مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
تابستان ۱۳۹۸، جلد دوازدهم، شماره ۲، صفحه ۱۷ تا ۲۵

بررسی اثر باکتری اسپورسارسینا پاستوری بر رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) و مقاومت فشاری تک محوره ماسه‌های کربناته

احمدرضا قربانی[۱]، مسعود رابطی‌مقدم*[۲]، منصور پرویزی[۳] و رضا نقی‌ها[٤]

دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۲۵ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۳/۲۹

چکیده

گسترش روزافزون زیرساخت‌های مهندسی جهت تامین نیازهای بشر در ارتباط مستقیم با نیاز به خاک مقاوم جهت اجرای ساخت و سازها است. از طرفی اهمیت مسائل زیست محیطی باعث شده تا همواره تقاضا برای روش‌های جدید و سازگار با محیط زیست برای بهسازی و تقویت خاک افزایش یابد. روش رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم (MICP) به عنوان یکی از روش‌های سازگار با محیط زیست مورد توجه محققین می‌باشد. این پژوهش با هدف مطالعه‌ی آزمایشگاهی تاثیر MICP بر مقاومت فشاری تک محوره‌ی (UCS) ماسه‌های کربناته انجام شده است. از این رو نمونه‌هایی از خاک ماسه‌ای کربناته بوشهر ساخته شد و پس از تزریق باکتری و محلول سیمانی عمل‌آوری گردید. سپس بر روی آن‌ها آزمایش تک محوره جهت ارزیابی مقاومت فشاری انجام گرفت. همچنین تاثیر پارامترهای غلظت محلول سیمانی و زمان عمل آوری بر نتایج روش MICP بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که حداکثر مقاومت فشاری تک محوره‌ی ماسه تثبیت شده با MICP در حدود ۳/۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع می‌باشد که نشانگر عملکرد مناسب روش MICP در بهسازی ماسه کربناته است. میزان مقاومت فشاری تک محوره به غلظت محلول سیمانی بستگی دارد. نمونه‌های تثبیت شده با غلظت محلول سیمانی بالاتر نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با غلظت محلول سیمانی کمتر مقاومت فشاری تک محوره‌ی بیشتری داشتند. زمان عمل‌آوری بیش از ١٤ روز، تاثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت تک محوره نداشت.

کلید واژه‌ها: *MICP، باکتری، کریستال کربنات‌کلسیم، بیوسمنتاسیون، آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت*

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
۲- استادیار، دکتری ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
۳- استادیار، دکتری ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
٤- استادیار، دکتری میکروبیولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
*مسئول مکاتبات: rabeti@yu.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

گسترش مناسب زیرساخت‌های شهری برای تامین نیاز رو به رشد جامعه لازم بوده و این مسأله به طور مستقیم با دسترسی به خاک مناسب که بتوان بر روی آن ساخت و ساز نمود مرتبط است، همزمان شرایط زیست محیطی نیز برای زندگی در مناطق شهری در حال تنزل بوده و این مسایل باعث شده تا همواره تقاضا برای روش‌های جدید و سازگار با محیط زیست برای بهسازی و تقویت خاک درحال افزایش باشد. یکی از این روش‌ها استفاده از باکتری‌های موجود در خاک جهت ایجاد اتصالات و چسبندگی بین دانه‌های خاک می‌باشد.

تخمین زده می‌شود این باکتری‌ها و موجودات که به تازگی برای بهبود ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند حدود ۳/۵ میلیارد سال قدمت داشته و در بیشتر این دوران انجام این فرآیند را دنبال می‌کرده‌اند (Noffke et al., 2013). طبق بررسی‌های صورت گرفته، در هر گرم خاک در عمق یک متر بیش از 10^9 سلول باکتری وجود دارد که با افزایش عمق شمار آنها کاهش می‌یابد. به طور متوسط در عمق ۳۰ متر (پایین ترین محدوده اکثر فعالیت‌های بهسازی مهندسی خاک) شمار باکتری‌ها 10^6 سلول در هر گرم می‌باشد که تعداد زیادی از آن‌ها می‌توانند در بهسازی خاک شرکت کنند (Dejong et al., 2010).

به روشی که در آن از این باکتری‌ها جهت رسوب زایی استفاده می‌گردد روش رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم (Microbial Induced Carbonate Precipitation) گفته می‌شود که به اختصار به آن روش MICP می‌گویند (Harkes et al., 2010). رابطه‌ی ۱ روند کلی هیدرولیز اوره و تشکیل کربنات‌کلسیم در پروسه MICP را نشان می‌دهد.

