

بررسی تأثیر ریز دانه‌های پلاستیک بر مقاومت روانگرایی ماسه اشباع

Effect of Plastic Fines on Cyclic Resistance of Saturated Sands

محمود قهرمانی^۱، عباس قلندرزاده^۲ و مجید مرادی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Email: mahmoud879@yahoo.com

چکیده: خاکهای مخلوط مانند ماسه‌های رسی، ماسه‌های سیلتی و سیلت‌های رسی بیشتر از خاکهای خالص مانند رس، سیلت و ماسه تمیز در طبیعت یافت می‌شوند. به دلیل آنکه تصور می‌شد ریزدانه‌ها و ماسه‌های حاوی ریزدانه مقاومت روانگرایی بیشتری نسبت به ماسه‌های تمیز دارند، رفتار سیکلیک آنها کمتر مورد توجه قرار گرفته بود. اما پس از روانگرایی‌های متعددی که در اثر زلزله در اینگونه خاکها بوقوع پیوست توجه بسیاری از محققان به این پدیده جلب شد. یکی از نمونه‌های بارز روانگرایی در خاکهای حاوی ریزدانه در اثر زلزله ۲۲ ژوئن سال ۲۰۰۲ میلادی در چنگوره- آوج ایران رخ داد. بررسی‌هایی که پس از زلزله صورت گرفت نشان داد که خاک محل حاوی ۴۴ درصد ریزدانه چسبنده می‌باشد. با توجه به اینکه در مناطق شمال غربی و غربی کشور این نوع خاکها به وفور یافت می‌شوند، بررسی این موضوع ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله با افزودن مقادیر مختلف کائولن به صورت وزنی به ماسه فیروزکوه، تأثیر ریزدانه‌های پلاستیک مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین مخلوط کائولن و بنتونیت با نسبت‌های متفاوت و درصد ریزدانه ثابت ۱۶ درصد به ماسه اضافه شده تا تأثیر پلاستیسیته ریزدانه‌ها نیز بررسی شود.

کلیدواژه‌ها: روانگرایی، مخلوط ماسه و رس، ریزدانه پلاستیک، آزمایش سه محوری سیکلیک

Abstract: Soil mixtures such as clayey sands, silty sands, and clayey silts are more commonly found in the nature than pure clays, silts, and sands. Most previous studies on liquefaction have been focused on clean sands and sands with little fines, for it was believed that fines and sands containing fines are not prone to liquefaction. However, after a number of earthquakes where soils with high plastic fines liquefied, the subject drew the attention of a number of researchers. One of the interesting cases of liquefaction occurred on June 22, 2002 during Changureh, Iran earthquake. Surface soil in this area is mostly clay; however, clear traces of sand boiling, softening of soil, and consequent deformations were observed. The preliminary tests showed that the soil has a < No. 200 fraction of 44% with a liquid limit and a plasticity index of 38 and 18, respectively. As these types of soils are commonly found on the western-north and west of Iran, it seems necessary to investigate the problem in the country. This paper investigates the effect of plastic fines and their plasticity on the cyclic resistance of sands.

۱- مقدمه

روانگرایی خاک، دلیل بسیاری از خرابیهای ناشی از زلزله می‌باشد. پس از روانگراییهای گسترده‌ای که در دو زلزله ویرانگر سال ۱۹۶۴ نیگاتا (ژاپن) و آلاسکا (آمریکا) بوقوع پیوستند توجه مهندسی ژئوتکنیک به این پدیده جلب شد. در طول ۴۰ سال گذشته پیشرفت قابل توجهی در زمینه درک مکانیزم روانگرایی و عوامل مؤثر بر آن صورت گرفته است. در سالهای آغازین، بیشتر توجه متخصصین به بررسی این پدیده در ماسه‌های تمیز معطوف شده بود؛ بطوریکه تصور می‌شد روانگرایی تنها مختص ماسه‌ها است و خاکهای ریزدانه و درشت‌دانه قابلیت تولید فشار

اضافی آب حفره‌ای که دلیل اصلی روانگرایی است را ندارند. اما با گذشت زمان و وقوع زلزله‌های جدید و مشاهده این پدیده در خاکهای درشت‌دانه و ریزدانه، محققان زیادی بر آن شدند که عوامل مؤثر بر روانگرایی این خاکها را نیز روشن سازند. بنا بر مشاهدات توهنو- یاسودا [۱۱] در زلزله سال ۱۹۸۶ توکاجی- اوکی خاکهای حاوی ۹۰ درصد ریزدانه و ۱۸ درصد رس روانگرا شده‌اند. میورا و همکاران [۷] روانگرایی خاکهای دارای ۴۸ درصد ریزدانه و ۱۸ درصد رس را در زلزله سال ۱۹۹۳ هوکایدو نانسایی- اوکی گزارش کرده است.

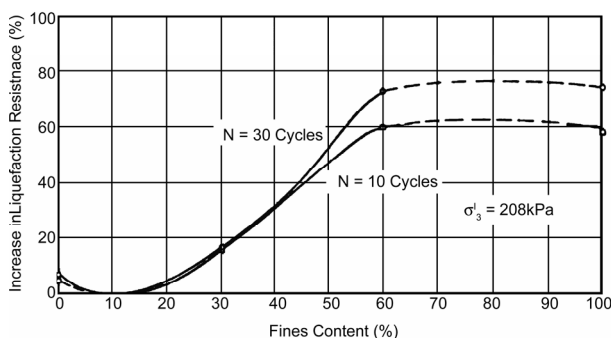
وجود شرایط مشابه خاک مذکور در بسیاری از نقاط دیگر ایران همراه با سطح آب زیرزمینی بالا، خصوصاً در مناطق شمال غربی و غربی کشور، بررسی روانگرایی این گونه خاکها را ضروری می‌نماید.

۲- تأثیر ریزدانه‌ها بر رفتار سیکلیک ماسه‌ها

از آنجایی که بسیاری از ماسه‌های طبیعی و نهشته‌های ساخته شده به دست انسان مانند سدهای باطله دارای درصد قابل ملاحظه‌ای ریزدانه چسبنده و غیرچسبنده می‌باشند، بررسی مقاومت روانگرایی این خاکها در طول ۲۰ سال گذشته بصورت گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است و اطلاعات فراوانی در ادبیات فنی موجود است. مروری بر تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که علیرغم مطالعات گسترده درباره نقش ریزدانه‌های غیرپلاستیک بر رفتار سیکلیک ماسه‌ها، در ظاهر نتایج متناقضی به دست آمده است.

۲-۱- ریزدانه‌های غیر پلاستیک

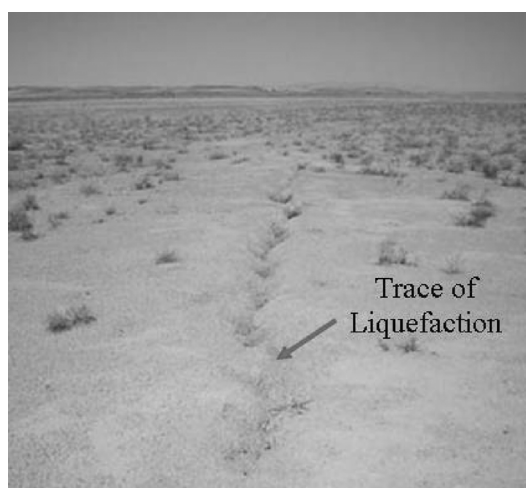
شکل (۳) نتایج آزمایشهای چانگ و همکاران [۲] را که به منظور بررسی اثر ریزدانه‌های با پلاستیسیته کم ($PI=5$) بر پتانسیل روانگرایی ماسه‌ها انجام شده است را نشان می‌دهد. با توجه به شکل در نسبت تخلخل ثابت، با افزایش ریزدانه تا ۱۰ درصد، مقاومت روانگرایی کمی کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد. دزفولیان [۴] نیز با افزودن ریزدانه‌های غیرپلاستیک ماسه به نتیجه مشابهی رسید.



