



وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

مؤسسه تحقیقات خاک و آب

خاک‌های روان گرا (Liquefiable Soils)

نگارنده

میر ناصر نویدی

استادیار پژوهش بخش تحقیقات ارزیابی اراضی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه فنی: 552

1396

عنوان: خاک‌های روان گرا (Liquefiable Soils)

نگارنده: میر ناصر نویدی

ناشر: مؤسسه تحقیقات خاک و آب

سال انتشار: 1396

نوبت چاپ: اول

تیراژ: 100 نسخه

ویراستار: آقای دکتر حمید قیومی محمدی

صفحه‌آرایی و حروفچینی: شیرین اسدزاده

کارشناس انتشارات: زهرا محمدی

طراح جلد: سید هرمز سجادی

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: انتشارات سنا

قیمت: 5000 تومان

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

این نشریه با شماره **52248** در تاریخ **96/6/7** در مرکز اطلاعات و مدارک علمی

کشاورزی به ثبت رسیده است.

نقل مطالب با ذکر منبع بلامانع است.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

.....	مقدمه
4.....	مفهوم جریان روانگرایی و تحرک چرخشی (دوره‌ای).....
4.....	جریان روان گرایی.....
6.....	تحرک چرخشی (دوره‌ای).....
6.....	اثرات حاصل از روان گرایی.....
7.....	"مثالهایی از خسارات ناشی از پدیده روان گرایی در اثر زلزله".....
7.....	1- زلزله سال 1964 در نیگیتای ژاپن.....
8.....	2- زلزله سال 1964 در آلاسکا.....
8.....	3- زلزله سال 1981 در لوماپریتای امریکا.....
8.....	دلایل وقوع روان گرایی.....
9.....	نسبت پوکی بحرانی.....
10.....	حالت ماندگار در تغییر شکل.....
13.....	جریان روان گرایی از دیدگاه مفاهیم مکانیک خاک.....
15.....	تحرک دوره‌ای (چرخه‌های تکرار شونده نیروی برشی اعمال شده).....
17.....	بررسی توان روان گرایی.....
18.....	دلایل وقوع روانگرایی و خصوصیات خاکهای مستعد.....
22.....	چگونگی کاهش خطرات ناشی از روان گرایی خاک.....
22.....	الف) عدم بهره‌برداری از خاکهای مستعد روان گرایی.....
23.....	ب) (احداث سازه‌های مقاوم به روان گرایی.....
23.....	1- احداث پی کم عمق (سطحی).....
25.....	2- احداث پی عمیق.....
26.....	ج) (اصلاح خاک.....
26.....	روش تراکم با شناوری ارتعاشی.....
27.....	روش تراکم ارتعاشی.....
28.....	روش ستون سنگی.....
29.....	احداث شمع تراکمی.....
30.....	روش تزریق تراکمی.....
30.....	مفهوم جریان روانگرایی و تحرک چرخشی (دوره‌ای).....
30.....	تکنیک‌های زهکشی.....
35.....	منابع.....

خاک‌های روان‌گرا (Liquefiable Soils)

مقدمه

روان‌گرایی یا liquefaction پدیده‌ای است که طی آن مقاومت و سختی خاک در اثر لرزش‌های (تکان‌های) ناشی از زلزله یا هرگونه بارگذاری سریع کاهش می‌یابد و خاک همانند یک سیال رفتار می‌کند. اسلادن و همکاران (1985) تعریف دقیق‌تری از روان‌گرایی خاک‌ها را به شرح ذیل ارائه نموده‌اند:

"روان‌گرایی عارضه‌ای است که در آن توده خاک درصد قابل توجهی از مقاومت برشی خود را از دست می‌دهد و این عمل زمانی رخ می‌دهد که خاک در معرض بارگذاری یکنواخت، دوره‌ای و یا تلاطمی (ناگهانی) قرار گیرد و به‌گونه‌ای همانند مایع جریان می‌یابد تا جایی که تنش‌های برشی موثر بر روی توده مورد نظر به همان اندازه مقاومت برشی کاهش یافته کوچک باشد."

در یک تعریف عمومی‌تر از روان‌گرایی، خاک به عنوان تغییر شکل از حالت جامد به حالت روان‌گرا شده تعبیر شده که علت آن فشار افزایش یافته حفره‌ای و کاهش تنش موثر است. روان‌گرایی و پدیده‌های مرتبط با آن مسئول حجم عظیم و مهیب خسارت ناشی از زلزله‌های تاریخی در سراسر دنیا بوده است.

روان‌گرایی در خاک‌هایی که قبلاً "از آب اشباع شده‌اند اتفاق می‌افتد. در خاک‌های اشباع فضای مابین ذرات منفرد کاملاً" توسط آب پر شده است. این آب فشاری بر روی ذرات خاک اعمال می‌کند که موجب می‌گردد خود ذرات مجزا بر روی هم و بطور محکم فشار وارد نمایند. از فشار خالص بین ذرات خاک در یک نقطه بخصوص از خاک به عنوان فشار سربار موثر یاد می‌شود (که برابر است با کل فشار عمودی منهای فشار آب). پیش از وقوع زمین لرزه فشار آب نسبتاً کم است، با این وجود لرزش‌ها و تکان‌های ناشی از زلزله می‌تواند سبب افزایش فشار آب تا حدی شود که ذرات خاک به آسانی و بطور مرتبط با هم حرکت کرده و جابجا شوند. در نهایت فشار آب مساوی و یا بزرگتر از کل فشار عمودی شده و نتیجتاً باعث

کاهش فشار سربار موثر تا حد صفر می‌گردد. این واقعه بدین معنی است که دیگر نیرویی بین ذرات خاک وجود ندارد. از آنجا که قوام (پایایی) خاک‌های ماسه‌ای بطور مستقیم متناسب است با فشار سربار موثر، لذا چنین خاک‌هایی مقاومت برشی خود را از دست داده و ذرات خاک به سادگی متحرک می‌شوند. البته تکان‌های حاصل از زمین لرزه اغلب سبب این گونه افزایش در فشار آب می‌شود ولی فعالیت‌های مربوط به ساخت و ساز و عملیات عمرانی مانند انفجار (Blasting) سبب افزایش فشار آب می‌گردد. زمانی که روان‌گرایی رخ می‌دهد مقاومت خاک کاهش یافته و توان نهشته‌های خاکی برای تقویت (تحمل) پی ساختمان‌ها و پل‌ها همان‌گونه که در اشکال 1 و 2 دیده می‌شود کاهش می‌یابد.



شکل 1- آپارتمان‌های آسیب دیده در اثر پدیده روان‌گرایی در زلزله نیگتا،

ژاپن 1964



شکل 2- پی پل که در اثر حرکت‌های جانبی ناشی از پدیده روان‌گرایی آسیب دیده است (زلزله نیگتا، ژاپن 1964)

خاک‌های روان‌گرا همچنین فشار زیادی بر روی دیوارهای حایل اعمال می‌کنند که این عمل می‌تواند منجر به کج شدن و یا لغزش این ابنیه شود. نتیجه نهایی این جابه‌جایی، نشست خاک پشت دیوار حایل و یا تخریب ساختمان‌های موجود بر سطح زمین می‌باشد (شکل 3). ضمناً افزایش فشار آب می‌تواند سبب زمین لغزه و فروریختگی سدها شود. به‌طور مثال زلزله سال 1971 سن فرناندو سبب لغزش زمین در زیر آب پشت سد شد.



شکل 3- نشست خاک روان‌گرا در پشت دیوار حائل

مفهوم جریان روان‌گرایی و تحرک چرخشی (دوره‌ای)

واژه Liquefaction (روان‌گرایی) در واقع برای توصیف چندین پدیده به‌کار رفته است و از آنجائی‌که این رویدادها اثرات مشابهی می‌توانند از خود بروز دهند، لذا تمایز بین آن‌ها بسیار مشکل است. این پدیده‌ها را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم نمود: جریان روان‌گرایی و تحرک چرخشی (دوره‌ای).

جریان روان‌گرایی

در این رخداد تعادل ایستا به وسیله بارگذاری‌های ایستا و پویا بر روی نهشته‌های خاکی دارای مقاومت برشی باقیمانده کم از بین می‌رود. مقاومت برشی باقیمانده همان مقاومت برشی یک خاک روان‌گرا شده است. به عنوان مثال

بارگذاری ایستا از طریق ایجاد ساختمان‌های جدید بر روی سراسیمبی اعمال می‌گردد که سبب اعمال نیروهای اضافی بر روی خاک موجود در زیر پی این بناها می‌گردد. زمین‌لرزه‌ها، انفجار، شمع زدن همگی مثال‌هایی از بارهای پویایی هستند که پدیده جریان روان‌گرایی را تشدید می‌نمایند. زمانی که فشارهای وارده تشدید شود، مقاومت برشی خاک مستعد به جریان روان‌گرایی دیگر توان ایستادگی در برابر تنش ایستایی را که بر روی خاک و قبل از آشفته‌گی بر روی آن اعمال شده است را ندارد.

