مقایسه تأثیر آهک زنده و شکفته بر ویژگیهای ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده

نوشته: سعید هاشمی طباطبایی* و عطاء آقایی آرایی*

* مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ایران

Comparison of Hydrated and Quick Lime Effects on Geotechnical Properties of Improved Soil

By: S. H. Tabatabaei* & A. Aghaei Araei*

* Building and Housing Research Center, Tehran, Iran

تاریخ دریافت : ۱۳۸۵/۱۲/۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۰۷/۱۸

چکیده

این مقاله نتایج مطالعات انجام شده به منظور اصلاح خاک با استفاده از آهک شکفته و زنده را ارائه می کند. نمونه‌های خاک با مقادیر متفاوت آهک مخلوط شدند. ویژگیهای ژئوتکنیکی بررسی شده بر روی نمونه‌ها، شامل ویژگیهای تراکمی، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری و CBR است. مشاهدات نشان می‌دهند که بیشینه وزن مخصوص خشک خاک اصلاح شده با آهک شکفته کاهش و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. در صورتی که تغییرات قابل ملاحظه‌ای در وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه خاک اصلاح شده با آهک زنده مشاهده نشد. شاخص خمیری نمونه‌ها روند کاهشی نشان دادند. اگرچه این روند در نمونه‌های اصلاح شده با آهک زنده مشهودتر است. افزودن مقدار درصدهای مختلف آهک موجب افزایش قابل ملاحظه در مقاومت فشاری نمونه با افزایش زمان شد. اما تأثیر آهک زنده در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح شده مشهودتر بود، مشابه این روند در آزمایشهای CBR نیز مشاهده شد. مقادیر بهینه آهک شکفته و زنده به منظور اصلاح رفتار مقاومتی خاک ارائه شده است.

کلید واژه‌ها: آزمایش فشاری، آهک شکفته، آهک زنده، CBR، شاخص خمیری

Abstract

This paper describes the result of a study on the determination of geotechnical properties of improved soil treated by quick lime and hydrated lime. Soil samples are mixed with quick lime and hydrated lime in various portions. The geotechnical properties investigated are compaction characteristics, Atterberg limits, compressive strength and CBR. It is observed that the dry density of soil treated with hydrated lime decreases and the optimum water content increases, while there is no noticeable change in dry density and optimum moisture content of soil treated with quick lime. The plasticity index of admixtures indicates a descending trend; however, it is more pronounced in samples treated by quick lime. Addition of small amount of lime causes significant increase in compressive strength of admixtures and increases with curing time. The effect of the quick lime is more significant than the hydrated lime. CBR tests show a trend similar to that observed for compressive strength tests. The optimum amount of hydrated and quick lime for improvement of the soil is presented.

Keywords: Compressive tests, Hydrated lime, Quick lime, CBR, Plasticity index

مقدمه

بهسازی خاک در کلیه موارد مهندسی خاک و بویژه در شرایط ضعیف بودن خاک مطرح است. این عمل به منظور اصلاح کاربرد مهندسی خاک برای دستیابی به اهدافی چون افزایش مقاومت، تغییر نفوذپذیری و پیشگیری از نشست انجام می‌شود. انتخاب روش بهسازی خاک به صورت طبقه‌بندی شده، دشوار است. مهندس ژئوتکنیک باید با توجه به کلیه مسائل فنی، اقتصادی، نیروی انسانی، ماشین آلات، تجربه و نتایج آزمایشها، روش بهینه

Archive of SID
www.SID.ir

را انتخاب و اقدام به بهسازی خاک نماید. از جمله مواد قابل استفاده در بهسازی و تقویت خاکها در پی‌سازی، راه سازی و فرودگاه‌ها، آهک است. در عملیات بهسازی، باید هدف از اختلاط خاک با آهک از قبل مشخص شود. در استفاده از آهک در بهسازی راهها و فرودگاهها و یا استفاده از آن به عنوان ستون آهکی باید به مقادیر بهینه مصرف آن توجه کرد.

آهک در سطح وسیعی برای اصلاح پارامترهای ژئوتکنیکی خاک به کار گرفته می‌شود(Muntohar & Hamtoro,2000; Jahanshahi,2005). مقاومت پایین خاک بیشتر به دلیل افزایش رطوبت است. افزایش مقدار کمی آهک موجب تغییر بافت خاک و در نتیجه تغییر ویژگیهای ژئوتکنیکی آن می‌شود. این تمهیدات به دلیل واکنش بین اجزای سیلیکاتی خاک و آهک در حضور آب انجام می‌شود. هنگامی که آهک به خاک رس افزوده می‌شود، واکنشهای متعددی انجام می‌شود ازجمله:

۱- واکنشهای تبادل کاتیونی یا کوتاه مدت

۲- واکنشهای پوزولانی یا دراز مدت

۳- واکنشهای کربناسیون

واکنشهای پوزولانی بستگی به درصد رس موجود در خاک مورد استفاده دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که مقدار رس در کل نمونه نباید کمتر از ۲۵ درصد و شاخص خمیری بزرگتر از ۱۰ باشد (Oates, 1998; Bengt, 1993) . به عبارت دیگر آهک در تثبیت خاکهایی موثر است که میزان کانیهای رسی آنها برای انجام واکنشهای پوزولانی به اندازه کافی باشد. واکنشهای پوزولانی، ذرات بخش ریزدانه خاک را به هم می‌چسباند و ذرات درشت حاصل می‌کند. افزودن آهک سبب افزایش حد خمیری و کاهش حالت خمیری خاک می‌شود .

