# واکنش دینامیکی شمعهای منفرد تحت اثر بارهای جانبی وزلزله

امیر مسعود کی‌نیا *

نشریه تحقیقاتی فنی - مهندسی استقلال، دانشگاه صنعتی اصفهان، شماره ۶ اسفند ۶۶

**چکیده**

در این مقاله اثر متقابل خاک وشمعهای منفرد در یک لایه خاک ویسکوالاستیک وهمگن تحت ارتعاشات جانبی مورد مطالعه قرار میگیرد. مدل تحلیلی مورد استفاده در این تحقیق مبتنی بر تئوری تیر بر بستر ارتجاعی ومفهوم مدول عکس العمل دینامیکی زمین است. برای این منظور مدول عکس العمل دینامیکی زمین برای ارتعاشات هارمونیک دائمی با استفاده از یک مدل اجزاء محدود معروف به مرز عبوردهنده به صورت یک کمیت مختلط بدست آمده وعبارات تقریبی وساده‌ای برای محاسبه آن در محدوده پائین وبالای فرکانس ارائه میشوند. با استفاده از این روابط تقریبی، سختیهای دینامیکی افقی وچرخشی شمعهای منفرد با اتکاء انتهائی به صورت عبارات بسته بدست می آیند ودقت آنها در مقایسه با نتایج تئوریک نشان داده میشوند. همچنین تعمیم مدل فوق برای مطالعهٔ واکنش شمعها تحت اثر زلزله با استفاده از تکنیک زیرسازه ارائه میشود وروابط لازم برای محاسبهٔ تغییر مکان وچرخش راس شمع بدست می‌آیند.

**مقدمه**

آنالیز شمعها تحت بارهای قائم وافقی از موضوعات تحقیقاتی پرسابقه در مهندسی پی است. درگذشته، مطالعه در این زمینه تنها معطوف به آنالیز استاتیکی بوده است ودر این راستا مطالعات تحلیلی وتجربی متنوعی نیز صورت گرفته است. غالب مطالعات تحلیلی مبتنی برمفهوم

---

* استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

تیربربستر ارتجاعی یا مدل وینکلر[1] بوده است ،که درآن وجودخاک دورشمع به‌کمک فنرهای گسترده مدل میشود [۱،۲،۳،۴،۵،۶،۷] .برای استفاده عملی ازاین روش نیاز به مقدار سختی زمین یا مدول عکس العمل زمین[2] است که برای تعیین آن اندازه‌گیریهای محلی درخاکهای مختلف صورت گرفته است [۸،۹،۱۰] .این مطالعات تجربی نشان داده است که مدول عکس العمل زمین نه‌تنها به‌عمق بلکه به‌میزان تغییرمکان خاک بستگی دارد وبه‌عبارت دیگر دارای رابطهٔ غیرخطی با تغییرشکل است .

روش دیگری که برای آنالیزشمعهای تحت بارجانبی بکارگرفته شده است استفاده ازتئوری میندلین [۱۱] است . به‌کمک این تئوری تغییرمکانهای ناشی ازبارمتمرکزدرداخل یک نیم‌فضا[3] (محیط نیمه بی نهایت) بدست آمده وبا استفاده ازروشهای ازنوع المانهای‌مرزی در آنالیزشمع بکارمیرود[۱۲،۱۳] .

پیدایش صنعت انرژی هسته‌ای ونیاز به‌طراحی‌وساخت رآکتورهای بزرگ واهمیت بررسی رفتاردقیق آنها درشرایط زلزله ازیک‌سووپیشرفت صنعت استخراج نفت ازدریا ولزوم احداث سازه‌های دریائی استوار بر شمعها ،که‌تحت اثرارتعاشات حاصل ازامواج وزلزله قراردارند، از سوی دیگرمحققین را متوجه‌لزوم‌بررسی رفتاردینامیکی شمعها کرد .این موضوع درمحدودهٔ دانش جدیدی به‌نام اثرمتقابل خاک وسازه[4] است .از آنجاکه اولین نتایجی که ازچنین مطالعاتی بدست آمده بودپدیده‌های جدیدی را دررفتارسازه آشکارمیکرد تحقیق درمطالعهٔ جنبه‌های دینامیکی رفتارپی های شمعی درسالهای اخیربشدت گسترش یافت .

