

استفاده از آزمایش برش مستقیم به منظور تعیین مقاومت پیوند خاک - دوغاب تزریقی در روش نیلینگ

علیرضا رحیم بصیری^۱، محمد علیایی*^۲، هیشم حیدرزاده^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استادیار مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۳- استادیار مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

M.Olyaei@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۲۵

چکیده

مقاومت برشی ناحیه پیوند، بین خاک و دوغاب تزریق، یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی در پایدارسازی گودبرداری‌های عمیق به روش نیلینگ است. مهم‌ترین آزمایش مرجع برای تعیین این پارامتر، آزمایش بیرون‌کشش نیل (Pullout) است. در این پژوهش تلاش شده است تا یک روش جایگزین ارائه شود که نسبت به آزمایش بیرون‌کشش نیل، کمی کم‌هزینه‌تر و ساده‌تر باشد. در حقیقت به کمک این روش جایگزین بتوان نتایج قابل استنادی را از مقاومت پیوند خاک-دوغاب بدست آورد.

برای این منظور، رفتار برشی ناحیه پیوند، بین دوغاب تزریقی و خاک ماسه‌ای در جعبه برش مستقیم بررسی شد. در این راستا، این جعبه آزمایش برش مستقیم، مورد باز طراحی و به روز رسانی قرار گرفت. سپس تعدادی آزمایش برش مستقیم با در نظرگیری تغییرات فشار تزریق و فشار سر بار انجام شد. نتایج نشان داد که آزمایش برش مستقیم با تقریب مناسبی می‌تواند مقاومت برشی ناحیه پیوند را تخمین بزند. همچنین، فرمولی برای تعیین مقاومت برشی ناحیه پیوند با در نظرگیری فشار تزریق و سر بار ارائه شده است.

واژگان کلیدی: ناحیه پیوند خاک دوغاب تزریق، آزمایش برش مستقیم، آزمایش بیرون‌کشش نیل (Pullout)، فشار تزریق

۱-مقدمه

عملیات خاکبرداری پایین‌تر از سطح زمین، شرایط تعادل اولیه خاک بر هم خورده و تانسور تنش در آن دچار تغییر می‌شود. این وضعیت جدید تنش، منجر به از بین رفتن انسجام کلی توده خاک و در نهایت گسیختگی و ریزش دیواره گود می‌شود.

امروزه با گسترش ساخت و ساز در مناطق شهری و نیاز به استفاده از فضاهای زیرزمینی، اجرای گودبرداری‌های عمیق تبدیل به جزء جدایی‌ناپذیر پروژه‌های عمرانی شده است. با انجام

بنابراین استفاده از یکی از تکنیک‌های پایدارسازی دیواره‌های خاکی امری واضح است [1-3].

یکی از روش‌های نوین و متداول پایدارسازی گودبرداری در ایران، به دلیل مزیت‌های اقتصادی و عملکرد مناسب، روش نیلینگ (میخ‌کوبی) است. این تکنیک، در اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی به عنوان روشی جایگزین برای پایدارسازی دیواره‌های خاکی عمیق در هنگ‌کینگ معرفی شد [4]. اساس این روش، بر مبنای دوختن گوه مستعد گسیختگی به توده خاک پایدار پشت آن به کمک المان‌های غیر فعال (نیل‌های غیر پیش تنیده) است. در این روش، حرکت اندک گوه ناپایدار خاک، منجر به عال‌شدن المان‌های نیل شده و تحت سرویس قرار گرفتن آن باعث پایداری دیواره می‌شود [5].

یکی از پارامترهای طراحی مهم در سیستم میخ‌کوبی، مقاومت نهایی و پسماند ناحیه پیوند نیل‌دوغاب و خاک اطراف است. از آن جا که سازوکار باربری، انتقال بار و مقاومت نهایی نیل‌ها در این روش، تابع مقاومت این ناحیه (فصل مشترک خاک و دوغاب تزریق) است، تعیین صحیح این پارامتر و شناخت عوامل موثر بر آن، گامی رو به جلو است [6-10]. هم‌چنین مقاومت بیرون‌کشیدگی نیل تابع عوامل گوناگونی از جمله فشار سربار اعمالی، فشار تزریق دوغاب، درصد رطوبت خاک، روش اجرا و غیره است [5]. در فرآیند طراحی سیستم نیلینگ، مقدار مقاومت برشی ناحیه پیوند، فرض شده و این مقدار در آزمایش‌های بیرون کشش برجا (حین ساخت) تدقیق می‌شود. این رویکرد طراحی، ممکن است منجر به طرحی نادرست به لحاظ فنی و اقتصادی شود [4]. بنابراین شناخت دقیق رفتار برشی ناحیه پیوند خاک-دوغاب تزریق، به منظور دستیابی به طرحی بهینه، ضروری به نظر می‌رسد.

تاکنون روش‌هایی برای ارزیابی مقاومت برشی ناحیه پیوند پیشنهاد شده است اما مهم‌ترین آزمایش مرجع برای ارزیابی و درستی‌آزمایی مقاومت این ناحیه، آزمایش بیرون کشش نیل ۱ است که در آن نیروی بیرون کشش به دست آمده، بیانگر مقاومت برشی ناحیه پیوند خاک-دوغاب است.

این آزمایش اگرچه نتایج نسبتاً دقیقی به دست می‌دهد اما دارای سختی‌های اجرایی فراوان در کارگاه بوده و تجهیزات گران آن باعث پر هزینه‌شدن این آزمایش می‌شود. از این رو، ارائه آزمایشی که بتواند با روش ساده و کم‌هزینه‌تر، تقریب مناسبی از نتایج آزمایش بیرون‌کشش را به دست دهد، ضروری است. در این مقاله برای اولین بار در ایران، آزمایش برش مستقیم به عنوان روشی برای تعیین مقاومت برشی ناحیه پیوند خاک و دوغاب معرفی شده و عوامل موثر بر این پارامتر مورد بررسی دقیق قرار می‌گیرد.

تاکنون پژوهش‌هایی روی مقاومت برشی ناحیه پیوند بین خاک و دوغاب انجام شده است. موریس [11]، مقاومت جداره نیل و خاک تزریق شده اطراف را در خاک رس لندن بررسی کردند. او در این پژوهش اثر فشار سربار و نرخ سرعت بیرون کشش را بر مقاومت بیرون‌کشش نیل ارزیابی کرد. نتایج پژوهش‌ها نشان داد که افزایش فشار سربار منجر به افزایش نیروی بیرون‌کشش نیل می‌شود. هم‌چنین نتایج نشان داد که افزایش نرخ سرعت بیرون‌کشش، باعث افزایش مقاومت نهایی می‌شود. چو و همکاران [12]، تعدادی آزمایش بیرون‌کشش آزمایشگاهی روی خاک CDG انجام دادند. مشاهده شد که رفتار ناحیه پیوند خاک و دوغاب تحت تاثیر ویژگی‌های خاک مانند درصد رطوبت، فشار سربار، درصد تراکم خاک و زبری پیرامونی نیل است. هم‌چنین نتایج نشان داد که ارزیابی تنش‌های اطراف نیل به سختی در آزمایشگاه امکان‌پذیر است.

سو و همکاران [13]، تعدادی تست آزمایشگاهی بیرون‌کشش نیل انجام داده و اثر فشار تزریق را در آن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌داد که با افزایش فشار تزریق، مقاومت بیرون کشش خاک-دوغاب نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین، آنان با انجام تعدادی تست بیرون کشش خاک-دوغاب، به بررسی اثر همزمان فشار سربار و فشار تزریق در شرایط نزدیک به اشباع پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌داد که فشار سربار و فشار تزریق، اثری تعاملی بر مقاومت بیرون کشش نیل دارند.

