

# اثر افزودن سیمان بر ناهمسانی مقاومتی ماسه در بارگذاری‌های فشاری و کششی (کاهش فشار محوری)

کاظم فخاریان\* (استادیار)

سارا حیدری گلفزانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیرحسین اقبالی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۳۹۲)  
دوری ۲ - ۲۹، شماره ۳، ص. ۱۱۷-۱۲۵، (پادداشت‌نوی)

در زمین‌های مسطح در اثر رسیدن موج زلزله به سطح زمین جهت تنش‌های اصلی دوران می‌کند و بارگذاری روی البان خاک می‌تواند از حالت فشاری به کششی تغییر کند. در چنین شرایطی با توجه به رفتار ناهمسان اغلب خاک‌های ماسه‌یی، مشخص نیست آیا سیمان افزوده سبب درصد یکسان افزایش مقاومت و سختی در هر دو امتداد افقی و قائم می‌شود یا خیر؟ در نوشتار حاضر، این موضوع با انجام تعدادی آزمایش سه‌محوری تحت مسیر تنش‌های متفاوت استاتیکی و با دوران  $90^\circ$  درجه‌یی امتداد تنش‌های اصلی بر روی خاک ماسه‌یی دارای سیمان بررسی و نتایج نشان داده شده است که در اغلب موارد، درصد افزایش پارامترهای مقاومتی ناشی از افزودن سیمان در بارگذاری کششی بیشتر از فشاری است، اما در هر دو مسیر بارگذاری حد بهینه‌یی برای افزایش مقاومت وجود دارد.

واژگان کلیدی: ناهمسانی، سیمان پرتلند، مسیر تنش، آزمایش سه‌محوری کششی و فشاری، دوران محورهای اصلی.

## ۱. مقدمه

خاک‌های ماسه‌یی با دانه‌بندی یکنواخت در نواحی ساحلی و در نقاطی که در اثر رسوب‌گذاری مسیل‌ها و رودخانه‌ها شکل گرفته‌اند، به‌خصوص در اعماق نزدیک به سطح زمین، تراکم کمی دارند و در صورت اشباع، مقاومت پایینی حتی در بارگذاری‌های معمول استاتیکی از خود نشان می‌دهند. این درحالی است که در اثر بارگذاری سیکلی مثل زلزله و افزایش ناگهانی فشار منفذی، کاهش مقاومت بیشتری نیز در خاک رخ خواهد داد که ممکن است باعث وقوع روان‌گرایی اولیه و یا افزایش قابل توجه نشست لایه‌های خاک شود. یکی از روش‌های بهسازی این‌گونه خاک‌های کم‌مقاومت که از دیرباز به شیوه‌های متفاوت استفاده شده است، افزودن سیمان به خاک است.

در سال ۱۹۷۹ پژوهشگران در تحقیقات خود برای بهسازی ماسه‌ها نشان دادند که با افزایش مقدار سیمان، میزان چسبندگی خاک افزایش می‌یابد.<sup>[۱]</sup> همچنین در سال ۲۰۰۲ به منظور بررسی اثر نوع سیمان از سیمان پرتلند، گچ و کلسیت به‌منزله‌ی عامل سیمانی‌کننده در ساخت نمونه‌ها استفاده شد و این نتیجه به‌دست آمد که نوع عامل سیمانی‌کننده روی رفتار برشی ماسه مؤثر است. این تحقیقات نشان داد که افزودن سیمان پرتلند سبب بروز رفتار خمیری و اتساعی، و افزودن گچ و کلسیت سبب بروز رفتار شکننده در نمونه‌های سیمانه می‌شود و از این رو نتیجه‌گیری شد که استفاده از سیمان پرتلند در کارهای بهسازی زمین به‌خصوص در مقابله با روان‌گرایی رفتار مناسب‌تری را نشان خواهد داد.<sup>[۲]</sup>

\* نویسنده مستقر

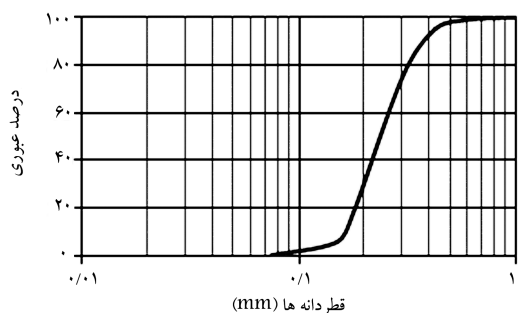
تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۲/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۰/۱/۳۰، پذیرش ۱۳۹۱/۷/۱.

در چند دهه‌ی اخیر تحقیقات زیادی روی خاک‌های مصنوعی سیمانی‌شده انجام شده است. برای مثال در سال ۱۹۸۱ تعدادی آزمایش سه‌محوری، تک‌محوری و برزیلی بر روی نمونه‌های با سیمان طبیعی و مصنوعی انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها مبین آن بود که با افزایش میزان سیمان و چگالی، مقاومت بیشینه و سختی افزایش می‌یابد و سمنتاسیون تأثیر محسوسی در زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ندارد.<sup>[۳]</sup>

همچنین در سال ۱۹۹۳ با انجام آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های سیمانی‌شده نشان داده شد که افزایش درجه‌ی سمنتاسیون سبب افزایش مدول برشی و مقاومت کششی خاک می‌شود.<sup>[۴]</sup> و نیز در بررسی رفتار مکانیکی ماسه‌های کربناتی سیمانی‌شده با گچ مشخص شد که مسیر تنش، شرایط زهکشی و فشار همه‌جانبه روی مقاومت بیشینه‌ی نمونه‌ها مؤثر است؛ و این نتیجه به دست آمد که سمنتاسیون سبب کاهش تراکم‌پذیری می‌شود و زاویه‌ی اصطکاک داخلی در خاک‌های سیمانی‌شده چند درجه کمتر از خاک‌های بدون سیمان است.<sup>[۵]</sup>

در سایر پژوهش‌ها هم نشان داده شد که در نمونه‌های سیمانی‌شده، مقاومت اوج، سختی و شکنندگی خاک افزایش می‌یابد و با افزایش فشار جانبی تأثیر سمنتاسیون کم می‌شود.<sup>[۶-۸]</sup>

در سال ۲۰۰۲ نیز با انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس روی نمونه‌های غیرسیمانی آبرفت تهران و سیمانی‌شده با آهک نشان داده شد که در نمونه‌های سیمانی‌شده چسبندگی افزایش می‌یابد و پوش گسیختگی در این نمونه‌ها به‌صورت منحنی است.<sup>[۹]</sup>



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی فیروزکوه (F۱۶۱).

