



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل وهفت، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۳۱ تا ۱۴۰
Vol. 47, No. 1, Summer 2015, pp. 131-140



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)
(AJSR - CEE)

اثر ریزدانه‌ها بر کرنش برشی آستانه ماسه‌های اشباع

سید مجدالدین میر محمد حسینی^{۱*}، مهدی درخشندی^۲

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

(دریافت ۱۳۸۹/۳/۱۲، پذیرش ۱۳۹۳/۸/۷)

چکیده

یکی از خصوصیات مهم ماسه‌های اشباع تحت بارهای سیکلی کرنش برشی آستانه (γ_t) می‌باشد. کرنش برشی آستانه بمنظور بررسی فشار منفذی ایجاد شده ناشی از بارهای زلزله، ماشین آلات ارتعاشی و کلیه بارهای سیکلی موقت یا همیشگی وارده بر خاک تعیین می‌شود. بر اساس مطالعات انجام شده کرنش برشی آستانه میزان کرنشی است که تا قبل از آن فشار آب حفره‌ای در حالت اشباع و نوسانات حجمی در حالت خشک دستخوش تغییر نشوند. با افزایش مقدار کرنش برشی به بیش از γ_t تغییرات در فشار منفذی معنی‌دار شده و ریز ساختار خاک دستخوش تغییر می‌شود. در این تحقیق نمونه‌هایی از ماسه‌های حاوی ریزدانه‌های چسبنده و غیر چسبنده با استفاده از روش تراکم کاهش یافته مرطوب تهیه شده و با انجام آزمایش‌های سه محوری سیکلی کنترل کرنش در محدوده کرنش‌های کوچک، اثر نوع و مقدار ریزدانه‌ها بر کرنش برشی آستانه این خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند با افزایش مقدار ریزدانه‌های چسبنده به بیش از ۲۰ درصد، کرنش برشی آستانه نیز به میزان قابل توجهی نسبت به ماسه تمیز افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ریزدانه‌های غیر چسبنده، ابتدا افزایش و سپس کاهش کرنش برشی آستانه را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

کرنش برشی آستانه، ماسه‌های اشباع، ریزدانه‌های چسبنده و غیر چسبنده، فشار آب منفذی، آزمایش سه محوری سیکلی کنترل کرنش.

* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: mirh53@yahoo.com

۱- مقدمه

کرنش برشی آستانه یکی از خصوصیات دینامیکی پایه خاک‌ها در شرایط اعمال بار سیکی می‌باشد که در کمتر از آن رفتار خاک دارای تغییرات خطی و الاستیک است. تعیین مقدار این کرنش در تغییرات فشار منفذی ناشی از زلزله، مسائل مربوط به ارتعاشات ماشین‌ها و همچنین تأثیر کلیه بارهای اعمالی با ماهیت سیکی که بطور طولانی یا موقت بر خصوصیات مکانیکی خاک‌ها مؤثر هستند دارای اهمیت است. بر اساس تعاریف مختلفی که توسط محققین از کرنش برشی آستانه γ_t شده است، همگی بر این امر اتفاق نظر دارند که مقدار کرنش برشی آستانه برابر مقداری از کرنش برشی سیکی می‌باشد که در کمتر از آن، در شرایط اشباع، افزایشی در فشار منفذی اتفاق نیفتاده و یا تغییرات آن قابل اغماض بوده و در شرایط خشک نیز تغییر حجمی در توده خاک روی ندهد. در کرنش‌های کمتر از γ_t تغییرات ماندگاری در ریزساختار خاک ایجاد نشده و تغییر شکل‌های ایجاد شده الاستیک و خطی می‌باشد، بطوریکه مدول برشی خاک در محدوده کمتر از این کرنش تقریباً ثابت باقی می‌ماند. فراتر از این کرنش با افزایش سیکل‌های بارگذاری، فشار آب منفذی بطور فزاینده‌ای افزایش یافته و خصوصیات سختی خاک با افزایش سیکل‌های بارگذاری کاهش می‌یابد.

مطالعه انجام شده توسط درنویج و ریچارت [۱] نشان داد در صورتیکه ماسه‌ها تحت ارتعاش در محدوده کرنش‌های برشی کوچکتر از 10^{-2} درصد قرار گیرند، تغییر قابل توجهی در دانسیته و مدول برشی آنها بوجود نمی‌آید.

اندرسن و ریچارت [۲] بیان داشتند که کرنش برشی آستانه در رس‌های اشباع، سطحی از کرنش است که اگر کرنش برشی از آن افزایش یابد باعث کاهش پیوسته در $G_{max,N}$ (مدول برشی حداکثر در سیکل n ام) می‌شود. آنها این مقدار را برابر 10^{-2} درصد پیشنهاد کردند.

بررسی کرنش برشی آستانه γ_t همچنین توسط دابری و لد [۳]، دابری و همکاران [۴] و لد و همکاران [۵] در تحقیقاتی مربوط به بررسی فشار منفذی و خصوصیات روانگرایی ماسه‌های اشباع مورد توجه قرار گرفت.

استل و کالد [۶] گزارش دادند که در کرنشی کمتر از کرنش برشی آستانه تمایلی برای اتساع ماندگار وجود نداشته و تغییری در فشار منفذی ایجاد نمی‌شود.

ایشیهارا [۷] مقدار کرنش برشی آستانه ماسه‌ها را برابر 10^{-1} درصد تعیین نمود بطوریکه در بالاتر از این حد کرنش، تمایل به اتساع یا تراکم در بارگذاری سیکی زهکشی شده و

افزایش فشار منفذی در بارگذاری زهکشی نشده ایجاد می‌شود. همچنین دابری و همکاران [۴] مقدار کرنش برشی آستانه را برای ماسه‌های تمیز برابر 0.1 درصد معرفی نمود.

ویوستیک [۸] دو نوع کرنش برشی آستانه، یکی به نام کرنش برشی آستانه خطی γ_{tl} ، که در آن رفتار خاک الاستیک و خطی است و دیگری بنام کرنش برشی آستانه حجمی γ_{tv} تعریف نمود که در آن $\gamma_{tv} > \gamma_{tl}$ است. بین γ_{tv} و رفتار خاک بطور قابل توجهی غیر خطی می‌شود، اما اغلب الاستیک باقی می‌ماند. در مقادیر بزرگتر از γ_{tv} ، تغییرات غیرالاستیک و غیر خطی در خاک ایجاد می‌شود. این تغییرات تحت بار سیکی باعث ایجاد تغییرات ماندگار در ریز ساختار خاک شده و باعث افزایش فشار آب منفذی در خاک‌های اشباع تحت شرایط زهکشی نشده و ایجاد کرنش حجمی در خاک‌های خشک و نیمه اشباع می‌گردد. شکل (۱-الف) محدوده تغییرات کرنش‌های γ_{tl} و γ_{tv} را در فضای دامنه خمیری در برابر دامنه کرنش برشی نشان می‌دهد. همچنین تغییرات کاهش مدول سکانت و منحنی درصد میرایی در مقادیر مختلف کرنش برشی سیکی در خاک‌های اشباع در شکل (۱-ب) قابل مشاهده می‌باشد. ویوستیک و سو [۹] با انجام آزمایش‌های برش ساده سیکی بر روی خاک‌های چسبنده بیان داشتند مقدار γ_t برای خاک‌های چسبنده، بزرگتر از خاک‌های غیر چسبنده می‌باشد. برای ریزدانه‌های لای و رس با اندیس خمیری در محدوده 14 تا 30 کرنش برشی آستانه در بین 0.024 تا 0.06 درصد می‌باشد؛ همچنین مقدار γ_t برای خاک‌های ماسه‌ای و شنی در محدوده 0.1 تا 0.02 درصد قرار می‌گیرد.

