

بررسی رفتار ترمومکانیکی مخلوط‌های ماسه- بنتونیت سیمانی و غیر سیمانی

سیدنیما میرمحمدی^۱، آتنا شیراسب^۲ و امیر حمیدی^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

^۲ دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

^۳ استاد مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

(دریافت: ۹۴/۱۰/۲۶، پذیرش: ۹۷/۶/۳۱، نشر آنلاین: ۹۷/۶/۳۱)

چکیده

تاکنون تحقیقات زیادی به منظور تعیین رفتار ترمومکانیک خاک‌های ریزدانه صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که قرار گرفتن رس اشباع در دماهای بالا تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد در طولانی مدت باعث تغییر در فشار آب حفره‌ای، مقاومت برشی، رفتار حالت بحرانی خاک و دیگر موارد می‌شود. معمولاً از خاک‌های چسبنده برای پوشاندن مدافن زباله‌های هسته‌ای در اعماق زیاد زمین استفاده می‌کنند. تأثیر افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد بر روی رفتار وابسته به زمان خاک‌های رسی و امکان واکنش‌های شیمیایی و ایجاد ساختار در دراز مدت، ضرورت مطالعه در مورد تأثیر حرارت روی خاک‌های رسی دارای ساختار را نشان می‌دهد. در این تحقیق برای بررسی خصوصیات مخلوط ماسه- بنتونیت غیرسیمانی و سیمانی از قبیل فشار آب حفره‌ای، مقاومت برشی و رفتار در حالت بحرانی، بر روی نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی (۳ درصد سیمان) در دماها و فشارهای دورگیر مختلف، آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی نشده، با استفاده از سلول سه محوری حرارتی اصلاح شده انجام شد. سرعت بخشیدن حرارت به تحکیم خاک، افزایش شیب خط تحکیم ایزوتروپ و کاهش تخلخل با افزایش دما در فشار ثابت از نتایج به دست آمده در مطالعه رفتار تغییر حجمی نمونه‌ها با افزایش دماست. آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده، افزایش مقاومت برشی و کاهش فشار آب حفره‌ای اضافی در نمونه‌های سیمانی و غیرسیمانی با افزایش دما مشاهده گردیده است. همچنین افزایش و کاهش به ترتیب چسبندگی مؤثر و زاویه اصطکاک داخلی مؤثر و کاهش و افزایش شیب خط حالت بحرانی به ترتیب برای نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی با افزایش دمای مرحله تحکیم از نتایج تأثیر دما بر پارامترهای مؤثر خاک در این تحقیق می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: رفتار ترمومکانیک، مخلوط ماسه- بنتونیت اشباع، مقاومت برشی، فشار آب حفره‌ای، آزمایش سه‌محوری، خاک سیمانی.

۱- مقدمه

هستند دارای شرایط نگهداری بسیار سخت و پر هزینه هستند. یکی از روش‌های نگهداری این پسماندها، دفن در اعماق زمین با ملاحظات زیست محیطی می‌باشد. به منظور جلوگیری از انتشار مواد رادیوکتیو، ساختارهای ضخیم رسی که نفوذپذیری پایینی دارند به عنوان لایه بافر برای قرارگیری در اطراف پسماندهای هسته‌ای پیشنهاد شده‌اند. رفتار ترمومکانیک رس‌ها در دو دهه گذشته با افزایش تمایل به استفاده از خاک‌های رسی در مدفن‌های زباله‌های هسته‌ای بررسی شده است. تعداد زیادی از محققین رفتار ترمومکانیکی رس‌ها را برای ارزیابی عملکرد آن‌ها به عنوان بافر مدفن‌های زباله‌های هسته‌ای مطالعه کرده‌اند (Towhata و همکاران، ۱۹۹۳؛ Lingnau و همکاران، ۱۹۹۵؛ Tanaka و همکاران، ۱۹۹۷؛ Laloui و Cekerevac، ۲۰۰۴؛ Shariatmadari

در تأمین انرژی‌های اساسی، استفاده از ظرفیت‌های هسته‌ای جایگزین منابع طبیعی گردیده است، زباله‌های هسته‌ای در سه سطح تولید می‌شوند. زباله‌های سطح پایین (LLW)^۱ از نوع بی-خطرترین مواد رادیوکتیو هستند که مدت زمان بسیار کوتاهی توانایی تشعشع دارند. لباس کارکنان درگیر با این مواد، ابزار و تجهیزات کاری آنها، فیلترها از این دسته مواد هستند و معمولاً در ترانسه‌هایی دفن می‌شوند. زباله‌های سطح متوسط (ILW)^۲ شامل پساب‌های شیمیایی، روکش فلزی سوخت‌ها و بسیاری از مواد زائد نیروگاه‌های اتمی هستند. این نوع مواد دارای عمر کوتاه تشعشع هستند اما لازم است که در مکان‌های مخصوص انبار گردند. زباله-های سطح بالا (HLW)^۳ که باقی‌مانده سوخت هسته‌ای راکتورها

3. High Level Waste

1. Low Level Waste
2. Intermediate Level Waste

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۱-۸۸۸۳۰۸۹۱

آدرس ایمیل سایر نویسندگان: nima.mirmohammadi@yahoo.com (س. ن. میرمحمدی)، std_shirasb@khu.ac.ir (آ. شیراسب)، hamidi@khu.ac.ir (ا. حمیدی).

و Saeidijam، ۲۰۱۱؛ Cui و Tang، ۲۰۱۳؛ Di Donna و همکاران، ۲۰۱۵).

در حال حاضر مخلوط ماسه- بنتونیت مناسبترین ماده به عنوان بافر زباله‌های رادیواکتیویته سطح بالای مدفون در اعماق زمین هستند (Mitchell، ۱۹۶۴). ترکیب بنتونیت- ماسه به علت توانایی بالای بنتونیت در جذب یون‌های رادیواکتیویته آزاد شده از محفظه‌های زباله، بالا بودن ظرفیت باربری ماسه برای نگهداری کانتینرها و به حداقل رساندن نشست‌ها (خزش)، از رایج‌ترین مصالح بافر در مدفن زباله‌های هسته‌ای در کانادا، سوئیس، فرانسه و بلژیک به شمار می‌رود (Dixon و همکاران، ۱۹۸۵). همچنین تحقیقاتی نشان داده‌اند که وجود بنتونیت سبب کاهش ضریب نفوذ هیدرولیکی و ضرایب انتشار مولکولی مخلوط گردیده است که این امر در راستای جلوگیری از انتشار مواد رادیواکتیویته در رسیدن به سطح آب زیرزمینی مؤثر است (Aliashrafi و Badv، ۲۰۱۵). به دلیل حرارت بالای زباله‌های هسته‌ای تولید شده از راکتورها، لایه‌های بافر در مدت زمان طولانی در معرض حرارت بالا قرار می‌گیرند و خصوصیات هیدرولیکی و مکانیکی آن‌ها تغییر می‌کند. مطالعه میکروسکوپی انجام شده بر روی بنتونیت اشباع عمل‌آوری شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ماه، نشان داده است که بنتونیت عمل‌آوری شده در دمای بالا دارای شبکه‌های اسمکتیت^۴ متراکم‌تر بوده که دارای فضای خالی بزرگتری نسبت به بنتونیت عادی می‌باشد (Güven و Pusch، ۱۹۹۰). بر این اساس، در تحقیق حاضر فرض شده که مخلوط ماسه بنتونیت مورد استفاده به‌عنوان بافر، در زمان‌های طولانی و تحت دماهای بالا، رفتاری مشابه خاک‌های دارای ساختار یا سیمانی شده را نشان می‌دهد. رفتار نمونه‌های دارای ساختار عموماً تردتر و شکننده‌تر از نمونه‌های فاقد ساختار بوده و نقطه اوج مشخصی در منحنی تنش- کرنش آنها قابل تعیین و مشاهده است (Haeri و همکاران، ۲۰۰۵؛ Hamidi و Haeri، ۲۰۰۵؛ Hamidi و همکاران، ۲۰۰۶؛ Hamidi و Haeri، ۲۰۰۸؛ Hamidi و Hooresfand، ۲۰۱۳؛ Amini و Hamidi، ۲۰۱۴). تحقیقات قبلی ذکر شده در زمینه بررسی رفتار لایه‌های بافر نیز، عموماً بر بررسی رفتار این خاک‌ها در شرایط بدون ساختار متمرکز بوده است.

