Archive of SID

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

فریدون مقدس نژاد [i *]؛ امیر مدرس [ii]

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، تضعیف‌شده و مقدار تورم قابل توجهی را متحمل می گردند. خاک‌های ماسه‌ای مناطق ساحلی که به ماسه‌بادی معروفند، در حالت محدودشده قابلیت باربری قابل توجهی دارند، ولی در حالت محدودنشده 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 نوع۲ وآهک مقایسه شده‌است. 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 پخش‌شده 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 محدودنشده 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: ۱۳۸٤/۱۰/۲۸

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۷/۱۲/۱۱

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

[ii] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی راه وترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: Email: amirmodarres2003@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

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

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 به‌منظور اصلاح خاک‌های نرم و کم مقاومت، بهبود مشخصات فنی خاک‌ها و مصالح شنی، ایجادلایه های اساس و زیراساس با قابلیت باربری زیاد، بازسازی روسازی‌های فرسوده با استفاده از مصالح موجود و کاهش گرد وخاک 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 وشد، هدف از انجام تثبیت خاک وهزینه عملیات بستگی دارد. با توجه به این موارد، انجام آزمایش‌ها و بررسی‌های دقیق خاک منطقه موردنظر 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 تورمی خاک می‌باشند [۱۱]، [۱۳] و[۱۶]. در سال‌های اخیر مطالعات جامعی در ارتباط با استفاده از تثبیت‌کننده‌های جدید انجام شده‌است. 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 شده‌است. 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 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 شده‌است [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 گرفته‌است.

۲- مشخصات خاک‌های مورد مطالعه

مشخصات خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق در جدول و شکل۱، ارائه شده‌است.

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 شده‌است.

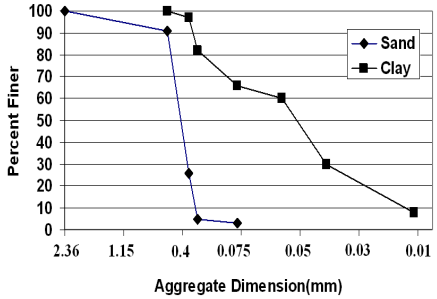
گروه دوم شامل خاک رس برداشت شده از عمق بیش از ۵۰ سانتیمتر در زمین‌های کشاورزی در ۱۰ نقطه مختلف از شهرهای گفته‌شده می‌باشد. کلیه مشخصات ارائه شده پس از اختلاط تمامی نمونه‌های برداشت‌شده برای هر کدام از خاک‌های مورد مطالعه تعیین شده‌است.

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 محدودنشده می‌باشد [۱].

خاک رس مورد مطالعه دارای خاصیت خمیری بالا بوده و طبق جدول۱، 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.

www.SID.ir

Archive of SID



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	۶۵/۱۳
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 یونیفاید	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[۳] و[۴]. با اعمال آهک به خاک واکنش تجمع- تراکم(تبادل کاتیونی) بطور آنی انجام می‌گیرد. در رابطه (۱) که به سری لیتروپی موسوم است، ترتیب کلی تبادل یون‌هایی که معمولاً در خاک‌ها یافت می‌شوند، نشان داده شده‌است.

$$N_a^{+} < K^{+} < C_a^{++} < M_g^{++} \qquad (۱)$$

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 اشباع‌شدن بارهای منفی موجود برروی 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 وآلومین‌دار 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 بسیارکند 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 نوع۱ 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 هیدارته‌شدن 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 جدول۲ ارائه شده‌است.

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۳- سیمان نوع۲

به منظور کنترل بهتر نتایج به دست آمده از سیمان آب‌زدا، در این مطالعه از سیمان نوع۲ به عنوان یک ماده مرسوم در عملیات تثبیت استفاده شده‌است. ترکیب شیمیایی این سیمان در جدول ۲ ارائه شده‌است. با اعمال سیمان‌ها به خاک واکنش هیدراسیون آغاز می‌گردد. در طی این واکنش ترکیباتی چون C_3S، C_2S و C_3A با آب اختلاط وارد واکنش شده وترکیبات سیمانی را تولید می‌نمایند که باعث ایجاد چسبندگی بین دانه‌های خاک تثبیت‌شده گردیده و مقاومت خاک را افزایش می دهند[۱۱]. همچنین در اثر هیدراسیون، هیدروکسید کلسیم تولید می گردد 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].

