

بررسی اثر افزودن الیاف موکت در افزایش فشار آب حفره‌یی در ماسه‌ی انزلی به کمک دستگاه تانک شفاف

رضا جمشیدی چناری* (استادیار)

آرش یوسفی بوندق (کارشناس ارشد)

محمدباقر اسفندیاری صومعه‌سرابی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۴ (دوره ۲ - شماره ۱/۲، ص. ۱۳۳-۱۴۰، یادداشت نثی)

در این نوشتار، به بررسی تأثیر الیاف موکت در شکل‌گیری و افزایش فشار آب حفره‌یی در ماسه در اثر اعمال بارهای هارمونیک پرداخته شده است. در این راستا، از مدل‌سازی فیزیکی در دستگاه تانک شفاف استفاده شده است. بدین منظور، الیاف موکت در درصد‌های وزنی و نسبت ابعاد مختلف با حفظ درصد تراکم بخش ماسه‌یی با ماسه مخلوط و به روش کوبش خشک متراکم شده است. نتایج بیان‌گر کاهش پتانسیل شکل‌گیری فشار آب حفره‌یی با افزایش درصد وزنی الیاف موکت است. علاوه بر توزیع تصادفی الیاف، توزیع منظم (سیستماتیک) یا لایه‌یی موکت در خاک ماسه‌یی ریزدانه نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌های مدل‌سازی حاکی از تأثیر اندک این نوع تسلیح در خواص هیدرولیکی خاک و پتانسیل شکل‌گیری فشار آب حفره‌یی در اثر ارتعاش دینامیکی است. در مجموع نتایج آزمایش‌های انجام‌شده حاکی از تأثیر مثبت افزودن تصادفی الیاف موکت به ماسه در کاهش پتانسیل شکل‌گیری و توسعه‌ی فشار آب حفره‌یی است.

jamshidi_reza@guilan.ac.ir
arash.yousefi.b@gmail.com
hamed.esfandyari@gmail.com

واژگان کلیدی: فشار آب حفره‌یی، الیاف موکت، تانک شفاف، ماسه‌ی ریزدانه، درصد وزنی الیاف، نسبت ابعاد الیاف، و ارتعاش هارمونیک.

۱. مقدمه

مواد مرکب براساس نتایج حاصل از آزمایش‌های رفتاری مواد مرکب مطالعه و ارزیابی کرد.

مطالعات اولیه‌ی انجام‌شده بر روی خاک‌های دانه‌یی مسلح با الیاف موکت حاکی از بهبود خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری این نوع خاک‌ها ناشی از تسلیح با الیاف موکت است.^[۱] در پژوهشی دیگر نیز به بررسی نقش این الیاف در تسلیح خاک‌های چسبنده پرداخته شد که نتایج آن حاکی از بهبود خواص این نوع خاک‌ها در اثر افزودن الیاف است.^[۲]

مطالعات دیگری موازی با مطالعات پیشین انجام‌شده بر روی رفتار استاتیکی خاک‌های مسلح با الیاف موکت و حتی پس از آن بر روی رفتار دینامیکی خاک مسلح با انواع مختلف الیاف انجام شده است، که همگی بیان‌گر بهبود چشم‌گیری در خواص دینامیکی خاک‌های ماسه‌یی در اثر افزودن الیاف هستند.^[۳-۹] در راستای مطالعه‌ی استفاده از ضایعات موکت در تسلیح خاک و همچنین پیشرفت مطالعات درباره‌ی رفتار دینامیکی خاک مسلح با الیاف موکت، پژوهش‌هایی نیز به منظور بررسی رفتار این خاک‌ها تحت اثر بارهای سیکلی قائم و افقی انجام شده است. بخش اول مطالعات انجام‌شده بر روی رفتار دینامیکی خاک‌های ماسه‌یی مسلح‌شده با الیاف موکت، مشتمل بر انجام آزمایش‌های سه محوری سیکلی بزرگ مقیاس بر

پیشرفت تکنولوژی و توسعه‌ی روزافزون صنایع از یک سو و رشد چشم‌گیر جمعیت و در نتیجه‌ی آن، افزایش بیش از پیش مصرف از سوی دیگر، افزایش حجم زائدات محصولات موکت را در مرحله‌ی تولید و مصرف به همراه دارد. بدون استفاده‌ماندن این نوع مواد ضایعاتی و مدفون شدن آنها در محل دفن زباله‌ها یا رهاکردنشان در محیط زیست، موجب آلودگی محیط می‌شود. بدیهی است باز یافت و استفاده‌ی مجدد و مناسب از این‌گونه مواد زائد، علاوه بر کمک به حفظ محیط‌زیست، به صرفه‌جویی اقتصادی (با توجه به هزینه‌ی بالای مدیریت مراکز دفن بهداشتی زباله‌ها) نیز کمک می‌کند.

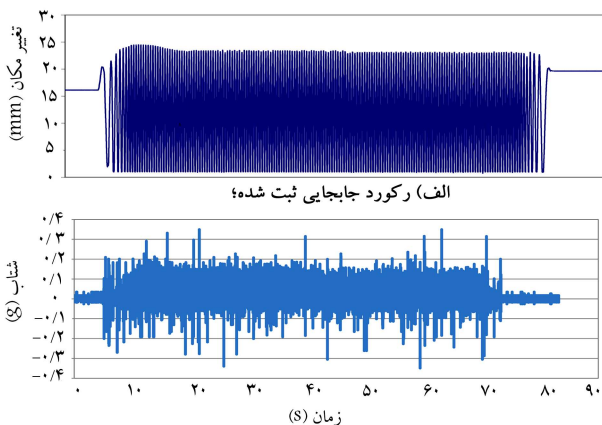
هر ساله مقدار زیادی موکت در سراسر جهان تولید می‌شود، که به‌کارگیری و مصرف آن درصد قابل توجهی ضایعات به همراه دارد. یکی از موارد استفاده از این نوع زائدات، استفاده از الیاف آن در تسلیح خاک است. از آنجا که از اختلاط خاک و زائدات پلیمری - الیافی و متراکم کردن مخلوط آنها، محیطی مرکب با زمینه‌ی اصلی (خاک) و عنصر تقویتی (رشته‌های الیاف) حاصل می‌شود، رفتار تغییر شکل‌پذیری و مقاومتی این محیط را می‌توان همانند سایر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۱۰/۱۳۹۱، اصلاحیه ۲۲/۴/۱۳۹۲، پذیرش ۱۹/۸/۱۳۹۲.



شکل ۲. محل قرارگیری حسگرهای فشار آب منفذی.



ب) رکورد شتاب محاسبه شده.

شکل ۳. نمونه‌یی از رکوردهای اعمالی به دستگاه تانک شفاف با بسامد ۲٫۶۶ هرتز.

