

امکان سنجی بهبود اندرکنش خاک رس - ژئوگرید با به کارگیری لایه های نازک ماسه ای*

محمود رضا عبدی^(۱) محمدعلی ارجمند^(۲)

چکیده آزمایش های برش مستقیم $30 \times 30 \times 20 \text{ cm}$ به منظور بررسی اندرکنش نمونه های رس- ژئوگرید، ماسه- ژئوگرید و رس- ماسه- ژئوگرید انجام شده است. کمبود اصطکاک کافی بین خاک رس و المان های مسلح کننده با استفاده از یک لایه ی نازک ماسه که صفحه ژئوگرید را در بر گرفته (Encapsulated geogrid- sand system) تأمین گردیده است. در این روش، نیروی کششی بسیج شده در ژئوگرید به وسیله ی دانه های ماسه به خاک رس انتقال یافته و در نتیجه، پارامترهای مقاومتی خاک رس مسلح بهبود می یابد. نتایج تحقیق، نشان می دهد که فراهم نمودن یک لایه ی نازک ماسه در دو طرف مسلح کننده در بهبود مقاومت برشی خاک رس، بسیار مؤثر می باشد. همچنین محاسبات ضریب اتصال (Bond coefficient) نشان می دهند که مقاومت برشی نمونه های رس- ژئوگرید بیشتر از مقاومت برشی رس غیرمسلح بوده است. این افزایش مقاومت، ناشی از تأثیر چشمه های باز ژئوگرید بوده که مقداری مقاومت مقاوم (پاسیو) (Bearing resistance) در حین برش فراهم نموده است. برای تعیین سهم مقاومت مقاوم ناشی از اعضاء متقاطع عرضی ژئوگرید در کل مقاومت برش مستقیم، یک سری آزمایش با به کارگیری ژئوگرید با اعضاء متقاطع عرضی و یک سری با حذف اعضاء متقاطع عرضی نیز انجام گردیده است. نتایج به دست آمده، نشان می دهد که درصد مقاومت مقاوم فراهم شده توسط المان های عرضی ژئوگرید، حدوداً ۱۰ درصد کل مقاومت برشی می باشد.

واژه های کلیدی ژئوگرید، نیروی کششی، خاک مسلح، اعضاء متقاطع عرضی، ضریب اتصال.

Feasibility Study of Improving Clay-geogrid Interaction by Using Thin Layers of Sand

M.R. Abdi

M.A. Arjomand

Abstract Large size direct shear tests (i.e. $300 \times 300 \text{ mm}$) were conducted to investigate the interaction characteristics between clay-geogrid, sand-geogrid and clay-sand-geogrid. The lack of adequate frictional resistance between clay and reinforcing elements was compensated by using thin sand layers to encapsulate the geogrid. Results indicate that encapsulating geogrids in thin layers of sand is very effective in enhancing the strength and deformation behaviour of reinforced clay. Variations of bond coefficient indicate that the shear resistance between the geogrid and the soil can be larger than the shear resistance of the soil itself. The increase in the shear resistance is mainly due to the influence of the geogrid apertures providing some bearing resistance during shear. In order to investigate the effects of passive resistance provided by the transverse members of the geogrid, several tests were conducted with these members removed. Total shear resistance provided by the geogrids with transverse members removed was approximately 10% lower than shear resistance of geogrids with transverse members.

Key Words Geogrid, Pullout Force, Soil Reinforcement, Transverse Members, Bond Coefficient.

* تاریخ تصویب مقاله ۸۹/۱/۲۹ و تاریخ دریافت نسخه ی نهایی اصلاح شده ۸۹/۴/۲۷

(۱) نویسنده ی مسئول، استادیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده ی مهندسی عمران

(۲) استادیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، دانشکده ی مهندسی عمران

مقدمه

بوده و در نتیجه، گسیختگی در سطح تماس قبل از رسیدن مقاومت کششی مسلح کننده به حد نهایی به وقوع می پیوندد. بنابراین درصد زیادی از مقاومت کششی مسلح کننده در زمان گسیختگی بسیج نشده و مورد استفاده قرار نمی گیرد [8]. نتایج آزمایش های آزمایشگاهی، نشان داده که تنش های برشی در اطراف مسلح کننده، بالا بوده و با دور شدن از سطح آن به سرعت کاهش می یابند [9]. بنابراین در سازه های خاک مسلح با مصالح خاگریز با کیفیت پایین این امکان وجود دارد که یک لایه ی نازک از مصالح دانه ای با مقاومت بالا در اطراف مسلح کننده برای مقابله با تنش های برشی بالا در نزدیکی مسلح کننده و در سطح تماس مورد استفاده قرار گیرد. این روش، باعث بهبود مکانیزم انتقال تنش به دلیل بهتر شدن ویژگی سطح تماس می گردد که به آن، روش ساندویچی گفته می شود. فراهم نمودن یک لایه ی نازک ماسه با مقاومت بالا در دو طرف ژئوگرید موثر در بهبود مقاومت برشی و رفتار تغییر شکل خاک رس مسلح می گردد [10].

در این تحقیق آزمایش های برش مستقیم مقیاس بزرگ (۳۰×۳۰×۲۰cm) برای بررسی مقاومت برشی و ضریب اتصال مسلح کننده در خاک مسلح انجام گردیده است. در کلیه ی آزمایش ها از یک نوع مسلح کننده با نام تجاری Fortrac 80/30-20 استفاده گردیده است. همچنین برای بررسی مقدار مقاومت مقاوم المان های متقاطع عرضی ژئوگرید (Transverse members) نسبت به کل مقاومت برشی در خاک مسلح، آزمایش های برش مستقیم مقیاس بزرگ با به کارگیری ژئوگرید با اعضاء متقاطع عرضی و بدون اعضاء متقاطع عرضی انجام گردیده است. با توجه به این که خاک مسلح رفتار برتر خود را ناشی از انتقال تنش از خاک به مسلح کننده در سطح تماس کسب می نماید؛ بنابراین اندرکنش مناسب در سطح تماس مسلح کننده- خاک سبب بهبود رفتار آن خواهد شد [11].

در سه دهه ی اخیر، ژئوسینتتیک ها با داشتن مقاومت کششی بالا برای تسلیح خاک ها در مهندسی ژئوتکنیک به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. به کارگیری مسلح کننده ها باعث تامین مقاومت کششی در توده خاک و در نتیجه کاهش تغییر شکل های افقی خاک و افزایش پایداری کلی سازه خاک مسلح می گردد [1]. در دهه های گذشته، روش خاک مسلح اکثراً با استفاده از مصالح درشت دانه به عنوان خاگریز (Backfill materials) به کار گرفته شده است. اخیراً به دلیل ملاحظات اقتصادی، از مصالح خاگریز با کیفیت پایین و قابل دسترس محلی به طور موفقیت آمیزی استفاده گردیده است [2]. گرچه مسلح کننده و مصالح خاگریز برای طراحی سیستم خاک مسلح استفاده می شود، اما مکانیزم اندرکنش خاک - مسلح کننده، نقش مهمی را ایفا می کند. اندرکنش بین مسلح کننده و خاک به دو مکانیزم ساده تقسیم شده که شامل لغزش خاک (Soil sliding) در برش مستقیم روی مسلح کننده و بیرون کشش مسلح کننده (Pullout of Reinforcement) از درون خاک می گردد [3].

