

مقایسه رفتار سیکلی و مونوتونیک زهکشی شده ماسه سست کرناته با استفاده از دستگاه پیچشی استوانه توخالی

یاسر جعفریان

استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
yjafarianm@iiees.ac.ir

حبیب شاه نظری

دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
hshahnazari@iust.ac.ir

محمد امین تونچیان

دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
amin@iust.ac.ir

رضا رضوانی

دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
r_rezvani@iust.ac.ir

کلید واژه‌ها: ماسه کرناته، استوانه توخالی، بارگذاری پیچشی، مونوتونیک، سیکلی

چکیده

خاک‌های کرناته که اغلب در مناطق گرم حاره ای و استوایی و نیز در مناطق دارای مخازن نفتی و گازی یافت می‌شوند، به دلیل تفاوت در ویژگی‌های مهندسی خود، از اهمیت بالایی در مهندسی ژئوتکنیک برخوردارند. قابلیت خردشدگی قابل توجه، نسبت منافذ بالا، سمناسیون سطحی ذرات و مقاومت روانگرایی بالا عمدتاً ویژگی‌های مصالح کرناته در مقایسه با خاک‌های سیلیکاته می‌باشند. در مقاله حاضر رفتار سیکلی و مونوتونیک ماسه کرناته جزیره هرمز در شرایط تراکمی سست با استفاده از آزمایش‌های پیچش استوانه توخالی مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج این تحقیق نشان دهنده قابلیت ماسه کرناته هرمز در تحمل سطح تنش بالاتر تحت بارگذاری سیکلی نسبت به شرایط بارگذاری مونوتونیک می‌باشند.

مقدمه

خاک‌های کرناته عموماً در مناطق گرم حاره ای و استوایی و نیز در مناطق دارای ذخایر نفت و گاز، از جمله سواحل کشور استرالیا، هند، سواحل دریای شمال و همچنین سواحل خلیج فارس یافت می‌شوند مطالعات زمین‌شناسی اخیر نشان می‌دهد که ۳۵٪ از سطح اقیانوس‌ها را این نوع خاک در بر می‌گیرد (API, 2000).

با توجه به اینکه خاک‌های کرناته هم از نظر منشاء تولید و هم از نظر رفتار مهندسی تفاوت‌های اساسی با خاک‌های متداول و معمول سیلیکاته دارند، در نتیجه لزوم شناسایی دقیق این نوع خاک‌ها و بررسی چگونگی رفتارشان تحت بارهای مونوتونیک و سیکلی اجتناب‌ناپذیر می‌نماید.

خاک‌های کرناته به خاک‌هایی اطلاق می‌شود که دارای ترکیبات کرناتی باشند. همچنین رسوبات کلسیاتی دارای کرنات کلسیم نیز به نوعی از خاک‌های کرناته هستند. خاک‌های کرناته می‌توانند دارای کانی‌های کرناتی باشند (دانه‌های کرناتی) و یا ماده سیمانی‌کننده آن



ها دارای مواد کربناتی باشد و یا هر دو مورد ذکر شده وجود داشته باشد. خاک های کربناته هر منطقه به دلیل منشأ تولید متفاوت و نیز نوع جانداران منطقه تشکیل دهنده این نوع خاک ها، دارای مشخصات فیزیکی بسیار متنوعی می باشند. تفاوت در پارامترهای مهمی همچون قابلیت خردشدگی ذرات، سمناسیون سطحی ذرات، نسبت منافذ، اندازه ذرات و چگالی دانه ها منجر به مشاهده رفتارهای بسیار متفاوت و بعضاً غیر قابل پیش بینی در مصالح کربناته شده است. این مصالح اغلب در شرایط سست در طبیعت یافت می شوند به صورتی که دامنه نسبت منافذ آنها بین ۰/۷ الی ۱/۵ بوده در صورتی که ماسه های سیلیکاته اغلب دارای نسبت منافذ ۰/۳ الی ۰/۸ می باشند (Morioka and Nicholson, 2000).

