آنالیز دینامیکی شمعهای منشر در تحت اثر بارهای محوری

امیر مسعود کی‌نیا

دانشگاه صنعتی اصفهان ـ دانشکده عمران

مقدمه

مسئله آنالیز شمعها تحت بارهای وارده مسئله‌ای است که از مدتها قبل مورد توجه محققین مهندسی پی قرار داشته است. مراحل اولیه این مطالعات معطوف به رفتار شمعها تحت بارهای استاتیکی محوری و جانبی بوده است و در این ارتباط روشهای تحلیلی و تجربی متعددی ارائه شده است. برخی از مطالعات تحلیلی بر مفهوم "مدل وینکلر" یا مفهوم "مدول عکس العمل زمین"[1] (یا تئوری تیر یا میله بر بستر ارتجاعی) استوار بوده است، که در آن وجود خاک دور شمع به کمک فنرهای گسترده در آنالیز شمع به کار می‌رود [۲، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۶]. برای تعیین مقادیر مدول عکس العمل یا "سختی زمین" اندازه‌گیریهایی در محل برای خاکهای مختلف صورت گرفته است [۳، ۱۷]. این تحقیقات نشان می‌دهند که مدول عکس العمل زمین نه تنها به عمق بلکه به میزان تغییر شکل خاک نیز بستگی دارد و به عبارت دیگر دارای رابطه غیر خطی با تغییر شکل است.

روش دیگر برای آنالیز شمعهای تحت بار محوری استاتیکی استفاده از تئوری میندلین [۷] بوده است. به کمک این تئوری می‌توان تغییر مکانهای ناشی از بار متمرکز در داخل یک نیم فضا[2] (محیط نیمه بی نهایت) را به دست آورد و سپس به کمک روشهای از نوع المانهای مرزی در آنالیز تغییر شکل شمع به کار برد [۱۳، ۱۴، ۱۵].

با پیدایش صنعت انرژی هسته‌ای و نیاز به طراحی و ساخت راکتورهای بزرگ و اهمیت بررسی دقیق رفتار آنها در شرایط زلزله

---

1. Modulus of Subgrade Reaction
2. Half-Space

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]

ازیک سووگسترش اکتشاف واستخراج نفت ازدریاها ولزوم احداث سازه‌های دریائی استوار برشمعها ،که تحت اثر ارتعاشات حاصل از امواج قرار دارند ازسوی دیگر ،محققین را متوجه لزوم بررسی رفتار دینامیکی شمعها کرد .

این مسئله درواقع درمحدوده‌ٔ دانش جدیدی به نام "اثرمتقابل خاک وسازه"[1] است که اولین نتایج حاصل ازآن پدیده‌های غیرقابل پیش بینی‌ای را دررفتار متقابل خاک وسازه آشکار کرد ودرنتیجه ،تحقیق در این زمینه بسرعت گسترش یافت.مطالعات انجام گرفته دراین زمینه نشان دادکه برای درنظرگرفتن ارتعاشات خاک وپی دررفتار سازه می‌توان سازه را برروی "فنرهایی"که معرف سختی دینامیکی پی واقع برخاک است قرارداد .آنچه دراین ارتباط حائز اهمیت است این مطلب است که سختی های دینامیکی کمیتهایی وابسته به فرکانس اند .

بنابراین برای آنالیزدینامیکی سازه لازم است ازتکنیکهای بسط به سری فوریه وتعیین واکنش دستگاه درمقابل هریک ازمولفه‌های سینوسی تابع نیرواستفاده کرد.براین اساس مفهوم سختی موهومی[2] مطرح شد ،بدین ترتیب که اگرنیروی هارمونیک $P=P_0 e^{i\omega t}$ برپی وارد شودواکنش دائمی آن به صورت $U=U_0 e^{i\omega t}$ خواهدبودودرنتیجه سختی موهومی نسبت $K=P_0/U_0$ است.امروزه اغلب نتایجی که درارتباط باسختی پی‌ها (ازجمله شمعها) ارائه می‌شودبه صورت سختی دینامیکی یا سختی موهومی است ،یعنی کمیتی به صورت $K=k+iC$ که درآن قسمت حقیقی مفهوم سختی وقسمت موهومی مفهوم استهلاک را دارد .