پنزین وهمکارانش [۱۴] وتاجیمی [۱۵] ازجمله اولین محققینی بوده‌اندکه واکنش شمعها راتحت اثرزلزله موردبررسی قرارداده‌اند . مطالعات تاجیمی مبتنی برحل‌معادلات انتشارموج دریک لایه‌خاک واقع بربسترصلب است . بااین روش اوموفق شدبرای تغییرمکان شمع روابط

---

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

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

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

با استفاده از تئوری تیر بر بستر ارتجاعی، نوواک [۱۶] موفق شد سختی های دینامیکی قائم، افقی[1] و چرخشی[2]، شمعهای منفرد با اتکاء انتهائی[3] را بدست آورد. در مدل بکار رفته توسط نوواک مدول عکس العمل زمین یک کمیت مختلط[4] است که جزء حقیقی آن معرف سختی و جزء موهومی آن معرف استهلاک تشعشعی[5] یا هندسی است. استهلاک هندسی نشان دهندهٔ تشعشع انرژی از طریق امواج ساطع شده در اثر ارتعاش شمع است. مدول مختلط عکس العمل زمین نیز برای ارتعاش یک شمع در محیط بی نهایت بدست آمده اند [۱۷]، یعنی با این فرض که حرکت خاک در اثر ارتعاش شمع متشکل از امواج استوانه ای است که بطور افقی منتشر میشوند. با استفاده از همین روش نوواک و ابوالعلاء [۱۸، ۱۹] ماتریس سختی دینامیکی یک جزء از شمع را بدست آورده و با سوار کردن ماتریس سختی هر لایه واکنش دینامیکی یک شمع را در محیطهای لایه ای خاک مورد مطالعه قرار دادند. لازم به تذکر است که با توجه به ماهیت مدولهای مختلط عکس العمل زمین، این نتایج برای محدودهٔ فرکانسهای کوچک (کوچکتر از فرکانسهای اصلی لایه) مناسب نیستند ولی با افزایش فرکانس دقت آنها 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 ابتداء با حل معادلهٔ موج برای یک لایه

---

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

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

ویسکوالاستیک گامهای[1] انتشار موج را درلایه بدست آوردندوسپس با استفاده ازآنها نیروهای واردبرشمع را درهرگام محاسبه کرده وسرانجام واکنش شمع را دراثراین نیروها تعیین کردند. برای محیطهای نیمه بی نهایت (نیم‌فضا) نیزدرسالهای اخیرنتایج جدیدی براساس حل معادلات موج به وسیله تکنیکهای تبدیل انتگرال وحل عددی معادلات حاصل بدست آمده اند [۲۲،۲۳] .

به موازات این روشهای تئوریک روشهای استفاده ازمدلهای اجزاء محدودنیزبرای مطالعه اثرمتقابل شمع وخاک بکارگرفته شده است . دراین ارتباط میتوان به تحقیقات انجام گرفته توسط کوهلمیر [۲۴] ، بلینی وهمکارانش [۲۵] وکی نیاوکاوسل [۲۶] اشاره کرد. مزیت این روشها برروشهای کاملا" تحلیلی این است که به وسیلهٔ آنها میتوان رفتارشمعها را درمحیطهای غیرهمگن نیزمورد مطالعه قرارداد.

دراینجا لازم است مختصرا" توضیح داده شودکه سختی های دینامیکی کمیتهای وابسته به فرکانس اند. علاوه براین،چون در محیطهای ویسکوالاستیک ، استهلاک ازنوع هیستریتیک است درآنالیزدینامیکی شمعها ( یا به طورکلی پی‌ها ) مناسب تراست ازنیروی هارمونیک $P=P_o e^{i\omega t}$ استفاده شود ($P_o$ حداکثرنیرو ، $\omega$ فرکانس ارتعاش و $i=\sqrt{-1}$ است ). اگر واکنش دائمی دراثرچنین نیروئی به صورت $u=u_o e^{i\omega t}$ باشد دراین صورت نسبت $K=P_o/u_o$ که یک کمیت مختلط است سختی دینامیکی نظیر تغییرمکان u است .امروزه غالب نتایجی که درارتباط باسختی پی‌ها ارائه میشودبه صورت سختی دینامیکی مختلط ، یعنی کمیتی به صورت $K=k+ic$ است که درآن قسمت حقیقی مفهوم سختی وقسمت موهومی مفهوم استهلاک رادارد.

