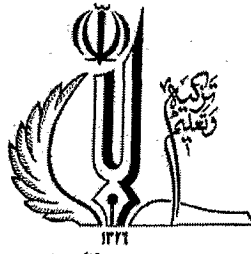


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٠٨٧٧

١٠٨٧٧

۱۳۸۷/۱۰/۱۹
۸۷۱۲۴۲



دانشگاه تبریز

دانشکده مهندسی عمران
گروه خاک و پی

پایان نامه

جهت دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد
در رشته‌ی عمران - مکانیک خاک و پی

عنوان:

بررسی و مطالعه‌ی امکان بروز روان‌گرایی در بدنه و زیر پی سدهای خاکی
(حالت موردی: سد اهر)

استاد راهنما:

دکتر جمشید صدرکریمی

استاد مشاور:

دکتر سید محسن حائری

پژوهشگر:

علی‌رضا صابری

زمستان ۸۴

۱۰۸۷۱۷

تقدیر و تشکر

بدینوسیله مراتب قدردانی و سپاس خود را از کلیه عزیزانی که در به انجام رسیدن این

پژوهش، بنده را یاری فرموده‌اند ابراز می‌دارم:

• از استاد راهنمای عزیز و ارجمندم جناب آقای دکتر جمشید صدرکریمی که همواره با دلسوزی

تمام در کلیه مراحل رساله، راهنما و راهگشای اینجانب بوده‌اند.

• از استاد مشاور گرانقدرم جناب آقای دکتر سید محسن حائری استاد دانشگاه صنعتی شریف

به جهت راهنمایی‌های ارزنده‌شان و به جهت همفکری و ارائه‌ی نقطه نظرات ارزشمندشان.

• از جناب آقای دکتر هوشنگ کاتبی، ریاست محترم دانشکده‌ی مهندسی عمران به جهت

رهنمودهای مفید و در اختیار قرار دادن امکانات دانشکده.

• از مسوولین محترم سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی و اردبیل که تسهیلات لازم جهت

دسترسی اینجانب به داده‌های مورد نیاز را فراهم نمودند.

• از آقایان مهندس حسین‌زاده و مهندس اصلان‌پور، کارشناسان ارشد دفتر فنی مهندسی سازمان

آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی و اردبیل به جهت همکاری و مساعدت‌های فراوانشان.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

که تا ابد وامدار محبت‌هایشان هستم.

نام خانوادگی دانشجو: صابری	نام: علی رضا
عنوان پایان نامه:	
بررسی و مطالعه‌ی امکان بروز روان‌گرایی در بدنه و زیر پی سدهای خاکی (حالت موردی: سد اهر)	
استاد راهنما: دکتر جمشید صدرکریمی	
استاد مشاور: دکتر سید محسن حائری	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: عمران گرایش: مکانیک خاک و پی دانشگاه: تبریز	
دانشکده: مهندسی عمران تاریخ فارغ‌التحصیلی: زمستان ۸۴ . تعداد صفحه: ۱۳۴	
کلید واژه‌ها: روان‌گرایی، سدخاکی، تنش مؤثر محدودکننده، نسبت مقاومت تناوبی.	
چکیده:	
<p>الگوی تنش در زیر پی یک سد خاکی قبل و بعد از ساخت آن یکسان نخواهد بود. بعد از آن‌که سد ساخته شد، عدد نفوذ استاندارد که جهت ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی بکار می‌رفت افزایش خواهد یافت. با این وجود روش‌های اصلاحی که در این زمینه ارائه شده‌اند، چندان کافی به نظر نمی‌رسند. در رساله‌ی حاضر سعی به تحقیق و بررسی این موضوع شده است. در این راستا سد اهر به عنوان حالت موردی انتخاب شده و اثر سربار بر مقاومت روان‌گرایی بستر سد با تحلیل روان‌گرایی آبرفت زیر بدنه‌ی آن، قبل از ساخت سد، دوران ساختمان و قبل از آبیگری سد، دوران پس از ساخت و آبیگری تا رقوم تاج فرازیند، و سرانجام دوران بعد از ساختمان سد مطالعه شده است. محاسبات فوق برای کلیه‌ی نقاط واقع بر دو مقطع، به ترتیب در طول و عرض رودخانه و برای شرایط مختلف بارگذاری با استفاده از هر دو روش مبتنی بر یافته‌های پژوهش‌های آزمایش‌گاهی و روش تطبیقی بوده است. جهت کاربرد آسان‌تر و مؤثرتر یافته‌ها، جمع‌بندی و تنظیم آن‌ها به صورت جدول‌ها و نمودارهای خلاصه نتایج، ضروری دانسته شده و با بهره‌گیری از نتایج جمع‌بندی شده، آخرین گام داده‌پردازی به صورت ریزپهنه‌بندی آبرفت از دیدگاه پارامترهای ژئوتکنیکی و پتانسیل روان‌گرایی به</p>	

