بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

دانشکده عمران و محیط زیست

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد- گرایش مهندسی خاک و پی

مطالعه رفتار مصالح پاره‌سنگی با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس

نگارش

مژگان اسدزاده

استاد راهنما

دکتر عباس سروش

زمستان ۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی- ارشد و دکترا

تاریخ:
شماره:

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: مژگان اسدزاده دانشجوی آزاد ● بورسیه ○ معادل ○

شماره دانشجوئی: ۸۵۱۲۴۰۲۱ دانشکده: مهندسی عمران و محیط زیست رشته تحصیلی: مکانیک خاک و پی گروه:

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: عباس سروش درجه و رتبه: دانشیار

نام و نام خانوادگی: درجه و رتبه:

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: عطا آقایی آرایی درجه و رتبه: دانشجوی دکتری

نام و نام خانوادگی: درجه و رتبه:

عنوان پایان‌نامه به فارسی : مطالعه رفتار مصالح پاره‌سنگی با استفاده از آزمایش برش مستقیم

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی: Large-scale Laboratory Direct Shear Testing on Rockfill Materials

نوع پروژه: کارشناسی○ ارشد● دکتر ا ○ سال تحصیلی: ۸۷-۸۸

کاربردی ● بنیادی○ توسعه‌ای ○ نظری○

تاریخ شروع : ۸۶/۷/۱ تاریخ خاتمه : ۸۷/۱۰/۱۴ تعداد واحد : ۶ سازمان تأمین کننده اعتبار :

واژه‌های کلیدی به فارسی: آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس، مقاومت برشی، سطح تنش، اشباع شدگی، فروریزش

واژه‌های کلیدی به انگلیسی: Large-scale direct shear test, Shear Strength, Stress level, Saturation, Saturation collapse

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات ۱۲۷	تصویر ● جدول ● نمودار● نقشه ○ واژه‌نامه○		تعداد مراجع ۴۶	تعداد صفحات ضمائم
زبان متن	فارسی ●	انگلیسی ○	چکیده	فارسی● انگلیسی ●	
یادداشت					

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاریخ: ۸۷/۱۱/۵**

۱ : ارائه به معاونت پژوهشی به همراه یک نسخه الکترونیکی از پایان‌نامه و فرم اطلاعات پایان‌نامه بصورت PDF همراه چاپ چکیده (فارسی انگلیسی) و فرم اطلاعات پایان‌نامه

۲ : ارائه به کتابخانه دانشکده (شامل دو جلد پایان نامه به همراه نسخه الکترونیکی فرم در لوح فشرده طبق نمونه اعلام شده در صفحه خانگی کتابخانه مرکزی)

به نام خدا

تعهدنامه اصالت اثر

۱۳۸۷/۱۰/۱۴

اینجانب مژگان اسدزاده متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلا برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگرد قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

مژگان اسدزاده

تقدیم به همه عزیزانی که دوستانه و دلسوزانه یاریم کردند

از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر سروش که این پژوهش با راهنمایی‌ها و تدبیر ایشان به ثمر نشست کمال تشکر را دارم. همچنین بدین وسیله مراتب سپاسگزاری خود را از مسئول دلسوز آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه، جناب آقای مهندس بهرامی و تکنسین آزمایشگاه، جناب آقای جوادی به دلیل همراهی و مساعدتشان ابراز می‌دارم.

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

چکیده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان : مطالعه رفتار مصالح پاره‌سنگی با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس

ارائه شده توسط مژگان اسدزاده **شماره دانشجویی ۸۵۱۲۴۰۲۱** **گرایش مهندسی ژئوتکنیک**

استاد راهنما : آقای دکتر عباس سروش

امروزه مصالح سنگریزه‌ای عمدتا به عنوان مصالح مهندسی (Engineering Fill) در مهندسی عمران از قبیل ساخت سد، اسکله سازی و زیرسازی راه مورد استفاده قرار می‌گیرند. این امر لزوم شناخت هرچه دقیق‌تر رفتار این مصالح را به همراه داشته است. تحقیقات نشان داده که رفتار مصالح سنگریزه‌ای، به عنوان مصالح دانه‌ای، عمدتا متکی بر پارامترهایی از قبیل: دانه‌بندی، جنس دانه‌ها، شکل و اندازه دانه-ها، میزان رطوبت و سطح تنش می‌باشد، که از این میان سطح تنش یکی از مهمترین عوامل موثر بر مقاومت برشی است.