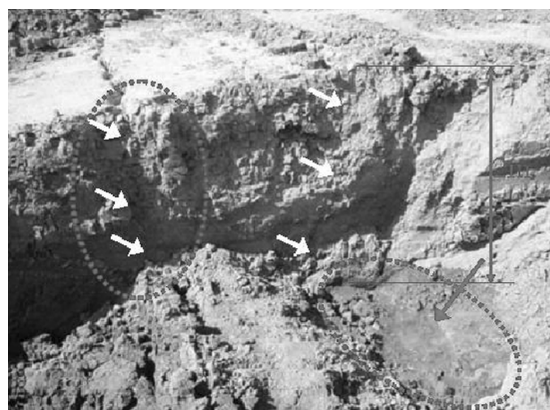
شکل ۳- تأثیر ریزدانه‌های با پلاستیسیته کم بر مقاومت روانگرایی ماسه‌ها [۲].

امینی و کی [۱] گزارش می‌دهند که با افزایش درصد سیلت از ۱۰ درصد به ۵۰ درصد، مقاومت روانگرایی ۶۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. پلیتو [۹] دریافت که در نسبت تخلخل ثابت، با افزایش مقدار سیلت تا ۳۵ درصد مقاومت روانگرایی کاهش و پس از آن به آرامی افزایش می‌یابد. اکسنکای [۱۲] نیز به این نتیجه رسید که در نسبت تخلخل ثابت، با افزایش ریزدانه غیر پلاستیک تا ۴۲ درصد مقاومت روانگرایی کاهش می‌یابد و پس از آن روند بر عکس می‌شود.

همچنین در دو زلزله سال ۱۹۹۹ که در کویلی ترکیه و چی- تایوان رخ داد، روانگرایی‌های گسترده‌ای رخ داد. پس از بررسی‌های دقیقی که پس از زلزله انجام شد، مشخص شد که قسمت اعظم این روانگرایی‌ها در خاکهای چسبنده - که بر اساس معیار چینی‌ها غیرقابل روانگرا بودند - بوقوع پیوسته است. به عنوان مثال قسمت اعظم خاک منطقه کویلی دارای شاخص پلاستیسیته بالای ۱۰ می‌باشد. یکی از موارد جالب روانگرایی در خاکهای حاوی درصد بالایی از رس در زلزله ۲۲ ژوئن سال ۲۰۰۲ میلادی در چنگوره - آوج در ایران رخ داده است. در این زلزله که با بزرگای ۶/۴ درجه در مقیاس ریشتر رخ داد علاوه بر خرابی‌های سازه‌ای بوجود آمده، مواردی از روانگرایی در نزدیکی دهکده حصار واقع در ۵ کیلومتری آبدره مشاهده گردید. روانگرایی در دشت مسطحی در ۲ کیلومتری شمال غربی حصار به صورت جوشش ماسه بوقوع پیوسته است (شکل ۱). پس از نمونه‌گیری و بررسی خاک روانگرا شده مشخص گردید که خاک مزبور حاوی ۴۴ درصد رس می‌باشد و با این حال دچار روانگرایی شده است (شکل ۲).



شکل ۱- نمونه‌ای از روانگرایی مشاهده شده در زلزله چنگوره- آوج.



شکل ۲- روانگرایی در عمق دو متری زمین در خاک حاوی ۴۴ درصد ریزدانه چسبنده، چنگوره.

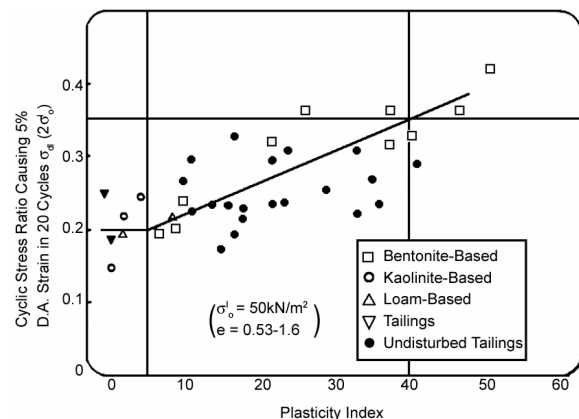
۲-۲- ریزدانه‌های پلاستیک

درصد ریزدانه نشان می‌دهد، رسم شده است. در قسمت A، درصد ریزدانه صفر است و دانه‌های ماسه به خوبی با یکدیگر تماس دارند و می‌توانند نیرو را منتقل کنند. هنگامی که از نقطه A به سمت نقطه B پیش می‌رویم، درصد ریزدانه افزایش می‌یابد. در این حالت، ریزدانه‌ها، فضای خالی بین دانه‌های ماسه را پر می‌کنند و باعث کاهش تخلخل و افزایش دانسیته نسبی می‌شوند، بدون آنکه در باربری شرکت داشته باشند تا اینکه در نقطه B، ریزدانه‌های اضافه شده کاملاً فضای خالی بین دانه‌های ماسه را پر می‌کنند. به این مقدار ریزدانه، ریزدانه حدی^۱ گفته می‌شود. با افزایش ریزدانه هنگامی که از نقطه B به سمت نقطه C می‌رویم، دانه‌های ماسه بیشتر از یکدیگر جدا می‌شوند و ذرات ریزدانه نقش مهمتری را ایفا می‌کنند تا اینکه در نقطه C ریزدانه‌ها نمونه را تشکیل می‌دهند. قابل ذکر است که مقدار حدی ریزدانه به دانه بندی خاک اصلی و خصوصیات ریزدانه بستگی دارد. مثلاً خاکهای خوب دانه‌بندی شده در مقایسه با خاکهای بد دانه بندی شده نسبت تخلخل کمتری دارند و در نتیجه مقدار کمتری ریزدانه می‌تواند دانه‌های ماسه را کاملاً از هم جدا کند. همچنین ذرات رس نسبت به ذرات سیلت دارای نسبت تخلخل بیشتری هستند و می‌توانند به صورت مؤثرتری در پر کردن فضای خالی بین دانه‌های ماسه شرکت کنند. پلیتو و مارتین [۹] مقادیر حدی ریزدانه را برای ۱۸۵ ترکیب ماسه و سیلت بدست آورده است. نتایج وی نشان می‌دهد که ۶۲ درصد ترکیبات مقادیر حدی بین ۲۵ تا ۴۵ درصد و ۲۰ درصد مقادیر حدی بیشتر از ۵۰ درصد داشتند. همانطور که از شکل (۵) برمی‌آید، عملکرد ماتریس ریزدانه و ماسه به این مسئله بستگی دارد که چه درصدی از ریزدانه در ماتریس حضور دارد. زیرا تأثیر افزایش میزان رس در رفتار ماسه بصورت تأثیر در ویژگیهای تغییر حجمی و یا میزان چسبندگی آن بروز پیدا می‌کند. توانایاگام [۱۰] که تحقیقات گسترده‌ای روی تأثیر ریزدانه‌های غیرپلاستیک بر پتانسیل روانگرایی ماسه انجام داده است، مدلی از ماتریس دوگانه ماسه و ریزدانه ارائه داده که در آن ماسه و ریزدانه بصورت دانه‌هایی کروی با دو قطر متفاوت معرفی شده‌اند. بر اساس نحوه اندرکنش دانه‌های درشت و ریز می‌توان دو نوع نسبت تخلخل جداگانه برای ماتریس ماسه و ریزدانه با نسبت تخلخل e ارائه کرد.