جزئیات بیشتر در ارتباط با مشخصات فیزیکی و مکانیکی این دستگاه در پژوهشی در سال ۲۰۰۹ ارائه شده است.^[۱۷]

بار سیکلی اعمالی به این دستگاه توسط یک لرزاننده با قابلیت اعمال بار هارمونیک با بیشینه دامنه‌ی ۳۰ میلی‌متر و بسامد بیشینه‌ی ۳٫۳۳ هرتز ایجاد شده است. برای ثبت دقیق و پیوسته‌ی فشار آب، حفره‌یی از ۳ عدد حسگر فشار آب منفذی^۱ با دامنه‌ی اندازه‌گیری ۰٫۱ الی ۰٫۱ بار استفاده شده است. این فشارسنج‌ها در ترازهای ۷٫۵، ۱۷٫۵ و ۲۷٫۵ سانتی‌متری از سطح فیلترکف جعبه نصب شده‌اند (شکل ۲). به منظور حذف خطاهای ناشی از جابجایی حسگرهای فشار حفره‌یی در اثر اعمال بار جانبی هارمونیک، این حسگرها توسط لوله‌هایی از جنس پلی اتیلن، که به جداری دستگاه متصل هستند، دقیقاً در ترازهای تعیین شده تثبیت شده‌اند. شتاب هارمونیک اعمالی به تانک شفاف به صورت غیرمستقیم توسط یک حسگر جابجایی از نوع LVDT با دامنه‌ی ۳۰ میلی‌متر و دقت ۰٫۱ میلی‌متر اندازه‌گیری و رکوردهای جابجایی ثبت شده پس از ۲ بار مشتق‌گیری به تاریخچه‌ی شتاب تبدیل شده است. شکل ۳، نمونه‌یی از رکورد جابجایی اعمالی به دستگاه تانک شفاف را به همراه رکورد شتاب محاسبه شده نمایش می‌دهد. دستگاه ثبت داده‌ها قابلیت قرائت داده‌ها را تا ۱۶ کانال ورودی بر حسب نیاز و در حالت استفاده از کلیه کانال‌ها، هر کانال قابلیت ثبت داده‌ها با نرخ نمونه‌برداری ۶٫۲۵ kHz را دارد.^[۱۸]

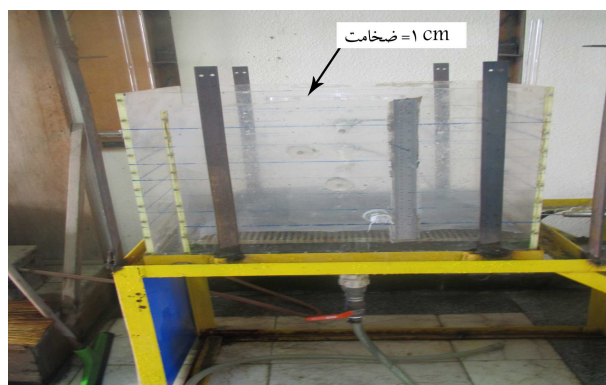
۳. مشخصات مصالح مورد استفاده

با بررسی‌های انجام شده بر روی خاک چند منطقه از بندرانزلی و بررسی پروفیل‌های حفاری جمع‌آوری شده از این منطقه، خاک غالب این منطقه از نوع ماسه‌ی بد

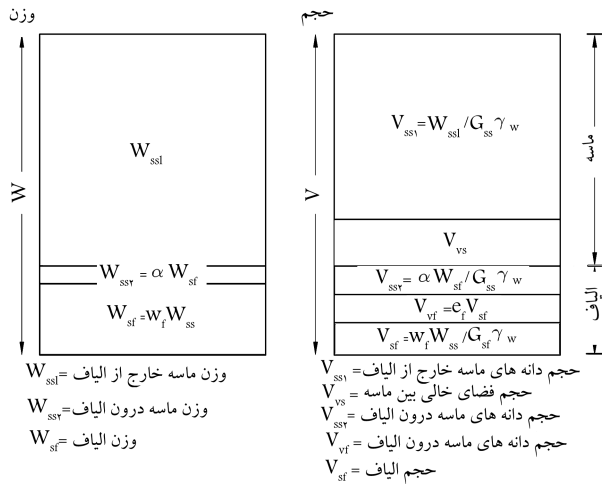
روی مخلوط ماسه با الیاف موکت در شرایط خشک بوده است.^[۱۰] علاوه بر این، آزمایش‌های میز لرزه بر روی مدل‌های جعبه‌یی چندلا حاوی ماسه‌ی مسلح با الیاف موکت در شرایط خشک تحت اثر بارهای دینامیکی هارمونیک انجام شده است، که نتایج آن‌ها حاکی از بهبود خواص دینامیکی این مصالح است.^[۱۱] در ادامه، با هدف یافتن کاربرد مطن‌ن برای زائادات موکت، از این مصالح به عنوان مصالح پشت‌ریز دیوارهای حائل سپری استفاده شده است. بدین منظور مدل‌های جعبه‌یی صلب از دیوار حائل سپری نگهدارنده‌ی مصالح ماسه‌یی مسلح با الیاف موکت در شرایط خشک بر روی میز لرزه ساخته شده است، که تحت اثر بار هارمونیک رفتار دینامیکی بهبود یافته‌یی نشان داده‌اند.^[۱۲] بخش دوم این مطالعات، مشتمل بر انجام آزمایش‌های سه محوری سیکلی مقیاس کوچک بر روی ماسه‌ی مسلح با الیاف موکت در شرایط اشباع است. این بخش از مطالعات همگی دال بر تأثیر قابل توجه الیاف موکت در پارامترهای دینامیکی اعم از مدول برشی و نسبت میرایی ماسه‌ی اشباع است.^[۱۳،۱۴] همچنین در پژوهش‌هایی در سال ۲۰۱۲، به مطالعه‌ی اثر افزودن الیاف موکت در خواص هیدرولیکی خاک‌های ماسه‌یی پرداخته شده است.^[۱۵،۱۶] این مطالعات حاکی از تغییر نفوذپذیری معادل خاک‌های ماسه‌یی مسلح با الیاف موکت است. این تغییر، تابع مشخصات دانه‌بندی خاک ماسه‌یی، اندازه‌ی بخش ریزدانه‌ی آن و نیز میزان فشردگی الیاف است، که مورد اخیر نیز خود بستگی به اندازه‌ی تنش مؤثر دارد. با این حال از آنجایی که رفتار لرزه‌یی به خصوص روان‌گرایی این نوع مصالح کامپوزیت در شرایط اشباع، اهمیت زیادی دارد و تابع مشخصات هیدرولیکی و همچنین اندازه‌ی تنش مؤثر است، لذا در این مطالعه به بررسی نتایج آزمایش‌های تانک شفاف حاوی ماسه‌ی اشباع مسلح شده با زائادات موکت در دو حالت توزیع تصادفی و توزیع منظم تحت اثر بار دینامیکی هارمونیک پرداخته شده است. همچنین هدف از نگارش این نوشتار، بررسی پتانسیل شکل‌گیری فشار آب حفره‌یی اضافی در این نوع مصالح بوده است.