مطالعات نشان داده‌اند که در رس‌های عادی تحکیم یافته کرنش حجمی انقباضی (Abuel-Naga و همکاران، ۲۰۰۷؛ Kasama و همکاران، ۲۰۰۰) و در رس‌های بیش تحکیم یافته با افزایش OCR کرنش حجمی انقباضی کاهش یافته و به سمت انبساطی می‌رود (Kasama و همکاران، ۲۰۰۰؛ Cekerevac و Laloui، ۲۰۰۴). در مطالعاتی نشان داده شده است که چنانچه حرارت در فاز باربرداری اعمال شود کرنش حجمی انبساطی و

چنانچه حرارت در فاز بارگذاری مجدد اعمال شود کرنش حجمی انقباضی است (Kasama و همکاران، ۲۰۰۰).

در بررسی رفتار برشی خاک رس نشان داده شده است که در شرایط زهکشی شده در رس‌های عادی تحکیم یافته با افزایش دما، مقاومت برشی نمونه‌ها افزایش (Tanaka و همکاران، ۱۹۹۷؛ Abuel-Naga و همکاران، ۲۰۰۶) و در شرایط زهکشی نشده، مقاومت کاهش می‌یابد (Lingnau و همکاران، ۱۹۹۵)، همچنین با افزایش دما فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد (Lingnau و همکاران، ۱۹۹۵؛ Tanaka و همکاران، ۱۹۹۷؛ Hueckel و همکاران، ۱۹۹۲؛ Burghignoli و همکاران، ۲۰۰۰) و همچنین مطالعاتی کاهش نشان داده شده است (Abuel-Naga و همکاران، ۲۰۰۶). در نمونه‌های بیش تحکیم یافته در شرایط زهکشی نشده، با افزایش دما مقاومت افزایش (Marques، ۱۹۹۶؛ Tanaka و همکاران، ۱۹۹۷) و فشار آب حفره‌ای با افزایش دما افزایش، با ثابت ماندن دما کاهش و با کاهش دما نیز کاهش می‌یابد (Hueckel و همکاران، ۱۹۹۲؛ Burghignoli و همکاران، ۲۰۰۰؛ Marques، ۱۹۹۶). همچنین نتایج تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که رس ساختار یافته دارای تنش تسلیم بیشتر نسبت به نمونه‌های عادی تحکیم یافته است (Locat و همکاران، ۱۹۹۶؛ Burland و همکاران، ۱۹۹۶).

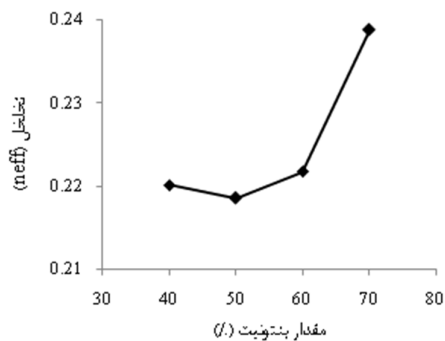
در این تحقیق سعی بر آن است که رفتار ترمومکانیکی مخلوط ماسه- بنتونیت اشباع و دارای ساختار، در دماها و فشارهای دورگیر مختلف طی آزمایش‌های سه‌محوری برای شبیه‌سازی لایه بافر به کار رفته در مدافن زباله‌های هسته‌ای مورد ارزیابی و مقایسه با نمونه‌های فاقد ساختار قرار گیرد. بدین منظور از سیمان‌تاسیون^۵ مصنوعی برای ایجاد ساختار در نمونه‌های مخلوط ماسه- بنتونیت استفاده گردیده است.

۲- تجهیزات آزمایش

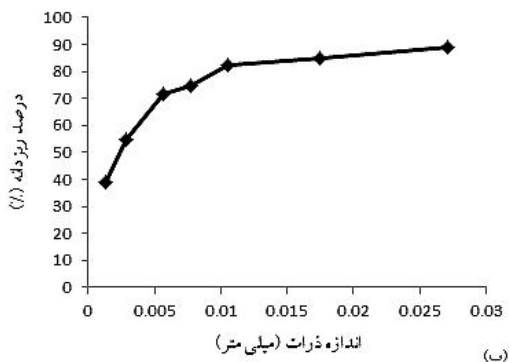
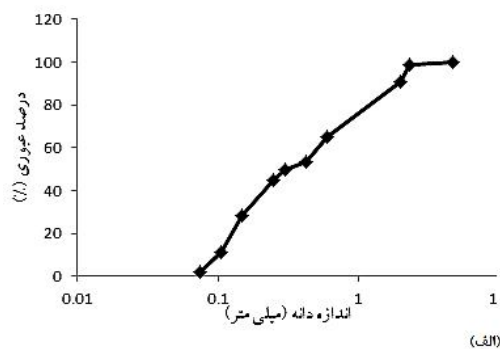
دستگاه سه‌محوری موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه خوارزمی به سلول حرارتی تجهیز گردیده است (شکل (۱)). سلول سه محوری فلزی دارای دو پنجره شیشه‌ای برای کنترل نمونه‌هاست. المان حرارتی به صورت مارپیچ دور نمونه برای ایجاد حرارت تا سقف ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نصب گردیده است و دما توسط ترموکوپل با دقت ± 0.1 درجه سانتی‌گراد که در بالای سلول نصب گردیده است کنترل می‌شود. دمای نمونه تحکیم شونده غیر مستقیم با حرارت دادن آب داخل سلول توسط المنت بالا می‌رود. همچنین برای نمایش و کنترل دما یک تابلوی برق برای این دستگاه تعبیه شده است. نرخ افزایش دمای المان تعبیه شده در سلول دستگاه، $1/17$ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه می‌باشد.