۳-۱- مقدار ریزدانه کمتر از مقدار ریزدانه حدی است

در این حالت ریزدانه‌ها به طور فعال در باربری نقشی ندارند و کاملاً در فضاهای خالی بین دانه‌های ماسه قرار گرفته‌اند و تخلخل

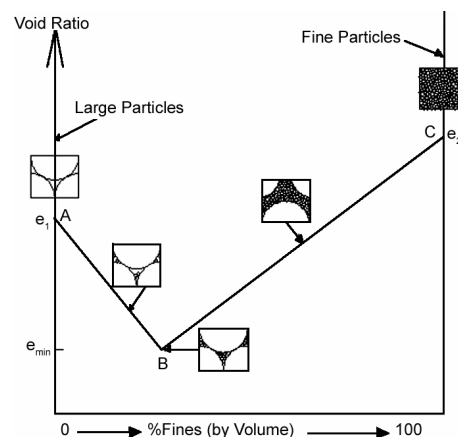
ایشیهارا و کوسکی [۵] به این نتیجه رسیدند که رابطه مشخصی میان درصد رس و مقاومت روانگرایی وجود ندارد. اما افزایش پلاستیسیته به افزایش مقاومت روانگرایی منجر می‌شود (شکل ۴). اما پرلا و همکاران [۸] با انجام آزمایش سه محوری ساده پیچشی سیکلیک بر روی نمونه‌های با نسبت تخلخل ثابت دریافتند که درصد رس در بافت خاک مهمتر از پلاستیسیته آن است. داس و همکاران [۳] با آزمایش بر روی نمونه‌های سیلت و رس دریافتند که با افزایش پلاستیسیته، مقاومت روانگرایی افزایش می‌یابد. لیانگ و بی [۶] نیز با اضافه کردن رس به ماسه ریز و سیلت تغییرات مقاومت روانگرایی را بررسی کردند. آنها دریافتند که با افزایش مقدار رس تا ۹٪ مقاومت روانگرایی کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد. در این بررسی به پلاستیسیته رس اشاره‌ای نشده است.



شکل ۴- افزایش مقاومت روانگرایی با افزایش شاخص پلاستیسیته [۵].

۳- بررسی نحوه تأثیر درصد ریزدانه در بافت خاک

اضافه شدن رس یا سیلت به ماسه در درصدهای مختلف می‌تواند به طور اساسی رفتار ماتریس ماسه و رس را تغییر دهد. برای درک بهتر موضوع، شکل (۵) که تغییرات درصد تخلخل را بر حسب



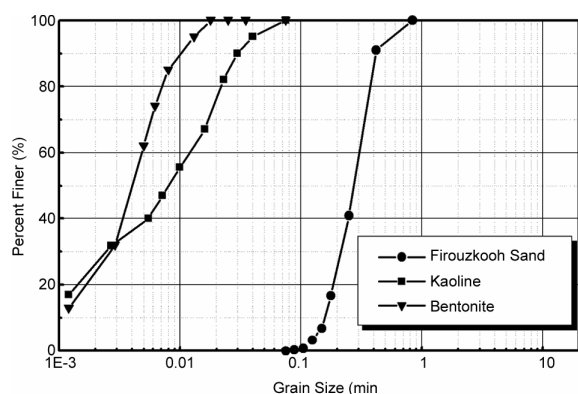
شکل ۵- تغییرات نسبت تخلخل مخلوط ماسه و رس بر حسب تغییرات درصد رس.

1. Threshold Fine Content

روانگرایی ماسه، تعدادی آزمایش سه محوری سیکلیک فشاری-کششی بر روی ماسه فیروزکوه با درصد‌های مختلف کائولن صورت گرفته و تأثیر درصد رس بر تغییر مقاومت روانگرایی و رفتار ماسه مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین برای بررسی تأثیر تغییر پلاستیسیته ریزدانه، در مقدار ریزدانه ثابت ۱۶ درصد، کائولن در درصد‌های مختلف با بنتونیت مخلوط به ماسه اضافه شده است و نحوه تغییر مقاومت روانگرایی مورد بررسی قرار گرفته است.

۴- معرفی مصالح مورد استفاده

ماسه مورد استفاده، ماسه سیلیسی شکسته فیروزکوه می‌باشد. این ماسه دارای رنگ زرد متمایل به طلایی است و دانه‌بندی یکنواختی دارد که در شکل (۷) نشان داده شده است. دیگر خصوصیات این ماسه در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۷- منحنی دانه بندی ماسه فیروزکوه، کائولن و بنتونیت.

جدول ۱: مشخصات ماسه فیروزکوه.

| G_s | e_{max} | e_{min} | D_{50} (mm) | C_u | C_c |
|-------|-----------|-----------|---------------|-------|-------|
| ۲/۶۵۸ | ۰/۹۴۳ | ۰/۵۴ | ۰/۲۷ | ۱/۸۷ | ۰/۸۸ |

کائولن مورد استفاده دارای ($G_s = ۲/۶۴$) می‌باشد و دارای حد روانی ۳۵، حد خمیری ۲۱ و شاخص پلاستیسیته ۱۴ می‌باشد و در گروه رس‌های با پلاستیسیته متوسط قرار می‌گیرد. بنتونیت مصرفی نیز دارای ($G_s = ۲/۶۴$) دارای حد روانی ۱۱۲، حد خمیری ۶۴ و شاخص پلاستیسیته ۴۸ می‌باشد و در گروه رس‌های با پلاستیسیته بالا قرار می‌گیرد. منحنی دانه‌بندی کائولن و بنتونیت که به روش هیدرومتری بدست آمده نیز در شکل (۷) ارائه شده است.

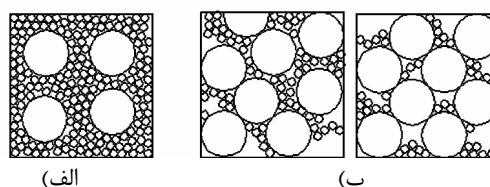
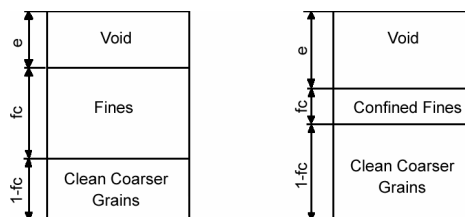
۵- روش تهیه نمونه و انجام آزمایش

نمونه‌ها به روش نهشتن خشک از طریق قیف درست شده‌اند. به این صورت که پس از اضافه شدن درصد رس مورد نظر به صورت وزنی به ماسه و مخلوط کردن ماسه و رس با هم، مخلوط

کلی نمونه را کاهش می‌دهند. با افزایش مقدار ریزدانه به تدریج ذرات رس تعدادی از دانه‌های ماسه را نیز از هم جدا می‌کنند. این موضوع در شکل (۶- الف) دیده می‌شود. پس با در نظر گرفتن حجم دانه‌های ریز (f_c) به عنوان فضای خالی، می‌توان نسبت تخلخل بین دانه‌های درشت را به صورت زیر تعریف کرد:

$$e_s = \frac{e + f_c}{1 - f_c}$$

e_s در این رابطه، نسبت تخلخل دانه‌های ماسه نامیده می‌شود.



