

مطالعات مقیاس واقعی تأثیر فشار تزریق بر مقاومت بیرون کشیدگی و رفتار خزشی میخ‌های گروتی در خاک مارن زیتونی

غلام مرادی^{۱*} و سیامک زادکریم^۲

^۱ دانشیار، دانشکده فنی-مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشجوی دکتری عمران - خاک و پی، پردیس بین‌المللی ارس دانشگاه تبریز

چکیده

مفاهیم طراحی یک سازه نگهبان میخکوبی شده بر اساس انتقال نیروی کششی تولید شده در مسلح کننده می‌باشد. مکانیزم انتقال بار بین میخ و خاک، به پارامترهای بسیار نظیر تکنیک نصب، روش حفاری، نوع گروت مصرفی، فشار تزریق، اندازه و شکل مسلح کننده، مشخصات هندسی خاک محل، نفوذپذیری خاک و مشخصه‌های مقاومت برشی خاک بستگی دارد. امروزه بحث گودبرداری‌های عمیق به دلیل استفاده بهینه از اعماق زمین به عنوان فضاهای مفید، اهمیت فوق‌العاده‌ای داشته که نحوه مهار آن‌ها مخصوصاً در خاک‌های ریزدانه چسبنده با توجه به تزریق پذیری کم و پلاستیسیته بالا، عموماً مشکل‌آفرین بوده است. با توجه به رفتار متفاوت خاک‌های مارنی در کوتاه و بلند مدت، در این تحقیق مقاومت کششی و رفتار خزشی میخ‌ها در گونه‌ای از این نوع خاک که عموماً در دسترس می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا تعداد ۶ عدد میخ به قطر ۱۱ و به طول ۴۰۰ سانتی‌متر در حالت قائم و ۴ میخ با همان مشخصات در حالت افقی با زاویه ۱۵ درجه نسبت به افق در مقیاس واقعی در سایت تحقیقاتی اجرا و اثر فشار تزریق بر مقاومت کششی و رفتار خزشی میخ‌ها با دستگاه جک کشش میخ که ویژه طرح ساخته شده و به ابزار اندازه‌گیری با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و دستگاه ثبت داده مجهز می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاکی از افزایش تقریباً ۳۵ تا ۴۰ درصدی مقاومت کششی و بهبود رفتار خزشی میخ‌ها در حالت استفاده از تزریق تحت فشار نسبت به تزریق ثقلی در میخ‌های قائم و افقی اجرا شده می‌باشند.

واژگان کلیدی: مارن زیتونی، میخکوبی، فشار تزریق، مقاومت بیرون کشیدگی، خزش.

۱- مقدمه

صدا)، سادگی اجرا، سازگار بودن با عوارض زمین و وضعیت طرح و محل (انعطاف‌پذیری روش)، تغییرشکل‌های کم، صرفه‌جویی اقتصادی در مقایسه با دیگر روش‌های ساخت خصوصاً سازه‌های نگهبان گیردار، امکان کار در فضاهای محدود، اشغال فضای کمتر نسبت به انکر به جهت طول کوتاه‌تر میخ‌ها، سرعت بالای انجام کار، اطمینان بیشتر میخ‌ها نسبت به انکرها، دستکاری و اصلاح طرح بدون از دست دادن سطح ایمنی و مناسب بودن برای کاربردهای موقتی و دائمی، مطالعه سیستم میخکوبی در این تحقیق مد نظر قرار گرفته است [۲].

مفاهیم طراحی یک سازه نگهبان میخکوبی شده بر اساس انتقال نیروی کششی تولید شده در مسلح‌کننده‌ها می‌باشد. مکانیزم انتقال بار بین میخ‌ها و خاک تا حد ظرفیت از جا درآمدگی نهایی، به پارامترهایی نظیر تکنیک نصب، روش حفاری، نوع گروت، روش تزریق، فشار تزریق، اندازه و شکل مسلح‌کننده، مشخصات هندسی خاک محل (خصوصاً دانسیته نسبی خاک یا نسبت پیش‌تحکیمی)، نفوذپذیری خاک و مشخصه‌های مقاومت برشی خاک بستگی دارد. در این نوع

یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در رشته مهندسی عمران، احداث سازه‌ها، حفاظت از گودبرداری‌ها و ساختمان‌های موجود در مجاورت آن‌ها و تثبیت دیواره‌های خاکی می‌باشد. عدم رعایت روش‌های مناسب به منظور حفاظت گودها و همچنین شیب‌های در حال احداث، منجر به خسارت جبران‌ناپذیری خواهد گردید و مخاطرات به وجود آمده ناشی از نشست‌های احتمالی و تقلیل ظرفیت باربری و تغییر مکان‌های جانبی، موجب ایجاد ترک در سازه‌های مجاور گود خواهد شد [۱].

به منظور جلوگیری از وقوع موارد ذکر شده لازم است قبل از شروع عملیات گودبرداری از روش‌های نگهداری و مهاربندی جانبی مناسب استفاده شود تا در محیطی پایدار و ایمن بتوان عملیات را ادامه داد. در این راستا از سیستم‌های حفاظت جانبی متعددی استفاده به عمل می‌آید که با توجه به عملکرد مناسب و مزایای استفاده از میخ در خاک‌ها نسبت به سایر روش‌های ذکر شده از قبیل امکان اجرا در مجاورت سازه‌های موجود، روش ساخت مطابق با معیارهای زیست‌محیطی (بدون لرزش و سر و

که عموماً بخش بالانشین شهر را شامل می‌شود، لزوم استفاده بهینه از آن و نیز استفاده از اعماق زمین به عنوان فضاهای مورد استفاده در ساخت و سازهای شهری، امری گریزناپذیر است که در این صورت بحث گودبرداری‌های بزرگ و نحوه مهار آن‌ها معضل اساسی بوده و خواص خاک محل که عموماً ماری و هوازه می‌باشد و رفتارهای خاص خود را دارد بر مشکلات حاصل افزوده است. پایداری خاک جداره‌های گودبرداری شده و نیز تثبیت دیواره‌های خاکی ایجاد شده در احداث راه‌ها و تونل‌ها و شریان‌های اصلی به عنوان مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک مطرح بوده و می‌باشد. لذا شناسایی و اجرای روش‌هایی که به کمک آن‌ها بتوان این مشکلات را تا حد امکان و با صرف کمترین هزینه در اسرع وقت رفع نمود، لازم و ضروری است.

با توجه به تنوع مارن در سطح (زرد، قهوه‌ای، سبز زیتونی و ...) بررسی تک تک آن‌ها در زمان کم مقدور نبوده و نیاز به صرف وقت و هزینه بیشتری دارد. ولی به دلیل کثرت خاک سبز زیتونی که در بیشتر پروژه‌های عمرانی در سطح شهر و در اعماق کمتر زمین قابل مشاهده است، در این تحقیق، تا حد امکان بررسی رفتار سیستم میخکوبی در این گونه از مارن‌ها مد نظر می‌باشد.

