

بررسی آزمایشگاهی مشخصه‌های تنش و کرنش در خاک‌های ماسه‌ای منجمد: مطالعه موردی متروی تبریز

مهزاد اسمعیلی فلک^۱، هوشنگ کاتبی^{۲*}، اکبر جوادی^۳، سعید رحیمی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، تبریز
- ۲- دانشیار گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، تبریز،
- ۳- استاد گروه ژئوتکنیک، دانشکده فنی، دانشگاه اکستر، انگلستان
- ۴- دانشجوی دکتری، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، تبریز

*Katebi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۱۲/۲۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۸/۱۹]

چکیده

امروزه روش‌های بهسازی موقت خاک جزء مهمترین مباحث ژئوتکنیکی به حساب می‌آیند. روش انجماد مصنوعی زمین به منظور سیستم تکیه‌گاه موقتی خاک، یک روش دوست‌دار محیط زیست (بدون ایجاد تغییرات ماندگار در ساختمان خاک و سفره آب زیرزمینی)، اقتصادی، ایمن و قابل استفاده در همه انواع خاک‌ها است. در انجماد مصنوعی زمین با پایین آوردن دمای خاک به دماهای زیر صفر، آب منفذی خاک منجمد شده و منجر به بهبود پارامترهای مکانیکی، از جمله افزایش مقاومت برشی خاک می‌شود، بدون این که ماده‌ای شیمیایی وارد خاک کند. در این مطالعه تخریل، درجه اشباع یخ، سازند و بافت خاک به عنوان پارامترهای ثابت و دما، تنش محدودکننده و نرخ کرنش به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده‌اند. نتایج این پژوهش که توسط دستگاه فشاری سه‌محوری انجماد بر روی خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده بازسازی شده مطابق ساختگاه ایستگاه H خط ۲ قطار شهری تبریز انجام شده است، نشان می‌دهد که کاهش دما، افزایش تنش محدودکننده و نرخ کرنش، هر یک به صورت جداگانه منجر به افزایش مقاومت برشی و مدول الاستیسیته خاک ماسه‌ای منجمد می‌شود. همچنین مطابق نتایج این پژوهش، نمونه‌های ماسه‌ای بدانه‌بندی شده منجمد، رفتار نرم‌شونده از خود نشان می‌دهند و به صورت شکل‌پذیر گسیخته می‌شوند. در تمامی نمودارهای تنش - کرنش این نوع خاک، یک قله و یک حالت نهایی مشهود است.

واژگان کلیدی: خاک منجمد، متروی تبریز، خواص مکانیکی، پارامترهای ژئوتکنیکی، تنش و کرنش.

۱- مقدمه

آسان، ایمن، دوست‌دار محیط زیست و اقتصادی (بدون در نظر گرفتن هزینه اولیه ماشین‌آلات) است. انجماد مصنوعی زمین هیچ ماده شیمیایی مضر و چرخه اکوسیستم نمی‌کند و در طول اجرای آن نیز هیچ تاثیر منفی‌ای بر خاک و آب زیرزمینی وارد نمی‌شود [1]. یکی دیگر از مهم‌ترین مزایای روش انجماد مصنوعی زمین، قابلیت

روش‌های بهسازی و تثبیت خاک جزء مهمترین مباحث ژئوتکنیک به حساب می‌آیند که در حالت کلی شامل دو بخش بهسازی سطحی و بهسازی زیرسطحی خاک است. انجماد مصنوعی زمین^۱ به عنوان سیستم تکیه‌گاه خاک، یک راه حل

1 Artificial Ground Freezing (AGF)

ویژه با در نظر گرفتن دستگاه سه‌محوری انجماد این حلقه تنگ‌تر می‌شود [35, 36]. از دشواری‌های انجام آزمایش سه‌محوری خاک منجمد، می‌توان به عدم وجود دستگاه سه‌محوری انجماد در بازارهای داخلی و بین‌المللی اشاره نمود؛ چراکه وسیله مورد نیاز یک دستگاه متعارف آزمایش نبوده و به دلیل مساله رقابتی در اغلب مطالعات انجام شده دستگاه خریداری نشده، بلکه طراحی و ساخته شده است. مشکل دیگر در این زمینه نیاز به اتاق سرد با حداقل انتقال حرارت ممکن است [37]، همچنین روند انجام آزمایش بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است [3].

انجماد مصنوعی زمین در عمل مشتمل بر دو بخش است: اول تشکیل بدنه منجمد که تحت عنوان مرحله فعال مطرح می‌شود؛ دوم مرحله مقاوم که عبارت از نگهداری بدنه منجمد در طول مدت عملیات ساختمانی یا آزمایشگاهی است [38-40]. از لحاظ سیستم‌های اجرا نیز تکنولوژی انجماد مصنوعی زمین به دو بخش تقسیم می‌شود: سیستم باز و سیستم بسته [41-43].

پژوهش‌های آزمایشگاهی ارائه شده در اینجا قصد دارد خواص مکانیکی نمونه‌های خاکی منجمد تهیه شده از ایستگاه H خط ۲ قطار شهری تبریز تحت تاثیر تغییرات دما، فشار محدود کننده و نرخ کرنش اعمالی توسط دستگاه آزمایش سه‌محوری انجماد ساخته شده در دانشگاه تبریز را برای استفاده از تکنولوژی نوین انجماد مصنوعی زمین به عنوان سیستم نگهدارنده خاک، مورد مطالعه قرار دهد.

۲- مطالعه آزمایشگاهی

۲-۱- دستگاه آزمایش

همان‌گونه که اشاره کردیم دستگاه آزمایش فشاری سه‌محوری خاک منجمد به دلیل مسائل رقابتی قابل خریداری نیست. بدیهی است به منظور انجام این پژوهش، دستگاه سه‌محوری کرنش کنترل برای خاک‌های منجمد طراحی و ساخته شد. اجزا و مراحل ساخت دستگاه آزمایش فشار سه‌محوری برای خاک‌های منجمد را می‌توان به ترتیب ذیل بیان نمود:

استفاده از این روش در تمامی انواع خاک‌های همگن، نرم، سست و با سرعت بالای آب زیرزمینی است [2, 3].