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O + Ca^{2+} \rightarrow 2NH_4^+ + CaCO_3 \qquad (۱)$$

روش بیوسمنتاسیون (تزریق مواد بیولوژیک) به عنوان یک روش جدید، کم هزینه و دوست‌دار طبیعت در بهسازی خاک در حال گسترش است. نتیجه این فرآیند، ایجاد رسوبات کربنات کلسیم می‌باشد که به شکل پل‌هایی، ذرات خاک را به یکدیگر متصل کرده و خاک ماسه‌ای سست را به ماسه سنگ تبدیل می‌کنند. مدت زمان انجام این عملیات در حدود ۱۰ روز و مقاومت ایجاد شده در حدود ۰/۲ الی ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد (Ivanov et al., 2008).

ویفین و همکاران (Whiffin et al., 2007) به منظور بررسیMICP به عنوان یک فرآیند تثبیت خاک، یک ستون ماسه ۵ متری با باکتری تحت شرایطی که برای کار در زمین بودند، تحت آزمایش قرار داد. میکروارگانیسم مورد استفاده در این مطالعه، اسپورسارسینا پاستوری (Sporosarcina Pasteurii) بود. بعد از تثبیت خاک با MICP، ستون خاک تحت آزمایش‌های تک محوره قرار گرفت که نتایج آزمایش‌ها بهبود قابل توجهی در مقاومت و سختی نمونه تثبیت شده را نشان داد.

القبانی و سوگا (Al Qabany and Soga., 2013) آزمایش‌های تک‌محوره بر روی نمونه‌های ماسه‌ی تیمار شده با استفاده از MICP با غلظت ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ مولار محلول اوره- کلرید کلسیم انجام دادند. نتایج حاصله نشان داد که اگرچه مقاومت تمام نمونه‌ها بعد از تیمار افزایش یافت اما مقدار این افزایش‌ها به غلظت محلول سمنتاسیون مورد استفاده در تیمار بستگی داشت و غلظت شیمیایی پایین‌تر محلول منجر به نمونه‌های مقاوم‌تر شد.

سون و همکاران (Soon et al., 2013) به بررسی اثر MICP بر بهبود مقاومت برشی پرداختند. در این مطالعه، گونه‌ای از گروه باکتری باسیلوس به نام B-megaterium برای هدایت رسوب کلسیت استفاده شد. مقاومت برشی نمونه‌های خاک به وسیله‌ی انجام آزمایش فشاری محصور نشده بر روی نمونه اشباع با قطر ۵۰ میلیمتر انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که MICP می‌تواند به طور چشمگیری باعث بهبود مقاومت برشی شود. هرچند که این بهبودها با توجه به دانسیته‌ی خاک و شرایط درمان متفاوت است.

چنگ و همکاران (Cheng et al., 2013) به بررسی روش MICP برای خاک ماسه‌ای سیمانی‌شده برای محیط‌های

www.SID.ir

Archive of SID

دریایی در مقابل روش MICP رایج در مطالعات مختلف پرداختند. روش پیشنهادی در این مطالعه متکی بر یونهای کلسیم محلول در آب دریا به عنوان تنها منبع کلسیم برای تشکیل کلسیت است. خاک مورد استفاده در این مطالعه، ماسه سیلیکاته خالص بوده و آزمایش نفوذپذیری، تک محوره و آنالیز میکروسکوپی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد که روش MICP که در مناطق دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد منجر به پایداری فیزیکی ماسه می‌شود و مقاومت محصور نشده تا kPa ۳۰۰ می‌رسد. این میزان افزایش مقاومت در حدود دو برابر بیشتر نسبت به تیمار MICP است که در آن محلول اوره و کلسیم با غلظت بالا استفاده می‌شود.

چیت و همکاران (Chiet et al., 2016) جهت بررسی امکان استفاده از باکتری Bacillus Subtilis و غلظت بهینه واکنش دهنده سیمانی مورد استفاده در MICP در خاک‌های پسماند گرمسیری، عملکرد MICP را با اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک و میزان کلسیت مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که غلظت واکنش دهنده‌ی سیمانی به‌طور قابل توجهی بر عملکرد تیمار MICP تاثیر می‌گذارد. نتایج نشان داده است که مناسب‌ترین غلظت واکنش دهنده‌ی سیمانی برای MICP، ۰/۲۵ مول و در حضور Bacillus Subtilis است. با استفاده از این پارامترهای تیمار، مقدار UCS و مقدار کلسیت خاک تحت درمان به ترتیب ۳۸ % و ٦٥/٥ % افزایش یافته است.