در این پایان نامه، به منظور بررسی اثر سطح تنش، آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس در پنج سطح تنش مختلف بر روی یک نوع از مصالح سنگریزه‌ای تیزگوشه انجام شده است. همچنین با توجه به شرایط اشباع‌شدگی مصالح در سدها و تاثیر عامل رطوبت بر رفتار این مصالح، آزمایش‌ها در حالت اشباع نیز تکرار شده و با نتایج آزمایش بر روی مصالح در حالت خشک مقایسه شده است. همچنین به منظور بررسی پدیده فروریزش در سد، برخی از نمونه‌ها به صورت خشک-اشباع نیز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در این روش پس از انجام آزمایش در حالت خشک تا یک تنش برشی مشخص، نمونه اشباع شده و سپس آزمایش ادامه یافته است.

نتایج آزمایش‌ها در دو حالت خشک و اشباع در پنج سطح تنش و حالت خشک-اشباع در سه سطح تنش حاکی از آن است که پوش گسیختگی این مصالح در هر سه حالت منحنی بوده و رابطه خطی مور-کولمب برای این مصالح صادق نمی‌باشد. با افزایش سطح تنش، پارامترهای مقاومتی مصالح (زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع) کاهش یافته و مصالح سخت‌تر عمل نموده‌اند. مقایسه دانه‌بندی مصالح قبل و بعد از آزمایش نشان داد که با افزایش سطح تنش، شکست ذرات به صورت خطی افزایش یافته است. این روند در هر سه حالت خشک، اشباع و خشک-اشباع مشابه است؛ با این تفاوت که پارامترهای مقاومتی در حالت اشباع، با توجه به تاثیر عامل رطوبت، نسبت به حالت خشک کاهش یافته‌اند و پارامترهای مقاومتی در حالت خشک-اشباع از حالت اشباع نیز کمتر می‌باشند. هچنین، شکست ذرات در حالت اشباع کمتر از شکست ذرات در حالت خشک و شکست ذرات در حالت خشک-اشباع بیشتر از شکست ذرات در حالت اشباع و کمتر از شکست ذرات در حالت خشک است.

بررسی نتایج در حالت خشک-اشباع نشان می‌دهد که اشباع شدگی موجب افت ناگهانی در تنش برشی و نیز افزایش نشست مصالح شده است.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، اثر دو عامل سطح تنش و اشباع شدگی بر روی رفتار مکانیکی مصالح سنگریزه‌ای به وضوح مشخص می‌شود. همچنین، با توجه به وقوع نشست‌های بزرگ در حالت خشک-اشباع، در نظر گرفتن پدیده فروریزش در طراحی درست و مطمئن سدها الزامی می‌باشد. بنابراین در انجام آزمایش‌های مربوط به هر سد لازم است شرایط واقعی ساخت سد و نیز اثر عوامل مختلف از جمله سطح تنش و اشباع شدگی به شکل مناسبی در نظر گرفته شود.

کلمات کلیدی : آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس، مقاومت برشی، سطح تنش، اشباع شدگی، فروریزش.

Key words: Large-scale direct shear test, Shear Strength, Stress level, Saturation, Saturation collapse.

فهرست مطالب

فصل ۱- مقدمه ۱

فصل ۲- مروری بر مطالعات گذشته ۳

۲-۱- مدل‌سازی مصالح سنگریزه‌ای ۵
۲-۱-۱- حداکثر اندازه دانه‌ها ٦
۲-۱-۲- روش‌های مدل‌سازی دانه‌بندی نمونه ۷
۲-۲- اثر پارامترهای مختلف بر رفتار مصالح سنگریزی ۱۲
۲-۲-۱- سطح تنش ۱۳
۲-۲-۲- تخلخل و دانه بندی نمونه ۱۵
۲-۲-۳- مقدار ریزدانه ۱۷
۲-۲-۴- حداکثر اندازه ذرات ۱۸
۲-۲-۵- رطوبت ۱۹
۲-۲-۶- جنس ذرات ۲۰
۲-۲-۷- نوع آزمایش ۲۱
۲-۲-۹- شکل مصالح ۲۳
۲-۲-۱۰- شکست ذرات ۲۵
۲-۳- روش‌های بررسی شکست ذرات ۲۷
۲-۴- بررسی اثر اصطکاک جدار در آزمایش برش ۳۲
۲-۵- روابط مقاومت برشی ۳٤

فصل ۳- خصوصیات مصالح، روش و نتایج آزمایش ۳۷

۳-۱- مشخصات مصالح ۳۸
۳-۱-۱- نتایج آزمایش بارگذاری نقطه‌ای ۳۹
۳-۲- مشخصات دستگاه ٤٤
۳-۳- نمونه‌سازی و آزمایش ٤۷
۳-۴- نتایج آزمایش ٤۹
۳-۴-۱- آزمایش‌ها در حالت خشک ٤۹
۳-۴-۲- آزمایش‌ها در حالت اشباع ٦۹
۳-۴-۳- مقایسه بین نتایج آزمایش‌ها روی مصالح خشک و اشباع ۸٦
۳-۴-۴- مقایسه نتایج آزمایش‌ها با سایر مراجع ۹٤