1. Pullout

هدف این پژوهش در مرحله اول، امکان‌سنجی انجام تست برش مستقیم خاک-دوغاب تزریق و معرفی آن به عنوان روشی برای تعیین مقاومت ناحیه پیوند بوده و در وهله دوم تاثیر پارامترهایی مانند فشار سربار و فشار تزریق را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این نوشتار و در بخش دوم مصالح مصرفی معرفی می‌شوند. بخش سوم، اختصاص به معرفی تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده و جعبه برش مستقیم به روزرسانی شده دارد. همچنین در بخش چهارم و پنجم به ترتیب، روش انجام آزمایش و تفسیر نتایج به دست آمده، ارائه می‌شود. در بخش پایانی نیز نتیجه‌گیری‌ها مطرح می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی خاک مصرفی

در این پژوهش، از ماسه ریخته‌گری کد ۱۶۱ فیروزکوه استفاده شده است. این ماسه دارای رنگ قهوه‌ای روشن مایل به طلایی بوده و از ترکیبات SiO_2 به میزان ۹۷/۵ درصد، Fe_2O_3 به میزان ۰/۶۵ درصد و غیره تشکیل شده است [5].

شکل ۱. ماسه فیروزکوه کد ۱۶۱



Fig. 1. Firoozkooch sand No 161

در شکل (۲)، منحنی دانه‌بندی این خاک مطابق استاندارد ASTM D-422 آمده است. براساس این آزمایش، مقادیر D_{10} ، D_{30} ، D_{50} و D_{60} این خاک به ترتیب برابر ۰/۲۱۲، ۰/۲۵۱، ۰/۲۶۳ و ۰/۲۸۰ است. بنابراین ضریب یکنواختی و ضریب انحنای این خاک به ترتیب برابر ۱/۳۲ و ۱/۰۶ به دست می‌آید. بر طبق رده‌بندی متحد، این خاک دارای رده SP است. همان‌گونه که در شکل (۲) دیده می‌شود، ماسه فیروزکوه، خاک یکنواخت ماسه‌ای دارای مقداری سیلت (کمتر از ۵ درصد) است [5]. آزمایش‌های وزن مخصوص ویژه، تخلخل بیشینه و کمینه، تراکم

چو و ئین [4]، به مقایسه مقاومت برشی ناحیه پیوند خاک-دوغاب در ۲ آزمایش بیرون‌کشش و برش مستقیم پرداختند. دستگاه برش مستقیم استفاده شده در این پژوهش، دستگاه بزرگ مقیاس 305×305 بود و برای ایجاد ناحیه پیوند بین خاک و دوغاب، ملات سیمان بدون اعمال هیچ فشار تزریقی، فقط بر روی سطح خاک ریخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که فشار سربار، بر مقاومت ناحیه پیوند تاثیرگذار است. اختر حسین و ئین [14]، رفتار ناحیه اندرکنش خاک و ملات تزریقی را در جعبه برش مستقیم را بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش با استفاده از دستگاه برش مستقیم با ابعاد فک 100×100 میلی‌متر، اثر فشار تزریق و فشار سربار را بر مقاومت ناحیه اندرکنش خاک رده SP بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش فشار سربار و فشار تزریق باعث افزایش پارامترهای برشی ناحیه پیوند می‌شود. در این پژوهش، با توجه به کمبودهایی مانند عدم اعمال فشار تزریق، عدم ارائه میزان نفوذ دوغاب و درستی‌آزمایی که در پژوهش‌های پیشین احساس می‌شد، رفتار برشی ناحیه پیوند بین خاک دانه‌ای (ماسه فیروزکوه) و دوغاب تزریق مورد بررسی قرار گرفت. در گام اول، جعبه برش مستقیم به روزرسانی شد تا قابلیت تزریق ملات و اعمال فشارهای بالا بر آن ایجاد شود. همچنین با انجام تست‌های مکرر و جست‌وجو در ماهیت خاک مورد آزمایش، میزان نفوذ دوغاب در خاک برای تشکیل سطح برش تعیین شد. سپس، تعداد ۱۲ تست برش مستقیم با در نظرگیری اثر فشار سربار و فشار تزریق در جعبه به‌روز شده برش مستقیم انجام گرفت و در نهایت نتایج به دست آمده درستی‌آزمایی شد. تست‌های برش مستقیم خاک-دوغاب با در نظرگیری ۳ فشار سربار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال در فشار تزریق‌های صفر (ثقلی)، ۱ بار و ۲ بار انجام گرفت و نتایج در قالب نمودارهای تنش نرمال-تنش برشی و پوش گسیختگی مور-کولمب ارائه شد. البته لازم به ذکر است که فشار تزریق در بیشتر پروژه‌های صنعتی، معمولاً حداقل ۲ بار در نظر گرفته می‌شود. اما در اینجا، با توجه به پژوهش‌های آزمایشگاهی پیشین، محدودیت امکانات آزمایشگاهی و انجام تست‌ها در مقیاس آزمایشگاهی، فشارهای تزریق صفر، ۱ بار و ۲ بار استفاده شده است.

محوره قرار گرفت. مقاومت ۷ روزه، ۱۴ روزه و ۲۸ روزه نمونه‌ها به ترتیب برابر ۲۸/۹، ۳۲/۵ و ۳۴/۹ مگاپاسکال به دست آمد. در جدول (۲)، مشخصات ملات مصرفی آورده شده است.

لازم به ذکر است که در جدول (۱)، مدول یانگ برای مصالح خاکی (خاک مصرفی) بر اساس منحنی تنش- کرنش حاصل از نتایج آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده (CD) بدست آمده است. همچنین در جدول (۲) (مشخصات ملات مصرفی)، مدول یانگ با توجه به نتیجه تنش- کرنش بدست آمده از آزمایش تک محوری، محاسبه شده است.

جدول ۲- مشخصات ملات مصرفی

No	Parameter	Unit	Value
1	Uniaxial compressive strength	MPa	34.9
2	Density	$\frac{gr}{cm^3}$	1.93
3	Poisson's ratio	-	0.22
4	Young modulus	MPa	14.41

Table 2. Mortar parameters

۲-۳- معرفی دستگاه برش مستقیم

در این پژوهش و برای انجام تست‌های برش مستقیم خاک- خاک و خاک-دوغاب، از دستگاه برش مستقیم با ابعاد فک جعبه ۱۰۰*۱۰۰ میلی‌متر استفاده شد که ارتفاع هر جعبه ۲۵ میلی‌متر است. ظرفیت لودسل این دستگاه، ۵۰۰ کیلوگرم است و گیج‌های اندازه‌گیری، دقتی معادل ۰/۰۱ میلی‌متر دارند. در شکل (۳)، تصویر این دستگاه آورده شده است.

این دستگاه دارای ۳ وسیله اندازه‌گیری است؛ الف- کرنش‌سنج افقی که نشان‌دهنده حرکت افقی جعبه‌ها و برش خوردن نمونه است. ب- نیروسنج که نشان‌دهنده میزان نیروی اعمال شده در هر لحظه و بیشینه نیروی اعمال شده از ابتدای آزمایش است. این نیرو توسط لودسل اندازه‌گیری شده و توسط مانیتور به نمایش درمی‌آید. ج- کرنش‌سنج عمودی که روی جعبه نصب شده و میزان اتساع یا نشست نمونه را نشان می‌دهد.

در این پژوهش، از آنجا که باید تزریق دوغاب در داخل جعبه صورت بگیرد، لازم است، جعبه آزمایش به‌روزرسانی شده و امکان تزریق ملات در داخل آن فراهم شود. بر همین اساس، یک

استاندارد (پروکتور)، برش مستقیم و ۳ محوری CTC روی این خاک انجام شد که خلاصه‌ای از پارامترهای به دست آمده در جدول (۱) آمده است.

شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک مصرفی بر طبق استاندارد ASTM D-422

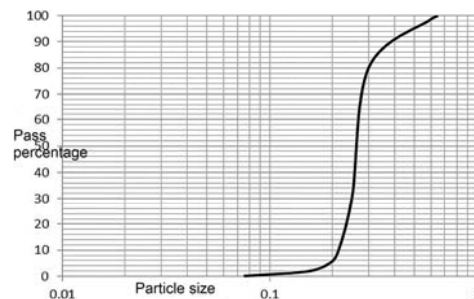


Fig. 2. Soil aggregation curve according to standard ASTM D-422

جدول ۱. پارامترهای خاک مصرفی

Firoozkooh Sand Grain Soil Parameters No 161

No	Parameter	Unit	Value
1	(G _s) Specific special weight	-	0.265
2	Specific dry weight max	$\frac{gr}{cm^3}$	1.7
3	Optimal moisture content	%	9
4	Young modulus	MPa	26.7
5	Internal friction angle	Degree	38
6	cohesion	kPa	7.25
7	Maximum porosity ratio	-	0.938
8	Minimum porosity ratio	-	0.523
9	Poisson's ratio	-	0.38

Table 1. Soil consumption parameters

۲-۲- مشخصات ملات مصرفی

برای ساخت ملات تزریقی از سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان تهران استفاده شد. دوغاب تزریقی با نسبت آب به سیمان (W/C) ۰/۵ مخلوط شد و به روی سطح خاک که در داخل جعبه برش مستقیم کوبیده شده بود، تزریق شد تا مدل‌سازی درستی از واقعیت صورت بگیرد.

