

بررسی رفتار تناوبی ماسه اشباع و ارزیابی تأثیر ناهمسانی القایی

هادی بهادری^۱ و عباس قلندرزاده^{۲*}

^۱استادیار گروه عمران - دانشکده فنی - دانشگاه ارومیه

^۲استادیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۳/۱۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۴/۳۰، تاریخ تصویب ۸۸/۹/۱۷)

چکیده

در این مقاله رفتار تناوبی ماسه اشباع، مورد مطالعه واقع شده است. برای این منظور از ماسه صنعتی شماره ۱۶۱ فیروزکوه استفاده شده است. برای ارزیابی تأثیر ناهمسانی القایی در رفتار تناوبی، ۳۰ آزمایش به نحوی برنامه‌ریزی شده که علاوه بر امکان بروز انواع ممکن روانگرایی شناخته شده در ادبیات فنی، بتوان به خوبی تأثیر ناهمسانی پس از تحکیم و نیز اثر معکوس شدن تنش‌ها را بررسی کرد. برای درک میزان ناهمسانی القایی، تأثیر آن بر پتانسیل روانگرایی با مبنای کنترل تنش مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که در مود کششی، ماسه رفتار نرم‌شونده‌تری از خود نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به روش‌های متعارف در ارزیابی رفتار ماسه‌های اشباع، بخصوص در روانگرایی باید توجهی جدی به این پدیده معطوف کرد. عامل مهمی که در این مقاله معرفی شده IC یا ضریب برگشت تنش‌ها است که مشخص می‌کند علاوه بر وجود ناهمسانی، میزان برگشت تنش‌ها نیز بر رفتار مؤثر است.

واژه‌های کلیدی: رفتار تناوبی، ماسه فیروزکوه، ناهمسانی القایی، مود کششی

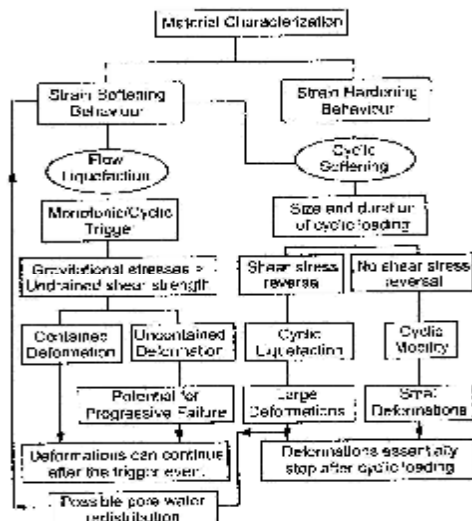
مقدمه

کاسترو در این کار خطوط حالت را در ماسه معرفی کرده و ابراز داشت علاوه بر تخلخل تنش همه‌جانبه نیز بر رفتار تأثیر دارد و انواع رفتار ماسه‌ها را طبقه‌بندی کرد. کاساگرانده در ۱۹۷۱ موفق شد رفتار را به دو بخش روانگرایی (جریان) و جا به جایی تناوبی تفکیک کند. روانگرایی فقط در ماسه‌های شل با بارهای تناوبی و یک جهته در صورت وجود تنش برشی اولیه رخ می‌دهد، اما جا به جایی تناوبی در آزمایشگاه در نمونه‌های متراکم نیز روی می‌دهد [۲]. در سال ۱۹۷۵ کاسترو مفهوم حالت بحرانی را برای ماسه‌ها ارائه کرد و آن را معیار روانگرایی یا نبود آن دانست و اشکالاتی بر مفهوم جا به جایی تناوبی از جمله بازتوزیع تخلخل گرفت [۳] که کاساگرانده برای رفع این اشکالات در ۱۹۷۶ مفهوم روانگرایی تناوبی را به موازات جا به جایی تناوبی طرح کرد. یکسال بعد کاسترو و پولوس مفهوم حالت پایدار (SSL)^۲ در ماسه را معرفی کردند [۴]. با ارائه خط حالت پایدار معیار ارزیابی پتانسیل روانگرایی ارائه شد و Seed در ۱۹۷۹ ابراز داشت که دانش مهندسی ما در حدی هست که می‌توانیم روانگرایی را ارزیابی کنیم [۵]. تحقیقات دهه ۸۰ تا کنون روی ماسه‌های اشباع بیشتر به بررسی رفتار معطوف شده و اثر عوامل گوناگون مانند ناهمسانی، فابریک، اثر تنش

پدیده‌های مختلفی در طبیعت در نهشته‌های ماسه‌ای حین بارگذاری‌های سریع رخ می‌دهد که بررسی رفتار لرزه‌ای ماسه‌های اشباع را اهمیت می‌بخشد. یکی از مسائلی که امروزه از جمله مسائل مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای شناخته شده به شمار می‌آید، موضوع روانگرایی در ماسه‌های اشباع است. در این راستا مطالعات فراوانی توسط محققان مختلف انجام شده است. انواع مختلف روانگرایی به روش‌های گوناگون طبقه‌بندی شده و اثر عوامل مختلف نیز بر آن بررسی شده است.

بعد از اینکه ترازقی در سال ۱۹۲۵ اولین بار واژه روانگرایی را به جامعه مهندسی معرفی کرد، کاساگرانده بعد از گسیختگی سد Fort pack^۱ مفهوم تخلخل بحرانی را با انجام آزمایش‌های برش مستقیم معرفی کرد. روسکو در دهه پنجاه مفاهیم حالت بحرانی برای خاک‌های رسی را مطرح کرد که بعدها این مفاهیم برای ماسه نیز مطرح شد. زلزله نینگاتا در سال ۱۹۶۴ روی داد و مهم‌ترین عامل خرابی‌ها در این زلزله پدیده روانگرایی بود. بعد از این حادثه و نیز زلزله آلاسکا Lee و Seed در ۱۹۶۹ با انجام آزمایش‌های سه‌محوری تناوبی، مفهوم روانگرایی اولیه و روانگرایی کامل را طرح کردند [۱]. به دنبال این تحقیق کاساگرانده با کاسترو تحقیق کامل‌تری انجام دادند.

یکسان را روی آن انجام دهند، امکان تکرارپذیر بودن نتایج و مقایسه نتایج حاصله از آزمایش‌های مختلف را می‌دهد. خاک مناسب برای این منظور باید دارای ویژگی‌های خاصی باشد. موضوع اول در دسترس بودن این خاک به میزان قابل توجه و با مشخصات فیزیکی ثابت است. موضوع دوم این است که تا آنجا که امکان دارد، مشخصات این خاک ماسه‌ای مشابه ماسه‌های استاندارد شناخته‌شده در دنیا باشد تا بتوان نتایج تحقیقات خود را با دیگران مقایسه کرد. از سوی دیگر در آزمایش‌های تحقیقاتی بررسی رفتار و تعیین پتانسیل روانگرایی دانه‌های ماسه‌های استاندارد نباید در بارگذاری‌ها بشکنند و نیز نباید کانی‌های موجود به راحتی واکنش‌پذیر باشند یا در آب حل شوند.



شکل ۱: نمودار روانگرایی (Robertson 2000).