آهک زنده به علت دارا بودن CaO بیشتر، تأثیر بیشتری در تثبیت خاک نسبت به آهک هیدراته $Ca(OH)_2$ دارد (Oates,1998). واکنشهای آهک زنده با آب همراه با تولید گاز CO_2 و دما است که برای سلامتی انسان زیان‌آور است. لذا کار کردن با آهک هیدراته ایمن‌تر است، بنابراین، کاربرد آن در صنعت مرسوم‌تر است.

معمولاً مقدار ۴ درصد وزنی آهک هیدراته معادل ۳ درصد آهک زنده است، با این تفاوت که آهک زنده به آب بیشتری برای هیدراته شدن نیاز دارد. در این مقاله، نتایج مقادیر بهینه افزودن آهک شکفته و زنده برای بهسازی خاک به منظور انجام فعالیتهای عمرانی بررسی و با هم مقایسه می‌شوند.

۲- برنامه مطالعات

بسیاری از محققان از آهک برای اصلاح پارامترهای مهندسی خاک استفاده کرده‌اند (Arora & Aydilek, 2005 White , 2006). بررسی منابع علمی نشان می‌دهد که واکنش خاک با آهک بسیار پیچیده است و دانش امروزی بر اساس تجربیات به‌دست آمده است. بنابراین، آزمایشهای آزمایشگاهی راه حل مناسبی برای ارزیابی ویژگیهای ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده با آهک هستند.

۲- ۱- مصالح و روش آزمایش

الف) خاک

در این مطالعه، از خاکهای اطراف شهر گرمی در استان اردبیل استفاده شده است. در فصول مرطوب جاده گرمی- ونستانق که تنها راه ارتباطی چندین روستا با شهر است، به دلیل تورم و مشکلات ظرفیت باربری پیوسته دچار تخریب می‌شد. به منظور اصلاح خاک بستر، نمونه‌هایی از ژرفای یک متری سطح زمین به وسیله حفاری دستی گرفته شد. ترکیب شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. آزمایش هیدرومتری و الک برای تعیین نوع خاک انجام گرفت. بر اساس نتایج آزمایش، خاک در گروه CL رده‌بندی متحد قرار دارد.

ب) آهک

سنگهای آهکی با ترکیب کلسیت $CaCO_3$ یا دولومیت $CaMg(CO3)_2$ ۲۵ درصد پوسته زمین تا ژرفای ۱۶ کیلومتری را تشکیل می‌دهند. کربنات کلسیم رایج‌ترین کربنات موجود در خاک است. آنچه از تجزیه شیمیایی سنگ آهک در اثر حرارت باقی می‌ماند، آهک زنده (اکسید کلسیم) است که ترکیب آن در زیر نشان داده شده است.

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

$$CaMg(CO_3)_2 \rightarrow CaO + MgO + 2\,CO_2$$

وزن مخصوص آهک زنده ۳/۲ تا ۳/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. آهک زنده به‌وسیله آب یا بخار به آهک شکفته (هیدروکسید کلسیم) تبدیل می‌شود که با آزاد شدن گرما همراه است.

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + heat$$

تبدیل آهک زنده به آهک شکفته با تغییر وزن مخصوص همراه است به‌گونه‌ای که پس از شکفته‌شدن به مقدار ۲/۲ تا ۲/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش می‌یابد و حجم آن به حدود ۲/۵ تا ۳ برابر اولیه می‌رسد (حامی، ۱۳۷۱).

انواع مختلف آهک در بازار وجود دارد. در این مطالعه از پودر آهک شکفته و زنده همدان استفاده شد. ترکیب شیمیایی آهک شکفته و زنده مورد

Archive of SID
www.SID.ir

استفاده، در جدول ۲ ارائه شده است.

۲– ۲– آزمایش حدود اتربرگ

آهک شکفته و زنده در هر مورد به تناسب ۳، ۶ و ۹ درصد وزن خشک خاک اضافه شد. در این مطالعه از آب شهری استفاده شده است. مصالح مورد استفاده به منظور همگنی مناسب، به مدت ۵ دقیقه مخلوط شدند. به لحاظ مقایسه اثر آهک زنده و شکفته بر تغییرات حدود اتربرگ، خاک طبیعی نیز مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایشها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ نشان می‌دهدکه با افزودن آهک شکفته، حد روانی و حد خمیری نسبت به مقادیر نظیر خاک طبیعی افزایش می‌یابد. این روند در مورد حد روانی خاک اصلاح شده با آهک زنده مشاهده نمی‌شود. همچنین با افزایش مقدار آهک شکفته و زنده، روند تغییرات شاخص خمیری کاهشی است. این روند تا مقدار شش درصد قابل ملاحظه است و پس از آن تغییرات مقدار شاخص خمیری بسیار اندک است. دلیل این تغییرات را می‌توان به مقدار واکنش کاتیونی و سرعت آن ربط داد. افزودن آهک به خاک، موجب تبادل کاتیون و تجمع خاک ریزدانه می‌شود و در نتیجه بافت خاک با بافت اولیه آن متفاوت می‌شود. جدول ۳ نشان می‌دهد تغییرات حدود اتربرگ خاک اصلاح شده با آهک زنده بیشتر است. پیشرفت واکنشهای کاتیونی و پوزولانی بستگی به‌دمای محیط واکنش دارد. آهک زنده می‌تواند به دلیل ایجاد گرمای بیشتر، واکنش را تسریع کند(Oates, 1998).