جدول۲: مشخصات اصلی سیمان‌های مورد استفاده [۴]

نوع سیمان	مقدار(٪)	C_3S	C_2S	C_3A	اسیدچرب
آب‌زدا	متوسط	۴۸/۵	۲۴/۵	۱۲	۱/۵
نوع۲	متوسط	۴۶	۲۹/۶	۶	۰/۰

براساس مطالعات، C_3S وC_2S بیشترین تاثیر را در خواص مقاومتی سیمان دارا هستند. اثرات C_3S در سیمان، تسریع گیرش اولیه و افزایش مقاومت اولیه وC_2S افزایش زمان گیرش اولیه و کاهش مقاومت اولیه در سیمان می باشد[۱۱]. در جدول ۲ دیده می‌شود که مقدار C_3S در سیمان آب‌زدا بیشتر از سیمان نوع۲ و مقدارC_3S در این سیمان کمتر از سیمان نوع۲ 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 نوع۲ باشد.

٤- آزمایش‌ها

٤-۱- حدود اتربرگ

با توجه به غیرخمیری بودن ماسه(خاکA)، 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 و۴ ارائه شده‌اند. با توجه به جدول ۳، هر ۳ ماده اعمالی به میزان قابل توجهی حد روانی خاک B را کاهش داده‌اند، ولی برای تمامی مقادیر اعمال شده اثرات آهک 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 نوع۲ 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 شده‌است. 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 حد روانی خاک B

درصد	سیمان نوع۲	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 نوع۲	آهک	سیمان آب‌زدا
۰	۳۸/۴۹	۳۸/۴۹	۳۸/۴۹
۲	۲۸/۹۷	۲۳/۳۱	۲۶/۰۹
۴	۱۸/۳۸	۱۱/۹۰	۱۶/۴۸
۶	۱۰/۹۴	۷/۰۱	۹/۵۳
۸	۶/۵۲	۱/۸۱	۴/۰۰

٤-۲- مقاومت فشاری محدود نشده (UCS)

مقاومت فشاری خاک تثبیت شده یکی از ضوابط اصلی برای انتخاب نوع ومقدار 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 وقطر ۳/۶cm از آنها استخراج گردید [۹]. درصد مواد افزودنی برای این آزمایش برابر با ۳، ۶، ۹ و ۱۲ درصد بوده‌است. نمونه‌های مقاومت فشاری شامل ۴ گروه زیر

www.SID.ir

Archive of SID

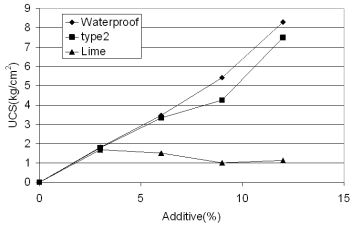
می‌باشند:

۱- نمونه‌های ۷روزه: 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.

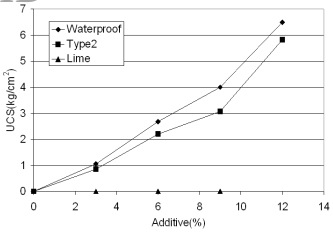
۲- نمونه‌های ۱+۶ روزه : شرایط ساخت و عمل آوری این نمونه‌ها تا روز ششم مشابه نمونه‌های ۷ روزه می‌باشد، ولی این نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت قبل از آزمایش درون حمام آب با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و اشباع شدند.

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

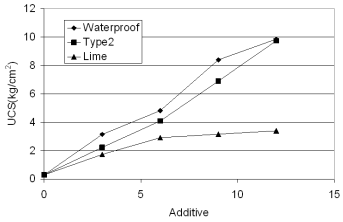
۴- نمونه‌های دوام: این مورد شامل نمونه‌هایی است که پس از ساخت تحت ۷ سیکل یخبندان وذوب قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها ابتدا به مدت ۶۰ ساعت در دمای ^{0C}۲۰، عمل‌آوری شده و به مدت ۲۴ ساعت درون آب با همین دما اشباع می‌گردند. سپس این نمونه‌ها تحت ۷ سیکل یخبندان و ذوب بین دماهای ^{0C}۲۰- و ^{0C}۲۰+ قرار گرفتند[۱۰]. زمان قرارگیری نمونه‌ها در هر کدام از این دماها ۱۲ ساعت بوده‌است. تمام نمونه‌ها به جز نمونه خاکB، در حالت تثبیت‌نشده که در آن شکست نمونه به صورت بادکردگی بود، در صفحات مورب گسیخته شدند. با توجه به شکل۲، 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 وسیمان نوع ۲ با افزایش مقدار این مواد افزایش قابل توجهی از خود نشان داده‌اند. در جدول۱، 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.