آزمایش جرم مخصوص مطابق با استاندارد ASTM C-188 و آزمایش مقاومت فشاری تک محوره مطابق با استاندارد ASTM C-109 انجام شد [15-16]. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، سه گروه آزمون هر یک به تعداد ۳ عدد آماده شد و پس از عمل‌آوری، نمونه‌ها در دستگاه تک

شکل ۴. به روزرسانی جعبه برش به منظور مدل سازی اثر تزریق ملات

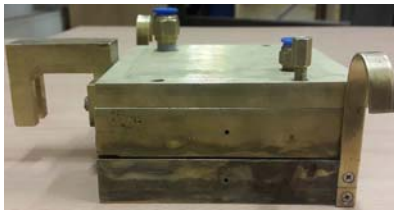


Fig. 4. View of upgraded direct shear box

۳- تست های آزمایشگاهی

۳-۱- تست برش مستقیم خاک- خاک

به منظور شناسایی پارامترهای مقاومتی خاک مورد آزمایش، تست های برش مستقیم خاک-خاک مطابق با استاندارد ASTM D-3080 انجام شد [17]. براساس مفاهیم مربوط به وزن مخصوص خشک و تراکم، مطابق با استاندارد ASTM D-7181، نسبت به تهیه نمونه خاک اقدام شد [18]. بر این اساس و با توجه به وزن مخصوص خشک حداکثر و میزان درصد تراکم ۹۰ درصد، مقدار وزن خشک خاک ۳۱۰ گرم به دست آمد. این مقدار خاک خشک با ۹ درصد وزنی آب (درصد رطوبت بهینه) مخلوط شد تا نمونه مرطوب به دست آید. بنا به توصیه آیین نامه، خاک مرطوب حاصل، در ۳ لایه و به کمک کوبه ۱۰×۱۰ سانتی متر در جعبه برنجی متراکم شد. برای ایجاد درگیری بین لایه های خاک، سطح هر لایه قبل از ریختن لایه بعدی به دقت خراشیده شد. (شکل ۵)

شکل ۵. کوبیدن نمونه خاک در جعبه برش

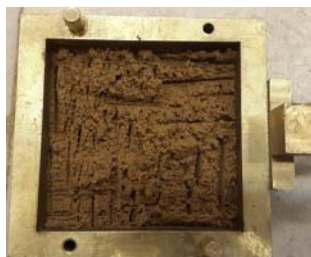


Fig. 5. Compressed soil in direct shear box

پس از کوبیدن نمونه و قرار دادن سنگ متخلخل و زهکش، سربار مورد نظر به نمونه اعمال شد. تست ها در ۳ سربار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ انجام شد. با توجه به آنکه تست ها در حالت تحکیم یافته زهکشی شده صورت می گرفت، سربار اعمالی مدتی روی نمونه نگه داشته شد تا به تمام ذرات خاک اعمال شود. در نهایت، نمونه خاک تحت نیروی برش قرار گرفت. سرعت برش

صفحه برنجی با ابعاد پلاستی ۱۲/۵ در ۱۲/۵ سانتی متر طراحی و ساخته شد. این صفحه با پیچ هایی به بخش انتهایی جعبه متصل می شود. روی این صفحه دو سوراخ رزوه شده به قطرهای ۱۵ و ۱۰ میلی متر نیز ایجاد شد که یکی برای تزریق ملات و دیگری برای خروج هوا و برگشت ملات استفاده می شود. این سوراخ ها توسط دو سرشلنگی در رزوه ها بسته می شود و شلنگ های تزریق و هوا بدان متصل می شود شکل های (۳ تا ۷).

شکل ۳. دستگاه برش مستقیم با ابعاد فک ۱۰۰×۱۰۰ میلی متر



Fig. 3. Direct shear machine (100 mm)

۲-۴- به روز رسانی جعبه برش و ایجاد امکان تزریق ملات

به منظور ایجاد صحیح ناحیه پیوند خاک-دوغاب در آزمایش برش مستقیم و برای مدل سازی اثر فشار تزریق، باید جعبه برنجی به روزرسانی می شد تا امکان تزریق ملات داخل آن فراهم شود. با انجام آزمایش های مکرر مشخص شد که ۲ موضوع اساسی در مدل سازی ناحیه پیوند در جعبه برش مستقیم وجود دارد: ۱- ایجاد فرآیندی برای تزریق ملات و ۲- در نظرگیری تمهیداتی برای اعمال فشار به دوغاب تزریقی. به همین منظور، صفحه ای برنجی با ضخامت و ابعاد مقطع مشخص طراحی شد. روی این صفحه دو حفره رزوه شده قرار دارد که یکی از آن برای اتصال شلنگ تزریق دوغاب و دیگری برای اتصال شلنگ خروج هوا است. این صفحه قابلیت اتصال پیچی به جعبه را دارد و امکان تزریق ملات از بالا و پایین نمونه در جعبه را فراهم می کند. تصویر جعبه به روزرسانی شده در شکل (۴) آمده است. برای آنکه جعبه قابلیت تحمل فشار تزریقی اعمالی را داشته باشد و دوغاب از آن بیرون نریزد، تعداد پیچ های اتصال بیش تر شد و از مصالحی مانند چسب سیلیکون و گچ برای هوا بند و آب بند کردن آن استفاده شد.

پاشیده می‌شود. لازم به ذکر است که در این مرحله، در ابتدا دوغاب به صورت ثقلی و با فشار بسیار کم $0/3$ بار به روی خاک ریخته شده و پس از اطمینان از پر شدن جعبه (برگشت ملات از شلنگ خروج هوا)، فشار تزریق مدنظر اعمال می‌شود. با بستن شلنگ تزریق، عملیات تزریق به پایان می‌رسد (شکل ۷). نمونه نهایی خاک - دوغاب به مدت ۷۲ ساعت عمل‌آوری شده تا ملات، مقاومت قابل قبولی پیدا کند. با توجه به توصیه چو و ئین [4] و اختر حسین و ئین [14] روش عمل‌آوری این‌گونه انتخاب شد که سطح ملات و جعبه برش با یک پارچه کفی مرطوب پوشانده شد. این پارچه به صورت روزانه تعویض می‌شود تا رطوبت آن حفظ شود. مدت زمان عمل‌آوری نیز براساس توصیه بهزادیان [5] مدت ۷۲ ساعت انتخاب شد. در نهایت، دو جعبه برش برگردانده شد و پس از باز کردن تمام اتصالات، گچ و چسب، در داخل حوضچه آلومینیومی دستگاه برش مستقیم قرار گرفت تا تحت نیروی برشی قرار گیرد. مقادیر نیرو و جابه‌جایی توسط لودسل و کرنش سنج قرائت شد.

شکل ۶. آب‌بندی جعبه برش مستقیم



Fig. 6. Sealing direct shear box

شکل ۷. تزریق دوغاب در جعبه برش به منظور ایجاد ناحیه پیوند

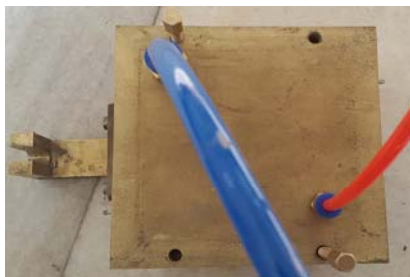


Fig. 7. Injection of cement slurry to create grouted soil interface

۳-۳- ضخامت لایه پیوند

همان‌گونه که در بخش قبلی توضیح داده شد، به واسطه اعمال فشار بر دوغاب تزریقی، این ملات در داخل خاک نفوذ کرده و ناحیه پیوند را تشکیل می‌دهد. از آن‌جا که لازم است سطح برش و ناحیه پیوند خاک دوغاب دقیقاً در یک محل قرار گیرد، لازم

خوردن نمونه، به صورت آهسته و برابر $0/5$ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد که نتایج دقیق‌تری حاصل شود. قرائت‌های نیرو از روی نمایشگر دیجیتال دستگاه و قرائت مقادیر جابه‌جایی به کمک گیج‌های افقی و عمودی نصب‌شده روی جعبه انجام شد.