به منظور بررسی مکانیزم اندرکنش خاک- مسلح کننده، مطالعات متعددی با استفاده از آزمایش های برش مستقیم و بیرون کشش توسط محققین مختلف انجام گردیده است [4,5].

برتری رفتار خاک مسلح به دلیل افزایش مقاومت برشی ناشی از افزایش مدول خاک و همچنین دارا بودن مقاومت کششی بالای مسلح کننده در مقایسه با خاک می باشد. مقاومت برشی در سطح تماس مسلح کننده ی خاک با ایجاد مقاومت اصطکاکی بین مسلح کننده و خاک و همچنین مقاومت مقاوم (پاسیو) توسعه یافته در بین المان های متقاطع عرضی ژئوگرید تأمین می گردد. هر دو عامل ایجاد افزایش مقاومت، به ویژه مقاومت مقاوم بستگی به زاویه اصطکاکی داخلی خاک دارد [6,7]. در خاک رس مسلح، مقاومت سطح تماس، پایین

دانه‌های بین ۰/۷ تا ۱/۲، ۱ تا ۲ و ۲ تا ۴ میلی‌متر تهیه شده است. خلاصه‌ی ویژگی‌های خاک رس و ماسه‌ی مخلوط که بر اساس ضوابط استانداردهای ASTM مربوطه تعیین گردیده، در جدول (۱) و منحنی‌های تراکم آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به توزیع دانه بندی و نتایج آزمایش‌ها و براساس سیستم طبقه بندی یونیفاید خاک (USCS)، خاک رس در گروه CL (رس با خاصیت خمیری کم) و ماسه در رده SW (ماسه خوب دانه بندی شده) قرار می‌گیرند. شکل (۲) منحنی دانه‌بندی ماسه را نشان می‌دهد. ژئوگرید مورد استفاده در تحقیق Fortrac 80/30-20 محصول HUESKER آلمان بوده و ویژگی‌های آن که توسط تولید کننده فراهم گردیده در جدول (۲) ارائه شده است.

آزمایش برش مستقیم. به منظور انجام آزمایش‌ها از دستگاه برش مستقیم بزرگ با ایجاد اصلاحاتی جهت اتصال ژئوگرید به جعبه برش تحتانی به وسیله گیره مطابق استاندارد ASTM D5321 استفاده گردیده است [18]. برای انجام تراکم خاک در داخل جعبه برش از یک چکش طراحی شده برای این منظور استفاده شده است. سه سری آزمایش برش مستقیم به شرح زیر انجام گردیده است.

الف- آزمایش‌های برش مستقیم بر روی خاک رس مسلح و غیر مسلح،

ب- آزمایش‌های برش مستقیم بر روی ماسه مسلح و غیر مسلح،

ج- آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های رس-ماسه و رس-ماسه-ژئوگرید. در نمونه‌های رس-ماسه-ژئوگرید، ژئوگرید یک بار با المان‌های متقاطع عرضی و یک بار بدون المان‌های متقاطع عرضی به کار گرفته شده است.

با توجه به این که جعبه برش دستگاه از دو قسمت فوقانی و تحتانی هر یک با ابعاد ۳۰×۳۰×۱۰ سانتی متر تشکیل گردیده، نحوه‌ی آماده سازی نمونه‌ها به شرح زیر بوده است:

تئوری مسأله

مقاومت برشی بین مسلح کننده و خاک از دو بخش، شامل مقاومت برشی بین مسلح کننده و خاک در سطح تماس آن‌ها و دیگری مقاومت برشی خاک با خاک در سطح چشمه‌های باز ژئوگرید تأمین می‌گردد. بر این اساس، مقاومت کل برش مستقیم (F_t) به صورت زیر بیان شده است:

$$F_t = \sigma_n A [\alpha_{ds} \tan(\delta + (1 - \alpha_{ds}) \tan \phi)] \quad (1)$$

در حالی که: ϕ : زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در برش مستقیم، δ : زاویه اصطکاک ظاهری سطح برش مسلح کننده و خاک، α_{ds} : نسبت سطح برش مسلح کننده به سطح برش کلی، σ_n : تنش قائم در صفحه برش و A : سطح برش کل می‌باشد [12]. بسیاری از محققین از ضریب اندرکنش یا ضریب اتصال به عنوان پارامتری مهم در طراحی خاک مسلح نام برده اند [13,14]. بر اساس نظر این محققین نسبت مقاومت در سطح تماس خاک با خاک به مقاومت در سطح تماس خاک با مسلح کننده، ضریب اندرکنش یا اتصال تعریف شده است. در تعریف ضریب اندرکنش، مقاومت در سطح تماس خاک با خاک همان مقاومت برش مستقیم خاک بوده، به شرطی که سطح برش همان سطح برش خاک-مسلح کننده باشد [15]. در صورتی که ضریب اتصال به دست آمده بیشتر از عدد واحد باشد، این امر نشان دهنده‌ی اتصال قوی بین خاک و ژئوسینتتیک بوده و مقاومت سطح تماس بین خاک و مسلح کننده بیشتر از مقاومت خاک با خاک خواهد بود. اگر ضریب اندرکنش کمتر از ۰/۵ باشد، اتصال ضعیف بین خاک و ژئوسینتتیک وجود دارد [16].

آزمایش‌های آزمایشگاهی

مصالح. برای انجام آزمایش‌های برش مستقیم در این تحقیق از خاک رس کائولینیت که رس A نامیده می‌شود، و یک نوع ماسه سیلیسی استفاده گردیده است. ماسه از مخلوط سه نوع ماسه‌ی یکنواخت با اندازه‌ی

- جعبه‌ی برش فوقانی در بالای ژئوگرید ریخته و متراکم می‌شد.
- ۴- گیره‌ی نگهدارنده‌ی ژئوگرید به درون بخش تحتانی جعبه‌ی برش متصل و از طریق پیچ‌های مربوطه محکم می‌گردید.
- ۵- بعد از نصب و استقرار ژئوگرید در مرز مشترک جعبه‌ها باقی‌مانده‌ی ماسه را روی ژئوگرید در جعبه فوقانی ریخته و متراکم می‌گردید.
- ۶- جعبه‌ی برش فوقانی همانند جعبه‌ی برش تحتانی با باقیمانده‌ی خاک رس، پر و متراکم می‌گردید.
- ۷- باقراردادن صفحه‌ی بارگذاری روی نمونه، مدت ۲۰ دقیقه اجازه داده می‌شد تا نیرو به طور یکسان توزیع گردد.
- ۸- آزمایش شروع و نیروی برشی با نرخ 1mm/min به نمونه اعمال می‌گردید.
- مراحل تهیه کلیه نمونه‌ها یکسان بوده و شکل شماتیک جعبه‌ی برش همراه با محل قرارگیری ژئوگرید مدفون در لایه‌ی نازک ماسه‌ای در نمونه‌های رس- ماسه- ژئوگرید، در شکل (۳) نشان داده شده است.