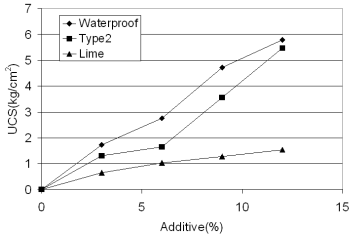
شکل (۲): تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه خاک A



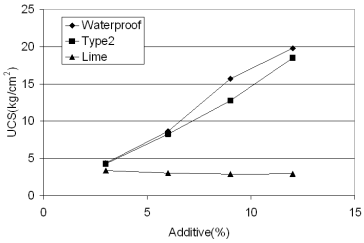
شکل (۳): تغییرات مقاومت فشاری ۱+۶ روز ه خاک A



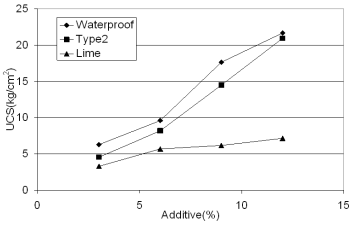
شکل (۴): تغییرات مقاومت فشاری ۷روزه خاکB



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 نوع۲ به علت اشباع شدن در آب اندکی کاهش یافته‌اند ولی مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک به ازا 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 نوع۲ بوده‌است.

www.SID.ir

Archive of SID

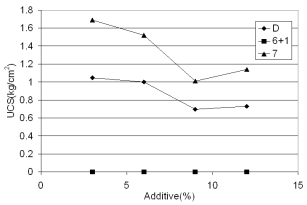
نتایج ارائه شده در شکل ۴ کم وبیش مشابه با شکل۲ می‌باشد. کندشدن روند افزایش مقاومت به‌ازا مقادیر بیش از ۶ درصد آهک به دلیل مصرف بخش عمده‌ای از مواد پوزولانی موجود در خاک می‌باشد، به طوریکه با افزایش مقدار آهک، مقدار مواد پوزولانی موجود در خاک، برای پیشرفت واکنش پوزولانی کافی نیست.

نتایج ارائه شده در شکل۵ 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].

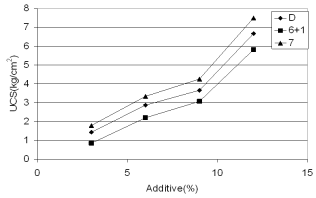
نتایج نمونه‌های ۲۸ روزه خاک A باتوجه به شکل۶ کم وبیش مشابه با نمونه‌های ۷ روزه می‌باشد. همانطورکه در مورد نمونه‌های ۷ روزه گفته شد مقدار رس موجود در این خاک بسیار کم بوده و واکنش پوزولانی در این خاک پیشرفت چندانی ندارد. در این صورت ذرات آهک همانند بخشی از ذرات خاک عمل کرده وبه دلیل کمتر بودن چگالی آهک نسبت به چگالی خاک مقدار وزن‌مخصوص توده خاک- آهک کاهش یافته و در نتیجه مقدار مقاومت این خاک با افزایش مقدار آهک کاهش می یابد[۱۱] و[۱۲].

با توجه به شکل۷، 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.

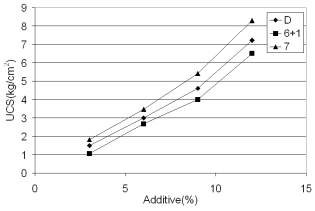
با توجه به شکل۸، روند تغییرات مقاومت فشاری برای نمونه‌های ۷ روزه و دوام با افزایش مقدار آهک در خاک A تقریباً مشابه بوده وبا افزایش مقدار تثبیت‌کننده مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل وارفتگی نمونه‌های اشباع شده مقاومت فشاری آنها صفر گزارش شده‌است. با توجه به روند تغییرات مقاومت فشاری برای نمونه‌های ۷ روزه و دوام و همچنین صفر بودن مقدار مقاومت فشاری برای نمونه‌های اشباع شده به ازا تمامی مقادیر آهک می‌توان به این نتیجه رسید که آهک ماده مناسبی برای تثبیت خاک A نمی‌باشد.