دررابطه با ارتعاشات محوری شمعها می‌توان به کارهای انجام شده توسط نوواک وهمکارانش اشاره کرد [۱۰، ۱۱، ۱۲].این مطالعات مبتنی است برمدول عکس العمل زمین که براساس ارتعاشات محوری یک شمع صلب دریک محیط بی‌نهایت به دست آمده است [۱۲، ۱].روشی بازیربنای ریاضی محکمترنیزتوسط نوگامی ونوواک برای شمعهای

1. Soil-Structure Interaction 2. Complex Stiffness

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]

با اتکاء انتهائی[1] ارائه شده است [۸] . در این روش ،نوگامی و نوواک ابتداء با حل معادلهٔ موج برای یک لایه خاک ویسکوالاستیک روی بسترسنگی،گامهای[2] انتشار موج درلایه را به دست آورند وسپس با استفاده از آنها واکنش دینامیکی شمع را موردبررسی قرار دادند .

درکنار این روشهای تئوریک روشهای استفاده از اجزاء محدود نیزبرای مطالعهٔ اثرمتقابل شمع وخاک بکارگرفته شده است .در این ارتباط می‌توان ازکارکوهلمیر [۶] یادکرد .

هدف از این مقاله مطالعهٔ رفتاردینامیکی شمعهای منفرد تحت اثربارمحوری دریک محیط ویسکوالاستیک با استفاده ازروش اجزاء محدودوارائه روشی ساده برای تعیین سختی دینامیکی محوری شمعهاست مزیت این روش برروشهای مبتنی برمکانیک محیطهای پیوسته ،گذشته ازسادگی آن ،کارآیی بیشتروامکان استفاده ازنتایج آزمایشهای صحرائی برای تعیین مدول عکس العمل زمین برای هرخاک موردنظر است .

مدول عکس العمل زمین برای ارتعاشات قائم با استفاده ازروش اجزاء محدود

ازآنجاکه هدف اصلی دراین مقاله تعیین سختی دینامیکی شمعها با استفاده ازمفهوم مدول عکس العمل زمین است لازم است ابتداء به نحوی این کمیت تعیین شود .برای این منظوربا استفاده ازروش کاوسل [۴] درفرموله کردن یک "مرزعبوردهنده"[3] برای مسائل آنالیز باتقارن محوری دردینامیک خاک ،یک برنامهٔ کامپیوتری توسط نگارنده تدوین شد [۵] . دراینجا لازم است قبل از ارائه نتایج حاصل ازاین برنامه مختصری درموردمدل فوق بیان شود .

ازمسائل مهمی که درتدوین هربرنامهٔ کامپیوتری اجزاء محدود برای مسائل اثرمتقابل خاک وسازه باید درنظرداشت مسئله منظور کردن صحیح تشعشع امواج حاصل ازارتعاش پی به محیط خارج است،در

1.End Bearing Piles 2.Modes 3.Transmitting Boundary

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]

صورتی که از مدلهای معمول اجزاء محدود استفاده شود لازم است مرزهای مدل در فاصلهٔ دوری از پی گرفته شوند تا بدین ترتیب امواج صادر شده از پی در انعکاس و برگشت از این مرزها در اثر استهلاک داخلی خاک مستهلک شده و اثری بر رفتار پی نگذارند. این مسئله سبب افزایش حجم حافظه مورد نیاز و کاهش دقت جوابها می‌شود. برای اجتناب از این مشکلات ابزار تحلیلی جالبی به صورت یک ماتریس مرزی ابداع شده است که به کمک آن می‌توان مرزهای اجزاء محدود را در فاصلهٔ بسیار نزدیکی از پی قرار داد و به کمک آن امواج صادر شده به بیرون از محیط را جذب کرد. این ماتریس مرزی در واقع رابطه‌ای است بین نیروها و تغییر مکانها در گیرههای مرز و طبیعتاً " کمیتی است تابع فرکانس . در یک مسئله اجزاء محدود این ماتریس مرزی مستقیماً " به ماتریس سختی محیط افزوده می‌شود (برای جزئیات کامل محاسبه این ماتریس مرزی به مرجع شمارهٔ [۴]. رجوع شود).