هدف ازاین مقاله مطالعه رفتاردینامیکی شمعهای منفردتحت اثربارجانبی وتحت اثرزلزله دریک محیط ویسکوالاستیک است .دراین مقاله با استفاده ازروش اجزاء محدودروابط ساده ای برای تعیین سختی

1. Modes

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

دینامیکی شمعها تحت بارجانبی ونیز واکنش شمعها تحت اثر زلزله ارائه میشود. مزیت این روش برروشهای مبتنی برمکانیک محیطهای پیوسته واجزاء محدود، گذشته ازسادگی آن، امکان استفاده ازنتایج آزمایشهای صحرائی برای تعیین مدول عکس العمل زمین برای انواع خاکهاست.

**مدول عکس العمل زمین برای ارتعاشات جانبی**

هدف ازاین مقاله تعیین واکنش شمعها با استفاده ازمفهوم مدول عکس العمل زمین است. بنابراین لازم است ابتدا مقداراین کمیت تعیین شود. برای این منظور با استفاده ازروش کاوسل [۲۷] درفرموله کردن یک مرزعبوردهنده[1] برای مسائل آنالیز با تقارن محوری دردینامیک خاک، یک برنامهٔ کامپیوتری توسط نگارنده تدوین شد [۲۶]. دراینجا مناسب است قبل ازارائه نتایج حاصل ازاین برنامه اشارهٔ مختصری به مدل فوق بشود. مشخصهٔ مهم مدلهای اجزاء محدودبرای مسائل اثر متقابل خاک وسازه نحوهٔ منظورکردن تشعشع امواج حاصل ازارتعاش پی به محیط خارج است. چنانچه ازمدلهای متداول اجزاء محدوداستفاده شود لازم است مرزهای مدل درفاصلهٔ دوری ازپی گرفته شوندتا امواج صادر شده ازپی درانعکاس وبرگشت ازاین مرزها دراثر استهلاک داخلی خاک مستهلک شده واثری بررفتار پی نگذارند. این مسئله سبب افزایش حجم حافظهٔ موردنیاز ونیزکاهش دقت جوابها میشود. برای اجتناب ازاین مشکلات ابزارتحلیلی مناسبی به صورت یک ماتریس مرزی ابداع شده است که به کمک آن میتوان مرزهای اجزاء محدودرا درفاصلهٔ بسیارکمی ازپی قرارداد. خاصیت این ماتریس مرزی این است که امواج صادرشده ازپی به بیرون ازمحیط راجذب کرده وآنها را برگشت نمیدهد. این ماتریس مرزی درواقع رابطه‌ای است بین نیروها وتغییرمکانها درگره‌های این مرزو طبیعتا "کمیتی است تابع فرکانس. دریک مسئله اجزاء محدوداین ماتریس مرزی مستقیما "به ماتریس سختی محیط افزوده میشود (برای

---

1. Transmitting Boundary

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

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

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

برای فرکانسهای بزرگتر از $\omega_s$:

$$k_x+ic_x=3.5G + i(10\ \frac{\omega R}{C_s})G \qquad (۱)$$

برای فرکانسهای کوچکتر از $\omega_s$:

$$k_x + ic_x = 3.5G + i(7\beta)G \qquad (۲)$$

که در آنها $\omega_s=2\pi C_s/(4h)$ فرکانس اصلی امواج برشی در لایه خاک، $h$، $C_s$، $G$، $\beta$ به ترتیب ارتفاع، سرعت امواج برشی، مدول برشی و نسبت استهلاک هیسترتیک لایه خاک، $R$ شعاع شمع و $\omega$ فرکانس ارتعاش است.

