

مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر افزودنی منبسط‌شونده بر مقاومت بیرون‌کشش میخ - خاک ماسه‌یی

هادی نیک‌نژاد (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد علیایی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۷۱-۷۷

در این پژوهش، اثر افزودنی منبسط‌شونده و فشار تزریق بر مقاومت بیرون‌کشش میخ بررسی شده است. از پارامترهای مهم طراحی در روش میخ‌کوبی، مقاومت پیوند است که به‌طور چشم‌گیری تحت تأثیر فرایند تزریق است. فرایند تزریق به پارامترهای مختلفی مانند فشار تزریق، الگوریتم تزریق و اجزای ملات تزریقی وابسته است؛ اما به دلیل کمبود مطالعات انجام شده در مورد تأثیر اجزای ملات تزریقی بر مقاومت پیوند، در تحقیق حاضر اثر افزودنی منبسط‌شونده در ملات، بر مقاومت باند به‌وسیله‌ی دستگاه بیرون‌کشش آزمایشگاهی بررسی شده است. تمام مراحل اجرای روش میخ‌کوبی در آزمایشگاه توسط دستگاه بیرون‌کشش به‌طور کامل مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از افزودنی منبسط‌شونده به میزان معین و بهینه سبب افزایش مقاومت پیوند در نمونه‌ی آزمایشگاهی می‌شود و استفاده‌ی بیش از حد از افزودنی منبسط‌شونده تأثیر معکوس بر روی مقاومت پیوند می‌گذارد. همچنین، افزایش فشار تزریق عامل مهم و مؤثری است که منجر به افزایش در مقاومت پیوند می‌شود.

واژگان کلیدی: روش میخ‌کوبی، دستگاه بیرون‌کشش، ملات منبسط‌شونده، فشار تزریق.

hadi.nicknejad@modares.ac.ir
m.olyaei@modares.ac.ir

۱. مقدمه

می‌توان با تغییر در اجزای تشکیل‌دهنده‌ی ملات این مشکل را برطرف کرد. افزودنی منبسط‌شونده در مواردی که افت حجم ناشی از آب‌اندازی ملات قابل صرف‌نظر کردن نیست، استفاده می‌شود. مواردی نظیر زیر صفحه‌ی ستون‌ها، نصب پیچ و میلگرد در بتن، فضای خالی پشت پوشش بتنی در تونل‌ها و غیره. بنابراین، استفاده از افزودنی منبسط‌شونده راهکاری برای مقابله با مشکل افت حجم دوغاب سیمانی در روش‌های میخ‌کوبی است. از این‌رو، در تحقیق حاضر به بررسی اثر افزودنی منبسط‌شونده بر مقاومت بیرون‌کشش میخ پرداخته می‌شود.

در زمینه‌ی مقاومت بیرون‌کشش میخ، موریس^[۱] با ساخت جعبه‌بی فولادی به بررسی اثر فشار سربار و نرخ سرعت بیرون‌کشش بر مقاومت بیرون‌کشش میخ در سخت لُندن برای حالات مختلف پرداخت و به این نتیجه رسید که با افزایش فشار سربار، مقاومت بیرون‌کشش هم در حالت بیشینه و هم در حالت نهایی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش سرعت بیرون‌کشش صرفاً باعث افزایش مقاومت بیشینه می‌شود. یین و ژو^[۲] نیز به بررسی اثر فشار تزریق و فشار سربار به وسیله‌ی جعبه‌ی فولادی به ابعاد $100 \times 84 \times 60$ سانتی‌متر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که فشار سربار تأثیر ناچیزی بر مقاومت بیرون‌کشش دارد؛ ولی فشار تزریق باعث افزایش مقاومت بیرون‌کشش می‌شود. کیم و همکاران^[۳] اثر فشار تزریق را برای یک تک میخ که به‌صورت قائم تعبیه شده بود، بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که

در سال‌های اخیر با گسترش زندگی شهری و افزایش حجم ساخت‌وسازها در مناطق پرتراکم شهری از یک طرف و نیز لزوم برآورده ساختن ضوابط و معیارهای شهرداری‌های مبنی بر تأمین پارکینگ و فضای مناسب برای تأسیسات مکانیکی از طرف دیگر، حفاری‌های و گودبرداری‌های قائم به‌جزئی مهم و جداناپذیر پروژه‌های ساختمانی تبدیل شده است. یکی از روش‌های نوین پادارسازی گودها، روش میخ‌کوبی است. در این روش گوه‌ی محرک خاک به وسیله‌ی اجزایی به ناحیه‌ی پشتی مقاوم دوخته می‌شود. سازوکار باربری، انتقال بار و مقاومت نهایی میخ‌ها در این روش اساساً تابع فصل مشترک خاک و ملات تزریقی (مقاومت پیوند) است. از طرفی مقاومت بیرون‌کشیدگی میخ تابع عوامل گوناگونی از جمله فشار تزریق، فشار سربار اعمالی، درصد رطوبت خاک، روش اجرا، ماتریس مواد تزریقی، نحوه‌ی حفاری و ... است. ملات تزریقی به کار رفته در بیشتر پروژه‌های عمرانی، مخلوطی از آب و سیمان به نسبت ۵/۵ است؛ اما یکی از نقطه‌ضعف‌های ملات‌های سیمانی کاهش حجم آن‌هاست که در اثر کاهش حجم ملات تزریقی در چال حفاری، پیوستگی بین ملات و خاک کاهش می‌یابد و در نتیجه مقاومت بیرون‌کشش میخ کاهش می‌یابد که