ادامه‌ی چکیده:

عنوان کاربردی‌ترین شکل ارائه‌ی نتایج انجام شده است. نتایج تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته برای شرایط بارگذاری مختلف اشاره به افزایش مقاومت روان‌گرایی بستر سد، بعد از ساخت و در حین بهره‌برداری از آن دارند. بهترین شرایط پی آبرفتی از این لحاظ را می‌توان دوران ساختمان سد و قبل از آب‌اندازی آن در نظر گرفت. هرچند که نمی‌توان دوران بهره‌برداری با آب تا رقوم نرمال را بهتر شرایط طبیعی آبرفت ندانست. با این وجود، احداث سد بر آبرفت‌هایی که در زیر سد واقع نبوده تأثیر چندانی نخواهند داشت. نتیجه‌ی مطالعات یاد شده، در طراحی به پذیرش در شرایط موجود، بهسازی یا ضرورت برداشت پی آبرفتی و احداث سد خاکی بر روی سنگ کف و یا روش‌های تلفیقی خواهد انجامید.

فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان

.....	تقدیر و تشکر	أ
.....	چکیده	ج
.....	فهرست مطالب	ه
.....	مقدمه	ا

فصل اول: بررسی منابع (پایه‌های نظری و پیشینه‌ی پژوهش)

.....	مقدمه	۱-۱	۴
.....	پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش	۲-۱	۴
.....	روان‌گرایی و مفاهیم اساسی آن	۳-۱	۶
.....	روان‌گرایی و انواع آن	۴-۱	۹
.....	ارزیابی مخاطرات روان‌گرایی	۵-۱	۱۰

فصل دوم: مواد و روش‌ها

.....	مقدمه	۱-۲	۱۴
.....	استعداد روان‌گرایی و معیارهای مؤثر بر آن	۲-۲	۱۴
.....	معیارهای تاریخی	۳-۲	۱۵
.....	معیارهای زمین‌شناسی	۴-۲	۱۶

۱۷	۵-۲ معیارهای ساختاری
۲۰	۱-۵-۲ خط نسبت تخلخل حداقل
۲۱	۲-۵-۲ خط نسبت تخلخل حداکثر
۲۲	۳-۵-۲ توضیح مسأله بر پایه آزمایش‌های صحرایی و آزمایش‌گاهی
۲۴	۶-۲ اثر متغیرهای حالت اولیه خاک
۲۶	۷-۲ تخلخل بحرانی
۲۸	۸-۲ شانس روان‌گرایی
۲۹	۹-۲ کلیاتی در مورد ارزیابی روان‌گرایی با استفاده از آزمایش‌های صحرایی
۳۰	۱۰-۲ آزمایش مقاومت نفوذ استاندارد
۳۲	۱۱-۲ تصحیح نتایج آزمایش
۳۲	۱-۱۱-۲ ضریب تصحیح تنش سربار، C_N
۳۴	۲-۱۱-۲ میزان جذب انرژی، C_E
۳۵	۳-۱۱-۲ ضریب تصحیح طول میله، C_R
۳۶	۴-۱۱-۲ ضریب تصحیح قطر گمانه، C_B
۳۶	۵-۱۱-۲ ضریب تصحیح نوع نمونه‌گیر، C_S
۳۶	۱۲-۲ مکانیزم روان‌گرایی و روش ارزیابی پتانسیل وقوع آن
۳۷	۱۳-۲ تنش برشی ایجاد شده توسط زلزله
۳۹	۱-۱۳-۲ ضریب کاهش تنش
۴۱	۱۴-۲ تنش برشی تناوبی مولد روان‌گرایی
۴۲	۱۵-۲ روش محاسبه
۴۳	۱۶-۲ برآورد روان‌گرایی بر اساس آزمون‌های آزمایش‌گاهی