فنگ و همکاران (Phang et al., 2018) به بررسی روش MICP در بهبود باربری خاک‌های آلی گرمسیری است. تیمار MICP با استفاده از روش پیش‌اختلاط به جای روش تزریق و نفوذ سطحی انجام شد. مقاومت برشی نمونه‌های تیمار شده و نشده از طریق آزمایش مقاومت فشاری تک محوره مورد بررسی قرارگرفت. نتایج آزمایش‌ها بیش از ۳۰۰ درصد افزایش در مقاومت برشی را نشان می‌دهد.

کیخا و همکاران (Keykha et al., 2018) تاثیر پارامترهای اثرگذار بر MICP مانند غلظت باکتری، غلظت اوره و کلریدکلسیم را بر میزان رسوب کربنات کلسیم برای دو نوع باکتری اسپورسارسینا پاستوری و اسپورسارسینا اکومارینا مورد مطالعه قرار دادند. چنین نتیجه گرفتند که برای باکتری اسپورسارسینا پاستوری، موثرترین شرایط آزمایشگاهی، غلظت باکتری cell/ml 109*12.8، غلظت ۱ مولار اوره و غلظت ۲ مولار کلریدکلسیم است. هم‌چنین این شرایط برای باکتری اکومارینا با غلظت باکتری cell/ml 109*9، غلظت ۰/۲۵ مولار اوره و غلظت ۲ مولار کلریدکلسیم حاصل شد.

ماهاویش و همکاران (Mahawish et al., 2019) از روش MICP به منظور افزایش مقاومت فشاری ستون‌های سنگی استفاده کردند. به کمک این روش مقاومت فشاری نمونه‌های ستون سنگی تثبیت شده تا ۲/۳ مگاپاسکال افزایش یافت.

قاسمی و همکاران (Ghasemi et al., 2019) یک مجموعه آزمایش به منظور ارزیابی اثر محلول‌های MICP با نسبت‌های مختلف اوره و کلریدکلیسم بر روی مقاومت فشاری تک محوره را بر روی دو نوع خاک انجام دادند. چنین نتیجه گرفتند غلظت محلول سیمانی اثر قابل توجهی بر مقاومت فشاری تک محوره خاک دارد؛ به طوری که غلظت بالاتر محلول سیمانی منجر به مقاومت بالاتر در نمونه‌ها می‌شود.

روشن بخت و همکاران (۱۳۹٤) به بررسی فاکتورهایی شامل نوع باکتری، غلظت محلول سیمانی، دما و تراکم سلول باکتری پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تزریق مرحله‌ای باعث بهتر سیمانی شدن نمونه می‌شود. هم چنین به کمک MICP نفوذپذیری کاهش و مقاومت افزایش می‌یابد.

در مطالعات انجام شده در زمینه تثبیت خاک با MICP، اغلب خاک‌های به کار رفته در آزمایش‌ها از نوع ماسه سیلیکاته بوده است. با توجه به اهمیت ویژه مناطق ساحلی جنوب کشور، که اغلب ماسه‌های سواحل از نوع کربناته هستند، لذا در پژوهش حاضر فرآیند MICP بر افزایش مقاومت فشاری تک محوره ماسه‌های کربناته مطالعه شده است. از طرفی وجود مقدار قابل توجهی یون Ca^{2+} در آب دریا که در پروسه MICP برای رسوب کربنات کلسیم نیاز است، اهمیت استفاده از روش MICP در بهسازی این خاک‌ها را روشن می‌سازد. از این رو در مطالعه حاضر از آب دریا در فرآیند MICP استفاده

www.SID.ir

Archive of SID

شده است. همچنین استفاده از روش MICP که سازگار با محیط زیست است، می‌تواند مشکلات زیست محیطی برخی از روش‌های بهسازی بر اکوسیستم دریایی را تا حد زیادی برطرف نماید.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. میکروارگانیسم مورد استفاده