5. Cementation

4. Smectite



شکل ۲- تخلخل مخلوط‌های ماسه- بنتونیت با نسبت‌های ترکیبی مختلف



شکل ۳- الف) منحنی دانه‌بندی ماسه سیلیسی، ب) نمودار هیدرومتری بنتونیت

بنتونیت مورد استفاده از شرکت درین کاشان تهیه گردیده است و حد روانی، شاخص خمیری و شاخص تورم بنتونیت طبق استانداردهای ASTM D4318-87 برای آزمایش حدود اتربرگ و ASTM D2487-93 برای آزمایش شاخص تورم به ترتیب ۱۷۹، ۱۲۵ و ۳۳۳ درصد به دست آمده اند و طبق سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS)، CH نامیده می‌شود. ماسه سیلیسی مورد استفاده از شرکت تاوان سیلیس گرمسار تهیه گردیده است و طبق سیستم طبقه‌بندی متحد، SP نامیده می‌شود. چگالی ویژه توده خاک (G_s)



شکل ۱- دستگاه سه‌محوری اصلاح شده: الف) نمای کلی دستگاه، ب) تابلوی برق دستگاه، ج) المنت حلقه‌ای و دماسنج

۳- مواد و روش‌ها

در این تحقیق خاک مورد آزمایش، مخلوط ماسه- بنتونیت با نسبت ترکیبی ۱:۱ می‌باشد. منحنی دانه‌بندی ماسه سیلیسی و منحنی هیدرومتری بنتونیت (شامل بیش از ۸۰ درصد مونت- موریلونیت) استفاده شده در ساخت نمونه در شکل (۲) مشخص می‌باشد. علت انتخاب مخلوط ماسه- بنتونیت با نسبت ترکیبی ۱:۱ این است که تخلخل این نسبت ترکیبی از مخلوط ماسه- بنتونیت حداقل مقدار را در بین تخلخل ترکیبات مختلف دارد که با توجه به تحقیقات اخیر هرچه تخلخل مخلوط مورد استفاده به عنوان بافر مدفن‌های زباله‌های هسته‌ای کمتر باشد، نشت تشعشعات رادیواکتیو از مدفن‌ها کمتر می‌شود. در این تحقیق تخلخل ترکیبات مختلف مخلوط ماسه- بنتونیت طبق رابطه (۱) محاسبه شده و در شکل (۳) به تصویر کشیده شده است Dixon و همکاران، (۱۹۸۵). حداقل مقدار تخلخل برای مخلوط ماسه- بنتونیت با نسبت ترکیبی ۱:۱ به دست آمد.

$$n_{eff} = 1 - \rho_d \times \left(\frac{1}{G_{s(mix)}} + \frac{0.15 \times p}{1 + p} \right) \quad (1)$$

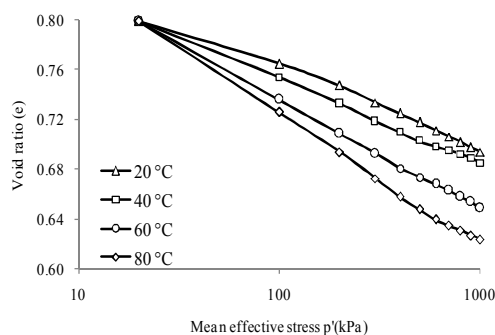
در رابطه (۱) پارامترهای ρ_d و $G_{s(mix)}$ به ترتیب معرف چگالی خشک حداکثر، چگالی ویژه مخلوط ماسه- بنتونیت و نسبت جرمی بنتونیت به ماسه می‌باشند.

تخلخل (e) برحسب تنش مؤثر میانگین ($p' = \frac{2\sigma'_3 + \sigma'_1}{3}$) آورده شده است. برای اطمینان از صحت نتایج، تمامی آزمایش‌ها بر نمونه‌های سیمانی و غیرسیمانی دوبار تکرار گردیده‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی نشده به صورت نمودارهای تغییر تخلخل بر حسب فشار دورگیر مقاومت برشی ($q = \sigma_1 - \sigma_3$)، فشار آب حفره‌ای (Δu) در برابر کرنش محوری (ϵ_a) و مسیرهای تنش کل و مؤثر برای نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی در دماهای عمل‌آوری و فشارهای تحکیم مختلف به دست آمده‌اند.

منحنی‌های تحکیم ایزوتروپ برای خاک‌های عادی تحکیم یافته در فضای $e - \log p'$ در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در تنش مؤثر میانگین ثابت و دماهای بالاتر، نسبت‌های تخلخل کمتری به دست آمده است. نمونه‌های عادی تحکیم یافته با نسبت بیش تحکیمی برابر یک ($OCR=1$) هستند، بنابراین رفتار تغییر حجم انقباضی حتی در دماهای بالا هم دیده می‌شود. همچنین این نتایج توسط Tanaka و همکاران (۱۹۹۷) برای خاک رس ایلیتی و Abuel-Naga و همکاران (۲۰۰۶) برای رس نرم بانکوک گزارش شده است. شیب خط تحکیم ایزوتروپیک در فضای $e - \log p'$ وابسته به دما بوده و تغییرات بیشتر تخلخل در دماهای بالاتر مشاهده شده است.

شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) نمودارهای مقاومت برشی (q) در برابر کرنش محوری (ϵ_a) را به ترتیب برای نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی نشان می‌دهد. با افزایش دمای تحکیم، مقاومت برشی نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی در برش زهکشی نشده افزایش می‌یابد. دلیل این مهم، افزایش درجه تحکیم نمونه‌ها با افزایش دما در این مرحله و کاهش نسبت تخلخل بعد از تحکیم بوده که در شکل (۴) نشان داده شده است.

افزایش مقاومت برشی با افزایش دما در فشارهای دورگیر بیشتر در نمونه‌های سیمانی به مراتب بیشتر از فشارهای دورگیر کمتر است. به طوری که در فشار دورگیر پایین‌تر این افزایش ۱۵ درصد و در فشار دورگیر بالاتر ۲۵ درصد می‌باشد.



شکل ۴- تغییرات تخلخل نمونه غیرسیمانی در دمای بالا

برای بنتونیت و ماسه به ترتیب ۲/۵۷ و ۲/۶۸ می‌باشد. همچنین حد روانی، شاخص خمیری و چگالی خشک حداکثر مخلوط ماسه-بنتونیت ۱:۱ طبق استاندارد ASTM D698-78 به ترتیب ۸۳ و ۵۷ درصد و ۱۷۳۳ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین گردید. آزمایش‌های شاخص برای تعیین خواص مصالح در دمای محیط (معادل ۲۵ درجه سانتیگراد) انجام گردیده است.

در گروه اول آزمایش‌ها، برای مطالعه رفتار تغییر حجمی مخلوط ماسه-بنتونیت در دمای بالا، ۴ نمونه غیرسیمانی مخلوط ماسه-بنتونیت با ۲۱/۴ درصد رطوبت در ۸ لایه تا رسیدن به درصد تراکم ۹۵٪ کوبیده شدند و پس از ساخت، عملیات اشباع-سازی صورت پذیرفته و نمونه‌ها اشباع گردیدند. پس از اشباع سازی، دمای نمونه تا یکی از دماهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی-گراد بالا برده شده است و تا انتهای تحکیم ثابت نگهداشته شده است. افزایش فشار دورگیر تا ۱۰۰۰ کیلوپاسکال به صورت پلکانی صورت گرفته است و تحکیم حرارتی نمونه‌ها انجام گردید. تحکیم حرارتی نمونه‌ها تا رسیدن به تغییر حجم صفر ادامه یافت.

