

ارزیابی رفتار تراکم پذیری و تغییر حجم خاک های ماسه ای سیمانته

امیر حمیدی^{۱*}، امین حسن زاده^۲

۱- گروه مهندسی عمران، دانشگاه تربیت معلم تهران

۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه تربیت معلم تهران

hamidi@tmu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۴/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۶/۱۴

چکیده- بیشتر مطالعات آزمایشگاهی با موضوع بررسی و تبیین رفتار مکانیکی خاک های سیمانی شده در گذشته بر ارزیابی ویژگی های مقاومت برشی این مصالح استوار بوده است. در این پژوهش سعی شده است که خصوصیات تراکم پذیری و تغییر حجم خاک های ماسه ای سیمانی شده در شرایط تحکیم یک بعدی (K_0) و تحکیم ایزوتروپ بررسی شود. بنابراین ماسه ریز و بد دانه بندی شده سواحل بابل سر به عنوان مصالح پایه و گچ و سیمان پرتلند به عنوان عامل سیمانی کننده استفاده شده است. نمونه ها با تراکم های نسبی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد و درصد سیمان های ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ ساخته شدند. دستگاه تحکیم ادمتر برای ارزیابی ویژگی های تراکم پذیری یک بعدی و سلول سه محوری برای بررسی خصوصیات تغییر حجم ایزوتروپ استفاده شد. با انجام آزمایش ها، رفتار تغییر حجم و تراکم پذیری خاک ماسه ای سیمانی شده ارزیابی شد. از موارد بررسی شده تنش تسلیم باندهای سیمانی در شرایط K_0 و فشار ایزوتروپ در تراکم های نسبی و درصد های سیمان مختلف است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که تراکم نسبی خاک، درصد و نوع عامل سیمانی کننده به شدت خصوصیات تغییر حجم خاک های سیمانی شده را تحت تأثیر قرار می دهند. با ازدیاد تراکم نسبی و درصد سیمان، سختی خاک سیمانی شده افزایش یافته و به عبارتی دیگر بر مدول حجمی و فشار لازم برای خردشدگی باندها افزوده می شود.

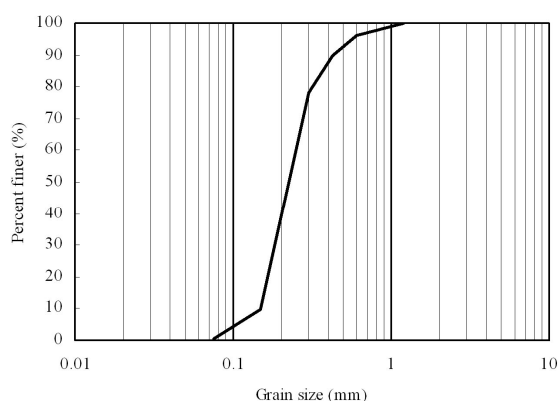
کلیدواژگان: تراکم پذیری، ماسه سیمانی شده، آزمایش ادمتری، فشار ایزوتروپ، سلول سه محوری

۱- مقدمه

آزمایشگاه، مقدار مورد نیاز از عامل سیمانی کننده مانند آهک، گچ یا سیمان پرتلند به خاک مورد نظر اضافه شده و نمونه در شرایط مناسب عمل آوری می شود. در بیشتر مطالعات آزمایشگاهی که در گذشته روی خاک های سیمانته انجام شده است به رفتار و ویژگی های مقاومت برشی این مصالح توجه شده است. از این مطالعات می توان به تحقیقات کلاف و همکاران [۴]، لرویل و وان [۵]، هوانگ و آیری [۶]، اشنید و همکاران [۷]، مالاندرانی و تول [۸] و حمیدی و حائری [۹ و ۱۰] اشاره کرد.

به خاطر دشواری و دست خوردگی زیاد خاک های سیمانته طبیعی هنگام عملیات نمونه گیری، معمولاً برای بررسی خواص مکانیکی آن ها از روش ساخت نمونه با سیمان تاسیون مصنوعی^۱ استفاده می شود. محققین بسیاری مانند کوپ و اتکینسون [۱]، حائری و همکاران [۲] و کنسولی و همکاران [۳] نیز در مطالعات خود از نمونه های با سیمان تاسیون مصنوعی استفاده کرده اند. بدین ترتیب برای تهیه نمونه در

1- Artificial cementation



شکل (۱) منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای پایه

۳- نحوه ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

برای بررسی تأثیر تغییرات تراکم نسبی و درصد سیمانتاسیون، نمونه‌ها در سه تراکم نسبی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد و سه درصد وزنی سیمان ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ تهیه شدند. برای بهتر مخلوط کردن عامل سیمانی‌کننده با خاک و هیدراتاسیون آن، حدود ۱۰ درصد وزنی آب مقطر به خاک، اضافه و کاملاً مخلوط شده است. جدول (۱) مشخصات همه‌ی نمونه‌ها همراه متغیرهای در نظر گرفته‌شده در انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

۳-۱- نحوه ساخت و عمل آوری نمونه‌ها با سیمان گچی

برای ساخت نمونه‌های گچی ابتدا برحسب میزان تراکم نسبی و درصد سیمان مورد نظر، وزن ماسه، گچ و آب مقطر معین می‌شود. برای ساخت نمونه برای آزمایش ادمتری، مواد وزن‌کشی شده با هم مخلوط و بعد از به‌دست آمدن یک مخلوط همگن، همه‌ی آن درون قالب ادمتر ریخته شده و با کوبه مخصوص تا به‌دست آمدن تراکم مورد نیاز کوبیده می‌شود؛ سپس قالب درون گرم‌خانه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد تا مخلوط سیمانته کاملاً خشک و آماده آزمایش شود. برای ساخت نمونه مورد نیاز آزمایش سه‌محوری، مواد وزن‌کشی شده به

همچنین در گذشته تحقیقات محدودی نیز راجع به ویژگی‌های تراکم‌پذیری خاک‌های سیمانته انجام شده است؛ مانند مطالعات روتا و همکاران [۱۱] و چیو و همکاران [۱۲] که درباره‌ی رفتار تراکم‌پذیری ماسه سیمانی شده با سیمان پرتلند و همچنین رس دارای ساختار انجام شده است. بیشتر این تحقیقات تراکم‌پذیری خاک‌های سیمانی شده با سیمان پرتلند تحت شرایط فشار ایزوتروپ را بررسی کرده‌اند. اما در این پژوهش سعی شده است تا علاوه بر بررسی رفتار در شرایط تنش ایزوتروپ به وضعیت تنش در حالت سکون (K_0) نیز پرداخته شود. همچنین برای ارزیابی آثار جنس سیمانتاسیون، ویژگی‌های تراکم‌پذیری خاک ماسه‌ای سیمانی شده با دو عامل سیمانتاسیون گچ و سیمان پرتلند بررسی شده است.

