th Annual Technology Conference, Houston, Texas, 1975, vol. 2, PP. 671-690.
11. Mindlin, T. D., "Forces at a point in the Interior of a Semi-Infinite Solid," Physics, 7,

- May 1936, PP. 195-202.
12. Poulos, H.G., "Behavior of Laterally Loaded Piles: I- Single Piles," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 97, No. SM5, paper 8092, May 1971, PP. 711-731.
13. Poulos, H. G., and Davis, E.H., Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley & Sons, New York, 1980.
14. Penzien, J., Scheffy, C. F., and Parmelee, R. A., "Seismic Analysis of Bridges on Long Piles," Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, June 1964, EM3, PP. 223-254.
15. Tajimi, H., "Dynamic Analysis of a Structure Embedded in an Elastic Stratum," Proc. of the 4th World Conference in Earthquake Engineering, Chile, 1969, PP. 53-69 (A-6).
16. Novak, M., "Dynamic Stiffnesses and Damping of Piles," Canadian Geotechnical Journal, vol. 11, No. 4, 1974, PP. 574-598.
17. Novak, M., Nogami, T., and Aboul-Ella, F., "Dynamic Soil Reactions for Plane Strain Case,"

Journal of the Engineering Mechanics Division,
ASCE, vol. 104, No. EM4, Aug. 1978.

18. Novak, M. and Aboul-Ella, F., "Impedance Functions of Piles in Layered Media," Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, vol. 104, No. EM3, June 1978, PP. 643-661.
19. Novak, M., and Aboul-Ella, F., "Stiffness and Damping of Piles in Layered Media," Proc. of the Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE Specialty conference, pasadena, California, June 19-21, 1978, PP. 704-719.
20. Nogami, T., and Novak, M., "Resistance of Soil to a Horizontally Vibrating Pile," International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 4, No.3, Jan-Mar. 1976, PP. 277-293.
21. Novak, M. and Nogami, T., "Soil-Pile Interaction in Horizontal Vibration," International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 5, No. 3, July-Sept. 1977, PP. 263-282.
22. Pak, R. Y. S., and Jennings, P. C., "Elastody-

- Dynamic Response of Pile under Transverse Excitations," Journal of Engineering Mechanics Division, vol. 113, No. 7, July 1987, PP. 1101-1116.
23. Rajapakse, R. K. N. D., and Shah, A. H., "On the Lateral Harmonic Motion of an Elastic Bar Embedded in an Elastic Half-Space," International Journal of Solids and Structures, vol. 23, No. 2, PP. 287-303, 1987.
24. Kuhlemeyer, R. L., "Static and Dynamic Laterally Loaded Floating Piles," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 105, No. GT2, Feb. 1979, PP. 289-304.
25. Blaney, G. W., Kausel, E., and Roesset, J. M., "Dynamic Stiffness of Piles," Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, Virginia, June. 1976. PP. 1001-1012.
26. Kaynia, A. M., and kausel, E., "Dynamic Stiffness and Seismic Respose of Sleeved Piles," Dept. of Civil Eng., M. I. T., Reseasch Report R80-12, May 1980.

27. Kausel, E., "Forced Vibration of Circular Foundations on layered Media," Dept. of Civil Eng., M. I. T., Research Report R74-11, Jan. 1974.
28. Baranov, V. A., "On the Calculation of Excited Vibrations of an Embedded Foundation," (in Russian), Voprosy Dynamiki Prochnosti, No. 14, Polytech. Inst. Riga, PP. 195-209.