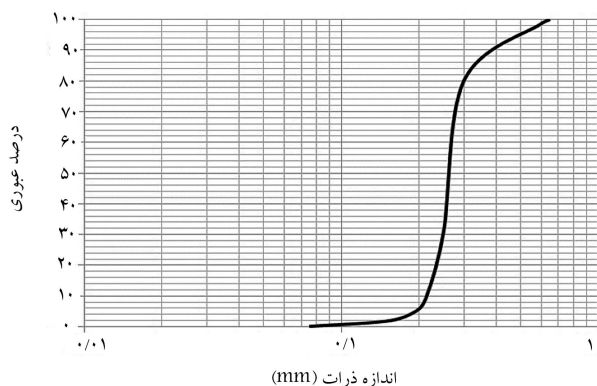
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۵/۲، اصلاحیه ۱۳۹۷/۸/۲۵، پذیرش ۱۳۹۷/۹/۱۸.

DOI:10.24200/J30.2018.51304.2394

جدول ۱. مشخصات خاک مصرفی.

زاویه‌ی اصطکاک (درجه)	چسبندگی (kPa)	رطوبت بهینه (درصد)	وزن مخصوص خشک کمینه (gr/cm^3) بیشینه (gr/cm^3)
۳۷	صفر	۹	۱٫۴ ۱٫۷



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک ۱۶۱ فیروزکوه.

جدول ۲. مشخصات ملات‌های مورد استفاده.

مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه (MPa)	درصد افزودنی منبسط شونده
۲۵٫۳	صفر
۲۱٫۹	۱
۱۸٫۳	۲
۱۳٫۱	۳

افزایش فشار تزریق باعث افزایش مقاومت بیرون‌کشش می‌شود. بی و همکاران^[۲] در سال ۲۰۱۷ با ساخت جعبه‌ی فولادی با افزودن اجزایی در طول میخ به بررسی اثر افزایش مقاومت اجزا بر مقاومت بیرون‌کشش میخ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تأثیر افزایش قطر توده‌ی سیمانی نسبت به افزایش طول میخ بر روی مقاومت پیوند بیشتر است. چاتو و همکاران^[۵] نیز با افزودن خرده‌فلز به ملات سیمانی به بررسی اثر آن بر مقاومت بیرون‌کشش پرداختند. نتایج حاصل بیانگر این نکته است که نیروی بیشینه در تمام نمونه‌های دارای خرده‌فلز به‌طور میانگین به میزان ۱۴ درصد نسبت به نمونه‌های بدون خرده‌فلز افزایش یافته است. هم‌چنین بهرآدیان و علیایی^[۶] به بررسی اثر فشار تزریق و فشار سربار و مکش بافتی بر مقاومت بیرون‌کشندگی میخ در خاک ماسه‌ای فیروزکوه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش فشار تزریق باعث افزایش چشم‌گیری در مقاومت پیوند می‌شود. هم‌چنین، افزایش فشار سربار تا حدی باعث افزایش مقاومت بیرون‌کشش می‌شود؛ علاوه بر آن افزایش یا کاهش درجه‌ی اشباع خاک باعث کاهش مقاومت پیوند می‌شود. با توجه به کمبود مطالعات محققان پیشین در حوزه‌ی اجزای ملات تزریقی و بررسی نشدن مشکل افت حجم ملات‌های تزریقی در روش‌های میخ‌کوبی و وجود نداشتن مطالعات آزمایشگاهی جامع درباره‌ی مقاومت بیرون‌کشش میخ در مقیاس واقعی در ایران، در این پژوهش به بررسی اثر افزودنی منبسط‌شونده و فشار تزریق پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. شناسایی مصالح

