

رفتار کائولین با ساختار تخلخل دو گانه در فروریزی و خزش

علیرضا باقریه^{۱*}، رضا فرپور^۲، علی فارسجانی^۳

۱. استادیار دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر

۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

۳. دانشجوی دکتری، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، گرایش ژئوتکنیک، اردبیل

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۲/۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۹/۳]

bagheri@malayeru.ac.ir

چکیده - با وجود آنکه مطالعات و پژوهش‌های مختلفی در زمینه پارامترهای تحکیم ثانویه و به ویژه ضریب تحکیم ثانویه در خاک‌های ریزدانه انجام پذیرفته است، در نتایج به دست آمده به وسیله‌ی پژوهشگران در چگونگی تغییرات آن در برابر تنش اتفاق نظر وجود ندارد. این پژوهش به طور خاص به بحث در مورد چگونگی این تغییرات، در خاکه‌ای دارای تخلخل دوگانه، تحت اعمال تنش پرداخته است. در خاک‌هایی که دارای تخلخل دوگانه است و تحت اثر تنش قرار می‌گیرند، پرداخته است. برای انجام این پژوهش از خاک کائولینیت استفاده شده است، که با استفاده از یک روش ویژه نمونه‌هایی دارای ساختار تخلخل دوگانه ساخته شده است. برای اطمینان از روش ساخت نمونه و وجود تخلخل دوگانه در آنها، آزمایش تخلخل سنجی به روش تزریق جیوه نیز انجام گرفت که وجود تخلخل دو گانه در نمونه‌ها را تأیید نمود. نمونه‌ها در دستگاه تحکیم قرار داده شده و بارگذاری انجام گرفت. اشباع به دو شکل انجام پذیرفت؛ در دسته اول ابتدا نمونه اشباع و سپس بارگذاری انجام شد و در دسته دوم نمونه بارگذاری و سپس تحت بار ثابت اشباع شد، نتایج به دست آمده حاکی از عدم تأثیر ترتیب اشباع بر میزان تخلخل نمونه‌ها پس از رهمندگی است. به منظور اندازه‌گیری تغییر شکل‌های ثانویه خاک، نمونه‌ها به مدت زیادی تحت بار ثابت قرار داده شدند و افزایش نشست در برابر زمان پس از تکمیل روند تحکیم اولیه اندازه‌گیری شد. داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ضریب تحکیم ثانویه در بازه تنش ۱۰۰ کیلو پاسکال تا حدود ۳۰۰ کیلو پاسکال با سیر صعودی به ماکزیمم خود رسیده و پس از آن روند نزولی را طی می‌کند که با روند نتایج پژوهشگران گذشته هماهنگی دارد. با توجه به این که خاک استفاده شده به وسیله‌ی پژوهشگران گذشته دارای تخلخل ساده بوده است، عدم تأثیر ساختار تخلخل دوگانه بر روند تغییرات ضریب تحکیم ثانویه از نتایج این پژوهش قابل استنتاج است.

واژگان کلیدی: ضریب تحکیم ثانویه، تخلخل دوگانه، تنش، فروپاشی، کائولین

۱ - مقدمه

کم هزینه و با دقت قابل قبول تعیین نمود؛ همواره مورد توجه بسیاری از پژوهشگران ژئوتکنیک بوده است. یکی از این پارامترهای مهم در این زمینه، ضریب تحکیم ثانویه است. همچنین بررسی این موضوع به ویژه در خاک‌هایی با تخلخل دوگانه مورد نظر است. مصالح سنگی و خاکی طبیعی و یا متراکم شده، در موارد زیادی دو مقیاس تخلخل را از خود نشان می‌دهند که در آن ریزحفره‌ها به وسیله درشت حفره‌ها احاطه شده‌اند؛ مثل مواردی که در بافت سنگ‌های شکسته شده وجود دارد. در خاک‌ها، تخلخل دو گانه به دلیل وجود

با توسعه فزاینده اقتصادی در جهان و رشد جمعیت، محدودیت ساختگاه مناسب برای فعالیت‌های عمرانی بیشتر می‌شود. خاک‌های نرم در مناطق ساحلی که نیاز به ساخت و ساز در آنها زیاد است؛ تغییر شکل ثانویه زیادی از خود نشان می‌دهند و این موضوع ساخت و ساز روی چنین خاک‌هایی را با چالش مواجه می‌کند [۱]. با توجه به زمان و هزینه زیاد آزمایش خزش، تخمین نشست ناشی از تحکیم ثانویه با استفاده از پارامترهای مؤثری که به توان آنها را با انجام آزمایش‌های ساده،

کشت و زرع در خاک منجر به جداسازی خاک‌های متراکم و ایجاد منفذ در آنها است. هافمن و همکاران (۲۰۰۷) [۱۵] در پژوهش خود به بررسی مخلوط‌های گرانول ساخته شده از کلوخه‌های بنتونیتی با تراکم بالا به عنوان جایگزین مناسب و اقتصادی برای ایزوله کردن مراکز دفن زباله پرداخته‌اند. همچنین این پژوهشگران به بررسی اثر تراکم در چگونگی توزیع اندازه حفره‌ها پرداخته‌اند. در نمونه با تراکم کمتر، میزان حفره‌ها ماکرو بیشتر بوده است در حالی که با افزایش تراکم و افزایش بار وارد شده برای رسیدن به تراکم بالاتر، حفره‌ها ماکرو تقریباً از بین رفته و فقط حفره‌های میکرو باقی مانده‌اند. تام و همکاران (۲۰۰۷) [۱۶] در پژوهش خود به این نتیجه رسیده‌اند که ساختار خاک ناشی از قرارگیری ذرات در کنار هم و تحت تأثیر خواص مکانیکی و هیدرولیکی آنها است. این پژوهشگران به بررسی میزان تأثیر انرژی تراکم، نوع تراکم، و رطوبت بعد از تراکم بر توزیع اندازه حفره‌ها در کائولینیت غیر اشباع پرداخته و توزیع اندازه حفره‌ها نمونه‌های خشک با استفاده از تخلخلسنجی با تزریق جیوه (Mercury Intrusion Prosimetry) را تعیین کردند. در درصد رطوبت تراکمی پایین، میزان حفره‌ها در داخل کلوخه‌ها بیشتر از حفره‌های بین کلوخه‌ها بوده و افزایش فشار تراکم حتی به صورت یکنواخت و استاتیکی، کاهش حجم حفره‌های بین کلوخه‌ها را به دنبال داشته است.

