مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۲)
دوره‌ی ۲-۲۹، شماره‌ی ۳، ص. ۴۹-۵۹

Original Article

بررسی رفتار لرزه‌یی دیوارهای حایل خاکی مسلح‌شده با ژئوسینتتیک‌ها جهت پیشنهاد ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل

محمد علیایی* **(استادیار)**
مریم یزدی (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

با توجه به افزایش استفاده از سیستم‌های خاک مسلح ژئوسینتتیکی در مناطق لرزه‌خیز، در این تحقیق به بررسی رفتار لرزه‌یی دیوارهای حایل قائم خاک مسلح‌شده با ژئوسینتتیک‌ها جهت پیشنهاد ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل پرداخته می‌شود. از آنجا که روش شبه‌استاتیکی، رویکردی مناسب و ساده برای معادل‌سازی تحلیل‌های دینامیکی شیروانی‌های خاکی است؛ در این تحقیق سعی شده است برای دیوارهای خاک مسلح، روشی مشابه جهت معادل‌سازی رفتار دینامیکی با درنظرگرفتن یک ضریب شبه‌استاتیکی معادل پیشنهاد شود. به این منظور با درنظرگرفتن نیروهای بسیج‌شده در مسلح‌کننده‌ها (مهم‌ترین عامل پایداری گوه‌ی گسیختگی) به‌منزله‌ی مبنای مقایسه، ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل ارائه شده است. جهت تحلیل حساسیت، تأثیر پارامترهای ارتفاع دیوار، نوع شتاب‌نگاشت، فاصله‌ی عمودی مسلح‌کننده، نوع مسلح‌کننده، و نوع خاک که می‌توانند اثر قابل‌توجهی بر تغییرشکل‌ها و نیروها داشته باشند مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: دیوار حایل، خاک مسلح، ژئوسینتتیک، تحلیل دینامیکی، تحلیل شبه‌استاتیکی، ضریب شتاب افقی معادل زلزله، FLAC.

m.olyaei@modares.ac.ir
yazdi_ma@yahoo.com

۱. مقدمه

به‌دلیل ضعیف‌بودن خاک در برابر تنش‌های کششی، طراحان همیشه به دنبال بهترین راه حل جهت جبران این نقیصه‌ی خاک بوده‌اند. تسلیح خاک یکی از قدیمی‌ترین روش‌هایی است که در ساختن سازه‌هایی که غالباً از خاک به منزله‌ی اصلی‌ترین مصالح در آن‌ها استفاده می‌شود، به کار رفته است.

هر چند تسمه‌ها و شبکه‌های فلزی در چند دهه‌ی پیش کاربرد وسیعی در تسلیح خاک داشته‌اند؛ اما پیشرفت علوم مهندسی پلیمر در دهه‌های اخیر، ژئوسینتتیک‌ها را که مزیت‌های بهتری نسبت به دیگر مسلح‌کننده‌ها دارند، به‌منزله‌ی گزینه‌ی مناسبی مطرح کرده است و دیوارهای حایل خاکی مسلح‌شده با ژئوسینتتیک‌ها[1] با روندی رو به رشد در بیشتر کشورها اجرا شده‌اند.

از مهم‌ترین مزایای دیوارهای مسلح ژئوسینتتیکی، رفتار مناسب این دیوارها در برابر بارهای دینامیکی است. تا زمانی که نیرویی به مسلح‌کننده وارد نشود، وجود یا عدم وجود مسلح‌کننده در دیوار حایل خاکی بی‌تأثیر است و فقط زمانی استفاده از مسلح‌کننده مفید است که تنش‌های وارد بر آن در حدی باشند که مسلح‌کننده وادار به کشش شود و نیروی تولیدشده در آن بر ضعف کششی خاک غلبه کند، از این رو پیش‌بینی میزان نیروی تولیدشده در ژئوسینتتیک‌ها حین زلزله اهمیت به‌سزایی دارد.

پیش‌بینی میزان نیروی تولیدشده در ژئوسینتتیک‌ها حین زلزله را می‌توان با پایش و رفتارنگاری تعداد زیادی نمونه‌ی آزمایشگاهی بزرگ‌مقیاس دینامیکی انجام داد؛ ولی به‌علت هزینه‌ی بالای این موضوع، این کار به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. لذا مدل‌سازی عددی، راه حل مناسبی جهت ارزیابی اقتصادی رفتار لرزه‌یی دیوارهای حایل خاکی مسلح‌شده با ژئوسینتتیک است. تحقیقات مختلفی به بررسی رفتار دیوارهای مسلح‌شده ژئوسینتتیکی پرداخته‌اند: در سال ۱۹۹۵ محققان با استفاده از نرم‌افزار TARA-۳، یک نوع دیوار مسلح‌شده‌ی ژئوسینتتیکی با پوشش بلوک بتنی را مدل‌سازی و پاسخ دینامیکی سازه‌ی موردنظر را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها تأثیر بارگذاری دینامیکی در تغییرمکان دیوار و جابجایی بین بلوک‌های بتنی در پوشش بالای دیوار را نشان داد. بر مبنای این نتایج، آن‌ها پیشنهادهایی را برای طراحی دینامیکی دیوارهای خاک مسلح ارائه کردند.[1]

در سال ۱۹۹۸ نیز پژوهشگران با استفاده از نرم‌افزار FLAC، به بررسی تأثیر مشخصات مسلح‌کننده نظیر طول و سختی و همچنین قید پای دیوار در پاسخ دینامیکی دیوار خاکی مسلح‌شده با ژئوسینتتیک‌ها پرداختند.[2و3] نتایج آن‌ها حاوی این نکته بود که بیشینه‌ی نیرو در مسلح‌کننده‌ها برخلاف توصیه‌ی آیین‌نامه‌ی AASHTO،[4] در ارتفاع تابعی خطی نیست.

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۳/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۰/۱۲/۱۵، پذیرش ۱۳۹۱/۱/۱۵.