۲.۱.۱. مشخصات خاک مصرفی

در این تحقیق از ماسه‌ی کد ۱۶۱ فیروزکوه که خاک استاندارد برای بیشتر پژوهش‌هاست، استفاده شده است. برای دستیابی به مشخصات خاک مورد نظر، آزمایش‌های مختلف شناسایی خاک نظیر وزن مخصوص ویژه^[۷]، برش مستقیم^[۸]، تراکم استاندارد^[۹] مطابق با استانداردهای موجود در آیین‌نامه‌ی ASTM انجام شد. منحنی دانه‌بندی به‌دست آمده برای خاک مورد نظر در شکل ۱ ارائه شده است. مقادیر D_{10} ، D_{30} ، D_{50} ، D_{60} این خاک به‌ترتیب برابر ۰٫۲۱۲، ۰٫۲۵۱، ۰٫۲۶۳ و ۰٫۲۸۰ است. بنابراین، این خاک دارای ضریب یکنواختی ۱٫۳۲ و ضریب انحنای ۱٫۰۶ است. بر طبق رده‌بندی متحد رده‌ی خاک SP است. هم‌چنین، پارامترهای مشخصه‌ی خاک ماسه‌ی کد ۱۶۱ در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۱.۲. مشخصات ملات مصرفی

برای ساخت ملات تزریقی از سیمان نوع ۲ استفاده شد. آزمایش مقاومت فشاری ملات بر روی نمونه‌های مختلف مطابق با استاندارد ASTM C-۱۰۹^[۱۰] توسط دستگاه UTM موجود در آزمایشگاه سازه‌ی دانشگاه تربیت مدرس صورت پذیرفته است. جدول ۲ بیانگر مشخصات ملات‌های مورد استفاده در آزمایش بیرون‌کشش میخ است. هم‌چنین شکل ۲ نمایی از نمونه‌های فاقد افزودنی و دارای افزودنی ۱ درصد است. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است افزودنی منبسط‌شونده سبب ایجاد حفره‌هایی در داخل ملات شده است. در جدول ۲ مشاهده می‌شود که

شکل ۲. نمایی از ملات‌های مورد استفاده در آزمایش (نمونه‌ی بالا دارای افزودنی ۱٪ و نمونه‌ی پایین فاقد افزودنی است).

مقاومت فشاری ملات با افزایش افزودنی کاهش می‌یابد. این امر ناشی از آن است که با افزایش افزودنی، میزان حفره‌های موجود در ملات افزایش می‌یابد و منجر به عدم پیوستگی بافت ملات می‌شود.

۳.۱.۲. مشخصات میلگرد مصرفی

در آزمایش بیرون‌کشش میخ از میلگرد قطر ۲۸ میلی‌متر A۳ استفاده شد. مشخصات این میلگرد مطابق جدول ۳ است.



شکل ۴. انتقال خاک مرطوب به وان پلاستیکی.



شکل ۵. جای گذاری لوله فولادی و میخ در تراز مورد نظر.

تهیه نمونه به این روش دارای مزایای زیادی است که می توان به همگنی کامل نمونه در لایه های مختلف و عدم وقوع جداشدگی دانه ها از همدیگر اشاره کرد.

بدین صورت کل نمونه خشک خاک به وزن ۱۲۲۴ کیلوگرم به ۹ قسمت تقسیم و هریک با رطوبت بهینه ۹ درصد به طور کامل مخلوط شد. سپس طبق توصیه گرپرساد و همکاران^[۱۲] کل خاک مرطوب به وان پلاستیکی انتقال داده شد و ارتباط رطوبتی آن به طور کامل با محیط به مدت ۲۴ ساعت قطع شد (شکل ۴).

پس از تعادل رطوبتی و مطابق با استاندارد ASTM D-۶۹۸^[۹]، توده های خاک در ۹ قسمت با ارتفاع ۱۰ سانتی متر به داخل مخزن خاک منتقل و هر لایه توسط چکش به طور کامل متراکم شد تا در ارتفاع مورد نظر جای گیرد. برای ایجاد درگیری لازم بین لایه های خاک، سطح هر لایه قبل از ریختن لایه بعدی خراشیده می شد.

۳.۳.۲. تعبیه ی چال حفاری

برای ایجاد چال حفاری به منظور تزریق، از چال به قطر ۱۰ سانتی متر استفاده شد. با توجه به ماهیت خاک مورد بررسی که چسبندگی ندارد و مشکلات روش حفاری دورانی از روش غلاف گذاری استفاده شد. بدین ترتیب که در تراز ۴۰ سانتی متری از کف یک عدد غلاف فولادی با مقاومت بالا و قطر ۱۰ سانتی متر و ضخامت ۸ میلی متر (برای ایجاد صلبیت لازم و عدم تغییر شکل در اثر سربار) استفاده شد و میخ فولادی در داخل غلاف فولادی قرار داده شد (شکل ۵).

۴.۳.۲. اعمال سربار

پس از اتمام مراحل خاک ریزی و تراکم آن، کیسه های هوای لاستیکی در حالتی که در زیر آن یک تخته چوب MDF قرار داده شده بود، بر روی تراز نهایی خاک قرار گرفت؛ علت استفاده از تخته چوب یکنواخت سازی توزیع سربار است. سپس درب دستگاه بسته شد و توسط تعدادی سیم بکسل ضخیم محکم شد تا صلبیت لازم را

جدول ۳. مشخصات میلگرد مصرفی.

