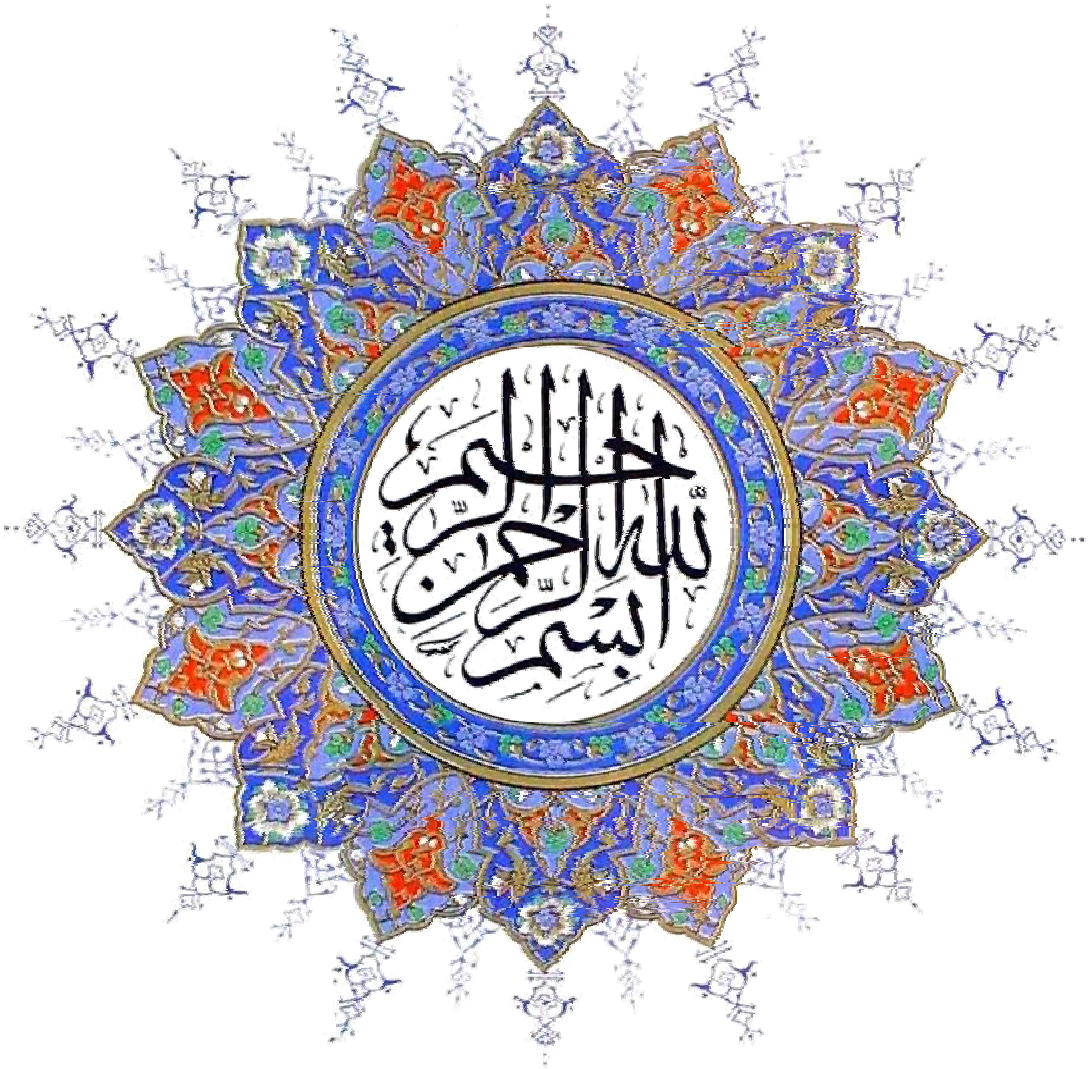


PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

به نام خدا

دانشگاه تهران
پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده عمران

بررسی تجربی ناهمسانی در رفتار مونوتونیک ماسه اشباع و تاثیر افزودن سیلت

نگارش

هادی بهادری

استاد راهنما

دکتر عباس قلندرزاده

رساله برای دریافت درجه دکتری در

رشته مهندسی عمران – خاک و پی

مرداد 1387

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

بنام خدا

دانشگاه تهران

دانشکده عمران

گواهـــی دفـــاع از رسالـــه دکتـــری

هیات داوران رساله دکتری آقای : **هادی بهادری** رشته : **مهندسی عمران** گرایش : **مکانیک خاک و مهندسی پی**

با عنوان : " **بررسی تجربی ناهمسانی در رفتار مونوتونیک ماسه اشباع و تأثیر افزودن سیلت**"

را در تاریخ : ۸۷/۰۵/۱۳ با درجه **عالی** ارزیابی نمود.

ردیف	مشخصات هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا موسسه	امضاء
۱	استاد راهنما	دکتر عباس قلندرزاده	استادیار	دانشگاه تهران	
۲	استاد مشاور				
۳	استاد مدعو خارجی ۱-	دکتر سیدمحسن حائری	استاد	دانشگاه صنعتی شریف	
	۲-	دکتر محمدکاظم جعفری	استاد	پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله	
۴	استاد مدعو داخلی ۱-	دکتر علی فاخر	دانشیار	دانشگاه تهران	
	۲-	دکتر بهروز گنمیری	استاد	دانشگاه تهران	
۵	معاون تحصیلات تکمیلی دانشکده مهندسی عمران	دکتر عباس بابازاده	استادیار	دانشگاه تهران	

تذکر : **این برگه پس از تکمیل توسط هیات داوران در نخستین صفحه رساله درج می گردد.**

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

ای منی آواره قویان اباالفضل ابالفضل،
یاتما اویان یاتدی علم اباالفضل اباالفضل

تقدیم به

ساحت مقدس سقای کربلا

و

پدر و مادر عزیزم

و

همسر مهربانم

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

تقدیر و تشکر

پس از حمد و ثنای ذات اقدس الهی به پاس من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق از اساتید و سروران عزیزم تشکر و قدردانی می‌نمایم.

در راس همه عزیزان تقدیر ویژه از استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای **دکتر عباس قلندرزاده** می‌نمایم که در طول دوره دکتری و نیز کارشناسی ارشد بار اصلی زحمات اینجانب برعهده ایشان بود و هرچه آموختم از گوشه‌ای از ذخایر علمی ایشان بوده است.

در مرحله بعد، از اساتید داور رساله اینجانب، آقایان **دکتر علی فاخر، دکتر بهروز گتمیری، دکتر سید محسن حائری، دکتر محمد کاظم جعفری و دکتر منوچهر لطیفی** تقدیر و تشکر می‌نمایم. تشویق-های دکتر فاخر و آموختن روش تحقیق و نگاه علمی از ایشان، شادابی علمی و پشتکار دکتر گتمیری، دقت نظر و دلسوزی‌های دکتر لطیفی، آموختن اصول مکانیک خاک در دوره کارشناسی از دکتر حائری و کسب انگیزه ورود به این رشته از سوی ایشان هیچگاه برای اینجانب قابل فراموش شدن نخواهد بود.

