

روانگرایی ماسه رس دار غیر اشباع

رضا صادق زادگان^۱، سید ابوالحسن نائینی^{۲*}، علی میرزائی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه کاشان

* Naeini_h@ikiu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۶/۲۰]

تاریخ دریافت: [۹۶/۰۲/۰۶]

چکیده

بیشتر پژوهش‌های انجام شده در خصوص پدیده روانگرایی معطوف به ماسه‌های تمیز یا ماسه‌های دارای سیلت در حالت اشباع بوده و ماسه‌های رس دار به ویژه در حالت غیر اشباع کمتر مورد توجه بوده است. در این پژوهش کوشیده شده است تا با انجام آزمایش‌های سه محوری تناوبی روی خاک ماسه‌ای غیر اشباع با درصد‌های مختلف کائولن (۰ تا ۳۰ درصد)، مقاومت روانگرایی آن‌ها ارزیابی شود. مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از سلول سه محوری دو جداره غیر اشباع در درجه اشباع‌های ۸۰٪، ۸۵٪، ۹۰٪، ۹۵٪، ۱۰۰٪ و تراکم نسبی ۵۰٪ صورت گرفته است. تغییرات مکش نمونه در حین بارگذاری بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد ریزدانه رسی تا حدود ۲۰٪ مقاومت روانگرایی کاهش داشته و با افزایش درصد ریزدانه از این مقدار به ۳۰٪ مقاومت کمی افزایش می‌یابد که این امر در نمونه‌های اشباع و غیر اشباع قابل مشاهده است. با کاهش درجه اشباع مقاومت روانگرایی در تمامی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. مقدار این افزایش در ماسه تمیز نسبت به خاک‌های دارای ریزدانه رسی بیشتر بوده و در واقع با کاهش درجه اشباع، افزایش مقاومت روانگرایی در خاک‌های دارای ریزدانه رسی نسبت به ماسه تمیز دارای حساسیت کمتری است.

واژگان کلیدی: روانگرایی، ماسه غیر اشباع، ریزدانه رسی، درجه اشباع، بارگذاری چرخه‌ای

۱- مقدمه

روانگرایی این گونه خاک‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفت. با توجه به مشاهدات مشخص شد روانگرایی در خاک‌هایی با درصد قابل توجه رس نیز به وقوع پیوسته است [1, 2]. در زلزله سال ۲۰۰۲ آوج علاوه بر خرابی‌های به وقوع پیوسته مواردی از روانگرایی گزارش شد که با بررسی بیشتر مشخص شد خاک منطقه دارای ۴۴ درصد ریزدانه رسی است. در این خصوص مطالعاتی با هدف بررسی تاثیر درصد ریزدانه رسی

روانگرایی یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌های ژئوتکنیکی است که همواره از گذشته تا حال به وسیله پژوهشگران مورد بحث و بررسی قرار گرفته و هنوز همه زوایای آن نیز به درستی شناخته نشده است. پس از وقوع روانگرایی در خاک‌های ماسه‌ای دارای ریز دانه که در طبیعت نیز نسبت به خاک‌های ماسه تمیز بیشتر یافت می‌شوند بررسی و پژوهش در خصوص

مقایسه شده است.

۲- مصالح استفاده شده

مصالح مورد استفاده در این تحقیق ماسه شکسته فیروزکوه ۱۶۱ به همراه درصدهای مختلف کائولن می باشد. مشخصات خاک مورد استفاده با درصدهای کائولن ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در جدول (۱) نمایش داده شده است. کائولن مورد استفاده در پژوهش دارای حد روانی ۴۹٪ و حد خمیری ۲۱٪ می باشد و در گروه رس های با پلاستیسیته متوسط قرار می گیرد.

جدول ۱. مشخصات خاک مصرفی

Kaolinite content (%)	Pure sand	10	20	30
Specific gravity, G_s	2.673	2.665	2.643	2.626
Maximum void ratio, e_{max}	0.951	1.053	1.184	1.335
Minimum void ratio, e_{min}	0.563	0.467	0.393	0.399
Liquid limit (%)	-	12	17	22
Plasticity index (%)	N.P	N.P	5	11
Percentage <75 μm	0.5	11	20	30
Soil type (Unified classification)	SP	SP-SC	SC	SC

Table 1. Index properties of sand- kaolinite mixture

تمامی نمونه ها در این پژوهش با استفاده از روش ریزش خشک بر اساس کمینه ابعاد استاندارد ASTM D5311 به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر تهیه شده اند که در بسیاری از تحقیقات دینامیکی با مصالح مشابه نیز استفاده شده است [7, 16, 17, 22, 25, 29]. به منظور بررسی تاثیر درصد ریزدانه نمونه ها با درصدهای ریزدانه متفاوت خشک شده با یکدیگر ترکیب شده و به داخل قیف ریخته شده اند. پس از آن انتهای قیف به آرامی بالا آورده شده به طوری که ارتفاع ریزش خاک در حدود صفر باشد. بدین ترتیب می توان از جداسدگی بین دانه ها تا حد امکان جلوگیری نمود. کلیه نمونه ها در ۵ لایه با ارتفاع و وزن مساوی ساخته شده اند. با زدن ضربات متقارن و یکنواخت به قالب نمونه سازی می توان به تراکم مورد نظر دست یافت. در نمونه های ماسه ای تمیز معمولاً پارامتر تراکم بر

روی مقاومت روانگرایی ماسه در حالت اشباع صورت پذیرفت که نتایج حاکی از کاهش مقاومت روانگرایی با افزایش درصد ریزدانه رسی و سپس افزایش مقاومت روانگرایی است [3-7]. از سوی دیگر وقوع روانگرایی در حین زلزله برای خاک هایی که در حالت اشباع کامل نبودند نیز گزارش شده است [8, 9]. در سال های اخیر بررسی مقاومت روانگرایی در خاک های غیر اشباع به ویژه ماسه تمیز مورد توجه قرار گرفته است. برخی از پژوهشگران به بررسی آزمایشگاهی افزایش مقاومت روانگرایی خاک های غیر اشباع در مقایسه با وضعیت اشباع پرداختند [10, 11] و برخی به مطالعات صحرایی آن پرداختند [12, 13]. گروهی نیز افزایش مقاومت روانگرایی خاک های ماسه ای غیر اشباع را با پارامتر درجه اشباع مرتبط ساختند و نشان دادند مقاومت روانگرایی با کاهش درجه اشباع افزایش می یابد [14, 15].

پژوهشگران دیگری نیز افزایش مقاومت روانگرایی ماسه را با پارامتر B اسکمپتون مرتبط ساختند و تاثیر تراکم پذیری هوا را در افزایش مقاومت روانگرایی ماسه غیر اشباع ارزیابی کردند [16].