مقایسه‌ای که در این مورد می‌توان ارائه کرد جایی است که پایداری ایستای یک اسکی باز در لحظه‌ای که در دروازه شروع قرار دارد بهم بخورد و آن هنگامی است که اسکی باز خود را از صندلی شروع رها می‌کند. پس از این آشفته‌گی نسبتاً "کوچک نیروی جلو برنده ایستا از طریق نیروی ثقل ایجاد می‌شود که بزرگتر است از نیروی مقاومت کننده اصطکاک موجود بین چوب اسکی و برف که سبب سرعت گرفتن ورزشکار به سمت پائین سرازیر می‌شود. مسیری که اسکی باز را به وضعیت ناپایدار می‌رساند شبیه آشفته‌گی استاتیک یا دینامیکی است که جریان روان‌گرایی را تشدید می‌کند. در هر دوی این موارد یک آشفته‌گی نسبتاً "کوچک منجر به ناپایداری می‌شود که به نیروی ثقل اجازه می‌دهد تا تولید جابجایی‌های بزرگ و سریع نماید. خصوصیت اصلی گسیختگی‌ها و شکستگی‌های حاصل از جریان روان‌گرایی غالباً "جابه‌جایی‌های سریع و بزرگ می‌باشد که منجر به ایجاد آثار مهیب و خطرناکی همانند آنچه در زلزله نیگیتا در سال 1964 اتفاق افتاد می‌گردد. در این زلزله چندین بلوک آپارتمانی، به‌طور کامل و یک‌جا واژگون گردیدند. در نمونه‌ای دیگر از آثار مخرب ناشی از جریان روان‌گرایی، می‌توان به لغزش 130 ایکری زمین بر روی عدسی‌های ماسه‌ای در آلاسکا اشاره کرد. در مثال - هایی تاریخی که ذکر آن رفت گسیختگی جریان، منتهی به جریان یافتن حجم قابل

ملاحظه‌ای از مواد می‌شود که در واقع علت اصلی این وقایع تنش‌های ایستا (Static Stresses) می‌باشد.

تحرک چرخشی (دوره‌ای)

این پدیده نیز نوعی روان‌گرایی است که از طریق بارگذاری دوره‌ای ایجاد شده و در نهشته‌های خاکی با تنش برشی ایستای کوچک‌تر از مقاومت برشی خاک اتفاق می‌افتد. تغییر شکل‌های حاصل از تحرک دوره‌ای به‌طور افزایشی توسعه پیدا می‌کند که دلیل آن تنش‌های دینامیک و استاتیکی است که در حین وقوع زلزله ایجاد می‌شود. پخش آب به‌طور جانبی نتیجه معمول حرکت دوره‌ای است که در اراضی با شیب ملایم و یا اراضی مسطح نزدیک رودخانه‌ها و دریاچه‌ها می‌تواند روی دهد. در اراضی مسطح فشار بالای آب منفذی که از طریق روان‌گرایی ایجاد می‌شود می‌تواند باعث شود تا آب منفذی به سرعت به سطح زمین جریان یابد، این جریان می‌تواند هم در اثنای زلزله و هم پس از آن روی دهد. اگر جریان آب منفذی به قدر کافی و به سرعت افزایش یابد می‌تواند منجر به حرکت ذرات ماسه به بیرون از شکاف‌ها و به سمت سطح زمین شود، به‌طوری‌که به شکل آتشفشان‌های ماسه‌ای یا جوشیدن و پرتاب شدن ماسه از زیر پوسته زمین نمود پیدا می‌کند.

اثرات حاصل از روان‌گرایی

هنگامی که فشار آب در حین تکان‌های زمین افزایش می‌یابد، آب زیرزمینی از طریق شکاف‌ها و منافذ موجود در زمین به سطح راه می‌یابد تا از فشار اضافی منافذ کاسته شود. نتیجه این عمل حرکت ذرات خاک به همراه آب به سطح زمین است که اصطلاحاً "Sand boils" نامیده می‌شود. روان‌گرایی همچنین سبب تغییر شکل در سطح زمین می‌گردد. این تغییر شکل‌ها در قالب نشست زمین جلوه

می‌کند و این هنگامی است که خاک‌های سست پس از آن‌که فشار منفذی از بین رفت بیشتر متراکم شوند. روان‌گرایی می‌تواند باعث نوسانات بیش از حد در سطح زمین شود که این عارضه زمانی بروز می‌کند که خاک‌های غیر روان‌گرا بر روی لایه خاک روان‌گرای زیرین به تحرک و ارتعاش دچار گردند. خاک‌هایی که پدیده روان‌گرایی در آن‌ها مشاهده می‌شود موجب خسارات جدی به سازه‌های بنا شده می‌گردند. در این گونه خاک‌ها ظرفیت باربری ساختمان‌هایی که توسط بارپی‌های وسیع نگهداری می‌شوند کاهش یافته و سازه‌های موجود یا نشست کرده و یا کج می‌شوند. سازه‌های زیرخاکی (مدفون در زیر خاک) که در زیر آب بنا یافته‌اند نیز می‌تواند در اثر افزایش فشار آب منفذی به اصطلاح در خارج از سطح زمین حالت شناور پیدا کند. سازه‌های بنا شده در جلوی جبهه آب مانند دیوار اسکله‌ها (باراندازها) یا دیوارهای ساحلی، فشارهای جانبی بزرگ‌تری را در اثر این پدیده تحمل می‌نماید. این پدیده در این گونه سازه‌ها نهایتاً "منجر به کجی و یا ایجاد شکستگی می‌شود.

مثال‌هایی از خسارات ناشی از پدیده روان‌گرایی در اثر زلزله

1- زلزله سال 1964 در نیگیتای ژاپن

زلزله مزبور به بزرگی 7/5 ریشتر سبب تخریب ساختمان‌های بسیاری در این شهر شد. خرابی‌ها اکثراً "محدود به ساختمان‌هایی می‌شد که پی آن‌ها بر روی نهشته‌های خاکی سست و اشباع از آب بنا شده بودند. اثر مخرب دیگر که دلیل اصلی وقوع آن زلزله نیگیتا بود، امواج سهمگین موسوم به **سونامی** (Tsunami) می‌باشد. این امواج در اثر حرکت کف دریا که در نتیجه شکست گسل اتفاق افتاد، منجر به تخریب کامل بندر نیگیتا گردید. در اثر این زلزله، علاوه بر ایجاد شکست‌های قابل ملاحظه در طبقات زمین، پدیده جوشش ماسه، باعث ایجاد شکاف‌های

عمیق در زمین و تخریب پل گردید. تخریب به دلیل جابجایی پایه‌های آن، در نتیجه وقوع پدیده روان‌گرایی اعلام شد.

2- زلزله سال 1964 در آلاسکا

بزرگی این زلزله 9/2 ریشتر و مدت آن 3 دقیقه بود. این زلزله مساحتی در حدود 500000 مایل مربع را تحت تاثیر قرار داد. سونامی حاصل از این زلزله مهیب سبب افزایش میزان خسارات وارده به اسکله‌ها و لنگرگاه‌ها گردید. در زمان وقوع زلزله وجود پدیده روان‌گرایی و شکاف‌های ماسه‌ای و سیلتی در خاک‌های رسی موجب ایجاد زمین لغزه‌های مخرب شد. عدسی‌ها و شکاف‌های روان‌گرا شده باعث آشفستگی شده و سبب افت مقاومت زمین به کمتر از سطوح مورد نیاز برای پایداری شد.

3- زلزله سال 1981 در لوماپریتای امریکا

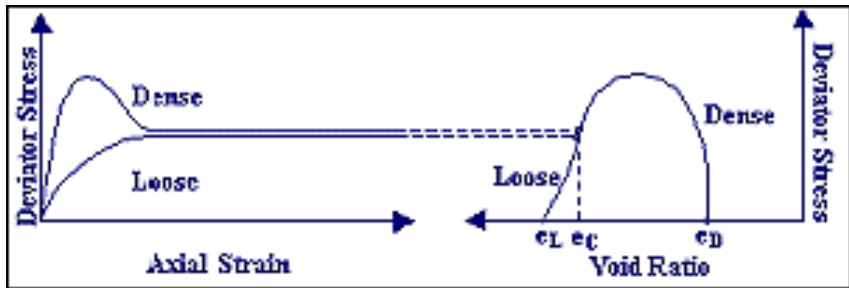
این زلزله با شدت 7/1 ریشتر در منطقه بی¹ آمریکا به وقوع پیوست. روان‌گرایی حاصل از آن در خاک‌های ماسه‌ای و اشباع از آب باعث بروز خسارات سنگینی به اسکله‌ها، فرودگاه‌ها، ساختمان‌ها و خطوط لوله گردید. جوشش ماسه در نقاط متعددی از سرزمین‌های حادثه دیده، دال بر وجود شواهد غیرقابل انکار از وقوع روان‌گرایی بود.