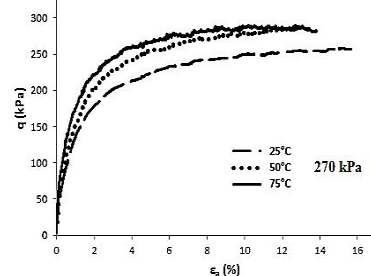
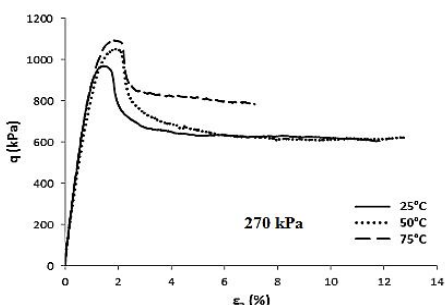
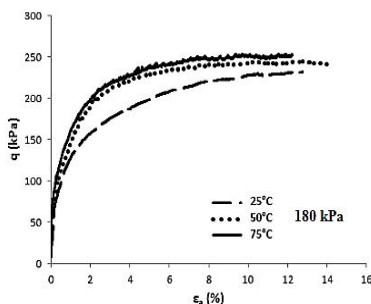
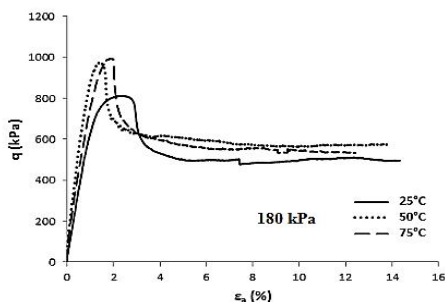
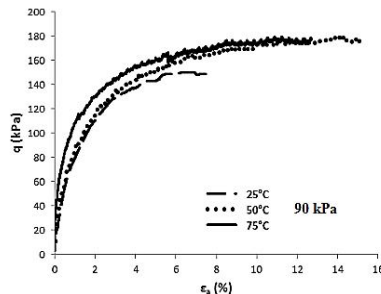
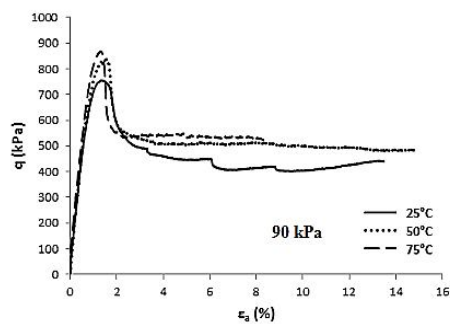
در گروه دوم آزمایش‌ها، برای مطالعه رفتار برشی نمونه‌ها ۹ نمونه غیر سیمانی مخلوط ماسه-بنتونیت به روش بالا ساخته شد و پس از ساخت، عملیات اشباع سازی صورت پذیرفته و نمونه‌ها اشباع گردیدند.

در گروه سوم، برای ۹ نمونه سیمانی مخلوط ماسه-بنتونیت با ۳ درصد سیمان مخلوط گردیدند و با ۲۱/۴ درصد رطوبت در ۸ لایه تا رسیدن به درصد تراکم ۹۵٪ کوبیده شدند و پس از ساخت، عمل‌آوری به مدت یک هفته صورت گرفته است. پس از عمل‌آوری، عملیات اشباع‌سازی صورت پذیرفته و نمونه‌ها اشباع شدند. پس از اشباع سازی، نمونه‌های گروه دوم و سوم در دماهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد و فشارهای دورگیر ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ کیلوپاسکال تحکیم گردیدند. تحکیم حرارتی نمونه‌ها تا رسیدن به تغییر حجم صفر ادامه یافت. دمای نمونه تا انتهای تحکیم ثابت نگهداشته شده است. زمان تحکیم از ۲ ساعت و ۱۵ دقیقه تا حداکثر ۴ ساعت در دماها و فشار دورگیرهای مختلف متفاوت بوده است.

آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی نشده طبق استاندارد ASTM D4767-95 بر روی نمونه انجام شد. تنش محوری اضافی در شرایط زهکشی نشده با سرعت ۰/۱۴ میلی‌متر بر دقیقه اعمال گردید و تغییرات فشار آب حفره‌ای نیز ثبت شد. برای بررسی اثر تکرارپذیری، تعدادی از آزمایش‌ها تکرار گردید تا از صحت نتایج به دست آمده اطمینان حاصل شود.

۴- شرح و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

نتایج حاصل از آزمایش‌های مطالعه رفتار تغییر حجمی مخلوط ماسه-بنتونیت در تحکیم حرارتی به صورت تغییرات



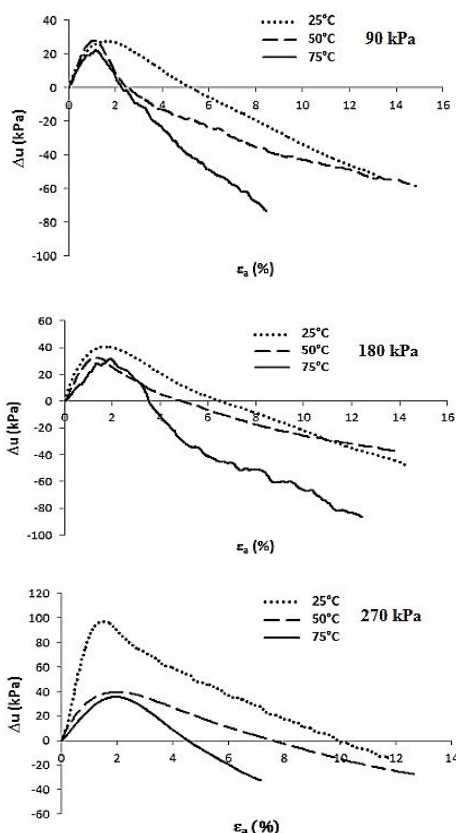
شکل ۵-الف- نمودارهای مقاومت برشی- کرنش محوری نمونه‌های غیرسیمانی در فشار دورگیر و دماهای مختلف

شکل ۵-ب- نمودارهای تنش محوری اضافی- کرنش محوری نمونه‌های سیمانی در فشار دورگیر و دماهای مختلف

افزایش فشار آب حفره‌ای (Δu) نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی همان‌طور که به ترتیب در شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) نشان داده شده‌اند، با افزایش دمای مرحله تحکیم کاهش می‌یابد. رفتار بیش-تحکیمی به‌وجود آمده در نمونه‌های سیمانی و غیرسیمانی در مرحله تحکیم حرارتی باعث کمتر شدن فشار آب حفره‌ای نمونه‌ها در مرحله برش زهکشی‌نشده می‌شود.

طبق شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) مشخص می‌شود که فشار آب حفره‌ای در نمونه‌های غیرسیمانی روند افزایشی داشته و با افزایش دما، این کاهش بیشتر و تا ۵۰٪ کاهش می‌یابد. در صورتی که فشار آب حفره‌ای نمونه‌های سیمانی، در ابتدا افزایش یافته و بعد از آن سیری نزولی تا رسیدن به مقادیر منفی را طی می‌کند.