وانگ و ژو (۲۰۰۷) [۱۷] در پژوهش خود آزمایش‌هایی با استفاده از دستگاه تحکیم تک محوری (ادئومتر) و تخلخلسنجی از طریق آزمایش نفوذ جیوه در نمونه‌های کائولینیت برای بررسی تأثیر تخلخل دو گانه بر تحکیم ثانویه انجام داده‌اند. این آزمایش‌ها فرضیه وابسته بودن تحکیم ثانویه به تخلخل دو گانه را تأیید نمی‌کند و همچنین این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که پروسه تحکیم اولیه و ثانویه، شامل همان عوامل فیزیکی است. باقریه و همکاران (۲۰۰۹) [۱۸] رفتار تغییر حجم و منحنی مشخصه آب-خاک را در یک خاک کلوخه‌ای ارزیابی نمودند. در این پژوهش آزمایش‌های مکش کنترل شده در شرایط ادئومتریک و تحت سربار ثابت انجام شد و رفتار تغییر حجم و منحنی مشخصه آب-خاک کائولین متراکم شده (به صورت استاتیکی) با ساختار دوگانه بررسی شد. آزمایش‌های

حفره‌های ناشی از ریشه گیاهان، حفره‌ها و ترک‌های ناشی از وجود کرم‌ها در خاک [۲] و یا به دلیل طبیعت کلوخه‌ای محیط است [۳]. ترک‌ها و درزه‌ها بیشتر در خاک‌های بسیار زیاد بیش تحکیم یافته و یا رس‌های خشک شده مشاهده شده است [۴]؛ در حالی که پدیده کلوخه شدن در خاک‌های کشاورزی و خاک‌های متراکم شده، به شکل خاص در مورد خاک‌هایی که در شرایط رطوبتی کمتر از رطوبت بهینه متراکم شده‌اند، دیده می‌شود [۵]. رفتاری که به وسیله‌ی چنین پدیده‌هایی بوجود می‌آید را می‌توان با استفاده از مفهوم تخلخل دوگانه مطالعه کرد. با توجه به پژوهش‌های انجام گرفته قبل از بارنبلات (۱۹۶۰) [۶] به وسیله‌ی اندریو که در صنایع نفتی منجر به ارائه رابطه مستقیم بین تعداد شیارهای صخره‌ها و میزان نفت استخراجی شد؛ بعد از بارنبلات نیز به همین منظور استفاده شد. از زمان پژوهش‌های بارنبلات و همکاران (۱۹۶۰) [۶] تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه محیط با تخلخل دوگانه انجام گرفته است. در این میان، موارد قابل توجه عبارتند از: بررسی‌های صحرائی و آزمایشگاهی ایوانز (۱۹۶۶) [۷] گریگارتن (۱۹۷۵) [۸]، باودن و همکاران (۱۹۸۰) [۹]، گارگا (۱۹۸۸) [۴]، مایو و کنتز (۲۰۰۰) [۱۰]، خلیلی (۲۰۰۳) [۱۱] و مندیک و همکاران (۲۰۰۷) [۱۲]. اگر چه تمامی مطالعات در زمینه چگونگی پاسخ محیط‌های ترک خورده است. در حقیقت تعداد کمی به بررسی رفتار مصالح کلوخه‌ای با وجود فراوانی آنها در زمینه مهندسی ژئوتکنیک، پرداخته‌اند. رمرو و همکاران (۱۹۹۹) [۵] و کوپولا (۲۰۰۰) [۱۳] داده‌های آزمایشگاهی در مورد رفتار خاک‌های کلوخه‌ای با تخلخل دو گانه منتشر کردند. رمرو و همکاران (۱۹۹۹) [۵] در پژوهش خود، پدیده کلوخه شدن در خاک‌های کشاورزی، خاک‌های متراکم شده و به طور خاص در مورد خاک‌هایی که در شرایط رطوبتی کمتر از رطوبت بهینه متراکم شده‌اند را مشاهده نمودند. همچنین این پژوهشگران در پژوهش‌های خود به بررسی اثر تراکم بر توزیع اندازه حفره‌ها پرداخته و نشان داده‌اند که هرچه میزان تراکم افزایش یابد؛ میزان حفره‌ها ماکرو، کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته و میزان حفره‌ها میکرو کمی افزایش می‌یابد.

گازمی و همکاران (۲۰۰۳) [۱۴] اظهار داشتند که کشاورزی و

باقریه و همکاران (۲۰۰۹) [۱۸] استفاده شده است که به دلیل مشخص بودن رفتار و مشاهده تخلخل دو گانه در روش ساخت، انتخاب شده است. نمودار دانه بندی مصالح در شکل (۱) نشان داده شده است.

برای ساخت نمونه نیز از همان تکنیک به کار گرفته شده توسط باقریه و همکاران (۲۰۰۹) [۱۸] استفاده شد. قبل از تراکم، خاک خشک شده در هوا، به دقت به وسیله اسپری به میزان مورد نظر (۲۵٪) مرطوب و در کیسه پلاستیکی قرار داده شد و برای رسیدن به تعادل رطوبتی، ۲۴ ساعت در این حالت نگهداری شد. سپس کلوخه‌ها از الک نمره ۱۲ عبور داده شد.

جدول ۱- مشخصات خاک کائولین آزمایش شده

Soil Classification	ML
Liquid Limit (%)	49
Plastic Limit (%)	29
Plasticity Index (%)	20
Specific Gravity	2.63
<2 μ (%)	67
>2 μ (%)	33

Table 1. Physical properties of kaolin

شکل (۱) منحنی دانه بندی کائولین

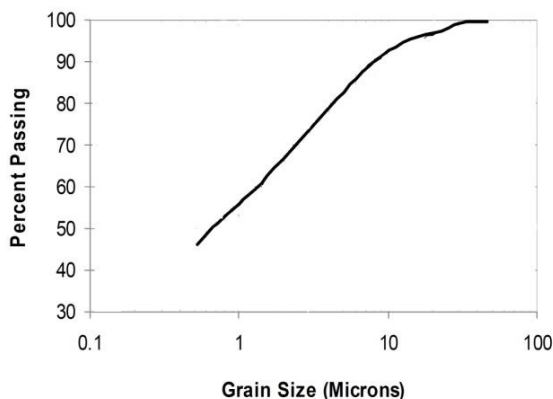


Fig. 1. Particle size distribution curve of kaolin

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی کائولین آزمایش شده

Compound		Percentage
Silica	SiO ₂	48.7
Alumina	Al ₂ O ₃	34.6
Magnesia	MgO	0.4
Potash	K ₂ O	1.2
Soda	Na ₂ O	0.2
Lime	CaO	0.1
Ferric oxide	Fe ₂ O ₃	0.9