در سال ۲۰۰۸ نیز برخی پژوهشگران به بررسی گسیختگی دیواره‌ی خاکریزهای ژئوسینتتیکی پرداختند. آن‌ها در تحقیق‌شان با استفاده از آزمایش بزرگ‌مقیاس برش مستقیم، مقاومت interface(اندرکنش خاک و مسلح کننده) را اندازه‌گیری و سپس پایداری و تغییرشکل ژئوممبرین را با روش‌های عددی و تحلیلی مطالعه کردند.[۵]

همچنین در سال ۲۰۰۹ پژوهش‌های متعددی با روش‌های متفاوت انجام شده است: مثلاً با روش تحلیل عددی به مدل‌سازی اثر بارگذاری یکنواخت و سیکلی در interface بین ژئوتکستایل و خاک پرداخته و از مدل خرابی کشسان‌خمیری برای مدل‌سازی رفتار interface بین ژئوتکستایل و خاک استفاده شده است؛[۶] در تحقیقی دیگر با استفاده از روش عددی تفاضل محدود (FLAC) به بررسی پاسخ دو دیوار خاکی بزرگ‌مقیاس که یکی با ژئوگرید پلیمری نسبتاً قابل انبساط و دیگری با شبکه‌ی مش جوش‌شده‌ی نسبتاً سخت مدل‌سازی شده بود، در طول مدت ساخت و تحت سربار پرداخته شده و نتایج نشان داده که مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار FLAC جهت پیش‌بینی عملکرد دیوار خاکی مسلح‌شده، برای مدل‌سازی خاک مسلح (interface)، شرایط مرزی، و... مناسب است؛[۷] و نیز با روش مدل‌سازی عددی تفاضل محدود (FLAC) به مقایسه‌ی یک مطالعه‌ی موردی از لحاظ توزیع تنش و تغییرمکان در ژئوفوم انتخابی پرداخته‌شده است. نتایج این پژوهش هم نشان داد که محاسبات توزیع تنش و تغییرمکان در خاکریز ساخته‌شده با ژئوفوم برای نشست، فشار خارجی وارده‌ی زمین به دیوار حایل، پایداری شیب‌ها، و طراحی لرزه‌یی خاکریزهای ساخته‌شده با ژئوفوم کاربرد دارد.[۸]

خاطر نشان می‌شود که در سال ۲۰۰۶ نیز به بررسی اثر سختی، طول و فاصله‌ی عمودی ژئوگریدها در پاسخ شبیه‌سازی‌شده‌ی زلزله بر دیوارهای حایل خاکی مسلح‌شده، با استفاده از آزمایش میز لرزان پرداخته شده است.[۹] لازم به ذکر است که از نتایج مذکور در این تحقیق جهت بررسی صحت مدل استفاده شده است.

بیشتر تحلیل‌های شبه‌استاتیکی انجام‌شده برای دیوارهای خاک مسلح بر مبنای روش‌های تحلیلی تعادل حدی بوده است (مثلاً مطالعات انجام شده با درنظرگرفتن: ۱. ضریب حالت فعال در روش مونونوبه ـاکابه، توزیع ذوزنقه‌یی و برمبنای روش بلوک لغزشی نیومارک،[۱۰] ۲. زوایای شیب مختلف گوه‌ی گسیختگی،[۱۱] ۳. تأثیر ضریب قائم زلزله،[۱۲] ۴. ارائه‌ی روش‌هایی جدید جهت تعیین فشار محرک وارد بر دیوار حایل مسلح‌شده و مسلح‌نشده،[۱۳و۱۴] و تعیین نیروهای کششی مسلح‌کننده‌ها و توزیع فشار محرک وارده،[۱۵] با استفاده از روش قطعات افقی، ۵. روش قطعات افقی[۱۶و۱۷]).

یکی از مسائل مهم در هنگام استفاده از روش‌های شبه‌استاتیکی انتخاب ضریب زلزله‌ی طرح است. آئین‌نامه‌ی FHWA (۲۰۰۱)،[۱۸] رابطه‌ی ارائه‌شده در سال ۱۹۹۱،[۱۹] را برای محاسبه‌ی k_h پیشنهاد کرده است (رابطه‌ی ۱):

$$k_h = \left(۱٫۴۵ - \frac{a_h}{g}\right)\left(\frac{a_h}{g}\right) \qquad (۱)$$

بر اساس نظریات Schlosser و Bastick [۲۰]، در استفاده از رابطه‌ی ۱ باید دقت لازم را مبذول داشت، زیرا این فرمول براساس تحلیل‌های انجام‌شده روی دیوارهای مسلح‌شده توسط تسمه‌های فولادی با ارتفاع بیشتر از ۱۰٫۵ متر، که تحت بار زلزله با بسامد بالا قرار گرفته‌اند، به‌دست آمده است.

با توجه به آنکه روش شبه‌استاتیکی رویکردی مناسب و ساده برای معادل‌سازی تحلیل‌های دینامیکی است، هدف اصلی این نوشتار بررسی رفتار لرزه‌یی دیوارهای حایل خاک مسلح ژئوسینتتیکی (GRSRW) بر مبنای روش عددی تفاضل محدود و ارائه‌ی روشی جهت معادل‌سازی رفتار دینامیکی با پیشنهاد یک ضریب شبه‌استاتیکی معادل برای مدل است. این روند با درنظرگرفتن نیروهای بسیج‌شده در مسلح‌کننده‌ها (مهم‌ترین عامل پایداری گوه‌ی گسیختگی) به منزله‌ی مبنای مقایسه، ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل (k'_h) را نتیجه می‌دهد. در بخش دوم این نوشتار، به نحوه‌ی مدل‌سازی عددی پرداخته شده و در بخش سوم صحت مدل مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بخش چهارم، پارامترهای مصالح برای تحلیل‌های دینامیکی و شبه‌استاتیکی ارائه و در بخش پنجم، نتایج عددی تحلیل‌های استاتیکی، دینامیکی، و شبه‌استاتیکی با درنظرگرفتن پارامترهای مختلف مورد بررسی (ارتفاع دیوار، نوع شتاب‌نگاشت، فاصله‌ی عمودی مسلح‌کننده، نوع مسلح‌کننده، و نوع خاک) آورده شده‌اند. در انتها نیز نتایج بیان شده است.

۲. مدل‌سازی عددی

در این نوشتار، مدل‌سازی بر مبنای روش عددی تفاضل محدود دو بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC انجام شده است. مدل‌سازی برای دیوارهای کوتاه و بلند با آرایش‌های مختلف و سختی‌های متفاوت ژئوسینتتیک و مصالح مختلف پشت دیوار صورت گرفته است. روند مدل‌سازی شامل ایجاد هندسه‌ی مدل، تعیین پارامترهای مصالح، اعمال شرایط مرزی و اولیه، بارگذاری استاتیکی، بارگذاری دینامیکی (اعمال شتاب‌نگاشت)، بارگذاری شبه‌استاتیکی (اعمال ضریب شتاب افقی معادل مدل) و تحلیل حساسیت روی پارامترهای مؤثر در تغییرشکل‌ها و نیروها بوده است.