۴۶	۱۷-۲	برآورد روان‌گرایی بر اساس مشاهدات صحرائی
۴۶	۱۸-۲	روش سید و همکاران (۱۹۸۵)
۵۱	۱۹-۲	ضریب بزرگی مقیاس
۵۲	۱-۱۹-۲	ضرایب مقیاس سید و ادريس (۱۹۸۲)
۵۳	۲-۱۹-۲	ضرایب مقیاس اصلاح شده‌ی ادريس
۵۳	۳-۱۹-۲	ضرایب مقیاس آمبراسیز (۱۹۸۸)
۵۴	۴-۱۹-۲	ضرایب مقیاس آرانگو (۱۹۹۶)
۵۵	۵-۱۹-۲	ضرایب مقیاس آندرس و استوکو (۱۹۹۷)
۵۵	۶-۱۹-۲	ضرایب مقیاس یود و نوبل (۱۹۹۷)
۵۶	۷-۱۹-۲	ضرایب مقیاس ادريس (۱۹۹۹)
۵۸	۲۰-۲	اصلاح مربوط به اثر سربار و شیب زمین
۵۹	۱-۲۰-۲	ضریب تصحیح سربار
۶۴	۱-۱-۲۰-۲	تأثیر عمر نهشته
۶۵	۲-۲۰-۲	ضریب تصحیح شیب زمین
۶۵	۲۱-۲	روش ادريس و بولانگر (۲۰۰۳)

فصل سوم: بررسی و مطالعه‌ی روان‌گرایی در سد اهر

۷۱	۱-۳	مقدمه
۷۱	۲-۳	موقعیت
۷۲	۳-۳	مشخصات سد
۷۲	۴-۳	عملیات ژئوتکنیکی

- ۳-۵ بررسی پدیده‌ی روان‌گرایی در پی آبرفتی سد اهر ۷۷
- ۳-۶ تنش برشی ناشی از زلزله ۷۸
- ۳-۷ شرایط بارگذاری و نحوه‌ی محاسبه‌ی آن ۷۸
- ۳-۷-۱ بارگذاری نوع ۱ ۸۱
- ۳-۷-۲ بارگذاری‌های نوع ۲ و ۳ و ۴ ۸۱
- ۳-۸ آنالیز تنش‌های کل در پی آبرفتی ۸۳
- ۳-۹ آنالیز تراوش ۸۴
- ۳-۱۰ مقاومت برشی خاک در برابر روان‌گرایی ۸۵
- ۳-۱۰-۱ روش اول: بهره‌گیری از یافته‌های آزمایش‌گاهی ۸۵
- ۳-۱۰-۲ روش دوم: روش انطباقی سید و همکاران (۱۹۸۵) ۸۵

فصل چهارم: نتایج و بحث

- ۴-۱ مقدمه ۸۸
- ۴-۲ ضرایب اطمینان عدم روان‌گرایی در پی آبرفتی سد اهر ۸۸
- ۴-۳ ریزپهنه‌بندی روان‌گرایی ۱۰۰

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ۴-۱ نتیجه‌گیری ۱۲۲
- ۴-۲ پیشنهادها ۱۲۵
- منابع مورد استفاده ۱۳۱

مقدمه

روان‌گرایی به عنوان یکی از مهم‌ترین، جالب‌ترین و پیچیده‌ترین مباحث ژئوتکنیک لرزه‌ای به شمار می‌آید. پدیده‌ای که می‌توان به طور ساده آن را چنین توصیف کرد: روان‌گرایی روان شدن خاک‌های ماسه‌ای اشباع به هنگام ارتعاشات زلزله در اثر بالا رفتن فشار آب منفذی است. در واقع این واژه کلیه‌ی پدیده‌هایی که شامل تغییر شکل‌های اضافی خاک‌های اشباع فاقد چسبندگی می‌شوند را در بر می‌گیرد (NRC 1985).

اگرچه سابقه‌ی روان‌گرایی به زلزله‌های بسیار قدیمی باز می‌گردد، اما در مقایسه با سایر مباحث مهندسی عمران کاملاً جوان است. در واقع به دنبال حوادث مصیبت بار ناشی از روان‌گرایی طی زلزله‌های ۱۹۶۴ آنکورجیج آلاسکا و نیگاتای ژاپن و نیز مخاطرات بالقوه بوجود آمده ناشی از رشد روزافزون سازه‌های بزرگ و حساس نظیر سدها و نیروگاه‌های اتمی در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی بود که شناخت پدیده‌ی روان‌گرایی به سرعت رو به گسترش نهاد. بروز روان‌گرایی در نواحی با ساختار ماسه‌ای اشباع، می‌تواند خسارت‌های عمده‌ای بر سازه‌های واقع در آن نواحی وارد نماید. در اثر وقوع روان‌گرایی، سازه‌ها به درون زمین فرو رفته (نشست زیاد) و یا کج (دوران زیاد) می‌شوند. ایجاد خرابی در سدهای خاکی‌ای که مستقیماً بر روی پی‌های آبرفتی احداث می‌گردند، به دلیل طبیعت و ساختار خاص آبرفت‌های رودخانه‌ای، همواره امری محتمل می‌باشد. از این رو می‌بایست پتانسیل روان‌گرایی پی‌های آبرفتی سدهای خاکی، با توجه به خصوصیات زلزله‌های منطقه، به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد.