هازیربابا و راجه [۱۰] با استفاده از آزمایش‌های برش ساده سیکی بر روی خاک‌های ماسه‌ای لای دار نشان دادند که اضافه نمودن ریزدانه‌های غیر چسبنده به ماسه تمیز باعث کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای و افزایش کرنش برشی آستانه می‌شود. همچنین در صورتیکه مقدار لای در نمونه به اندازه‌ای باشد که موجب افزایش نسبت تخلخل نمونه به بیش از نسبت تخلخل اسکلت ماسه‌ای شود، در کرنش برشی سیکی یکسان افزایش فشار آب حفره‌ای ماسه لای‌دار نسبت به ماسه تمیز بیشتر خواهد بود.

نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده توسط تاباتا و ویوستیک [۱۱] نشان داد، زمانیکه خاک‌های اشباع در معرض کرنش‌های سیکی کوچک قرار می‌گیرند ساختار خاک تغییری نمی‌کند و هیچگونه تغییری در مقاومت و سختی آن روی نمی‌دهد تا اینکه به مقدار کرنش برشی به γ_{tl} برسد که در آن سختی خاک شروع به کاهش می‌کند که آن را کرنش آستانه برای تغییرات سختی معرفی نمودند. همچنین مرتضائی و ویوستیک [۱۲] با انجام یک

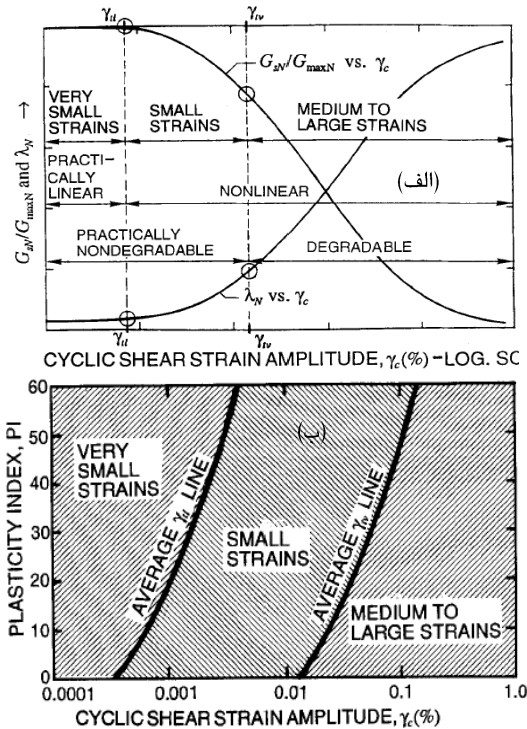
سری آزمایشهای کنترل کرنش با استفاده از دستگاه برش ساده سیکلی NGI در محدوده کرنشهای برشی ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۳ درصد الی ۲ درصد، دو حد کرنش برشی آستانه تعریف نمودند؛ یکی γ_{td} که مطابق تعریف کرنشی است که در آن سختی خاک شروع به کاهش می‌کند و دیگری γ_{ip} که در آن فشار آب حفره‌ای ماندگار در نمونه با افزایش تعداد سیکل بارگذاری شروع به افزایش می‌کند.

سری آزمایشهای کنترل کرنش با استفاده از دستگاه برش ساده سیکلی NGI در محدوده کرنشهای برشی ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۳ درصد الی ۲ درصد، دو حد کرنش برشی آستانه تعریف نمودند؛ یکی γ_{td} که مطابق تعریف کرنشی است که در آن سختی خاک شروع به کاهش می‌کند و دیگری γ_{ip} که در آن فشار آب حفره‌ای ماندگار در نمونه با افزایش تعداد سیکل بارگذاری شروع به افزایش می‌کند.

همه نمونه‌ها با استفاده از آزمایش سه‌محوری سیکلی کنترل کرنش تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. در این آزمایشها فشار منفذی بعنوان پارامتر اصلی اندازه‌گیری شده است. در آزمایش‌های سه‌محوری کنترل تنش به دلیل نرم‌شوندگی نمونه پس از اعمال سیکل‌های متوالی، سختی نمونه (پارامتر G) و فشارهای منفذی نمونه توأماً بعنوان دو پارامتر مهم دستخوش تغییرات شده و بنابراین تفسیر داده‌ها نسبت به آزمایش‌های سیکلی کنترل کرنش پیچیده‌تر خواهد بود. دلیل دیگر استفاده از آزمایشهای کنترل کرنش عدم تأثیرپذیری این آزمایشها از نحوه ساخت و دستخوردگی نمونه نسبت به آزمایشهای کنترل تنش می‌باشد. از آنجائیکه آزمایشها بصورت کنترل کرنش انجام شده‌اند، برای اعمال کرنش برشی مورد نظر از رابطه (۱) مقدار کرنش محوری ϵ_a محاسبه شده و بصورت دامنه دابل جابجائی به نرم افزار دستگاه معرفی می‌شود.

$$\gamma = (1 + \nu) \cdot \epsilon_a \quad (1)$$

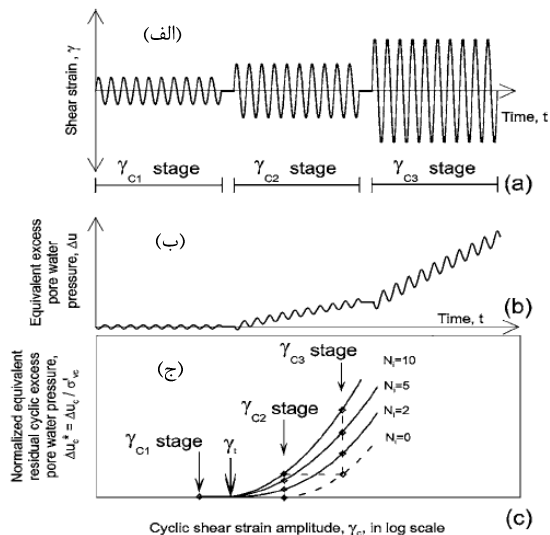
رابطه فوق با استفاده از تئوری الاستیسیته قابل اثبات است [۱۴]. مقدار ضریب پواسون (ν) برای خاک اشباع در شرایط زهکشی نشده برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. شکل (۲) الگوی بارگذاری مرحله‌ای را بطور شماتیک برای تعیین کرنش آستانه نشان می‌دهد [۹]. در این شکل کرنش سیکلی اعمالی به نمونه در سه مرحله γ_{c1} ، γ_{c2} ، γ_{c3} در ۱۰ سیکل اعمال شده است. شکل (۲-الف) نمودار کرنش سیکلی در برابر زمان را برای مرحله بارگذاری نشان می‌دهد. همچنین اضافه فشار منفذی ایجاد شده در حین اعمال سیکل‌های بارگذاری در برابر زمان در شکل (۲-ب) نشان داده شده است و شکل (۲-ج) اضافه فشار