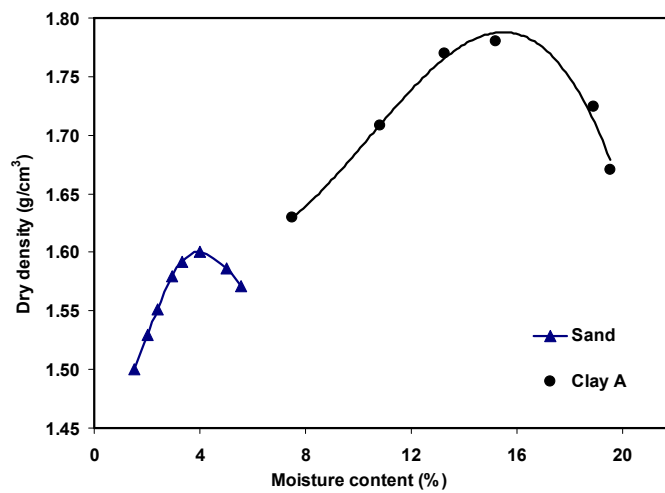
- ۱- خاک رس یا ماسه‌ی خشک آماده شده از قبل به ازای حجم مورد نیاز در جعبه با درصد رطوبت بهینه‌ی کاملاً مخلوط و سپس به دو بخش مساوی از طریق وزن کردن برای پر کردن بخش‌های تحتانی و فوقانی جعبه برش تقسیم می‌گردید.
- ۲- قسمت اول در سه لایه در جعبه برش تحتانی تا رسیدن به حداکثر دانسیته خشک به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد پروکتور ریخته و متراکم می‌گردید. تعداد ضربات مورد نیاز جهت رسیدن تراکم مورد نظر از طریق سعی و خطا و با انجام آزمایش‌های مقدماتی به دست آمده بود. در سیستم رس- ماسه- ژئوگرید، ضخامت خاک رس در جعبه‌ی تحتانی برابر ده سانتی متر، منهای نصف ضخامت لایه‌ی ماسه‌ی مورد نظر، جهت پوشاندن ژئوگرید در وسط جعبه‌ی برش بود.
- ۳- مقدار ماسه‌ی مورد نیاز در سیستم رس- ماسه - ژئوگرید با توجه به ضخامت مورد نظر از طریق توزین به دو بخش تقسیم می‌گردید. نصف ماسه در جعبه‌ی برش تحتانی زیر ژئوگرید و نصف دیگر در

جدول ۱ خصوصیات خاک رس و ماسه

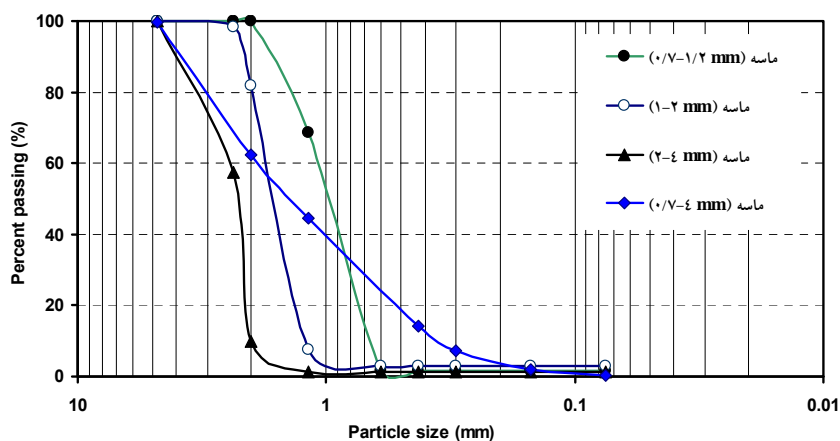
مقدار	ASTM STANDARD	شرح	نوع خاک
۲۶/۵(%)	ASTM D4318	حد روانی	رس A (کائولینیت)
۴/۵(%)	ASTM D4318	حد خمیری	
۲۲(%)	ASTM D4318	نشانه خمیری	
۱۷(%)	ASTM D698	رطوبت بهینه	
۱/۷۸(g/cm ³)	ASTM D698	دانسیته خشک حداکثر	
۱۱/۷(kPa)	ASTM D3080	چسبندگی	
۲۲/۵°	ASTM D3080	زاویه اصطکاک داخلی	
۰/۴	ASTM D2862	D10(mm)	ماسه
۱/۳	ASTM D2862	D30(mm)	
۲/۵	ASTM D2862	D60(mm)	
۶/۲۵	ASTM D2862	ضریب یکنواختی (Cu)	
۱/۶۹	ASTM D2862	ضریب انحنای (Cc)	
۴(%)	ASTM D698	رطوبت بهینه	
۱/۶(g/cm ³)	ASTM D698	دانسیته خشک حداکثر	
۱۲/۱(kPa)	ASTM D3080	چسبندگی	
۳۳/۷°	ASTM D3080	زاویه اصطکاک داخلی	

جدول ۲ ویژگی های ژئوگرید Fortrac 80/30-20 [17]

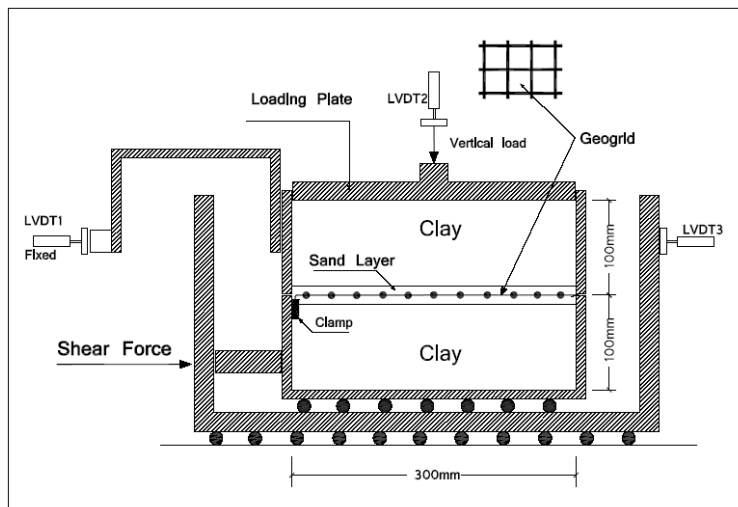
نشان / مقدار	شرح
PET	مواد اولیه
Polymer	پوشش
۸۰ (kN/m)	مقاومت کششی نهایی در جهت طولی (T_{ult})
۳۰ (kN/m)	مقاومت کششی نهایی در جهت عرضی (T_{ult})
۱۲/۵ (%)	کرنش در مقاومت کششی اسمی در جهت طولی
۱۰ (%)	نسبت سطح برش مسلح کننده به سطح برش کلی (α_{ds})
۲ (mm)	ضخامت