در سال ۱۹۶۸ در جزیره لاوان تغییر شکل های بسیار زیاد به ازای هر بار کوبش در عملیات شمع کوبی مورد توجه قرار گرفت و این اولین مورد مواجهه با مشکلات خاک کربناته در خلیج فارس می باشد (McClelland, 1988). خرابی های زیادی نیز در اثر وقوع زلزله های بزرگ بر روی سازه هایی که بر روی خاک های کربناته قرار گرفته اند گزارش شده است، که از آن ها می توان به زلزله گوام در سال ۱۹۹۳، زلزله هاوایی در سال ۲۰۰۶ و زلزله بزرگ هائیتی در سال ۲۰۱۰ اشاره کرد (رضوانی، ۱۳۹۰). در هر سه زلزله شواهد بسیاری مبنی بر وقوع روانگرایی همچون جوشش ماسه ای (Sand Boils)، گسترش جانبی (Lateral Spreading) و نشست های تفاضلی (Differential Settlements) گزارش شده است (Brandes, 2011).

در سال های اخیر به ویژه پس از وقوع خرابی های قابل توجه در زلزله های فوق الذکر، مطالعات متعددی بر روی ماسه های کربناته و رفتار آنها تحت بارهای مونوتونیک و سیکی انجام شده است. Brandes (2011) رفتار دینامیکی و استاتیکی ماسه کربناته جزیره هاوایی را با استفاده از دستگاه برش ساده بررسی نمود. همچنین در این مطالعه مقاومت سیکی ماسه های کربناته مورد استفاده با نوعی ماسه ی سیلیکاتی مرجع (Nevada Sand) مورد مقایسه قرار گرفت که بر این اساس ماسه کربناته در شرایط اولیه و بارگذاری یکسان از مقاومت بالاتری نسبت به ماسه سیلیکاته از خود نشان داد. همچنین انحنای بیشتر منحنی پوش گسیختگی ماسه های کربناته و زاویه اصطکاک بالاتر آنها در مقایسه با ماسه های سیلیکاتی مشخص شد.

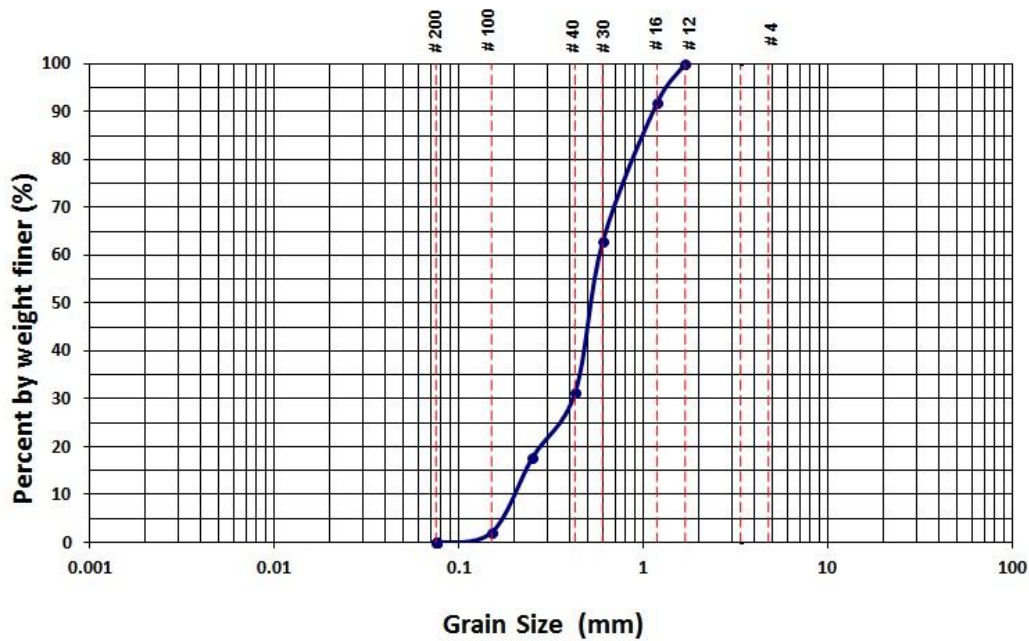
Salem et al. (2013) به بررسی رفتار سیکی و مونوتونیک ماسه های کربناته ساحل شمالی مصر با استفاده از دستگاه سه محوری پرداختند. در این مطالعه اثر تراکم نسبی نمونه ماسه کربناته و نیز اثر تنش همه جانبه موثر بررسی شد. بر این اساس با افزایش تراکم نسبی، مقاومت مونوتونیک و نیز سیکی ماسه های کربناته افزایش می یابد. همچنین افزایش تنش همه جانبه منجر به افزایش مقاومت برشی مونوتونیک نمونه می شود. در مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی مقاومت سیکی از پارامتر نسبت تنش سیکی (CSR: Cyclic Stress Ratio) استفاده می شود که با توجه به تعریف آن (نسبت تنش برشی وارده به تنش موثر همه جانبه اولیه نمونه)، افزایش تنش همه جانبه موثر منجر به کاهش نسبت مقاومت سیکی نمونه می شود. در مطالعه Salem et al. (2013) نیز این حقیقت به خوبی مشاهده و گزارش شده است. علاوه بر موارد فوق تغییرات فشار آب حفره ای در طول آزمایشات مونوتونیک و سیکی بررسی شده و تغییرات تنش موثر همه جانبه تحت تاثیر تغییرات فشار آب حفره ای گزارش شده است. مطالعات دیگری نیز توسط محققین مهندسی ژئوتکنیک در نقاط مختلف دنیا بر مصالح کربناته انجام شده است که می توان به (Porcino et al. (2008), Mao and Fahey (2003), Salehzadeh (2000) و Hyodo et al. (1998) اشاره نمود.