از کمک‌های قابل توجه پروفسور **Ikuo Towhata** خصوصا در پیشنهاد مبنای انرژی در تهیه نمونه‌ها، از زحمات پروفسور **Mitsotoshi Yoshimine** درخصوص مشاوره های ایشان در مورد فرمولاسیون معادلات کرنش، از مباحثات ارزنده شفاهی با پروفسور **Roman Verdugo** در خصوص روانگرایی، از آقای دکتر **حبیب شاه‌نظری** بابت همکاری در ساخت و کالیبراسیون سنسور یکپارچه تنش محوری و پیچشی، از آقای مهندس **امیر رجبی** بابت ساخت مدار الکترونیکی دستگاه برش پیچشی، از آقای **بهروز مولایی** بابت تهیه برنامه کامپیوتری کنترلی، از آقای مهندس **سعید چلیپا** و مهندس **سید علی طباطبایی** بابت همکاری در ساخت قطعات مکانیکی دستگاه تشکر می‌نمایم و به همه این سروران قدردانی عمیق خود را ابراز می‌دارم.

در طی مراحل مختلف دوره دکتری از نظرات علمی آقایان دکتر مجید **مرادی**، دکتر مسعود **پلاسی**، دکتر علی‌اصغر **میرقاسمی**، دکتر اورنگ **فرزانه**، دکتر اسدا.. و علی **نورزاد**، دکتر فردین **جعفرزاده** و دکتر **Sitharam**، بهره فراوان گرفتم که جای دارد از همه این عزیزان تقدیر نمایم.

در مراحل مختلف انجام این پایان‌نامه دوستان زیادی به اینجانب لطف نموده و کمکهای فراوانی برای انجام هرچه بهتر این رساله رساندند که جای دارد از آقایان مهندسین سیفعلی **ضربی**، کامبیز **خورشید**، احسان **سیدی**، علیرضا **احمدی**، محمد **آبادی**، محمدحسین **ابراهیمی**، سیدامیر **یزدان‌پرست**، رضا **رفیعی**، نوید **خیاط**، امیر **عربلویی**، رضا **شاکری**، حمیدرضا **توکلی**، هادی **شهیر**، محمد **ابراهیم‌نیا**، فریدون **قبادی**، فرزاد **آریادوست**، محمود **قهرمانی**، رامین **صفاریان**، سیامک **فیضی**، علیرضا **میردامادی**، مجتبی

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

میرجلیلی، حامد **محمودزاده**، بهنام **وخشوری**، شمس‌الدین **موسوی چاشمی**، نیما **اکبری**، حسن **اکبری**، محمدمهدی**علیزاده**، طیب **علیجانی**، علیرضا **شکوری**، محمدعلی **سلیمی**، خانم مهندس **محمودی** و آقایان دکتر علی **ذوالفقاری**، دکتر کاظم **بدو**، دکتر ایرج **میزایی**، دکتر علی **لشکری**، دکتر رامین **معتمد**، دکتر مهدی **درخشندی**، دکتر آصف **نظری** و نیز آقای یوسف **حبیب‌پور** در این خصوص تشکر نمایم.

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

چکیده

رفتار ناهمسان ذاتی ماسه و تاثیر افزودن مقادیر مختلف ریزدانه سیلت غیرپلاستیک بر آن در این تحقیق مورد بررسی واقع شده است. 76 آزمایش برش پیچشی استوانه توخالی و 30 آزمایش سه محوری تناوبی بهمراه تعداد قابل توجهی آزمایش برش مستقیم، تحکیم و نیز آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی بر روی ترکیبات مختلف ماسه و سیلت اشباع فیروزکوه برای تامین هدف این رساله انجام شده‌اند. در آزمایش‌های برش پیچشی استوانه توخالی و سه محوری از روش خشک در نمونه‌سازی استفاده شده است. جهت تنش اصلی یا زاویه انحراف تنش اصلی نسبت به محور قائم تاثیر قابل توجهی بر رفتار ماسه دارد که به ناهمسانی ذاتی فابریک ماسه حین رسوب گذاری برمی‌گردد. علاوه بر این افزودن مقادیر مختلف سیلت به ماسه میزبان باعث ایجاد یک رفتار شدیدا نرم شونده (حتی در دانسیته نسبی بالاتر در مقایسه با ماسه خالی) می‌گردد که حاکی از تمایل بیشتر ماسه‌های سیلت دار به گسیختگی جریانی در مقایسه با ماسه تمیز است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن سیلت به اسکلت ماسه تاثیر ناهمسانی را تا یک میزان آستانه کاهش می‌دهد و پس از این مقدار آستانه تاثیر ناهمسانی افزایش می‌یابد. ساختار ناهمسان ترکیب و فابریک نیمه‌پایدار و غیرپایدار ماسه-سیلت در درصدهای مختلف باعث این پدیده تلقی می‌گردد که با عکسهای میکروسکوپی نیز تشریح شده است. پتانسیل جریان با افزایش سیلت تا 30 درصد افزایش می‌یابد و این پتانسیل با زاویه تنشهای اصلی نیز ارتباط مستقیم دارد. همچنین شاخص تردی به درصد سیلت موجود (خصوصا در 30 درصد) بیشتر از زاویه تنشها وابسته است. دسته‌بندی رفتار ماسه‌های حاوی سیلت در ادامه مورد بحث واقع شده و پارامترهای مناسب جهت این دسته‌بندی شامل نسبت‌های تخلخل بین‌دانه‌ای و دانسیته نسبی عمومی مبنا بررسی شده‌اند. پایداری نمونه‌های ماسه‌ای حاوی سیلت نیز نهایتا مورد بررسی واقع شده و با شاخص‌های مختلف مقایسه شده‌اند.