۲. دستگاه تانک شفاف

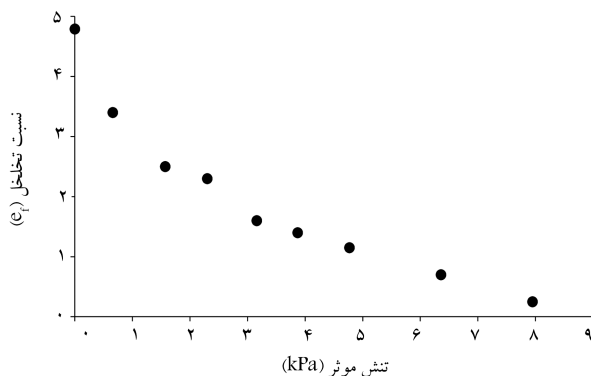
تانک شفاف مورد استفاده در این پژوهش به شکل مکعب مستطیل روباز با ابعاد ۵۲ × ۵۱ × ۵۷ سانتی‌متر از صفحات با جنس پلاستیک فشرده به ضخامت ۱ سانتی‌متر است. این صفحات با پیچ‌ها و چسب مخصوص به هم متصل و آب‌بندی شده‌اند (شکل ۱). در سطح زیرین، تانک مجزایی به شکل لوله برای ورود و خروج آب تعبیه شده است، که از این شیر جهت اشباع‌سازی نمونه استفاده شده است.



شکل ۱. نمای دستگاه تانک شفاف مورد استفاده.



شکل ۵. روابط وزنی - حجمی مربوط به ماسه‌ی مسلح با الیاف. [۱۶]



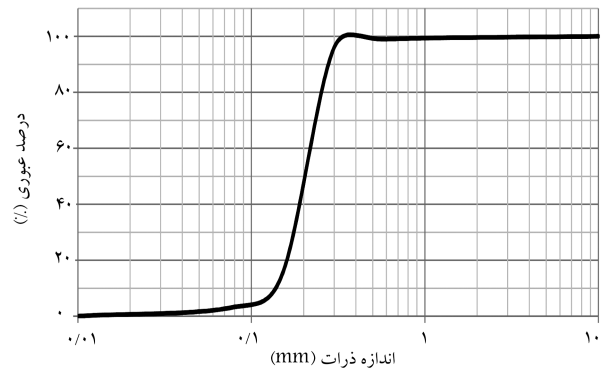
شکل ۶. تغییرات نسبت منافذ موکت با افزایش سطح تنش مؤثر. [۱۵]

جامد ماسه که درون الیاف گیر افتاده اند (v_{ss2}) : ۳. حجم فضای خالی درون الیاف (v_{vf}) تقسیم کرد.

در بیان وزنی این نمودار می‌توان نمودار را به ۳ بخش: ۱. وزن جامد الیاف (w_{sf}) ، ۲. وزن جامد ماسه‌ی آزاد (w_{ss1}) ، ۳. وزن جامد ماسه‌ی درون الیاف (w_{ss2}) تقسیم کرد. وزن جامد الیاف معمولاً به صورت درصدی از وزن جامد ماسه $(w_{ss} = w_{ss1} + w_{ss2})$ بیان می‌شود (w_f) . به منظور محاسبه‌ی وزن ماسه‌ی موردنیاز در ترکیب ماسه - الیاف با فرض چگالی نسبی مشخصی برای بخش ماسه‌ی (D_r) و محاسبه‌ی نسبت منافذ الیاف (e_f) ، که مطابق شکل ۵ تابع سطح تنش مؤثر است، و همچنین تخمین مناسبی از درصد وزنی جذب ماسه‌ی الیاف (α) از رابطه‌ی ۱ استفاده می‌شود: [۱۵]

$$w_{ss} = \frac{V_m}{\left[e_{\gamma_{25}} \left(\frac{1}{G_{ss} \gamma_w} - \frac{\alpha w_f}{G_{sf} \gamma_w} \right) + \left(\frac{1}{G_{ss} \gamma_w} + \frac{(1+e_f) w_f}{G_{sf} \gamma_w} \right) \right]} \quad (1)$$

که در این رابطه، α ضریب جذب ماسه‌ی الیاف، G_{ss} چگالی ویژه‌ی دانه‌های ماسه‌ی، G_{sf} چگالی ویژه‌ی بخش جامد الیاف، $e_{\gamma_{25}}$ نسبت منافذ معادل تراکم نسبی ۲۵٪ و سایر پارامترها مطابق بانوشت شکل ۴ تعریف شده‌اند. نکته‌ی حائز اهمیت آن است که نسبت منافذ الیاف (e_f) ، تابع سطح تنش مؤثر است و می‌توان به کمک نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی این تغییرات را مطابق شکل ۶ ترسیم کرد و با توجه به سطح تنش در مسئله‌ی مورد مطالعه و با برآزش داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی مورد آزمایش.

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده در آزمایش‌های تانک شفاف.

پارامتر	واحد	مقدار
چگالی ویژه (G_s)	-	۲٫۶۷
ضریب یکنواختی (C_u)	-	۱٫۵۳
ضریب انحاء (C_c)	-	۱٫۰۴
نسبت تخلخل بیشینه (e_{max})	-	۰٫۹۵
نسبت تخلخل کمینه (e_{min})	-	۰٫۶۳
اندازه‌ی مؤثر ذرات (D_{10})	mm	۰٫۱۳
اندازه‌ی متوسط (D_{50})	mm	۰٫۲

دانه‌بندی شده (SP) و در قسمت‌هایی از اعماق نیز ماسه‌های بد دانه‌بندی شده همراه با کمی لای (SP-SM) است. ماسه‌ی استفاده شده جهت انجام آزمایش‌های تانک شفاف، ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) با اندازه‌ی ذرات متوسط ۰٫۲ میلی‌متر است. متخنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در شکل ۴ ارائه شده است.

سایر مشخصات دانه‌بندی و تراکم خاک ماسه‌ی مورد استفاده در این آزمایش‌ها اعم از شاخص‌های دانه‌بندی (یکنواختی و انحاء)، چگالی ویژه و نسبت‌های تخلخل کمینه و بیشینه در جدول ۱ ارائه شده است.

۴. روابط وزنی و حجمی خاک مسلح با الیاف

روابط وزنی - حجمی کلاسیک، که در محاسبات خاک‌های غیرمسلح به‌کار می‌روند، توانایی بیان پارامترهای مؤثر در روابط وزنی و حجمی خاک‌های دانه‌ی مسلح با الیاف موکت را ندارند. از این رو، محاسبه‌ی پارامترهای مؤثر در ترکیب ماسه‌ی مسلح با الیاف موکت نیاز به ارائه‌ی یک سری روابط وزنی - حجمی جدید دارد. پارامترهایی نظیر نسبت منافذ الیاف، که تابع سطح تنش مؤثر است، درصد جذب ماسه‌ی الیاف و درصد تراکم اسکلت کامپوزیت از پارامترهایی هستند که در بیان سنتی روابط وزنی - حجمی خاک‌ها به آن پرداخته نمی‌شود. شکل ۵، مبنای محاسبات روابط جدید وزنی - حجمی است، که به کمک آن می‌توان مؤلفه‌های مختلف وزنی خاک مسلح را محاسبه کرد. [۱۶]