این نتایج نشان میدهد که قسمت حقیقی مدول مختلط خاک مقداری تقریبا "ثابت دارد. قسمت موهومی مدول عکس العمل خاک، از سوی دیگر، در فرکانسهای کوچکتر از $\omega_s$ تقریبا " ثابت بوده و معرف استهلاک هیسترتیک است و در فرکانسهای بزرگتر از $\omega_s$ تقریبا "به طور خطی افزایش می یابد و معرف استهلاک تشعشعی یا هندسی است. (علت ظهور این پدیده در قسمت موهومی عکس العمل خاک این واقعیت است که در فرکانسهای کوچکتر از $\omega_s$ 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 هیسترتیک خاک است، در حالی که در فرکانسهای بزرگتر از $\omega_s$ امواج برشی از محیط به خارج صادر میشوند و سبب اتلاف انرژی قابل

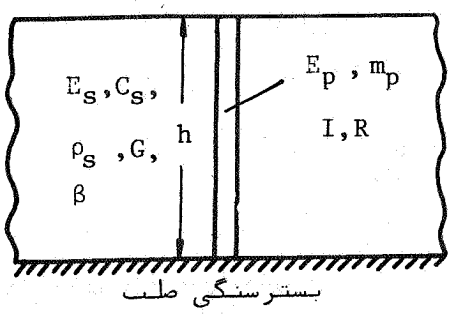
[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

ملاحظه‌ای ازدستگاه میشوند). نتایج فوق با نتایج بدست آمده توسط بارانو[۲۸] یانوواک[۱۷] درفرکانسهای بزرگتر از $\omega_s$ مشابه استولی درفرکانسهای کوچکتر از $\omega_s$ نتایج بدست آمده توسط این دو محقق صحیح نیستندزیرا همانطورکه قبلا"نیزاشاره شداین نتایج براساس یک محیط بی نهایت، ونه یک محیط محدودمثل یک لایه خاک روی بسترصلب، بدست آمده اند.

## سختی دینامیکی شمعهای منفردتحت ارتعاشات جانبی

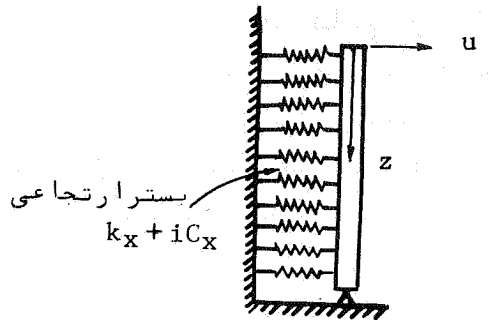
شکل (۱) یک شمع بااتکاءانتهائی رادریک‌لایهٔ خاک ویسکوالاستیک وهمگن نشان میدهد. درشکل (۲)همین شمع به صورت یک‌تیربر بسترارتجاعی با مدول عکس العمل مختلط $K_x=k_x+ic_x$ مدل شده است. اگر $I$،$R$، $E_p$، $\rho_p$، $m_p$ به ترتیب شعاع، ممان اینرسی‌مقطع، مدول الاستیسته، جرم‌واحدحجم وجرم‌واحدطول شمع باشندوتغییرمکان جانبی شمع با $u$ نمایش‌داده‌شود، معادلهٔ دیفرانسیل ارتعاش‌یک‌المان ازشمع عبارت است از:

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




شکل ۱ ــ شمع با اتکاءانتهائی درلایه خاک

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]




شکل ۲ ـ مدل برای مطالعه ارتعاشات جانبی

با فرض یک حرکت هارمونیک به صورت :

$$u(z,t) = \bar{u}(z)e^{i\omega t} \qquad (۴)$$

وقرار دادن این رابطه در معادلهٔ (۳) نتیجه ذیل حاصل میشود :

$$E_p I \frac{d^4\bar{u}}{dz^4} + [(k_x - m_p\omega^2) + ic_x]\bar{u} = 0 \qquad (۵)$$

جواب عمومی معادلهٔ فوق عبارت است از :

$$\bar{u}(z) = e^{\alpha z}(A_1\cos\alpha z + A_2\sin\alpha z) + e^{-\alpha z}(A_3\cos\alpha z + A_4\sin\alpha z) \qquad (۶)$$

