بررسی ناهمسانگردی مقاومت برشی خاکهای چسبنده‌اصطکاکی

محمدعلی روشن‌ضمیر* و عزیزا... جعفری**
دانشکده مهندسی عمران – دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۳/۸/۲۰ – دریافت نسخه نهایی: ۸۴/۴/۱۵)

چکیده – خاکهای چسبنده‌اصطکاکی به وفور در اجرای سازه‌های خاکریز استفاده می‌شوند. با توجه به نحوه اجرای این خاکریزها، یعنی اعمال انرژی تراکمی در راستای قائم، وقوع ناهمسانگردی مقاومت و نفوذپذیری در آنها محتمل به نظر می‌رسد. در این پژوهش سعی شده است با اصلاح و استفاده از ابزار برش مستقیم با جعبه بزرگ، امکان ارزیابی ناهمسانگردی در مقاومت برشی خاکهای چسبنده‌اصطکاکی فراهم شود. آن گاه با انجام بیش از ۱۰۸ آزمون برش مستقیم، تأثیر نوع تراکم و میزان رطوبت تراکم بر میزان ناهمسانگردی مقاومت در نمونه‌های متراکم شدهٔ خاک ماسه‌ای رس‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از آزمایشهای انجام شده ملاحظه شد که اولاً در کلیه نمونه‌ها ناهمسانگردی در مقاومت وجود داشته و مقاومت برشی در راستای قائم (راستای تراکم) درحدود ۱۴ تا ۲۱ درصد بیش از مقاومت در صفحهٔ افقی است. ثانیاً با افزایش رطوبت در کلیه تراکمها میزان ناهمسانگردی افزایش می‌یابد. به علاوه معلوم شد که در رطوبتهای بیش از بهینه افزایش میزان ناهمسانگردی در چسبندگی قابل ملاحظه است. بیشترین میزان ناهمسانگردی مشاهده شده در تراکم کوبشی و کمترین میزان ناهمسانگردی مربوط به تراکم ارتعاشی بوده است.

واژگان کلیدی : ناهمسانگردی مقاومت برشی، تراکم، خاکهای چسبنده اصطکاکی

Investigation of Shear Strength Anisotropy of c- ϕ Soils

M.A.Rowshanzamir and A. Jafari
Department of Civil Engineering, Isfahan University of Techcnology

Abstract: ***Cohesive-frictional soils are widely used in the construction of embankment structures and due to the method of construction, i.e. applying compactive efforts in the vertical direction in these cases, the occurrence of anisotropy in the soil strength and permeability seems to be inevitable. In this study, attempts have been made to evaluate the shear strength of c-ϕsoils through modifying a large shear box apparatus. Conducting more than 108 direct shear tests, the effects of compaction method and moisture on the shear strength anisotropy of a selected c-ϕ soil (a clayey sand) have then been***

* – استادیار ** – کارشناسی ارشد

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]

investigated. According to the test results, firstly strength anisotropy was observed in all the soil specimens and the shear strength in the vertical direction was about 14% to 21% higher than that in the horizontal direction. Secondly, it was found that an increase in the compaction moisture led to an increase in the degree of anisotropy. Furthermore, the anisotropy in the cohesive strength was more pronounced in the specimens with a moisture content higher than the optimum one. The highest degree of anisotropy was observed in the specimens compacted by impacting effort and the lowest one belonged to those with the vibratory compaction.

Keywords: *Shear strength anisotropy, Compaction, c-ϕ soils*

۱- مقدمه

ناهمسانگردی[1] در مراجع مهندسی به ساختاری از ماده یا خاصیتی از آن که درجهات مختلف یکسان نیست، اطلاق می‌شود. خصوصیت ناهمسانگردی در خاک، دیر زمانی است که شناخته شده است؛ اما تنها تلاشهای اندکی در این اواخر برای منظور کردن آن در طراحیهای ژئوتکنیکی به عمل آمده است، زیرا لحاظ کردن ناهمسانگردی مستلزم پیچیدگی و صرف هزینه بیشتر در هر دو مورد تعیین خواص مصالح و طراحی است. اگرچه با رواج رایانه‌های با سرعت بالا و توسعه نرم افزارهای مناسب امکان منظور کردن ناهمسانگردی مقاومتی خاک در طراحی فراهم آمده است، اما تاکنون در زمینه بسط روشهای آزمایشگاهی برای تعیین ناهمسانگردی مصالح خاکی پیشرفت قابل ملاحظه‌ای حاصل نشده است. برای پر کردن فاصله بین تکنیکهای آزمایشگاهی و روشهای عددی پیشرفته، لازم است روشهای آزمایشگاهی قابل قبولی برای تعیین خواص مصالح بسط داده شود. از آنجا که مصالح خاکی عمدتاً رفتاری ناهمسانگرد دارند، لذا اصلاح داده‌های فرض همسانی، به سمت رفتار واقعیتر یعنی رفتار ناهمسانگرد، به طراحیهای دقیقتر و احتمالاً اقتصادیتری منجر خواهد شد.

در این مقاله بعد از مروری بر سوابق مطالعاتی موضوع، تلاشهای انجام شده برای ارزیابی ناهمسانگردی در مقاومت خاک متراکم شده ماسه‌ای رس‌دار از طریق اصلاح دستگاه برش مستقیم جعبه بزرگ گزارش شده است. آن گاه نتایج حاصل از بررسی تأثیر پارامترهای مهم تراکم یعنی نوع و رطوبت تراکم بر میزان ناهمسانگردی مقاومت خاک انتخابی ارائه شده است.

۲- پیشینه موضوع

در مورد ناهمسانگردی در رسوبات رسی و ماسه‌ای تحقیقات متعددی در ادبیات تخصصی یافت می‌شود در این بخش مختصری از مهمترین مطالعات انجام شده در زمینه ناهمسانگردی در رسها و ماسه‌ها ارائه می‌شود.

۲-۱- مطالعات انجام شده در مورد ناهمسانگردی در رس

در سال ۱۹۶۵ لو و همکاران[2] پایداری شیروانیها در خاکهای رسی ناهمسانگرد را بررسی و نتیجه‌گیری کردند که اثر ناهمسانگردی برای شیروانیهای با شیب کم (کمتر از °۵۰) حائز اهمیت است[۱]. کارین‌کراس و همکاران[3] در سال ۱۹۷۷ به مطالعه ناهمسانگردی در رس بیش‌تحکیمی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سختی برشی رس در حالت محرک، ده برابر بیشتر از حالت مقاوم است و ضریب سختی با جهت برش تغییر می‌کند[۲]. لد و همکاران[4] در سال ۱۹۷۷ به بررسی تغییر ضریب کشسانی خاک در اثر ناهمسانگردی ذاتی در رسوبات طبیعی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که وقتی بارگذاری در جهت ته‌نشینی صورت می‌گیرد، خاک بیشترین مقاومت برشی و بیشترین ضریب کشسانی را دارد؛ و وقتی بارگذاری در جهت عمود بر ته‌نشینی انجام می شود، خاک کمترین مقاومت و ضریب کشسانی را دارد[۳].

بودیمان و همکاران[5] در سال ۱۹۹۲ با استفاده از سلول برش ساده (DSC) به بررسی رفتار ناهمسانگرد ایجاد شده

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]

ناشی از اعمال تنشهای ناهمسانگرد در خاک چسبنده پرداخته و رفتار تنش-کرنش خاک مورد آزمایش را تشریح کردند. از نتایج مهم تحقیقات مذکور این بود که با افزایش زاویه جهت تنشهای اصلی، ضریب سختی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش و کرنش حداکثر و کرنش حجمی افزایش می‌یافت. همچنین تاریخچه تنش، اثر قابل ملاحظه‌ای در پاسخ تنش-کرنش داشت[۴].

سیواکوگان و همکاران[۶] در سال ۱۹۹۳ ناهمسانگردی در رس را با ابزار برشی نمونه مکعبی مطالعه کردند. از جمله نتایج حاصله این بود که در تحکیم یک بعدی رسها، زاویه اصطکاک داخلی بستگی به جهت بارگذاری دارد. همچنین معلوم شد وقتی نمونه رس با تحکیم یک بعدی تحت بارگذاری افقی قرار می‌گیرد، چرخش در تنشهای اصلی رخ می‌دهد و به دنبال آن افزایش خیلی زیاد در فشار حفره‌ای و در نتیجه گسیختگی صورت می‌گیرد[۵].

سو و همکاران[۷] در سال ۱۹۹۸ اثر ناهمسانگردی مقاومت، ناهمگنی رس نرم، و عمق دیوار بر تحلیل پایداری گودبرداری عمیق را بررسی کردند. نتایج حاصل از این بررسی در تحلیل نگهداری ترانشه‌های با سیستم دیوار، ترانشه‌های با عرض کم و نسبت $D/B>0.7$ (نسبت عمق به عرض)، محاسبه حداقل عمق پایداری دیوار در ترانشه‌ها، و محاسبه ضریب اطمینان طراحی استفاده شد[۶].

