

بررسی آزمایشگاهی اثر توأمان تسلیح و تثبیت بر رفتار برشی ماسه بابلسر

عیسی شوش پاشا^{۱*} و حمیدرضا نجاتی^۲

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۹۷/۳/۸، پذیرش: ۹۷/۱۱/۶، نشر آنلاین: ۹۷/۱۱/۶)

چکیده

یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های ماسه‌ای کم مقاومت افزودن سیمان به آن می‌باشد. جهت بهبود خصوصیات خاک‌های موجود در محل پروژه، بحث اصلاح خاک مطرح می‌شود که می‌توان از روش‌های تثبیت با مواد افزودنی و یا تسلیح خاک با الیاف طبیعی و یا مصنوعی و یا ژئوسنتتیک‌ها استفاده نمود. در چند دهه گذشته پژوهش‌هایی روی تأثیر تسلیح و تثبیت در شرایط زهکشی شده بر روی ماسه انجام گرفته است، ولی فقدان و کمبود پژوهش در شرایط زهکشی نشده وجود دارد. در این پژوهش به بررسی تأثیر الیاف پلی‌وینیل الکل و سیمان بر روی رفتار برشی ماسه پرداخته شده است که با استفاده از دستگاه سه محوری آزمایش در شرایط تحکیم یافته زهکشی نشده صورت گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که وجود رشته‌ها با توزیع تصادفی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار ماسه تثبیت شده با سیمان دارد، با افزایش درصد رشته تمایل به رفتار انقباضی افزایش و مکش نهایی کاهش می‌یابد و حالت انتقال فاز در تنش‌های بالاتری اتفاق می‌افتد و همچنین باعث افزایش تنش گسیختگی، مقاومت بیشینه، پتانسیل جذب انرژی و کاهش افت مقاومت پسماند و سختی می‌شود. با افزایش در فشار دورگیر ضریب شکنندگی کاهش و تنش گسیختگی، مقاومت بیشینه، مقاومت پسماند و سختی نمونه‌های سیمانی افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: ماسه بابلسر، تثبیت، تسلیح، فشار منفذی، آزمایش سه‌محوری.

۱- مقدمه

مسلح کننده‌های پارچه‌ای را محدود می‌کند، به عنوان یک جایگزین مناسب به کار می‌رود. استفاده از رشته‌ها به عنوان عنصر تسلیح، یک روش مؤثر برای بهبود کیفیت و پایدارسازی لایه زیراساس در کارهای راهسازی می‌باشد (Ahmad, 2010).

پژوهشگران پیوسته در صدد افزایش ظرفیت باربری، مقاومت و بهبود خواص خاک برآمده و روش‌های مختلفی از جمله اصلاح مکانیکی مانند تراکم، اصلاح شیمیایی مانند تثبیت با آهک یا سیمان و استفاده از ایده خاک مسلح یا به کارگیری عناصر کمکی با مقاومت کششی زیاد را در این زمینه به کار گرفته‌اند (Holtz و Ghiassian, 2005).

سمنتاسیون به معنای عام آن چسبیدن و سیمانی شدن است و در مهندسی ژئوتکنیک به چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر و ایجاد یک توده چسبنده و با مقاومت بیشتر است. سیمانی شدن مصنوعی عموماً در ارتباط با ماسه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است، زیرا مصالح درشت‌تر مانند شن و ماسه‌های درشت‌دانه اصولاً نیازمند به بهسازی نیستند و اغلب خصوصیات ژئوتکنیکی مطلوبی دارند. به همین منظور

تقویت خاک‌های ضعیف و نامناسب با افزودن عناصری مانند الیاف که مقاومت کششی را تقویت می‌کنند و پایدار نمودن با استفاده از افزودنی‌هایی که واکنش شیمیایی با خاک دارند جهت به کارگیری در شیروانی‌ها، پی‌ها، بستر جاده‌ها، سدها و برای ایجاد پیکربندی خاکی با ویژگی‌های مهندسی دلخواه، تسلیح و تثبیت خاک نامیده می‌شود (Consoli و همکاران، 2009).

استفاده از رشته‌های انعطاف‌پذیر مجزا تقلیدی از رفتار ریشه گیاهان است که موجب بهبود مقاومت و پایداری لایه‌های خاک در نزدیکی سطح زمین می‌گردد (Diambra و همکاران، 2010).

رشته‌های مجزا با توزیع تصادفی در خاک ایجاد یک مقاومت همسانگرد می‌کنند و صفحات ضعیف بالقوه به وجود آمده به موازات مسلح کننده‌های جهت‌دار را محدود می‌نمایند (Yetimoglu و Salbas, 2003).

خاک‌های مسلح با رشته برای ترمیم شیب‌های گسیخته شده در جاهایی که شکل نامنظم وصله‌های خاک امکان استفاده از

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۱۱۲۳۱۷۰

Wang و Leung در سال ۲۰۰۸ با تحقیق بر خاک ماسه‌ای سیمانته در دستگاه سه محوری دریافتند که دو فرآیند مقابل اما کاملاً وابسته، مقاومت اوج را تعیین می‌کنند. شکست پیوندهای سیمانی موجب کاهش مقاومت اما اتساع همراه با آن منجر به افزایش مقاومت می‌شود (Wang و Leung، ۲۰۰۸).

Park در سال ۲۰۱۱، با انجام آزمایش‌های فشاری تک‌محوری روی ماسه سیمانی مسلح با رشته‌های پلی وینیل الکل با توزیع تصادفی، تأثیر درصد رشته و سیمان را بر مقاومت و انعطاف‌پذیری ماسه مورد بررسی قرار داده است؛ که به دلیل رفتار انعطاف‌پذیر نمونه‌های مسلح شده با رشته، تنجش محوری در مقاومت بیشینه نمونه‌ها با درصد سیمان ۶٪، با افزایش درصد رشته تا ۵٪ افزایش یافته است (Park، ۲۰۱۱).

Ajorloo و همکاران در سال ۲۰۱۲ با انجام آزمایش سه محوری با بررسی ماسه اصلاح شده با سیمان به منظور کمی‌سازی اثرات سیمانی شدن بر روی رفتار تنش کرنش، سختی و مقاومت برشی با نمونه‌هایی تا ۱۸۰ روز عمل‌آوری به این نتیجه رسیدند که رفتار تنش کرنش ماسه سیمانی شده غیرخطی با مراحل انقباضی-اتساعی می‌باشد و رفتار شکننده در تنش همه‌جانبه پایین و درصد بالای سیمان مشاهده شد (Ajorloo و همکاران، ۲۰۱۲).

Hamidi و Hooresfand در سال ۲۰۱۳، آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده برای تعیین اثر سیمان و الیاف پلی‌پروپیلن بر روی مقاومت ماسه انجام دادند. مقدار سیمان در نمونه‌ها ۳ درصد وزنی خشک نمونه بود که از نتایج ایشان می‌توان به این که افزودن الیاف به خاک سیمانی شده موج افزایش مقاومت بیشینه و مقاومت پسماند و کاهش سختی اولیه و شاخص شکنندگی شده است (Hamidi و Hooresfand، ۲۰۱۳).