مطابق این شکل، در بیان حجمی نمودار می‌توان به‌طور کلی حجم کامپوزیت ماسه‌ی الیاف را به دو بخش ماسه و الیاف تقسیم کرد. در بخش ماسه‌ی این نمودار مطابق روابط کلاسیک مکانیک خاک، بخشی از حجم ماسه را دانه‌های جامد (v_{ss1}) و بخش دیگر را فضای خالی (v_{vs}) پر می‌کند. اما در بخش الیاف می‌توان حجم کلی الیاف را به ۳ بخش: ۱. حجم بخش جامد الیاف (v_{sf}) ؛ ۲. حجم دانه‌های

به تخمین نسبت منافذ این نوع الیاف مطابق رابطه ی ۲ پرداخت:

$$e_f = 4,7 \exp(-0,33\sigma') \quad (2)$$

در این مطالعه با توجه به اندازه گیری های مقدماتی ضریب جذب ماسه، α برابر ۱ و درصد تراکم بخش ماسه بی، ۲۵٪ فرض شده است. درصد تراکم مزبور به نحوی انتخاب شده است تا بتوان به روشنی شکل گیری فشار آب حفره یی اضافی و اثر افزودن الیاف بر آن را مشاهده کرد. با توجه به اینکه ساخت نمونه ی آزمایشگاهی در ۷ لایه صورت گرفته و سطح تنش مؤثر در لایه های مختلف متفاوت است، لذا به منظور حذف و یا کاهش خطای مربوط به درصد تراکم بخش ماسه بی می توان به دو طریق عمل کرد: در روش اول، نسبت منافذ متناظر با سطح تنش در هر لایه را از رابطه ی ۲ استخراج و سپس با توجه به حجم آن لایه، وزن ماسه ی خشک را می توان طوری تعیین کرد که درصد تراکم نسبی آن لایه ۲۵٪ باقی بماند. در روش دوم، با فرض نسبت منافذ متوسط ۷ لایه، وزن خشک ماسه در کل مدل را می توان محاسبه و سپس در ۷ لایه به طور مساوی تقسیم کرد. در این مطالعه با انتخاب مقدار متوسط ۲٫۶۷ برای نسبت منافذ تریشه های موکت، وزن کل ماسه محاسبه و سپس در ۷ لایه تقسیم شده است. انتظار می رود با این روش درصد تراکم بخش ماسه بی در کلیه ی مدل ها حدود ۲۵٪ باقی بماند. بنابراین در این مطالعه با ثابت نگاه داشتن درصد تراکم بخش ماسه بی می توان فقط به بررسی اثر افزودن الیاف و تریشه های موکت در درصد های مختلف وزنی و همچنین نسبت ابعاد مختلف در توسعه و شکل گیری فشار آب منفذی در مدل تانک شفاف پرداخت.

۵. نمونه سازی

روش های مختلفی برای ساخت نمونه ی خاک های دانه یی وجود دارد که عبارت اند از: رسوب گذاری در آب^۳، کوبش خشک^۴، کوبش تر^۵ و ریزش خشک^۶. در روش های رسوب گذاری در آب و ریزش خشک می توان به نمونه های نسبتاً همگنی دست یافت. با این حال از این روش ها معمولاً برای ساخت نمونه های ماسه بی مسلح با الیاف و تریشه ها نمی توان استفاده کرد و جهت ساخت این نوع نمونه ها از یکی از روش های کوبش خشک و یا تراستفاده می شود. در این مطالعه، تسلیح خاک ماسه بی به دو روش انجام شده است: در روش اول، نمونه های ماسه بی مسلح با الیاف و تریشه های موکت با توزیع تصادفی در درصد های وزنی و نسبت ابعاد مختلف ساخته شده است. برای ساخت این نوع نمونه ها، ابتدا از روش کوبش خشک استفاده و سپس اشباع سازی از پایین مدل انجام شده است. در روش دوم، که از تسلیح منظم یا سیستماتیک استفاده شده است، لایه های موکت در ترازهای مشخص قرار گرفته و فضای بین لایه ها از ماسه ی خالص با درصد تراکم مشخص (۲۵٪) پر شده است. در روش تسلیح منظم یا سیستماتیک، نمونه سازی به صورت رسوب گذاری در آب صورت گرفته است.

۱.۵. توزیع تصادفی الیاف

در بخش اول این مطالعه، ابتدا ارتفاع جعبه ی مدل سازی در دستگاه تانک شفاف به ۷ لایه و هر کدام به ضخامت ۵ سانتی متر تقسیم شده است. سپس با فرض تراکم ۲۵٪ برای اسکلت ماسه و به کمک روابط وزنی و حجمی ارائه شده در این نوشتار و همچنین با توجه به سطح تنش مؤثر در هر لایه، که تابع عمق آن لایه است، به محاسبه ی وزن ماسه ی خشک مورد نیاز برای کوبش هر لایه پرداخته شده است.



شکل ۷. نمونه سازی با توزیع تصادفی الیاف.

جدول ۲. مشخصات آزمایش با توزیع تصادفی الیاف.

مقادیر	پارامتر
۹ و ۵، ۳، ۱	نسبت اضلاع (A_R)
۱ و ۰٫۵	درصد وزنی (w_f) (%)
۲۵	چگالی نسبی (D_r) (%)

جدول ۳. مشخصات آزمایش با توزیع منظم لایه های موکت.

تعداد لایه	تراز قرارگیری (cm)
۱	۱۵
۳	۲۵ و ۱۵، ۵
۵	۲۵ و ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵

سپس با توجه به درصد وزنی الیاف مطابق شکل ۷، الیاف به صورت دستی و حتی الامکان به صورت همگن با ماسه مخلوط و در فضای مربوط به هر لایه ریخته و به روش کوبش خشک متراکم شده است. پس از تکمیل نمونه سازی در ۷ لایه، آب به آرامی از پایین مدل وارد تانک شده و تا اشباع سازی کل مدل ادامه پیدا کرده است.

جدول ۲، پارامترهای به کار رفته در روش نمونه سازی با توزیع تصادفی الیاف را برای حالات مختلف نشان می دهد. در مجموع با توجه به مقادیر انتخاب شده، تعداد ۸ آزمایش در این مقطع انجام شده است، که مربوط به ۴ حالت مختلف نسبت ابعاد الیاف و دو حالت مختلف درصد وزنی برای الیاف موکت است. مطابق این جدول، مقدار بیشینه ی درصد وزنی الیاف ۱ است. در این ارتباط باید توجه داشت از آنجایی که الیاف مورد استفاده در این مطالعه بسیار متخلخل است، لذا مقادیر درصد وزنی بالاتر از ۱ درصد مدزمن به ورود حجم بسیار زیادی از الیاف در اسکلت خاک می شود، که عملاً عملیات مخلوط سازی و تراکم را مشکل و حتی غیر ممکن می سازد. در پژوهشی در سال ۲۰۰۳، مقدار بیشینه ی ۱٫۲٪ نیز به کار برده شده است.^[۲]

۲.۵. توزیع منظم الیاف

در بخش دوم این مطالعه، با توجه به تعداد لایه های موکت مورد نظر در تسلیح ماسه، با فرض درصد تراکم ۲۵ درصد برای ماسه و به کمک روابط کلاسیک وزنی - حجمی در مکانیک خاک، وزن ماسه ی مورد نیاز برای پر کردن هر لایه محاسبه شده است. به منظور ساخت نمونه در این روش، از آنجایی که الیاف مستقیماً در ترکیب ماسه حضور ندارند، از روش رسوب گذاری در آب استفاده شده است. مطابق جدول ۳،

جدول ۴. مشخصات حرکت ارتعاشی اعمال شده به تانک.