شکل ۶- تأثیر ریزدانه در ساختار خاک. الف) حالتی که درصد ریزدانه کمتر از میزان حدی است. ب) حالتی که درصد ریزدانه بیشتر از میزان حدی است.

۳-۲- مقدار ریزدانه بیشتر از مقدار ریزدانه حدی است

در این حالت دانه‌های ریز فضای خالی بین دانه‌های درشت را کاملاً پر کرده‌اند بطوریکه دانه‌های درشت با یکدیگر تماس ندارند. به عبارت دیگر، دانه‌های درشت به صورت غوطه‌ور میان دانه‌های ریز قرار دارند و نمی‌توانند با یکدیگر در باربری ماتریس نقش داشته باشند، بلکه تنها به عنوان انتقال دهنده نیرو بین دانه‌های ریز اطراف خودشان کار می‌کنند. این موضوع در شکل (۶- ب) نشان داده شده است. برخلاف حالت الف که حجم دانه‌های ریز را به عنوان فضاهای خالی در نظر گرفتیم، در این حالت، حجم دانه‌های درشت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود و نسبت تخلخل بین دانه‌های ریز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e_f = \frac{e}{f_c}$$

e_f در این رابطه، نسبت تخلخل بین دانه‌های ریزدانه نامیده می‌شود. حال در صورتی که ریزدانه‌های موجود در خاک از جنس رس باشند، علاوه بر اینکه به عنوان پرکننده در بافت خاک عمل می‌کنند، می‌توانند با القاء چسبندگی به خاک بافت خاک را یکپارچه‌تر سازند.

به منظور بررسی اثر مقدار ریزدانه‌های پلاستیک بر پتانسیل

جدول ۲: نتایج بررسی توزیع رس در نمونه.

| انحراف معیار | میانگین | قسمت ۴ | قسمت ۳ | قسمت ۲ | قسمت ۱ | درصد ریزدانه مورد نظر |
|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|
| ۰/۸۳۸ | ۹/۸۷۷ | ۱۰/۸۵ | ۹/۸۷ | ۸/۵۶ | ۱۰/۲۳ | ۱۰ |
| ۰/۹۰ | ۲۰/۳۲ | ۱۸/۸۹ | ۲۰/۸۶ | ۲۰/۳۵ | ۲۰/۵۶ | ۲۰ |
| ۰/۴۴ | ۳۰/۰۳ | ۲۹/۴۵ | ۳۰/۱۳ | ۳۰/۶۷ | ۲۹/۸۷ | ۳۰ |

۷- بررسی نتایج آزمایشهای انجام یافته

جدول (۳) مشخصات و نتایج برخی از آزمایشهای انجام شده روی ترکیبات مختلف ماسه و رس را نشان می‌دهد. کلیه نمونه‌ها با تنش 200 kPa تحکیم شده‌اند و معیار روانگرایی برای کلیه نمونه‌ها صفر شدن تنش مؤثر در نظر گرفته شده است ($Au = 200\text{ kPa}$). همچنین به منظور بررسی تأثیر پلاستیسیته ریزدانه‌ها بر پتانسیل روانگرایی ماسه‌ها در مقدار ریزدانه ثابت ۱۶ درصد، کائولن و بنتونیت در نسبتهای متفاوت با هم مخلوط شدند و نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج این آزمایشها در جدول (۴) ارائه شده‌اند.

جدول ۳: مشخصات و نتایج برخی از آزمایشهای ماسه و کائولن.

| شماره آزمایش | درصد کائولن | تعداد سیکلهای روانگرایی ($CSR=0.12$) | تعداد سیکلهای روانگرایی ($CSR=0.13$) | نسبت تخلخل (e) | e_s | e_f |
|--------------|-------------|--|--|--------------------|-------|-------|
| S90-K10 | ۱۰ | ۲۷۳ | ۴۰ | ۰/۶۱۲ | ۰/۷۹ | - |
| S80-K20 | ۲۰ | ۶۳ | ۹ | ۰/۶۱۷ | ۰/۹۲۵ | - |
| S70-K30 | ۳۰ | ۴۳ | ۸ | ۰/۶۲۱ | ۱/۳۱ | - |
| S60-K40 | ۴۰ | ۵۰ | ۹ | ۰/۶۲۰ | - | ۱/۵۵ |
| S50-K50 | ۵۰ | ۷۶ | ۱۳ | ۰/۶۳۰ | - | ۱/۲۶ |

جدول ۴: مشخصات و نتایج آزمایشهای مربوط به تغییر پلاستیسیته.

| شماره آزمایش | درصد کائولن | درصد بنتونیت | تعداد سیکلهای روانگرایی ($CSR=0.12$) | نسبت تخلخل (e) | حد روانی (LL)* | شاخص پلاستیسیته (PI)* |
|--------------|-------------|--------------|--|--------------------|--------------------|---------------------------|
| S84-B4-K12 | ۱۲ | ۴ | ۸۴ | ۰/۶۲۸ | ۵۴ | ۲۵ |
| S84-B8-K8 | ۸ | ۸ | ۱۰۱ | ۰/۶۲۳ | ۶۷ | ۳۳ |
| S84-B12-K4 | ۴ | ۱۲ | ۱۲۹ | ۰/۶۱۳ | ۱۰۱ | ۴۱ |

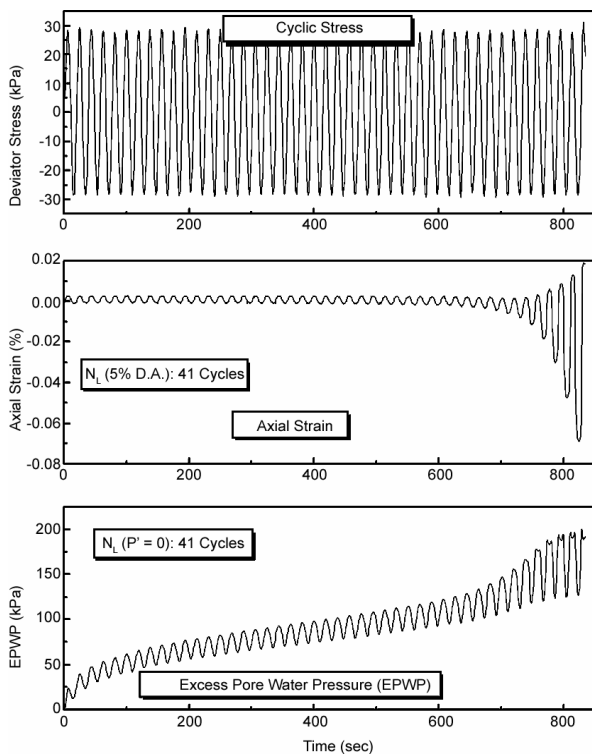
* آزمایشهای تعیین حدود اتربرگ بر روی قسمت عبوری از الک # ۲۰۰ صورت گرفته است.