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

ردیف	عنوان	صفحه
1	مقدمه	1
1-1	زمینه تحقیق	1
2-1	تعریف مساله و سوالات تحقیق	2
3-1	توجیه ضرورت انجام تحقیق	2
4-1	روش تحقیق و ساختار مطالعه	3
5-1	خلاصه رساله	3
2	مروری بر رفتارزهکشی نشده ماسه اشباع	4
1-2	مقدمه	4
2-2	نسبت تخلخل بحرانی	5
3-2	حالت پایدار تغییر شکل	7
4-2	حالت شبه پایدار و تغییر فاز	15
5-2	فاکتورهای موثر بر رفتار عمومی ماسه	19
1-5-2	دانسیته ماسه	19
2-5-2	تنش تحکیم اولیه	21
3-5-2	تاثیر مرکب دانسیته و تنش تحکیم اولیه	21
6-2	جمع‌بندی رفتار ماسه‌ها	24
3	بررسی ناهمسانی در رفتار ماسه اشباع	25
1-3	مقدمه	25
2-3	α و b تعریف پارامترهای	26
3-3	مفهوم تجربی ناهمسانی خاک	27
4-3	ناهمسانی خاک و فابریک	28
5-3	دستگاه‌های آزمایشگاهی برای مطالعه ناهمسانی	29
6-3	ناهمسانی ذاتی	32
7-3	ناهمسانی القایی	36
8-3	جهت تنش اصلی و مقدار تنش اصلی میانی	37
4	تاثیر ریزدانه‌های غیرپلاستیک سیلت بر رفتار زهکشی نشده ماسه اشباع	49
1-4	مقدمه	49
2-4	پارامترهای حالت برای مقایسه رفتار خاکهای مخلوط	49
3-4	اختلافهای محققین در بررسی تاثیر سیلت در رفتار ماسه	50
4-4	تاثیر ریزدانه بر پارامترهای چگالی خاک	51

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

5-4	بعنوان معیارهای پیش‌بینی رفتارψ و eبررسی پارامترهای	53
1-5-4	ماسه	53
2-5-4	دارماسه سیلت	54
1-2-5-4	e_f و e_sمعرفی پارامترهای	55
2-2-5-4	دانه‌ای و ریزدانه‌ای‌خط حالت پایدار بین	57
3-2-5-4	پارامتر حالت بین ذرات دانه‌ای و بین ذرات ریزدانه	57
4-2-5-4	جمع‌بندی پارامترهای تخلخل و حالت در ارزیابی رفتار ماسه‌های سیلت‌دار	58
3-5-4	پیش‌بینی رفتار	58
4-5-4	میزان ریزدانه و مقاومت حالت پایدار	61
5-5-4	میزان ریزدانه و پتانسل انهدام	61
6-5-4	بعنوان معیارهای پیش‌بینی رفتار ψ_s و ψمقایسه نتایج بر مبنای	61
7-5-4	نتایج آزمایشگاهی خطوط حالت پایدار و حالت پایدار بین دانه ای	62
6-4	تاثیر ریزدانه بر رفتار عمومی ماسه	64
1-6-4	تغییرات رفتارهای ماسه با افزودن درصد کمی ریزدانه سیلتی	65
2-6-4	تاثیر ریزدانه بالا (40 درصد) بر رفتار ماسه	66
3-6-4	جمع بندی دسته‌بندی رفتار ماسه‌های حاوی سیلت	68
7-4	ناپایداری در رفتار ماسه های حاوی سیلت	69
5	ساخت دستگاه، مراحل انجام آزمایش و فورمولاسیون	73
1-5	مجموعه آزمایش‌های انجام شده در تحقیق حاضر	73
2-5	ساخت دستگاه برش پیچشی استوانه توخالی و راه اندازی آن	74
1-2-5	سلول و نمونه	74
2-2-5	سیستم انتقال نیرو	79
3-2-5	سیستم کنترلی	85
1-3-2-5	ترانسدیوسرهای اعمال فشار و نیرو	86
2-3-2-5	سنسورها	89
3-3-2-5	(دیتالاگر)D/A و A/Dثبت داده‌ها و کارتهای	94
4-3-2-5	برنامه کامپیوتر	96
3-5	نحوه نمونه سازی و انجام آزمایش	97
1-3-5	تنظیمات اولیه	97
2-3-5	قالب های نمونه سازی	98
3-3-5	خاک مورد آزمایش	99
4-3-5	مراحل نمونه سازی	100

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

4-5	فورمولاسیون	108
1-4-5	تانسور تنش	108
2-4-5	محاسبه تنشها و کرنشها	109
6	معرفی مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه و سیلت فیروزکوه	116
1-6	مقدمه	116
2-6	خواص فیزیکی ماسه و سیلت فیروزکوه	117
1-2-6	دانه‌بندی ماسه و سیلت فیروزکوه	117
2-2-6	شکل ظاهری و کانی شناسی ماسه و سیلت فیروزکوه	119
3-2-6	نسبتهای تخلخل مینیمم و ماکزیمم در درصدهای مختلف سیلت	121
4-2-6	پارامترهای نسبت تخلخل بین دانه ای	122
5-2-6	ارزیابی شکست دانه‌های ماسه فیروزکوه حین بارگذاری	123
3-6	خواص مکانیکی ماسه فیروزکوه	124
1-3-6	نتایج آزمایشات تحکیم	124
2-3-6	نتایج آزمایشات برش مستقیم	126
4-6	ارزیابی ناهمسانی در رفتار تناوبی ماسه اشباع با دستگاه سه محوری تناوبی	132
1-4-6	CSR و rc و kتغییر جهت تنشهای اصلی و مقدار آن – پارامترهای	132
2-4-6	معرفی ابزار انجام آزمایش	135
3-4-6	نحوهٔ انجام و لیست آزمایشات	136
4-4-6	ناهمسانی	138
1-4-4-6	نمایش تاثیر ناهمسانی در تولید فشار آب حفره ای	140
5-4-6	بر پتانسیل روانگرایی ماسه فیروزکوهrcبررسی تاثیر	142
6-4-6	ارزیابی رفتار تناوبی ماسه فیروزکوه با روش انرژی	142
7-4-6	ارزیابی تاثیر ناهمسانی القایی بر رفتار ماسه اشباع فیروزکوه با روش انرژی	144
7	نتایج آزمایش‌های برش پیچشی استوانه توخالی	146
1-7	برنامه ریزی آزمایشها	146
1-1-7	تعیین نسبت‌های سیلت	146
2-1-7	تعیین روش نمونه‌سازی	147
3-1-7	تعیین تخلخل (دانسیته) نمونه‌ها- پارامتر مناسب کنترل دانسیته	148
4-1-7	جدول آزمایش‌ها و نتایج	151
8	تحلیل نتایج آزمایش‌ها و تفسیر تاثیر ناهمسانی و میزان سیلت	185
1-8	مطالعه پارامترهای ناهمسانی	185
1-1-8	زاویه تنشهای اصلی	185

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

2-1-8	نسبت تنش میانی	195
2-8	مطالعه پارامترهای حالت (p'_0 و Dr)	201
1-2-8	ماسه تمیز	201
2-2-8	ماسه حاوی 15 درصد سیلت	206
3-2-8	ماسه حاوی 30 درصد سیلت	210
3-8	جمع بندی رفتارهای نمونه های آزمایش شده	216
4-8	تفسیر ناهمسانی	217
5-8	ناپایداری	220
1-5-8	پارامترهای اتخاذ شده از ماسه‌ها	221
2-5-8	پارامترهای اتخاذ شده از خاکهای حاوی ریزدانه	226
6-8	حالت پایدار در ماسه های سیلت دار	235
7-8	ارزیابی رفتار نرم‌شونده ماسه‌های حاوی سیلت با پارامتر فشار آب حفره‌ای	237
8-8	دسته بندی رفتار ماسه های حاوی سیلت	239
9	جمع بندی و نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد برای تحقیقات آتی	241
1-9	نتایج اصلی	241
2-9	پیشنهادها	244
	مراجع	245