ضریب پواسون	مدول کشسانی (MPa)	نوع	قطر (mm)
۰/۳	۲۰۰۰۰۰	A۳	۲۸



شکل ۳. نمای جانبی دستگاه بیرون کشش.

۲.۲. دستگاه بیرون کشش

برای تعیین ظرفیت بیرون کشش طول مشخصی از یک میخ، یا به تعبیری همان مقاومت فصل مشترک میخ - خاک، دستگاهی در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شده است. این دستگاه به طور کلی توانایی بررسی اثر متغیرهای گوناگون از جمله فشار سربار، فشار تزریق، نوع خاک، مصالح تزریقی، سرعت بارگذاری و غیره را بر ظرفیت بیرون کشش میخ دارد. دستگاه بیرون کشش میخ شامل پنج قسمت اصلی است که عبارتند از: محفظه ی قرارگیری نمونه ی خاک، تجهیزات اعمال سربار، تجهیزات اعمال تزریق، تجهیزات اعمال بارگذاری و سامانه ی داده برداری و حس گرها. ابعاد محفظه، به طول ۱۰۰ و عرض ۸۰ و ارتفاع ۹۰ سانتی متر است که این ابعاد با مدل سازی در نرم افزار آباکوس و توصیه ی سایر محققان نظیر بین و ژو^[۱۲]، چو و بین^[۱۱]، گرپرساد و همکاران^[۱۲] و دیگران به دست آمده اند. نمای جانبی دستگاه در شکل ۳ قابل مشاهده است.

۳.۲. فرایند انجام آزمایش های بیرون کشش

۱.۳.۲. تعیین مقدار خاک مورد نیاز

در این پژوهش با استفاده از مفاهیم مربوط به وزن مخصوص خشک و تراکم مطابق با استاندارد ASTM D-۷۱۸۱ برای ساخت نمونه های سه محوری در خاک دانه بی^[۱۳] و استاندارد ASTM D-۶۷۰۶ برای آزمون های بیرون کشش ژئوستتیک ها^[۱۴]، نسبت به تهیه ی نمونه ی خاک اقدام شد. با توجه به وزن مخصوص به دست آمده برای این نوع خاک و با در نظر گرفتن حجم مخزن خاک که برابر ۰/۷۲ متر مکعب است، مقدار خاک خشک مورد نیاز برای رسیدن به وزن مخصوص خشک مورد نظر، برابر ۱۲۲۴ کیلوگرم به دست آمد.

۲.۳.۲. آماده سازی نمونه ی خاک

برای بازسازی نمونه ی خاک روش های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می توان به روش های انتقال خشک با قیف، رسوب گذاری با آب، انتقال دوغابی، ریزش خشک، تراکم مرطوب و ریزش مرطوب اشاره کرد. با توجه به فرضیات مسئله و محدودیت ها، در این تحقیق از روش تراکم مرطوب استفاده شده است. ایشهارا^[۱۵] نشان داد که

برای ایجاد واکنش نیرویی در اثر تحت فشار قرار گرفتن کیسه‌ی هوا فراهم کند. سپس جریان هوا به داخل کیسه‌ی هوا منتقل شد و با استفاده از تنظیم‌کننده‌ی فشار، فشار اعمالی کنترل شد.

۵.۳.۲. بیرون کشیدن غلاف، ایجاد چال و تزریق

پس از گذشت ۲۴ ساعت و تعادل تنش‌های وارده مطابق با پیشنهاد بین و ژو^[۱۲]، گربرساد و همکاران^[۱۳] و از آن‌جایی که نمونه‌ی خاک کاملاً دانه‌ی بی بود و زمان اندکی برای تعادل نیاز داشت، برای بیرون آوردن غلاف با استفاده از جرثقیل دستی اقدام شد. پس از بیرون کشیدن غلاف، چال در محل خود ایجاد می‌شود؛ شکل ۶ با ایجاد چال، آزادسازی تنش در اثر باربرداری توده‌ی خاک محل چال، در اجزای خاک مجاور چال رخ می‌دهد. پایداری کلی دیواره‌ی چال عمدتاً در اثر وقوع پدیده‌ی قوس‌زدگی تفسیرپذیر است. در ادامه، میل‌گرد ۲۸ در وسط چال قرار داده می‌شود. سپس درب‌های ابتدایی و انتهایی دستگاه برای آب‌بندی چال به‌دقت در محل خود نصب می‌شوند. پس از آن ملات تزریقی با نسبت آب به سیمان ۵/۰ مخلوط و به داخل سیلندر تزریق انتقال می‌یابد. در ادامه جریان هوای تحت فشار وارد مخزن می‌شود و فرایند تزریق آغاز می‌شود. پس از بر شدن چال و خروج ملات از شلنگ برگشت و حصول اطمینان از بر شدن چال، این شلنگ مسدود می‌شود تا فشار تزریق به مقدار مورد نظر برسد. فشار تزریق اعمالی به‌وسیله‌ی فشارسنج در خروجی متراکم‌کننده‌ی هوا تنظیم می‌شود. شکل ۷ نشان‌دهنده‌ی سیلندر تزریق و جزئیات آن است.