Kutanaei و Choobbasti در سال ۲۰۱۶ با انجام آزمایش سه محوری فشاری زهکشی شده اثرات سیمان و رشته‌های پروپیلن را بر روی رفتار خاک ماسه‌ای را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که سختی نمونه‌ها با افزایش درصد الیاف و افزایش درصد سیمان به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد (Kutanaei و Choobbasti، ۲۰۱۶).

با مروری بر پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام شده در زمینه خاک سیمانی مسلح با رشته‌های مجزا با توزیع تصادفی و بررسی نتایج به دست آمده از این پژوهش‌ها می‌توان به نکات زیر در مورد عمل تسلیح خاک با رشته اشاره کرد: مهم‌ترین ضرایب تغییر شکل یا سختی خاک، مدول یانگ، ضریب عکس‌العمل بستر و مدول برشی خاک هستند. سمنتاسیون موجب افزایش ضرایب تغییر شکل خاک می‌شود و افزایش شکل‌پذیری در خاک مسلح نسبت به خاک غیرمسلح سبب افزایش قابلیت جذب انرژی و مدول برشی خاک مسلح می‌گردد. در چند دهه گذشته اکثر پژوهش‌هایی که روی تأثیر تسلیح و تثبیت بر روی ماسه انجام گرفته در شرایط زهکشی شده بوده است، در شرایط زهکشی نشده رفتار نمونه به

جهت بهسازی خاک با استفاده از سیمانی شدن مصنوعی آن، محققین بیشترین توجه را به ماسه‌ها و مصالح ریزدانه‌اند معطوف داشته‌اند (Clough، ۱۹۸۱).

یکی از عوامل مؤثر بر رفتار خاک‌ها (درشت‌دانه و ریزدانه) ساختار آن است و در این میان، سیمانی شدن مهم‌ترین نقش را در ایجاد ساختار در خاک درشت‌دانه ایفاء می‌نماید. منظور از ساختار خاک عبارت است از دو عامل چیدمان هندسی ذرات یا دانه‌ها و نیروهای بین ذرات (در صورت وجود). واژه بافت خاک فقط به چیدمان هندسی ذرات بازمی‌گردد، در خاک‌های درشت‌دانه یا غیر چسبنده که نیروی بین ذرات وجود ندارد بافت و ساختار خاک هر دو یکی هستند، اما در خاک‌های رسی و یا سیمانته (چسبنده) که نیروی بین ذرات نسبتاً بزرگ است هر دو عامل باید به عنوان ساختار خاک ملاحظه شود.

اصلاح خاک با مواد پایه سیمانی همچون آهک، سنگ گچ، سیمان پرتلند و خاکستر بادی به‌عنوان تکنیک بهسازی خاک در مهندسی پی و ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گرفته است. رفتار مکانیکی خاک اصلاح شده با سیمان در گذشته توسط محققینی مورد بررسی قرار گرفته است. در مواردی از این مطالعات به بررسی ویژگی‌های مکانیکی ماسه اصلاح شده با سیمان با افزودن ژئولیت، خرده لاستیک‌ها، الیاف‌های طبیعی و مصنوعی، نانوسیلیکا، خاکستر بادی، ژئوتکستایل‌ها به شیوه‌ای یکسان پرداخته شده است.

Clough و همکاران (۱۹۸۱)؛ Coop و Atkinson (۱۹۹۳) و Consoli و همکاران (۱۹۹۸) از اولین نفراتی بودند که در زمینه خاک سیمانی تحقیق کرده‌اند و در مقایسه‌ای که با خاک غیر سیمانته انجام داده‌اند، دریافتند که با اضافه کردن عامل سمنتاسیون به خاک مقاومت نقطه اوج و سختی اولیه افزایش می‌یابد ولی با توجه به شکسته شدن باندها و بالا رفتن شاخص شکنندگی بعد از نقطه گسیختگی در کرنش‌های بالاتر افت شدیدی در مقاومت برشی خاک مشاهده شده است (Consoli و همکاران، ۱۹۸۱؛ Coop و Atkinson، ۱۹۹۳؛ Clough و همکاران، ۱۹۹۸).

مشخصه منفی خاک‌های تثبیت شده با سیمان آن است که اگرچه خاک‌های سیمانی دارای مقاومت بیشینه بالا می‌باشند، اما در تنجش‌های پایین گسیخته می‌گردند، افزودن رشته نقیصه خاک‌های سیمانی را اصلاح می‌نماید.

Consoli و همکاران در سال ۲۰۰۴ رشته‌های مجزا را به خاک سیمانی افزودند و با انجام آزمایش‌های فشاری سه‌محوری روی مخلوط حاصل نتیجه گرفتند که تسلیح خاک با رشته‌های مجزا هر دو عامل مقاومت حداکثر و مقاومت پسماند را افزایش می‌دهد و رفتار ترد خاک سیمانی را به سمت انعطاف‌پذیری بیشتری تغییر می‌دهد. همچنین آن‌ها دریافتند که اضافه کردن رشته‌ها به واسطه جلوگیری از شکل‌گیری ترک‌های کششی به طرز چشم‌گیری سازوکار شکست را تغییر می‌دهد (Consoli و همکاران، ۲۰۰۴).

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی، تراکمی ماسه بابلسر			
D ₅₀ (mm)	۰/۱۹۵	FC (%)	۱/۴۴
D ₁₀ (mm)	۰/۱۵۲	Gs	۲/۷۴
D ₃₀ (mm)	۰/۱۷۵	γ_{dmax} (kN/m ³)	۱۷/۶۷
D ₆₀ (mm)	۰/۲۰۰	γ_{dmin} (kN/m ³)	۱۴/۹۸
C _u	۱/۳	emin	۰/۵۵۱
C _c	۱/۰	emax	۰/۸۲۹

۳- تهیه نمونه و انجام آزمایش

ساخت نمونه برای یک پژوهش آزمایشگاهی موضوع بسیار مهمی است. در آزمون‌های آزمایشگاهی چون قرائت‌ها در مرزهای نمونه انجام می‌گیرد، مسئله ساخت نمونه همگن جهت به دست آوردن معادله رفتاری از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بسیار اهمیت دارد و باید به این موضوع توجه کافی شود (نورزاد، ۱۳۷۹). برای به دست آوردن مخلوط خاک و سیمان ابتدا آن‌ها به صورت خشک باهم مخلوط شدند، سپس مقدار آب لازم به صورت اسپری و در نهایت الیاف به صورت رشته‌های مجزا به آن افزوده شد و با مخلوط‌کن الکتریکی به مدت ۴ دقیقه مخلوط گردید و رطوبت ۱۲ درصد به عنوان رطوبت بهینه انتخاب شد. نمونه‌ها در قالب با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۵ میلی‌متر در ۵ لایه متراکم می‌شوند. هر لایه در داخل قالب ریخته و با استفاده از تراکم استاتیکی برای رسیدن به ارتفاع مطلوب متراکم می‌شوند. ارتفاع لایه‌های متراکم شده با استفاده از کولیس رقمی که دقتی برابر ۰/۰۱ میلی‌متر دارد، کنترل گردید. در بین لایه‌ها، به منظور حفظ پیوستگی دو لایه و جلوگیری از ایجاد صفحات ضعیف با استفاده از خط کش فلزی شیارهایی به ژرفای حدود ده درصد ضخامت لایه، به صورت شبکه‌ای ایجاد شد. پس از خارج نمودن نمونه از قالب آن را داخل محفظه پلاستیکی جهت جلوگیری از تغییرات رطوبت قرار داده و هر نمونه را در اتاق در دمای ۲۳±۲ قرار گرفت تا عمل‌آوری صورت گیرد. نمونه‌های آزمایشگاهی خاک پایه این پژوهش دارای تراکم نسبی در حدود ۴۰ درصد می‌باشند.