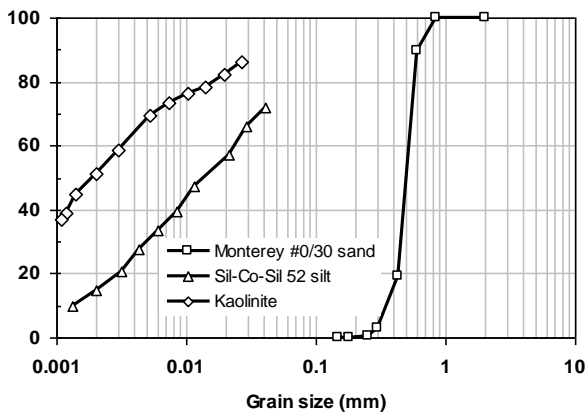
شکل (۱): الف- محدوده تغییرات γ_{ip} و γ_{td} با دامنه خمیری (PI) در برابر دامنه کرنش برشی ب- تغییرات مدول برشی سکانت در بخش‌های مختلف دامنه کرنش برشی سیکلی در خاک‌های اشباع [۸]

۲- روش آزمایش و مصالح مورد مطالعه

برای انجام آزمایشها از دستگاه سه‌محوری سیکلی (GCTS) استفاده شده است. این سیستم یکی از دستگاههای سه‌محوری پیشرفته است که از سیستم کنترل حلقه بسته برای ارتباط بین نرم‌افزار و سنسورهای دستگاه استفاده می‌کند. بمنظور انجام آزمایش‌های سیکلی کنترل کرنش برای بررسی کرنش برشی آستانه، نیاز به اعمال تغییر شکل‌های کنترل شده با دقت بالا می‌باشد. بدین منظور از یک سنسور LVDT مینیاتوری با دقت ۰/۰۰۰۵mm برای اعمال تغییر شکل‌های کوچک بمنظور اعمال کرنش‌های برشی در محدوده ۰/۰۰۳ تا ۰/۱ درصد استفاده شده است. نمونه‌های مورد آزمایش، با قطر ۶۳/۵ و ارتفاع ۱۲۷ میلیمتر و درصد تراکم ۲۰، با استفاده از روش تراکم کاهش یافته مرطوب [۱۳] و درصد تراکم کاهش یافته اولیه (U_{m1}) ۶ درصد در ۷ لایه ساخته شده‌اند. این نمونه‌ها حاوی ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد ریزدانه چسبیده کائولینیت و لای غیرچسبیده Sil-



شکل (۲): الگوی بارگذاری مرحله‌ای برای تعیین کرنش برشی آستانه a- کرنش برشی سیکلی اعمالی در برابر زمان b- اضافه فشار منفذی در طی مراحل بارگذاری سیکلی در برابر زمان اعمال بار c- اضافه فشار منفذی نرمالیزه شده در برابر دامنه کرنش برشی سیکلی اعمالی [۹].



شکل (۳): منحنی توزیع دانه‌بندی ماسه Monterey #0/30، لای Sil-Co-Sil 52 و کائولینیت

۳- بحث و تفسیر نتایج

۳-۱- بحث و تفسیر نتایج اثر ریزدانه‌های چسبیده بر کرنش

برشی آستانه ماسه‌های اشباع

در این قسمت از مطالعه اثر ریزدانه‌های چسبیده بر کرنش برشی آستانه با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی کنترل کرنش مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر سطح کرنش فشار منفذی حین اعمال ۵۰ سیکل کرنش برشی پایش شده و با استفاده از زهکشی نمونه، تغییر حجم نمونه پس از بارگذاری اندازه‌گیری شده است. بمنظور تعیین کرنش برشی آستانه، کرنش برشی سیکلی در محدوده ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۱ با رشد ۰/۰۰۱ به صورت مرحله‌ای به نمونه اعمال می‌شود تا اینکه افزایش ناگهانی در فشار منفذی بوجود آید. در مجموع تعداد ۳۷ آزمایش

منفذی نرمالیزه شده بر حسب تنش همه جانبه مؤثر را در انتهای سیکل‌های بارگذاری ۰، ۲، ۵ و ۱۰ در برابر دامنه کرنش برشی سیکلی اعمالی نشان می‌دهد. در این مطالعه مراحل اعمال بارگذاری و ثبت داده‌ها برای تعیین کرنش برشی آستانه به همین راه انجام شده است؛ منتها در هر مرحله بارگذاری تعداد ۵۰ سیکل بار به نمونه اعمال شده است. همچنین برخلاف آنکه محققین مختلفی از جمله فین و همکاران [۱۵]، بولنجر و همکاران [۱۶] پولیتو [۱۷] نشان دادند که فرکانس بارگذاری اثر ناچیزی بر رفتار بارگذاری ماسه دارد لیکن در ماسه‌های رس‌دار فرکانس بار سیکلی اعمالی به نمونه باید به گونه‌ای انتخاب شود که با توجه به حضور ریزدانه‌ها در نمونه، فرصت گسترش فشار آب حفره‌ای در سراسر نمونه فراهم شود؛ به همین دلیل فرکانس اعمال بار در آزمایشها ۰/۱ هرتر انتخاب شد. استفاده از این فرکانس بارگذاری در آزمایشهای سه‌محوری سیکلی بر روی ماسه‌های رس‌دار را می‌توان در آثار محققین دیگر نیز مشاهده نمود [۹]. مصالح مورد مطالعه شامل ماسه Monterey #0/30 رس کائولینیت و لای Sil-Co-Sil 52 می‌باشد که منحنی توزیع دانه‌بندی آنها در شکل (۳) نشان داده شده است. خصوصیات اندیسی ترکیبات مختلف ماسه، کائولینیت و لای از جمله ثقل ویژه و حدود آتربرگ به ترتیب با استفاده از استانداردهای ASTM D 854 [۱۸] و ASTM D 4318-05 [۱۹] تعیین شده است. اگرچه استانداردهای ASTM D 4253 [۲۰] و ASTM D 4254 [۲۱] برای مخلوط ماسه و ریزدانه غیر چسبنده، حداکثر مقدار ریزدانه را به ۱۵ درصد محدود می‌کند، لیکن بدلیل نبود استاندارد مناسب دیگر برای تعیین حداقل نسبت تخلخل (e_{min}) و حداکثر نسبت تخلخل (e_{max}) از روش C استاندارد ASTM D 4253، برای تعیین e_{max} و استاندارد ASTM D 4254 برای تعیین e_{min} مخلوط‌های ماسه و لای استفاده شده است. همچنین بدلیل آنکه مخلوط ماسه - کائولینیت را نمی‌توان توسط میز لرزان به حداکثر تراکم رساند، برای تعیین حداقل نسبت تخلخل، از روش تراکم پراکتور اصلاح شده ASTM D 1557 [۲۲] استفاده شده است. شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) به ترتیب تغییرات نسبت‌های تخلخل مخلوط‌های ماسه - لای و ماسه - کائولینیت را نشان می‌دهند. همچنین جدول‌های (۱) و (۲) به ترتیب خصوصیات فیزیکی و شاخص‌های مخلوط‌های ماسه - کائولینیت و ماسه - لای را نشان می‌دهند.