از این رو در بررسی حاضر، نوعی از ماسه سیلیسی شکسته فیروزکوه (ماسه شماره ۱۶۱) به عنوان ماسه استاندارد برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده واقع شد. ماسه ۱۶۱ فیروزکوه به رنگ زرد مایل به طلایی به میزان فراوان برای استفاده‌های صنعتی تولید می‌شود و می‌توان تا حدود زیادی بر پایداری تولید آن اعتماد کرد. این ماسه تمیز بوده و درصد ریزدانه آن حدود یک درصد است. مشخصات فیزیکی این ماسه با آزمایش روی چهار نمونه از این خاک در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده فنی دانشگاه تهران در شکل (۲) و جدول (۱) تعیین شده است. در جدول (۲) ضمن معرفی دو ماسه استاندارد شناخته شده مشابه، خصوصیات فیزیکی

میانی و زاویه تنش‌های اصلی مورد توجه قرار گرفته است. آقای روبرتسون در سال ۲۰۰۰ نتایج همه کارهای قبلی درباره مفاهیم مرتبط با پدیده روانگرایی را در نمودار شکل (۱) خلاصه کرده است [۶]. چنان که ملاحظه می‌شود روانگرایی جریانی و نرم‌شدگی تناوبی دو مفهوم اصلی هستند که برای اولین بار کاسترو به آن اشاره کرد. کاساگرانده هم نرم‌شدگی را به ۲ بخش جا به جایی تناوبی^۲ و روانگرایی تناوبی^۴ بر مبنای برگشت تنش‌های اصلی^۵ تفکیک کرد. چنانکه از نمودار شکل (۱) مشخص است، روانگرایی جریانی می‌تواند با بار یک جهته یا تناوبی به وجود آید. فقط کافی است که رفتار خاک نرم‌شونده باشد، در صورتی که شاخه دوم نمودار فقط مربوط به بارهای تناوبی است و می‌تواند در رفتارهای نرم‌شونده یا سخت‌شونده رخ دهد.

با این وجود هنوز موارد ابهام فراوانی وجود دارد و به دلیل تأثیر پیچیده عواملی مانند ناهمسانی، استفاده از شکل‌ها و روابط ارائه‌شده برای خاک‌های متفاوت خالی از اشکال نیست. با توجه به اینکه در مناطقی از کشور ما خطر پدیده روانگرایی وجود دارد، مطالعه این پدیده در ایران حائز اهمیت است. برای بررسی این پدیده توسعه و استفاده از ابزار آزمایشگاهی مناسب و انجام آزمایش‌های پیچیده ضروری است. مقاله حاضر با پیگیری این هدف، مسئله ناهمسانی را که بحث مهمی در موضوع روانگرایی است، مورد بررسی قرار می‌دهد. برای این هدف تعدادی آزمایش سه‌محوری تناوبی روی ماسه اشباع‌شده فیروزکوه در حالت بارگذاری فشاری و کششی انجام شده است. این وضعیت تنش‌ها در پای شیروانی‌ها، پشت دیوارهای حائل در محدوده فشار غیر فعال، در محدوده کناری زیر پی‌های تکی و گسترده ممکن است به وجود آید. ناهمسانی مورد نظر در این مقاله، ناهمسانی تنش‌های اعمالی تناوبی و تغییر آنها از حالت فشاری به کششی در آزمایش‌های مختلف است و ناهمسانی ذاتی ماسه مورد نظر نبوده است.

معرفی مصالح استفاده‌شده در آزمایش‌ها

استفاده از یک خاک با ویژگی‌های ثابت در انجام آزمایش‌هایی که برای بررسی پدیده خاصی انجام می‌شوند، ضروری است. به عبارتی با وجود یک خاک با شرایط و ویژگی‌های ثابت که همگان بتوانند آزمایش‌های

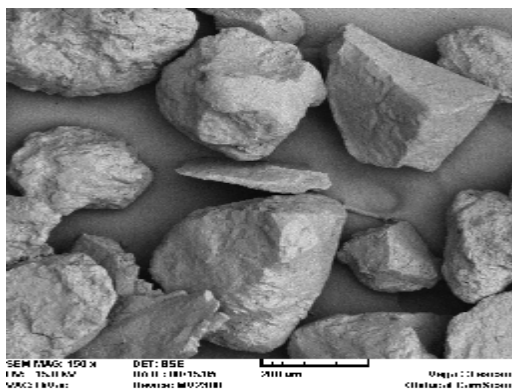
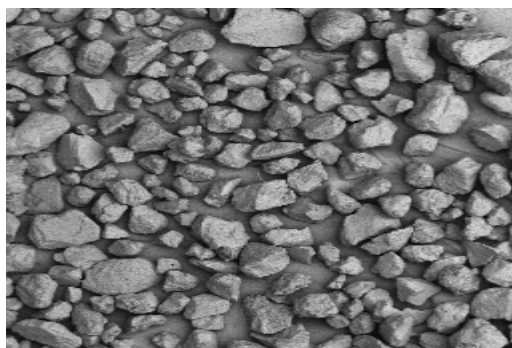
جدول ۱: مشخصات فیزیکی ماسه فیروزکوه (چهار نمونه ومیانگین).

نام	Cc	Cu	D50 (mm)	Passing #200	D60 (mm)	D30 (mm)	D10 (mm)
SP	0.88	1.86	0.26	1.1%	0.30	0.20	0.16
SP	0.89	1.82	0.26	0.4%	0.29	0.20	0.16
SP	0.88	1.92	0.28	0.2%	0.31	0.21	0.16
SP	0.88	1.88	0.27	0.3%	0.30	0.21	0.16
SP	0.88	1.87	0.27	0.01	0.30	0.21	0.16

جدول ۲: مقایسه ماسه فیروزکوه با Toyoura و sengenyama.

	Passing #200	D50 (mm)	Cu	Cc
فیروزکوه	0.01	0.27	1.87	0.88
Toyouura	0	0.17	1.54	1.25
Sengenyama	0.023	0.27	2.15	1.21

حالت بینابینی دارد، ولی ضریب خمیدگی آن از دو ماسه دیگر کمتر است.

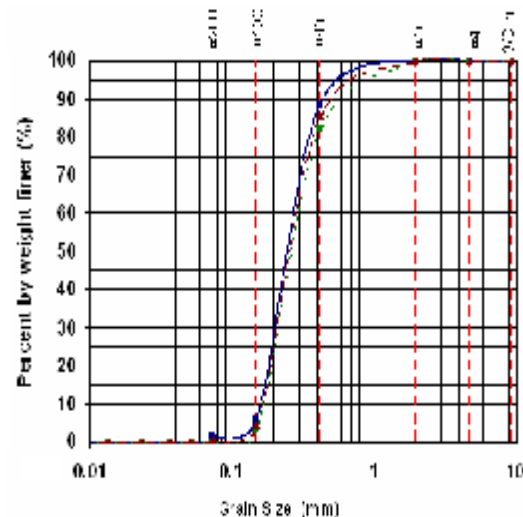


شکل ۳: تصویر میکروسکوپی دانه‌های ماسه فیروزکوه [۸].

عکس‌های میکروسکوپی گرفته شده در شکل (۳)، ساختار تیز گوشه و شکسته دانه‌های ماسه فیروزکوه را نشان می‌دهد.

ماسه‌های یادشده ارائه و مورد مقایسه قرار گرفته است. ماسه‌های استاندارد مشابهی که ضمن معرفی مشخصات فیزیکی با ماسه فیروزکوه مورد مقایسه قرار گرفته‌اند، ماسه‌های Toyoura sand و Sengenyama sand است.

با مقایسه مشخصات فیزیکی و دانه‌بندی ماسه فیروزکوه و ماسه‌های ذکرشده، می‌توان مشاهده کرد که ماسه فیروزکوه از نظر خواص فیزیکی و منحنی دانه‌بندی به ماسه‌های استاندارد Toyoura و Sengenyama شباهت دارد [۷].



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی ماسه فیروزکوه.