نمونه‌ها بعد از عمل‌آوری درون سلول دستگاه سه محوری گذاشته می‌شود، اشباع سازی نمونه شامل سه مرحله است. اولین مرحله عبور گاز دی‌اکسید کربن CO₂ به مدت ۱ ساعت صورت گرفت تا هوای داخل نمونه خارج و جای آن با گاز CO₂ پر شود. این کار به دلیل این که این گاز قابلیت ترکیب شدن با آب را دارد و برای نمونه شرایطی را ایجاد می‌کند که به راحتی و در مدت زمان کمتری اشباع شود، صورت می‌گیرد. در مرحله بعد آب هوازدایی شده از نمونه عبور داده می‌شود و مرحله پایانی اعمال فشار محفظه‌ای و پس‌فشار به صورت هم‌زمان و گام به گام است که نمونه را تا رسیدن به پس فشار ۵۰۰ کیلو پاسکال اشباع کرده تا به ضریب اسکمپتون (B) حداقل ۰/۹ برسد. در ادامه نمونه را تحت فشار دورگیرهای ۵۰،

لحاظ مشخصات رفتاری و مقاومتی با در نظر گرفتن شرایط یکسان، متفاوت از شرایط زهکشی شده است؛ بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای سیمانی شده مسلح با الیاف پلی‌وینیل الکل در شرایط تحکیم یافته زهکشی نشده در آزمایش‌های سه محوری فشاری می‌باشد. رشته‌های الیاف پلی‌وینیل الکل در مقایسه با سایر الیاف‌های طبیعی و مصنوعی سازگاری بسیار خوبی با پیوندهای سیمانی ایجاد می‌کنند و کمتر در تحقیقات آزمایشگاهی مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این مطالعه به ارزیابی تأثیرات افزودن سیمان و رشته‌های مجزا بر رفتار مقاومتی تنش- کرنش (تغییرات فشار منفذی، سختی، جذب انرژی، شاخص شکنندگی و تنجش گسیختگی) پرداخته شده است.

۲- خصوصیات فیزیکی مصالح آزمایش شده

خاک مورد استفاده در این آزمایش، از ساحل دریای خزر (بابلسر- ایران) که به عنوان خاک پایه می‌باشد. با انجام آزمایش دانه‌بندی مطابق با استاندارد ASTM D422-63 (ASTM، ۲۰۰۲) و بر اساس سیستم رده‌بندی متحد خاک (USCS) طبق استاندارد ASTM D2487-00 (ASTM، ۲۰۰۰) این ماسه جزء گروه ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) طبقه‌بندی می‌شود. چگالی دانه‌های جامد (Gs) این ماسه به توجه به مقدار میانگین حسابی شش آزمایش تعیین چگالی دانه‌های جامد بر اساس استاندارد ASTM D854-10 (ASTM، ۲۰۱۰) برابر با ۲/۷۴ می‌باشد. همچنین برای به دست آوردن مقدار بیشینه وزن مخصوص (γ_{dmax}) از استاندارد ASTM D4253-00 (ASTM، ۲۰۰۰) و برای محاسبه مقدار کمینه وزن مخصوص (γ_{dmin}) از استاندارد ASTM D4254-00 (ASTM، ۲۰۰۰) استفاده شده است. با به دست آوردن مقدار کمینه و بیشینه وزن مخصوص می‌توان مقدار بیشینه و کمینه نسبت تخلخل (e) را هم به دست آورد. این دو مقدار در تعیین تراکم نسبی (Dr) نمونه‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی، تراکمی ماسه بابلسر در جدول (۱) ارائه گشته است.

رشته‌های الیاف پلی‌وینیل الکل که طول آن ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. سازگاری بسیار خوبی با سیمان دارد و به خوبی آب جذب می‌کند و به دلیل ذات آب‌دوست خود قابلیت چسبندگی بسیار زیادی با ماتریس‌های سیمانی دارند، نسبتاً دارای استحکام و مدول الاستیسیته بالاتری در مقایسه با دیگر الیاف آلی معمول مورد استفاده می‌باشد. مقدار الیاف صفر، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی در نظر گرفته شده است. برای عامل سمنتاسیون از سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه سیمان مازندران (نکا) استفاده شده است. سیمان به مقدار ۸ درصد وزنی خاک خشک اضافه گردیده است.



شکل ۱- مراحل جای گذاری نمونه روی پایه دستگاه

۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال تحکیم کرده و در پایان با نرخ ۰/۳ میلی متر بر دقیقه برای آزمایش های زهکشی نشده بارگذاری صورت می گیرد. مقدار بار اعمال شده، جابه جایی و تغییرات فشار منفذی نمونه در طول آزمایش اندازه گیری شده و ثبت می شود.

در این پژوهش بارگذاری بر روی نمونه ها به روش کنترل کرنش صورت گرفته است. بر اساس استاندارد ASTM-D4767-04 (ASTM، ۲۰۰۴) در تمامی آزمایش ها، بارگذاری تا کرنش محوری ۱۵ درصد ادامه یافت و مقاومت بیشینه یا مقاومت نمونه در کرنش ۱۵ درصد هر کدام که زودتر رخ دهد به عنوان معیار گسیختگی لحاظ شد. در شکل (۱) مراحل جای گذاری نمونه روی پایه دستگاه نشان داده شده است.

۴- نتایج

نتایج آزمایش های سه محوری در شرایط زهکشی نشده روی نمونه های ماسه سیمانی با اصلاح الیاف در مقادیر صفر، ۰/۵ و ۱ درصد، تحت فشار دورگیر ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال بررسی شده است و تأثیراتی که اضافه کردن الیاف روی رفتار تنش برشی می گذارد، مورد بررسی قرار می گیرد.

۴-۱- شکل گسیختگی نمونه ها

در مطالعه حاضر، در نمونه های ماسه سیمانته شکل گسیختگی برشی تردی نشان داده شده است. باندهای برشی در تمامی نمونه ها مشاهده شده است. در شکل (۲) نمایی از گسیختگی برشی ارائه شده است.

همان طور که مشاهده می شود مربوط به وضعیت نمونه سیمانته می باشد که گسیختگی ترد و لغزش صفحات برش بر روی هم به وضوح قابل تشخیص است. با توجه به مشاهدات انجام شده طی آزمایش ها در تنجش های انتهایی باند برشی به وجود آمده، نمونه را به دو بخش در بالا و پایین تقسیم می کند، این دو بخش مجزا نسبت به باند برشی به وجود آمده نیمه صلب هستند. در تنجش های انتهایی در این باند برشی به علت تنجش های بسیار بزرگ، پیوندهای سیمانی به وجود آمده از بین رفته یا با ماهیتی لغزشی باعث کاهش میزان تنش انحرافی می شود. در این حالت خاک موجود در ناحیه باند برشی مانند خاک پایه به همراه کمی خرده های سیمان است که از متلاشی شدن پیوندهای سیمانی به وجود می آید ولی چنانچه نمونه با الیاف تسلیح می شود، پهنای باند برشی کاهش می یابد و حتی ترک ها بسته می شود و رشته ها اثر پل گونه خود را نمایان می کند.