### ۳. مشخصات نمونه‌ها و برنامه‌ی آزمایش‌ها

در این پژوهش نمونه‌هایی به قطر ۷۱ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر حدود ۲/۱ تا ۲/۲ برای انجام آزمایش در دستگاه سه‌محوری اتوماتیک (دارای قابلیت اعمال مسیر تنش دلخواه) تهیه شده است. به منظور یکسان‌سازی شرایط ساخت بین نمونه‌های خاک پایه و دارای سیمان، در ساخت تمامی نمونه‌ها روش کوبش مرطوب با تراکم کاهش یافته مطابق روش ارائه شده به کار گرفته شده است.<sup>[۱۲]</sup> نمونه‌های دارای سیمان با اضافه کردن درصد از پیش تعیین شده‌ی سیمان به خاک پایه، اختلاط خشک مجموعه به صورت دستی و نهایتاً اضافه کردن رطوبت مورد نیاز (مجموع رطوبت مورد نیاز جهت تراکم و هیدراته شدن سیمان) و اختلاط مجدد در لایه‌های یکسان ساخته شده‌اند.

چون هدف این پژوهش مطالعه‌ی اثر افزودن سیمان بر رفتار ماسه‌های با تراکم پایین است، چگالی نسبی  $D_r$  نهایی نمونه‌های خاک پایه حدود ۱۵ الی ۲۰ درصد انتخاب و چگالی ساخت نمونه‌ها نیز بر این اساس محاسبه شده است؛ اما از آنجایی که افزودن دانه‌های ریز سیمان موجب افزایش چگالی اولیه نمونه می‌شود، بنابراین درصد وزنی سیمان اضافه شده نسبت به وزن خاک ماسه‌ی خالص به گونه‌ی تعیین شده است که چگالی نهایی تمامی نمونه‌های دارای سیمان تقریباً ثابت و برابر با چگالی نمونه‌های خاک پایه باشد.

نمونه‌های ماسه‌ی خالص پس از ساخت، به ترتیب با عبور دادن دی‌اکسید کربن، آب بدون هوا و در نهایت اعمال پس فشار اشباع شدند تا کمیتی مقدار ضریب اسکمپتون دست کم برابر  $B = 0.96$  حاصل شود. نمونه‌های دارای سیمان داخل قالب‌های مخصوص از جنس P.V.C ساخته و پس از قراردادن در کیسه‌های آب‌بند به مدت ۲۸ روز در محیط مرطوب (وان آب) نگهداری شدند و در روز آزمایش مراحل مشابه قبل را برای اشباع شدن تا حصول دست کم  $B = 0.92$  پشت سر می‌گذاشتند. نمونه‌ها اعم از ماسه‌ی خالص و یا دارای سیمان به صورت همه‌جانبه و همسان و تحت دو فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ و یا ۳۰۰ کیلوپاسکال تحکیم داده شدند و سپس در یکی از مسیر تنش‌های افزایش فشار محوری<sup>۱</sup> و یا کاهش فشار محوری<sup>۲</sup> با ثابت نگه داشتن فشار محفظه تحت بارگذاری یک‌طرفه‌ی استاتیکی تحکیم یافته‌ی زهکشی نشده قرار گرفتند.

در آزمایش سه‌محوری با افزایش فشار محوری، نمونه ابتدا تحت تنش همه‌جانبه‌ی مورد نظر تحکیم و سپس فشار محوری نمونه به صورت کنترل کرنش محوری افزایش یافت ( $\alpha = 0^\circ, b = 0$ ). در این حالت تنش اصلی میانی با تنش اصلی کوچک‌تر که در امتداد شعاعی است، برابر شد. در آزمایش سه‌محوری با کاهش فشار محوری، فشار محوری نمونه پس از تحکیم به تدریج به صورت کنترل کرنش محوری کاهش یافت ( $\alpha = 90^\circ, b = 1$ )، که این امر سبب چرخش امتداد محور تنش‌های اصلی

همچنین با انجام آزمایش‌هایی روی نمونه‌های سیمانته شده با آهک هیدراته مشخص شد که مقاومت برشی با افزایش سیمان افزایش می‌یابد، ولی اثر سیمان با افزایش فشار همه‌جانبه کاهش می‌یابد.<sup>[۱۰]</sup>

هر چند که دامنه‌ی وسیع پژوهش‌های گذشته حاکی از اهمیت بالای تحقیق در زمینه‌ی آثار سمتاسیون است، اما در عین حال، اغلب تحقیقات گذشته محدود به انجام آزمایش سه‌محوری فشاری، سیکلی یک‌طرفه و معدودی کشش برزلی است و اثر دوران و تغییر امتداد اعمال تنش‌های اصلی مورد بررسی قرار نگرفته است؛ این در حالی است که در زمین‌های مسطح در اثر رسیدن موج زلزله به سطح زمین، جهت تنش‌های اصلی دوران کرده است و بارگذاری روی المان خاک می‌تواند از حالت فشار محوری (comp.) به کاهش فشار محوری (ext.) تغییر کند.<sup>[۱۱]</sup> در چنین شرایطی با توجه به رفتار ناهمسان اغلب خاک‌های ماسه‌ی مشخص نیست که آیا سیمان افزوده سبب درصد یکسان افزایش مقاومت و سختی در هر دو امتداد افقی و قائم می‌شود یا خیر؛ در این پژوهش با انجام تعدادی آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته‌ی زهکشی نشده، تحت مسیر تنش‌های متفاوت استاتیکی و با دوران ۹۰ درجه‌ی امتداد تنش‌های اصلی بر روی خاک ماسه‌ی دارای سیمان اثر تغییر مقادیر پارامترهای  $b = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$  و  $\alpha$  که به ترتیب معرف امتداد تنش اصلی میانی نسبت به تنش اصلی کمینه و امتداد تنش اصلی بیشینه نسبت به امتداد محور تشکیل نمونه هستند، از وضعیت  $b = 0, \alpha = 0^\circ$  به وضعیت  $b = 1, \alpha = 90^\circ$  تحقیق شده است.

### ۲. مصالح مورد استفاده

به منظور انجام آزمایش‌ها در این پژوهش از خاک ماسه‌ی فیروزکوه از نوع F۱۶۱ استفاده شده است. ماسه‌ی فیروزکوه از نوع سیلیسی و تجاری شکسته‌ی مصنوعی است که در پژوهش‌های علمی ایران کاملاً شناخته شده است. این ماسه‌های سیلیسی، دانه‌های تیز گوشه تا نسبتاً تیز گوشه دارند. از نظر کانی‌شناسی، بخش عمده‌ی در حدود ۹۰٪ بافت دانه‌ها از کانی‌های فلدسپات و چرت است. هم‌چنین درصد کمی از کانی‌های کوارتز، کربنات (کلسیت)، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در بافت دانه‌ها قابل تشخیص هستند. خصوصیات فیزیکی خاک پایه‌ی مورد استفاده در جدول ۱ و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش جهت ساخت نمونه‌های دارای سیمان از سیمان پرتلند نوع II با درصد‌های مختلف ۳، ۵ و ۱۰ درصد استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه‌ی فیروزکوه (F۱۶۱).