هنگام واکنش، آهک زنده با ترکیبهای موجود در خاک نسبت به آهک هیدراته، گرمای بیشتری تولید می‌کند. این امر موجب تسریع واکنشهای کاتیونی می‌شود. بنابر این تأثیر آهک زنده بر تغییرات حدود اتربرگ می‌تواند بیشتر باشد.

۲– ۳– آزمایش تراکم

برای تعیین وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه، آزمایش تراکم استاندار براساس استاندارد (ASTM D698,1991) بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج این آزمایشها در نمودار ۱ ارائه شده است.

نمونه طبیعی، برای مقایسه اثر آهک بر رفتار نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش آهک شکفته، رطوبت بهینه افزایش یافته و وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد. اما این روند در مورد مخلوط با آهک زنده مشاهده نمی‌شود و در حقیقت تغییر اندکی در رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ملاحظه می‌شود.

کاهش وزن مخصوص نمونه حاوی آهک شکفته می‌تواند به دلیل افزایش درصد مصالح ریزدانه و جذب آب به‌وسیله آهک شکفته باشد. اما تغییر نامحسوس وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه نمونه حاوی آهک زنده، احتمالاً می‌تواند به دلیل جذب آب به‌وسیله گرما در موقع واکنشهای کاتیونی باشد. زیرا آهک زنده تقریباً معادل دو برابر آهک شکفته گرما ایجاد می‌کند. از طرفی واکنش کاتیونی تحت تأثیر گرما تسریع و روند خشک شدن، مخلوط بلافاصله پس از واکنش آغاز می‌گردد (Oates, 1998).

بنابراین، خاک اصلاح شده با آهک زنده می‌تواند رطوبت بهینه کمتر و وزن مخصوص خشک بیشتر نسبت به نمونه حاوی آهک شکفته داشته باشد.

۳– روشهای ارزیابی مصالح

برای تعیین پارامترهای مقاومتی مخلوط آهک و خاک می‌توان از آزمایشهای متعددی استفاده کرد. در این مطالعه، از آزمایشهای مقاومت فشاری و CBR برای ارزیابی رفتار مقاومتی مصالح استفاده شد. نمونه‌های آهک شکفته و زنده به نسبت ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی خاک خشک به مدت پنج دقیقه مخلوط شدند. این نمونه در قالبهای ۱۰×۱۰×۱۰cm و CBR با رطوبت بهینه به ترتیب در سه و پنج لایه تهیه شدند.

پس از تهیه، نمونه‌ها در اتاق مخصوص در دمای ۳۰ درجه و ۶۰ درصد رطوبت عمل‌آوری شدند. نمونه‌های حاوی آهک شکفته و زنده به سه گروه تقسیم شدند و هر گروه به مدت ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز عمل‌آوری شدند.

۳– ۱– آزمایش مقاومت فشاری

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، ۵۴ نمونه با درصدهای مختلف آهک شکفته و زنده (۳٪، ۶٪ و ۹٪) بر اساس استاندارد (BS 1881: Part 116, 1983) تهیه شد. برای درصدهای مختلف آهک، ۳ نمونه در سه لایه یکنواخت در درون قالبهای ۱۰×۱۰×۱۰ cm آماده گردید. نمونه‌ها به اتاق عمل‌آوری منتقل و پس از ۴۸ ساعت از قالب خارج شدند. نمونه‌های ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه با سرعت 1mm/min بارگذاری شدند. میانگین مقاومت فشاری سه نمونه در نمودارهای ۲ و ۳ ارائه شده است.

نمودار ۲ نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای با افزایش آهک شکفته افزوده می‌شود. این روند تا مخلوط ۹ درصد آهک شکفته ادامه می‌یابد. این روند با نتایج حاصل از مطالعات دیگر پژوهشگران مطابقت دارد (طباطبایی،۱۳۸۱؛ Bujang et al., 2005 ؛ طباطبایی و آقایی آرایی، ۱۳۸۴). چنین رفتاری می‌تواند به دلیل میزان پیشرفت واکنشهای پوزولانی باشد. زیرا افزودن آهک به خاک موجب واکنش تبادل یونی شده و بافت خاک دانه‌ای می‌شود. در نتیجه این عمل، مقاومت افزایش می‌یابد

Archive of SID
www.SID.ir

(Rao & Thyagaraj,2003 ; Chew et al.,2004). این واکنشها تا رسیدن به مقدار بهینه افزایش می‌یابد که در این مطالعه ۹ درصد است.