با استفاده از برنامهٔ فوق یک نیروی محوری یکنواخت به بزرگی واحد در ارتفاع مرز عبور دهنده اعمال شد و مقدار متوسط تغییر مکان گرههای این مرز به دست آمد و سپس با معکوس کردن آن مدول عکس العمل موهومی لایه خاک به صورت k_s+ic_s برای فرکانسهای مختلف ارتعاش محاسبه شد. نتیجه این محاسبه به صورت خط پر در شکل (۱) نمایش داده شده است. این منحنی ها برای استهلاک هیستریتیک خاک $\beta_s=5\%$ به دست آمده است .

این نتایج نشان می‌دهند که قسمت حقیقی مدول موهومی خاک مقداری تقریباً " ثابت دارد (به جز برای فرکانسهای نزدیک به فرکانس امواج فشاری لایه برابر $\omega_p = 2\pi\frac{V_p}{4H}$ که در آن $V_p=V_s\frac{\sqrt{2(1-\nu)}}{\sqrt{1-2\nu}}$ سرعت امواج فشاری در خاک است. ضمناً " V_s سرعت امواج برشی، H ضخامت لایه و ν ضریب پواسون خاک است. هر قدر مقدار استهلاک هیستریتیک خاک کمتر باشد ناحیهٔ دره‌ای شکل در منحنی سختی شیب تندتری دارد و مقدار سختی در فرکانس ω_p کاهش بیشتری می‌یابد). قسمت موهومی مدول عکس العمل خاک، از سوی دیگر، که معرف استهلاک ارتعاشات است ، در

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]

فرکانسهای پایین تراز ω_p تقریبا" ثابت ومعرف استهلاک هیسترتیک است ودرفرکانسهای بزرگتراز ω_p تقریبا" به‌طورخطی با فرکانس افزایش می‌یابد. دراین حالت به استهلاک حاصله استهلاک هندسی[1] یا استهلاک تشعشعی[2] گفته می‌شود. (علت ایجاد این‌خاصیت درقسمت موهومی مدول عکس العمل خاک این‌واقعیت است که‌درفرکانسهای کوچکتراز ω_p امواج ایجادشده امکان خروج ازمحیط راپیدانمی‌کنندودرمحیط محصورمی‌شوندودرنتیجه تنها منبع اتلاف انرژی دردستگاه استهلاک هیسترتیک خاک است، درحالیکه درفرکانسهای بالاتراز ω_p امواج فشاری ازمحیط به‌خارج صادرمی‌شوندوسبب اتلاف انرژی بزرگی از دستگاه می‌شوند).

درهمین شکل مدول موهومی عکس العمل زمین که‌توسط بارانو [۱] یانوواک [۱۲] به‌دست آمده است به‌صورت خط چین ترسیم شده است بایدتوجه داشت که‌اگرچه درفرکانسهای بالاتراز ω_p هردونتیجه مشابهند درفرکانسهای پائین تراز ω_p نتایج به‌دست آمده توسط بارانو یا نوواک صحیح نیستندزیراهمانطورکه‌قبلا" نیزاشاره‌شداین نتایج‌بر اساس یک محیط بی‌نهایت (ونه محدود) به‌دست‌آمده‌اند.