برای اینکه بتوان تأثیر ریزدانه را بررسی کرد لازم است که یکی از پارامترهای معرف بافت خاک مانند نسبت تخلخل (e)، نسبت تخلخل اسکلت ماسه (e_s) و یا دانسیته نسبی (Dr) را در تمام آزمایشها ثابت نگه داشت. اکثر محققان سعی کرده‌اند که دانسیته نسبی یا نسبت تخلخل را به عنوان پارامتر ثابت

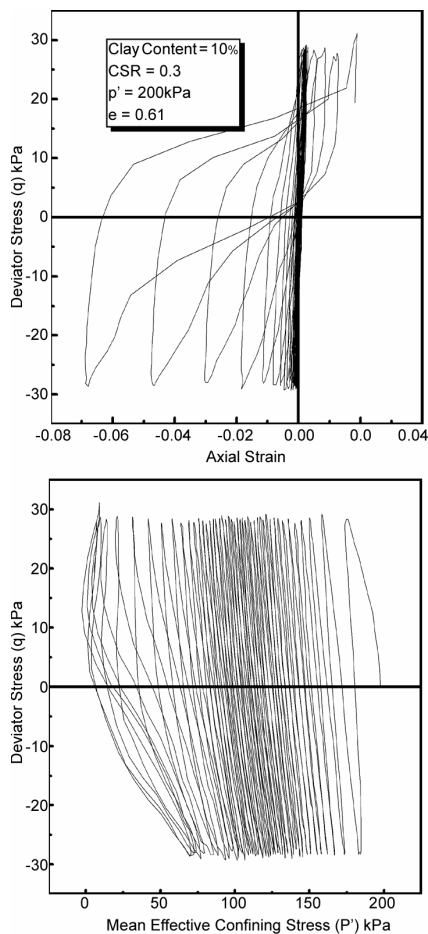
به داخل قیف که انتهای آن بوسیله کاغذی مسدود شده است ریخته می‌شود. پس از قرار گرفتن انتهای قیف روی کف قالب نمونه‌سازی، کاغذی که انتهای قیف را مسدود کرده بود خارج می‌شود و قیف در امتداد محور قالب استوانه‌ای به آرامی بالا آورده می‌شود، بطوریکه ارتفاع ریزش مخلوط صفر می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان از جدا شدگی دانه‌ها تا حد امکان جلوگیری کرد. کلیه نمونه‌ها در چهار لایه با ارتفاع و وزن مساوی ساخته شده‌اند. همچنین با زدن ضرباتی هماهنگ و متقارن به بدنه قالب می‌توان تخلخل نمونه را تغییر داد. پس از ساخته شدن نمونه (به قطر ۳۸ و ارتفاع ۷۶ میلیمتر)، گاز CO_2 به مدت ۶۰ دقیقه از داخل نمونه عبور داده شد. پس از جایگزینی هوای محبوس در نمونه بوسیله گاز CO_2 ، آب بدون هوا ($Deaired\ Water$) به داخل نمونه وارد شد. به منظور جلوگیری از شسته شدن ریز دانه‌ها در قسمت‌های پایین و تجمع آنها در بالای نمونه، آب با فشار بسیار کم (3 kPa تا 1 kPa) به داخل نمونه وارد می‌شد. با توجه به درصد رس موجود در نمونه، این قسمت از آزمایش ۲ تا ۶ ساعت زمان لازم داشت. از آنجاییکه هو و زای [۴] گزارش داده‌اند که با افزایش مقدار پس فشار مقاومت روانگرایی ماسه افزایش می‌یابد، برای تمرکز هر چه بیشتر روی اثر ریزدانه بر رفتار سیکلیک ماسه، پس از اشباع شدن کلیه نمونه‌ها، پس فشار 350 kPa به آنها وارد شد تا کلیه آزمایشها شرایط یکسانی داشته باشند. حداقل مقدار پارامتر فشار آب حفره‌ای اسکمپتون (B) برای شروع تحکیم 0.95 در نظر گرفته شده است. پس از تحکیم کامل نمونه‌ها با تنش مؤثر 200 kPa - که ۱ تا ۶ ساعت زمان لازم داشت - بار سیکلیک مورد نظر با فرکانس 0.5 Hz با استفاده از دستگاه سه محوری سیکلیک به نمونه وارد گردید.

۶- بررسی یکنواختی توزیع رس در نمونه‌ها

به منظور اطمینان از یکنواختی توزیع رس در نمونه‌ها، سه نمونه با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد رس مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بدین صورت که پس از تحکیم، نمونه‌ها از سلول خارج شدند و بوسیله نخ به ۴ قسمت عرضی مساوی تقسیم شدند. پس از خشک شدن در آون، هر قسمت روی الک شماره ۲۰۰ شسته شد تا رس از ماسه جدا شود. پس از خشک شدن ظروف حاوی رس، درصد وزن رس در هر لایه مشخص شد. جدول (۲) نتایج بدست آمده را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که با افزایش درصد رس در نمونه، توزیع آن نیز یکنواخت‌تر می‌شود. بطوریکه نمونه حاوی ۱۰ درصد رس غیر یکنواخت‌ترین و در نمونه حاوی ۳۰ درصد رس یکنواخت‌ترین نمونه می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که خطای توزیع رس در تمام نمونه‌ها قابل قبول است.



شکل ۸ (الف) - انحرافی، کرنش محوری و فشار اضافی آب حفره‌ای بر حسب زمان، برای نمونه حاوی ۱۰ درصد کائولن و نسبت تغییرات تنش تنش سیکلیک ۰/۳.

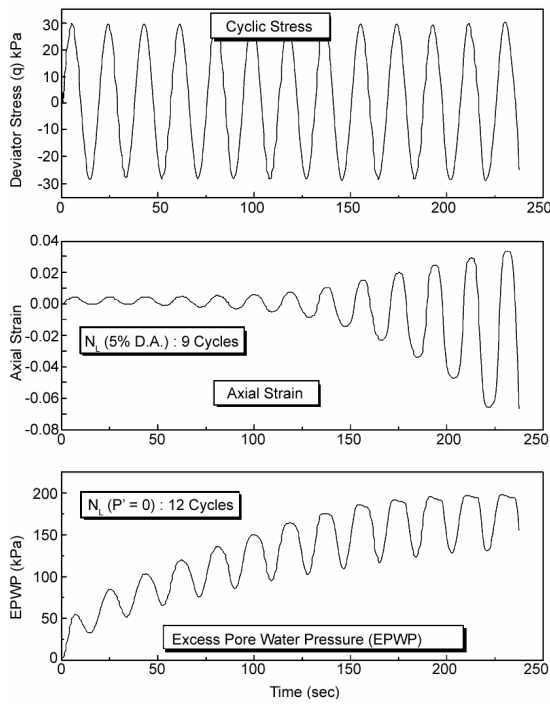


شکل ۸ (ب) - نمودار مسیر تنش و تنش کرنش، برای نمونه حاوی ۱۰ درصد کائولن و نسبت تنش سیکلیک ۰/۳.