۳-۲- تست برش مستقیم خاک - دوغاب

ساخت نمونه در تست‌های برش مستقیم خاک-دوغاب، با کمی تفاوت، روندی شبیه به تست‌های خاک-خاک دارد. در این روش دو جعبه برش به کمک پیچ به یکدیگر بسته شد. سپس آن دو همراه با هم برگردانده شد و نمونه خاک مرطوب تهیه شده (طبق روش گفته شده در تست‌های خاک - خاک) در داخل جعبه پایینی کوبیده و جا داده شد. میزان نمونه خاک مرطوب تهیه شده به گونه‌ای محاسبه شده است که فقط یکی از جعبه‌ها را پر کرده و مقدار کمی (در حدود ۱ تا ۲ میلی‌متر) از سطح برش فراتر می‌رود. دلیل این موضوع آن است که پس از تزریق دوغاب و نفوذ آن در خاک به واسطه فشار تزریق، ناحیه پیوند خاک دوغاب دقیقاً در سطح برش دو جعبه ایجاد شود. مقدار مذکور در بخش بعدی توضیح داده می‌شود.

اکنون، جعبه بالایی برش که به واسطه برگرداندن، در پایین قرار گرفته است، از خاک کوبیده شده، پر شده است و جعبه دیگر برای تزریق دوغاب خالی است. در مرحله بعد، هر دو جعبه برش و اتصالات مرتبط، آب‌بندی می‌شود تا راه‌های خروج دوغاب از آن به کلی بسته شود. لازم به ذکر است که در این مرحله تمام ملحقات جعبه به کمک اتصالات پیچی به آن بسته شده است تا در حین تزریق دوغاب و فشارگیری، دوغاب بیرون نریزد. علاوه بر این، برای آب‌بندی منافذ، از ترکیب چسب سیلیکون (درزگیر) و گچ ساختمانی استفاده می‌شود. این کار باعث می‌شود تا فشار تزریق اعمالی از جعبه خارج نشده و نمونه تحت فشار قرار گیرد. (شکل ۶)

در مرحله بعدی، تزریق دوغاب به داخل جعبه خالی که در تماس با خاک است، انجام می‌شود. بدین منظور، تجهیزات تزریق شامل پمپ هوا، شلنگ تزریق و شلنگ خروج هوا آماده شده و دوغاب سیمان که با نسبت آب به سیمان $0/5$ آماده شده است، به کمک فشار هوا، به داخل جعبه تزریق می‌شود و به روی خاک

۸- الف و نمودار جابه‌جایی افقی - جابه‌جایی عمودی در این ۳ سربار در شکل (۸ - ب) آمده است.

جدول ۳. برنامه تست‌های آزمایشگاهی

Normal stress (kPa)	Grout pressure (bar)	Test	No
100	-	Soil-Soil	1
200			2
300			3
100	0	Soil-Slurry	4
200			5
300			6
100	1	Soil-Slurry	7
200			8
300			9
100	2	Soil-Slurry	10
200			11
300			12

Table 3. Lab tests program

شکل ۸ الف. تغییرات نیروی برشی - جابه‌جایی افقی خاک-خاک در سربارهای مختلف

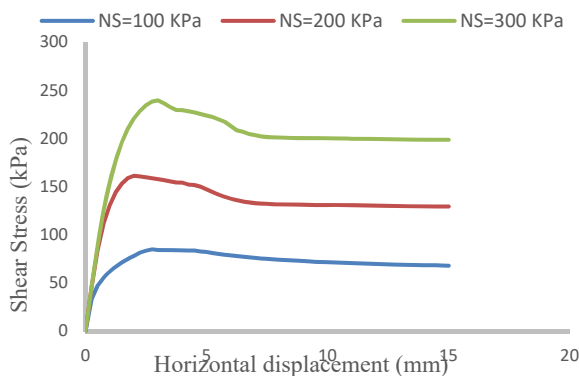


Fig. 8.a) Shear stress VS horizontal displacement in various normal stresses in soil-soil tests

شکل ۸ ب. تغییرات جابه‌جایی افقی - جابه‌جایی عمودی خاک-خاک در سربارهای مختلف

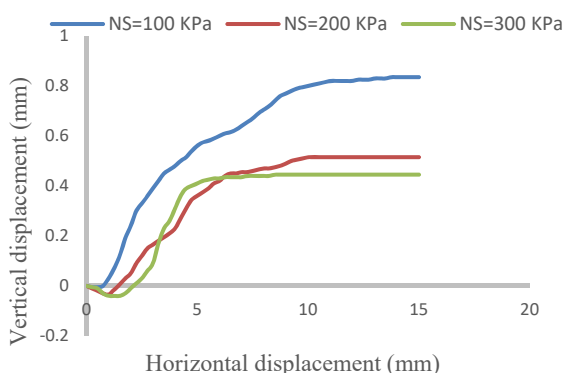


Fig. 8.b) Vertical displacement VS horizontal displacement in various normal stresses in soil-soil tests

است تا خاک کوبیده شده در جعبه به میزانی بیش‌تر از ارتفاع تک جعبه (۲۵ میلی‌متر) در نظر گرفته شود تا پس از نفوذ دوغاب، ناحیه پیوند در سطح برش تشکیل شود. برای به دست آوردن این مقدار آزمایش‌ها نمونه زیادی انجام شد و در نهایت مشخص شد که مقدار نفوذ وابسته به سه عامل دانه‌بندی خاک، درصد تراکم و فشار تزریق است. در این پژوهش، با توجه به دانه‌بندی یکنواخت خاک و درصد تراکم، میزان نفوذ در تست‌های ثقیلی و فشار تزریق ۱ بار به اندازه ۱ میلی‌متر و در تست‌های فشار تزریق ۲ بار به اندازه ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بنابراین، «ضخامت لایه پیوند»، میزان ارتفاع خاک است که ملات در آن نفوذ کرده و ناحیه پیوند در آن قسمت شکل می‌گیرد.

روند تعیین اثر فشار تزریق در تعیین میزان نفوذ با انجام «آزمون و خطا» بررسی و انتخاب شد. برای این منظور، در هر فشار تزریق خاص، سه عدد ۱ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر برای میزان نفوذ تخمین زده شد. سپس دوغاب روی خاک تزریق شد و فشار تزریق معین اعمال شد. پس از عمل‌آوری، عملیات برش انجام شد و نیروی برشی در هر تست ثبت شد. با مقایسه نتایج، ملاحظه کردیم که به عنوان نمونه در فشار تزریق ۱ بار، بیشترین نیروی برش در میزان نفوذ «۱ میلی‌متر» به دست آمده است و در دو حالت دیگر نیروی برشی نزدیک به برش خاک-خاک است. بنابراین، نتیجه گرفته شد که فشار تزریق ۱ بار، ملات تزریقی حدود ۱ میلی‌متر نفوذ کرده و ناحیه پیوند شکل گرفته است. همین عمل برای سایر فشارهای تزریق تکرار شد.

۴- نتایج

به منظور مطالعه رفتار برشی ناحیه پیوند خاک-دوغاب در آزمایش برش مستقیم، ۱۲ تست تعریف شد. از این تعداد، ۳ تست خاک-خاک بوده و ۹ تست نیز خاک-دوغاب است که با فشار سربارهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق‌های صفر (ثقیلی)، ۱ و ۲ بار انجام گرفت. در جدول (۳)، مشخصات تست‌های این پژوهش آمده است.