جدول (۱): خصوصیات اندازه‌گیری شده مخلوط‌های ماسه Monterey #0/30 و کائولینیت

درصد وزنی ریزدانه					خصوصیت اندازه‌گیری شده
۱۰۰	۳۰	۲۰	۱۰	۰	
۲/۵۸	۲/۶۲	۲/۶۳	۲/۶۳	۲/۶۴	Gs
۴۱/۷	۱۵/۳	۱۱/۵	۸/۸	-	LL
۲۶/۲	۱۰/۳	۹/۶	-	-	PL
۱۵/۵	۵	۱/۹	NP	-	PI
۷۰	۲۱	۱۴	۷	۰	درصد رس (<0.۰۵mm)
CL	SC	SC	SP-SC	SP	طبقه بندی USGS

جدول (۲): خصوصیات اندازه‌گیری شده مخلوط‌های ماسه Monterey #0/30 و لای Sil-Co-Sil 52

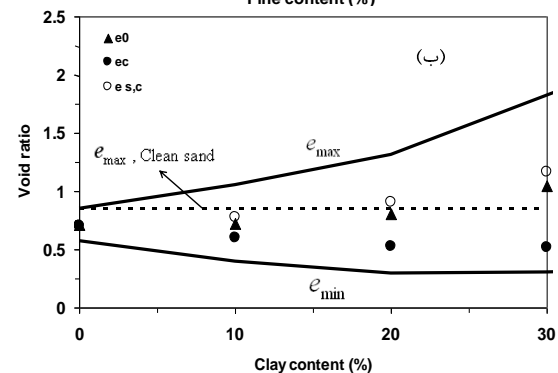
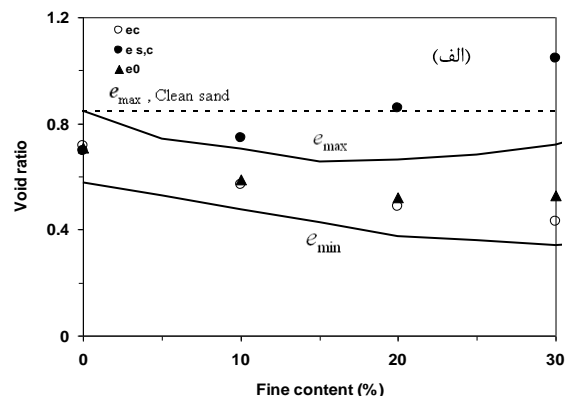
درصد وزنی ریزدانه					خصوصیت اندازه‌گیری شده
۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۰	
۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴	توده ویژه (Gs)
SM	SM	SM	SP-SM	SP	طبقه بندی خاک (USGS)

در این تحقیق پس از جمع‌بندی معیارهای ارائه شده در ادبیات موضوع برای هر سطحی از کرنش، اضافه فشار منفذی ایجاد شده پس از ۱۰ و ۵۰ سیکل اعمال بار به‌مراه کرنش حجمی ایجاد شده در اثر زهکشی پس از اعمال بار سیکلی بعنوان معیار تعیین کرنش برشی آستانه انتخاب شده است. شکل (۵) تغییرات اضافه فشار منفذی در کرنش‌های برشی کوچک را که در تعیین کرنش برشی آستانه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) اضافه فشار اندازه‌گیری شده در انتهای سیکل‌های ۱۰ و ۵۰، در سطوح کرنش کوچکتر از ۰/۰۲ درصد را نشان می‌دهد. مطابق شکل، پاسخ فشار منفذی برای نمونه‌های حاوی کمتر از ۲۰ درصد کائولینیت شبیه یکدیگر است اما متفاوت از فشارهای منفذی متناظر با مقدار ریزدانه ۳۰ درصد می‌باشد.

در کرنش برشی $\gamma = 0.003$ درصد اضافه فشار منفذی متناظر با همه نمونه‌های کمتر از ۲۰ درصد کائولینیت به مقداری در حدود $r_{ii} = 0.4$ درصد در $N=10$ و $r_{ii} = 0.7$ درصد در $N=50$ می‌رسد.

با وجود اینکه این مقادیر فشارهای منفذی برابر صفر نیستند اما هیچگونه تغییر حجمی پس از زهکشی بعد از اعمال ۵۰ سیکل بارگذاری مشاهده نمی‌شود. در این سطح کرنش هیچگونه فشار منفذی برای نمونه‌های حاوی ۳۰ درصد کائولینیت ثبت نشده است. در $\gamma = 0.01$ درصد (مقدار کرنش آستانه برای ماسه‌های تمیز) نمونه‌های حاوی کمتر از ۲۰ درصد کائولینیت اضافه فشار منفذی در حدود $r_{ii} = 1.5 \sim 3$ درصد در $N=10$ و $r_{ii} = 3 \sim 6$ درصد در $N=50$ را تجربه می‌کنند. این مقادیر (با وجود اینکه مقادیر کوچکی می‌باشند) بزرگتر از مقدار فشار منفذی مورد انتظار برای این سطح کرنش می‌باشند. برای ۳۰ درصد

بر روی نمونه‌های ماسه رس‌دار و ۲۸ آزمایش بر روی نمونه‌های ماسه لای‌دار انجام شد. تعداد آزمایش‌ها و میزان کرنش برشی اعمالی را می‌توان از شکل‌های (۵) و (۷) دریافت نمود.

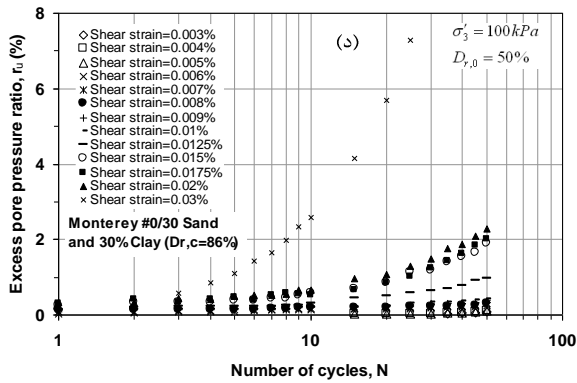


شکل (۴): تغییرات نسبت‌های تخلخل حداکثر (e_{max}), حداقل (e_{min}), نسبت تخلخل اولیه پس از ساخت نمونه (e_0) و نسبت تخلخل اسکلت ماسه‌ای پس از تحکیم ($e_{s,c}$), در برابر درصد ریزدانه لای برای