۲-۲- مطالعات انجام شده در مورد ناهمسانگردی در ماسه

به دلیل مشکلات نمونه‌گیری و دست‌خوردگی نمونه‌ها در خاکهای غیرچسبنده (ماسه‌ای)، نوع آزمایشها و روشهای تهیه نمونه‌ها با تحقیقات انجام شده در رس کاملاً متفاوت است. در ادامه، برخی از مهمترین تحقیقات انجام شده در مورد ناهمسانگردی در ماسه ارائه شده است.

آرتور و همکارانش[۸] (۱۹۷۷) به بررسی ناهمسانگردی القایی[۹] (ناهمسانگردی ناشی از اعمال تنشهای ناهمسانگرد) در ماسه پرداختند. در این آزمایشها از دستگاه آزمایش پیشرفته‌ای استفاده شد که توسط آن بر روی هر نمونه ماسه متراکم یک چرخش ناگهانی نسبت به جهت تنشهای اصلی اعمال می‌شد. این پژوهشگران با استفاده از کرنشهای متناظر با حالت خمیری، جهت محورهای ناهمسانگردی را تعیین کردند و نتیجه گرفتند که ناهمسانگردی، تاثیر مهمی بر زاویه مقاومت برشی ندارد ولی اثر قابل توجهی بر افزایش کرنشها دارد و می‌توان نسبت تنش و ضرایب کشسانی سکانتی را در باربرداری بعد از چرخش تنشهای اصلی به دست آورد[۷].

اودا و کیشی‌کاوا[۱۰] (۱۹۷۹) با استفاده از آزمایش کرنش صفحه‌ای به بررسی مقاومت ناهمسانگرد در ماسه پرداختند. از جمله نتایج مطالعات این محققان آن بود که مقاومت برشی ماسه در جهت قائم بیشتر از مقاومت برشی ماسه در جهت افقی است و مقاومت برشی حاصل شده از آزمایش کرنش صفحه‌ای، همیشه ۱۰ تا ۲۰ درصد بیشتر از مقاومت برشی حاصل از آزمایش سه‌محوری است. همچنین آنان تغییرات ضریب واکنش بستر (k_s: شیب منحنی فشار- نشست) و ظرفیت باربری نهایی را در دو حالت قائم و افقی با نسبت تخلخل مقایسه و مشاهده کردند که برای نسبتهای تخلخل کمتر از ۰/۷۲، مقادیر ضریب واکنش بستر و ظرفیت باربری نهایی در حالت قائم از مقادیر مربوط به حالت افقی بیشتر است، در حالی که برای نسبتهای تخلخل بیشتر از ۰/۷۲، مقادیر فوق یکسان‌اند. این محققان در نهایت نتیجه‌گیری کردند که در مسائل پایداری، از جمله مسائل فشار جانبی و مسائل ظرفیت باربری شالوده‌ها با شرایط کرنش صفحه‌ای، اثر مقاومت برشی ناهمسانگرد بسیار قابل ملاحظه است و باید در طراحی لحاظ شود[۸].

سیمز و همکاران[۱۱] در سال ۱۹۸٤ ناهمسانگردی در حالت زهکشی نشده و چرخش تنشهای اصلی در ماسه اشباع را مورد بررسی قرار دادند. برای این تحقیق از نمونه استوانه‌ای توخالی و ماسه با تراکم متوسط تا شل در شرایط بدون زهکشی استفاده شد. در طول آزمایش، تنش برشی ثابت بود و تنشهای اصلی در جهتهای مختلف اعمال و فشار آب حفره‌ای اضافه می‌شد. این افزایش فشار آب حفره‌ای در حین چرخش متناوب جهات تنشهای اصلی، منجر به گسیختگی خاک می‌شد. از نتایج مهم

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]

این تحقیق آن بودکه ناهمسانگردی اولیه خاک به طور عمده، با اعمال تنشها تغییر پیدا می‌کند[۹].

ونگ و همکاران[۱۲] در سال ۱۹۸۵ ناهمسانگردی ذاتی و القایی (ایجاد شده تحت شرایط تنش ناهمسانگرد) در ماسه را مورد بررسی قرار دادند. این محققان برای مطالعه اندرکنش ناهمسانگردی ذاتی و القایی، با استفاده از سلول برش، آزمایشهای متعددی بر روی ماسه متراکم در شرایط زهکشی شده انجام دادند و رابطه‌ای بین کرنشهای قدیم و ناهمسانگردی القایی پیدا کردند. در این آزمایشها تغییرات سختی کشسانی و فشار آب حفره‌ای نیز موردبررسی قرارگرفت. از جمله نتایج این بود که ناهمسانگردی ذاتی مقاومت برشی زهکشی شده، علی‌رغم گسترش قابل ملاحظه کرنشهای برشی ناشی از تغییر جهت محور تنشهای اصلی ثابت می‌ماند و عموماً کرنش برشی در نمونه‌های دانه‌ای به علت تنشهای القایی است[۱۰].

روشن‌ضمیر در سال ۱۹۹۵ با به کارگیری آزمایشهای سه‌محوری واقعی با قابلیت اعمال بارهای تکراری سه‌بعدی بر روی یک نوع سنگ شکسته بازالتی، مدلهای جدیدی را بسط داده و ضرایب برجهندگی مربوط به رفتار ناهمسانگرد مقطعی را به تنشهای تکراری سه‌بعدی مرتبط کرده است. نتایج حاصل از این تحقیقات نشان داد که نسبت تنش اصلی میانی، عامل بسیار موثری بر ضرایب برجهندگی و به خصوص بر درجهٔ ناهمسانگردی است. این نتیجه به عنوان نشانه‌ای از این واقعیت تلقی شد که ناهمسانگردی مشاهده شده در این آزمایشها عمدتاً از نوع ناهمسانگردی القایی است. با توجه به این نتیجه استدلال شد در شرایط تنش ناهمسانگرد که عمدتاً در خاکریزها روی می‌دهد، حتی اگر هیچ گونه ناهمسانگردی ذاتی وجود نداشته باشد، مدل ناهمسانگرد مقطعی می‌تواند مشخصه‌های رفتاری (تغییرشکل) این مصالح را بهتر از مدلهای همسانگرد تعیین کند[۱۱].

هیمدال و همکاران[۱۳] در سال ۱۹۹۹ در مورد ناهمسانگردی کشسانی ناشی از وجود تراشه‌های تایرهای فرسوده در خاک تحقیق کردند. از جمله نتایج حاصل این بود که ضریب کشسانی یانگ در راستای افقی، سه برابر بیشتر از ضریب کشسانی یانگ در راستای قائم و میزان نشست در سیستمهای چند لایه‌ای شامل این مواد، بسیار کمتر از میزان نشست در سیستمهای با لایه‌های کمتر بود[۱۲].

به طور خلاصه با توجه به مجموع مطالب فوق‌الذکر بر مبنای منابع در دسترس، هیچ گونه مطالعه و تحقیق منتشر شده‌ای در رابطه با ناهمسانگردی در خاکهای چسبنده‌اصطکاکی در ادبیات تخصصی مشاهده نشد. از طرفی این نوع خاکها کاربرد فراوانی در اجرای خاکریزها و سازه‌های خاکریز داشته و با توجه به نحوه اجرای این خاکریزها یعنی اعمال انرژی تراکمی در راستای قائم، وقوع ناهمسانگردی در آنها محتمل به نظر می‌رسد. لذا تحقیق در مورد ناهمسانگردی در چنین مصالحی مفید بوده و بررسی ناهمسانگردی مقاومت در این گونه خاکها می‌تواند به انجام تحلیلهای دقیقتر در مسائل پایداری کمک کند.

۳- دستگاه آزمایش و نحوه انجام آزمایشها

دستگاه مورد استفاده در این پژوهش برش مستقیم با جعبه بزرگ است که اصلاحات لازم برای ارزیابی میزانی ناهمسانگردی در مقاومت نمونه‌ها بر روی آن انجام شده است. آزمایش برش مستقیم با جعبه بزرگ اساساً برای تعیین مقاومت برشی خاکهای درشت‌دانه‌توسعه یافته است. برای انجام آزمایش، مصالح درشت‌دانه درون جعبه برش ریخته می‌شود ونمونه با وزن واحد مورد نظر در داخل جعبه متراکم می‌شود. بدین صورت که خاک در لایه‌های مختلف ریخته می‌شود و هر لایه بسته به نوع تراکم مورد نظر متراکم می‌شود.

جای دادن نمونه به روال فوق در جعبهٔ برشی دلالت بر آن داردکه با انجام آزمایش می‌توان نمونهٔخاک را فقط در یک راستا برش داد: یعنی همان راستای افقی که در واقع صفحه عمود بر امتداد تراکم است. اما بررسی ناهمسانگردی مقاومت برشی احتیاج به امکان برش نمونه در جهات مختلف دارد (حداقل در دو جهت عمود برهم). برای حل این مشکل تصمیم گرفته شد

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]

که نمونه‌های مکعبی یکسانی با ابعاد مساوی ساخته شود، به قسمی‌که این نمونه‌ها را بتوان در جهات مختلف درون جعبه برش قرار داد. نمونه خاک در قالب مکعبی و در تراکم معین متراکم می‌شود و قالب چنان طراحی شده که خروج نمونه در جهات مختلف از آن میسر بوده و لذا جای دادن نمونه از جهات مختلف درجعبه برش امکانپذیر است. اگر چه حسب ضوابط استاندارد آزمایش برش مستقیم؛ عرض یا قطرنمونه می‌بایستی حداقل دوبرابر ضخامت آن باشد اما با توجه به هدف مورد نظر در این پژوهش که مسئله‌ای مقایسه‌ای بین پارامترهای مقاومت برشی در جهات قائم و افقی است؛ انتخاب نمونه مکعبی مشکلی ایجاد نمی‌کند. در شکل (۱) دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ نشان داده شده است. در ادامه به اصلاحات انجام شده در ابزار این آزمایش اشاره ارائه خواهد شد.