۴-۱- نتایج تست‌های خاک-خاک

نمودار تنش برشی - جابه‌جایی افقی تست‌های برش مستقیم خاک-خاک، با ۳ سربار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال در شکل

شکل ۱۰. الف. تغییرات نیروی برشی- جابه‌جایی افقی خاک- دوغاب در سربارهای مختلف و فشار تزریق صفر (ثقلی)

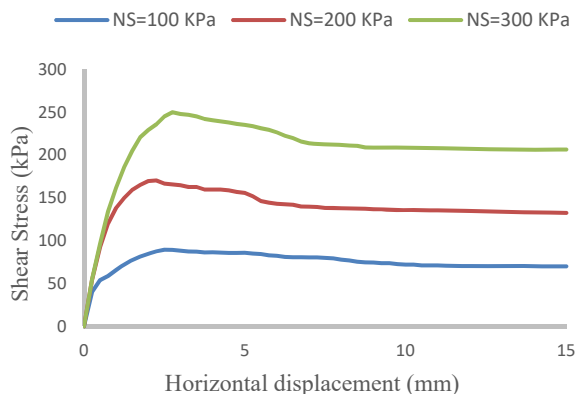


Fig. 10.a) Shear stress VS horizontal displacement in various normal stresses in GP=0

شکل ۱۰- ب. تغییرات جابه‌جایی افقی-جابه‌جایی عمودی خاک- دوغاب در سربارهای مختلف و فشار تزریق صفر (ثقلی)

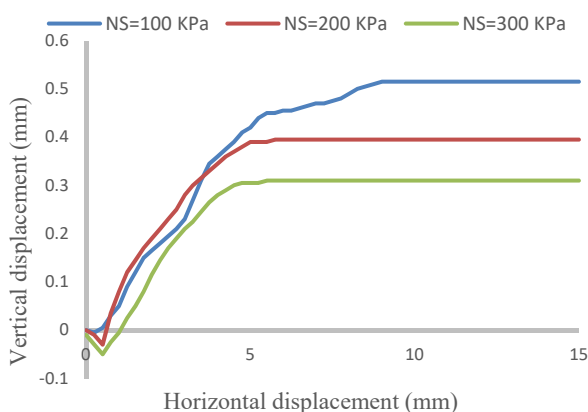


Fig. 10.b) Vertical displacement VS horizontal displacement in various normal stresses in GP=0

شکل ۱۱- الف. تغییرات نیروی برشی- جابه‌جایی افقی خاک- دوغاب در سربارهای مختلف و فشار تزریق ۱ بار

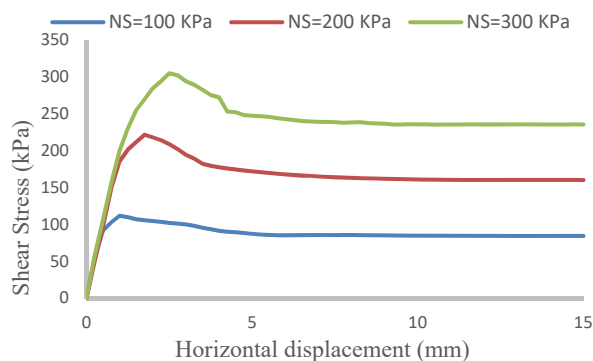


Fig. 11.a) Shear stress VS horizontal displacement in various normal stresses in 1 bar Grout pressure

با توجه به شکل ۸-الف، مشاهده می‌شود که رفتار برشی خاک-خاک، رفتاری شبیه به ماسه متراکم دارد. بدین معنی که در ابتدا دارای مقدار حداکثر بوده و در انتها دارای مقدار نهایی (پسماند) است. بدیهی است که با افزایش سربار، مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به شکل ۸-ب، مشاهده می‌شود که جابه‌جایی عمودی خاک، رفتار نشست-اتساع دارد. بدین معنی که در ابتدا کمی نشست داشته و سپس اتساع می‌یابد. این موضوع با توجه به شباهت رفتار خاک به ماسه متراکم تفسیر می‌شود. هم‌چنین دیده می‌شود که افزایش فشار سربار باعث کاهش مقدار نهایی اتساع می‌شود. در شکل (۹)، پوش گسیختگی مور کولمب خاک رسم شده است. بر این اساس، زاویه اصطکاک داخلی خاک ۳۸ درجه و چسبندگی آن ۷/۲۵ کیلوپاسکال به دست می‌آید.

شکل ۹. پوش گسیختگی مور کولمب خاک-خاک

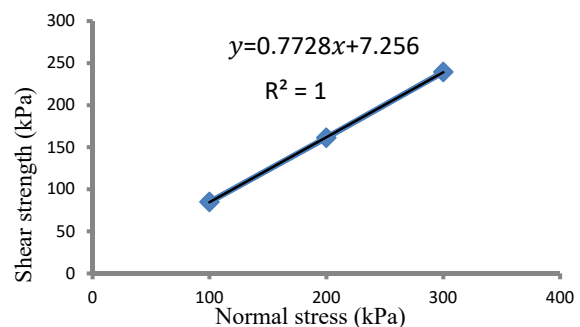


Fig. 9. Mohr-coulomb failure envelope for soil

۲-۴- نتایج تست‌های خاک-دوغاب

۲-۴-۱- بررسی اثر سربار بر مقاومت ناحیه پیوند

نمودارهای (۱۰، ۱۱ و ۱۲) اثر تغییرات سربار را به ترتیب در فشار تزریق ثقلی (صفر)، ۱ و ۲ بار نشان می‌دهد. شکل‌های الف، تغییرات تنش برشی را در ۳ سربار مختلف ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال برای فشارهای تزریق متناظر و شکل‌های ب، تغییرات جابه‌جایی عمودی را در این ۳ سربار و فشارهای تزریق متناظر نمایش می‌دهند.

با توجه به نمودارهای (۱۰-الف، ۱۱-الف و ۱۲-الف)، مشاهده می‌شود که فشار سربار، تاثیر مستقیم بر مقاومت برشی ناحیه پیوند دارد؛ به گونه‌ای که افزایش فشار سربار اعمالی بر جعبه برش، منجر به افزایش مقاومت حداکثر و مقاومت نهایی (پسماند) ناحیه پیوند می‌شود. به عنوان نمونه، با ۲ برابر شدن سربار، مقاومت برشی بیشینه ناحیه پیوند تقریباً ۱/۹ برابر شده است و با ۳ برابر شدن سربار، مقاومت برشی بیشینه تقریباً ۲/۸ برابر شده است. همچنین با توجه به نمودارهای (۱۰-ب، ۱۱-ب و ۱۲-ب)، مشاهده می‌شود در پیوند خاک-دوغاب نیز افزایش فشار سربار با افزایش فشار تزریق باعث کاهش مقدار اتساع نمونه و افزایش نشست اولیه آن می‌شود.

۴-۲-۲- بررسی اثر فشار تزریق بر مقاومت ناحیه پیوند

نمودارهای (۱۳، ۱۴ و ۱۵) اثر تغییرات فشار تزریق (ثقلی، ۱ بار و ۲ بار) را به ترتیب در سربارهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد.

شکل ۱۳. تغییرات نیروی برشی - جابه‌جایی افقی خاک-دوغاب در فشار

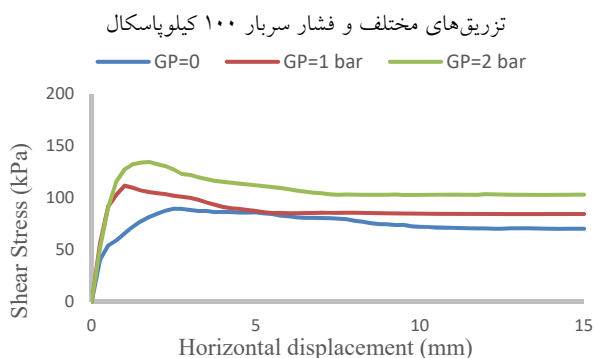
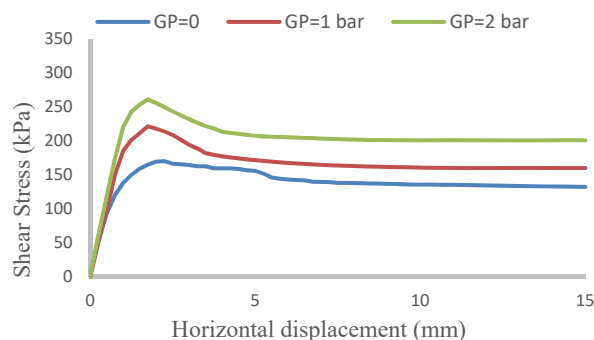


Fig. 13) Shear stress VS horizontal displacement in various Grout pressure & 100 kPa NS