واکنش آهک با خاک بسیار پیچیده و آهسته است. نمودار ۲ نشان می‌دهد که مقاومت مخلوط، به زمان بستگی دارد. مقاومتها به دلیل تشکیل ژل سیمان در اثر واکنشهای آهک و خاک به تدریج افزایش می‌یابد. سیمان ایجاد شده به آهستگی اجزای خاک را به هم چسبانده و مقاومت آن را افزایش می‌دهد. عمل‌آوری نمونه‌ها در کوتاه مدت، زمان کمتری برای تشکیل واکنشها در اختیار می‌گذارد. در نتیجه، بخشی از آب منفذی در نمونه‌ها باقی مانده و موجب سست شدن نمونه می‌شود. در صورتی که عمل‌آوری طولانی، زمان بیشتری برای تشکیل واکنشها نهایی می‌دهد. در نتیجه این واکنشها، اسکلت قوی‌تری از دانه‌ها به دلیل سیمانی شدن ایجاد می‌شود و آب بین دانه‌ای بیشتری مصرف می‌شود (Naji, 2002).

نمودار ۳ نشان می‌دهد که روند مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی آهک زنده تا مخلوط ۶٪ آهک، افزایشی است. افزایش مقاومت می‌تواند به دلیل پیشرفت واکنشهای پوزولانی باشد. اما با گذشت زمان به دلیل عدم محصور شدگی نمونه‌ها در قالب و در نتیجه افزایش حجم مقاومت روند نزولی نشان می‌دهد (طباطبایی و آقایی آرایی، ۱۳۸۵). همچنین مقایسه نمودارهای ۲ و ۳ نشان می‌دهد که نسبت افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی آهک زنده چندین برابر نمونه‌های حاوی آهک شکفته است. چنین رفتاری می‌تواند به دلیل رطوبت بهینه کمتر و وزن مخصوص خشک اولیه بیشتر باشد. زیرا واکنش آهک زنده با آلومینات خاک، نسبت به نمونه‌های حاوی آهک شکفته بسیار گرمازاتر است و روند خشک شدن مصالح بلافاصله پس از واکنش آغاز می‌شود. در نتیجه این عمل، نمونه مقاومت بیشتری به دست می‌آورد. تغییرات مقاومتی نمونه‌های آهک و خاک به زمان بستگی دارد. نمونه‌های حاوی آهک زنده با گذشت زمان تا ۵۶ روز روند نزولی نشان می‌دهد. در بررسی مراجع فنی نتایج مطالعات محققان دیگر برای اصلاح خاک با آهک زنده مشاهده نشد. این پدیده نیاز به بررسی بیشتر دارد. نمودار ۴ نشان می‌دهد، افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی آهک زنده حدود ۳۰۰ درصد بیشتر از نمونه‌های حاوی آهک شکفته است.

۳- ۲- آزمایش CBR

برای بررسی تأثیر آهک شکفته و زنده بر روی مقدار CBR، تعداد ۵۷ نمونه با نسبت آهک ۳، ۶ و ۹ درصد وزن خشک خاک در ۵ لایه بر اساس استاندارد (ASTM D1883, 1987) تهیه شد. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در مدت زمانهای ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز آزمایش شدند. آزمایشهای فیزیکی مانند درصد رطوبت و میزان تورم بر روی نمونه‌ها انجام گرفت.

نتایج آزمایشها با درصدهای مختلف آهک شکفته و زنده به همراه خاک طبیعی در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه مقادیر CBR برای درصدهای مختلف آهک نشان می‌دهد که به مقدار قابل ملاحظه‌ای مقادیر CBR افزایش یافته است. این روند با نتایج مطالعات محققان دیگر مطابقت دارد (Kumar et al., 2001). بررسی نتایج نشان می‌دهد که روند تغییرات مقادیر CBR نمونه‌های محتوی آهک شکفته با افزایش آهک، صعودی است. اما با افزایش زمان عمل‌آوری بجز در نمونه حاوی ۹ درصد آهک شکفته و ۲۵ ضربه کوبش روند نزولی نشان می‌دهد. این روند را می‌توان به دلیل تورم و جذب رطوبت بسیار زیاد نسبت داد. نتایج نشان می‌دهد که روند افزایش مقادیر CBR در نمونه‌های خاک اصلاح شده با آهک زنده در زمان عمل‌آوری صعودی است. این روند را می‌توان به واکنشهای پوزولانی که منجر به تشکیل ژل و سیمان شدگی دانه‌ها، تورم کمتر نسبت به خاک اصلاح شده با آهک شکفته و جذب آب بین دانه‌ای نسبت داد. نتایج نشان می‌دهند که در بیشتر نمونه‌های خاک اصلاح شده با آهک زنده، آب محتوی کمتر از رطوبت بهینه در مدت زمان عمل‌آوری است. نتایج حاصل از آزمایشهای CBR در تضاد با نتایج مقاومت فشاری است. بررسی این پدیده نیاز به بررسیهای تکمیلی از جمله مطالعات میکروسکوپی دارد که در این تحقیق امکان انجام آنها وجود نداشت.