در سال ۱۹۷۱ پروفیسور سید و پروفیسور ایدریس با همکاری یکدیگر روش ساده شده‌ای را به منظور ارزیابی مقاومت روان‌گرایی خاک‌ها ارائه نمودند که به صورت استاندارد قابل قبول در سراسر جهان منتشر شد و مورد استفاده قرار گرفت (Seed and Idriss 1971). این روش بعدها و

طی مقالات مهم مختلف نظیر سید (۱۹۷۹)، سید و ادريس (۱۹۸۲)، سید و همکاران (۱۹۸۵) مورد بازنگری قرار گرفت و اصلاح شد. در سال ۱۹۸۵، گردهمایی از سوی مرکز ملی مطالعات مهندسی زلزله (NCEER) برگزار شد که در آن یافته‌های موجود در زمینه ارزیابی روان‌گرایی گردآوری شده و مورد نقد و بررسی قرار گرفت (NRC 1985). بعد از آن تاریخ هیچ‌گونه مرور و تجدید نظر کلی تازه‌ی دیگری صورت نگرفت، تا آن‌که مرکز ملی مطالعات مهندسی زلزله اقدام به برگزاری دو گردهمایی دیگر در سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۸ نمود. طی این دو گردهمایی روش پیشنهادی سید و ایدريس (۱۹۷۱) مورد ارزیابی مجدد قرار گرفت و اضافات جدیدی به آن افزوده گردید.

یکی از مهم‌ترین عناوین مورد بحث در این دو گردهمایی، بررسی اثر سربار بر روی مقاومت روان‌گرایی خاک بود. توجه به این مسأله در تحلیل روان‌گرایی پی سدهای خاکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هرچه میزان تنش مؤثر اولیه بیشتر باشد، خاک از پتانسیل کمتری برای روان‌گرایی برخوردار است. حال با توجه به این مطلب که الگوی تنش زمین پی یک سد خاکی قبل و بعد از احداث آن، در شرایط کاملاً متفاوتی از نظر میزان تنش مؤثر وارده و بالطبع عدد نفوذ استاندارد نرمالیزه، که به دلیل سادگی یکی از نخستین آزمایش‌هایی است که به طور گسترده در ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، به سر می‌برد، لذا دیگر نمی‌توان از پارامترهای خاک با همان مقادیر قبل از احداث سد برای ارزیابی روان‌گرایی استفاده کرد. در این میان روش‌های اصلاحی برای در نظر گرفتن این موضوع ارائه شده که به عنوان مثال می‌توان به روش پیشنهادی سید و هاردر (۱۹۹۰) اشاره داشت، لیکن نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه همچنان احساس می‌شود. هدف اصلی در این رساله بررسی و مطالعه‌ی همین موضوع است. در این راستا سد اهر به عنوان حالت موردی انتخاب شده، و اثر زلزله بر این سد خاکی و پی آبرفتی آن و مقاومت پی در برابر امکان بروز روان‌گرایی مورد توجه قرار گرفته است.

فصل اول

بررسی منابع

۱-۱ مقدمه

اثرات ویران‌کننده روان‌گرایی بر روی سازه‌های مختلف توسط صدها محقق در سراسر جهان مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. پیشرفت‌های صورت گرفته در این زمینه به خصوص طی ۳۰ سال گذشته قابل توجه بوده، اما راه تحقیق در این باب هنوز کاملاً هموار نگشته است و نیاز به انجام تحقیقات بیشتر همچنان احساس می‌شود. در این فصل روان‌گرایی، مفاهیم و معیارهای مؤثر بر آن تشریح شده است.

