Archive of SID

بهسازی خاک با استفاده از روش‌های اصلاح هیدرولیکی

احسان قصری[۱×]، صادق احسانفر[۲]، علی پوراربابی[۳]

۱و۲- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه آزاد زاهدان

۳ - دانشجوی دکتری عمران سازه و عضو هیات علمی دانشگاه آزاد واحد زابل

eghasri@yahoo.com

چکیده

مهندسین ژئوتکنیک برای بهسازی خاک و با هدف افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری آن از روشهای مختلفی استفاده می‌کنند. یکی از این روش‌های فیزیکی، روشهای اصلاح هیدرولیکی بوسیله انجماد و گرمایش خاک می‌باشد. تغییرات در ساختمان خاک جدا از تغییرات محتوای آب، باعث استفاده از روشهای اصلاحی بر پایه دما وهمچنین ابزارهای دیگر شده است.انجماد خاک فرآیندی است که طی آن لایه‌های آبدار را بطور موقت نفوذناپذیر و مقاومت فشاری و برشی آن را با تبدیل آب بین درزه‌ها به یخ افزایش می‌دهند. انجماد خاک معمولاً به منظور ممانعت از نفوذ جریان آب زیر زمینی به درون محل حفاری جهت آماده سازی عملیات گودبرداری ساختمانی و ایجاد پایداری موقت مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین از روش حرارتی برای ایجاد تغییرات در محتوای آب موجود در خاک میتوان استفاده نمود که پر کاربرد ترین آنها استفاده از شمعهای ژئوترمال میباشد. در این مقاله سعی شده به طور خلاصه اصول و کاربردهای روش‌های مختلف اصلاح هیدرولیکی بررسی گردد.

کلمات کلیدی: بهسازی فیزیکی خاک، روش انجماد، شمعهای ژئوترمال، آب زیرزمینی، گودبرداری ساختمانی.

۱- مقدمه

بهسازی خاک شامل روشهای مختلف تغییرخصوصیات خاک بوده که نهایتا منجر به افزایش مقاومت برشی خاک ،کاهش تغییرات حجمی وتامین رفتار خاک رابهمراه دارد.خاکهای مسئله دارمثل خاکهای واگرا، رومبنده، متورم شونده خاکهای نرم وشل هستندکه دارای پایداری حجمی پایین ومقاومت کم بوده و زمانی تحت اشباع وفشار بار قرارمی گیرندبافت داخلی شان بهم ریخته ونشست زیادی می کند. برای جلوگیری وکاهش نشست می توان از انواع روش های بهسازی استفاده نمود .به کار گیری یک روش خاص بستگی به عوامل اقتصادی ، کارایی درخاک موجود دسترسی به تجهیزات و مصالح ومهارتها واثرگذاری درمحیط زیست دارد. تغییرات در حالت خاک نرم رسی را که بخاطر تغییرات رطوبت بوجود میآید را میتوان با روشهای اصلاح مانند روش انجماد تحت کنترل در آورد. تغییرات در حالت خاک را که بخاطر تغییرات رطوبت بوجود می آید را میتوان با روشهای اصلاح هیدرولیکی تحت کنترل در آورد. تغییرات در ساختمان خاک جدا از تغییرات محتوای آب، باعث استفاده از روشهای اصلاحی بر پایه دما وهمچنین از ابزارهای دیگر شده است که به روشهای فیزیکی معروف هستند (قصری،۱۳۹۱).

در واقع روشهای بهسازی فیزیکی خاک به دو دسته تقسیم میشوند: روش اصلاح گرمایی و روش انجماد خاک(Sirvakumar,2008) .

www.SID.ir

Archive of SID

در این مقاله به طور اختصار به بررسی اصول و موارد‌کاربرد این دو روش در بهسازی فیزیکی زمین پرداخته میشود.بر اساس تحقیقات نویسنده مقاله، این روش هنوز در کشورمان بطور مستقیم عملیاتی نشده، ولی پتانسیل اجرای آن با توجه ظرفیت های موجود در کشور امکان پذیر است(قصری،۱۳۹۱).