بر اساس نتایج آزمایشهای انجام شده حالت بهینه برای بهبود خواص مقاومتی نمونه خاک اصلاح شده با آهک شکفته و زنده، افزودن ۹٪ آهک شکفته با ۲۵ ضربه کوبش برای هر لایه یا ۶٪ آهک زنده با ۵۶ ضربه کوبش برای هر لایه است. در این حالات، بیشینه مقادیر CBR، کمینه رطوبت و مقدار تورم با زمان مشاهده می‌شود.

نتایج تغییرات تورم در برابر زمان عمل‌آوری برای خاک اصلاح شده با درصد بهینه آهک شکفته و زنده، در نمودار ۵ ارائه شده است.چنانچه مشاهده می‌شود تغییرات تورم در هر دو حالت روند صعودی دارد. اما به دلیل تراکم بیشتر، تورم نمونه‌های اصلاح شده با آهک زنده در ابتدا کمتر بوده، اما با گذشت زمان تقریباً یکسان می‌شود. نمودار ۶ تغییرات درصد رطوبت و زمان عمل‌آوری برای خاک اصلاح شده با آهک شکفته و زنده را نشان می‌دهد. درصد رطوبت نمونه‌های محتوی آهک شکفته با گذشت زمان ابتدا روند صعودی و پس از گذشت ۵۶ روز روند نزولی دارند. این پدیده را می‌توان به جذب آب توسط مخلوط به دلیل انجام واکنشهای پوزولانی نسبت داد. نمونه‌های محتوی آهک زنده از ابتدا با گذشت زمان روند نزولی نشان می‌دهند و تفاوت درصد رطوبت بین نمونه‌های اصلاح شده با آهک شکفته

Archive of SID
www.SID.ir

و زنده قابل ملاحظه است. این پدیده را می‌توان به واکنشهای گرمازای آهک زنده نسبت به آهک شکفته و در نتیجه جذب آب بین دانه‌ای بیشتر نسبت داد (Oates, 1998).

نمودار ۷ تغییرات CBR و زمان عمل‌آوری برای خاک اصلاح شده با درصد بهینه آهک شکفته و زنده را نشان می‌دهد. نمونه‌های خاک اصلاح شده با آهک زنده دارای مقدار کمتر آب بین دانه‌ای، اسکلت قوی‌تر به دلیل سیمانتاسیون و تورم کمتر هستند. بنابراین مقدار CBR آن می‌تواند بیش از نمونه‌های محتوی آهک شکفته باشد.

۴- نتیجه‌گیری

بررسی یافته‌های محققان نشان می‌دهد که انتخاب طرح اختلاط خاک و آهک به صورت طبقه‌بندی به منظور استفاده در فعالیتهای عمرانی بسیار مشکل است. طرح اختلاط بستگی به چندین متغیر دارد. بنابراین آزمایشهای آزمایشگاهی، راه حل مناسبی برای به دست آوردن طرح اختلاط بهینه در شرایط خاص طرحهای عمرانی است. در این تحقیق، اثر آهک شکفته و زنده به منظور اصلاح ویژگیهای ژئوتکنیکی خاک $PI \approx 30$ بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد:

• روند تغییرات مقاومتی و فیزیکی خاک اصلاح شده با آهک شکفته و زنده متفاوت است.

• افزودن آهک شکفته و زنده سبب تغییر بافت خاک ریزدانه به خاک مجتمع می‌شود.

• افزودن آهک شکفته موجب افزایش مقادیر حد روانی و خمیری خاک می‌شود، شاخص خمیری کاهش می‌یابد. اما روند تغییرات حد روانی و شاخص خمیری برای خاک اصلاح شده با آهک زنده کاهشی است.

• افزودن آهک شکفته موجب افزایش درصد رطوبت و کاهش وزن خشک می‌شود. اما تغییرات قابل ملاحظه در نمونه‌های محتوی آهک زنده مشاهده نشد.

• روند تغییرات مقاومت فشاری خاک اصلاح شده با آهک شکفته با افزایش زمان عمل آوری افزایشی است. روند مقاومت فشاری خاک اصلاح شده با آهک زنده در کلیه نمونه‌ها کاهشی است. اما مقاومت فشاری در ۹۰ روز عمل‌آوری نسبت به نمونه‌های محتوی آهک شکفته بسیار بیشتر است.

• روند تغییرات مقادیر CBR خاک اصلاح شده با درصد بهینه آهک شکفته و زنده افزایشی است. مقادیر CBR نمونه‌های محتوی آهک زنده نسبت به نمونه‌های محتوی آهک شکفته بسیار بیشتر است.

• درصد جذب رطوبت و تورم خاک اصلاح شده با آهک زنده کمتر از خاک اصلاح شده با آهک شکفته در طول زمان عمل‌آوری است.

• مقادیر درصد آب محتوی و تورم در نمونه‌های محتوی ۶ درصد آهک زنده و ۵۶ ضربه و نمونه‌های محتوی ۹ درصد آهک شکفته و ۲۵ ضربه حداقل است.