شکل ۱۴. تغییرات نیروی برشی - جابه‌جایی افقی خاک-دوغاب در فشار

تزریق‌های مختلف و فشار سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۱۱-ب. تغییرات جابه‌جایی افقی-جابه‌جایی عمودی خاک-دوغاب در سربارهای مختلف و فشار تزریق ۱ بار

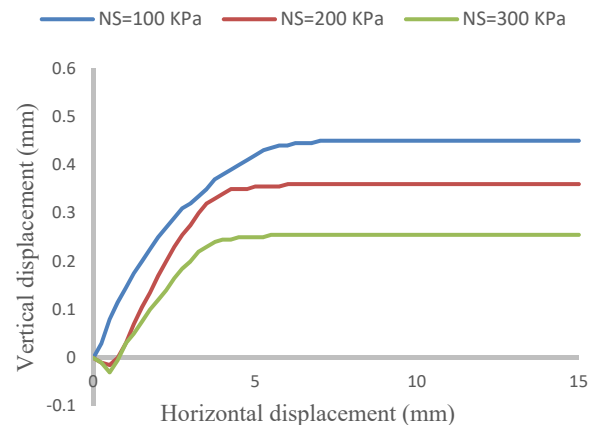


Fig. 11.b) Vertical displacement VS horizontal displacement in various normal stresses in GP=1

شکل ۱۲-الف. تغییرات نیروی برشی - جابه‌جایی افقی خاک-دوغاب در سربارهای مختلف و فشار تزریق ۲ بار

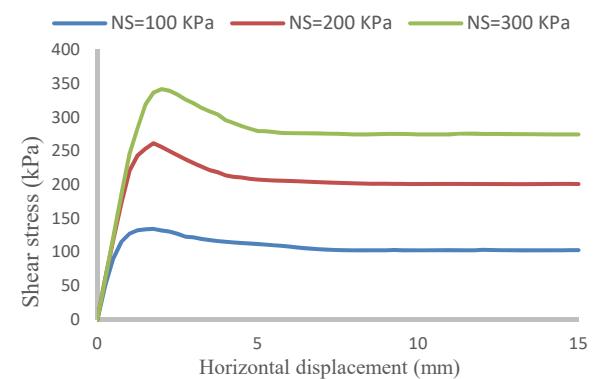


Fig. 12.a) Shear stress VS horizontal displacement in various normal stresses in 2 bar Grout pressure

شکل ۱۲-ب. تغییرات جابه‌جایی افقی-جابه‌جایی عمودی خاک-دوغاب در سربارهای مختلف و فشار تزریق ۲ بار

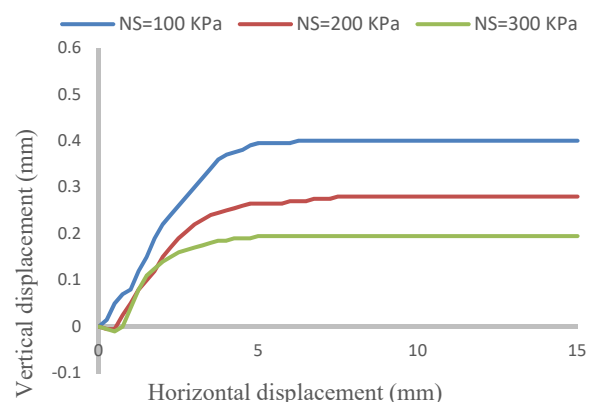


Fig. 12.b) Vertical displacement VS horizontal displacement in various normal stresses in GP=2

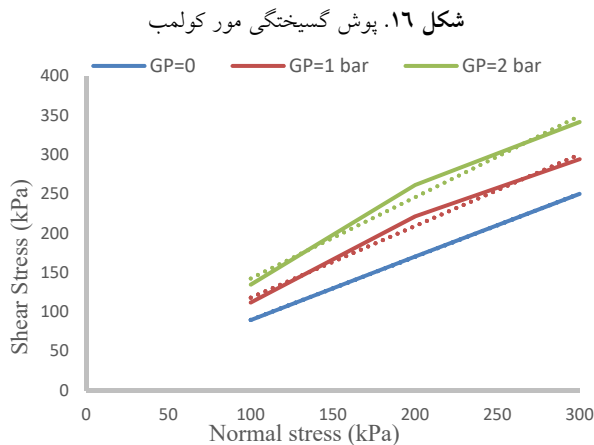


Fig. 16. Mohr-coulomb failure envelope

جدول ۵- زاویه اصطکاک و چسبندگی در فشار تزریق‌های متفاوت

(kPa) C	(deg) ϕ	
9.3	38.8°	GP=0
26.6	42.4°	GP=1
38.8	45.9°	GP=2
7.25	38°	Soil-Soil

Table 5. Friction angle and adhesion at different GP

با توجه به پوش گسیختگی مور کولمب شکل (۱۶) و جدول (۵)، مشاهده می‌شود که افزایش فشار تزریق، هم باعث افزایش چسبندگی و هم زاویه اصطکاک خاک-دوغاب شده است. با این حال، دیده می‌شود که افزایش چسبندگی، بسیار قابل ملاحظه‌تر از افزایش زاویه اصطکاک است. به عبارت دیگر، افزایش فشار تزریق ضمن اثرگذاری بیش‌تر بر چسبندگی، مقاومت ناحیه پیوند را افزایش داده است. از شکل (۱۶) ملاحظه می‌شود که با افزایش فشار سربار (برای فشار تزریق بالا)، نرخ افزایش مقاومت برشی پیوند خاک-دوغاب کاهش می‌یابد.

۴-۲-۴- ارائه رابطه‌ای برای مقاومت برشی پیوند

با رسم نمودار مقاومت برشی گسیختگی ناحیه پیوند (τ_f) در برابر فشار تزریق (P_g)، در سربارهای مختلف دیده می‌شود که این نمودار خطی بوده و شیب آن در فشار سربارهای بالاتر از ۱۰۰ کیلوپاسکال، با هم برابر است (شکل ۱۷). بنابراین می‌توان رابطه‌ای برای تخمین مقاومت برشی ناحیه پیوند که تابعی از فشار تزریق و فشار سربار اعمالی است ارائه نمود. بر این اساس، روابط ذیل برای مقاومت برشی پیوند خاک ماسه‌ای - دوغاب در آزمایش برش مستقیم پیشنهاد می‌شود:

الف- فشار سربار تا ۱۰۰ کیلوپاسکال:

Fig. 14) Shear stress VS horizontal displacement in various Grout pressure & 200 kPa NS

شکل ۱۵. تغییرات نیروی برشی - جابه‌جایی افقی خاک-دوغاب در فشار

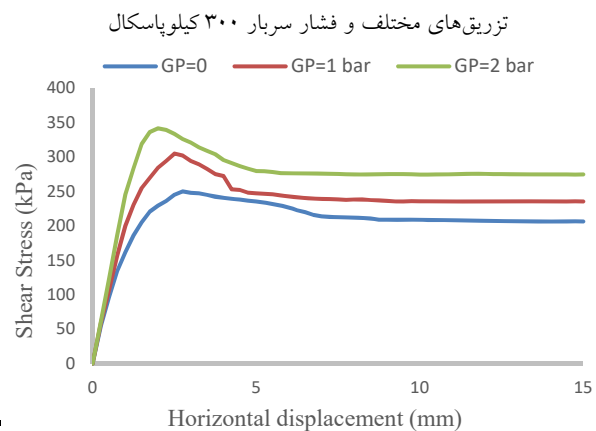


Fig. 15) Shear stress VS horizontal displacement in various Grout pressure & 300 kPa NS

با توجه به منحنی‌های فوق، مشاهده می‌شود که افزایش فشار تزریق دوغاب، باعث افزایش مقاومت برشی حداکثر و مقاومت برشی نهایی (پسماند) ناحیه پیوند می‌شود. جدول (۴)، مقادیر مقاومت برشی حداکثر ناحیه پیوند را ارائه می‌دهد:

جدول ۴. مقادیر مقاومت برشی حداکثر ناحیه پیوند (kPa)

NS=300	NS=200	NS=100	
250	170	89	GP=0
305	222	112	GP=1
342	261	135	GP=2

Table 4. Max shear stress of interface

مشاهده می‌شود که با افزایش فشار تزریق از حالت ثقلی به ۱ بار در سربارهای ثابت، مقاومت برشی ناحیه پیوند، به صورت میانگین ۲۵ درصد افزایش پیدا می‌کند. در حالی که با افزایش فشار تزریق از ۱ بار به ۲ بار، این عدد به ۱۷ درصد می‌رسد. بنابراین، به نظر می‌رسد که در آزمایش برش مستقیم خاک-دوغاب، با افزایش فشار تزریق از ۱ بار به ۲ بار، مقاومت برشی ناحیه پیوند نرخ رشد کمتری نسبت به افزایش فشار تزریق از صفر به ۱ بار را نشان می‌دهد.