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

فصل اول - مقدمه

1-1- زمینه تحقیق

در سال‌های اخیر ابهامات قابل توجهی در مورد رفتار ماسه‌های اشباع رفع شده و تاثیر پارامترهای بسیاری روشن گردیده است لیکن این تحقیقات هنوز ادامه دارند. شناخت رفتار نهشته‌های خاکی خصوصا خاکهای دانه‌ای و رسیدن به مرزهای دانش در این عرصه و گسترش آن با توجه به اینکه زلزله در کشور ما یکی از چالشهای مهم است، اهمیت زیادی دارد. به لحاظ کاربردی نیز از یک‌سو با توسعه شناخت از رفتار می‌توان نرم‌افزارهایی بر مبنای مدلهای متکی بر داده‌های مستخرج از آزمایش‌ها تهیه کرده و در طراحی استفاده کرد. از سوی دیگر زمینه برای انجام آزمایشات دقیق شامل تامین دستگاه‌ها و سخت‌افزارهای لازم و نیروی انسانی و تفسیر نتایج فراهم می‌آید.
زمینه تحقیق حاضر در زمینه بررسی آزمایشگاهی رفتار خاکهای دانه‌ای در شرایط اشباع زهکشی‌نشده با تاکید بر مساله رفتار ناهمسان و نیز افزودن مقادیر مختلفی ریزدانه سیلت غیرپلاستیک است.

1-2- تعریف مساله و سوالات تحقیق

واقعیت اول: به نظر می رسد افزودن سیلت به خاک ماسه‌ای باعث افت در مقاومت و افزایش ناپایداری خاک می‌گردد و اکثر موارد واقعی بروز روانگرایی در طبیعت در خاکهای ماسه‌ای حاوی مقادیری سیلت بوده‌اند. خاکهای ماسه‌ای موجود در طبیعت نیز عمدتا ماسه تمیز نبوده و مقادیری ریزدانه در خود دارند.

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

واقعیت دوم: ناهمسانی تاثیر قابل توجهی بر رفتار خاکهای ماسه‌ای می‌گذارد و خاکها در حالت فشاری رفتاری در مقایسه با حالت کششی به مراتب مقاوم‌تر و سخت‌شونده‌تر از خود بروز می‌دهند. با این وصف اکثر مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی خاکها در مود فشاری کامل است و از این حیث نتایج آزمایشها در طراحی‌ها در جهت غیرمحافظه‌کارانه قرار می‌گیرد.

با توجه به دو واقعیت فوق نیاز به تحقیق بر روی هرکدام از دو مورد فوق احساس می‌شود. نکته دیگری که در توسعه دانش موجود در این حوزه در این تحقیق پیگیری می‌گردد اندرکنش دو مساله فوق است.

در تحقیق حاضر به سوالات زیر پاسخ داده خواهد شد:
1- نحوه تاثیر ناهمسانی ذاتی در رفتار ماسه اشباع چگونه است؟
2- تاثیر افزودن خاک ریزدانه غیرپلاستیک سیلتی بر رفتار ماسه اشباع چگونه است؟
3- افزودن سیلت چه تاثیری بر رفتار ناهمسان ماسه دارد؟
4- چگونه می‌توان خاکهای ماسه‌ای سیلت‌دار را دسته‌بندی کرد؟

1-3- توجیه ضرورت انجام تحقیق

ارزیابی دقیق رفتار ماسه‌های اشباع حاوی سیلت و کارهای تجربی در این زمینه جهت مطالعات روانگرایی، ارزیابی رفتار سازه‌های در تماس با این نوع خاکها، سازه بنا شده از این نوع خاکها، پاسخ رفتار مصالح در مقابل بارهای استاتیکی و زلزله و نهایتا توسعه و بهبود مدلهای رفتاری در این زمینه بسیار ضروری است. اینک در بسیاری اوقات در ارزیابی‌های رفتار خاک‌ها اولا مساله ناهمسانی در نظر گرفته نمی‌شود و از سوی دیگر در ارزیابی پتانسیل ناپایداری خاک‌ها با روشهای موجود وجود ریزدانه در توده ماسه‌ای یک امر شبهه‌انگیز است که عمده روشها آن را یک مزیت به حساب می-آورند درحالیکه مشاهدات جدید این مساله را مورد تردید قرار می‌دهند.
امروزه ثابت شده که یکی از پارامترهای موثر در رفتار خاکها ناهمسانی است و بسیاری از پارامترهای موثر شناخته شده دیگر در رفتار خاک‌ها ریشه در ناهمسانی دارند. تاثیر پارامترهایی نظیر تنش میانی، زاویه تنش‌های اصلی و دوران این تنش‌ها، تنش برشی و کرنش اولیه، بیش‌تحکیمی و مسیر تنش بر رفتار خاکها ریشه در ناهمسانی القایی دارند و پدیده-هایی نظیر اثر سن و سیمانتاسیون و اثرات شیمیایی و بیولوژیکی نیز این ناهمسانی را تقویت می‌کنند. پارامترهایی نظیر روش ساخت نمونه، زاویه ته‌نشینی ذرات، شکل دانه‌ها، میزان ریزدانه، توزیع اندازه دانه‌ها نیز در ایجاد ناهمسانی ذاتی فابریک تاثیر بسزایی دارند و تخلخل و تنش محصور کننده همه جانبه نیز بر این پدیده موثرند. با این همه گستردگی موضوع ناهمسانی ضرورت دارد تحقیقات فراوانی بر روی آن صورت پذیرد که تحقیق حاضر قدم کوچکی در این راستا به حساب می‌آید.

1-4- روش تحقیق و ساختار مطالعه

بسترهای تحقیقاتی در حیطه آزمایشگاهی در حال حاضر با محدودیت‌هایی مواجه است. خصوصا جهت مطالعه موضوع ناهمسانی نظر به محدودیت‌های ذاتی دستگاه‌های سه‌محوری و برش ساده و برش مستقیم نیاز به تهیه ابزاری مناسب احساس شد که در آن امکان کنترل زاویه تنشهای اصلی و نسبت تنش میانی خصوصا با امکان کنترل تنشها در شرایط

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

پس از تنش برشی ماکزیمم مهیا باشد. این مهم در حال حاضر صرفا با دستگاه برش پیچشی استوانه توخالی کنترل کرنش پیچشی و کنترل تنش قائم میسر است. از این‌رو ساخت و راه‌اندازی دستگاه برش پیچشی استوانه توخالی در این تحقیق در دستور کار قرار گرفت. اینک با راه‌اندازی این دستگاه بصورت کنترل تمام کامپیوتری با چهار موتور پنوماتیکی و یک موتور الکتریکی و یازده سنسور و تهیه نرم افزار مناسب امکان اعمال هر مسیر تنشی در تمام فضای تنش وسترگارد میسر گردیده است.