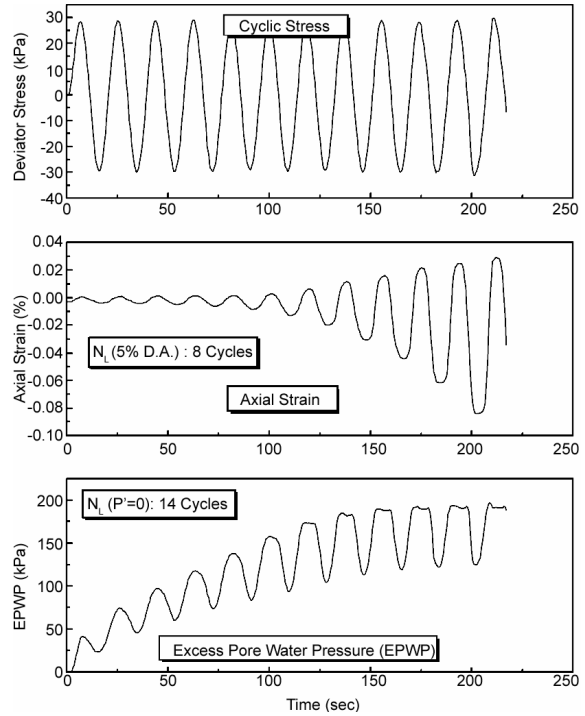
انتخاب کنند. از آنجاییکه استانداردهای *ASTM D-4254* و *ASTM D4253* تنها برای خاکهای حاوی حداکثر ۱۵ درصد ریزدانه غیرچسبنده محدود شده‌اند، انتخاب دانسیته نسبی به عنوان پارامتر ثابت صحیح به نظر نمی‌رسد. به همین دلیل در این بررسی سعی شده است که نسبت تخلخل به عنوان پارامتر ثابت در نظر گرفته شود. در آزمایشگاه کلیه نمونه‌ها با وارد شدن تنشهای سیکلی متناظر با تنشهای ناشی از یک زلزله بزرگ روانگرا شدند و به حالت تنش مؤثر برابر با صفر رسیدند. شکلهای (۸-۱۰) به ترتیب نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی نمونه‌های حاوی ۱۰، ۴۰ و ۵۰ درصد رس با نسبت تنش سیکلی $CSR=0.3$ را نشان می‌دهد.

نمودار گسترش فشار آب حفره‌ای در نمونه دارای ۱۰ درصد رس شباهت نسبتاً زیادی به نمودارهای ماسه خالص دارد؛ بطوریکه شیب قسمتهای آخر آن ناگهان زیاد می‌شود و همزمان نمونه دچار کرنشهای بزرگی می‌گردد. همچنین پدیده دو فرکانسی شدن در نمودار فشار آب حفره‌ای که مخصوص ماسه‌ها است بوضوح دیده می‌شود. در این آزمایش دو معیار $\Delta u=200\text{ kPa}$ و کرنش بیشتر از ۵ درصد همزمان رخ داده‌اند.

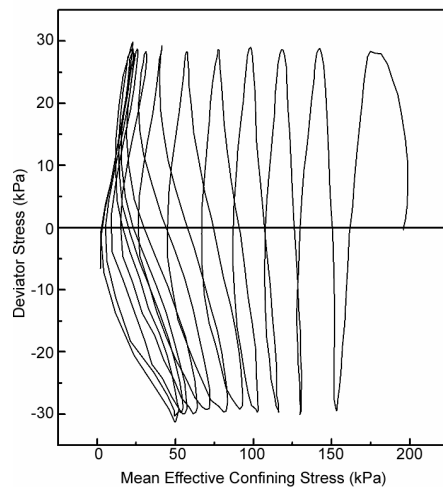
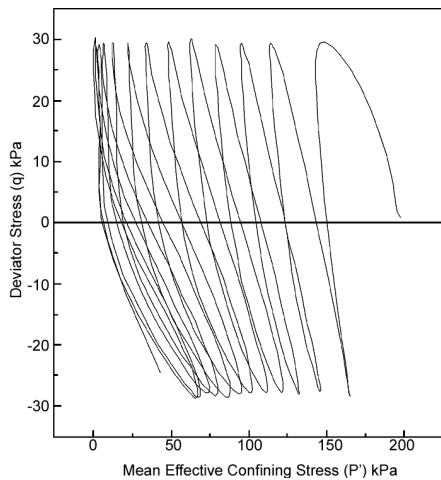
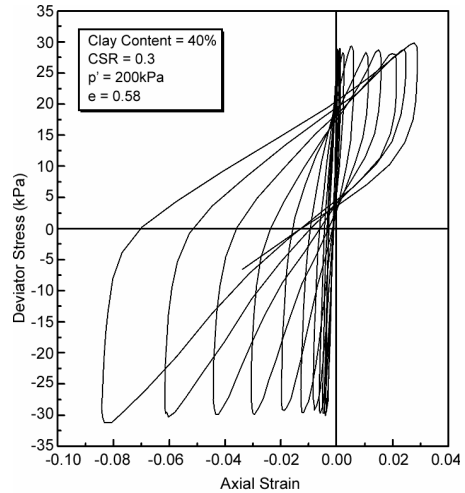
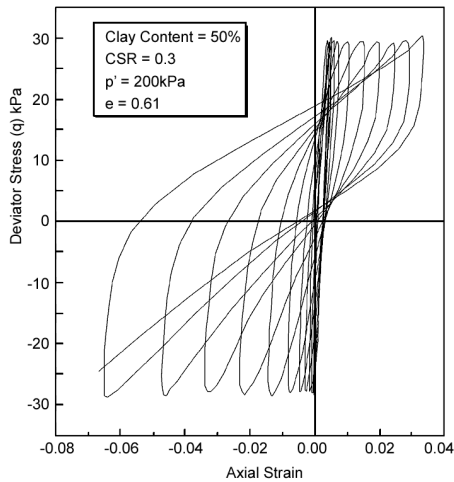
در نمونه حاوی ۴۰ درصد رس از همان سیکلهای ابتدایی آزمایش، کرنش وارد بر نمونه بتدریج بزرگ می‌شود. بر خلاف نمونه حاوی ۱۰ درصد رس پدیده دو فرکانسی شدن در نمودار فشار آب حفره‌ای دیگر مشاهده نمی‌شود و این نشان می‌دهد که در این حالت رفتار نمونه بوسیله ذرات رس که دانه‌های ماسه را کاملاً احاطه کرده‌اند کنترل می‌شود. در این آزمایش معیار $\Delta u=200\text{ kPa}$ پس از اعمال ۱۴ سیکل بار و معیار کرنش بیشتر از ۵ درصد پس از اعمال ۸ سیکل بار رخ داده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که رفتار خاک با اضافه شدن ریزدانه شکل پذیرتر می‌گردد. ملاحظه می‌شود که رفتار نمونه حاوی ۵۰ درصد رس شباهت زیادی به نمونه حاوی ۴۰ درصد رس دارد؛ بطوریکه از همان سیکلهای ابتدایی آزمایش بتدریج کرنشهای وارد بر نمونه بزرگ می‌شود. اما مقاومت آن بیشتر از نمونه دارای ۴۰ درصد رس می‌باشد. همچنین پدیده دو فرکانسی شدن در نمودار فشار آب حفره‌ای دیگر مشاهده نمی‌شود و این نشان می‌دهد که در این حالت رفتار نمونه بوسیله ذرات رس که دانه‌های ماسه را کاملاً احاطه کرده‌اند کنترل می‌شود. در این آزمایش معیار $\Delta u=200\text{ kPa}$ پس از اعمال ۱۲ سیکل بار و معیار کرنش بیشتر از ۵ درصد پس از اعمال ۹ سیکل بار رخ داده‌اند.