در مطالعه حاضر از مصالح کربناته ساحل جزیره هرمز واقع در جنوب استان هرمزگان جهت بررسی رفتار ماسه های کربناته استفاده شده است. آزمایش های مونوتونیک و سیکی زهکشی نشده با استفاده از دستگاه پیچشی استوانه توخالی که از قابلیت های بالایی در شبیه سازی شرایط طبیعی برخوردار است، استفاده گردید. در این مقاله نتایج ۵ آزمایش سیکی و مونوتونیک بر روی ماسه کربناته جزیره هرمز ارائه می شود که از آنها در راستای ارزیابی و تفسیر همزمان رفتارهای مونوتونیک و سیکی بهره برداری می شود.

مشخصات ماسه کربناته جزیره هرمز

مصالح کربناته جزیره هرمز کاملاً فاقد ریزدانه بوده و ساختاری کاملاً دانه ای دارند. در ادامه نمودار دانه بندی ماسه کربناته مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است (شکل ۱). آزمایش درصد کربنات بر روی خاک های کربناته انجام گرفت و نتایج آن حاکی از آن است که مقدار کربنات موجود در خاک جزیره هرمز برابر ۶۹/۳ درصد می باشد. سایر مشخصات ماسه کربناته جزیره هرمز در قالب جدول ۱ ارائه شده است. همانگونه که مشخص است مقادیر وزن مخصوص حداقل و حداکثر این ماسه و نیز پارامتر چگالی ویژه دانه های آن بالاتر از ماسه های سیلیکاته می باشد. در شکل های ۲ و ۳ به ترتیب تصاویری از ساحل جزیره هرمز و نیز تصویری از ماسه کربناته جزیره هرمز در اندازه الک های مختلف نشان داده شده است.





شکل ۱: نمودار دانه بندی ماسه کریناته جزیره هرمز مورد استفاده در تحقیق حاضر

جدول ۱: مشخصات مهندسی ماسه کریناته جزیره هرمز

نوع خاک	وزن مخصوص خشک حداقل (gr/cm ³)	وزن مخصوص خشک حداکثر (gr/cm ³)	چگالی ویژه ذرات (G _s)	متوسط اندازه ذرات (D ₅₀) (mm)	ضریب یکنواختی (C _u)	ضریب انحنای (C _c)
ماسه کریناته جزیره هرمز	۱/۷۲۳	۱/۹۹۱	۲/۹۳	۰/۵۲	۳/۰۵	۱/۴۵



شکل ۲: تصاویری از ساحل جزیره هرمز (قسمت شمال شرقی جزیره)



شکل ۳: تصویر ماسه جزیره هرمز در اندازه الک های مختلف

همانگونه که مشخص است با ریزتر شدن اندازه ذرات ماسه کربناته جزیره هرمز، رنگ آنها تیره تر می شود که این از ویژگی های منحصر به فرد این نوع مصالح کربناته می باشد.