ویژگی	مقدار
$G_s$	۲٫۶۵
$e_{max}$	۰٫۸۶
$e_{min}$	۰٫۵۸
$D_{50}$ (mm)	۰٫۲۶
$C_u$	۱٫۹
$C_c$	۰٫۸۸

جدول ۲. برنامه و مشخصات آزمایش‌ها.

شماره آزمایش	$\sigma_v$ (kPa)	نوع آزمایش	سیمان (%)	شماره آزمایش	$\sigma_v$ (kPa)	نوع آزمایش	سیمان (%)
۱	۱۰۰		۰	۹	۱۰۰		۰
۲	۳۰۰		۰	۱۰	۳۰۰		۰
۳	۱۰۰		۱٫۵	۱۱	۱۰۰		۱٫۵
۴	۳۰۰	comp	۱٫۵	۱۲	۳۰۰	ext	۱٫۵
۵	۱۰۰		۳	۱۳	۱۰۰		۳
۶	۳۰۰		۳	۱۴	۳۰۰		۳
۷	۱۰۰		۵	۱۵	۱۰۰		۵
۸	۳۰۰		۵	۱۶	۳۰۰		۵

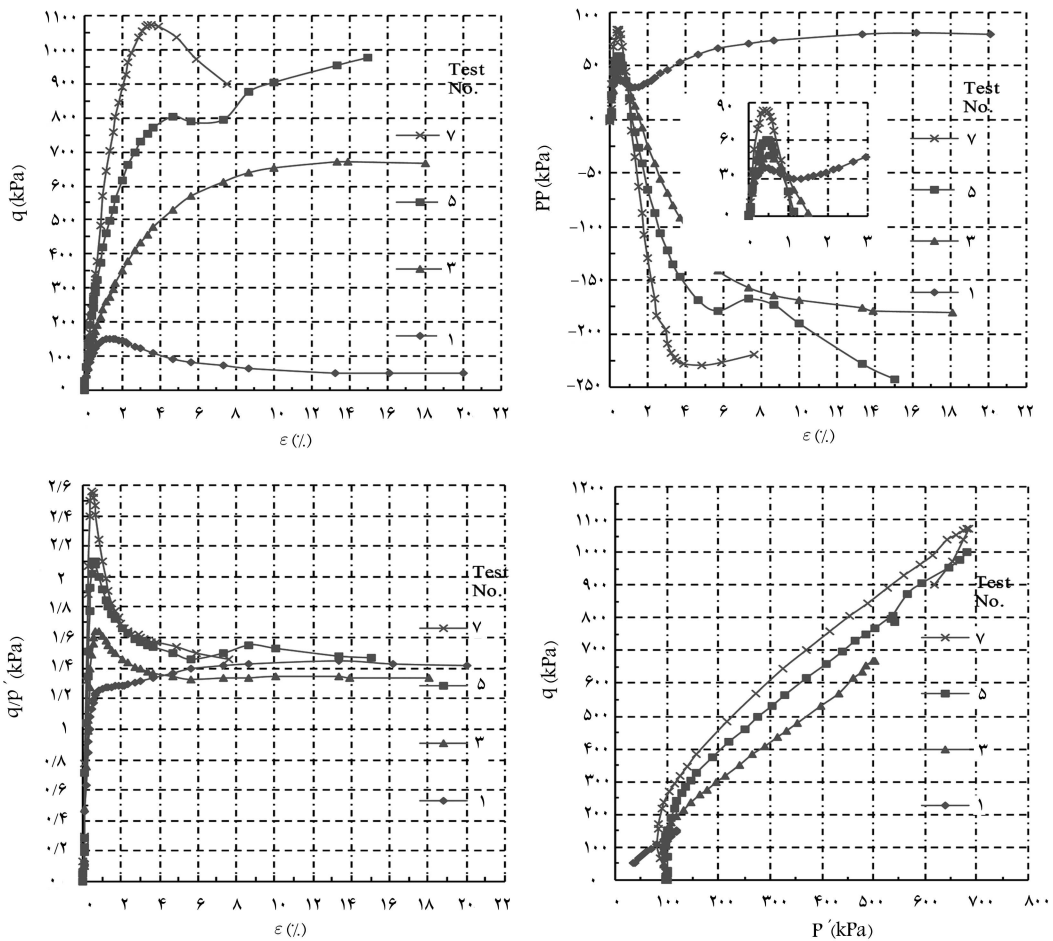
شکل‌های ۴ و ۵ (ext.) نمایش داده شده است. در این شکل‌ها نمودارهای مربوط به  $q - \varepsilon$  (تنش تفاضلی برحسب کرنش محوری)،  $PP - \varepsilon$  (اضافه فشار منفذی برحسب کرنش محوری)،  $q - p'$  (مسیر تنش مؤثر)، و  $q/p' - \varepsilon$  (نسبت تنش نرمالیزه شده بر حسب کرنش) ارائه شده‌اند.

با عنایت به توضیحات قبلی در آزمایش comp، پارامترهای مسیر تنش عبارتند از:  $q' = q - \Delta\sigma_d$  و  $p' = \sigma_v + \frac{\Delta\sigma_d}{\alpha} - PP$  که  $q'$  که تنش اصلی کوچک‌تر (در راستای شعاع نمونه) و  $\Delta\sigma_d$  تنش انحرافی است و در آزمایش ext، این پارامترها برابر با  $p' = \sigma_v - \frac{\Delta\sigma_d}{\alpha} - PP$  و  $q' =$