در خصوص مقاومت روانگرایی خاک های ماسه ای غیر اشباع دارای ریزدانه در سال های اخیر مطالعات اندکی صورت پذیرفته است. از جمله این مطالعات معدود، وانگ^۱ و کوزکی^۲ به مطالعه روانگرایی ماسه اینگای^۳ که دارای ۳۰٪ ریزدانه بود پرداخته و به مقایسه آن با پارامتر کرنش حجمی که به وسیله اوکامورا^۴ و همکاران پیشنهاد شده بود پرداختند [17].

با توجه به احتمال وقوع روانگرایی در خاک هایی با درجه اشباع نزدیک به ۱۰۰٪ و همینطور مطالعات اندکی که در خصوص خاک های ماسه رس دار غیر اشباع صورت پذیرفته، این پژوهش کوشیده است تا با انجام آزمایش های سه محوری تناوبی غیر اشباع روی خاک ماسه ای همراه با درصد های مختلف کائولن به بررسی مقاومت روانگرایی این خاک ها بپردازد. در پایان نیز روند افزایش مقاومت با نتایج گذشته

1 Wang
2 Koseki
3 Ingai
4 Okamura

است. مطابق شکل (۱) در پدستال بالای نمونه نیز دو مجرای ورود / خروج برای آب و هوای حفره‌ای تعبیه شده است. در هر دوی این مجاری دو سنگ متخلخل فلزی تعبیه شده اند. یکی از این مجراها برای ورود/خروج آب در مرحله اشباع نمونه بوده و مجرای دیگر نیز برای ورود/خروج هوای حفره‌ای در نظر گرفته شده است. استفاده از این ترکیب مجاری ورودی / خروجی آب و هوای حفره‌ای برای انجام آزمایش‌های غیر اشباع در درجات اشباع بالا در گذشته نیز به وسیله پژوهشگران همچون اوکامورا و نوگوچی^۵ استفاده شده است [28].

قبل از انجام آزمایش دیسک سرامیکی را از آب اشباع نموده و به منظور جلوگیری از خشک شدن سطح دیسک حین ساخت نمونه فشاری در حدود ۱۰ کیلو پاسکال بر آب زیر دیسک وارد شده تا دیسک از حالت اشباع خارج نشود. پس از ساخت نمونه و قرار دادن پدستال بالا روی نمونه، ابتدا از پایین نمونه و سنگ متخلخل که در اطراف دیسک سرامیکی قرار گرفته، گاز دی اکسید کربن از داخل نمونه به مدت ۳۰ دقیقه عبور کرده و پس از عبور آب به مدت ۱ ساعت و اعمال پس فشار ۲۰۰ کیلو پاسکال نمونه اشباع شده و سپس با بالا بردن فشار محصور شدگی تا ۳۰۰ کیلو پاسکال نمونه تحت تنش همه جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال به مدت ۱ ساعت تحکیم شده است.

به منظور حذف اثر زمان تحکیم تمامی نمونه‌ها به مدت زمان مساوی تحکیم شده‌اند. به منظور ارزیابی میزان دقت سلول در اندازه‌گیری تغییر حجم با توجه به میزان حجم آب ورودی به سلول داخلی و نیز میزان حجم آب حفره‌ای خروجی از نمونه خاک در مرحله تحکیم یک نمونه خاک ماسه شامل ۳۰ درصد ریزدانه در وضعیت اشباع کامل تحت اثر تنش تحکیمی ۱۰۰ کیلو پاسکال بررسی شد. مطابق نتایج بدست آمده در شکل (۲) مشاهده می‌شود که میزان اختلاف اندازه‌گیری تغییر حجم از دو روش برابر ۰/۲۵ سی سی بوده و با توجه به حجم نمونه خاک برابر با ۰/۱۳ درصد است که حاکی از دقت مطلوب استفاده از سلول دو جداره برای اندازه‌گیری رفتار تغییر حجمی نمونه‌های خاک در حالت غیر اشباع است.

اساس نسبت تخلخل کمینه و بیشینه (به ترتیب e_{min} و e_{max}) مشخص می‌شود. با توجه به جدول (۱) مشخص است که این مقادیر تابعی از درصد ریزدانه بوده و مقدار آنها با تغییر درصد ریزدانه تغییر می‌کند. پژوهشگران مختلفی نشان دادند که رفتار تناوبی خاک‌های دارای ریزدانه تابعی از نسبت تخلخل بین دانه‌های ریز و نسبت تخلخل بین دانه‌های درشت (e_s و e_f) است [18, 19]. برخی از پژوهشگران پارامتر تراکم نسبی (D_r) را به عنوان پارامتر مرجع در نظر گرفتند [20, 21]. پارامتر تراکم نسبی وضعیت تراکمی خاک را بین حد بالا و پایین به خوبی مشخص می‌کند. در این پژوهش تمامی نمونه‌ها به گونه‌ای آماده شدند که تراکم نسبی آنها پس از تحکیم در حدود ۰/۵۰ باشد.

۳- روش تهیه نمونه و انجام آزمایش

به منظور انجام آزمایش‌های سه‌محوری اشباع و غیراشباع سلول سه‌محوری دو جداره مطابق پژوهش‌های مندرس و تول^۱ و همینطور بین^۲، در دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) ساخته شد که در شکل (۱) جزئیات آن نمایش داده شده است [26, 27]. فریم بارگذاری و سیستم فرمان دهنده و جمع‌آوری داده‌ها با نام اختصاری DYNATRIAX مربوط به شرکت کنترلر^۳ است که قابلیت ذخیره اطلاعات و همینطور بارگذاری ۰/۵۰ تا ۷۰ هرتز را طبق ASTM-D5311 دارد. همینطور استفاده از سیستم پی آی دی^۴ کنترلر سبب شده است که چگونگی اعمال بار و پاسخ آن از سیستم با دقت خوبی قابل تنظیم باشد. با استفاده از روش جابه‌جایی محوری امکان کنترل مکش روی نمونه فراهم شده است. مطابق شکل (۱)، پدستال پایین سلول شامل دو مجرای ورود / خروج آب به داخل نمونه بوده است. یکی از این مجراها مجهز به یک دیسک سرامیکی با عدد ورودی هوای ۱ بار با قابلیت عبور جریان زیاد برای انجام آزمایش‌های غیر اشباع بوده است. مجرای دیگر پدستال پایین نیز شامل یک سنگ متخلخل فلزی برای ورود و خروج آب از پایین به داخل نمونه برای مرحله اشباع کامل نمونه‌ها بوده

