

آزمایش مقیاس واقعی و مدلسازی عددی ریز شمع ها در خاک ماسه ای

الیاس قمری^{۱*}، علی قربانی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، دانشکده فنی

۲- استادیار دانشگاه گیلان، دانشکده فنی، رشت، گیلان

*Elias.ghamari@yahoo.com

چکیده

این مقاله از سه بخش تشکیل شده است: بخش اول مطالعه موردی موسسه مالی و اعتباری قوامین واقع در شهرستان رشت می باشد، که بر روی فونداسیون مسلح شده توسط ریزشمع احداث شده است. در این پروژه، آزمایش بارگذاری جانبی بر روی تک ریز شمع انجام شده است. بخش دوم، مدلسازی عددی آزمایش انجام شده در بخش اول خواهد بود، که با استفاده از روش المان محدود سه بعدی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از مدل المان محدود نشان دهنده صحت مدل بانیج آزمایش انجام گرفته می باشد. بخش سوم، مدلسازی گروه ریز شمع تحت بارگذاری لرزه ای می باشد. برای تحلیل لرزه ای از شتاب نگاشت زلزله رودبار استفاده شده است. در آخر، اثر صلبیت نسبی و غیرخطی بودن خاک بر روی رفتار استاتیکی و دینامیکی ریز شمعها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از این تحلیل، اطلاعات ارزشمندی را در مورد توزیع ممانهای خمشی به دست آمده از بارهای لرزه ای و استاتیکی ارائه می دهد.

کلمات کلیدی: ریز شمع، اجزاء محدود، آزمایش مقیاس واقعی، بارگذاری لرزه ای

۱. مقدمه

به طور معمول در مواجهه با خاکهای مسئله دار نظیر خاکهای سست با قابلیت باربری کم و نشست پذیری زیاد دو راه پیش روی مهندسین ژئوتکنیک قرار دارد: الف) استفاده از المانهای باربر در خاک. ب) بهسازی و اصلاح خواص فیزیکی. برخی از روشها نیز ترکیبی از دو دسته فوق بوده و مزایای هر دو دسته را تا حدودی به همراه دارند. از آن دسته می توان به استفاده از ریز شمعها به همراه تزریق دوغاب سیمان اشاره نمود. ریزشمع به شمع هایی با قطر کوچک (کمتر از ۳۰۰ میلیمتر) اطلاق می گردد که غالباً با تسلیح فولادی سبک و تزریق دوغاب سیمان همراه می باشند. ریزشمع علاوه بر آنکه به عنوان یک المان باربر و مقاوم در برابر نشست عمل می کند، به دلیل تزریق دوغاب سیمان، سبب بهبود مشخصات مکانیکی (مقاومتی و رفتاری) خاک اطراف نیز می گردد [1]. یک راه دقیق برای مطالعه رفتار جانبی ریزشمعها، انجام آزمایش واقعی در محل می باشد که

به دلیل هزینه بالا غالباً با محدودیت همراه است. (Yamane et al. (2000) با استفاده از آزمایش در مقیاس واقعی تحت بارگذاری استاتیکی قائم و جانبی، مطالعاتی بر روی رفتار قائم ریزشمع تحت بار قائم و ظرفیت خمشی تحت بار جانبی انجام دادند [2]. Geosystem, L.P.(2000) با استفاده از آزمایش بارگذاری جانبی بر روی گروه ریزشمعها و ریزشمعهای مشبک، پاسخ جانبی ریزشمعها را مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش تعداد ریزشمع و نحوه آرایش آنها با بارگذاری در جهت های متفاوت مورد توجه قرار گرفت [3]. Han & ye.(2006) آزمایشات صحرایی بر روی رفتار تک ریزشمعها تحت بارگذاری فشاری و کششی در رسهای نرم و تقویت زیر پی انجام دادند. در این آزمایشاتواکنش بار-جابجایی، مدول الاستیسیته، مقاومت نوک، اندرکنش ریزشمع با رس نرم و مکانیسم انتقال بار در طول ریزشمع بحث شده اند [4,5].