الف- مخلوط ماسه Monterey #0/30 و لای Sil-Co-Sil

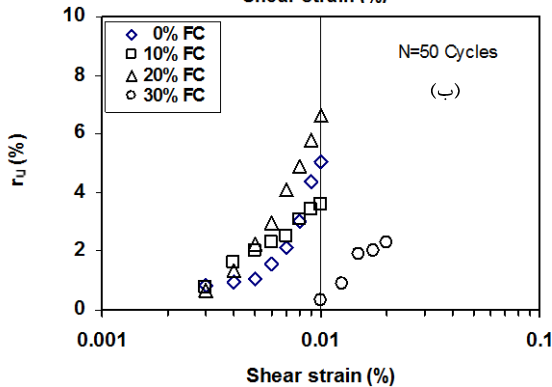
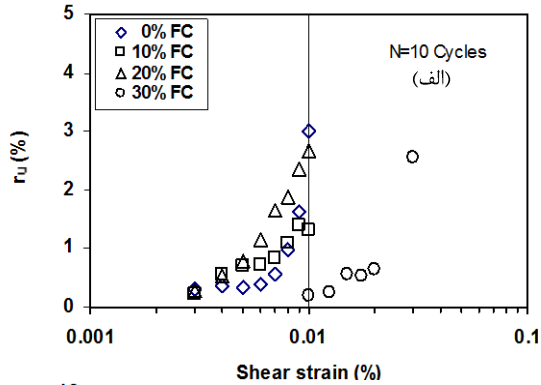
ب- مخلوط ماسه Monterey #0/30 و کائولینیت

بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که تاکنون تعریف استاندارد از کرنش برشی آستانه ارائه نشده است. لُد و همکاران [۵] اضافه فشار منفذی پس از ۱۰ سیکل بارگذاری را مبنا قرار دادند، درحالی‌که یوود [۲۳] تغییرات نسبت تخلخل بعد از تعداد مختلفی از سیکل‌های بارگذاری را بعنوان معیار تعیین کرنش برشی آستانه انتخاب نمود. همچنین ویوستیک و سو [۹] نیز مقدار کرنش برشی آستانه را با استفاده از نمودار $r_{ii} - \gamma$ انتخاب نمودند، اما قضاوت مهندسی را در تعیین آن مورد تأکید قرار دادند.



شکل (۵): نسبت اضافه فشار منفذی ایجاد شده در مقابل تعداد سیکل بارگذاری به منظور تعیین کرنش برشی آستانه الف- ماسه Monterey #0/30 - ب- مخلوط ماسه Monterey #0/30 و ۱۰٪ کائولینیت ج- مخلوط ماسه Monterey #0/30 و ۲۰٪ کائولینیت د- مخلوط ماسه Monterey #0/30 و ۳۰٪ کائولینیت

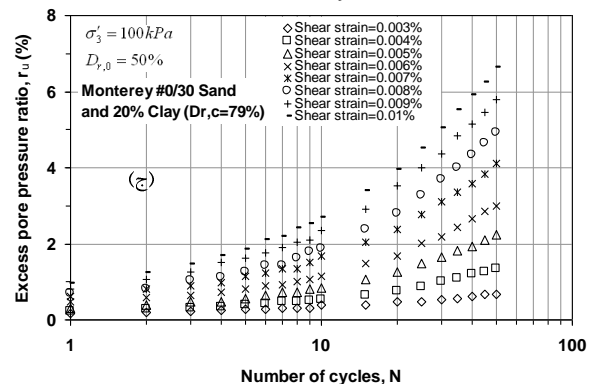
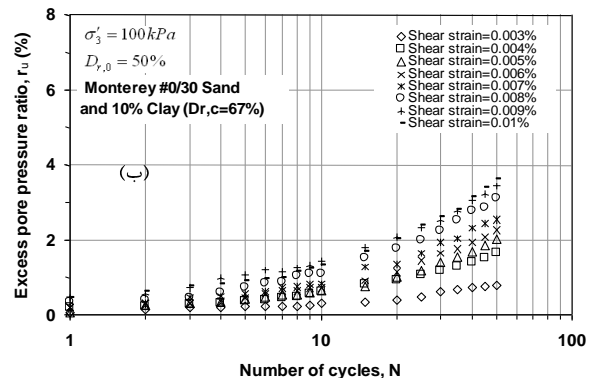
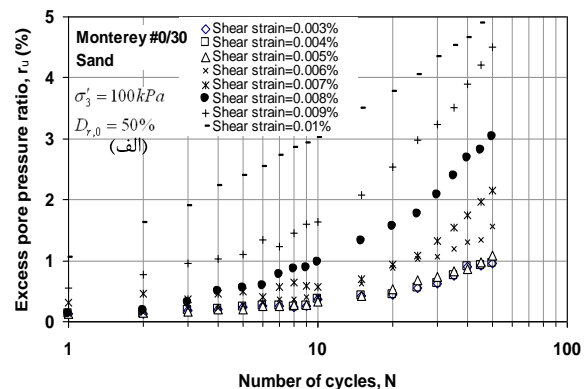
بنابراین کرنش برشی آستانه را برای ۳۰ درصد کائولینیت می‌توان برابر $\gamma_t = 0.025$ درصد تخمین زد. این مقدار مشابه مقداری است که ویوستیک و سو [۹] برای کائولینیت خالص پیشنهاد دادند، اما این تخمین بالایی برای خاکهای غیر پلاستیک می‌باشد. تفاوت در رفتار نمونه‌های ماسه‌ای حاوی ۳۰ درصد کائولینیت را شاید بتوان به دلیل انتقال از یک ماتریس ماسه‌ای به یک ماتریس ریزدانه کائولینیتی توصیف نمود.



شکل (۶): تغییرات نسبت اضافه فشار منفذی در برابر کرنش برشی (کمتر از ۱/۰ درصد) در نمونه‌های مخلوط ماسه Monterey #0/30 و درصدهای مختلف کائولینیت الف- در انتهای سیکل ۱۰ ب- در انتهای سیکل ۵۰

کائولینیت، نسبت اضافه فشار منفذی هنوز کمتر از $r_u = 0.5$ درصد برای این سطح کرنش می‌باشد.

در مجموع با توجه به موارد ذکر شده از این بحث مقدار $r_u = 0.1$ در $N = 10$ در این پژوهش بعنوان معیاری قابل قبول به منظور تعریف کرنش برشی آستانه انتخاب می‌شود. با استفاده از این معیار و داده‌های موجود در شکل (۶-الف) کرنش برشی آستانه برای $FC \leq 20\%$ بین 0.006 تا 0.008 درصد بدست می‌آید که تقریباً سازگار با مطالعات انجام شده در مورد ماسه تمیز می‌باشد. در کرنش برشی $\gamma = 0.01$ درصد برای ریزدانه ۳۰ درصد، مقدار r_u در $N = 10$ کمتر از ۱ درصد و در کرنش $\gamma = 0.03$ درصد، r_u حدود ۲/۵ درصد برای $N = 10$ می‌باشد.



کرنش برشی آستانه برای مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد لای برابر $\gamma_t = 0.175 \sim 0.15$ درصد بدست می‌آید. این مقدار برای مقادیر ۰ و ۳۰ لای در حدود $\gamma_t = 0.1$ درصد تعیین شده است.