1 Mendes and Toll

2 Yin

3 Controls

4 Proportional Integral Derivative

شکل ۱. اجزای سلول سه محوری غیر اشباع

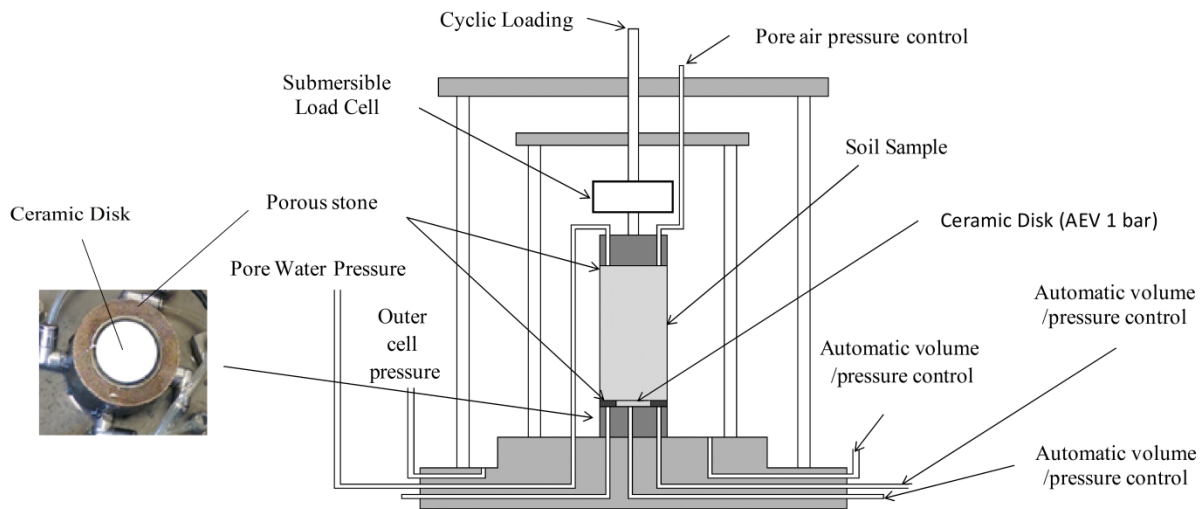


Fig. 1. Unsaturated triaxial cell

است. در ادامه، شیر مربوط به آب حفره‌ای بالای نمونه بسته شده، فشار هوای ۲۰۰ کیلو پاسکال از بالا اعمال شده و فشار آب حفره‌ای ۱۹۵ کیلو پاسکال تنها از طریق دیسک سرامیکی واقع در پدستال پایین اعمال شده است. در این وضعیت به واسطه اختلاف فشار بین هوا و آب درون نمونه، به تدریج نمونه از وضعیت اشباع خارج شده و با اندازه‌گیری میزان آب خارج شده از نمونه امکان رساندن نمونه به درجه اشباع هدف میسر شده است. به عنوان نمونه شکل (۳) روند غیراشباع نمودن نمونه دارای ۲۰٪ رس که به درجه اشباع ۸۵٪ رسیده شده است را نمایش می‌دهد. در این شکل مقدار آب نمونه در حالت اشباع ۸۵/۲ سی سی بوده که با خارج نمودن مقدار مشخص آب، درجه اشباع نمونه به ۸۵٪ رسانده شده است. پس از رسیدن نمونه به درجه اشباع مورد نظر شیر آب متصل به دیسک سرامیکی بسته شده و نمونه به مدت ۲۴ ساعت به منظور تعادل توزیع رطوبت در این حالت باقی مانده است. برای کاهش اثر تبخیر آب درون نمونه خاک به داخل هوای حفره‌ای، هوای ورودی به نمونه آب از داخل یک محفظه بسته نیمه پر از آب عبور داده شده است. درستی توزیع یکنواخت درصد رطوبت در بخش‌های مختلف نمونه‌های خاک با خارج نمودن یکی از نمونه‌های ماسه حاوی ۳۰ درصد ریزدانه و تقسیم آن به چهار قسمت مساوی بررسی شد.

شکل ۲. تغییر حجم نمونه ۳۰٪ رس در حین تحکیم

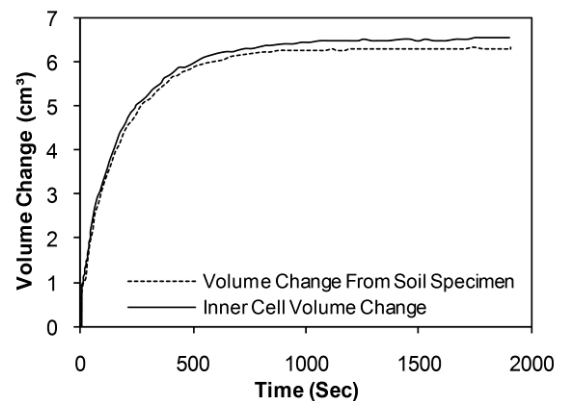


Fig. 2. Volume change of sand+30% clay during consolidation

پس از مرحله تحکیم نمونه‌های اشباع در حالت زهکشی نشده بارگذاری شده‌اند. در آزمایش‌های غیراشباع، برای رسیدن به درجات اشباع هدف (۸۰، ۸۵، ۹۰ و ۹۵ درصد) از روش پیشنهادی به وسیله اوکامورا و نوگوچی استفاده شد [28]. برای این امر از مجاری هوای حفره‌ای واقع در پدستال بالا که دارای کمینه فاصله تا پدستال بوده فشار هوای معادل ۲۰۰ کیلو پاسکال اعمال شده است. برای خروج آب جمع شده در مجرای اعمال هوای حفره‌ای در مرحله اشباع، فشار آب حفره‌ای در مجرای دیگر واقع در بالای نمونه به مقدار ۱۹۵ کیلو پاسکال کاهش یافته و با قرائت کردن مقدار آب خروجی از این مجرا، حجم آب محبوس در مجرای هوا تخلیه شده

مقادیر فشار آب و هوای حفره ای به صورت پیوسته در حین بارگذاری چرخه‌ای اندازه‌گیری شد.

برای بررسی پتانسیل رخداد روانگرایی، بارگذاری چرخه‌ای با اعمال نسبت‌های تنش چرخه‌ای متفاوت به صورت سینوسی با فرکانس ۰/۰۱ هرتز انجام شد. فرکانس اعمال بار به گونه‌ای انتخاب شده که فشار آب منفذی زیر دیسک سرامیکی را بتوان به دقت در حین اعمال بار تناوبی قرائت نمود. همچنین این مقدار سازگار و مشابه با فرکانس انتخابی سایر پژوهشگران در شرایط مشابه بوده است [16, 22].

برای اندازه‌گیری دقیق‌تر فشار آب حفره‌ای در مرحله بارگذاری تناوبی، حباب‌های هوای احتمالی جمع شده در دیسک سرامیکی قبل از بارگذاری تناوبی با برقراری یک جریان آب در زیر دیسک سرامیکی تخلیه شده است. نتایج مربوط به آزمایش‌های سه محوری تناوبی اشباع و غیر اشباع انجام شده در درجه اشباع‌های ۱۰۰٪، ۹۵٪، ۹۰٪، ۸۵٪ و ۸۰٪ برای نمونه‌های دارای درصد ریزدانه ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد و در چندین نسبت تنش در جدول (۳) نمایش داده شده است.

