

تثبیت خاک با استفاده از سیمان آبزدا جهت استفاده در پروژه‌های راهسازی

@bsgroup



فریدون مقدس نژاد^{i*}؛ امیر مدرسⁱⁱ

چکیده

خاک‌های ماسه‌ای و رسی بخش وسیعی از خاک‌های شمال کشور را تشکیل می‌دهند. اغلب خاک‌های رسی در این مناطق اگرچه در حالت خشک مقاومت خوبی دارند، در حالت اشباع، تضعیف شده و مقدار تورم قابل توجهی را متحمل می‌گردند. خاک‌های ماسه‌ای مناطق ساحلی که به ماسه‌بادی معروفند، در حالت محدود شده قابلیت باربری قابل توجهی دارند، ولی در حالت محدود نشده در صورتی که در مسیر جریان آب قرار بگیرند، به دلیل دانه‌بندی یکنواخت و نداشتن چسبندگی، شسته می‌شوند. در این تحقیق اثرات سیمان آبزدا بر خصوصیات رفتاری این خاک‌ها، با اثرات سیمان نوع ۲ و آهک مقایسه شده است. برای تولید سیمان آبزدا، در مرحله آسیاب کلینکر سیمان پرتلند معمولی، حدود ۲ درصد اسید چرب به آن اضافه می‌گردد. این تغییر باعث افزایش دوام در برابر رطوبت و تاخیر هیدراسیون تا زمان اختلاط کامل می‌گردد. در عملیات تثبیت ابتدا ماده تثبیت‌کننده بر روی لایه مورد نظر پخش شده سپس عملیات اختلاط آغاز می‌گردد. بنابراین در صورت استفاده از سیمان معمولی با توجه به وجود رطوبت در خاک بخشی از سیمان قبل از شروع عملیات اختلاط هیدراته شده و درصد سیمان هیدراته نشده که با خاک مخلوط می‌گردد کمتر از مقدار بهینه تعیین شده می‌باشد. بنابراین در صورت تایید اثرات مفید سیمان آبزدا بر خصوصیات رفتاری خاک، استفاده از این سیمان با توجه به هزینه‌های تولید یکسان آن با سیمان معمولی مفیدتر می‌باشد. آزمایش‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محدود نشده و CBR می‌باشند. نتایج حاکی از اثرات بسیار مناسب سیمان آبزدا بر خصوصیات مقاومتی و اثرات متوسط آن بر خصوصیات خمیری خاک‌ها می‌باشند.

کلمات کلیدی

تثبیت خاک، ماسه بادی، رس، سیمان آبزدا، مقاومت فشاری، حدود اتربرگ، CBR

Soil Stabilization with Waterproof Cement for Road Applications

F. Moghadasnejad.; A. Modarres.

ABSTRACT

Sand and clay soils are the most usually common soils that constitute the subgrade of roads in northern parts of Iran. The clay soil has high plasticity index. Also they have high strength in dry condition, in saturated state; they lose most of strength and during this time, sustain much swelling which is dangerous for pavement. Sandy soils in coastal zones are termed Beach sand and have considerable strength in confined state. However In unconfined state, because of their uniform gradation and lack of cohesion,

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۴/۱۰/۲۸

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۷/۱۲/۱۱

* نویسنده مسئول و استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: Email: moghadas@aut.ac.ir

ⁱⁱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: Email: amirmodarres2003@yahoo.com

they will be washed out by water flow. In this research, the effects of Waterproof cement on engineering properties of these soils compared to Type 2 cement and Lime have been considered. In order to investigate the effects of the above materials on improving soil properties, Atterberg limit, Unconfined Compressive Strength and CBR tests have been carried out. It was found that the Waterproof cement has superior effect on strength properties of soils compared to the two other additives. The tests have also shown the average effect of this additive on the Plastic properties of soils.

KEYWORDS

Stabilization, Beach sand, clay, Waterproof Cement, Compressive Strength, Atterberg limit, CBR

سیمان‌ها می‌باشند [۲۰] و [۲۱]. در یکی دیگر از مطالعات انجام شده از خاکستر بادی نوع C استفاده شده و اثرات آن بسیار مشابه با سیمان گزارش شده است [۱۷].

در راستای استفاده از مواد تثبیت‌کننده مناسب در عملیات راهسازی و افزایش کارایی عملیات تثبیت، در این مطالعه اثرات سیمان آب‌زدا به عنوان یک تثبیت‌کننده جدید بر خصوصیات رفتاری دو نوع خاک موجود در مناطق شمالی کشور مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

۲- مشخصات خاک‌های مورد مطالعه

مشخصات خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق در جدول و شکل ۱، ارائه شده است.

گروه اول از خاک‌های مورد مطالعه شامل ماسه‌بادی می‌باشد. این خاک از فواصل ۱۰۰ تا ۱۵۰ متری ساحل در عمق بیش از ۵۰ سانتیمتر و در ۱۰ نقطه مختلف از شهرهای ساحلی استان مازندران برداشت شده است.

گروه دوم شامل خاک رس برداشت شده از عمق بیش از ۵۰ سانتیمتر در زمین‌های کشاورزی در ۱۰ نقطه مختلف از شهرهای گفته شده می‌باشد. کلیه مشخصات ارائه شده پس از اختلاط تمامی نمونه‌های برداشت شده برای هر کدام از خاک‌های مورد مطالعه تعیین شده است.

ماسه مورد مطالعه دارای دانه‌بندی تا اندازه‌ای یکنواخت بوده و ۲/۲ درصد آن را ذرات با اندازه رس تشکیل می‌دهند. این خاک غیرخمیری بوده و در رده‌بندی اشتو در گروه A-۳ قرار می‌گیرد. این گروه از خاک‌ها دارای مقاومت مناسبی بوده و معضل اصلی آنها عدم چسبندگی و احتمال آب‌شستگی در شرایط محدود نشده می‌باشد [۱].

