

تأثیر سختی کلاhek در رفتار گروه شمع تحت اثر بار زلزله

محمد علیایی* (استادیار)

کهیل خاکپور (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳
دوری ۲-۳۰، شماره ۱/۴، ص. ۳۴-۲۵

پی‌های شمعی اغلب به صورت گروه شمع برای سکوه‌های دریایی، پل‌ها و ساختمان‌های بلند استفاده می‌شوند. هدف این پژوهش، بررسی اثر سختی کلاhek گروه شمع در رفتار شمع‌ها تحت اثر بار دینامیکی با استفاده از روش تفاضل محدود سه بعدی در خاک‌های ماسه‌یی است. تحقیقات نشان می‌دهد که سختی کلاhek گروه شمع، شرایط اتصال شمع به کلاhek و اندرکنش سازه - شمع - خاک تأثیر قابل ملاحظه‌یی در رفتار گروه شمع در برابر بارهای جانبی دارد. در این نوشتار، برای اتصال شمع‌ها به یکدیگر از المان تیر استفاده شده است. مطالعه‌ی سختی کلاhek شمع نشان می‌دهد با افزایش یا کاهش سختی کلاhek شمع، بیشینه‌ی جابه‌جایی، بیشینه‌ی نیروی برشی و بیشینه‌ی لنگر خمشی در شمع‌ها الزاماً کاهش یا افزایش نمی‌یابد، بلکه با توجه به جرم مجموعه، برای هر گروه شمع محدوده‌یی از سختی کلاhek وجود دارد، که در آن بیشترین جابه‌جایی، نیروی برشی و ممان در شمع‌ها ایجاد می‌شود.

واژگان کلیدی: سختی کلاhek گروه شمع، تحلیل دینامیکی، اندرکنش سازه -

شمع - خاک، تحلیل تفاضل محدود سه بعدی.

m.olyaei@modares.ac.ir
k.khakpour@modares.ac.ir

۱. مقدمه

پژوهشگرانی در سال ۲۰۰۷، پایه‌ی پل در رودخانه‌ی Nak-Kong کره (شکل ۱) را در دو حالت با کلاhek انعطاف‌پذیر و صلب مورد بررسی قرار دادند. نتایج در شکل‌های ۲ و ۳ و جدول ۱ به صورت خلاصه ارائه شده است.^[۱]

با توجه به نتایج ارائه شده در پژوهش مذکور، در تحلیل گروه شمع با کلاhek انعطاف‌پذیر، مقادیر بار جانبی و ممان خمشی در شمع، به موقعیت قرارگیری آن در گروه بستگی دارد. همچنین با فرض کلاhek صلب در تحلیل، به شدت مقدار ممان خمشی در سرشمع‌ها کاهش می‌یابد.

در این نوشتار، با توجه به تحلیل‌های انجام شده‌ی پیشین،^[۱] و اهمیت اندرکنش سینماتیکی در مدل سازه - شمع - خاک، به تحلیل سه بعدی اثر سختی کلاhek شمع در رفتار گروه شمع تحت اثر بار زلزله با استفاده از روش تفاضل محدود پرداخته شده است. در ضمن برای اتصال شمع‌ها، از تیرهای بتنی استفاده و با کاهش طول مؤثر تیرها، اثر سختی این تیرها در رفتار شمع‌ها تحت بارهای دینامیکی بررسی شده است.

در بخش ۲، با توجه به اهمیت پارامترهای سطح مشترک^۱ در مدل‌سازی شمع و خاک، پارامترهای سطح مشترک شمع و خاک مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در بخش ۳، عوامل مؤثر در تحلیل دینامیکی و در بخش ۴، مدل‌سازی گروه شمع ارائه شده است و در انتها، به تحلیل و نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

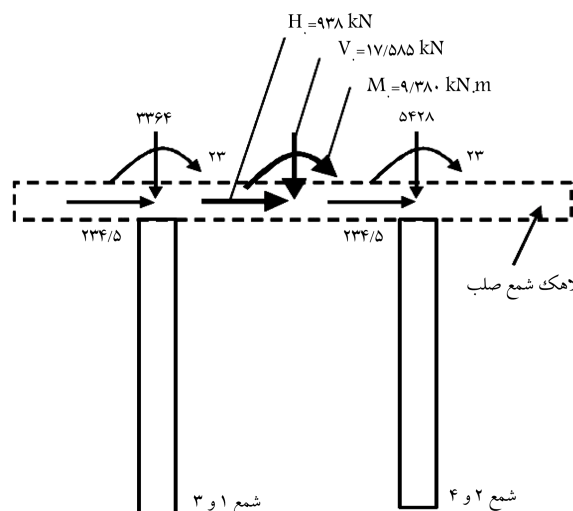
در سازه‌هایی که تحت بارهای دینامیکی قرار دارند (برج‌ها، سازه‌های دریایی، پل‌ها، پی ماشین‌های صنعتی و...)، گروه شمع روش مرسوم برای انتقال نیرو به لایه‌های مقاوم پایین‌تر، کاهش نشست و کاهش اختلاف نشست است.^[۱] کلاhek شمع به عنوان عضو سازه‌یی، برای توزیع بارها بین شمع‌ها استفاده می‌شود.^[۲] تحقیقات نشان می‌دهد سختی کلاhek گروه شمع و شرایط اتصال شمع به کلاhek تأثیر قابل ملاحظه‌یی در رفتار گروه شمع در برابر بارهای جانبی دارد.^[۳] یکی از نکات مهم در طراحی پی‌های شمعی، تعیین سختی سیستم کلاhek - شمع - خاک است. در طراحی صحیح پی‌های شمعی برای استفاده در سازه‌های انعطاف‌پذیر، رابطه‌ی بین سختی شمع و کلاhek اهمیت ویژه‌یی دارد.^[۴] برای محاسبه‌ی اندرکنش شمع و کلاhek از روش سختی یا المان محدود یا تفاضل محدود استفاده می‌شود. روش سختی در ابتدا در سال ۱۹۵۰ مطرح شد. صلب در نظر گرفتن کلاhek شمع از معایب این روش است. برای در نظر گرفتن اثر سختی کلاhek شمع در تحلیل‌ها، از روش‌های المان محدود یا تفاضل محدود استفاده شد.^[۵] مطالعات صحرایی، آزمایشگاهی و عددی زیادی به بررسی رفتار گروه شمع در برابر بارهای جانبی پرداخته است.^[۶-۷]

* نویسنده مسئول

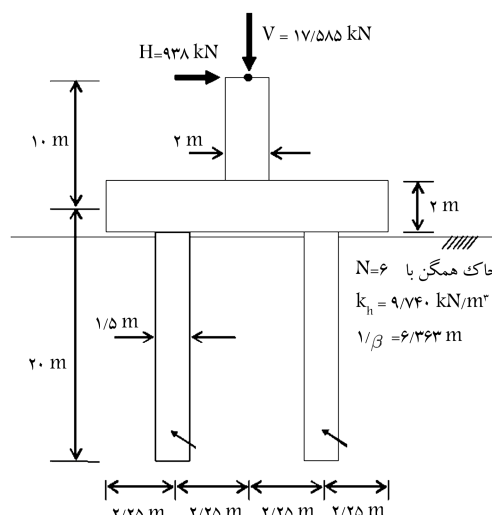
تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۵/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۰/۳، پذیرش ۱۳۹۱/۱۲/۱۲.