۲-۱ پایه‌های نظری و پیشینه‌ی پژوهش

سدهایی که بر روی بسترهای رسوبی اشباع مانند لایه‌های ماسه‌ای بنا می‌گردند، در حین زلزله مستعد روان‌گرایی و شکست می‌باشند. روان‌گرایی در شالوده‌ی سد باعث تخریب یا ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ ماندگار در بدنه‌ی آن می‌گردد. برداشت رسوبات و بنا کردن سد بر روی بستر سنگی اغلب هزینه‌های زیادی را می‌طلبد و گاهی به دلیل عمق زیاد رسوبات غیر ممکن می‌نماید. بنابراین بررسی و ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی و بکارگیری روش‌های مناسب بهسازی زمین در اولویت قرار دارد.

در این بین سدهای خاکی در برابر زلزله نسبت به سایر انواع سدها (سدهای بتنی)، بیشتر مستعد تخریب می‌باشند. تنوع خاص بدنه‌ی سدهای خاکی، گوناگونی جنس و ضخامت و شرایط دیگر شالوده‌ی آنها و تفاوت‌های اصولی ویژگی‌های مؤثر زلزله‌ها، همه عواملی هستند که هر کدام از آنها می‌تواند سبب پیچیدگی در نتایج شوند.

این پدیده تاکنون موجب تخریب سدهای زیادی شده است. شکست سد شفیلد^۱ در زلزله ۱۹۲۵ سانتاباربارا در اثر روان‌گرایی خاک زیر پی آن و شکست سد سان‌فرناندوی^۲ پایین در سال ۱۹۷۱ در اثر لغزش شیروانی سد بعد از آن‌که دچار روان‌گرایی گشت، جزء شناخته‌شده‌ترین مثال‌ها در تاریخ مهندسی سدسازی به شمار می‌روند. بلافاصله بعد از ایجاد روان‌گرایی در سد سان‌فرناندو دستور تخلیه ۸۰ هزار سکنه پایین دست داده شد، اما اگر مصرف آب زیاد نبود و سطح آب مخزن مثلاً یک متر بالاتر می‌بود و یا اگر زلزله تنها چند ثانیه بیشتر به طول می‌انجامید، تخریب کامل سد و وقوع یک فاجعه حتمی بود. سد سان‌فرناندو بالایی نیز در همان زلزله بر اثر روان‌گرایی تخریب شد.

بعد از آن‌که ترزاقی^۳ در سال ۱۹۲۵ برای اولین بار پدیده روان‌گرایی را به جامعه مهندسی معرفی کرد، کاساگرانده مفهوم تخلخل بحرانی را به منظور ارزیابی روان‌گرایی ارائه نمود. روسکو در دهه‌ی ۵۰ میلادی مفهوم حالت بحرانی را برای خاک‌های رسی ارائه کرد که بعدها این مفاهیم وارد مطالعه‌ی ماسه‌ها نیز شد. پیشاپ طی سال‌های ۱۹۶۲ و ۱۹۶۳ دستگاه سه محوری را طراحی کرد. پس از زلزله ۱۹۶۴ نیگاتا ($M = 7.5$) و پس از آن زلزله Good Friday در آلاسکا ($M = 8.4$) و خرابی‌هایی که بیشتر ناشی از روان‌گرایی بود، سید و لی^۴ تست‌های سه‌محوری تناوبی را برنامه‌ریزی کردند و بدین ترتیب مفهوم روان‌گرایی اولیه و روان‌گرایی کامل، ارائه شد. با این حال با توجه به این‌که روان‌گرایی

^۱ Sheffield Dam

^۲ San Fernando Dam

^۳ Karl Terzaghi (1883-1963)

^۴ Seed and Lee (1966)

در عمل محصول بارگذاری رفت و برگشتی همانند زلزله می‌باشد، ضروری بود که ارزیابی مستقیم امکان بروز روان‌گرایی در مقابل زلزله ارائه گردد. پیشگامان این مطلب سید و ادیس بودند که با ارائه‌ی یک روش ساده مسیر جدیدی را در این راستا باز کردند. روش آن‌ها مبتنی بر تعیین نسبت تنش برشی مقاوم خاک در برابر روان‌گرایی به ازای تعداد معینی از سیکل‌های بارگذاری بود.