آماده سازی نمونه

در این تحقیق از روش بارش خشک جهت نمونه سازی استفاده گردید. جهت دقت بیشتر در نمونه سازی و ساخت نمونه هایی با تراکم نسبی همگن تر در لایه های مختلف، از مبانی روش پیشنهادی Ladd (1978) نیز بهره گیری شد. ابتدا ارتفاع نمونه به ۵ قسمت مساوی تقسیم شده و سپس وزن مخصوص هر لایه به ترتیب از لایه پایین به بالا با تراکم نسبی $Dr-2$ ، $Dr-1$ ، Dr ، $Dr+1$ و $Dr+2$ درصد محاسبه شد. این امر به دلیل نحوه نمونه سازی در روش بارش خشک و در نظر گرفتن نشست هر لایه در اثر ضربات وارده به جداره بیرونی قالب (جهت دستیابی به تراکم نسبی مورد نظر) می باشد. پس از ریختن هر لایه، با استفاده از ضربات آهسته وزن مخصوص هر لایه به مقدار مورد نظر رسانده شده و بدین ترتیب نمونه ساخته می شود. در دستگاه مورد استفاده در مطالعه حاضر، قطر داخلی نمونه ۶۰ میلیمتر، قطر خارجی ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع آن ۲۰۰ میلیمتر می باشد.

پس از نصب نمونه در داخل دستگاه، برای اشباع سازی نمونه ابتدا گاز دی اکسید کربن به مدت حداقل ۴۵ دقیقه از نمونه عبور داده شده و سپس آب هواگیری شده وارد نمونه خاک می گردد. پس از آن با اعمال پس فشار (حداکثر ۲۰۰ کیلوپاسکال) مرحله اشباع سازی به پایان می رسد. با استفاده از فرآیند مذکور حداقل مقدار پارامتر اشباع شدگی (B -value) در تمامی نمونه ها بیش از ۰/۹۵ بدست آمد. در ادامه نمونه ها بصورت همسان تحت تنش همه جانبه مورد نیاز تحکیم یافته و سپس بارگذاری زهکشی نشده مورد نظر به نمونه اعمال گردید.

لازم به ذکر است آزمایش های این تحقیق با استفاده از دستگاه استوانه توخالی GDS (ساخت کشور انگلستان) واقع در مرکز تحقیقات مهندسی ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است (شکل ۴).



شکل ۴: تصاویری از دستگاه استوانه توخالی دانشگاه علم و صنعت ایران (راست: بخش اصلی، چپ: کنترلرهای اعمال فشار)

برنامه آزمایش ها و نتایج حاصل شده

در ادامه جداول آزمایش های صورت گرفته در این تحقیق ارائه می شوند.

جدول ۲: برنامه آزمایش های انجام شده در تحقیق حاضر

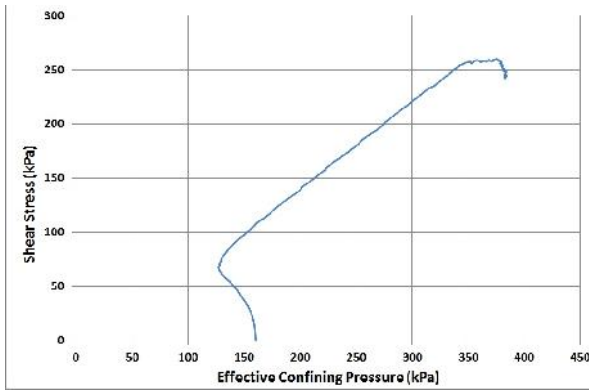
شماره آزمایش	نام آزمایش	فشار همه جانبه (kPa)	تراکم نسبی قبل از تحکیم (%)	تراکم نسبی بعد از تحکیم (%)	نوع بارگذاری	درجه اشباع (B-) (Value) (%)
۱	T01-C160-Dr30-Mo	۱۶۰	۲۴/۵۸	۳۰/۶۸	مونوتونیک	۹۶
۲	T02-C160-Dr30-Cy-CSR0.475	۱۶۰	۲۳/۳۷	۲۹/۲۷	سیکلی	۹۸
۳	T03-C160-Dr30-Cy-CSR0.4	۱۶۰	۲۳/۵۳	۲۹/۷۲	سیکلی	۹۸
۴	T04-C160-Dr30-Cy-CSR0.325	۱۶۰	۲۳/۳۹	۳۰/۰۳	سیکلی	۹۸
۵	T05-C160-Dr30-Cy-CSR0.25	۱۶۰	۲۳/۳۸	۲۹/۳۸	سیکلی	۹۶

لازم به ذکر است آزمایش های سیکلی با فرکانس بارگذاری سینوسی ۰/۱ انجام شدند.