خاک رس مورد مطالعه دارای خاصیت خمیری بالا بوده و طبق جدول ۱، طبق رده‌بندی اشتو در گروه A-۷-۶(۲۲) رده‌بندی می‌گردد. مشکل اساسی این گروه از خاک‌ها تورم بیش از حد و کاهش قابل توجه مقاومت آنها در اثر اشباع‌شدگی می‌باشد.

۱- مقدمه

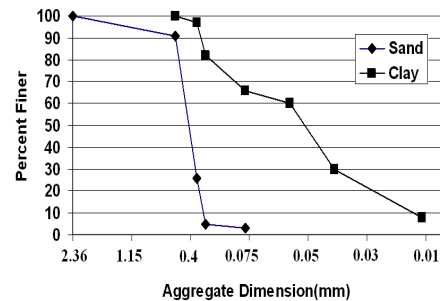
استفاده از روش تثبیت برای بهسازی زمین در پروژه‌های عمرانی سابقه ای نزدیک به ۱۰۰ سال دارد. این روش در بیشتر موارد در پروژه‌های راهسازی به منظور اصلاح خاک‌های نرم و کم مقاومت، بهبود مشخصات فنی خاک‌ها و مصالح شنی، ایجاد لایه های اساس و زیراساس با قابلیت باربری زیاد، بازسازی روسازی‌های فرسوده با استفاده از مصالح موجود و کاهش گرد و خاک و یا کاهش رطوبت مورد استفاده قرار گرفته است [۲]، [۱۱] و [۱۹]. در تمامی موارد یادشده انتخاب نوع ماده تثبیت‌کننده به عوامل زیادی از قبیل جنس خاک، شرایط جوی منطقه، میزان آمد و شد، هدف از انجام تثبیت خاک و هزینه عملیات بستگی دارد. با توجه به این موارد، انجام آزمایش‌ها و بررسی‌های دقیق خاک منطقه مورد نظر ضروری می‌باشد. در بسیاری از موارد انتخاب نادرست روش تثبیت نتایج نامناسب و افزایش هزینه‌های بلند مدت روسازی را دربرداشته است [۲].

تثبیت‌کننده‌های مرسوم شامل آهک به صورت دوغاب و آهک شکفته، سیمان‌های پرتلند معمولی و انواع پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی می‌باشند. به طور کلی براساس مطالعات انجام شده استفاده از سیمان باعث افزایش قابل توجه در قابلیت باربری خاک می‌گردد. در مقابل به غیر از خاک‌های حاوی ترکیبات پوزولانی (مانند خاک رس)، اثرات آهک بر قابلیت باربری خاک‌ها چندان قابل توجه نمی‌باشد. اما بررسی‌ها حاکی از برتری آهک در بهبود خصوصیات خمیری و توری خاک می‌باشند [۱۱]، [۱۳] و [۱۶]. در سال‌های اخیر مطالعات جامعی در ارتباط با استفاده از تثبیت‌کننده‌های جدید انجام شده است. در چندین مطالعه اثرات استفاده از خاکستر کوره سیمان مورد بررسی قرار گرفته و براساس نتایج به دست آمده اثرات آن بر خصوصیات رفتاری خاک متوسط ارزیابی شده است. براساس نتایج یکی از این مطالعات، به دلیل کمتر بودن ترکیبات سیمانی در این ماده نسبت به سیمان‌های معمولی مقادیر مناسب برای تثبیت بین دو تا سه برابر این

بوده و با توجه به مطالعات، این واکنش در اکثر موارد تا چندین سال پس از اعمال آهک به خاک ادامه می‌یابد [۱۱] و [۱۹]. مطالعات نشان می‌دهند که شروع واکنش پوزولانی، تابع میزان پیشرفت واکنش تجمع- تراکم است. با پیشرفت این واکنش، مقدار PH خاک بالا رفته و سیلیکای خاک از ساختمان ورقه ای چهاروجهی و آلومینای خاک از ساختمان ورقه ای هشت وجهی‌اش آزاد شده و واکنش پوزولانی شتاب می‌گیرد.

۳-۲- سیمان آب‌زدا

برای تولید این سیمان، در مرحله آسیاب کلینکر سیمان پرتلند معمولی، به میزان حداکثر ۲ درصد (متوسط ۱/۵ درصد)، اسید لاکتیک یا اسید اولئیک به آن اضافه می‌گردد. با توجه به تغییرات اندک اعمالی در این سیمان، ترکیب شیمیایی این سیمان مشابه سیمان نوع ۱ می‌باشد. در اثر اعمال اسیدهای چرب (اسید لاکتیک یا اسید اولئیک)، دوام این سیمان در برابر رطوبت افزایش یافته و در مجاورت رطوبت به سرعت هیدراته نمی‌گردد. در روش‌های متداول تثبیت ابتدا سیمان با استفاده از پخش‌کننده مناسب و با توجه به درصد بهینه تعیین شده در طرح اختلاط آزمایشگاهی بر روی لایه خاکی مورد نظر در یک طول مشخصی از راه پخش شده و پس از تایید مقدار آن با آزمایش سینی عملیات اختلاط آغاز می‌گردد. با توجه به آنکه درصد رطوبت خاک در این زمان اندکی بیشتر از درصد رطوبت بهینه می‌باشد، احتمال هیدراته شدن بخشی از سیمان بالا بوده و مقدار سیمان هیدراته نشده‌ای که با لایه موردنظر مخلوط می‌گردد کمتر از مقدار بهینه می‌باشد. بنابراین در صورت نبودن اثرات مخرب اسیدهای چرب بر سایر خصوصیات خاک‌های تثبیت‌شده، استفاده از سیمان آب‌زدا می‌تواند تا حد زیادی این مشکل را برطرف می‌نماید. علاوه بر این مدت زمان نگهداری این سیمان در شرایط مرطوب بالاتر از سیمان‌های معمولی بوده و این مورد باعث افزایش سهولت استفاده از این سیمان می‌گردد. افزودنی مشابهی در کشور آلمان تولید شده و به "سیمان راه" معروف است [۱۷]. از خصوصیات اصلی گزارش شده می‌توان به نداشتن نیاز به بسته‌بندی، افزایش دوام در برابر رطوبت و عدم هیدراته شدن در ابتدای مجاورت با آب و خصوصیات خمیری و مقاومتی نسبتاً مشابه با سیمان‌های معمولی اشاره نمود. همچنین نتایج بررسی‌های انجام شده حاکی از دستیابی به مقاومت‌های بالاتر در مقایسه با موادی چون خاکستر بادی و آهک می‌باشند [۱۷]. ترکیب شیمیایی این سیمان در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱: دانه‌بندی خاک‌های مورد مطالعه