۲- خاک مارن

در مهندسی ژئوتکنیک، مارن‌ها معمولاً جزو مواد مشکل‌آفرین محسوب می‌شوند. به دلیل رفتار ژئوتکنیکی متغیر آن‌ها، مطالعات گسترده‌ای بر روی این نوع خاک انجام گرفته است. عامل مهم تعیین کننده در طراحی سازه‌ها بر روی مارن‌ها، تغییر شکل‌پذیری یا نشست و گاهی نیز مقاومت آن‌ها در برابر بارهای وارده می‌باشد.

مارن یک اصطلاح برای نهشته‌هایی است که از ترکیب رسوکربنات کلسیم تشکیل شده است. مارن‌ها در نواحی شرقی، شمالی و جنوبی تبریز برونزد داشته و در بیشتر نواحی شهر نیز تشکیل دهنده سنگ کف بوده و به عبارت دیگر در زیر رسوبات آبرفتی قرار دارند. این مارن‌ها به رنگ‌های مختلفی از جمله زرد، سبز زیتونی، قهوه‌ای و خاکستری دیده می‌شوند. معمولاً لایه‌های زرد و سبز در قسمت‌های سطحی و مارن‌های خاکستری در اعماق قرار دارند و از نظر مکانیک خاک مارن‌ها در گروه خاک-های نوع رسی یا سیلتی با خاصیت خمیری بالا طبقه‌بندی می‌شوند. حد روانی و شاخص خمیری مارن‌ها در محدوده نسبتاً گسترده‌ای قرار دارد که این امر نشان دهنده متغیر بودن درصد کربنات کلسیم و نوع کانی رسی تشکیل دهنده مارن‌ها می‌باشد.

سازه‌ها، تغییر مکان جانبی مشخص برای بسیج اندرکنش خاک میخ و تولید نیروهای کششی در میخ‌ها لازم می‌باشد. بنابر این در مناطق شهری، بایستی فاصله مورد نیاز بین توده میخکوبی شده و سازه مجاور آن حفظ شود تا از ایجاد بارهای اضافی بر سازه مجاور جلوگیری شود [۳].

تحلیل‌های عددی انجام گرفته نشان می‌دهند که رفتار شیب میخکوبی شده بیش از این که وابسته به شرایط انتهایی تسلیح کننده‌ها باشد به مشخصات سطح تماس تسلیح کننده و خاک اطراف بستگی دارد که یکی از عوامل بسیار مؤثر، اثر فشار تزریق بر مقاومت کششی میخ‌ها است [۴]. میخکوبی دیواره‌های خاکی جهت عملیات حفاری، به خصوص زمانی که برش‌های قائم یا نزدیک قائم خاک نیاز است بسیار مناسب است. این تکنیک در عملیات ساخت بزرگراه‌ها، خاک‌برداری فونداسیون پل‌ها، نگهداری دیواره‌های گودبرداری شده برای احداث سازه‌های زیرزمینی در محیط‌های شهری، تعمیر، تحکیم و بازسازی سازه‌های نهبان فرسوده، همچنین ورودی تونل‌ها بسیار موفقیت‌آمیز بوده است. به طور کلی از دیواره‌های میخکوبی شده در پایداری ترانشه‌ها در احداث بزرگراه‌ها و راه‌آهن، کوه‌بری به هنگام جاده‌سازی، پایداری جداره تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی، پایداری مجاور و حفاظت گود در سازه‌های مناطق شهری، ساختمان‌های مجاور گود، ایستگاه‌های زیرزمینی مترو، تعمیر و بازسازی سیستم‌های نگهدارنده قدیمی، پایداری کوله‌های مجاور پل‌ها در زمین‌های سست و ریزشی به صورت موقت و دائمی بهره‌جسته می‌شود [۵]. تا به حال مطالعات آزمایشگاهی، مقیاس واقعی و نرم-افزاری زیادی در رابطه با اثرات سربار، فشار تزریق، فشار آب حفره‌ای بر مقاومت کششی میخ‌های گروتی در حالات اشباع و غیر اشباع انجام یافته که نتایج قابل توجهی حاصل گردیده است [۱-۱۲].

بررسی رفتار میخ‌ها در خاک‌های رسی و ماری که خاک‌های ریزدانه و با خواص متفاوت از خاک‌های دانه‌ای محسوب می‌شوند، از جمله موضوعاتی است که به آن کمتر پرداخته شده است. خواص خمیری بالا، حالت نیمه اشباع داشتن، تغییر رفتار آن در بلندمدت، تزریق‌پذیری بسیار کم آن و سایر موارد مشابه از جمله معضلاتی است که عملکرد میخ در این نوع خاک‌ها را مستلزم مطالعه بیشتر می‌نماید.

در سال‌های اخیر با توجه به رشد و توسعه شهری و افزایش تراکم جمعیت، تعداد طبقات زیرزمین و عمق گودبرداری افزایش یافته است. با توجه به قیمت زمین و ارزش آن در مناطق مذکور

توان اندازه‌گیری نیرو تا ۵۰ تن و اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها با دقت ۰/۱ میلی‌متر را دارا و مجهز به تجهیزات جهت ثبت داده‌های حاصله به صورت اتوماتیک از هر ۶ ثانیه می‌باشد، گردید. همچنین جک مذکور مجهز به سیستم قفل خزش برای ثابت نگه‌داشتن مقدار نیرو در طول زمان بوده و در صورت کاهش مقدار نیرو به هر دلیلی، با اعمال و تنظیم فشار روغن، میزان نیرو را در مقدار ثابت تعریف شده به دستگاه کنترل می‌کند. لودسل فشار، شیر کنترل فشار، شیر تخلیه، اهرم دوطرفه اعمال فشار، درگاه USB ثبت حافظه، سیستم مونی‌تورینگ (نیرو، فشار و تغییر شکل) و پانل تنظیمات داخلی دستگاه به همراه جک پایه، سیستم اتصال جک به میخ و خط‌کش اهمی از اجزای اصلی دستگاه مذکور می‌باشند. با توجه به توصیه استاندارد FHWA [۱] و نیز سایر استانداردهای معتبر برای اندازه‌گیری میزان تغییر مکان‌ها با دقت ۰/۱ میلی‌متر، اقدام به نصب دو عدد گیج با دقت مذکور برای سنجش میزان تغییر مکان میخ و فونداسیون اجرا شده در زیر جک برای قرائت داده‌ها به صورت دقیق در فواصل زمانی تعیین شده مطابق ضوابط آیین‌نامه‌های مربوطه گردید.

با توجه به حساسیت کار در حفر گمانه‌ها و قابلیت تکرارپذیری آزمایشات، سیستم حفاری بایستی از دقت و کیفیت بالایی برخوردار بوده و دارای لرزش‌های کم و در حد قابل قبول باشند که در این راستا اقدام به تهیه تجهیزات حفاری با قابلیت حفاری قائم و افقی با زاویه مشخص و گردش ۳۶۰ درجه، ست تزریق گروت با توان اعمال فشار تا ۱۰ بار، دستگاه اختلاط اولیه و ثانویه و نیز پکرهای ویژه جهت تزریق در این تحقیق گردید (شکل‌های (۱) - (۳)).