جدول ۱. نتایج تحلیل پایه‌ی پل Nak-Kong [۱۰].

صفحه	نیرو یا ممان در سر شمع	کلاهک صلب		کلاهک انعطاف پذیر	
		شمع‌های ۲ و ۴	شمع‌های ۱ و ۳	شمع‌های ۲ و ۴	شمع‌های ۱ و ۳
X-Z	بار جانبی (kN)	۲۳۴٫۵	۲۳۴٫۵	۲۶۷	۲۰۲
	ممان خمشی (kN-m)	۲۳	۲۳	۲۶۴	-۱۵۲
Y-Z	بار جانبی (kN)	-	-	۳۴	۳۰
	ممان خمشی (kN-m)	-	-	±۲۲۲	±۱۹۴
	نیروی محوری (kN)	۵۴۲۸	۳۳۶۴	۵۴۶۳	۳۳۲۹



شکل ۳. تحلیل با کلاهک صلب برای پایه‌ی پل در رودخانه‌ی Nak-Kong کره [۱۰].



شکل ۴. پایه‌ی پل در رودخانه‌ی Nak-Kong کره [۱۰].

نیاز به آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی دارد. در این بخش با توجه به روابط و مدل‌های ارائه شده برای پارامترهای سطح مشترک شمع و خاک سعی شده است با تحلیل‌های عددی، این پارامترها مشخص شوند.

۱.۲. رفتار فنرهای برشی در سطح مشترک شمع و خاک [۴]

در مدل‌های عددی، رفتار برشی سطح مشترک در هنگام جابه‌جایی برشی نسبی بین گره‌های شمع و نقاط شبکه‌ی مدل، با سختی برشی فنر (K_s) مطابق رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود (شکل ۴):

$$\frac{F_s}{L} = K_s (u_p^s - u_m^s) \quad (1)$$

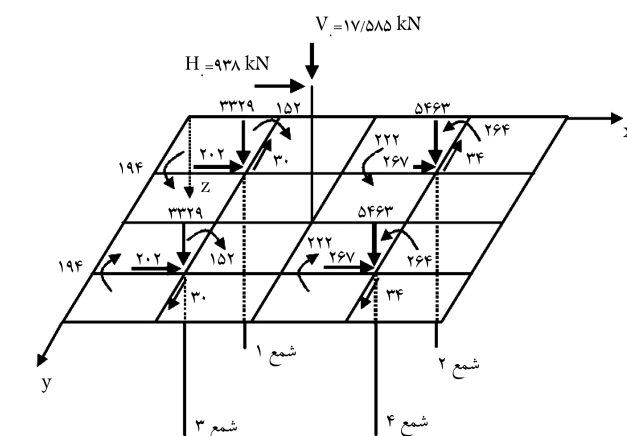
که در آن، F_s نیروی برشی در فنر برشی، u_p^s جابه‌جایی محوری شمع، u_m^s جابه‌جایی مدل (خاک یا سنگ) در راستای محور شمع و L طول المان است. نیروی برشی بیشینه بر واحد طول المان شمع به صورت رابطه‌ی ۲ بیان می‌شود:

$$\frac{(F_s^{\max})}{L} = c_s + \sigma_m \times \tan(\phi_s) \times \text{perimeter} \quad (2)$$

که در آن، c_s مقاومت چسبندگی فنر برشی، σ_m تنش محدودکننده‌ی اطراف المان شمع و ϕ_s زاویه‌ی اصطکاک فنر برشی است.

۲.۲. رفتار فنرهای نرمال در سطح مشترک شمع و خاک [۱۱]

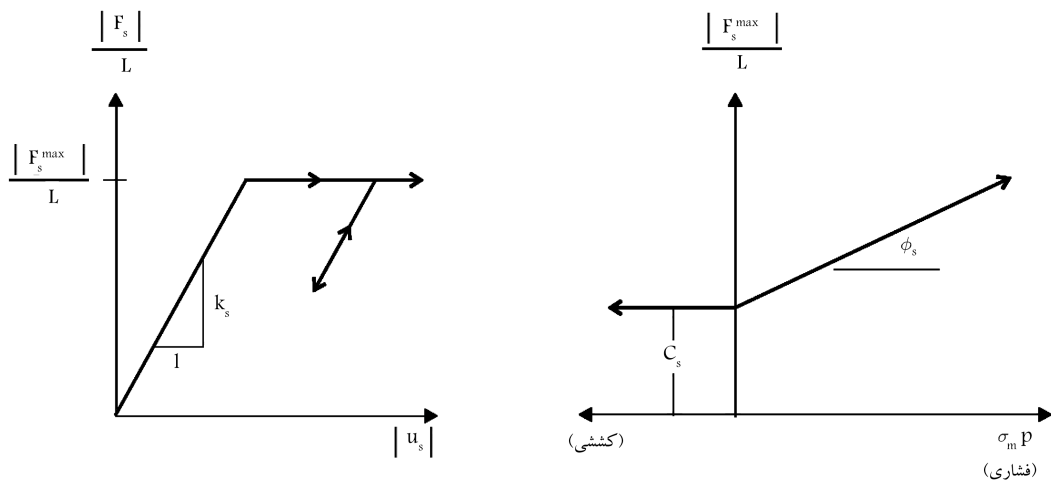
رفتار نرمال سطح مشترک شمع و نقاط شبکه‌ی مدل توسط فنر نرمال مدل‌سازی می‌شود. به عبارت دیگر، جابه‌جایی نرمال نسبی بین گره‌های شمع و نقاط شبکه‌ی