باکتری‌ها میکروارگانیسم‌های بسیار ریز با سلول‌های اختصاصی هستند که تمام مواد ضروری آنها در داخل کیسه متصل گنجانده شده است. باکتری‌ها برای زنده ماندن و رشد باید مواد مغذی خود را مستقیما از محیط بگیرند. از آن جایی که باکتری‌ها فاقد دهان می‌باشند، بنابراین مواد مغذی آنها باید به صورت محلول و به اندازه‌های ریز باشد که بتوانند از میان غشاء کیسه مانندی که اطراف سلول زنده وجود دارد، عبور کند. ترکیبات هسته در باکتری‌ها، در داخل مایع سلولی غوطه‌ور هستند، بنابراین ساختن ترکیبات هسته‌ای بیشتر و هم‌چنین تشکیل یک سلول دیگر برای آن‌ها آسان است. باکتری‌ها با فرآیندی که تقسیم دوتایی نام دارد تکثیر می‌یابند. تنوع متابولیکی گسترده و اندازه کوچک باکتری‌ها، آنها را قادر به رشد در خاک‌هایی می‌سازد که حاوی مقادیر قابل توجهی مواد غذایی هستند. برای مطالعه باکتری‌ها باید آن‌ها را بر روی محیط‌های مناسب در شرایط فیزیکی مناسب کشت داد. باکتری مورد استفاده در پروسه MICP این پژوهش، باکتری اسپوروسارسینا پاستوری آی بوده که در مرکز کلکسیون قارچ و باکتری ایران (PTCC No.: 1645) موجود است.

ابتدا باکتری اسپوروسارسینا پاستوری آی در شرایط هوازی، در یک محیط کشت اختصاصی (حاوی ۲۰ گرم بر لیتر عصاره مخمر، ۱۰ گرم بر لیتر NH_4Cl و در pH=9) تکثیر می‌یابد. سپس با روش کدورت سنجی، 10^6 cfu/ml از باکتری تهیه می‌شود. بدین منظور باکتری ابتدا در محیط جامد نوترینت آگار به همراه اوره‌ی ۲۰ درصد، کشت داده شده و در دستگاه انکوباتور قرار گرفت. پس از سه روز باکتری از محیط جامد به محیط مایع مولر هینتون براث به همراه اوره ۲۰ درصد، انتقال یافت. پس از گذشت مدت زمان ۳ روز که باکتری در محیط مایع به مقدار کافی رشد کرد، محیط مایع در فالکون‌های ۵۰ سی‌سی ریخته و سانتریفیوژ شد. پس از سانتریفیوژ، باکتری به صورت رسوب در کف فالکون‌ها نمایان شد. سپس محیط کشت مایع داخل فالکون‌ها را بیرون ریخته و مقداری از آب دریا درون فالکون‌ها ریخته شد. جدول ۱ مواد استفاده شده جهت تهیه‌ی آب دریا را بر اساس مطالعه (Cheng et al., 2014) نشان می‌دهد. باکتری را با دستگاه ورتکس کاملا در آب دریا حل کرده و فالکون‌های حاوی آب دریا و باکتری را در ارلن‌های حاوی آب دریا ریخته تا محلول همگنی از ترکیب باکتری و آب دریا به دست آید. شکل ۱ تصاویری از ساخت سوسپانسیون آب باکتری را در آزمایشگاه نشان می‌دهد.

جدول ۱. مواد مورد نیاز برای ساخت آب دریا

Material name	Amount of material (gr/lit)
NaCl	23.9
Na2SO4	4
CaCl2 . 2H2O	1.5
MgCl2. 6H2O	10.8
KCl	0.7
NaHCO3	0.2
KBr	0.1
H3BO3	0.03

شکل ۱. ساخت محلول آب باکتری

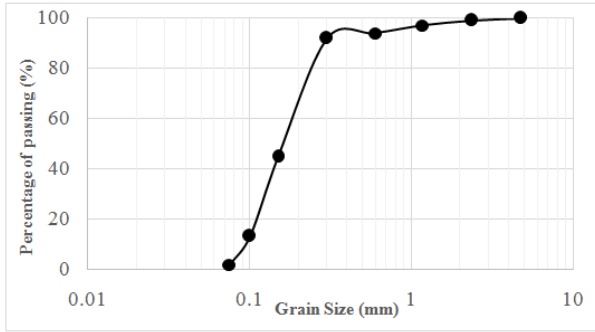
www.SID.ir

Archive of SID

۲-۲. *خاک مورد استفاده*

در این پژوهش از ماسه کربناته از ساحل بندر بوشهر استفاده شده است. شکل ۲ نمونه‌ای از این خاک را نشان می‌دهد. پس از انجام آزمایش تعیین مقدار کربنات‌کلسیم و مورد تایید قرار گرفتن کربناته بودن آن، خاک به مقدار مورد نیاز سفارش داده شد. کربنات‌کلسیم خاک برابر ٦٠/١٨ درصد به دست آمد. بر اساس انجام آزمایش دانه‌بندی، نوع خاک در سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (USCS) ماسه‌ی یکنواخت بد دانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. نمودار دانه‌بندی خاک در شکل ۳ نشان داده شده است. در جدول ۲ مقادیر ضریب انحنا (C_c) و ضریب یکنواختی (C_u) مشخص شده است. آزمایش تراکم بر روی نمونه‌ی خاک به روش اشتو استاندارد انجام شد و چگالی خشک بیشینه‌ی خاک ١/٤٤ گرم بر سانتیمتر مکعب در درصد رطوبت بهینه ۱۹ درصد به دست آمد.