جدول (۱): مشخصات خاک‌های مورد آزمایش

| مشخصات | استاندارد | ماسه (A) | رس (B) |
|---------------------------------|---------------|----------|-----------|
| درصد شن | ASTM D۴۲۲-۸۷ | - | - |
| درصد ماسه | ASTM D۴۲۲-۸۷ | ۹۷/۸ | ۳۴/۸۷ |
| درصد رس | ASTM D۴۲۲-۸۷ | ۲/۲۰ | ۶۵/۸۳ |
| حدروانی | ASTM D۴۳۱۸-۸۷ | غیرخمیری | ۶۴/۰۰ |
| نشانه خمیری | ASTM D۴۳۱۸-۸۷ | غیرخمیری | ۳۸/۵۰ |
| حداکثر γ_d (gr/cm^3) | AASHTO T۹۹-۹۰ | ۱/۷۳ | ۱/۶۷ |
| درصد رطوبت بهینه | AASHTO T۹۹-۹۰ | ۱۵/۵۹ | ۲۳/۴۰ |
| رده بندی در سیستم یونفاید | AASHTO T۱۸۰-D | SP | CH |
| رده بندی در سیستم آشتو | AASHTO T۱۸۰-D | A-۳ | A-۷-۶(۲۲) |

۳- مشخصات مواد تثبیت‌کننده مورد استفاده

۳-۱- آهک

آهک از پرکاربردترین و ارزان‌ترین مواد تثبیت‌کننده است [۲] و [۴]. با اعمال آهک به خاک واکنش تجمع- تراکم (تبادل کاتیونی) بطور آبی انجام می‌گیرد. در رابطه (۱) که به سری لیتروپی موسوم است، ترتیب کلی تبادل یون‌هایی که معمولاً در خاک‌ها یافت می‌شوند، نشان داده شده است.

$$N_a^+ < K^+ < C_a^{++} < M_g^{++} \quad (1)$$

در این سری هریک از یون‌ها تمایل به جایگزینی یون‌هایی که در سمت چپ آن قرار دارند را داشته و یون‌های یک‌ظرفیتی با یون‌های چندظرفیتی جایگزین می‌شوند. در طی واکنش تجمع- تراکم یون کلسیم موجود در آهک جایگزین یون‌های تک‌ظرفیتی موجود در کانی‌های رسی خاک می‌گردد [۱۱] و [۱۹]. در اثر ایجاد جاذبه بیشتر بین یون‌های دوظرفیتی کلسیم، ذرات خاک به هم نزدیک شده و بافت خاک از حالت ریزدانه خارج می‌گردد. همچنین در اثر اشباع شدن بارهای منفی موجود بر روی ذرات رس، تمایل آنها به جذب آب کمتر شده و در نتیجه خواص خمیری و تورمی خاک اصلاح می‌گردد. در صورت وجود مواد پوزولانی شامل مواد سیلیس‌دار و آلومین‌دار در خاک، واکنش پوزولانی نیز در مخلوط آهک- خاک رخ داده و مواد سیمانی تولید شده باعث بهبود خواص مقاومتی و دوام خاک می‌شوند. پیشرفت این واکنش بسیار کند

بهتر از ۲ ماده دیگر بوده است. با توجه به وجود مقدار قابل توجهی رس در این خاک، میزان پیشرفت واکنش اولیه در این خاک بالا بوده و در نتیجه آن خواص خمیری این خاک پس از اعمال آهک به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که در بیشتر موارد اثرات آهک در بهبود خواص خمیری خاک‌های تثبیت‌شده بهتر از سیمان می‌باشد [۱۱]، [۱۲] و [۱۳]. در ارتباط با خصوصیات خمیری اثرات سیمان آب‌زدا اندکی بهتر از سیمان نوع ۲ است که این مورد نشان‌دهنده پیشرفت سریع‌تر واکنش هیدراسیون می‌باشد. همچنین بهتر بودن اثرات سیمان آب‌زدا نسبت به سیمان نوع ۲ نشان‌دهنده عدم اثرات مخرب اسیدهای چرب بر خواص این سیمان می‌باشد. در جدول ۴ تغییرات دامنه خمیری خاک B در اثر تغییر مقدار مواد اعمالی ارائه شده است. روند تغییرات دامنه خمیری این خاک مشابه تغییرات حدروانی بوده و موارد یاد شده برای حدروانی در این مورد نیز درست است. کاهش نشانه خمیری، باعث افزایش کارایی خاک می‌گردد. در اثر واکنش تبادل کاتیونی، بافت خاک رس از نظر فیزیکی تغییر کرده و مانند ماسه ریزدانه عمل می‌نماید.