۶.۳.۲. بارگذاری

مطابق پیشنهاد FHWA مدت زمان ۷۲ ساعت برای گیرش کامل سیمان و شروع بارگذاری لازم است؛ اما طبق آزمایش مقاومت فشاری ملات انجام شده بر روی

نمونه‌های دارای افزودنی منبسط‌شونده این زمان افزایش پیدا می‌کند. بین و ژو^[۱۲]، مدت زمان ۱۲۰ ساعت را از شروع تزریق تا بارگذاری انتخاب کرده‌اند. از این‌رو، مدت زمان ۱۲۰ ساعت برای گیرش ملات و شروع آزمایش در نظر گرفته شد. در آزمایش‌های آزمایشگاهی عموماً از بارگذاری کنترل کرنش در آزمون‌های یکنواخت استفاده می‌شود. هم‌چنین، بر اساس پیشنهاد محققان قبلی از جمله بین و ژو^[۱۲]، گربرساد و همکاران^[۱۳]، هنگ و همکاران^[۱۶] و نیز آیین‌نامه‌ی ASTM D-۳۰۸۰ برای آزمون‌های برش مستقیم از روش کنترل کرنش با نرخ جابه‌جایی ۱ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. علاوه بر این، از آن‌جایی که مقاومت بیشینه در آزمون‌های بیرون‌کشش در جابه‌جایی‌هایی در محدوده‌ی ۱ تا ۵ میلی‌متر در آزمون‌های کنترل کرنش رخ می‌دهد^[۱۷، ۱۸]، جابه‌جایی نهایی ۲۵ میلی‌متر به‌عنوان حد نهایی بیرون‌کشش انتخاب شد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار Labview مقادیر نیروی بیرون‌کشش به همراه جابه‌جایی در سر میخ در طول آزمایش ثبت شد.

۳. نتایج

برای بررسی اثر افزودنی منبسط‌شونده بر مقاومت بیرون‌کشش میخ، ۴ آزمون برنامه‌ریزی شد که مشخصات هر آزمون در جدول ۴ آمده است. علاوه بر این، دو آزمون تکمیلی هم برای بررسی اثر فشار تزریق انجام شده است. فشار سربار ۲ بار به‌معنای ارتفاع ۱۰ متر خاک است. پس با ثابت در نظر گرفتن فشار سربار و فشار تزریق به بررسی اثر افزودنی منبسط‌شونده بر مقاومت بیرون‌کشش پرداخته شد. به‌منظور مقایسه‌ی نتایج با یکدیگر، پوش ۱ نقاط بیشینه‌ی نیروی بیرون‌کشش در شکل ۸ ارائه شده است.

از طرفی با تقسیم نیروی بیرون‌کشش در میخ‌ها بر سطح جانبی چال می‌توان نمودار تنش برشی متوسط را به‌دست آورد. این مقدار برابر مقاومت برشی فصل مشترک میخ - خاک است. شکل ۹ نشان‌دهنده‌ی نمودار تنش برشی متوسط برای درصدهای مختلف افزودنی منبسط‌شونده در فشار تزریق ۱۰۰ کیلو پاسکال است. آنچه از نمودارها دریافت می‌شود این است که با اضافه کردن افزودنی منبسط‌شونده، در ابتدا مقاومت بیرون‌کشش میخ افزایش می‌یابد. در میزان افزودنی ۱٪، مقاومت بیرون‌کشش به میزان ۱۵ درصد هم در حالت بیشینه و هم در حالت نهایی افزایش یافته است. با اضافه کردن بیشتر افزودنی به میزان ۱٪ دیگر (کلاً ۲٪)، مقاومت بیرون‌کشش نسبت به حالت قبل، در حالت بیشینه به میزان ۲ درصد افزایش یافته ولی در حالت نهایی به میزان ۳ درصد کاهش یافته است. در حالت افزودنی ۳ درصد، مقاومت در هر دو حالت کاهش چشم‌گیری داشته است.

جدول ۴. جدول آزمون‌ها.