انجماد مصنوعی زمین عبارت است از پایین آوردن دمای خاک تا دماهای زیر صفر، به طوری که آب موجود در خاک منجمد شده و به عنوان یک عامل پیوندی باعث سیمانتاسیون موقتی خاک شود که منجر به بهبود پارامترهای مکانیکی خاک می‌شود و نفوذپذیری آن را به صفر می‌رساند تا به عنوان یک مصالح آب‌بند عمل نماید [4]. انجماد مصنوعی زمین در مهندسی ژئوتکنیک نباید با انجماد طبیعی یا سیکل‌های ذوب-انجماد نواحی سردسیر اشتباه گرفته شود [5-7].

اولین کاربرد ثبت شده روش انجماد مصنوعی زمین بر روی یک پروژه شافت معدنی در سوانسی، ولز جنوبی به سال ۱۸۶۲ بازمی‌گردد [8]. ماهیت و رفتار مکانیکی خاک‌های غیرمنجمد توسط پژوهشگران زیادی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند در حالی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک منجمد به دلیل پیچیدگی‌های موجود، کمتر بررسی شده‌اند. مطالعات عددی پراکنده‌ای تحت عناوین مدل‌های رفتاری مکانیکی، مکانیکی-حرارتی و مکانیکی-حرارتی-هیدرولیکی توسط پژوهشگران ارائه شده‌اند [9-15]؛ ولی باید در نظر داشت که یک مدل عددی موفق برگرفته از بطن آزمون‌های آزمایشگاهی دقیق و مکرر حاصل می‌شود. در زمینه آزمون‌های آزمایشگاهی روی خاک منجمد نیز پژوهشگران مطالعاتی انجام داده‌اند [16-31]، ولی به دلایلی که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد، مطالعات آزمایشگاهی به ویژه آزمایش سه‌محوری خاک منجمد که شرایط واقعی نمونه خاک در زمین را تداعی می‌کند، بسیار محدود است. به همین دلیل پیمانکاران انجماد کار در دنیا محدود است و امروزه روش انجماد مصنوعی زمین نه تنها یک علم می‌باشد بلکه به یک هنر بدل گشته است [32]. عمده پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام شده روی خاک منجمد توسط دستگاه تک محوری انجام شده است [1, 2, 33, 34] که به دلیل انتقال حرارت شدید دمای اتاق و نمونه در معرض هوا، نتایج به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرند.

شرکت‌های مشاور و دانشگاه‌های معدودی هستند که تجهیزات و تکنسین ارزیابی خاک منجمد را دارا هستند. به

۲-۲- مصالح مورد استفاده در آزمایش

در این مطالعه از نمونه‌های خاک ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده تهیه شده از ایستگاه H خط ۲ قطار شهری تبریز استفاده شد. مشخصات فیزیکی و منحنی دانه‌بندی خاک مذکور به ترتیب در شکل (۲) و جدول (۱) و نمایش داده شده‌اند. به دلیل دانه‌ای و ریزشی بودن خاک و نیز امکان قابلیت تکرارپذیری و مقایسه‌پذیری نتایج، نمونه‌ها مطابق شرایط تراکمی و ساختاری ساختگاه بازسازی شدند. نمونه‌ها مطابق روابط وزنی-حجمی پس از بازسازی و اشباع‌سازی با تخلخل یکسان، داخل قالب‌های مخصوصی قرار گرفتند که از بالا و پایین توسط فوم پلی‌یورتان عایق‌بندی شده بود، قالب‌های فوق از بدنه آلومینیمی با هدایت حرارتی بالایی ساخته شده‌اند شکل (۳). این مجموعه با شرایط فوق به محفظه انجماد منتقل شد. هدف استفاده از این قالب‌ها، انتشار جبهه انجماد در جهت شعاعی و عدم تشکیل لزه‌های یخی و ناهمگنی در نمونه‌های منجمد بود.

شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک استفاده شده برای بازسازی نمونه‌های

منجمد

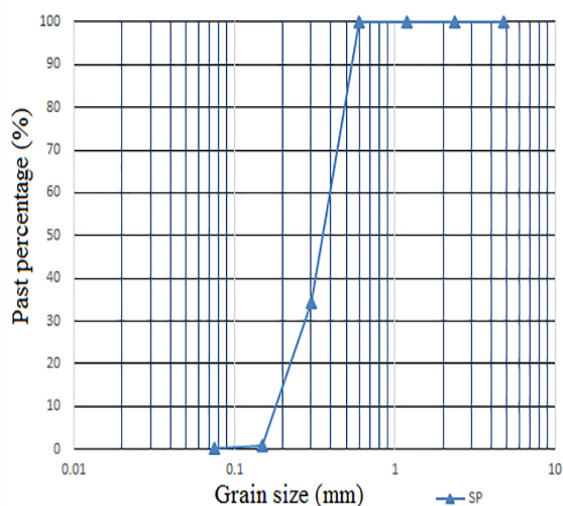


Fig. 2. Grain size distribution of soil samples.

لازم به ذکر است که ۵٪ نمونه‌های ساخته شده به منظور بررسی عدم تشکیل لزه‌های یخی و ناهمگنی، شکافته و بازرسی شدند. طرح کلی قطار شهری تبریز در شکل (۴) نشان داده شده است.

۱- سیستم تبرید؛ ۲- مبدل‌های حرارتی؛ ۳- ساخت و تراشکاری و ماشین‌کاری سلول سه‌محوری و تعبیه دریچه‌های استقرار دو مبدل حرارتی و آب‌بندی و تست برای فشارهای بالا؛ ۴- اتصال فشارسنج S شکل و جابجایی سنج از سلول سه‌محوری به دیتالاگر و از دیتالاگر به رایانه. با ساخت دستگاه سه‌محوری انجماد در دانشگاه تبریز و ثبت اختراع آن تحت شماره ۹۱۴۶۷ در سازمان ثبت اسناد و املاک کشور (مرکز مالکیت معنوی) شکل (۱)، امکان مطالعه روی مدل‌های رفتاری، تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی و مکانیکی خاک‌های منجمد و نیز قابلیت شبیه‌سازی شرایط انجماد مصنوعی زمین در پروژه‌های ساخت و ساز زیرزمینی میسر شد.