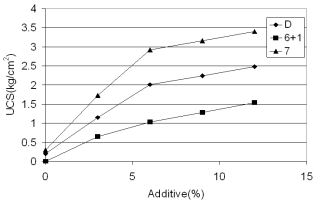
شکل (۸): نمونه‌های ۷ روزه، ۱+۶ روزه و دوام (خاک A، آهک)



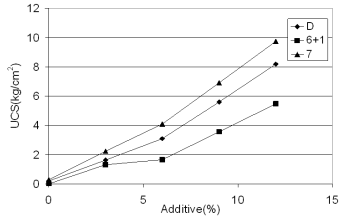
شکل (۹): نمونه‌های ۷، ۱+۶ روزه و دوام (خاک A،نوع۲)



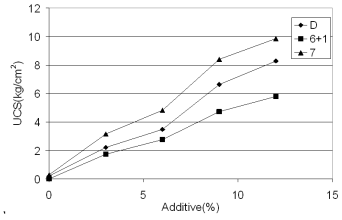
شکل (۱۰): نمونه‌های ۷ ، ۱+۶ روزه و دوام (خاک A،آب‌زدا)



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



شکل (۱۲): نمونه‌های ۷ ، ۱+۶ روزه و دوام (خاک B،نوع۲)



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

www.SID.ir

Archive of SID

روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های خاک A تثبیت‌شده با سیمان نوع۲ مطابق شکل۹ برای هر ۳ دسته از نمونه‌ها کاملا 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].

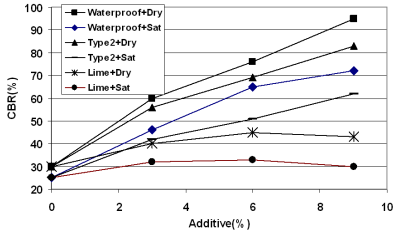
با مقایسه نتایج مربوط به سیمان آب‌زدا در شکل ۱۰ وسیمان نوع۲ در شکل۹ می‌توان به این نتیجه رسید که اثرات سیمان آب‌زدا بر افزایش دوام در برابر رطوبت و سیکل‌های یخبندان-ذوب بهتر از سیمان نوع۲ می‌باشد.

با توجه به شکل۱۱، آهک اثرات قابل قبولی بر افزایش دوام خاک B در مقابل سیکل‌های یخبندان وذوب دارد. همچنین همانند نمونه‌های قبل در این مورد نیز دیده می‌شود که مقادیرمقاومت به دست آمده از نمونه‌های یخبندان وذوب از نمونه‌های اشباع شده بالاتر می‌باشد. اثرات سیمان نوع۲ و آب‌زدا بر دوام خاک B مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، کم وبیش 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.

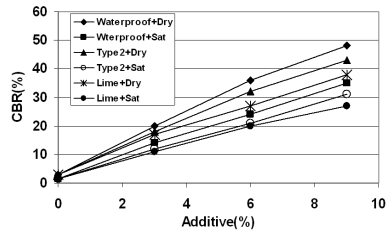
CBR -۳-٤

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 وزن‌مخصوص آهک نسبت به خاک A، وزن‌مخصوص 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 سه ماده به میزان قابل توجهی CBR خاک B را افزایش داده‌اند.