از آنجاییکه آزمایشات محدودی در مقیاس واقعی توسط محققین صورت گرفته است. لذا، در این مقاله با استفاده از آزمایش مقیاس واقعی و مدلسازی عددی ساخته شده بر مبنای آزمایش، رفتار جانبی استاتیکی تک ریزشمع مورد بررسی قرار گرفته است و سپس برای درک بیشتر رفتار ریزشمعها، پاسخ لرزه ای گروه ریز شمع تحت بار تحریک حاصل از یک زلزله ی نزدیک محل آزمایش، مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۲. آزمایش مقیاس واقعی

۱.۲. شرایط زمین

آزمایش بارگذاری استاتیکی جانبی بر روی تک ریز شمع در مقیاس واقعی جهت احداث موسسه مالی و اعتباری قوامین واقع در شهرستان رشت صورت گرفته است [۶]. جهت شناسایی لایه های خاکدر محل، اقدام به حفر سه گمانه توسط دستگاه حفاری دورانی تا عمق ۱۸ متر گردیده است. در حین انجام عملیات حفاری ماشینی به منظور به دست آوردن پارامترهای خاک، آزمایش نفوذ استاندارد در اعماق مختلف زمین انجام شده است. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی خاک و شناخت کامل از عملکرد مهندسی خاک مورد نظر، بر روی نمونه هایبه دست آمده آزمایشات مختلفی از قبیل دانه بندی، تعیین حدود اتربرگ، برش مستقیم، تحکیم و غیره انجام گرفت. تغییرات ضربات SPT با عمق و لوگ گمانه برای خاک مورد نظر در جدول ۱ و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک محل احداث سازه فوق در جدول ۲ نشان داده شده اند. از آنجاییکه در مدلسازی عددی، خاک محل احداث سازه به صورت همگن فرض شده است. لذا، مقادیر متوسط چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به صورت میانگین وزنی از رابطه زیر به دست می آیند.

$$C_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i H_i}{\sum_{i=1}^n H_i}, \quad \phi_{ave} = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^n \tan(\phi_i) H_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (1)$$

چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی متوسط خاک، C_i و ϕ_i به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی لایه i ام خاک و H_i ضخامت لایه i ام خاک می باشند.

جدول ۱- تغییرات N_{spt} با عمق و لوگ گمانه در محل انجام آزمایش تحت بار استاتیکی جانبی [۶]

عمق	N_{spt}	توضیحات	طبقه بندی یونیفاید	C (Kg/cm ²)	(degree)
0		خاک دستی			
2	9	تراز آب زیر زمینی در عمق ۸۰/۱ متری از روی زمین می باشد. رس با خاصیت خمیری بالا	CH	0.34	10
4	11	رس با خاصیت روانی کم	CL		
6	12	ماسه رس دار و بد دانه بندی شده	SP-SC	0.1	24.6
8					
10	8	ماسه رس دار	SC	0	23.1
12					
14	10	ماسه رس دار	SC	0	23.8
16					
18					

جدول ۲- خصوصیات ژئوتکنیکی خاک محل احداث سازه فوق و محل واقعی انجام تست [۶]

		ϕ	C	$\xi(\%)$		
مدول الاستیسیته خاک	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی	دانشیه خاک	نسبت میرایی	سرعت موج برشی خاک
135	0.4	22.15	0.09	1906	5	50.16

۲.۲. نحوه انجام آزمایش و نتیجه آن

در آزمایش فوق قطر و طول ریز شمع به ترتیب برابر با ۲۰۰ میلیمتر و ۱۰ متر بوده اند. بعد از اجرای کامل ریز شمع، عملیات بارگذاری جانبی از طریق عملیات جکینگ روی ریز شمع مطابق شکل ۱ انجام پذیرفت. بارگذاری از بار معادل ۰.۵/۰ بار طراحی (DL=2 ton) به عنوان بار تنظیم شروع شده و طبق جدول ۳ زیر ادامه یافت. تغییر مکان جانبی در سر ریز شمع با استفاده از گیج های نصب شده نشان داده شده در شکل ۱ اندازه گیری گردیدند. نتایج حاصل از قرائت گیج در جدول ۳ نشان داده شده اند.