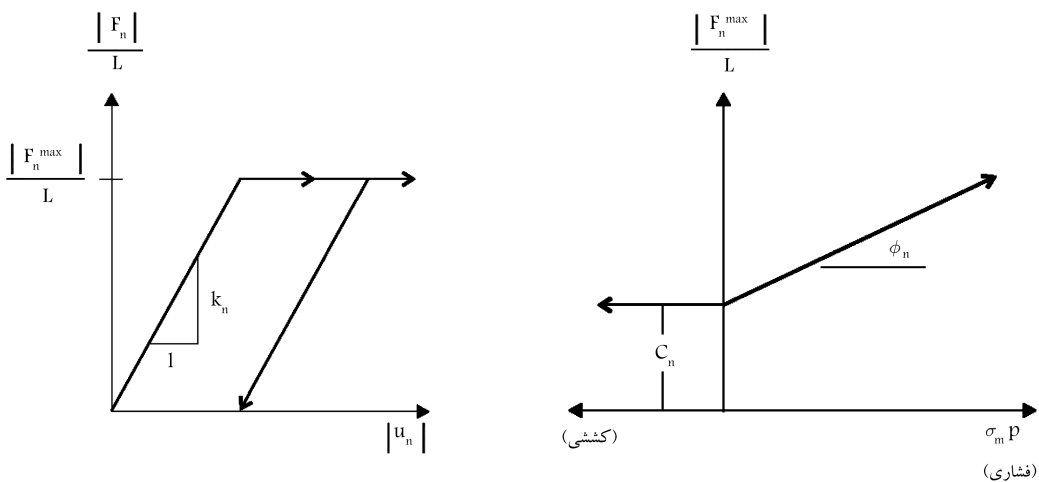
شکل ۵. تحلیل با کلاهک انعطاف پذیر برای پایه‌ی پل در رودخانه‌ی Nak-Kong کره [۱۰].

۲. پارامترهای سطح مشترک شمع و خاک [۱۱]

المان شمع دارای ۱۲ درجه‌ی آزادی است که نیروهای برشی، نرمال و لنگر خمشی را به نقاط شبکه‌ی تفاضل محدود انتقال می‌دهد. در واقع المان شمع ترکیبی از رفتار المان‌های تیر و کابل است، که در آن نیروی برشی موازی المان و نیروی نرمال عمود بر المان است. در اتصال گره‌های شمع به نقاط شبکه‌ی مدل، از فنرهای نرمال و برشی استفاده می‌شود. [۱۱] تعیین پارامترهای سطح مشترک شمع و خاک



شکل ۴. رفتار فنر برشی در المان شمع.^[۱۱]



شکل ۵. رفتار فنر نرمال در المان شمع.^[۱۱]

مقاومت زاویه‌ی اصطکاک فنر برشی (ϕ_s) برابر زاویه‌ی اصطکاک داخلی در نظر گرفته می‌شود. در ضمن این پارامتر برای سطح صاف شمع برابر $\frac{\pi}{2}$ زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک است.^[۱۱]

مقاومت چسبندگی فنر برشی (c_s) برابر حاصل ضرب محیط شمع در چسبندگی خاک است. در ضمن این پارامتر برای سطح صاف شمع برابر $\frac{\pi}{2}$ مقدار محاسبه شده در نظر گرفته می‌شود.^[۱۱]

با توجه به رابطه‌ی ۵، می‌توان سختی برشی سطح مشترک را محاسبه کرد:^[۱۲]

$$K_s = K_n \frac{1 - 2\vartheta}{2(1 - \vartheta)} \quad (5)$$

که در آن، ϑ ضریب پواسون خاک است. در ضمن باید به رابطه‌ی ۶ توجه شود:

$$K_s < K_n < 10 \times \left(\frac{K + \frac{\pi}{2}G}{D_{\min}} \right) \quad (6)$$

که در آن، K ، G و $D_{\min}$ به ترتیب مدول حجمی، مدول برشی و کمینه‌ی بعد المان است.^[۴]

در ادامه، با توجه به اهمیت پارامترهای فنر نرمال در سطح مشترک شمع -

مدل، با سختی نرمال (K_n) مطابق رابطه‌ی ۳ بیان می‌شود (شکل ۵):

$$\frac{F_n}{L} = K_n (u_p^n - u_m^n) \quad (3)$$

که در آن، F_n نیروی نرمال در فنر نرمال، u_p^n جابه‌جایی شمع در جهت عمود بر محور آن و u_m^n جابه‌جایی محیط (خاک یا سنگ) در جهت عمود بر محور شمع است.

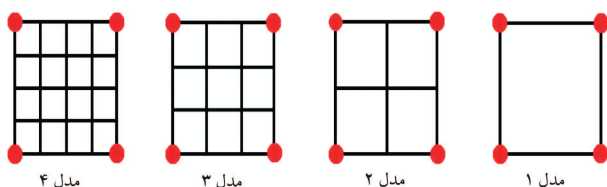
نیروی نرمال بیشینه بر واحد طول المان شمع به صورت معادله‌ی ۴ بیان می‌شود:

$$\frac{(F_n^{\max})}{L} = c_n + \sigma_m \times \tan(\phi_n) \times \text{perimeter} \quad (4)$$

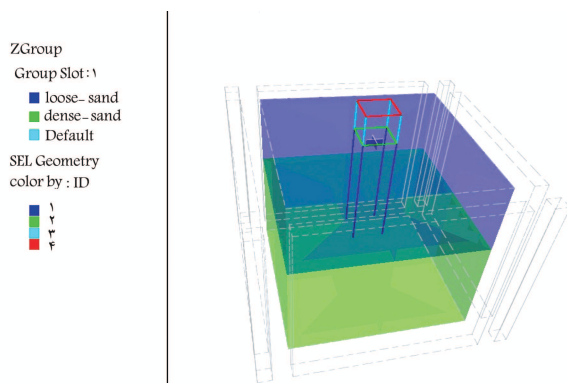
که در آن، c_n مقاومت چسبندگی فنر نرمال و ϕ_n زاویه‌ی اصطکاک فنر نرمال است.

۳.۲. تعیین پارامترهای سطح مشترک شمع و خاک

در بسیاری از موارد، دسترسی به پارامترهای سطح مشترک شمع و خاک دشوار است. در این بخش با توجه به نوع خاک، راهکارهایی جهت به دست آوردن پارامترهای سطح مشترک ارائه می‌شود:



شکل ۸. انواع کلاهیگ گروه شمع مورد استفاده در این پژوهش.



شکل ۹. هندسه‌ی مدل.

جدول ۲. پارامترهای خاک.

پارامترهای خاک	واحد	ماسه‌ی سست	ماسه‌ی متراکم
مدول برشی	(kN/m ²)	$6,07 \times 10^3$	$1,54 \times 10^4$
مدول حجمی	(kN/m ²)	$2,84 \times 10^4$	$3,34 \times 10^4$
ضریب پواسون	-	۰٫۴	۰٫۳
چسبندگی	(kN/m ²)	۲٫۰	۵٫۰
زاویه‌ی اصطکاک داخلی	(deg)	۲۸	۳۴
چگالی	(kg/m ³)	۱۶۰۰	۱۹۰۰
زاویه‌ی اتساع	(deg)	۰	۲

برای هر عمق، نیروی نرمال در واحد طول و حاصل ضرب تنش همه‌جانبه در محیط شمع، به ازاء جابه‌جایی‌های نرمال نسبی مختلف رسم می‌شود (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱، سختی نرمال (K_n)، نیروی نرمال بیشینه‌بر واحد طول شمع $\left(\frac{F_n^{\max}}{L}\right)$ و حاصل ضرب تنش مؤثر همه‌جانبه‌ی بیشینه در محیط شمع (σ_m^p) در جدول ۴ خلاصه شده است.