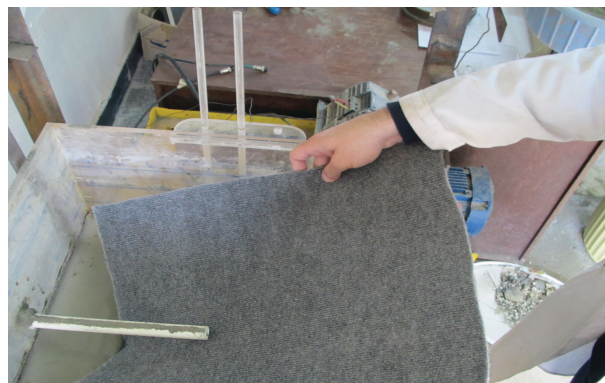
پارامتر	مقدار
شتاب بیشینه (α_{max})	۰/۳۴ g
دامنه‌ی حرکت ارتعاشی (A)	۱۲/۱ mm
بسامد ارتعاشی (f)	۲/۶۶ Hz

۴. کلیه‌ی حسگرهای ثبت فشار آب حفره‌یی به دستگاه ثبت داده‌ها متصل و توسط کابل رابط به رایانه متصل شده‌اند.

۵. نمونه‌سازی به یکی از روش‌های شرح داده‌شده اعم از توزیع تصادفی یا منظم انجام شده است. پس از آماده‌سازی نمونه، آب اضافی موجود بر روی نمونه تخلیه شده است.

۶. قبل از اعمال لرزه، میزان شتاب اعمالی توسط اینورتنور تنظیم و حسگر جابجایی منبع جهت ثبت جابجایی هارمونیک در مکان خود مستقر شده است.

۷. بار لرزه‌یی به مدت ۶۰ ثانیه به مدل اعمال شده است و کلیه‌ی حسگرها، داده‌های فشار آب حفره‌یی و همچنین جابجایی اعمالی به مدل را ثبت کرده‌اند.



شکل ۸. نمونه‌سازی خاک ماسه‌یی مسلح با توزیع منظم لایه‌های موکت.

در این روش ۴ آزمایش موردنظر قرار گرفته است. ابعاد لایه‌های موکت مورد استفاده 50×50 سانتی‌متر است. به منظور بررسی اثر لایه‌های تسلیح، ابتدا یک آزمایش بدون حضور موکت و با تراکم نسبی ۲۵٪ انجام شده است. در آزمایش‌های بعدی لایه‌های موکت به ۳ حالت ۱، ۳، و ۵ لایه با فواصل مساوی در ماسه گذاشته شده است.

در اولین مدل، لایه‌ی موکت به صورت تک در وسط نمونه و در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری، در آزمایش دوم ۳ لایه موکت در ترازهای ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر، و نهایتاً در مدل ۵ لایه، لایه‌های موکت در ترازهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر درون ماسه جاسازی شده‌اند. قبل از نمونه‌سازی در هر مدل داخل تانک تا ارتفاع ۵ سانتی‌متر آب ریخته و سپس ماسه با دقت درون آب رسوب‌گذاری شده است. این روند به صورت لایه به لایه تا لایه‌ی هفتم ادامه یافته است. این تذکر لازم است که ارتفاع آب پس از ساخت هر لایه تا انتها ثابت نگاه داشته شده است. شکل ۸، شمایی از جاسازی لایه‌های موکت را در مدل‌های ماسه‌ی مسلح با موکت، با توزیع لایه‌یی یا منظم نمایش می‌دهد.

۶. آزمایش‌های ارتعاش دینامیکی

بار ارتعاشی اعمالی به مدل توسط یک جعبه دنده، که توسط یک الکتروموتور مجهز به مبدل بسامد به حرکت در آورده می‌شود، اعمال می‌شود. دامنه‌ی حرکت و جابجایی مینا در تانک ثابت است و با تغییر بسامد مبدل، که توسط برق شهر تغذیه می‌شود، می‌توان بسامد اعمالی به تانک و در آخر دامنه‌ی شتاب اعمالی به آن را تغییر داد. جدول ۴، مشخصات بارهای هارمونیک اعمالی به جعبه‌ی تانک شفاف را ارائه می‌دهد.

پروسیه‌ی مرحله به مرحله‌ی آزمایش تانک شفاف بر روی مدل خاک ماسه‌یی مسلح‌شده با الیاف با توزیع تصادفی و همچنین لایه‌های منظم موکت به این شرح است:

۱. الک نمره‌ی ۴۰۰ برای جلوگیری از شسته‌شدن و خارج شدن مصالح ریزدانه در قسمت پایینی مدل تانک شفاف قرار گرفته و تثبیت شده است.

۲. مجاری انتقال‌دهنده‌ی فشار آب از وسط مدل خاکی به دهانه‌ی حسگرهای فشار آب حفره‌یی، تمیز و در جای خود نصب شده‌اند.

۳. کلیه‌ی قطعات و لایه‌های دستگاه قبل از شروع آزمایش باز و عاری از هرگونه گرد و خاک و آلودگی شده‌اند.

۷. نتایج آزمایشگاهی

هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر الیاف موکت بر توسعه‌ی فشار آب حفره‌یی در ماسه در اثر اعمال بارهای دینامیکی است. در این راستا، از آزمایش‌های مدل‌سازی در مقیاس کوچک استفاده شده است. تانک شفاف موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه گیلان با امکان اعمال بارهای ارتعاشی هارمونیک جهت انجام این آزمایش‌ها استفاده شده است. جهت بررسی تأثیر عوامل مختلف اعم از درصد وزنی الیاف و نسبت ابعاد آن و همچنین تعداد لایه‌ها در روش سیستماتیک، در ایجاد و توسعه‌ی فشار آب حفره‌یی در مدل‌های ماسه‌یی مسلح با الیاف و یا لایه‌های موکت، در مجموع تعداد ۱۲ آزمایش در قالب این ۳ محور انجام شده است:

۱. درصد افزودن الیاف در توزیع تصادفی،

۲. نسبت اضلاع الیاف در توزیع تصادفی،

۳. توزیع منظم الیاف (الیاف صفحه‌یی).

در تمامی آزمایش‌های انجام‌شده، شتاب بیشینه‌ی اعمال شده $0/34 \text{ g}$ انتخاب و درصد تراکم نمونه‌ها در این آزمایش‌ها، ۲۵٪ لحاظ شده است.

به منظور ارزیابی دقیق‌تر این مسئله، همان‌طور که در بخش‌های ابتدایی این نوشتار شرح داده شده است، ۳ حسگر شتاب‌نگار در پایین، وسط، و بالای مدل نصب شده‌اند. لذا رکورد پارامتر نسبت فشار آب حفره‌یی (R_u)، که به صورت نسبت اضافه فشار آب حفره‌یی به تنش مؤثر اولیه تعریف می‌شود، بر حسب زمان برای ۳ حسگر مزبور و برای حالات مختلف پارامترهای تسلیح ترسیم شده است.