فصل ۴- آزمایش در حالت خشک-اشباع ۱۰۲

۴-۱- نمونه سازی و آزمایش ۱۰۳
۴-۲- نتایج آزمایش ۱۰٤
۴-۳- جمع‌بندی ۱۱۸

فصل ۵- جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهاد ادامه کار..... ۱۱۹

پیشنهاد ادامه کار ۱۲۲

منابع و مراجع..... ۱۲۳

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱: تغییرات φ با D در آزمایش سه محوری (Parkin, 1991) ۷

شکل ۲-۲: تبدیل دانه‌بندی نمونه‌های آزمایشگاهی ۸

شکل ۲-۳: رابطه فشار و کرنش قائم در آزمایش اودومتر بر روی دانه بندی به روش منحنی درجه دوم در مقیاس لگاریتمی (Fumagalli, 1969) ۱۱

شکل ۲-۴ : منحنی پوش مور و تغییرات φ'_p با σ'_3 برای مصالح بازالت (Indraratna et al., 1998) ۱۳

شکل ۲-۵: آزمایش‌های سه محوری بر روی مصالح ماسه سنگی در چهار تنش همه جانبه متفاوت (Charles and Watts, 1980) ۱۴

شکل ۲-۶: تغییرات ضریب پواسون و مدول تغییرشکلی با σ'_3 (Indraratna et al., 1998) ۱۵

شکل ۲-۷: پوش مور و $\tan\varphi_0$ برحسب تنش نرمال در آزمایش سه محوری در دوحالت متراکم و شل (Marsal, 1973). ۱۵

شکل ۲-۸: اثر تخلخل اولیه بر تراکم پذیری سنگریز سنگ آهک (Frassoni et al., 1982) ۱۶

شکل ۲-۹: نمودار بار محوری به تغییرشکل محوری در آزمایش اودومتر (Frassoni et al.,1982) ۱۹

شکل ۲-۱۰: منحنی‌های تراکم نمونه‌های گرانیت خشک و اشباع (Frassoni et al., 1982) ۲۰

شکل ۲-۱۱: آزمایش سه محوری زهکشی شده روی سنگریزهای متراکم در تنش‌های همه جانبه $۱۰۰\,kPa$ (Charles and Watts, 1980) ۲۱

شکل ۲-۱۲: مقایسه مقاومت برشی حاصل از آزمایش سه محوری و کرنش مسطح (Marsal, 1973) ۲۲

شکل ۲-۱۳: اثر ضریب شکل بر تراکم پذیری سنگریز سنگ آهک (Frassoni et al., 1982) ۲۳

شکل ۲-۱۴: رفتار تنش-کرنش-تغییرات حجمی برای a) مصالح گردگوشه و b) مصالح تیزگوشه (Varadarajan et al., 2003) ۲۴

شکل ۲-۱۵: تغییرات فاکتور شکست با تنش همه جانبه برای مصالح تیزگوشه و گردگوشه (Varadarajan et al., 2003) ۲۵

شکل ۲-۱۶ : منحنی‌های دانه‌بندی ماسه کامبریا پس از آزمایش‌های سه محوری در سطوح تنش مختلف (Lade et al., 1996) ۲۷

شکل ۲-۱۷ : فاکتور شکست مارشال بر حسب تنش نرمال میانگین موثر در لحظه شکست برای انواع مختلف آزمایش روی ماسه متراکم کامبریا (Lade et al., 1996) ۲۹

شکل ۲-۱۸ : فاکتور شکست لی و فرهومند بر حسب تنش نرمال میانگین موثر در لحظه شکست برای انواع مختلف آزمایش روی ماسه متراکم کامبریا (Lade et al., 1996) ۲۹