جدول (۳): تغییرات حدروانی خاک B

| درصد | سیمان نوع ۲ | آهک | سیمان آب‌زدا |
|------|-------------|-------|--------------|
| ۰ | ۶۴/۰۰ | ۶۴/۰۰ | ۶۴/۰۰ |
| ۲ | ۵۵/۱۲ | ۴۸/۱۳ | ۵۳/۱۴ |
| ۴ | ۴۴/۱۱ | ۳۵/۲۴ | ۴۲/۱۸ |
| ۶ | ۳۷/۷۱ | ۲۹/۷۱ | ۳۵/۲۳ |
| ۸ | ۲۹/۸۴ | ۲۳/۲۲ | ۲۷/۴۲ |

جدول (۴): تغییرات دامنه خمیری خاک B

| درصد | سیمان نوع ۲ | آهک | سیمان آب‌زدا |
|------|-------------|-------|--------------|
| ۰ | ۳۸/۴۹ | ۳۸/۴۹ | ۳۸/۴۹ |
| ۲ | ۲۸/۹۷ | ۲۳/۳۱ | ۲۶/۰۹ |
| ۴ | ۱۸/۲۸ | ۱۱/۹۰ | ۱۶/۴۸ |
| ۶ | ۱۰/۹۴ | ۷/۰۱ | ۹/۵۲ |
| ۸ | ۶/۵۲ | ۱/۸۱ | ۴/۰۰ |

۴-۲- مقاومت فشاری محدود نشده (UCS)

مقاومت فشاری خاک تثبیت شده یکی از ضوابط اصلی برای انتخاب نوع و مقدار تثبیت کننده می‌باشد. برای ساخت نمونه‌های مقاومت فشاری، ابتدا نمونه‌های مخلوط شده با هر کدام از مواد افزودنی در قالب ۶ اینچی تراکم با روش اشتوی اصلاح شده متراکم گردید، سپس نمونه‌های مقاومت فشاری به ارتفاع ۷/۲cm و قطر ۳/۶cm از آنها استخراج گردید [۹]. درصد مواد افزودنی برای این آزمایش برابر با ۳، ۶، ۹ و ۱۲ درصد بوده است. نمونه‌های مقاومت فشاری شامل ۴ گروه زیر

به منظور کنترل بهتر نتایج به دست آمده از سیمان آب‌زدا، در این مطالعه از سیمان نوع ۲ به عنوان یک ماده مرسوم در عملیات تثبیت استفاده شده است. ترکیب شیمیایی این سیمان در جدول ۲ ارائه شده است. با اعمال سیمان‌ها به خاک واکنش هیدراسیون آغاز می‌گردد. در طی این واکنش ترکیباتی چون C_7S ، C_6S و C_7A با آب اختلاط وارد واکنش شده و ترکیبات سیمانی را تولید می‌نمایند که باعث ایجاد چسبندگی بین دانه‌های خاک تثبیت‌شده گردیده و مقاومت خاک را افزایش می‌دهند [۱۱]. همچنین در اثر هیدراسیون، هیدروکسید کلسیم تولید می‌گردد که بر خواص خمیری خاک تثبیت‌شده تاثیر زیادی داشته و همانند آهک در صورت وجود مواد پوزولانی در خاک با آنها وارد واکنش شده و ترکیبات سیمانی ثانویه را تولید کرده که پیشرفت این واکنش به موازات واکنش هیدراسیون باعث افزایش مقاومت در خاک می‌گردد [۱۱].

جدول ۲: مشخصات اصلی سیمان‌های مورد استفاده [۴]

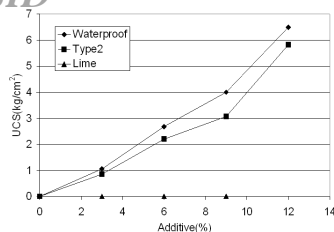
| نوع سیمان | مقدار (%) | C_7S | C_6S | C_7A | اسیدچرب |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|---------|
| آب‌زدا | متوسط | ۴۸/۵ | ۲۴/۵ | ۱۲ | ۱/۵ |
| نوع ۲ | متوسط | ۴۶ | ۲۹/۶ | ۶ | ۰/۰ |

بر اساس مطالعات، C_3S و C_2S بیشترین تاثیر را در خواص مقاومتی سیمان دارا هستند. اثرات C_3S در سیمان، تسریع گیرش اولیه و افزایش مقاومت اولیه و C_2S افزایش زمان گیرش اولیه و کاهش مقاومت اولیه در سیمان می‌باشد [۱۱]. در جدول ۲ دیده می‌شود که مقدار C_7S در سیمان آب‌زدا بیشتر از سیمان نوع ۲ و مقدار C_7A در این سیمان کمتر از سیمان نوع ۲ می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود در صورت عدم اثرات نامطلوب اسیدهای چرب بر خصوصیات شیمیایی سیمان آب‌زدا، نتایج به دست آمده از سیمان آب‌زدا بهتر از سیمان نوع ۲ باشد.

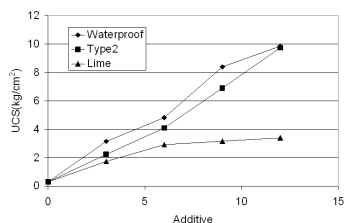
۸-۱- آزمایش‌ها

۸-۱-۱- حدود اتربرگ

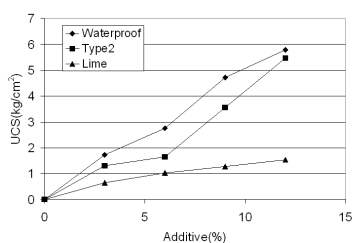
با توجه به غیرخمیری بودن ماسه (خاک A)، این آزمایش فقط برای خاک رس (خاک B) انجام شد. نمونه‌های خاک B پس از اختلاط با مواد تثبیت‌کننده و مقدار رطوبت مورد نظر در هر مرحله، به مدت یک ساعت نگهداری شده و پس از گیرش اولیه، آزمایش‌های حدروانی و حدخمیری انجام شد. نتایج به دست آمده در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. با توجه به جدول ۳، هر ۳ ماده اعمالی به میزان قابل توجهی حدروانی خاک B را کاهش داده‌اند، ولی برای تمامی مقادیر اعمال شده اثرات آهک



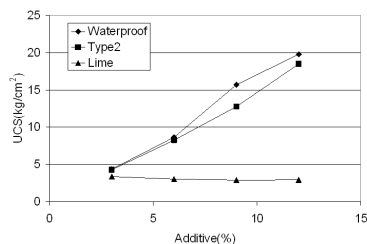
شکل (۳): تغییرات مقاومت فشاری ۱+۶ روزه خاک A



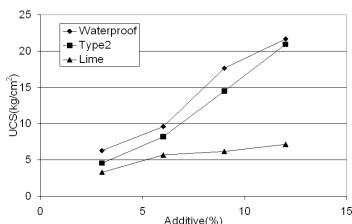
شکل (۴): تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه خاک B



شکل (۵): تغییرات مقاومت فشاری ۱+۶ روزه خاک B



شکل (۶): تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه خاک A



شکل (۷): تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه خاک B

با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان آب‌زدا و سیمان نوع ۲ به علت اشباع شدن در آب اندکی کاهش یافته‌اند ولی مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک به ازای تمامی مقادیر به دلیل وارفتگی پس از قرارگیری در آب قابل اندازه‌گیری نبوده‌است. در شکل ۳ مشاهده می‌گردد که نتایج حاصل از سیمان آب‌زدا بهتر از نتایج نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان نوع ۲ بوده‌است.