که در آن :

$$\alpha = \frac{\sqrt[4]{(k_x - m_p\omega^2)+ic_x}}{\sqrt[4]{4E_p I}} \qquad (۷)$$

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

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

ماتریس سختی میباشندرا محاسبه کرد. دراین ارتباط بایدتوجه داشت که شرایط مرزی نظیرانتهای شمع، با فرض مفصلی عمل کردن انتها، عبارت است از :

$$\bar{u}\,(z=h)=0 \qquad \bar{u}''(z=h)=0 \qquad (۸)$$

این محاسبات نتایج ذیل را برای ماتریس سختی دینامیکی شمع بدست میدهد :

$$\underline{K}=\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{x\phi} \\ K_{\phi x} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \qquad (۹)$$

$$K_{xx}=4E_pI\alpha^3\ \frac{\cosh 2\alpha h+\cos 2\alpha h}{\sinh 2\alpha h-\sin 2\alpha h} \qquad (۱۰)$$

$$K_{x\phi}=K_{\phi x}=-2E_pI\alpha^2\ \frac{\sinh 2\alpha h+\sin 2\alpha h}{\sinh 2\alpha h-\sin 2\alpha h} \qquad (۱۱)$$

$$K_{\phi\phi}=2E_pI\alpha\ \frac{\cosh 2\alpha h-\cos 2\alpha h}{\sinh 2\alpha h-\sin 2\alpha h} \qquad (۱۲)$$

برای بررسی دقت روش تقریبی فوق، نتایج این روش با نتایج بدست آمده توسط نوواک ونوگامی [۲۱] دراشکال(۳) و(۴) مقایسه شده است. منحنی‌های ترسیم‌شده دراین اشکال تغییرات قسمتهای حقیقی و موهومی $K_{xx}$ و $K_{\phi\phi}$ (یعنی سختی های افقی وچرخشی شمع) رانسبت به سختی استاتیکی نظیربدست میدهند. یعنی اگرسختی استاتیکی (مقدار سختی به ازاء $\omega=0$ ) برای حرکت افقی وچرخش به ترتیب با $k^{\circ}_{xx}$ و $k^{\circ}_{\phi\phi}$ نمایش داده شوند، دراین صورت :

$$K_{xx}=k^{\circ}_{xx}(k'_{xx}+ic'_{xx}) \qquad (۱۳)$$

$$K_{\phi\phi}=k^{\circ}_{\phi\phi}(k'_{\phi\phi}+ic'_{\phi\phi}) \qquad (۱۴)$$

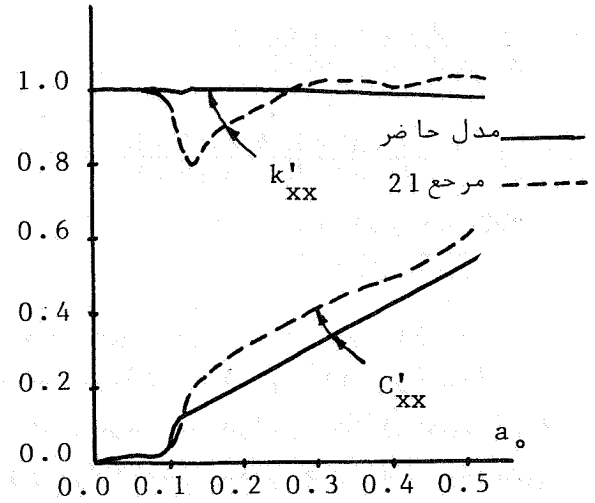
[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

درشکل (۳) تغییرات $k'_{xx}$ و $c'_{xx}$ ودرشکل (۴) تغییرات $k'_{\phi\phi}$ و $c'_{\phi\phi}$ بر- حسب $a_\circ = \frac{\omega d}{C_s}$ ترسیم‌شده‌اند ( d قطرشمع است ). سایرپارامترهای این اشکال به‌قرارزیرند:

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

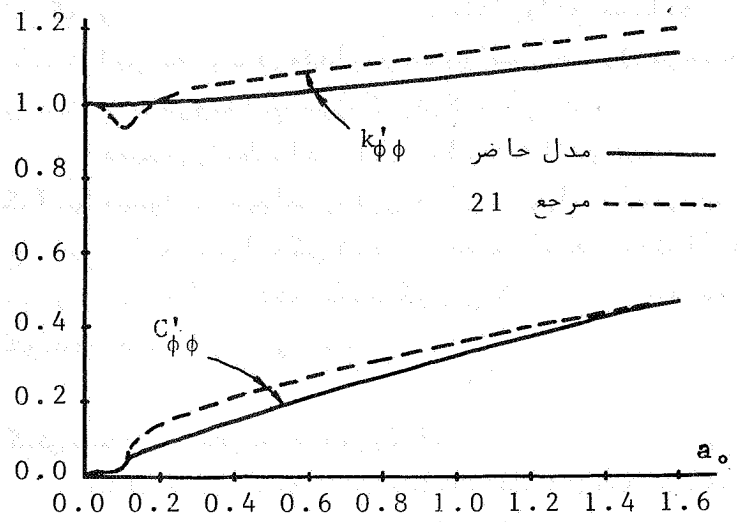
$$\overline{\rho} = \rho_s/\rho_p = 0.6$$

$$\overline{v} = \frac{C_s}{Vp} = \frac{\sqrt{G\rho_p}}{\sqrt{E_p\rho_s}} = 0.01$$




شکل ۳ـ سختی دینامیکی افقی شمع منفرد

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]




شکل ۴ـ سختی دینامیکی چرخشی شمع منفرد

همانطورکه دراین اشکال مشاهده میشودروابط پیشنهادی(روابط ۱۰تا ۱۲) برای سختی دینامیکی شمع برای ارتعاشات جانبی بادقت خوبی این کمیتها را بدست میدهد. قسمتی ازتفاوت بین این نتایج در اثراین مسئله است که نسبت استهلاک درنتایج ارائه شده توسط نوواک و نوگامی برابر $\beta=0/01$ است درحالی که مقادیرمدول عکس العمل زمین (روابط ۱و۲)برای نسبت استهلاک ۰/۰۵ بدست آمده اند. نسبت استهلاک تنها برواکنش دینامیکی درحوالی فرکانس اصلی امواج برشی درلایه ($\omega_s$) اثرمیگذارد. هرقدرنسبت استهلاک کمترباشدسختی دینامیکی در محدوده $\omega_s$ نزول موضعی شدیدتری دارد. این مسئله دراشکال (۳)و(۴) بخوبی مشاهده میشود. اما لازم به تذکر است که این خاصیت موضعی تاثیرمحسوسی برواکنش دینامیکی کلی شمع ندارد. همچنین،

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

نتایج نوواک ونوگامی برای ضریب پواسون ν=۰/۵ بدست آمده اند در حالی که روابط ۱ و ۲ مبتنی بریک مقدار واقع بینانه تر ν =۰/۴ میباشند واین تفاوت در مقدار ضریب پواسون مسئول درصد دیگری تفاوت بین نتایج حاضرونتایج نوواک ونوگامی است.

اهمیت روابط سادهٔ (۱۰) تا (۱۲) ازدوجهت است. اولا" به کمک آنها میتوان بسهولت وبدون نیاز به ابزار تحلیلی پیچیده روابط لازم برای آنالیز دینامیکی شمعها را بدست آورد، ثانیا "به کمک آنها میتوان صحت روشهای تئوریک دیگری راکه برای محاسبهٔ سختیها ارائه میشوند مورد بررسی قرارداد.

**واکنش شمعهای منفرد تحت اثر زلزله**

به طورکلی ،برای انجام یک آنالیز اثر متقابل خاک وسازه علاوه برسختیهای دینامیکی شمع بایدحرکت راس شمع را نیز بدون حضورسازه بدست آورد. به چنین تحلیلی اصطلاحا "اثر متقابل سینماتیکی[1] گفته میشود. نتیجهٔ چنین تحلیلی تعیین توابع انتقالی[2] حرکات راس شمع دراثر یک حرکت هارمونیک است. با استفاده ازنتایج مربوط به سختیهای دینامیکی وتوابع انتقالی ، برای آنالیز کامل سازه(مستقر برشمعها) ،با توجه به مسئله اثر متقابل خاک وسازه ،کافی است سازه روی فنرهائی که سختی آنها برابر سختی شمع است قرارداده شده ،مجموعهٔ آنها تحت اثر حرکات بدست آمده از اثر متقابل سینماتیکی تحلیل شود.