خشک کردن روی نمونه‌های اشباع تحت تنش‌هایی خالص مختلف انجام گرفته و مشاهده شد که در تنش‌هایی با محدوده ۱۱۰ تا ۴۴۰ کیلو پاسکال، ساختار تخلخل دوگانه از منحنی‌های آب- خاک در پاسخ دو موده (Bimodal) مشهود و در تنش‌های بیشتر از ۴۴۰ کیلو پاسکال، حفرهای درشت شروع به ناپدید شدن می‌کنند و در تنش خالص ۷۵۰ کیلو پاسکال، پاسخ منحنی آب- خاک نزدیک به رفتار خاکی با تخلخل ساده است. لی و ژنگ (۲۰۰۹) [۱۹] به بررسی تغییرات تخلخل و ارزیابی ساختار تخلخلی در نمونه‌هایی با تخلخل دوگانه در مدت فرایند خشک شدن، پرداختند.

در پژوهش جسمانی و همکاران (۱۳۸۷) [۲۰] به بررسی ویژگی‌های تحکیم ثانویه خاک‌های ایران با تکیه بر مفهوم نسبت ضریب تحکیم ثانویه به ضریب فشردگی پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان دهنده وابستگی ضریب تحکیم ثانویه به مقادیر تنش تحکیمی است؛ به گونه‌ای که در تنش‌های کم شاهد مقادیر کمتر این پارامتر و با افزایش تنش‌ها مقدار آن افزایش می‌یابد.

هدف اصلی این مقاله، ارائه داده‌های آزمایشگاهی در مورد تغییرات ضریب تحکیم ثانویه تحت تنش در یک خاک کلوخه‌ای است که در آزمایشگاه تهیه شده است. از این رو به وسیله آزمایش‌های تحکیم تک محوری، اثر تنش خالص و پوکی اولیه روی تغییرات ضریب تحکیم ثانویه انجام شد و نتایج تحلیل شد.

این مقاله در چهار بخش سامان‌دهی شده است؛ پس از مقدمه به عنوان اولین بخش، بخش دوم جزئیات برنامه آزمایشگاهی شامل خواص خاک مورد آزمایش، تکنیک آماده‌سازی نمونه و فرآیند آزمایش (چگونگی اعمال بارها) گنجانده شده است. ارائه و تفسیر نتایج در بخش سوم ارائه شده است و در پایان، یافته‌های اصلی این بررسی در بخش چهارم خلاصه شده‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش مجموعه‌ای از آزمایش‌های خزش روی یک کائولین تجاری موجود انجام گرفت. پارامترهای مشخصه مصالح در جدول (۱) و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی این کائولین در جدول (۲) آورده شده است. این مصالح در پژوهش

برای بررسی وجود تخلخل دوگانه در نمونه‌های آزمایش شده از روش تخلخل سنجی با تزریق جیوه (MIP)^۱ استفاده شد. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D4284 انجام پذیرفته است. روش انجام آزمایش بدین صورت است که پس از آنکه حدود ۲ گرم از نمونه درون سلول آزمایش قرار داده می‌شود، سل مورد نظر در محفظه خلاء قرار داده شده و پس از ایجاد خلاء تمامی سل پر از جیوه می‌شود. سپس سل از آن دستگاه خارج و درون محفظه‌ای (محفظه اتوکلاو) قرار می‌گیرد. در این محفظه جیوه تزریق شده به گونه‌ای که تمامی پیرامون سل حاوی نمونه را جیوه فرا می‌گیرد. بدون اعمال فشار، حجم بسیار کمی از جیوه درون نمونه نفوذ می‌نماید. در مرحله بعد فشار از مقدار ۰ تا ۲۰۰۰ بار به صورت پله‌ای افزایش و در هر مرحله به نمونه برای رسیدن به شرایط تعادل، زمان داده می‌شود. پس از رسیدن به فشار بیشینه مورد نظر، فشار کاهش می‌یابد و در هر مرحله گفته شده تکرار می‌شود که این مرحله خیس کردن تلقی می‌شود. در مراحل مختلف برای اندازه‌گیری میزان جیوه وارد و خارج شده از نمونه، نظر به آنکه جیوه مایع رسانای الکتریکی است با اتصال سنسور به ابتدا و انتهای سل حاوی جیوه، میزان تغییرات آن قابل محاسبه است.

از آزمایش تخلخل سنجی به روش جذب سطحی (BET) نیز استفاده شد. اساس کار اندازه‌گیری تخلخل و سطح در این روش‌ها بر پایه جذب سطحی ماده جذب شده است. اگر شرایط به گونه‌ای اتخاذ شود که در آن یک لایه کامل از مولکول‌های ماده جذب شونده روی سطح به وجود آید، باتعیین ضخامت متوسط یک مولکول، می‌توان سطحی که یک مولکول اشغال می‌کند را محاسبه کرد و بنابراین براساس میزان ماده جذب شده، می‌توان مساحت سطح کل نمونه را اندازه‌گیری کرد. مناسب‌ترین مواد برای این منظور، گازها یا بخار برخی از مواد هستند که ابعاد مولکولی کوچک دارند و می‌توانند به داخل منافذی با ابعاد چند ده نانومتر نفوذ کنند. از مزایای این روش‌ها می‌توان به اندازه‌گیری تخلخل‌های باز در اندازه ۵ الی ۵/۴ نانومتر و همچنین سهولت اندازه‌گیری و قیمت پایین آن اشاره نمود.