براساس نتایج بدست آمده (شکل (۱)) روابط تقریبی زیربرای مدول عکس العمل زمین توصیه می‌شود:

- برای فرکانسهای بزرگتراز ω_p

$$k_s+iC_s=2.3G+i(.7+\frac{6\omega R}{V_s})G \qquad (۱)$$

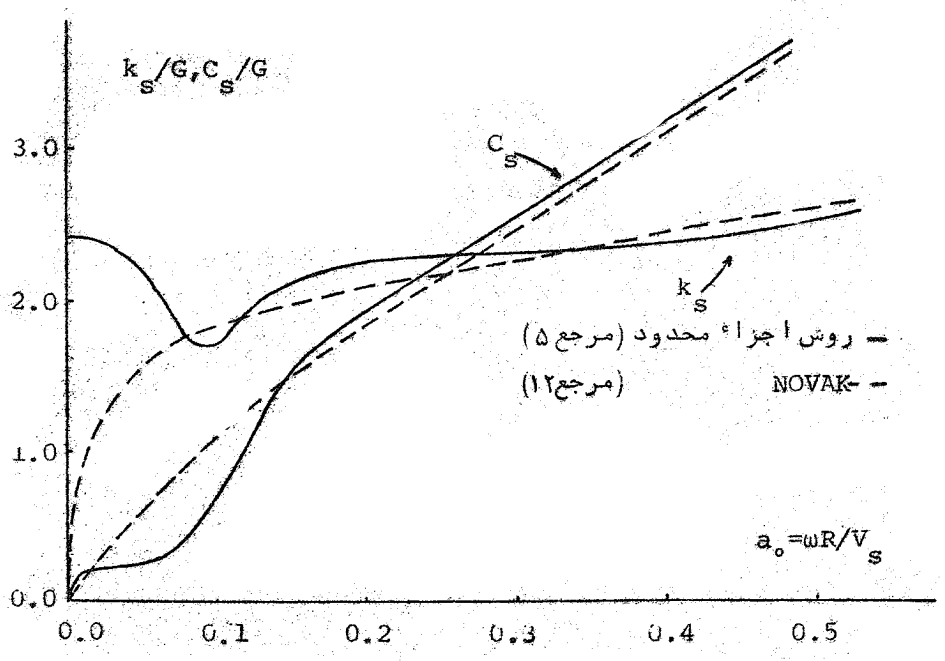
- برای فرکانسهای کوچکتراز ω_p :

$$k_s+iC_s=2.3G^c=2.3G+i(4.6\beta_s)G \qquad (۲)$$

دراین روابط G و G^c به‌ترتیب مدول برشی ومدول برشی موهومی‌خاک، ω فرکانس ارتعاشات دائم، R شعاع‌مقطع‌شمع و β_s نسبت استهلاک

1.Geometric Damping 2.Radiation Damping

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]



شکل (۱) ـ مدول موهومی عکس‌العمل زمین برای ارتعاشات محوری

هیستر تیک خاک است .

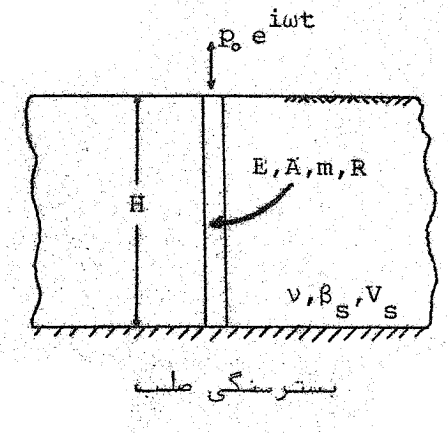
سختی دینامیکی شمعهای منفرد تحت ارتعاشات محوری

همانطورکه قبلا" نیز اشاره شد هدف اصلی در این مقاله دستیابی یک رابطه ساده برای سختی دینامیکی محوری شمعهای منفرد است . با استفاده از روابط تقریبی (۱) و (۲) بخش قبل در اینجا میتوان به تعیین سختی یک شمع با اتکاء انتهائی پرداخت .