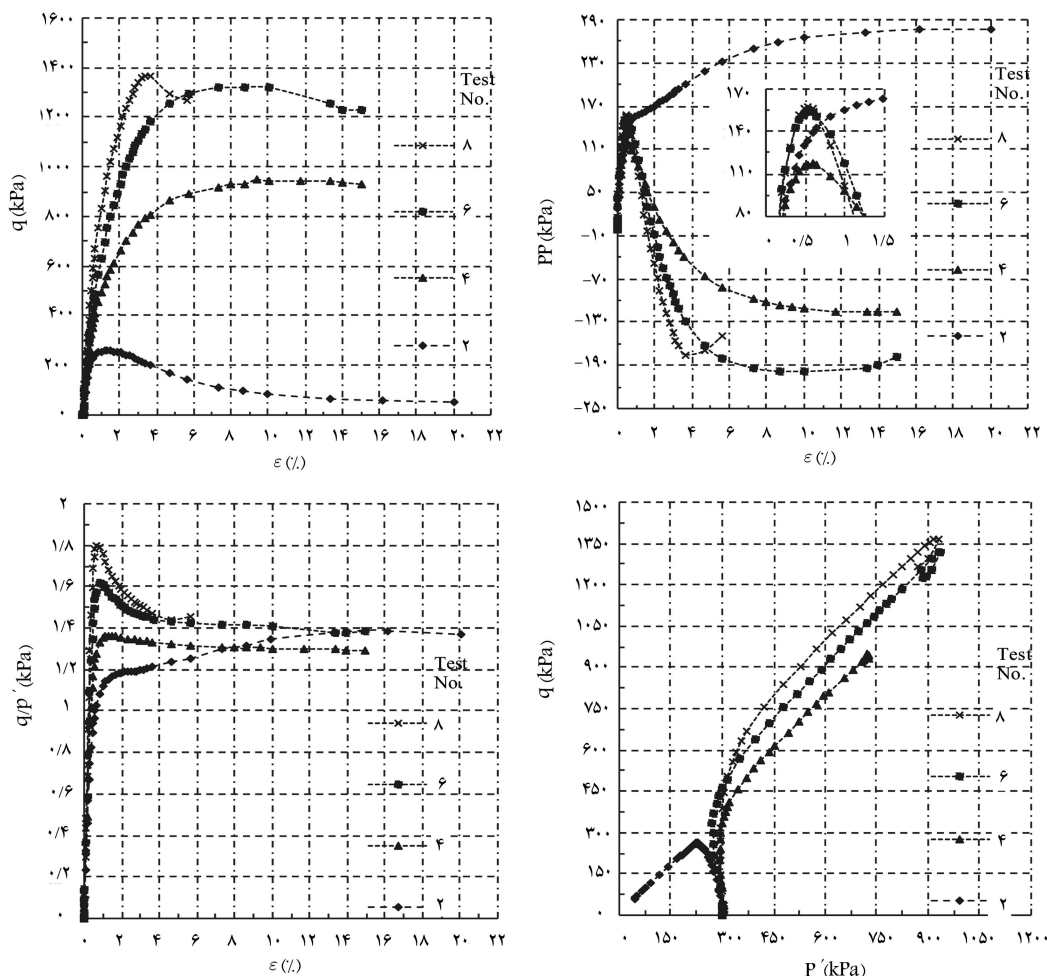
به اندازه‌ی  $90^\circ$  شد. در این حالت تنش اصلی میانمی با تنش اصلی بزرگ‌تر که در امتداد شعاعی است، برابر شد. براساس مطالب ذکرشده، مجموعاً ۱۶ آزمایش تعریف شده است که در جدول ۲، خلاصه‌ی مشخصات و اطلاعات مربوط به هر یک از آزمایش‌ها ارائه شده است.

#### ۴. نتایج حاصل از آزمایش‌ها

نتایج آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی‌نشده در شکل‌های ۲ و ۳ (comp.) و



شکل ۲. نتایج مربوط به آزمایش‌های سه‌محوری comp. تحت فشار محصورکننده‌ی  $100$  کیلوپاسکال.



شکل ۳. نتایج مربوط به آزمایش‌های سه‌محوری comp. تحت فشار محصورکننده‌ی ۳۰۰ کیلوپاسکال.

برشی است، تشکیل دو صفحه‌ی شکست قطری در نمونه مشاهده می‌شود؛ البته با تشکیل صفحه‌ی شکست اول در واقع آزمایش خاتمه‌یافته تلقی می‌شود، اما به دلیل مقاومت زیاد و اتساع شدید نمونه، ملاحظه می‌شود که حتی پس از شکست اول، فشار منفذی منفی داخل نمونه از بین نرفته و اجازه‌ی ادامه‌ی باربری و تشکیل صفحه‌ی دوم را داده است.

لازم به یادآوری است که هیچ‌یک از آزمایش‌ها شامل باربرداری نبوده‌اند و برگشت ظاهری برخی نمودارها در انتهای مسیر بارگذاری که ناشی از گسیختگی ناگهانی آن است، فقط به‌منظور تصریح نقطه‌ی شکست به‌خصوص در نمونه‌های با رفتار تردشکن نمایش داده شده است.

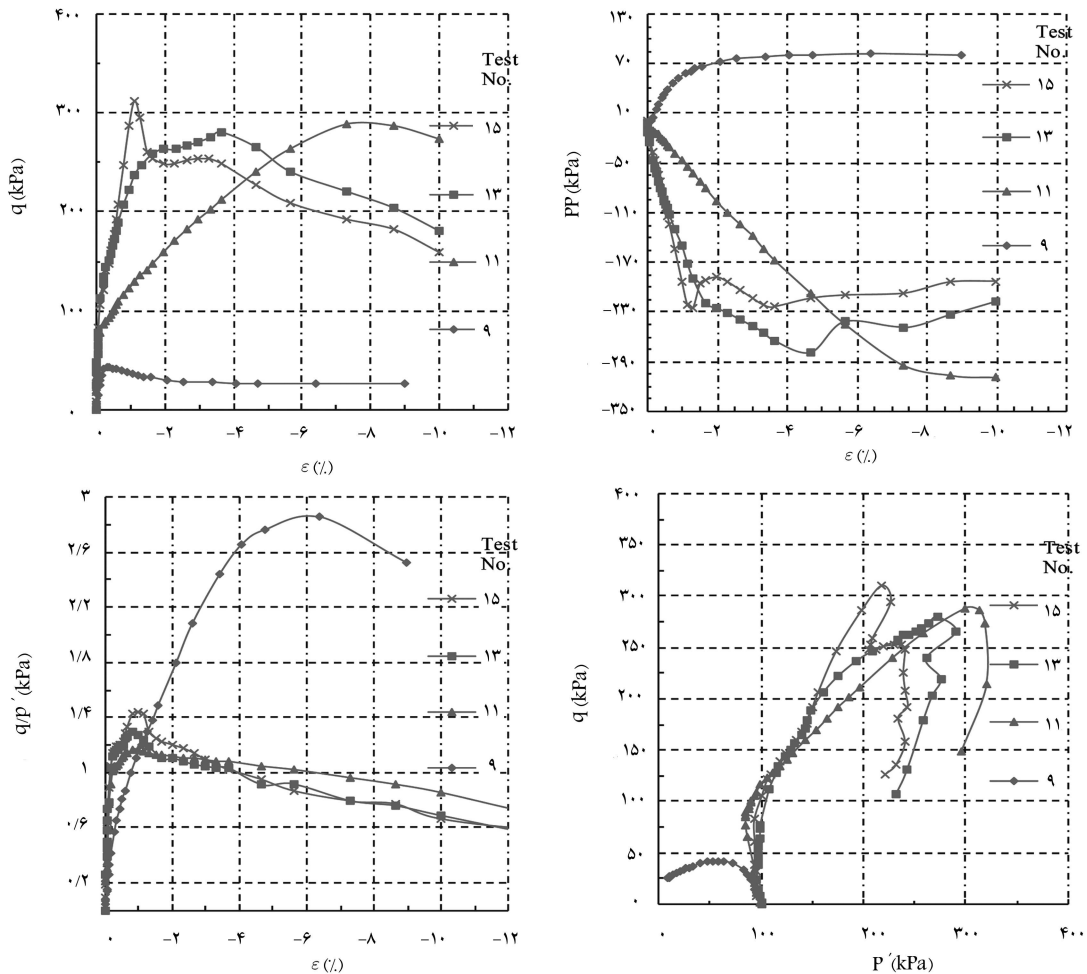
همچنین از جدول ۳ ملاحظه می‌شود که با افزودن سیمان ضمن آنکه حالت رفتار نمونه‌ها نسبت به خاک پایه تغییر کرده است، کرنش متناظر نقطه‌ی مقاومت بیشینه در نمونه‌های سیمان‌ته با افزایش درصد سیمان در تمامی آزمایش‌های comp. و ext. کاهش یافته است که تأییدی بر افزایش شکنندگی و کاهش شکل‌پذیری نمونه‌ها با افزایش سیمان است؛ این روند در بارگذاری comp. خفیف‌تر از بارگذاری ext. است. توضیح اینکه در تمامی نمونه‌ها، حصول ۲۰٪ کرنش محوری در بارگذاری comp.، ۱۰٪ کرنش محوری در بارگذاری ext. (به دلیل رفتار نرم‌شونده‌تر نمونه‌ها که ناشی از نوع بارگذاری است) و یا گسیختگی نمونه در حین آزمایش، هر کدام زودتر به وقوع بپیوندند، به‌منزله‌ی حد خرابی در نظر گرفته شده است.