Property		
Loss on Ignition	(1000°C)	12.1%
Oil Absorption	(mls/100g)	42
Specific Gravity		2.63
pH	(20% Slurry)	7.2
Bulk Density	(Compacted, g/cm ³)	1.6
Surface Area	m ² /g	21.1
Powder CIE Color	L*	92.15

Table 3. Physical properties of kaolin

برای تراکم خاک، نمونه‌ها در قالبی به قطر ۵۰ میلی‌متر از جنس استیل قرارداده شده و تا ارتفاع ۱۹ میلی‌متر و با وزن مخصوص ۱۲ کیلونیوتن بر متر مکعب به صورت استاتیکی تراکم شدند. برای تراکم نمونه‌ها، از دستگاه آزمایش تک‌محوری استفاده شده تا تراکم به صورت استاتیکی اعمال شود. آزمایش‌های خزش با استفاده از اودئومتر معمولی انجام گرفت. پس از قرار دادن نمونه در دستگاه، کائولین کلوخه‌ای تحت بار قرار گرفته و در زمان‌های مختلف میزان فشردگی خوانده شد. تنش‌های قائم در این آزمایش‌ها در محدوده ۱۰۲ الی ۲۵۴۸ کیلوپاسکال بوده است. در بارگذاری نمونه‌ها دو روش اعمال شده که تفاوت اصلی آنها در تقدم و تأخر اشباع نمونه است:

روش اول (اشباع- بارگذاری):

در این حالت ابتدا نمونه اشباع و سپس اعمال بار انجام گرفت و به صورت بلند مدت (کمینه ۱۵ روز) تحت تنش ثابت قرار گرفته و میزان کاهش تخلخل آن اندازه‌گیری شد.

روش دوم (بار گذاری- اشباع):

در این حالت نمونه به صورت غیر اشباع و به مدت ۲۴ ساعت تحت تنش ثابت قرار گرفته و پس از آن اشباع شده است. تغییرات ارتفاع و تخلخل نمونه در اثر اشباع اندازه‌گیری و ثبت شد. نمونه پس از تکمیل تغییر شکل‌های ناشی از فروریزی نیز برای مدت طولانی در شرایط بارگذاری ثابت قرارداده شد و روند افزایش تغییر شکل‌های قائم در اثر خزش ثبت شد. در تمام حالات تغییرات ارتفاع نمونه اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و تفاسیر

۳-۱- آزمایش‌های تخلخل سنجی

مؤید وجود دو قله یکی مربوط به درشت حفره‌ها و دیگری مربوط به ریز حفره‌ها است که این موضوع نیز وجود ساختار تخلخل دو گانه را تأیید می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بازه اندازه حفره‌ها قابل اندازه‌گیری در روش BET بسیار محدود است و نقطه A نشان دهنده بیشترین تغییرات حجم گاز ورودی به حفره‌ها در فضای ریز حفره‌ها است. اما به دلیل عدم وجود داده‌های مربوط به درشت حفره‌ها (به دلیل محدودیت دستگاه) نسبت به انجام تخلخل سنجی به روش تزریق جیوه اقدام شد.

شکل ۳ توزیع اندازه حفره‌ها در آزمایش BET

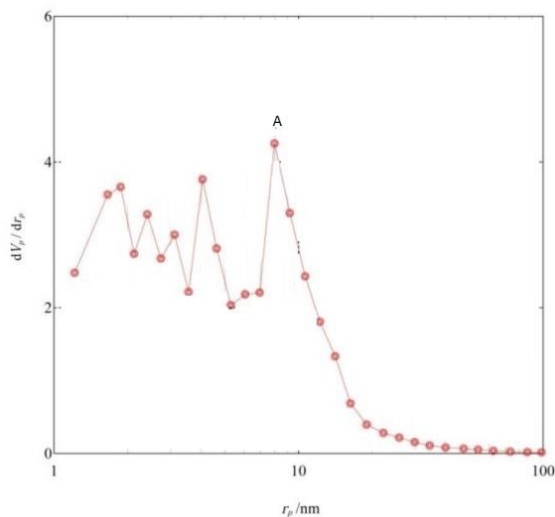


Fig. 3. Pore size distribution from BET

باقریه و همکاران (۲۰۰۹) [۱۸] روی همین مصالح، تحقیق و دقیقاً با کاربرد روش تراکمی مانند این پژوهش، آزمایش تعیین منحنی مشخصه آب و خاک را تحت تنش‌های مختلف قائم و در شرایط ادنومتریک انجام دادند. منحنی مشخصه آب-خاک پژوهش گفته شده در شکل (۴) آمده است. مشاهده می‌شود که در نمونه‌هایی که تحت تنش ۲۲۰ کیلو پاسکال قرار داشته است؛ منحنی مشخصه دو مکش ورود هوا را نشان می‌دهند که یکی مربوط به درشت حفره‌ها و دیگری مربوط به ریز حفره‌ها است. در محدوده‌ای بین این دو مکش درجه اشباع با تغییر مکش تغییر نکرده است و منحنی توزیع حفره‌ها در محدوده گفته شده افقی است. این مشاهده را می‌توان با عدم وجود حفره‌ها در محدوده خاصی نسبت داد. از طرفی در شکل (۴) می‌توان دید که درشت حفره‌ها با افزایش تنش قائم در ۷۵۰

در شکل (۲) نتایج آزمایش تخلخل سنجی به روش تزریق جیوه نشان داده شده است. در محدوده حفره‌ها با قطر کم (micropores) یک افزایش ناگهانی در حجم جیوه ورودی مشاهده می‌شود. سپس در مرحله بعد و در محدوده حفره‌ها با ابعاد بزرگتر (macropores)، شدت و حجم بیشتری مشاهده می‌شود. این نتایج ساختار تخلخل دو گانه را در خاک نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر، نمونه‌ها حاوی دو ساختار تخلخل مجزای ریز حفره‌ها و درشت حفره‌ها است. هدف از انتخاب روش تراکمی در این پژوهش، ساخت نمونه‌هایی با ساختار تخلخل دوگانه بوده است و نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که با این روش هدف ما محقق شده است.

شکل ۲ توزیع اندازه حفره‌ها در آزمایش تزریق جیوه

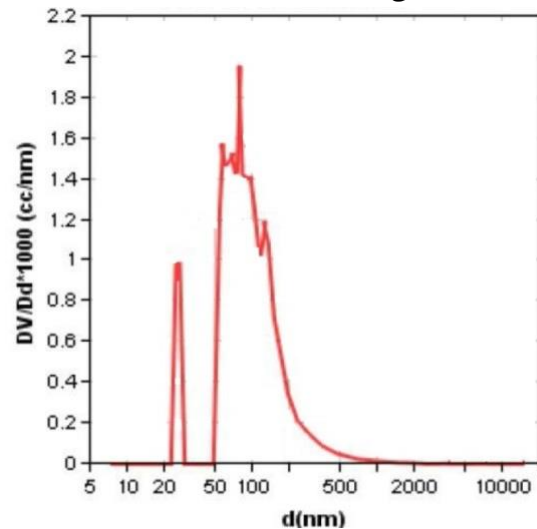


Fig. 2. Pore size distribution from Mercury Intrusion Prosometry

نتایج آزمایش روش جذب سطحی در شکل (۳) نشان داده شده است. در شکل (۳)، v_p حجم حفره و r_p شعاع آن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود؛ دامنه اندازه‌گیری حفره‌ها در این روش در بازه ۱ الی ۱۰۰ نانومتر قرار دارد و این محدوده در قیاس با محدوده قابل اندازه‌گیری به وسیله MIP کوچک‌تر است و محدوده ریز حفره‌ها را نشان می‌دهد که دقت اندازه‌گیری آن در محدوده ریز حفره‌ها (micropore) بیشتر است. نتایج آزمایش‌های BET، MIP، در کنار یکدیگر