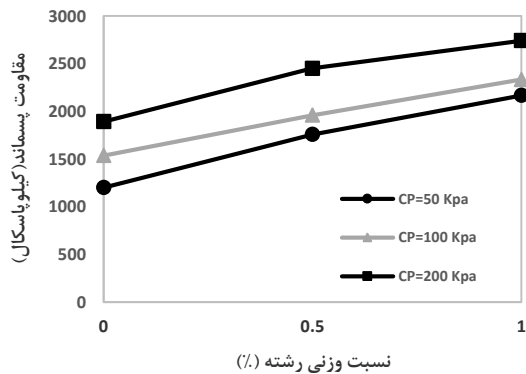


شکل ۲- مد گسیختگی نمونه های تحت آزمایش

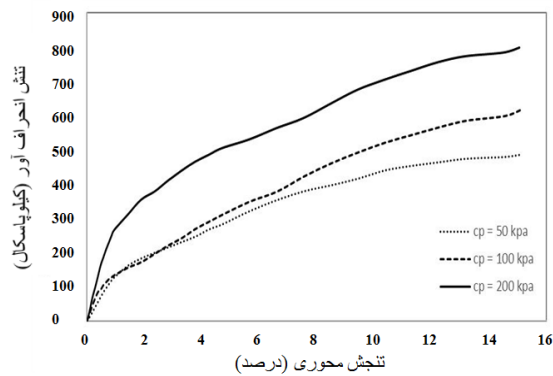
۴-۲- تأثیر اصلاح الیاف روی رفتار تنش برشی

منحنی های تنش-تنجش ماسه سیمانی در شکل (۳) ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش در فشار دورگیر کرنش گسیختگی افزایش و ضریب شکنندگی کاهش و مقاومت بیشینه، مقاومت پسماند و سختی نمونه های سیمانی افزایش می یابد.

منحنی های تغییرات مقاومت بیشینه و پسماند برحسب نسبت وزنی رشته در شکل (۴) و شکل (۵) نشان داده شده است. مشاهده می شود که افزودن الیاف سبب می شود پس از نقطه



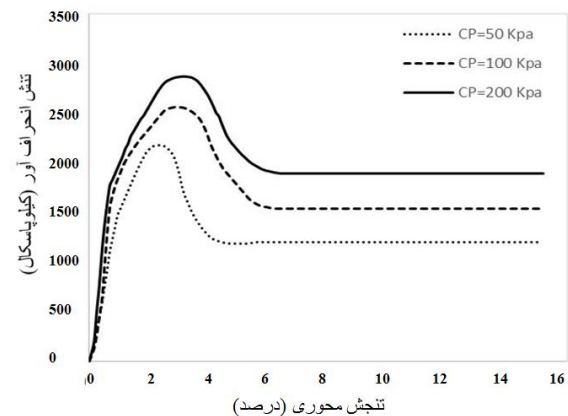
شکل ۵- تغییرات مقاومت پسماند برحسب نسبت وزنی رشته برای نمونه سیمانی با نسبت وزنی ۸ درصد و فشار دورگیر متفاوت و زمان عمل آوری ۲۸ روزه



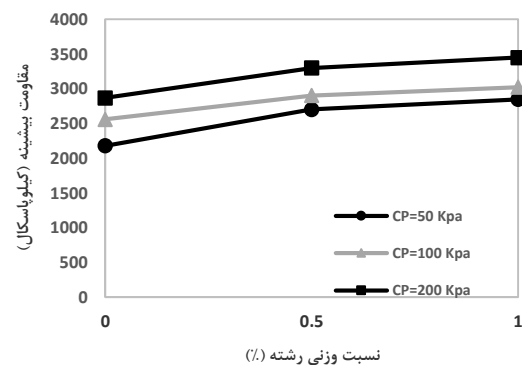
شکل ۶- منحنی تنش-تنجش محوری برای نمونه ماسه‌ای با تراکم نسبی ۴۰ درصد و فشار دورگیرهای متفاوت

همان گونه که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود نمونه در ابتدای آزمایش رفتار انقباضی نشان می‌دهد ولی در ادامه ماسه تغییر رفتار داده و تمایل به اتساع نشان می‌دهد، یعنی ماسه با اعمال برش افزایش حجم می‌دهد. برای توجیه چنین رفتاری می‌توان به شکل و سطح دانه‌ها اشاره کرد. ماسه مورد استفاده در این تحقیق آزمایشگاهی بد دانه‌بندی شده بوده و دارای سطحی نسبتاً زبر است، تیز گوشگی و زبری سطح باعث می‌شود در هنگام برش دانه‌ها با اصطکاک زیادی روی هم لغزیده و تمایل به اتساع پیدا کنند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش فشار دورگیر تمایل به اتساع به دلیل محبوس شونده‌گی بیشتر نمونه کاهش یافته است. از نمودارهای اتساعی واضح است که ابتدا به دلیل فرورفتن دانه‌ها در یکدیگر کاهش حجم اولیه را خواهیم داشت، اما اعمال نیروی برشی بیشتر سبب حرکت و غلتیدن دانه‌ها روی یکدیگر و افزایش حجم خواهد شد. در تمامی نمونه‌ها بعد از ایجاد فشار آب حفره‌ای مثبت تا انتهای آزمایش فشار آب حفره‌ای منفی ایجاد شده است. با وجود افزایش تنجش محوری نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای منفی کم شده لیکن به صفر نرسیده است.

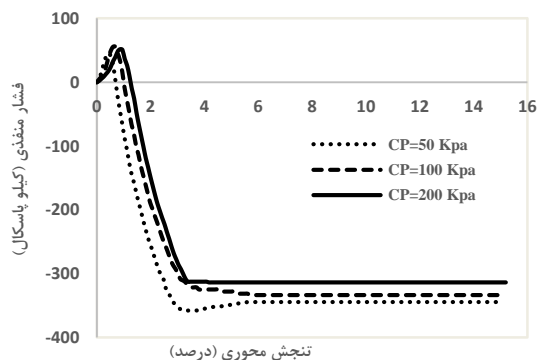
گسیختگی رفتار شکننده نرم‌تر شود و نمونه‌ها تحت تنجش بیشتری به مقاومت برشی ماکزیمم خود برسند. یعنی نمونه‌ها تحت تنش وارده شکل پذیرتر شده و این شکل پذیری با افزایش درصد الیاف بیشتر خواهد شد و موجب کاهش چشمگیری در سختی نمونه‌ها شده است. به طور کلی بالا بودن مقاومت باقی مانده نمونه‌های سیمانی مسلح به الیاف به این علت است که پس از این که نمونه تنش حداکثر را تحمل کرد، الیاف موجود در شبکه ماسه-سیمان مانع از به هم ریختن کامل ساختار نمونه شده و سبب می‌شود بعد از تحمل تنش حداکثر خاصیت باربری خود را بهتر از نمونه‌های سیمانی غیرمسلح حفظ کنند و تحت تنش بیشتری نسبت به نمونه غیرمسلح گسیخته شود. در شکل (۶) منحنی تنش-تنجش محوری برای نمونه ماسه‌ای با تراکم نسبی ۴۰ درصد ارائه شده است. در ماسه‌های شل انتظار می‌رود که نمونه رفتار انقباضی نشان دهد، یعنی با اعمال برش بر نمونه ماسه کاهش حجم دهد.