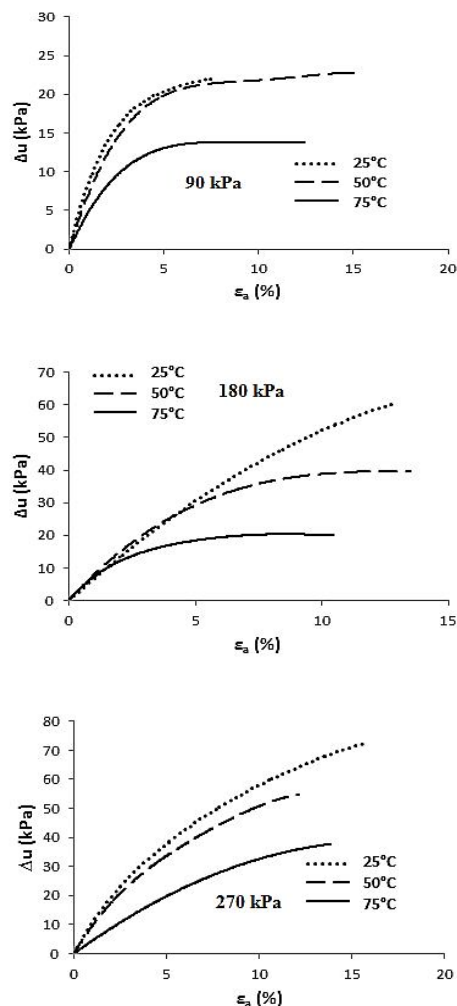
با توجه به شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) مشخص می‌شود که تنش محوری اضافی نمونه‌های غیرسیمانی تا انتهای برش زهکشی-نشده روند افزایشی داشته ولی در نمودارهای مقاومت برشی نمونه‌های سیمانی وجود یک مقاومت اوج، نشانه‌ای از ایجاد ساختار در این نمونه‌ها می‌باشد. همچنین در نمونه‌های سیمانی، مقاومت برشی اوج در کرنش‌های کمتر دیده می‌شود که این امر در فشارهای دورگیر پایین، مشهودتر می‌باشد. در فشار دورگیر ۲۷۰ کیلوپاسکال، مقاومت فشاری اوج برای هر سه دما در کرنش‌های کم اتفاق می‌افتد. نتایج به دست آمده برای مقاومت برشی در نمونه‌های غیر سیمانی با نتایج Abuel-Naga و همکاران (۲۰۰۷)، Tanaka و همکاران (۱۹۹۷) برای رس عادی تحکیم یافته و Marques (۱۹۹۶) برای رس پیش تحکیم یافته همسو است. در نمونه‌های سیمانی روند کلی افزایش نسبت به نمونه‌های غیرسیمانی با نتایج Uddin و همکاران (۱۹۹۷) بر روی رس سیمانته نرم بانکوک و Horpibulsuk و همکاران (۲۰۰۹) برای رس سیمانته در دمای محیط تطابق دارد Hamidi و همکاران، (۲۰۱۷).



شکل ۶-ب) نمودارهای فشار حفره‌ای- کرنش محوری نمونه‌های سیمانی در فشار دورگیر و دماهای مختلف

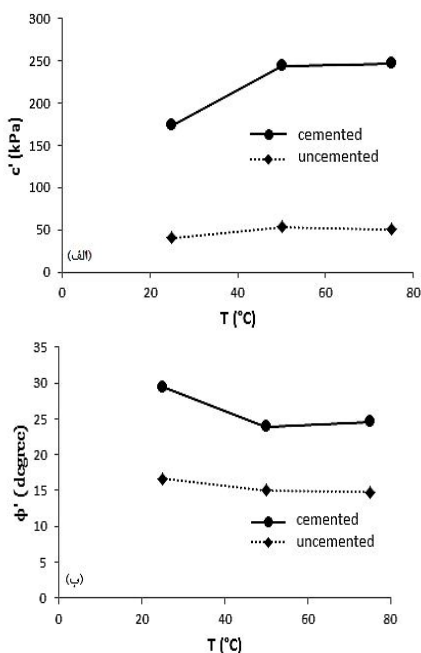
نمونه‌ای از مسیر تنش مؤثر نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی در فشار دورگیر ۲۷۰ کیلوپاسکال و در دماهای تحکیم ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) آمده است. طبق این شکل‌ها نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش دمای مرحله تحکیم، مسیر تنش مؤثر متمایل به مسیر تنش کل می‌شود که علت آن کاهش فشار آب حفره‌ای اضافی حین برش است. در نمونه‌های سیمانی این تمایل با توجه به منفی شدن فشار آب حفره‌ای نسبت به نمونه‌های غیرسیمانی بیشتر است.

با داشتن مقاومت برشی نمونه‌ها برای هر دما در فشارهای دورگیر ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ کیلوپاسکال می‌توان دوایر موهر مربوط به سه آزمایش و پوش گسیختگی را ترسیم کرده و چسبندگی و زاویه اصطکاک نمونه‌های سیمانی و غیرسیمانی را در دماهای مختلف مقایسه نمود. افزایش دمای مرحله تحکیم نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی موجب افزایش ۳۰ و ۷۰ درصدی در چسبندگی مؤثر (c') در نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی و کاهش ۲۰ و ۴۰ درصدی در زاویه اصطکاک داخلی مؤثر (ϕ') می‌شود که در شکل (۸) این روند افزایشی برای چسبندگی مؤثر و کاهش زاویه اصطکاک داخلی مؤثر مشخص می‌باشد.

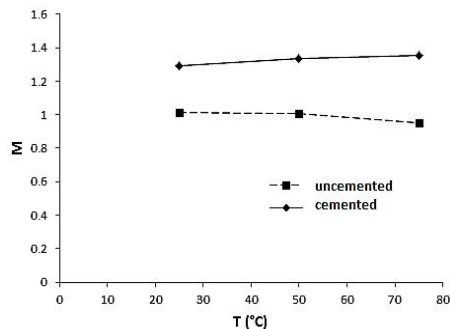


شکل ۶-الف) نمودارهای فشار حفره‌ای- کرنش محوری نمونه‌های غیرسیمانی در فشار دورگیر و دماهای مختلف

علت اصلی این امر رفتار نرم شونده نمونه‌های سیمانی نسبت به نمونه‌های غیرسیمانی حین آزمایش برش سه محوری است. در نمونه‌های سیمانی و غیرسیمانی همان‌طور که در منحنی‌های تنش محوری اضافی-کرنش محوری نیز دیده شد کاهش فشار آب حفره‌ای با افزایش دما در نمونه‌های با فشار دورگیر بالاتر، بیشتر بوده و در فشار دورگیر ۹۰ کیلوپاسکال، این کاهش کمتر است. نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر، با نتایج حاصل از نمونه‌های غیرسیمانی در آزمایش‌های Abuel-Naga و همکاران (۲۰۰۷) همسو است. برای نمونه‌های سیمانته نیز تغییرات فشار حفره‌ای در نمونه‌های سیمانی شده ماسه- بنتونیت با نتایج حائری و همکاران (۲۰۰۶) برای ماسه‌شن‌دار سیمانی شده و آزمایش‌های Baudet و Rios (۲۰۱۳) برای رس سیلت‌دار سیمانته و در یک راستا است.



شکل ۸- نمودار: الف) چسبندگی مؤثر، ب) زاویه اصطکاک داخلی مؤثر، در برابر دما برای نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی

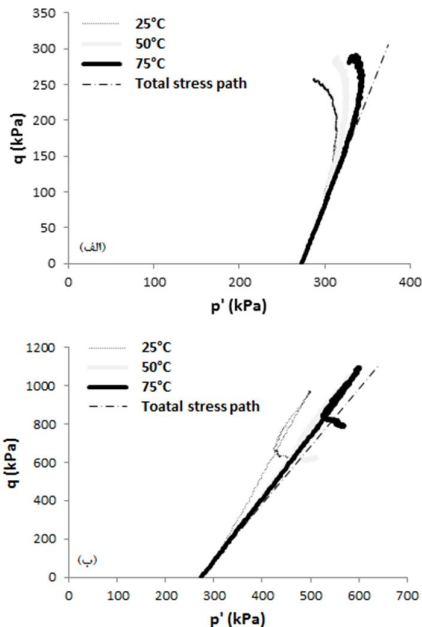


شکل ۹- شیب خطوط حالت بحرانی نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی در دماهای مختلف

برای بررسی بیشتر تأثیرات دما بر شیب خط حالت بحرانی، سطح تسلیم نمونه‌ها با مدل رفتاری Cam Clay شبیه‌سازی گردیده است. مدل رفتاری Cam Clay دارای سطح تسلیم با معادله زیر می‌باشد.

$$f = q^2 - M^2 [P'(P'_0 - P')] = 0 \quad (2)$$

در این رابطه، q تنش محوری اضافی، M شیب خط حالت بحرانی، P' تنش مؤثر میانگین و P'_0 تنش مؤثر میانگین اولیه نمونه است. سطوح تسلیم در هر فشار دورگیر و در دماهای مختلف (۲۵، ۵۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد) برای نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. بر این اساس، با افزایش دمای



شکل ۷- مسیر تنش مؤثر نمونه‌های الف) غیرسیمانی، ب) سیمانی در فشار ۲۷۰ کیلوپاسکال و دماهای مختلف

با توجه به شکل مشخص است که تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مؤثر نمونه‌های سیمانی بیشتر از نمونه‌های غیر سیمانی می‌باشد.