۲- مواد و مصالح

مصالح پایه در این پژوهش، ماسه ساحلی بابلسر [به‌خاطر همگن بودن و یکنواختی این خاک] است. منحنی دانه‌بندی این مصالح در شکل (۱) نمایش داده شده است. برای این ماسه، ضریب یکنواختی، ۱/۷۵، ضریب خمیدگی، ۰/۸۹ و چگالی دانه‌های جامد، ۲/۷۴ است. در سیستم طبقه‌بندی متحد^۱ این خاک در رده ماسه بد دانه‌بندی شده قرار می‌گیرد. دو نوع عامل سیمانی‌کننده در این پژوهش استفاده شده است؛ یکی سیمان پرتلند متداول در فعالیت‌های ساخت و ساز است. زمان گیرش اولیه این سیمان بر اساس نتایج حاصل از آزمایش با سوزن و یکات حدود ۲/۵ ساعت است. دیگری نیز گچ از انواع رایج در عملیات ساختمانی است. زمان گیرش اولیه این نوع گچ نیز که بر اساس نتایج حاصل از آزمایش با سوزن و یکات به دست آمده، تقریباً ۱۰ دقیقه است.

1- Unified system of soil classification

اتاق بخار قرار می‌گیرند. علت قراردادن نمونه‌ها در اتاق بخار، رساندن سیمان پرتلند به مقاومت هفت‌روزه آن است.

۴- نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش برای انجام آزمایش‌های فشار ایزوتروپ از سلول دستگاه سه‌محوری با امکان آزمایش بر نمونه‌ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و برای انجام آزمایش‌های بارگذاری در شرایط سکون (K_0) از دستگاه اودومتر کاساگرانده^۱ با نمونه‌هایی با قطر ۵ و ارتفاع ۲ سانتی‌متر استفاده شده است. شکل (۲) نمایی از مصالح، دستگاه اودومتر و سیستم آزمایش سه‌محوری^۲ با سلول مسلح استفاده‌شده در آزمایش‌های این پژوهش را نشان می‌دهد. از آنجا که تماس آب با گچ سبب از بین رفتن مقاومت باندهای سیمانی می‌شود، آزمایش‌ها روی نمونه‌های دارای سیمان گچی بر نمونه‌های کاملاً خشک انجام شد؛ اما در نمونه‌های دارای سیمان پرتلند، آزمایش‌ها روی نمونه‌های کاملاً اشباع انجام شده است.

۴-۱- نحوه انجام آزمایش‌ها با دستگاه اودومتر

برای آزمایش روی نمونه‌های با سیمان‌تاسیون گچی، نمونه‌ها بعد از خارج شدن از گرم‌خانه مدت ۳ ساعت در فضای آزمایشگاه قرار داده می‌شوند تا دمای آن‌ها با محیط یکسان شود. سپس قالب روی دستگاه اودومتر قرار داده می‌شود و بعد از جای‌گذاری و تراز کردن اهرم انتقال نیرو، بارگذاری با نرخ یکسان ۵۰ کیلوپاسکال در هر مرحله اعمال می‌شود.

برای آزمایش روی نمونه‌های تهیه‌شده با سیمان پرتلند، قالب حاوی نمونه بعد از خارج کردن از اتاق بخار مدت ۲۴ ساعت در محفظه اودومتر که از آب مقطر پر شده، قرار

هشت بخش مساوی تقسیم می‌شوند؛ سپس مواد هر یک از هشت قسمت به خوبی همراه آب با یک‌دیگر مخلوط شده و نمونه مورد نیاز در هشت لایه با ارتفاع مساوی ساخته می‌شود. بعد از گیرش اولیه، نمونه از قالب خارج شده و برای عمل‌آوری مدت ۴۸ ساعت در گرم‌خانه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد.

جدول (۱) مشخصات نمونه‌های تهیه‌شده برای انجام آزمایش‌ها

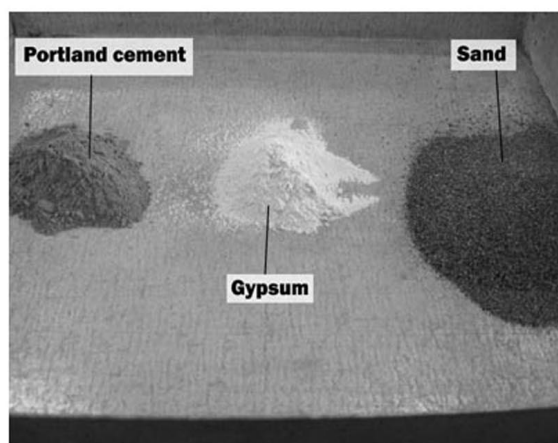
بارگذاری در شرایط سکون (آزمایش اودومتري)			بارگذاری در شرایط ایزوتروپ (سلول سه محوري)		
نوع سیمان	دانشیه نسبی	درصد سیمان	نوع سیمان	دانشیه نسبی	درصد سیمان
پرتلند	۳۰	۰.۵	پرتلند	۳۰	۰.۵
پرتلند	۳۰	۱	پرتلند	۳۰	۱
پرتلند	۳۰	۱.۵۰	پرتلند	۳۰	۱.۵۰
پرتلند	۵۰	۰.۵	پرتلند	۵۰	۰.۵
پرتلند	۵۰	۱	پرتلند	۵۰	۱
پرتلند	۵۰	۱.۵۰	پرتلند	۵۰	۱.۵۰
پرتلند	۷۰	۰.۵	پرتلند	۷۰	۰.۵
پرتلند	۷۰	۱	پرتلند	۷۰	۱
پرتلند	۷۰	۱.۵۰	پرتلند	۷۰	۱.۵۰
گچ	۳۰	۰.۵	گچ	۳۰	۰.۵
گچ	۳۰	۱	گچ	۳۰	۱
گچ	۳۰	۱.۵۰	گچ	۳۰	۱.۵۰
گچ	۵۰	۰.۵	گچ	۵۰	۰.۵
گچ	۵۰	۱	گچ	۵۰	۱
گچ	۵۰	۱.۵۰	گچ	۵۰	۱.۵۰
گچ	۷۰	۰.۵	گچ	۷۰	۰.۵
گچ	۷۰	۱	گچ	۷۰	۱
گچ	۷۰	۱.۵۰	گچ	۷۰	۱.۵۰

۳-۲- نحوه ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها با سیمان پرتلند