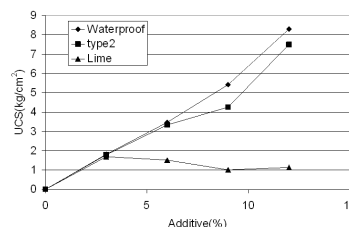
می‌باشند:

۱- نمونه‌های ۷ روزه: این نمونه‌ها به مدت ۷ روز در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و با کنترل رطوبت عمل‌آوری شده سپس آزمایش مقاومت فشاری بر روی آنها انجام گرفت.

۲- نمونه‌های ۱+۶ روزه: شرایط ساخت و عمل‌آوری این نمونه‌ها تا روز ششم مشابه نمونه‌های ۷ روزه می‌باشد، ولی این نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت قبل از آزمایش درون حمام آب با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و اشباع شدند.

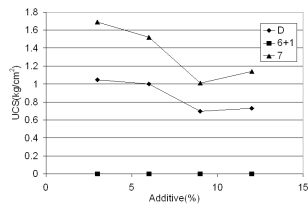
۳- نمونه‌های ۲۸ روزه: شرایط عمل‌آوری این نمونه‌ها مشابه نمونه‌های ۷ روزه و به مدت ۲۸ روز بوده‌است.

۴- نمونه‌های دوام: این مورد شامل نمونه‌هایی است که پس از ساخت تحت ۷ سیکل یخبندان و ذوب قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها ابتدا به مدت ۶۰ ساعت در دمای ۲۰^{0C}، عمل‌آوری شده و به مدت ۲۴ ساعت درون آب با همین دما اشباع می‌گردند. سپس این نمونه‌ها تحت ۷ سیکل یخبندان و ذوب بین دماهای ۲۰^{0C}- و ۲۰^{0C}+ قرار گرفتند [۱۰]. زمان قرارگیری نمونه‌ها در هر کدام از این دماها ۱۲ ساعت بوده‌است. تمام نمونه‌ها به جز نمونه خاک B، در حالت تثبیت‌نشده که در آن شکست نمونه به صورت بادکردگی بود، در صفحات مورب گسیخته شدند. با توجه به شکل ۲، مقدار مقاومت فشاری خاک A با افزایش مقدار آهک تغییرات قابل توجهی ندارد و حتی با افزایش مقدار آهک بیش از ۳ درصد مقدار مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. این مورد به دلیل عدم واکنش‌پذیری خاک A با آهک می‌باشد. همچنین مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان آب‌زدا و سیمان نوع ۲ با افزایش مقدار این مواد افزایش قابل توجهی از خود نشان داده‌اند. در جدول ۱، مشاهده می‌گردد که مقدار رس موجود در این خاک بسیار ناچیز می‌باشد. با توجه به این مورد پیشرفت واکنش پوزولانی در آهک چندان قابل توجه نبوده و در نتیجه تغییر قابل توجهی در مقدار مقاومت فشاری خاک A پس از تثبیت با آهک رخ نمی‌دهد.

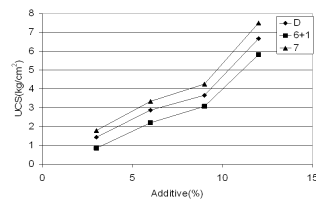


شکل (۲): تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه خاک A

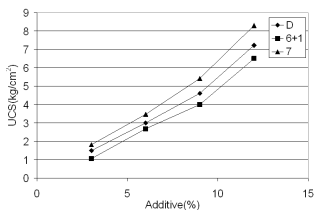
اشباع شده به ازای تمامی مقادیر آهک می‌توان به این نتیجه رسید که آهک ماده مناسبی برای تثبیت خاک A نمی‌باشد.



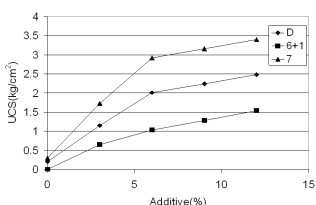
شکل (۸): نمونه‌های ۷ روزه، ۶+۱ روزه و دوام (خاک A، آهک)



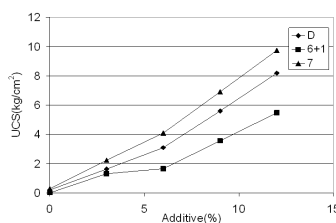
شکل (۹): نمونه‌های ۷، ۶+۱ روزه و دوام (خاک A، نوع ۲)



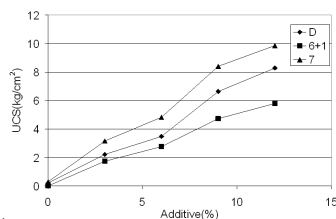
شکل (۱۰): نمونه‌های ۷، ۶+۱ روزه و دوام (خاک A، آب‌زدا)



شکل (۱۱): نمونه‌های ۷، ۶+۱ روزه و دوام (خاک B، آهک)



شکل (۱۲): نمونه‌های ۷، ۶+۱ روزه و دوام (خاک B، نوع ۲)



شکل (۱۳): نمونه‌های ۷، ۶+۱ روزه و دوام (خاک B، آب‌زدا)

نتایج ارائه شده در شکل ۴ کم و بیش مشابه با شکل ۲ می‌باشد. کند شدن روند افزایش مقاومت به‌ازای مقادیر بیش از ۶ درصد آهک به دلیل مصرف بخش عمده‌ای از مواد پوزولانی موجود در خاک می‌باشد، به طوری که با افزایش مقدار آهک، مقدار مواد پوزولانی موجود در خاک، برای پیشرفت واکنش پوزولانی کافی نیست.