شکل ۱۰ (الف) - تغییرات تنش انحرافی، کرنش محوری و فشار اضافی آب حفره‌ای بر حسب زمان، برای نمونه حاوی ۵۰ درصد کائولن و نسبت تنش سیکلیک ۰/۳.



شکل ۹ (الف) - تغییرات تنش انحرافی، کرنش محوری و فشار اضافی آب حفره‌ای بر حسب زمان، برای نمونه حاوی ۴۰ درصد کائولن و نسبت تنش سیکلیک ۰/۳.

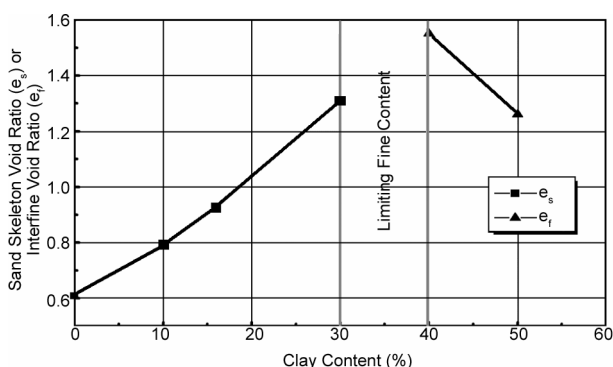


شکل ۱۰ (ب) - نمودار مسیر تنش و تنش کرنش، برای نمونه حاوی ۵۰ درصد رس و نسبت تنش سیکلیک ۰/۳.

شکل ۹ (ب) - نمودار مسیر تنش و تنش کرنش، برای نمونه حاوی ۴۰ درصد کائولن و نسبت تنش سیکلیک ۰/۳.

۱-۷- بررسی تأثیر درصد رس بر شکل پذیری

که با افزایش رس تا ۱۶ درصد، قسمت اعظم ذرات رس در فضای خالی بین دانه‌های ماسه و قسمت کمتری نیز بین دانه‌های ماسه قرار گرفته‌اند و باعث سست شدن بافت خاک گردیده‌اند. با افزایش درصد رس تا ۳۰ درصد ذرات رس علاوه بر اینکه فضای خالی بین دانه‌های ماسه را پر کرده‌اند، باعث جدا شدن دانه‌های ماسه از یکدیگر نیز شده‌اند. در این حالت رفتار نمونه بوسیله رس کنترل می‌شود. بطوریکه با بالا رفتن درصد رس از ۳۰ درصد، مقاومت روانگرایی نیز شروع به افزایش می‌کند. تعیین مقدار دقیق ریزدانه حدی نیاز به آزمایش‌های بیشتر در محدوده ۲۵ تا ۳۵ درصد رس دارد. برای توجیه این رفتار می‌توان به شکل (۱۳) توجه کرد. در این شکل نمودار تغییرات نسبت تخلخل بین دانه‌های ماسه و نسبت تخلخل بین ذرات رس ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در مقادیر کمتر از مقدار حدی با افزایش ریزدانه، نسبت تخلخل بین دانه‌های ماسه زیاد می‌شود. به عبارت دیگر قسمت اعظم ذرات ریزدانه بدون اینکه نقشی در باربری مجموعه داشته باشند تنها فضای بین دانه‌های ماسه را پر می‌کنند و قسمت کمتری نیز در بین دانه‌های ماسه قرار می‌گیرند. بدین ترتیب مجموعه سست‌تر می‌شود و مقاومت روانگرایی نمونه کاهش می‌یابد. اما در مقادیر بیشتر از مقدار حدی، ذرات رس کاملاً دانه‌های ماسه را احاطه کرده از تماس آنها با یکدیگر جلوگیری کرده‌اند. در این حالت ذرات رس رفتار مجموعه را کنترل می‌کنند و با افزایش مقدار ریزدانه، نسبت تخلخل بین ذرات رس نیز کاهش می‌یابد. این امر منجر به بالا رفتن مقاومت روانگرایی نمونه می‌شود.

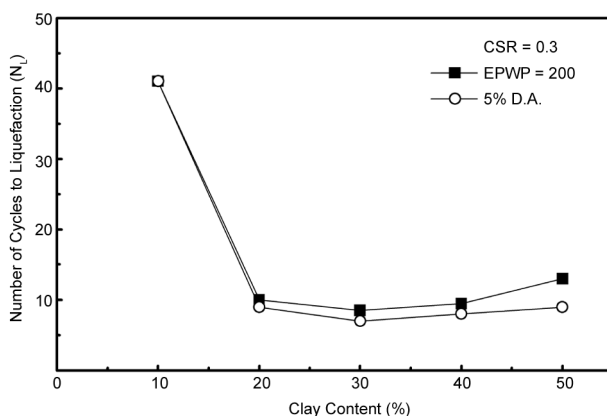


شکل ۱۳- تغییرات نسبت تخلخل بین دانه‌های ماسه و نسبت تخلخل بین ذرات رس بر حسب درصد رس.

۳-۷- بررسی تأثیر پلاستیسیته بر مقاومت روانگرایی

شکل (۱۴) تعداد سیکل‌های لازم برای روانگرایی را به ازای مقادیر مختلف پلاستیسیته با مقدار ریزدانه ثابت ۱۶ درصد و نسبت تنش سیکلی ۰/۲ نشان می‌دهد. بدین صورت که در درصد ریزدانه ثابت ۱۶ درصد، با افزودن نسبت‌های مختلف بنتونیت

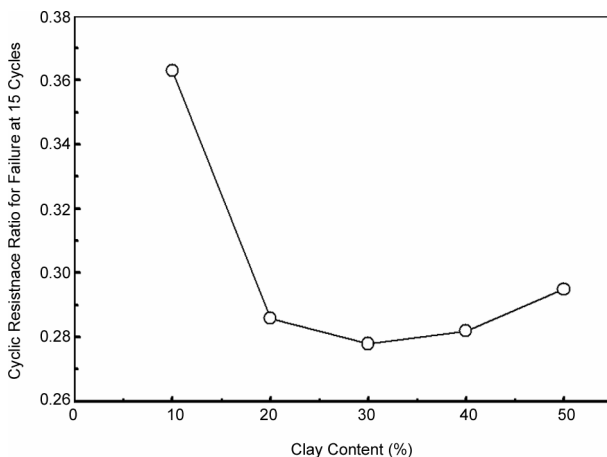
شکل (۱۱) تعداد سیکل‌های لازم برای رسیدن فشار اضافی آب حفرهای به $200 kPa$ و رسیدن کرنش محوری دو برابر دامنه به ۵ درصد را برای نسبت تنش سیکلیک ۰/۳ نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود معیار رسیدن کرنش محوری دو برابر دامنه به ۵ درصد زودتر از معیار تنش مؤثر صفر رخ می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار رس، رفتار نمونه شکل پذیرتر و نرم‌تر می‌شود.



شکل ۱۱- تعداد سیکل‌های لازم برای صفر شدن تنش مؤثر و رسیدن کرنش محوری دو برابر دامنه به ۵٪ بر حسب درصد رس.

۲-۷- بررسی تأثیر درصد رس بر مقاومت روانگرایی

شکل (۱۲) نمودار تغییر مقاومت روانگرایی خاک را به ازای درصدهای مختلف رس برای نسبت تنش سیکلیک معادل با ۱۵ سیکل بارگذاری (زلزله با بزرگی $M=7/5$) نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد رس تا ۳۰ درصد مقاومت روانگرایی کاهش می‌یابد اما پس از ۳۰ درصد مقاومت روانگرایی شروع به افزایش می‌نماید. با توجه به مدل پیشنهادی توانایاگام [۱۰] که در قسمت ۳ بحث شد می‌توان نتیجه گرفت



شکل ۱۲- تغییر مقاومت تناوبی همپایه شده برای زلزله با بزرگی ۷/۵ بر حسب درصد رس.