مراحل اولیه ساخت نمونه با سیمان پرتلند، همانند روش ساخت نمونه گچی است. اما در انتهای ساخت، نمونه‌ها برای عمل‌آوری مدت یک هفته در اتاق بخار قرار می‌گیرند. نمونه‌های آزمایش اودومتري بدون خارج کردن از قالب در اتاق بخار قرار داده می‌شوند؛ در حالی که نمونه‌های آزمایش سه‌محوری بعد از خروج از قالب در

1- Casagrande oedometer apparatus

2- Triaxial test system



گرفته تا کاملاً اشباع شود. بر اساس نتایج تحقیقات روتا و همکاران [۱۱] درباره‌ی ویژگی‌های تراکم پذیری خاک‌های سیمانته، نمونه ماسه‌ای سیمانی شده با سیمان پرتلند بعد از حدود یک ساعت غرقاب بودن به درجه‌ای از اشباع می‌رسد که می‌توان از آثار مکش حین آزمایش بر آن چشم‌پوشی کرد. سایر مراحل آزمایش نیز همانند آزمایش روی نمونه‌های گچی است.

۴-۲- نحوه انجام آزمایش‌های فشار ایزوتروپ با

سلول دستگاه سه‌محوری

آزمایش‌های فشار ایزوتروپ، بعد از خروج نمونه از اتاق بخار و قرار دادن آن بر پدستال دستگاه، غشای لاستیکی^۱ و اورینگ‌های^۲ بالا و پایین قرار داده می‌شوند. سپس سلول سه‌محوری قرار گرفته و برای نمونه‌های سیمانی شده با سیمان پرتلند، جریان آب با پس فشار^۳ ۱۵ کیلوپاسکال مدت یک ساعت از آن عبور داده می‌شود تا کاملاً اشباع شود؛ اما در نمونه‌های با سیمان گچی، آزمایش در شرایط کاملاً خشک انجام می‌شود. کنترل اشباع کامل نمونه با اندازه‌گیری ضریب فشار حفره‌ای اسکمپتون^۴ (B) انجام می‌شود و با به دست آمدن مقدار بالای ۰/۹ برای این ضریب، عملیات اشباع نمونه متوقف شده است. پس از اشباع، بارگذاری نمونه با افزایش فشار همه‌جانبه در نرخ‌های یکسان ۵۰ کیلوپاسکال آغاز خواهد شد. شرط لازم برای افزایش فشار همه‌جانبه برای مرحله بعد، ثابت شدن مقدار تغییر حجم نمونه تحت بارگذاری فعلی است. همه‌ی اندازه‌گیری‌ها با استفاده از سنسورهای الکترونیکی متصل به سلول سه‌محوری خوانده و ثبت می‌شود [۱۳].



شکل (۲) نمایی از مصالح، دستگاه ادومتر و سلول سه‌محوری مسلح استفاده‌شده در انجام آزمایش‌ها

- 1- Membrane
- 2- O-Ring
- 3- Back pressure
- 4- Skempton's B coefficient

۵- نتایج آزمایش‌ها

نتایج آزمایش‌های ادمتری و فشار ایزوتروپ در شکل‌های (۳) تا (۵) به صورت نمودارهای نسبت تخلخل (e) در برابر فشار سربار قائم^۱ در [آزمایش‌های ادمتری] یا تنش همه‌جانبه^۲ در [آزمایش‌های فشار ایزوتروپ] در مقیاس نیمه‌لگاریتمی ارائه شده است. بر اساس شکل (۳)، در درصد سیمان^۳ (CC) و تراکم نسبی^۴ (D_r) ثابت، تراکم‌پذیری نمونه‌های ساخته‌شده با سیمان پرتلند بیشتر از نمونه‌های حاوی سیمان گچی است. به همین ترتیب شکل (۴) نشان می‌دهد برای یک نوع سیمان خاص، در صورت ثابت بودن تراکم نسبی نمونه‌ها، افزایش درصد سیمان سبب افزایش سختی و کاهش تراکم‌پذیری خاک خواهد شد. در نهایت بر اساس شکل (۵) در صورت یکسان بودن نوع سیمان، افزایش تراکم نسبی در یک درصد ثابت سیمان سبب کاهش تراکم‌پذیری نمونه و افزایش سختی اولیه خاک می‌شود. بدین ترتیب اثرگذاری سه عامل نوع سیمان، درصد سیمان‌تاسیون و تراکم نسبی نمونه‌ها بر رفتار تراکم‌پذیری آن‌ها قابل تشخیص است.

فشار وارد شده بر خاک سیمانی‌شده به‌وسیله‌ی دو بخش ماتریس خاک پایه و باندهای سیمانی بین دانه‌ها تحمل می‌شود. با توجه به مقاومت بسیار بیشتر سنگ‌دانه‌ها در مقایسه با باندهای سیمانته، با افزایش فشار بر خاک، باندهای مذکور به مقاومت نهایی خود رسیده و به تدریج گسیخته می‌شوند. این مقدار تنش تسلیم باندهای سیمانی^۵ (p'_y) نام دارد و از نمودارهای بارگذاری فشار-تغییر شکل، قابل تعیین است. در واقع

این مقدار مترادف با تنش نظیر تغییر سریع شیب در نمودار مذکور است. با توجه به شباهت زیاد رفتار تراکم‌پذیری خاک‌های ماسه‌ای و رفتار تحکیمی خاک‌های رسی پیش‌تحکیم‌یافته^۶، برای تعیین مقاومت باندهای سیمانی از روشی مشابه روش پیشنهادی کاساگرانده در تعیین تنش پیش‌تحکیمی خاک‌های رسی استفاده می‌شود. شکل (۶) تغییرات تنش تسلیم باندهای سیمانی را در آزمایش ادمتری و فشار ایزوتروپ در درصد‌های مختلف سیمان پرتلند و گچ با تراکم‌های نسبی متفاوت نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش درصد سیمان و تراکم نسبی سبب افزایش تنش تسلیم باندهای سیمانی می‌شود. همچنین در مقادیر سیمان بالاتر از ۰/۵ درصد، تنش تسلیم باندهای گچی از باندهای حاصل از سیمان پرتلند بیشتر است. در درصد سیمان ۰/۵، تنش تسلیم باندهای ناشی از سیمان‌تاسیون گچی و سیمان پرتلند تقریباً با یک‌دیگر مساوی است.