شکل۲. نمونه‌ای از ماسه کربناته



شکل۳. نمودار دانه بندی خاک مورد آزمایش (ماسه‌ی بوشهر)

جدول ۲.مقادیر محاسبه شده‌ی ضریب یکنواختی و ضریب انحنای ماسه بوشهر

D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_c
0.09	0.12	0.18	2	0.89

۲-۳. *محلول‌های مورد استفاده*

محلول سیمانی شامل اوره و کلریدکلسیم است. محلول سیمانی در دو غلظت متفاوت که ترکیب آن‌ها در جدول ۳ آمده است، تهیه شده است. نسبت اوره و کلرید کلسیم در مطالعه حاضر به صورت بهینه بر اساس مطالعه (Okwadha and Lee., 2010) در نظر گرفته شده است.

جدول۳. ترکیبات محلول سیمانی مورد استفاده (اوره + کلریدکلسیم)

Cementation Solution Combination	No
0.25 M $CaCl_2$ + 0.666 M urea	1
1.0 M $CaCl_2$ + 2.66 M urea	2

۲-٤. *آماده سازی، تزریق و عمل آوری نمونه‌ها*

نمونه‌های خاک در حالت سست با تراکم نسبی ۳۰ درصد ساخته شد. جهت ساخت نمونه‌های خاک سست، وزن مشخصی از خاک به وسیله‌ی قیف از ارتفاع مشخص داخل لوله‌ی پلیکا ریخته شد.

سیستم تزریق به وسیله سرم و سوزن به عنوان روش تزریق در این پژوهش انتخاب شد که دارای سرعت عمل مطلوب و دقت مناسب می‌باشد (شکل ٤). آب باکتری و محلول سیمانی در طی سه مرحله به نمونه‌های خاک تزریق شد. تزریق باکتری و محلول سیمانی به درون خاک در دو فاز از نظر زمان صورت گرفت. فاز اول به منظور چسباندن باکتری‌ها به ذرات خاک و فاز دوم به منظور انجام پروسه MICP با تزریق محلول سیمانی و رسوب کربنات کلسیم صورت می‌گیرد. پس از ساخت نمونه خاک، ابتدا با نرخ مشخصی (1 Lit/hr) محلول حاوی باکتری به خاک تزریق شد. به مدت ٢٤ ساعت نمونه‌ها با باکتری در همان وضعیت نگه‌داری شدند. سپس

www.SID.ir

Archive of SID

محلول سیمانی مرحله اول به نمونه تزریق شده و ۲٤ ساعت بعد محلول سیمانی مرحله دوم به نمونه تزریق شد و اجازه داده شد تا طی زمان‌های ١٤ و ٢٨ روزه، پروسه MICP تکمیل شود. نمونه ها در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار گرفته و پس از ١٤ و ٢٨ روز آزمایش مقاومت فشاری تک محوره بر روی آن‌ها انجام گرفت.

برنامه‌ی آزمایش تیمار نمونه‌ها با MICP در جدول ٤ آمده است. برای بالا بردن دقت و رسیدن به نتیجه‌ی دقیق‌تر هر نمونه با ۳ تکرار ساخته شده است.

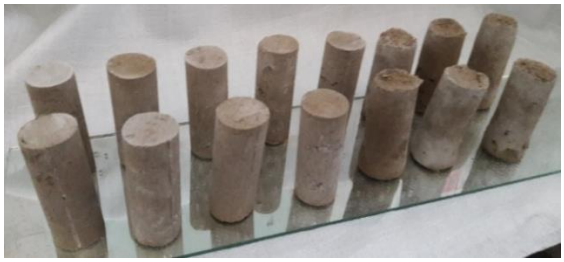
شکل ٤. تصاویری از سیستم تزریق سرم و سوزن

جدول٤. برنامه‌ی آزمایش‌ها

Number of Samples with 3 repetition	States	Number of States	Variable
12	0.25 & 1 mol	2	Concentration of the cementation
	14 & 28 days	2	Curing time
	-	3	Repetitions