دلایل وقوع روان‌گرایی

برای درک بهتر چگونگی وقوع پدیده روان‌گرایی لازم است تا برخی از مفاهیم مکانیک خاک بیان گردد.

نسبت پوکی بحرانی¹

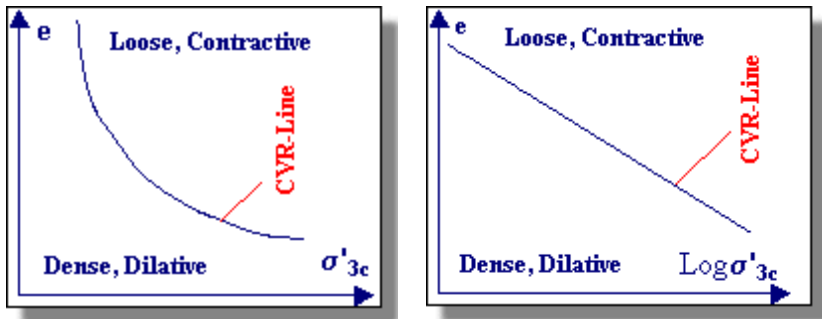
در سال 1936 دکتر آرتور کاساگراندته تعدادی آزمایش سه محوری با تغییر طول نسبی کنترل شده (آزمایش تعیین مقاومت برشی خاک که در آن مقدار تغییر طول نسبی کنترل شده و تنش حاصله در هر مرحله تعیین می‌شود) انجام داد. وی دریافت که نمونه‌هایی که از ابتدا سست و متراکم بودند و به هریک فشار محبوس یکسان (Confining Pressure) وارد گردیده، و سپس تحت تنش برشی به بزرگی تغییر طول نسبی قرار گرفتند، دارای چگالی تقریباً "یکسانی شدند ولی نسبت پوکی مرتبط با این مقدار چگالی را نسبت پوکی بحرانی نامید و با e_c نمایش داد (شکل 4).



شکل 4- رفتار خاک‌های سست و متراکم به هنگام آزمایش یکنواخت سه محوری
تغییر طول نسبی کنترل شده (کرامر 1996)

کاساگراندته پس از انجام این آزمایشات در فشارهای محبوس موثر متفاوت، دریافت که میزان نسبت پوکی بحرانی با میزان فشار محبوس موثر تغییر می‌کند. رسم نمودار تغییرات این دو فاکتور به ایجاد منحنی موسوم به خط نسبت پوکی بحرانی یا CVR منتهی می‌شود. خط CVR تشکیل دهنده مرز بین رفتار اتساعی (Dilative) و انقباضی (Contractive) در فشردگی سه محوری تخلیه‌ای (drained)

است. خاک‌هایی که نقاط حاصل از انجام این آزمایش در آن‌ها در بالای منحنی CVR قرار گیرند دارای رفتار انقباضی بوده و خاک‌هایی که نقاط حاصل از انجام این آزمایش در آن‌ها در زیر این خط واقع شوند رفتار اتساعی از خود به نمایش می‌گذارند (شکل 5).

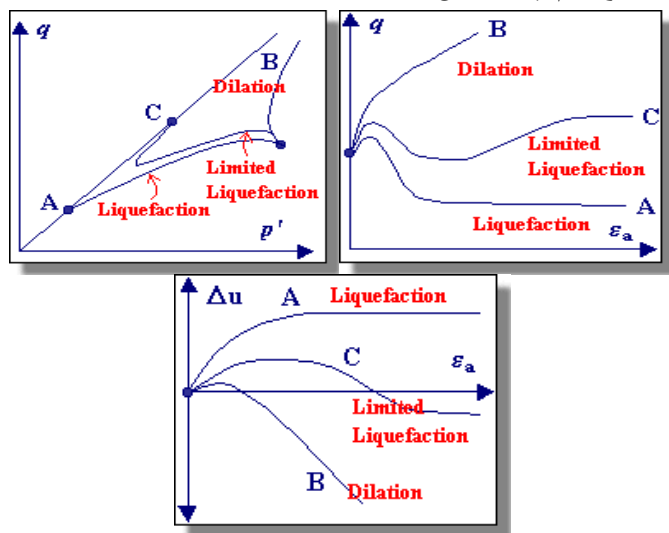


شکل 5- منحنی CVR برای فشار محبوس - سمت راست لگاریتمی و سمت چپ عددی

حالت ماندگار در تغییر شکل

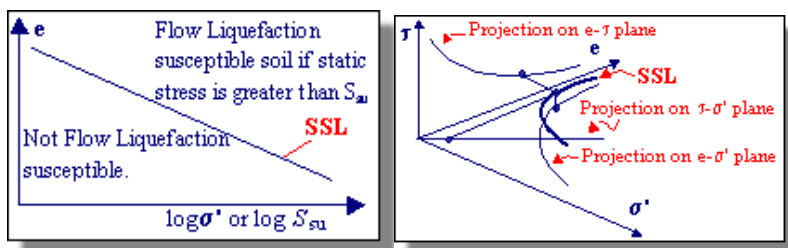
در سال 1960 گوتروالوکاسترو که یکی از دانشجویان کاساگرانده بود یک سری آزمون‌های غیرتخلیه‌ای (Undrained) تنش کنترل شده سه محوری بسیار مهم را به مرحله اجرا درآورد و مشاهده نمود که 3 نوع مختلف از رفتار تنش - کرنش که به وضعیت و حالت خاک وابستگی دارد، وجود دارد. نمونه‌های چگال (متراکم) در ابتدا منقبض شده ولی سرانجام با افزایش فشار محبوس موثر و تنش برشی اتساع حاصل می‌کنند. نمونه‌های بسیار سست در مقادیر کوچک‌تری از تغییر طول نسبی برشی فرو ریخته و با مقادیر بزرگ‌تر تغییر طول نسبی به سرعت از هم گسیخته می‌شود. کاسترو نام این رفتار را روان‌گرایی گذاشت که اغلب به آن جریان روان‌گرایی نیز می‌گویند. خاک‌های با چگالی متوسط در ابتدا همان رفتار نمونه‌های

سست را از خود نشان می‌دهند ولی پس از این رفتار ابتدایی انقباضی، خاک دگرگون شده و از خود رفتار اتساعی به نمایش می‌گذارد. کاسترو این نوع رفتار را روان‌گرایی محدود نام نهاد (شکل 6).



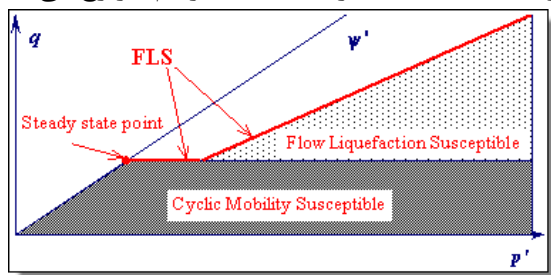
شکل 6- آزمون تنش سه محوری ایستا برای سه نمونه با درجات چگالی متفاوت

کاسترو وابستگی بین فشار محبوس موثر و نسبت پوکی در مقادیر بزرگ تغییر طول نسبی که در آزمون‌های غیر تخلیه‌ای تنش کنترل شده بدست آمده بود، را به صورت نمودار رسم کرد (شکل 7). کاسترو منحنی بدست آمده را که شبیه منحنی CVR کاساگرانده خط حالت ماندگار¹ نامید. تفاوت بین CVR و SSL به وجود آنچه که کاساگرانده آن را از حالت جریانی نامید نسبت داده می‌شود. در حالت جریانی ذرات طوری خود را توجیه می‌کنند که در حین جریان کمترین مقدار انرژی از طریق مقاومت اصطکاک از بین می‌رود.



شکل 7- سمت چپ: خط حالت ماندگار سه بعدی، سمت راست: طرح دو بعدی از SSL بر روی نمودار نسبت پوکی در مقابل لگاریتم فشار محبوس یا مقاومت حالت پایدار

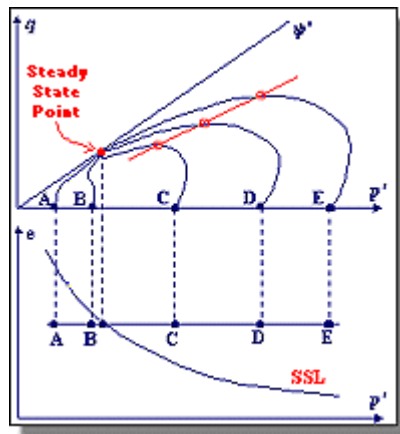
همان‌طور که در شکل 7 دیده می‌شود، SSL در واقع یک منحنی 3 بعدی فضایی است که محورهای تشکیل دهنده آن e (نسبت پوکی) (تنش موثر) (تنش برشی) است. با استفاده از طرح دو بعدی e (نسبت پوکی) (تنش موثر) می‌توان تعیین کرد که آیا خاک به جریان روان‌گرایی حساس است یا خیر. خاک‌هایی که در حالت اولیه در زیر SSL قرار گیرند به جریان روان‌گرایی حساس نبوده در حالی که خاک‌هایی که در بالای منحنی SSL قرار گیرند مستعد وقوع جریان روان‌گرایی می‌باشند و این زمانی است که اگر (و فقط اگر) تنش برشی ایستا متجاوز از مقاومت باقیمانده خاک باشد. تحرک چرخشی یکی دیگر از فرآیندهای مرتبط با روان‌گرایی است که علاوه بر خاک‌های سست در خاک‌های متراکم نیز رخ می‌دهد (شکل 8).