با به‌کارگیری رگرسیون خطی روی نتایج ارائه‌شده در شکل (۶)، روابط (۱) و (۲) برای تعیین تنش تسلیم باندهای سیمانی بر حسب کیلوپاسکال (p'_y) با توجه به درصد سیمان (CC) و درصد تراکم نسبی (D_r) برای آزمایش‌های ادمتری و فشار ایزوتروپ به دست آمده است.

$$(1) \text{ آزمایش‌های ادمتری: } R^2=0.90 \\ p'_y = (1.9CC + 1.4)D_r + 90CC - 75$$

$$(2) \text{ آزمایش‌های فشار ایزوتروپ: } R^2=0.91 \\ p'_y = (3.0CC + 0.5)D_r + 1.0CC + 52$$

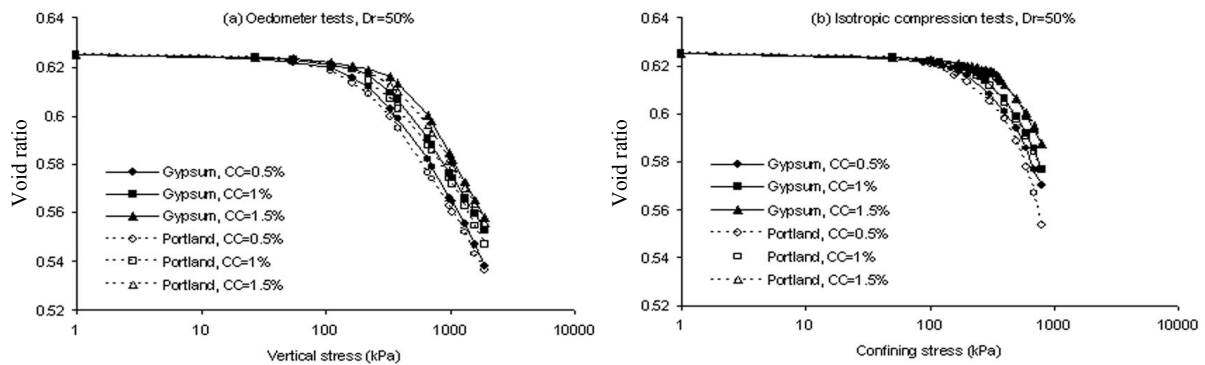
مدول بالک^۷ یا مدول تغییر حجم نیز به عنوان نسبت

- 1- Vertical stress
- 2- Confining stress
- 3- Cement content
- 4- Relative density
- 5- Cemented bond's yield stress

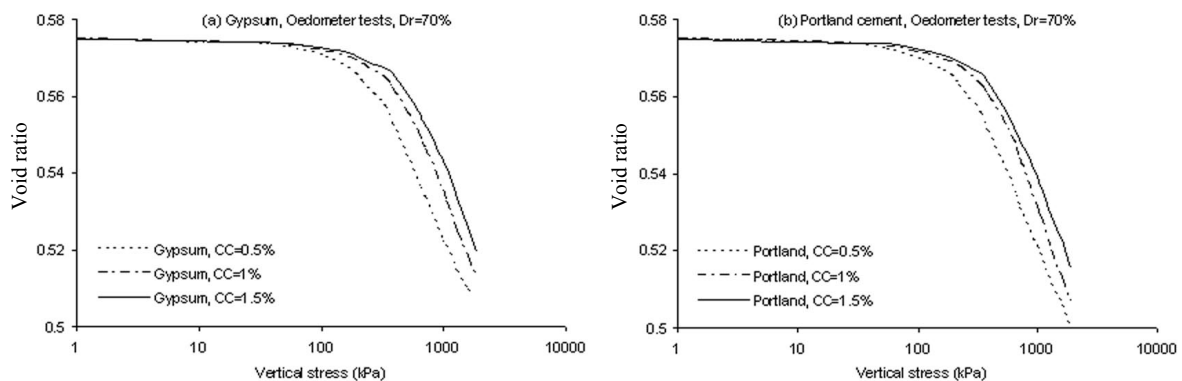
6- Over consolidated clays
7- Bulk modulus

این شکل، مدول بالک با افزایش درصد سیمان، افزایش می‌یابد؛ به علاوه مقدار آن در نمونه‌های ساخته‌شده با سیمان گچی بیش از مقدار نظیر در نمونه‌های ساخته‌شده با سیمان پرتلند است.

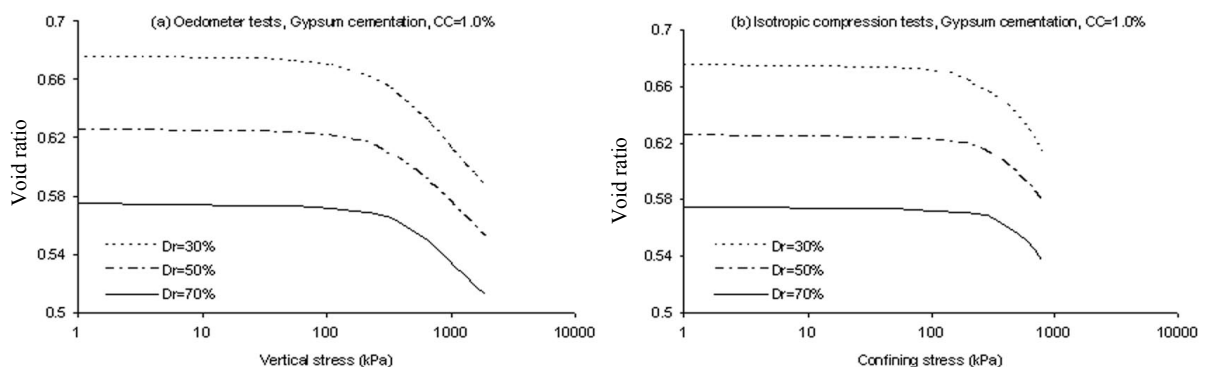
تغییرات تنش فشاری وارد شده، به کرنش حجمی ایجادشده در بخش اول منحنی فشار-تغییر شکل قابل محاسبه می‌شود. شکل (۷) تغییرات مدول بالک خاک سیمانی‌شده با تراکم نسبی نمونه را نشان می‌دهد. بر اساس