قالب مورد استفاده برای ساخت نمونه دارای ابعاد داخلی ۱۵cm×۱۵cm×۱۵cm بوده و می‌توان سرقالبی با ابعاد داخلی ۱۵cm×۱۵cm نیز بر آن سوار کرد. مهمترین ویژگی قالب انتخابی این است که صفحات تشکیل‌دهنده آن توسط پیچهایی به هم متصل شده‌اند که می‌توان قالب را از هر جهت دلخواه باز کرده و نمونه را از آن جهت خارج کرد، شکل (۲). برای تأمین شرایط مرزی مناسب دو صفحه مشبک شیاردار به ابعاد ۱۵cm×۱۵cm دارای شیارهای به فواصل منظم تهیه شد. لازم به ذکر است که این شیارها برای بسیج تنشهای برشی در نمونه در حین آزمایش ضروری‌اند، شکل (۲).

۳-۱- ابزار تراکم کوبشی

برای ساخت نمونه‌ها در تراکم کوبشی با توجه به استفاده از قالب مکعبی برای آنکه در گوشه‌های قالب نیز عمل تراکم به خوبی صورت گیرد، ساخت چکشی با ابعاد مربعی ضروری بود. ولی از آنجا که تغییر در ساختار چکش، وزن و به تبع آن انرژی کوبشی را تغییر می‌داد، لذا می‌بایست تعداد ضربه‌ها و تعداد لایه‌ها و ارتفاع سقوط و سایر مشخصات چکش را طوری تعیین کرد که همان انرژی کوبشی چکش استوانه‌ای را در تراکم استاندارد تامین کند. چکش انتخابی کوبه‌ای با مقطع مربع۴cm×۴cm به وزن ۲۳۰۰gr بود که با فرض ۵ لایه و ارتفاع سقوط ۳۰cm و انرژی کوبشی تراکم استاندارد یعنی ۵۹۴kJ، تعداد ضربه‌های لازم برای هر لایه با استفاده از معادلهٔ زیر برابر با ٦١ ضربه به دست آمد.

$$CE = \frac{(\text{ارتفاع سقوط})(\text{وزن چکش})(\text{تعداد لایه‌ها})(\text{تعداد ضربات})}{(\text{حجم قالب})}$$

۳-۲- ابزار تراکم ارتعاشی

در تراکم ارتعاشی از یک چکش ارتعاشی الکتریکی[۱۴] با توپی مربعی استفاده شده است. در این نوع تراکم باید زمان لازم برای اعمال ارتعاش توسط چکش برای به دست آوردن میزان تراکم ثابت تعیین شد. برای این منظور با انجام چندین آزمایش و با سعی و خطا میزان زمان لازم برای روشن نگه داشتن چکش الکتریکی و عمل کردن آن بر روی نمونه خاک ۱۲ ثانیه به دست آمده است (برای دستیابی به تراکمی معادل تراکم استاندارد). از آنجا که در شرایط تماس مستقیم توپی با لایه خاک ریخته شده در درون قالب، تراکم مطلوب به دست نمی‌آید؛ لذا از یک صفحه دسته دار به ابعاد ۱۵×۱۵cm استفاده شد که روی لایه مورد نظر قرار گرفته و بعد توپی بر روی آن قرار می‌گیرد. شکل (۳) نمایی از چکش الکتریکی ارتعاشی و چکش مربعی شکل را نشان می‌دهد.

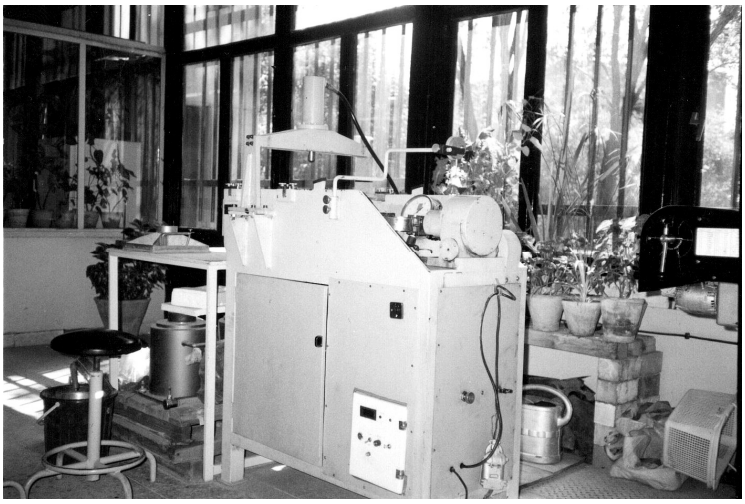
۳-۳- ابزار تراکم استاتیکی

در آزمایشهای با تراکم استاتیکی، کل خاک موردنظر درون قالب و سرپوش ریخته می‌شود و بر روی آن صفحهٔ فولادی قرار می‌گیرد. سپس عمل تراکم توسط دستگاه اعمال فشار استاتیکی (جک هیدرولیکی) صورت می‌گیرد. فشار از طریق رابط به صفحه موجود بر خاک درون قالب منتقل می‌شود. سرعت اعمال فشار بر خاک باید کم باشد تا عمل تراکم به طور یکنواخت صورت گیرد.

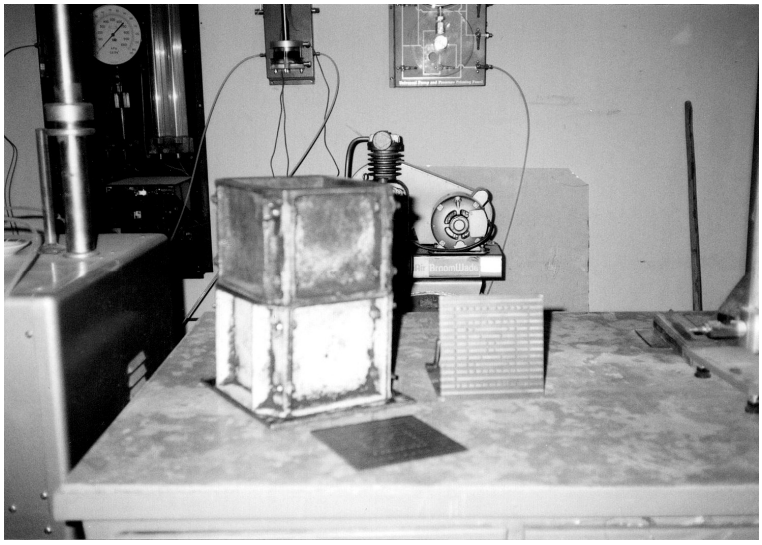
۳-٤- ساخت جعبه برشی مناسب

بعد از ساخت نمونه مکعبی شکل به ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵cm نمونه باید درون جعبه برش قرار گیرد. از آنجایی که ابعاد جعبه

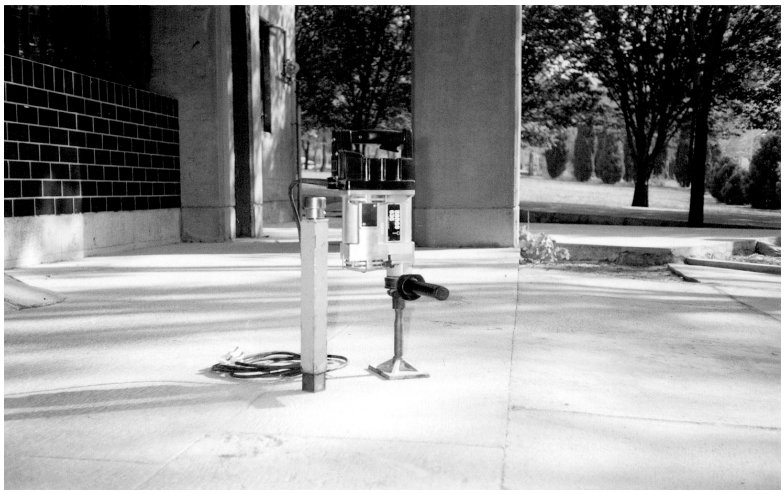
[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]



شکل ۱- دستگاه آزمایش برش مستقیم با جعبه بزرگ



شکل ۲- نمایی از قالب و سر پوش و صفحات شیاردار



شکل ۳- چکش الکتریکی ارتعاشی و چکش کوبه‌ای مربعی‌شکل

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]

برش اصلی در دستگاه برش مستقیم بزرگ ۳۰×۳۰×۱۵cm است، لذا طرح جعبه برشی مناسب به ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵cm ضروری بوده است. بنابراین با استفاده از ورقهای فولادی به ضخامت ۱۰mm دو نیم‌جعبه به ابعاد ۱۵×۱۵×۷/۵cm با سیستم اتصال پیچ و مهره طراحی و ساخته شد. شکل (۴) نیم‌جعبه‌های مورد استفاده برای انجام آزمایشها را نشان می‌دهد.