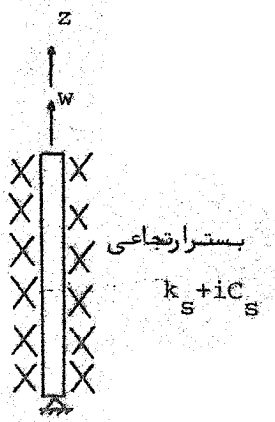
شکل (۲) یک شمع با اتکاء انتهائی را در یک لایه خاک ویسکو-الاستیک وهمگن نشان می‌دهد . در شکل (۳) همین شمع به صورت پک

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]

میله‌دربسته ارتجاعی با مدول عکس العمل $k_s + iC_s$ مدل شده است .اگر E، A ، m به‌ترتیب ،مدول الاستیسیته ،سطح‌مقطع وجرم‌واحد طول شمع باشند ،معادلهٔ دیفرانسیل یک جزء ازشمع درصورتی که w



شکل(۲)ـ شمع با اتکاء انتهائی درلایه‌خاک



شکل(۳)ـ مدل‌برای‌مطالعه‌ارتعاشات‌محوری

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]

معرف تغییرمکان محوری‌شمع باشد،عبارت است از:

$$EA\frac{\partial^2 W}{\partial z^2}-(k_s+iC_s)W=m\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \qquad (۳)$$

برای یک حرکت هارمونیک به‌صورت

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

معادله (۳)به‌صورت زیرنوشته می‌شود:

$$EA\frac{d^2\bar{W}}{dz^2}-\{(k_s-m\omega^2)+iC_s\}\bar{W}=0 \qquad (۵)$$

جواب عمومی معادله‌فوق عبارت است از

$$\bar{W}=A_1\mathrm{Cosh}\eta z+A_2\mathrm{Sinh}\eta z \qquad (۶)$$

که درآن

$$\eta=\sqrt{\frac{(k_s-m\omega^2)+iC_s}{EA}} \qquad (۷)$$

حال با استفاده‌ازرابطهٔ (۶) وباتوجه‌به‌دوشرط مرزی

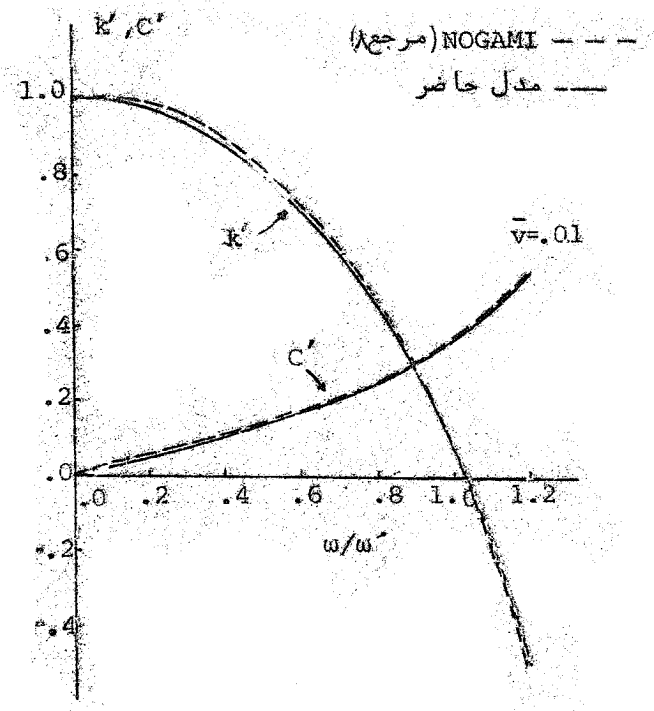
$$\bar{W}(z=0)=0$$
$$\bar{W}(z=H)=1 \qquad (۸)$$