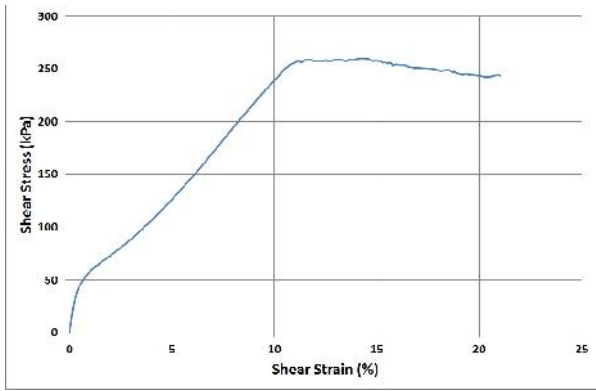
در ادامه نتایج آزمایش مونوتونیک در شکل ۵ نشان داده شده اند. همانگونه که مشخص است، نمونه سست کرناته تحت تنش موثر همه جانبه ۱۶۰ کیلوپاسکال از ابتدای آزمایش تا کرنش برشی تقریباً ۱/۵ درصد رفتار تراکمی (Contractive) از خود نشان داده و سپس با عبور از نقطه تغییر فاز: (Phase Transformation Point) رفتار اتساعی (Dilative) نشان می دهد. در بخش اول روند تغییرات فشار آب از نوع صعودی و در بخش دوم این روند از نوع نزولی می باشد. همچنین بر اساس نتایج فوق مشخص می شود که با توجه به ویژگی های منحصر به فرد مصالح کرناته، امکان دستیابی به مقاومت باقی مانده (Residual Strength) یا حالت پایدار (Steady State) تا کرنش هایی در حدود ۲۰ درصد میسر نمی باشد و مصالح کرناته عملاً در کرنش های بسیار بالا به حالت پایدار می رسند. توجه به این نکته ضروری است که در کرنش های بیشتر از ۱۸ درصد تغییرات فشار آب حفره ای اضافی بسیار ناچیز و محدود می باشد.

همانگونه که در شکل ۶ مشخص است، نمونه ماسه کرناته هرگز با تراکم نسبی ۳۰٪ تحت بارگذاری سیکلی با نسبت تنش سیکلی ۰/۴۷۵ و تنش همه جانبه موثر ۱۶۰ کیلوپاسکال، پس از ۵/۵۹ سیکل بارگذاری سینوسی به روانگرایی می رسد. لازم به ذکر است مبنای روانگرایی کامل در تحقیق حاضر دستیابی به حالت $r_u=1$ (نسبت فشار آب حفره ای اضافی به تنش موثر همه جانبه اولیه)، همان مبنای روانگرایی سیکلی (Cyclic Liquefaction) که توسط Casagrande (1975) تعریف شده می باشد. در برخی مراجع دستیابی به کرنش یک طرفه ۳/۷۵٪ و یا کرنش دو طرفه ۷/۵٪ نیز به عنوان روانگرایی شناخته شده (همانند Baziari and Sharafi, 2011) که این حالت همان تعریف Casagrande (1975) برای تحرک سیکلی (Cyclic Mobility) می باشد. برای آزمایش های ۲ الی ۵ در جدول ۲ تعداد سیکل های ثبت شده تا وقوع روانگرایی کامل به ترتیب ۵/۵۹، ۱۳/۵۸، ۲۳/۶ و ۷۴/۱ می باشند. در شکل ۷ نمودارهای مسیر تنش برشی در برابر تنش موثر همه جانبه برای تمامی ۵ آزمایش این تحقیق ارائه شده است.

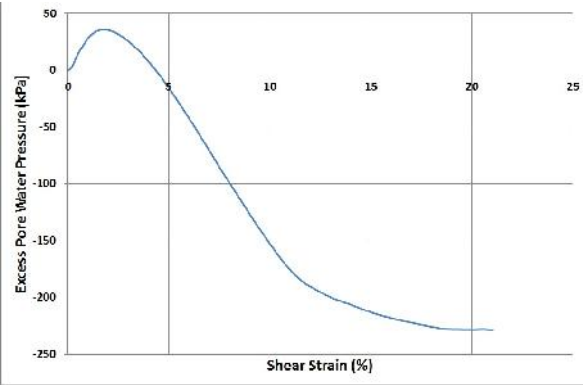
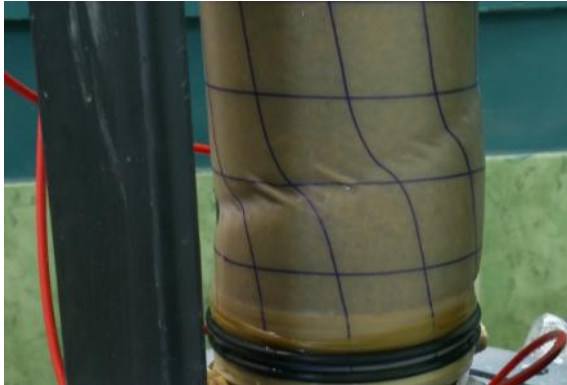