۲-۵. انجام آزمایش تک محوره بر روی نمونه‌های تثبیت شده

پس از ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها، نمونه‌های سالم جهت تعیین میزان مقاومت فشاری تک محوره، تحت آزمایش مقاومت تک محوره قرار گرفت. شکل ۵ نمونه‌های تثبیت شده با روش MICP را نشان می‌دهد. شکل ٦ تصاویری از انجام آزمایش تک محوره روی نمونه‌های تثبیت شده را نشان می دهد. لازم به ذکر است برخی از نمونه‌ها در حین خارج کردن از قالب، خرد شده و قابلیت انجام آزمایش تک محوره را نداشتند.



شکل ۵. نمونه‌های تثبیت شده با روش MICP

شکل ٦. تصاویری از انجام آزمایش تک محوره روی نمونه‌های تثبیت شده

۳. نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌های تک محوره برای دو دوره عمل آوری ١٤ روزه و ٢٨ روزه به ترتیب در جداول ۵ و ٦ آمده است. در این جداول مقاومت تک محوره هر نمونه به همراه مقادیر میانگین تکرارها برای دو غلظت محلول سیمانی ۰/۲۵ و ۱ مولار ارائه شده است. لازم به ذکر است برای هر نمونه سه تکرار لحاظ شده که به دلیل خرابی برخی نمونه‌ها، برخی از تکرارها فاقد داده است.

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های تک محوره برای دوره عمل آوری ١٤ روزه

Avg. UCS (kg/cm^2)	UCS (kg/cm^2)	Repetitions No.	Concentration of the cementation	Curing time
2.4	2.51	1	0.25 mol	14 days
	2.29	2		
	-	3		
2.69	2.73	1	1.0 mol	
	2.66	2		
	-	3		

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٦. نتایج آزمایش‌های تک محوره برای دوره عمل آوری ۲۸ روزه

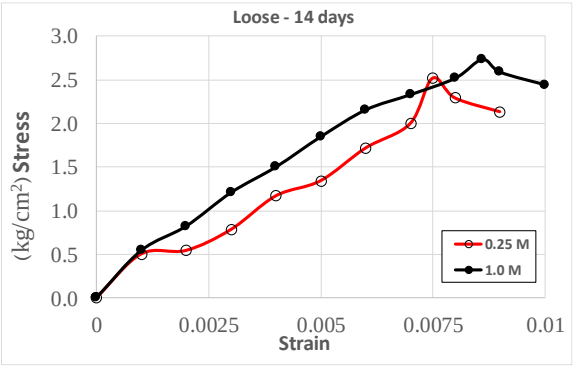
Avg. UCS (kg/cm²)	UCS (kg/cm²)	Repetitions No.	Concentration of the cementation	Curing time
2.48	2.3	1	0.25 mol	28 days
	2.66	2		
	2.51	3		
3.03	3.21	1	1.0 mol	
	2.85	2		
	-	3		

با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که مقاومت تک محوره در نمونه‌ها بین ۲/٤ الی ۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد که نشانگر عملکرد مناسب پروسه‌ی MICP در بهسازی ماسه کربناته است. در پژوهش حاضر مقاومت فشاری تک محوره از مقدار صفر برای نمونه‌های خرد شده تا حداکثر ۳۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه عمل آوری شده در ۲۸ روز با غلظت محلول سیمانی ۱ مولار به دست آمده است. بر اساس نتایج حاصله برای مقاومت فشاری تک محوره با تثبیت به روش MICP مشاهده می‌شود که نمونه خاک حالت سیمانی گرفته و مقاومت فشاری قابل قبولی به دست آمده است.

۳-۱. *بررسی تاثیر غلظت محلول سیمانی بر مقاومت تک محوره*

الف) نمونه‌های ١٤ روزه

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، در این حالت میزان مقاومت تک محوره در نمونه‌های با غلظت محلول سیمانی ۱ مولار بیشتر از نمونه‌های با غلظت محلول سیمانی ۰/۲۵ مولار است. شکل۷ نمودار مقایسه تنش-کرنش دو نمونه را نشان می‌دهد. با توجه به بررسی حالت‌های مختلف در نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که میزان مقاومت فشاری تک محوره با غلظت محلول سیمانی ۱ مولار بیشتر از نمونه‌های تثبیت شده با غلظت محلول سیمانی ۰/۲۵ مولار می‌باشد.