شکل ۱- شمای کلی از دستگاه جک کشش میخ

با وجود گستردگی زمانی و تنوع پدیده‌های زمین‌شناسی آذربایجان، واحدهای زمین‌شناسی تبریز و پیرامون آن دارای گستردگی زمانی زیادی نبوده و سازندهای موجود، متعلق به بعد از کرتاسه هستند. از نظر زمین‌شناسی ریخت کنونی جلگه‌ای که شهر در آن واقع شده است، حاصل پدیده‌های تکتونیکی و فعالیت گسل‌ها، آتشفشان‌ها و همچنین فرسایش می‌باشد. شهر در جلگه‌ای که به صورت شرقی-غربی است واقع شده و از سمت شمال به کوه‌های عون بن علی با برونزد سازندهای قرمز بالایی و پایینی محدود شده و حد فاصل جلگه و این کوه‌ها را گسل تبریز با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی تشکیل می‌دهد. قسمت جنوبی نیز با تپه‌های کوچک که قسمت شمالی آتشفشان‌های سهند را تشکیل می‌دهند، محدود شده است. از نظر چینه‌شناسی سنگ بستر قسمت‌های اعظم شهر را سازندهای قرمز بالایی و پایینی متشکل از مارن، ماسه سنگ گنگلومرای ریزدانه، سیلت و رس‌های ژپس و گچ‌دار به همراه تشکیلات ماهی‌دار و همچنین سازند محلی باغمیشه با لیتولوژی مارن‌های لیگنیت‌دار تشکیل می‌دهند. بر روی همه سازندها رسوبات آبرفتی کواترنری قرار دارند که قسمت اعظم شهر بر روی آن‌ها بنا نهاده شده است. این رسوبات جوان اغلب ماسه سیلتی شن‌دار با جورشدگی متوسط و اغلب با گردشدگی ذرات بوده و سیمان‌تاسیون خفیف نیز گاهی در آن رخ داده است.

مارن‌های تبریز در نقاط مختلف دارای تنوع زیادی می‌باشند. این تنوع هم در ظاهر و هم در خواص مهندسی و ترکیبات کانی‌شناسی آن‌ها وجود دارد. این مارن‌ها در شرایط متفاوت از جمله عمق، میزان سربار، رطوبت طبیعی، درجه اشباع، میزان درصد رس و همچنین وجود رگه‌های ژپس و ذغال، رفتار ژئومکانیکی متفاوتی از خود نشان می‌دهند. با توجه به اهمیت این مارن‌ها و گسترش آن‌ها در شهر تبریز و نیز عملکرد متفاوت آن‌ها، اقدام به بررسی رفتار این نوع مارن‌ها در برابر سیستم میخ‌گذاری، شده است. با توجه به تنوع مارن‌ها، مقاومت کششی و رفتار خزشی میخ‌ها در مارن سبز زیتونی که عموماً در ترازهای فوقانی در دسترس بوده و دارای گستردگی زیادی نیز می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- تجهیزات انجام آزمون

برای انجام آزمون‌ها، نیاز به دستگاهی که بتواند با دقت بالا مقادیر نیرو، فشار و تغییر مکان‌ها را اندازه‌گیری و ثبت نماید، بوده که بر این اساس اقدام به ساخت جک ویژه کشش میخ که

زیتونی می‌باشد و این که تهیه نمونه دست نخورده از این خاک با توجه به ساختار و لایه‌بندی آن بسیار مشکل می‌باشد، لذا در این تحقیق به جای تهیه نمونه دست‌نخورده از خاک مارن و استفاده از آن در آزمایشگاه که دارای خطاهای بزرگ و تأثیرگذار خواهد بود، اقدام به احداث یک سایت مطالعاتی در مکان مشخص گردیده است. به طوری که ابتدا یک سایت با ابعاد مشخص و به عمق لازم در داخل سایت دانشگاه تبریز احداث گردیده و جهت جلوگیری از هوازگی خاک، دیواره‌ها و کف آن با مواد مناسب پوشش داده شد و سپس آزمایشات فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و کانی‌شناسی لازم روی آن انجام و پس از شناخت کافی از خاک محل و در واقع شناسنامه‌دار کردن خاک موجود، نسبت به اجرای میخ‌ها در کف و تعدادی از آن‌ها روی دیواره‌های گود، اقدام شد. با توجه به تنوع مارن سبز زیتونی، فقط یک نوع مارن که مشخصات آن با آزمایشات مربوطه به دست آمده است مورد مطالعه قرار گرفت (جدول (۱)). لازم به ذکر است با عنایت به این که اثر سربار از موارد مورد بررسی در این تحقیق نمی‌باشد و با توجه به ساختار خاک مارن که دارای درزه‌هایی با جهات مختلف می‌باشد، جهت سهولت کار و دقت کافی در ایجاد و انجام آزمایشات مورد نظر و به وجود آوردن شرایط یکسان در نمونه‌ها، اقدام به اجرای میخ‌ها به صورت قائم در محل از پیش تعیین شده گردیده و آزمایشات لازم بر روی آن‌ها انجام یافت. همچنین تعدادی میخ در حالت افقی روی دیواره موجود در ضلع جنوبی سایت جهت مقایسه و ایجاد رابطه بین برخی مقادیر حاصله، انجام یافت. در ادامه رفتار میخ‌ها در این نوع خاک در برابر پدیده خزش مورد ارزیابی قرار گرفت. یکی از محدودیت‌های موجود، بحث مقیاس می‌باشد. از آن‌جا که انجام آزمایشات در مقیاس آزمایشگاهی با توجه به جنس خاک مورد مطالعه و عدم امکان تهیه نمونه دست نخورده، ممکن نمی‌باشد لذا اجرای میخ‌ها در مقیاس واقعی انجام شده است.

برای رسیدن به اهداف پیش‌بینی شده پروژه اخیر، ۶ عدد میخ با مقیاس واقعی با طول تزریق شده ۴۰۰ سانتی‌متر و طول آزاد ۶۰ سانتی‌متر در محل مذکور با گروت‌های تزریقی سیمانی به صورت عمودی و ۴ عدد میخ به صورت افقی با زاویه ۱۵ درجه نسبت به افق با همان مشخصات ذکر شده، جهت بررسی اثر فشار تزریق گروت بر رفتار اصطکاکی و تأثیر آن‌ها بر مقاومت کششی و رفتار خزشی میخ‌ها اجرا شد. بررسی اثر فشار تزریق بر مقاومت کششی و تأثیر آن بر رفتار خزشی میخ‌ها به عنوان یکی



شکل ۲- تصویر تجهیزات جانبی جک کشش میخ و نحوه اتصال آن به میخ



شکل ۳- تصویر انجام آزمون کشش میخ در محل مورد مطالعه

۴- طرح مسأله و انجام آزمون‌ها

طرح ژئوتکنیکی که بر اساس یک فرضیه برای پیش‌بینی رفتار یک سیستم ساخته می‌شود، بر اساس دقت عکس‌العمل-های مورد انتظار، می‌تواند با جزئیات کم و زیاد، بسته به نوع کار، مورد استفاده قرار گیرد. با مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس می‌توان پارامترهای مختلف و تأثیر آن‌ها را با دقت مناسب و تحت شرایط کنترل شده بررسی نمود که استفاده از مدل‌هایی با مقیاس واقعی نتایج واقع بینانه‌ای را ارائه خواهد نمود [۵] و [۱۰]. با توجه به جنس خاک مورد مطالعه که از نوع مارن سبز