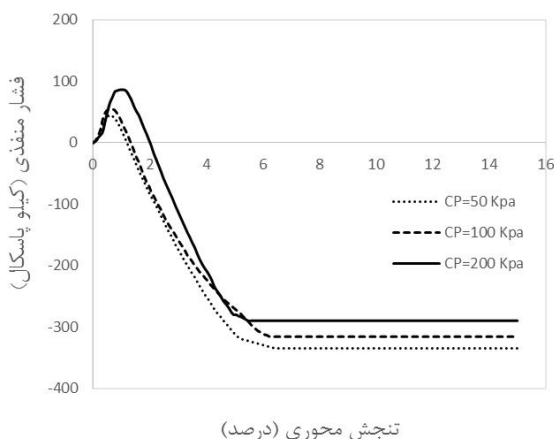
شکل ۳- منحنی تنش-تنجش محوری برای نمونه سیمانی با نسبت وزنی ۸ درصد و فشار دورگیرهای متفاوت و زمان عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۴- تغییرات مقاومت پیشینه برحسب نسبت وزنی رشته برای نمونه سیمانی با نسبت وزنی ۸ درصد و فشار دورگیر متفاوت و زمان عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۸- تغییرات فشار منفذی- تنجش محوری برای نمونه سیمانی با نسبت وزنی ۸ درصد و فشار دورگیرهای متفاوت و زمان عمل آوری ۲۸ روزه

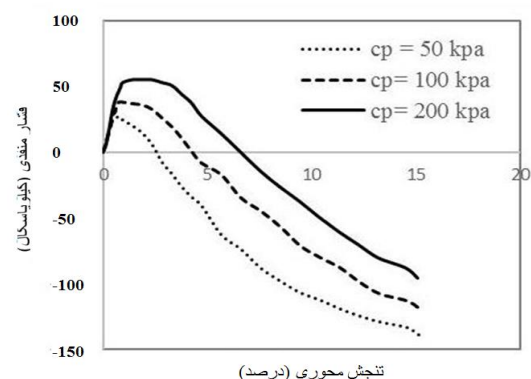


شکل ۹- تغییرات فشار منفذی- تنجش محوری برای نمونه سیمانی با نسبت وزنی ۸ درصد و نسبت وزنی رشته نیم درصد و فشار دورگیرهای متفاوت و زمان عمل آوری ۲۸ روزه

۴-۳- ضریب تغییر شکل

در نمودارهای تنش- تنجشی که برای نمونه‌های سیمانی مسلح ارائه شد واضح است که افزودن رشته موجب کاهش سختی نمونه گردیده است.

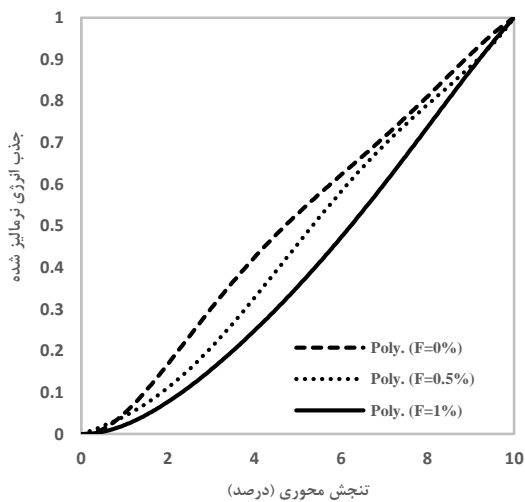
با توجه به شکل (۱۰) با افزایش نسبت وزنی رشته در نمونه‌های سیمانی مسلح سختی که به وسیله محاسبه ضریب سختی سکانت برای نیمی از مقاومت برشی تخمین زده می‌شود، به عبارتی سختی متناظر با ۵۰ درصد تنش انحراف آور بیشینه (شیب خطی که در نمودار تنش انحراف آور برحسب تنجش محوری، مبدأ مختصات را به نقطه متناظر با ۵۰ درصد تنش انحراف آور بیشینه وصل می‌نماید) کاهش یافته است.



شکل ۷- تغییرات فشار منفذی- تنجش محوری برای نمونه ماسه‌ای با تراکم نسبی ۴۰ درصد

عموماً مشاهده می‌شود که پیوندهای سیمانی به تدریج با افزایش تنجش‌ها زوال می‌یابند، همین طور که پیوندها می‌شکنند تنش‌های تحمل شده به وسیله این پیوندها به اسکلت خاک ویل فشار آب منفذی (برحسب شرایط زهکشی) انتقال می‌یابد. همچنین با افزایش فشار همه جانبه روند رفتاری تمایل به اتساع کاسته و بر روند تمایل به رفتار انقباضی افزوده می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود با اعمال تنجش محوری ابتدا نمونه‌ها به صورت انقباضی و ایجاد فشار آب حفره‌ای مثبت و سپس اتساعی و ایجاد فشار آب حفره‌ای منفی رفتار نموده‌اند. گسترش فشار منفذی در تمامی نمونه‌های سیمانی ابتدا تمایل به کاهش حجم و سپس تمایل به افزایش حجم می‌باشد. با افزودن ۸ درصد وزنی سیمان به خاک پایه رفتار تمایل زیادی به اتساع پیدا می‌کند و در واقع می‌توان گفت نرخ تمایل به اتساع در زمان شکست افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر هنگامی که ذرات کوچک‌تر و ریز سیمانی می‌شوند، ذرات مؤثر بزرگ‌تری ایجاد می‌شود که این ذرات بزرگ‌تر دارای قفل و بست‌شدگی و اصطکاک بالاتری هستند در نتیجه هنگامی که مورد برش واقع می‌شوند، نرخ تمایل به اتساع بیشتری خواهند داشت.

با توجه به شکل (۹) در واقع تمایل به اتساع در نمونه‌های سیمانی مسلح شده کمتر از نمونه غیرمسلح بوده و مقدار آن با افزایش درصد رشته کمتر می‌شود و می‌توان گفت به دلیل این که این نوع رشته مقاومت کششی بسیار بالایی دارد و چسبندگی و پیوستگی بسیار مناسبی با پیوندهای سیمانی دارد باعث می‌شود در این مرحله رشته به کار افتاده و نقش پل گونه خودبین پیوند- های سیمانی را ایفا کند و مشاهده می‌شود با اضافه شدن درصد رشته نرخ اتساع کاهش یافته است و باعث افزایش بخش انقباضی و کاهش بخش اتساعی شده است. با وجود این رفتار کلی تغییر نکرده است. به عبارت دیگر در همه نمونه‌ها هر دو رفتار انقباضی و اتساعی وجود دارد و بعد از ایجاد فشار آب حفره‌ای مثبت اولیه، فشار منفی شروع گشته و تا انتهای آزمایش ادامه یافته است.