۴- نتایج

۴-۱- رفتار تنش - کرنش

نتایج آزمایش‌های سه محوری تناوبی انجام شده روی ماسه و مخلوط ماسه و ۳۰٪ کائولن در حالت اشباع به ترتیب در شکل‌های (۴ و ۵) نمایش داده شده است. با مقایسه نمودار گسترش آب حفره‌ای در نمونه ماسه خالص و نمونه دارای ۳۰٪ رس می‌توان دریافت که افزایش فشار آب حفره ای در ماسه تقریباً به طور یکنواخت افزایش یافته و در سیکل‌های پایانی نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای بیشتر شده و معمولاً یک پرش در نمودار مشاهده شده است. این پدیده و رفتار گسیختگی ناگهانی در نمونه‌هایی با ۱۰٪ رس نیز به طور مشابه دیده شده است. این رفتار حاکی از آن است که قسمت ماسه‌ای رفتار کلی خاک را رقم زده و رفتار خاک اصطلاحاً ماسه‌ای بوده است. برخلاف آن در نمونه ماسه مخلوط با ۳۰٪ کائولن در سیکل‌های ابتدایی بارگذاری فشار آب حفره‌ای با نرخ بیشتری افزایش یافته و پدیده دو فرکانسی شدن که در

شکل ۳. غیراشباع نمودن نمونه ۲۰٪ رس به درجه اشباع ۸۵٪

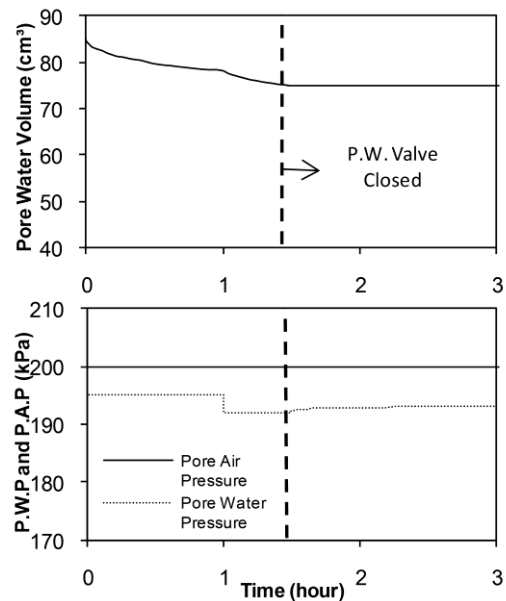


Fig. 3. Desaturation of sand+20% clay from $S_r=100\%$ to $S_r=85\%$

این نتایج در جدول (۲) ذکر شده است و بیانگر توزیع یکنواخت آب در نقاط مختلف خاک بعد از خشک نمودن آن به درجات اشباع مختلف و نیز عدم تاثیر تبخیر آب درون حفرات در مدت زمان ۲۴ ساعت بوده است.

جدول ۲. نتایج بررسی درصد رس، درجه اشباع و درصد رطوبت در

نمونه‌های حاوی ۳۰٪ رس و درجه اشباع ۹۰٪

	Part 1	Part 2	Part 3	Part 4	Mean	Standard deviation
Clay content %	29.38	29.82	30.55	29.49	29.81	0.38
Moisture Content %	28	27.8	27.5	27.3	27.7	0.25
Degree of saturation %	90.3	89.5	88.7	87.6	89.1	0.82

Table 2. Result of clay content, degree of saturation and moisture content of sand+30% clay in $s_r=90\%$

در مرحله بارگذاری نمونه‌های خاک غیر اشباع، با نظر سریع بودن اعمال بارهای لرزه‌ای در هنگام زلزله، امکان زهکشی سیال‌های موجود در توده خاک تا حد زیادی وجود ندارد [12, 16, 17, 22, 25]. در نتیجه در بیشتر پژوهش‌های گذشته روی رخداد روانگرایی در خاک‌های غیر اشباع، هر دو فاز آب و هوای حفره‌ای در وضعیت زهکشی نشده قرار گرفته است که در ادبیات به آن اصطلاحاً شرایط **undrained-unexhausted** اطلاق شده است [12, 16, 17, 22, 25]. با عنایت به شرایط فوق،

مشخص شده مقدار اختلاف بین فشار هوا و فشار آب حفره‌ای در حین بارگذاری تدریجاً کاهش یافته و در پایان آزمایش تقریباً به مقدار صفر رسیده است.