۲- روش گرمایش خاک

اصلاح حرارتی یک خاک رس تا دمای ۴۰۰ درجه سیلسیوس منجر به تغییرات بیان شده در خصوصیات مهندسی آن میشود.گرما دادن، یک فرایند انرژی بر است و برای پایدارسازی یک مترمکعب خاک، ۵۰ تا ۱۰۰ لیتر سوخت مورد نیاز است.امروزه این روش دیگر پیشنهاد نمیشود.هرچند استفاده از شمعهای ژئوترمال بعنوان سیستم حرارتی همچنان در بریتانیا مرسوم است.

از انواع روشهای حرارتی می توان به روشهای گرمایش سطح زمین، گرمایش در طول گمانه ها، استفاده از بلوکهای ساختمانی حرارتی و شمعهای حرارتی اشاره نمود که استفاده از روش آخر همچنان در بریتانیا مرسوم میباشد(Sivakumar, 2008).

شمعهای ژئوترمال سیستم های ابتکاری سازه های فونداسیون هستند که برای کمک به منبع انرژی زمین مورد استفاده قرار میگیرند. یکسری حلقه های توخالی در شمعهای ساختمان نصب میشوند و آب یا مایع دیگری در آنها پمپ میگردد.این مایع و انرژی حرارتی جابجاشده زمین سپس از درون یک مبدل حرارتی در ساختمان برای ایجاد سرمایش یا حتی گرمایش در زمستان، عبور میکنند.به هرحال از آنجایی که اینها روی فونداسیون ساختمان نصب میشوند، بایستی دو تکنولوژی را همزمان اجرا کرد.در شکل ۱ نمونه ای از شمعهای هیدروترمال را میتوان مشاهده نمود.

شکل ۱ – نمونه ای اجراشده از شمعهای ژئوترمال

۳- انجماد زمین

انجماد زمین فرآیندی است که طی آن لایه های آبدار را بطور موقت نفوذناپذیر میکند و مقاومت فشاری و برشی آنها را با تبدیل آب بین درزه ها به یخ، افزایش میدهد. انجماد زمین عمدتا در آب بند کردن در برابر آبهای زیرزمینی، نگهداری فضاهای

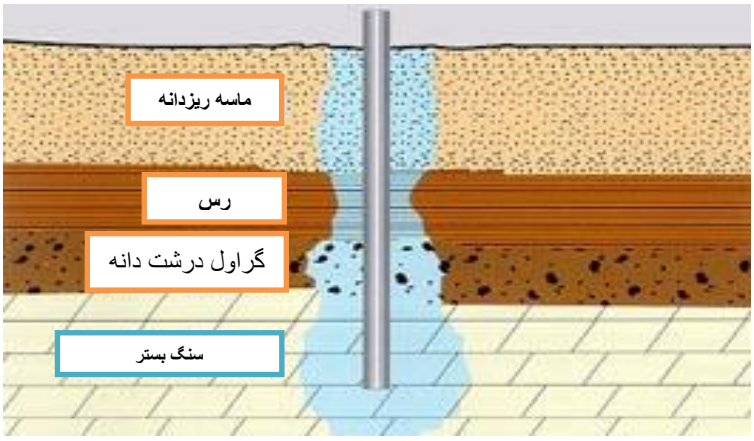
www.SID.ir

Archive of SID

زیرزمینی موقتی، پایدار سازی زمین برای حفر تونل های زیرزمینی، برای جلوگیری از زمین لغزش، پایداری زیربنای سازه ها و محدود کردن جریان آلودگیهای زیرزمینی بکار میرود، شکل۲.

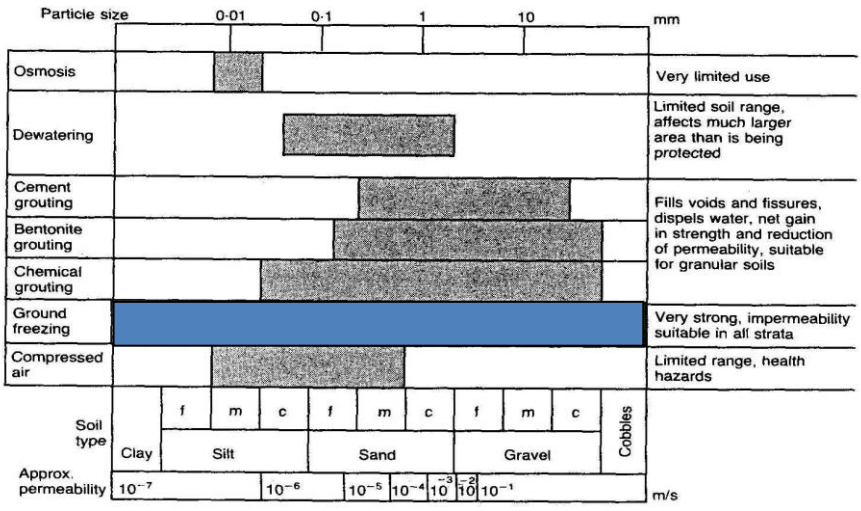
در واقع انجماد زمین نفوذپذیر آبدار ،همزمان باعث بسته شدن مجاری آب درون درزه ها و از همه مهمتر باعث افزایش مقاومت زمین سست میگردد.