شکل ۲-۱۹: فاکتور شکست هاردین بر حسب انرژی کل (Lade et al., 1996) ۳۲

شکل ۲-۲۰: دستگاه برش اصلاح شده a- استفاده از میله‌های تفلون و صفحه تفلون b- کشیدن جعبه فوقانی با یک میله یا زنجیر انعطاف‌پذیر (Liu et al., 2005) ۳۴
شکل ۳-۱: مصالح مورد آزمایش به تفکیک اندازه الک ۳۸
شکل ۳-۲: دستگاه آزمایش بارگذاری نقطه‌ای ۴۲
شکل ۳-۳: نمونه‌های ۳، ۴، ۵ و ۷ از سنگ‌های شکسته شده در آزمایش بار نقطه‌ای ۴۳
شکل ۳-۴: نمای کلی دستگاه برش مستقیم cm ۱۵×۳۰×۳۰ ..... ۴۵
شکل ۳-۵: نمای جعبه برش دستگاه برش مستقیم cm ۱۵×۳۰×۳۰ ..... ۴۵
شکل ۳-۶: منحنی دانه‌بندی اولیه و دانه‌بندی مدل‌سازی شده ۴۷
شکل ۳-۷: a – منحنی تنش برشی- جابجایی افقیb – منحنی جابجایی قائم – جابجایی افقی $\sigma_n = ۱۱۱\ kPa$ ۵۰
شکل ۳-۸: a – منحنی تنش برشی- جابجایی افقیb – منحنی جابجایی قائم – جابجایی افقی $\sigma_n = ۲۲۲\ kPa$ ۵۱
شکل ۳-۹: a – منحنی تنش برشی- جابجایی افقیb– منحنی جابجایی قائم – جابجایی افقی $\sigma_n = ۴۴۴\ kPa$ ۵۲
شکل ۳-۱۰: a – منحنی تنش برشی- جابجایی افقیb– منحنی جابجایی قائم – جابجایی افقی $\sigma_n = ۶۶۶\ kPa$ ۵۳
شکل ۳-۱۱: a – منحنی تنش برشی- جابجایی افقیb – منحنی جابجایی قائم – جابجایی افقی $\sigma_n = ۷۷۷\ kPa$ ۵۴
شکل ۳-۱۲: منحنی میانگین تنش برشی – جابجایی افقی در سطوح تنش مختلف ۵۵
شکل ۳-۱۳: منحنی میانگین جابجایی قائم – جابجایی افقی در سطوح تنش مختلف ۵۵
شکل ۳-۱۴: شکل شماتیک مقاومت برشی برحسب جابجایی افقی ۵۷
شکل ۳-۱۵: شکل شماتیک جابجایی قائم بر حسب جابجایی افقی ۵۷
شکل ۳-۱۶: مقادیر مقاومت برشی ماکزیمم بر حسب سربار قائم در حالت خشک ۵۹
شکل ۳-۱۷: مقادیر مقاومت برشی باقیمانده بر حسب سربار قائم در حالت خشک ۵۹
شکل ۳-۱۸: مقادیر جابجایی افقی معادل تنش برشی ماکزیمم بر حسب سربار قائم در حالت خشک ۶۰
شکل ۳-۱۹: مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در اوج بر حسب سربار قائم در حالت خشک ۶۰
شکل ۳-۲۰: مقادیر زاویه اصطکاک باقیمانده بر حسب سربار قائم در حالت خشک ۶۱
شکل ۳-۲۱: مقادیر زاویه اتساع بر حسب سربار قائم در حالت خشک ۶۱
شکل ۳-۲۲: مقادیر شاخص شکست مارشال بر حسب سربار قائم در حالت خشک ۶۲
شکل ۳-۲۳: مقادیر G^* در اوج بر حسب سربار قائم در حالت خشک ۶۲
شکل ۳-۲۴: مقادیر G^* در ۵۰٪ تنش برشی ماکزیمم بر حسب سربار قائم در حالت خشک ۶۳
شکل ۳-۲۵: $Log\tau$ بر حسب $Log\sigma_n$ a- با استفاده از میانگین تنش برشی ماکزیمم در هر آزمایشb - با استفاده از نتایج کلیه آزمایش‌ها ۶۴