می‌توان مشاهده کرد که ماسه فیروزکوه نسبت به ماسه‌های استاندارد مورد مقایسه، از نظر توزیع دانه‌بندی

معرفی ابزار انجام آزمایش

دستگاه مورد نظر برای بررسی رفتار ماسه‌های اشباع دستگاه سه‌محوری تناوبی است. برای ارزیابی روانگرایی، آزمایش‌ها در شرایط زهکشی نشده انجام پذیرفته‌اند. دستگاه به صورت کنترل بسته کامپیوتری به شکل کنترل تنش برای انجام آزمایش‌ها آماده شده و ترتیبی در نظر گرفته شده که بتوان اثر ناهمسانی را مطالعه کرد [۹]. در شکل (۴) دستگاه سه‌محوری مسیر تنش بیشاپ-وسلی آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده فنی نشان داده شده است. این دستگاه برای اولین بار در سال‌های ۱۹۶۱ و ۱۹۶۲ توسط بیشاپ طراحی و ساخته شده است و بر خلاف دستگاه‌های معمول سه‌محوری که به صورت کنترل کرنش در اعمال تنش قائم انجام می‌شوند، به صورت کنترل تنش طراحی شده است، اما امکان بارگذاری تناوبی ندارد. برای اعمال تحکیم و بارگذاری ناهمسان در مود کششی نیاز است تا تنش جانبی از تنش قائم بیشتر شود. این کار به جداسازی تنش‌های افقی و قائم نیاز دارد. برای این منظور از دو قطعه نیم مخروطی استفاده شده است که داخل آنها در طول آزمایش با اعمال خلا کامل از هوا و آب خالی می‌شود تا از ایزولاسیون دو تنش افقی و قائم اطمینان حاصل شود. [۱۰] اعمال خلا، این امکان را می‌دهد که بارگذاری به صورت کششی قابل اعمال باشد. لازم به ذکر است که قطر نمونه ۳۸ میلی‌متر بوده و ارتفاع آن ۷۸ میلی‌متر است.



شکل ۴: دستگاه سه‌محوری مسیر تنش بیشاپ-وسلی.

در تحقیق حاضر برای اولین بار با اصلاح دستگاه ذکرشده، امکان بارگذاری تناوبی فشاری و کششی با

کنترل کامپیوتری به وجود آمده و این کار با تکنولوژی داخلی و در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تهران انجام گرفته است.

نحوه انجام آزمایش و لیست آزمایش‌ها

سه روش عمده تهیه نمونه ماسه‌ای در آزمایش سه‌محوره در آزمایشگاه روش خشک، روش مرطوب و روش غرق‌آبی به شمار می‌آیند [۱۱] که در این تحقیق از روش خشک استفاده شده است. بعد از تهیه نمونه، ابتدا اشباع و سپس تحکیم انجام می‌گیرد. سپس بارگذاری به نحو مقتضی به صورت تناوبی یا مونوتونیک انجام می‌شود. نتایج در سه گروه آزمایش‌های همسان، فشاری و کششی قابل ارائه بوده که در جدول (۳) ارائه شده‌اند. در جدول زیر P_0 تنش مؤثر متوسط، K نسبت تنش مؤثر افقی به قائم، CSR نسبت تنش تناوبی، N تعداد سیکل‌های منجر به روانگرایی و Dr دانسیته نسبی است. ضریب rc نیز در بخش بعد توضیح داده شده است.

مشخصات کلی آزمایش‌ها و اثر ناهمسانی

شرایط کلی

۳۰ آزمایش تناوبی برای درک بهتر رفتار ماسه اشباع فیروزکوه انجام گرفت. این نوع بارگذاری در ماسه‌های اشباع در شرایط زهکشی نشده به روانگرایی منجر می‌شود. چنان که در بخش مقدمه نیز ذکر شد، در ادبیات فنی درباره روانگرایی دو گروه رفتاری از هم متمایز شده است. آزمایش‌های انجام‌گرفته در این تحقیق فارغ از اینکه رفتار استاتیکی خاک، نرم‌شونده یا سخت‌شونده باشد، به شاخه اول طبقه‌بندی در نمودار رابرتسون یعنی نرم‌شدگی در اثر بارهای تناوبی تعلق دارند و در محدوده وسیعی از نسبت تخلخل و تنش محدودکننده قرار گرفته‌اند. چنانکه ملاحظه می‌شود در آزمایش‌های انجام‌گرفته نسبت تخلخل نمونه‌ها بعد از تحکیم بین ۰.۶۸۱ و ۰.۸۴۲ بوده است. تنش تحکیمی در نمونه‌ها نیز بین ۱۰۰ و ۳۴۵ کیلو پاسکال بوده است.

ناهمسانی

مشخصه اصلی آزمایش‌های انجام گرفته، اعمال یا عدم اعمال ناهمسانی و میزان آن است. ناهمسانی یکی از خواص اصلی اکثر مصالح به شمار می‌رود.

جدول ۳: لیست آزمایش‌های انجام‌شده.

شماره	نام آزمایش	P ⁰ (KPa)	K'	CSR	(N)	Dr	rc	نسبت تخلخل بعد از تحکیم
1	A4(81-6-14-1)	205	1	0.12	No Liq.	0.465	0.5	0.785
2	A5(81-6-14-2)	255	1	0.2	17	0.559	0.5	0.753
3	A6(81-6-14-3)	167	1	0.3	2	0.326	0.5	0.832
4	A7(82-4-1)	200	1	0.1875	3	0.509	0.5	0.774
5	A8(82-5-20)	200	1	0.2	12	0.715	0.5	0.706
6	A9(82-6-8)	200	1	0.0625	No Liq.	0.773	0.5	0.681
7	A10(82-6-10)	200	1	0.185	155	0.538	0.5	0.764
8	A11(82-6-12)	200	1	0.275	3	0.509	0.5	0.771
9	A12(82-6-17)	100	1	0.425	1	0.685	0.5	0.706
10	A13(82-8-17)	250	1	0.16	28	0.629	0.5	0.729
11	A14(82-8-22-1)	300	1	0.135	65	0.656	0.5	0.72
12	B1(81-6-12-1)	247	1.3	0.12	3	0.456	0	0.788
13	B2(81-6-12-2)	345	1.2	0.06	580	0.476	0	0.789
14	B3(81-6-13-1)	247	1.3	0.09	700	0.415	0	0.802
15	B4(81-6-13-2)	247	1.3	0.2	10	0.362	0.3	0.82
16	B5(81-6-16-1)=B1	247	1.3	0.12	2	0.621	0	0.732
17	B6(81-6-10-1)	253	1.02	0.2	7	0.624	0.45	0.731
18	B7(82-6-29)	220	1.2	0.193	12	0.626	0.2	0.728
19	B8(82-7-5)	200	1.2	0.0625	No Liq.	0.568	0.2	0.752
20	B9(82-8-22-2)	200	1.2	0.12	92	0.638	0.2	0.726
21	B10(82-8-24)	250	1.2	0.168	16	0.562	0.2	0.752
22	B11(82-8-28)	200	1.2	0.207	9	0.547	0.2	0.757
23	B12(82-8-29)	195	1.2	0.185	20	0.579	0.2	0.746
24	B13(82-9-29)	200	1.3	0.125	No Liq.	0.591	0	0.742
25	C4(81-6-10-2)	255	0.86	0.2	8	0.524	0.7	0.765
26	C5(81-6-10-3)	255	0.86	0.16	50	0.476	0.7	0.781
27	C6(81-6-16-2)	167	0.8	0.3	3	-	0.7	
28	C7(81-6-17-1)	167	0.8	0.2	22	0.544	0.7	0.758
29	C8(81-6-17-2)	167	0.8	0.1	No Liq.	0.297	1	0.842
30	C9(82-9-23)	200	0.8	0.125	440	0.674	0.8	0.714

ناهمسانی القایی یا تنش‌ی توسط کاساگرانده و کاریلو (۱۹۴۴) به آرایش مجدد دانه‌ها حین کرنش مربوط دانسته شده است. ذرات خاک حین اعمال بار، ساختارهای باربر داخلی خاصی ایجاد می‌کنند. به طوری که به تعبیر Oda (۱۹۷۲) ستون‌های قوی هم راستای جهت تنش اصلی بزرگ‌تر شکل می‌گیرند. هنگامی که تنش ناهمسان در خاکی که به طور ذاتی همسان بوده اعمال می‌شود، یک ساختار ناهمسان به وجود می‌آید. بنابراین عوامل مقاومتی ناهمسان می‌شوند. این نوع ناهمسانی در این تحقیق مورد نظر بوده است. عامل اصلی

رفتار متفاوت ماده در جهات مختلف، ناهمسانی نامیده می‌شود. در مصالح دانه‌ای نیز این ناهمسانی وجود دارد و ناهمسانی رفتار مکانیکی خاک‌ها به دو بخش ذاتی و القایی (تنشی) تقسیم می‌شود. ناهمسانی ذاتی توسط کاساگرانده و کاریلو (۱۹۴۴) به شکل "یک خصوصیت ذاتی فیزیکی ماده و کاملاً مستقل از کرنش‌های اعمالی" تعریف شده است و به چگونگی ته‌نشینی و خصوصیات دانه‌های خاک مربوط می‌شود که در آزمایشگاه با روش‌های مختلف نمونه‌سازی قابل مطالعه است و در این تحقیق مورد نظر نبوده است.