در این روش، نیاز به تزریق هیچ گونه مصالح فرعی و خارجی نیست ، و به غیر از احتمال تورم در اثر یخ زدگی، زمین معمولا به حالت نرمال خود بر میگردد(Sirvakumar ,2008).



شکل۲- نحوه گسترش انجماد اطراف لوله ها در لایه های مختلف خاک(Sirvakumar ,2008)

این فرایند برای یک دامنه گسترده ای از خاکها کاربرد دارد؛ اما زمان قابل توجهی برای ایجاد یک دیوار یخی کارآمد گرفته میشود و فرآیند انجماد بایستی بطور پیوسته و تا موقعی که لازم باشد ادامه یابد، شکل ۳. روش انجماد خاک ممکن است بدون توجه به ساختار، دانه بندی یا نفوذپذیری، در هر ساختار خاکی یا سنگی استفاده شود. هر چند این روش در زمینهای نرم بهتر از زمینهای سنگی جواب میدهد(M.Nemati ,2007).



شکل ۳- گستره کاربرد روش های مختلف بهسازی برای خاکهای با دانه بندی مختلف(M.Nemati ,2007)

www.SID.ir

Archive of SID

فرآیند انجماد خاک ممکن است برای هر اندازه، شکل یا عمقی از حفاری بکار رود و دستگاه ایجاد سرمایش می تواند از پروژه ای به پروژه ای دیگر منتقل شود؛ همینکه یک دیوار زمینی یخ زده نفوذناپذیر قبل از حفاری ساخته میشود، اصولا نیاز به هوای فشرده، زهکشی، یا نگرانی راجع به فروریزش زمین در حین زهکشی و حفاری را از بین میبرد(Soo ,1983).

۴- اصول انجماد خاک

تاثیرگذاری انجماد ، وابسته به حضور آب برای ایجاد یخ، سیمانی بودن فواصل بین ذرات و افزایش مقاومت زمین جهت ایجاد تعادل بین سنگ نرم و متوسط است . اگر زمین اشباع یا نزدیک به اشباع باشد، بنابراین نفوذناپذیر محسوب میشود. اگر رطوبت سوراخها را پر نکرده باشد، ممکن است نیاز به اضافه کردن آب باشد. رسیدن به مقاومت مورد نظر خاک منجمد شده بستگی به دمای انجماد، رطوبت و طبیعت خاک دارد. فرآیند انجماد مخصوصا میتواند روی پایداری سیلتهایی که برای تزریق بسیار ریز هستند تاثیر بگذارد(Soo ,1983).

در حین یخ زدن، آب حدود ۹٪ افزایش حجم میدهد که البته به تنهایی باعث اعمال تنش و کرنش روی خاک نمیشود، مگر اینکه آب بین دو لایه محدود شده باشد. با رطوبت تا حدود ۳۰٪ افزایش حجم مستقیم خاک ممکن است حدود ۳٪ باشد. تورم حاصل از یخ زدگی که ممکن است در سیلتهای ریزدانه و رسها اتفاق بیافتد، پدیده ای متفاوت است. لنزهای یخ در سنگ و رس، ممکن است بصورت رگه های ریز بزرگ شوند. بنابراین باعث افزایش نفوذپذیری پس از آب شدن میشوند(Sivakumar ,2008).

همانند تمام تکنیکهای بهسازی زمین، بررسی کافی محل اجرای پروژه برای انتخاب بهترین سیستم ، طراحی مناسب لوله های انجماد و انتخاب دستگاه با قدرت کافی جهت انجماد، ضروری به نظر میرسد.