$q = -\Delta\sigma_d$  هستند که تنش اصلی بزرگ‌تر (در راستای شعاع نمونه) است.

نتایج نشان می‌دهند که بارگذاری در دو جهت متفاوت بر روی خاک پایه، مقادیر مقاومت‌های متفاوتی را به‌دست می‌دهد که مقاومت در بارگذاری comp. بیشتر از ext. بوده و این موضوع حاکی از رفتار ناهمسان خاک پایه است؛ اما علی‌رغم رفتار ناهمسان خاک پایه با دقت در نمودارهای مذکور ملاحظه می‌شود که به‌طورکلی درصد افزایش مقاومت ناشی از افزودن سیمان برای بارگذاری کششی بیشتر از بارگذاری فشاری است، طوری که به‌نظر می‌رسد افزایش سیمان میل به کاهش رفتار ناهمسان ماسه دارد.

نکته‌ی قابل توجه در شکل ۴، رشد بسیار زیاد نسبت  $\frac{q}{p}$  برای نمونه‌های فاقد سیمان نسبت به نمونه‌های دارای سیمان در هر دو تنش همه‌جانبه است، که با توجه به مقادیر کم  $q$  مربوط به این نمونه‌ها واضح است که علت آن در واقع به دلیل کاهش شدید  $p'$  (ناشی از مقادیر بالای اضافه فشار منفذی) است.

با افزایش درصد سیمان، رفتار نمونه‌ها از شکل‌پذیر به شکننده تغییر می‌کند؛ به طوری که حالت شکست در نمونه‌های غیرسیمان‌ته و با ۱/۵٪ سیمان از نوع بشکه‌بی (bulging) و در نمونه‌های با درصد سیمان بالاتر از نوع تشکیل صفحه‌ی شکست بوده است که تصاویر برخی از نمونه‌ها در لحظه‌ی شکست در شکل ۶ ملاحظه می‌شود. در شکل ۶ج که مربوط به وضعیت نمونه‌ی ۵٪ سیمان در زمان گسیختگی



شکل ۴. نتایج مربوط به آزمایش‌های سه‌محوری ext. تحت فشار محصورکننده  $100$  کیلو پاسکال.

خاک به منظور بهسازی آن در بارگذاری‌های تناوبی دارای جهت معکوس شونده‌ی بارگذاری در کشش و فشار (stress reversal) هستند، حائز اهمیت است و نیاز به تحقیقات بیشتر دارد.

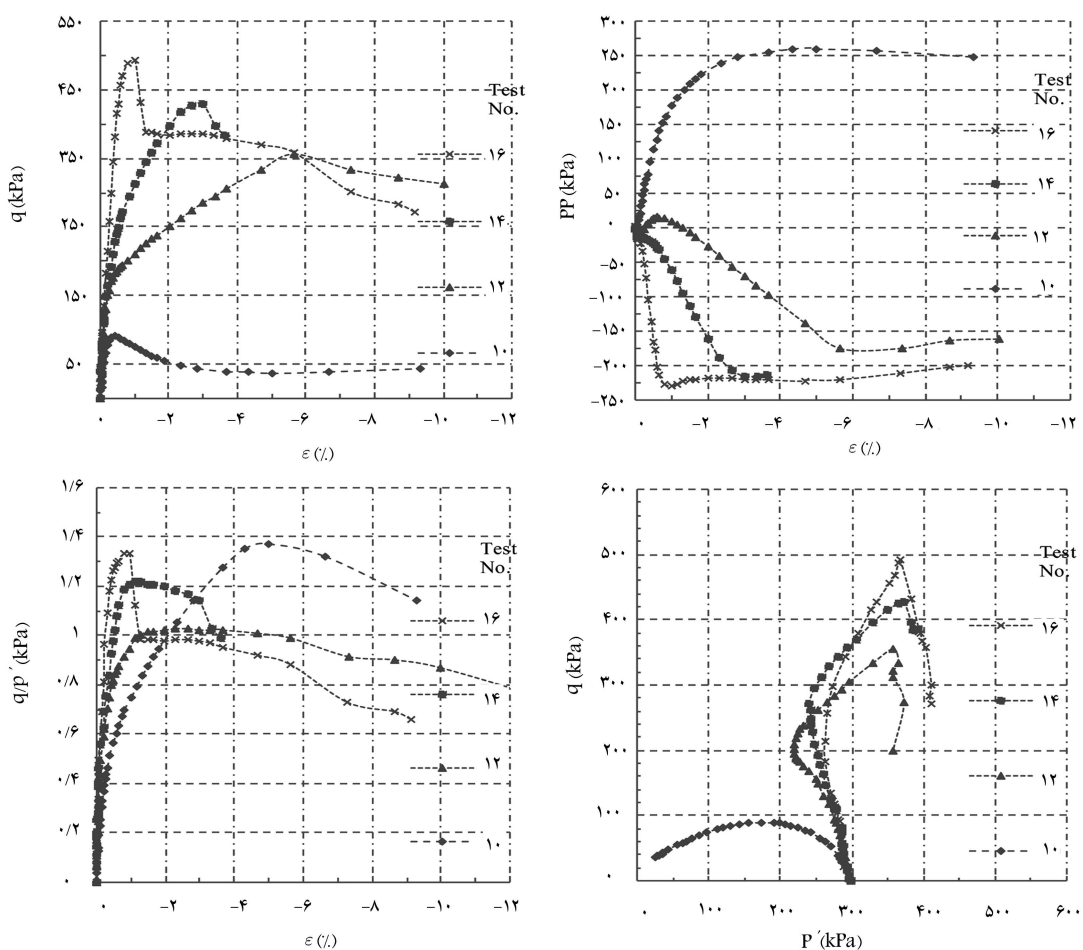
یکی دیگر از آثار افزودن سیمان، افزایش سختی نمونه‌هاست؛ که به‌منظور مقایسه‌ی نتایج، در شکل ۸ مدول ارتجاعی سکانتی (مبین سختی محوری) به ازای  $0.5\%$  کرنش محوری برای مسیر تنش‌های مربوط به آزمایش‌های comp. و ext. نمایش داده شده است که مبین افزایش مدول ارتجاعی با افزایش درصد سیمان در هر دو نوع مسیر بارگذاری است و در عین حال درصد افزایش سختی در بارگذاری ext. بیشتر از comp. بوده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات پارامترهای مقاومت برشی زهکشی‌شده نمونه‌ها در مقاومت بیشینه، با افزایش درصد سیمان ارائه شده است.

شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش درصد سیمان، چسبندگی نمونه‌ها افزایش یافته است. نتایج ارائه‌شده‌ی سایر پژوهشگران در گذشته نیز مبین اتفاق نظر در خصوص افزایش چسبندگی بر اثر افزودن سیمان است، مثلاً در سال ۱۹۸۱ از مطالعه بر روی ماسه‌ها نتیجه گرفته شد که سمتاسیون باعث افزایش چسبندگی خاک می‌شود، به طوری که در خاک‌های ماسه‌یی با  $4\%$  سیمان، میزان چسبندگی حدود سه برابر مقدار چسبندگی در خاک با  $2\%$  سیمان است.<sup>[۳]</sup> اما مروری بر نتایج پژوهش‌های گذشته حاکی از آن است که برخلاف چسبندگی،

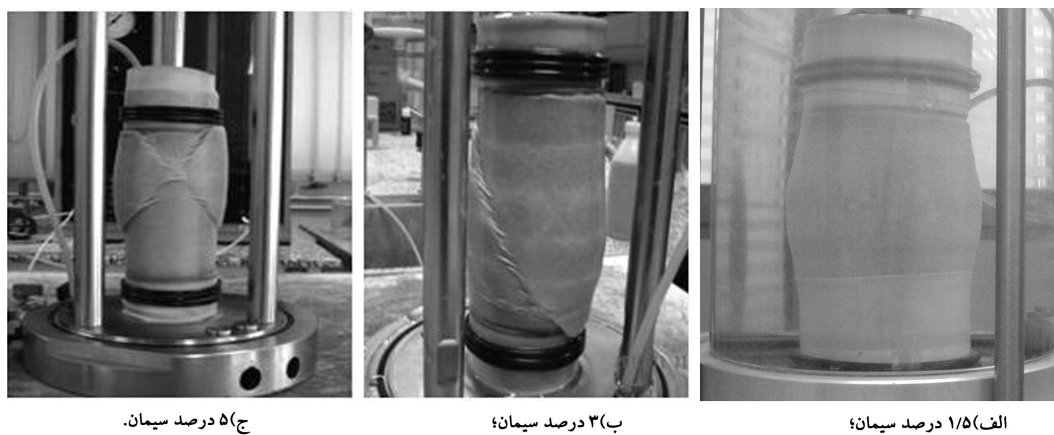
جدول ۳. کرنش متناظر با نقطه‌ی اوج منحنی تنش-کرنش در مسیر بارگذاری‌های متفاوت برای نمونه‌های سیمانته.

کرنش متناظر با نقطه‌ی اوج منحنی تنش-کرنش (%)		سیمان (%)		
		۵	۳	۱.۵
AE (ext.)	$\sigma_r = 100$ kPa	۱.۲	۴.۲	۷.۹
	$\sigma_r = 300$ kPa	۱.۰	۲.۹	۶.۳
AC (comp.)	$\sigma_r = 100$ kPa	۳.۶	۵.۵	۱۳.۳
	$\sigma_r = 300$ kPa	۳.۵	۸.۷	۹.۳

در شکل ۷ که نمودار بیشینه‌ی مقاومت حاصل‌شده در مقابل درصد سیمان نمایش داده شده است، ملاحظه می‌شود که به‌طور کلی با افزایش درصد سیمان، نرخ افزایش مقاومت کاهش می‌یابد، به‌گونه‌یی که از حدود  $3\%$  در اغلب موارد روند کاهشی دیده می‌شود. همچنین درصد افزایش مقاومت بر اثر افزودن سیمان در هر دو حالت بارگذاری comp. و ext. در فشارهای همه‌جانبه‌ی پایین بیشتر است. در محدوده‌ی آزمایش‌های انجام‌شده، کمینه‌ی درصد افزایش مقاومت به ازای  $1.5\%$  سیمان بیش از  $25\%$  بوده است. اما همان‌طور که اشاره شد، در اغلب موارد، درصد افزایش مقاومت نسبت به خاک پایه، در بارگذاری کششی بیشتر از بارگذاری فشاری است. توجه به این نکته در کارهای عملی و مواقعی که از روش افزودن سیمان به



شکل ۵. نتایج مربوط به آزمایش‌های سه‌محوری ext. تحت فشار محصورکننده ۳۰۰ کیلوپاسکال.



ج) ۵ درصد سیمان.

ب) ۳ درصد سیمان؛

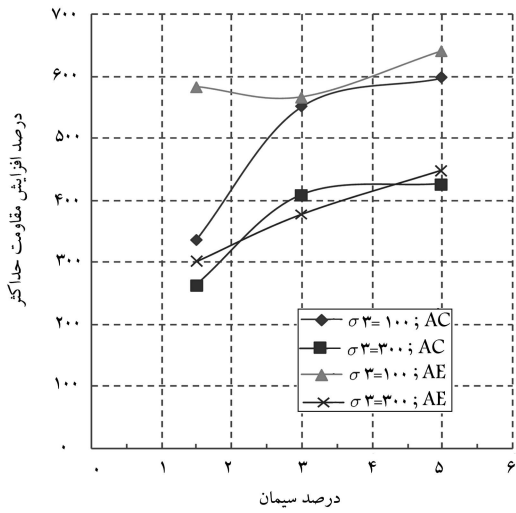
الف) ۱/۵ درصد سیمان؛

شکل ۶. تصاویر مربوط به وضعیت حد خرابی نمونه‌ها در آزمایش‌های سه‌محوری فشاری.