شکل ۵- نحوه اجرای فونداسیون بتنی مسلح در محل اجرای میخ‌ها جهت استقرار دستگاه کشش و اعمال بار کششی

پی‌های احداثی از بتن با عیار ۳۰۰ کیلوگرم برسانتی‌متر مکعب بوده که مسلح به شبکه آرماتور در قسمت میانی خود بوده و دارای توان باربری کافی در برابر بارهای وارده می‌باشند. در ادامه کار، اقدام به استقرار تجهیزات اجرای میخ از قبیل دستگاه حفار، کمپرسور بادی، ژنراتور سه فاز برای تأمین برق تجهیزات، ست تزریق اولیه و ثانویه و مصالح مورد نیاز جهت اجرای میخ‌ها مطابق برنامه از پیش تعیین شده، گردید که در این راستا تعداد ۶ عدد میخ به صورت قائم در کف سایت مطالعاتی از پیش آماده شده از وسط پی‌های منفردی که سوراخی به قطر ۱۵ سانتی‌متر در قسمت میانی آن‌ها تعبیه شده بود، حفر گردید. همچنین اقدام به حفر و تزریق ۴ عدد میخ به صورت افقی با شیب ۱۵ درجه نسبت به سطح افق در دیواره ضلع جنوبی سایت گردید که پس از اتمام عملیات اجرایی و آماده‌سازی انتهای میخ‌ها، دهانه آن‌ها با بالشتک بتنی مسلح به ابعاد 100×100 سانتی‌متر بسته شده و صفحه فلزی به ابعاد 30×30 سانتی‌متر با سوراخی به قطر ۵ سانتی‌متر در وسط آن در قسمت میانی بخش بتنی تعبیه گردید که این امر شرایط لازم برای تکیه دادن

از عوامل مؤثر، در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است (جدول (۲)).

به منظور انجام این تحقیق سائیتی با ابعاد و عمق مشخص در داخل دانشگاه تبریز تعیین و پس از خاک‌برداری، تسطیح و آماده‌سازی محل، کف و دیواره‌های آن با پوشش مناسب جهت جلوگیری از هوازگی پوشانیده شد. سپس آزمون‌های فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی لازم بر روی خاک سایت مورد آزمایش انجام گرفت. در ادامه نسبت به تعیین محل اجرای میخ‌ها اقدام گردید که پس از علامت‌گذاری محل اجرای آن‌ها، پی‌های منفردی به ابعاد 120×120 سانتی‌متر با ضخامت ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر در وسط آن‌ها اجرا گردید که در قسمت میانی آن‌ها سوراخی به قطر ۵ اینچ جهت حفر میخ‌ها و عملیات تزریق کار گذاشته شد. هدف از اجرای پی‌ها، بالا آوردن تراز سطح کار به دلیل حفاظت آن‌ها از آب‌های سطحی، بارندگی‌های احتمالی، ایجاد سطحی برای اجرای عملیات قفل بلندمدت میخ‌ها، اجرای سطح صاف و تراز جهت استقرار جک کشش میخ و ممانعت از نشست‌های ناهمگون و قابل کنترل بودن مقادیر نشست در هنگام اعمال بار در صورت وجود می‌باشد (شکل‌های (۴) و (۵)).



شکل ۴- تسطیح و آماده‌سازی سایت مطالعاتی و آماده کردن محل اجرای میخ‌ها



شکل ۹- نصب دستگاه کشش میخ با تجهیزات مربوطه در دیواره گودبرداری شده



شکل ۱۰- نحوه اجرای دال بتنی مسلح در انتهای میخ‌ها



شکل ۱۱- میخ‌های اجرا شده در دیواره گودبرداری با دال بتنی مسلح در انتهای آن جهت نصب تجهیزات انجام آزمون



شکل ۱۲- نحوه اجرای دال بتنی مسلح در انتهای میخ‌ها

دهانه جک کشش میخ و اعمال نیرو بر آن را فراهم نموده و از نشست‌های زاید و پیش‌بینی نشده در حین انجام آزمایش ممانعت می‌کند (شکل‌های (۶) - (۱۱)). لازم به ذکر است که مقادیر نشست قسمت‌های مختلف پی بتنی مسلح، حین انجام آزمایش تا مرحله اتمام آن در بازه‌های زمانی مشخص توسط چند گیج اندازه‌گیری تغییر مکان با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ میلی‌متر سنجش شده است. همچنین قبل از قرارگیری میلگردها در داخل گمانه‌های حفر شده، انتهای آن‌ها به اندازه ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر رزوه و فضا دهنده‌های لازم از هر یک متر بر روی آن‌ها تعبیه گردیده و سپس توسط لوله‌های تزریق، اقدام به تزریق گروت سیمانی با نسبت آب به سیمان ۱ به ۲ مطابق برنامه‌ریزی انجام شده، گردید.



شکل ۶- دستگاه حفاری مورد استفاده در پروژه



شکل ۷- حفاری، میلگردگذاری و نصب لوله‌های تزریق گروت



شکل ۸- نمونه‌برداری از گروت سیمانی جهت تعیین مقاومت فشاری قبل از انجام آزمون کشش میخ

جدول ۱- مشخصات مارن زیتونی مورد استفاده در طرح و پارامترهای مقاومتی آن

عمق (m)	وزن مخصوص مرطوب (kg/m^3)	رطوبت (%)	حد روانی (%)	حد خمیری (%)	چسبندگی (kg/cm^2)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۲	۱۸۵۰	۳۸	۷۴	۵۰	۱.۲	۲۰
۵	۱۹۰۰	۴۰	۷۶	۵۹	۱.۳	۲۱

جدول ۲- مشخصات ابعادی میخ‌ها و گروت مصرفی

طول تزریق شده میخ (متر)	طول آزاد میخ (متر)	قطر نهایی میخ (متر)	شماره میلگرد (میلیمتر)	نوع سیمان مصرفی	روش حفاری
۴	۰.۷	۱۱	۳۲	تیپ ۲	سه پره‌ای

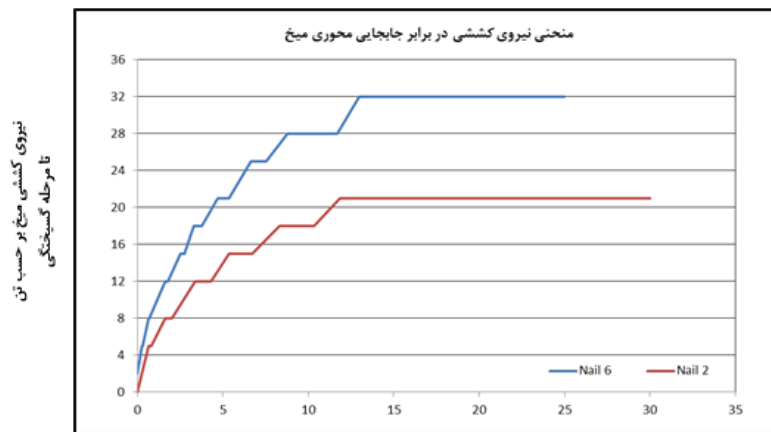
جدول ۳- نتایج آزمون‌های واقعی، مشخصات ابعادی و جزئیات اجرایی آن‌ها