شکل ۱۲- تغییرات جذب انرژی نرمالیز شده برحسب تنجش محوری برای نمونه سیمانی با نسبت وزنی ۸ درصد در فشار دور گیر ۲۰۰ کیلو پاسکال و زمان عمل آوری ۲۸ روزه

۴-۵- شاخص شکنندگی

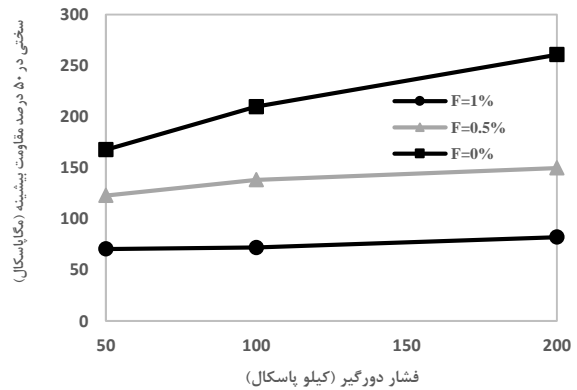
بر اساس متون فنی افزودن رشته‌ها به خاک مسلح، باعث کاهش افت مقاومت پس از مقاومت حداکثر می‌گردد. این رفتار نشان می‌دهد که وجود رشته‌ها باعث انعطاف‌پذیری بیشتر در رفتار نمونه‌های مسلح در مقایسه با نمونه‌های غیرمسلح می‌گردد. دلیل این موضوع این است که وجود رشته‌ها مانع از ایجاد نوار برشی در نمونه‌ها می‌شود و نیز می‌توان این‌گونه بیان کرد که هنگامی که نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار دارند، رشته‌ها به مانند پل عمل می‌کنند و این عملکرد آن‌ها باعث افزایش مقاومت خاک در تغییر شکل‌های بالا می‌گردد. ایجاد نوار برشی، عامل افت مقاومت پس از مقاومت حداکثر در نمونه‌های ماسه سیمانته می‌باشد.

کنسولی و همکاران شاخص شکنندگی را برای نشان دادن رفتار ترد خاک‌ها بیان نمودند (Consoli و همکاران، ۱۹۹۸):

$$I_B = \frac{q_{max}}{q_{res}} - 1 \quad (1)$$

که q_{max} ، q_{res} و I_B به ترتیب تنش انحراف‌آور بیشینه، تنش انحراف‌آور پسماند و شاخص شکنندگی می‌باشند.

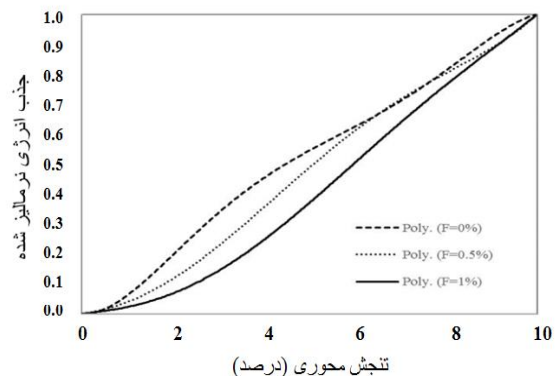
در شکل (۱۳) تغییرات ضریب شکنندگی برحسب فشار دورگیر برای نمونه‌های سیمانی ارائه شده است.



شکل ۱۰- تغییرات سختی معادل در ۵۰ درصد مقاومت بیشینه برحسب فشار دورگیر برای نمونه سیمانی با نسبت وزنی ۸ درصد و زمان عمل آوری ۲۸ روزه

۴-۴- انرژی جذب شده

در این پژوهش پتانسیل جذب انرژی برای نمونه‌های با ۸ درصد وزنی سیمان و زمان عمل آوری ۲۸ روزه به طوری که در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشهود است ارائه شده است. پتانسیل جذب انرژی مقدار انرژی لازم جهت تحمیل تغییر شکل در مصالح مسلح شده را نشان می‌دهد. این انرژی را می‌توان با محاسبه سطح زیر نمودار تنش-تنجش بیان کرد. جذب انرژی برای تنجش محوری ۱۰٪ برای تمامی آزمایش‌ها محاسبه شده است. جذب انرژی برای تنجش‌های محوری متفاوت به جذب انرژی در تنجش محوری ۱۰ درصد برای درصد رشته متفاوت نرمالیزه شده است. تغییر کوچکی در شیب منحنی برای خاک سیمانته غیر مسلح در جذب انرژی ۵۰ درصد می‌توان مشاهده کرد. چنانچه که درصد الیاف از صفر به ۰/۵ درصد افزایش یابد، شیب منحنی مسطح می‌شود و تنجش محوری متناظر افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- تغییرات جذب انرژی نرمالیز شده برحسب تنجش محوری برای نمونه سیمانی با نسبت وزنی ۸ درصد در فشار دور گیر ۵۰ کیلو پاسکال و زمان عمل آوری ۲۸ روزه

می‌نماید به طوری که نمونه‌های سیمانی و سیمانی مسلح با رشته به ترتیب کمترین و بیشترین تنجش گسیختگی در یک وضعیت مشابه را دارا هستند. سیمانی شدن اگرچه موجب افزایش مقاومت می‌گردد اما تنجش گسیختگی را کاهش می‌دهد و رفتار نمونه را ترد و شکننده می‌سازد. افزایش فشار دورگیر موجب می‌گردد تا رفتار نمونه انعطاف پذیرتر گردد و کرنش نظیر گسیختگی افزایش یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جهت بررسی آزمایشگاهی اثر تسلیح و تثبیت بر رفتار خاک ماسه‌ای به جهت بررسی رفتار استاتیکی با در نظر گرفتن تأثیر عواملی چون نسبت وزنی رشته و سیمان، زمان عمل‌آوری و تنش تحکیمی در بارگذاری استاتیکی انجام پذیرفت که چکیده نتایج آن به شرح زیر است:

(۱) با افزایش در فشار دورگیر کرنش گسیختگی افزایش و ضریب شکنندگی کاهش و مقاومت بیشینه، مقاومت پسماند و سختی نمونه‌های سیمانی افزایش می‌یابد.

(۲) با افزودن رشته‌های مجزا به خاک سیمانی مشاهده شد که تسلیح خاک با رشته‌های مجزا هر دو عامل مقاومت حداکثر و مقاومت پسماند را افزایش می‌دهد و رفتار ترد خاک سیمانی را به سمت انعطاف پذیری بیشتری تغییر می‌دهد.

(۳) افزودن رشته موجب افزایش تنجش گسیختگی می‌گردد و با افزایش نسبت وزنی، تنجش گسیختگی افزایش می‌یابد.

(۴) تمایل به اتساع در نمونه‌های سیمانی مسلح شده کمتر از نمونه غیرمسلح بوده و مقدار آن با افزایش درصد رشته کمتر می‌شود.

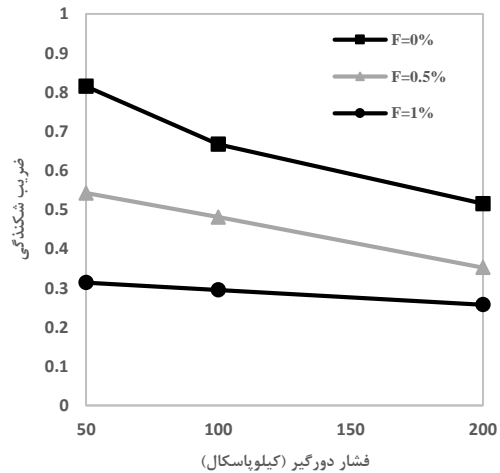
(۵) با افزایش درصد رشته تمایل به رفتار انقباضی افزایش و مکش نهایی کاهش می‌یابد و حالت انتقال فاز در تنجش‌های بالاتری اتفاق می‌افتد و همچنین باعث افزایش تنجش گسیختگی، مقاومت بیشینه، پتانسیل جذب انرژی و کاهش افت مقاومت پسماند و سختی می‌شود.