شکل ۳-۲۶: منحنی پوش گسیختگی مصالح خشک ۶۵
شکل ۳-۲۷: کاهش زاویه اصطاک داخلی بر حسب a- $\left(\frac{\sigma'_n}{Pa}\right)$ و b- $Log\left(\frac{\sigma'_n}{Pa}\right)$ ۶۶
شکل ۳-۲۷ (ادامه): کاهش زاویه اصطاک داخلی بر حسب a- $\left(\frac{\sigma'_n}{Pa}\right)$ و b- $Log\left(\frac{\sigma'_n}{Pa}\right)$ ۶۷
شکل ۳-۲۸: a – منحنی تنش برشی- جابجایی افقیb – منحنی جابجایی قائم – جابجایی افقی $\sigma_n = ۱۱۱\ kPa$ ۷۰
شکل ۳-۲۹: a – منحنی تنش برشی- جابجایی افقیb – منحنی جابجایی قائم – جابجایی افقی $\sigma_n = ۲۲۲\ kPa$ ۷۱
شکل ۳-۳۰: a – منحنی تنش برشی- جابجایی افقیb – منحنی جابجایی قائم – جابجایی افقی $\sigma_n = ۴۴۴\ kPa$ ۷۲
شکل ۳-۳۱: a – منحنی تنش برشی- جابجایی افقیb – منحنی جابجایی قائم – جابجایی افقی $\sigma_n = ۶۶۶\ kPa$ ۷۳
شکل ۳-۳۲: a – منحنی تنش برشی- جابجایی افقیb – منحنی جابجایی قائم – جابجایی افقی $\sigma_n = ۷۷۷\ kPa$ ۷۴
شکل ۳-۳۳: منحنی میانگین تنش برشی – جابجایی افقی در سطوح تنش مختلف ۷۶
شکل ۳-۳۴: منحنی میانگین جابجایی قائم – جابجایی افقی در سطوح تنش مختلف ۷۶
شکل ۳-۳۵: مقادیر مقاومت برشی ماکزیمم بر حسب سربار قائم در حالت اشباع ۷۷
شکل ۳-۳۶: مقادیر مقاومت برشی باقیمانده بر حسب سربار قائم در حالت اشباع ۷۸
شکل ۳-۳۷: مقادیر جابجایی افقی معادل تنش برشی ماکزیمم بر حسب سربار قائم در حالت اشباع ۷۸
شکل ۳-۳۸: مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در اوج بر حسب سربار قائم در حالت اشباع ۷۹
شکل ۳-۳۹: مقادیر زاویه اصطکاک باقیمانده بر حسب سربار قائم در حالت اشباع ۷۹
شکل ۳-۴۰: مقادیر زاویه اتساع بر حسب سربار قائم در حالت اشباع ۸۰
شکل ۳-۴۱: مقادیر شاخص شکست مارشال بر حسب سربار قائم در حالت اشباع ۸۰
شکل ۳-۴۲: مقادیر G^* در اوج بر حسب سربار قائم در حالت اشباع ۸۱
شکل ۳-۴۳: مقادیر G^* در ۵۰٪ تنش برشی ماکزیمم بر حسب سربار قائم در حالت اشباع ۸۱
شکل ۳-۴۴: $Log\tau$ بر حسب $Log\sigma_n$ با استفاده از نتایج آزمایش‌ها در حالت اشباع ۸۲
شکل ۳-۴۵: منحنی پوش گسیختگی مصالح در حالت اشباع ۸۳
شکل ۳-۴۶: زاویه اصطاک داخلی بر حسب a- $\left(\frac{\sigma'_n}{Pa}\right)$ و b- $Log\left(\frac{\sigma'_n}{Pa}\right)$ ۸۴
شکل ۳-۴۷: منحنی میانگین تنش برشی- جابجایی افقی در سطوح تنش مختلف دو حالت خشک و اشباع ۸۷
شکل ۳-۴۸: منحنی میانگین جابجایی قائم- جابجایی افقی در سطوح تنش مختلف دو حالت خشک و اشباع ۸۷
شکل ۳-۴۹: مقادیر مقاومت برشی ماکزیمم بر حسب سربار قائم در دو حالت خشک و اشباع ۸۸
شکل ۳-۵۰: مقادیر مقاومت برشی باقیمانده بر حسب سربار قائم در دو حالت خشک و اشباع ۸۹

شکل ۳-۵۱: مقادیر جابجایی افقی معادل تنش برشی ماکزیمم بر حسب سربار قائم در دو حالت خشک و اشباع ۸۹
شکل ۳-۵۲: مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در اوج بر حسب سربار قائم در دو حالت خشک و اشباع ۹۰
شکل ۳-۵۳: مقادیر زاویه اصطکاک باقیمانده بر حسب سربار قائم در دو حالت خشک و اشباع ۹۰
شکل ۳-۵۴: مقادیر زاویه اتساع بر حسب سربار قائم در دو حالت خشک و اشباع ۹۲
شکل ۳-۵۵: مقادیر شاخص شکست مارشال بر حسب سربار قائم در دو حالت خشک و اشباع ۹۲
شکل ۳-۵۶: مقادیر G^* در اوج بر حسب سربار قائم در دو حالت خشک و اشباع ۹۳
شکل ۳-۵۷: مقادیر G^* در ۵۰٪ تنش برشی ماکزیمم بر حسب سربار قائم در دو حالت خشک و اشباع ۹۳
شکل ۳-۵۸: دانه‌بندی مصالح مورد استفاده توسط Gharavy (1996) ۹۵
شکل ۳-۵۹: دانه‌بندی مصالح مورد استفاده توسط توفیق ریحانی، ۱۳۷۹ ..... ۹۵
شکل ۳-۶۰: مقاومت برشی ماکزیمم بر حسب سربار قائم ۹۶
شکل ۳-۶۱: مقاومت برشی باقیمانده بر حسب سربار قائم ۹۷
شکل ۳-۶۲: مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در اوج بر حسب سربار قائم ۹۸
شکل ۳-۶۳: مقادیر زاویه اصطکاک باقیمانده بر حسب سربار قائم ۹۹
شکل ۳-۶۴: مقادیر زاویه اتساع بر حسب سربار قائم ۹۹
شکل ۳-۶۵: مقادیر شاخص شکست مارشال بر حسب سربار قائم ۱۰۰
شکل ۳-۶۶: مقادیر G^* در اوج بر حسب سربار قائم ۱۰۱
شکل ۴-۱: رفتار تنش برشی- جابجایی افقی در حالت خشک- اشباع در مقایسه با رفتار خشک و اشباع ($\sigma_n = ۴۴۴\ kPa$) ۱۰۷
شکل ۴-۲: رفتار جابجایی قائم- جابجایی افقی در حالت خشک-اشباع در مقایسه با رفتار خشک و اشباع ($\sigma_n = ۴۴۴\ kPa$) ۱۰۷
شکل ۴-۳: رفتار تنش برشی-جابجایی افقی در حالت خشک-اشباع در مقایسه با میانگین نتایج حالت خشک و اشباع ($\sigma_n = ۴۴۴\ kPa$) ۱۰۸
شکل ۴-۴: رفتار جابجایی قائم-جابجایی افقی در حالت خشک-اشباع در مقایسه با میانگین نتایج حالت خشک و اشباع ($\sigma_n = ۴۴۴\ kPa$) ۱۰۸
شکل ۴-۵: رفتار تنش برشی-جابجایی افقی در حالت خشک-اشباع در مقایسه با رفتار خشک و رفتار اشباع ($\sigma_n = ۶۶۶\ kPa$) ۱۰۹
شکل ۴-۶: رفتار جابجایی قائم-جابجایی افقی در حالت خشک-اشباع در مقایسه با رفتار خشک و رفتار اشباع ($\sigma_n = ۶۶۶\ kPa$) ۱۰۹
شکل ۴-۷: رفتار تنش برشی-جابجایی افقی در حالت خشک-اشباع در مقایسه با میانگین نتایج حالت خشک و اشباع ($\sigma_n = ۶۶۶\ kPa$) ۱۱۰