۱.۷. اثر درصد وزنی الیاف

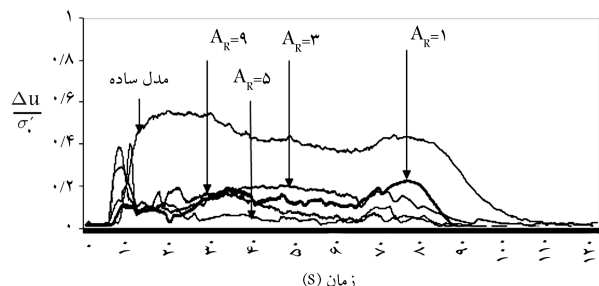
به منظور بررسی اثر افزودن درصد وزنی الیاف در ایجاد و توسعه‌ی فشار آب حفره‌یی در ماسه، دو درصد مختلف وزنی ۰/۵ و ۱ در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهشی در سال ۲۰۰۳ نشان داده شده است که درصد‌های بالاتر از ۱

در ارتباط با انتخاب مقدار بیشینه درصد وزنی الیاف با توجه به بخش‌های مختلف شکل ۹ و همچنین توضیحات ارائه شده قبلی پیداست که می‌توان حداکثر تا ۱٪ وزنی الیاف به ماسه اضافه کرد. این در شرایطی است که اثر درصد‌های مختلف وزنی (۵٪ و ۱٪)، تفاوت قابل توجهی ندارد. مطالعات انجام شده در سال ۲۰۰۸^[۱۹] نیز مقدار بهینه ۵٪ درصد را در بهبود خواص دینامیکی خاک‌های دانه‌بندی تأیید می‌کند.

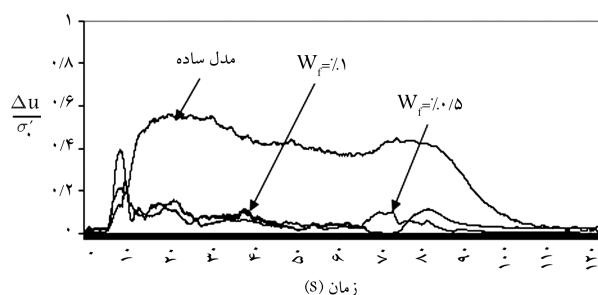
۲.۷. اثر نسبت اضلاع الیاف

به منظور بررسی اثر نسبت اضلاع الیاف در شکل‌گیری فشار آب حفره‌ی ماسه، ۴ نسبت اضلاع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. این آزمایش‌ها به لحاظ شتاب ارتعاشی اعمالی با یکدیگر کاملاً مشابه‌اند. نتایج بیانگر این است که با افزایش نسبت اضلاع الیاف، نسبت فشار آب حفره‌ی به طور قابل ملاحظه‌ی کاهش می‌یابد. مشابه آنچه در میحث مربوط به اثر درصد وزنی الیاف تشریح شد، میزان اثر بخشی الیاف در ترازهای مختلف بستگی به اندازه و سطح تنش مؤثر دارد و مطابق شکل ۱۰ نیز از بالا به پایین اثر توزیع تصادفی الیاف در کاهش فشار آب حفره‌ی کمتر شده

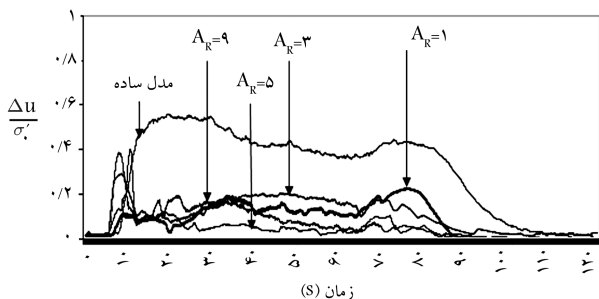
عملاً ممکن نیست.^[۲۱] این آزمایش‌ها به لحاظ شتاب بیشینه‌ی ارتعاشی و تراکم بخش ماسه‌ی با یکدیگر یکسان هستند. شکل ۹، تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ی را برای مدل تانک شفاف مسلح با الیاف موکت با نسبت ابعاد ۱ در درصد‌های مختلف وزنی و برای حسگرهای مختلف با موقعیت مکانی متفاوت نمایش می‌دهد. از آنجایی که شکل‌گیری فشار آب حفره‌ی در موقعیت هر حسگر و همچنین نحوه‌ی استمرار آن با زمان مستقیماً به نفوذپذیری و شرایط زهکشی در آن موقعیت بستگی دارد، لذا با نگاهی به بخش‌های مختلف شکل ۹ و با توجه به تراز مورد مطالعه (سطح تنش) و نزدیکی به تراز زهکشی پیداست که به‌طور کلی اضافه‌کردن الیاف به عنوان عناصر متخلخل منجر به کاهش پتانسیل شکل‌گیری فشار آب حفره‌ی می‌شود. با این حال در پژوهشی در سال ۲۰۱۱ نشان داده شده است که نسبت منافذ و در نتیجه نفوذپذیری الیاف موکت با سطح تنش مؤثر تغییر می‌کند.^[۱۵] بنابراین انتظار می‌رود با افزایش عمق قرارگیری حسگرهای فشار آب حفره‌ی از بالا به پایین، سطح مؤثر نیز افزایش یابد و این خود منجر به کاهش نفوذپذیری الیاف شود و نهایتاً اثر کاهنده‌ی که از این الیاف در شکل‌گیری فشار آب حفره‌ی انتظار می‌رود، کمرنگ‌تر شود. این نکته را می‌توان با مقایسه‌ی بخش‌های مختلف شکل ۹، از بالا به پایین، به روشنی مشاهده کرد.



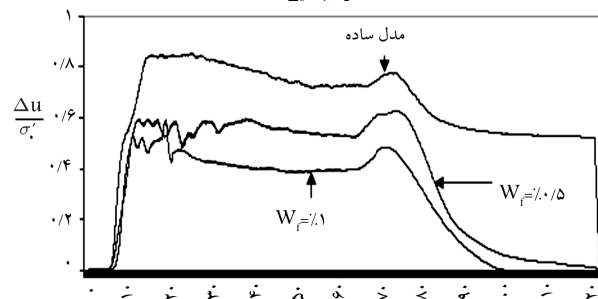
الف) تراز بالایی؛



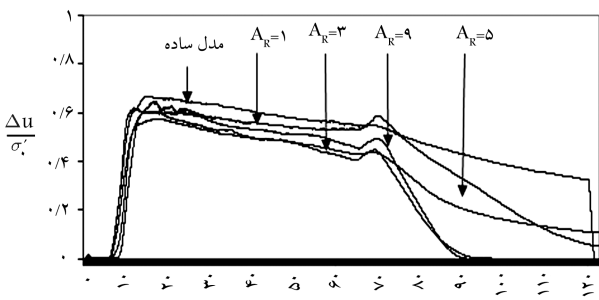
الف) تراز بالایی؛



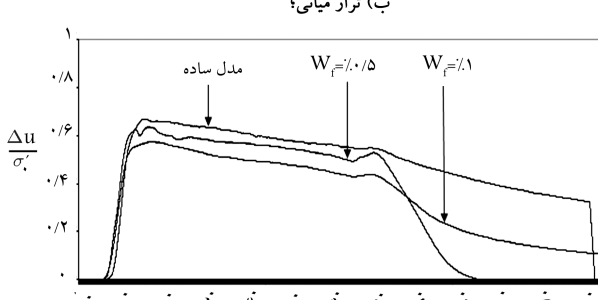
ب) تراز میانی؛



ب) تراز میانی؛



ج) تراز پایینی.