76 آزمایش برش پیچشی استوانه توخالی بر روی ماسه تمیز و نیز ماسه حاوی 15 و 30 درصد سیلت انجام پذیرفته و بررسی تاثیر تنش میانی و زاویه تنشهای اصلی در دانسیته ها و تنشهای تحکیم متفاوت در آزمایشها مورد توجه قرار گرفته‌اند. در نهایت جهت تکمیل چند آزمایش با درصد سیلت‌های بالاتر نیز انجام گردیده‌اند. علاوه بر آن جهت شناخت بهتر پارامترهای مکانیکی و فیزیکی ماسه و سیلت فیروزکوه، آزمایش‌های المانی سه‌محوری تناوبی (30 مورد)، برش مستقیم، تحکیم و عکسهای میکروسکوپی نیز کامل کننده این پروژه آزمایشگاهی بوده‌اند.

پس از راه‌اندازی دستگاه و انجام آزمایشها، مرحله سوم و نهایی یعنی تفسیر نتایج و ارزیابی آنها و حصول پاسخ‌های مناسب برای سوالات تحقیق انجام گردیده است. در این راستا با استفاده از تئوری‌های موجود و نتایج آزمایشهای فیزیکی (شامل عکسهای میکروسکوپی) و مکانیکی، تجزیه و تحلیل‌های لازم انجام و جمع‌بندی گردیده است.

1-5- خلاصه رساله

در این رساله ابتدا در فصل دوم به ادبیات فنی مختصری در مورد رفتار ماسه های اشباع و تعاریف عمده در این موضوع و سپس در فصل سوم به موضوع تاثیر ناهمسانی در رفتار زهکش‌نشده ماسه‌های اشباع تمیز پرداخته می‌شود. در فصل چهارم به موضوع تاثیر ریزدانه بر رفتار ماسه‌ها پرداخته شده و مبانی مقایسه ماسه‌ها با ماسه‌های حاوی سیلت مورد بحث قرار می‌گیرد. در فصل پنجم به مراحل ساخت و تهیه قطعات دستگاه، نحوه کنترل، فورمولاسیون، کالیبراسیون و نحوه نمونه‌سازی و انجام آزمایش اشاره می‌شود. فصل ششم به رفتار فیزیکی و مکانیکی ماسه و سیلت فیروزکوه و نتایج آزمایش‌های تناوبی سه‌محوری بر روی این مصالح می‌پردازد. در فصل هفتم نتایج آزمایشهای برش پیچشی استوانه توخالی ارائه گردیده و در فصل هشتم تحلیل این نتایج صورت می‌پذیرد. فصل نهم نیز به جمع‌بندی و ارائه پیشنهادها اختصاص دارد.

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

فصل دوم – مروری بر رفتار زهکشی نشده ماسه اشباع

2-1- مقدمه

قبل از ورود به بحث در خصوص خاک‌های ماسه‌ای حاوی ریزدانه، شایسته است در خصوص رفتار خاک‌های ماسه‌ای و مسائل مرتبط با آن مباحثی مطرح گردد. تا امروز محققین علم مکانیک خاک در حوزه های آزمایشگاهی و نیز مدلسازی رفتار خاک‌های ماسه‌ای اشباع در شرایط زهکشی‌شده و زهکشی‌نشده بررسی‌های بسیار زیادی انجام داده‌اند و اینک دستاوردهای بسیار زیادی در این خصوص موجود است. به علت پیچیدگی‌های رفتار ماسه‌های اشباع در شرایط زهکشی نشده عمدتا مطالعات در این شرایط انجام شده است. مفاهیم اصلی مورد بحث در این حوزه ارتباط تغییر شکل‌ها با فشار آب منفذی است که تولید فشار آب منفذی نیز ارتباط تنگاتنگی با نوع بارگذاری و شرایط اولیه خاک دارد. در این فصل بررسی تاریخی رفتارشناسی و تلاشهای صورت گرفته جهت پیش‌بینی رفتار ماسه‌های اشباع و پدیده‌های مرتبط از جمله روانگرایی و نیز پارامترهای موثر در رفتار این خاکها با تاکید بر نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

در سال 1935 در یک سخنرانی آقای کاساگرانده نتیجه گیری نمود که حین تغییر شکل برشی زهکشی شده، ماسه های شل یا متراکم تمایل دارند به "دانسیته بحرانی" یا "نسبت تخلخل بحرانی" میل کنند که در آن نسبت تخلخل، "خاک غیرچسبنده می‌تواند بدون تغییر حجم، تغییر شکل دلخواه یا به تعبیری جریان پیدا کند". او همچنین ابراز کرد که اگر ماسه اشباع تحت حجم یکسان تحت برش قرار گیرد، در اینصورت تمایل به تغییر حجم، به تغییر در فشار آب حفره ای منجر خواهد شد. بدینصورت که ماسه با نسبت تخلخل کمتر از نسبت تخلخل بحرانی افزایش فشار آب حفره‌ای تجربه خواهد کرد که منجر به کاهش مقاومت برشی و در صورت قابل توجه بودن این کاهش باعث جاری شدن خاک خواهد شد.

از آن زمان به بعد تلاشهای بسیاری برای تعیین نسبت تخلخل بحرانی در آزمایشگاه انجام پذیرفته است. روسکو و همکارانش در سال 1958 برای اولین بار وجود این نسبت تخلخل را در مواد غیر چسبنده و گلوله‌های شیشه‌ای و

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

ساچمه‌های فولادی در آزمایش‌های برش ساده ثابت کردند. هرچند تا آن زمان، کاساگرانده مفهوم "ساختار جریان" را پیشنهاد کرده بود، چون توضیح گسیختگی جریانی در سد فورت‌پک (واتسون، 1940) صرفاً با مفهوم تخلخل بحرانی، کافی نبود. یافته‌های گزارش شده توسط روسکو در سال 1958 در روشن کردن وجود "ساختار جریان" کمکی نکرد. کاساگرانده فرض کرد که در لغزش حین روانگرایی، موقعیت نسبی دانه‌ها بصورت ثابت تغییر می‌کند به شکلی که موجب مقاومت حداقل شود. او توضیح داد که تغییر دانه‌ها از یک آرایش ساختمانی نرمال به ساختار جریان تقریبا بصورت تصادفی در یک هسته آغاز می‌شود و سپس بصورت عکس العمل زنجیروار به توده توزیع می‌شود و این عکس العمل می‌تواند ماهیت خودبخودی لغزشهای روانگرا را توضیح دهد. با بررسی گسیختگی‌های متعدد در آزمایشگاه کاساگرانده نتیجه گرفت که احتمالاً هیچگاه امکان بازسازی مجدد شرایط واقعی در آزمایشگاه میسر نخواهد شد حتی اگر تنشها و کرنشها در نمونه‌ها کاملا یکنواخت باشد.