با توجه به آنکه براساس مطالعه‌ی متون فنی، ارتفاع متداول برای دیوارهای GRSRW در محدوده‌ی ۳ تا ۱۲ متر است، به منظور مطالعه‌ی تأثیر ارتفاع دیوار، کلیه‌ی تحلیل‌ها برای دو دیوار ۵ و ۱۰ متری به‌عنوان دیوار کوتاه و دیوار بلند انجام شده‌اند.

فاصله‌ی عمودی بین ژئوسینتتیک‌ها از عوامل دیگری است که بر نیروی تولیدشده در آن‌ها تأثیر به‌سزایی دارد. براساس متون فنی این امر نیز با انتخاب ۲ فاصله‌ی ۰٫۵ و ۱ متری بین مسلح‌کننده‌ها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

در دیوارهای مسلح‌شده با ژئوسینتتیک‌ها، سختی مسلح‌کننده‌ها اهمیت زیادی دارد. هر چند که سختی‌های متفاوت در دامنه‌ی مشخصی می‌تواند معیار پایداری دیوار را ارضاء کند؛ اما این دامنه، تأثیر قابل‌ملاحظه‌یی در تغییرمکان ایجادشده در دیوار و نیروهای تولیدشده در ژئوسینتتیک‌ها دارد و در مواردی که تغییرشکل سازه مهم است، نقش سختی مسلح‌کننده‌ها دو چندان می‌شود. روش‌های ساده‌ی تعادل حدی، به‌علت درنظرنگرفتن تأثیر سختی مسلح‌کننده‌ها، در مدل‌سازی ضعف دارند. در نتیجه با کمک روش عددی تفاضل محدود کوشیده شده است تا این تأثیر بر نیروهای تولیدشده در ژئوسینتتیک‌ها در نظر گرفته شود.

از آنجا که اغلب از خاک دانه‌یی در مصالح پشت دیوار استفاده می‌شود، در این تحقیق از ۲ نوع خاک دانه‌یی با مشخصات مختلف، که بتوانند محدوده‌یی کلی از این مصالح را پوشش دهند، استفاده شده است؛ تا به بررسی میزان تأثیر نوع خاک دانه‌یی بر نیروهای تولیدشده در مسلح‌کننده‌ها پرداخته شود.

خاطرنشان می‌شود مشکل عمده‌ی تحلیل‌های دینامیکی زمانبربودن آن‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای عددی است. از این رو مناسب‌ترین و ساده‌ترین راه حل، تعیین ضرایبی معادل است که به‌واسطه‌ی آن‌ها بتوان نیروهای بسیج‌شده در مسلح‌کننده را به‌منزله‌ی مهم‌ترین عامل پایداری گوه‌ی گسیختگی از ۲ روش شبه‌استاتیکی و دینامیکی به یکدیگر همگرا کرد؛ تا با استفاده از تحلیل‌های شبه‌استاتیکی که زمان

بسیارکمتری نسبت به تحلیل‌های دینامیکی می‌گیرند، به طراحی نسبتاً دقیقی دست یافت. مدل‌سازی‌های انجام‌شده شامل ۳ مرحله هستند: ۱. تحلیل استاتیکی، ۲. تحلیل دینامیکی (اعمال ۳ شتاب‌نگاشت مهم طبس، ال‌سنترو و لوماپریتا با بیشینه‌ی شتاب و محتوی بسامدی متفاوت)، ۳. تحلیل شبه‌استاتیکی یا استاتیکی معادل (اعمال ضریب شتاب افقی معادل مدل).

شرایط مرزی در حالت تحلیل استاتیکی و شبه‌استاتیکی برای مرزهای جانبی به‌صورت غلتکی و برای مرز تحتانی به‌صورت مفصل کامل در نظرگرفته شد.

اما آنچه که در تحلیل‌های دینامیکی اهمیت دارد، انتخاب مرزهای کناری است. به‌عبارت دیگر، در تحلیل دینامیکی مرزهای محیط آزاد در اطراف مدل، جایگزین مرزهای استاتیکی می‌شوند. این عمل باعث می‌شود که پس از ارضاء شرایط استاتیکی و پایداری مدل تحت تنش‌های برجای اولیه، مرزهای محیط آزاد، از برگشت انعکاسی موج زلزله جلوگیری کنند.

۳. صحت‌سنجی مدل[۲]

در مدل‌سازی عددی مهم آن است که در ابتدا از صحت نتایج مدل اطمینان حاصل کرد. بدین منظور از آزمایش‌های پژوهشی در سال ۲۰۰۶،[۹] استفاده شده است. در این آزمایش‌ها به بررسی اثر فاصله‌ی عمودی ژئوگرید، نسبت طول ژئوگرید به ارتفاع دیوار و سختی ژئوگرید در پاسخ شبیه‌سازی‌شده‌ی زلزله در GRSRW، با استفاده از آزمایش میز لرزان پرداخته شده است. نمای کلی دیوار مورد آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.

با استفاده از پارامترهای آزمایش‌های فوق، مدل تفاضل محدود در تحلیل دینامیکی مورد صحت‌سنجی قرارگرفت. در شکل ۲، به مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی پرداخته شده است. در این شکل، تغییرات مجموع نیروهای بسیج‌شده در مسلح‌کننده‌ها در برابر دامنه‌ی شتاب موج ورودی پایه، برای دو دیوار مورد مطالعه در آزمایش‌های میز لرزان و مدل FLAC تطابق خوبی را نشان می‌دهند.

۴. پارامترهای مدل و مصالح

۱.۴. هندسه‌ی مدل

در این تحقیق، از دیوارهای با ارتفاع ۵ و ۱۰ متر استفاده شده است. ابعاد مدل به گونه‌یی انتخاب شده‌اند که از تأثیر مرزها در نتایج تحلیل پرهیز شود. به همین علت

شکل ۱. نمای مدل GRSRW در آزمایش میز لرزان.[۹]

الف)نتیجه ی آزمایش های میز لرزان ؛[۹]

ب)نتیجه ی مدل FLAC.

شکل ۲. مقایسه‌ی تغییرات مجموع نیروهای بسیج‌شده در مسلح‌کننده‌ها ($\sum T_i$) در برابر دامنه‌ی شتاب موج ورودی پایه.

شکل ۳. مدل تفاضل محدود FLAC.

بُعد خاکریز پشت دیوار براساس پیشنهادهای پژوهش‌های پیشین،[۳] حدود ۵ برابر ارتفاع دیوار مدل شده است. ضمناً براساس مطالعات پیشین،[۱۹] به منظور حذف اثر نوع پی در تحلیل، یک پی صلب به عمق ۱ متر در مرز زیرین مدل انتخاب شد.