افزایش مقدار لای از ۱۰ تا ۲۰ درصد، باعث جای‌گیری ذرات لای در فضای بین دانه‌های ماسه و کاهش تخلخل نمونه می‌گردد که در نتیجه آن بدلیل کاهش تخلخل و عدم بهم ریختگی ساختار دانه‌های ماسه در اثر اضافه شدن ذرات لای، فشار منفذی کاهش می‌یابد. بنابراین برای افزایش فشار منفذی باید کرنش برشی سیکلی اعمالی بیشتر از مقدار کرنش برشی آستانه باشد. مطابق شکل (۴-ب) در مقدار ریزدانه‌های بزرگتر از حدود ۲۰ درصد به دلیل افزایش نسبت تخلخل اسکلت ماسه‌ای به بیش از مقدار حداکثر نسبت تخلخل ماسه تمیز، رفته رفته تماس بین ذرات ماسه با یکدیگر حذف شده و ماتریس لای کم‌کم بر ساختار خاک حاکم می‌شود. این رفتار در مطالعه انجام شده توسط پیتمن و همکاران [۲۴] نیز مشاهده گردید.

برای $FC \leq 20\%$ ، نسبت‌های تخلخل اسکلت ماسه‌ای پس از تحکیم ($e_{s,c}$ ، شکل ۴-الف) کمتر از نسبت تخلخل حداکثر ماسه تمیز ($e_{max, clean}$) می‌باشد. در حالیکه برای نمونه‌های حاوی ۳۰ درصد کائولینیت مقدار تخلخل اسکلت ماسه‌ای ($e_{s,c}$) بیشتر از $e_{max, clean}$ می‌باشد که نشان از حذف تماس دانه‌های ماسه با یکدیگر و نبود تسلط بافت ماسه‌ای بر ماتریس خاک است.

جدول (۳) مقادیر کرنش برشی آستانه و اضافه فشار منفذی متناظر با آن بر اساس معیار پیشنهادی در این تحقیق را برای نمونه‌های ماسه‌ای حاوی مقادیر کائولینیت ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نشان می‌دهد. این جدول بر اساس نتایج حاصل از داده‌های شکل (۵) و همچنین شکل (۶-الف) تدوین شده است.

جدول (۳): کرنش برشی آستانه برای مخلوط ماسه Monterey

#0/30 و درصد‌های مختلف کائولینیت

ریزدانه (%)	۰	۱۰	۲۰	۳۰
کرنش برشی آستانه (%)	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۲۵

۲-۳- اثر ریزدانه‌های غیرچسبنده بر کرنش برشی آستانه

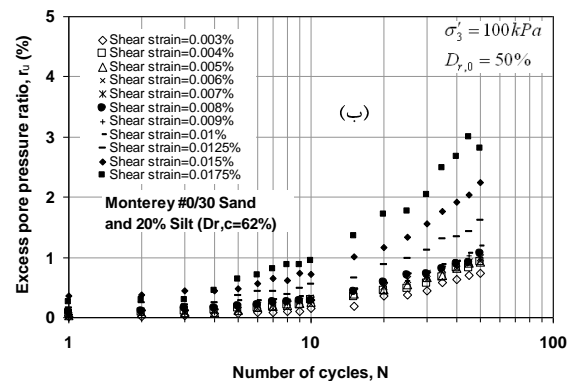
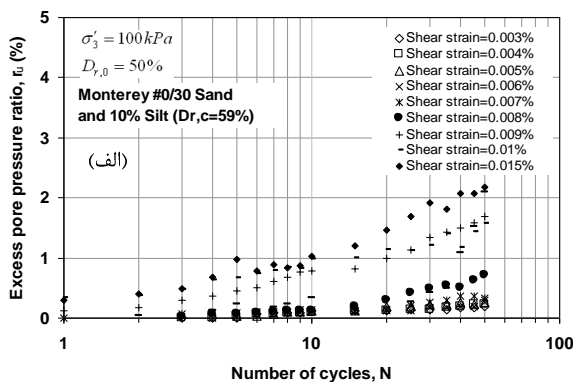
ماسه‌های اشباع

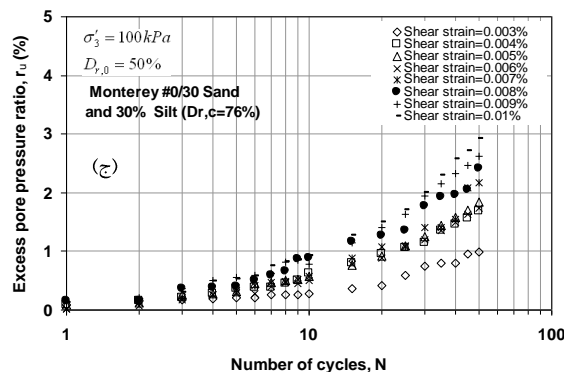
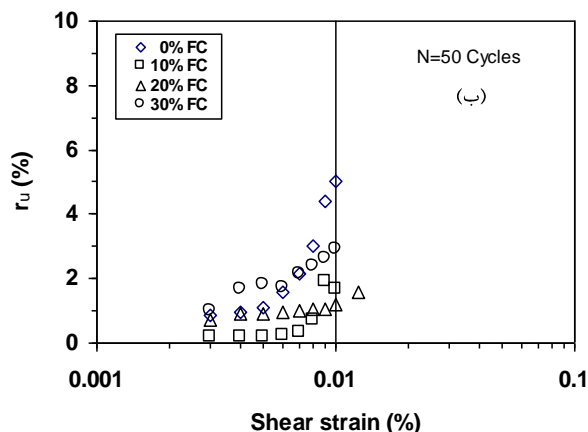
بر اساس معیار معرفی شده در این تحقیق برای بررسی اثر ریزدانه‌های غیرچسبنده بر کرنش برشی آستانه ماسه‌ها نیز مقدار کرنش متناظر با رسیدن اضافه فشار منفذی در نمونه به ۱ درصد در اثر ۱۰ سیکل بارگذاری بعنوان معیاری قابل قبول برای تعیین کرنش برشی آستانه استفاده شده است [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۸]. انتخاب سیکل دهم با توجه به تعداد سیکل‌های بارگذاری معادل یک زلزله با بزرگی ۷ انتخاب شده است.

شکل (۷) تغییرات اضافه فشار منفذی ایجاد شده در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری را برای ماسه #0/30 Monterey حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد لای Sil-Co-Sil 52 نشان می‌دهد. این نتایج از آزمایش‌های سیکلی کنترل کرنش انجام شده در کرنش‌های کوچک، به منظور تعیین کرنش برشی آستانه، بدست آمده است.

همچنین شکل‌های (۸) اضافه فشار منفذی اندازه‌گیری شده در انتهای سیکل‌های بارگذاری ۱۰ام و ۵۰ام را در سطوح مختلف کرنش‌های کوچک نشان می‌دهد ($\gamma < 0.2\%$ درصد). نتایج نشان می‌دهند، پاسخ فشار منفذی برای نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد لای در این سطح کرنش به یکدیگر شبیه است. همچنین پاسخ فشارهای منفذی متناظر با مقدار ریزدانه ۰ و ۳۰ درصد لای نیز در حدود یکدیگر می‌باشد.