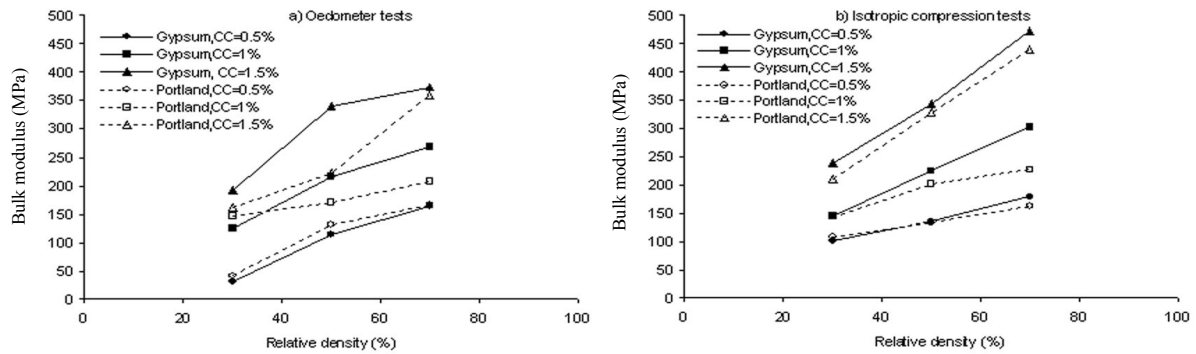
شکل (۳) تأثیر جنس سیمان بر منحنی نسبت تخلخل-فشار در آزمایش‌های ادمتری و فشار ایزوتروپ



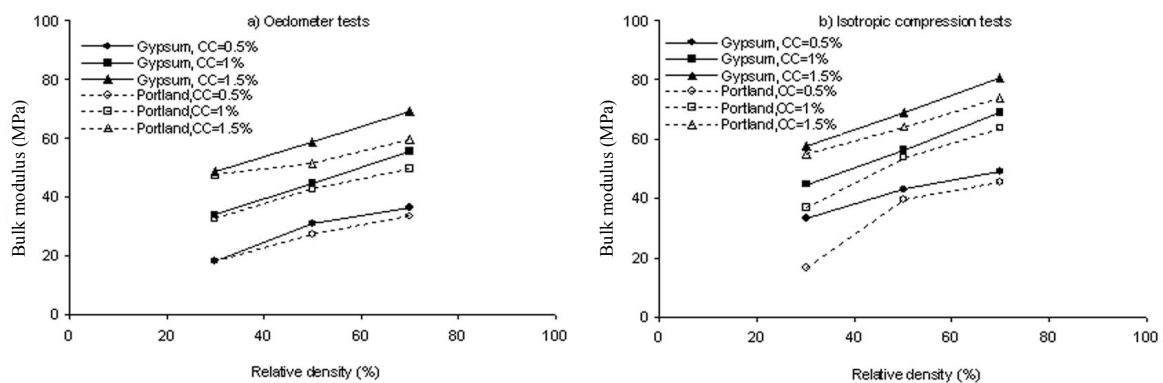
شکل (۴) تأثیر درصد سیمان‌تاسیون بر منحنی نسبت تخلخل-فشار در آزمایش‌های ادمتری



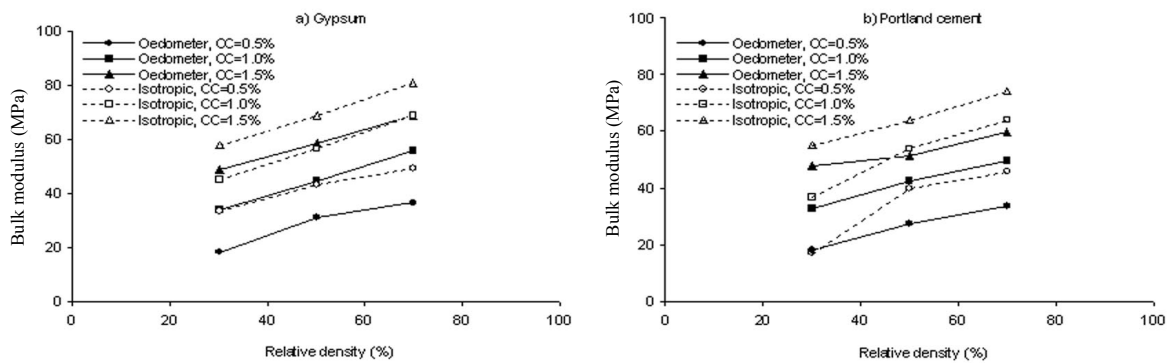
شکل (۵) تأثیر تراکم نسبی بر منحنی نسبت تخلخل-فشار در آزمایش‌های ادمتری و فشار ایزوتروپ



شکل (۶) نحوه تغییرات تنش تسلیم باندهای سیمانی با تراکم نسبی در آزمایش‌های ادومتری و فشار ایزوتروپ



شکل (۷) نمودار تغییرات مدول بالک با تراکم نسبی در آزمایش‌های ادومتری و فشار ایزوتروپ

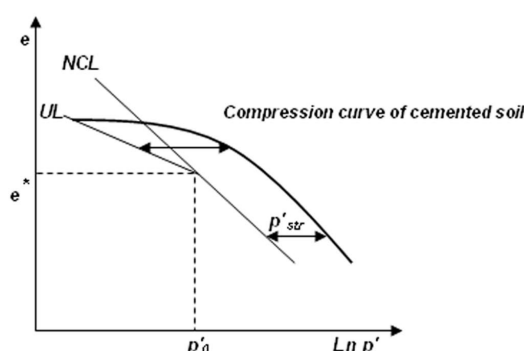


شکل (۸) تغییرات مدول بالک با تراکم نسبی در نمونه‌های ساخته‌شده با سیمان‌تاسیون متفاوت

با محاسبه‌ی مدول بالک در همه‌ی آزمایش‌ها و اعمال رگرسیون خطی، روابط (۳) و (۴) بین مدول بالک بر حسب مگاپاسکال (K)، درصد سیمان (CC) و درصد تراکم نسبی (D_r) برای آزمایش‌های ادومتری و فشار ایزوتروپ محاسبه می‌شود.

شکل (۸) تغییرات مدول بالک در مقابل تراکم نسبی را برای نمونه‌های ساخته‌شده با گچ و سیمان پرتلند نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مقدار حاصل برای مدول بالک در آزمایش‌های فشار ایزوتروپ، بیشتر از مقدار نظیر در آزمایش‌های ادومتری است.

بین محور عمودی و خط UL در نسبت تخلخل‌های کوچک‌تر از نسبت تخلخل نظیر محل برخورد خطوط UL و NCL (e^*) یا فاصله افقی بین محور عمودی و خط NCL در نسبت تخلخل‌های بزرگتر از نسبت تخلخل نظیر محل برخورد خطوط UL و NCL (e^*) است. p'_{str} ، فاصله افقی بین منحنی تراکم خاک سیمانه و خطوط UL و NCL در بازه‌های گفته شده است.