در شکل ۳، نمای کلی مدل‌های ساخته‌شده در FLAC نشان داده شده است. ابعاد کلی مدل دیوارها و پی، محل قرارگیری ژئوسینتتیک‌ها و طول و فواصل عمودی آن‌ها، و شرایط مرزی استاتیکی و دینامیکی در این شکل قابل مشاهده است.

لازم به ذکر است طول مسلح‌کننده‌ها برابر دو سوم ارتفاع دیوار در نظر گرفته

شده است. این طول، معادل طولی است که در تحقیقات پیشین،[۲۱و۲۲] به‌عنوان مرز کارایی مؤثر مسلح‌کننده معرفی شده است.

۲.۴. پارامترهای مصالح

به‌دلیل اندرکنش مناسب‌تر خاک‌های دانه‌یی و مسلح‌کننده‌ها نسبت به خاک‌های ریزدانه، معمولاً برای ساخت دیوارهای خاک مسلح از خاک‌های دانه‌یی استفاده می‌شود. از این رو ۲ نوع خاک دانه‌یی که بتوانند محدوده‌یی کلی از مصالح خاکریز پشت دیوار را پوشش دهند، به‌منزله‌ی نماینده‌انتخاب شده‌اند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

برای مدل‌سازی المان‌های خاک در پشت دیوار از مدل کشسان خمیری کامل موهر ـ کلمب استفاده شده است. مشخصات پی و پوشش نیز مطابق با جدول ۱ انتخاب شده‌است. ضمناً میرایی درنظرگرفته‌شده در خاک از نوع رایلی است.

در این تحقیق، از مدل کشسان خمیری کامل برای مدل‌سازی ژئوسینتتیک‌ها استفاده شده است. دامنه‌ی سختی مسلح‌کننده‌های ژئوسینتتیکی معمولاً از

جدول ۱. پارامترهای مصالح.

خاک پشت دیوار شماره ۱	
مدل	کشسانی ـ خمیری کامل موهر ـ کلمب
γ (وزن مخصوص)	۱۸ (kN/m^3)
ϕ (زاویه اصطکاک داخلی خاک)	۳۴°
Ψ (زاویه اتساع)	۴°
E (مدول کشسانی)	۳۵ (Mpa)
ν (نسبت پواسون)	۰٫۳
خاک پشت دیوار شماره ۲	
مدل	کشسانی ـ خمیری کامل موهر ـ کلمب
γ (وزن مخصوص)	۱۷(kN/m^3)
ϕ (زاویه اصطکاک داخلی خاک)	۳۰°
Ψ (زاویه اتساع)	۰°
E (مدول کشسانی)	۳۲(Mpa)
ν (نسبت پواسون)	۰٫۳
فونداسیون	
مدل	کشسانی ـ خطی
γ (وزن مخصوص)	۲۰ (kN/m^3)
E (مدول کشسانی)	۲۵ (Gpa)
ν (نسبت پواسون)	۰٫۲
نما	
مدل	کشسانی خطی
γ (وزن مخصوص)	۲۴ (kN/m^3)
E (مدول کشسانی)	۲۵ (Gpa)
ضخامت	۰٫۲ (m)

جدول ۲. پارامترهای ژئوسینتتیک‌ها.

مدل	مسلح کننده کشسانی ـ خمیری کامل
K or J (سختی=EA)	No.۱: ۱۰۰۰(kN/m) → ژئوتکستایل پلیمری انعطاف پذیر No.۲: ۱۰۰۰۰(kN/m) → ژئوگرید بسیار سخت
T_y (تنش تسلیم)	۲۰۰ (kN/m)
مقطع عرضی	۰٫۰۰۲ (m^2/m)
پارامترهای اندرکنش	$K_b = ۲ \times ۱۰^۳$(MN/m/m) $S_b = ۱\ times ۱۰^۳$ (kN/m)

شکل ۴. تاریخچه‌ی زمانی شتاب‌نگاشت‌های طبس، ال‌سنترو و لوماپریتا بر روی بستر سنگی.[۲۱]

۱۰۰۰ kN/m تا ۱۰۰۰۰ kN/m متغیر است. سختی ۱۰۰۰ kN/m برای ژئوتکستایل‌های ارتجاعی و ۱۰۰۰۰ N/m برای ژئوگریدهای بسیار سخت معمول هستند. دو سختی فوق به‌عنوان حد بالا و پایین سختی ژئوسینتتیک‌ها در مدل‌سازی مورد استفاده قرارگرفته‌اند. در جدول ۲ سایر مشخصات ژئوسینتتیک‌ها ارائه شده‌اند.

۳.۴. بارگذاری دینامیکی

در تحلیل‌های دینامیکی از ۳ شتاب‌نگاشت زلزله‌های مهم طبس، ال‌سنترو، و لوماپریتا با بیشینه‌ی دامنه‌ی شتاب، محتوی بسامدی و مدت دوام متفاوت استفاده شده است. تاریخچه‌ی زمانی این زلزله‌ها که بر روی بستر سنگی ثبت‌شده در شکل ۴ و مشخصات اصلی آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. برای مقیاس‌کردن

جدول ۳. مشخصات اصلی زلزله‌های انتخابی.

زلزله	a_{max}/g	ω (rad/sec)	زمان (s)
طبس	۰٫۴۰	۱٫۳	۳۳
ال‌سنترو	۰٫۳۲	۱٫۲	۳۱
لوماپریتا	۰٫۲۵	۱٫۱	۳۹

شتاب‌نگاشت‌ها از ضریب g ۰٫۳۵ (مقدار شتاب مبنای طرح برای شهر تهران مطابق آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰) در هر ۳ زلزله استفاده شده است.

۴.۴. مدل‌های مختلف تحلیل

مدل‌های مختلف تحلیل برای شرایط استاتیکی، دینامیکی، و شبه‌استاتیکی در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. خاطرنشان می‌شود نام مشخص‌شده برای هر مدل، مشخصات متغیرهای مدل را بیان می‌کند. مثلاً، مدل H۵-d۰٫۵-S۱-G۱-T مدل یک دیوار ۵ متری را نشان می‌دهد (H۵)، که در آن فاصله‌ی عمودی ژئوسینتتیک‌ها برابر ۰٫۵ متر بوده (d۰٫۵) و از خاک نوع ۱ (S۱) و ژئوسینتتیک نوع ۱ (G۱) استفاده شده است و تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طبس قرار گرفته است (T).