ج) تراز پایینی.

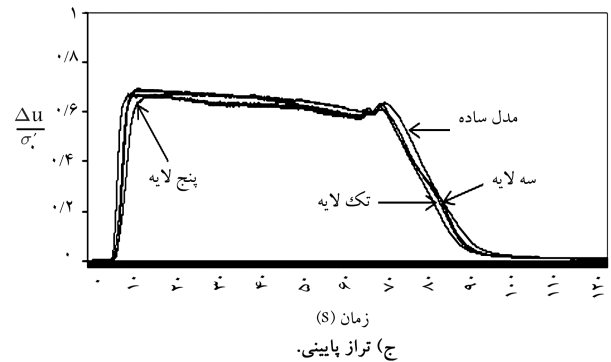
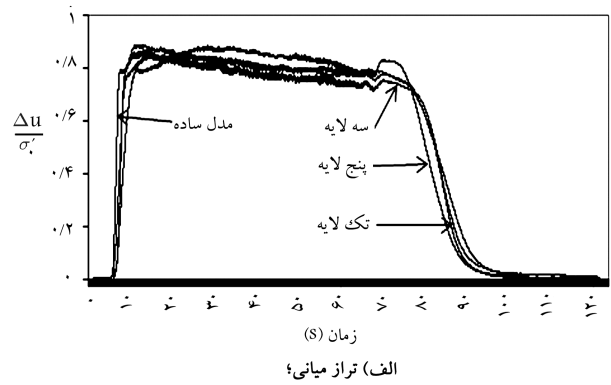
شکل ۱۰. تغییرات σ_{ue} بر حسب زمان با نسبت‌های مختلف اضلاع الیاف در شرایط مختلف $W_f = 1\%$.

شکل ۹. تغییرات σ_{ue} بر حسب زمان برای درصد‌های مختلف وزنی الیاف در ترازهای مختلف در شرایط $A_R = 5$.

آنجایی که مدل‌های مختلف تسلیح منظم موکت حسگر بالایی خارج از محدوده‌ی تسلیح قرار می‌گیرند، لذا به عبارت دیگر، به منظور بررسی بهتر این نوع تسلیح بر رفتار هیدرولیکی مدل و توسعه‌ی اضافه فشار آب حفره‌یی، نتایج دو حسگر میانی و پایینی در شکل ۱۱ برای حالات مختلف تعداد لایه‌ی تسلیح موکت ارائه شده است. مطابق شکل مذکور، تسلیح منظم و پهن کردن لایه‌یی موکت به صورت افقی در ترازهای مختلف در مقایسه با توزیع تصادفی الیاف تأثیر چندانی در کاهش فشار آب حفره‌یی ندارد. دلیل این رفتار جهت تراوش قائم در توزیع افقی موکت است، عملاً در بررسی و محاسبه‌ی نفوذپذیری معادل بخشی که تخلخل و نفوذپذیری کمتری دارد، نقش تعیین‌کننده‌تری دارد. لذا، عملاً رفتار بخش ماسه‌یی کنترل‌کننده‌تر است. بنابراین مطابق نتایج آزمایشگاهی در شکل ۱۱، هر چند ایجاد تسلیح لایه‌یی موکت نیز مشابه حالت توزیع تصادفی الیاف آن منجر به کاهش شکل‌گیری فشار آب حفره‌یی در مدل شده است، ولی مقدار کاهش، غیر قابل توجه و ناچیز است.

۸. نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه بررسی تأثیر الیاف موکت در شکل‌گیری فشار آب حفره‌یی اضافی در خاک ماسه‌یی ریزدانه‌ی مسلح در اثر اعمال بارهای ارتعاشی هارمونیک است. در این راستا، از آزمایش‌های مدل‌سازی در مقیاس کوچک در دستگاه تانک شفاف استفاده شده است. به منظور انجام این بررسی اثر ۳ عامل مختلف اعم از درصد وزنی، نسبت ابعاد الیاف و نوع توزیع اعم از تصادفی و منظم در نظر گرفته شده است. درصد وزنی الیاف به جهت تخلخل بالا، نقش کاهنده در شکل‌گیری فشار آب حفره‌یی اضافی ناشی از ارتعاش هارمونیک دارد. این اثر با افزایش سطح تنش مؤثر و با سربار به عبارت دیگر کم‌رنگ‌تر می‌شود. علت این پدیده، کاهش تخلخل الیاف در اثر افزایش سطح تنش مؤثر عنوان شده است. در ارتباط با مقدار بهینه‌ی درصد وزنی الیاف، با توجه به نتایج آزمایش‌ها و همچنین ادبیات فنی موجود مقدار ۰٫۵٪، درصد وزنی مناسبی به نظر می‌رسد. نسبت ابعاد الیاف اثر دوگانه‌یی را در ارتباط با شکل‌گیری فشار آب حفره‌یی نشان داده است. این اثر از یک سو به دلیل افزایش نسبت ابعاد و بزرگ شدن المان‌های متخلخل، کاهش یافته و از سوی دیگر، با افزایش نسبت ابعاد و کم شدن تعداد المان‌ها، در درصد وزنی ثابت کم‌رنگ‌تر شده است. لذا همان‌طوری که از نتایج مشاهده می‌شود، می‌توان انتظار یک نسبت ابعاد بهینه‌یی را داشت. در این نوشتار، نسبت ابعاد ۵ به عنوان نسبت ابعاد بهینه انتخاب و معرفی شده است. علاوه بر بررسی اثر درصد وزنی الیاف و نسبت ابعاد آن، نوع توزیع این المان‌های متخلخل به عنوان یک پدیده‌ی اثرگذار بررسی و مقایسه شده است. از آنجایی که در سیستم توزیع منظم (سیستماتیک) لایه‌های موکت به صورت کاملاً افقی خوابانده شده‌اند، لذا با توجه به اصول و روابط کلاسیک مربوط به محاسبه‌ی نفوذپذیری معادل، بخش ماسه‌یی با داشتن نفوذپذیری کمتر کنترل‌کننده‌تر است و لذا موکت به عنوان یک المان متخلخل تأثیر قابل توجهی در توسعه و شکل‌گیری اضافه فشار آب حفره‌یی ندارد. در مجموع و با در نظر گرفتن جمیع جوانب می‌توان بیان کرد که افزودن الیاف متخلخل به خاک‌های ماسه‌یی ریز در شرایط سطح تنش پایین و در اعماق سطحی می‌تواند منجر به کاهش پتانسیل شکل‌گیری فشار آب حفره‌یی شود و لیکن این اثر با زیاد شدن عمق استقرار و بالا رفتن سطح تنش مؤثر، که به نوبه‌ی خود منجر به کاهش تخلخل ذاتی این الیاف می‌شود، کم‌رنگ می‌شود. می‌توان نتیجه‌ی این مطالعه را در قالب استفاده از این نوع الیاف در شرایطی که سطح و تراز تنش مؤثر پایین است و همچنین نفوذپذیری بالای مصالح، که اهمیت خاصی دارد، خلاصه کرد.