شکل ۴. رفتار تناوبی ماسه اشباع

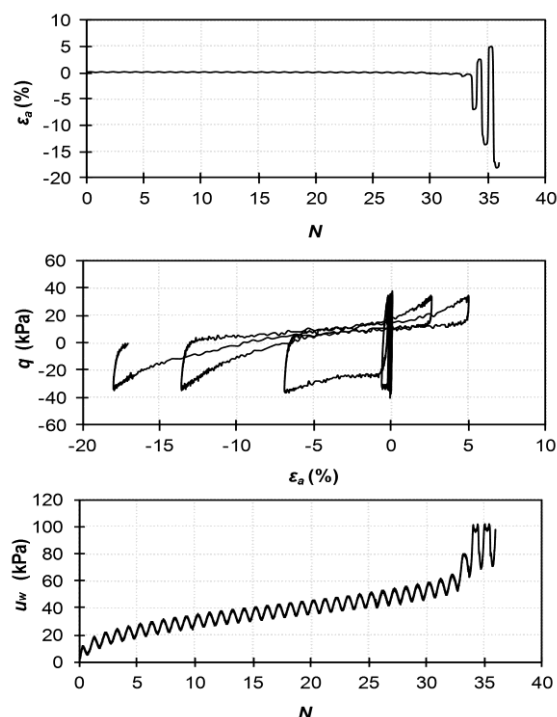


Fig. 4. Cyclic behavior of sand Sr=100

شکل ۵. رفتار تناوبی ماسه + ۳۰٪ رس اشباع

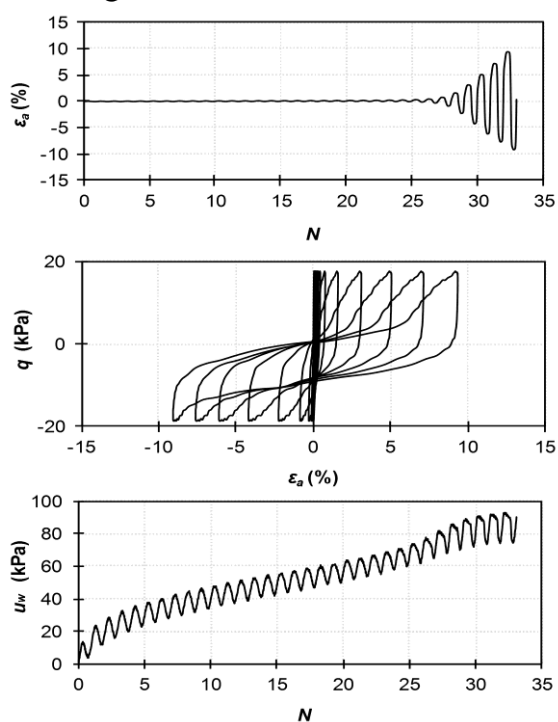


Fig. 5. Cyclic behavior of sand+30% clay Sr=100

خاک ماسه‌ای دیده شده نیز در آن دیده نمی‌شود. این تغییر رفتار به لحاظ احاطه کردن ذرات ماسه توسط رس بوده که در نمونه‌های دارای رس بیشتر از ۲۰٪ قابل مشاهده است. کرنش قائم در نمونه دارای ۳۰٪ رس نیز از ابتدا در تنش اعمالی یکسان بیشتر بوده و نمونه اصطلاحاً شکل‌پذیری بیشتری دارد. بر این اساس رفتار تناوبی خاک‌های دارای رس به دو صورت ماسه‌ای و رسی تفکیک شده که ۲۰٪ ریز دانه برای مصالح مورد مطالعه تقریباً مرز این رفتار است.

جدول ۳. خلاصه نتایج آزمایش‌های سه محوری تناوبی

Test No.	Clay Content	Dr %	Sr %	CSR ₂₀	ϵ_v^*
1-3		50-51	100	0.191	-
4-6		49-52	95.3	0.328	0.0065
7-9	0%	49-51	89.6	0.374	0.0150
10-12		48-52	85.2	0.389	0.0213
13-15		49-53	80.0	0.408	0.0288
16-18		50-51	100	0.115	-
19-21		49-52	95.1	0.175	0.0072
22-24	10%	48-51	90.3	0.208	0.0142
25-27		50-52	85.0	0.219	0.0219
28-30		49-51	80.1	0.240	0.0290
31-33		50-52	100	0.075	-
34-36		50-51	94.8	0.105	0.0077
37-39	20%	49-51	90.7	0.117	0.0136
40-42		48-51	84.9	0.127	0.0223
43-45		50-51	80.1	0.140	0.0295
46-48		49-53	100	0.090	-
49-51		49-53	94.9	0.121	0.0079
52-54	30%	48-54	89.5	0.134	0.0162
55-57		50-53	85.1	0.155	0.0229
58-60		49-52	80.0	0.163	0.0309

Table 3. Summary of cyclic triaxial test results

در شکل‌های (۶ و ۷) نیز رفتار تناوبی خاک ماسه‌ای و خاک ماسه همراه با ۳۰٪ کائولن با درجه اشباع ۸۰٪ نمایش داده شده است. با توجه به تغییرات فشار آب حفره‌ای و فشار هوای حفره‌ای می‌توان دریافت در این حالت با اعمال تنش تناوبی فشار هوا و آب به طور همزمان افزایش یافته؛ به گونه‌ای که فشار هوای حفره‌ای زودتر به مقدار نهایی خود رسیده است. با رسیدن فشار هوا به مقدار بیشینه هنوز تغییر مکان‌های قابل توجهی در نمونه دیده نمی‌شود. با افزایش تعداد سیکل‌ها و نزدیک شده فشار آب حفره‌ای به تنش محصور شدگی کرنش‌ها افزایش یافته و نمونه روانگرا شده است. همان‌گونه که

می‌کند. در صورتی که برای خاک‌های ماسه‌ای همراه با رس نسبت افزایش فشار آب حفره‌ای می‌تواند به حدود ۹۰٪ الی ۹۵٪ برسد [23]. در این پژوهش با توجه به وجود رس و پیشنهاد پژوهشگران مختلف، آستانه شروع روانگرایی نمونه‌ها کرنش مضاعف ۵٪ در نظر گرفته شده است [25, 26]. تمامی نمونه‌ها با اعمال تنش‌های تناوبی مختلف به روانگرایی رسیده‌اند. با ترسیم تغییرات نسب تنش تناوبی در برابر تعداد سیکل‌های لازم برای روانگرایی در حالت اشباع و غیر اشباع می‌توان مقدار تنش تناوبی متناظر با ۲۰ سیکل برای شروع روانگرایی را تعیین نمود که به عنوان پارامتر CSR_{20} در این پژوهش در نظر گرفته شده است [22]. در شکل (۸) همچنین مقادیر نسبت تنش تناوبی متناظر با ۲۰ سیکل که به عنوان مقاومت روانگرایی خاک در این پژوهش در نظر گرفته شده در برابر درصد ریزدانه برای درجه اشباع‌های ۱۰۰٪ تا ۸۰٪ ترسیم شده است. همان‌گونه که در شکل (۸) مشخص شده با افزایش درصد ریزدانه مقاومت روانگرایی خاک تا حدود ۲۰٪ ریزدانه کاهش داشته و با افزایش درصد ریزدانه تا ۳۰٪ مقاومت روانگرایی اندکی افزایش دارد. این نتایج با نتایج پژوهشگران دیگر در حالت اشباع همخوانی دارد [6, 7].

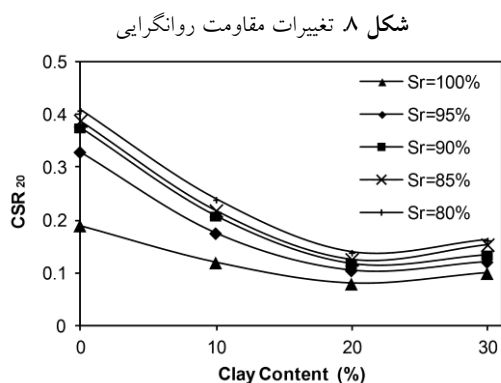


Fig. 8. Variation of CSR_{20} versus clay content

از طرف دیگر مقاومت روانگرایی برای یک درصد ریزدانه مشخص با کاهش درجه اشباع افزایش یافته است. مطابق نتایج بدست آمده نرخ این افزایش در وضعیت کاهش درجه اشباع از ۱۰۰٪ به ۹۵٪ نسبت وضعیت کاهش درجه اشباع از ۹۵٪ به ۹۰٪ بیشتر محسوس بوده است. روند مذکور تا کاهش درجه اشباع به مقدار ۸۰٪ ادامه یافته است. روند افزایش مقاومت با