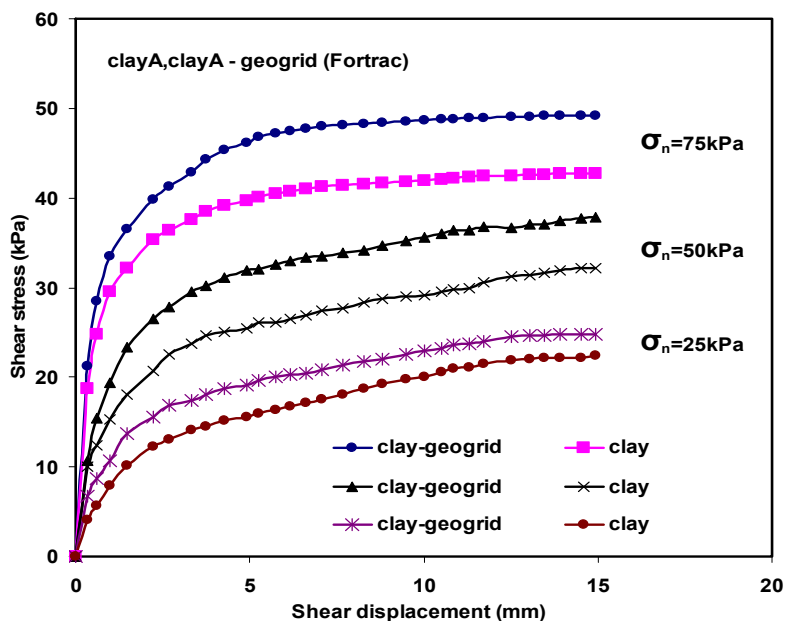
شکل ۱ منحنی تراکم خاک رس و ماسه



شکل ۲ منحنی دانه بندی ماسه



شکل ۳ شکل شماتیک جعبه برش همراه با محل قرارگیری ژئوگرید مدفون در لایه نازک ماسه‌ای



شکل ۴ منحنی‌های تنش برشی - جابه‌جایی برشی نمونه‌های رس مسلح و غیر مسلح

نیروی برشی انتخاب شده برای کلیه آزمایش‌ها برابر ۱mm/min بوده که برای همخوانی با تحقیقات دیگر محققین، انتخاب گردیده است [18]. مراحل انجام کلیه آزمایش‌ها مطابق ASTM D5321 و به روش

روش انجام آزمایش. برای تشابه سازی مکانیزم اندرکنش بین خاک و مسلح کننده ژئوگرید در سطح تماس، آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده است. تنش‌های قائم برابر با ۲۵، ۵۰ و ۷۵ کیلوپاسکال و نرخ اعمال

مسلح و مسلح شده با ژئوگرید را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مسلح نمودن خاک رس با ژئوگرید باعث افزایش چسبندگی و کاهش جزئی زاویه اصطکاک در سطح تماس شده است.

نمونه‌های ماسه و ماسه-ژئوگرید. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم برای ماسه‌ی غیر مسلح و مسلح شده با ژئوگرید در شکل (۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که به کارگیری ژئوگرید باعث افزایش مقاومت برشی ماسه در مقایسه با ماسه‌ی غیر مسلح گردیده است. مقاومت برشی هر دو ماسه مسلح و غیر مسلح با افزایش جزئی جا به جایی (۱ میلی‌متر) به شدت و به صورت خطی افزایش یافته است. پس از رسیدن به حداکثر مقاومت برشی تحت جا به جایی حدوداً ۳ میلی‌متر، مقاومت‌های برشی کاهش یافته و در جابه‌جایی‌های افقی نسبتاً زیاد (حدوداً ۴ میلی‌متر) به شرایط ثابت و ماندگار می‌رسند. هر دو سری نمونه‌های خاک ماسه‌ای غیر مسلح و مسلح، رفتار کاملاً مشابه ولی قدری متفاوت از لحاظ بزرگی مقاومت‌های برشی از خود نشان داده‌اند. با توجه به شکل، می‌توان گفت که احتمالاً مقاومت کششی ژئوگرید کاملاً بسیج نشده است.

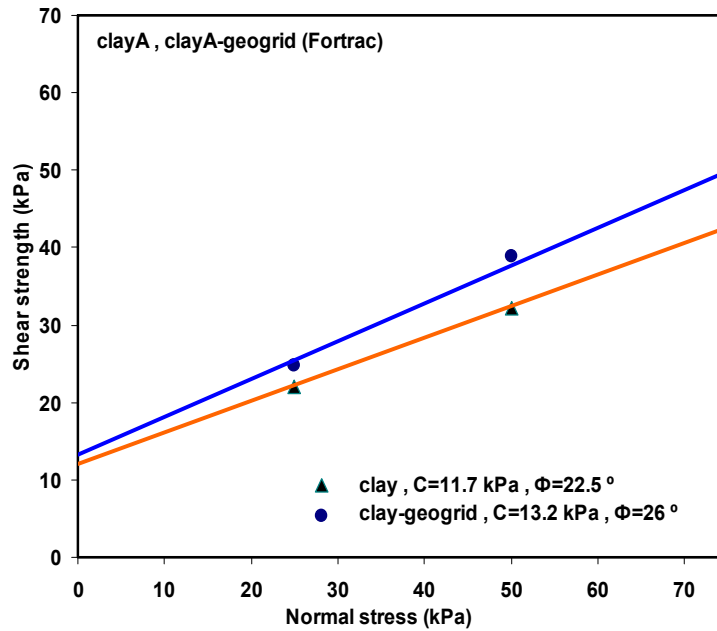
شکل (۷) پوش‌های گسیختگی برای ماسه غیر مسلح و مسلح شده با ژئوگرید را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که مسلح نمودن ماسه با ژئوگرید باعث افزایش قابل توجهی در زاویه اصطکاک ظاهری گردیده، در صورتی که چسبندگی ظاهری ماسه مسلح و غیرمسلح یکسان به دست آمده است. افزایش زاویه اصطکاک ظاهری ماسه مسلح احتمالاً به دلیل قفل شدگی دانه‌های ماسه در چشمه‌های باز ژئوگرید می‌باشد.

کنترل کرنش انجام گرفته است. در این آزمایش‌ها نیروی برشی توسط لودسل (LVDTs) و تغییر مکان‌های قائم و افقی به وسیله‌ی ترنس‌دیوسرهای متصل به کامپیوتر اندازه‌گیری شده است. با توجه به تنش‌های برشی و جابه‌جایی‌های برشی منحنی‌های مربوطه رسم و پارامترهای مقاومت برشی تعیین گردیده است. پس از اتمام هر آزمایش به منظور کنترل درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک نمونه‌ها از خاک داخل جعبه‌ی برشی، نمونه برداری به عمل آمده است.