در نمودارهای مقاومت برشی- کرنش محوری در دماها و فشارهای دورگیر مختلف و برای نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی، q متناظر با آخرین مقدار کرنش محوری انتخاب شد و بر اساس آن، مقدار p' (تنش مؤثر) برای هر محاسبه گردید. لذا متناظر با سه فشار دورگیر مختلف ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ کیلوپاسکال، سه نقطه نظیر شرایط بحرانی در مختصات $q-p'$ در هر دما به دست آمد. با برازش خطی بین این نقاط و مبداء، خط حالت بحرانی رسم گردیده و شیب آن به دست آمده است. شکل (۹) شیب خطوط حالت بحرانی در دماهای مختلف برای نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی را نشان داده است. با توجه به شکل مشخص است که با افزایش دمای مرحله تحکیم، شیب خط حالت بحرانی برای نمونه‌های سیمانی ۱۰ درصد افزایش و برای نمونه‌های غیرسیمانی ۵ درصد کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد که اختلاف مقاومت برشی در فشارهای دورگیر مختلف با افزایش دما برای نمونه‌های سیمانی افزایش و برای نمونه‌های غیرسیمانی کاهش می‌یابد. مطالعات پیشین بر روی خاک رسی غیرسیمانی در دمای بالا نیز مستقل بودن شیب خط حالت بحرانی و در نتیجه زاویه اصطکاک حالت بحرانی خاک مستقل از دماست.

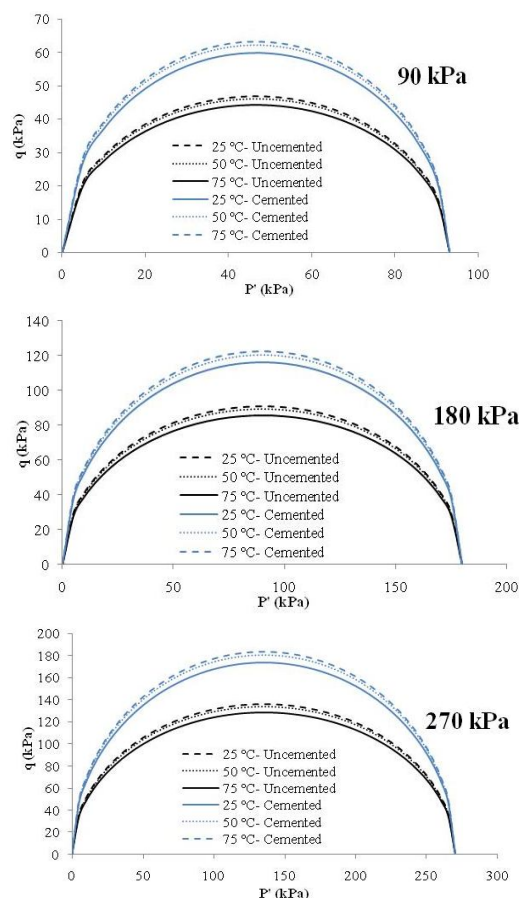
سانتیگراد به عنوان دمای محیط، مقدار ξ برای نمونه‌های سیمانی دارای ساختار، $0/09$ به دست آمده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این بخش نتایج به دست آمده از این تحقیق به صورت خلاصه ذکر می‌گردند.

- شیب خط تحکیم ایزوتروپ در نمونه‌های غیرسیمانی وابسته به دماست و در دماهای بالاتر مقدار تخلخل کمتر در فشار ثابت به دست می‌آید.
- رفتار تغییر حجمی نمونه‌های غیرسیمانی انقباضی و عملکرد در دماهای بالا نیز شبیه نمونه‌های عادی تحکیم یافته است.
- درجه تحکیم نمونه‌های ماسه-بتونیت غیرسیمانی و سیمانی در دماهای بالاتر بیشتر است. علت این امر ضریب انبساط حرارتی بیشتر آب نسبت به دانه‌های جامد خاک و ایجاد فشار حفره‌ای اضافی در شرایط زهکشی نشده خواهد بود.
- با توجه به نمودارهای تنش-کرنش در هر فشار دورگیر در دماهای مختلف مشخص شد که با افزایش دمای مرحله تحکیم مقاومت برشی به وجود آمده بیشتر می‌شود. به گونه‌ای که تنش اوج نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر از ۵۰ درجه و آن نیز بیشتر از ۲۵ درجه می‌باشد.
- افزایش دمای مرحله تحکیم، باعث کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای در مرحله برش زهکشی نشده در هر فشار دورگیر گردیده است. درجه تحکیم نمونه‌ها در مرحله تحکیم با افزایش دما افزایش می‌یابد.
- مسیرهای تنش مؤثر نمونه‌های مورد آزمایش در هر فشار دورگیر با افزایش دمای مرحله تحکیم به دلیل کاهش فشار آب حفره‌ای (افزایش تنش مؤثر) به سمت مسیر تنش کل متمایل شده‌اند.
- با افزایش دمای مرحله تحکیم می‌توان یک روند افزایشی برای چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی برای نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی در نظر گرفت.
- شیب خط حالت بحرانی نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی با افزایش دمای مرحله تحکیم، به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد.
- در یک فشار دورگیر خاص با افزایش دمای مرحله تحکیم سطح تسلیم نمونه‌های غیرسیمانی کوچک و سطح تسلیم نمونه‌های سیمانی بزرگ می‌شود. این پدیده نشان می‌دهد که افزایش دما باعث شده است که

مرحله تحکیم، سطوح تسلیم نمونه‌های سیمانی، بزرگ و سطوح تسلیم نمونه‌های غیرسیمانی، کوچک می‌شود. سطح تسلیم نمونه‌های غیر سیمانی داخل سطح تسلیم نمونه‌های غیرسیمانی قرار می‌گیرد. این امر بیانگر افزایش شیب خط حالت بحرانی در نمونه‌های سیمانته دارای ساختار با دما و بالعکس کاهش آن در نمونه‌های غیرسیمانی است.