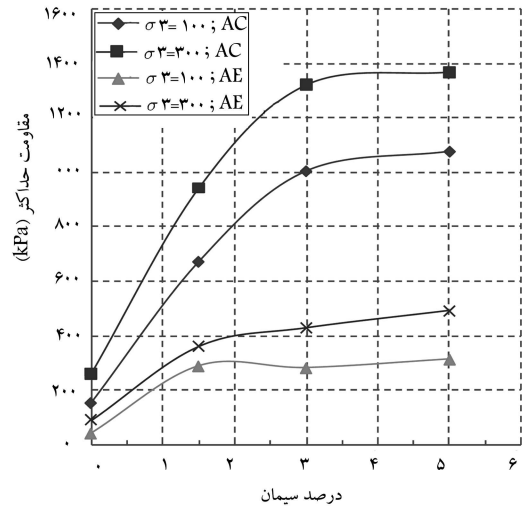
است. [۳] همچنین در سال ۱۹۸۹ این نتیجه به دست آمد که سمنتاسیون سبب کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌شود و مقادیر این کاهش نیز با وزن مخصوص خاک مرتبط است. [۱۳]

در نوشتار حاضر با توجه به شکل ۱۰ می‌توان گفت زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ی دارای سیمان نسبت به نمونه‌ی غیرسیمانته افزایش یافته است، اما افزودن بیشتر مقدار سیمان سبب کاهش تدریجی و اندک زاویه اصطکاک داخلی می‌شود.

اتفاق نظر مشخصی در مورد زاویه اصطکاک داخلی وجود ندارد. برای مثال در سال ۱۹۸۹ طی مطالعه بر روی ماسه‌ی سیمانته‌شده با سیمان پرتلند نشان داده شد که زاویه اصطکاک داخلی در فشارهای جانبی کم سبب افزایش اندکی در  $\phi$  می‌شود. [۱۳] و نیز در سال ۱۹۸۱ از تحقیقات بر روی ماسه‌ها نتیجه گرفته شد که سمنتاسیون تأثیر محسوسی در زاویه اصطکاک داخلی خاک ندارد و این پدیده فقط سبب جابجایی پوش موهر به سمت بالا می‌شود، که دلیل آن هم چسبندگی

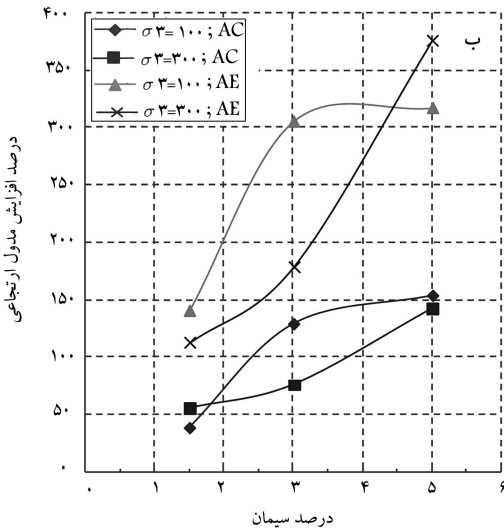


ب) درصد افزایش با درصد سیمان های متفاوت.

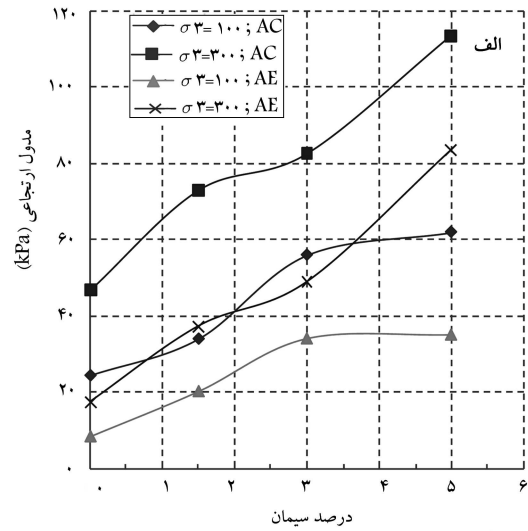


الف) تغییرات با درصد سیمان های متفاوت؛

شکل ۷. مقاومت بیشینه.

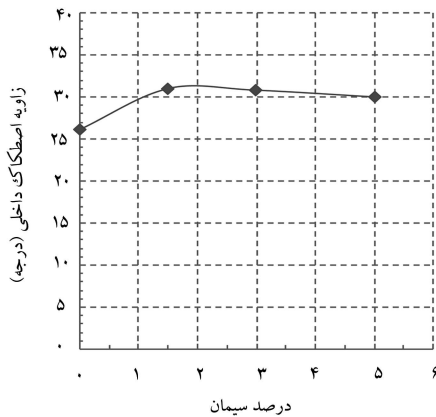


ب) درصد افزایش با درصد سیمان های متفاوت.

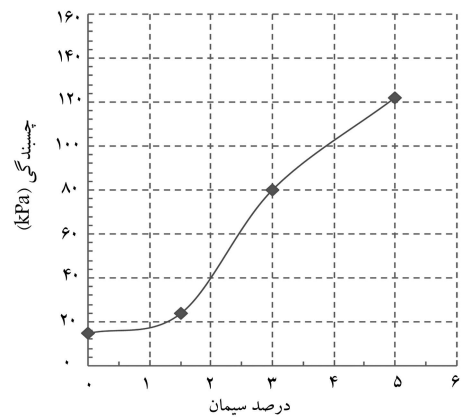


الف) تغییرات با درصد سیمان های متفاوت؛

شکل ۸. مدول ارتجاعی در ۰/۵٪ کرنش محوری.



شکل ۹. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده با درصد سیمان در آزمایش سه محوری فشاری.



شکل ۱۰. تغییرات چسبندگی زهکشی شده با درصد سیمان در آزمایش سه محوری فشاری.

## ۵. نتیجه‌گیری

برای مقایسه اثر افزودن سیمان بر رفتار خاک‌های ماسه‌یی در مسیر تنش‌های متفاوت بارگذاری محوری، تعدادی آزمایش در دستگاه سه‌محوری در دو مسیر تنش افزایش بار محوری در فشار محفظه‌ی ثابت و کاهش بار محوری در فشار محفظه‌ی ثابت انجام و این نتایج حاصل شد:

- افزودن سیمان پرتلند حالت رفتار خاک پایه را تغییر می‌دهد و در نمونه‌ی خاک سیمانته، تردی و شکنندگی نمونه‌ها با افزایش سیمان افزایش می‌یابد.
- افزودن سیمان پرتلند تمایل به کاهش رفتار ناهمسان مقاومتی در ماسه‌ها دارد.
- به‌طورکلی درصد افزایش مقاومت ناشی از افزودن سیمان به نمونه‌ها در بارگذاری ext. بیشتر از comp. است.
- به‌طورکلی نرخ افزایش مقاومت ماسه‌ها با درصد سیمان افزوده از حدود ۳٪ به بعد کاهش می‌یابد؛ اما آزمایش‌های بیشتری با درصد‌های متفاوت برای مشخص‌کردن این حد برای هر نوع ماسه مورد نیاز است.
- در محدوده‌ی مطالعه‌ی انجام‌شده، افزودن سیمان پرتلند به خاک در ابتدا موجب افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی می‌شود؛ اما با افزایش بیشتر مقدار سیمان به تدریج زاویه‌ی اصطکاک داخلی اندکی کاهش می‌یابد. به‌طورکلی تأثیر درصد سیمان بر زاویه‌ی اصطکاک داخلی چندانی نیست.