شماره‌ی آزمون	فشار		درصد افزودنی
	تزریق (kPa)	سربار (kPa)	
۱	۱۰۰	۲۰۰	صفر
۲	۱۰۰	۲۰۰	۱
۳	۱۰۰	۲۰۰	۲
۴	۱۰۰	۲۰۰	۳
۵*	صفر	۲۰۰	۱
۶*	۲۰۰	۲۰۰	۱

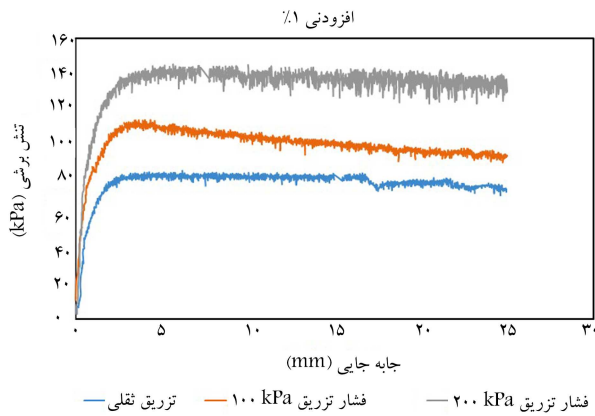
* آزمون‌های ۵ و ۶ برای بررسی اثر فشار تزریق توأم با افزودنی ۱ درصد انجام شده است.



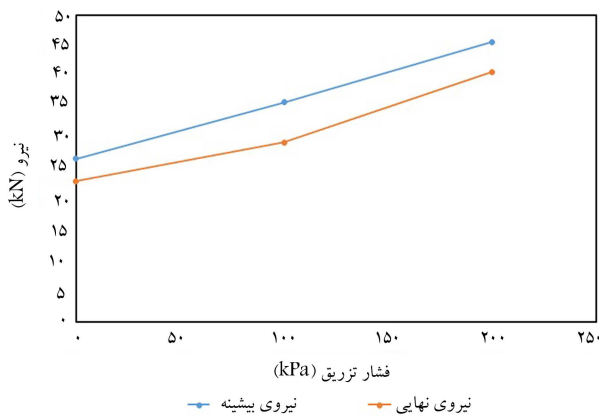
شکل ۶. چال ایجاد شده پس از خروج غلاف.



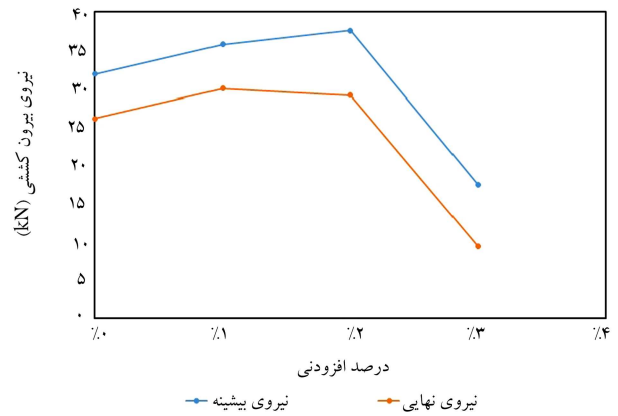
شکل ۷. مخزن تزریق.



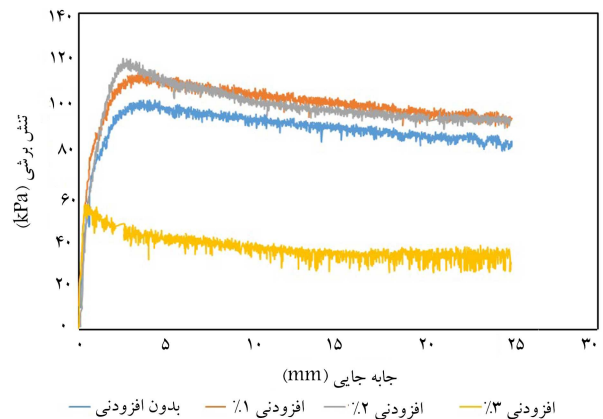
شکل ۸. نمودار نیرو- جابه جایی در حالت افزودنی ۱٪ و فشارهای تزریق مختلف.



شکل ۹. نمودار تنش برشی - جابه جایی برای درصدهای مختلف افزودنی.



شکل ۱۰. پوش نقاط بیشینه و نهایی نیروی بیرون کشش در حالت های مختلف درصد افزودنی.



شکل ۱۱. پوش نیروهای بیشینه و نهایی در فشارهای تزریق مختلف.