۴-۲-۳- مقایسه پوش گسیختگی مور کولمب

پوش گسیختگی برای پیوند خاک-دوغاب به ازا فشارهای تزریق مختلف در شکل ۱۶ و پارامترهای مقاومتی متناظر در جدول ۵ ارائه شده است.

جانمایی شده است. با انجام عملیات تزریق در داخل چال و گذشت ۷۲ ساعت، نیل مورد آزمایش تحت سربار معین قرار گرفته و سپس توسط جک هیدرولیکی بیرون کشیده می‌شود. به این ترتیب مقاومت ناحیه پیوند دوغاب اطراف نیل و خاک مورد سنجش قرار گرفت. دستگاه آزمایش استفاده شده در این آزمایش‌ها در شکل (۲۰) نشان داده شده است.

شکل ۱۸. نمودار نیرو - تغییر شکل در فشار تزریق ۱ بار و فشار سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال بدست آمده از آزمایش بیرون کشش [5]

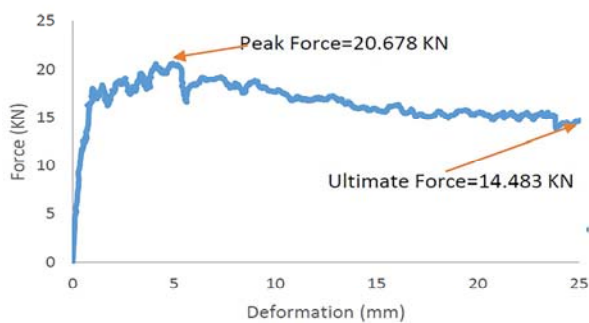


Fig. 18. Force VS displacement at GP=0 & NS=100 (Pullout test) [5]

شکل ۱۹. نمودار نیرو - تغییر شکل در فشار تزریق ۱ بار و فشار سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال بدست آمده از آزمایش بیرون کشش [5]

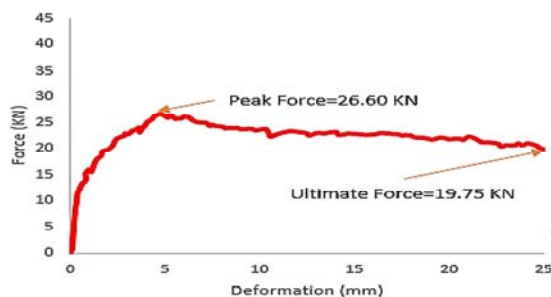


Fig. 19. Force VS displacement at GP=1 & NS=100 (Pullout test) [5]

شکل ۲۰. دستگاه آزمایش بیرون کشش نیل [5]



Fig. 20. Instrument of the pullout test [5]

$$\tau_f = 0.225P_g + 0.85q \quad (1)$$

ب- فشار سربار بالاتر از ۱۰۰ کیلوپاسکال:

$$\tau_f = 0.45P_g + 0.85q \quad (2)$$

فشار تزریق و q فشار سربار با کیلوپاسکال است.

تاکید می‌شود که روابط (۱) و (۲) روابطی می‌باشد که با توجه به آزمایش‌های محدود انجام شده در این پژوهش بدست آمده است. برای تدقیق روابط، لازم است پژوهش‌های گسترده‌تری در این خصوص انجام گیرد.

شکل ۱۷. منحنی فشار تزریق - تنش برشی ناحیه پیوند

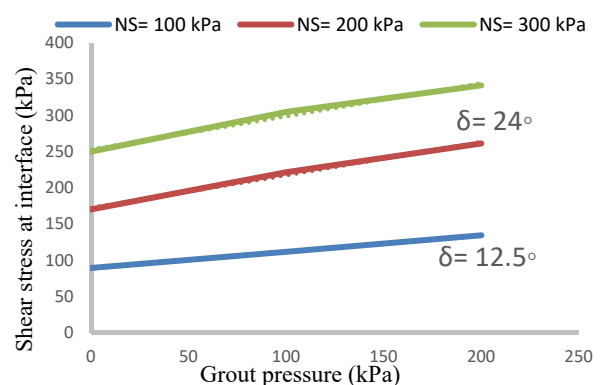


Fig. 17. Grout pressure VS Shear stress at interface

۴-۲-۵- درستی آزمایشی نتایج برش مستقیم خاک - دوغاب با آزمایش بیرون کشش

یکی از هدف‌های این پژوهش آن است که به بررسی آزمایش برش مستقیم به عنوان تقریبی مناسب برای تعیین مقدار مقاومت برشی ناحیه پیوند پردازد. بر همین اساس، نتایج به دست آمده از این تست‌ها با دو آزمایش بیرون کشش مقایسه می‌شود تا مشخص شود که آیا آزمایش برش مستقیم خاک - دوغاب تزریق در محدوده درستی حرکت می‌کند یا خیر. در زیر نتایج دو آزمایش بیرون کشش، مستخرج از پایان‌نامه بهزادیان [5] آورده شده است (شکل‌های ۱۸ و ۱۹).

دستگاه بیرون کشش نیل موجود در دانشگاه تربیت مدرس که در سال ۱۳۹۵ توسط بهزادیان [5] طراحی و ساخته شده است، قابلیت مدل‌سازی فیزیکی ۱ متر نیل را تحت تغییرات فشار سربار و فشار تزریق مختلف دارد. بهزادیان [5] در آزمایش‌های خود از ماسه فیروزکوه کد ۱۶۱ (همان خاک مورد استفاده در این پژوهش) استفاده کرده است. در این آزمایش‌ها میلگرد با قطر ۳۲ به طول ۱ متر به عنوان نیل، در داخل چال از پیش تعبیه شده،

۱- با مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش برش مستقیم خاک-دوغاب با آزمایش بیرون کشش دیده می شود که اعداد در محدوده قابل قبولی است.

۲- منحنی تنش برشی - جابه جایی افقی به دست آمده در تست های برش مستقیم، رفتاری شبیه به همین منحنی در تست های بیرون کشش دارد.

۳- با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده شد که منحنی تنش برشی - جابه جایی افقی در تست های خاک-دوغاب رفتاری شبیه به همین منحنی در تست های خاک-خاک دارد.

۴- مقاومت برشی ناحیه پیوند با افزایش فشار سربار و فشار تزریق، افزایش می یابد. در این میان، تغییرات فشار سربار، اثر مستقیم و قابل ملاحظه ای بر مقاومت برشی ناحیه پیوند دارد. همچنین اثر افزایش فشار تزریق در تغییر آن از مقدار صفر به ۱ بار، چشمگیرتر بود.

۵- افزایش فشار سربار با افزایش فشار تزریق در پیوند خاک-دوغاب، باعث کاهش اتساع و افزایش نشست می شود. ۶- افزایش فشار تزریق با افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی پیوند خاک و دوغاب باعث افزایش مقاومت برشی می شود. در این بین اثر چسبندگی غالب است.

۷- با افزایش فشار سربار (برای فشارهای تزریق بالا)، نرخ افزایش مقاومت برشی پیوند خاک-دوغاب کاهش می یابد.

۸- نسبت تخلخل، بیشینه اندازه دانه های خاک، درصد تراکم و درصد رطوبت، بر میزان نفوذ دوغاب در داخل خاک تاثیرگذار است. در این پژوهش، با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۳-۳ (ضخامت لایه پیوند)، میزان نفوذ دوغاب در داخل خاک، با توجه به شرایط آزمایش و خاک به دست می آید.