نهایتاً کاسترو در سال 1969 موفق شد "ساختار جریان" را در شرایط آزمایشگاهی بازسازی کند. در شروع تحقیق، کاساگرانده پیشنهاد کرد که بهترین راه برای بازسازی شرایط روانگرایی در آزمایشگاه استفاده از یک دستگاه "برش پیچشی" خواهد بود که آزمایش بر روی ماسه‌های اشباع با حجم ثابت را دا تغییر شکلهای خیلی بزرگ برشی مقدور خواهد ساخت. مزیت این دستگاه آن است که کرنشهای واقعی در حین روانگرایی می‌تواند با این دستگاه بدست آید چراکه در دستگاه سه‌محوری کرنشهای محوری به حداکثر 20% محدود است. اما طراحی و ساخت دستگاهی با این مشخصات بسیار کار سختی بود و امروز نیز با چالشهای زیادی محققین را درگیر می‌کند. لذا در کار آقای کاسترو با پیشنهاد آقای پولوس مقرر گردید از دستگاه سه محوری استفاده شود با این تفاوت که با نظر کاساگرانده بجای کنترل کرنش از کنترل تنش بهره گرفته شد.

از زمان این تحقیق به بعد تعداد بسیار زیادی تحقیق در خصوص روانگرایی و پدیده های مرتبط در ادبیات فنی گزارش شده است که بر پایه آزمایشات مونوتونیک و عمدتاً با دستگاه سه‌محوری انجام شده‌اند (کاساگرانده 1970، کاساگرانده 1975، کاسترو و همکاران 1982، پولوس و همکاران 1985، وید و چرن 1985، وردوگو 1992، ایشی هارا 1993). مشاهده رفتار روانگرایی صرفاً با آزمایشات سه‌محوری فشاری می‌تواند به تخمین‌های دست بالا از مقاومت برشی و غیرمحافظه‌کارانه از پتانسیل روانگرایی منجر شود (بیشاپ 1972، میورا و توکی 1984، هانازاوا 1980، آلارکون-گوزمان و همکاران 1988، وید و همکاران 1990، یوشیمینه 1996).

2-2- نسبت تخلخل بحرانی

بر اساس مشاهده رفتار تغییر حجم ماسه‌های شل و متراکم در آزمایشهای برش مستقیم و نیز بر اساس حس مهندسی، کاساگرانده در سال 1940 نظریه‌ای را مطرح کرد که ماسه‌های شل و متراکم حین برش، انقباض یا انبساط می‌یابند تا اینکه به یک حجم حالت پایدار (یا نسبت تخلخل یا دانسیته حالت پایدار) برسند. این حالت "دانسیته بحرانی" یا "نسبت تخلخل بحرانی" نامیده شد.

در ابتدا کاساگرانده فرض کرد که نسبت تخلخل بحرانی از تنش قائم مستقل است اما بعد با انجام آزمایشهایی با تنشهای قائم بزرگتر نتیجه‌گیری کرد که نسبت تخلخل بحرانی تابعی از تنش قائم است. کاساگرانده در سال 1975 مفهوم نسبت تخلخل بحرانی به صورت شکل 2-1 توضیح داد. در قسمت b شکل 2-1 محور قائم نشان دهنده نسبت تخلخل یا دانسیته نسبی است و محور افقی معرف تغییر مکان می‌باشد. منحنی L’ پاسخ انقباضی ماسه شل و منحنی D’ پاسخ انبساطی ماسه متراکم را نشان می دهند و خط افقی M’ نسبت تخلخل بحرانی را نشان می‌دهد که هر دو نمونه اگر برش به اندازه کافی ادامه پیدا کند یا اینکه آزمایش برش با این نسبت تخلخل آغاز شود به آن میل خواهند کرد. نسبت تخلخل، e (محور عمودی) و تنش قائم اعمالی، σ_n (محور افقی) در بخش c شکل 2-1 با مقیاس نیمه

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

لگاریتمی ترسیم شده‌اند. منحنی‌های L_C، M_C و D_C نشان دهنده منحنی‌های تحکیم در آزمایش تحکیم تک‌بعدی می‌باشند.

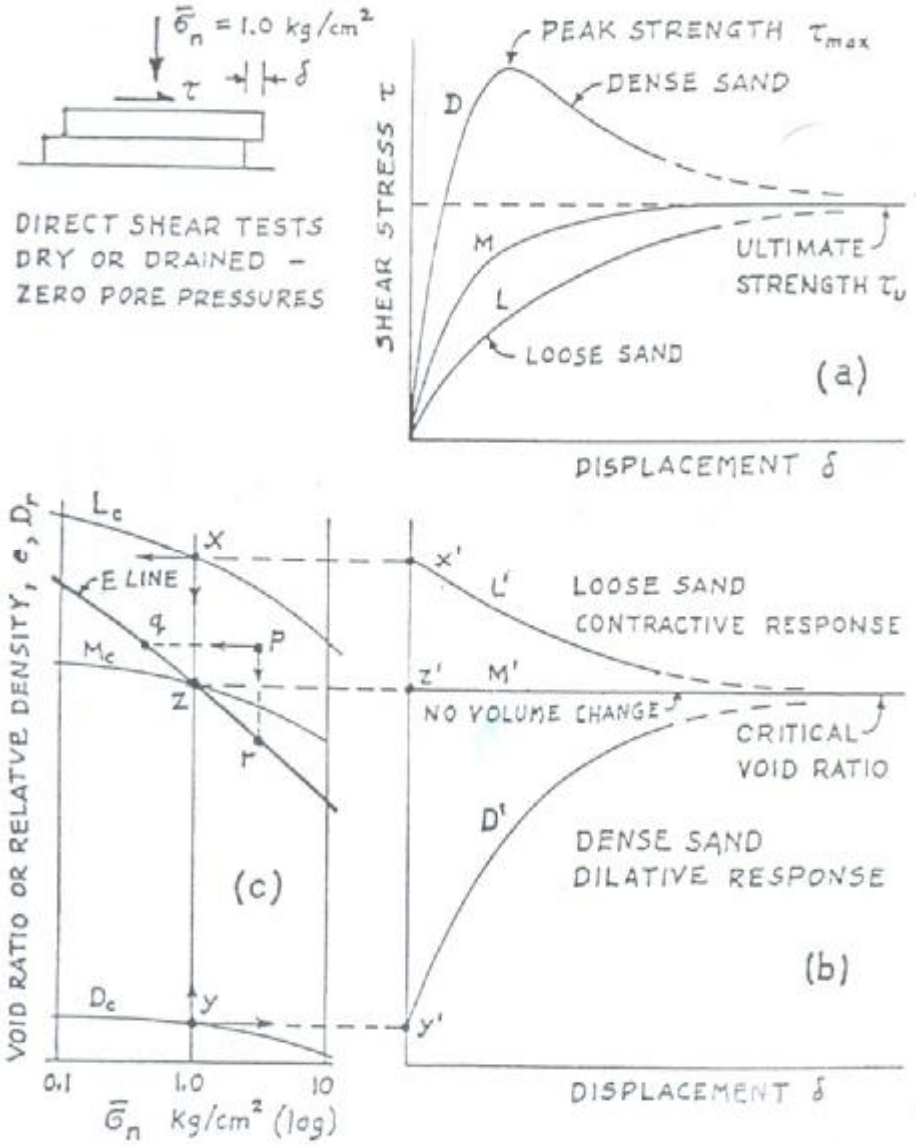
نظریه نسبت تخلخل بحرانی و نتایج آزمایشات برش مستقیم که آزمایش مطمئنی به لحاظ توزیع تنشها نیز بشمار نمی-آید، کاساگرانده را در سال 1975 به نتایج ذیل رهنمون کرد:

1) تمام ترکیب های نسبت تخلخل و تنش قائم موثر که در پایین یا سمت چپ خط بحرانی E (بخش c شکل 2-1) قرار می گیرند معرف حالتی هستند که ماسه پاسخ انبساطی از خود نشان می‌دهد و در برابر روانگرایی یا گسیختگی جریانی ایمن است.
2) تمام نقاط بالا یا سمت راست خط بحرانی E ترکیباتی هستند که به پاسخ انقباضی منجر می‌شوند. به منظور ایجاد لغزش جریانی و نه فقط یک ناپایداری با ابعاد محدود نقطه شروع می‌بایست بطور قابل ملاحظه ای در سمت راست خط E قرار داشته باشد تا در حالت روانگرا تنشهای موثر به مقدار بسیار کمتری از زمان اولیه برش برسند.
3) هرچه تنش موثر محصور کننده بیشتر باشد، مثلا هرچه عمق لایه ماسه بالاتر باشد، نسبت تخلخل بحرانی کمتر است. به بیان دیگر ماسه باید برای مقابله در برابر روانگرایی متراکم تر باشد. اما زمانی که بارگذاری سنگینی اعمال می شود حتی یک لایه ماسه نیمه متراکم ممکن است مستعد روانگرایی باشد.

کاساگرانده در سال 1938 اولین بار پیشنهاد تعیین آزمایشگاهی نسبت تخلخل بحرانی را برای مطالعات روانگرایی توده-های خاک دانه‌ای شل مطرح کرد. شرایط اختیاری انتخاب شده توسط او در بارگذاری ناشی از مفاهیم اولیه بوده و مقادیر دست بالایی را می دهد. علاوه بر او و روسکو در سال 1958، محققین زیادی شواهد آزمایشگاهی مبنی بر وجود نسبت تخلخل بحرانی ارائه کردند [گوئز 1948، کپه جان و همکاران 1948، بگمان و همکاران 1977، لیندنبرگ و همکاران 1981، دیریچس و فوستر 1985].

تیلور در سال 1948 ابراز کرد یک خاک مشخص تحت شرایط بارگذاری مختلف می‌تواند نسبت تخلخل‌های بحرانی با دامنه وسیع داشته باشد. صرفاً زمانی که یک خاک مشخص تحت شرایط بارگذاری کاملا مشخص قرار گیرد یک مقدار معین نسبت تخلخل بدست خواهد آمد. علاوه بر این، شرایط دینامیکی (زلزله، انفجار و ...) مسائل مهمی هستند که در آنها مفهوم نسبت تخلخل بحرانی می تواند استفاده شود. تیلور به هر نوع بارگذاری با ماهیت دینامیکی که موجب شروع دفعی روانگرایی باشد اشاره کرده و بیان می‌دارد این شروع دفعی در تست‌های با حجم ثابت وجود ندارد. او می‌افزاید شوک‌های تصادفی، احتمالاً باعث می‌شوند که دانه‌های همجوار از جای خود تکان خورده و تماس قطع شود و لذا شرایطی اتفاق می‌افتد که در تست‌های استاتیکی نمی‌توان آنها را شبیه‌سازی کرد. او نتیجه می‌گیرد که تمام تست‌های آزمایشگاهی با حجم ثابت و دیتای نسبت تخلخل بحرانی حاصل از این تست‌ها می‌تواند برای شرایط اتفاقی روانگرایی مورد قبول باشد البته تا زمانی که شرایط طبیعت اثرات دینامیکی که در آزمایشگاه قابل شبیه‌سازی نیستند را نداشته باشند.

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com



شکل 2-1- نظریه اولیه نسبت تخلخل بحرانی با آزمایشات برش مستقیم (کاساگرانده 1975)

2-3- حالت پایدار تغییر شکل

یک لغزش بزرگ در پوسته بالادست سد فورت پک نزدیک خاتمه ساخت این سازه نهشته هیدرولیکی در سال 1938 اتفاق افتاد. حرکت اصلی در حدود 3 دقیقه اتفاق افتاد. برخی بخش‌های پنجه بالادست تا حداکثر 400 متر با سرعت یک رودخانه در حال جریان جابجا شدند. بنا به گزارش کاساگرانده در سال 1975 حدود 8 میلیون متر مکعب ماسه در سد و پی در این لغزش جابجا شدند. گرچه گروه مشاوران لغزش بیان کردند که لغزش بخاطر روانگرایی نبوده است اما کاساگرانده از سرعت جابجایی و توپوگرافی توده‌های لغزیده قضاوت کرد که ماسه در عمق قابل توجهی روانگرا شده

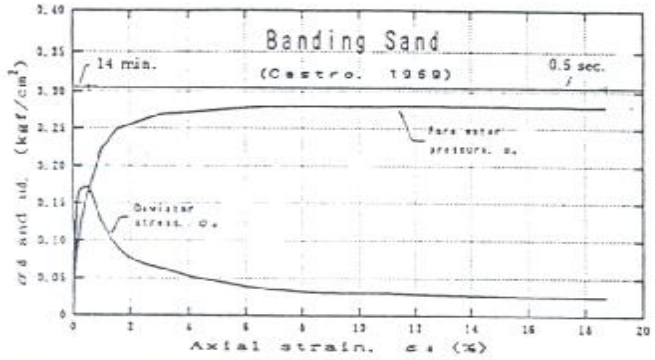
PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com