شکل (۹) تعریف مؤلفه اصطکاکی تنش و تنش تحمل شده به وسیله‌ی باندهای سیمانی

۶-۱- تعیین مؤلفه اصطکاکی تنش در خاک

حین تراکم به دلیل تغییر کرنش حجمی، نسبت تخلخل خاک نیز تغییر خواهد کرد. مقدار این تغییرات با روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$e = e_i - \Delta e \quad (6)$$

$$\Delta e = \varepsilon_v (1 + e_i) \quad (7)$$

$$e = e_i - \varepsilon_v (1 + e_i) \quad (8)$$

که در آن e_i ، نسبت تخلخل اولیه، e ، نسبت تخلخل کنونی، Δe ، تغییرات نسبت تخلخل و ε_v کرنش حجمی است. همچنین خط NCL تابع رابطه‌ی زیر است:

$$v = 1 + e = N - \lambda \ln p'_0 \quad (9)$$

$$R^2=0.91 \quad (3) \text{ آزمایش‌های ادمتری:}$$

$$K = (0.2CC + 0.3)D_r + 17CC + 11.5$$

$$R^2=0.93 \quad (4) \text{ آزمایش‌های فشار ایزوتروپ:}$$

$$K = (-0.1CC + 0.5)D_r + 31CC - 10$$

۶- بررسی اجزای تشکیل دهنده تنش در خاک سیمانی شده

تنش اعمال شده بر خاک سیمانه دو بخش دارد. قسمت اول، تنش تحمل شده ناشی از عملکرد اصطکاکی دانه‌هاست که به اختصار، مؤلفه اصطکاکی نامیده می‌شود. قسمت دوم نیز تنش تحمل شده به وسیله‌ی باندهای سیمانی بین دانه‌های خاک است. این موضوع با رابطه زیر تبیین می‌شود [۱۴]:

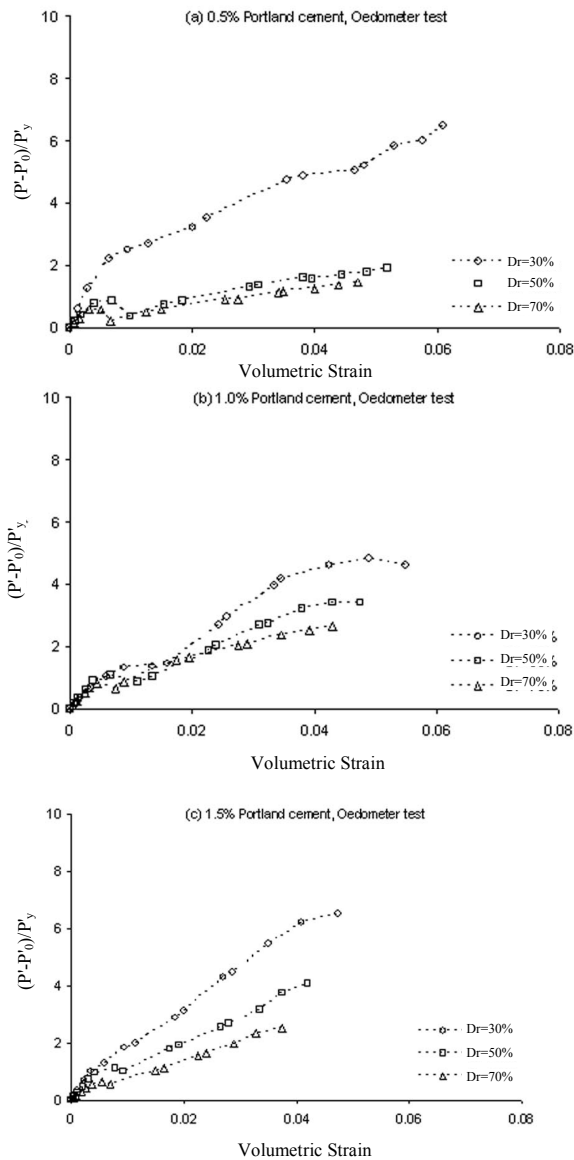
$$p' = p'_0 + p'_{str} \quad (5)$$

در رابطه‌ی p' فشار سربار قائم^۱ در آزمایش‌های ادمتری، یا تنش همه‌جانبه^۲ در آزمایش‌های فشار ایزوتروپ، تحمل شده به وسیله‌ی مجموعه خاک سیمانی است؛ p'_0 مؤلفه اصطکاکی تنش تحمل شده به وسیله‌ی دانه‌های خاک و p'_{str} تنش مؤثر تحمل شده به وسیله‌ی باندهای سیمانی بین دانه‌ها است. شکل (۹) وضعیت تنش‌های ذکر شده را به طور شماتیک نشان می‌دهد.

برای خاک غیرسیمانی، خط باربرداری^۳ (UL) و خط تراکم عادی^۴ (NCL)، مسیر تنش را در دستگاه مختصات $e - \ln p'$ نشان می‌دهد. در حقیقت این خطوط نشان دهنده‌ی نیروی تحمل شده به وسیله‌ی خاک فاقد سیماناسیون است. اما خاک سیمانه رفتار سخت‌تری نسبت به خاک غیرسیمانه از خود نشان خواهد داد و منحنی تراکم عادی متفاوت خواهد بود. p'_0 ، فاصله افقی

1- Vertical stress
2- Confining stress
3- Unloading line
4- Normal compression line

نشان‌دهنده‌ی سهم کمتر باندهای سیمانی در تحمل نیروی وارد شده است. مشابه همین وضعیت در آزمایش‌های تراکم ایزوتروپ و سیمان گچی نیز مشاهده می‌شود.



شکل (۱۰) تغییرات تنش نرمال‌شده ماتریس سیمانته برای نمونه‌های ساخته‌شده با تراکم‌های نسبی متفاوت در آزمایش ادمتری

بدین ترتیب برای ایجاد یک رابطه برای تبیین رفتار باندهای سیمانته، فضای تنش نرمال‌شده ماتریس سیمانته در

در اینجا v ، حجم ویژه، N ، حجم ویژه در فشار ۱ kPa و λ ، شیب خط NCL است. از رابطه‌ی بالا نتیجه می‌شود:

$$p'_0 = \exp \left\{ \frac{N - (1 + e)}{\lambda} \right\} \quad (10)$$

حال با جایگذاری از رابطه (۸) در رابطه (۱۰) می‌توان نوشت:

$$p'_0 = \exp \left[\frac{N - (1 - \varepsilon_v)(1 + e_i)}{\lambda} \right] \quad e < e^* \quad (11)$$

اما برای شرایطی که خط UL تعیین‌کننده رفتار تراکم‌پذیری خاک غیرسیمانی باشد ($e > e^*$)، برای تعیین p'_0 از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$e = e_i - \kappa [\ln(p'_0) - \ln(p'_i)] \quad (12)$$

$$p'_0 = \exp \left[\frac{\varepsilon_v(1 + e_i)}{\kappa} + \ln(p'_i) \right] \quad e > e^* \quad (13)$$

که در آن κ ، شیب خط UL و p'_i ، تنش مؤثر میانگین در ابتدای آزمایش است.