معرف و شاخص ناهمسانی نسبت تنش‌های اصلی، یعنی $k = \sigma_1' / \sigma_3'$ است. در دستگاه سه‌محوری با توجه به اینکه تنش‌های اصلی لزوماً بر جهتهای افقی و قائم منطبق هستند، برای سهولت اغلب k را نسبت تنش افقی به تنش قائم تعبیر می‌کنند. از این رو این نسبت می‌تواند بزرگ‌تر، مساوی یا کوچک‌تر از ۱ شود. در دستگاه حاضر به سبب تفکیک کامل این تنش‌ها امکان انجام آزمایش‌ها با مقادیر k کوچک‌تر از ۱ نیز فراهم شده است، در صورتی که در دستگاه‌های معمول سه‌محوری این امکان وجود ندارد. در شرایطی که در ابتدای آزمایش، مقدار k کوچک‌تر از واحد است، در اصطلاح آزمایش فشاری^۶ خوانده می‌شود در حالی که به شرایط اولیه k بزرگ‌تر از ۱ آزمایش کششی^۷ اطلاق می‌شود و به شرایطی که در ابتدای آزمایش $k=1$ است، شرایط همسان^۸ گفته می‌شود. در آزمایش‌های حاضر ۱۱ آزمایش با تحکیم همسان انجام پذیرفته‌اند، ۱۳ آزمایش در حالت کششی و ۶ آزمایش نیز در حالت فشاری انجام شده‌اند.

برگشت تنش‌های اصلی

برگشت تنش‌های اصلی در بارگذاری‌های تناوبی در طول آزمایش، ممکن است به کرات روی دهد. در این صورت علامت جبری میزان برش اعمالی $q = (\sigma_1' - \sigma_3')/2$ به طور مرتب مثبت و منفی می‌شود. برگشت تنش‌های اصلی باعث ایجاد ناهمسانی القایی شده و رفتار خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تا جایی که چنانکه اشاره شد، کاساگرانده و پس از او رابرتسون در سال ۲۰۰۰ آن را مبنای تفکیک دو پدیده جا به جایی تناوبی و روانگرایی تناوبی از یکدیگر قلمداد کرده‌اند. در آزمایش‌های انجام‌گرفته، ۶ آزمایش در شرایط جا به جایی تناوبی و ۲۴ آزمایش دیگر در شرایط روانگرایی تناوبی انجام گرفته‌اند. شایان ذکر است در دستگاه سه‌محوری تناوبی، امکان مطالعه زوایای تنش اصلی به غیر از ۰ و ۹۰ درجه مقدر نیست و مطالعه تأثیر ناهمسانی فقط در این دو زاویه مقدور است و با برگشت تنش‌ها یک باره جهت آنها ۹۰ درجه تغییر می‌کند و در یک آزمایش تناوبی با برگشت تنش این موضوع بارها تکرار می‌شود.

ضریب برگشت^۹

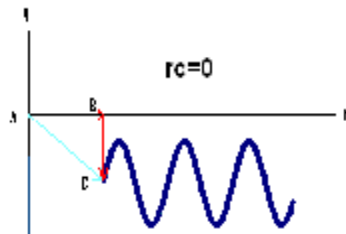
عامل k از وضعیت نحوه بارگذاری و اعمال برش

پس از تحکیم، هیچ اطلاعاتی به دست نمی‌دهد. از سوی دیگر بررسی رفتار خاک در فضای مسیر تنش $q-p'$ بسیار مفید است، در حالی که عامل k فقط در فضای مسیر تنش‌های اصلی قابل نمایش است. با توجه به این موارد و نظر به اهمیت موضوع، برگشت تنش‌ها نیاز به معرفی یک عامل که بتواند اثر برگشت تنش‌ها و میزان آن را به طور کمی در حین بارگذاری‌های تناوبی بر رفتار مشخص کند، احساس می‌شود. از آن جا که در بارگذاری‌های تناوبی، لزوماً سیکل اعمالی حالت متقارن نسبت به محور افقی یعنی q ندارد و نتایج حاکی از آن است که میزان نبود تقارن نیز در نتایج آزمایش‌ها و تعداد سیکل‌های منجر به روانگرایی تأثیر خواهد داشت، بنابراین این نبود تقارن به صورت یک عامل با عنوان ضریب برگشت معرفی شده است. ضریب rc نسبتی از کل سیکل بارگذاری است که در بخش فشاری واقع شده است، از این رو rc از ۰ (حالت کاملاً کششی) تا ۱ (حالت کاملاً فشاری) در نوسان است. در شکل‌های (۵-الف) تا (۵-هـ) عامل rc معرفی شده است. هنگامی که rc به طور دقیق مساوی ۰ یا ۱ است، همه سیکل به طور کامل در بالا یا پایین محور q بوده و برگشت تنش‌ها و روانگرایی تناوبی رخ نمی‌دهد و پدیده جا به جایی تناوبی رخ خواهد داد. rc می‌تواند تا حدودی معرف میزان ناهمسانی نیز باشد. هنگامی که rc مساوی ۰/۵ است، بدین معناست که تحکیم همسان انجام گرفته و معادل مقدار k مساوی ۱ است. مقادیر rc بین ۰/۵ و ۱ معادل مقادیر k کمتر از ۱ و مقادیر rc بین ۰/۵ و ۰ معادل مقادیر k بزرگ‌تر از ۱ است.

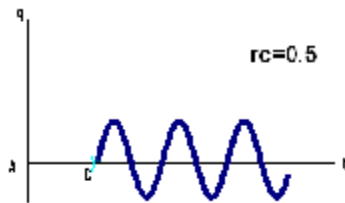
آنچه مسلم است علاوه بر تأثیر مستقیم وجود یا نبود ناهمسانی که به برگشت یا عدم برگشت تنش‌های اصلی مربوط است، میزان این برگشت نیز در رفتار و نحوه رسیدن نمونه به روانگرایی مؤثر است و عامل rc علاوه بر نشان دادن تأثیر ناهمسانی (در rc های ۰ و ۱ ناهمسانی القایی به وجود نمی‌آید)، قادر به نشان دادن تأثیر نسبت برگشت تنش‌های اصلی نیز هست.

نسبت تنش تناوبی (CSR)

نسبت تنش تناوبی (CSR) در آزمایش‌های تناوبی، یکی از مهم‌ترین عوامل شاخص است. این عامل حاوی اطلاعاتی از نحوه بارگذاری و در عین حال میزان



شکل ۵-د: آزمایش بدون برگشت تنش‌ها به طور کاملاً کششی.



شکل ۵-ه: آزمایش با برگشت تنش‌ها به طور کاملاً همسان.