شکل 8- مناطق مختلف مربوط به جریان روان‌گرایی و تحرک چرخشی

جریان روان گرایی از دیدگاه مفاهیم مکانیک خاک

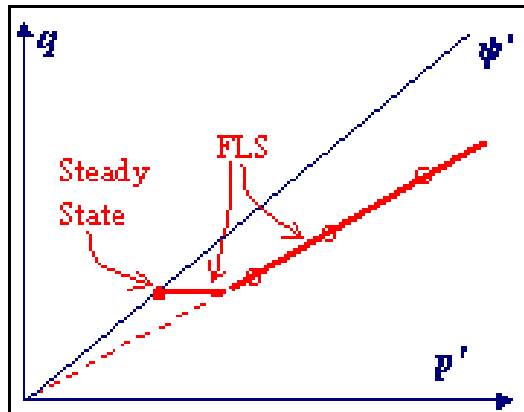
شکل 9 سمت چپ نمودار مسیر تنش برای 5 آزمایش برش غیر تخلیه‌ای را نشان می‌دهد. نمونه‌های مورد آزمایش C, D, E در معرض بارهایی بزرگتر از مقاومت باقیمانده‌شان قرار گرفته و دچار روان گرایی شده اند. خط مستقیم ترسیم شده از میان نقاط در جایی که جریان روان گرایی آغاز شده تا مبداء ادامه دارد. نام این خط سطح جریان روان گرایی¹ است.



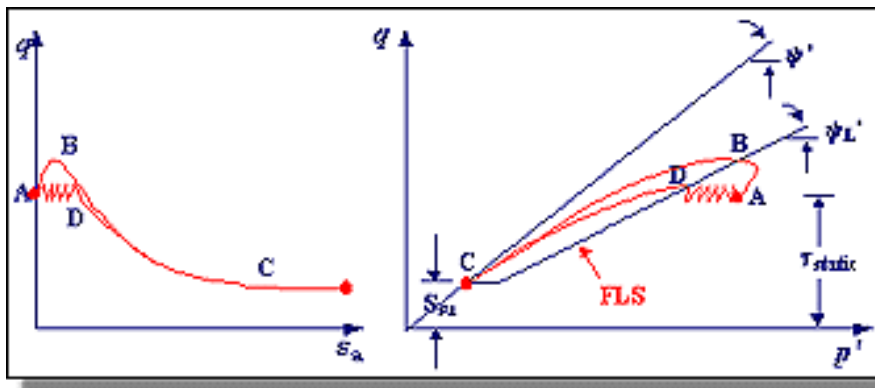
شکل

اگر تنش برشی ایستا کوچک‌تر از مقاومت حالت ماندگار باشد جریان روان گرایی نمی‌تواند رخ دهد. با توجه به شکل 8 خط سطح جریان روان گرایی توسط خطی که از نقطه حالت ماندگار عبور می‌کند قطع می‌شود (شکل 9 سمت راست). مقاومت حالت ماندگار، مقاومت خاک در زمانی است که تغییر شکل یک حالت ماندگار در آن خاک در حال وقوع است مانند جریان مداوم تحت تنش برشی ثابت و فشار محبوس موثر ثابت در حجم و سرعت ثابت. چنانچه مسیر تنش، خط

سطح جریان روان‌گرایی را در حین برش غیرتخلیه‌ای (صرف نظر از آن که آیا بارگذاری چرخشی (دوره‌ای) یا یکنواخت باشد)، قطع کند آنگاه جریان روان‌گرایی آغاز خواهد شد. مسیر تنش برای بارگذاری یکنواخت و دوره‌ای در شکل 10 نشان داده شده است. فرآیند جریان روان‌گرایی طی قابل توضیح است. تشریح می‌شود. نخست فشار منفذی اضافی که در مقادیر کم تغییر طول نسبی سبب جابجایی مسیر تنش موثر به سوی خط سطح جریان روان‌گرایی می‌شود. در چنین نقطه‌ای خاک ناپایدار می‌شود. زمانی که خاک در شرایط غیرتخلیه‌ای به این وضعیت از ناپایداری برسد، مقدار مقاومت برشی آن تا حد مقاومت باقیمانده افت می‌کند. در نتیجه تنش‌های برشی ایستا سبب کاهش مقادیر بزرگ تغییر طول نسبی تا حدی می‌شود که خاک حالت فرو ریخته (Collapse) پیدا می‌کند. مقادیر بزرگ نرمش - کرنش هنگامی رخ می‌دهد که مسیر تنش به سوی نقطه حالت ماندگار جابه‌جا می‌شود.



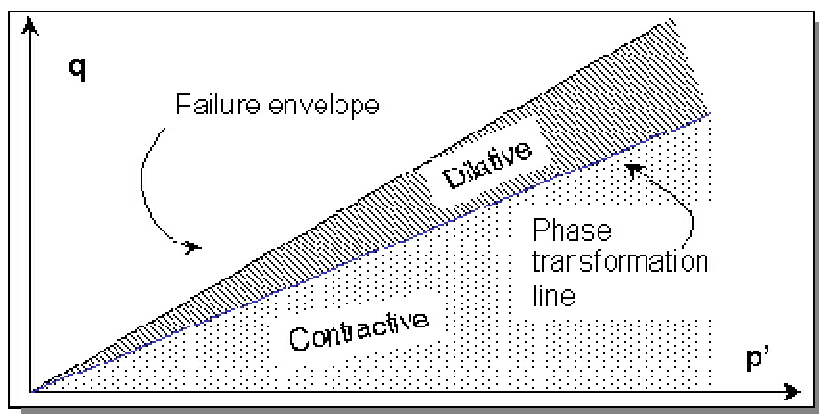
شکل 9- تشریح گرافیکی سطح جریان روان‌گرایی



شکل 10- گسیختگی جریان ناشی از بارگذاری دوره‌ای و یکنواخت

تحرك دوره‌ای (چرخه‌های تکرار شونده نیروی برشی اعمال شده)

این واقعه زمانی اتفاق می‌افتد که تنش برشی ایستا کوچک‌تر از مقاومت برشی حالت ماندگار (یا باقیمانده) باشد. درک حرفه مهندسی ژئوتکنیک از تحرک دوره‌ای در طی ده سال گذشته به نحو چشم‌گیری پیشرفت نموده است. کلید درک این مفهوم به هنگام تشخیص خط تغییر فاز (Phase Transformation Line) حاصل شد. ماسه‌های با چگالی زیاد تا متوسط که در معرض بارگذاری یکنواخت قرار می‌گیرند، ابتدا رفتار انقباضی از خود نشان می‌دهند اما به محض آنکه مقدار کرنش یا تغییر طول نسبی آن‌ها به وضعیت ماندگار نزدیک گردد رفتار اتساعی بروز می‌دهند. رسم نقاط مربوط به مسیر تنش که در آن تغییر شکل از رفتار انقباضی به سوی اتساعی رخ می‌دهد، خط تغییر شکل فاز (PTL) را آشکار خواهد کرد (شکل 11).



شکل 11- نمودار p' - q مربوط به خط تغییر شکل فاز

در منطقه انقباضی، مسیر تنش غیرتخلیه‌ای منجر به جابه‌جایی به سمت چپ خواهد شد و این زمانی است که گرایش به سوی انقباض موجب افزایش فشار منفذی و کاهش P' می‌شود. هنگامی که مسیر تنش به خط تغییر شکل فاز¹ نزدیک شود، تمایل به انقباض کاهش یافته و مسیر تنش عمودی‌تر می‌شود. وقتی مسیر تنش به حد خط تغییر شکل فاز رسید، دیگر گرایشی سمت انقباض یا اتساع وجود نداشته و از این رو P' ثابت مانده خط تغییر شکل فاز و مسیر تنش عمودی می‌شود. پس از آن که خط تنش خط تغییر شکل فاز را قطع کرد، گرایش برای اتساع باعث می‌شود تا فشار منفذی کاهش یافته و P' افزایش یابد که در این صورت مسیر تنش به سمت راست جابه‌جا خواهد شد.

توجه به این نکته ضروری است که چون سختی خاک به P' بستگی دارد لذا زمانی که مسیر تنش زیر خط تغییر شکل فاز باشد سختی کاهش می‌یابد و زمانی که خط تنش به بالای خط تغییر شکل فاز جابه‌جا می‌شود سختی افزایش می‌یابد.

1- Phase transformation line

این تغییر در سختی (صلبیت) خاک، باعث ایجاد پدیده روان‌گرایی محدود می‌شود. در شرایط بارگذاری دوره‌ای رفتار خاک حتی از قبل هم پیچیده‌تر می‌شود.