جدول ۳- نحوه اعمال بارگذاری و داده های مربوط به قرائت گیج [۶]

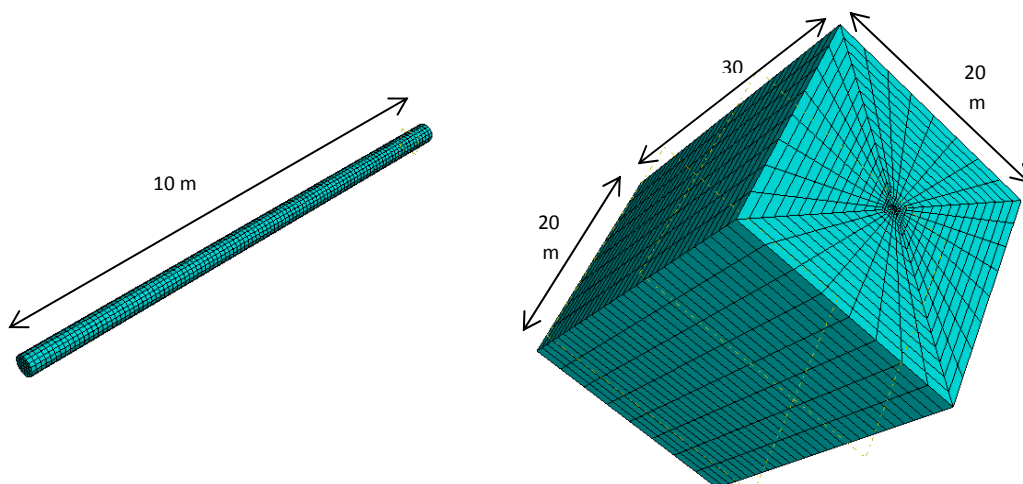
No.	Load (% Design)	Load (Ton)	Gage Pressure (Bar)	Dial Gage 1 (0.01mm)	Dial Gage 2 (0.01mm)	Average Movement (mm)
1	AL	0.10		600	0	0.00
2	25%	0.50		620	0	0.20
3	50%	1.00		670	0	0.70
4	75%	1.50		742	0	0.42
5	100%	2.00		784	0	1.42
7	133%	2.66		838	0	2.38
8	167%	3.34		900	0	3.00
9	AL	0.10		634	0	0.34



شکل ۱- اعمال بارگذاری جانبی از طریق عملیات جکینگ در آزمایش مقیاس واقعی [۶]

۳. مدلسازی عددی ریزشمع تحت بار استاتیکی جانبی

برای ساختن مدل عددی آزمایش انجام شده بر روی تک ریزشمع از نرم افزار المان محدود ABAQUS استفاده گردیده است [7]. ابعاد محیط خاکی اطراف ریزشمع $20 \times 20 \times 30$ متر می باشد. مشخصات هندسی مقاطع شمع و خاک در شکل ۲ ملاحظه می شود. برای انجام تحلیل استاتیکی، یک بار متمرکز جانبی به مقدار $34/3$ تن در سر ریزشمع اعمال شده است. المانهای در نظر گرفته جهت مش بندی محیط خاکی و ریزشمع، المانهای هشت گره ای (شش سطحی) می باشند. اندازه المانها در نزدیکی ریزشمع بسیار کوچک بوده و به تدریج با فاصله گرفتن از ریزشمع اندازه المانها افزایش می یابد. در حقیقت مش بندی محیط خاکی برای نواحی اطراف ریزشمع به دلیل تغییرات شدید تنش ها و اثرات پلاستیسیته خاک دقیق تر خواهد بود.



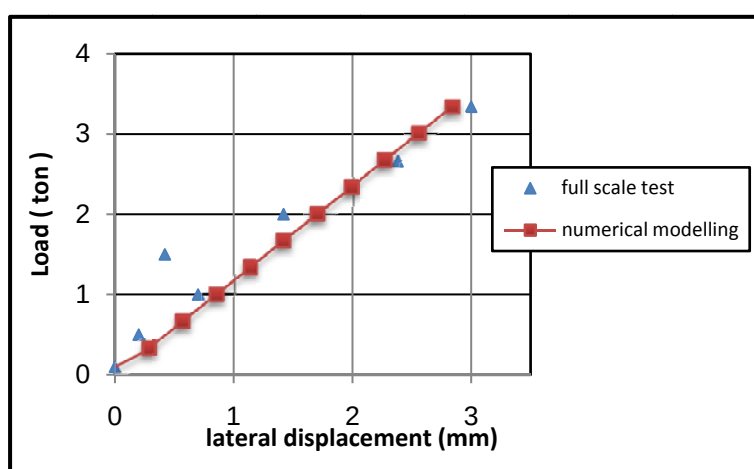
شکل ۲- مشخصات هندسی خاک و ریزشمع در مدل عددی ساخته شده با نرم افزار ABAQUS