بررسی کلی نتایج

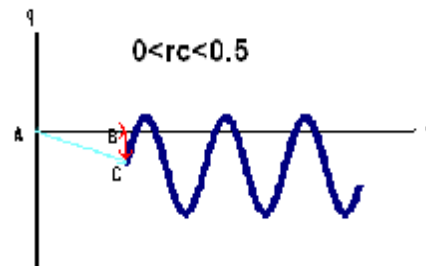
تعداد سیکل‌های منجر به روان‌گرایی (N) به عنوان تابعی از چهار عامل مستقل تنش تحکیمی اولیه (P'_0)، تخلخل پس از تحکیم (e_0)، ضریب برگشت (rc) و نسبت تنش تناوبی (CSR) می‌تواند قلمداد شود. با بررسی همه نتایج به دست آمده در آزمایش‌ها از جدول (۳) و با استفاده از تابع رگرسیون خطی بین چهار متغیر اشاره شده و تعداد سیکل منجر به روان‌گرایی، رابطه زیر در محدوده این تحقیق به دست می‌آید:

$$N = 1017e_0 - 0.6P'_0 - 3440CSR + 133rc$$

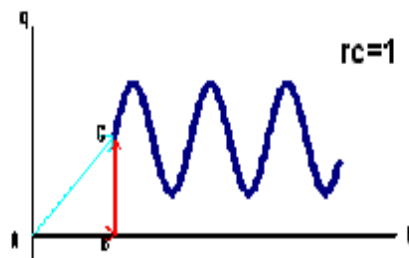
این رابطه برای استفاده مستقیم توصیه نمی‌شود، ولی روند تأثیرگذاری عوامل را در پتانسیل روان‌گرایی نشان می‌دهد. با توجه به این رابطه، افزایش عوامل تنش تحکیمی (p') و نسبت تنش تناوبی (CSR)، سبب کاهش میزان سیکل‌های منجر به روان‌گرایی می‌شود و در عوض افزایش میزان تخلخل (e) و ضریب دوران تنش‌ها (rc)، سبب افزایش تعداد سیکل‌های منجر به روان‌گرایی شده است. البته بدیهی است تأثیر نسبت تخلخل و تنش تحکیم به طور مستقل با توجه به تئوری خط حالت پایدار دقیق نخواهد بود.

در اشکال (۶) تا (۸) سه آزمایش به صورت نمونه از حالت‌های همسان، فشاری و کششی ملاحظه می‌شود. در این آزمایش‌ها، نمودارهای تنش برشی اعمالی (q)، کرنش محوری نمونه (ϵ)، فشار آب حفره‌ای تولید شده بر حسب زمان (PP) و نیز نمودارهای مسیر تنش و رفتار تنش-کرنش خاک نشان داده شده‌اند. کرنش محوری (ϵ) نسبت

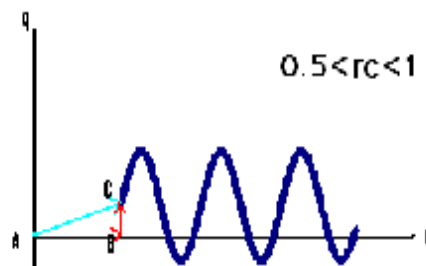
تحکیم‌شدگی است. این عامل حاصل تقسیم میزان دامنه برش اعمالی در هر سیکل بر مقدار تنش تحکیمی اولیه است. در آزمایش‌های انجام‌گرفته نسبت تنش تناوبی از ۰.۰۶۲۵ تا ۰.۴۲۵ متغیر گرفته شده که البته در نسبت‌های بالای ۰.۲۵ در ۳ سیکل اول روانگرایی رخ داده است. می‌توان چنین تفسیر کرد که در CSR ‌های بالا، تنش تحکیمی اولیه نقش برش اولیه را بازی کرده و پدیده روانگرایی جریانی رخ داده است. سه عامل نسبت ناهمسانی (K)، ضریب برگشت (rc) و نسبت تنش تناوبی (CSR) از هم مستقل نیستند و با دانستن دو عامل، عامل سوم قابل محاسبه است، ولی در این پژوهش با توجه به مزایای ضریب برگشت (rc) نسبت به نسبت ناهمسانی (K) که اشاره شد، بیشتر برای تفسیر داده‌ها از دو عامل rc و CSR استفاده می‌شود.



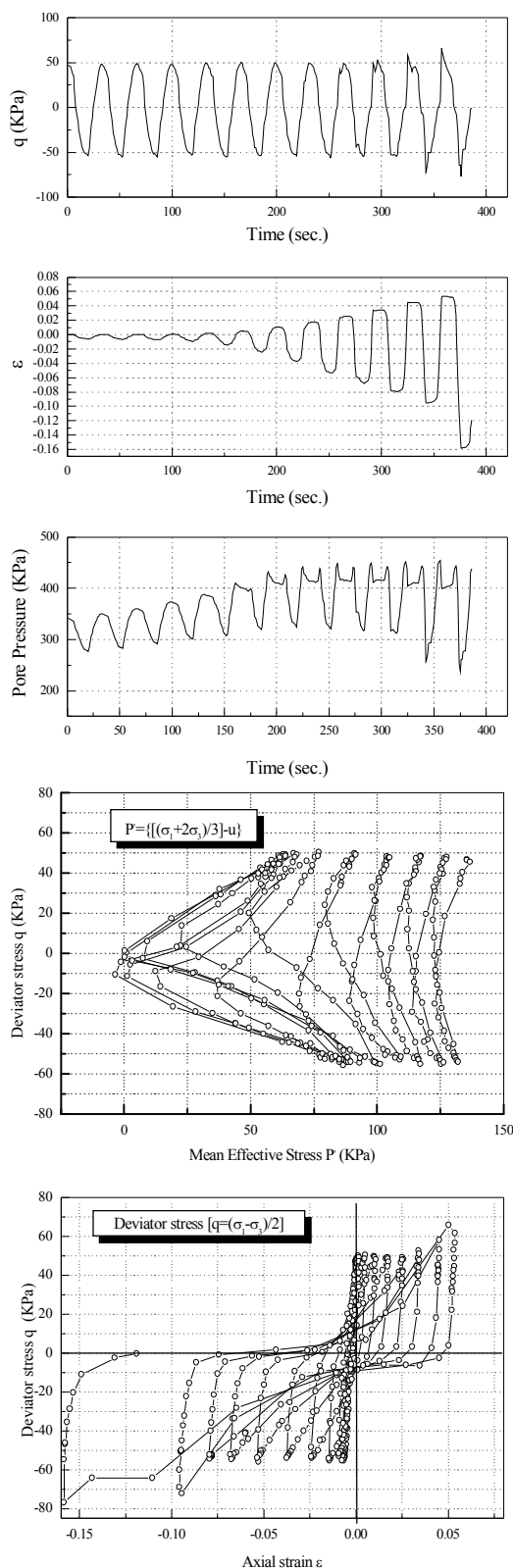
شکل ۵-الف: آزمایش با برگشت تنش‌ها به سمت کشش.



شکل ۵-ب: آزمایش بدون برگشت تنش‌ها به طور کاملاً فشاری.



شکل ۵-ج: آزمایش با برگشت تنش‌ها به سمت فشار.