شکل ۴-۸: رفتار جابجایی قائم-جابجایی افقی در حالت خشک-اشباع در مقایسه با میانگین نتایج حالت خشک و اشباع ($\sigma_n = ۶۶۶\,kPa$) ۱۱۰

شکل ۴-۹: رفتار تنش برشی-جابجایی افقی در حالت خشک-اشباع در مقایسه با رفتار خشک و رفتار اشباع ($\sigma_n = ۷۷۷\ kPa$) ۱۱۱

شکل ۴-۱۰: رفتار جابجایی قائم-جابجایی افقی در حالت خشک-اشباع در مقایسه با رفتار خشک و رفتار اشباع ($\sigma_n = ۷۷۷\,kPa$) ۱۱۱

شکل ۴-۱۱: رفتار تنش برشی-جابجایی افقی در حالت خشک-اشباع در مقایسه با میانگین نتایج حالت خشک و اشباع ($\sigma_n = ۷۷۷\ kPa$) ۱۱۲

شکل ۴-۱۲: رفتار جابجایی قائم-جابجایی افقی در حالت خشک-اشباع در مقایسه با میانگین نتایج حالت خشک و اشباع ($\sigma_n = ۷۷۷\,kPa$) ۱۱۲

شکل ۴-۱۳: مقاومت برشی ماکزیمم مصالح در سه حالت خشک، اشباع و خشک-اشباع بر حسب سطح تنش ۱۱۴

شکل ۴-۱۴: زاویه اصطکاک داخلی مصالح در سه حالت خشک، اشباع و خشک-اشباع بر حسب سطح تنش ۱۱۴

شکل ۴-۱۵: مقادیر افت تنش برشی در اثر اشباع شدن پس از جبران افت ناگهانی اولیه بر حسب تنش نرمال ۱۱۵

شکل ۴-۱۶: افزایش ناگهانی تغییرمکان قائم در اثر اشباع شدگی بر حسب تنش نرمال ۱۱۶

شکل ۴-۱۷: زاویه اتساع حداکثر مصالح در سه حالت خشک، اشباع و خشک-اشباع بر حسب تنش نرمال ۱۱۶

شکل ۴-۱۸: شاخص شکست مارشال در سه حالت خشک، اشباع و خشک-اشباع بر حسب تنش نرمال ۱۱۷

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱: کاربرد مصالح سنگریزه‌ای (Gharavy, 1996) ۴
جدول ۲-۲: روابط برشی ارائه شده برای مصالح سنگریزه‌ای ۳۵
جدول ۳-۱: خصوصیات مصالح ۳۹
جدول ۳-۲: نتایج آزمایش بارگذاری نقطه‌ای روی مصالح مورد آزمایش ۴۱
جدول ۳-۳: استفاده از شاخص مقاومت بار نقطه‌ای در طبقه‌بندی ژئومکانیکی سنگ‌ها (Beiniawski, 1973) ۴۴
جدول ۳-۴: نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های خشک ۵۸
جدول ۳-۵: پیش بینی مقادیر زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از روابط پیشنهادی ۶۸
جدول ۳-۶: نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های اشباع ۷۵
جدول ۳-۷: خصوصیات آزمایش‌های مختلف ۹۴
جدول ۴-۱: نتایج آزمایش‌ها در حالت خشک-اشباع ۱۱۳