• مقادیر مقاومت فشاری و CBR خاک اصلاح شده با آهک زنده بسیار بیشتر از خاک اصلاح شده با آهک شکفته است.

• در صورت احراز موارد ایمنی، با توجه به عملکرد بسیار مطلوب آهک زنده درخصوص پارامترهای مقاومت برشی خاک، توصیه می‌شود برای اصلاح خاک مورد مطالعه، از ۶ درصد آهک زنده استفاده شود.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی خاک رس مورد مطالعه

L.O.I.	۸/۰۵	**MgO**	۱/۶۹
SiO_2	۵۲/۵۰	**Na_2O**	–
Al_2O_3	۱/۶۶۵	**K_2O**	–
Fe_2O_3	۷	**SO_3^-**	۴/۸۹
CaO	۶/۲۴	**Cl^-**	۰/۳۵

جدول ۲- ترکیب شیمیایی نمونه آهک شکفته و زنده

ترکیب شیمیایی	آهک زنده	آهک شکفته
SiO_2	۰/۵۶	۰/۶۸
$Al_2O_3 + Fe_2O_3$	۰/۸۴	۱/۲۶
L.O.I.	۲۲/۸۶	۲۷/۳۸
CaO	۷۴/۹۲	۶۷/۷۵
MgO	۰/۳۲	۰/۴۸

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۳- تغییرات حدود اتربرگ با درصدهای مختلف آهک شکفته و زنده

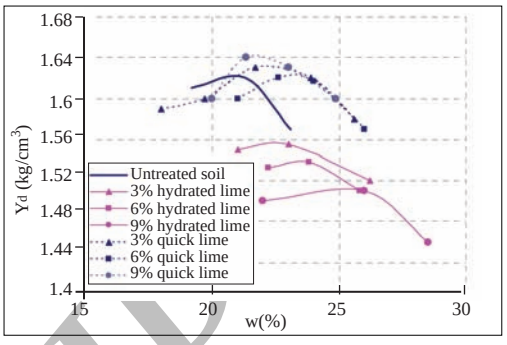
میزان آهک (٪)	PI		PL		LL	
	شکفته	زنده	شکفته	زنده	شکفته	زنده
۰	۳۲	۳۲	۱۷	۱۷	۴۹	۴۹
۳	۲۴	۱۴	۳۲	۲۹	۵۶	۴۲
۶	۱۹/۵	۱۵	۳۲	۲۸	۵۱/۵	۴۲
۹	۱۹	۱۳	۳۲	۲۸	۵۱	۴۱