می‌توان ضرائب A_1وA_2وباستفاده‌ازآنهانیروی لازم درراًس شمع را که‌همان سختی دینامیکی‌است به‌ترتیب زیربه‌دست‌آورد:

$$K_z=EA\eta\mathrm{Coth}\eta H \qquad (۹)$$

برای بررسی دقت روش‌تقریبی فوق،نتایج این روش‌بانتایج به‌دست‌آمده توسط نوگامی وتوواک[۸] دراشکال (۴)و(۵)برای دو حالت مختلف (شمع درخاک سخت وشمع درخاک نرم)مقایسه‌شده‌است. منحنی های ترسیم‌شده‌دراین اشکال تغییرات k' و c'،یعنی قسمتهای حقیقی وموهومی K_z رانسبت به‌سختی استاتیکی به‌دست می‌دهند،یعنی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]



شکل (۴)ـ سختی‌دینامیکی‌دریک خاک‌سخت

اگرسختی استاتیکی شمع با k_{st} نمایش داده‌شود، دراین‌صورت :

$$K_z=k_{st}(k'+iC') \qquad (11)$$

دراشکال(۴)و(۵)تغییرات k' و C' برحسب ω/ω' ترسیم‌شده‌اند،که‌درآن

$$\omega'=\frac{\pi}{2H}\frac{\sqrt{EA}}{\sqrt{m}}$$

اولین فرکانس طبیعی شمع منفرداست .سایرپارامترهای‌این اشکال به‌قرارزیرند :

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]

β_s=.02

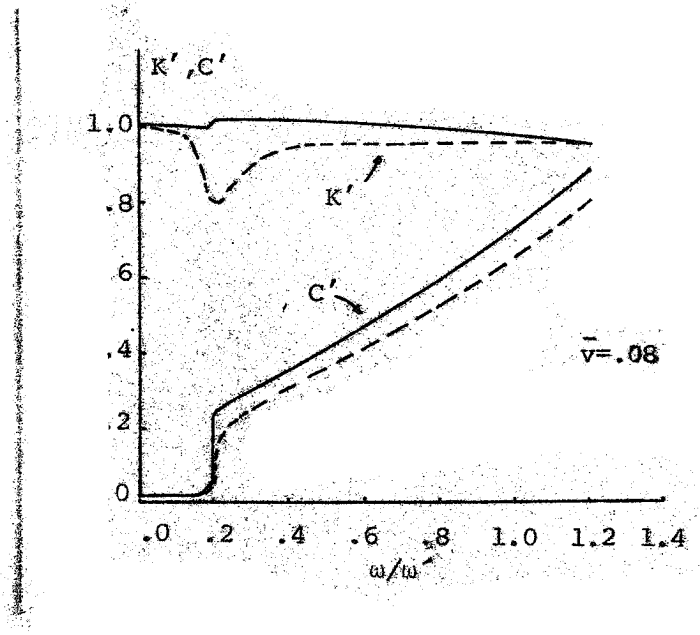
H/R=40

$\bar{\rho}=\rho/\rho_s$=.6

$\bar{v}$=.04 (شکل ۴)

$\bar{v}$=.08 (شکل ۵)

درعبارات فوق ρ و ρ_s به‌ترتیب جرم‌واحدحجم‌شمع‌وخاک و $\bar{v} = \frac{V_s}{V} = \frac{\sqrt{G\rho}}{\sqrt{E\rho_s}}$ نسبت سرعت امواج‌برشی درخاک به‌سرعت امواج‌طولی درشمع است .



شکل(۵)- سختی‌دینامیکی‌دریک خاک نرم

همانطورکه‌دراین‌اشکال‌مشاهده‌میشودرابطهٔ پیشنهادی برای‌سختی دینامیکی شمع برای‌ارتعاشات محوری با دقت خوبی‌این‌کمیت‌را به دست می‌دهد .