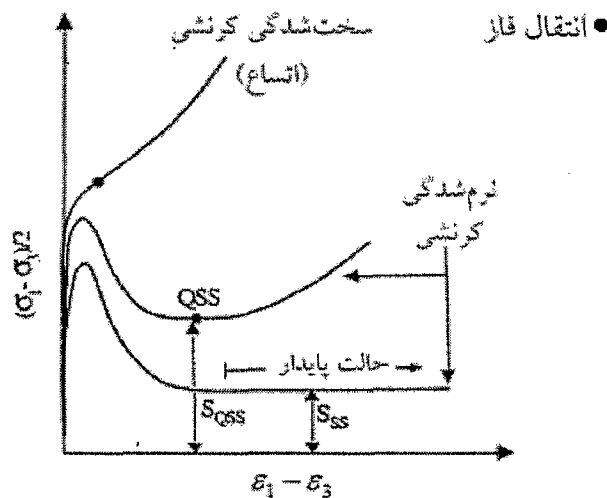
۳-۱ روان‌گرایی و مفاهیم اساسی آن

روان‌گرایی یکی از مخاطرات عمده‌ای است که مناطق زلزله‌خیزی که نهشته‌های خاکی اشباع سست در آن‌ها وجود دارد، با آن مواجه هستند. پدیده‌ای که به صورت تغییر شکل مصالح دانه‌ای از حالت جامد به مایع، ناشی از افزایش فشار آب منفذی بین دانه‌ای و کاهش تنش مؤثر تعریف می‌شود (Youd et al. 2001). مصالح غیرچسبنده در اثر بارگذاری نوسانی کاهش حجم پیدا می‌کنند، مشروط بر آن‌که کرنش برشی از مرز 0.01 درصد بگذرد (Fell et al. 1992). این مسأله بیشتر در خاک‌های غیر متراکم وجود دارد و هرگز در خاک‌های متراکم دیده نشده است. وقتی که خاک اشباع بوده و از زه‌کشی آب منفذی آن نیز جلوگیری شده باشد، این تمایل به کاهش حجم تحت اثر بارگذاری نوسانی، باعث افزایش فشار آب منفذی خواهد شد. چنانچه این افزایش فشار به حدی باشد که فشار آب منفذی برابر فشار روبار شود، تنش مؤثر صفر گشته و نتیجتاً خاک مقاومت برشی خود را از دست می‌دهد. چرا که مدول برشی G که کرنش برشی را کنترل می‌کند، تابعی از متوسط تنش مؤثر قائم است و با افزایش فشار منفذی لرزه‌ای کاهش می‌یابد. این همان اتفاقی است که منجر به از میان رفتن سختی برشی شده و سبب می‌گردد تا ماسه‌ی اشباع، رفتاری مشابه رفتار یک سیال پیدا کرده و به حالت روان درآید. به همین دلیل است که این پدیده روان‌گرایی خوانده می‌شود.

میزان فشار منفذی بوجود آمده در خاک، بستگی به توازن میان کاهش حجم و واگشت بوجود

آمده در آن دارد. بدین ترتیب که در نتیجه تنش‌های اعمال شده، ساختار خاک تمایل به متراکم شدن و در نتیجه انتقال تنش به آب منفذی و کاهش تنش از دانه‌های خاک خواهد داشت. از سوی دیگر، ساختار دانه‌ای خاک، برای ثابت نگاه داشتن حجم، به میزان مورد نیاز واگشت خواهد داشت، که توازن میان این دو تعیین‌کننده‌ی میزان افزایش فشار آب منفذی بوجود آمده خواهد بود.

در آزمایش‌گاه روان‌گرایی تحت بار استاتیکی به صورت رفتار نرم‌شدگی کرنشی زه‌کشی نشده (حجم ثابت)، که به معنی کاهش عمده مقاومت بعد از رسیدن به یک مقاومت حداکثر در کرنش‌های نسبتاً کوچک (عموماً کوچک‌تر از ۱ درصد) است، بروز می‌کند (شکل ۱-۱). این مقاومت نهایی با عناوین مقاومت حالت پایدار توسط کاسترو (۱۹۶۹)، مقاومت بحرانی توسط کاساگرانده (۱۹۳۶)، مقاومت باقیمانده توسط سید (۱۹۸۷) و مقاومت پس از روان‌گرایی^۵ توسط سایرین خوانده شده است. باید خاطر نشان کرد که نقطه‌ی انتقال فاز در شکل (۱-۱) که در سال ۱۹۷۵ توسط ایشی‌هارا تعریف شد نقطه‌ای است که در آن رفتار ماسه‌ی انقباضی و انبساطی از یکدیگر جدا می‌شوند.