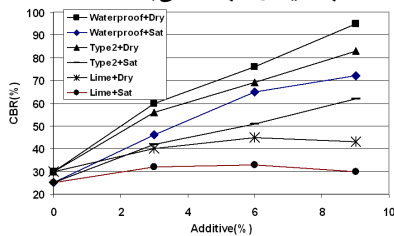
نتایج ارائه شده در شکل ۵ بیانگر آن است که بر خلاف خاک A مقاومت فشاری نمونه‌های خاک B که با آهک تثبیت شده‌اند در اثر اشباع شدن در آب به طور کامل از بین نرفته‌اند. این مورد به دلیل پیشرفت واکنش پوزولانی در این خاک که حاوی مقدار قابل توجهی رس می‌باشد بوده‌است. بر خلاف آهک، مقدار کاهش مقاومت فشاری به دلیل اشباع شدن در خاک B برای سیمان‌ها بیشتر از خاک A می‌باشد که این مورد به دلیل وجود مقدار قابل توجهی رس در خاک B و خاصیت خمیری بالای این خاک است [۱۱] و [۱۲].

نتایج نمونه‌های ۲۸ روزه خاک A با توجه به شکل ۶ کم و بیش مشابه با نمونه‌های ۷ روزه می‌باشد. همان‌طور که در مورد نمونه‌های ۷ روزه گفته شد مقدار رس موجود در این خاک بسیار کم بوده و واکنش پوزولانی در این خاک پیشرفت چندانی ندارد. در این صورت ذرات آهک همانند بخشی از ذرات خاک عمل کرده و به دلیل کمتر بودن چگالی آهک نسبت به چگالی خاک مقدار وزن مخصوص توده خاک- آهک کاهش یافته و در نتیجه مقدار مقاومت این خاک با افزایش مقدار آهک کاهش می‌یابد [۱۱] و [۱۲].

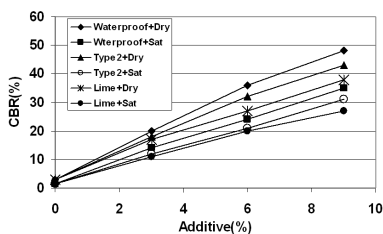
با توجه به شکل ۷، مقاومت فشاری ۲۸ روزه خاک B برای نمونه تثبیت‌شده با آهک تغییرات مشابهی با نمونه ۷ روزه در این خاک دارد و بر خلاف خاک A مقدار مقاومت فشاری این خاک با افزایش مقدار آهک افزایش می‌یابد. همچنین در این مورد نیز مشابه با نمونه‌های ۷ روزه روند تغییرات مقاومت فشاری برای نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر کمتر از ۶ درصد زودتر از نمونه‌های تثبیت‌شده با بیش از این مقدار می‌باشد. این مورد به دلیل کند شدن روند واکنش پوزولانی برای مقادیر بیشتر از ۶ درصد آهک در خاک B می‌باشد.

با توجه به شکل ۸، روند تغییرات مقاومت فشاری برای نمونه‌های ۷ روزه و دوام با افزایش مقدار آهک در خاک A تقریباً مشابه بوده و با افزایش مقدار تثبیت‌کننده مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل وارفتگی نمونه‌های اشباع شده مقاومت فشاری آنها صفر گزارش شده‌است. با توجه به روند تغییرات مقاومت فشاری برای نمونه‌های ۷ روزه و دوام و همچنین صفر بودن مقدار مقاومت فشاری برای نمونه‌های

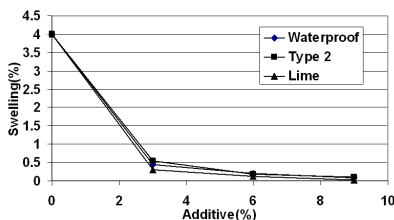
سه ماده به میزان قابل توجهی CBR خاک B را افزایش داده‌اند. درصد تورم خاک A در حالت تثبیت‌نشده بسیار ناچیز بوده و خاک B ۴ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج شکل ۱۶، هر ۳ ماده به میزان قابل توجهی تورم خاک B را کاهش داده‌اند. آهک در تورم خاک B بهتر از دو ماده دیگر بوده و سیمان آبزدا دارای تاثیر متوسط بوده‌است. در حالت کلی براساس مطالعات انجام شده در صورت واکنش‌پذیری خاک با آهک تاثیر آهک بر کاهش تورم خاک بیشتر از سیمان می‌باشد [۱۳] و [۱۶]. به هر حال نتایج آزمایش‌های CBR و درصد تورم نیز موید عملکرد مناسب سیمان آبزدا می‌باشد.



شکل (۱۴): اثرات تثبیت‌کننده‌ها بر CBR خاک A



شکل (۱۵): اثرات تثبیت‌کننده‌ها بر CBR خاک B



شکل (۱۶): اثرات تثبیت‌کننده‌ها بر تورم ناشی از اشباع شدن

۵- بررسی نمودارهای تنش- کرنش نمونه های

مقاومت فشاری

جهت بررسی تغییرات میزان کرنش حد گسیختگی نمودارهای تنش- کرنش برخی از نمونه های مقاومت فشاری محدودنشده، در شکل‌های ۱۷ الی ۲۰ ارائه شده‌است. در این نمودارها:

B: مقاومت فشاری خاک B بدون اعمال تثبیت‌کننده‌ها

B3WC: خاک B، تثبیت‌شده با سه درصد سیمان آبزدا

B32C: خاک B، تثبیت‌شده با ۳ درصد سیمان نوع ۲

B3L: خاک B، تثبیت‌شده با ۳ درصد آهک

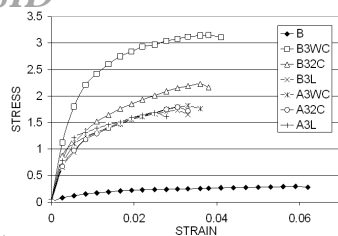
روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های خاک A تثبیت‌شده با سیمان نوع ۲ مطابق شکل ۹ برای هر ۳ دسته از نمونه‌ها کاملاً مشابه است ولی باز هم مقادیر به دست آمده از نمونه‌های دوام بالاتر از نمونه‌های اشباع شده می‌باشند. این مورد با نتایج مطالعات انجام گرفته در این زمینه که نشان دهنده دوام مناسب نمونه‌های تثبیت‌شده در مقابل دوره‌های یخبندان و ذوب هستند، مطابقت دارد. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که نمونه‌هایی که با ماده مناسب تثبیت می‌شوند در اثر دوره‌های یخبندان و ذوب بین ۷۰ الی ۹۰ درصد از مقاومت اولیه خود را حفظ کرده‌اند [۲] و [۱۱].

با مقایسه نتایج مربوط به سیمان آبزدا در شکل ۱۰ و سیمان نوع ۲ در شکل ۹ می‌توان به این نتیجه رسید که اثرات سیمان آبزدا بر افزایش دوام در برابر رطوبت و سیکل‌های یخبندان-ذوب بهتر از سیمان نوع ۲ می‌باشد.

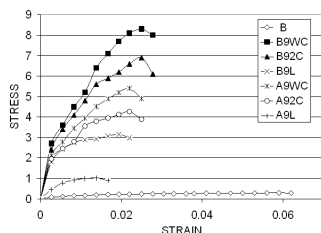
با توجه به شکل ۱۱، آهک اثرات قابل قبولی بر افزایش دوام خاک B در مقابل سیکل‌های یخبندان و ذوب دارد. همچنین همانند نمونه‌های قبل در این مورد نیز دیده می‌شود که مقادیر مقاومت به دست آمده از نمونه‌های یخبندان و ذوب از نمونه‌های اشباع شده بالاتر می‌باشد. اثرات سیمان نوع ۲ و آبزدا بر دوام خاک B مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، کم و بیش مشابه با خاک A می‌باشند. تمامی نمودارها نشان می‌دهند که اشباع شدن اثرات مخرب‌تری نسبت به سیکل‌های یخبندان و ذوب متوالی برای خاک‌های تثبیت شده دارد.

۳-۴ - CBR

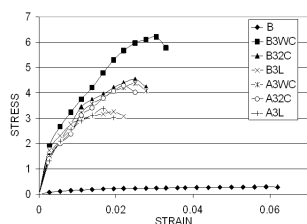
CBR بستر و لایه‌های خاکی روسازی یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی در روش طراحی غیرمستقیم می‌باشد. در این مطالعه به منظور بررسی تاثیر سیمان آبزدا بر قابلیت باربری خاک‌های مورد مطالعه آزمایش CBR بر روی نمونه‌های خشک و اشباع انجام شده و درصد تورم نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده برای نمونه‌های خاک A در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است. با توجه به این شکل نتایج آزمایش CBR قابل مقایسه با آزمایش‌های مقاومت فشاری می‌باشد. برابر با نتایج قبلی آهک اثرات چندانی بر باربری خاک A ندارد. به دلیل نداشتن کفایت کانی‌های رسی موجود در این خاک، واکنش پوزولانی پیشرفت محسوسی نداشته و آهک همچون بخشی از ذرات خاک عمل نموده و با توجه به پایین‌تر بودن وزن مخصوص آهک نسبت به خاک A، وزن مخصوص ترکیب خاک-آهک کاهش یافته و قابلیت باربری آن کاهش خواهد یافت. این مورد در مطالعات مشابه انجام گرفته نیز اشاره شده‌است [۱۱] و [۱۲]. مطابق با شکل ۱۵، هر



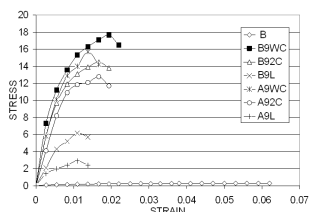
شکل (۱۷): نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های ۷ روزه



شکل (۱۸): نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های ۷ روزه



شکل (۱۹): نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های ۲۸ روزه



شکل (۲۰): نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های ۲۸ روزه

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله اثرات سیمان آبزدا بر خصوصیات دو نوع از خاک‌های مناطق شمالی کشور شامل خاک رس و ماسه‌بادی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. برای ارزیابی و مقایسه نتایج به دست آمده در ارتباط با خصوصیات مقاومتی و خمیری دو نوع افزودنی دیگر شامل سیمان نوع ۲ و آهک نیز مورد استفاده قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به دست آمده عبارتند از:

- ۱- با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده و CBR در دو حالت خشک و اشباع، سیمان آبزدا در مقایسه با آهک و حتی سیمان نوع ۲ افزودنی مناسب‌تری برای تثبیت این دو نوع خاک می‌باشد.

می‌باشند. به طور مشابه A، نشان‌دهنده نمونه‌های خاک A و ۹، نشان‌دهنده ۹ درصد از هر کدام از این تثبیت‌کننده‌ها می‌باشد.