شکل ۶. رفتار تناوبی ماسه در درجه اشباع ۸۰٪

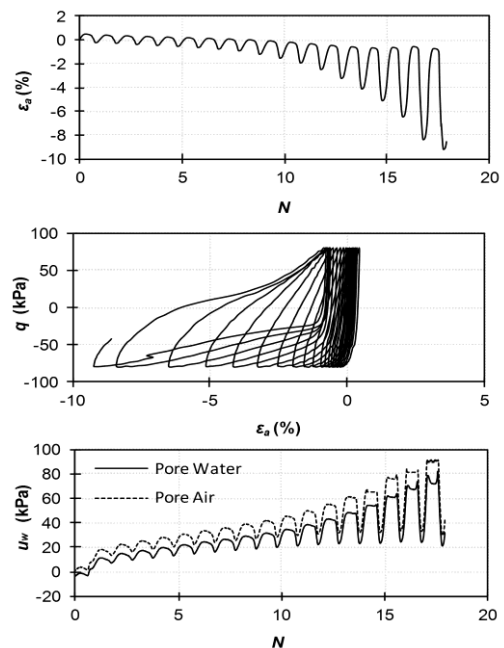


Fig. 6. Cyclic behavior of sand $Sr=80$

شکل ۷. رفتار تناوبی ماسه +۳۰٪ رس در درجه اشباع ۸۰٪

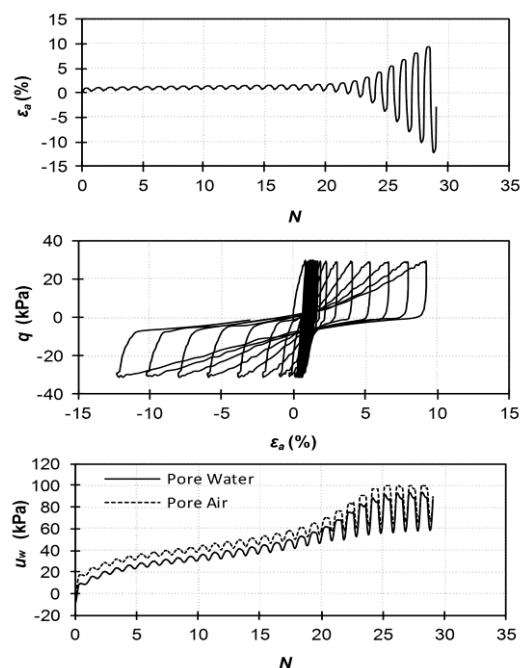


Fig. 7. Cyclic behavior of sand+30% clay $Sr=80$

۲-۴- مقاومت روانگرایی

در خاک‌های ماسه‌ای تمیز، روانگرایی اولیه در آزمایش‌های تناوبی زمانی رخ یافته که افزایش فشار آب حفره‌ای به مقدار تنش محصورشدگی رسیده و یا به عبارت دیگر نسبت افزایش فشار آب حفره‌ای به ۱۰۰٪ برسد. این افزایش در خاک‌های ماسه تمیز تقریباً در کرنش ۳/۷۵٪ رخ پیدا

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta P}{P_0 + \Delta P} (1 - S_r) \frac{e}{1+e} \leq \frac{\sigma'_c}{p_0 + \sigma'_c} (1 - S_r) \frac{e}{1+e} = \varepsilon_v^* \quad (1)$$

که در این رابطه P_0 مقدار فشار هوای اولیه نمونه قبل از اعمال بار و σ'_c تنش محصور شدگی موثر است. پتانسیل کرنش حجمی یا ε_v^* در واقع بیشترین تغییرات حجم نمونه مربوط به زمانی است که مقدار فشار هوای حفره‌ای با فشار محصور شدگی موثر برابر شود [22].

بر اساس رابطه پیشنهادی (۱) برای درک درست روانگرایی و مقایسه با پژوهش‌های گذشته پتانسیل کرنش حجمی برای تمامی آزمایش‌ها محاسبه شده و در جدول (۲) آورده شده است. شکل (۱۰) تغییرات پارامتر نسبت مقاومت روانگرایی، LRR را در برابر پتانسیل کرنش حجمی برای پژوهش‌های گذشته که بیشتر روی ماسه تمیز است نمایش می‌دهد. انتظار می‌رود مقاومت روانگرایی خاک‌های غیر اشباع دارای ریزدانه با توجه به وجود مکش بیشتر در مقایسه با ماسه تمیز افزایش یافته؛ ولی با توجه به تراکم متوسط خاک بیشترین مقدار مکش اندازه‌گیری شده مربوط به نمونه دارای ۳۰٪ رس و درجه اشباع ۸۰٪ در حدود ۱۴ کیلوپاسکال بوده که در مقابل تنش محصور شدگی مقدار اندکی داشته و تاثیر زیادی روی مقاومت روانگرایی ندارد. پس انتظار می‌رود که مانند ماسه تمیز روند افزایش مقاومت در خاک‌های دارای ریزدانه نیز از رابطه ارائه شده در خصوص ماسه پیروی کند.

نتایج آزمایش‌های این پژوهش نیز به منظور مقایسه در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشخص است نتایج آزمایش‌ها روی ماسه و تا حدودی خاک ماسه‌ای با ۱۰٪ رس هماهنگی خوبی با رابط پیشنهادی توسط اوکامورا و سوگا (۲۰۰۶) دارد در حالی که در نمونه‌های دارای ریزدانه و به ویژه نمونه‌های دارای رفتار رسی (دارای ۳۰٪ ریزدانه) نسبت مقاومت خاک غیراشباع به اشباع (LRR) مقدار کمتری نسبت به رابطه ارائه شده دارند. بنابراین با توجه به مطالب گفته شده قبلی در خصوص تفاوت رفتار سیکلی و چگونگی افزایش فشار آب حفره‌ای بین خاک‌های رفتار ماسه‌ای و خاک‌های رفتار رسی می‌توان دریافت که تنها پتانسیل کرنش حجمی نمی‌تواند مقاومت خاک‌های غیر اشباع دارای ریزدانه را با رابطه ارائه شده به خوبی پیش‌بینی کند.

کاهش درجه اشباع در تمامی خاک‌ها قابل مشاهده بوده با این تفاوت که در مقایسه با خاک‌های دارای ریزدانه، مقاومت روانگرایی ماسه خالص با کاهش درجه اشباع به شدت افزایش یافته است. به عبارت دیگر مقاومت روانگرایی خاک‌های دارای ریزدانه حساسیت کمتری نسبت به کاهش درجه اشباع در مقایسه با ماسه خالص دارند.

در شکل (۹) نسبت مقاومت روانگرایی یک نمونه خاک در یک درجه اشباع مفروض به مقاومت روانگرایی همان نمونه خاک در حالت اشباع (برابر با پارامتر LRR) نشان داده شده است. مطابق این شکل، با کاهش درجه اشباع در ماسه خالص پارامتر LRR افزایش بیشتری نسبت به خاک‌های دارای ریزدانه داشته است.

با توجه به تراکم‌پذیری هوای موجود در نمونه‌های غیر-اشباع می‌توان انتظار داشت مقاومت روانگرایی خاک‌های غیر اشباع وابسته به تراکم‌پذیری آن‌ها باشد. اوکامورا و سوگا (۲۰۰۶) پارامترهای تاثیرگذار روی مقاومت روانگرایی ماسه غیراشباع را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که دلیل افزایش مقاومت روانگرایی ماسه غیراشباع مستهلک شدن فشار آب حفره‌ای به هنگام بارگذاری به واسطه قابلیت تراکم‌پذیری هوای حفره‌ای درون نمونه است.