ب: نمودار تنش برشی در برابر فشار موثر همه جانبه

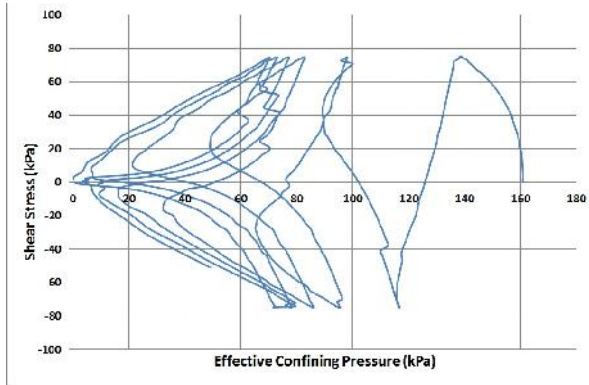


الف: نمودار تنش برشی در برابر کرنش برشی

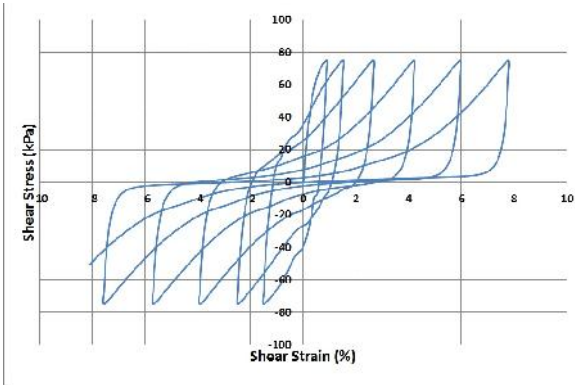


ج: نمودار فشار آب حفره ای اضافی در برابر کرنش برشی
د: تصویری از سطح برش یافته در اثر پیچش مونوتونیک در شرایط زهکشی نشده
شکل ۵: نتایج آزمایش مونوتونیک به همراه تصویری از نمونه آزمایش شده

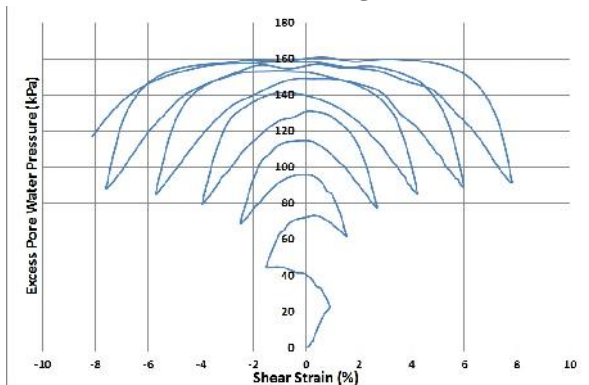
در شکل ۶ نتایج مربوط به آزمایش شماره ۲ جدول ۲ که نمونه ای از آزمایشات سیکلی می باشد، ارائه شده است.



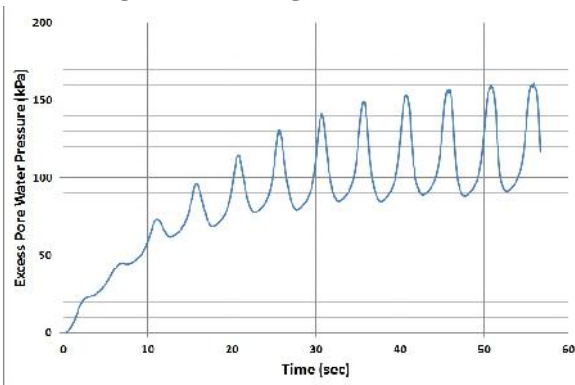
ب: نمودار تنش برشی در برابر فشار موثر همه جانبه