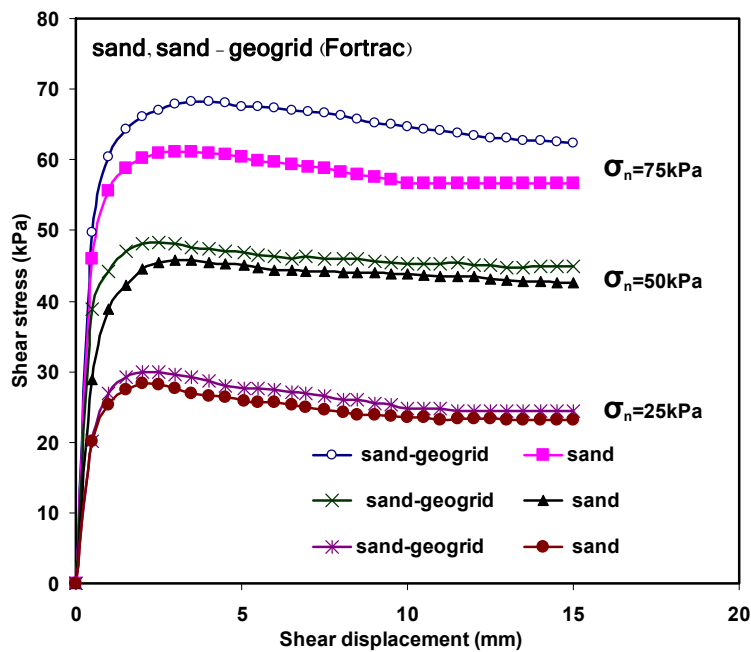
نتایج آزمایش‌های برش مستقیم

نمونه‌های رس و رس-ژئوگرید. منحنی‌های تنش برشی-جا به جایی برشی حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم برای خاک رس غیر مسلح و مسلح شده با ژئوگرید در شکل (۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که نمونه‌های خاک رس غیر مسلح و مسلح شده، رفتار سخت شونده‌گی از خود نشان می‌دهند. از طرف دیگر، سطح برش، سریع‌تر تشکیل می‌گردد و این رفتار ناشی از تغییر شکل‌های نمونه خاک متراکم شده می‌باشد. همچنین از روی شیب منحنی‌های خاک رس مسلح، نتیجه‌گیری می‌شود که گسیختگی برشی در نمونه‌های مسلح نیز سریع‌تر شکل گرفته است. بنابراین این رفتار نشان می‌دهد که نتایج آزمایش برش مستقیم مقیاس بزرگ بسیار مناسب‌تر برای طراحی‌های واقعی سازه‌های ژئوتکنیکی خاک مسلح می‌باشد [19]. منحنی‌ها نشان می‌دهد که مقاومت برشی در سطح تماس ژئوگرید و خاک بیشتر از خاک با خاک می‌باشد. این افزایش احتمالاً ناشی از تأثیر المان‌های عرضی ژئوگرید بوده که باعث فراهم شدن مقداری مقاومت مقاوم در امتداد سطح برش گردیده است.

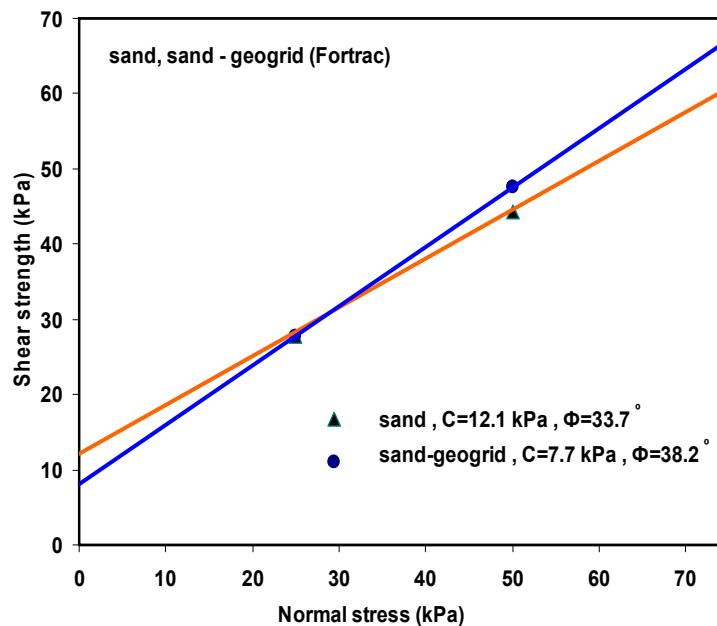
شکل (۵) پوش‌های گسیختگی برای خاک رس غیر



شکل ۵ پوش های گسیختگی نمونه های رس مسلح و غیرمسلح



شکل ۶ منحنی های تنش برشی - جابه جایی برشی نمونه های ماسه مسلح و غیر مسلح



شکل ۷ پوش‌های گسیختگی نمونه‌های ماسه مسلح و غیرمسلح

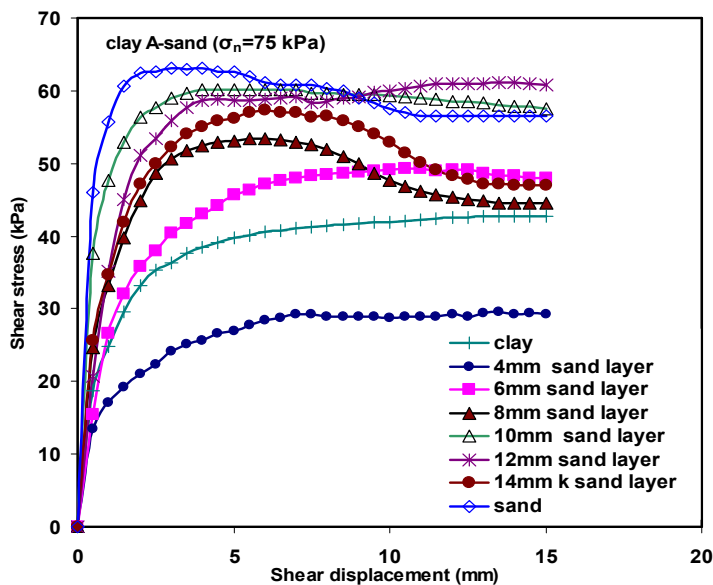
ژئوگرید گردیده که افزایشی ۴۹ درصدی را نشان می‌دهد. براساس منحنی‌های ارائه شده در شکل‌های (۵) و (۹) ملاحظه می‌شود که مقدار چسبندگی در روش ساندویچی نسبت به خاک رس مسلح، کمی کاهش داشته که این نشان می‌دهد که مقدار چسبندگی سطح تماس خاک رس با ژئوگرید بیشتر از سطح تماس ماسه با ژئوگرید می‌باشد.

به منظور بررسی تأثیر المان‌های متقاطع عرضی ژئوگرید در مقدار کل مقاومت برشی سطح تماس، آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های رس مسلح شده با ژئوگرید در برگرفته شده در ماسه با حذف اعضاء متقاطع عرضی ژئوگرید (شکل (۱۲)) انجام و نتایج به دست آمده در شکل (۱۳) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که المان‌های متقاطع عرضی ژئوگرید باعث ایجاد مقداری مقاومت مقاوم می‌شود که این مقدار در این آزمایش‌ها حدوداً ۱۰ درصد می‌باشد. پوش‌های گسیختگی نمونه‌های مسلح