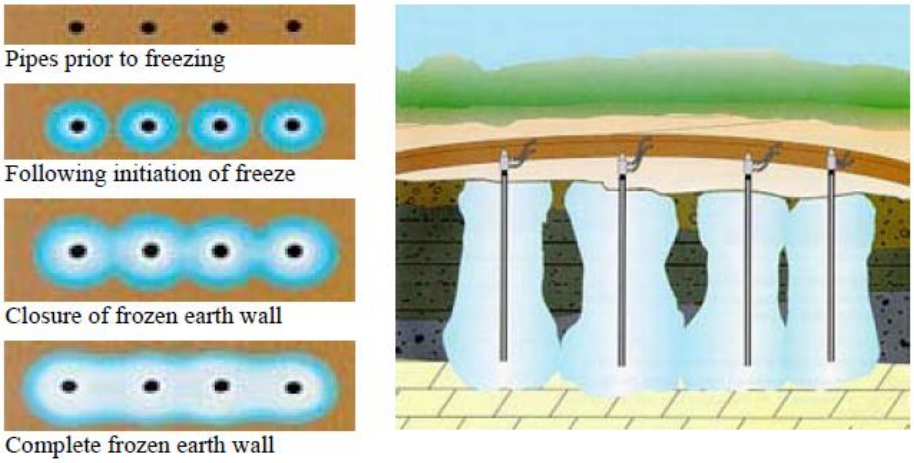
پس از اینکه انجماد اولیه پایان پذیرفت و دیوار یخ زده درجای خودش قرارگرفت، ظرفیت سرمایشی بطور قابل توجهی جهت نگهداشتن دیواره یخ زده کاهش میابد. وقتی که رس نرم تا دمای انجماد سرد میشود، برخی بخشهای آب حفره ای آن شروع به انجماد میکند و رس هم بهمین منوال سخت تر می گردد. اگر دما همچنان کاهش یابد، آب منفذی بیشتری یخ میزند و مقاومت رس بطور قابل ملاحظه ای افزایش میابد.

هنگام طراحی سازه های زیرزمینی یخی در رس، رسیدن به دمای پایین تر جهت افزایش مقاومت مورد نظر، ضروری به نظر میرسد. بطور مثال، رسیدن به دمای ۷- درجه سلسیوس ممکن است برای زمین ماسه ای کافی باشد، در حالیکه برای رس نرم دمای کمتر از ۲۹- درجه سلسیوس ممکن است نیاز باشد. مطابق شکل۳، زمین یخ زده ابتدا به شکل استوانه های قائم اطراف لوله های انجماد شکل میگیرند و همینطور که از این پروسه می گذرد این استوانه ها گسترش یافته و با هم تشکیل یک دیوار پیوسته را میدهند. ضخامت این دیوار یخی بستگی به نرخ کاهش دما و خروج حرارت از خاک دارد.

یکبار که دیوار یخی به ضخامت مورد نظر رسید، برای حفظ شرایط، کاهش دما متوقف میشود و فقط گرمای خاک خارج میگردد تا دما ثابت بماند. طراحی یک دیوار خاکی منجمد توسط خصوصیات گرمایی خاک زیرین تحمیل میشود و بستگی به این دارد که آیا این سیستم انجمادجوابگو هست یا نه(Han , 2009).

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٤- نحوه تشکیل دیواره یخی(Han ,2009)

۵- مونیتورینگ

به محض شروع عملیات انجماد، مونیتورینگ آن برای اطمینان از ساختار دیواره یخی و همچنین بررسی روند انجام و اتمام فرایند انجماد لازم میباشد. در حین حفاری، لوله های مونیتورینگ دما برای ثبت دمای زمین نصب میشوند(Sivakumar ,2008).

۶- روشهای انجماد خاک

انجماد خاک ممکن است به دو روش انجام پذیرد:

روش غیر مستقیم ؛ بوسیله گردش یک سردکننده ثانویه درون لوله هایی که به داخل زمین فرو رفته اند.

و روش مستقیم؛ بوسیله گردش یک مایع خنک کننده اولیه درون لوله های زمینی یا بوسیله تزریق یک سردکننده به داخل زمین، مانند نیتروژن مایع(Sivakumar, 2008).