گیرش یافته و خاک پیرامونی و نیز تنش انتقال یافته بین آن دو عامل باربری و ایجاد مقاومت است. حال آن که با افزایش میزان فشار ملات تزریق شده سازوکار عملکرد چندوجهی می شود. در تزریق های تحت فشار، علاوه بر دو عامل ذکر شده برای تزریق های ثقلی، میزان فشار بر دیواره چال افزایش می یابد. فشار وارد بر دیواره چال سه کارکرد خواهد داشت. نخست آن که بسته به میزان لزجت ملات تزریقی از یک طرف و نیز تخلخل و نفوذپذیری محیط خاکی و میزان تراکم درجا از طرف دیگر، نفوذ ملات به خاک صورت خواهد پذیرفت. سازوکار نفوذ ملات به داخل خاک در سطوح فشار پایین (تا حدود ۲ بار که در روش میخ متعارف است)، عملاً ناشی از نفوذ خلل و فرجی است و متفاوت از روش های تزریق با فشار بالا نظیر تزریق پرفشار است که در آن سازوکار نفوذ ترکیبی از ایجاد ترک و نفوذ خلل و فرجی است. البته واضح است که میزان نفوذ خلل و فرجی کاملاً وابسته به لزجت مصالح تزریقی و نیز میزان تراکم و ساختار توده ی خاک اطراف چال است. کارکرد دوم اعمال فشار تزریق بر دیواره چال در روش میخ کوبی، افزایش میزان تنش نرمال وارد بر دیواره است. با افزایش تنش نرمال بر جدار چال مطابق معیار مور - کولمب^۲ نیروی اصطکاک موجود در فصل مشترک خاک - دوغاب افزایش می یابد و افزایش مقاومت برشی را به دنبال خواهد داشت. هم چنین افزایش تنش بر جدار چال سبب متراکم سازی خاک های دیواره می شود و سبب افزایش نیروهای قفل و بست می گردد. از سوی دیگر فشار تزریق اعمالی باعث انبساط حفره ی چال و افزایش هرچه بیشتر ناحیه ی درگیر با خاک می شود که در صورت وجود افزودنی منبسط شونده این سازوکارها تشدید می شود و مقاومت بیرون کشش بیشتری را نتیجه می دهد.

۱.۳. اثر فشار تزریق توأم با افزودنی منبسط شونده

فشار تزریق عامل مهمی در پژوهش های میخ کوبی است و در پژوهش های محققان زیادی بررسی شده است. پس در این پژوهش نیز به بررسی اثر آن در مقاومت بیرون کشش همراه با افزودنی منبسط شونده پرداخته شد. برای بررسی اثر فشار تزریق بر مقاومت پیوند، دو آزمایش، یکی در فشار تزریق بالاتر (۲۰۰ کیلو پاسکال) نسبت به حالت مبنا و دیگری در فشار تزریق کمتر (ثقلی) انجام شد که نتایج آن در شکل های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۰ و ۱۱ می توان دریافت که با افزایش فشار تزریق، مقاومت بیرون کشش افزایش چشم گیری می یابد. این افزایش در حالت فشار تزریق ۱۰۰ کیلو پاسکال نسبت به حالت ثقلی به میزان ۳۸ درصد در حالت بیشینه و ۲۷ درصد در حالت نهایی است. هم چنین در فشار تزریق ۲۰۰ کیلو پاسکال، مقاومت بیشینه به میزان ۳۹ درصد و مقاومت نهایی به میزان ۴۰ درصد نسبت به آزمایش در فشار تزریق ۱۰۰ کیلو پاسکال افزایش یافته است.

۲.۳. تفسیر نتایج

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده در فشارهای تزریق مختلف به طور کلی می توان گفت افزایش فشار تزریق باعث افزایش قابل توجه مقاومت فصل مشترک ملات و خاک می شود. در تزریق های ثقلی، عملاً چسبندگی و اصطکاک بین ملات

شده است. در حالی که در میزان افزودنی ۲ درصد تغییر چندانی در مقاومت بیرون‌کشش مشاهده نمی‌شود.

۴. در حالت ۳ درصد افزودنی، مقاومت در هر دو حالت بیشینه و نهایی کاهش چشم‌گیری داشته است. این افت بدین صورت تفسیر می‌شود که افزودن بیش از حد ماده‌ی منبسط‌شونده سبب کاهش شدید مقاومت ملات و جداسازی در بافت ملات می‌شود. هم‌چنین، اثر کندگیر کردن این افزودنی منجر به عدم دستیابی ملات به مقاومت مطلوب خود در زمان مقرر می‌شود.

۵. فشار تزریق نیز عاملی مهم در فرایند تزریق است و در این پژوهش همراه با افزودنی منبسط‌شونده (حالت بهینه‌ی ۱ درصد) بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش فشار تزریق به میزان ۱۰۰ کیلوپاسکال، نیروی بیشینه و نهایی به میزان حدودی ۳۵ درصد افزایش یافت.

۶. با توجه به نتایج این پژوهش، استفاده از افزودنی منبسط‌شونده به میزان ۱ الی ۲ درصد وزن سیمان برای دستیابی به مقاومت بیرون‌کشش بیشتر در روش‌های میخ‌کوبی توصیه می‌شود.

با توجه به کمبود مطالعات انجام شده در زمینه‌ی اجزای ملات تزریقی، بررسی اثر سایر افزودنی‌های موجود بر مقاومت بیرون‌کشش می‌تواند پیشنهادی برای ادامه‌ی پژوهش حاضر باشد.