الف- حضور ریزدانه در ماسه می‌تواند باعث تغییر در تمایل خاک به انبساط و انقباض در اثر اعمال تنش برشی گردد. این تغییر به نوبه خود به افزایش فشار آب حفره‌ای و در نتیجه تغییر مقاومت روانگرایی منجر می‌شود.

ب- رس موجود در نمونه بدلیل طبیعت چسبنده خود می‌تواند مقداری از این چسبندگی را به دانه‌های ماسه اطراف خود منتقل کند و مقاومت روانگرایی را افزایش دهد.

۶- تأثیر چسبندگی در مواردی که ریزدانه رسی پلاستیسیته بیشتری دارد زیادتر است. به همین دلیل با در نظر گرفتن هر دو عامل فوق‌الذکر می‌توان نتیجه گرفت که هم ریزدانه رسی و هم پلاستیسیته می‌تواند مقاومت روانگرایی ماسه را تحت تأثیر قرار دهد. در واقع اندرکنش این دو عامل افزایش و یا کاهش مقاومت روانگرایی ماسه را تعیین می‌کند.

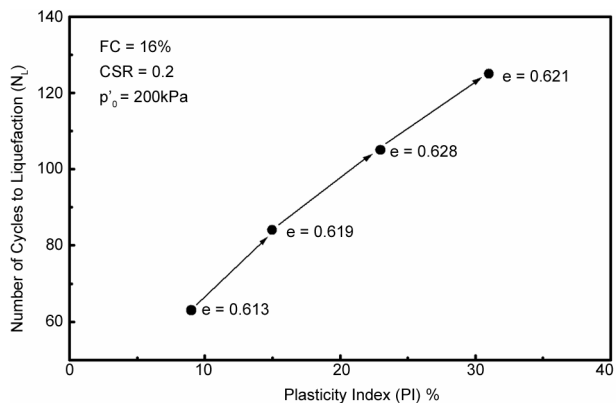
تشکر و قدردانی

تهیه‌کنندگان این مقاله لازم می‌دانند از زحمات آقایان مهندس حقیقت و بهادری که در راه‌اندازی دستگاه سه محوری سیکلیک آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تهران متحمل زحمات فراوانی شدند و همچنین آقای پروفسور کوناگی - استاد دانشگاه توکیو- که عکسها و نمونه خاک چنگوره را در اختیار آنان قرار دادند، صمیمانه تشکر نمایند.

مراجع

1. Amini, F. and Qi, G.Z. (2000). "Liquefaction Testing of Stratified Silty Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engr. March.*, 208-17
2. Chang, N.Y., Yeh, S.T., and Kaufman, L.P. (1982). "Liquefaction Potential of Clean and Silty Sands", *Proceedings of the Third International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, USA*, 2, 1017-32.
3. Das, B.M., Puri, V.K., and Prakash, S. (1999). "Liquefaction of Silty Soils", *Earthquake Geotechnical Engineering, Balkema, Rotterdam*, 619-23.
4. Dezfulian, H. (1982). "Effects of Silt Content on Dynamic Properties of Sandy Soils", *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, USA*, 63-70.

و کائولن، ریزدانه با پلاستیسیته متغیر فراهم و به نمونه اضافه شد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار پلاستیسیته مقاومت روانگرایی نیز افزایش یافته است. ایشیهارا و کوسکی [۵] نیز به افزایش مقاومت روانگرایی با افزایش پلاستیسیته اشاره کرده‌اند.



شکل ۱۴- تعداد سیکلهای لازم برای روانگرایی بر حسب مقادیر مختلف پلاستیسیته، (مقدار ریزدانه ۱۶٪ و نسبت تنش سیکلیک ۰/۲).

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعه آزمایشگاهی حاضر می‌توان نتیجه گرفت که:

۱- رفتار مخلوط ماسه و رس مشابه رفتار ماسه و سیلت می‌باشد؛ بطوریکه در نسبت تخلخل ثابت با افزایش درصد رس مقاومت روانگرایی کاهش و پس از رسیدن مقدار ریزدانه به مقدار حدی، افزایش می‌یابد.

۲- با اضافه شدن رس شکل‌پذیری نمونه افزایش می‌یابد؛ بطوریکه معیار رسیدن کرنش محوری دو برابر دامنه به ۵ درصد زودتر از معیار تنش مؤثر صفر رخ می‌دهد. البته این پدیده در مورد ماسه‌های سیلتی نیز گزارش شده است.

۳- با افزایش درصد رس نحوه گسترش فشار اضافی آب حفره‌ای نیز تغییر می‌کند. بدین صورت که در درصدهای کمتر که رفتار نمونه بوسیله قسمت ماسه‌ای کنترل می‌شود، در سیکلهای انتهایی بارگذاری، فشار اضافی آب حفره‌ای ناگهان زیاد می‌شود. اما در نمونه‌های با درصد رس بالا فشار اضافی آب حفره‌ها تقریباً با سرعت ثابتی افزایش می‌یابد.

۴- با افزایش پلاستیسیته ذرات رسی، مقاومت روانگرایی نیز افزایش می‌یابد.

۵- با توجه به نتایج ذکر شده می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که برای بررسی تأثیر ریزدانه‌های پلاستیک بر مقاومت روانگرایی ماسه‌ها باید به دو پدیده مجزا دقت کرد:

- Geotechnical Engr.*, Lisbon, Portugal, **2**, 611-618.
9. Polito, C.P. and Martin, J.R. (2001). "The Effects of Non-Plastic Fines on the Liquefaction Resistance of Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engr.*, 408-15.
 10. Thevanayagam, S. (2000). "Liquefaction Potential and Undrained Fragility of Silty Soils", *Proc. of 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, p. 8.
 11. Tohno, I. and Yasuda, S. (1981). "Liquefaction of the Ground during the 1978 Miyagiken-Oki Earthquake", *Soils and Foundations*, **21**(3), 18-34.
 12. Xenkai, V.C. and Athanasopoulos, G.A. (2003). "Liquefaction Resistance of Sand-Silt Mixtures: An Experimental Investigation of the Effect of Fines", *Soil Dynamics and Earthquake Engr.*, **23**, 183-94.
 5. Ishihara, K. and Koseki, (1989). "Discussion on The Cyclic Shear Strength of Fines-Containing Sands", *Earthquakes Geotechnical Engineering, Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio De Janiero, Brazil, 101-106.
 6. Liang, R., Bai, X., and Wang, J. (2000). "Effect of Clay Particle Content on Liquefaction of Soil", *12th World Conference on Earthquake Engr.*, Auckland, New Zealand, 1560-1564.
 7. Miura, S., Kawamura, S., and Yagi, K. (1995). "Liquefaction Damage of Sandy and Volcanic Grounds in the 1993 Hokkaido Nansel-Oki Earthquake." *Proc. 3rd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engr. and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, **1**, 193-196.
 8. Perlea, V.G., Koester, J.P., and Prakash, S. (1999). "How Liquefiable are Cohesive Soils?", *Proc. Second Int. Conference on Earthquake*