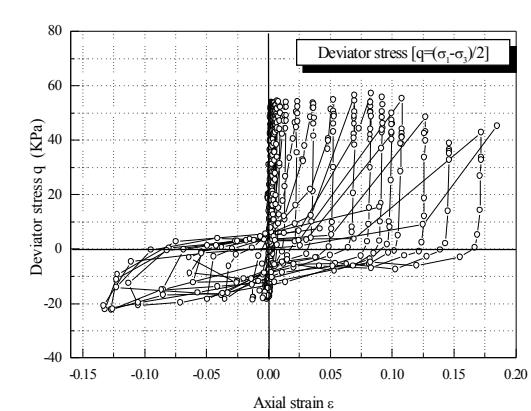
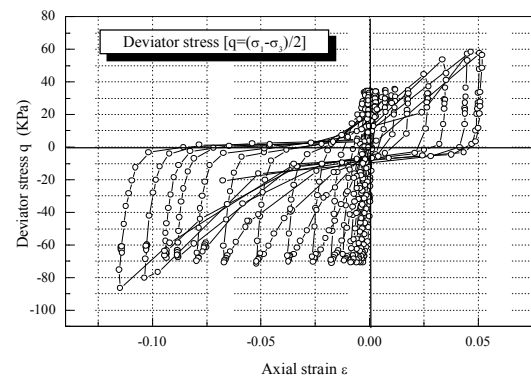
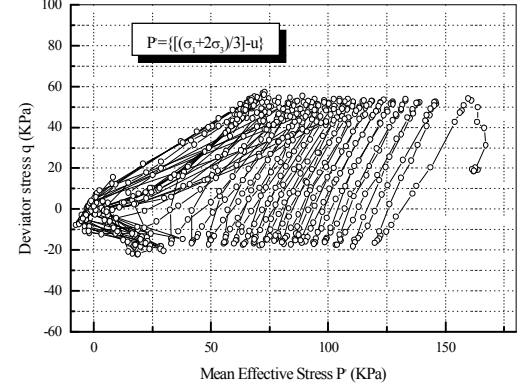
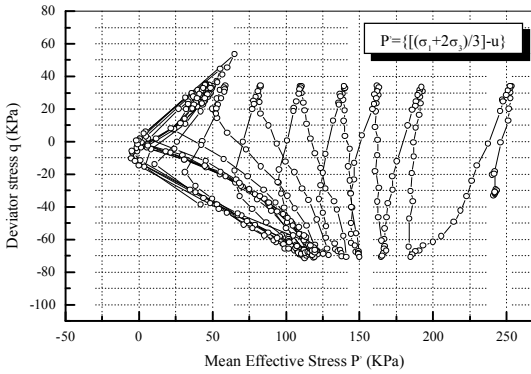
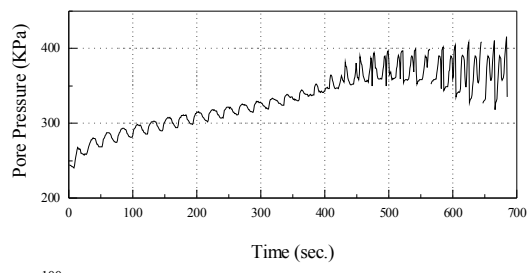
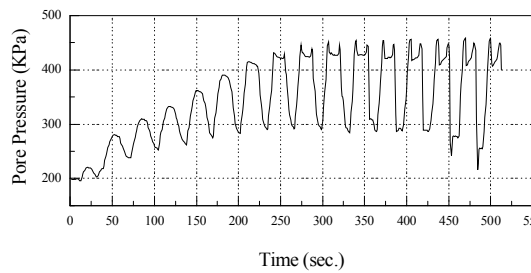
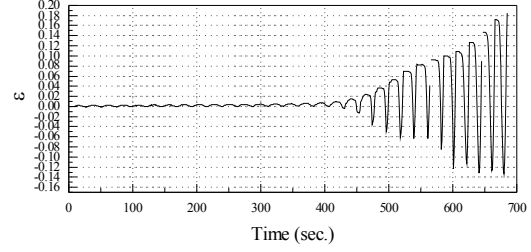
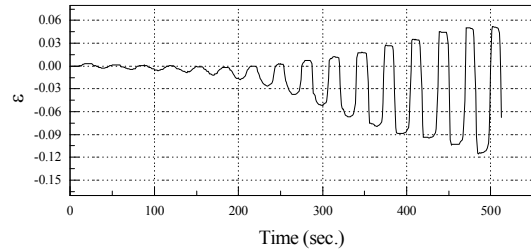
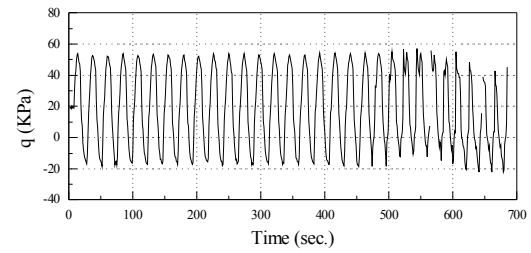
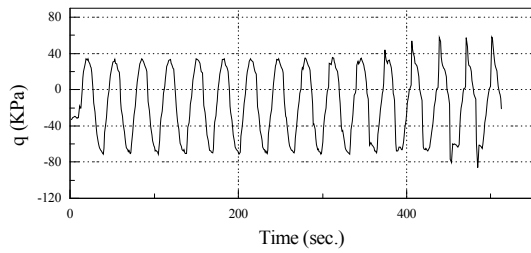
شکل ۶: منحنی‌های برش اعمالی، کرنش محوری و فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش و تنش-کرنش یک نمونه آزمایش همسان.

تغییر طول نمونه به طول اولیه آن است. در منحنی فشار آب حفره‌ای اثر دو دامنه‌ای شدن^{۱۰} که در زمان روانگرایی اتفاق می‌افتد به وضوح قابل رؤیت است.

تأثیر ناهمسانی

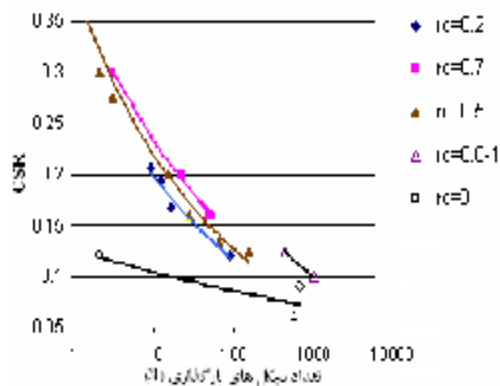
مشاهده تأثیر ناهمسانی در آزمایش‌هایی که برگشت تنش اصلی در آنها رخ داده است، با مقایسه کرنش‌های بخش فشاری با کششی مقدور است. با دقت در شکل (۶) مشاهده می‌شود که کرنش‌های به وجود آمده در بخش کرنش‌های منفی (بلندتر شدن نمونه) بزرگ‌تر از کرنش‌های به وجود آمده در بخش کرنش‌های مثبت (کوتاه شدن نمونه) است. این پدیده که یکی از نمودهای ناهمسانی است، در شکل (۷) به گونه‌ای دیگر بروز کرده است. چنان که مشاهده می‌شود، با وجود اینکه عمده دامنه آزمایش در بخش فشاری قرار گرفته، با این وصف کرنش‌های به وجود آمده در بخش‌های مثبت و منفی تا حدودی برابری می‌کند. در شکل (۸) نیز این پدیده مشاهده می‌شود. برای کمی کردن این تأثیر، میزان کرنش‌های مثبت و منفی در آزمایش‌های همسان در شکل (۹) ترسیم شده است. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود در یک آزمایش در شرایط تحکیم همسان، به ازای ۱ درصد کرنش مثبت (فشرده‌گی نمونه)، حدود ۳ درصد کرنش منفی (کشیدگی) به وجود می‌آید که این ارتباط با یک تابع ساده معرفی شده است.

در شکل (۷) یک نمونه آزمایش در حالت فشاری نشان داده شده است، یعنی در شرایط پس از تحکیم و قبل از اعمال برش تناوبی تنش قائم از تنش جانبی نمونه بیشتر ($q_0 > 0$) است. چنانکه در این شکل ملاحظه می‌شود، پس از تحکیم اولیه به میزان ۱۶۰ کیلوپاسکال تنش برشی تناوبی به دامنه ۷۰ کیلوپاسکال (از ۲۰ تا ۵۰ کیلوپاسکال) به نمونه اعمال می‌شود و نمونه پس از تحمل حدود ۲۵ سیکل روان‌گرا می‌شود. نحوه افزایش فشار آب حفره‌ای نیز در این شکل ملاحظه می‌شود. در شکل (۸) نیز یک نمونه آزمایش در حالت کششی نشان داده شده است، یعنی در شرایط پس از تحکیم و قبل از اعمال برش تناوبی، تنش قائم از تنش جانبی نمونه کمتر ($q_0 > 0$) است. چنانکه در این شکل ملاحظه می‌شود، پس از تحکیم اولیه به میزان ۲۳۵ کیلوپاسکال



شکل ۸: منحنی‌های برش اعمالی، کرنش محوری و فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش و تنش-کرنش یک نمونه آزمایش کششی.