۳-۵- شیوه تنظیم دستگاه و انجام آزمایش

روال کار بدین صورت است که ابتدا نیم‌جعبه‌های کوچک خوب تمیز و روغنکاری می‌شود. این نیم‌جعبه‌ها درون نیم‌جعبه‌های بزرگ دستگاه جای داده شده و محکم می‌شوند. سپس نمونه ساخته شده با استفاده از روش تراکم مورد نظر درون جعبه برش جای داده می‌شود. نمونه را می‌توان در دو حالت متفاوت در داخل جعبه برش قرار داد. حالت اول آنکه در همان راستای تراکم، نمونه به درون جعبه برش لغزانده می‌شود. در این حالت نمونه در امتدادی عمود بر راستای تراکم برش داده می‌شود. اما در حالت دوم نمونه به اندازه ۹۰ درجه چرخانده شده و سپس درون جعبه برش قرار داده می‌شود. در این حالت نمونه در امتدادی عمود بر راستای تراکم قرار گرفته و لذا برش در راستای تراکم صورت می‌گیرد.

در هنگام آزمایش با اعمال کرنش برشی، دو نیم‌جعبه بر روی یکدیگر حرکت می‌کنند که علاوه بر مقاومت برشی خاک، نیروی مقاومی ناشی از اصطکاک بین سطوح دو نیم‌جعبه نیز ایجاد می‌شود. برای کاهش این اصطکاک بر روی لبه زیرین نیم‌جعبه بالایی، چهار برآمدگی نقطه‌ای یکسان توسط خال جوش ایجاد شد تا تماس دو نیم‌جعبه به صورت نقطه‌ای باشد. به علاوه لبه‌های تماس نیم‌جعبه‌ها به خوبی روغنکاری می‌شوند تا اصطکاک بین آنها به حداقل برسد.

۳-۶- مشخصات خاک مورد آزمایش

خاک انتخابی برای این پژوهش ماسه رس‌دار همراه با شن است و طبق طبقه بندی متحد در رده SC قرار می گیرد. این نوع خاک به طور وسیعی در ساخت خاکریزها و سازه‌های خاکی به کار برده می‌شود. خاک انتخابی بیش از ۱۵ درصد شن دارد و طبق استاندارد اشتو در رده A-2-6(0) قرار می‌گیرد که از خاکهای مناسب برای اجرای سازه‌های خاکریز از جمله لایه‌های روسازی راه است. منحنی دانه‌بندی خاک مذکور در شکل(۵) ارائه شده است. حد روانی بخش ریزدانه خاک LL=35.4 و حد خمیری آن PL=23.6 تعیین شده است و لذا این بخش از نوع رس با خمیری پایین است. G_s خاک انتخابی ۲٫۶۸ تعیین شده است.

برای تعیین درصد رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر از آزمایش تراکم استاندارد استفاده و منحنی مربوطه در شکل(۶) رسم شده است. باتوجه به منحنی تراکم مقدار درصد رطوبت بهینه ۹٪ و مقدار دانسیته حداکثر خشک ۲/۰۱ gr/cm^3 به دست آمده است.

۴- نتایج حاصل از آزمایشها

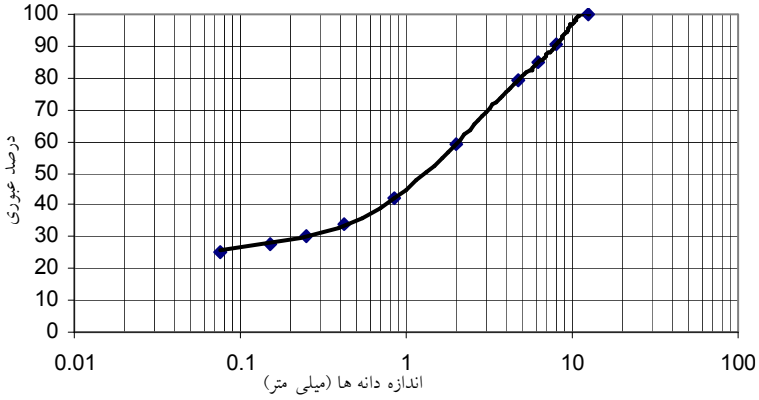
در این بخش نتایج به دست آمده از آزمایشهای انجام شده و نمودارهای مربوطه ارائه شده است. از آنجا که تعداد آزمایشها زیاد است، نتایج آزمایشهای مربوط به هر تراکم خاص، جداگانه ارائه شده و در ادامه تأثیرمتغیرهای رطوبت و نوع تراکم بر روی مشخصه‌های مقاومتی و درجه ناهمسانگردی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- مشخصه‌های مقاومتی خاک در انواع مختلف تراکم

در این پژوهش در مجموع ۱۰۸ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت که شامل سه دسته دوازده‌تایی در سه رطوبت کمتر از بهینه، رطوبت بهینه، و بیش از بهینه یعنی رطوبتهای ۸ درصد، ۹ درصد و ۱۰ درصد برای هر تراکم بود. در هر دسته سه نمونه برای برش در راستای تراکم و سه نمونه برای برش در امتداد عمود بر جهت تراکم مورد استفاده قرار گرفتند. برای رسم پوش گسیختگی موهر- کولمب برای هر خاک متراکم شده در شرایط معین و امتداد برش معلوم از سه آزمایش استفاده و به

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]

شکل ۴- نیم‌جعبه‌های مورد استفاده در آزمایش برش مستقیم



شکل ۵- منحنی دانه بندی خاک مورد آزمایش

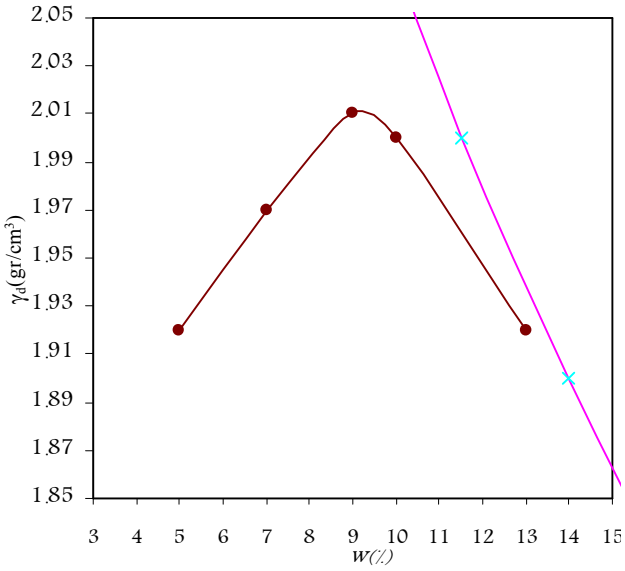
منظور افزایش دقت نتایج هر سری آزمایش دوبار تکرار شده است. با رسم پوش گسیختگی موهر- کولمب (بر مبنای نتایج هر سری آزمایش) مقادیر ϕ و c تعیین شده که در مجموع برای هر نوع تراکم دوازده مقدار برای ϕ و دوازده مقدار برای c به دست آمده است. نتایج حاصل از آزمایشها در جدولهای (۱-۳) خلاصه شده است.

در جداول مذکور w میزان رطوبت تراکم، ϕ_v زاویه اصطکاک داخلی در راستای قائم (حاصل از برش در راستای تراکم یا راستای عمود بر لایه‌بندی)، ϕ_h زاویه اصطکاک داخلی در راستای افقی (حاصل از برش عمود بر راستای تراکم یا راستای به موازات لایه‌بندی)، c_v چسبندگی در راستای قائم، و c_h چسبندگی در راستای افقی‌اند.