شماره میخ	قطر میخ (سانتی‌متر)	طول تزریق شده میخ	طول آزاد میخ (سانتی‌متر)	حالت اجرا	نوع حفاری	نوع گروت مصرفی و فشار تزریق	توان کششی در کسب‌کنندگی (تن)	شروع خزش غیر قابل قبول (تن)	نیروی قابل اعتماد برای اجرا (تن)
۱	۱۱	۴۰۰	۶۰	قائم	سه پره‌ای	سیمانی استاندارد تزریق ثقیلی	۲۲	۱۸	۱۵
۲	۱۱	۴۰۰	۶۰	قائم	سه پره‌ای	سیمانی استاندارد تزریق ثقیلی	۲۱	۱۷	۱۴
۳	۱۱	۴۰۰	۶۰	قائم	سه پره‌ای	سیمانی استاندارد تزریق ثقیلی	۲۲	۱۹	۱۶
۴	۱۱	۴۰۰	۶۰	قائم	سه پره‌ای	سیمانی استاندارد تزریق تحت فشار ۶ بار	۳۲	۲۶	۲۱
۵	۱۱	۴۰۰	۶۰	قائم	سه پره‌ای	سیمانی استاندارد تزریق تحت فشار ۶ بار	۳۳	۲۷	۲۲
۶	۱۱	۴۰۰	۶۰	قائم	سه پره‌ای	سیمانی استاندارد تزریق تحت فشار ۶ بار	۳۲	۲۶	۲۱
۷	۱۱	۴۰۰	۶۰	افقی	سه پره‌ای	سیمانی استاندارد تزریق ثقیلی	۱۴	۱۲	۱۰
۸	۱۱	۴۰۰	۶۰	افقی	سه پره‌ای	سیمانی استاندارد تزریق ثقیلی	۱۵	۱۳	۱۱
۹	۱۱	۴۰۰	۶۰	افقی	سه پره‌ای	سیمانی استاندارد تزریق تحت فشار ۶ بار	۲۲	۱۸	۱۵
۱۰	۱۱	۴۰۰	۶۰	افقی	سه پره‌ای	سیمانی استاندارد تزریق تحت فشار ۶ بار	۲۳	۱۹	۱۶

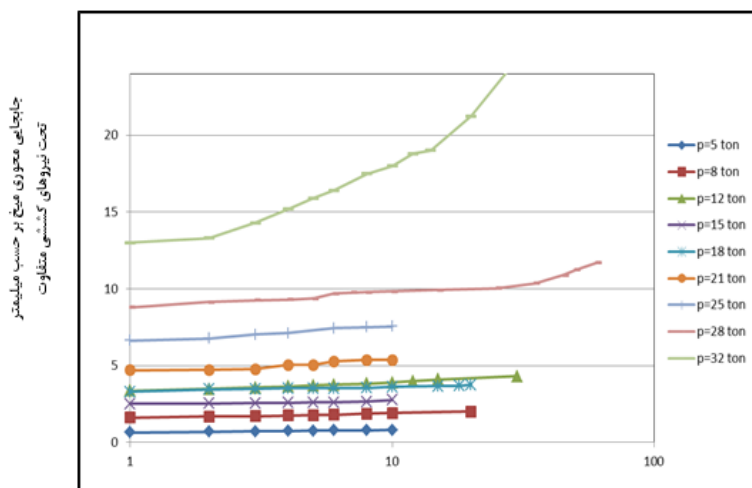
آزمایش قرار گرفت. لازم به ذکر است با توجه به جنس خاک مورد مطالعه و قابلیت تزریق پذیری کم آن، امکان تزریق تحت فشار بالاتر وجود نداشت.

ابتدا آب و سیمان به نسبت ۱ به ۲ در دستگاه اختلاط اولیه، مخلوط و سپس به دستگاه اختلاط ثانویه انتقال یافت که در این مرحله، گروت به مدت ۱۰ دقیقه هم زده شده و سپس عملیات تزریق به دو حالت ثقیلی و تحت فشار شش بار انجام گردید.

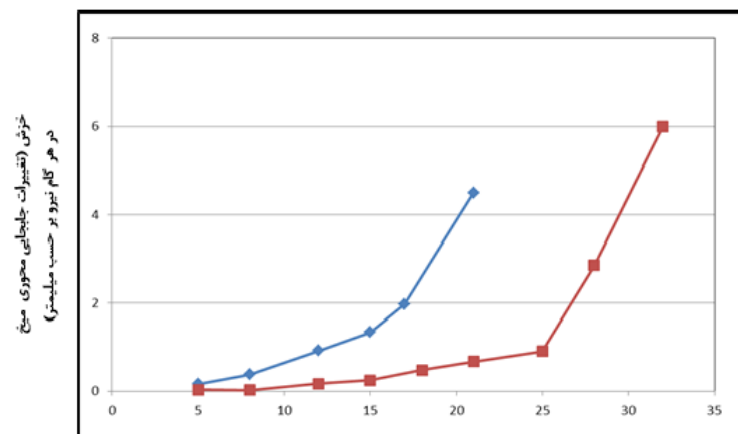
در حفاری میخ‌ها از روش‌های مرسوم حفاری سه پره‌ای (پره‌ای با سیستم تخلیه بادی) که در کارهای اجرایی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده به عمل آمده است به نحوی که تعداد ۳ میخ در حالت قائم و ۲ عدد در حالت افقی با مته سه پره‌ای و گروت سیمانی استاندارد با تزریق ثقیلی و تعداد ۳ میخ در حالت قائم و ۲ عدد در حالت افقی با شرایط مشابه قبلی، حفاری و تحت فشار تزریق ۶ بار در سایت مطالعاتی اجرا و مورد



شکل الف: جابجایی محوری میخ بر حسب میلیمتر



شکل ب: لگاریتم زمان بر حسب دقیقه



شکل ج: نیروی کششی میخ بر حسب تن

شکل ۱۳- الف) نمودار نیروی کششی در برابر جابجایی محوری میخ تا مرحله گسیختگی در میخ‌های شماره ۲ و ۶، ب) نمودار جابجایی محوری میخ در برابر لگاریتم زمان تحت بارهای کششی متفاوت در میخ شماره ۶، ج) نمودار نیروی کششی در برابر تغییرات جابجایی محوری میخ در گام‌های مختلف در میخ‌های شماره ۲ و ۶

نمونه، نتایج مربوط به آزمون‌های میخ‌های شماره ۲ و ۶ در شکل (۱۳) ارائه گردیده است.