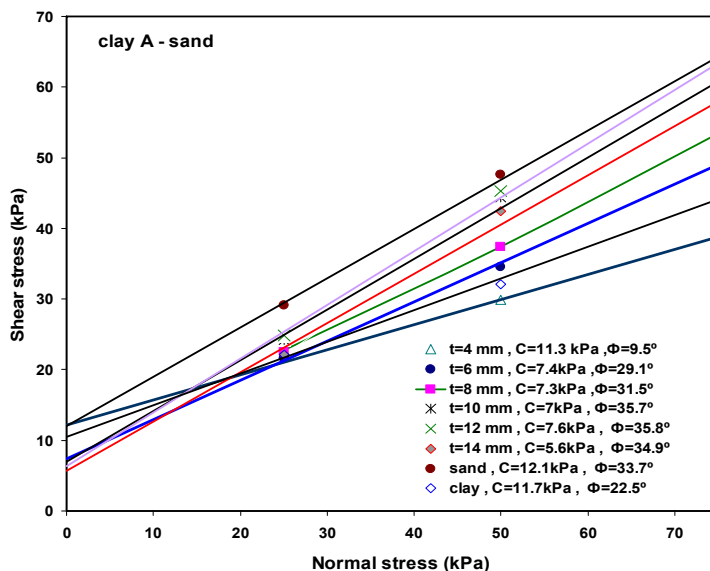
نمونه‌های رس-ماسه و رس-ماسه-ژئوگرید. منحنی‌های تنش برشی-جابجایی برشی و پوش‌های گسیختگی نمونه‌های رس-ماسه و رس-ماسه-ژئوگرید به ترتیب در شکل‌های (۸) تا (۱۱) ارائه گردیده است. مشاهده می‌گردد که به کارگیری لایه‌های نازک ماسه‌ای در اطراف مسلح کننده، تأثیر محسوسی در افزایش تنش برشی و نتیجتاً مقاومت برشی داشته است. می‌توان دید که مقاومت برشی خاک غیر مسلح از ۴۹ کیلو پاسکال در نتیجه مسلح کردن به ۶۷/۵ کیلو پاسکال افزایش یافته که افزایشی ۳۸ درصدی می‌باشد. این افزایش به دلیل بهبود سطح تماس و اندرکنش بهتر و جذب نیروهای برشی توسط ماسه بوده است. با توجه به پوش‌های گسیختگی نمونه‌های فوق‌الذکر در شکل‌های (۹) و (۱۱) می‌توان دید که فراهم نمودن لایه‌های نازک ماسه در اطراف ژئوگرید باعث افزایش مقدار زاویه اصطکاک داخلی از ۲۶ درجه (خاک رس مسلح) به حداکثر ۳۸/۷ برای نمونه رس-ماسه-

ژئوگرید چسبندگی ظاهری را افزایش داده و تأثیر چندانی بر زاویه اصطکاک ظاهری ندارد.

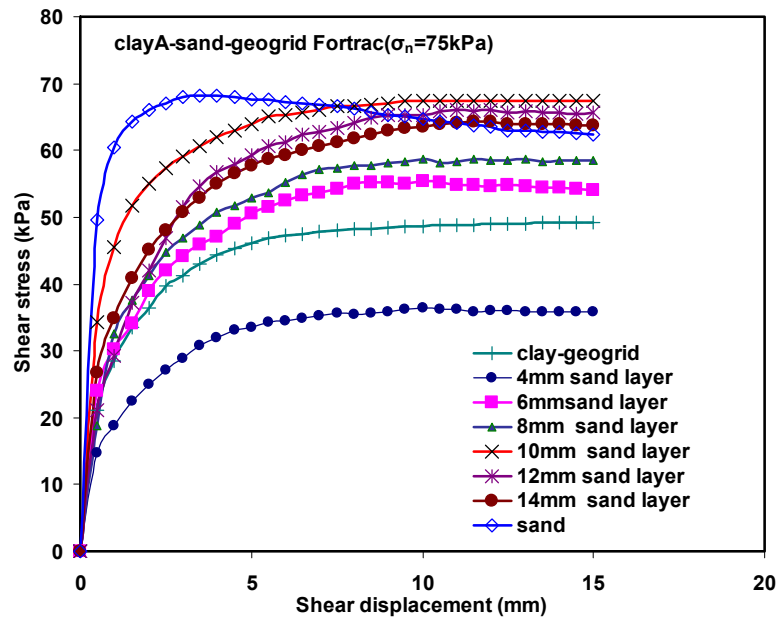
شده با ژئوگرید با المان‌های متقاطع عرضی و بدون المان‌های متقاطع عرضی در شکل (۱۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که المان‌های متقاطع عرضی



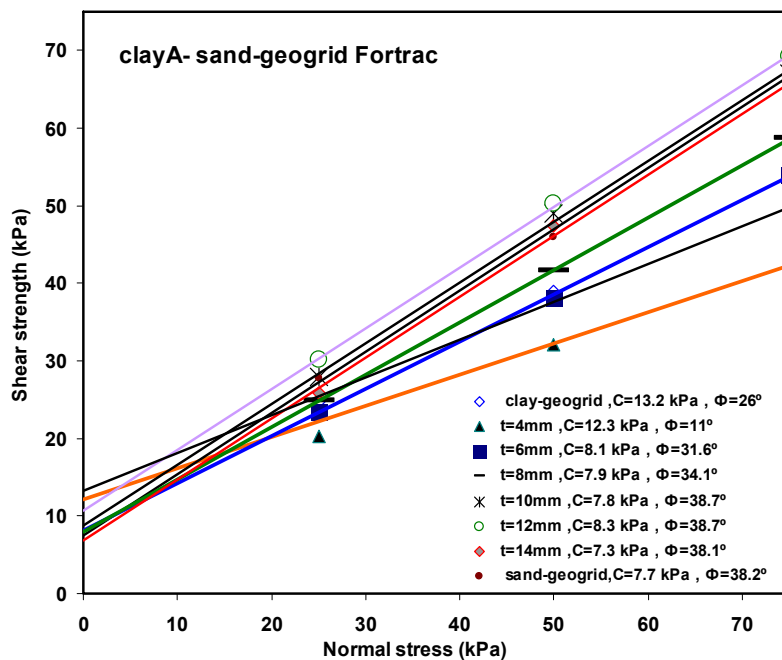
شکل ۸ منحنی‌های تنش برشی - جابه‌جایی برشی نمونه‌های رس مسلح شده با لایه‌های نازک ماسه‌ای



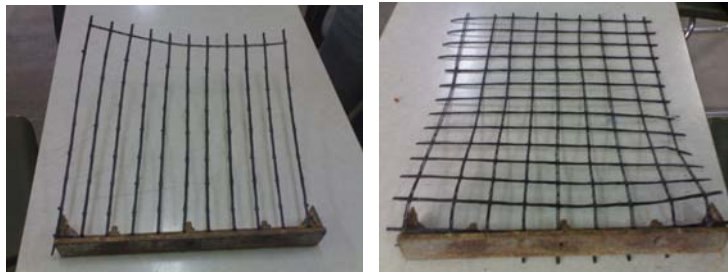
شکل ۹ پوش‌های گسیختگی نمونه‌های رس مسلح شده با لایه‌های نازک ماسه‌ای