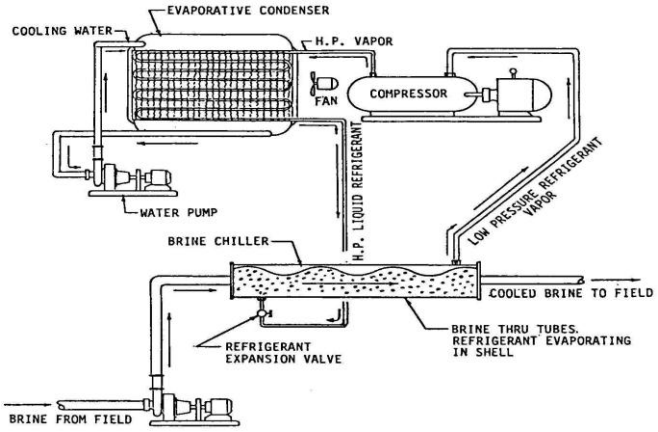
۱-۶- روش انجماد غیر مستقیم

دستگاه سردکننده اولیه برای ایجاد چرخه گرفتن گرما از یک سردکننده ثانویه درون لوله ها و حرکت به سمت زمین مورد استفاده قرار می گیرد. این سردکننده اولیه بیشتر بعنوان جانشین گاز فریون استفاده میشود، که بخاطر مضرات آن برای لایه اوزن از ۱۹۹۶ از این چرخه خارج شده است.از دیگر سردکننده های اولیه میتوان به آمونیاک، NH_4،(-۳،۳۳°C) و دی اکسید کربن CO_2 -که البته استفاده از آن منسوخ شده است – اشاره کرد.

سرد کننده ثانویه، که در میان شبکه لوله ها در زمین میچرخد، معمولا محلول کلرید کلسیم میباشد. با یک غلظت ۳۰٪ مانند آب نمک، که نقطه انجماد آن از سردکننده اولیه کمتر است. روش سردسازی اولیه اساسا همان چرخه معکوس انبساط و انقباض کارنو است .زمان لازم برای منجمد کردن زمین در واقع به ظرفیت ماشین سردکننده بستگی دارد که خود به حجم زمینی که باید منجمد شود، فاصله و سایز لوله های منجمد کننده و رطوبت زمین وابسته است(Kinosita et al., 1985)، شکل ۵.

www.SID.ir

Archive of SID

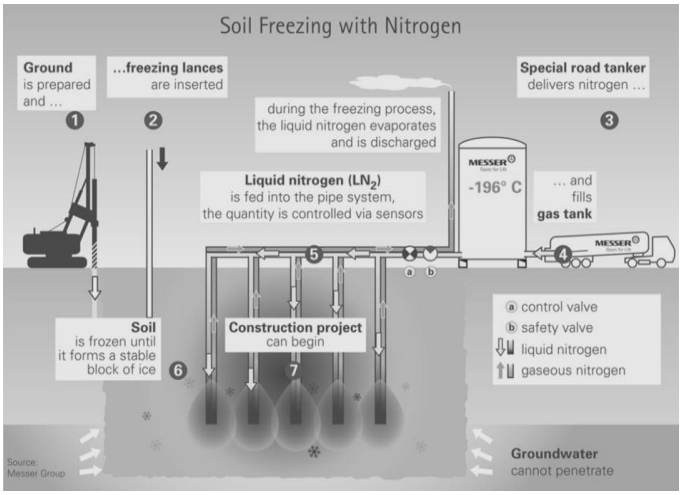


شکل ۵- شماتیک یک کارخانه انجماد زمین به روش غیر مستقیم توسط محلول نمک(Kinosita et al., 1985)

۶،۲. روش انجماد مستقیم

در این سیستم ها سردکننده اولیه درون سیستم لوله ها در زمین میچرخد و بطور مستقیم گرمای نهان را بیرون میکشد، و بنابراین کارایی بالاتری نسبت به روش غیرمستقیم دارد. زمان انجماد کردن مستقیم با زمان لازم برای روش غیرمستقیم یکی است. این انتخاب بستگی به دردسترس بودن ماشین خنک کننده، مقرون به صرفه بودن و شاید سلیقه شخصی مهندسین خواهد داشت.