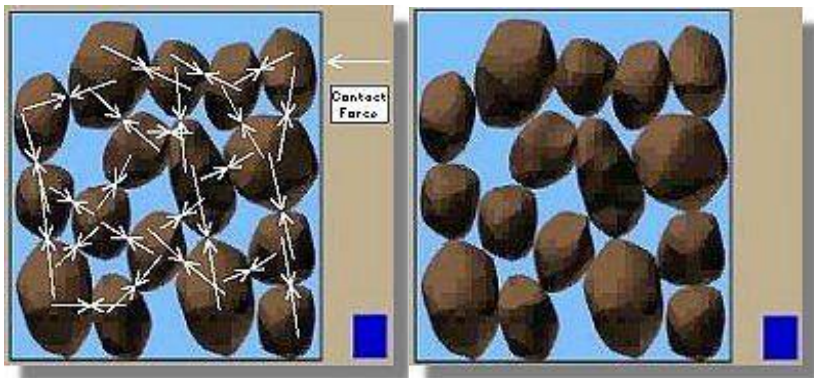
بررسی توان روان‌گرایی

اراضی که مستعد وقوع پدیده روان‌گرایی و خطرات ناشی از آن هستند شامل مناطقی می‌باشند که دارای نهشته‌های آبرفتی جوان، متشکل از ماسه و سیلت و سطح ایستایی سفره و آب زیرزمینی کم عمق بوده و به طور مستمر در معرض لرزش‌های بسیار قوی تا متوسط زمین می‌باشند. از نقطه زمین‌شناسی سن رسوبات جوان در این مناطق ممکن است به دوره هولوسن و یا پلیستوسن نیز برسد. متخصصین ژئوتکنیک برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی در یک منطقه عموماً از تکنیک‌های کاوش زیرسطحی استفاده می‌نمایند. معمول‌ترین تکنیک مورد استفاده در این زمینه شمارش ضربه زدن در آزمایش فروسنجی استاندارد است که معمولاً به آن N-value گفته می‌شود. محققین با استفاده از تنش‌های حاصل از یک زلزله مورد انتظار در یک خاک که در اثر یک زلزله ساختگی بدست می‌آید و کمیت N-value که مرتبط با مقاومت خاک است تکنیک‌های پیش‌بینی روان‌گرایی را توسعه داده‌اند. اگر N-value به اندازه کافی بزرگ باشد، انتظار نمی‌رود که در اثر تنش ایجادشده توسط زلزله، روان‌گرایی اتفاق بیفتد. بطور مثال در مناطقی از ایالات متحده آمریکا که دارای خاک ماسه‌ای بوده و از نظر زلزله بسیار فعال هستند، N-value به‌طور کل باید بزرگتر از 30 باشد تا روان‌گرایی در خاک روی ندهد. از سوی دیگر تکنیک‌های پیش‌بینی وقوع روان‌گرایی بر اساس هم‌بستگی با آزمایش نفوذ مخروط (CPTs) نیز توسعه پیدا نموده‌اند. استفاده از تکنیک CPTs توسط متخصصین ژئوتکنیک بیشتر ترجیح داده می‌شود. دلیل این امر انجام عمق‌یابی‌های مداومی است که ضرورتاً با انجام آزمایش CPTs در پروفیل خاک میسر می‌گردد.

در صورتی که به روش N-value فقط مقادیر مقاومت در فواصل چند فوتی حاصل می‌شود، در حال حاضر تکنیک‌های ارزیابی قادر به پیش‌گویی بزرگی پدیده روان‌گرایی که باعث نشست می‌شود، هم هستند. افزون بر این تکنیک‌هایی نیز وجود دارد که می‌توان از آن‌ها در اراضی شیب‌دار، برای اندازه‌گیری بزرگی پخش آب به-صورت جانبی (Lateral spreading) را استفاده کرد.

دلایل وقوع روان‌گرایی و خصوصیات خاک‌های مستعد

نکته مهم برای درک بهتر روان‌گرایی، شناخت شرایط حاکم بر یک رسوب خاکی، قبل از وقوع زمین‌لرزه است. رسوبات خاکی متشکل از اجتماع ذرات منفرد خاک در کنار یکدیگر می‌باشند. در خاک که هر ذره با تعدادی از ذرات در مجاورت خود در تماس است، وزن ناشی از ذرات خاک لایه‌های فوقانی بین ذرات نیروهای تماسی می‌کند بطوری‌که این نیروها ذرات منفرد را در جای خود نگهداشته و به خاک قوام می‌بخشند (شکل 12).



شکل 12- سمت چپ: ذرات خاک در یک نهشته خاکی، ارتفاع ستون کنار ذرات خاک نشانگر سطح

فشار آب منفذی در خاک است. سمت راست: طول فلش‌ها نمایشگر اندازه نیروهای تماسی بین ذرات منفصل خاک می‌باشد. هنگامی که فشار آب منفذی کوچک باشد، مقدار نیروهای تماسی بزرگ می‌باشد. هنگامی که ساختمان خاک در یک خاک ماسه‌ای سست و اشباع از آب، به علت بارگذاری سریع تخریب شود، پدیده روان‌گرایی خودنمایی می‌کند. به محض آن که ساختمان خاک در هم شکسته شود ذرات منفرد خاک که به سستی در کنار هم قرار گرفته‌اند، سعی می‌کنند تا شکلی متراکم‌تر پیدا کنند. با این وجود به هنگام زلزله زمان کافی برای خروج آب موجود در منافذ خاک وجود ندارد. در عوض آبی که در این منافذ محبوس شده اجازه نزدیکی بیشتر ذرات خاک به هم را نمی‌دهند. این عمل همراه است با افزایش فشار آب که سبب کاهش نیروهای تماسی بین ذرات مجزای خاک شده و نهایتاً منجر به نرم‌شدگی و سست شدن نهشته‌های خاکی می‌شود. در موارد بحرانی میزان فشار آب منفذی به حدی زیاد می‌شود که بسیاری از ذرات خاک به‌طور ضعیفی با هم در تماس قرار می‌گیرند. در چنین مواردی است که خاک دارای مقاومت بسیار کمی خواهد شد و رفتاری که از خود بروز می‌دهد به مایع شباهت بیشتری دارد تا جامد. به همین دلیل این پدیده را روان‌گرایی Liquefaction نامیده‌اند. در رابطه با خاک‌هایی حساس به روان‌گرایی 3 دسته از خصوصیات به شرح زیر بیان می‌شوند:

1- معیارهایی ترکیبی¹

بطور کل استعداد روان‌گرایی خاکی که دارای دانه‌بندی یکنواخت است نسبت به خاک با دانه‌بندی غیریکنواخت بیشتر می‌باشد چون کاهش تمایل در تغییر طول نسبی حجمی (کرنش حجمی) برای یک خاک با دانه‌بندی گسترده باعث کاهش مقادیر فشار منفذی می‌شود که این واقعه در شرایط غیرتخلیه‌ای بیشتر نمود

می‌یابد. به لحاظ تاریخی خاک‌های ماسه‌ای تنها خاک‌هایی بودند که مستعد وقوع روان‌گرایی بودند، اما قابل ذکر است که این واقعه در گراول‌ها (شن‌ها) و سلیت هم رؤیت شده است. پدیده کرنش - نرمش (Strain- Softening) در یک خاک با دانه‌بندی ریز نیز می‌تواند اثرات مشابه روان‌گرایی را ایجاد کند. خاک‌های با دانه‌بندی ریز (Fine- grained) هنگامی که دارای 4 مشخصه زیر باشند مستعد بروز این رفتار هستند:

1- مقدار ذرات ریزتر از 0/005 میلیمتر کمتر یا مساوی 15% باشد.

2- حد روانی کمتر یا مساوی 35%

3- مقدار رطوبت خاک در آن‌ها بیشتر یا مساوی 0/9 حد روانی

4- نمایه روانی کوچکتر یا مساوی 75%

استعداد برای روان‌گرایی در ذرات به شکل آن‌ها نیز بستگی دارد. رسوبات خاکی که دارای ذرات مدور باشند، نسبت به رسوبات خاکی دارای ذرات گوشه‌دار، از استعداد بیشتری برای روان‌گرایی برخوردارند.

2- معیارهای حالت¹

عوامل زیادی در پیدایش نوع حالت خاک در نهشته‌های خاکی دخیل هستند. در فشار محبوس ثابت، مقاومت به روان‌گرایی با افزایش چگالی نسبی (Dr) افزایش یافته و در چگالی نسبی ثابت با افزایش فشار محبوس، میزان مقاومت به روان‌گرایی روندی افزایشی خواهد داشت. یافته‌های محققین مختلف (کاسترو 1962، کرامرو سید 1988) نشان داده که تنش ایستای برشی موجود در یک خاک در آمادگی آن خاک به روان‌گرایی ایستا، نقش بسیار مهمی خواهد داشت. هرقدر

تنش برشی اولیه خاک زیادتر باشد، پتانسیل آن برای بروز روان‌گرایی بیشتر بوده و نیروی تکان دهنده کم‌تری برای ایجاد پدیده روان‌گرایی مورد نیاز می‌باشد.