۴-۲- بررسی تأثیر میزان رطوبت بر پارامترهای مقاومت برشی

برای بررسی تأثیر رطوبت تراکم و نوع تراکم بر مشخصه‌های مقاومت و میزان ناهمسانگردی در چسبندگی و

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]



شکل ۶- منحنی تراکم استاندارد خاک انتخابی

جدول۱- نتایج مربوط به تراکم کوبشی

تراکم کوبشی	سری اول آزمایش			سری دوم آزمایش		
w (%)	۱۰	۹	۸	۱۰	۹	۸
ϕ_v(deg)	۳۷/۶	۳۸	۳۸/۶	۳۸	۳۸/۱	۳۸/۲
ϕ_h(deg)	۳۱/۵	۳۲/۵	۳۳/۹	۳۰/۸	۳۱/۷	۳۳/۵
c_v(kN/m^2)	۷۵	۹۰	۸۹/۵	۷٤	۸۸	۹۲
C_h(kN/m^2)	٦۲	۸۰	۸۷	٦۳	۸۳	۸٦/۵

جدول۲- نتایج مربوط به تراکم ارتعاشی

تراکم ارتعاشی	سری اول آزمایش			سری دوم آزمایش		
w (%)	۱۰	۹	۸	۱۰	۹	۸
ϕ_v(deg)	۳۷	۳۸/۹	٤۱/۷	۳۸/۱	۳۸/۳	٤۱
ϕ_h(deg)	۳۳	۳٤	۳٦/٤	۳۲/۷	۳۳/۲	۳٦/۷
c_v(kN/m^2)	٦۷/۸	۷۵	۸۳/۵	٦۳/۸	۷۸	۸۱/۵
C_h(kN/m^2)	۵٤/٤	٦۷	۷۱/۵	۵٦/٤	٦۲	٦۹/۵

جدول۳- نتایج مربوط به تراکم استاتیکی

تراکم استاتیکی	سری اول آزمایش			سری دوم آزمایش		
w (%)	۱۰	۹	۸	۱۰	۹	۸
ϕ_v(deg)	۳۵/۹	۳۷	۳۹/۳	۳٦/۵	۳۷/۸	۳۸/۵
ϕ_h(deg)	۳۱/۱	۳۲	۳٤	۳۲/۳	۳۲/٦	۳۳/۲
c_v(kN/m^2)	۷۰/۷	۸٦	۹۲	۷۲/۷	۸٤	۸۸
C_h(kN/m^2)	٦۰/٤	۷۷	۸۳/۵	٦۱/٤	۷٤	۸۲/۵

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]

زاویه اصطکاک داخلی و به طور کلی میزان ناهمسانگردی مقاومت برشی، نمونه‌هایی با وزن واحد خشک یکسان در سه رطوبت کمتر از بهینه، بهینه و بیش از بهینه، با سه نوع تراکم کوبشی، ارتعاشی، و استاتیکی ساخته شده‌اند. با استفاده از نتایج این آزمایشها نمودارهای مورد نظر رسم و در نهایت تغییرات ناهمسانگردی مقاومت و تغییرات مشخصه‌های مقاومت مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

در شکلهای (۷- ۹) نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در راستای قائم و افقی در برابر رطوبت به ترتیب برای تراکمهای کوبشی، ارتعاشی، و استاتیکی رسم شده‌اند. برای سادگی از این به بعد زوایای اصطکاک داخلی مذکور، به عنوان زاویه قائم و زاویه افقی نامیده می‌شوند. همان طوری که ملاحظه می‌شود، با افزایش رطوبت از کمتر از بهینه به بهینه هر دو زاویه قائم و افقی کاهش یافته‌اند، ولی با افزایش رطوبت از بهینه به بیش از بهینه، روند کاهش، با شیبی ملایمتری دیده می‌شود. به نظر می‌رسد که به واسطه وجود درصد قابل توجهی ماسه ریزدانه در خاک مورد آزمایش ممکن است با افزایش درصد رطوبت، از بهینه به بیش از بهینه به علت تأثیر کشش سطحی، در مقاومت اصطکاکی حالت بیش از بهینه، افزایش ظاهری اندکی ایجاد شده باشد و در نتیجه روند کاهش در این حالت با شیب ملایمتری ایجاد شده است.

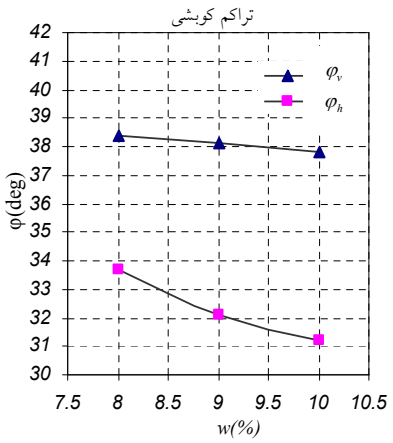
در شکلهای (۱۰- ۱۲) نمودار تغییرات چسبندگی در راستای قائم وافقی در برابر رطوبت در سه نوع تراکم رسم شده است. برای سادگی از این به بعد چسبندگی در راستای قائم، به اختصار چسبندگی قائم و چسبندگی در راستای افقی ، چسبندگی افقی نامیده می‌شود. همان طوری که از نمودارها دیده می‌شود، با افزایش رطوبت، مقدار مقاومت چسبندگی سیر نزولی دارد. به طور مثال در تراکم استاتیکی، برای رطوبت ۸ درصد، مقدار چسبندگی افقی ۸۳٫۵ کیلوپاسکال است و در رطوبت ۱۰ درصد مقدار چسبندگی افقی ۶۱٫۴ کیلوپاسکال است. یعنی با افزایش رطوبت از کمتر از بهینه به بیش از بهینه مقدار کاهش چسبندگی افقی ۲۲٫۱ کیلوپاسکال و متوسط تغییرات در همین حالت ۱۵/۲ کیلوپاسکال است. به نظر می‌رسد که این روند کاهش چسبندگی به خاطر بخش ریزدانه خاک مورد آزمایش باشد که با افزایش درصد رطوبت چسبندگی در آن کاهش می‌یابد.

۴-۳- بررسی تأثیر نوع تراکم بر پارامترهای مقاومت برشی

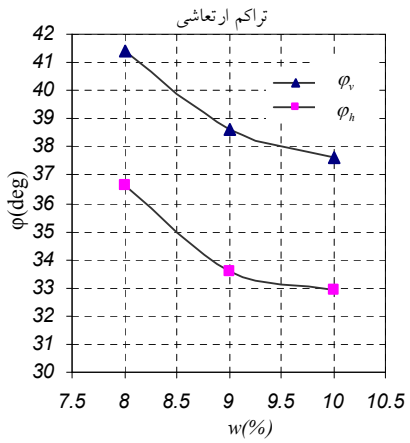
برای نشان دادن تأثیر نوع تراکم بر میزان مقاومت اصطکاکی، به شکلهای (۱۳ و ۱۴) ارجاع داده می‌شود که در آنها تغییرات زاویه افقی و قائم بر حسب رطوبت در سه نوع تراکم با هم رسم شده‌اند. همان طوری که از این نمودارها دیده می‌شود، برای تراکم ارتعاشی، به جز برای زاویه قائم در رطوبت ۱۰ درصد، در دیگر رطوبتها برای دو زاویه افقی و قائم بیشترین مقاومت اصطکاکی حاصل شده است. برای رطوبت ۸ درصد، مقدار مقاومت اصطکاکی قائم در تراکم استاتیکی، بیشتر از تراکم کوبشی است؛ ولی با افزایش رطوبت از کمتر از بهینه به بهینه و از بهینه به بیش از بهینه، مقاومت اصطکاکی قائم در تراکم استاتیکی کمترین مقادیر را داراست. همچنین بیشترین زاویه قائم در تراکم ارتعاشی یعنی ٤١/٤ درجه، کمترین زاویه قائم در تراکم استاتیکی ٣٦/٤ درجه و بیشترین زاویه افقی در تراکم ارتعاشی ٣٦/٨ درجه، کمترین زاویه افقی در تراکم استاتیکی ۳۱/۲ درجه دیده می‌شود. بیشترین درصد تغییرات مقاومت اصطکاکی در حالت قائم، برای تراکم ارتعاشی به مقدار ۱۰/۱ درصد و کمترین مقدار در تراکم کوبشی به مقدار ۱/٦ درصد است. بیشترین درصد تغییرات مقاومت اصطکاکی در حالت افقی نیز برای تراکم ارتعاشی و به مقدار ۱۲/۲ درصد و کمترین مقدار برای تراکم استاتیکی با مقدار ۷/۷ درصد است.

همچنین با توجه به نمودارهای رسم شده در شکلهای (۱۵ و ۱۶) دیده می‌شود که مقاومت چسبندگی با افزایش رطوبت در تراکم کوبشی بیشترین و در تراکم ارتعاشی کمترین مقدار را داراست. در توجیه این نتایج شاید بتوان گفت که در تراکم کوبشی جهت‌گیری ریزدانه‌ها نامنظم بوده است و لذا میزان چسبندگی بالایی حاصل شده است؛ در حالی که در تراکم

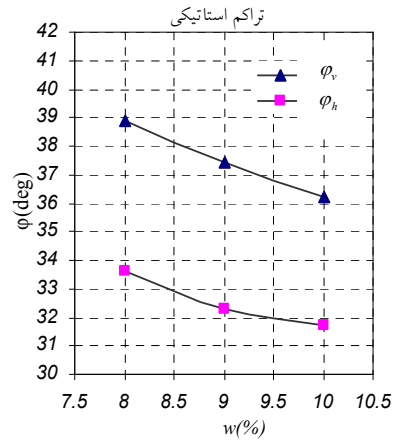
[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]



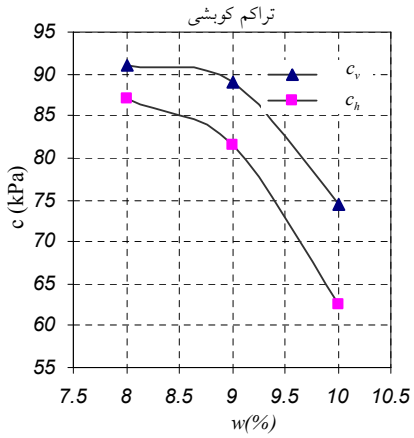
شکل ۷- تغییرات زاویه اصطکاک قائم و افقی در تراکم کوبشی