۵. نتایج تحلیل‌های عددی

۱.۵. نتایج تحلیل دینامیکی

نتایج تحلیل دینامیکی مدل‌های ارائه‌شده در جدول ۴ در شکل‌های ۵ الی ۸ آورده شده‌اند. از آنجا که نیروی بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها به‌منزله‌ی مبنای مقایسه‌ی تحلیل‌های دینامیکی و شبه‌استاتیکی انتخاب شده است، این شکل‌ها تغییرات نیرو را در ترازهای دیوار نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها، این نتایج به‌دست می‌آیند:

- نیروها در ارتفاع از بالا به پایین افزایش یافته‌اند. همان‌گونه که انتظار می‌رود با توجه به تغییرات خطی تنش در ارتفاع، تغییرات نیروی مورد انتظار نیز تقریباً خطی است. با وجود این، در دیوارهای بلند روند خطی تا حدودی دچار تغییر می‌شود. مثلاً در بخش یک سوم پائینی دیوار، مقدار نیروی بیشتری در مسلح کننده‌ها بسیج شده‌اند. این موضوع مؤید این نکته است که مناطق پائین دیوار نیاز بیشتری به مراقبت و دقت در طراحی دینامیکی دارند.
- با مقایسه‌ی نیروهای تولیدشده در ژئوسینتتیک‌های با فاصله‌ی عمودی ۰٫۵ m و ۱ m در دیوارهای با سایر مشخصات مشابه (مقایسه‌ی شکل ۵ با ۶ و شکل ۷ با ۸) مشاهده می‌شود که نیروهای بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها با فاصله‌ی ۱ m بیشتر از نیروهای بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها با فاصله‌ی ۰٫۵ m است. برای عموم زلزله‌ها، بیشینه‌ی نیروی بسیج‌شده در حالت اول ۲۰ تا ۵۰ درصد بیش از حالت دوم است. به‌عبارت دیگر، با ۲ برابرشدن فواصل قائم، بیشینه‌ی نیروی بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها به همان نسبت افزایش نمی‌یابد.
- استفاده از ژئوسینتتیک نوع ۱ که سختی آن یک دهم سختی ژئوسینتتیک نوع ۲ است، نیروهای بسیج‌شده در مسلح‌کننده‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش داده است. این موضوع اهمیت استفاده از ژئوتکستایل‌های کشسان را در مقایسه با ژئوگریدهای با سختی بیشتر در بهینه‌سازی رفتار لرزه‌یی دیوار نشان می‌دهد. ضمناً با توجه به شکل‌های ۵ تا ۸ مشاهده می‌شود که در شرایط مشابه، اثر نوع ژئوسینتتیک بیشتر از اثر نوع خاک دانه‌یی بوده است. این موضوع ناشی از آن است

جدول ۴. مدل‌های مختلف تحلیل.

زلزله	ارتفاع دیوار (m)	فاصله ژئوسینتتیک (m)	شماره خاک	شماره ژئوسینتتیک	ID
طبس	۵	۰٫۵	۱	۱	H۵-d۰٫۵-S۱-G۱-T
				۲	H۵-d۰٫۵-S۱-G۲-T
			۲	۱	H۵-d۰٫۵-S۲-G۱-T
				۲	H۵-d۰٫۵-S۲-G۲-T
		۱	۱	۱	H۵-d۱-S۱-G۱-T
				۲	H۵-d۱-S۱-G۲-T
			۲	۱	H۵-d۱-S۲-G۱-T
				۲	H۵-d۱-S۲-G۲-T
	۱۰	۰٫۵	۱	۱	H۱۰-d۰٫۵-S۱-G۱-T
				۲	H۱۰-d۰٫۵-S۱-G۲-T
			۲	۱	H۱۰-d۰٫۵-S۲-G۱-T
				۲	H۱۰-d۰٫۵-S۲-G۲-T
		۱	۱	۱	H۱۰-d۱-S۱-G۱-T
				۲	H۱۰-d۱-S۱-G۲-T
			۲	۱	H۱۰-d۱-S۲-G۱-T
				۲	H۱۰-d۱-S۲-G۲-T
ال‌سنترو	۵	۰٫۵	۱	۱	H۵-d۰٫۵-S۱-G۱-T
				۲	H۵-d۰٫۵-S۱-G۲-T
			۲	۱	H۵-d۰٫۵-S۲-G۱-T
				۲	H۵-d۰٫۵-S۲-G۲-T
		۱	۱	۱	H۵-d۱-S۱-G۱-T
				۲	H۵-d۱-S۱-G۲-T
			۲	۱	H۵-d۱-S۲-G۱-T
				۲	H۵-d۱-S۲-G۲-T
	۱۰	۰٫۵	۱	۱	H۱۰-d۰٫۵-S۱-G۱-T
				۲	H۱۰-d۰٫۵-S۱-G۲-T
			۲	۱	H۱۰-d۰٫۵-S۲-G۱-T
				۲	H۱۰-d۰٫۵-S۲-G۲-T
		۱	۱	۱	H۱۰-d۱-S۱-G۱-T
				۲	H۱۰-d۱-S۱-G۲-T
			۲	۱	H۱۰-d۱-S۲-G۱-T
				۲	H۱۰-d۱-S۲-G۲-T
لوماپریتا	۵	۰٫۵	۱	۱	H۵-d۰٫۵-S۱-G۱-T
				۲	H۵-d۰٫۵-S۱-G۲-T
			۲	۱	H۵-d۰٫۵-S۲-G۱-T
				۲	H۵-d۰٫۵-S۲-G۲-T
		۱	۱	۱	H۵-d۱-S۱-G۱-T
				۲	H۵-d۱-S۱-G۲-T
			۲	۱	H۵-d۱-S۲-G۱-T
				۲	H۵-d۱-S۲-G۲-T
	۱۰	۰٫۵	۱	۱	H۱۰-d۰٫۵-S۱-G۱-T
				۲	H۱۰-d۰٫۵-S۱-G۲-T
			۲	۱	H۱۰-d۰٫۵-S۲-G۱-T
				۲	H۱۰-d۰٫۵-S۲-G۲-T
		۱	۱	۱	H۱۰-d۱-S۱-G۱-T
				۲	H۱۰-d۱-S۱-G۲-T
			۲	۱	H۱۰-d۱-S۲-G۱-T
				۲	H۱۰-d۱-S۲-G۲-T

شکل ۵. تغییرات نیروهای بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها در ارتفاع دیوار برای دیوارهای ۵ متری با d= ۰/۵ m.

شکل ۷. تغییرات نیروهای بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها در ارتفاع دیوار برای دیوارهای ۱۰ متری با d= ۰/۵ m.

شکل ۶. تغییرات نیروهای بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها در ارتفاع دیوار برای دیوارهای ۵ متری با d= ۱ m.