فصل ۱

مقدمه

کاربرد وسیع مصالح سنگریزه‌ای در دهه‌های گذشته در مهندسی ژئوتکنیک از قبیل ساخت سد، زیرسازی راه و اسکله‌سازی، لزوم شناخت هرچه دقیق‌تر رفتار این مصالح را به همراه داشته است. از بین کاربردهای مختلف این مصالح، سدسازی بیش از همه مورد توجه می‌باشد. قدیمی‌ترین سد خاکی با حدود ۶۰۰۰ سال قدمت در منطقه حوا در اردن فعلی قرار داشته که از خاک با پوشش سنگی تشکیل شده بود.

خاک و سنگ مصالحی هستند که طی فرایندهای پیچیده‌ای به وجود آمده‌اند. خاک مصالحی متشکل از دامنه وسیعی از اندازه دانه‌ها، مثل رس، سیلت، ماسه، شن، قلوه سنگ و سنگریزه می‌باشد که دو اندازه آخر در پوسته سدهای خاکی و سنگریزه‌ای استفاده می‌شوند.

سدهای سنگریزه‌ای به دلیل قابلیت انعطاف‌پذیری، ظرفیت بالا در جذب انرژی زلزله و انطباق‌پذیری با شرایط مختلف پی و شرایط مختلف جوی امروزه به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. با پیشرفت و گسترش علوم مهندسی و پیشرفت‌های شگرف در تکنولوژی، گامی نوین در شناخت و پیش‌بینی رفتار این مصالح برداشته شده است و در سال‌های اخیر مطالعات زیادی به منظور تعیین خصوصیات مهندسی مصالح سنگریزه‌ای انجام گرفته است.

به نحوی که امروزه ساختمان بزرگترین سدهای دنیا با ارتفاع بیش از ۳۰۰ متر نظیر سد نورک (Nurce) و سد روگان (Rogun) در تاجیکستان از مصالح سنگریزه‌ای است.

برای طراحی یک سازه متشکل از مصالح سنگریزه‌ای، پارامترهای طراحی مصالح باید به درستی شناخته شوند. در این زمینه استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی بزرگ مقیاس بسیار مفید می‌باشد. اگرچه که ابعاد بزرگ این مصالح مشکلاتی را در انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و انطباق نتایج آن‌ها با شرایط عملی ایجاد نموده است.

در این پژوهش تلاش شده است تا گامی هرچند کوچک در افزایش شناخت و آگاهی بیشتر نسبت به رفتار این مصالح برداشته شود. بر این اساس، فصل دوم این پایان‌نامه به مروری اجمالی و تا حد امکان جامع بر مطالعات انجام شده بر روی این مصالح اختصاص داده خواهد شد و عوامل موثر بر رفتار مکانیکی این مصالح در آزمایشگاه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی مصالح سنگریزه‌ای آزمایش‌هایی انجام شده است. هدف اصلی این آزمایش‌ها بررسی مقاومت برشی مصالح و اثر اشباع‌شدگی بر روی رفتار این مصالح می‌باشد. در فصل سوم نتایج آزمایش‌ها در دو حالت خشک و اشباع در سطوح تنش مختلف ارائه شده و در پایان این فصل نتایج حاصل از این آزمایش‌ها با نتایج حاصل از برخی آزمایش‌ها از سایر مراجع مقایسه خواهد شد.

از روش‌های متداول در ساخت سد، استفاده از مصالح به صورت خشک است. به این ترتیب که به دلایل اقتصادی مصالح سنگریزه‌ای به صورت خشک در لایه‌های مختلف ریخته شده و متراکم می‌شوند و سپس سد آبگیری می‌شود. این روش در مقایسه با روش تر که نیاز به حجم زیادی آب برای مرطوب کردن مصالح دارد اقتصادی‌تر است. در فصل چهارم نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی این مصالح به روش خشک-اشباع مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در نهایت در فصل پنجم نتایج حاصل جمع‌بندی شده و پیشنهاداتی برای ادامه کار در این زمینه ارائه خواهد شد.