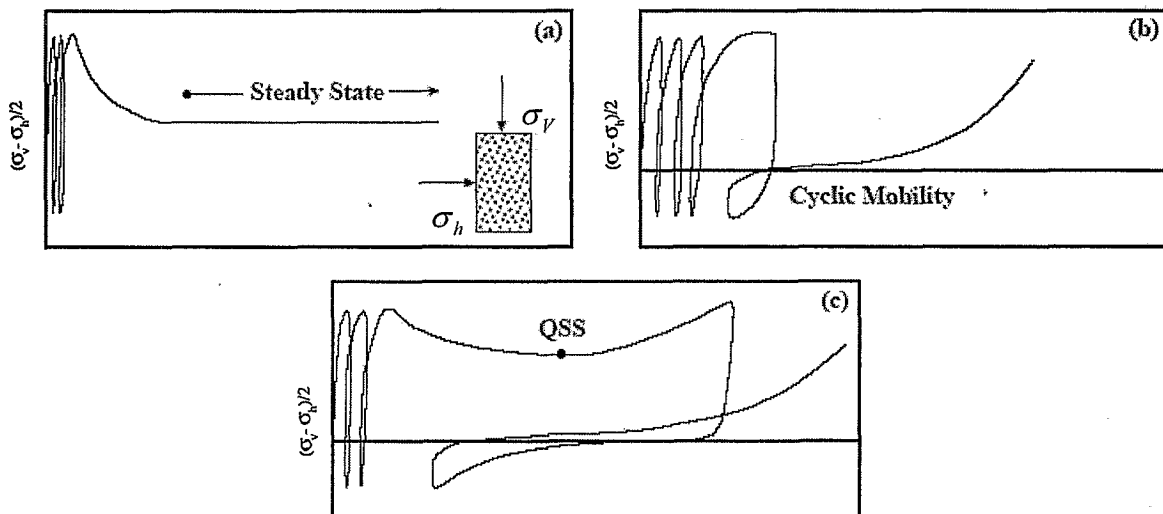
شکل ۱-۱: توصیف رفتار زه‌کشی نشده‌ی ماسه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی.

(Q_{SS} = حالت نیمه پایدار؛ S_{QSS} و S_{SS} = به ترتیب مقاومت حالت نیمه پایدار و حالت پایدار؛ σ_1 و σ_3 = به ترتیب تنش‌های اصلی و فرعی؛ ε_1 و ε_3 = به ترتیب کرنش‌های اصلی و فرعی می‌باشند).

⁵ Post Liquefaction

اما تحت بارگذاری متناوب زه‌کشی نشده، روان‌گرایی خود را یا به صورت رفتار نرم‌شدگی کرنشی در حین بارگذاری متناوب، درست شبیه حالت استاتیکی، آشکار می‌کند و یا به صورت تحرک تناوبی مطابق شکل (۲-۱) بروز می‌نماید. تحرک تناوبی زمانی که ماسه رو به سوی حالت گذرای تنش مؤثر صفر ($\sigma'_3 = 0$) می‌رود، سبب افزایش کرنش‌های بزرگ متناوب خواهد شد. اولین بار که $\sigma'_3 = 0$ شود، اصطلاحاً روان‌گرایی اولیه نامیده می‌شود.

در مورد ماسه‌های سست، روان‌گرایی اولیه بیانگر حالتی از نرم‌شدگی همراه با تغییرشکل‌های بزرگ ناگهانی است. این مسأله با محو مقاومت برشی، در حین و یا بلافاصله بعد از ایجاد فشار آب منفذی ۱۰۰٪، همراه خواهد بود. چنین امری می‌تواند در یک پی یا شیروانی خاکی منجر به تغییرشکل‌های بسیار بزرگ یا حتی گسیختگی‌های جریانی تحت تنش‌های برشی متوسط تا زیاد شود. این پدیده روان‌گرایی کلی و یا به اختصار روان‌گرایی نامیده می‌شود (شکل ۲-۱-الف). در ماسه‌های نیمه متراکم تا متراکم، نوعی از رفتار نرم‌شدگی ایجاد خواهد شد که همراه خواهد بود با افزایش



شکل ۲-۱: (الف) روان‌گرایی، (ب) تحرک سیکلی تحت بارگذاری تناوبی، (ج) روان‌گرایی محدود ناشی از تحرک سیکلی ($\sigma_h =$ فشار محفظه؛ $\sigma_v =$ تنش محوری).