جدول ۴- نتایج آزمایشهای CBR، تورم، درصد رطوبت خاک اصلاح شده با آهک شکفته و زنده

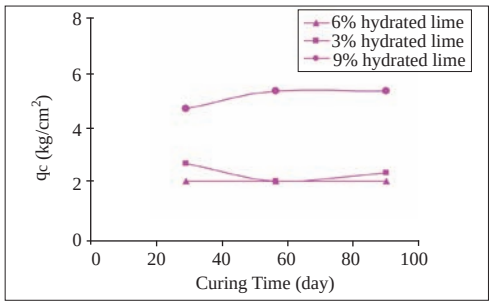
خاک بدون آهک									
تعداد کوبش	CBR			رطوبت بهینه (٪)					
۱۰	۳/۲۸			۲۱/۳					
۲۵	۵/۳۶			۲۱/۳					
۵۶	۶/۹			۲۱/۳					
خاک اصلاح شده با ۳٪ آهک شکفته									
تعداد کوبش	۲۸ روز			۵۶ روز			۹۰ روز		
	CBR	رطوبت (٪)	تورم (٪)	CBR	رطوبت (٪)	تورم (٪)	CBR	رطوبت (٪)	تورم (v)
۱۰	۲/۸۹	۳۲/۲	۱/۹۴	۲/۰۶	۴۴/۹۹	۲/۶۴	۴/۵۳	۳۶/۱۲	۲/۹۳
۲۵	۱۱/۵۳	۳۴/۶	۴/۶۸	۹/۸۹	۳۵/۶	۵	۴/۱۲	۳۵/۴	۵/۲۱
۵۶	۱۴/۴۲	۳۵	۶/۷۶	۷/۴۲	۳۵/۶	۷/۴۱	۷/۷۷	۳۵/۴۷	۷/۷
خاک اصلاح شده با ٦٪ آهک شکفته									
۱۰	۲۸/۸۵	۳۲/۳	۱۳/۹۴	۴/۱۲	۳۰/۷	۱۴/۴	۴/۱۲	۴۹/۱۱	۱۴/۶۱
۲۵	۲۲/۶۶	۳۸/۱	۶/۷۶	۲۰/۴۸	۳۹/۳	۷/۱۳	۱۴/۴۳	۴۰/۳	۷/۳۱
۵۶	۳۵/۵۶	۳۵/۳	۹/۳۳	۵۳/۵۷	۲۹/۴	۹/۸	۲۶/۳۷	۳۴/۴	۹/۹۵
خاک اصلاح شده با ۹٪ آهک شکفته									
۱۰	۱۴/۴۲	۴۰	۲۳/۹۸	۳/۳	۳۱/۳۱	۲۵/۵۶	۳/۵۷	۵۳/۳	۲۶/۰۶
۲۵	۲۶/۷۶	۴۱/۳	۶/۵۷	۳۱/۰۳	۴۹	۸/۱	۲۹/۶۶	۴۱/۶۵	۸/۲۴
۵۶	۸۲/۴۲	۳۰/۴	۱۴/۶۳	۶۳/۱۶	۳۳/۶۳	۲۰/۴۲	۴۴/۷۶	۳۵/۷۴	۲۰/۵۶
خاک اصلاح شده با ۳٪ آهک زنده									
۱۰	۶/۰۴	۳۳/۲۴	۳/۸۱	۱۴/۳۳	۲۶/۳۶	۴/۴۳	۵/۴۹	۲۷/۶۲	۴/۵۹
۲۵	۷/۴۱	۳۰/۶۸	۶/۵۷	۱۷/۹۱	۲۸/۹۱	۱۹	۳/۹	۳۱/۲۸	۱۹/۱۷
۵۶	۱۲/۰۸	۲۷/۵۴	۸/۵۷	۵۱/۵۱	۲۶/۵۲	۹	۱۵/۹۳	۲۴/۰۴	۹/۱۴
خاک اصلاح شده با ٦٪ آهک زنده									
۱۰	۳۷/۰۷	۲۱/۳۸	۳/۱۴	۳۵/۰۳	۲۷/۸	۴/۳۸	۱۷۰	۲۱/۹۸	۴/۸۸
۲۵	۹/۰۶	۲۹/۷۳	۱۰/۲۹	۸۵/۲۷	۲۶/۹۲	۱۳/۱۷	۱۶۷/۸۵	۲۳/۹۷	۱۳/۹۵
۵۶	۳۷/۰۷	۲۶/۲۱	۴/۷۶	۸۹/۹	۲۶/۳۵	۷/۳۸	۱۹۹/۱۵	۱۸/۶۴	۸/۳۳
خاک اصلاح شده با ۹٪ آهک زنده									
۱۰	۱/۳۷	۳۸/۹۸	۸/۵۷	۷۶/۲۴	۲۸/۲۳	۲۶/۹۵	۲۴/۶۴	۳۱/۵	۲۹/۵۲
۲۵	۳/۵۷	۳۱/۷۷	۸/۸۷	۸۵/۲۷	۲۸	۱۲/۵۷	۱۷۰/۶۲	۲۱/۹۹	۱۴/۵
۵۶	۷۴/۱۴	۲۳/۲۸	۱۰/۶۷	۸۶/۵۴	۲۷/۶۷	۱۴/۷۶	۱۳۷/۴۴	۲۱/۰۴	۱۵/۸۱

Archive of SID

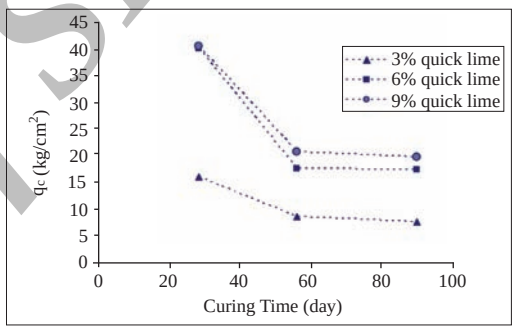
www.SID.ir



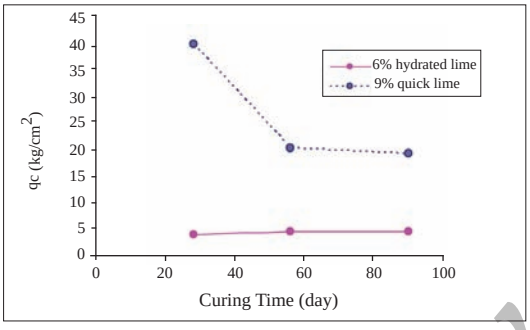
نمودار ۱- تغییرات تراکم با درصدهای متفاوت آهک شکفته و زنده



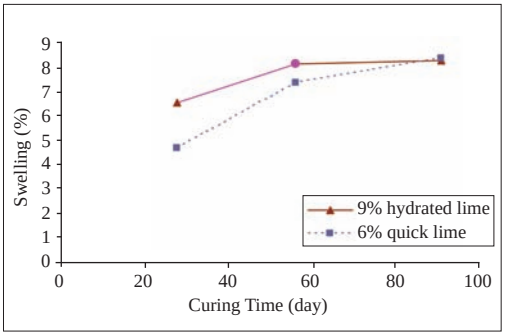
نمودار ۲- تغییرات مقاومت فشاری با درصدهای مختلف آهک شکفته و زمانهای مختلف عمل آوری