الف: نمودار تنش برشی در برابر کرنش برشی

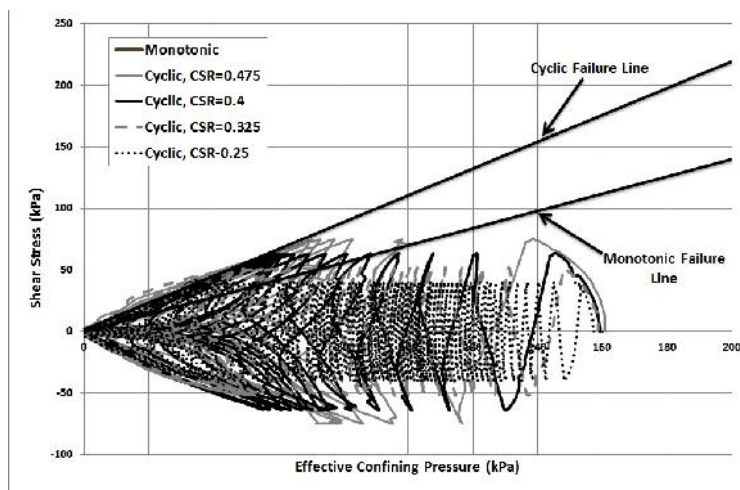


د: نمودار فشار آب حفره ای اضافی در برابر کرنش برشی



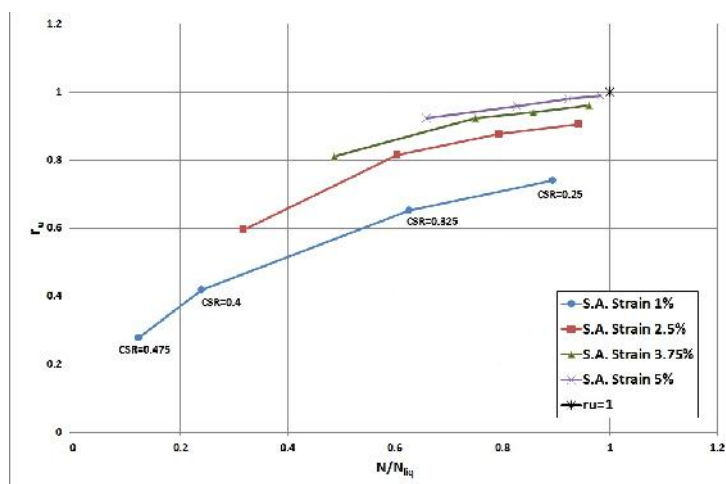
ج: نمودار فشار آب حفره ای اضافی در برابر زمان

شکل ۶: نتایج آزمایش سیکلی با فرکانس بارگذاری سینوسی ۰/۱ در شرایط زهکشی نشده



شکل ۷: مسیر تنش ثبت شده در آزمایش های مختلف تحقیق حاضر

همانگونه که مشخص است سیکل اول بارگذاری در آزمایشهای سیکلی از یک مسیر یکسان عبور کرده و شباهت های قابل توجهی نیز به آزمایش مونوتونیک دارند. در آزمایش مونوتونیک نمونه پس از عبور از نقطه تغییر فاز بر روی مسیر خط گسیختگی (Failure Line) قرار می گیرد و عملاً این خط مرز تحمل تنش توسط نمونه در شرایط زهکشی نشده می باشد. نکته قابل توجه در شکل فوق این است که نمونه های بارگذاری شده توسط بار سینوسی سیکلی از خط گسیختگی مونوتونیک عبور کرده و سطح تنش بالاتری را تحمل کرده اند. علت اصلی این رفتار در حقیقت نحوه بارگذاری در آزمایش های استوانه توخالی پیچشی می باشد که به دلیل ماهیت دو طرفه بودن بارگذاری، با پایان هر نیم سیکل عملاً خاک فرصت بازآرایش ذرات (Particle Rearrangement) خود را داشته و در نتیجه می تواند بالاتر از خط گسیختگی مونوتونیک قرار گیرد. در بارگذاری مونوتونیک عملاً این فرصت بازآرایش به دلیل ماهیت یک طرفه بودن بارگذاری فراهم نمی شود. در شکل ۸ نسبت فشار آب حفره ای اضافی به تنش موثر اولیه در برابر نسبت سیکل به تعداد سیکل روانگرایی رسم شده است.