شکل ۵ نتایج آزمایش تحکیم تک بعدی در صفحه $e \sim \log \sigma_v$

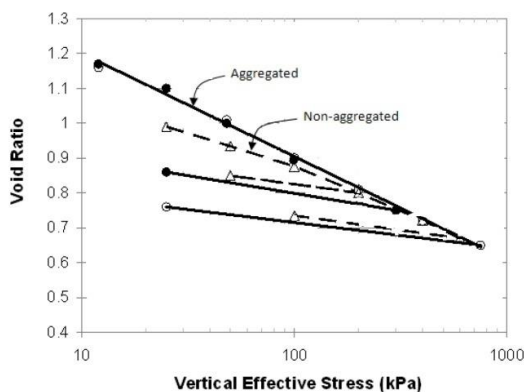


Fig. 5. The results of one dimensional consolidation in $e \sim \log \sigma_v$ plane

۳-۳- آزمایش های خزش

شکل (۶) تغییرات تخلخل در برابر زمان را در نمونه‌هایی نشان می‌دهد که با روش اول روی آنها آزمایش انجام گرفته است؛ یعنی ابتدا نمونه‌ها اشباع و سپس به صورت هم‌زمان اعمال تنش نیز انجام پذیرفته است. نمونه‌ها تحت تنش‌های قائم ۱۰۲ و ۲۰۴ و ۴۰۸ و ۷۶۴ و ۲۵۴۸ کیلو پاسکال قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در این نمونه‌ها پس از زمان تقریبی ۲۴ ساعت، تحکیم اولیه پایان یافته و تحکیم ثانویه شروع شده است.

شکل ۶ تغییرات تخلخل در برابر زمان در تنش‌های متفاوت

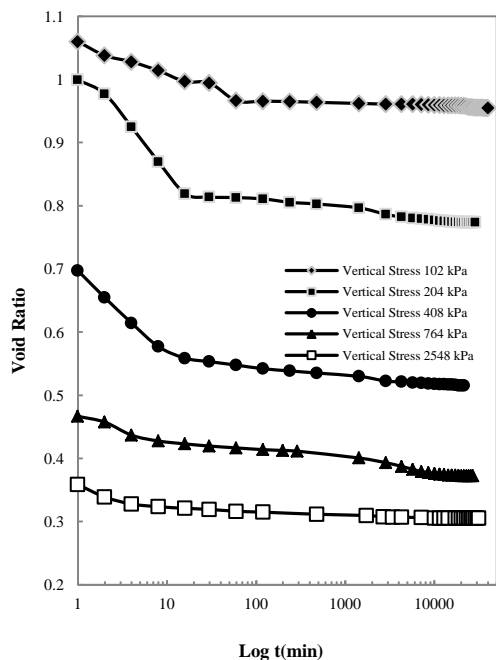


Fig. 6. The variation of void ratio vs. time at different vertical stresses

کیلو پاسکال از بین رفته‌اند و منحنی مشخصه آب- خاک یک مکش ورود هوا را مربوط به ریز حفره‌ها نشان می‌دهد.

شکل ۴ منحنی نگهداشت آب- خاک تحت تنش‌های خالص ۲۲۰ و

750 kPa [۱۸]

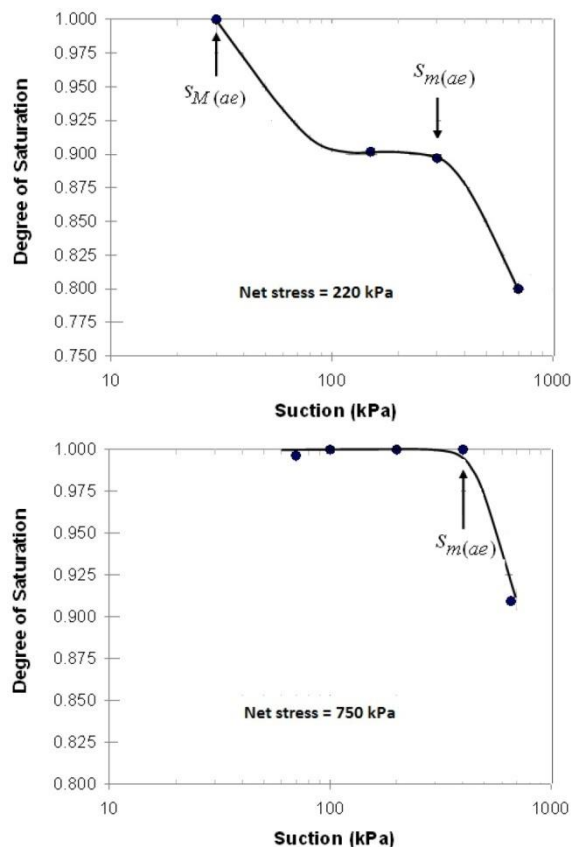


Fig. 4. Water retention curves under net stresses of 220 and 750 kPa [18]

۳-۲- آزمایش‌های تحکیم عادی

نتایج آزمایش‌های تحکیم عادی اودنومتریک در شکل (۵) آورده شده است. در این شکل منحنی تحکیم اولیه که بر روی نمونه‌های دارای ساختار کلوخه‌ای و غیر کلوخه‌ای به صورت هم‌زمان ترسیم شده است. خط تحکیم دو نوع نمونه در تنش‌های زیاد هماهنگ شده‌اند. دلیل چنین مشاهده‌ای بدین صورت قابل بیان است که نمونه‌ای که ابتدا به صورت کلوخه‌ای تهیه شده، با افزایش تنش به تدریج ساختار کلوخه‌ای آن از بین رفته و ساختار تخلخل ساده‌ای می‌یابد و نمودار تحکیم آن با نمودار نمونه غیر کلوخه‌ای هم‌گرا می‌شود. نمونه کلوخه‌ای از همان ابتدای بارگذاری رفتار عادی تحکیم یافته را نشان می‌دهد.