(۶) افزودن رشته‌ها به خاک مسلح، باعث کاهش افت مقاومت پس از مقاومت حداکثر می‌گردد. این رفتار نشان می‌دهد که وجود رشته‌ها باعث انعطاف پذیری بیشتر در رفتار نمونه‌های مسلح در مقایسه با نمونه‌های غیرمسلح می‌گردد.

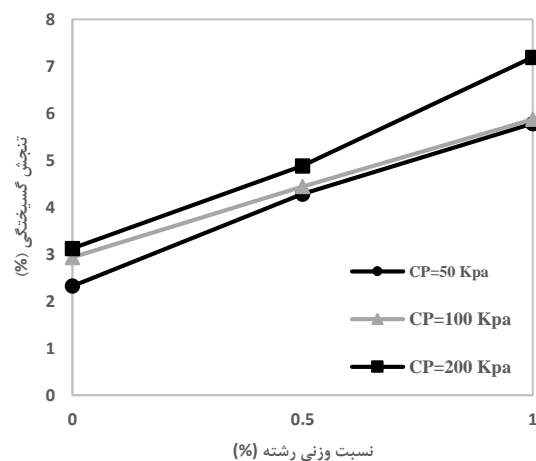
(۷) سیمانی شدن اگرچه موجب افزایش مقاومت می‌گردد اما تنجش گسیختگی را کاهش می‌دهد و رفتار نمونه را ترد و شکننده می‌سازد.

۷- مراجع

نورزاد، ر، "مشخصات رفتاری ماسه مسلح با ژئوتکستایل"، رساله دکتری مهندسی ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی شریف، تهران،



شکل ۱۳- تغییرات ضریب شکنندگی برحسب فشار دورگیر برای نمونه سیمانی با نسبت وزنی ۸ درصد و زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه



شکل ۱۴- تغییرات تنجش گسیختگی برحسب نسبت وزنی رشته برای نمونه سیمانی با نسبت وزنی ۸ درصد و زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه

۴-۶- تنجش گسیختگی

همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت وزنی رشته بر مقدار تنجش گسیختگی افزوده می‌گردد. مشخصه منفی خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان آن است که اگرچه خاک‌های سیمانی دارای مقاومت بیشینه بالا می‌باشند، اما در تنجش‌های پایین گسیخته می‌گردند. افزودن فشار دورگیر موجب افزایش تنجش گسیختگی و نرم‌تر شدن رفتار خاک سیمانی می‌گردد اما سیمان بیشتر برای خاک‌های سطحی استفاده می‌شود که در این حالت فشار دورگیر کم می‌باشد. افزودن رشته همان‌گونه که مشاهده می‌شود موجب افزایش تنجش گسیختگی می‌شود و نقیصه خاک‌های سیمانی را اصلاح

- American Society for Testing and Materials, "Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density, ASTM D4254-00", Annu B ASTM Stand, 2000C, 04, 08.
- American Society for Testing and Materials, D 4767-04: Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. ASTM Int., West Conshohocken, Pa. 2004.
- ۱۳۷۹
- Consoli NC, Vendruscolo MA, Fonini A, Rosa FD, "Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range", *GeotextGeomembranes*, 2009, 27, 3, 196-203.
- Diambra A, Ibraim E, Muir Wood D, Russell AR, "Fibre reinforced sands: Experiments and modelling", *Geotext Geomembranes*, 2010, 28, 3, 238-250.
- Yetimoglu T, Salbas O, "A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers", *Geotext Geomembranes*, 2003, 21, 2, 103-110.
- Ahmad F, Bateni F, Azmi M, "Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres", *Geotext Geomembranes*, 2010, 28, 1, 93-99.
- Ghiassian H, Holtz DH, "Geosynthetic cellular systems (GCS) in coastal application", Report University of Washington, Washington, Department of Civil and Environment Engineering, September, 2005.
- Clough GW, Sitar N, Bachus RC, Rad NS, "Cemented sands under static loading", *Journal Geotech Engineering, Division, ASCE*, 1981, 107, 6, 799-817.
- Coop MR, Atkinson JH, "The mechanics of cemented carbonate sands", *Geotechnique*, 1993, 43, 1, 53-67.
- Consoli NC, Prietto PDM, Ulbrich LA, "Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil", *Journal Geotech Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124, 12, 1211-1214.
- Consoli NC, Montardo JP, Donato M, Prietto PD, "Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fibre composites", *Proc Ice-gr Improv*, 2004, 8, 2, 77-90.
- Wang YH, Leung SC, "Characterization of cemented sand by experimental and numerical investigations", *Journal Geotech Geoenvironmental Engineering ASCE*, 2008, 134, 7, 992-1004.
- Park SS, "Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand", *Constr Build Mater*, 2011, 25, 2, 1134-1138.
- Ajorloo AM, Mroueh H, Lancelot L, "Experimental investigation of cement treated sand behavior under triaxial test", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2012, 30, 1, 129-143.
- Hamidi A, Hooresfand M, "Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand", *Geotext Geomembranes*, 2013, 36, 1-9.
- Kutanaei SS, Choobbasti AJ, "Triaxial behavior of fiber-reinforced cemented sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2016, 30, 6, 579-593.
- American Society for Testing and Materials, "Standard test method for particle-size analysis of soils, ASTM D422-63", Annu B ASTM Stand, 2002, 04. 08.
- American Society for Testing and Materials, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), ASTM D2487-00", Annu B ASTM Stand, 2000A.
- American Society for Testing and Materials, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, ASTM D854-10", Annu B ASTM Stand, 2010, 04. 08.
- American Society for Testing and Materials, "Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table, ASTM D4253-00", Annu B ASTM Stand, 2000B, 04. 08.

EXTENDED ABSTRACT

An Experimental Study on the Combined Effect of Reinforcement and Stabilization on the Shear Behavior of Babolsar Sand

Issa Shooshpasha*, Hamidreza Nejati Namin

Faculty of Civil Engineering, University of Babol University of Technology, Babol, Iran

Received: 29 May 2018; Accepted: 26 January 2019

Keywords:

Babolsar sand, Stabilization, Reinforcement, Pore pressure, Triaxial test.

1. Introduction

Improvement of weak soils with adding elements such as fibers that can increase tensile strength and stabilizing soils with additives that react chemically with them to make soils with desirable engineering properties is called reinforcement and stabilization (Consoli et al 2009). Researchers have always tried to improve bearing capacity, strength and properties of soil using different methods such as mechanical and chemical modifications and also reinforcement by high tensile strength elements Ghiassian, H. and Holtz, D, H., 2005). Randomly distributed discrete fibers offer strength isotropy and limit potential planes of weakness that can develop parallel to oriented reinforcement (Yetimoglu, T. and Salbas, O., 2003). Cementation in its general sense is binding and in geotechnical engineering, cementation is sticking soil particles to each other to form a cohesive mass with a higher strength. Soil structure is one of the factors that can affect behavior of (fine and coarse- grained) soils. Cementation plays an important role in the structure formation of coarse-grained soil. Soil structure is geometric arrangement of the soil particles and the forces, if any, between them the objective of this research is experimental study of the effect of reinforcement and stabilization on the behavior of sandy soil and evaluating effect of fibers on the shear behavior of cemented sand using strain-controlled triaxial tests under consolidated undrained conditions.