درمقاله حاضر فرض میشود که حرکات ناشی اززلزله درمحیط آزاد[3] (یعنی قبل ازقراردادن شمع )یک تغییرمکان افقی هارمونیک بادامنهٔ واحددرسطح زمین باشد. به علاوه فرض میشود که این حرکات دراثر امواج برشی افقی که ازبسترسنگی به بالا منتشر میشوند ایجاد شده باشند. باتوجه به آنچه دربالا اشاره شد ،هدف ازاثر متقابل سینماتیکی تعیین تغییرمکان افقی

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

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

وچرخش راس شمع در اثر چنین امواجی است. برای این منظور میتوان از قضیهٔ زیرسازه[1] استفاده کرد. مطابق این قضیه، واکنش شمع درشکل (۲) را تحت اثر امواج برشی میتوان با اعمال نیروهای خاصی به شمع بدست آورد. معادلات دیفرانسیل یک المان شمع با مشخصات شکل (۱) را میتوان با استفاده از این قضیه به صورت ذیل نوشت:

$$E_p I \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + K_x u + m_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = K_x u^* - P^* \qquad (۱۵)$$

در این معادله $u^*$ تغییر مکان محیط آزاد است که با حل معادلهٔ یک‌بعدی تشدید[2] ارتعاش درخاک به صورت ذیل بدست می‌آید:

$$u^*(z,t) = u^*_o e^{i\omega t} \cos \frac{\omega}{C_s} z \qquad (۱۶)$$

که در آن $u^*_o$ تغییر مکان دائمی درسطح زمین ($z=0$) است که مقدار آن برابر واحد فرض میشود. نیروی $P^*$ در معادلهٔ (۱۵) براین اساس بدست می‌آید که معادلهٔ (۱۵) شرایط محیط آزاد را در اوقتی خاک جایگزین شمع میشود بوجود آورد. بنابراین میتوان نوشت:

$$P^* = - \left(E_s I \frac{\partial^4 u^*}{\partial z^4} + \pi R^2 \rho_s \frac{\partial^2 u^*}{\partial t^2}\right) \qquad (۱۷)$$

که در آن $\rho_s$ و $E_s$ به ترتیب جرم واحد حجم و مدول الاستیسیتهٔ خاک است.

چنانچه $u(z,t)$ و $u^*(z,t)$ به صورت ذیل بیان شوند:

$$u(z,t) = \bar{u}(z) e^{i\omega t} \qquad (۱۸)$$

$$u^*(z,t) = \cos\omega \frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{G(1+2i\beta)}} z \, e^{i\omega t} = \cos\xi z \, e^{i\omega t} \qquad (۱۹)$$

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

---

1. Substructure Theorem .2. One-Dimensional Amplification

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

$$\frac{d^4\bar{u}}{dz^4}+\left(\frac{K_x-m_p\omega^2}{E_pI}\right)\bar{u}=\frac{K_x-\pi R^2\rho_s\omega^2+E_sI\xi^4}{E_pI}\cos\xi z \qquad (۲۰)$$

جواب عمومی این معادله را میتوان به صورت زیر نوشت :

$$\bar{u}(z)=A_1e^{\alpha z}\cos\alpha z+A_2e^{\alpha z}\sin\alpha z+A_3e^{-\alpha z}\cos\alpha z$$

$$+A_4e^{-\alpha z}\sin\alpha z+\frac{K_x-\pi R^2\rho_s\omega^2+E_sI\xi^4}{E_pI(4\sigma^4+\xi^4)}\cos\xi z \qquad (۲۱)$$

که در آن $\alpha$ با رابطهٔ (۷) تعریف میشود.