شکل ۱۰ منحنی های تنش برشی - جابه جایی برشی نمونه های رس - ماسه - ژئوگرید



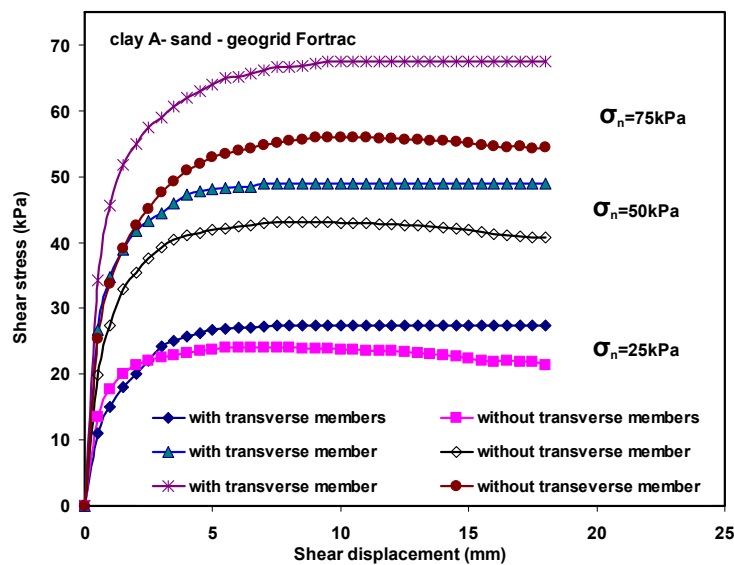
شکل ۱۱ پوش های گسیختگی نمونه های رس - ماسه - ژئو گرید



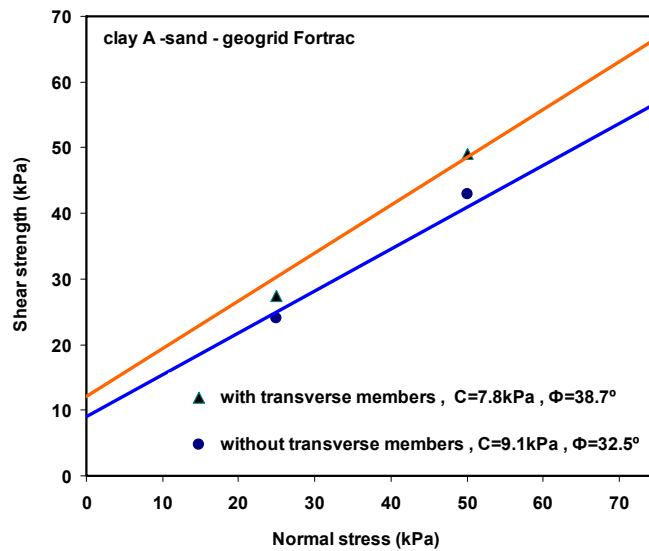
ب

الف

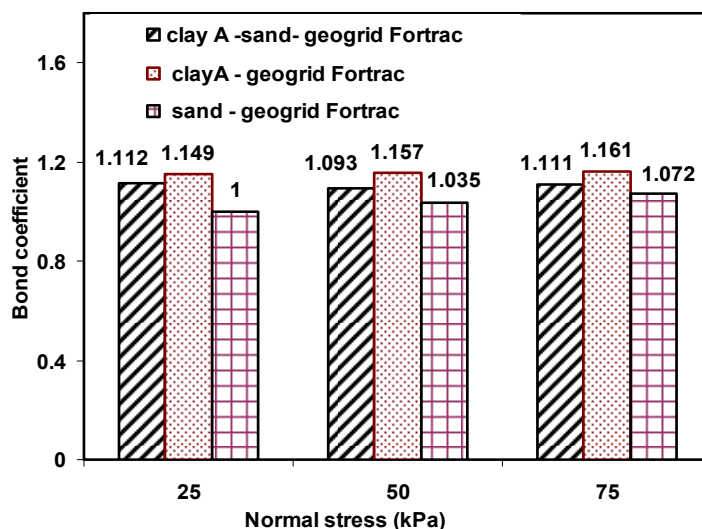
شکل ۱۲ نمونه‌ی ژئوگرید (الف) با المان‌های متقاطع عرضی، (ب) بدون المان‌های متقاطع عرضی



شکل ۱۳ منحنی‌های تنش برشی - جابه‌جائی برشی برای نمونه‌های رس - ماسه - ژئوگرید با و بدون المان‌های متقاطع عرضی



شکل ۱۴ پوش‌های گسیختگی نمونه‌های رس - ماسه - ژئوگرید با و بدون المان‌های متقاطع عرضی



شکل ۱۵ تغییرات ضریب اتصال ژئوگرید نسبت به تنش قائم

شکل زیر ساده خواهد شد:

$$C_i = \frac{\tan \delta_a}{\tan \phi} \quad (۳)$$

ضریب اندرکنش برای حالت بیرون کشش مسلح کننده بستگی به سطح ژئوسینتتیک، سطح باربری اعضای متقاطع عرضی برای باربرون کشش، ظرفیت باربری خاک اطراف مسلح کننده، نوع خاک و طول نمونه مدفون شده دارد. مقاومت برشی سطح تماس در مکانیزم اندرکنش برش مستقیم خاک-مسلح کننده، ترکیبی از مقاومت برش مستقیم سطح خاک با خاک و مقاومت برش مستقیم مسلح کننده با خاک در سطح تماس دارد. در صورتی که ضریب اندرکنش کمتر از ۰/۵ باشد، بدین معنی است که اتصال ضعیفی بین خاک و ژئوسینتتیک وجود دارد و اگر بیشتر از ۱ باشد، بدین معنی است که اتصال قوی بین خاک و ژئوسینتتیک حاکم است. مطالعات انجام شده درباره‌ی ویژگی اصطکاکی سطح ژئوسینتتیک نشان داده که مقدار اصطکاکی سطح تماس در امتداد طول سطح تماس بین خاک و مصالح ژئوسینتتیک می‌تواند کمتر از مقدار زاویه

ضریب اتصال

محققین متعددی تأثیر پارامترهای مختلف در رفتار اصطکاکی سطح تماس خاک - ژئوسینتتیک را بررسی نموده‌اند. محور تحقیقات این محققین بیشتر پارامترهایی همانند درصد رطوبت، نوع و دانسیته خاک، هندسه و سختی ژئوسینتتیک و تنش‌های قائم بوده است [20]. مقدار زاویه‌ی اصطکاک بسیج شده در سطح تماس خاک و ژئوسینتتیک را با زاویه اصطکاک داخلی خاک مقایسه و بررسی کرده‌اند. آن‌ها فاکتور C_i یا ضریب اندرکنش یا سطح تماس مؤثر را به صورت زیر تعریف کرده‌اند:

$$C_i = \frac{C_a + \sigma_n \tan \delta_a}{C + \sigma_n \tan \phi} \quad (۲)$$

درحالی که: C_a : چسبندگی بین خاک و ژئوسینتتیک، δ_a : زاویه اصطکاک ظاهری سطح تماس، C : چسبندگی خاک، ϕ : زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک و σ_n : تنش قائم اعمال شده می‌باشد. در صورتی که خاک مورد آزمایش ماسه باشد، ضریب اندرکنش به