3- معیارهای زمین‌شناسی

نوع فرآیندهای زمین‌شناسی که موجب پیدایش رسوبات خاکی در یک منطقه می‌شوند، قویاً بر روی استعداد آن خاک برای بروز پدیده روان‌گرایی مؤثر است. رسوبات خاکی اشباع تشکیل شده در اثر رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها یا دریاچه‌ها (رسوبات آبرفتی و رودخانه‌ای)، ته نشست مواد واریزه‌ای و فرسایش یافته (رسوبات واریزه‌ای) یا رسوبات تشکیل شده در اثر عمل باد (رسوبات بادرفتی) به روان‌گرایی بسیار حساس هستند. این فرآیندها باعث جور شدن ذرات به دانه‌های با اندازه یکنواخت شده و سپس آن‌ها را به صورت رسوبات سست ته نشین می‌کنند که در نهایت در هنگام زلزله یا هر نوع تکانی این رسوبات گرایش به متراکم شدن پیدا می‌نمایند. تمایل به متراکم شدن در این مواد منجر به افزایش فشار آب منفذی و کاهش قوام خاک می‌گردد. بر روی درجه استعداد خاک‌ها برای بروز پدیده روان‌گرایی در تایوان بررسی صورت گرفته است و خاک‌های متعلق به گروه‌های مختلف بافتی نسبت به بروز این پدیده درجه‌بندی شده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1- درجه بندی استعداد روان گرایی در خاک‌ها
(برای احداث پی کم عمق در ساختمان‌ها)

کلاس درجه بندی حساسیت روانگرایی خاک	بافت				
	بافت درشت (شن، شن لومی)	متوسط تادرشت (لوم شنی، لوم شنی، لوم رسی شنی)	بافت متوسط (سیلت، لوم و سیلتی لوم)	بافت متوسط تا ریز (لوم رس، لوم رس سیلتی)	بافت ریز (رس سیلتی و رس)
زهکشی خوب تا متوسط	2	3	4	5	5
زهکشی ناقص	1	2	3	4	5
زهکشی ضعیف تا خیلی ضعیف	0	1	2	3	4
غرقاب	0	0	1	2	3

چگونگی کاهش خطرات ناشی از روان گرایی خاک

چنانچه مشخص گردد که محلی دارای پتانسیل روان گرایی و تبعات ناشی از آن می‌باشد، چه راه کارهایی برای مقابله با این پدیده می‌توان در نظر گرفت؟ اصولاً سه امکان برای کاهش خطرات ناشی از روان گرایی در هنگام بنا کردن ساختمان‌های جدید و یا سازه‌های دیگری مانند پل‌ها، تونل‌ها و جاده‌ها پیش روی قرار دارد که در این قسمت به هریک پرداخته خواهد شد.

الف) عدم بهره‌برداری از خاک‌های مستعد روان گرایی

اولین راه حل، صرف نظر کردن از احداث هر نوع ساختمان در خاک‌های مستعد روان گرایی است. معیارهای گوناگونی برای تعیین حساسیت یک خاک به روان گرایی وجود دارد که در فصول قبل در مورد آن‌ها مطالبی ارائه شده است. با تعیین خصوصیات خاک در محلی که برای احداث ساختمان در نظر گرفته شده و تطبیق این مشخصات با خصوصیات خاک‌های روانگرا، متخصص امر می‌تواند

تصمیم‌گیری کند که چنانچه محل مورد نظر آمادگی لازم برای روان‌گرایی را داشته باشد از ساخت و ساز در چنین مکان نامناسب چشم‌پوشی کند.

ب) احداث سازه‌های مقاوم به روان‌گرایی

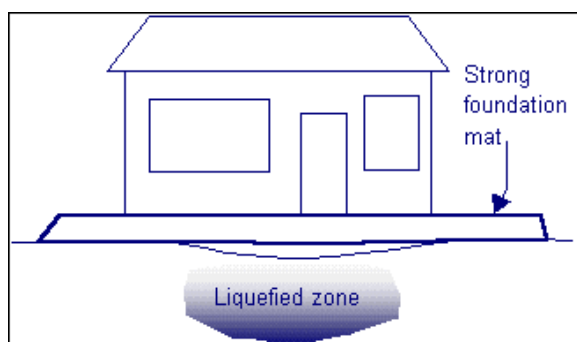
ساختمانی که قابلیت کشش یا سختی (Ductility) داشته باشد، توانایی تحمل تغییر شکل‌های گسترده را نیز دارد. تکیه‌گاه‌های اصلاحی برای تصحیح نشست‌های متفاوت و طراحی نوعی از پی که بین نواحی شست یا شولات (soft spots) پل بزند باعث کاهش خسارت به ساختمان‌هایی می‌شود که دچار پدیده روان‌گرایی شده‌اند. برای رسیدن به اهداف فوق در یک ساختمان جنبه‌های ذیل را می‌توان در نظر داشت:

1- احداث پی کم عمق (سطحی)

آنچه در این مورد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است این نکته است که تمامی اجزاء در پی کم عمق با یک‌دیگر اتصال داشته و کشش‌های وارده را با هم تحمل کنند تا پی ساختمان به‌طور یکنواخت نشست کرده یا حرکت کند. این تدبیر موجب می‌شود تا نیروهای برشی وارد شده به اجزاء ساختمان که بر روی پی تکیه کرده‌اند، کاهش یابد. شکل 13 مربوط به دیوار یک خانه در دست ساخت در ژاپن است. دیوارهای تک پی که هم از بیرون و هم از داخل به خوبی مسلح شده‌اند با یک‌دیگر اتصال داشته و باعث می‌شود تا به‌عنوان پلی بین همه مکان‌هایی که دچار نشست شده‌اند عمل نموده و مقاومت بهتری در برابر جابجایی و حرکت خاک از خود نشان دهند. یک پی گسترده و سخت (Stiff foundation mat) نوع بسیار خوبی از پی کم عمق می‌باشد که قادر است بارهای اعمال شده از سوی نواحی محلی دچار روان‌گرایی را به اراضی قوی‌تر مجاور انتقال دهد (شکل 14).



شکل 13- تصویری از دیوار تک پی که هم از داخل و هم از خارج مسلح شده است



شکل 14- تصویر شماتیک از پی گسترده کم عمق

تاسیسات مدفون در زیر خاک نظیر فاضلاب یا لوله‌های آب، باید توسط اتصالات نشکن به ساختمان متصل باشند تا آمادگی لازم برای جابجایی‌ها و نشست‌های عظیم ناشی از روان‌گرایی را داشته باشند. لوله‌هایی که در شکل 15

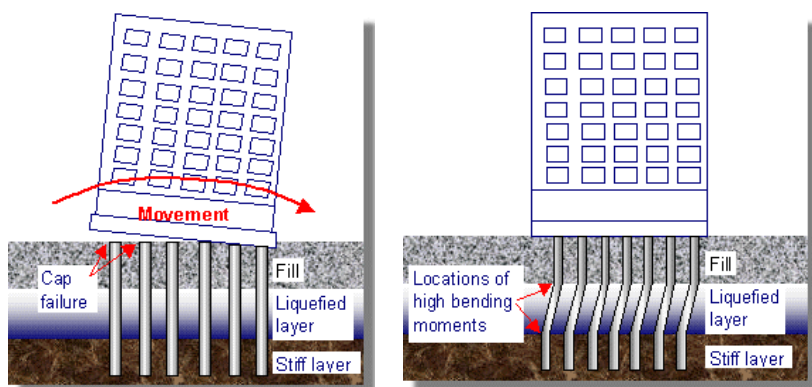
دید می‌شود دو ساختمان مجاور را قبل از زلزله به صورت یک خط راست به هم متصل کرده بود.



شکل 15- استفاده از اتصالات نشکن در تاسیسات زیر خاک

2- احداث پی عمیق

روان گرایی قادر به اعمال بارهای عظیم جانبی بر روی شمع‌ها در سازه‌ها می‌باشد. شمع‌هایی که از درون لایه خاکی که ضعیف بوده و دارای پتانسیل روان گرایی باشند عبور کرده و وارد لایه مستحکم‌تر می‌شوند، به هنگام روان گرایی لایه ضعیف باید هم بارهای عمودی ناشی از روسازی (super structure) را حمل نموده و هم بایستی قادر به مقاومت در برابر بارهای افقی و گشتاور خمشی ایجاد شده در اثر حرکت‌های جانبی باشد. با ایجاد شمع‌های با ابعاد بزرگتر و یا همراه با مسلح‌تر کردن آن‌ها می‌توان مقاومت کافی در این اجزاء ایجاد نمود. نکته قابل توجه و مهم آن است که شمع‌ها به شیوه‌ای به کلاهک متصل شوند که نشکسته و اجازه کمی چرخش در پی بدون آن‌که این اتصال گسیخته شود را بدهد. چنانچه اتصالات شمع گسیخته شود، کلاهک قادر به مقاومت در برابر لنگر خوردن (گشتاور واژگونی) که حاصل افزایش بارهای عمودی روسازی بر روی شمع‌هاست نخواهد بود (شکل 16).