۵- نتایج

نتایج آزمون‌های انجام یافته، حاکی از افزایش ۳۵ تا ۴۰ درصدی مقاومت کششی میخ‌های اجرا شده با استفاده از حفاری سه پره‌ای (پره‌ای با سیستم تخلیه بادی) و گروت سیمانی استاندارد، تزریق شده با فشار ۶ بار، نسبت به حالت تزریق ثقلی، می‌باشد که این امر می‌تواند ناشی از نفوذ گروت سیمانی تحت فشار بالا به داخل منافذ و درزه‌های موجود در خاک و درگیری مناسب گروت با خاک اطراف خود و یا احتمال تغییر شکل مقطع میخ در اثر اعمال فشار تزریق بالا باشد. همچنین بهبود رفتار خزشی میخ‌ها در حالت استفاده از فشار تزریق در هر دو حالت افقی و قائم مشاهده می‌گردد که شروع خزش غیر قابل قبول (بالای ۲ میلی‌متر) را به تعویق انداخته و رفتار بلندمدت قابل قبول‌تری از خود نشان می‌دهد (جدول (۳)). لازم به ذکر است تأثیر فشار تزریق در نیل‌های قائم و افقی تقریباً یکسان بوده که این امر خود می‌تواند بیانگر تقریبی تشابه درزه‌ها در راستای قائم و افقی در توده خاک مارن سبز باشد.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

میخ‌های اجرا شده در خاک مارن به دلیل رطوبت، حد روانی و حد خمیری بالا، رفتاری متفاوت با سایر خاک‌ها از خود نشان می‌دهند که این امر باعث تغییر رفتار سازه‌های اجرا شده در این نوع خاک می‌باشد. بررسی‌ها و تجربیات عملی نشان دهنده کاهش توان کششی میخ‌های اجرا شده در خاک مارن در طول زمان می‌باشد که این امر می‌تواند به دلیل رفتار خزشی این نوع خاک و همسو شدن دانه‌های رس، تحت بار وارده باشد. لذا بهبود رفتار میخ‌ها در خاک مارن با روش‌های مختلف و افزایش ظرفیت کششی و بهبود رفتار خزشی آن مخصوصاً در بلند مدت از اهداف این مقاله به شمار می‌آید. استفاده از گروت‌های تحت فشار به دلیل ایجاد درگیری مناسب گروت با خاک دیواره میخ و نیز احتمال ایجاد تغییر شکل در جدار و مقطع میخ‌ها می‌تواند شرایط مناسب‌تری را فراهم نموده و رفتار کششی و خزشی میخ را بهبود بخشد. لازم به ذکر است با توجه به وجود انواع مارن‌ها با قابلیت‌ها و رفتارهای متفاوت، با تغییر نوع مارن، مشخصات فیزیکی و پارامترهای مقاومتی آن، نتایج حاصله قابل تغییر بوده و نمی‌توان نتایج حاصله را به تمامی مارن‌ها ربط داد.

لازم به ذکر است که حداکثر زمان استفاده از مخلوط حاصل، برای عملکرد بهتر برابر ۳۰ دقیقه می‌باشد. با توجه به این که زمان شروع آزمون‌های محلی، وابسته به اخذ مقاومت فشاری گروت تزریقی دارد، لذا جهت اطمینان از مقاومت فشاری گروت مورد استفاده در میخ‌ها، از گروت تمامی میخ‌ها در نمونه‌گیرهای مخصوص به قطر ۲ اینچ، نمونه‌برداری شده و پس از گذشت مدت‌زمان‌های ۳ و ۷ روز، نسبت به شکست و تعیین مقاومت فشاری آن‌ها اقدام و پس از کسب مقاومت لازم توسط گروت (مطابق آیین‌نامه FHWA [۱])، به انجام آزمون‌های واقعی در سایت مطالعاتی پرداخته شد. با توجه به وجود درزه‌های فراوان در خاک مارن به دلیل ساختار آن، امکان بررسی فشارهای تزریق متفاوت مقدور نبوده و فقط تزریق ثقلی و فشار تزریق حداکثر که در این پروژه برابر شش بار بوده، مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از تجهیزات حفاری و اختلاط و تزریق با دقت بالا، نسبت به اجرای میخ‌ها در خاک مارن با تغییر در فشار گروت مصرفی اقدام و آزمون‌های لازم جهت تعیین مقاومت کششی میخ‌ها و بررسی رفتار خزشی این نوع خاک‌ها مطابق آیین‌نامه‌های معتبر جهانی در دو حالت قائم و حالت افقی با زاویه ۱۵ درجه نسبت به افق انجام یافته است. بدین ترتیب که پس از آماده شدن محل، رعایت اصول فنی لازم، نصب میخ‌ها، تزریق گروت سیمانی و اخذ مقاومت لازم توسط گروت، نسبت به نصب دستگاه کشش نیل و تجهیزات وابسته به آن اقدام و در ابتدا باری به اندازه ۲ تن به صورت کششی بر میخ وارد و سپس گیج‌های اندازه‌گیری جابجایی محوری میخ و نشست پی واقع در زیر جک، نصب و روی عدد صفر تنظیم گردیدند. یکی از گیج‌ها روی پی بتنی مسلح جهت اندازه‌گیری نشست پی تحت بارگذاری صورت گرفته در طول زمان و دیگری درست در انتهای میخ، جهت اندازه‌گیری میزان بیرون آمدگی آن از داخل خاک می‌باشد. در ادامه، مقدار نیروی کششی در گام‌های مشخص افزایش و در هر گام به مدت یک ساعت نیرو ثابت مانده و مقادیر تغییر شکل‌های محوری در زمان‌های مشخص بر اساس استاندارد تعیین شده اندازه‌گیری و میزان خزش در بار مذکور ارزیابی گردید. لازم به ذکر است مدت زمان توقف در هر گام تابعی از جابجایی محوری میخ‌ها در زمان‌های ۱۰ و ۱ دقیقه ابتدایی می‌باشد. این پروسه تا زمان اتمام کار و بیرون کشیدگی میخ از داخل خاک ادامه یافته و بر اساس داده‌های حاصله، گراف‌های مربوطه رسم و نتیجه‌گیری‌های لازم صورت گرفت. به عنوان

- [4] Rasekh, M., Yazdani, A., "Study Of Grout Properties in Soil Nails Pullout Tests", The 9th International Congress on Civil Engineering, Esfahan, Iran, 2012.
- [5] Byrne, R. J., Cotton, D., Porterfield, J., Wolschlag, C., Ueblacker, G., "Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls", Report FHWA-SA-96-69R, Federal Highway Administration (FHWA), Washington DC, US, 1998.
- [6] Franzen, G., "Soil Nailing-A Laboratory and Field Study of Pullout Capacity", PhD Thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1998.
- [7] Zhou, W. H., "Experimental and Theoretical Study on Pullout Resistance of Grouted Soil Nails", PhD Thesis, The Hong Kong Polytechnic University, 2008.
- [8] Pradhan, B., Tham, L., Yue, Z., Junaideen, S., Lee, C., "Soil-Nail Pullout Interaction in Loose Fill Materials", International Journal of Geomechanics, 2006, 6 (4), 238-247.
- [9] Su, L., Chan, T., Yin, J., Shiu, Y., Chiu, S., "Influence of Overburden Pressure on Soil-Nail Pullout Resistance in a Compacted Fill", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134 (9), 1339-1347.
- [10] Hong, C. Y., Yin, J. H., Zhou, W. H., Pei, H. F., "Analytical Study on Progressive Pullout Behavior of a Soil Nail", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138, 500-507.
- [11] Hossain, M., Yin, J. H., "Influence of Grouting Pressure on the Behavior of Unsaturated Soil-Cement Interface", American Society of Civil Engineers, 2012, 138, 193-202.
- [12] Bayoumi, A., Bobet, A., Lee, J., "Pullout Capacity of a Reinforced Soil in Drained and Undrained Conditions", Finite Elements in Analysis and Design, 2008, 44, 525-536.