شکل ۱. تصویر دستگاه آزمایش سه‌محوری برای خاک‌های منجمد: (۱)

شاسی صلب، (۲) جابه‌جایی سنج، (۳) فشارسنج، (۴) مبدل‌های حرارتی با سیستم اتصال موازی، (۵) ورودی مایع مبرد، (۶) شیر فشار همه‌جانبه، (۷) خروجی مایع مبرد، (۸) سیستم اعمال تنش انحرافی، (۹) محفظه سه‌محوری

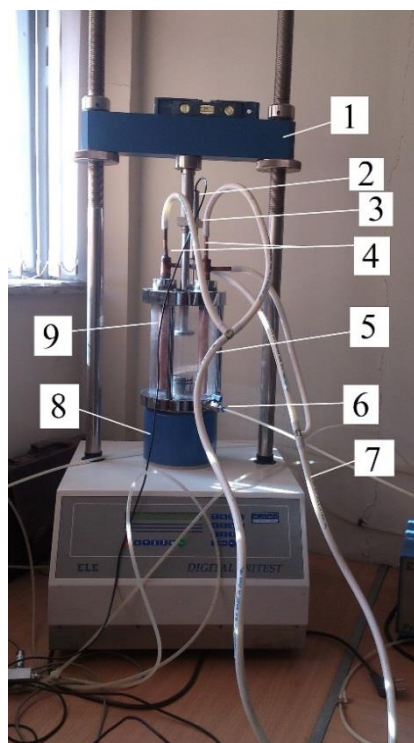


Fig. 1. Triaxial testing apparatus for frozen soils: (1)rigid chassis, (2)LVDT, (3)loadcell, (4)heat exchanger with parallel connection, (5)coolant input, (6)confining pressure valve, (7)coolant output, (8) deviatoric stress system, (9)triaxial chamber.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک استفاده شده برای بازسازی نمونه‌های منجمد

G_s	G (%)	S (%)	$C \& M$ (%)	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_c	ϕ (°)	Soil type
2.635	0	98.8	1.2	0.18	0.27	0.39	2.17	1.04	33	SP

Table 1. Physical characteristics of soil specimens

شدند. آزمایش‌ها در اتاقی با دمای ثابت و کمینه انتقال حرارت ممکن انجام شدند و دمای اتاق همواره پایش می‌شود که از محدوده $14^\circ \pm 0.5^\circ C$ تجاوز نکند. کلیه آزمایش‌ها تا کرنش ۱۰٪ ادامه یافته‌اند که این مقدار از ۵٪ کرنشی که بیشینه تنش در آن رخ داده است بیشتر خواهد بود [44]. شیب قسمت خطی منحنی تنش-کرنش بدون در نظر گرفتن مقاومت پیک و مقاومت نهایی برای محاسبه مدول یانگ استفاده شده قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها به عنوان دوره پیش انجماد درون محفظه انجماد قرار گرفته و پس از انجماد کامل به سلول سه‌محوری منتقل شده و در دمای مورد نظر تثبیت می‌شوند. از آنجایی که آب به هنگام انجماد افزایش حجم می‌دهد و در جهت شعاعی امکان انبساط ندارد، در جهت فوقانی دچار بلندشدگی ناشی از انجماد می‌شود که قبل از استقرار نمونه‌ها داخل سلول سه‌محوری، این بلندشدگی‌ها حذف و مسطح شدند. در نهایت قریب به ۱۰۰ آزمایش سه‌محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده بر روی خاک‌های ماسه‌ای منجمد انجام شدند و عمده آزمایش‌های کنترلی درستی آزمایش‌ها را تایید نمودند که نشان از دقت بالای انجام آزمایش‌ها دارد. لازم به ذکر است، با توجه به رفتار خزشی و وابسته به زمان فاز یخ در خاک منجمد [45]، تعدادی آزمایش سه‌محوری روی یخ خالص نیز انجام شده و تاثیر نرخ کرنش بر آن بررسی شد. دلیل انتخاب آزمایش سه‌محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده، انعکاس بهتر شرایط محل مطالعه موردی توسط این آزمایش است. کلیه آزمایش‌های سه‌محوری بر روی خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده منجمد، بر اساس استاندارد ASTM D2850 [44] و ASTM D4083 [46] انجام شده‌اند.

شکل ۳. تصویر قالب عمل‌آوری نمونه‌های آزمایش قبل از انتقال به دستگاه انجماد



Fig. 3. Curing mold of frozen soil specimens.

شکل ۴. طرح کلی قطار شهری تبریز

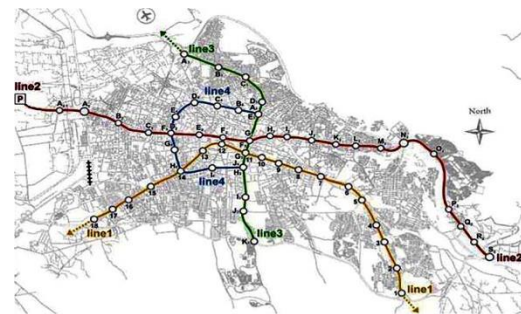


Fig. 4. A general layout of Tabriz Subway

۳-۲- برنامه‌ریزی و روند انجام آزمایش

همان‌گونه که می‌دانیم، هر پژوهش تجربی مستلزم برنامه‌ای برای آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها است. با وجود دشواری روش فاکتوریل ساده، این روش به عنوان خط مشی این پژوهش انتخاب شد. در این روش هر یک از متغیرها به ترتیب ثابت نگه داشته شده سایر متغیرها در کل محدوده مورد مطالعه تغییر می‌کنند. بدین ترتیب محدوده دمایی $1^\circ C$ تا $-11^\circ C$ ، بازه فشار محدود کننده $0 KPa$ تا $800 KPa$ و چهار نرخ کرنش $0.1 mm / min$

۳- بحث و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

پارامترهای تخلخل، درجه اشباع یخ، دما، فشار محدودکننده، نرخ کرنش و تاثیر اختلاط انواع خاک‌ها و افزودنی‌ها با یکدیگر قابل بررسی هستند. از آنجایی که این پژوهش یک مطالعه موردی امکان‌سنجی استفاده از روش انجماد مصنوعی زمین در ساختگاه خاصی است، تنها پارامترهای متغیر ممکن عبارتند از دما، فشار محدودکننده و نرخ کرنش؛ و بدین ترتیب سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شوند. در مورد چگونگی گسیختگی که بر تمامی آزمایش‌ها صادق بود، باید به مساله عدم وقوع گسیختگی ترد اشاره نمود. تمامی نمونه‌های ماسه‌ای منجمد تحت آزمایش سه‌محوری انجماد و در تمامی حالت‌ها، تغییرشکل شکل‌پذیر و رفتار نرم‌شونده از خود نشان دادند. به مانند خاک ماسه‌ای منجمد، یخ خالص نیز رفتار نرم‌شونده از خود نشان می‌دهد. با این تفاوت که گسیختگی یخ خالص تحت آزمایش سه‌محوری کاملاً ترد است. در ادامه تاثیر پارامترهای متغیر روی مقاومت برشی و مدول الاستیسیته خاک منجمد بررسی خواهند شد که نتایج این پژوهش در آینده می‌تواند به عنوان پایگاه داده در شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شود.