۶-۲- تعیین مؤلفه تنش باندهای سیمانی

مقدار $\frac{p' - p'_0}{p'_y}$ ، تنش نرمال‌شده ماتریس سیمانته^۱ نامیده می‌شود. شکل (۱۰) تغییرات این پارامتر را با کرنش حجمی برای نمونه‌های سیمانی شده با سیمان پرتلند در تراکم‌های نسبی مختلف تحت آزمایش ادمتری نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشهود است، مقدار تنش نرمال‌شده ماتریس سیمانته برای همه‌ی درصد‌های سیمان، با افزایش تراکم نسبی خاک کاهش می‌یابد. در واقع ازدیاد تراکم نسبی سبب افزایش قفل و بست بین‌دانه‌ای و در نتیجه ازدیاد مؤلفه اصطکاکی خواهد شد. این موضوع

1- Normalized stress of cemented matrix

مقابل کرنش حجمی انتخاب شد. شکل (۱۱) وضعیت منحنی‌های حاصل در این فضا را برای ۱۸ آزمایش ادمتری و شکل (۱۲) منحنی‌های مزبور را برای ۱۸ آزمایش تراکم ایزوتروپ نشان می‌دهد. با انجام رگرسیون، دو رابطه‌ی زیر برای تعیین مقدار تنش در ماتریس سیمانی شده بر حسب کرنش حجمی برای شرایط آزمایش-های ادمتری و تراکم ایزوتروپ ارائه می‌شود. این روابط برای تعیین سهم تنش تحمل‌شده به‌وسیله‌ی باندهای

سیمانی کاربرد دارد.

(۱۴) شرایط آزمایش ادمتری:

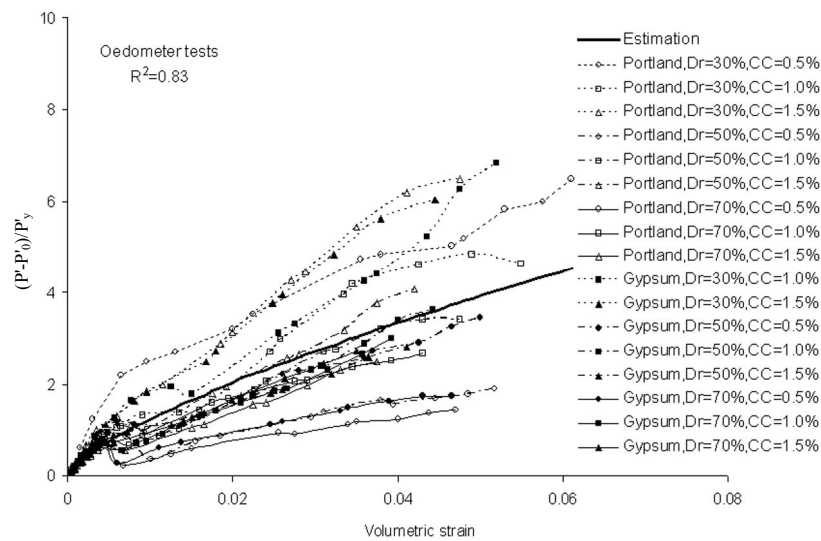
$$R^2=0.83$$

$$\frac{p' - p'_0}{p'_y} = 28.0 \varepsilon_v^{0.70}$$

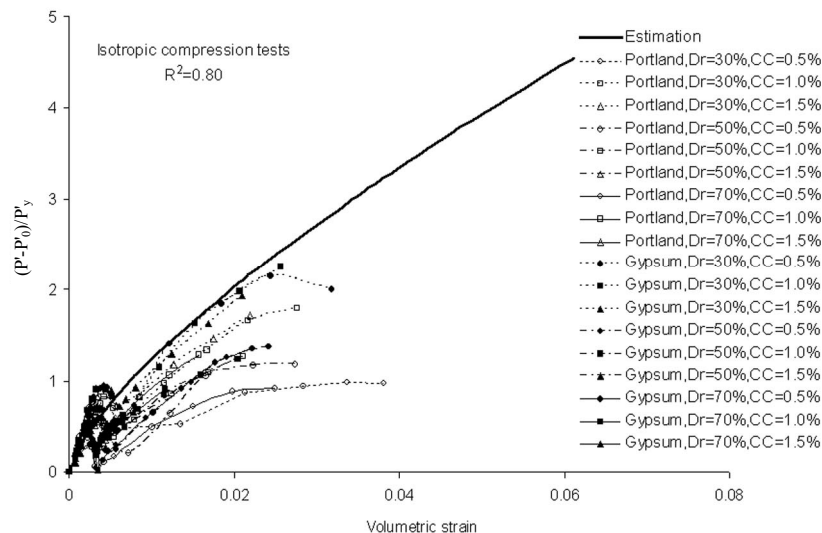
(۱۵) شرایط آزمایش فشار ایزوتروپ:

$$R^2=0.80$$

$$\frac{p' - p'_0}{p'_y} = 9.3 \varepsilon_v^{0.53}$$



شکل (۱۱) تنش نرمال‌شده ماتریس سیمانته در برابر کرنش حجمی در آزمایش‌های ادمتری



شکل (۱۲) تنش نرمال‌شده ماتریس سیمانته در برابر کرنش حجمی در آزمایش‌های فشار ایزوتروپ

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش برای بررسی تأثیرات نحوه بارگذاری، تراکم نسبی، درصد و نوع سیمان بر خصوصیات تراکم پذیری خاک ماسه سیمانته، ۳۶ آزمایش ادمتری و فشار ایزوتروپ روی نمونه های خاک سیمانته ساخته شده در تراکم های نسبی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد با درصد وزنی سیمان ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵، با دو نوع سیمان گچی و سیمان پرتلند انجام شده است. بر این اساس، نتایج زیر به دست آمده است:

۱- افزایش درصد تراکم و درصد سیمان سبب کاهش تراکم پذیری خاک می شود.

۲- جنس سیماناسیون بر خصوصیات تراکم پذیری خاک سیمانی مؤثر است. نمونه های سیمانی شده با سیمان پرتلند، تراکم پذیری بیشتری نسبت به نمونه های سیمانی شده با گچ دارند.

۳- تنش تسلیم باندهای سیمانی با افزایش درصد سیمان و درصد تراکم افزایش می یابد.

۴- تنش تسلیم باندهای سیمانی در آزمایش های تراکم ایزوتروپ تا حدی بیشتر از مقدار نظیر در آزمایش های تراکم یک بعدی است.