2. Methodology

The soil used in the present study was obtained from shores of Caspian Sea (in the city of Babolsar located in the north of Iran) that according to ASTM D2487-00 (ASTM, 2000) is classified as poorly graded sand (SP). Table 1 shows some physical properties of Babolsar sand. The 12 mm- Polyvinyl alcohol fibers (PVA) are compatible with cement and can strongly adhere to cement matrix due to their hydrophilic nature. The fiber contents in this study were considered as 0, 0.5 and 1% by weight of soil. Portland cement type II of Mazandaran cement factory (Neka) was used. Sample preparation is very important for an experimental study. Samples are placed in triaxial cell after 28 days of curing. Sample saturation is carried out in 3 steps. At first, CO₂ gas is passed through the sample. Then, de-aired water is passed through the sample and finally, cell pressure and back pressure are applied simultaneously so that Skempton coefficient (B) reaches at least to 0.9 for a back pressure of 500 kPa. Samples are consolidated under confining pressures of 50, 100 and 200 kPa and then, loading is applied with the rate of 0.3 mm/ min for undrained tests. The applied load, displacement and pore pressure variations of samples are measured and registered during the tests. Strain-controlled loading was applied in this research for samples according to ASTM-D4767-04 (ASTM, 2004).

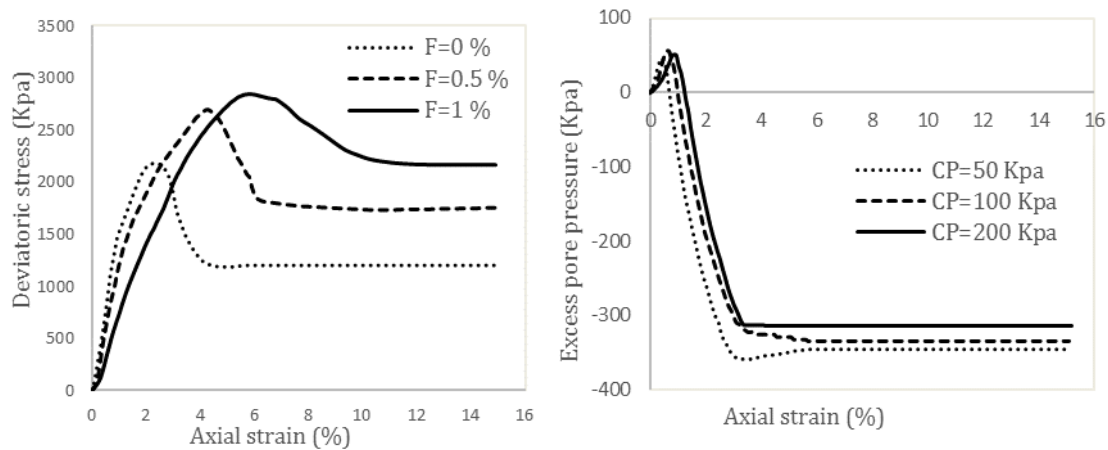
* Corresponding Author

E-mail addresses: shooshpasha@nit.ac.ir (Issa Shoosh pasha), Hamidrezanejati1989@gmail.com (Hamidreza Nejati).

3. Results and discussion

3.1. Stress-strain and Excess pore pressure behavior

The results of undrained triaxial tests for cemented samples with fiber contents of 0, 0.5 and 1% under confining pressures of 50, 100 and 200 kPa were analyzed the effects of fibers on the shear stress were studied. Fig. 1-a show stress-strain curves. Fibers can cause the behavior of samples more ductile and cause samples to reach to their peak shear strength under higher strain. In addition, fibers decrease stiffness of samples. Generally, fiber-reinforced cemented samples showed high residual strength because after passing the peak shear strength point, fibers keep the bearing capacity of reinforced samples and prevent complete destruction of sample structure. Moreover, fibers cause samples to fail under higher stress in comparison with unreinforced ones. It is observed that cemented bonds gradually destroy with increasing strain. While bonds break, stresses carried by these bonds transmit to soil structure or to pore water pressure. In addition, while confining pressure increases, the tendency to dilative and contractive behavior decreases and increases, respectively. As observed in Fig. 1-b, the behavior of samples is at first, contractive with generation of positive pore water pressure and then, dilative with generation of negative pore water pressure. Generation of pore pressure for all cemented samples is at first, the tendency to volume decrease and then, the tendency to volume increase.



(a) Reinforced with different fiber contents at CP=50 kPa (b) Unreinforced with different confining pressure

Fig. 1. (a) Deviator stress and excess pore pressure variation with for a sample with 8% cement after 28 days curing

3.2. The energy absorption potential

Fig. 2 shows the energy absorption potential. The energy absorption potential depicts the required energy to cause a deformation in reinforced materials. This energy can be obtained by calculating the area under stress-strain curve. The absorbed energy for different strains has been normalized to the absorbed energy for strain of 10% (for various fiber contents).

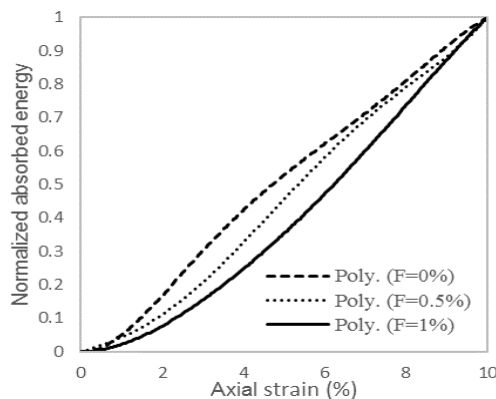


Fig. 2. Variation of normalized absorbed energy for 8% cemented samples with different fiber contents at 200 kPa confining pressure.

4. Conclusions

The results demonstrate that randomly distributed fibers affect the behavior of cemented sand significantly so that they increase the peak and residual strengths of samples and change the brittle behavior of cemented soil to the more ductile one. The tendency to contractive behavior increases, final suction decreases and phase transformation state occurs in higher strain levels with increasing fiber content. However, the general behavior has not been changed. In other words, all samples have both contractive and dilative behaviors and after generation of initial positive pore water pressure, the negative pressure began and continued to the end of the test. Furthermore, fibers increase failure strain and energy absorption potential and decrease stiffness and loss of residual strength.

5. References

- Consoli NC, Vendruscolo MA, Fonini A, Rosa FD, "Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range", *Geotext Geomembranes*, 2009, 27, 3, 196-203.
- Ghiassian H, Holtz DH, "Geosynthetic cellular systems (GCS) in coastal application", Report University of Washington, Department of Civil and Environment Engineering, September, 2005.
- Yetimoglu T, Salbas O, "A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers", *Geotext Geomembranes*, 2003, 21, 2, 103-110.
- American Society for Testing and Materials, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), ASTM D2487-00", *Annu B ASTM Stand*, 2000.
- American Society for Testing and Materials. D 4767-04: Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. ASTM Int., West Conshohocken, Pa. 2004.