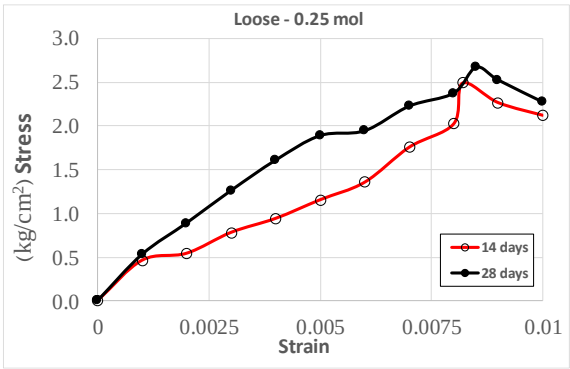
شکل ۸. نمودار مقایسه میزان تنش در نمونه‌های ١٤ روزه

۳-۲. *بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک محوره*

دو بازه زمانی ١٤ و ۲۸ روزه جهت عمل‌آوری نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. اثر زمان عمل آوری برای نمونه‌های با غلظت محلول سیمانی یکسان با یکدیگر مقایسه شده است.

الف) نمونه‌های با غلظت محلول سیمانی ۰/۲۵ مولار

از مقایسه‌ی مقادیر میانگین مقاومت تک محوره برای دو زمان عمل‌آوری ١٤ و ۲۸ روزه با غلظت محلول سیمانی ۰/۲۵ مولار در جدول ٤-۱۰ مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری تک محوره میانگین نمونه با افزایش زمان عمل‌آوری تغییر چندانی نداشته است. مقاومت نمونه ۲۸ روزه اندکی فراتر از مقاومت نمونه ١٤ روزه است. شکل ۵ نمودار مقایسه تنش-کرنش دو نمونه را نشان می‌دهد. افزایش اندکی در سختی نمونه با گذر زمان نیز از مقایسه شیب نمودارها قابل مشاهده است.



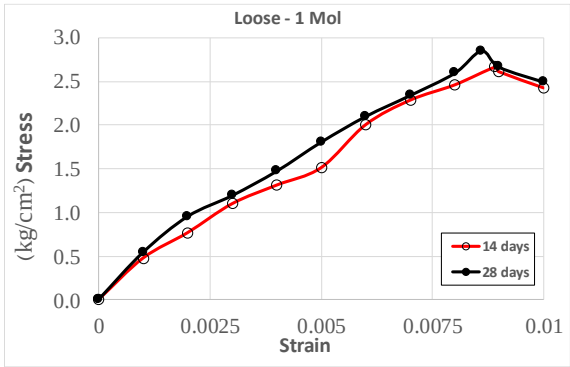
شکل ۹. نمودار مقایسه میزان تنش در نمونه‌های سست ۰/۲۵ مولار

www.SID.ir

Archive of SID

ب) نمونه‌های با غلظت محلول سیمانی ۱ مولار

از مقایسه‌ی مقادیر میانگین مقاومت تک محوره برای دو زمان عمل‌آوری ۱٤ و ۲۸ روزه نمونه‌های با غلظت محلول سیمانی ۱ مولار در جدول ۵ مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری تک محوره میانگین نمونه با افزایش زمان عمل‌آوری در حدود ۰/۳ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع افزایش داشته است. شکل ٦ نمودار مقایسه تنش-کرنش دو نمونه را نشان می‌دهد. برای یک تکرار از نمونه ۱ مولار اختلاف مقاومت ۱٤ روزه و ۲۸ روزه برابر ۰/٦ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.



شکل ۱۰. نمودار مقایسه میزان تنش در نمونه‌های سست ۱ مولار

با توجه به بررسی حالت‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت بصورت کلی با افزایش زمان عمل‌آوری، میزان مقاومت فشاری تک محوره رو به افزایش است ولی این تغییرات مقاومت از ۱٤ روز به ۲۸ روز چشمگیر نمی‌باشد.

٤. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با توجه به اهمیت ویژه مناطق ساحلی جنوب کشور و از آنجا که اغلب ماسه‌های سواحل از نوع کربناته هستند، فرآیند MICP بر افزایش مقاومت تک محوره ماسه‌های کربناته مطالعه شد. به منظور درنظر گرفتن آب دریا در فرآیند MICP، آب دریا شبیه‌سازی گردید. نمونه‌هایی از خاک ماسه‌ی کربناته بوشهر با روش MICP ساخته و عمل‌آوری شد و سپس تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوره قرار گرفت که نتایج زیر حاصل گردید:

نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوره نشانگر عملکرد مناسب روش MICP در بهسازی ماسه کربناته است. حداکثر مقاومت فشاری تک محوره ماسه تثبیت شده با MICP در حدود ۳/۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع به دست آمد که مقاومت مناسبی را برای خاک ماسه‌ای در ساخت و سازهای متعارف ایجاد کرده است. لازم به ذکر است که برخی از نمونه‌های تثبیت شده با MICP بطور کامل و یکنواخت در طول نمونه تثبیت نشده بودند و نمونه در حین بیرون آوردن از قالب نمونه خرد شد.