کرنش‌های برشی تناوبی. با این تفاوت که در این گونه ماسه‌ها، تمایل به اتساع در حین برش مانع از کاهش عمده‌ی مقاومت و ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ می‌شود (شکل ۱-۲-ب). حالت سوم، مربوط به وضعیتی مابین دو حالت قبلی است. بدین ترتیب که حتی اگر ماسه سست هم باشد و در ابتدا تمایل به روان شدن داشته باشد در ادامه، بسته به میزان فشار محصور کننده، مجدداً مقاومت خود را بازخواهد یافت و میزان محدودی از کرنش برشی سیکلی مشاهده خواهد شد (شکل ۱-۲-ج). این حالت به عنوان روان‌گرایی محدود شناخته می‌شود (Ansal and Tonuk 2005). در محل، فشار آب منفذی در اثر بارگذاری زلزله، در خاک‌های غیرچسبنده با نفوذپذیری کم همچون ماسه‌ها که عمل زهکشی در آن‌ها به سختی انجام می‌شود افزایش می‌یابد و اصولاً آن‌ها مستعدترین خاک‌ها در برابر روان‌گرایی می‌باشند.

۱-۴ روان‌گرایی و انواع آن

پدیده‌ی روان‌گرایی را می‌توان به دو بخش روان‌گرایی جریانی^۶ و تحرک تناوبی^۷ تقسیم کرد. در عمل روان‌گرایی جریانی، کمتر از تحرک تناوبی اتفاق می‌افتد اما اثرات آن بسیار شدیدتر است. روان‌گرایی جریانی زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی لازم برای تعادل استاتیکی توده‌ی خاک (تنش برشی استاتیکی) بزرگ‌تر از مقاومت برشی خاک در حالت روان‌گرا باشد. این امر معمولاً منجر به تغییر شکل‌های برشی بزرگ و ناگهانی در خاک خواهد شد. شکست سد شفیلد در زلزله ۱۹۲۵ سانتاباریا و روان‌گرایی شیروانی بالادست سد سان‌فرناندو پائین در اثر زلزله سال ۱۹۷۱ سان‌فرناندو نمونه‌هایی از روان‌گرایی جریانی می‌باشند.

برعکس روان‌گرایی جریانی، تحرک تناوبی زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی استاتیکی کمتر از

^۶ Flow Liquefaction

^۷ Cyclic Mobility

مقاومت خاک روان شده باشد. اما مجموع تنش‌های دینامیکی و استاتیکی بزرگ‌تر از مقاومت برشی خاک روان شده خواهد بود. تغییر شکل‌های ناشی از تحرک تناوبی که به گسترش جانبی^۸ مشهورند، هرچند عموماً به شدت خسارات وارده ناشی از روان‌گرایی جریانی نیستند، اما می‌توانند سبب ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ ماندگار و حتی شکست سازه شوند.

یک حالت خاص از تحرک تناوبی روان‌گرایی سطحی^۹ است. گسیختگی‌های روان‌گرایی سطحی، در اثر جریان رو به بالای آب که به هنگام استهلاک اضافه فشار منفذی ناشی از زلزله ایجاد می‌شود، رخ می‌دهد. از نشانه‌های گسیختگی روان‌گرایی سطحی می‌توان نشست‌های بزرگ قائم و جوشش ماسه را که در زلزله‌ی ۱۶ ژوئن ۱۹۶۴ نیگاتا به طور گسترده مشاهده شد، نام برد.

۵-۱ ارزیابی مخاطرات روان‌گرایی

صدمات ناشی از روان‌گرایی ممکن است یا به طور مستقیم ایجاد شوند، مثلاً در اثر مواردی نظیر گسیختگی شیروانی و خاک زیر پی یک سد خاکی ناشی از کاهش مقاومت خاک، گسترش جانبی، نشست خاک، جوشش خاک در اثر حرکت رو به بالا از یک ناحیه با فشار منفذی زیاد، و یا به طور غیرمستقیم، مثلاً در اثر قطع جریان آب و در نتیجه گسترش آتش در هنگام وقوع زلزله بوجود آیند.

برخی از انواع گسیختگی‌های ناشی از روان‌گرایی عبارتند از:

- زمین لغزش: مقاومت برشی استاتیکی در شیروانی‌های خاکی عموماً تنها کمی بزرگ‌تر از تنش‌های برشی استاتیکی هستند، لذا کاهش مقاومت برشی در اثر روان‌گرایی می‌تواند به آسانی سبب زمین لغزش در آن‌ها شود. چنین گسیختگی‌هایی در شیروانی‌های طبیعی و مصنوعی و نیز در سدهای خاکی اتفاق افتاده است.

^۸ Lateral Spreading

^۹ Level Ground Liquefaction