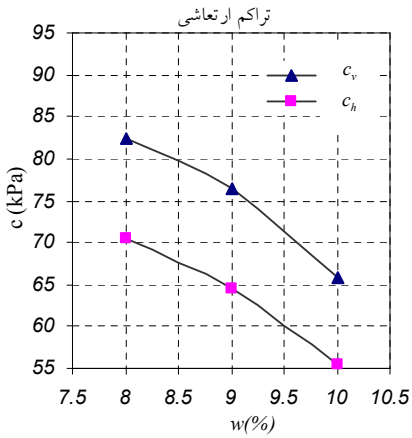
شکل ۸- تغییرات زاویه اصطکاک قائم و افقی در تراکم ارتعاشی



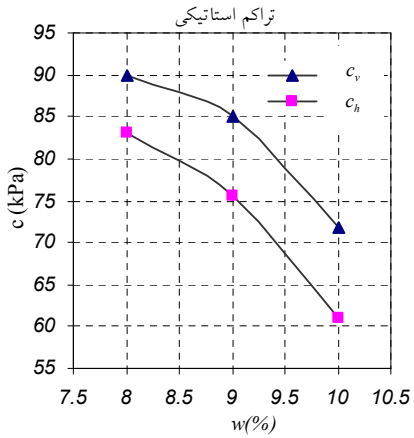
شکل ۹- تغییرات زاویه اصطکاک قائم و افقی در تراکم استاتیکی



شکل ۱۰- تغییرات چسبندگی راستای قائم و افقی در تراکم کوبشی

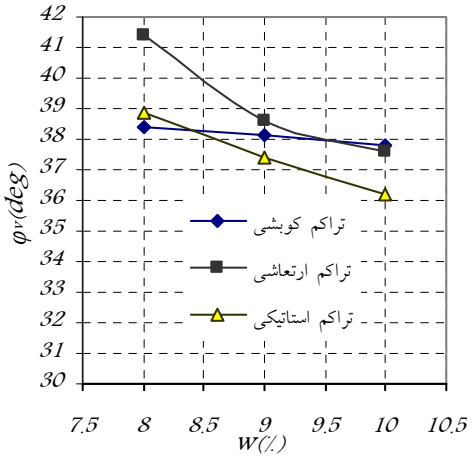


شکل ۱۱- تغییرات چسبندگی راستای قائم و افقی در تراکم ارتعاشی

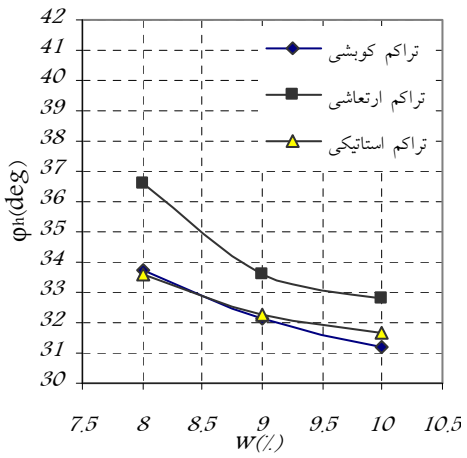


شکل ۱۲- تغییرات چسبندگی راستای قائم و افقی در تراکم استاتیکی

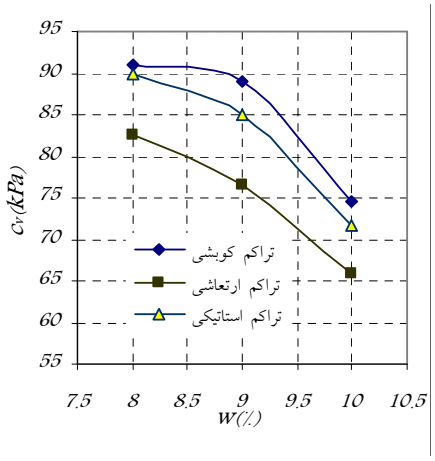
[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]



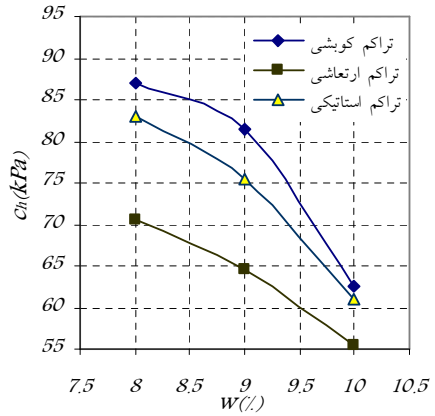
شکل ۱۳- تغییرات زاویه اصطکاک در راستای قائم در انواع تراکم



شکل ۱۴- تغییرات زاویه اصطکاک در راستای افقی در انواع تراکم



شکل ۱۵- تغییرات چسبندگی در راستای قائم در انواع تراکم



شکل ۱۶- تغییرات چسبندگی در راستای افقی در انواع تراکم

ارتعاشی، ذرات جهت‌گیری منظمتری داشته بنابراین چسبندگی کمتری حاصل شده است. با افزایش رطوبت از بهینه به بیش از بهینه، مقاومت چسبندگی در تراکمهای کوبشی و استاتیکی روند کاهشی یکسانی دارند. بیشترین مقاومت چسبندگی در تراکم کوبشی و به میزان ۹۱/۸ کیلوپاسکال و کمترین مقاومت چسبندگی مربوط به تراکم ارتعاشی و به میزان ۵۵/۵ کیلوپاسکال است.

٤-٤- بررسی تأثیر رطوبت و نوع تراکم بر میزان ناهمسانگردی اصطکاکی

از آنجایی که ناهمسانگردی، تفاوت خواص مواد در جهات مختلف تعریف شده است، برای بررسی ناهمسانگردی ابتدا تفاوت مشخصه‌های مقاومتی خاک، از لحاظ کمّی مورد نگرش قرار گرفته است سپس به میزان تغییرات ناهمسانگردی پرداخته شده است. تغییرات زوایای قائم وافقی با رطوبت تراکم قبلاً در شکلهای (۷ - ۹) نشان داده شدند. از نمودارهای مذکور دیده می‌شود که در یک رطوبت معین، همیشه مقدار زاویه قائم از افقی بیشتر است. به طور مثال در تراکم کوبشی در رطوبت ۸ درصد مقدار زاویه افقی ۳۳/۸ درجه و در همان رطوبت مقدار زاویه قائم ۳۸/٤ درجه است یعنی اختلاف زوایای قائم وافقی در این حالت ٤/٦ درجه و متوسط تفاوت زاویه قائم از زاویه افقی در این تراکم ۵/۷ درجه است.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]

در شکل(۱۷) نمودار تغییرات ناهمسانگردی اصطکاکی بر حسب رطوبت برای تراکمهای کوبشی، ارتعاشی، استاتیکی رسم شده است. برای سادگی، مقدار ناهمسانگردی اصطکاکی که عبارت است از نسبت مقدار زاویه قائم به زاویه افقی با M نمایش داده می شود. همان طوری که از شکلها دیده می‌شود با افزایش رطوبت از حالت کمتر از بهینه به رطوبت بهینه و از بهینه به بیش از بهینه مقدار M با دو شیب متفاوت افزایش یافته است. در رطوبتهای کمتر از بهینه، تغییرات ناهمسانگردی اصطکاکی شامل کمترین مقدار و در رطوبتهای بیش از بهینه شامل بیشترین مقدار است. به عنوان مثال، در تراکم استاتیکی مقدار M در رطوبت ۸ درصد، ۱/۱۵۷ در رطوبت بهینه ۱/۱٦ و در رطوبت بیش از بهینه، ۱/۱۷ است. بیشترین مقدار ناهمسانگردی اصطکاکی در این نوع تراکم در حالت بیش از بهینه ۱٦/۷ درصد است که مقداری قابل توجه است.

همان طوری که از نمودارهای شکل (۱۷) دیده می‌شود، با افزایش رطوبت، بیشترین مقدار M در تراکم کوبشی و کمترین ناهمسانگردی اصطکاکی در تراکم ارتعاشی حاصل شده است. در تراکمهای کوبشی و استاتیکی روند افزایش ناهمسانگردی اصطکاکی در محدوده رطوبتهای بهینه تا بیش از بهینه در مقایسه با روند افزایش در محدوده رطوبتهای خشکتراز بهینه تا بهینه کمتر است. حداکثر مقدار ناهمسانگردی اصطکاکی در تراکم کوبشی، به میزان ۲۱/۵ درصد و حداقل مقدار آن در تراکم ارتعاشی، به میزان ۱۱/۵ درصد است. میزان تغییرات ناهمسانگردی اصطکاکی در تراکم ارتعاشی ناچیز و تقریباً ثابت است (به میزان یک درصد).