مدل رفتاری خاک بر پایه موهر- کولمب به صورت الاستوپلاستیک که در بر گیرنده رفتار غیر خطی خاک و حدوث پاسخهای غیر خطی با پذیرش کرنش های پلاستیک می باشد، در نظر گرفته شده است. ریزشمع به صورت المانهای سه بعدی

الاستیک که دارای چسبندگی و پیوستگی کامل با خاک می باشد، مدل گردید. خصوصیات ژئوتکنیکی خاک و بتن ریزشمع در جداول ۲ و ۴ داده شده اند. در شکل ۳ پاسخ ریزشمع تحت بارگذاری استاتیکی جانبی مشاهده می شود. منحنی $p-y$ به دست آمده از مدل المان محدود انطباق خوبی با نتایج آزمایش انجام شده نشان می دهد.

جدول ۴- خصوصیات ژئوتکنیکی بتن ریزشمع

دانشیه ریزشمع	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته ریزشمع
2400	0.3	$2.2e+5$

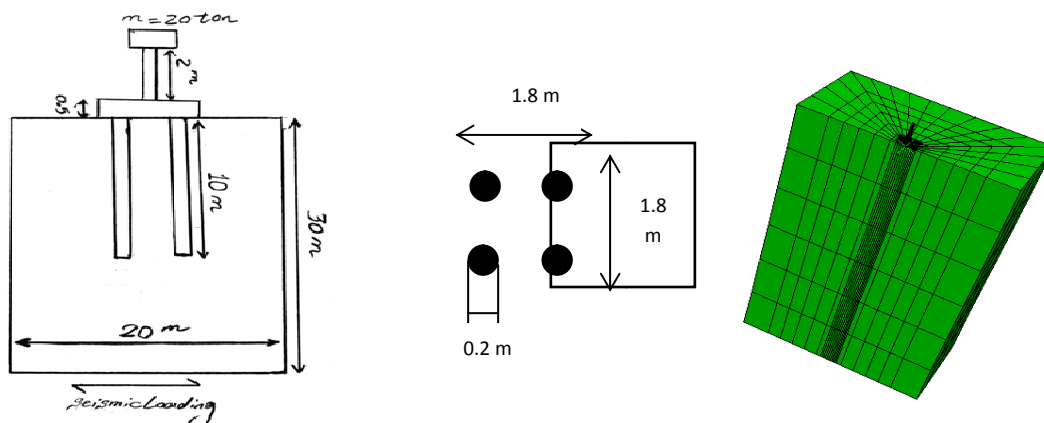


شکل ۳- مقایسه منحنی $p-y$ به دست آمده از مدلسازی عددی و نتیجه آزمایش صحرایی

۴. مدل المان محدود گروه ریزشمع تحت بار لرزه ای

در این بخش رفتار لرزه ای گروه ریزشمع در محل مورد آزمایش با مدلسازی عددی تحت بار ناشی از زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. گروه ریزشمع شامل چهار ریزشمع بتنی با مقطع دایروی بوده و به طور کامل در درون خاک مدفون شده اند. برای اتصال ریزشمع از یک کلاهک از جنس صلب با ابعاد $1/1 \times 8/1$ متر به ضخامت ۵۰ سانتیمتر استفاده شده است. روسازه (سازه بنا نهاده شده بر فونداسیون) به صورت یک مدل ایده آل یک درجه آزادی که متشکل از یک ستون با سختی خمشی ۱۰۰۰۰۰ برابر ریزشمع و جرم متمرکز در انتهای آن می باشد، مدل گردیده است [8]. ارتفاع ستون و وزن جرم متمرکز به ترتیب ۲ متر و ۲۰ تن می باشند. مشخصات هندسی ریزشمع، کلاهک و خاک در شکل ۴ ملاحظه می شود. به دلیل تقارن سیستم تنها نصف مدل اصلی ساخته شده است. ابعاد محیط خاکی و ریزشمع و خصوصیات ژئوتکنیکی آنها مشابه مدل استاتیکی است. برای انجام تحلیل دینامیکی، تحریک لرزه ای در کف توده خاک اعمال می گردد. نوع این تحریکات به صورت گذرا بوده و راستای آن نیز در جهت محور X می باشد. برای اعمال این تحریک از طیف شتاب نگاشت زلزله رودبار که در فاصله ۱۰۵

کیلومتری محل احداث پروژه قرار دارد، استفاده شده است. برای شبیه سازی سنگ بستر، شرایط مرزی در انتهای توده خاک به صورت کاملاً گیردار فرض شده است.