شکل ۱۰- سطوح تسلیم متناظر با مدل رفتاری Cam clay برای نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی

Hamidi و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل رفتاری را برای شبیه‌سازی رفتار برشی خاک‌های ساختار یافته در حرارت بالا ارائه نموده و وابستگی شیب خط حالت بحرانی به دما را با رابطه زیر نشان دادند.

$$M_T = M_A + \xi \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (3)$$

در این رابطه، M_T شیب حالت بحرانی در دمای بالا، M_A شیب حالت بحرانی در دمای محیط، T_0 دمای محیط و T دمای افزایش یافته است. در تحقیق حاضر، با در نظر گرفتن دمای ۲۵ درجه

- International Journal of Civil Engineering, 2008, 6 (3), 159-173.
- Hamidi A, Haeri SM, Hoseini SM, Asghari E, Toll GD, "Effect of Cement Type on the Mechanical Behavior of a Gravely Sand", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 24, 335-360.
- Hamidi A, Hoosesfand M, "Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand", *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 36, 1-9.
- Hamidi A, Tourchi S, Karooni F, "A critical state based thermo-elasto-plastic constitutive model for structured clays", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 1094-1103.
- Hamidi A, Tourchi S, Khazaei C, "A Thermomechanical constitutive model for saturated clays based on critical state theory", *International Journal of Geomechanics*, 2015, 15, 1-14.
- Horpibulsuk S, Liu MD, Liyanapathirana DS, Suebsuk J, "Behaviour of cemented clay simulated via the theoretical framework of the structured Cam Clay model", *Computers and Geotechnics*, 2009, 37, 1-9.
- Hueckel T, Pellegrini R, "Effective stress and water pressure in saturated clays during heating-cooling cycles", *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29, 1095-1102.
- Kasama K, Ochiai H, Yasufuku N, "On the stress-strain behaviour of lightly cemented clay based on an extended critical state concept", *Soils and Foundations*, 2000, 40 (5), 37-47.
- Lingnau BE, Graham J, Tanaka N, "Isothermal modeling of sand-bentonite mixtures at elevated temperatures", *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32, 78-88.
- Locat J, Tremblay H, Leroueil S, "Mechanical and hydraulic behaviour of a soft inorganic clay treated with lime", *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33, 654-669.
- Marques MES, "Strain-rate and temperature effect on consolidation of natural clays", M.Sc. thesis, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil, 1996.
- Mitchell JK, "Shearing resistance of soils as a rate process", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1964, 90, 29-61.
- Pusch R, Guven N, "Electron microscopic examination of hydrothermally treated bentonite clay", *Engineering Geology*, 1990, 28, 303-314.
- Rios S, Baudet BA, "On the shearing behaviour of an artificially cemented soil", *Acta Geotechnica*, 2013, 9, 215-226.
- Shariatmadari N, Saeidijam S, "The Effect of Elevated Temperature on Compressibility and Swelling of Bentonite-Sand Mixtures", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 16, 137-146.
- Tanaka N, Graham J, Crilly TN, "Stress-strain behavior of reconstituted illitic clay at different temperatures", *Engineering Geology*, 1997, 47, 339-350.
- Towhata I, Kuntiwattanakul P, Seko I, Ohishi K, "Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests", *Soils and Foundations*, 1993, 33, 170-183.
- Uddin K, "Strength and deformation behavior of cement- treated Bangkok clay", D.Eng. thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, 1995.
- اختلاف مقاومت حالت بحرانی در فشارهای دورگیر ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ کیلوپاسکال برای نمونه‌های غیرسیمانی کاهش و برای نمونه‌های سیمانی افزایش یابد که این مسئله ناشی از تغییرات شیب حالت بحرانی در نمونه‌های سیمانی و غیرسیمانی با دما است.
- ۶- مراجع
- Abuel-Naga HM, Bergado DT, Bouazza A, Ramana GV, "Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling", *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44 (8), 942-956.
- Abuel-Naga HM, Bergado DT, Ramana GV, Grino L, Rujivipat P, Thet Y, "Experimental evaluation of engineering behavior of soft Bangkok clay under elevated temperature", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132, 902-910.
- ASTM, *Annual Book of ASTM Standards, Soils and Rock Division*, 1998.
- Badv K, Aliashrafi H, "Laboratory Investigation of Geotechnical and Geoenvironmental Characteristics of Bentonite-Enhanced Sand Mixtures as Landfill Liner Material", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2015, 45, 13-23.
- Burghignoli A, Desideri A, Miliziano S, "A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37, 764-780.
- Burland JB, Rampello S, Georgiannou VN, Calabresi G, "A laboratory study of the strength of four stiff clays", *Geotechnique*, 1996, 46 (3), 491-514.
- Cekerevac C, Laloui L, "Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay", *International Journal for Numerical Analytical Methods Geomechanics*, 2004, 28, 209-228.
- Cui YJ, Tang AM, "On the chemo-thermo-hydro-mechanical behavior of geological and engineered barriers", *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2006, 5 (3), 169-178.
- Di Donna A, Laloui L, "Response of soil subjected to thermal cyclic Loading: Experimental and constitutive study", *Engineering Geology*, 2015, 190, 65-76.
- Dixon DA, Gray MN, Thomas AW, "A study of the compaction properties of potential clay-sand buffer mixtures for use in nuclear fuel waste disposal", *Engineering Geology*, 1985, 21, 247-255.
- Haeri SM, Hamidi A, Tabatabaee N, "The effect of gypsum cementation on the mechanical behavior of gravely sands", *ASTM International*, 2005, 28, 380-390.
- Hamidi A, Amini Y, "Triaxial shear behavior of a cement-treated sand-gravel mixture", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6, 455-465.
- Hamidi A, Haeri SM, "Critical state concepts for a cemented gravely sand", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 1-12.
- Hamidi A, Haeri SM, "Stiffness and deformation characteristics of a cemented gravely sand",

EXTENDED ABSTRACT

Thermo-Mechanical Behavior of Uncemented and Cemented Sand-Bentonite Mixtures at Elevated Temperatures

Seyed Nima MirMohammadi, Atena shirasb, Amir Hamidi *

School of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

Received: 17 January 2016; Accepted: 23 September 2018

Keywords:

Thermo-mechanical behavior, Saturated sand-bentonite mixture, Deviatoric stress, Pore water pressure, Triaxial test, Cemented soil.

1. Introduction

Thermo-mechanical behavior of clays has been investigated in the past two decades because of high interest in using clay as a buffer material in nuclear waste barriers. Many of researchers studied the thermo-mechanical behavior of clays to estimate their performance as buffers for nuclear waste containers (Cekerevac and Laloui, 2004; Shariatmadari and Saeidijam, 2011; Cui and Tang, 2006; Di Donna and Laloui L, 2015). Sand-bentonite mixture is expected to be the most appropriate material for buffer of high-level radioactive wastes which are disposed in underground depth (Mitchell, 1964). The dry density of pure clays can be as low as 1.3 Mg/m³ when it is compacted in situ; however, mixing sand with the clay, the attainable dry density can be increased. Additions of sand can also be expected to decrease the creep potential of the material, increase the thermal conductivity and improve soil strength properties. Moreover, compacting clay-sand mixtures leads to lower hydraulic conductivities (Dixon et al., 1985). The soil around nuclear waste repositories are subjected to elevated temperatures and their features change in long time. So the behavior of soil considering pressure and temperature has been studied with more accuracy in last decades. This study is designed to evaluate thermo-mechanical behavior of reconstituted and structured sand-bentonite mixture in different temperatures and confining stresses during triaxial tests.

2. Test Equipment

In this study, a modified triaxial apparatus was used. A metallic thermal cell which is able to handle the temperatures up to 100°C is applied. A thermometer is installed inside the cell for controlling the triaxial cell temperature. The temperature raising rate is about 1.17 °C/min.

3. Materials and Methodology

The material is 1:1 by weight of sand- bentonite mixture. The liquid limit, plasticity index and swelling index of sodium bentonite is 179, 125 and 333 % respectively, and the dry density of 1:1 sand-bentonite mixture is 1733 (kg/m³) according to modified Proctor test. The compaction ratio of the samples is 95%. After saturation, uncemented and cemented samples were consolidated at different temperatures 25, 50 and 75°C and pressures 90, 180 and 270 kPa. Next, the undrained shearing test was conducted. The speed of loading was 0.14 mm/min.

* Corresponding Author

E-mail addresses: nima.mirmohammadi@yahoo.com (Seyed Nima MirMohammadi), std_shirasb@khu.ac.ir (Atena shirasb), hamidi@khu.ac.ir (Amir Hamidi).