بر اساس جدول ۴، نمودار نیروی نرمال بیشینه بر واحد طول شمع در برابر حاصل ضرب تنش مؤثر همه‌جانبه‌ی بیشینه در محیط شمع، برای لایه‌ی ماسه‌ی سست و لایه‌ی ماسه‌ی متراکم به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۴ و شکل‌های ۱۲ و ۱۳، سختی نرمال (K_n)، مقاومت چسبندگی فنر نرمال (C_n) و مقاومت اصطکاکی فنر نرمال (ϕ_n) برای ماسه‌ی سست و ماسه‌ی متراکم در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به بخش ۳٫۲، پارامترهای برشی سطح مشترک شمع و خاک در جدول ۶ خلاصه شده است.

۳٫۳. انتقال موج [۱۱]

در تحلیل دینامیکی با استفاده از روش‌های عددی ممکن است در انتشار موج خطای عددی به‌وجود آید، که این خطا تابع شرایط مدل‌سازی و ابعاد شبکه است. بسامد موج ورودی و سرعت انتقال موج سیستم هر دو بر درستی انتقال موج تأثیر می‌گذارند. Lysmer و Kuhlemeyer نشان دادند که برای انتقال صحیح موج در مدل‌های عددی، ابعاد المان تقریباً باید از $\frac{1}{10}$ تا $\frac{1}{5}$ بیشترین طول موج مربوط به بیشترین بسامد موج ورودی، کمتر باشد ($\Delta L < \frac{\lambda}{10}$). اگر بار دینامیکی ورودی حاوی بسامدهای بالایی باشد، در این حالت ابعاد المان‌ها بسیار ریز می‌شود و در نتیجه زمان موردنیاز برای تحلیل مدل بسیار طولانی خواهد شد. در چنین مواقعی با فیلترکردن تاریخچه‌ی موج ورودی و حذف مؤلفه‌های بسامد بالا می‌توان از المان‌های بزرگ‌تری استفاده کرد.

برای فیلترکردن موج ورودی می‌توان به کمک شیوه‌ی تبدیل سری فوریه، بسامدهای ورودی را ارزیابی و بسامدهای بیشتر از محدوده‌ی مشخص شده را حذف کرد. بنابراین قبل از اعمال موج ورودی باید به محتوای بسامدی آن دقت داشت.

۴. مدل‌سازی گروه شمع

تحقیقات نشان می‌دهند که هم نیروی ناشی از سازه و هم اندرکنش سینماتیکی بین شمع و خاک نقش مهمی در رفتار شمع‌ها دارد، بنابراین تحلیل باید براساس اندرکنش سازه - شمع - خاک صورت گیرد. در این پژوهش، به منظور بررسی اندرکنش سینماتیکی، از اعمال بارهای استاتیکی جانبی و قائم به سازه خودداری شده است. جهت بررسی عملکرد سختی کلاهیگ در رفتار دینامیکی گروه شمع، از مدل‌هایی مطابق با شکل ۸، برای اتصال سرشمع‌ها استفاده شده است. در واقع سختی کلاهیگ از مدل ۱ به مدل ۴ به تدریج افزایش می‌یابد. بر این اساس، با کاهش طول مؤثر تیرها، سختی بخش کلاهیگ گروه شمع به تناسب افزایش می‌یابد. این موضوع برای سختی خمشی EI/L قابل ملاحظه‌تر است.

شکل ۹، گروه شمع واقع در یک خاک دولایه‌ی شامل ماسه‌ی سست و ماسه‌ی متراکم به ترتیب به ضخامت ۱۰ متر و ۱۵ متر را نشان می‌دهد. از مدل رفتاری موهر - کولمب و کشسان به ترتیب برای خاک و سازه استفاده شده است. طول شمع‌ها ۱۵/۵ متر است. در صورت تماس کلاهیگ با خاک، نیروی برشی وارده بین شمع‌ها و کلاهیگ توزیع می‌شود. [۱۵] برای عدم تماس کلاهیگ شمع با خاک، کلاهیگ ۰/۵ متر بالاتر از سطح زمین است. به عبارت دیگر، ۵ متر انتهایی شمع‌ها در لایه‌ی ماسه‌ی متراکم واقع شده است. فاصله‌ی شمع‌ها از یکدیگر برابر ۴ متر است و در ضمن یک قاب در بالای کلاهیگ در نظر گرفته شده است. پارامترهای مربوط به خاک و سازه به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