شکل ۹. نسبت مقاومت روانگرایی در مقابل درجه اشباع

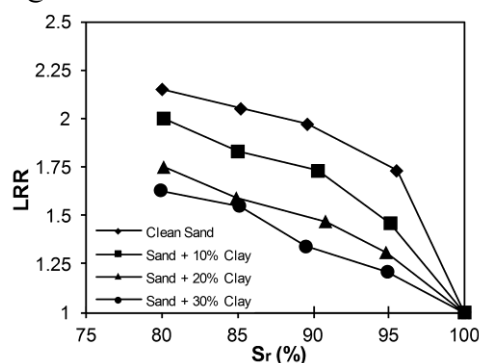


Fig. 9. Variation of LRR versus Sr

با عنایت به وجود سه فاز مختلف دانه‌های جامد، آب حفره‌ای و هوای حفره‌ای در خاک‌های غیر اشباع و نیز با توجه به قانون بویل کرنش حجمی نمونه تحت تغییرات فشار حفره ای ΔP را می‌توان به صورت رابطه (۱) نوشت:

شکل ۱۰. تغییرات نسبت مقاومت روانگرایی خاک غیر اشباع به اشباع در برابر کرنش حجمی

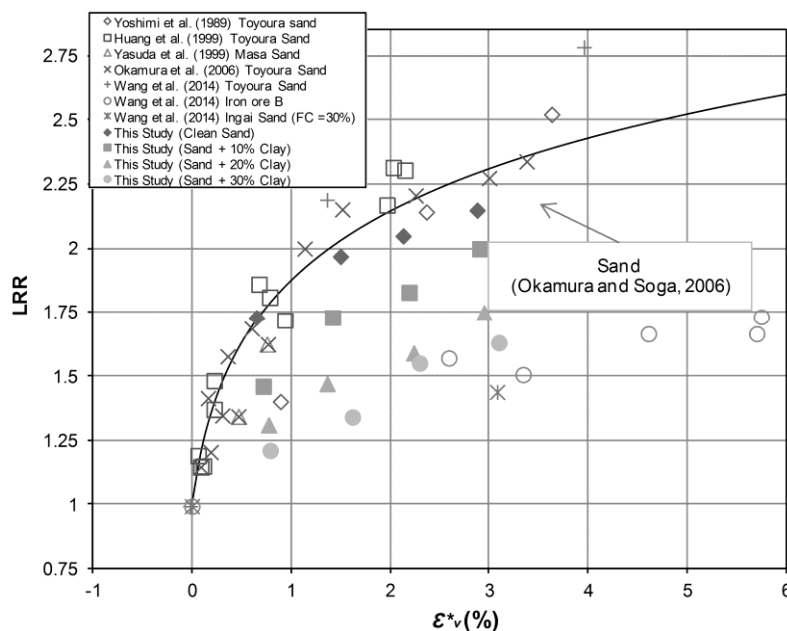


Fig. 10. Variation of LRR versus potential volumetric strain

عملکرد رابطه بین نسبت مقاومت روانگرایی در حالت اشباع به غیر اشباع در مقابل پتانسیل کرنش حجمی پیشنهادی اوکامورا و سوگا (۲۰۰۶) برای نتایج بدست آمده در این پژوهش بررسی شد. مطابق نتایج، رابطه مذکور بیشتر برای نمونه‌های ماسه خالص و تقریباً ماسه + ۱۰٪ رس سازگار بوده است.

با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که حتی در خاک‌های حاوی ریز دانه تا حدود ۲۰ درصد، پتانسیل روانگرایی در حالات غیر اشباع و تا درجات اشباع حدود ۸۰٪ نیز محتمل بوده است.

References

- [1] Miura S., Yagi K. & Kawamura S. 1995 Liquefaction damage of sandy and volcanic grounds in the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil dynamics*.
- [2] Tohno I. & Yasuda S. 1987 Liquefaction of the Ground During the 1978 Miyagiken-Oki earthquake. *Soils and Foundations*, 21(3), 18-34.
- [3] Koester J. P. 1994 The Influence of Fine Type and Content On Cyclic Strength, Ground Failures Under Seismic Conditions. *ASCE Geotechnical Special Publication*, 44, 17-33.
- [4] Kuwano J., Iimura H., Nakazawa H. & Sugihara K. 1995 Liquefaction strength of sand containing kaolin.

۶- مراجع

۵- نتیجه گیری

این پژوهش به منظور بررسی مقدار ریزدانه به همراه درصد اشباع روی رفتار تناوبی ماسه غیر اشباع انجام پذیرفته است. به این منظور مجموعه‌ای از آزمایش‌های تناوبی اشباع و غیر اشباع با شرایط زهکشی نشده روی نمونه‌های ماسه حاوی درصد‌های رس ۰٪ تا ۳۰٪ و درجه اشباع‌های ۱۰۰٪ تا ۸۰٪ صورت گرفت. تاثیر تراکم پذیری فشار هوای حفره‌ای در انواع خاک‌ها ارزیابی شد و با آنچه در گذشته برای خاک‌های ماسه خالص صورت پذیرفته بود مقایسه شد. نتایج زیر از این پژوهش قابل برداشت است:

با افزایش درصد ریز دانه تا حدود ۲۰ درصد در نمونه‌های با درصد تراکم ۵۰٪ مقاومت روانگرایی خاک کاهش یافته و سپس با افزایش درصد ریزدانه تا ۳۰ درصد مقاومت روانگرایی اندکی افزایش یافته است. این روند همینطور در نمونه‌های غیر اشباع نیز دیده شده است.

مکش بافتی در حین بارگذاری تقریباً یکنواخت بوده و با افزایش فشار آب حفره‌ای مقدار آن کاهش یافته است. با افزایش مقدار فشار آب حفره‌ای و نزدیک شدن آن به فشار محصور شدگی، مقادیر کرنش‌ها زیاد شده و روانگرایی آغاز شده است.