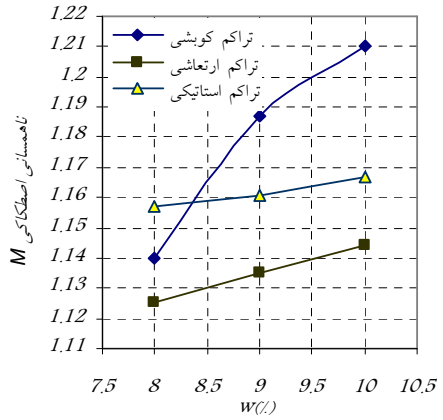
۴-۵- بررسی تأثیر رطوبت و نوع تراکم برمیزان ناهمسانگردی چسبندگی

در شکلهای (۱۰ – ۱۲) تأثیر رطوبت تراکم برچسبندگی افقی و قائم مورد به نمایش گذاشته شد. با استناد به نمودارهای مذکور می‌توان نتیجه گرفت که همواره مقدار چسبندگی قائم از افقی بیشتر است. برای مثال در تراکم ارتعاشی در رطوبت ۱۰ درصد، میزان چسبندگی قائم ٦۵/۸ کیلوپاسکال است در حالی که در همین شرایط میزان چسبندگی افقی ۵٦ کیلوپاسکال است یعنی تغییرات خاصیت چسبندگی در دو جهت عمود بر هم به میزان ۹/۸ کیلوپاسکال است که این اختلاف در خاصیت چسبندگی، موجب ایجاد ناهمسانگردی در مقاومت چسبندگی می‌شود.

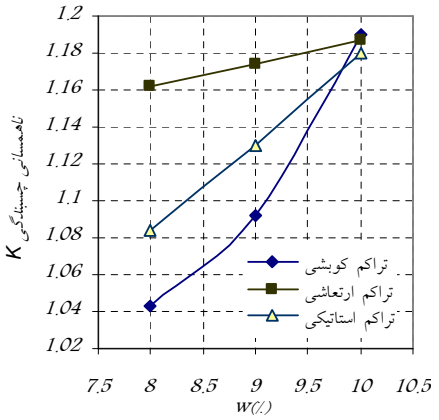
در شکل (۱۸) نمودار تغییرات میزان ناهمسانگردی چسبندگی بر حسب رطوبت برای سه نوع تراکم رسم شده است. برای سادگی، ناهمسانگردی چسبندگی که عبارت است از نسبت چسبندگی قائم به چسبندگی افقی، K نامیده می‌شود. از نمودارهای شکل (۱۸) دیده می‌شود که با افزایش رطوبت از حالت کمتر از بهینه به بهینه و از بهینه به بیش از بهینه، مقدار ناهمسانگردی چسبندگی با دو شیب متفاوت، روند افزایشی دارد که این روند در حالت کمتر از بهینه به بهینه، دارای شیب کمتری است. به عنوان مثال در تراکم کوبشی ،مقدار K از حدود ۱/۰٤ در رطوبت کمتر از بهینه به ۱/۰۹ در رطوبت بهینه و در نهایت به ۱/۱۹ در رطوبت بیش از بهینه رسیده است. بیشترین مقدار ناهمسانگردی چسبندگی در رطوبت بیش از بهینه وبه مقدار ۱۹ درصد و کمترین مقدار ناهمسانگردی چسبندگی در رطوبت کمتر از بهینه، به مقدار ٤/۳ درصد است.

همان طوری که از نمودارهای شکل (۱۸) دیده می‌شود، برای رطوبت ۸ درصد کمترین میزان ناهمسانگردی چسبندگی مربوط به تراکم کوبشی است که با افزایش رطوبت سیر افزایشی دارد و در تراکمهای استاتیکی و ارتعاشی نیز این روند افزایشی است. اما در رطوبت ۱۰ درصد ناهمسانگردی هر سه نوع تراکم دارای مقدار تقریباً یکسانی می‌شود. به طور نمونه می‌توان به تغییرات K در سه نوع تراکم اشاره کرد، برای تراکم کوبشی در رطوبت ۸ درصد میزان K، ۱/۰٤ برای تراکم ارتعاشی ۱/۱٦ و در تراکم استاتیکی ۱/۰۸ است. به نظر می رسد علت نزدیک شدن مقادیر ناهمسانگردی چسبندگی در انواع تراکم در رطوبت ۱۰درصد به یکدیگر آن باشد که دراین رطوبت ساخت بخش رسی خاک در کلیه تراکم ها به ساختی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]



شکل ۱۷- تغییرات ناهمسانگردی اصطکاکی در انواع تراکم



شکل ۱۸- تغییرات ناهمسانگردی چسبندگی در انواع تراکم

کاملاً پراکنده نزدیک می‌شود. تغییرات ناهمسانگردی چسبندگی در محدوده رطوبتهای کمتر از بهینه تا بهینه، در مقایسه با تغییرات ناهمسانگردی چسبندگی در رطوبتهای بهینه تا بیش از بهینه، برای انواع تراکم با شیب کمتری دیده می‌شود. در تراکم ارتعاشی بیشترین میزان ناهمسانگردی چسبندگی دیده می‌شود؛ ولی تغییرات ناهمسانگردی چسبندگی در این نوع تراکم با افزایش رطوبت از کم از بهینه تا بیش از بهینه، مقدار کمی (حدود ۲ درصد) است.

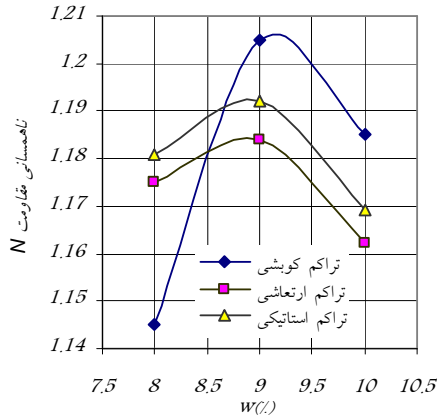
۴-۶- تأثیر رطوبت و نوع تراکم بر ناهمسانگردی مقاومت

در بخشهای پیشین تأثیر رطوبت تراکم برناهمسانگردی اصطکاکی و چسبندگی مورد بررسی قرار گرفت، اما همان طوری که می دانیم در خاکهای چسبنده اصطکاکی، مقاومت برشی خاک شامل دو مقاومت چسبندگی و اصطکاکی است و لذا تأثیر توأم این دو مشخصه باید مورد توجه باشد. برای نشان دادن تأثیر رطوبت تراکم بر ناهمسانگردی مقاومت برشی، نسبت مقاومت برشی در راستای قائم به این مقاومت در راستای افقی (N) در برابر میزان رطوبت در سه نوع تراکم کوبشی، ارتعاشی و استاتیکی در شکل (۱۹) ارائه شده‌اند.

با توجه به نمودارهای شکل (۱۹) ملاحظه می‌شود که با افزایش رطوبت از کمتر از بهینه به بهینه مقدار ناهمسانگردی مقاومت سیر افزایشی دارد و در محدوده رطوبتهای بهینه تا بیش از بهینه سیر کاهشی دارد. به عنوان مثال در تراکم ارتعاشی، مقدار ناهمسانگردی مقاومت در رطوبت کمتر از بهینه، ۱۷/۵درصد در رطوبت بهینه ۱۸/۴درصد ودر رطوبت بیش از بهینه ۱۶/۲درصد است و بیشترین مقدار ناهمسانگردی مقاومت در تراکم کوبشی ۲۰/٤ درصد و کمترین مقدار ناهمسانگردی در همین تراکم ۱٤/۵ درصد دیده می‌شود. به نظر می‌رسد علت بالا بودن میزان ناهمسانگردی مقاومت در تراکم کوبشی در مقایسه با دیگر تراکمها کوچک بودن سطح تماس کوبه و خاک نسبت به سطح مقطع قالب است. زیرا در چنین شرایطی در هنگام برخورد کوبه به خاک جابه جایی جانبی خاک به مراتب بیش از مواردی است که توپی تراکم مقطع نمونه را به طور کامل در بر می‌گیرد. در ضمن می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در شرایط تراکم کارگاهی نیز به علت کم بودن حصر جانبی ناهمسانگردی می‌تواند بیش از ناهمسانگردی نمونه های آزمایشگاهی باشد.

همان طوری که از نمودارهای شکل (۱۹) دیده می‌شود در کلیه انواع تراکم در رطوبت بهینه، حداکثر مقادیر ناهمسانگردی مقاومت حاصل شده است. در رطوبت بهینه، بیشترین مقدار ناهمسانگردی مقاومت در تراکم کوبشی به میزان ۲۰/٤ درصد و کمترین مقدار ناهمسانگردی مقاومت در تراکم

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]



شکل ۱۹- تغییرات ناهمسانگردی مقاومت برشی در انواع تراکم

ارتعاشی به میزان ۱۸/٤ درصد دیده می شود. دامنه تغییرات ناهمسانگردی مقاومت در تراکم کوبشی بیشترین (۵/۹ درصد) و در تراکمهای ارتعاشی و کوبشی کمترین (حدود ۲/۲ درصد) است.

۵- جمعبندی نتایج

با بررسی نتایج ارائه شده در بخش قبل ملاحظه می‌شود که، اولاً در همه انواع تراکم، ناهمسانگردی مقاومت وجود داشته و ثانیاً در اثر افزایش رطوبت تراکم، هردو ناهمسانگردی اصطکاکی و ناهمسانگردی چسبندگی افزایش می‌یابد. اثر رطوبت تراکم بر ناهمسانگردی مقاومت کل، در محدوده رطوبتهای کمتر از بهینه تا بهینه، افزایش مقدار ناهمسانگردی و در محدوده رطوبتهای بهینه تا بیش از بهینه، کاهش مقدار آن است.