نیتروژن مایع(LN_2) : با استفاده از این روش دیگر نیازی به یک کارخانه بزرگ سردسازی پرتابل نخواهد بود، و دما پایین تر و بنابراین عملیات سریعتر انجام میشود.نیتروژنی که در دمای$^{\circ}C$ ۱۹۶ - بجوش می آید، تحت فشار متوسط و در ظروف عایق بصورت مایع به سایت موردنظر برده میشود که سرمای موردنیاز را تامین می کند. از فواید این روش می توان به سرعت بالای انجماد خاک بدون نیاز به برپایی یک کارخانه با دقت و تجهیزات زیاد می باشد. هنگامی که وقت کافی برای آماده سازی وجود داشته باشد، یک ردیف از لوله های انجماد برای چرخش نیتروژن نصب میشود، که شامل لوله های بازگشتی خروجی به اتمسفر میشود. علیرغم اینکه سرعت منجمد کردن زمین در این روش از روشهای دیگر بسیار بیشتر است، اما این روش بسیار پرهزینه است و بیشتر برای یک دوره کوتاه انجماد تا حدود ۳ هفته مناسب میباشد. شکل ۶ شماتیک یک کارخانه انجماد نیتروژن مایع را نشان میدهد.



شکل ۶- شماتیک یک کارخانه انجماد مستقیم بوسیله نیتروژن مایع(Sivakumar,2008)

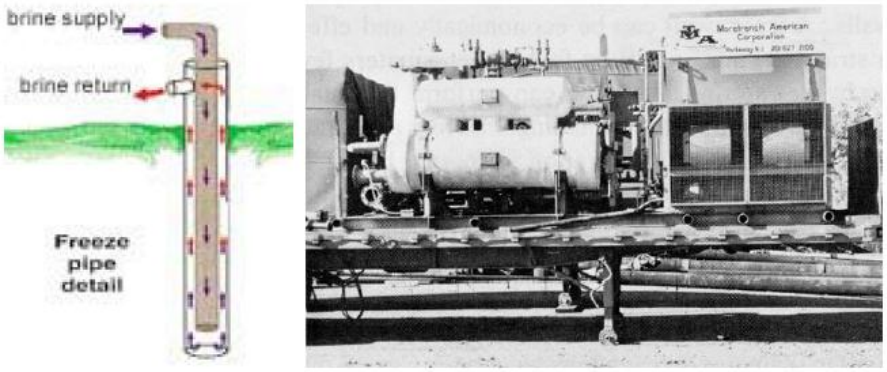
www.SID.ir

Archive of SID

این روش ممکن است همزمان با دیگرروش ها و با ردیفهای مشابه لوله های انجماد و شبکه لوله های انشعابی عایق بکار رود، که در این صورت نیتروژن مایع اول برای گسترش سریع یخ زدگی بکار میرود و سپس برای حفظ شرایط مطلوب انجماد تا زمان اتمام کار استفاده میشود.

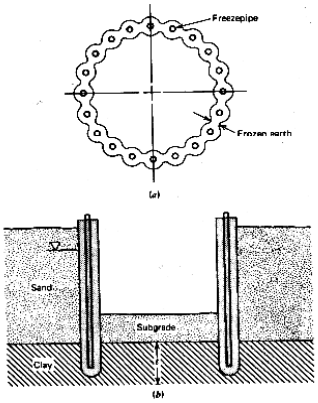
۷- ابزار و روشهای انجماد

متداول ترین روش انجماد، چرخه(سیرکولاسیون) آب نمک است(یک محلول قوی آب نمک).آب نمک سرد شده توسط مجرایی به کف لوله های انجماد پمپ شده و با جریان در لوله ها، گرما را از خاک بیرون می کشد. شکل۷ واحد سیار ۵۰ تنی سردکننده نمکی رانشان میدهد.