الف) مدل عددی ساخته شده با نرم افزار (ب) پلان کلاهک و نحوه آرایش ریزشمع (ج) پروفیل مدل تحت بار لرزه ای

شکل ۴- مشخصات هندسی ریزشمع، خاک و روسازه در تحلیل لرزه ای گروه ریزشمع

مدل رفتاری خاک در این بخش مدل پلاستیسیته موهر- کولمب سخت شونده و مدل ریزشمع به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده اند. در تحلیل دینامیکی نمی توان مانند تحلیل های استاتیکی از شرایط مرزی ثابت استفاده کرد، زیرا انرژی امواج ایجاد شده در اثر بار زلزله به محیط برگشت داده شده و شرایط تنش موجود را متغیر می سازند و از آنجاییکه از یک مدل بزرگتر به دلیل زمان محاسبات و نیاز به پردازشگرهای قوی نمی توان استفاده کرد، لذا از المان میراگر (ویسکوز) به عنوان مرز جاذب انرژی استفاده شده است. برای محاسبه مقادیر ضریب میرایی المان های میراگر از روابط زیر استفاده شده است [9].

$$\sigma = \rho v_p \dot{w} \rightarrow C_p = \rho A v_p \quad ; \quad \tau = \rho v_s \dot{u} \rightarrow C_s = \rho A v_s (2)$$

که در آن C_p و C_s ضرایب میرایی موج برشی و طولی، ρ دانسیته خاک و v_p و v_s موج برشی و طولی هستند.

میرایی در نظر گرفته شده برای خاک میرایی رایلی میباشد که معمولاً در مسائل حوزه زمان از آن استفاده می شود. فرمول میرایی رایلی در ذیل ارائه شده است:

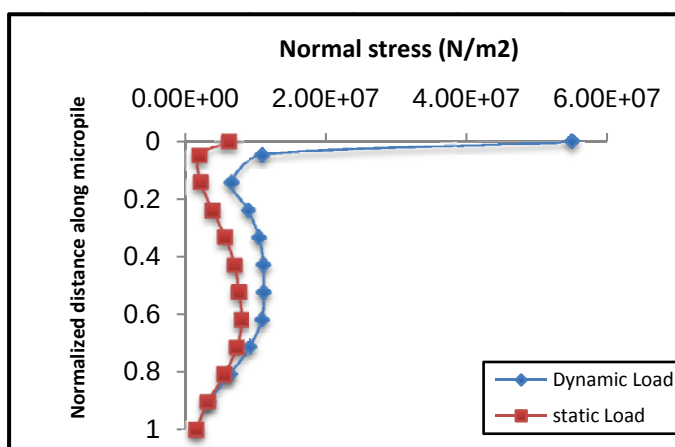
$$C = \alpha[M] + \beta[K] (3)$$

α و β ضرایب میرایی رایلی می باشند. α ضریب میرایی وابسته به جرم و β ضریب میرایی وابسته به سختی می باشند. قابل ذکر است که در نقطه ای مربوط به حداقل فرکانس طبیعی (ω_{min}) حداقل ضریب میرایی (ξ_{min}) رخ داده، که سهم میرایی وابسته به جرم و سختی برابرند. لذا برای مستقل بودن میرایی از فرکانس، از ω_{min} به عنوان فرکانس دورانی خاک برای محاسبه میرایی استفاد می شود.

$$\alpha = \xi_{min} \omega_{min} \quad ; \quad \beta = \xi_{min} / \omega_{min} \quad ; \quad \omega_{min} = v_s / 4H_s (4)$$

که در آن α و β ضرایب میرایی رابلی، ξ_{min} ضریب میرایی بحرانی، ω_{min} فرکانس دورانی خاک، v_s سرعت موج برشی و H_s ارتفاع خاک می باشند.

شکل ۵ مقایسه منحنی تنش نرمال حاصل از بارگذاری لرزه ای را نسبت به بارگذاری استاتیکی در یک گروه ریز شمع را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، در تحلیل لرزه ای به دلیل اثر نیروهای اینرسی حاصل از بار روسازه، ماکزیمم تنش در سر ریز شمع رخ داده، در حالیکه در تحلیل استاتیکی، به دلیل کاهش اثر نیروی اینرسی، بیشترین مقدار تنش در وسط ریز شمع می باشد.