شکل ۱۱. تغییرات σ_{ve} بر حسب زمان در مدل‌های با توزیع منظم (سیستماتیک) موکت.

است. شکل ۱۰، نسبت فشار آب حفره‌یی را در ترازهای مختلف مدل تانک شفاف برای نسبت‌های مختلف ابعاد الیاف نمایش می‌دهد. مطابق شکل مذکور، با افزایش نسبت ابعاد الیاف، کاهش فشار آب حفره‌یی بیشتر خواهد بود. با این حال، این کاهش تا نسبت ابعاد ۵ ادامه یافته و پس از آن تغییر چندانی مشاهده نشده است و حتی در مواقعی نسبت فشار آب حفره‌یی مجدداً افزایش نشان داده است (پاراگراف بعدی خود توجیه این مدعاست).

نکته‌ی حائز اهمیت در این ارتباط آن است که بالا رفتن نسبت ابعاد الیاف در یک مقدار درصد وزنی ثابت منجر به کم شدن مقدار المان‌های الیاف در مدل می‌شود. از طرفی با بزرگ شدن اندازه‌ی هر المان، اثر الیاف در کاهش فشار آب حفره‌یی پررنگ‌تر می‌شود. بنابراین، نسبت ابعاد الیاف یک اثر دوگانه‌یی دارد و نقش آن در خاک دانه‌یی برآیند و اندرکنش دو اثر کاهش ناشی از کم شدن تعداد اجزاء متخلخل و افزایش ناشی از بزرگ شدن اندازه‌ی اجزاء است. این امر منجر به بروز یک چرخش در نقش نسبت ابعاد الیاف در یک نسبت مشخص می‌شود، که در این مطالعه نسبت ابعاد مزبور ۵ است، و به عبارت دیگر می‌تواند نسبت ابعاد بهینه باشد و البته با توجه به محدودیت‌ها و ابعاد کار نیاز به مطالعات بیشتری است.

۳.۷. اثر تسلیح منظم (سیستماتیک)

به منظور بررسی اثر تسلیح منظم یا سیستماتیک لایه‌یی موکت در مقایسه با توزیع تصادفی الیاف آنها بر توسعه‌ی اضافه فشار آب حفره‌یی، تعداد ۳ آزمایش با شرایط یکسان از لحاظ چگالی نسبی بخش ماسه‌یی و شتاب اعمالی مطابق با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ انجام شده است. لایه‌های موکت در سه حالت ۱، ۳، ۵ و لایه در مدل مورد استفاده در ترازهای ارائه شده در جدول ۳ قرار داده شده‌اند. از

پانوشتها

1. pore water pressure transducer (PWPT)
2. skeletal relative density
3. water sedimentation
4. dry tamping
5. moist tamping
6. dry pluviation
7. systematic distrebution

منابع (References)

1. Wang, Y. "Carpet waste for soil stabilization", Proceedings of Second Conference on Recycling of Fibrous Textile & Carpet Waste, Atlanta, GA (1997).
2. Poorebrahim, G. "Soil reinforcement with carpet wastes", PhD Dissertation, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran (2003).
3. Miraftab, M. and Lickfold, A. "Utilization of carpet waste in reinforcement of substandard soils", *Journal of Industrial Textiles*, **38**(2), pp. 167-174 (2008).
4. Noorany, I. and Uzdavines, M. "Dynamic behavior of saturated sand with geosynthetic fibers", Geosynthetics Conference, San Diego, USA, **2**, pp. 385-396 (1989).
5. Maher, M.H. and Woods, R.D. "Dynamic response of sand reinforced with randomly distributed fibers", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **116**(7), pp. 1116-1131 (1990).
6. Shewbridge, S.E. and Sousa, J. "Dynamic properties of a reinforced sand", *Journal of Geotechnical Eng., ASCE*, **117**(9), pp. 1402-1422 (1991).
7. Feng, Z.Y. and Sutter, K.G. "Dynamic properties of granulated rubber sand mixtures", *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, **23**(3), pp. 338-344 (2000).
8. Li, J. and Ding, D.W. "Nonlinear elastic behavior of fiber reinforced soil under cyclic loading", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(22), pp. 977-983 (2002).
9. Boominathan, A. and Hari, S. "Liquefaction strength of fly ash reinforced with randomly distributed fibers", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(9-12), pp. 1027-1033 (October-December 2002).
10. Ghiassian, H., Jamshidi C., R. and Tabarsa, A.R. "Dynamic performance of Toyoura sand reinforced with randomly distributed carpet waste strips", 4th Decennial 20 Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, Sacramento, California, USA (2008).
11. Ghiassian, H., Jamshidi Chenari, R., Shahnazari, H. and Tabarsa, A. "Fine sand model ground during shaking using a Laminar box", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **10**(4), pp.195-203 (2009).
12. Jamshidi, C.R., Towhata, I., Ghiassian, H. and, Tabarsa, A. "Experimental evaluation of dynamic deformation characteristics of sheet pile retaining walls with fiber reinforcement backfill", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(6), pp. 438-446 (2010).
13. Shahnazari, H., Ghiassian, H., Noorzad, A., Shafiee, A., Tabarsa, A.R. and Jamshidi, R. "Shear modulus of silty sand reinforced by carpet waste strips", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **11**(3), pp. 133-142 (2009).
14. Ghiassian, H., Shahnazari, H., Tabarsa, A. and Jamshidi, C.R. "Damping ratio of silty sand reinforced with carpet fibers", *Amirkabir Journal of Science and Technology*, **42**(1), pp. 65-73 (2010).
15. Jamshidi C., R. and Shahbazi, F.H., *Fiber Reinforced Composites*, Nova Science Publisher, Inc. (2011).
16. Shahbazi, F.H. "Investigation on the effect of carpet fiber on permeability and liquefaction of sandy soil using laboratory test", M.Sc Thesis, The University of Guilan, Guilan, Iran (2011).
17. Asefi, A., Eslami A., Lashte Neshae, M.A. "Study the behavior of Anzali sand using quick tank and shaking table", *Sharif Journal of Science and Research*, **48**, pp. 15-22 (2009).
18. Hasani, M. "Investiagtion on the effect of dynamic forces on pore pressure variation and displacement of Anzali sand with quick tank", M.Sc Thesis, The University of Guilan, Guilan, Iran (2009).
19. Jamshidi C, R. "Dynamic behavior of sand reinforced with randomly distributed carpet waste strips behind sheet-pile retaining walls in shaking table tests", PhD Dissertation, IranUniversity of Science and Technology, Tehran, Iran (2008).