است. او تشخیص داد که خط نسبت تخلخل بحرانی به خوبی مرز بین ماسه‌های مقاوم و نامقاوم در برابر روانگرایی را مشخص نمی‌کند.
بعد از گسیختگی سد فورت‌پک، کاساگرانده نظریه‌ای را ارائه کرد که زمانی که ماسه روانگرا می‌شود و واقعاً جریان می-یابد، باید یک ساختار متفاوتی از آنچه که در حال استاتیک دارد داشته باشد. در هنگام جریان، هر دانه به طور ثابت نسبت به تمام دانه‌های اطرافش می‌چرخد تا به یک مقاومت اصطکاکی حداقل برسد. کاساگرانده در سال 1975 به این حالت "ساختار جریان" نام داد و ادعا کرد که این ساختار:

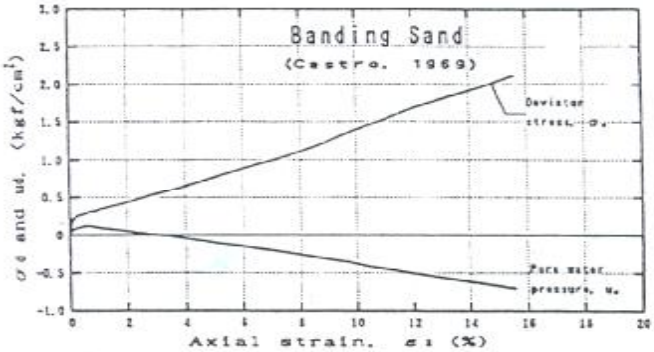
1- با یک عکس العمل زنجیروار گسترش می یابد،
2- فقط هنگام جریان وجود دارد، و
3- در لحظه ایستادن جریان، دانه‌ها دوباره آرایش جدیدی می‌یابند و به یک ساختار استاتیک برمی‌گردند که در این حالت بعد از اینکه فشار آب حفره‌ای اضافی زهکشی می‌شود ساختار اندکی متراکم‌تر از حالت استاتیک قبل از روانگرایی می‌شود.

پس از بارها تجربه ناموفق از بازسازی شرایط ساختار جریان در آزمایشگاه کاسترو در سال 1969 با استفاده از بارگذاری کنترل بار بصورت مونوتونیک با دستگاه سه‌محوری موفق شد. شکل 2-2 برخی از نتایج بدست آمده از ماسه بندینگ را که یک ماسه یکنواخت کوارتزی تمیز با دانه های مدور و گوشه‌ای با ضریب یکنواختی 1/8 و با 10 درصد دانه‌ها زیر 0/1 میلیمتر می‌باشد را نشان می‌دهد. در قسمت a شکل 2-2 نمونه بصورت همسان با 30 کیلوپاسکال و نسبت تخلخل بعد از تحکیم 0/769 (دانسیته نسبی 0/21) تحکیم یافته است. پس از رسیدن به ماکزیمم، مقاومت نمونه به مقدار ثابت بسیار کوچک 3 کیلوپاسکال افت می‌کند. این افت زیاد در مقاومت به علت روانگرایی یا گسیختگی جریانی است که در آزمایشگاه می‌تواند به دست آید. قسمت b شکل 2-2 رابطه تنش-کرنش برشی و ایجاد فشار آب حفره‌ای را با تنش همه‌جانبه موثر 30 کیلوپاسکال و دانسیته نسبی بعد از تحکیم معادل 41 درصد را نشان می‌دهد. در این حالت، نمونه بعد از حد کوچکی از کرنش، فشار آب حفره‌ای با گام‌های منفی را تجربه می‌کند که رفتار سخت شونده کرنشی را نشان می‌دهد. قسمت c شکل 2-2 یک حالت بینابینی در رفتار را نشان می‌دهد که در آن نمونه با دانسیته نسبی 0/29 و تنش محصور کننده 30 کیلوپاسکال یک افت مقطعی مقاومت از خود نشان داده سپس دوباره با افزایش کرنش سخت‌تر می‌شود.
از نتایج آزمایشگاهی، کاسترو در سال 1969 دو خط مرزی را در فضای $e-\sigma'_3$ تشخیص داد (شکل 2-3). این خطوط به خطوط L و P نامگذاری شدند و به ترتیب حالت‌های مرتبط با گسیختگی جریانی و گسیختگی محدود را مرزبندی کردند.

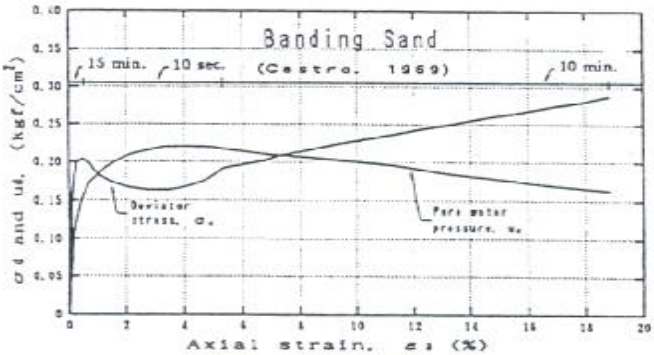
PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com



a) Relative Density = 21% and consolidation stress = 0.3 kg/cm2 (30kPa)



b) Relative Density = 41% and consolidation stress = 0,3 kg/cm2 (30kPa)



c) Relative Density = 29% and consolidation stress = 0.3 kg/cm2 (30kPa)

شکل 2-2- منحنی های تنش-کرنش و تولید فشار آب حفره ای (کاسترو 1969)

برای مثال حالت اولیه بالای خط L (نقطه ای مانند A) می‌بایست گسیختگی جریانی در برش زهکشی‌نشده بوجود آورد (قسمت a شکل 2-3). در حالیکه حالتهای اولیه زیر خط P (مانند نقاط C، F و D) نباید هیچ افتی در مقاومت نشان دهند (قسمت b شکل 2-3). شرایط اولیه‌ای بین خطوط L و P (مانند نقطه B) می‌بایست یک افت محدود در مقاومت نشان دهند (قسمت c شکل 2-3). خط e_f برای پیش بینی مقاومت خاک در برابر روانگرایی بکار برده شده است چون این خط مقاومت حداقلی که یک ماسه می تواند حین گسیختگی جریانی تولید کند را به دست می‌دهد. از شکل 2-3 بدست می‌آید که با افزایش تنش محصور کننده موثر اولیه احتمال بوجود آمدن گسیختگی جریانی افزایش می‌یابد. کاسترو در سال 1969، دو محدودیت مهم نتایج آزمایشهای خود را نسبت به حالت واقعی بصورت زیر بیان کرد:

PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version http://www.pdffactory.com