فصل ۲

مروری بر مطالعات گذشته

امروزه مصالح سنگریزه‌ای به طور گسترده‌ای در مهندسی ژئوتکنیک به ویژه سدسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. گستردگی استفاده از این مصالح به دلیل مزایای فراوان آن است. این مصالح ارزان بوده و از منابع طبیعی به دست می‌آید. در نتیجه نیاز به استفاده از مصالحی همچون سیمان و فولاد را کاهش می‌دهد. کاملا مکانیزه اجرا می‌شود و هزینه نیروی انسانی در اجرا را به حداقل می‌رساند. در شرایط جوی مختلف قابل اجرا است و تنوع زیادی به لحاظ جنس دارد که امکان ساخت سد با ارتفاع بالا را نیز فراهم می‌کند. سرعت اجرای آن نسبت به سایر روش‌ها بیشتر است و شیب ساخت سد سنگریزه‌ای نسبت به سد خاکی بیشتر است. در نتیجه حجم مصالح مصرفی در آن پایین‌تر می‌باشد. از طرفی به دلیل درشت دانه بودن و قابلیت زهکشی بالا، از ایجاد فشار آب حفره‌ای اضافی در زمان آبگیری جلوگیری می‌کند. بر این اساس این مصالح می‌توانند در موارد مختلفی مورد استفاده قرار گیرند. جدول ۲-۱ موارد استفاده از این مصالح را به طور خلاصه بیان می‌کند.

جدول ۲-۱: کاربرد مصالح سنگریزه‌ای (Gharavy, 1996)

این مصالح می‌توانند در موارد زیر مورد استفاده قرار گیرند: به عنوان مصالح ساختمانی به عنوان مصالح پرکننده
• در ساخت راه و خاکریز
• پی و سنگفرش
• مهندسی معدن به عنوان مصالح پرکننده در خاکبرداری و خاکریزی
• مهندسی محیط زیست در مدفن‌های زباله برای مقاصد زیر: ۱- خاکریزی پشت سازه ۲- پایدارسازی شیب ۳- کف مدفن‌های انباشت زباله
• مهندسی سد و سدهای سنگریزه‌ای ۱۱۴ سد از سدهای با ارتفاع بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر و حجم ۱ تا ۲۰ میلیون مترمکعب در جهان از انواع زیر می‌باشند: هسته مرکزی خاکی ۱- پوسته خاکی ۲- پوسته بتن مسلح ۳- دیافراگم بتن مسح ۴- پوسته فلزی
• مهندسی ساحل و مهندسی آب ساخت موج شکن فیلتراسیون

در طراحی سدهای سنگریزه‌ای تعیین پارامترهای طراحی مصالح ضروری است. انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس، روشی برای تعیین پارامترهای طراحی سنگریزها می‌باشد. آزمایش‌های سنگریزها را می‌توان در دو گروه عمده زیر دسته‌بندی نمود:

۱- آزمایش‌های درجا

۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی

آزمایش‌های درجای سنگریزه‌ها را می‌توان به بخش‌های زیر قسمت کرد: بارگذاری صفحه، تعیین تراکم درجا، نفوذپذیری و مقاومت برشی. اما به دلیل هزینه‌های بالا و صعوبت اجرا، این آزمایش‌ها به ندرت انجام شده و کمتر نتایج آن‌ها در دسترس می‌باشد.

هدف از آزمایش‌های آزمایشگاهی روی مصالح سنگریزه‌ای، شناسایی مقاومت و خصوصیات تنش-کرنش به منظور برآورد درجه ایمنی و رفتار ساختمان سنگریزه‌ای است. از آزمایش‌های آزمایشگاهی متداول در این زمینه می‌توان موارد زیر را نام برد:

- آزمایش سه محوری
- آزمایش کرنش مسطح
- آزمایش اودومتر
- آزمایش برش مستقیم

اغلب در پروژه‌های سدسازی با مصالح سنگریزه‌ای، قطعات سنگ تا ابعاد ۱ متر یا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابعاد بزرگ این سنگ‌ها مشکلات زیادی در تعیین خصوصیات مهندسی این مصالح در آزمایشگاه ایجاد می‌کند. طراحی تجهیزات آزمایشگاهی برای آزمایش مصالحی با این ابعاد عموما غیرعملی و غیر اقتصادی می‌باشد. بنابراین کاهش توزیع ابعاد و اندازه ذرات برای آزمایش ضروری به نظر می‌رسد. یکی از مشکلات موجود در این زمینه مسئله واقعی بودن نمونه‌های سنگریزه‌ای است که به ابعاد نمونه بستگی دارد. نمونه‌های آزمایشگاهی همیشه چند درجه کوچک‌تر می شوند. این نمونه‌ها همواره باید به اندازه‌ای کوچک شوند که مدل اصلی و نمونه بازسازی شده رفتاری مشابه داشته باشند. به این علت ابعاد نمونه آزمایشگاهی که بتوان از روی آن رفتار واقعی مصالح در محل را برآورد نمود، همیشه مبهم بوده است.

۲-۱- مدل‌سازی مصالح سنگریزه‌ای

در مدل‌سازی مصالح سنگریزه‌ای در یک آزمایش خاص دو نکته حائز اهمیت است، اول تعیین حداکثر اندازه دانه و دوم تعیین منحنی دانه‌بندی مناسب که معرف ویژگی‌های مقاومتی مصالح اصلی باشد.