شکل 16- شکل ساده‌ای از ایجاد پی عمیق در زیر ساختمان‌ها

ج) اصلاح خاک

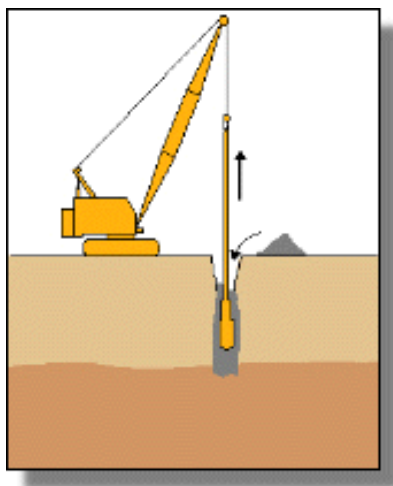
سومین گزینه برای تخفیف خطرات ناشی از روان‌گرایی در خاک‌ها، اصلاح و بهبود قوام، چگالی (تراکم) و یا خصوصیات زهکشی این خاک‌هاست. این هدف در خاک‌ها با توسل به اعمال تکنیک‌های مختلف محقق می‌شود. هدف اصلی در به-کارگیری این فنون، اجتناب از افزایش فشار آب منفذی در حین تکان‌های ناشی از زلزله می‌باشد. برای نیل به این اهداف از روش‌های تراکم خاک به تنهایی و یا همراه با بهبود ظرفیت زهکشی خاک می‌توان سود جست.

روش تراکم با شناوری ارتعاشی¹

در این روش از یک پروپ که در خاک‌های دانه‌ای تا عمق بیش از صد فوت توانایی نفوذ دارد استفاده می‌شود. ارتعاش پروپ سبب از بین رفتن و فروریختن ساختمان دانه‌ای به نحوی می‌شود که خاک‌های اطراف این ابزار متراکم می‌گردد. به منظور اصلاح منطقه‌ای که دارای خاک‌های با پتانسیل روان‌گرایی است مطابق یک

الگوی شبکه‌ای و به‌صورت بالا و پائین کشیدن از ابزار مورد نظر استفاده می‌شود (شکل 17).

در روش تراکم با جایگزینی ارتعاشی (Vibroreplacement) که ترکیبی است از روش‌های تراکم با شناوری ارتعاشی و پشت‌ریزی توسط شن، ستون‌هایی از سنگ به‌دست می‌آید که نه تنها باعث افزایش میزان تراکم می‌شود بلکه تا حد زیادی سبب تقویت خاک شده و ستون حاصله همانند یک ابزار موثر در امر زهکشی کمک شایانی می‌کند.

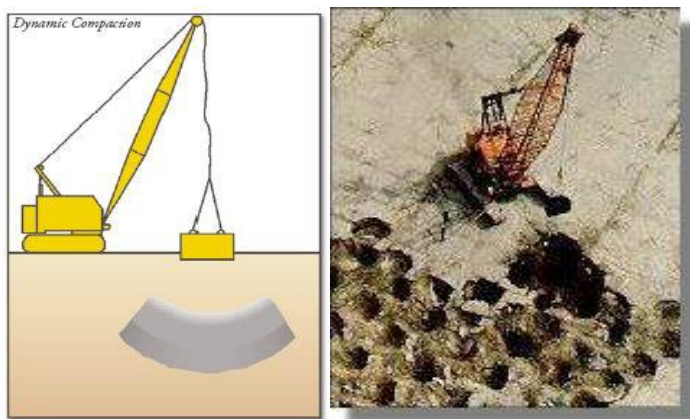


شکل 17- روش تراکم با شناوری ارتعاشی

روش تراکم ارتعاشی¹

ایجاد تراکم از طریق این روش با رها کردن وزنه‌ای سنگین از جنس فولاد با بتن در یک طرح شبکه‌ای و از ارتفاع 30 الی 100 فوتی انجام می‌پذیرد. این عمل راهی با صرفه اقتصادی برای کاهش خطرات ناشی از بروز پدیده روان‌گرایی در خاک

است. روان‌گرایی ممکن است به‌طور موضعی در اعماق زیرین آغاز شود. کاربرد این روش سبب می‌شود تا در نقاطی که وزنه باعث متراکم شدن خاک شده، ذرات ماسه با سهولت بیشتری متراکم گردد. هنگامی که فشار آب منفذی اضافی ناشی از بارگذاری ارتعاشی (Dynamic Loading) از بین برود، متراکم شدن بیشتری رخ خواهد داد. با توجه به شکل 18 مشاهده می‌شود با انجام این روش سطح خاک تا حدودی بهم خوردگی پیدا می‌کند به‌طوری که خاک سطحی نیاز به متراکم سازی کم عمق دارد. در ادامه در صورت امکان به نقاط متراکم شده بایستی خاک دستی حاوی ذرات بزرگ‌تر از ماسه اضافه نمود.

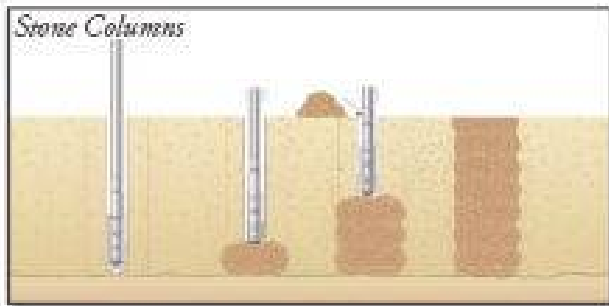


شکل 18- روش تراکم ارتعاشی

روش ستون سنگی¹

همان‌گونه که پیشتر نیز شرح داده شد است، ستون‌های سنگی از جنس ذرات ماسه بوده و در عمق زمین ساخته می‌شوند. این ستون‌ها را می‌توان از طریق

تراکم با شناوری ارتعاشی نیز بنا کرد. البته این سازه‌ها را به روش‌های دیگری نیز می‌توان ایجاد کرد مانند روش فرانکی که با کمک یک پوسته فولادی و همانند لوله گذاری در چاه و پرتاب یک چکش ستون سنگی احداث می‌شود. در این روش پوسته فولادی به درون خاک رانده شده و سپس از بالا توسط ماسه پر می‌شود و هم‌زمان با خروج پوسته فولادی از ستون به‌وجود آمده، عمل سفت کردن و متراکم ساختن ستون به‌وسیله رها کردن چکش انجام می‌شود (شکل 19).



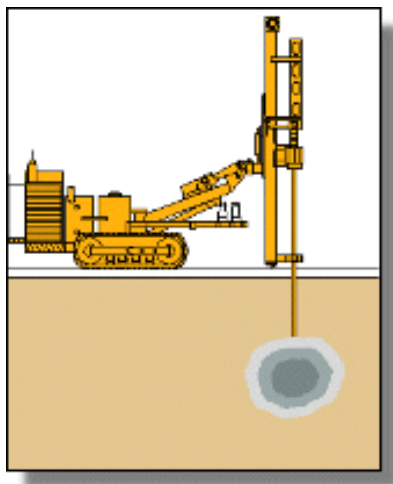
شکل 19- چگونگی انجام روش ستون سنگی

احداث شمع تراکمی¹

کار گذاشتن شمع‌های تراکمی راهی بسیار موثر برای بهبود وضعیت خاک می‌باشد. این شمع‌ها معمولاً از جنس بتن پیش تنیده و یا الوار ساخته شده‌اند و با نصب آن‌ها دو هدف متراکم کردن خاک و تقویت آن هم‌زمان حاصل می‌شود. این شمع‌ها به صورت شبکه‌ای نصب شده و تا عمق حدود 60 فوتی در زمین رانده می‌شود.

روش تزریق تراکمی¹

به‌وسیله این تکنیک مخلوط آب، ماسه و سیمان تحت فشار به درون خاک دانه‌ای تزریق می‌شود. دوغاب سیمان به شکل پیاز در خاک وارد شده و از این رو تمام خاک اطراف خود را متراکم می‌کند. در این روش چنان‌چه پی ساختمان موجود نیازمند اصلاح باشد، انتخاب روش تزریق تراکمی بسیار مناسب است. در چنین مواردی تزریق دوغاب بطور جانبی و یا تحت زاویه شیب‌دار به‌طوری که به زیر ساختمان برسد امکان‌پذیر است (شکل 20).