نمودارهای شکل ۱۷ نشان می‌دهند که میزان کرنش حد گسیختگی نمونه‌های تثبیت‌نشده خاک B، به مراتب از مقدار این پارامتر در نمونه‌های تثبیت‌شده بزرگتر است. همچنین مقدار این پارامتر برای نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان آبزدا بزرگتر از نمونه‌های سیمان نوع ۲ و آهک می‌باشد. برای نمونه‌های خاک A، به دلیل محدود نبودن، امکان انجام آزمایش بر روی نمونه‌های تثبیت‌نشده وجود نداشت. ولی برای نمونه‌های تثبیت‌شده دیده می‌شود که مقدار کرنش حد گسیختگی کمتر از نمونه‌های خاک B می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۸، مقدار کرنش حد گسیختگی برای نمونه‌های تثبیت‌شده با ۹ درصد از تثبیت‌کننده‌ها کمتر از مقدار این پارامتر در نمونه‌های تثبیت‌شده با ۳ درصد تثبیت‌کننده بوده‌است. همچنین مقدار کرنش حد گسیختگی برای نمونه‌های خاک A، کوچکتر از نمونه‌های خاک B، می‌باشد. با توجه به شکل ۱۹، مقدار کرنش حد گسیختگی برای نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های ۷ روزه کاهش یافته‌است. ولی مقایسه شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان می‌دهد که مقدار کرنش حد گسیختگی برای نمونه‌های ۷ روزه تثبیت‌شده با ۹ درصد از تثبیت‌کننده‌ها، اندکی کمتر از مقدار این پارامتر، برای نمونه‌های ۲۸ روزه تثبیت‌شده با ۳ درصد تثبیت‌کننده می‌باشد.

در شکل ۲۰، دیده می‌شود که مقدار کرنش حد گسیختگی برای نمونه‌های ۲۸ روزه پس از تثبیت با ۹ درصد تثبیت‌کننده، به مراتب از نمونه‌های ۷ روزه مشابه و نمونه‌های ۲۸ روزه تثبیت شده با ۳ درصد تثبیت‌کننده، کمتر است. با توجه به نتایج به دست آمده، موارد دیگری به دست می‌آید که عبارتند از:

- با افزایش زمان عمل‌آوری و مقدار تثبیت‌کننده رفتار خاک شکننده‌تر خواهد بود.
- اثر زمان عمل‌آوری بر میزان تغییر شکل نمونه‌ها در لحظه گسیختگی، کمتر از اثرات میزان تثبیت‌کننده می‌باشد.
- نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان آبزدا، رفتار انعطاف پذیرتر و نمونه‌های تثبیت شده با آهک، رفتار شکننده‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند.

با توجه به عملکرد مناسب این سیمان در تثبیت خاک پیشنهاد می‌گردد جهت تکمیل مطالعات اثرات این سیمان در افزایش دوام مخلوط‌های آسفالت گرم و همچنین استفاده از آن در عملیات بازیافت سرد آسفالت به عنوان تثبیت‌کننده مورد مطالعه قرار گیرد.

- ۲- اثرات سیمان آب‌زدا بر خصوصیات خمیری خاک رس در مقایسه با آهک ضعیف‌تر بوده اما قابل مقایسه با سیمان نوع ۲ می‌باشد.
- ۳- براساس نتایج به دست آمده سیمان آب‌زدا را می‌توان به عنوان یک ماده تثبیت‌کننده در پروژه‌های راهسازی استفاده نمود.

۷- مراجع

- [۱] طاحونی، شاپور؛ اصول مهندسی ژئوتکنیک (مهندسی پی)، انتشارات پارس آیین، تهران، جلد دوم، ۱۳۸۰.
- [۲] طباطبایی، امیرمحمد؛ روسازی راه، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳۸۰.
- [۳] کباری، سیاوش؛ مصالح ساختمانی، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳۷۳.
- [۴] فامیلی، هرمز؛ بتن شناسی (خواص بتن)، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۳۷۶.
- [۵] ASTM(2000), "Test method for particle size analysis of soils", D422-87, Vol 04-08, pp91-97.
- [۶] ASTM(2000), "Method for particle size analysis of soils", D421-58, Vol04.08, pp91-97.
- [۷] ASTM(2000), "Test method for specific gravity of soils", D854-87, Vol 04.08, pp168-17.
- [۸] ASTM(2000), "Test method for CBR(California Bearing Ratio) of laboratory compacted soils", D1883-87, Vol 04.08, pp248-255.
- [۹] ASTM (2000), "Test method for unconfined compressive strength of cohesive soil", D2166-87, Vol 04.08.
- [۱۰] ASTM (2000), "standard test method for freezing and thawing compacted soil- cement mixtures", D560, Vol.04.01, pp463-464.
- [۱۱] Bhattacharja, s. and Todres, H.A.,2003, "Stabilisation of clay soils by Portland cement or lime – A critical review of literature", *PCA R&D*, serial No.2066 .
- [۱۲] Diamond, S. and Kinter, E.B.1965, "Mechanisms of soil-lime stabilization", *Highway Research record*92, pp83-102.
- [۱۳] Hopkins, T.C. Hunsucker, D.Q. and Beckhum, T.1994, "Selection of design strengths of untreated soil subgrades and subgrades treated with cement and hydrated lime", *Transportation research record* 1440,pp37-44
- [۱۴] Hunter,D.1988, "Lime-induced heave in sulfate bearing clay soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.114, No.2, February, pp150-167
- [۱۵] Neville, A. M., 1981, "Properties of concrete". Pitman Books, London.
- [۱۶] Perrin, L. 1992, "Expansion of lime-treated clays containing sulfates",*Proc., 7th Int. Conf. on ExpansiveSoils*, Vol. 1, ASCE Expansive Soils Research Council, New York, 409–41.
- [۱۷] Prabaker, J., Dendorkar, N., and Morchhale, R.K., 2001, "Influence of flyash on strength behaviour of typical soils", *Structural Engineering Research Center, India*.
- [۱۸] Rollings, R.S., Burkes, J.P. and Rollings, M.P.,1999, "Sulfate attack on cement stabilized sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No.5, May, pp364-372.
- [۱۹] Sherwood, P.T.,1993, "Reactions of soil minerals with cement and chemicals", *Highway research record* 139, pp15-25.
- [۲۰] Todres, H.A., Mishulovich, A., and Ahmad, J., 1992, "Cement kiln dust management:permeability", *research and development bulletin RD103T*. Skokie, IL: Portland Cement Association,;pp1-6.
- [۲۱] Zaman, M., Lagurous, J.G., and Sayah, A., 1992 "Soil stabilization using cement kiln dust", *Proceedings of the 7th International Conference on Expansive Soils*, Dallas, TX, 3-5 August:pp47-51.