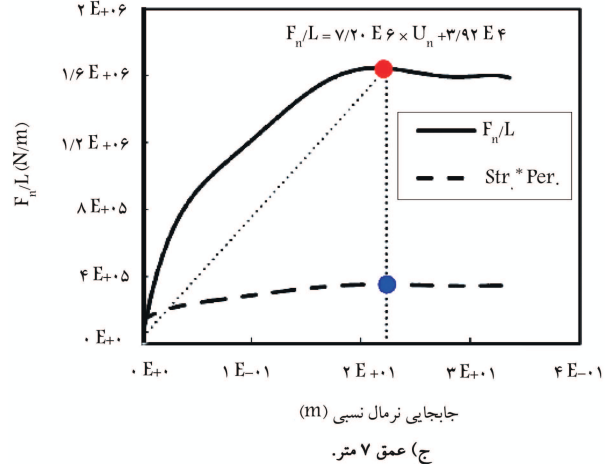
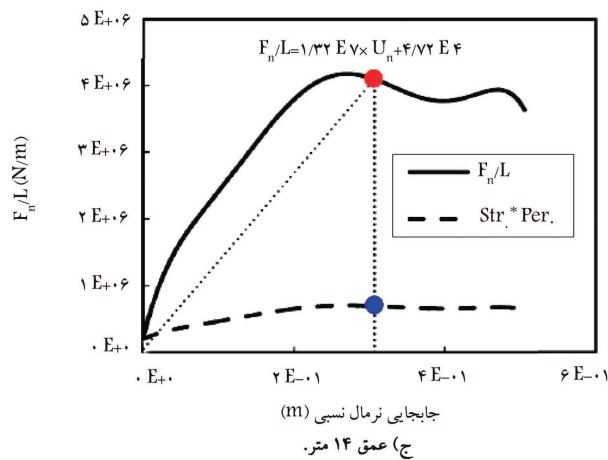
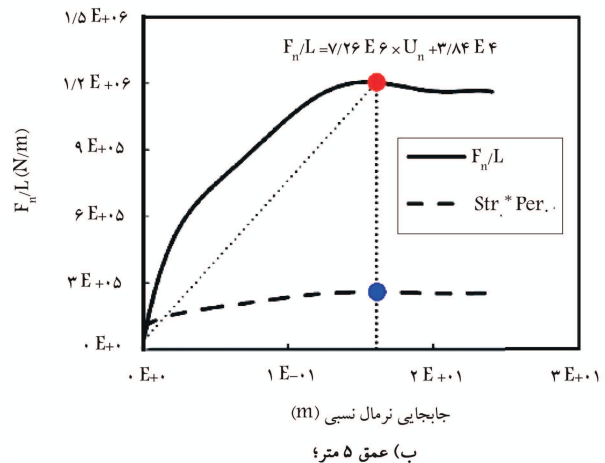
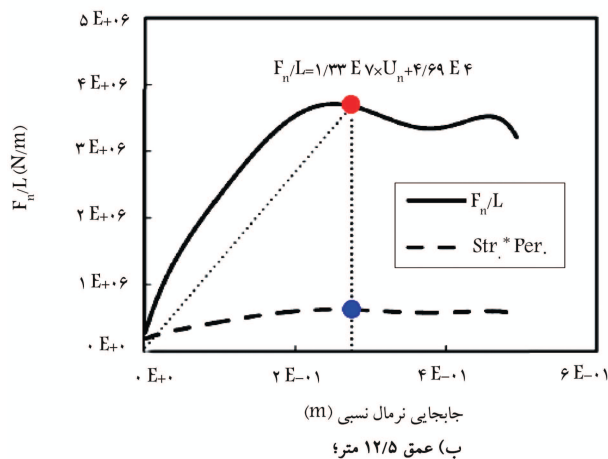
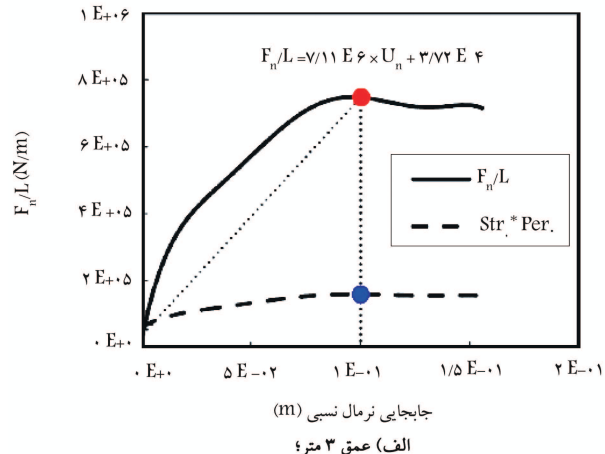
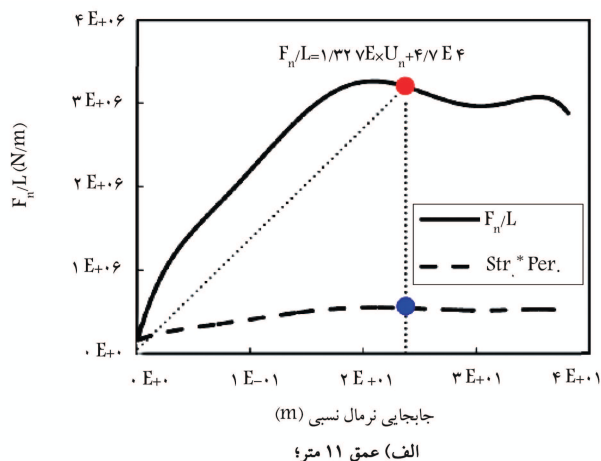
۱٫۴. محاسبه‌ی پارامترهای نرمال سطح مشترک شمع و خاک برای این پژوهش

جهت محاسبه‌ی پارامترهای نرمال سطح مشترک شمع و خاک، برای لایه‌ی اول عمق‌های ۳ متر، ۵ متر و ۷ متر برای لایه‌ی دوم عمق‌های ۱۱ متر، ۱۲/۵ متر و ۱۴ متر مدنظر قرار گرفته است. تنش همه‌جانبه در عمق موردنظر از رابطه‌ی ۱۱ به‌دست می‌آید:

$$\sigma_m = 0.5(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (11)$$

جدول ۳. پارامترهای اعضای سازه‌یی.

واحد	تیر	ستون	کلاهک شمع (تیر)	شمع
مدول کشسانی (GPa)	۲۳/۳	۲۳/۳	۲۳/۳	۲۳/۳
ضریب پواسون	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
ممان اینرسی (m ^۴)	$۲/۱۳۳ \times ۱۰^{-۳}$	$۲/۱۳۳ \times ۱۰^{-۳}$	$۵/۲۰۸ \times ۱۰^{-۳}$	$۴/۹۰۹ \times ۱۰^{-۲}$
سطح مقطع (m ^۲)	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۷۸۵۴
چگالی (kg/m ^۳)	۲۴۰۰	۲۴۰۰	۲۴۰۰	۲۴۰۰



شکل ۱۱. نمودار نیروهای نرمال در واحد طول در برابر جابه‌جایی نرمال نسبی.

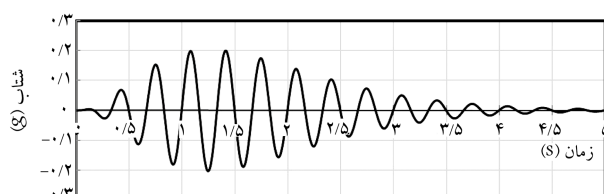
شکل ۱۰. نمودار نیروی نرمال در واحد طول در برابر جابه‌جایی نرمال نسبی.

جدول ۵. پارامترهای نرمال سطح مشترک شمع و خاک.

پارامترهای نرمال سطح مشترک شمع و خاک	لایه‌ی اول (ماسه‌ی سست)	لایه‌ی دوم (ماسه‌ی متراکم)
K_n (kN/m/m)	7.19×10^2	1.33×10^4
C_n (kN/m)	۱۴/۶	۲۵/۶
φ_n (deg)	۷۸	۸°

جدول ۶. پارامترهای برشی سطح مشترک شمع و خاک.

پارامترهای برشی سطح مشترک شمع و خاک	لایه‌ی اول (ماسه‌ی سست)	لایه‌ی دوم (ماسه‌ی متراکم)
K_s (kN/m/m)	1.2×10^2	3.79×10^2
C_s (kN/m)	۶/۳	۱۵/۷
φ_s (deg)	۱۹	۲۳



شکل ۱۴. تاریخچه‌ی زمانی شتاب.