4. Results and Discussion

The results showed that in uncemented samples, the slope of isotropic consolidation line was temperature dependent and at higher temperatures, a contractive behavior and more volume change was observed (Fig.1). With the increase in consolidation temperature, deviatoric stress of uncemented and cemented samples increased and the pore water pressure decreased. Also an apparent peak point in stress-strain curve was observed for cemented sample which was not seen for uncemented soil. In addition, the pore water pressure of uncemented samples increased, while the pore water pressure of cemented samples first increased and then decreased. As an example for increasing of deviatoric stress and decreasing of the pore water pressure, it has been shown for a confining pressure of 270 kPa at consolidation temperatures of 25, 50 and 75°C for uncemented and cemented samples in Fig. 2 and 3, respectively.

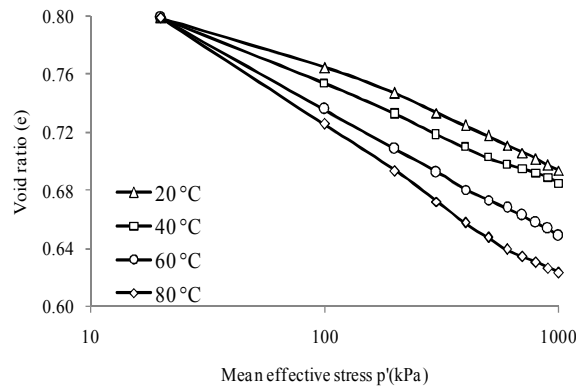


Fig. 1. Compression curves for uncemented sand-bentonite mixtures at elevated temperature

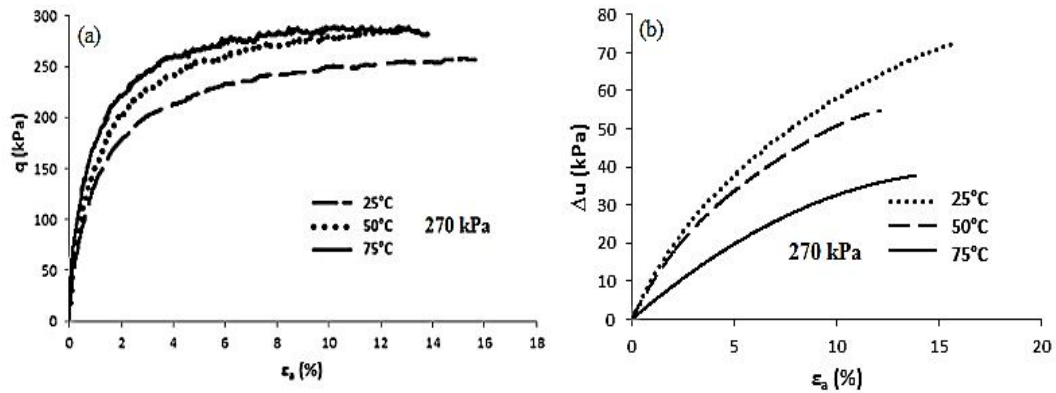


Fig. 2. Thermo-mechanical behavior of uncemented sand-bentonite mixture at elevated temperature

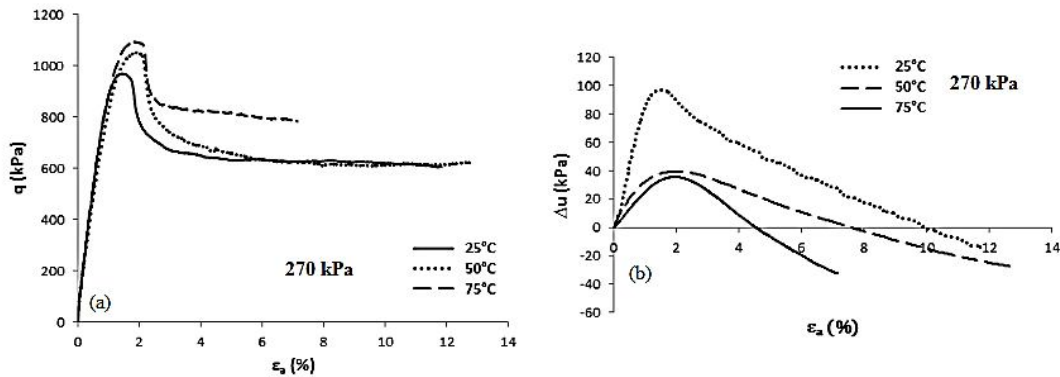


Fig. 3. Thermo-mechanical behavior of cemented sand-bentonite mixture elevated temperature

The effective stress path shifted to total stress path due to the reduction of pore water pressure at high temperature which lead to the increase in effective stress. Increase of the consolidation temperature led to the increase of cohesion (c') and reduction of internal friction angle (ϕ').

Fig. 4 shows the slope of critical state lines at different temperatures for uncemented and cemented samples. Due to the decrease of the slope of critical state line for uncemented samples, the yield surface shrinks. Also by increase in the slope of critical state line for cemented samples, the yield surface expands.

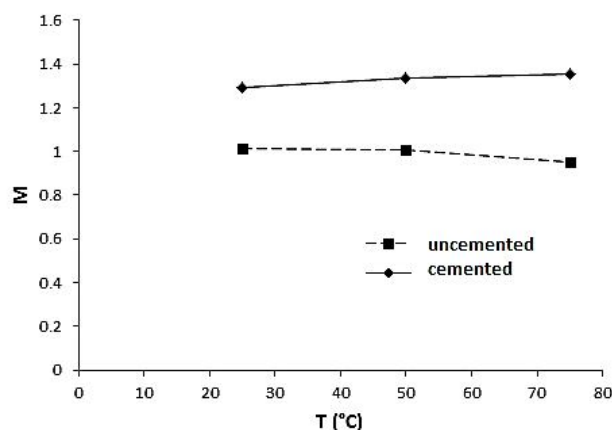


Fig. 4. Effect of temperature on the slope of critical state line of uncemented and cemented samples

5. Conclusions

The results of study are presented briefly as below:

- With increase in temperature during consolidation, the slope of isotropic consolidation line increased.
- Deviatoric stress increased by increase in temperature.
- The pore water pressure increased at elevated temperatures.
- The effective stress path shifts to the right, close to the total stress path, due to the decrease in pore water pressure (and increase in effective stress).
- Increase in temperature leads to the increase of cohesion and decrease of internal friction angle of uncemented and cemented samples.
- The slope of critical state line decreased for uncemented samples and increased for cemented mixture at elevated temperatures. As a result, shrinkage and expansion of Cam clay yield surface for uncemented and cemented samples were observed respectively.

6. References

- Cekerevac C, Laloui L, "Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay", *International Journal for Numerical Analytical Methods Geomechanics*, 2004, 28, 209-228.
- Shariatmadari N, Saeidijam S, "The Effect of Elevated Temperature on Compressibility and Swelling of Bentonite-Sand Mixtures", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 16, 137-146.
- Cui YJ, Tang AM, "On the chemo-thermo-hydro-mechanical behavior of geological Geotechnical & Geological Engineering", 2006, 24, 335-360.
- Di Donna A, Laloui L, "Response of soil subjected to thermal cyclic Loading: Experimental and constitutive study", *Engineering Geology*, 2015, 190, 65-76.
- Mitchell JK, "Shearing resistance of soils as a rate process", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1964, 90, 29-61.
- Dixon DA, Gray MN, Thomas AW, "A study of the compaction properties of potential clay-sand buffer mixtures for use in nuclear fuel waste disposal", *Engineering Geology*, 1985, 21, 247-255.