شکل ۸: نمودار نسبت فشار آب حفره ای اضافی به تنش موثر اولیه در برابر نسبت سیکل به تعداد سیکل روانگرایی

در شکل ۸ مقادیر کرنش بر اساس کرنش های یک طرفه یا تک دامنه (Single amplitude) می باشند. همانگونه که مشخص است با افزایش کرنش، نسبت اضافه فشار آب حفره ای افزایش یافته و این دقیقاً منطبق بر ادبیات فنی روانگرایی ماسه ها می باشد (مانند جعفریان، ۱۳۸۸). به عبارت دیگر این شکل نشان دهنده وابستگی تولید اضافه فشار آب حفره ای به وقوع کرنش در خاک می باشد. همچنین این شکل نشان می دهد که کرنش ۱٪ (به عنوان نمونه) در نمونه هایی با CSR بالاتر در مقدار N/N_{liq} زودتری حاصل می شود.

جمع بندی و نتیجه گیری

در تحقیق حاضر ادبیات فنی مرتبط با خاک های کربناته و بیان ویژگی های منحصر به فرد این مصالح، به صورت خلاصه بررسی شدند. مشخصات خاک کربناته جزیره هرمز به عنوان یکی از مهم ترین انواع مصالح کربناته در خلیج فارس، ارائه گردیدند. نحوه نمونه سازی ماسه کربناته



سست با استفاده از روش بارش خشک در دستگاه استوانه توخالی بیان شد. نتایج ۵ آزمایش زهکشی نشده مشتمل بر یک آزمایش مونوتونیک و ۴ آزمایش سیکلی ارائه گردیدند.

در این تحقیق نتایج رفتار مونوتونیک و سیکلی نمونه سست کربناته با یکدیگر مقایسه شدند. مشخص گردید در آزمایش های سیکلی با دستگاه پیچشی استوانه توخالی نمونه ماسه کربناته می تواند تنش های بالاتری نسبت آزمایش مونوتونیک تحمل کند. همچنین مشخص شد با افزایش کرنش، نسبت اضافه فشار آب حفره ای افزایش یافته که این امر نشان دهنده وابستگی تولید اضافه فشار آب حفره ای به وقوع کرنش در خاک می باشد.

مراجع

حسنلو راد م (۱۳۸۷) بررسی رفتار ماسه های کربناته غیر سیمان و سیمان به روش تزریق تحت بارگذاری برشی، پایان نامه دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

جعفریان ی (۱۳۸۸) ارزیابی روانگرایی و اضافه فشار حفره ای دینامیکی ماسه ها با استفاده از معیارهای انرژی، پایان نامه دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

رضوانی توچاهی ر (۱۳۹۰) مقایسه رفتار برشی ماسه کربناته با ماسه سیلیکاته، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

API S (2000) Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design, API RP2A-WSD, 21st Edition

Baziar MH and Sharafi H (2011) Assessment of silty sand liquefaction potential using hollow torsional tests-An energy approach, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7): 857-865

Brandes H (2011) Simple Shear Behavior of Calcareous and Quartz Sands, *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(1): 113-126

Casagrande A (1975) Liquefaction and cyclic deformation of sands-A critical review, Proc., 5th Pan-American Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, also published as Harvard soil mechanics series No. 88, January, 1976, Harvard Univ., Cambridge, Mass

Hyodo M, Hyde AFL and Aramaki N (1998) Liquefaction of crushable soils, *Géotechnique*, 48(4), 527-543

Ladd RS (1978) Preparing test specimens using undercompaction, *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 16-23

Mao X and Fahey M (2003) Behaviour of calcareous soils in undrained cyclic simple shear, *Géotechnique*, 53(8): 715-727

McClelland B (1988) Calcareous sediments: An engineering enigma, 1st Int. Conf. on Calcareous Sediments, Perth, Australia, pp. 777-784

Morioka B and Nicholson P (2000) Evaluation of the liquefaction potential of calcareous sand, 10th International Offshore and Polar Engineering Conference; Seattle, WA; USA; 28 May-2 June 2000. pp. 494-500

Porcino D, Caridi G and Ghionna VN (2008) Undrained monotonic and cyclic simple shear behaviour of carbonate sand, *Géotechnique*, 58(8): 635-644

Salehzadeh H (2000) The behaviour of non-Cemented and artificially cemented carbonate sand under monotonic and reversed cyclic shearing, Ph.D. thesis, University of Manchester, UK

Salem M, Elmamlouk H and Agaiby S (2013) Static and cyclic behavior of North Coast calcareous sand in Egypt, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 55(0): 83-91