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]

اهمیت وارزش رابطهٔ ساده فوق (رابطهٔ ۹) ازدوجهت است اولا" به‌کمک آن تعیین سختی دینامیکی بسیار سریع وآسان می‌شود، ثانیا" به‌کمک آن می‌توان صحت روشهای تئوریک دیگری که برای محاسبهٔ سختی ارائه می‌شوند را بررسی کرد.

برای اینکه بتوان از روش فوق، که دقت آن به وسیله نتایج فوق تایید شد، برای محاسبهٔ سختی دینامیکی شمعهای اصطکاکی یا شمعهای شناور[1] استفاده کرد می‌توان از روشی که توسط نوگامی [۹] وبرخی دیگر ازمحققین برای درنظرگرفتن این مسئله پیشنهاد شده است استفاده کرد. بدین ترتیب که مطابق شکل (۶) می‌توان فرض کرد ستونی ازخاک با همان قطر شمع اززیرشمع تا بسترسنگی قرارگرفته است و در واقع شمع ازدوجنس با مدولهای الاستیسیتهٔ E و E_s وباطولهای H و h تشکیل شده است. شکل (۷) نیز این شمع مجازی را دربستر ارتجاعی آن نشان می‌دهد. با استفاده از حل معادلات دیفرانسیل مربوط به دوقسمت شمع مطابق رابطهٔ (۶) وبا اعمال شرائط مرزی درقسمت فوقانی و تحتانی شمع ونیز با توجه به سازگاری تغییرشکل وتعادل نیروها در فصل مشترک دوقسمت شمع به سادگی می‌توان نشان داد که در این حالت سختی دینامیکی شمع برابر است با:

$$K_z = EA\eta \frac{E\eta Sinh\eta H Sinh\eta_s h + E_s\eta_s Cosh\eta H Cosh\eta_s h}{E\eta Cosh\eta H Sinh\eta_s h + E_s\eta_s Cosh\eta_s h Sinh\eta H} \qquad (۱۰)$$

که در آن E ، A ، η ، H کمیتهای تعریف شده در ابتدای بخش و η_s با رابطه‌ای مشابه رابطهٔ (۷) به طریق زیر تعریف می‌شود:

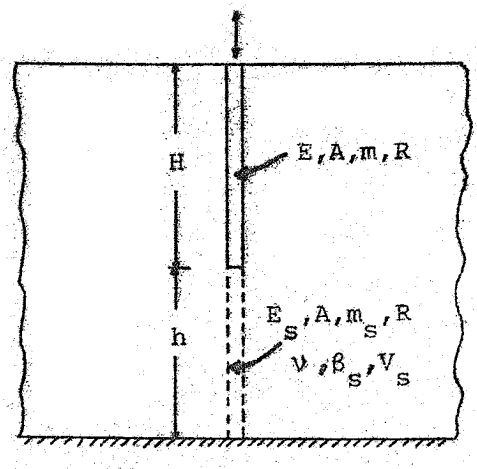
$$\eta_s = \frac{\sqrt{(k_s - m_s\omega^2) + iC_s}}{\sqrt{E_s A}} \qquad (۱۱)$$

در این رابطه $m_s = \rho_s A$ جرم واحد طول ستون خاک است.

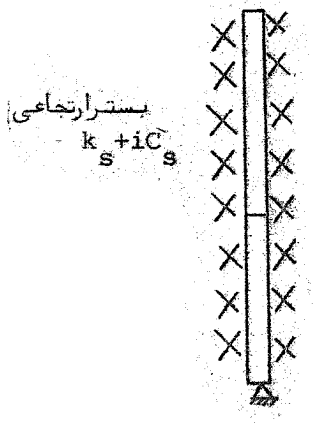
---

1. Floating pile

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]



شکل(۶)ـ شمع‌شنا وردرلایه‌خاک



شکل(۷)ـ مدل برای رفتار شمع‌شناور

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]