- [17] Wang H. & Koseki J. 2013 Liquefaction resistance of unsaturated Inagi sand. *JSCE 15th Int. Summer Symp.*
- [18] Naeini S. A. & Baziar M. H. 2004 Effect of fines content on steady-state strength of mixed and layered samples of a sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**(3), 181–187.
- [19] Thevanayagam S. & Martin G. R. 2002 Liquefaction in silty soils screening and remediation issues. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(9), 1035–1042.
- [20] Bahadori H., Ghalandarzadeh A. & Towhata I. 2008 Effect of non plastic silt on the anisotropic behaviour of sand. *Soils and Foundations*, **48**(4), 531-546.
- [21] Derakhshandi M., Rathje E. M., Hazirbaba K. & Mirhosseini S. M. 2008 The effect of plastic fines on the pore pressure generation characteristics of saturated sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(5), 376-386.
- [22] Okamura M. & Soga Y. 2006 Effects of pore fluid compressibility on liquefaction resistance of partially saturated sand. *Soils and Foundations*, **46**(5), 695-700.
- [23] Ishihara K. 1996 Soil behaviour in earthquake geotechnics. Oxford Un. Press: Oxford, UK.
- [24] Bray J. & Sancio R. 2006 Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(9), 1165–1177.
- [25] Wang H. & Koseki J. 2013 Liquefaction resistance of unsaturated Inagi sand. *JSCE 15th Int. Summer Symp.*
- [26] Mendes J, Toll D. G. & Evans F. 2012 A Double Cell Triaxial System for Unsaturated Soils Testing. In *Unsaturated soils: Research and applications* (pp. 5-10). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [27] Yin J. 2003 A Double Cell Triaxial System for Continuous Measurement of Volume Changes of an Unsaturated or Saturated Soil Specimen in Triaxial Testing. *Geotechnical Testing Journal*, **26**(3), 353-358.
- [28] Okamura M. & Noguchi K. 2009 Liquefaction resistance of unsaturated non-plastic silt, *Soil and Foundations*, **49**(2), 221-229.
- [29] ASTM D5311 / D5311M-13, 2013 Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 50th Japan Society of Civil Engineers Annual Meeting, 506-507.
- [5] Boulanger R. & Idriss I. 2004 Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays. Report No. UCD/CDM–04/01, Center for Geotechnical Modeling.
- [6] Chang W. J. & Hong M. L. 2008 Effects of clay content on liquefaction characteristics of gap-graded clayey sands. *Soils and Foundations*, **48**(1), 101–114
- [7] Kim U., Kim D. & Zhuang L. 2016 Influence of fines content on the undrained cyclic shear strength of sand–clay mixtures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **83**, 124-134.
- [8] Konagai K., Johannson J., Mayorca P., Yamamoto T., Miyajima M., Uzuoka R., Pulido E. N., Duran F. C., Sassa K. & Fukuoka H. 2004 Las Colinas landslide caused by the January 13, 2001 off the coast of El Salvador earthquake, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, **2**(1), 1–15.
- [9] Uzuoka R., Sento N., Kazama M. & Unno T. 2005 Landslides during the earthquakes on May 26 and July 26, 2003 in Miyagi. *Soils and Foundations*, **45**(4), 149–163.
- [10] Grozic J. L., Robertson P. K. & Morgenstern N. R. 2000 Cyclic liquefaction of loose gassy sand. *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(4), 843-856.
- [11] Bouferra R., Benseddiq N. & Shahrour I. 2007 Saturation and preloading effects on the cyclic Behavior of sand. *International journal of geomechanics*, **7**(5), 396-401.
- [12] Okamura M., Ishihara M. & Tamura K. 2006 Degree of saturation and liquefaction resistances of sand improved with sand compaction pile. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(2), 258-264.
- [13] Kayen R., Moss R. E. S., Thompson E. M., Seed R. B., Cetin K. O., Kiureghian A. D., Tanaka Y. & Tokimatsu K. 2013 Shear-wave velocity–based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**(3), 407-419.
- [14] Yoshimi Y., Tanaka K. and Tokimatsu K. 1989 Liquefaction resistance of a partially saturated Sand. *Soils and Foundations*, **29**(3), 157-162.
- [15] Goto S. & Shamoto Y. 2002 Estimation method for the liquefaction strength of unsaturated sandy soil. Proc., 37th Jpn. Nat. Conf. Geotech. Engrg.
- [16] Unno T., Kazama M., Uzuoka R. & Sento N. 2008 Liquefaction of unsaturated sand considering the pore air pressure and volume compressibility of the soil particle skeleton. *Soils and Foundations*, **48**(1), 87-99.

Liquefaction of Unsaturated Clayey Sand

R. Sadeghzadegan¹, S.A. Naeini^{2*}, A. Mirzaii³

1- P.hD. Student, Civil Eng. Dept., Imam Khomeini International University

2- Prof., Civil Eng. Dept., Imam Khomeini International University (Corresponding Author)

3- Assistant professor, Civil Eng. Dept, Faculty of Engineering, Kashan University

*Naeini_h@ikiu.ac.ir

Abstract:

Soil mixtures such as clayey sands, silty sands, or clayey silts are among the categories of common natural soils observed in liquefied sites. The substantial amount of liquefactions discussed in previous contributions appeared to occur in sands containing plastic fine particles. In saturated soils, a notable amount of experimental studies were performed in past to examine the influence of fine content on the liquefaction potential of sands. In spite of the occurrence of liquefaction in unsaturated zones due to ground motions observed in the past, few experimental data exist, relating liquefaction potential to saturation degree, S_r , specifically for soils with high degrees of saturation. In this article, the results of a set of careful laboratory test programs is presented, to determine the liquefaction behavior of a sand mixed with zero to 30% of kaolinite, at elevated saturation conditions. This experiment was carried out using a double-walled suction controlled triaxial cell specifically developed to conduct cyclic triaxial tests at high degree of saturations, i.e. 80, 85, 90, 95 and 100%. The stress-strain behavior of the soil is presented and compared with respect to the data available in the literature. The variation of excess pore water pressure during the cyclic loading indicates that, in saturated pure sand, the generation of excess pore water pressure was mainly occurred at the higher cycle of loads, while in saturated specimens with 30% clay content, it is observed from the earlier cycles of loading stage. Also, a change is observed in suction and volume of specimen during cyclic loading under undrained condition. Due to the presence of air in unsaturated soil, volume change occurs during cyclic loading. It can be observed that void ratio decreases while saturation ratio increases. Matric Suction is almost constant during cyclic loading until pore air pressure reached to maximum value, and by increasing pore water pressure, matric suction decreases. During cyclic loading axial strain is small until pore water pressure reaches to the effective confining pressure. In this case, sudden increase occurs in axial strain, and liquefaction starts. Accordingly, it is seen that during the cyclic loads all tested specimens reached to the liquefaction state. The liquefaction potential within the soil is presented according to cyclic stress ratio at 20 cycles (CSR_{20}), and is found to be a function of fine content. It is appeared to be initially decreased within the increment of fine content up to 20%, and consequently, it is slightly increased with increasing the percentage of fine particles up to 30%. The above behavior was witnessed in the whole considered range of saturation degree. Additionally, it is seen that at a given fine content, a slight desaturation of specimens caused a significant increment in the liquefaction resistance ratio within the soil, and was more evident within the decrement of the fine content. The trend observed for the variation of liquefaction resistance ratio versus the potential volumetric strains in pure sands appeared to be consistent to the logarithmic relationship as suggested in the literature.

Keywords: Liquefaction, Unsaturated Sand, Fine content, Degree of Saturation, Cyclic Triaxial.