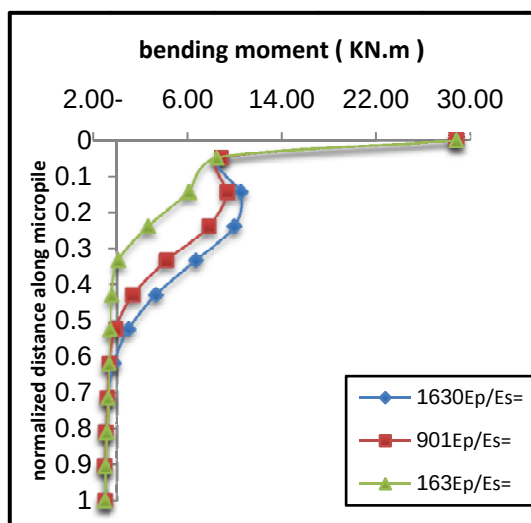
شکل ۵- منحنی تنش نرمال در طول ریز شمع تحت بار لرزه ای و استاتیکی

۵. نتایج تحلیل پارامتریک

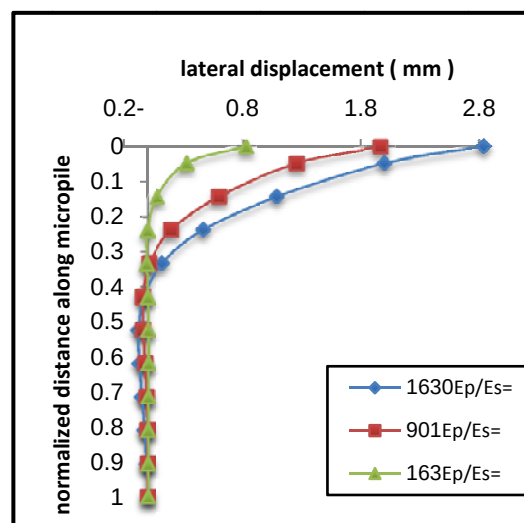
عوامل متعددی در رفتار استاتیکی و لرزه ای ریزشمعها تاثیر گذار هستند، که از آن جمله می توان به صلبیت نسبی (E_p/E_s)، ضرایب میرایی (α, β)، غیر خطی بودن خاک، زاویه تمایل ریزشمعها، بار روسازه، زاویه اصطکاک خاک، نحوه اتصال ریزشمع- خاک، نسبت لاغری ریزشمعها و ... غیره اشاره کرد، که در این مقاله تاثیر صلبیت نسبی و غیر خطی بودن خاک بر روی توزیع لنگر خمشی در طول ریزشمع مورد بررسی قرار می گیرد.

- تاثیر صلبیت نسبی خاک و ریزشمع

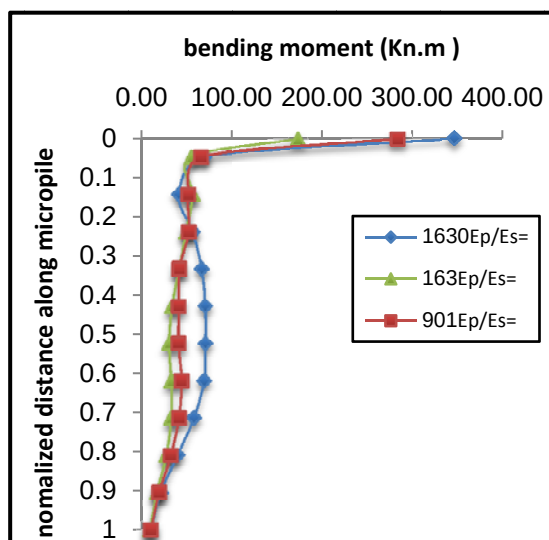
شکلهای ۶ و ۸ منحنی جابجایی و شکلهای ۷ و ۹ پوش لنگر خمشی به دست آمده از تحلیل المان محدود تک ریز شمع تحت بار استاتیکی جانبی و ریزشمع تحت بار لرزه ای را نشان می دهند. مشاهده می شود که با کاهش صلبیت نسبی (افزایش مدول الاستیسیته خاک)، جابجایی و لنگر خمشی در طول ریزشمع کاهش پیدا می کند. این تفاوت در بالای ریز شمع قابل ملاحظه و مشهود است، و از این فاصله به بعد به طور کلی کاهش می یابد. این مسئله بیانگر نقش مهم نیروهای اینرسی به وجود آمده تحت تحریک وارده می باشد.