شکل ۸. تغییرات نیروهای بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها در ارتفاع دیوار برای دیوارهای ۱۰ متری با d= ۱ m.

که مصالح خاکریز دانه‌یی پشت دیوار عموماً از جنس مصالح مناسب انتخاب می‌شود، لذا دامنه‌ی تغییرات خواص این مصالح چندان متفاوت نیست (به‌منظور مشاهده‌ی روند اثر هر یک از پارامترهای نوع خاک و سختی ژئوسینتتیک در نیروهای بسیج‌شده، تغییرات نیرو تحت تأثیر این پارامترها برای نمونه در دیوارهای ۵ متری با فاصله‌ی عمودی ۰/۵ ژئوسینتتیک در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند).

- افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی، مدول کشسانی و وزن مخصوص خاک، باعث کاهش نیروهای بسیج‌شده در مسلح‌کننده‌ها شده است. میزان این کاهش در برخی دیوارها بیشتر و یا کمتر است. با این وجود مشخص است استفاده از خاک‌های با خواص دانه‌یی بیشتر به‌منزله‌ی مصالح پرکننده‌ی پشت دیوار اثر بهتری در رفتار لرزه‌یی دیوار دارد.
- برای دیوارهای با ارتفاع و فاصله‌ی عمودی ژئوسینتتیک یکسان، نقطه‌ی شروع همه‌ی نمودارها در بالای دیوار تقریباً بر هم منطبق است ولی در نقاط پایین، نمودارها بیشترین فاصله را از یکدیگر دارند. این امر نشان می‌دهد که ژئوسینتتیک‌های لایه‌ی بالایی، نیروهای تقریباً یکسانی را تحمل کرده و عملکرد یکسانی دارند؛ در حالی‌که با افزایش عمق، اختلاف نیروهای بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها برحسب شرایط مختلف سختی ژئوسینتتیک و نوع خاک بیشتر می‌شود.
- با مقایسه‌ی نیروهای بسیج‌شده در مسلح‌کننده‌ها در اثر شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های مختلف، مشاهده می‌شود که شتاب بیشینه‌ی زلزله، عامل مهم و تأثیرگذاری است. ژئوسینتتیک‌های مدل‌های مشابه‌ی که تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طبس با بیشترین بیشینه‌ی شتاب قرار گرفته‌اند، دارای بیشترین مقدار نیرو و آن‌هایی که تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی لوماپریتا با کمترین بیشینه‌ی شتاب قرار گرفته‌اند، دارای کمترین مقادیر نیرو هستند.

شکل ۹. اثر نوع خاک بر نیروهای بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها (دیوارهای ۵ متری با d= ۰/۵ m).

شکل ۱۰. اثر سختی بر نیروهای بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها (دیوارهای ۵ متری با d= ۰/۵ m).

۲.۵. مقایسه‌ی نتایج تحلیل‌های دینامیکی و استاتیکی

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مقایسه‌ی نیروهای تولیدشده در حالت استاتیکی و دینامیکی آورده شده‌اند. مثلاً، در شکل ۱۱ نتایج برای دیوارهای ۵ متری با فاصله‌ی عمودی ۰/۵ متری ژئوسینتتیک‌ها و در شکل ۱۲ برای دیوارهای ۱۰ متری با فاصله‌ی عمودی ۱ متری ژئوسینتتیک‌ها ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که بارگذاری دینامیکی، باعث تولید نیروی اضافه در مسلح‌کننده‌ها می‌شود؛ به‌گونه‌یی که در قسمت‌های بالای دیوار نیروهای استاتیکی و دینامیکی بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند و با افزایش عمق، اختلاف آن‌ها به نحو قابل ملاحظه‌یی افزایش می‌یابد.

مثلاً برای دیوارهای ۵ متری با فاصله‌ی عمودی ۰/۵ متری ژئوسینتتیک‌ها،

شکل ۱۱. مقایسه‌ی نیروهای بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی برای دیوارهای ۵ متری با d= ۰/۵ m.

شکل ۱۲. مقایسه‌ی نیروهای بسیج‌شده در ژئوسینتتیک‌ها در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی برای دیوارهای ۱۰ متری با d=۱ m.

ضریب افزایش نیرو از حالت استاتیکی به دینامیکی در پایین دیوار برای زلزله‌ی طبس بین ۱٫۸ تا ۳٫۸، زلزله‌ی ال‌سنترو بین ۱٫۶ تا ۳ و برای زلزله‌ی لوماپریتا بین ۱٫۲ تا ۱٫۸ است. ضمناً برای دیوارهای ۱۰ متری با فاصله‌ی عمودی ۱ متری ژئوسینتتیک‌ها، این ضریب برای زلزله‌ی طبس بین ۱٫۸ تا ۲٫۵، زلزله‌ی ال‌سنترو بین ۱٫۶ تا ۲٫۴ و برای زلزله‌ی لوماپریتا بین ۱٫۵ تا ۲٫۲ است.

۳.۵. نتایج تحلیل‌های شبه‌استاتیکی

پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی و به‌دست‌آوردن توزیع نیروهای تولیدشده در مسلح‌کننده‌ها، با انجام تحلیل‌های شبه‌استاتیکی به روش تفاضل محدود با نرم‌افزار FLAC و با اعمال ضرایب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل (k'_h)، سعی در به‌دست‌آوردن پوش نیروهای حالت دینامیکی (متناظر با شکل‌های ۵ تا ۸) شده است. این پوش‌ها و ضرایب k'_h مربوط به آن‌ها در شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ نشان داده شده‌اند. خاطرنشان می‌شود دسته‌بندی مدل‌ها براساس پارامترهای ارتفاع دیوار،

شکل ۱۳. محدوده‌ی تغییرات ضرایب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل (k'_h) در دیوارهای ۵ متری با d= ۰/۵ m.

شکل ۱۴. محدوده‌ی تغییرات ضرایب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل (k'_h) در دیوارهای ۵ متری با d= ۱ m.

شکل ۱۵. محدوده‌ی تغییرات ضرایب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل (k'_h) در دیوارهای ۱۰ متری با d= ۰/۵ m.

شکل ۱۶. محدوده‌ی تغییرات ضرایب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل (k'_h) در دیوارهای ۱۰ متری با d= ۱ m.

فاصله‌ی عمودی ژئوسینتتیک‌ها و شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ورودی که بیشترین تأثیر را در نتایج تحلیل دینامیکی داشته‌اند، بوده است.