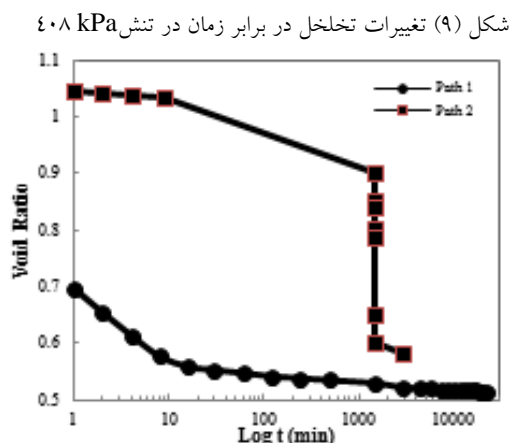


Fig. 9. Void ratio vs. time under vertical stress of 408 kPa

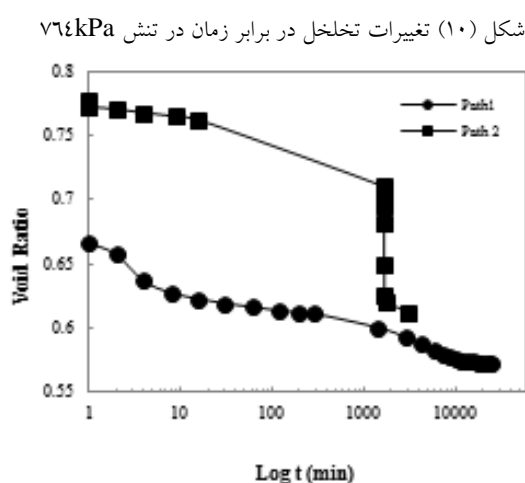


Fig. 10. Void ratio vs. time under vertical stress of 764 kPa

در شکل (۱۱) خط تحکیم اولیه که از آزمایش تحکیم معمولی به دست آمده است، در کنار داده‌های مربوط به آزمایش‌های خزش که بار قائم در آنها به صورت یک مرحله‌ای اعمال، و ترسیم شده است. این در حالی است که در نمونه‌هایی که روی آنها آزمایش تحکیم معمولی انجام گرفته، بارگذاری به صورت پله‌ای انجام شده و در هر مرحله، بار دو برابر شده است. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های مربوط به بارگذاری مرحله‌ای نیز در حول خط به دست آمده از آزمایش تحکیم معمولی قرار خواهند گرفت. این مشاهده، یافته‌های مقاله باقریه و فارسیجانی (۱۳۹۵) [۲۱] را که بیان داشته‌اند؛ مسیر بارگذاری، ترتیب بارگذاری و اشباع بر تخلخل نمونه‌های اشباع شده تأثیر معنا داری ندارد، صحیح است و خط پایان تحکیم اولیه خطی واحد و مستقل از مسیر بارگذاری است.

در شکل (۱۲) ضریب تحکیم ثانویه در مقابل تنش قائم

همان‌گونه که در قسمت مواد و روش‌ها توضیح داده شد؛ برای کنترل میزان تأثیر تقدم و تأخر زمان اشباع نمودن، نمونه‌ها به دو صورت اشباع شده‌اند؛ در حالت اول، نمونه ابتدا اشباع و سپس به صورت هم‌زمان اعمال بار نیز انجام پذیرفته؛ در حالت دوم، نمونه به صورت غیر اشباع با همان رطوبت ساخت و به مدت ۲۴ ساعت تحت تنش قرار گرفته و پس از آن اشباع شده است. در شکل‌های (۷ الی ۱۰)، تأثیر به کارگیری این حالتها نشان داده شده است. می‌توان ملاحظه نمود که نمونه‌ها با چشم‌پوشی از ترتیب اشباع کردن و بارگذاری آنها پس از اشباع، دارای مسیر یکسانی است و پس از اتمام بارگذاری تخلخل نمونه‌ها تقریباً یکسان است.

شکل ۷ تغییرات تخلخل در برابر زمان تحت تنش قائم ۱۰۲ kPa

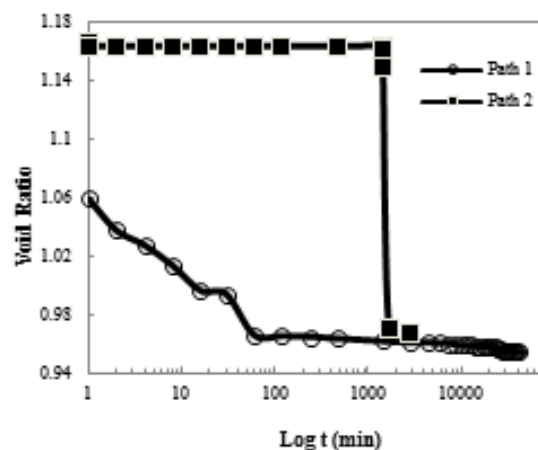


Fig. 7. Void ratio vs. time under vertical stress of 102 kPa

شکل (۸) منحنی‌های تغییرات تخلخل در برابر زمان در تنش ۲۰۴ kPa

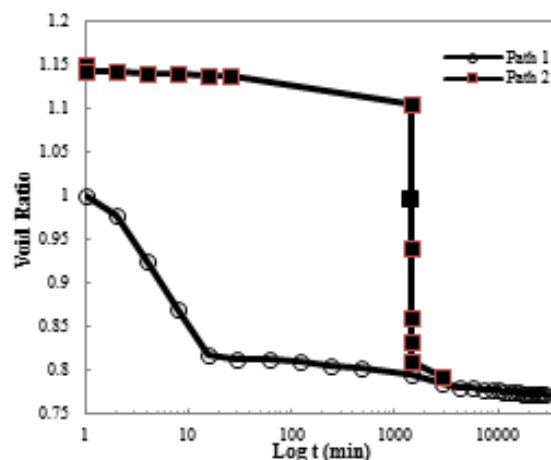


Fig. 8. Void ratio vs. time under vertical stress of 204 kPa

طرفی دیگر (با فرض تأثیر مستقیم تخلخل دو گانه بر خزش) تنش با توجه به اینکه موجب کاهش تخلخل دو گانه می‌شود، ضریب تحکیم ثانویه را نیز کاهش می‌دهد. از این رو است که شیب کاهش ضریب تحکیم ثانویه با تنش در داده‌های مربوط به این پژوهش بیشتر است.