- افزایش مقاومت برشی گردیده که عمدتاً ناشی از تأثیر چشمه‌های باز ژئوگرید بوده است. تأثیر مسلح کننده بیشتر در بهبود چسبندگی نمود داشته و تأثیر چندانی در زاویه‌ی اصطکاک ظاهری نداشته است.
- ۲- مسلح نمودن ماسه توسط ژئوگرید نیز باعث افزایش مقاومت برشی سطح تماس گردیده که بیشتر بر زاویه‌ی اصطکاک داخلی تأثیر داشته است.
- ۳- فراهم نمودن یک لایه‌ی نازک ماسه‌ای در اطراف ژئوگرید در خاک رس مسلح، باعث بهبود زاویه‌ی اصطکاک ظاهری خاک رس گردیده است.
- ۴- اعضاء متقاطع عرضی ژئوگرید، باعث ایجاد مقاومت مقاوم شده که سهم این اعضاء از مقاومت کل برشی حدوداً ۱۰ درصد بوده است.
- ۵- نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سطح برش خاک مسلح به طور سریع‌تری شکل می‌گیرد و مقاومت کل بعد از تغییر مکان‌های حدوداً ۲ تا ۴ میلی‌متری ثابت می‌ماند؛ بنابراین پارامترهای مقاومتی به دست آمده نباید جایگزین مقاومت حداکثر گردد.
- ۶- ضریب اتصال برای نمونه‌ی رس؛ ۱/۱۰، برای ماسه؛ ۱/۰۴ و برای رس- ماسه- ژئوگرید ۱/۱۱ تعیین شده است. افزایش این ضریب نشان دهنده‌ی تأثیر بسیار مثبت مدفون نمودن ژئوگرید در لایه‌های نازک ماسه‌ای جهت مسلح نمودن خاک‌های رسی می‌باشد.

اصطکاک داخلی همان خاک باشد. چنین حالتی احتمالاً سطح ضعیفی در امتداد طول تماس ژئوسیتتیک و خاک گسترش خواهد داد. تغییرات ضریب اتصال یا ضریب اندرکنش محاسبه شده در شکل (۱۵) ارائه شده است این شکل به خوبی نشان می‌دهد که مقاومت برشی کل سطح تماس خاک مسلح شده بیشتر از مقاومت خاک تنها می‌باشد. در مقایسه‌ی منحنی‌ها مشاهده می‌شود که ضریب اتصال روش ساندویچی از خاک رس مسلح و ماسه مسلح بیشتر می‌باشد. ضریب اندرکنش برای ماسه مسلح با افزایش تنش قائم ثابت، برای رس مسلح کاهش و برای نمونه‌های رس- ژئوگرید- ماسه روند افزایشی را نشان می‌دهد.

نتیجه گیری

آزمایش‌های برش مستقیم مقیاس بزرگ برای بررسی ویژگی اندرکنش نمونه‌های رس- ژئوگرید، ماسه- ژئوگرید و رس- ماسه- ژئوگرید، انجام گردیده است. همچنین به منظور ارزیابی تأثیر اعضاء متقاطع عرضی ژئوگرید در مقدار مقاومت کل سطح تماس، این آزمایش‌ها با حذف این اعضاء تکرار شده است. بر اساس نتایج حاصله از آزمایش‌ها نتیجه‌گیری‌های زیر به عمل آمده است:

۱- مسلح نمودن خاک رس توسط ژئوگرید، باعث

مراجع

1. Abiera, H.O. , "Mechanically stabilized earth using Tensar, bambo and steel grid reinforcements with weathered Bangkok clay as backfill", M. Eng. Thesis, No. Gt -90-21, Asian Institute of technology, Bangkok, Thailand, (1991).
2. Bergado, D.T., Sampaco, C.L., Shivashankar, R., Alfaro, M.C., Anderson, L.R., Balasubramaniam, A.S., "Performance of a welded wire wall with poor quality backfill on soft clay", In Proceedings of ASCE

- 1991 Geotechnical Engineering Congress, Boulder, CO, USA, Ed. F.G. McLean, D.A. Campbell & D.W. Harris. ASCE Geotechnical Special Publication No.27, 908-22, (1991).
3. Sreekantiah, H.R., Unnikrishnan, N., "Behavior of geotextile under pullout", *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference*, Calcutta, 215-228, (1992).
 4. Chia, NanLiu, Yu., Hsien, Ho., Jian, WenHuang., "Large scale direct shear tests of soil/pet-yarn geogrid interface", *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (3), 19-30, (2009).
 5. Zhenggui Wang and Werner Richwien, "A study of soil-reinforcement interaction friction", *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No. 1, 92-94, (2002).
 6. Ghiassian, H., Jahannia, M., "Influence of encapsulated geogrid-sand system on bearing capacity and settlement characteristics of reinforced clay", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 2, No. 1, (2004).
 7. Shin, E.C., Das, V. M., Pur, V. K., Cook, E. E., Yen, S.C., "Bearing capacity of a strip foundation on geogrid – reinforced clay", *Geotech, Testing Jour.*, ASTM, Vol. 16, No. 4, pp. 534- 541, (1993).
 8. Jewell, R.A., Wroth, C.P., "Direct shear test on reinforced sand". *Geotechnique*. Vol. 37, No. 1, 53- 68, (1987).
 9. Sridharan, A., Srinivasa Murthy, B.R., Bindumadhava, Revanasiddappa, K., "Technique for using fine-grained soil in reinforced earth", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE 117, 1174-1190, (1991).
 10. Unnikrishnan, N., Rajagopal, K., Krishnaswamy, N.R., "Behavior of reinforced clay under monotonic and cyclic loading", *Geotextile and Geomembranes* 20, 117-133, (2002).
 11. Mohiuddin, A., "Analysis of laboratory and field pullout tests of geosynthetics in clayey soils. Thesis for the Master in Science Degree, Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, (2003).
 12. Bergado, D.T., Chai, J.C., Abiera, H.O., Alfaro, M.C., Balasubramaniam, A.S., "Interaction between cohesive – frictional soil and various grid reinforcements", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 12, No. 4, 327-349, (1993).
 13. Alfaro, M.C., Miura, N., Bergado, D. T., "Soil-geogrid reinforcement interaction by pullout and direct shear tests", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 18, No. 2, 157- 167, (1995).
 14. Cowell, M.J., Sprague, C.J., "Comparison of pull-out performance of geogrids and Geotextiles", *Geosynthetics* , 93, 579-592, (1993).

15. Farrag, K., Morvant, M., "Evaluation of interaction properties of geosynthetics in cohesive soils", LTRC Reinforced-Soil Test Wall. Louisiana Transportation Research Center, Report 379, (2003).
16. Jewell, R. A., Milligan, G. W. E., Sarsby, R. W., Dubois, D., "Interaction between soil and geogrids", In Proceedings of Symposium on Polymer Grid Reinforcement. Thomas Telford Ltd, London, 18-29, (1984).
17. FORTRAC Datasheet, HUESKER Synthetic, GmbH Fabrikstraße 13-15, D48712, Gescher.
18. ASTM D 5321-02., "Standard testing method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear test method", Section 4, Vol. 04.13, 123-129, (2005).
19. Mallick, S.B., Zhai, H., Adanur, S., Elton, D. J., "Pullout and direct shear testing of geosynthetic reinforcement", State of the Art Report, Auburn University, Auburn, Alabama, (1996).
20. Tatlisoz, N., Edil, T.B., Benson, C.H., "Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1109-1119, (1998).