۷- توصیه‌ها

بررسی رفتار میخ‌ها با گروت سیمانی متفاوت می‌تواند باعث بهبود رفتار میخ گردد. همچنین بررسی رفتار میخ‌ها تحت بارهای متفاوت وارده با نصب تنش‌سنج‌ها و کرنش‌سنج‌هایی در جدار آن و پایش مقادیر حاصله و بررسی عملکرد میخ می‌تواند در تحلیل رفتاری آن بسیار مفید باشد. تغییر در نوع گروت مصرفی، زمان تزریق تحت فشار، تغییر در شکل مقطع حفاری، سربار وارده و ... از جمله موضوعاتی است که در این نوع خاک جای فراوان برای کار دارد.

۸- سپاسگزاری

از زحمات استاد راهنما، مشاور و سایر اساتید گروه به دلیل راهنمایی‌های ارزنده در انجام این تحقیق و نیز دفتر فنی و حراست محترم دانشگاه تبریز به جهت مهیا نمودن شرایط مناسب برای انجام آزمون‌ها و همکاری در احداث سایت مطالعاتی صمیمانه قدردانی می‌گردد.

۹- مراجع

- [1] Lazarte, C., Robinson, H., Gómez, J., Baxter, A., Cadden, A., Berg, R., "Soil Nail Walls Reference Manual", Federal Highway Administration, Washington DC 20590, US Department of Transportation, US, 2015.
- [2] Plumelle, C., Schlosser, F., "French National Research Project Clouterre-Recommendations", Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-026, Washington DC, US, 1991.
- [3] Joseph Wong, C. P., Pun, W. K., Andy Wong, H. T., Raymond Wong, M. W., Cheung, T. K., Eric Li, S. F., "Guide to Soil Nail Design and Construction", Published by Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2008.

EXTENDED ABSTRACT

Field Study of the Effect of Grout Pressure on Tensile Strength and Creep Behavior of Grout Nails in Green Marl

Gholam Moradi *, Siamak Zadkarim

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 21 July 2015; **Accepted:** 31 January 2016

Keywords:

Tabriz green marl, Soil nailing, grouting pressure, Tensile strength, Creep

1. Introduction

One of the most important problems in civil engineering is constructing structures, protecting excavation and the building in their surrounding and stabilizing embankments. Non-observing proper methods for protecting deeps and also constructing slopes will lead to irreparable damage and the risks resulted from probable subsidence and reducing the bearing capacity and lateral displacements will cause cracks in neighbouring structures [1].

Studying the nails behavior in marl and clay soils which are considered as fine-grained soils with different properties compared to grained soils are the subjects which has been considered less. High plastic properties, semi-saturation state, changing its behavior in long-term, very low grouting and other similar [2, 3] cases are among the problems which necessitates studying the nail function in these types of soils.

Regarding the diversity of marl in surface (yellow, green, olive green) it is not possible to study all of them in low time and it needs more time and more cost while due to multiplicity of olive green soil which is observable in most civil projects in the city and in lower depth of lands, this research studies the behaviour of nailing systems in these types of marls.

2. Methodology

2.1. Material and equipment

Marl is a term for depositions which is formed by combination of Rousseau sodium carbonate. Marls are exposed in eastern, northern and southern districts of Tabriz and in most city areas, it forms bedrock, in other words, they are under alluvial deposits. These marls are seen in different colors such as yellow, olive green, brown and gray. The yellow and green layers are usually put in surface and gray marls are in deep and mark soils are mechanically classified in the group of clays or silty with high plasticity. The marls' smoothness and plasticity index is in an extended area which shows the variability of carbonate calcium percent and type of clay composing marls.

Tabriz marls have wide diversity in different areas. Such diversity is observed in their appearance and in engineering properties and compositions. These marls show different geo-mechanical behavior in different conditions such as depth, the amount of overhead, natural humidity, saturation, clay percent and also gypsum and coal lines. Regarding the importance of these marls and their expansion in Tabriz and their different function, the studying is done on behavior of this type of marls against nailing system.

For doing tests, it needs a device which can measure and register the force, pressure values and displacements with high precision, in this regard; a nail anchoring was made which can measure the force by 50 tons and measure the deformations in 0.01-mm precision equipped with data logger for registering the data automatically per 6 seconds.

2.2. Test program

For reaching the predicted aims of recent project, 6 nails in real scale with injected length of 400 cm and free length of 60cm in mentioned field with different injection grouts vertically and 4 nails horizontally with 15 degree angle to horizontal with the same details were implemented for studying the effect of grouting pressure on friction

* Corresponding Author

E-mail addresses: gmoradi@tabrizu.ac.ir (Gholam Moradi), s-zadkarim@yahoo.com (Siamak Zadkarim).

behavior and their effects on tensile strength and creeping behavior of nails. The current research studies the effect of grouting pressure on tensile strength and its effect of creeping behavior of nails as one of the effective factors.

In nails drilling, the customary method of shield drilling which is most used in implementation works is used such that 3 nails were drilled vertically and 2 ones horizontally with shield drill and standard cement grout with gravity injection and 3 nails vertically and 2 ones horizontally with similar previous conditions and implemented and tested under 6 times injection pressure in studying site. It shall be noted that regarding the type of studied soil and its low grouting, it was not possible to do injection under high pressure.

3. Results and discussion

The 10 series of test results shown in Table 3, represents the influence of injection pressure on the tensile strength and creep behavior nails are the horizontal and vertical modes. Graphs of tests 2 and 6 for better understanding of the tests are shown in Fig. 1.

The nails implemented in marl soil show different behavior compared to other soils due to humidity, smoothness and high plasticity which causes change in behavior of implemented structures in this kind of soil. Studying and scientific experiences show reduction of tensile power of nails in marl soil during the time which can be due to creeping behavior of this type of soil and aligning the clay grains under load. Improving the nail behavior in marl soil with different methods and increasing the tensile capacity and improving its creeping behavior especially in long-term is considered as aims of this paper. Using pressure grouts can provide more proper conditions due to establishing proper involvement of grout with soil of nail wall and probability of establishing displacement in wall and section of nails and improve the tensile and creeping behavior of nail. It shall be noted that regarding the types of marls with different capabilities and behaviors, the results are changeable upon changing the type of marl type and its physical properties and strength parameters and cannot relate the results to all marls.