شکل (۱۲) تغییرات ضریب تحکیم ثانویه در برابر تنش

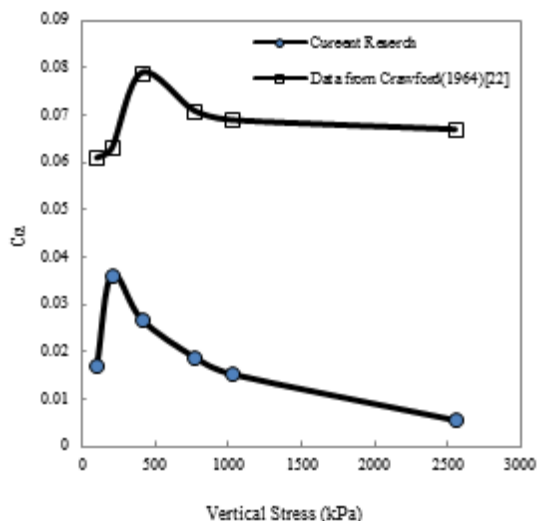


Fig. 12. Coefficient of secondary consolidation vs. vertical stress

۴- نتیجه‌گیری

یک برنامه آزمایشگاهی برای مطالعه تأثیر تنش بر ساختار تخلخل و ضریب تحکیم ثانویه یک خاک رسی از جنس کائولینیت که دارای ساختار تخلخل اولیه دوگانه است؛ انجام شد. وجود تخلخل دوگانه در نمونه‌ها، علاوه بر آزمایش‌های تعیین منحنی مشخصه آب-خاک، از طریق آزمایش‌های تزریق جیوه و روش جذب سطحی نیز تأیید شد. تنش آن‌گونه که باقریه و همکاران (۲۰۰۹)[۱۸] مشاهده کردند، موجب حذف تخلخل دو گانه می‌شود. آزمایش‌ها نشان دادند که مسیر فروریزی ساختار، تقدم و تأخر بارگذاری و اشباع نمونه‌ها تأثیری بر تخلخل نمونه؛ پس از فرو ریزی در یک تنش مشخص ندارد و خط پایان تحکیم اولیه، خطی واحد است. این یافته، نتایج پژوهش باقریه و فارسجانی (۱۳۹۵)[۲۱] را تأیید می‌کند که روی مصالح دیگری به همان نتیجه رسیده‌اند. همچنین تغییرات ضریب تحکیم ثانویه برحسب تنش مانند خاک با تخلخل ساده، در ابتدا دارای روند افزایشی و پس از

ترسیم شده است. ضریب تحکیم ثانویه در ابتدا با افزایش مقدار تنش قائم افزایش می‌یابد تا اینکه در تنش مشخصی به بیشینه مقدار خود رسیده، پس از آن با افزایش تنش، کاهش می‌یابد. این روند همان روندی است که به وسیله کرافورد (۱۹۶۴)[۲۲] مشاهده شده است. نمونه‌های پژوهش گفته شده دارای تخلخل ساده بوده، و مشاهده می‌شود که رفتار آنها مشابه رفتار نمونه‌های این پژوهش است که دارای تخلخل دوگانه بوده‌اند. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که وجود، یا عدم وجود تخلخل دوگانه بر روند کلی تغییرات ضریب تحکیم ثانویه برحسب تنش، تأثیر قابل توجهی ندارد. یادآور می‌شود بر اساس آزمایش‌های مربوط به تخلخل سنجی در تنش‌های کم، نمونه‌های این پژوهش دارای تخلخل دوگانه و در تنش‌های زیاد دارای تخلخل ساده بوده‌اند. برخی از پژوهش‌های اینگونه اظهارنظر کرده‌اند که تحکیم ثانویه به تخلخل دوگانه و خروج آب حفره‌ای از ریز حفره‌ها ارتباط دارد [۲۳].

شکل ۱۱ مقایسه تخلخل نمونه‌ها پس از اتمام تحکیم اولیه در آزمایش تحکیم عادی و اعمال یک مرحله‌ای بار قائم اولیه

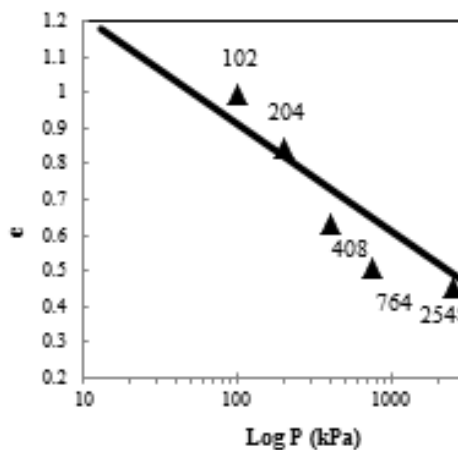


Fig. 11. Comparison of void ratio at the end of conventional primary consolidation and applying the load in one stage

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که در تنش‌های بالا، ضریب تحکیم ثانویه نسبت به تنش‌های کم که نمونه در آنها دارای تخلخل دوگانه است، کاهش یافته است. در واقع تنش در تغییر ضریب تحکیم ثانویه به دو صورت نقش دارد: اول آنکه تنش به تنهایی باعث تغییرات این ضریب می‌شود؛ مانند آنچه کرافورد (۱۹۶۴)[۲۲] مشاهده کرده است و پس از نقطه بیشینه، ضریب تحکیم ثانویه کاهش می‌یابد. از