- افزودن درصد سیمان موجب افزایش قابل توجه در پارامتر چسبندگی می‌شود.
- نتایج حاصل، مبین افزایش مدول ارتجاعی با افزایش درصد سیمان در هر دو نوع مسیر بارگذاری است و در عین حال درصد افزایش سختی در بارگذاری ext. بیشتر از بارگذاری comp. است.
- تأثیر افزودن سیمان به خاک بر درصد افزایش مقاومت و مدول ارتجاعی در بارگذاری‌های ext. و comp. متفاوت است؛ لذا تحقیقات بیشتری برای استفاده از اختلاط خاک -سیمان در کارهای بهسازی به‌خصوص برای جلوگیری از کاهش مقاومت ناشی از بارگذاری‌های تناوبی که دارای جهت معکوس‌شونده (stress reversal) هستند (نظیر آنچه در تمام زمین‌های مسطح و دارای سربار قائم کم، مانند: ساختمان‌های کوتاه، روسازی راه‌ها و... تحت بارگذاری زلزله یا در زیر پی ماشین‌آلات محتمل است) مورد نیاز است.

## تقدیر و تشکر

بدین وسیله از زحمات آقای مهندس تقی بهرامی، کارشناس آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر که در مراحل نمونه‌سازی و انجام آزمایش‌ها همکاری شایان توجهی داشته‌اند، قدردانی و تشکر می‌شود.

## پانویس‌ها

1. (comp)(compression)
2. (ext)(extension)

## منابع (References)

1. Dupas, J.M. and Pecker, A. "Static and dynamic properties of sand-cement", *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, **105**(3), pp. 419-436 (1979).
2. Ismail, M.A., Joer, H.A., Sim, W.H. and Randolph, M.F. "Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil", *J. Geotech. And Geoenv.Engng., ASCE*, **128**(6), pp. 520-529 (2002).
3. Clough, G.W., Sitar, N., Bachus, R.C. and shafii Rad, N. "Cemented sands under static loading", *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, **107**(6), pp. 799-817 (1981).
4. Airey, D.W. "Triaxial testing of naturally cemented carbonated soil", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **119**(9), pp. 1379-1393 (1993).
5. Coop, M.R. and Atkinson, J.H. "The mechanics of cemented carbonate sand", *Journal of Geotechnique*, **43**(1), pp. 741-760 (1993).
6. Schnaid, F., Prietto, P.D.M. and Consoli, N.C. "Characterization of cemented sand in triaxialcompression", *J. Geotech. And Geoenviron. Eng., ASCE*, **127**(10), pp. 857-868 (2001).
7. Rotta, G.V., Consoli, N.C., Prietto, P.D.M., Coop, M.R. and Graham, J. "Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress", *Geotechnique*, **53**(5), pp. 493-501 (2003).
8. Consoli, N.C., Foppa, D., Festugato, L. and Heineck, K.S. "Key parameters for strength control of artificially cemented soils", *J. Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE*, **133**(2), pp. 197-205 (2007).
9. Haeri, S.M., Yasrebi, S. and Asghari, E. "Effect of cementation on the shear strength parameters of Tehran alluvium using large direct shear test", In: *Proc. Of*



- the 9th Congress on Engineering Geology for Developing Countries*, Durban, South Africa, pp. 16-20 (Sept. 2002).
10. Asghari, E., Toll, D.G. and Haeri, S.M. "Triaxial behavior of a cemented gravely sand", *Geotech. Geological Eng.*, **21**(1), pp. 1-28 (2003).
  11. Yang, Z.X., Li, X.S. and Yang, J. "Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil", *Geotechnique*, **57**(4), pp. 371-384 (2007).
  12. Ladd, R.S. "Preparing test specimens using undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, **1**(1), pp. 16-23 (1978).
  13. Lade, P.V. and Overton, D.D. "Cementation effects in frictional materials", *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, **115**(10), pp. 1373-1387 (1989).
  14. Allman, M.A. and Poulos, H.G. "Stress-strain behaviour of an artificially cemented calcareous soil", *Proc. Of Engineering for Calcareous Sediments*, Jewell and Andrews(eds), ISBN 90617549 (1988).



# EFFECT OF PORTLAND CEMENT ADDITION ON ANISOTROPIC STRENGTH OF SAND UNDER COMPRESSION AND EXTENSION TRIAXIAL TESTS

**K. Fakharian**(corresponding author)

kfakhari@aut.ac.ir

**S. Heidarie Golafzani**

sara\_hg65@yahoo.com

**A.H. Eghbali**

ah\_eghbali@yahoo.com

**Dept. of Civil and Environment Engineering  
AmirKabir University of Technology**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 4, Page 107-115, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 8 May 2011; received in revised form 19 February 2012; accepted 22 September 2012.

## Abstract

Poorly graded clean sand sediments formed on coastal zones are usually in a loose state, especially at shallow depths and when saturated, show low strength values even under static loading. This is because under cyclic loading, like seismic excitations, excess pore water pressure undergoes a sudden rise and, hence, decreases the strength to reach a condition near initial liquefaction or excessive settlement. One of the most important reasons behind intensifying the cyclic loading effect is indeed stress reversal, or, when after loading in a compressive manner, a reverse loading equal to twice the compressive amplitude will be applied in such a way that the soil element experiences an extension. In the latter case, the major principal stress direction will rotate from vertical to horizontal direction or the  $\alpha$  change of 0 to 90 degrees will occur. Furthermore, under many monotonic loading/unloading conditions, the major principal stress may also change its direction, with respect to the vertical direction and the stress path on the soil element after from, for example, compression to extension. Therefore, it can be simply concluded that knowing the values of strength in monotonic compression and extension loading and a study of soil behavior in these cases, would be useful in design applications.

Portland cement can be mixed with sand to improve its mechanical characteristics. Many studies are reported in

literature on this topic, but the effect of principal stress rotation has not been investigated yet. Considering the inherent anisotropy of most sands, it is not clear whether the added cement will contribute to an equal increase in strength and stiffness in vertical and horizontal directions or not.

In this study, the effects of adding Portland cement to clean sand on strength and stiffness characteristics are investigated through experimental investigation using undrained triaxial compression and extension tests. Different mixtures of Portland cement (1.5, 3 and 5 %) have been added to Firuzkooch sand and the specimens have been cast using the wet tamping method.

Test results revealed that while adding Portland cement will increase strength and elastic modulus (stiffness) in both stress paths, in most cases the percent of strength and stiffness increases, due to cement addition in extension loading is higher than compression. In other words, Portland cement addition tends to decrease strength and stiffness anisotropy. This is a noticeable point for attention in practical applications when compared to other soil improvement methods.

**Key Words:** anisotropy, Portland cement, stress path, triaxial compression and extension test, rotation of principal stresses.