با استفاده از معیار معرفی شده برای تعیین کرنش برشی آستانه و داده‌های موجود در شکل (۸) برای ۱۰ سیکل بارگذاری،





شکل (۷): نسبت اضافه فشار منفذی ایجاد شده در مقابل تعداد سیکل بارگذاری به منظور تعیین کرنش برشی آستانه الف-مخلوط ماسه Monterey #0/30 و ۱۰٪ لای ب- مخلوط ماسه Monterey #0/30 و ۲۰٪ لای ج- مخلوط ماسه Monterey #0/30 و ۳۰٪ لای

شکل (۸): تغییرات نسبت اضافه فشار منفذی در برابر کرنش برشی (کمتر از ۰/۱ درصد) در نمونه‌های مخلوط ماسه Monterey #0/30 و درصد‌های مختلف لای الف- در انتهای سیکل ۱۰ ب- در انتهای سیکل ۵۰

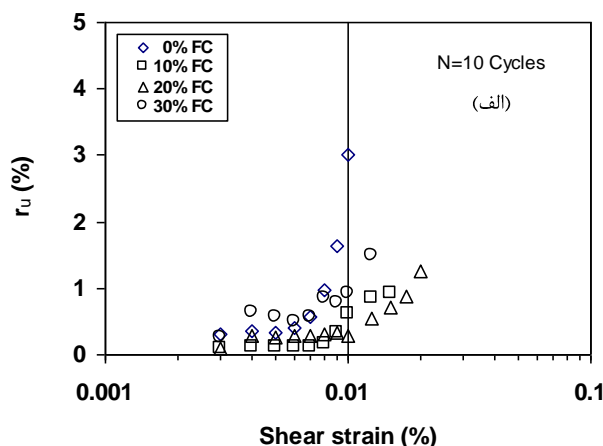
جدول (۴): کرنش برشی آستانه برای مخلوط ماسه Monterey #0/30 و درصد‌های مختلف لای Sil-Co-Sil 52

ریزدانه (%)	۳۰	۲۰	۱۰	۰	کرنش برشی آستانه (%)
	۰/۰۱	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱	

در این مطالعه اثر ریزدانه‌ها و دانه‌بندی بر رفتار نمونه‌های ماسه‌ای سست با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی مورد بررسی قرار گرفت. این تصاویر نشان دادند که در اثر قرار گرفتن حجم بالای ریزدانه، تماس دانه به دانه ماسه‌ها با یکدیگر از بین رفته با افزایش بیشتر ریزدانه ساختار خاک تبدیل به یک ساختار ریزدانه شده و دانه‌های ماسه در متن ریزدانه‌ها شناور می‌شوند. بنابراین ذرات لای، رفتار فشار منفذی نمونه را تغییر داده و باعث کاهش کرنش برشی آستانه در مقدار لای ۳۰ درصد می‌شود. جدول (۴) مقادیر کرنش برشی آستانه و اضافه فشار منفذی متناظر با آن را برای نمونه‌های ماسه‌ای لای‌دار در مقادیر لای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نشان می‌دهد. این جدول بر اساس نتایج حاصل از داده‌های نمودار (۷) و (۸) تدوین شده است.

با توجه به اینکه پدیده روانگرایی ارتباط مستقیم با اضافه فشار آب منفذی حین زلزله دارد، درخشندی و همکاران [۲۵] با انجام یکسری آزمایش‌های سه‌محوری کنترل کرنش بر روی ماسه‌های رس‌دار نشان دادند که اگر به یک ماسه تمیز با قابلیت روانگرایی، تا مقدار ۲۰ درصد رس اضافه شود در دامنه کرنش برشی سیکنی یکسان، اضافه فشار منفذی به میزانی بیش از ماسه تمیز افزایش خواهد یافت در حالیکه اگر میزان رس به ۳۰ درصد برسد اضافه فشار منفذی به صورت قابل ملاحظه‌ای نسبت به ماسه تمیز کاهش می‌یابد. این مسأله نشان می‌دهد در صورتیکه برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی ماسه‌های رس‌دار که تا ۲۰ درصد ریزدانه رسی دارند از معیارهای متداول بکارگرفته شده در ماسه‌های تمیز و یا ماسه‌های لای‌دار استفاده شود نتیجه ارزیابی در جهت خلاف اطمینان خواهد بود و برعکس اگر میزان رس اضافه شده به بیش از ۳۰ درصد برسد نمونه رفتار تحرک سیکنی از خود نشان داده و فشار آب منفذی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین در صورتیکه بمنظور بهسازی خاک بمیزان بیش از ۳۰ درصد رس اضافه شود از ایجاد روانگرایی جریانی جلوگیری شده لیکن متناسب با درصد افزایش اضافه فشار آب منفذی، افزایش نشست در خاک را بدنبال خواهد داشت.

شکل (الف): Scatter plot showing the relationship between Shear strain (%) and Excess pore pressure ratio, r_u (%) for N=10 Cycles. The plot shows data points for four different FC levels: 0% FC (diamonds), 10% FC (squares), 20% FC (triangles), and 30% FC (circles). The x-axis is logarithmic, ranging from 0.001 to 0.1. The y-axis ranges from 0 to 5. A vertical line is drawn at approximately 0.01% shear strain.



۴- نتیجه

شده از میکروسکوپ الکترونیکی نشان می‌دهد. بنابراین مقدار کرنش برشی آستانه نمونه به مقدار $0/01$ درصد کاهش می‌یابد که این مقدار برابر کرنش برشی نمونه ماسه تمیز می‌باشد. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت افزایش ریزدانه‌های غیرچسبنده تا حدود 30 درصد بدلیل ماهیت غیرچسبنده بودن ماسه و لای نمی‌تواند بطور معنی داری کرنش برشی آستانه مخلوط‌های ماسه-لای را نسبت به ماسه تمیز تغییر دهد. درحالیکه در صورت وجود ریزدانه‌های چسبنده در مقدار ریزدانه 30 درصد بدلیل غالب شدن بافت رس در نمونه کرنش برشی آستانه به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۵- تقدیر و تشکر

از گروه ژئوتکنیک دانشگاه تگزاس (آستین) به خاطر فراهم ساختن تسهیلات آزمایشگاهی قدردانی و سپاسگذاری می‌شود. همچنین از راهنمایی‌های ارزنده خانم دکتر Ellen M Rathje صمیمانه تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

۶- مراجع

- [۱] Drenvich, V.P., Richart, F.E. JR., "Dynamic prestraining of dry sand", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division (ASCE), Vol. 96, No. 2, pp. 453- 469, 1970.
- [۲] Anderson, D.G., Richart F.E., JR., "Effects of straining on shear modulus of clays", Journal of Geotechnical Engineering Division (ASCE), Vol.102, No. 9, pp. 975- 987, 1976.
- [۳] Dobry, R., Ladd R., "Discussion of Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes by Seed HB and Liquefaction potential: science versus practice by Peck RB", Journal of Geotechnical Engineering Division (ASCE), Vol. 106, No. 6, pp. 720- 724, 1980.
- [۴] Dobry, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R.M., and Powell, D., "Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method", National Bureau of Standards Building. Sci. Series 138, Washington, D.C., 1982.
- [۵] Ladd, R. S., Dobry, R., Dutko, P., Yokel, F. Y., and Chung, R.M., "Pore-water pressure buildup in clean sands because of cyclic straining", Geotechnical Testing Journal, Vol. 12, Issue.1, pp. 77- 86, 1989.
- [۶] Stoll R.D., Kald, L., "Threshold of dilation under cyclic loading", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. 10, pp. 1174- 1178, 1977.