Table 1. Properties of olive marl used in plan and its strength parameters

Angle of Internal Friction (Degree)	Cohesive (kg/cm ²)	Plastic Limit PL (%)	Liquid Limit LL (%)	Humidity (w %)	Wet Density (kg/m ³)	Depth (m)
20	1.2	50	74	38	1850	2
21	1.3	59	76	40	1900	5

Table 2. Dimensional properties of nails and used grout

Drilling Type	Cement Type of Grout	Bar Size (mm)	Diameter of the Nail (cm)	Free Length of the Nail (Cm)	Injection Length (Cm)
Rotary Three blades	II	32	11	60	400

Table 3. Results of real tests, dimensional properties

Nail Number	Diameter (cm)	Injection Along the Nail (cm)	Free Length of the Nail (cm)	Run Mode	Drilling Type	Injection Pressure and Grout Type	Maximum Pullout Resistance(ton)	Start Unacceptable Creep (ton)	Reliable force to Perform(ton)
1	11	400	60	Vertical	Rotary	Cement(Type II) Gravity injection	22	18	15
2	11	400	60	Vertical	Rotary	Cement(Type II) Gravity injection	21	17	14
3	11	400	60	Vertical	Rotary	Cement(Type II) Gravity injection	22	19	16
4	11	400	60	Vertical	Rotary	Cement(Type II) Injection pressure= 6 bar	32	26	21
5	11	400	60	Vertical	Rotary	Cement(Type II) Injection pressure= 6 bar	33	27	22
6	11	400	60	Vertical	Rotary	Cement(Type II) Injection pressure= 6 bar	32	26	21
7	11	400	60	Horizontal	Rotary	Cement(Type II) Gravity injection	14	12	10
8	11	400	60	Horizontal	Rotary	Cement(Type II) Gravity injection	15	13	11
9	11	400	60	Horizontal	Rotary	Cement(Type II) Injection pressure= 6 bar	22	18	15
10	11	400	60	Horizontal	Rotary	Cement(Type II) Injection pressure= 6 bar	23	19	16

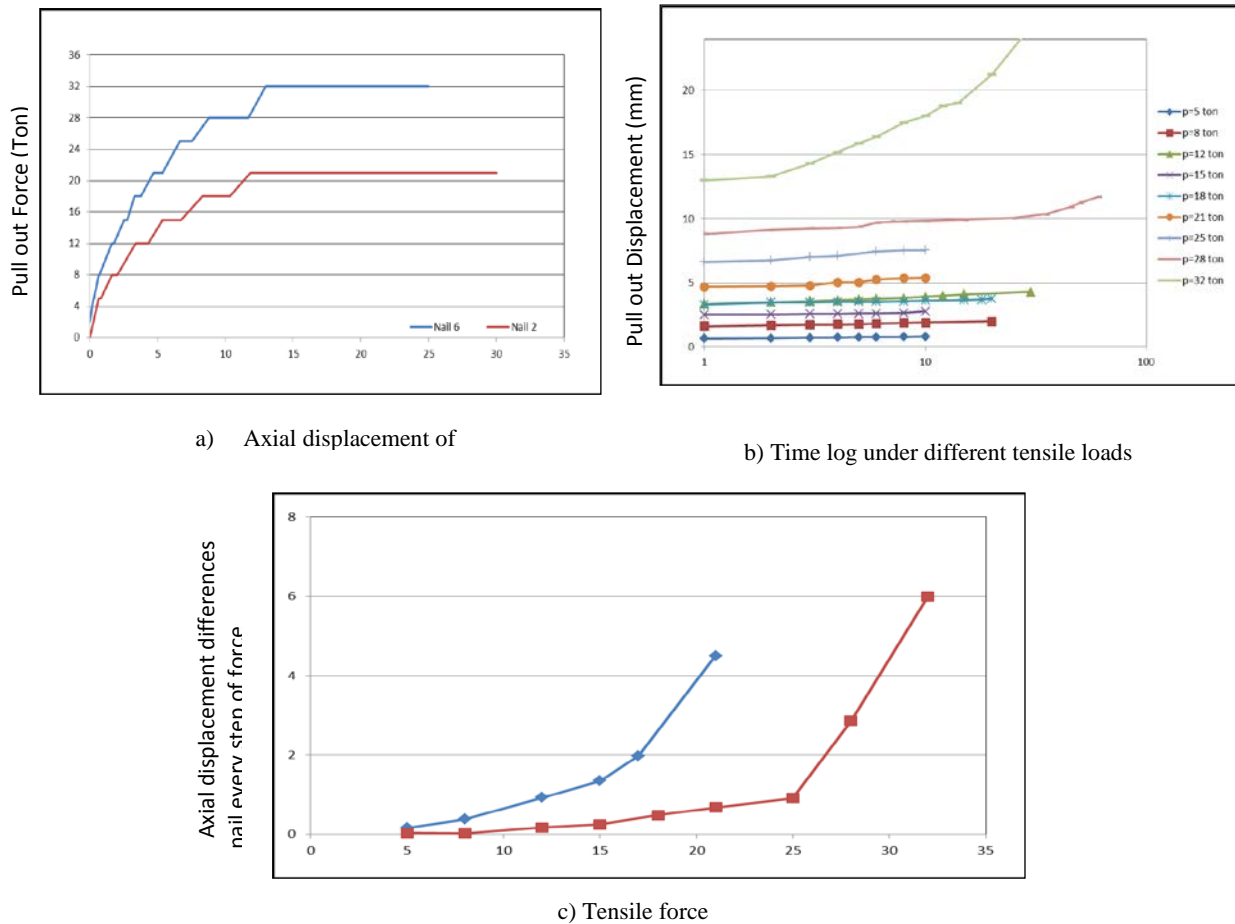


Fig. 1. a) Diagram of tensile force against axial displacement of nail by failure in nails No. 2 and 6, b) Diagram of axial displacement of nail against time log under different tensile loads in nails No 6, c) Diagram of tensile force against displacement changes in different stages in nails No. 2 and 6.

4. Conclusions

The results of test indicate 35% to 40% rise in tensile strength of nails implemented by shield excavation and injected standard cement group with 6 times pressure compared to gravity injection which can be resulted from grout penetration under high pressure to the soil pores and proper involvement of grout with neighboring soil or probability of nail section upon exerting high pressure. Meanwhile, improving creep behavior of nails is observed via using the injection pressure in both horizontal and vertical states. which delays the onset of unacceptable creeping (above 2-mm) and shows more acceptable long-term behavior.

The effect of the injection pressure is approximately equal in the vertical and horizontal nails, which can represent the the approximate similarity in the vertical and horizontal cracks in green marl soil masses.

5. References

- [1] Lazarte, C., Robinson, H., Gómez, J., Baxter, A., Cadden, A., Berg, R., "Soil Nail Walls Reference Manual", Federal Highway Administration, Washington DC 20590, US Department of Transportation, US, 2015.
- [2] Plumelle, C., Schlosser, F., "French National Research Project Clouterre-Recommendations", Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-026, Washington DC, US, 1991.
- [3] Joseph Wong, C. P., Pun, W. K., Andy Wong, H. T., Raymond Wong, M. W., Cheung, T. K., Eric Li, S. F., "Guide to Soil Nail Design and Construction", Published by Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2008.