است که با کاهش دما مقاومت برشی و مدول الاستیسیته خاک ماسه‌ای بددانه‌بندی شده منجمد افزایش می‌یابد و قله نمودارهای تنش-کرنش به سمت راست منتقل می‌شوند. به عبارتی با کاهش دما، تنش‌های تسلیم در کرنش‌های بیشتری به وقوع می‌پیوندند.

شکل ۵. تاثیر دما بر رفتار تنش-کرنش ماسه منجمد تحت تنش

محدودکننده 0 KPa و نرخ کرنش 0.2 mm / min

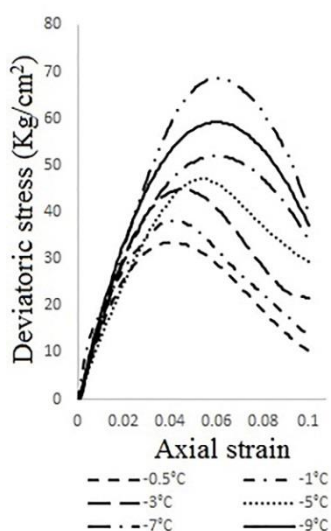


Fig. 5. Stress-strain behavior of frozen sand at different temperatures at confining pressure of 0 KPa and strain rate of 0.2 mm / min .

شکل ۶. تاثیر دما بر رفتار تنش-کرنش ماسه منجمد تحت تنش

محدودکننده 100 KPa و نرخ کرنش 1 mm / min

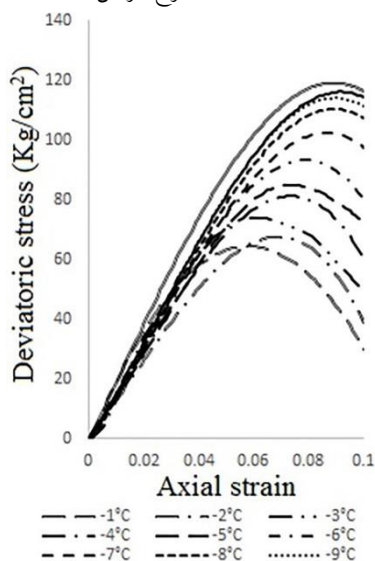


Fig. 6. Stress-strain behavior of frozen sand at different temperatures at confining pressure of 100 KPa and strain rate of 1 mm / min .

۳-۱- تاثیر دما بر مقاومت برشی و مدول الاستیسیته خاک منجمد برای این که تاثیر دما بر مقاومت برشی و مدول الاستیسیته خاک منجمد بررسی شود، باید از نمونه‌های با تخلخل، درجه اشباع یخ، فشار محدودکننده و نرخ کرنش یکسان استفاده شود. اثر دما در فشارهای محدودکننده و نرخ‌های کرنش مختلف نیز بررسی شد که گزیده‌ای از آن‌ها به عنوان نمونه نمایش داده شده‌اند شکل‌های (۵ و ۶). همچنین تاثیر دما بر مدول الاستیسیته خاک منجمد در جدول (۲) ارائه شده است.

رفتار نرم‌شونده در تمامی نمونه‌های خاک منجمد به وضوح مشاهده می‌شود و نمودارهای تنش-کرنش یک قله و یک حالت نهایی از خود نشان می‌دهند. با در نظر گرفتن این قله به عنوان مقاومت برشی خاک منجمد، پر واضح

جدول ۲. تاثیر دما بر مدول الاستیسیته خاک ماسه‌ای بددانه‌بندی شده منجمد بر حسب KPa

T (°C)	C. P. : 0 KPa S. R. : 0.2 mm / min	C. P. : 0 KPa S. R. : 0.5 mm / min	C. P. : 50 KPa S. R. : 0.5 mm / min	C. P. : 100 KPa S. R. : 1 mm / min
-1	73093	78766	81695	103636
-2	86292	84885	93562	100388
-3	78106	97728	104299	110019
-4	-	103835	104913	112298
-5	84556	89119	103983	114291
-6	-	105047	106931	115854
-7	87881	-	-	118239
-8	-	-	-	123104
-9	96801	-	-	125852
-10	-	-	-	126640
-11	112224	-	-	131354

Table 2. The effect of temperature on the Young modulus of frozen SP soils (KPa)

برشی و مدول الاستیسیته خاک منجمد، باید از نمونه‌های با تخلخل، درجه اشباع یخ، دما و نرخ کرنش یکسان استفاده شود. اثر فشار محدودکننده در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف نیز بررسی شد که گزیده‌ای از آن‌ها به عنوان نمونه نمایش داده شده‌اند شکل‌های (۸ و ۹). همچنین تاثیر فشار محدودکننده بر مدول الاستیسیته خاک منجمد در جدول (۳) ارائه شده است.

شکل (۱۰) پوش گسیختگی کولمب بر دوایر موهر را در نرخ کرنش 1 mm / min و در دو دمای 3°C و 5°C تحت فشارهای محدودکننده صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. مقاومت برشی زهکشی نشده ماسه منجمد در دمای 3°C در حدود ۳۲۰۰ و برای دمای 5°C در حدود ۴۱۵۰ کیلوپاسکال است. برای هر دو دما، زاویه اصطکاک داخلی در حدود ۲ تا ۳ درجه به دست می‌آید که ناشی از خطای آزمایش است با افزایش تنش محدودکننده، مقاومت برشی و مدول الاستیسیته خاک ماسه‌ای بددانه‌بندی شده منجمد افزایش می‌یابد و این افزایش مدول الاستیسیته با افزایش تنش محدودکننده بیشتر می‌شود. به عبارتی تنش‌های تسلیم با افزایش فشار محدودکننده از قانون خاصی تبعیت نمی‌کنند و نسبت به تاثیر تغییرات دما بر مدول الاستیسیته، محدودتر هستند.