شکل ۷: منحنی‌های برش اعمالی، کرنش محوری و فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش و تنش-کرنش یک نمونه آزمایش فشاری.



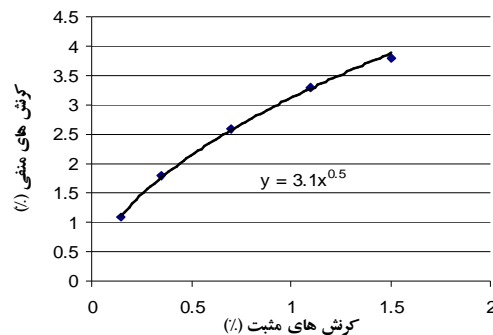
شکل ۱۰: تأثیر تغییر جهت تنش های اصلی بر مقاومت تناوبی.

نمایش تأثیر ناهمسانی در تولید فشار آب حفره‌ای

اثر تفاوت مودهای کششی و فشاری را در منحنی‌های کرنش محوری- فشار آب حفره‌ای نیز به خوبی می‌توان دید. در آزمایش‌هایی که کاملاً در ناحیه کششی انجام شده‌اند، این منحنی به سرعت تمایل به سمت کرنش‌های منفی دارد و در آزمایش‌هایی که کاملاً در ناحیه فشاری قرار گرفته‌اند، منحنی تمایل به حرکت به سمت کرنش‌های مثبت دارد؛ هر چند سرعت این حرکت کم است. اما در آزمایش‌هایی که به طور همسان انجام شده‌اند، مشابه شکل (۱۱) در منحنی کرنش محوری- فشار آب حفره‌ای تمایل منحنی به حرکت به سمت کرنش‌های منفی بیشتر از کرنش‌های مثبت است. در حالت‌های بینابینی که آزمایش در حالت کششی یا فشاری انجام شده، اما به طرف ناحیه مقابل نیز کشیده شده است، رفتار نیز در حالت بینابینی قرار دارد؛ به نحوی که در شرایطی که آزمایش در حالت فشاری انجام شده، ولی حدود ۳۰ درصد تغییر جهت تنش در سمت کششی است، ($rc = 0.7$) منحنی کرنش محوری - فشار آب حفره‌ای حالت متقارن‌تری به خود می‌گیرد. در حالی که اگر به طور دقیق وضعیت بر عکس اتفاق بیافتد، یعنی حدود ۳۰ درصد آزمایش در ناحیه فشاری باشد ($rc = 0.3$) منحنی به شدت به سمت کششی مطابق شکل‌های (۱۲) و (۱۳) کشیده می‌شود.

موضوع دیگری که در منحنی‌های کرنش محوری - فشار آب حفره‌ای می‌توان مشاهده کرد، زمان شروع تغییر

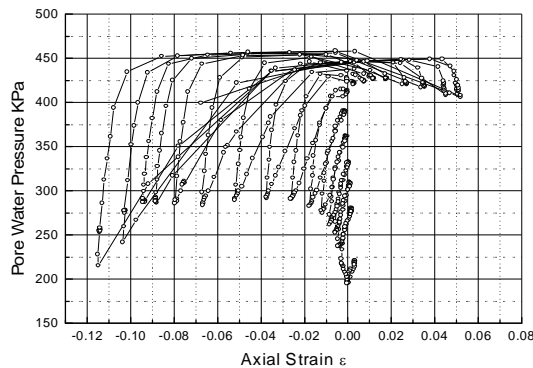
تنش برشی تناوبی به دامنه ۱۰۰ کیلوپاسکال (از ۷۰- تا ۳۰+ کیلوپاسکال) به نمونه اعمال می‌شود و نمونه پس از تحمل حدود ۱۰ سیکل روان‌گرا می‌شود. نحوه افزایش فشار آب حفره‌ای نیز در این شکل ملاحظه می‌شود.



شکل ۹: ارتباط کرنش های مثبت و منفی در هر سیکل در آزمایش همسان.

بررسی تأثیر rc بر رفتار و پتانسیل روان‌گرایی

چنان که اشاره شد، برگشت تنش‌های اصلی که باعث ایجاد ناهمسانی القایی می‌شود، از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر نتایج است. برای بررسی این موضوع، میزان تأثیر این عامل بر پتانسیل روان‌گرایی مورد بررسی قرار گرفته است. چنانکه ذکر شد با توجه به مزیت عامل ضریب برگشت (rc) نسبت به عامل ضریب ناهمسانی (K)، با توجه به مستتر بودن دامنه تنش برشی تناوبی در ضریب برگشت، از این عامل استفاده شده است. برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی از "روش تنش" که توسط Seed و Idriss معرفی شده، استفاده شده است. در این روش میزان پتانسیل روان‌گرایی با تعیین تعداد سیکل‌های منجر به روان‌گرایی بر حسب نسبت تنش تناوبی اعمالی (CSR) ارزیابی شده و ترسیم می‌شود و با میزان CSR اعمالی توسط زلزله محتمل مقایسه می‌شود. شایان ذکر است که در این روش به ضعف مقاومت در اثر ناهمسانی نیز توجه نشده است و آزمایش‌های سه‌محوری فشاری در این روش مبنای ارزیابی است که در جهت غیر محافظه‌کارانه است. بررسی میزان تأثیر ضریب rc به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش تدریجی این عامل از ۰ به ۱ (از کشش کامل تا فشار کامل) نسبت مقاومت تناوبی مطابق شکل (۱۰) افزایش می‌یابد [۱۲].



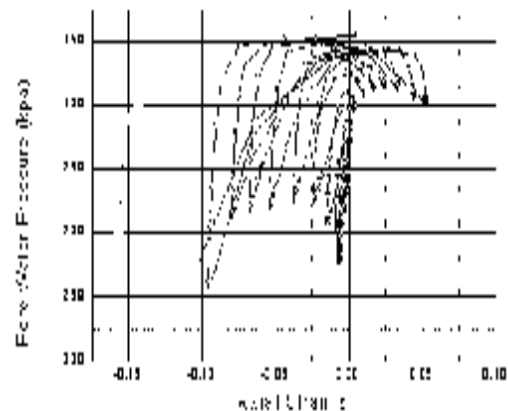
شکل ۱۳: منحنی ارتباط کرنش محوری با فشار آب حفره‌ای
($rc=0.3$).