با توجه به اینکه در کف مدل (سنگ بستر) از مرز آرام استفاده شده است، شتاب‌نگاشت با استفاده از معادله‌ی ۸ به تنش‌نگاشت تبدیل شده است و به کف مدل اعمال می‌شود، در ضمن باید توجه داشت که تقریباً دو برابر آن به مدل اعمال شود، زیرا بخشی از آن به محیط بی‌نهایت منتقل می‌شود. از مزایای این شتاب‌نگاشت می‌توان به این موارد اشاره کرد:

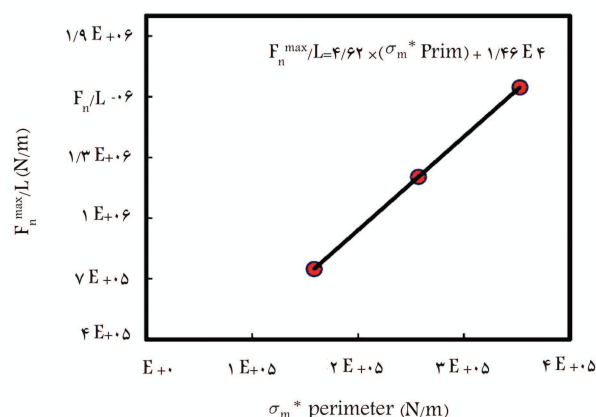
۱. این نوع شتاب‌نگاشت برخلاف شتاب‌نگاشت‌های سینوسی به شتاب‌نگاشت واقعی نزدیک‌تر است.
۲. این نوع شتاب‌نگاشت برخلاف شتاب‌نگاشت‌های سینوسی به مدل‌های عددی شوک وارد نمی‌کند.

۵. تحلیل مسئله

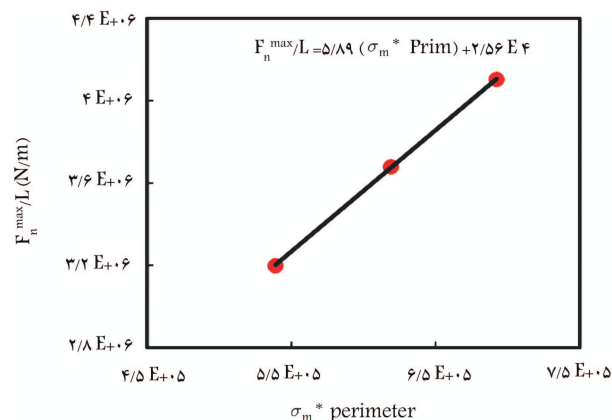
این پژوهش با توجه به اندرکنش سینماتیک، به بررسی اثر سختی کلاهدک شمع در رفتار شمع‌های واقع در گروه شمع پرداخته است. با توجه به تأثیر اندرکنش سازه - شمع - خاک در رفتار شمع‌ها، مدل به صورت سه بعدی سازه - شمع - خاک در نظر گرفته شده است. میدان آزاد به کناره‌های مدل و مرز آرام به کف مدل و در نتیجه شتاب‌نگاشت به صورت تنش‌نگاشت برشی در جهت X (شکل ۱۵) به کف مدل اعمال شده است. جهت بررسی عملکرد سختی کلاهدک در رفتار دینامیکی گروه شمع، از مدل‌هایی مطابق با شکل ۸ برای اتصال سرشمع‌ها به یکدیگر استفاده شده است، در ضمن توجه شود جرم کلاهدک از مدل ۱ به ۴ نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۴. سختی نرمال، نیروی نرمال بیشینه بر واحد طول و حاصل ضرب تنش مؤثر همه‌جانبه‌ی بیشینه در محیط شمع برای عمق‌های مختلف.

عمق (متر)	$\sigma_m \times \text{perimeter}$ (kN/m)	$F_n^{\max}/L$ (kN/m)	K_n (kN/m/m)
۳	1.59×10^2	7.47×10^2	7.11×10^2
۵	2.57×10^2	1.20×10^3	7.26×10^2
۷	3.53×10^2	1.65×10^3	7.20×10^2
۱۱	5.39×10^2	3.20×10^3	1.32×10^4
۱۲/۵	6.19×10^2	3.68×10^3	1.33×10^4
۱۴	6.92×10^2	4.10×10^3	1.32×10^4



شکل ۱۲. نمودار معیار مقاومت نرمال لایه‌ی اول (ماسه‌ی سست).



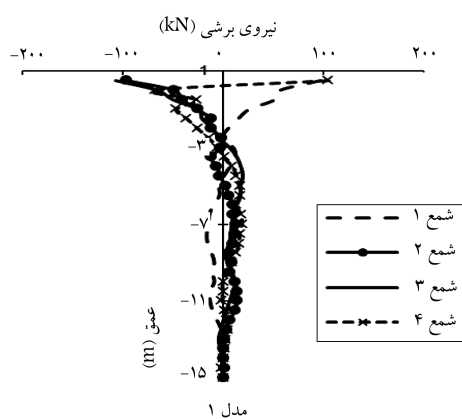
شکل ۱۳. نمودار معیار مقاومت نرمال لایه‌ی دوم (ماسه‌ی متراکم).

۲.۴. شتاب‌نگاشت ورودی

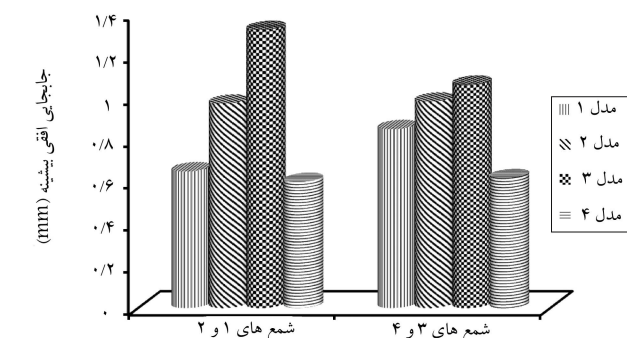
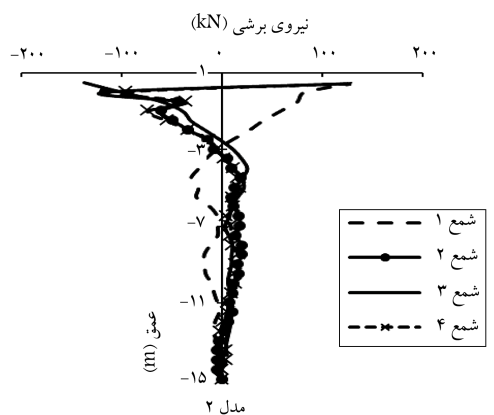
شتاب‌نگاشت اعمالی به مدل دارای بسامد ۳ هرتز و بیشینه‌ی شتاب $0.2g$ است و از رابطه‌ی ۱۲ پیروی می‌کند (شکل ۱۴):