اثر ریزدانه‌ها بر خصوصیات مختلف دینامیکی ماسه‌های اشباع حائز اهمیت است. یکی از این خصوصیات کرنش برشی آستانه می‌باشد. در این تحقیق معیار یک درصدی اضافه فشار منفذی در اثر اعمال بار سیکنلی در سیکل دهم بعنوان یک معیار در تعیین کرنش برشی آستانه تعیین گردید. نتایج حاصل از آزمایش‌های سه محوری سیکنلی کنترل کرنش انجام شده در محدوده کرنش‌های برشی کوچک $\gamma = 0/003$ درصد نشان می‌دهد که وجود ریزدانه‌های با چسبندگی پائین ($PI=15$) تا حدود 20 درصد وزنی باعث ایجاد کرنش برشی آستانه‌ای در حدود $\gamma_t = 0/006 \sim 0/008$ درصد می‌شود. با افزایش مقدار کاتولینیت به 30 درصد، کرنش برشی آستانه به میزان قابل ملاحظه‌ای در حدود $\gamma_t = 0/025$ درصد افزایش می‌یابد که مؤید غلبه بافت ریزدانه بر ماتریس خاک و کنترل رفتار خاک توسط بافت کاتولینیت در مقادیر ریزدانه بالا ($FC = 30\%$) می‌باشد. بنابراین رفتار نمونه هم اکنون مانند رفتار نمونه کاتولینیتی می‌باشد که دانه‌های ماسه در متن ذرات کاتولینیت شناور می‌باشند و این رفتار متناظر با افزایش نسبت تخلخل اسکلت ماسه‌ای از نسبت تخلخل حداکثر ماسه تمیز می‌باشد ($e_{s,c} > e_{max}$). همچنین آزمایش‌های سه‌محوری سیکنلی مشابهی بر روی نمونه‌هایی ماسه‌ای حاوی ریزدانه‌های غیر چسبنده لای انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان دهنده افزایش کرنش برشی آستانه در مقادیر لای 10 و 20 درصد می‌باشد که در این مطالعه برابر $\gamma_t = 0/015 \sim 0/018$ درصد بدست آمده است. مقدار کرنش برشی آستانه برای نمونه‌های ماسه‌ای تمیز و حاوی 30 درصد ریزدانه لای، در حدود $\gamma_t = 0/01$ درصد تعیین شده است. دلیل افزایش کرنش برشی آستانه برای مقادیر 10 و 20 درصد لای (در مقایسه با درصدهای مشابه ریزدانه‌های رسی) نسبت به ماسه تمیز آن است که ریزدانه‌های لای مورد استفاده فاقد هر گونه خواص خمیری می‌باشند. افزایش لای به مقدار کم تا حدود 20 درصد، به ورود این ریزدانه‌ها در بین دانه‌های ماسه که در تماس با یکدیگر هستند کمک می‌کند که این امر باعث کاهش نسبت تخلخل نمونه و در نتیجه افزایش کرنش برشی آستانه می‌شود. با افزایش درصد لای به 30 درصد رفته رفته تماس بین دانه‌های ماسه با یکدیگر با افزایش درصد لای از بین رفته و ماتریس غالب لای بر نمونه حاکم می‌گردد. در این حالت نمونه رفتار یک نمونه لای را نشان می‌دهد که دانه‌های ماسه نقش تسلیح کننده را در بین ذرات لای ایفا می‌کنند. تحقیقات انجام شده در ادبیات فنی درستی این رفتار را به وضوح از طریق مشاهدات انجام شده با استفاده از تصاویر تهیه

- loading”, Report No. UCB/GT/91- 08, University of California, Berkeley, 1991.
- Polito, C.P., “The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils”, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999. [۱۷]
- ASTM D854, “Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer”, 2000. [۱۸]
- ASTM D4318-05, “Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils”, 2000. [۱۹]
- ASTM D 4253, “Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table”, 2000. [۲۰]
- ASTM D 4254, “Standard test methods for minimum index density and unit weight of and calculation of relative density”, 2000. [۲۱]
- ASTM D 1557, “Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort”, 2000. [۲۲]
- Youd, T.L., “Compaction of sands by repeated shear straining”, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE), Vol. 98, No. SM, pp. 709- 725, 1972. [۲۳]
- Pitman, T.D., Robertson, P.K., and Segoo D.C., “Influence of fines on the collapse of loose sands”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No. 5, pp. 728– 739, 1994. [۲۴]
- Derakhshandi M., Rathje EM., Hazirbaba K., and Mirhosseini, S.M., “The effect of plastic fines on pore pressure generation characteristics in saturated sands”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 28, No. 5, pp. 376- 386, 2008. [۲۵]
- Ishihara K., “Strength of cohesive soils under transient and cyclic loading conditions”, State-of-the-Art in Earthquake Engineering, Proceeding, 7th World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, pp. 154- 169, 1981. [۷]
- Vucetic, M., “Cyclic threshold shear strains in soil”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.120, No. 12, pp. 2208– 2228, 1994. [۸]
- Hsu, C.C., Vucetic, M., “Threshold shear strain for cyclic pore water pressure in cohesive soils”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 32, No.10, pp. 1325- 1335, 2006. [۹]
- Hazirbaba, K., Rathje, E.M., “Pore pressure generation of silty sands due to induced cyclic shear strains”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 135, No. 12, pp. 1892- 1905, 2009. [۱۰]
- Tabata, K., Vucetic, M., “Threshold shear strain for cyclic degradation of three clays”, Proceedings of the 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, On CD-ROM, Session 1a, Paper No. 1.15a, San Diego, California, Publisher: Missouri University of Science and Technology, 12 pages, 2010. [۱۱]
- Mortezaie, A., and Vucetic, M., “Small-strain cyclic testing with standard NGI simple shear device”, Geotechnical Testing Journal (ASTM), Vol. 45, Issue. 6, pp. 935- 948, 2012. [۱۲]
- Ladd, R.S., “Preparing test specimens using undercompaction”, Geotechnical Testing Journal, Vol.1, No. 1, pp. 16- 23, 1978. [۱۳]
- Erten, D., “Effect of fines content on liquefaction potential of sands”, Ph.D. Dissertation, Rutgers the State University of New Jersey– New Brunswick, U.M.I., 1994. [۱۴]
- Finn, W.D.L., Pickering, D.J. and Bransby, P.L., “Sand liquefaction in triaxial and simple shear tests”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No. SM4, pp. 639- 659, 1971. [۱۵]
- Boulanger, R.W., Seed, R.B., Chan, C.K., Seed, H.B., Sousa J., “Liquefaction behavior of saturated sands under uni-directional and bi-directional monotonic and cyclic simple shear [۱۶]