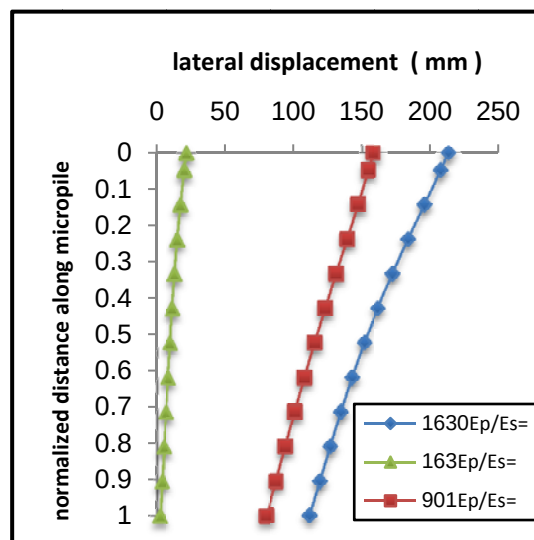
شکل ۷- پوش لنگر خمشی در طول ریز شمع تحت بار استاتیکی



شکل ۶- منحنی جابجایی در طول ریز شمع تحت بار استاتیکی



شکل ۹- پوش لنگر خمشی در طول گروه ریز شمع تحت بار دینامیکی

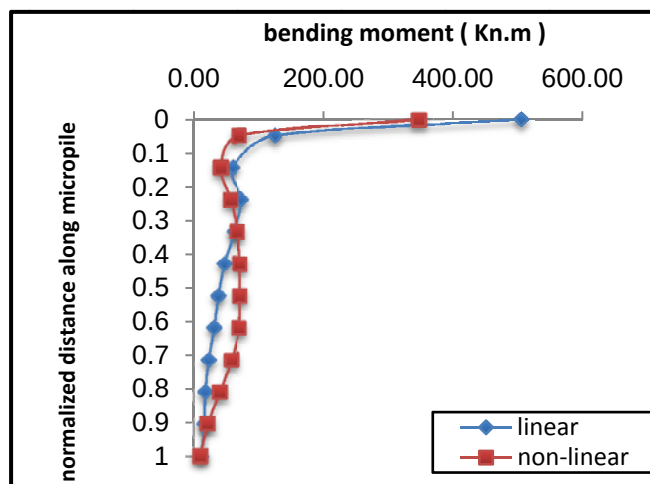


شکل ۸- منحنی جابجایی در طول گروه ریز شمع تحت بار دینامیکی

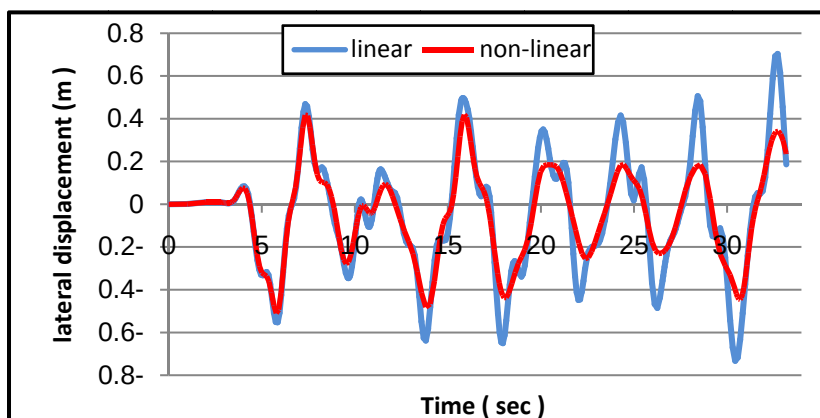
- تاثیر رفتار غیر خطی خاک

شکلهای ۱۰ و ۱۱ پوش لنگر خمشی در طول ریز شمع و منحنی جابجایی جانبی در جرم روسازه تحت بار لرزه ای را در هر دو حالت مدل الاستیک و الاستوپلاستیک نشان می دهند. همانطور که از شکل ۱۰ می توان مشاهده کرد، حداکثر ممان در محل اتصال ریز شمع به فونداسیون به وجود آمده است. این مسئله بیانگر نقش مهم نیروهای اینرسی به وجود آمده تحت تحریک لرزه ای می باشد. همچنین، غیر خطی بودن خاک موجب کاهش ممان خمشی در سر ریز شمع می گردد. به عبارت دیگر، پلاستیسیته موجب کاهش انرژی انتقالی به روسازه می شود، و در نتیجه کاهش عمده نیروهای اینرسی را به همراه خواهد داشت. همچنین در شکل ۱۱ ملاحظه می شود که پاسخ الاستیک (خطی) بیشتر از پاسخ الاستوپلاستیک (غیر خطی) است.