- [11] Khalili N. 2003 Coupling effects in double porosity media with deformable matrix. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(22), Art. No.2153.
- [12] Mandique E.J., Muci V.E. & Gurfinkel M.E. 2007 EOR field experiences in carbonate reservoirs in the United States. *SPE Reserv. Evalu. Eng.*, **10**(6), 667-686.
- [13] Coppola, A. 2000 Unimodal and bimodal descriptions of hydraulic properties for aggregated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64**(4), 1252-1262.
- [14] Ghezzehei TA & Or D. 2003 Pore-space dynamics in a soil aggregate bed under a steady external load. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **67**(1), 12-19.
- [15] Hoffmann C, Alonso E. E. & Romero E. 2007 Hydro-mechanical behavior of bentonite pellet mixtures. *Physics and chemistry of the earth*, **32**(8-14), 832-849.
- [16] Thom R., Sivakumar V, Murray E. J. & Mackinnon P. 2007 Pore size distribution of unsaturated compacted kaolin: the initial states and final states following saturation. *Geotechnique*, **57**(5), 469-474.
- [17] Wang Y.H. & Xu D. 2007 Dual porosity and secondary consolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(7), 793-801.
- [18] Bagherieh A. R., Khalili N., Habibagahi G., Ghahramani A. 2009 Drying response and effective stress in a double porosity aggregated soil. *Engineering Geology*, **105**(1-2), 44-50.
- [19] Li X. & Zhang L.M. 2009 Characterization of dual-structure pore-size distribution of soil. *Can. Geotech. J.*, **46**(2), 129-141.
- [20] Jesmani M. & Vaezi 2008 Determination of secondary consolidation properties of clayey soils under different values of effective pressures. Proceedings of the fourth national congress of civil engineering, Tehran university. Tehran. Iran. (In Persian)
- [21] Bagherieh A. R. & Farsijani A. 2016 Consolidation Behavior of Collapsible Clayey Soils in Saturated and Unsaturated Conditions. *Sharif Journal of Civil Engineering*, **32.2**(1.1), 43-54. (In Persian)
- [22] Crawford, C.B. 1964 Interpretation of the consolidation test. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE*, **90**(SM5), 87-102.
- [23] De Jong GJ, Verruijt A. 1965 Primary and secondary consolidation of a spherical clay sample. In: *Proceedings of the 6th international conference soil mechanic and foundation engineering*, Montreal, 254-258.

رسیدن به مقدار بیشینه (در یک تنش مشخص) سیر نزولی پیدا می‌کند. از این رو می‌توان گفت وجود یا عدم وجود تخلخل دوگانه بر روند کلی تغییرات ضریب تحکیم ثانویه در برابر تنش، تأثیر چشم‌گیری نداشته است.

References

۷- مراجع

- [1] Le T. M., Fatahi B. & Khabbaz H. 2012 Viscous Behaviour at soft clay and Inducing factors. *Geotech. Geol. Eng.*, **30**(5), 1069-1083.
- [2] Jongmans A.G., Pulleman M.M., Balabane M., van Oort F. & Marinissen J.C.Y. 2003 Soil structure and characteristics of organic matter in two orchards differing in earth worm activity. *Appl. Soil Ecol.*, **24** (3), 219-232.
- [3] Burger C.A. & Shackelford C.D. 2001 Evaluating dual porosity of pelletized diatomaceous water characteristic curve functions. *Can. Geotech. J.*, **38** (1), 53-66.
- [4] Garga V.K. 1988 Effect of sample-size on consolidation of a fissured clay. *Can. Geotech. J.*, **25** (1), 76-84.
- [5] Romero E., Gens A. & Lloret A. 1999 Water permeability, water retention and micro structure of unsaturated compacted Boom clay. *Eng. Geol.*, **54**(1-2), 117-127.
- [6] Barrenblatt G.I., Zeltov I.P. & Kochina, N. 1960 Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *J. Appl. Math. Mech.*, (translation of the Soviet journal: *Prikladnaja Matematika i Mekhanika (PMM)*) **24**(5), 1286-1303, 1960.
- [7] Evans D.M. 1966 The Denver area and earthquakes and rocky mountain arsenal well. *Mt. Geol.*, **3**(1), 23-36.
- [8] Grigarten A.C., Ramey H.J. & Raghavan R. 1975 Applied pressure analysis for fractured wells. *J. Pet. Technol.*, **27**(7), 887-892.
- [9] Bawden W.F., Curran J.H. & Roegiers J.-C. 1980 Influence of fracture deformation on secondary permeability a numerical approach. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **17**(5), 265-279.
- [10] Mayo A.L. & Koontz W. 2000 Fracture flow and groundwater compartmentalization in the Rollins Sandstone Lower Mesaverde Group, Colorado, USA. *Hydrogeol. J.*, **8**(4), 430-446.

The Collapse and Creep Behavior of Kaolin with Double Porosity Structure

A.R. Bagherieh^{*1}, R. Farpour², A. Farsijani³

1. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Malayer University.(Corresponding Author)

2. Graduate student, Islamic Azad University, Hamedan Branch.

3. Ph.D. Student, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil.

bagheri@malayeru.ac.ir

Abstract:

Despite several existing researches on the secondary consolidation of fine grained soils, there is no consensus among researchers about the main reasons for variations of the coefficient of secondary consolidation versus stress. The present research specifically aims to discuss the general trend of this parameter in soils with double porosity structure. This paper studies the commercial kaolin. After adding the required moisture to the soil and allowing the moisture equalization, samples of kaolin are statically compacted into the desired dry density. The density of the compacted kaolin is considered to be low enough to obtain an initial open and double porosity structure. In order to make sure about the compaction procedure -as well as the existence of double porosity structure, prosimetry experiments including mercury intrusion and BET experiments are carried out. The results of prosimetry experiments confirm the existence of double porosity structure in the samples. Furthermore the results of water retention analysis of soil prove the double porosity structure of compacted soil samples. The water retention curves show a stepwise trend which is a consequence of bimodal distribution of pore size. Moreover, the water retention curves show that the structure changes into single structure at high vertical stresses. In other words, the vertical stress causes the closure of macro pores. For further investigations, samples are put in conventional oedometer apparatus. Saturation is carried out in two ways: the first group of samples are saturated before being loaded; In the second group, the samples are initially loaded at compaction water content and then are saturated under a constant load. The results indicate that the history of stress before the collapse, transposition of loading and saturation processes does not affect the porosity of the samples after saturation (Collapse upon wetting). In other words the porosity after collapse is only related to the effective stress at saturation state. This may validate the idea which states "normal consolidation line of saturated samples is a unique line and is not substantially dependent on the stress path and history". This idea simplifies the procedure of modeling the behavior of collapsible soils. Over a long period of time required for measuring the secondary changes in soil volume, the samples are put under a constant load, and the amount of settlement versus time is measured after the completion of primary consolidation. The coefficient of secondary consolidation is reported for all states of vertical stresses. Recorded experimental results show that in the stress range of 100 to around 300 kPa, the coefficient of secondary consolidation exhibits an increasing trend with respect to stress; where it reaches its maximum at 300 kPa and starts its descending trend. This is in compliance with the same results of earlier researches. Consequently, given that the soil studied in earlier researches has been of single porosity structure, present research shows that the double porosity structure does not considerably affect the general trend of changes in secondary consolidation coefficient. Furthermore this is in contrast with some theories that express the relation between the secondary deformations and double porosity structure of soil. Therefore, it could be stated that it is required to clarify the reasons of secondary deformations of soils more precisely.

Keywords: Secondary consolidation, double porosity, collapse, mercury intrusion.