۴.۵. ارائه‌ی ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل (k'_h)

براساس نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های شبه‌استاتیکی (شکل‌های ۱۳ تا ۱۶)، محدوده‌ی تغییرات ضریب شتاب افقی معادل زلزله را می‌توان براساس پارامترهای مؤثر، در جدول ۵ خلاصه کرد. همانگونه که انتظار می‌رود، ضریب افقی معادل زلزله با شتاب بیشینه در ارتباط مستقیم است؛ یعنی با افزایش شتاب بیشینه‌ی زلزله، مقدار این ضریب در دیوارهای مشابه افزایش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که ضریب مذکور، تابعی از ارتفاع دیوار و فاصله‌ی عمودی مسلح‌کننده‌ها نیز است.

نکته‌ی مهم در جدول ۵ آن است که تفاوت مقادیر بیشترین و کمترین مقدار k'_h به‌دست‌آمده که با $\Delta k'_h$ نشان داده شده است، چندان وابسته به نوع شتاب‌نگاشت نبوده است. محدوده‌ی تغییرات $\Delta k'_h$ به این شرح است:

دیوارهای ۵ متری با d= ۰/۵ m: $۰/۱۲ < \Delta k'_h < ۰/۱۵$

دیوارهای ۵ متری با d= ۱ m: $۰/۱۰ < \Delta k'_h < ۰/۱۳$

دیوارهای ۱۰ متری با d= ۰/۵ m: $۰/۰۶ < \Delta k'_h < ۰/۰۷$

دیوارهای ۱۰ متری با d= ۱ m: $۰/۰۳ < \Delta k'_h < ۰/۰۴$

مشاهده می‌شود که محدوده‌ی تغییرات $\Delta k'_h$ در ۴ تیپ مختلف دیوار و فاصله‌ی عمودی ژئوسینتتیک، برای دیوارهای بلند، ناچیز و برای دیوارهای کوتاه دارای تغییرات اندکی است.

در نهایت، براساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۵، مشابه روند تحلیل شبه‌استاتیکی شیروانی‌های خاکی، می‌توان رابطه‌ی ۲ را جهت تعیین ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل پیشنهاد کرد:

$$k'_h = \beta \frac{a_{\max}}{g} \qquad (۲)$$

در این رابطه، $a_{\max}$ بیشینه‌ی شتاب زلزله و g شتاب ثقل هستند. ضریب β برای ۴ تیپ مختلف دیوار و فاصله‌ی عمودی ژئوسینتتیک به این صورت پیشنهاد می‌شود:

دیوارهای ۵ متری با d= ۰/۵ m: $۰/۷ < \beta < ۰/۸۵$

جدول ۵. محدوده تغییرات ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل.

ارتفاع دیوار (H)	فاصله ژئوسینتتیک (d)	زلزله	$a_{\max}/g$	k'_h (min)	k'_h (max)	$\Delta k'_h$	β
۵ (m)	۰/۵	طبس	۰/۴۰	۰/۱۵	۰/۳۰	۰/۱۵	۰/۷۵
		ال سنترو	۰/۳۲	۰/۱۲	۰/۲۷	۰/۱۵	۰/۸۵
		لوماپریتا	۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۶۹
	۱	طبس	۰/۴۰	۰/۱۷	۰/۳۰	۰/۱۳	۰/۷۵
		ال سنترو	۰/۳۲	۰/۱۱	۰/۲۱	۰/۱۰	۰/۶۶
		لوماپریتا	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۶۱
۱۰ (m)	۰/۵	طبس	۰/۴۰	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۰۶	۰/۶۸
		ال سنترو	۰/۳۲	۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۰۷	۰/۸۲
		لوماپریتا	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۰۶	۰/۹۸
	۱	طبس	۰/۴۰	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۰۳	۰/۶۵
		ال سنترو	۰/۳۲	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۰۳	۰/۷۲
		لوماپریتا	۰/۲۵	۰/۱۶	۰/۲۰	۰/۰۴	۰/۸۱

دیوارهای ۵ متری با d= ۱ m: $۰٫۶ < \beta < ۰٫۷۵$

دیوارهای ۱۰ متری با d= ۰٫۵ m: $۰٫۷ < \beta < ۱٫۰$

دیوارهای ۱۰ متری با d= ۱ m: $۰٫۶۵ < \beta < ۰٫۸$

همانگونه که مشاهده می‌شود ضریب β رابطه‌ی مستقیم با ارتفاع دیوار و رابطه‌ی معکوس با فاصله‌ی عمودی ژئوسینتتیک‌ها دارد. دلیل این موضوع آن است که با کاهش فاصله‌ی عمودی ژئوسینتتیک‌ها، تعداد آن‌ها افزایش یافته و ضریب بزرگتری برای غلبه بر نیروی به‌وجودآمده در کل آن‌ها و وقوع ناپایداری لازم است.

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش استفاده از دیوارهای حائل خاکی مسلح‌شده با ژئوسینتتیک‌ها (GRSRW) در مناطق لرزه‌خیز، بررسی رفتار لرزه‌یی این سازه‌ها در این نوشتار بررسی شده است تا با درنظرگرفتن نیروهای بسیج‌شده در مسلح‌کننده‌ها (به‌منزله‌ی مهم‌ترین عامل پایداری گوه‌ی گسیختگی)، ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل پیشنهاد شود.

جهت تحلیل حساسیت، تأثیر پارامترهای ارتفاع دیوار، نوع شتاب‌نگاشت، فاصله‌ی عمودی مسلح‌کننده، نوع مسلح‌کننده، و نوع خاک که در تغییرشکل‌ها و نیروها مؤثر هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. خلاصه‌ی نتایج به‌دست‌آمده به این شرح است:

- مناطق پائین دیوار نیاز بیشتری به مراقبت و دقت در طراحی دینامیکی دارند.
- با ۲ برابرشدن فواصل قائم ژئوسینتتیک‌ها، بیشینه‌ی نیروی بسیج‌شده در آن‌ها با نسبتی کمتر افزایش می‌یابد.
- استفاده از ژئوتکستایل‌های کشسان در مقایسه با ژئوگریدهای با سختی بیشتر رفتار لرزه‌یی بهتری را نشان می‌دهد.

درنهایت، رابطه‌ی ۲ برای تعیین ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل پیشنهاد می‌شود. ضریب β برای ۴ تیپ مختلف دیوار و فاصله‌ی عمودی ژئوسینتتیک پیشنهاد می‌شود.