۹- در این پژوهش، مشاهده شد که نمودار تنش برشی گسیختگی ناحیه پیوند در برابر فشار تزریق، خطی است. بنابراین رابطه ای برای تخمین تنش برشی ناحیه پیوند که تابعی از فشار سربار و فشار تزریق است ارائه شد.

با تقسیم مقادیر نیرو در نمودارهای فوق بر سطح جانبی نیل که برابر ۰/۳۱۴۱ متر مربع است، می توان مقادیر تنش برشی ناحیه پیوند در آزمایش بیرون کشش را به دست آورد. این مقادیر در جدول شماره (۶) آورده شده است.

جدول ۶. مقاومت برشی حداکثر ناحیه پیوند در آزمایش بیرون کشش برای فشار سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال

Max stress (kPa)	Max force (kN)	Grout pressure (bar)
65.9	20.7	0
84.7	26.6	1
112	35.18	2

Table 6. Max force and stress in pullout test for the overburden 100 kPa

در جدول ۷، مقایسه ای بین نتایج آزمایش بیرون کشش و برش مستقیم ارائه شده است. مقدار n در این جدول، با توجه به رابطه (۳) بدست می آید.

$$n = \frac{\text{مقاومت برشی پیوند در آزمایش برش مستقیم}}{\text{مقاومت برشی پیوند در آزمایش بیرون کشش}} \quad (۳)$$

جدول ۷. مقایسه مقاومت برشی ناحیه پیوند در آزمایش بیرون کشش و

برش مستقیم برای فشار سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال

n	Shear strength in pullout test (kPa)	Shear strength in direct shear test (kPa)	Grout pressure (bar)
1.3	65.9	89.4	0
1.3	84.7	111.7	1
1.2	112	135	2

Table 7. Interface shear strength in direct shear and pullout test for the overburden 100 kPa

همان گونه که ملاحظه می شود، در صورتی که اعداد به دست آمده از آزمایش برش مستقیم بر اعداد به دست آمده از آزمایش بیرون کشش تقسیم شود، نسبت به دست آمده تقریباً یک مقدار ثابت است. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که مقادیر حاصل از آزمایش برش مستقیم، همواره نسبتی مشخصی از نتایج آزمایش بیرون کشش است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مقاومت برشی ناحیه پیوند خاک ماسه ای-دوغاب در آزمایش برش مستقیم بررسی شد و تاثیر پارامترهای موثر بر آن ارزیابی شد. مهم ترین نتایج مستخرج از این پژوهش در زیر ارائه می شود:

۶- مراجع

- [9] Seo H.-J., Lee I.-M., & Lee S.-W. 2014 Optimization of soil nailing design considering three failure modes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (2), pp 488-496.
- [10] Conti R., De Sanctis L. & Viggiani G.M.B. 2012 Numerical modelling of installation effects for diaphragm walls in sand. *Acta Geotechnica*, 7 (3), pp 219-237.
- [11] Morris J. D. 1999 Physical and numerical modeling of grouted nails in clay. University of Oxford.
- [12] Chu L. M. 2003 Study on the interface shear strength of soil nailing in completely decomposed granite (CDG) soil. The Hong Kong Polytechnic Univ., Hong Kong.
- [13] Su L.-J., Yin J.-H., & Zhou W.-H. 2010 Influences of overburden pressure and soil dilation on soil nail pull-out resistance. *Computers and Geotechnics*, 37(4), pp 555-564.
- [14] Hossain M.A. & Yin J.H. 2014 Behavior of a pressure-grouted soil-cement interface in direct shear tests. *International Journal of Geomechanics*, 14(1), pp 101-109.
- [15] ASTM, C 188. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. *Annual Book of ASTM Standards* 4.
- [16] ASTM, C 109. 2008 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. *Annual Book of ASTM Standards* 4.
- [17] ASTM, D. 3-9. 2011 Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. D3080 / D3080 M.
- [18] ASTM, D7181 2011 Method for consolidated drained triaxial compression test for soils. *Annual Book of Standards* 4.
- [1] Rawat S., & Gupta A.K. 2018 Testing and Modelling of Screw Nailed Soil Slopes. *Indian Geotechnical Journal*, 48 (1), pp 52-71.
- [2] Heidarzadeh H. & Oliaei M. 2016 Evaluation of the effect of yield surface shape on static and dynamic analysis of geotechnical structures. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 32.2 (1.2), pp 15-26.
- [3] Tang Y. & Zhao X. 2016 Field testing and analysis during top-down construction of super-tall buildings in Shanghai. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20 (2), pp 647-661.
- [4] Chu L. M. & Yin J. H. 2005 Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **131**(9), pp 1097-1107.
- [5] Behzadian A. 2016 Analysis the effect of grouting pressure, overburden pressure and matric suction on soil nail pullout resistance. M.S. thesis, Tarbiat Modares University.
- [6] Heidarzadeh H. 2018 Evaluation of Modified Cam-Clay Constitutive Model in FLAC and its Development by FISH Programming. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1521752>
- [7] Heidarzadeh H. & Oliaei M. 2018 An Efficient Generalized Plasticity Constitutive Model with Minimal Complexity and Required Parameters. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22 (4), pp 1109-1120.
- [8] Heidarzadeh H. & Oliaei M. 2018 Development of a generalized model using a new plastic modulus based on bounding surface plasticity. *Acta Geotechnica*, 13 (4), pp 925-941.

Experimental study of pressure grouted soil interface resistance by direct shear tests

Alireza Rahimbasiri¹, Mohammad Oliaei^{*2}, Heisam Heidarzadeh³

1. M.Sc. Student (Geotechnical Engineering), Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University
2. Assistant Professor (Geotechnical Engineering), Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University
3. Assistant Professor (Geotechnical Engineering), Department of civil Engineering, Faculty of Technology **and Engineering, Shahrekord University**

M.Olyaei@modares.ac.ir

Abstract

With increasing urban population, the need for underground spaces increases and deep excavation is an inevitable affair in civil projects. deep tunnels and large buildings require deep excavations, which is a must use some techniques for stabilize it. grouted soil nail is a popular reinforcement to stabilize slopes, excavations and retaining walls. This method has been introduced to Hong Kong in the mid-1980s and has become an alternative solution to the conventional slope stabilizing methods such as compaction, earth retaining structure, or reduced inclination of the slope, etc. this method is based on sewing the potential failure wedge of soil on the stable soil using some inactive (un-prestressed) elements. the shear strength-displacement behavior at the interface between the grouted nail and surrounding soil is an important parameter in design of various geotechnical engineering projects, for example, soil nails, retaining walls, shallow foundations, pile foundations, etc. in soil nail system, the most common method to measure the interface shear strength is pullout test. It is also possible to determine the interface strength based on the development of resistance between soil and grout in direct shear tests. However, accurate perception of the shear behavior in the connection area of the soil and grout is essential to reach an optimum design. In other words, the interaction between soil and grouted nail is necessary to design an optimum soil nail system. the most common method for determination grouted soil interface resistance is pullout test but there is another experiment that can yield acceptable results. The current study investigates the interface shear behavior between cement-grout and granular soil in direct shear test with different grout pressures (0 up to 2 bar) and different overburden pressures (100 up to 300 kPa). For this purpose, a number of direct shear tests are performed by modifying of the standard shear box for injection of grout. “Firozkooh” sand is used in this study. The soil is compacted to the relative density of 90 % and the slurry is sprayed with pressure on its surface. Furthermore, results of two pullout tests were used for verification. These pullout test have already been presented in another study with different normal stress and grout pressure. it is shown that the results of direct shear test and pullout test at interface are similar. this may indicate the proper function of direct shear test as a suitable choice alongside pullout test. It was observed that shear stress–displacement curves of the soil-grout interface in direct shear tests are similar to the soil-soil tests; which are classified under different grouting pressures. In addition, increasing grout pressure increases shear strength by increasing the angle of friction and bonding of soil and slurry. The effect of adhesion is dominant. it is shown that The interface shear stress under different grouting pressures is greater than the shear stress of soil under the same normal stresses. it is shown that grouting pressure and normal stress have influence on the behavior of soil-cement interface. Therefore, interface shear strength increases with increase in overburden and injection pressure. The variation of the interface shear strength is approximately linear versus grouting pressure. Finally, a formula is proposed for interface shear strength considering grouting pressure.

Keywords: Cement grout, Grouting pressure, Direct shear test, Shear strength of interfac