شکل (۷) نمونه خاک منجمد قبل و بعد از آزمایش سه-محوری را نشان می‌دهد. مطابق شکل نمونه پس از گسیختگی، با وجود مشاهده قله در منحنی تنش-کرنش ماسه منجمد، گسیختگی انعطاف‌پذیری از خود نشان می‌دهد. این نوع گسیختگی برای تمامی نمونه‌های مورد آزمایش در این مطالعه مشاهده شده است.

شکل ۷. نمونه خاک منجمد: (۱) قبل از آزمایش (۲) پس از آزمایش



Fig. 7. Frozen soil specimens: (1) before test, (2) after test.

۳-۲- تاثیر فشار محدودکننده بر مقاومت برشی و مدول الاستیسیته خاک منجمد

به منظور بررسی تاثیر فشار محدودکننده بر مقاومت

جدول ۳. تاثیر فشار محدودکننده بر مدول الاستیسیته خاک ماسه‌ای بددانه‌بندی شده منجمد بر حسب KPa

C. P. (KPa)	Temp : $-3^{\circ}C$	Temp : $-3^{\circ}C$	Temp : $-3^{\circ}C$	Temp: $-5^{\circ}C$
	S. R. : 0.2 mm / min	S. R. : 0.5 mm / min	S. R. : 1mm / min	S. R. : 1mm / min
0	78106	97728	100836	110990
50	89491	104299	-	111189
100	94711	109281	110019	114291
200	94918	11933	115212	132270
300	-	-	-	137618
400	95202	113165	120454	149890
500	-	-	-	152736
800	-	119573	140190	168578

Table 3. The effect of confining pressure on the Young modulus of frozen SP soils (KPa)

شکل ۹. تاثیر فشار محدودکننده بر رفتار تنش-کرنش ماسه منجمد در

شکل ۸. تاثیر فشار محدودکننده بر رفتار تنش-کرنش ماسه منجمد در

دمای $-3^{\circ}C$ و نرخ کرنش 0.5 mm / min

دمای $-3^{\circ}C$ و نرخ کرنش 0.2 mm / min

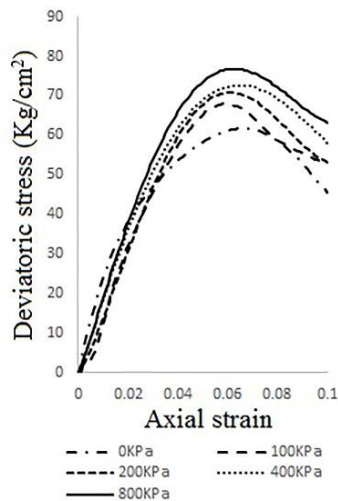


Fig. 9. Effect of confining pressure on stress-strain behavior of frozen sand at temperature $-3^{\circ}C$ and strain rate 0.5 mm / min .

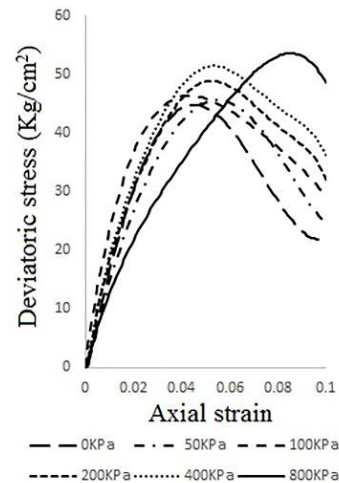


Fig. 8. Effect of confining pressure on stress-strain behavior of frozen sand at temperature $-3^{\circ}C$ and strain rate 0.2 mm / min .

شکل ۱۰. دایره موهر و پوش گسیختگی کولمب برای نرخ کرنش

۳-۳- تاثیر نرخ کرنش بر مقاومت برشی و مدول الاستیسیته خاک منجمد

1 mm / min و دماهای $-3^{\circ}C$ و $-5^{\circ}C$.

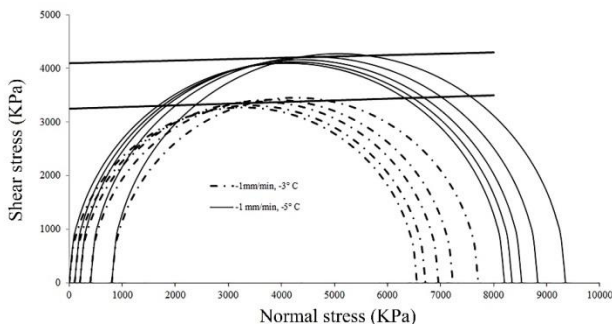


Fig. 10. Mohr-Coulomb failure envelope at strain rate 1 mm / min and temperatures $-3^{\circ}C$ and $-5^{\circ}C$.

به منظور بررسی تاثیر نرخ کرنش بر مقاومت برشی و مدول الاستیسیته خاک منجمد، بایستی از نمونه‌های با تخلخل، درجه اشباع یخ، دما و فشار محدودکننده یکسان استفاده شود. اثر نرخ کرنش در دماها و فشارهای محدودکننده مختلف نیز بررسی شد که گزیده‌ای از آنها به عنوان نمونه نمایش داده شده‌اند (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). همچنین تاثیر نرخ کرنش بر مدول الاستیسیته خاک منجمد در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴. مدول الاستیسیته خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده منجمد بر حسب KPa

S. R.	C. P.: 50 KPa Temp: -1°C	C. P.: 200 KPa Temp: -1°C	C. P.: 0 KPa Temp: -2°C	C. P.: 0 KPa Temp: -3°C
0.1	46770	49820	72122	74488
0.2	51201	61089	76292	78106
0.5	81695	84356	84885	97728
1	83290	91284	98538	100836

Table 4. Young modulus of frozen SP (KPa)