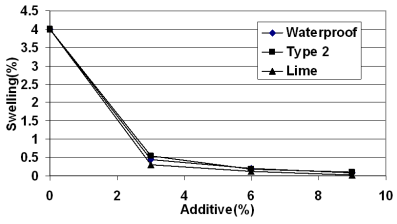
درصد تورم خاک A در حالت تثبیت‌نشده بسیار ناچیز بوده و خاک B ۴ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج شکل ۱۶، هر ۳ ماده به میزان قابل توجهی تورم خاک B را کاهش داده‌اند. تاثیر آهک در تورم خاک B بهتر از دو ماده دیگر بوده و سیمان آب‌زدا دارای تاثیر متوسط بوده‌است. در حالت کلی براساس مطالعات انجام شده در صورت واکنش‌پذیری 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 اشباع‌شدن

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: خاکB ، تثبیت‌شده با ۳ درصد سیمان نوع۲

B3L: خاک B، تثبیت‌شده با ۳ درصد آهک

www.SID.ir

Archive of SID

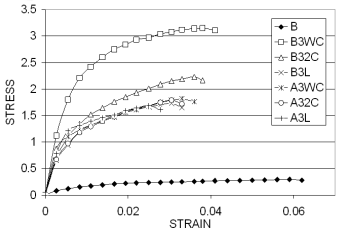
می‌باشند. به طور مشابه A، نشان‌دهنده نمونه‌های خاکA و ۹، نشان‌دهنده ۹ درصد از هر کدام از این تثبیت‌کننده ها می‌باشد.

نمودارهای شکل۱۷ نشان می‌دهند که میزان کرنش حد گسیختگی نمونه‌های تثبیت‌نشده خاکB، 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 نوع۲ و آهک می‌باشد. برای نمونه‌های خاک A، به دلیل محدودنبودن، 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.

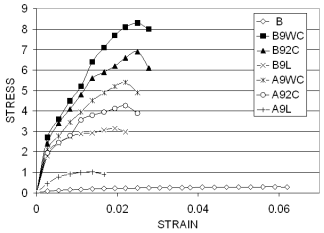
با توجه به شکل ۱۸، مقدار کرنش حد گسیختگی برای نمونه‌های تثبیت‌شده با ۹ درصد از تثبیت‌کننده ها کمتر از مقدار این پارامتر در نمونه‌های تثبیت‌شده با ۳ درصد تثبیت‌کننده بوده‌است. همچنین مقدار کرنش حد گسیختگی برای نمونه‌های خاکA، کوچکتر از نمونه‌های خاک B ، می‌باشد. با توجه به شکل ۱۹، مقدار کرنش حد گسیختگی برای نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های ۷ روزه کاهش یافته‌است. ولی مقایسه شکل‌های ۱۸و ۱۹ نشان می دهد که مقدار کرنش حد گسیختگی برای نمونه‌های ۷ روزه تثبیت‌شده با ۹ درصد از تثبیت‌کننده ها، 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 تثبیت کننده، کمتر است. با توجه به نتایج به دست آمده، موارد دیگری به دست می‌آید که عبارتند از:

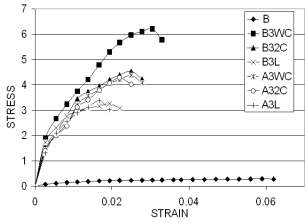
- با افزایش زمان عمل‌آوری و مقدار تثبیت‌کننده رفتار خاک شکننده‌تر خواهد بود.
- اثر زمان عمل‌آوری بر میزان تغییرشکل نمونه‌ها در لحظه گسیختگی، کمتر از اثرات میزان تثبیت‌کننده می‌باشد.
- نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان آب‌زدا، رفتار انعطاف پذیرتر و نمونه های تثبیت شده با آهک، رفتار شکننده‌تری نسبت به سایر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



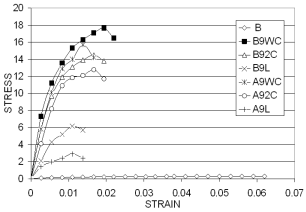
شکل (۱۷): نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های۷ روزه



شکل (۱۸): نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های۷ 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 نوع۲ 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 نوع۲ افزودنی مناسب‌تری برای تثبیت این دو نوع خاک می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

۲- اثرات سیمان آب‌زدا بر خصوصیات خمیری خاک رس در مقایسه با آهک ضعیف‌تر بوده اما قابل مقایسه با سیمان نوع۲ می‌باشد.

۳- براساس نتایج به دست آمده سیمان آب‌زدا را می‌توان به عنوان یک ماده تثبیت‌کننده در پروژه‌های راهسازی استفاده نمود.

۴- 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 بازیافت‌سرد آسفالت به عنوان تثبیت‌کننده مورد مطالعه قرار گیرد.

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 mixrutes", 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 Geoenviromental 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.

www.SID.ir