پانوشت‌ها

1. geosynthetic reinforced soil retaining wall (GRSRW)
2. verification

منابع (References)

1. Cai, Z. and Bathurst, R.J., "Seismic response analysis of geosynthetic reinforced soil segmental retaining walls by finite element method", *Computers and Geotechnics*, **17**(4), pp. 523-546 (1995).
2. Bathurst, R.J. and Hatami, K. "Influence of reinforcement stiffness, length and base condition on seismic response of geosynthetic reinforced soil walls", *Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics*, USA, pp. 613-616 (1998).
3. Bathurst, R.J. and Hatami, K. "Seismic response of a geosyntetic-reinforced soil retaining wall", *Geosynthetics International*, **5**(1-2), pp. 127-166 (1998).
4. AASHTO, *Interims: Standard Specifications for Highway Bridges*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA (1998).
5. Wu, W., Wang, X.T. and Aschauer, F. "Investigation on failure of a geosynthetic lined reservoir", *Geotextiles and Geomembranes,* **26**(4), pp. 363-370 (2008).
6. Ga, Z., Liping, W. and Jian-Min, Z. "Monotonic and cyclic modeling of interface between geotextile and gravelly soil", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,* **34**(13), DOI: 10.1002/nag, pp. 1346-1361 (September 2010).
7. Huang, B., Bathurst, R.J. and Hatami, K. "Numerical study of reinforced soil segmental walls using three different constitutive soil models", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , ASCE,* **135**(10), pp. 1486-1498 (2009).
8. Newman, M.P., Bartlett, S.F. and Lawton, E.C. "Numerical modeling of geofoam embankments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **136**(2), pp. 290-298 (2009).
9. El-Emam., M. and Bathurst, R.J. "Influence of reinforcement parameters on the seismic response of reduced-scale reinforced soil retaining walls", *Geotextiles and Geomembranes,* **25**(1), pp. 33-49 (2006).
10. Cai, Z. and Bathurst, R.J. "Seismic-Induced permanent displacement of geosynthetic-reinforced segmental retaining walls", *Canadian Geotechnical Journal*, **33**(6), pp. 937-955 (1996).
11. Ling, H.I., Leshchinsky, D. and Perry, E.B. "Seismic design and performance of geosynthetic-reinforced soil structures", *Géotechnique,* **47**(5), pp. 933-952 (1997).
12. Ling, H.I. and Leshchinsky, D. "Effects of vertical acceleration on seismic design of geosynthetic-reinforced soil structures", *Géotechnique*, **48**(3), pp. 347-373 (1998).
13. Lo, S-C.R. and Xu, D-W. "A strain-based method for the collapse limit state of reinforced soil walls and slopes", *Canadian Geotechnical Journal,* **29**(5), pp. 832-842 (1992).
14. Ahmadabadi, M. and Ghanbari, A. "New procedure for active earth pressure calculation in retaining walls with reinforced cohesive-frictional backfill", *Geotextiles and Geomembranes,* **27**(6), pp. 456-463 (2009).
15. Shekarian, S., Ghanbari, A. and Farhadi, A. "New seismic parameters in the analysis of retaining walls with

reinforced backfill", *Geotextiles and Geomembranes*, **26**, pp. 350-356 (2008).

16. Shahgholi, M. "Design of reinforced soil walls against earthquake", Thesis Presented to the University of Tehran, Tehran, Iran, in Partial Fulfillment Requirements for the Degree of Master of Science (1999).
17. Nouri, H., Fakher, A. and Jones, C.J.F.P. "Development of horizontal slice method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls", *Geotextiles and Geomembranes*, **24**(3), pp. 175-187 (2006).
18. Yasrobi, S.S., and Azad, A. "Facing effects in geosynthetic-reinforced soil structures", *Proceedings of 57th Canadian Geotechnical Conference,* Québec, Canada, 7 p. (2004).
19. Sakaguchi, M., Muramatsu, M. and Nagura, K. "A discussion on reinforced embankment structures having high earthquake resistance", *Proceeding of the International Symposium on Earth Reinforcement Practice,* Fukuoka, Japan, **1**, pp. 287-292 (1992).
20. Schlosser, F. and Bastick, M."Rein forced earth", Foundation Engineering Hand book, Fang(ed), Van Nostrand Reinhold, pp.778-795 (1991)
21. Sakaguchi, M. "A study of the seismic behavior of geosynthetic reinforced walls in Japan", *Geosynthetics International,* **3**(1), pp. 13-30 (1996).
22. The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER).

EVALUATION OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF GEOSYNTHETIC REINFORCED SOIL RETAINING WALLS TO PRESENT THE EARTHQUAKE EQUIVALENT HORIZONTAL ACCELERATION COEFFICIENT FOR THE MODEL

M. Oliaei(corresponding author)
m.olyaei@modares.ac.ir
M. Yazdi
yazdi_ma@yahoo.com
Dept. of Civil and Environmental Engineering
Tarbiat Modares University

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 29, Issue 3, Page 49-59, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 1 June 2011; received in revised form 5 March 2012; accepted 3 April 2012.

Abstract

Geosynthetics have been proved suitable for reinforced soil retaining walls. Due to an increase in the use of geosynthetic reinforced soil systems in seismic active zones that bear frequent earthquakes, it is important to study the dynamic behavior of these structures. Hence, in this research, a study on the seismic behavior of Geosynthetic Reinforced Soil Retaining Walls (GRSRW) has been undertaken to present the earthquake equivalent horizontal acceleration coefficient for the model.

As long as no force is imposed on the reinforcement, the existence of reinforcement in the soil retaining wall has no effect, hence, using reinforcement is useful only when the applied forces cause reinforcement tension, and the mobilized tension force can overcome the soil tension weakness. Thus, predicting mobilized forces in geosynthetics during an earthquake is very important.

The pseudo-static method is a suitable and simple approach to substitute for dynamic analyses of slope stability. Therefore, this research endeavors to offer an equivalent pseudo-static coefficient using a similar approach for the reinforced soil retaining walls to equalize dynamic behavior. A fundamental requirement to assess conservatism in current design practice and to validate new design approaches is a reliable estimate of the load in reinforcement layers to maintain the stability of the reinforced structure. Based on considering forces in reinforcements (as the most important factor of stability), the earthquake equivalent horizontal acceleration coefficient is proposed. Comprehensive sensitivity analyses have been performed to study the effects of parameters on forces and displacements. The effects of the most important parameters, such as wall height, maximum acceleration, vertical spacing of reinforcements, types of reinforcement and soils, through numerical modeling of geosynthetic reinforced soil retaining walls (GRSRW) under dynamic loading with the finite difference method using FLAC, have been investigated. The findings indicate rather positive results with each parameter.

Key Words: Geosynthetic Reinforced Soil Retaining Walls (GRSRW), dynamic analysis, pseudo-static analysis, earthquake equivalent horizontal acceleration coefficient.