شکل ۱۲. تاثیر نرخ کرنش بر رفتار تنش-کرنش ماسه منجمد در دمای

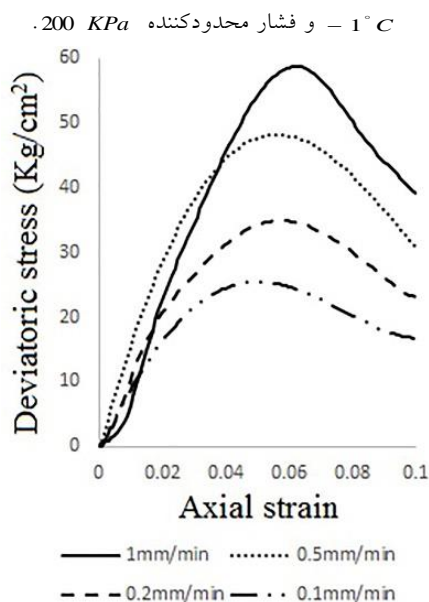


Fig. 12. Effect of strain rate on stress-strain behavior of the frozen SP at temperature -1°C and confining pressure 200 KPa .

شکل ۱۱. تاثیر نرخ کرنش بر رفتار تنش-کرنش ماسه منجمد در دمای

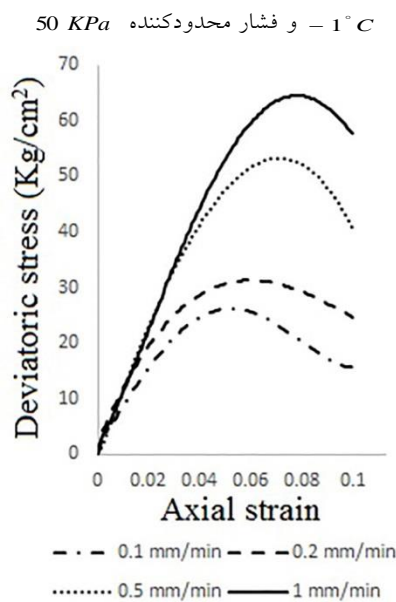


Fig. 11. Effect of strain rate on stress-strain behavior of the frozen SP at temperature -1°C and confining pressure 50 KPa .

شکل ۱۳) تاثیر نرخ کرنش بر رفتار تنش-کرنش یخ خالص در دمای

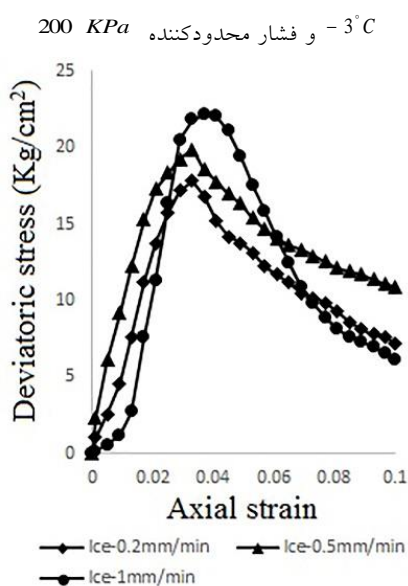


Fig. 13. Effect of strain rate on stress-strain behavior of pure ice at temperature -3°C and confining pressure 200 KPa .

بررسی نمودارها نشان می‌دهد که افزایش نرخ کرنش باعث افزایش مقاومت برشی خاک ماسه‌ای منجمد می‌شود. به منظور بررسی این موضوع تعداد محدودی آزمایش سه-محوری روی یخ خالص انجام شد تا در آنها تاثیر نرخ کرنش بر رفتار یخ خالص مطالعه شود. مطابق شکل (۱۳) رفتار یخ خالص در مقایسه با خاک منجمد بسیار ترد بوده و منحنی تغییرات پس از شکست به دلیل جابه‌جایی نسبی دو قطعه روی یکدیگر است.

قابل ملاحظه است که مقاومت برشی یخ خالص با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد و این افزایش برای مدول الاستیسیته به صورت جزئی‌تری وجود دارد. همچنین قابل ملاحظه است که هرچند افزایش نرخ کرنش موجب افزایش مدول الاستیسیته می‌شود، اما این افزایش در مقایسه با تاثیر دما و تنش محدود کننده، کمتر است.

کرنش منجر به افزایش قابل توجه مقاومت برشی و افزایش جزئی مدول الاستیسیته خاک ماسه‌ای منجمد می‌شود.

۵- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مدیریت محترم سازمان قطار شهری تبریز و حومه برای همکاری به منظور تهیه نمونه و ارائه نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک قدردانی می‌شود.

References

۶- مراجع

- [1] Evirgen, B. Onur, M. I., Tuncan, M. & Tuncan, A., "Determination of the freezing effect on unconfined compression strength and permeability of saturated granular soils", 4th Int. Conf. on Geotechnique, Construction material and environment, Brisbane, Australia, 2014.
- [2] Anagnosto, C. A. & Grammatikopoulos, I., "The effect of freezing on the strength of silty- clay- sand mixtures", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 10, Bund. F, 2005, 1-9.
- [3] Ziegler, M., Baier, C. & Aubach, B., "Simplified phase change model for artificially frozen ground subject to water seepage", Proc. 17th Int. Conf. on soil mechanics and geotechnical engineering, Egypt, 2009, 562-565.
- [4] Ziegler, M., Schuller, R. & Mottaghy, D., "Numerical simulation of energy consumption of artificial ground freezing applications subject to water seepage", Proc. 18th Int. Conf. on soil mechanics and geotechnical engineering, Paris, France, 2013, 2985-88.
- [5] Johansson, T., "Artificial ground freezing in clayey soils", Doctoral thesis, KTH University, Sweden, 2009.
- [6] Wang, W., Qi, J., Yu, F. & Liu, F., "A novel modeling of settlement of foundations in permafrost regions", Geomechanics & Engineering, Vol. 10, No. 2, 2016, 225-245.
- [7] Arasan, S & Nasirpur, O., "The effect of polymers and fly ash on unconfined compressive strength and freeze-thaw behavior of loos saturated sand", Geomechanics & Engineering, Vol. 8, No. 3, 2015, 361-375.
- [8] Li, S., Lai, Y, Zhang, M. & Zhang, S., "Minimum ground pre-freezing time before excavation of Guangzhou subway tunnel", Cold regions science and technology, Vol. 46, 2006, 181-191.
- [9] Lackner, R., Amon, A. & Lager, H., "Artificial ground freezing of fully saturated soil: Thermal problem", Journal of engineering mechanics, ASCE, Vol. 131, No. 2, 2005, 211-220.
- [10] Yuanming, L., Long, J. & Xiaoxiao, C., "Yield criterion and elasto-plastic damage constitutive model for frozen sandy soil", International journal of plasticity, Vol. 25, No. 6, 2009, 1177-1205.
- [11] Nishimura, S., Gens, A., Olivella, S. & Jardine, J., "THM- coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application", Geotechnique, Vol. 59, No. 3, 2009, 159-171.
- [12] Xu, X., Lai, Y., Dong, Y. & Qi, J., "Laboratory