این مسئله به واسطه قابلیت استهلاک انرژی توسط تغییر شکل‌های پلاستیک با توجه به اثر غیر خطی و پلاستیسیته بر کاهش سختی سیستم دارد، که در عوض موجب کاهش فرکانس سیستم در مقایسه با سیستم الاستیک می‌گردد.



شکل ۱۰- پوش لنگر خمشی در طول گروه ریزشمع تحت بار دینامیکی



شکل ۱۱- اثر پلاستیسیته بر جابجایی جانبی جرم روسازه

۶. نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از یک مورد عملی، رفتار ریزشمع تحت بار استاتیکی جانبی با استفاده از مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مدل انطباق خوبی با نتایج تست واقعی نشان داد. بررسی رفتار لرزه ای در ریزشمع تحت بار جانبی نشان داد که در تحلیل لرزه ای، غیر خطی بودن خاک موجب کاهش نیروهای داخلی و جابجایی در سر ریزشمع می‌گردد. به عبارت دیگر، پلاستیسیته موجب کاهش انرژی انتقالی به روسازه می‌شود، و در نتیجه کاهش عمده نیروهای اینرسی را به همراه خواهد داشت. علاوه بر این، نیروی اینرسی روسازه اثر مهمی بر پاسخ جانبی ریزشمع تحت بارگذاری لرزه ای دارد و باعث ایجاد ماکزیمم جابجایی و لنگر خمشی در سر ریزشمع می‌شود.

تحلیل های پارامتریک انجام شده نشان دادند که :

۱- کاهش صلیبیت نسبی (افزایش مدول الاستیسیته خاک) ، باعث کاهش جابجایی و لنگر خمشی در طول ریزشمع شده است.

۲- نیروی اینرسی روسازه اثر مهمی بر پاسخ جانبی ریزشمع تحت بارگذارلرزه ای دارد و باعث ایجاد ماکزیمم جابجایی و لنگر خمشی در سر ریزشمع می شود.

۳- در تحلیل لرزه ای رفتار غیر خطی خاک باعث کاهش جابجایی جانبی در روسازه و کاهش نیروهای داخلی در سر ریزشمع می شوند.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از شرکت مهندسین مشاور ژئوتکنیک طرح کنترل گیل ، به دلیل همکاری های لازم جهت ارائه گزارش ژئوتکنیک و آزمایش بارگذاری ریزشمع تشکر و قدردانی لازم را اعلام می دارم.

مراجع

1. Bruce, D.A., Juran, I. (1997) . "Drilled and Grouted Micropiles; State of Practice Review," FHWA-RD-96-017 .FHWA, U.S .Department of Transportation.
2. Yamane, T., Nakata, Y., and Otani, Y .(2000) . "Efficiency of micropile for seismic retrofit of foundation system." 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, pp .1-8.
3. Geosystem, L.P .(2002) . "Description of full scale tests conducted and data obtained in the three phases of tests conducted for the U.S .Military in Baltimore, M.D." Federal Highway Administration, Order DTFH61-02-P-00162, Requisition/Reference No .41-08-2011.
4. Jie, Han.And Shu-Lin, ye .(2006) . "A field study on the behavior of a foundation underpinning by micropiles," Can .Geotech .Journal .43, pp .30~42.
5. Jie, Han.And Shu-Lin, ye .(2006) . "A field study on the behavior of micropiles in clay under compression or tension," Can .Geotech .Journal .43, pp .19~29.
6. شرکت مهندسین مشاور طرح و کنترل گیل. ، (۱۳۸۶) ، " آزمایش مقیاس واقعی تک ریزشمع تحت بار استاتیکی جانبی"، رشت.
7. ABAQUS.(2003) .Hibbitt, karlsson and Sorensen., Inc., Version 6.4.
8. Joo chai, W .(2004), "Seismic behavior of micropiles", Athesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in civil engineering , Washington state university, pp . 50~65
9. Wolf, J.P .(1985). " Dynamic soil-structure interaction", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.