با استفاده از رابطهٔ (۲۱) و شرایط مرزی مربوط به راس و انتهای شمع میتوان ثابتهای $A_1$ تا $A_4$ را بدست آورده و تغییر مکان و چرخش راس شمع را با استفاده از رابطهٔ (۲۱) محاسبه کرد. به علت مفصل بودن این نتایج، در اینجا از ارائهٔ روابط به فرم بسته صرف نظر میشود.

شکل (۵) قدر مطلق توابع انتقال، یعنی تغییر مکان افقی $|\bar{u}_o|$ و چرخش $|\bar{\phi}_o|$ در راس شمع را برحسب فرکانس برای پارامترهای زیر نشان میدهد:

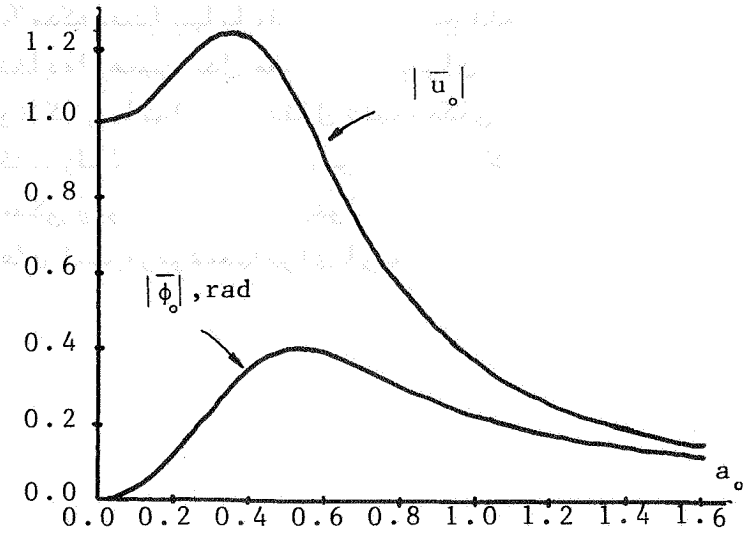
$$\bar{\rho}=0.7 \quad , \quad \frac{h}{d}=30$$

$$\bar{v}=\frac{C_s}{v_p}=\frac{1}{30} \quad , \quad \beta=0.05$$

$$d=1^m \quad , \quad \rho_p=2500kg/m^3$$

نتایج نشان داده شده در شکل (۵) از نظر صورت کلی مشابه نتایج بدست آمده توسط بلینی و همکارانش [۲۵] است. اصولا" برای تمام شمعها توابع انتقال صورت کلی فوق را دارند. بدین ترتیب که شمع سبب فیلتر شدن و حذف فرکانسهای بزرگ و تشدید فرکانسهای کوچک و متوسط میشود. هر قدر خاک سخت تر باشد محدودهٔ فرکانسهائی که حرکت زلزله در

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]




شکل ۵ـ قدرمطلق توابع انتقال برای تغییرمکان وچرخش راس شمع تحت اثرزلزله

آن محدوده تشدیدمیشودافزایش می‌یابدوبرعکس درخاکهای نرم‌فرکانسهای کوچکتری فیلتروحذف میشوند. این مسئله درآنالیزدینامیکی سازه‌های استواربرشمع وتشدیدواکنش آنها نقش مهمی داردوبایدبدقت‌موردتوجه قرارگیرد.

**خلاصه ونتیجه‌گیری**

بااستفاده ازیک مدل اجزاء محدود، مدول عکس العمل زمین برای ارتعاشات جانبی شمعهای مدفون دریک لایه‌خاک ویسکوالاستیک‌به صورت یک رابطه تقریبی ساده‌بدست‌آمد. بااستفاده ازاین نتیجه‌روابط ساده‌ای برای سختیهای دینامیکی شمعهای منفردبااتکاء انتهائی

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

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

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

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 Micgihan 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.

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

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,

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

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,"

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

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

18. Novak, M. and Aboul-Ella, F.,"Impedence 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-

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

namic 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-Sapace." 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.

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]

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 Prochnocti, No. 14, Polytech. Inst. Riga, PP. 195-209.

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1366.6.1.1.8 ]