اثر غلظت محلول سیمانی و زمان عمل آوری نمونه‌ها بر مقاومت فشاری تک محوره نمونه‌ها نیز مطالعه گردید. چنین نتیجه شد که غلظت بالاتر محلول سیمانی در نمونه‌ها باعث افزایش بیشتر مقاومت فشاری تک محوره در نمونه‌ها می‌گردد. هم چنین از بررسی تاثیر زمان عمل آوری چنین نتیجه شد که فعالیت باکتریایی و افزایش مقاومت فشاری تک محوره در نمونه‌ها از ۱٤ روز به بعد کاهش یافته و تا روز ۲۸ تغییرات بسیار کمی دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

منابع

روشن بخت، ک.، خامه چیان، م.، ساجدی، ر.، نیکودل، م.، ۱۳۹٤. بهسازی خاک‌های ماسه‌ای با رسوب زیستی کربنات کلسیم و فاکتورهای موثر بر آن: مجله علمی- پژوهشی انجمن زمین شناسی ایران، جلد هشتم، شماره ۱ و ۲.

Al Qabany, A., and Soga, K., 2013. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils: Géotechnique, 63(4): 331–339.

Cheng, L., Cord-Ruwisch, R., and Shahin, M. A., 2013. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation: Can. Geotech. J., 50(1): 81–90 .

Cheng, L., Shahin, M. A., and Cord-Ruwisch, R., 2014. Bio-cementation of sandy soil using microbially induced carbonate precipitation for marine environments: Géotechnique, 64(12): 1010–1013.

Chiet, K. T. P., Kassim, K. A., Chen, K. B., Martula, U., Yah, C. S., Arefnia, A., 2016. Effect of reagents concentration on biocementation of tropical residual soil: Materials Science and Engineering, 136.

DeJong, J. T., Soga, K., Banwart, S. A., Whalley, W. R., Ginn, T. R., Nelson, D. C., Mortensen, B. M., Martinez, B. C. and Barkouki, T., 2011. Soil engineering in vivo: Harnessing natural biogeochemical systems for sustainable, multi-functional engineering solutions: J Royal Soc Inter, 8(54): 1-15.

Ghasemi, P., Zamani, A., and Montoya, B., 2019. The effect of chemical concentration on the strength and erodibility of micp treated sands: Eighth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Geo-Congress 2019.

Harkes, M. P., van Paassen, L. A., Booster, J. L., Whiffi, V. S., and van Loosdrecht, M. C. M., 2010. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement: Ecol. Eng., 36 (2): 112–117.

Ivanov, V., and Chu, J., 2008. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ: Rev. Environ.Sci. Biotechnol, 7: 139–153.

Keykha, H. A., Asadi, A., Huat, B. K., and Kawasaki, S., 2018. Microbial induced calcite precipitation by Sporosarcina pasteurii and Sporosarcina aquimarina: Environmental geotechnics.

Mahawish, A., Bouazza, A., and Gates, W. P., 2019. Strengthening crushed coarse aggregates using bio-grouting. Geomechanics and Geoengineering, 14 (1): 59-70.

Noffke, N., Christian, D., Wacey, D., and Hazen, R. M., 2013. Microbially induced sedimentary structures recording a complex microbial ecosystem in the 3.5 Ga Dresser Formation, Pilbara, Western Australia: Astrobiology, 13 (12): 1-22.

Okwadha, G. D. and Li, J., 2010. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation: Chemosphere, 81(9): 1143–1148.

Phang, I. R. K., Wong, K. S., Chan, Y. S., and Lau, S. Y., 2018. Effect of microbial-induced calcite precipitation towards tropical organic soil: AIP Conference Proceedings.

Soon, N. W., Lee, L. M., Khun, T. C., and Ling, H. S., 2013. Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation: KSCE Journal of Civil Engineering, 17 (4): 718–728.

Whiffin, V. S., Van Paassen, L. A., and Harkes, M. P., 2007. Microbialcarbonate precipitation as a soil improvement technique: Geomicrobiol. J., 24 (5): 417–423.

www.SID.ir