خلاصه و نتیجه‌گیری

با استفاده از روش اجزاء محدود، مدول عکس العمل زمین برای ارتعاشات محوری شمعهای مدفون در یک لایه خاک ویسکوالاستیک به صورت یک رابطهٔ تقریبی بدست آمد. با استفاده از این مدول رابطهٔ ساده‌ای برای سختی دینامیکی شمع‌های منفرد با اتکاء انتهائی به دست آمد که دقت آن در مقایسه با نتایج تئوریک نشان داده شد. همچنین با استفاده از همین مدل ریاضی رابطه‌ای نیز برای محاسبهٔ سختی دینامیکی محوری شمعهای شناور ارائه شد. به کمک این سختی‌های دینامیکی می‌توان اثر متقابل خاک و سازه را برای سازه‌های استوار بر شمعها برای ارتعاشات قائم مورد مطالعه قرار داد.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]

منابع ومراجع:

1.Baranov,V.A.,"On The Calculation of Excited Vibrations of an Embedded Foundation," (in Russian), Voprasy Dynamiki Prochnocti, No.14,Polytech. Inst. Riga,P.P. 195-209.

2.Hetenyi,M.,Beams on Elastic Foundation, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1946.

3.Holmquist, D.V. and Matlock,H.,"Resistance-Displacement Relationships for Axially-Laded piles in Soft Clays," Proceedings of the 8th Offshore Technology Conference, 1976,paper No. OTC 2474,pp.554-569.

4.Kausel,E.,"Forced Vibration of Circular Foundations on Layered Media,"Dept. of Civil Engineering,M.I.T. Research Report R74-11,Jan.74

5.Kaynia,A.M.,and Kausel,E.,"Dynamic Stiffness and Seismic Response of Sleeved piles",Dept. of civil Engineering,M.I.T.,Research Report R80-12,May 1980.

6.Kuhlemeyer,R.L ,"Vertical Vibration of piles,"Journal of The Geotechnical Engineering Division,ASCE,Vol.105 No.GT2,Feb. 1979,PP.289-304.

7.Mindlin,R.D.,"Forces at a point in the Interior of a Semi Infinite Solid,"Physics,7,May 1936,pp.195-202.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]

8.Nogami,T.,and Novak,M.,"Soil-pile Interaction in Vertical Vibration," International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, John Wiley and Sons,Vol.4,No,3,Jan.-Mar.1976,pp.277-293

9.Nogami,T.,"Dynamic Group effect of Multiple piles Under Vertical Vibration," proc. of the ASCE Engineering Mechanics Division Specialty Conference, Austin,Texas, pp.750-754.

10.Novak,M.,"Dynamic Stiffnesses and Damping of Piles," Canadian Geotechnical Journal,Vol.II,No.4,1974,pp.574-598.

11.Novak,M.,"Vertical Vibration of Floating Piles," Journal of The Engineering Mechanics Division,ASCE , Vol. 103,No.EM1,Proc. Paper 12747 , Feb.1977,pp.153-168.

12.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

13.Poulos,H.G.,and Davis,E.H,"The Settlement Behavior of Single Axially-Loaded Incompressible piles and piers," Geotechnique,Vol.18,No.3,1968,pp.351-371.

14.Poulos,H.G.,"Analysis of The Settlement of pile groups"

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]

Geotechnique, Vol 18,pp.449-471.,1968.

15.Poulos,H.G.,and Davis,E.H., pile Foundation Analysis and Design, New york ,John Wiley and Sons,1980.

16.Reese,L.C.,Cox,W.R.,and Koop,F.D.,"Analysis of laterally Loaded piles in Sand,"Proc of the Sixth Annual offshore Technology Conference, paper No.OTC 2080,Houston,Texas,1974

17. Reese,L.C.,Cox,W.R.and Koop;F.D.,"Field Testing and Analysis of Laterally- Loaded piles in Stiff clays," Proc.of the Seventh Annual offshore Technology conference,paper. No.2312, Houston.Texas, 1975,Vol.2,pp.671-690.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1366.5.1.1.5]