۵- تنش تسلیم باندها در نمونه های سیمانی شده با گچ، بیش از نمونه های سیمانی شده با سیمان پرتلند است.

۶- مدول بالک به دست آمده از آزمایش های فشار ایزوتروپ بیش از مقدار محاسبه شده از آزمایش های ادمتری است و همچنین این مقدار در نمونه های سیمانی شده با گچ بیشتر از مقدار نظیر در نمونه های سیمانی شده با سیمان پرتلند است.

۷- افزایش تراکم نسبی سبب کاهش تنش نرمال شده ماتریس سیمانته می شود.

۸- بر اساس نتایج آزمایش ها، امکان ارائه فرمولاسیونی برای تعیین و محاسبه سهم هر یک از مؤلفه های اصطکاکی تنش در خاک و باندهای سیمانی از تنش کل، در فرایند

تراکم پذیری خاک سیمانته وجود دارد. این روابط در این پژوهش تعیین و ارائه شدند.

۸- تشکر و قدردانی

این مطالعه با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت معلم تهران انجام شده است که بدین وسیله از آن قدردانی می شود. همه ی آزمایش ها در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت معلم تهران انجام شده است. نویسندگان مقاله از همکاری تکنسین ها در انجام آزمایش ها قدردانی می کنند.

۹- مراجع

- [1] Coop, M.R. and Atkinson, J.H., (1993) "The mechanics of cemented carbonate sands," *Geotechnique*, 43(1), pp 53-67.
- [2] Haeri, S.M., Hamidi, A. and Tabatabaee, N., (2005) "The effect of gypsum cementation on the mechanical behaviour of gravelly sand," *Geotechnical Testing Journal*, 28(4), pp 1-11.
- [3] Consoli, N.C., Rotta, G.V. and Prietto, P.D.M., (2006) "Yielding - compressibility - strength relationship for an artificially cemented soil cured under stress," *Geotechnique*, 56(1), pp 69-72.
- [4] Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C. and Rad, N. S. (1981) Cemented Sands Under Static Loading, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 107(6), 799-817.
- [5] Leroueil, S. and Vaughan, P.R., (1990) "The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks," *Geotechnique*, 40(3), pp 467-488.
- [6] Huang, J.T. and Airey, D.W., (1998) "Properties of artificially cemented carbonate sand," *Journal of geotechnical and geoenviromental engineering, ASCE*, 124(6), pp 492-499.
- [7] Schnaid, F., Prietto, P.D.M. and Consoil, M. H. T. (2001) Characterization of Cemented Sand in Triaxial Compression, *ASCE Journal of*

- [12] Chiu, C.F., Zhu, W. and Zhang, C.L., (2008) "Yielding and shear behaviour of cement-treated dredged materials," *Engineering Geology*, 103(1), pp 1-12.
- [13] Hasanzadeh, A. (2010), "Evaluation of compressibility behaviour of cemented sands," M.Sc. Thesis, Tarbiat Moallem University of Tehran, Iran.
- [14] Consoli, N. C., Rotta, G. V., Foppa, D. and Fahey, M. (2007). "Mathematical model for isotropic compression behaviour of cemented soil cured under stress." *Geomechanics and Geoengineering: an International Journal*, 2(4), pp. 269-280.
- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(10), 857-867.
- [8] Malandraki, V., and Toll, D. G. (2001) Triaxial Tests on a Weakly Bonded Soil with Changes in Stress Path, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(3), 282-291.
- [9] Hamidi, A. and Haeri, S.M., (2005), "Critical state concepts for a cemented gravely sand," *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 10(E), pp. 1-12.
- [10] Hamidi, A., Haeri, S.M., (2008) "Stiffness and deformation characteristics of cemented gravely sands," *International Journal of Civil Engineering*, 6(3), pp 159-173.
- [11] Rotta, G.V., Consoli, N.C., Prietto, P.D.M, Coop, M.R. and Graham, J., (2003) "Isotropic yielding in artificially cemented soil cured under stress," *Geotechnique*, 53(5), pp 493-501.

Investigating the Compressibility and Volume Change Behaviour of Cemented Sands

A. Hamidi^{1*}, A. Hasanzadeh²

1-Civil Engineering Group, School of Engineering, Tarbiat Moallem University of Tehran

2-Civil Engineering Group, School of Engineering, Tarbiat Moallem University of Tehran

hamidi@tmu.ac.ir

Abstract:

Most of previous researches on cemented soils, concern about their shear strength. However, in present study the main issue is investigating compressibility of cemented sandy soils during one dimensional and isotropic compression loading conditions. The soil used in present study is fine and poorly graded sand from the shores of Caspian Sea (in the city of Babolsar located in North Iran). Gypsum and Portland cement are used as the cementing agents. Gypsum cemented samples were tested under completely dry condition; however, samples cemented with Portland cement were tested in saturated state. Indeed, a back pressure of 15 kPa was applied for about one hour to receive a Skempton B value of 0.9 more for the samples. The specimens were made in three relative densities of 30, 50 and 70 and cement contents of 0.5, 1 and 1.5 percent. All the samples were cured for seven days in a humid room under a constant temperature to gain their strength before the tests. Oedometer tests were used for one dimensional compression (K_0 condition) and triaxial apparatus cell with a diameter of 100 mm was used for the isotropic compression tests. The pressure was applied in increments of 50 kPa during the tests. Compressibility and volume change of cemented samples was investigated during the tests by considering $e-Ln(p')$ curves for all samples. Yield stress, bulk modulus and normalized stress of cemented matrix have been analyzed and effect of cement type, cement content and relative density on these properties have been investigated. Results showed that the mentioned parameters affect compressibility behaviour of cemented sand, for example bulk modulus and yield stress, increase with relative density and cement content. Cement type was another important factor in compressibility of cemented sand. For specimens with gypsum cementation, yield stress, bulk modulus and stress of cemented matrix were more than those with Portland cement. Also stress of cemented matrix increased with cement content and decreases with relative density. According to the results of experiments, a mathematical formulation suggested for calculation of yield stress in cemented soil and also bulk modulus. Moreover, new equations are presented to determine stresses in both cemented bonds and uncemented matrix of cemented soil. These equations are based on the critical state theory for uncemented matrix and a normalized framework for calculation of the stress in cemented bonds. Based on this framework, stress of cemented bonds can be predicted based on the yield stress and volumetric strain in cemented soil. As a result, stress-strain relation of soil can be determined during isotropic compression loading conditions.

Keywords: Cemented sand, Compressibility behaviour, Yield stress, Bulk modulus, Cement content, Cement type, Matrix stress.