$$\ddot{u}(t) = \sqrt{\beta e^{-\alpha t} \gamma} \sin(2\pi f t) \quad (12)$$

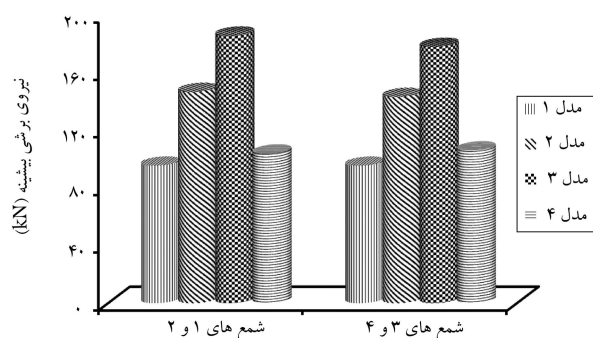
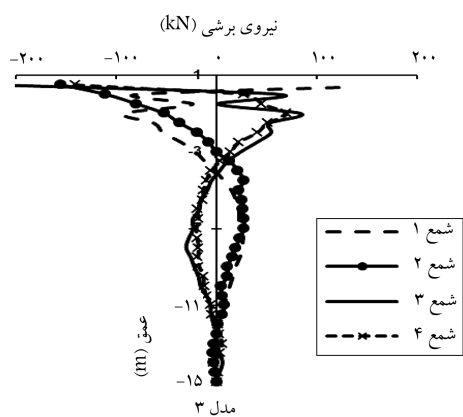
که در آن، $\alpha = 4$ ، $\beta = 2$ ، $\gamma = 5$ و $f = 3 \text{ Hz}$ است.



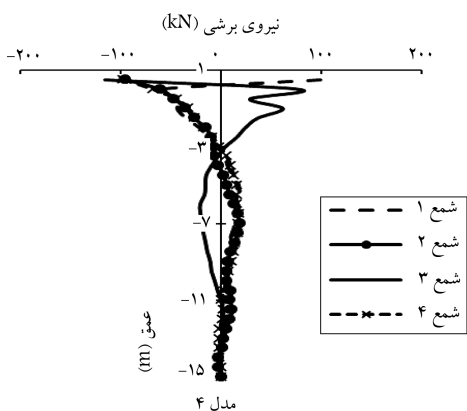
شکل ۱۵. موقعیت قرارگیری شمع‌ها در گروه شمع.



شکل ۱۶. پیشینه‌ی جابه‌جایی افقی در شمع‌ها برای مدل‌های مختلف کلاهک گروه شمع.



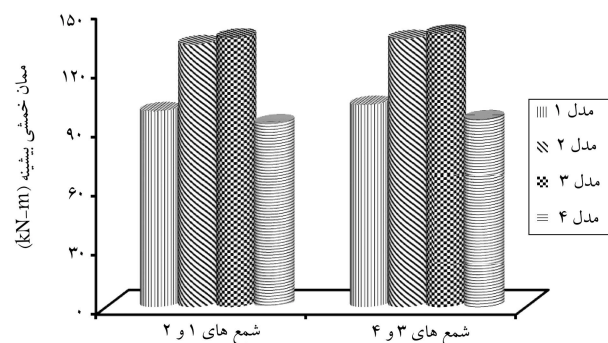
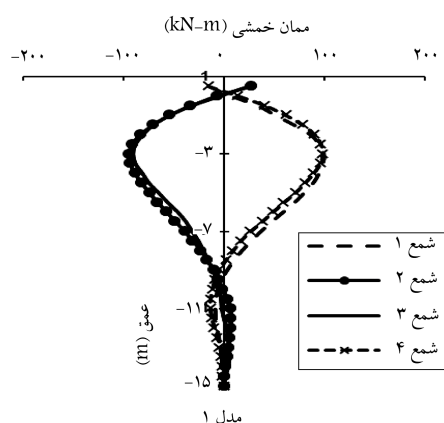
شکل ۱۷. پیشینه‌ی نیروی برشی در شمع‌ها برای مدل‌های مختلف کلاهک گروه شمع.



شکل ۱۸. نیروی برشی در طول شمع‌ها برای مدل‌های مختلف کلاهک گروه شمع.

همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، پیشینه‌ی جابه‌جایی افقی در سر شمع‌ها در ابتدا با افزایش سختی کلاهک گروه شمع (همراه با افزایش جرم کلاهک گروه شمع) افزایش و سپس کاهش یافته است. خاطرنشان می‌شود زمان وقوع پیشینه‌ی جابه‌جایی در شمع‌های ۱ و ۲ با شمع‌های ۳ و ۴ متفاوت است، که بیان‌گر اثر سختی کلاهک گروه شمع و اندرکنش بین شمع‌ها در رفتار گروه شمع است.

با افزایش سختی کلاهک گروه شمع (همراه با افزایش جرم کلاهک گروه شمع)، پیشینه‌ی نیروی برشی در شمع‌ها افزایش و سپس کاهش می‌یابد (شکل ۱۷). به عبارت دیگر، افزایش یا کاهش سختی کلاهک شمع الزاماً سبب کاهش یا افزایش پیشینه‌ی نیروی برشی در شمع‌ها نمی‌شود. شکل ۱۸، توزیع نیروی برشی در طول



شکل ۱۹. بیشینه‌ی ممان خمشی در شمع‌ها برای مدل‌های مختلف کلاhek گروه شمع.

شمع‌ها را (در زمان وقوع بیشینه‌ی نیروی برشی در آنها) برای مدل‌های گوناگون از کلاhek گروه شمع نشان می‌دهد. در یک مدل از کلاhek شمع، با توجه به جهت اعمال شتاب‌نگاشت و اندرکنش شمع‌ها با سازه و همچنین تأثیر شمع‌ها در رفتار یکدیگر (در تحلیل‌های دینامیکی حوزه‌ی تأثیر شمع‌ها بر یکدیگر ۶ تا ۸ برابر قطر شمع‌هاست)، زمان وقوع بیشینه‌ی نیروی برشی در شمع‌ها متفاوت است. تغییر علامت و مقدار نیروی برشی در شمع‌ها برای مدل‌های گوناگون از کلاhek گروه شمع، بیانگر نقش سختی کلاhek شمع در رفتار پی‌های شمی است.

شکل ۱۹، بیشینه‌ی لنگر خمشی ایجادشده در شمع‌ها (در زمان وقوع بیشینه‌ی ممان خمشی در آنها) را با توجه به سختی‌های مختلف کلاhek شمع (همراه با افزایش جرم کلاhek گروه شمع) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سختی کلاhek شمع، بیشینه‌ی لنگر خمشی در شمع‌ها افزایش و سپس کاهش یافته است. با توجه به شکل ۲۰، بیشینه‌ی ممان خمشی تقریباً در عمق ۳ متری از سطح زمین و یا به عبارت دیگر، در طول ۳/۵ متری شمع رخ داده و این به دلیل کاهش اثر روسازه در المان‌های قسمت پایین شمع‌هاست. در یک مدل از کلاhek شمع، بیشینه‌ی ممان خمشی به دلیل تأثیر شمع‌ها در رفتار یکدیگر، جهت اعمال شتاب‌نگاشت و تأثیر روسازه در رفتار شمع، در زمان‌های مختلف در شمع‌ها رخ داده است.