تقدیر و تشکر

از شرکت سنگ آهن گهرزمین که حامی ساخت دستگاه تعیین مقاومت بیرون‌کشیدگی میخ است و بخشی از این تحقیقات با این دستگاه انجام شده است، تقدیر و تشکر می‌شود.

هم‌چنین همان‌طور که از نتایج مشخص است با گذر از حد مجاز افزودنی در ملات، مقاومت بیرون‌کشش کاهش چشم‌گیری می‌یابد. این افت بدین صورت تفسیر می‌شود که افزودن بیش از حد ماده‌ی منبسط‌شونده سبب کاهش شدید مقاومت ملات و جداسازی در بافت ملات (ناشی از افزایش حفره‌ها) می‌شود و در نتیجه اثر مضر کاهش مقاومت بر اثر مطلوب افزایش حجم غلبه می‌کند. هم‌چنین اثر کندگیر کردن این افزودنی منجر به عدم دستیابی ملات به مقاومت مطلوب خود در زمان مقرر می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، به بررسی اثر افزودنی منبسط‌شونده در ملات تزریقی و فشار تزریق بر مقاومت بیرون‌کشش میخ با استفاده از دستگاه بیرون‌کشش میخ پرداخته شد که مهم‌ترین نتایج این پژوهش به قرار زیر است:

۱. استفاده از افزودنی منبسط‌شونده، تا حدی معین و بهینه، سبب افزایش مقاومت بیرون‌کشش در روش‌های میخ‌کوبی می‌شود.

۲. افزایش مقاومت بیرون‌کشش ناشی از افزودنی منبسط‌شونده، در اثر عملکرد سازوکار افزایش حجم ملات است. این افزایش حجم با افزایش فشار نرمال به دیواره‌ی چال سبب متراکم‌سازی دیواره‌ی چال و به دنبال آن سبب افزایش زاویه‌ی اصطکاک می‌شود. هم‌چنین باعث افزایش نیروی اصطکاک مطابق با قانون مور - کولمب در فصل مشترک خاک - ملات می‌شود.

۳. استفاده از افزودنی منبسط‌شونده به میزان ۱ درصد وزن سیمان، سبب افزایش مقاومت پیوند به میزان ۱۵ درصد هم در حالت بیشینه و هم در حالت نهایی

پانویس‌ها

1. Push over
2. Mohr-Coulomb

منابع (References)

1. Morris, J.D. "Physical and numerical modelling of grouted nails in clay", PhD Thesis. University of Oxford (1999).
2. Yin, J.-H. , W.-H. Zhou. "Influence of grouting pressure and overburden stress on the interface resistance of a soil nail", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(9), pp. 1198-1208 (2009).
3. Kim, Y. and et al. "The effect of pressure-grouted soil nails on the stability of weathered soil slopes", *Computers and Geotechnics*, **49**, pp. 253-263 (2013).
4. Ye, X. and et al. "Numerical and experimental studies of the mechanical behaviour for compaction grouted soil nails in sandy soil", *Computers and Geotechnics*, **90**, pp. 202-214 (2017).
5. Cao, C. and et al. "Experimental investigation of the effect of grout with additive in improving ground support", *Rock Mechanics and Mining Sciences*, **85**, pp. 52-59 (2016).
6. Behzadian A. "Analysis the effect of grouting pressure, overburden pressure and matric suction on soil nail pull-out resistance", M.S. thesis, Tarbiat Modares University. (2016).
7. ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", ASTM International (2006).
8. ASTM, D. 3-9. "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions", D3080/D3080 M (2011).
9. Standard, A. D698. "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort", Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials (2007).
10. Testing, A.S.f. , M.C.C.-o. Cement, "Standard test method for compressive strength of hydraulic cement

- mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens)", ASTM International. (2013).
11. Chu, L.-M. and J.-H. Yin. "Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(9), pp. 1097-1107 (2005).
 12. Gurpersaud, N., Vanapalli, S.K. and Sivathayalan, S. "Pull-out capacity of soil nails in unsaturated soils", in *Pan-Am CGS Geotechnical Conference* (2011).
 13. ASTM., *Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*, D 7181, Annual Book of Standards 4 (2011).
 14. ASTM. Standard test method for measuring geosynthetic pullout resistance in soil (2001).
 15. Ishihara K. and Zlatovic S. "Normalized behavior of very loose non-plastic soils: Effects of fabric", *Soils and Foundations*, **37**(4), pp. 47-56. (1997).
 16. Hong, Y.-S., C.-S. Wu. and S.-H. Yang. "Pullout resistance of single and double nails in a model sandbox", *Canadian Geotechnical Journal*, **40**(5), pp. 1039-1047 (2003).
 17. Elias, V. "Soil nailing for stabilization of highway slopes and excavations", FHWA-RD-89-198 (1991).
 18. Lazarte, C.A., Robinson, H. and Gomez, J.E. "Soil nail walls reference manual", FHWA-NHI-14-007 (2015).