در محدوده رطوبتهای بهینه تا بیش از بهینه در تراکم کوبشی، مقادیر ناهمسانگردی مقاومت کل و ناهمسانگردی اصطکاکی بیشترین و در تراکم ارتعاشی مقادیر مذکور کمترین‌اند. در محدوده رطوبتهای کمتر از بهینه تا بهینه در تراکم ارتعاشی، مقادیر ناهمسانگردی چسبندگی بیشترین و مقادیر این ناهمسانگردی در تراکم کوبشی کمترین است. همچنین در این محدودهٔ رطوبت برای تراکم ارتعاشی نسبت ناهمسانگردی اصطکاکی دارای کمترین مقدار است.

در اینجا مهمترین نتایج حاصله از این پژوهش در رابطه با اثر رطوبت تراکم و نوع تراکم بر میزان ناهمسانگردی پارامترهای مقاومت برشی و ناهمسانگردی مقاومت برشی کل ارائه می‌شود:

۱. برای خاک مورد آزمایش (ماسه رس دار همراه با شن) در این پژوهش، مقادیر مشخصه‌های مقاومتی به دست آمده در جهت تراکم (ϕ_v, c_v) همواره از مقادیر مشخصه‌های مقاومتی در جهت عمود بر تراکم (ϕ_h, c_h) بزرگتر بوده و لذا در کلیه حالات ناهمسانگردی در مقاومت دیده می‌شود.

۲. بیشترین ناهمسانگردی در مقاومت اصطکاکی به میزان ۲۱/۱ درصد، ناهمسانگردی چسبندگی به میزان ۲۰ درصد و ناهمسانگردی مقاومت کل به میزان ۲۰/٤ درصد در تراکم کوبشی برای رطوبت بیش از بهینه دیده شد.

۳. کمترین ناهمسانگردی مقاومت اصطکاکی به میزان ۱۲/۵ درصد در تراکم ارتعاشی،کمترین ناهمسانگردی چسبندگی به میزان ۱/٤ درصد در تراکم کوبشی و کمترین ناهمسانگردی مقاومت کل به میزان ۱٤/۵ درصد در تراکم کوبشی برای رطوبت کمتر از بهینه دیده شد.

٤. در انواع تراکم، بیشترین تغییرات ناهمسانگردی در محدوده رطوبتهای کمتر از بهینه تا بهینه و کمترین تغییرات ناهمسانگردی در محدوده رطوبتهای بهینه تا بیش از بهینه دیده شد.

۵. تغییرات رطوبت تراکم باعث تغییرات کمتری در ناهمسانگردی مقاومت اصطکاکی در مقایسه با ناهمسانگردی مقاومت چسبندگی شده است.

٦. در تراکم ارتعاشی اثر رطوبت تراکم بر تغییرات ناهمسانگردی مقاومت چسبندگی ناچیز و تقریباً ثابت است (حدود یک درصد).

۷. برای رطوبت ثابت در محدوده رطوبتهای بهینه تا بیش از بهینه مقدار ناهمسانگردی اصطکاکی و ناهمسانگردی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]

مقاومت در تراکم کوبشی بیشترین، و در تـراکم ارتعاشـی کمترین است.

۸. در محدوده رطوبتهای کمتر از بهینـه تـا بـیش از بهینـه، تغییـر در ناهمـسانگردی مقاومـت کـل، در تراکمهـای استاتیکی و ارتعاشی روند مشابهی داشته است.

لازم به ذکر است که در تراکم ارتعاشی نمونـه تحـت تـأثیر توأم ضربه و ارتعاش است. در این حالـت چـون قفـل و بـست بین دانه‌های خاک به خـوبی صـورت مـی‌گیـرد، اخـتلاف بـین مشخـصه‌هـای مقـاومتی خـاک در جهـات مختلـف کـاهش و درنتیجه میزان ناهمسانگردی مقاومت کاهش می‌یابـد، یعنـی در خاکهای حاوی بخش قابل تـوجهی درشـت‌دانـه تحـت تـراکم ارتعاشی کمترین مقدار ناهمسانگردی ایجاد مـی‌شـود. بـرعکس چنانچه در همین نوع خاکهـا از تـراکم کوبـشی اسـتفاده شـود، دانه‌های خاک تنها در یک جهت خاص (جهت تراکم) به خوبی متراکم می‌شوند لذا بین مقادیر مشخصه‌های مقـاومتی خـاک در جهات مختلف، تفاوت بیشتری وجود دارد یعنی در این حالـت میزان ناهمسانگردی مقاومت در خـاک افـزایش مـی‌یابـد. ایـن نتیجـه‌گیـری کلـی درجهـت توجیـه تفـاوت در ناهمـسانگردی مقاومتی مشاهده شده در تراکم‌های ارتعاشی و کوبشی است.

برمبنای نتیجه‌گیری فوق معلوم می شود که اگر بخواهیم در خاکریزهای متراکم شده کمترین ناهمسانگردی مقاومـت داشـته باشیم به نظر می‌رسد استفاده از روش تراکم ارتعاشی مناسبترین روش باشد. به عبارت دیگـر بـا بـه کـارگیری تـراکم ارتعاشـی خطاهای ناشی از ناهمسانگردی مصالح در تحلیلهـای پایـداری رایج یعنی تحلیلهای مبتنی بر فرض همسانگری به مقـدار قابـل توجهی کاهش می‌یابند. برعکس اسـتفاده از انرژیهـای تراکمـی ضربه‌ای ممکن اسـت بـه ناهمـسانگردی عمـده‌ای در مقاومـت منجر شـود و لـذا بـه کـارگیری تحلیلهـای پایـداری مبتنـی بـر همسانی مصالح در این موارد می‌تواند به خطـای قابـل تـوجهی منجر شود.

یاداوری می‌شود که چنانچه نسبت ناهمـسانگردی مقاومـت بیش از یک باشد و تحلیل پایداری بـر مبنـای فـرض همـسانی مقاومت صورت گیرد، نتایج حاصله محافظه‌کارانه و در صورتی که نسبت ناهمسانگردی (درجـه ناهمـسانگردی) کمتـر از یـک باشد تحلیل مبتنی بر همسانی مصالح در جهت خلاف اطمینـان است.

واژه نامه

1. anisotropy
2. Lo et al
3. Cairn Cross et al
4. Lada et al
5. Budiman et al
6. Sivakugan et al
7. Su et al
8. Arthur
9. induced anisotropy
10. Oda and Koishikawa
11. Symes et al
12. Wang et al
13. Heimdahl et al
14. Kango hammer

مراجع

1. Lo, K.Y., "Stability of Slopes in Anisotropic Soils," *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,* Vol. 91, No. SM4., pp. 85-106, 1965.
2. Cairncross, A.M. and James, R.G., "Anisotropy in Overconsolidated Clays," *Geotechnique*, Vol. 27, No. 1, pp. 31-36, 1977.
3. Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F., and Poulos, H. G., "Stress-Deformation and Strength Characteristics," *Proceedings of the 9th. Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engng.*, Tokoyo, pp. 421-494, 1977.
4. Budiman, J.S., Sture, S., and Yimko, H., "Constitutive Behavior of Stress-Induced Anisotripic Cohesive Soil," *Journal of Geotechnical Engineering*, *ASCE,* Vol. 118, No. 9, pp. 1348-1359, 1992.
5. Sivakugan, N., Chameau, J.L., and Holtz, R.D., "Anisotropic Studies on Cuboidal Shear Device," *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 119, No. 6, pp. 973-983,.1993
6. Su, S.F., and Jiao, H.J., "Base Stability of Deep Excavation in Anisotropic Soft Clay," *Journal of*

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]

Geotechnical and Geoenviromental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 9, pp. 809-818, 1998.

7. Arthur, J.R.F., Cahua, K.S., and Dunstan, T., "Induced Anisotropy in a Sand," *Geotechnique*, Vol. 27, No. 1, pp. 13-30, 1977.
8. Oda, M., Koishikawa. I., and Higuchi. T, "Experimental Study of Anisotropic Shear Strength of Sand by Plane Strain Tests," *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 1, 1978.
9. Symes, M.J.P.R., Gens, A., and Hight, D.N., "Undrained Anisotropy and Principal Stress Rotation in Saturated Sand," *Geotechnique*, Vol. 34, No. 1, pp. 11-27, 1984.
10. Wong, R.K.S., Chua, K.S., and Arthur, G.R.F., "*Induced* and Inherent Anisotropy in Sand," *Geotechnique*, Vol. 35, No. 4, pp. 471-481, 1985.
11. Rowshanzamir, M.A., "Resiliient Cross-Anisotropic Behaviour of Granular Base Material under Repetitive Loading," Ph.D.Thesis, Univ. NSW, Australia, 1995.
12. Heimdahl, T.C., and Drescher, A., "Elastic Anisotropy of Tire Shreds," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 5, pp. 383-389, 1999.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.6.1]