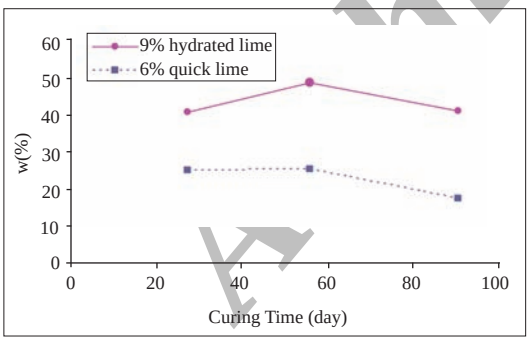
نمودار ۳- تغییرات مقاومت فشاری با درصدهای مختلف آهک زنده و زمانهای مختلف عمل آوری



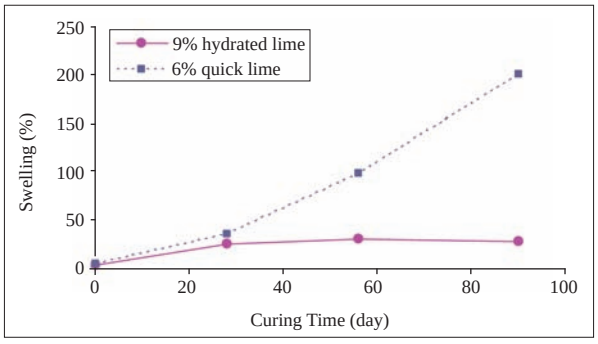
نمودار ۴- تغییرات مقاومت فشاری برای خاک اصلاح شده با درصد بهینه آهک شکفته و زنده



نمودار ۵- تغییرات تورم در برابر زمان عمل‌آوری برای خاک اصلاح شده با درصد بهینه آهک شکفته و زنده



نمودار ۶- تغییرات درصد رطوبت و زمان عمل‌آوری برای خاک اصلاح شده با درصد بهینه آهک شکفته و زنده



نمودار ۷- تغییرات CBR و زمان عمل‌آوری برای خاک اصلاح شده با درصد بهینه آهک شکفته و زنده

Archive of SID

www.SID.ir

کتابنگاری

حامی، الف.، ۱۳۷۱- مصالح ساختمانی، چاپ هفتم، انتشارات دانشگاه تهران

هاشمی طباطبایی، س.، ۱۳۸۱- استفاده از مواد افزودنی جهت بهسازی و پایدارسازی شیبهای مارنی، پروژه تحقیقاتی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

هاشمی طباطبایی، س.، آقایی آرایی، ع.، ۱۳۸۴- بررسی تأثیر آهک شکفته و زنده بر مشخصات فیزیکی و مقاومتی خاکهای اصلاح شده، پروژه تحقیقاتی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

هاشمی طباطبایی،س، آقایی آرایی، ع.، ۱۳۸۵- استفاده از آهک زنده در بهسازی خاکهای با شاخص خمیری بالا، فصلنامه علمی و پژوهشی علوم زمین، سال شانزدهم، شماره ۶۱، صفحات ۶۰ و ۶۷

References

Arora, S., Aydilek, A., 2005- Class F fly- ash- amended soils as highway base materials, Journal of Material in Civil Engineering, Vol. 17, issue 6, pp. 640- 649.

ASTM D1698, 1991- Standard Test Method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effect, 1991- ASTM D698- Vol. 04.08-pp 69- 76.

ASTM D1883, 1987- Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory compacted soils, Vol. 04- 09- pp. 149- 157.

Bengt, B. B., 1993- Ground improvement, John willey and Sons Publishing Company.

BS, 1881, 1983- Method for Determination of compressive strength of concrete cubes.

Bujang, B. K., Shukri, M. and Thamer, A.H., 2005- Effect of chemical admixtures on engineering properties of tropical peat soil, American Journal of Applied Sciences Vol. 2(7): 1113- 1120.

Chew, S. H., Kamruz zaman, A.H. and Lee, F.H., 2004- Physiochemical and engineering behavior of cemented treated clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.130, Issue 7,696-706.

Jahanshahi, M., 2005- An improvement method for swell problem in sulfate soils that Stabilized by lime. American Journal of Applied Sciences 2(7):1121- 1128.

Kumar, S., Puri, V. K., Das, B. M. and Devkota, B.C., 2001- Geotechnical properties of fly ash and lime fly ash stabilized coal mine refuse, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, paper 05, Oklahama state university, U.S.A.

Muntohar, A. S., Hamtoro. G., 2000- Influence of rice huck ash and lime on engineering properties of a clayey subgrade, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, paper 094, Oklahama state university, USA.

Muntohar, A. S., Hamtoro, G., 2000- Influence of rice huck ash and lime on engineering properties of a clayey subgrade, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, paper 094, Oklahama state university, USA.

Naji, S. A., 2002- The use of lime to stabilize granular volcanic ash materials for road construction, Journal of Sciences and Technology, Vol. 7, No.2, 115- 123.

Oates, J. A. H., 1998- Lime and limestone, John Willey and Sons Publishing Company.

Rao, S. M., Thyagaraj, T., 2003- Lime study stabilization of an expansive soil, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 156, Issue 3, 139- 146.

White, D. J., 2006- Reclaimed hydrated fly ash as a geomaterial. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 18, Issue 2, pp 206- 213.

Archive of SID

www.SID.ir