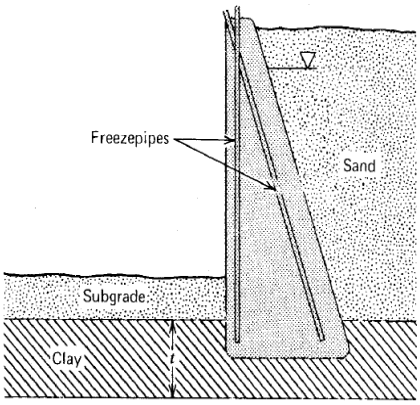


شکل ۷- کارخانه واحد سیار ۵۰ تنی سرد کننده نمکی(M.Nemati, 2007)

نیتروژن مایع(LN۲) روشی موفق در روش انجماد زمین است. هزینه هر واحد گرمای خارج شده نسبت به حالت چرخه آب نمک بسیار بیشتر است. با این حال برای پروژه های کوچک و کوتاه مدت، بویژه در مواقع اضطراری، این روش میتواند بخوبی جبران هزینه ها را بکند. بخاطر دما بینهایت پایین آن، انجماد با(LN۲) سریع انجام می شود،ومقاومت بالای رس منجمد رابدست می دهد. این تکنولوژی در پروژه های ساختمانی زیر معمولا بکار میرود: ساخت زیربنای عظیم؛ انجماد سقف تونلها؛ انجماد برشهای عرضی در مجاری تونل ؛ حاشیه فونداسیونها و جابجایی نمونه های خاک بکر. شکل های ۸ و ۹ دو نمونه از کاربردهای این روش را نشان میدهند(M.nemati, 2007).



شکل۸- نگهداری حفره دایره ای با استفاده از دیوار یخی



شکل۹-ترانشه نگهداری شده توسط دیوار یخی

www.SID.ir

Archive of SID

نکته قابل ذکر در مورد شکلهای فوق این است که در هر دو مورد، لوله های انجماد تا درون لایه رسی پیش خواهند رفت(M.Nemati, 2007).

۸- نتیجه گیری

روش های ژئوترمال بدلیل هزینه های بالایی که ایجاد میکنند اغلب ترجیح داده نمیشوند و در حال حاضر به طور محدود در بریتانیا مورد استفاده قرار میگیرند. اما روش انجماد برای یک رنج گسترده خاک بدون توجه به ساختار ودانه بندی کاربرد دارد. این روش زمان قابل توجهی را برای ایجاد دیواریخی کارآمد میطلبد. ولی از آنجایی که انجماد برای زمین های نرم بهترجواب می دهد تازمین های سنگی، در کشورهای اروپایی بیشتر از این روش استفاده میشود.

عملیات انجماد خاک برای هرسایز،شکل وعمقی از حفاری بکار می رود. در ابتدای شروع عملیات انجماد، زمین یخ زده به صورت استوانه های قائم شکل میگیرند و با گذشت زمان و کاهش بیشتر دما این استوانه ها به صورت یک دیوار پیوسته یخی در می آیند.

پروسه های انجماد به دو روش مستقیم و غیر مستقیم انجام میشوند که در روش غیرمستقیم در واقع یک یخچال وجود دارد که گرما را از زمین میگیرد و سرما را توسط لوله ها به زمین منتقل میکند. و روش مستقیم شامل تزریق محلول آب نمک سرد و همچنین نیتروژن مایع می باشد. روش نیتروژن مایع سریعتر از دیگر روشها میباشد ولی هزینه آن بیشتر است.

استفاده از این روش بهسازی خاک در ایران به صورت سیستماتیک انجام نپذیرفته و پیشنهاد میشود در زمین های آبدار مخصوصا تونلهای مترو از این روش استفاده گردد.

۹- مراجع

قصری، الف. ۱۳۹۱، " روشهای بهسازی فیزیکی خاک – روش اصلاح گرمایی و انجماد"، ارائه شده به عنوان سمینار مهندسی زیربنا و پی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان، زاهدان.

Han, J. (2009), "Advances in Ground Improvement", Geotechnical Special Publication No.188, 322 Pages.

Kinosita, S., Fukuda, M., and Balkema, A.A., (1985), "Ground Freezing", Proc. 4th International Symposium, Rotterdam, Netherlands, 2:28.

M.Nemati, K. (2007), "Temporary Structures-Construction Dewatering and Ground Freezing", University of Washington, CM420, Lesson 7.

Sivakumar Babu, G.L. (2008), "Ground Improvement-Heating and Freezing Methods", Lecture 16, NPTEL Course.

Soo, S. (1983), " Studies of plain and reinforced frozen soil structures", Ph.D. Dissertation, Michigan State University,East Lansing, Michigan.

Soo, S., Wen, R.K., and Andersiond, O.B. (1985), " Finite Element Models for Structural Creep Problems in Frozen Ground".

www.SID.ir