شکل 20- روش تزریق تراکمی

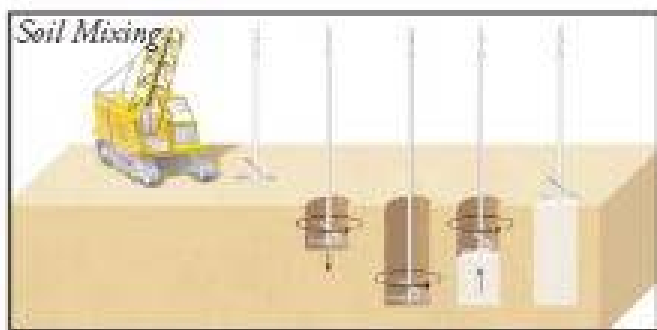
مفهوم جریان روان‌گرایی و تحرک چرخشی (دوره‌ای)

تکنیک‌های زهکشی

خطرات ناشی از روان‌گرایی را می‌توان با استفاده از افزایش توان زهکشی خاک افزایش داد، در صورتی‌که آب منفذی درون خاک آزادانه زهکشی شود آنگاه

فشار آب منفذی اضافی کاهش پیدا خواهد کرد. تکنیک‌های زهکشی شامل کار گذاشتن زهکش‌های ماسه‌ای، شنی و یا مواد مصنوعی است. زهکش‌های فتیله‌ای مصنوعی را می‌توان در زوایای مختلفی نصب نمود. در مقابل زهکش‌های ماسه‌ای و شنی معمولاً "عمودی کار گذاشته می‌شوند. برای کاهش موثرتر خطرات ناشی از روان‌گرایی، اغلب از تکنیک‌های زهکشی به همراه فنون دیگر زهکشی استفاده می‌شود.

از دیگر روش‌های اصلاح وضعیت خاک و افزایش مقاومت خاک در برابر روان‌گرایی می‌توان به روش‌هایی نظیر استفاده از اختلاط خاک¹ با مواد سیمانی به کمک مته‌های تو خالی² و روش تزریق فورانی دوغاب³ اشاره کرد (اشکال 21 و 22).

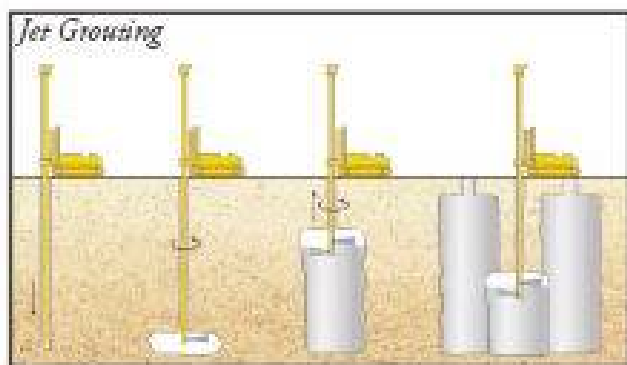


شکل 21- روش اختلاط خاک

1 Soil Mixing

2 Hollow- stem auger

3 Jet Grouting

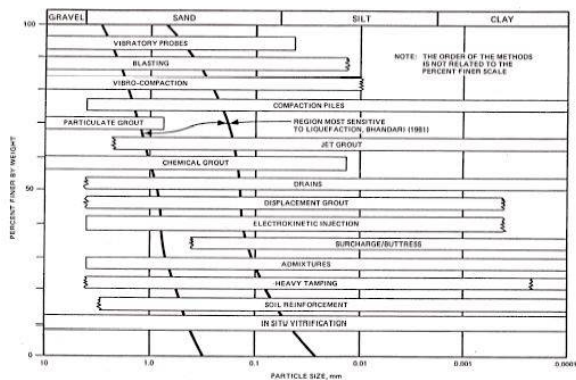


شکل 22- روش تزریق فورانی دوغاب

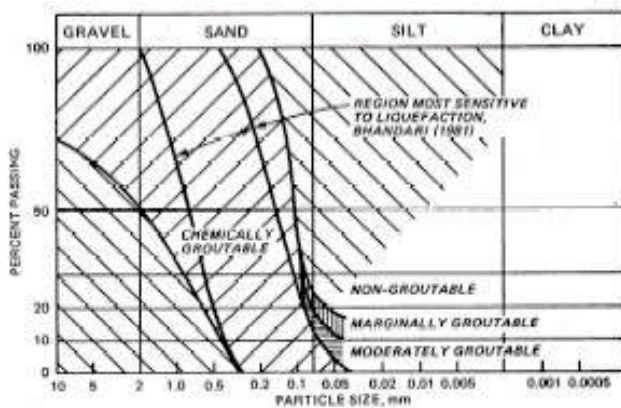
بررسی‌های علمی جهان نشان می‌دهد که منابع مختلف، بسته به وضعیت خاک و نوع شکل روان‌گرایی خاک و نوع ساختمان‌ها و سازه‌های موجود، روش‌های متنوعی را برای بهبود شرایط و کاهش اثرات تخریبی ناشی از این پدیده ارائه نموده‌اند. در جدول 2، نمونه‌ای از راه‌حل‌های موجود و ارائه شده در منابع علمی جمع‌بندی و گزارش شده‌اند. ضمناً "شکل 23 مربوط به محدوده‌های اندازه ذرات قابل استفاده در روش‌های اصلاح خاک‌های روان‌گرا و شکل 24 نیز طیف موثر از اندازه ذرات خاک برای استفاده در دوغاب‌های شیمیایی می‌باشد.

جدول 2- طبقه‌بندی روش‌های اصلاح زمین در راستای کاهش روان‌گرایی در پل‌های موجود

روش‌های اصلاحی بالقوه	اصل	مکانیسم اصلاح
• تزریق فشرده • (compaction grouting) • سیستم ارتعاشی (Vibro-systems)	ذرات خاک به سمت یک آرایش محکم‌تر حرکت کرده و چگالی افزایش می‌یابد.	تراکم‌سازی
• تزریق دانه بندی • تزریق شیمیایی • تزریق با فشار	ذرات خاک از طریق پر شدن منافذ با مواد سخته کننده با یکدیگر پیوند محکم برقرار می‌کنند.	سیمانی نمودن
• قراردادن ستون و دیوار • تزریق با فشار • جاسازی ارتعاشی • قراردادن شمع ریشه ای	توده خاک با المان سخت تقویت می‌شود تا مقاومت برشی بیشتری فراهم شود. هنگامی که المان‌ها همپوشانی و طوری آرایش داده شوند ناچار دیواری تشکیل شود مهار کردن نیز اتفاق می‌افتد.	تقویت و مهار کردن
• سربار یا شمع پشتیبان دیوار • تزریق فشرده	تنش موثر درجا در داخل توده خاک افزایش می‌یابد و در نتیجه مقاومت برشی زیاد می‌شود.	تنش درجا (In situ) افزایش می‌یابد
• سنگریزه، ماسه و زهکش ضعیف • جایگزین ارتعاشی	قراردادن المان‌های با نفوذپذیری زیاد سبب کاهش فاصله زهکش‌ها در توسعه خاک شده و در فشار آب مازاد سریعاً از بین می‌رود	زهکشی



شکل 23- محدوده‌های اندازه‌ای ذرات قابل استفاده در روش‌های اصلاح خاک‌های روان گرا



شکل 24- طیف موثر از اندازه ذرات خاک برای استفاده در دوغاب‌های شیمیایی

منابع

- 1- ابن جلال، م. ش. بجستان. 1370. مکانیک خاک، اصول نظری و عملی. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- 2- رحیمی، ح. 1359. مکانیک خاک. انتشارات دانش و فن.
- 3- سپاسخواه، ع.، رحیمی، ع.، موحد دانش ح. صدقی، ع. خلیلی، ا.، علیزاده و ح. فرهودی. 1382. فرهنگ کشاورزی و منابع طبیعی. گروه علوم کشاورزی-14. فرهنگستان علوم کشاورزی. موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
- 4- کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. 1376. فرهنگ آبیاری و زهکشی. وزارت نیرو. کمیته ملی آبیاری و زهکشی.
- 5- Guo, H.Y. et al., 2000. The study for assessment of suscepitbility to soil liquefaction in Taiwan. GIS development. Net. AARS. Taiwan agriculture research institute. Wufeng, Taichung Heien. Taiwan.
- 6- Kaplan, A. 2004. Soil liquefaction. Georiga Institue of Technology.
- 7- Karmber, 2000. Adopted From www.ce.washington.edu/~liquefaction.
- 8- Ledbetter, R. H. 1985. Improvement of liqefiable foundation conditions beneath existing structures. Us Army Engineer Water Ways Experiment Station, Vicksburg. Technical Report REMR-GT-SR-12.
- 9- Lew, M. and M. B. 2004. Liquefaction Basics. Stracture magazine. 10-12.
- 10- Websites about liquefaction
- 11- <http://ceor.princeton.edu/~radu>
- 12-http://science.msfc.nasa.gov/newhome/headlines/msad06jan98_1.htm.
- 13- <http://geosvstems.gatech.edu/Research/gpr.html>
- 14- <http://rccg01.use.edu/GEES/velacs/velacs.html>
- 15- <http://ceor.princeton.edu/~radu/soil/velacs>
- 16- <http://www.civil.ualberta.ca/geot/document/canlex.htm>
- 17- <http://mceer.buffalo.edu>