در نهایت به نظر می‌رسد تاثیر نرخ کرنش بر رفتار خاک منجمد ناشی از رفتاری خزشی فاز یخ نبوده بلکه به دلیل آب غیرمنجمدی است که در دماهای زیر صفر نیز در خاک منجمد به صورت نوار باریکی دانه‌های جامد خاک را احاطه کرده و مانع از تماس مستقیم دانه‌های خاک با یخ می‌شود که امروزه این امر در برخی گزارش‌ها، مورد قبول پژوهشگران قرار گرفته است، به گونه‌ای که با کاهش دما مقدار آب غیرمنجمد کاهش یافته و به مقدار ثابتی می‌رسد. مقدار این آب غیرمنجمد برای خاک‌های دانه‌ای کمتر از خاک‌های چسبنده است [3].

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر انجماد مصنوعی زمین بر رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای بددانه‌بندی شده بازسازی شده مطابق ساختگاه ایستگاه H خط ۲ قطار شهری تبریز بررسی شده است. درجه اشباع یخ، تخلخل، بافت و ترکیب خاک به عنوان پارامترهای ثابت و دما، فشار محدودکننده و نرخ کرنش به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شدند. نتایج کلی حاصل از این پژوهش به شرح ذیل ارائه می‌شود:

- در تمامی آزمایش‌ها، خاک ماسه‌ای بددانه‌بندی شده منجمد رفتار نرم‌شوند از خود نشان می‌دهد و کلیه گسیختگی‌ها به صورت شکل‌پذیر است.

- نمودارهای تنش- کرنش یک قله و یک حالت نهایی از خود نشان می‌دهند که در تنش محدود کننده و نرخ کرنش ثابت، با کاهش دما این قله به سمت راست متمایل می‌شود و به عبارتی تنش تسلیم در کرنش‌های بزرگتری رخ می‌دهد.

- با کاهش دما در تنش محدودکننده و نرخ کرنش ثابت، مقاومت برشی و مدول الاستیسیته ماسه بددانه‌بندی شده منجمد افزایش می‌یابد.

- در دما و نرخ کرنش ثابت، با افزایش تنش محدود کننده مقاومت برشی و مدول الاستیسیته خاک ماسه‌ای منجمد افزایش می‌یابد.

- در تنش محدود کننده و دمای ثابت، افزایش نرخ

- [30] Liu, J., Peng, L., Cui, Y. & Liu, J., "Experimental study on direct shear behavior of frozen soil- concrete interface", *Cold regions science and technology*, Vol. 104-105, 2014, 1-6.
- [31] Yugui, Y., Feng, G., Lai, Y. & Zhang, X., "Triaxial creep characteristic and fractional order constitutive model of frozen silt", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 19, Bund. O, 2014, 3757-68.
- [32] Frivik, P. E., "State of art report. Ground freezing: Thermal properties, modeling of processes and thermal design", *Engineering geology*, Vol. 18, 1981, 115-133.
- [33] Nguyen, A. D., Sego, C. D., Arenson, U. L. & Biggar, W. K., "The dependence of strength and modulus of frozen saline sand on temperature, strain rate and salinity", 63rd Canadian Geotechnical Conf. in Clagary, Alberta, Canada, 2010, 467-475.
- [34] Zhao, X., Zhou, G. & Wang, J., "Deformation and strength behavior of frozen clay with thermal gradient under uniaxial compression", *Tunneling and underground space technology*, Vol. 38, 2013, 550-558.
- [35] Braun, B., Shuster, J. & Burnham, E., "Ground freezing for support of open excavations", *Engineering Geology*, Vol. 13, 1979, 429-453.
- [36] Pimentel, E., Anagnostou, G. & Sres, A., "Large-scale physical model for simulation of artificial ground freezing with seepage flow", *Physical modelling in geotechnics*, 2010, 379-382.
- [37] Re, G. D., Germaine, J. T. & Ladd, C. C., "Triaxial testing of frozen sand, equipment and example results", *Cold regions engineering*, ASCE, 2003, 90-118.
- [38] Shuster, J. A., "Engineering quality assurance for construction ground freezing" *Engineering Geology*, Vol. 18, 1981, 333-350.
- [39] Andersland, O. B. & Ladanyi, B., "Introduction to frozen ground engineering", Chapman & Hall, Springer, 1994.
- [40] Johansson, M., "ground freezing of weathered rock in the molleback zone at the Hallandsas project", M.Sc. Thesis, Lulea University, Sweden, 2011.
- [41] Heinrich, D., Muller, G. & Voort, H., "Ground freezing monitoring techniques", *Engineering Geology*, Vol. 13, 1979, 455-471.
- [42] Stoss, K. & Valk, J., "Uses and limitations of ground freezing with liquid nitrogen", *Engineering Geology*, Vol. 13, 1979, 485-494.
- [43] Gallavresi, F., "ground freezing- The application of the mixed method (Brine- Liquid nitrogen)", *Engineering Geology*, Vol. 18, 1981, 361- 375.
- [44] ASTM D2850-15(2015), "Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils", ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2015, www.astm.org.
- [45] Ting, John M. *The Creep of Frozen Sands: Qualitative and Quantitative Models*. No. R81-5. Massachusetts inst of Tech Cambridge Dept of civil engineering, 1981.
- [46] ASTM D4083-89(2016), "Standard Practice for Description of Frozen Soils (Visual-Manual Procedure)", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.
- investigation on strength and deformation characteristics of ice-saturated frozen sandy soil", *Cold regions science and technology*, Vol. 69, No. 1, 2011, 98-104.
- [13] Zhou, M., "Computational simulation of soil freezing: Multiphase modeling and strength upscaling", Ph.D. Dissertation, Ruhr University, Bochum, Germany, 2013.
- [14] Casini, F., Gens, A., Olivella, S. & Viggiani, G., "Triaxial tests on frozen ground: formulation and modeling", 12th Int. Conf. on computational plasticity: Fundamentals and Applications, Barcelona, Spain, 2013.
- [15] Lai, Y., Xu, X. & Qi, J., "An experimental investigation of the mechanical behavior and a hyperplastic constitutive model of frozen loess", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 84, 2014, 29-53.
- [16] Vyalov, S., "Rheology of frozen soils", Proc. 1st Int. Conf. on permafrost, National academy of sciences, 1963, 332-339.
- [17] Sayles, F. H., "Creep of frozen sands", Technical report 190, U.S. Army cold region research and Engineering laboratory, Hanover, 1968.
- [18] Sayles, F. H., "Triaxial and creep tests on frozen Ottawa sand", 2nd Int. Conf. on permafrost, National academy of sciences, 1973, 384-391.
- [19] Jones, J. S. & Brown, R. E., "Design of tunnel support system using ground freezing", *Engineering Geology*, Vol. 13, 1979, 375-395.
- [20] Mellor, M. & Cole, D. M., "Deformation and failure of ice under constant stress and constant strain rate", *Cold regions science and technology*, Vol. 5, No.2, 1982, 201-219.
- [21] Jacka, T. H., "The time and strain required for development of minimum strain rate in ice", *Cold regions and science technology*, Vol. 8, No. 3, 1984, 261-268.
- [22] Hivon, E. G. & Sego, D. C., "Strength of frozen saline soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, 1995, 336-354.
- [23] Al-Hunaidi, M. O., Chen, P. A., Rainer, J. H. & Tremblay, M., "Shear moduli and damping in frozen and unfrozen clay by resonant column tests", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, 1996, 510-514.
- [24] He, P., Zhu, Y. & Cheng, G., "Constitutive models of frozen soil", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, 2000, 811-816.
- [25] Sheng, Y., Peng, W., Wen, Z. & Fukuda, M., "Physical properties of frozen soils measured using ultrasonic techniques", *Permafrost*, Philips, Springman & Arenson, 2003, 1035-38.
- [26] Colombo, G., Lundardi, P., Cavagna, B., Cassani, G. & Manassero, V., "The artificial ground freezing technique application for the Naples underground", Proc. of World Tunnel congress, Agra, India, 2008, 910- 921.
- [27] Yugui, Y., Lai, Y., Dong, Y. & Li, S., "The strength criterion and elastoplastic constitutive model of frozen soil under high confining pressures", *Cold regions science and technology*, Vol. 60, No. 2, 2010, 154-160.
- [28] Qi, J., Yao, X., Yu, F. & Liu, Y., "Study on thaw consolidation of permafrost under roadway embankment", *Cold regions and science technology*, Vol. 81, 2012, 48-54.
- [29] Yugui, Y., "Experimental and theoretical investigations on the deformation characteristics of frozen silt in underground engineering", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 19, Bund. I, 2014, 1883-94.