۶. نتیجه‌گیری

پژوهش‌های پیشین برای تحلیل گروه شمع با کلاhek انعطاف‌پذیر نشان می‌دهد که مقادیر بار جانبی و ممان خمشی در شمع، به موقعیت قرارگیری آن در گروه شمع بستگی دارد و با فرض کلاhek صلب در تحلیل، مقدار ممان خمشی در سرشمع‌ها به شدت کاهش می‌یابد. در این پژوهش با توجه به این موضوع و اهمیت اندرکنش سینماتیکی در مدل سازه - شمع - خاک، به تحلیل سه‌بعدی تأثیر سختی کلاhek شمع در رفتار گروه شمع تحت بار زلزله با استفاده از روش تفاضل محدود پرداخته شده و برای اتصال سرشمع‌ها به یکدیگر از تیرهای بتنی استفاده شده است.

با توجه به اهمیت پارامترهای سطح مشترک شمع و خاک در مدل‌سازی اندرکنش شمع - خاک، در ابتدا براساس رویکرد جدید ارائه‌شده در این پژوهش، به محاسبه‌ی پارامترهای سطح مشترک شمع و خاک پرداخته شده است. نتایج تحلیل دینامیکی نشان می‌دهد که با افزایش سختی کلاhek گروه شمع همراه با افزایش جرم کلاhek شمع، جابه‌جایی افقی بیشینه‌ی، بیشینه‌ی نیروی برشی و بیشینه‌ی لنگر خمشی

شکل ۲۰. ممان خمشی در طول شمع‌ها برای مدل‌های مختلف کلاhek گروه شمع.

شمع‌ها در گروه بستگی دارد. موقعیت بیشینه‌ی ممان در شمع‌ها (۳/۵ متری طول شمع) بیانگر تأثیر روسازه در رفتار پی‌های شمعی است. در انتها خاطرنشان می‌شود با توجه به آنکه استفاده از تیرهای بتنی به جای کلاهک برای اتصال گروه شمع در ابتدای مراحل اجرا و تحقیق است و از طرف دیگر، ارزیابی رفتار این سیستم تحت اثر بار زلزله، برای اولین بار در این پژوهش انجام شده است، تا این مرحله از تحقیقات، امکان درستی‌سنجی با نتایج مدل‌های فیزیکی و یا داده‌های عملی میسر نشده است. انتظار آن است که نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و صحرایی مؤید کارایی این سیستم اتصال باشند.

در شمع‌ها در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزایش سختی کلاهک همراه با افزایش جرم کلاهک، الزاماً سبب کاهش جابه‌جایی بیشینه، نیروی برشی بیشینه و لنگر خمشی بیشینه در شمع‌ها نمی‌شود، زیرا در حین افزایش سختی به دلیل افزایش جرم، نیروی به‌وجودآمده در کلاهک در اثر شتاب زلزله بیشتر می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که برای هر گروه شمع محدوده‌یی از سختی کلاهک گروه شمع (همراه با جرم آن) وجود دارد که سبب می‌شود جابه‌جایی و نیروی برشی و ممان خمشی در شمع‌ها به بیشترین مقدار خود برسد. ضمناً نتایج بیانگر آن است که در گروه شمع با کلاهک انعطاف‌پذیر، نیروی برشی و ممان خمشی در شمع‌ها، به مکان

پانوشته‌ها

1. interface
2. quiet boundary
3. free field

منابع (References)

1. Fleming, W.G.K., Weltman, A.J., Randolph, M.F. and Elson, W.k., *Piling Engineering*, 1st Edition. John Wiley and Sons, New York (1985).
2. Bowles, J.E., *Foundation Analysis and Design*, 4th Edition, McGraw-Hill International Edition, Singapore (1988).
3. Won, J., Ahn, S.Y., Jeong, S., Lee, J. and Jang, S.Y. "Nonlinear three-dimensional analysis of pile group supported columns considering pile cap flexibility", *Computers and Geotechnics*, **33**(6-7), pp. 355-370 (2006).
4. US Army Corps of Engineers, *Engineering and Design: Design of Pile Foundations*, Engineer Manual, No.1110-2-2906 (1991).
5. Jasim, M.A., Zamri, H.C. and Mohd, R.T. "Effect of pile cap system on the distribution of bending moment of cap", *ARPJ, Journal of Engineering and Applied Sciences*, **3**(4), pp. 46-50 (2008).
6. Hrennikoff, A. "Analysis of pile foundations with batter piles", *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **115**(1), pp. 351-374 (January 1950).
7. Rollins, K.M., Peterson, K.T. and Weaver, T.J. "Lateral load behavior of full-scale pile group in clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**(6), pp. 468-478 (June 1998).
8. Yang, Z. and Jeremic, B. "Numerical analysis of pile behavior under lateral loads in layered elastic-plastic soils", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **26**(14), pp. 1385-1406 (December 2002).
9. Comodromos, E.M. and Pitilakis, K.D. "Response evaluation of horizontally loaded fixed-head pile groups using 3-D nonlinear analysis", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech*, **29**(6), pp. 597-625 (2005).
10. Sang-Seom, J., Jin-Oh, W. and Young-Ho, K. "Effect of pile cap flexibility on the response of pile group supported column", *Jour. of the KGS*, **23**(9), pp. 39-49 (2007).
11. Manual of FLAC3D, Ver.2.1 "Dynamic Analysis", Itasca Consulting Group Inc. 1, pp. 137-144, Meerut, India: Sarita, Roorkee University, India (January 1977).
12. Mahinroosta, R. "Modeling of hardening and softening behavior of rock masses under shear using multilaminate model", Ph.D. thesis, Sharif University of Technology (2005).
13. Kunar, R.R., Beresford, P.J. and Cundall, P.A. "A tested soil-structure model for surface structures", in *Proceedings of the Symposium on Soil-Structure Interaction*, Roorkee University, India, Meerut, India, Sarita Prakashan, **1**, pp. 137-144 (January 1977).
14. Cundall, P.A. "Explicit finite difference methods in geomechanics", in *Numerical Methods in Engineering, Proceedings of the EF Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Blacksburg, Virginia, **1**, pp. 132-150 (June 1976).
15. Budhu, M., *Soil Mechanics and Foundations*, John Wiley and Sons. U.S.A (2000).