نتیجه گیری و بحث

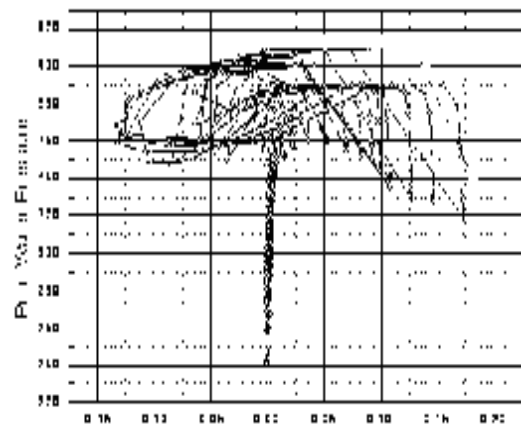
آزمایش‌های سه‌محوری تناوبی در ارزیابی پتانسیل روانگرایی ماسه‌های اشباع کاربرد فراوان دارند. آنچه در استانداردها در این باره وجود دارد، انجام این آزمایش‌ها در حالت فشاری است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با ورود سیکل تناوبی در قسمت کششی، تفاوت‌های قابل توجهی در رفتار ظاهر می‌شود تا جایی که می‌توان گفت ارزیابی‌های کنونی درباره پتانسیل روان‌گرایی جنبه غیر محافظه‌کارانه دارد. در این مقاله به بررسی این پدیده و عوامل مؤثر بر آن پرداخته شده است. یکی از دلایل این موضوع، ناهمسانی است که با برگشت تنش‌های اصلی تأثیر می‌گذارد. برگشت تنش‌های اصلی و میزان آن، به شدت بر رفتار ماسه‌های اشباع تأثیر می‌گذارد که با دستگاه سه‌محوری تناوبی تنها می‌توان برگشت یکباره این تنش‌ها را مطالعه کرد و بررسی پیوسته زاویه تنش‌های اصلی نیاز به ابزارهایی چون آزمایش برش پیشگی استوانه تو خالی دارد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که در بخش کششی، رفتار به شدت نرم‌تر از بخش فشاری است. آنچه مسلم است در شرایط واقعی نیز در موارد زیادی شرایط کششی بر فضای تنش در خاک حاکم است، مواردی چون پای شیروانی‌ها، پشت دیوارهای حائل در محدوده فشار غیرفعال، در محدوده کناری زیر پی‌های تکی و گسترده از آن دسته‌اند.

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد افزایش نسبت تنش تناوبی (CSR) تأثیری کاملاً مستقیم بر میزان پتانسیل روان‌گرایی دارد. به عبارت دیگر در همه شرایط، افزایش این نسبت باعث افزایش پتانسیل روان‌گرایی یا کاهش تعداد سیکل‌های لازم برای روان‌گرایی می‌شود. علاوه بر

شکل‌های بزرگ یا تغییر ناگهانی فشار آب حفره‌ای است. در این راستا مفهومی به نام کرنش آستانه در ادبیات فنی برای تعیین میزان کرنشی که از آن به بعد روان‌گرایی رخ می‌دهد، تعریف شده که با مراجعه به شکل‌های قبل می‌توان این کرنش را برای حالت‌های کششی و فشاری تعیین کرد. پدیده‌ای که اتفاق می‌افتد بدین نحو قابل توجیه است که با اعمال سیکل‌های تنشی به تدریج دانه‌های ماسه در اثر تحمل تنش تمایل به انبساط^{۱۱} می‌یابند که عامل افزایش فشار آب حفره‌ای محبوس شده است. در نتیجه افزایش فشار آب حفره‌ای به می‌زان اندک اندک، این میزان به فشار همه‌جانبه نزدیک شده و در این مسیر، نمونه، به سمت و تنش مؤثر صفر و روان‌گرایی تناوبی پیش می‌رود و امکان ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ به تدریج فراهم می‌شود.



شکل ۱۱: منحنی ارتباط کرنش محوری با فشار آب حفره‌ای
برای نمونه همسان ($rc=0.5$).



شکل ۱۲: منحنی ارتباط کرنش محوری با فشار آب حفره‌ای
($rc=0.7$).

در حالی که ناگهان در یک فشار آب حفره‌ای آستانه، کرنش‌ها افزایش چشمگیری می‌یابند و روان‌گرایی آغاز می‌شود. مسئله ناگهانی بودن آغاز کرنش‌های بزرگ، خطر این پدیده را خاطر نشان می‌کند.

در نهایت بر لزوم توجه آیین‌نامه‌ها بر وقوع حالات کششی که در آن تنش افقی در خاک از تنش قائم بیشتر است و در طبیعت نیز نمونه‌های زیادی از آن قابل رخداد است، تأکید می‌شود، بخصوص با توجه به اینکه رفتار در این شرایط کاملاً نرم‌شونده‌تر از حالت فشاری است.

تقدیر و تشکر

لازم است در این بخش از آقای مهندس محمود قهرمانی که عکس‌های میکروسکوپی ارائه شده در متن، نتیجه تلاش‌های ایشان بوده تشکر و قدردانی به عمل آید. نیز از همکاران آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده فنی دانشگاه تهران تقدیر می‌شود.

آن ضریب برگشت (rc) نیز تأثیر کاملاً معکوسی با پتانسیل روان‌گرایی دارد و با افزایش ضریب برگشت، تعداد سیکل‌های منجر به روان‌گرایی افزایش می‌یابد و خاک مقاومت بیشتری در برابر روان‌گرایی از خود نشان می‌دهد. تأثیر نسبت تخلخل و تنش تحکیمی در پتانسیل روان‌گرایی نیز با توجه به تئوری خط حالت پایدار بای‌د به طور همزمان مطالعه شود.

تأثیر ناهمسانی با استفاده از عوامل مختلف قابل ارزیابی است. این تأثیر که در این تحقیق با میزان کرنش‌های محدوده کششی و فشاری نیز کمی شده است، حاکی از تأثیر قابل توجه رفتار ناهمسان خاک بر روان‌گرایی است. علاوه بر این، معیار این تأثیر در نمودارهای فشار آب حفره‌ای نیز نمایان است.

منحنی‌های فشار آب حفره‌ای نسبت به کرنش محوری نیز وقوع یک کرنش آستانه را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است که کرنش‌ها تا یک محدوده فشار آب حفره‌ای مقدار بسیار اندکی دارند،

مراجع

- 1 - Seed, H. B. and Lee, K. L. (1969). "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading." *J. Soil Mechanics And Foundation Engineering*, Vol, 92, SM6, PP. 105-134.
- 2 - Casagrande, A. (1971). "On liquéfaction phenomena." *Géotechnique*, Vol. 21, No. 3, PP. 197-202.
- 3 - Castro, G. (1975). "Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands." *J. Geotech. Engng Dir. Am, Soc, Civil Engineering*, 101, GT6, PP. 551-569.
- 4 - Castro, G. and Poulos, S. J. (1977). "Factors affecting liquefaction and cyclic mobility." *J. Geotech, Engng Div. Am. Soc. Civ. Engrs*, 103, Gt6, PP. 501-516.
- 5 - Seed, H. B. (1979). "Soil Liquefaction and Cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes." *J. Geotech. Engng Dir. Am. Soc. Civ. Engrs*, 105, GT2. PP. 201-255.
- 6 - Roberttson P. K, Wride C. E. and others (2000). "The CANLEX Project: summary and conclusions." *Can. Geotech. J.* Vol. 37, PP. 563-591.
- 7 - Haghight, S. (2001). *Study of the total stress ratio and lateral strain on the undrained behavior of saturated sand utilizing stress path triaxial apparatus*. MSc. Thesis, University of Tehran.
- 8 - Bahadori, H. (2002). *Study of the cyclic behavior of saturated sand in the triaxial extensional tests*. MSc. Thesis, University of Tehran.
- 9 - Ghahramani, M. (2005). *Study of the liquefaction potential of the sands containing silt and clay*. MSc. Thesis, University of Tehran.
- 10 - Bahadori, H. and Ghalandarzadeh, A. (2002). "Study of the liquefaction potential of saturated sand performing compressional and extensional triaxial tests." *Proceeding of 3th international conference on geotechnical engineering of Iranian Geotechnical Society*, Tehran, Iran.

- 11 - Ishihara K. (1993). "Liquefaction and flow failure during earthquakes." *Geotechnique*, Vol. 43, No 3, PP. 351-415.
- 12 - Ghalandarzadeh, A. and Bahadori, H. (2005). "Effect of stress anisotropy on the cyclic behavior of saturated sand in undrained condition." *Proceeding of 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japan

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Fort pack
- 2 - SSL (Steady State Line)
- 3 - Cyclic Mobility
- 4 - Cyclic Liquefaction
- 5 - Stress Reversal
- 6 - Compression
- 7 - Extension
- 8 - Isotropic
- 9 - Reversal Coefficient
- 10 - Double Amplitude
- 11 - Dilation