Experimental Investigation of Stress and Strain Characteristics of Frozen Sandy Soils - A Case Study of Tabriz Subway

M. Esmaeili-Falak¹, H. Katebi^{2*}, A. Javadi³, S. Rahimi⁴

1- Ph.D. candidate in Geotechnical Eng., Faculty of Civil Eng., University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Associate Prof., Geotechnical Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Prof., Department of Engineering, University of Exeter, Exeter, UK

4- Ph.D. candidate in Structural Eng., Faculty of Civil Eng., University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Katebi@tabrizu.ac.ir

Abstract:

Temporary soil improvement techniques are considered among the most important geotechnical topics. Artificial ground freezing is considered to be eco-friendly, economic, safe and applicable for all types of homogeneous, loose and soft soils. By lowering the soil temperature below zero, the pore water of the soil freezes which leads to improved mechanical properties of soil; it increases the shear and compressive strength of soil, without releasing any chemicals into the soil environment. In practice, artificial ground freezing consists of two parts: (i) formation of frozen body before construction or test (active step) and (ii) maintenance of frozen body during the construction and test procedure (passive step). There are two methods for using artificial ground freezing; (i) open method and (ii) closed method. In the open method, liquid nitrogen is used for cooling. With the evaporation of the liquid nitrogen, the soil freezes and the nitrogen gas is released to the atmosphere. In the closed method, a brine is used which is connected to a refrigeration plant. The brine is circulated until the formation of frozen body. The used brine can be ethylene glycol or calcium chloride. One of the difficulties of studying frozen soils is the absence of triaxial compression apparatus for frozen soils in the national and international markets, because it is an unconventional test apparatus. In this research, a triaxial compression apparatus was developed for testing of frozen soils in the geotechnical laboratory of the University of Tabriz. This apparatus was placed in a cold and insulated room with minimum heat transfer. The temperature of the room was monitored continuously. This triaxial apparatus for frozen soils was developed using a closed system that is connected to a refrigeration plant. In this study, void ratio, ice saturation and texture of soil were considered as constant parameters and temperature, confining pressure and strain rate were considered as variable parameters. The soil samples were remolded in the laboratory to represent the in situ soil in line 2, station H of Tabriz Subway. The in situ soil was poorly graded sand and fully saturated. A special type of mold was designed for this research, composed of aluminum material with high heat transfer ability. The mold was insulated from top and bottom and it was rigid in radial direction. A series of unconsolidated undrained triaxial tests were conducted on samples of the frozen soil using the developed triaxial compression apparatus. The results show that, at constant confining pressure and strain rate, decreasing temperature leads to increase in the shear strength and modulus of elasticity of the soil. Decreasing temperature also results in occurrence of the yield point of frozen soil at higher strains. Also, at constant temperature and strain rate, increasing the confining pressure increases the shear strength and modulus of elasticity of the soil. At constant temperature and confining pressure, increasing the strain rate leads to a moderate increase in the modulus of elasticity and a significant increase in shear strength of frozen sandy soil. Furthermore, the results show that the poorly graded frozen sandy soil samples tested in this research program show softening behavior. All the stress-strain curves show a peak and a residual state.

Keywords: frozen soil, Tabriz subway, mechanical properties, Geotechnical parameters, stress and strain.