

عوامل تأثیر گذار بر روی پارامترهای دینامیکی خاک

شهربانو مقدسی، محمدحسین طالبی و سعید سراج پور

شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک

چکیده

آسیب‌های ناشی از بارهای دینامیکی به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر پاسخ لایه‌های خاک قرار می‌گیرند، لذا به منظور تجزیه و تحلیل آسیب‌های ناشی از زلزله یا سایر بارهای دینامیکی، لازم است خصوصیات دینامیکی خاک‌ها تعیین شود. مهم‌ترین پارامترهای دینامیکی خاک شامل مدول برشی G و نسبت میرایی D می‌باشد که به پارامترهای مختلفی از جمله کرنش، تنش محصور کننده، شرایط زهکشی، فرکانس بارگذاری و ... بستگی دارد. در روش‌های تحلیل دینامیکی خاک به صورت مدل‌سازی عددی و هم‌نیطور برای تهیه طیف طرح ویژه ساختگاه، تغییرات مدول برشی دینامیکی و نسبت میرایی در سطوح مختلف کرنش برشی جزء پارامترهای ضروری می‌باشند. در این مقاله مراحل تعیین پارامترهای دینامیکی و ترسیم منحنی‌های $D-\gamma$ و $\frac{G}{G_0}-\gamma$ با استفاده از دستگاه سه محوری دینامیکی موجود در شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک ارائه شده است. به علاوه تأثیر تنش محصور کننده، شکل ذرات و خاصیت خمیری در خاک‌های دانه‌ای و رسی مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها موارد اصلی اختلاف بین دو استاندارد $ASTM D3999-11$ و $JGS 0542-2000$ ژاپن که مربوط به آزمایش سه محوری دینامیکی می‌باشند، ارائه شده است.

۱- مقدمه

زهکشی، فرکانس بارگذاری و ... بستگی دارد و همه پارامترهای موثر می‌بایست مورد توجه قرار گیرند.

تلاش‌های قابل توجهی جهت تعیین خواص دینامیکی خاک برای استفاده در روش‌های تحلیل دینامیکی صورت گرفته است. در مدلسازی عددی، تغییرات مدول برشی دینامیکی و نسبت میرایی در سطوح مختلف کرنش برشی جزو پارامترهای اساسی ورودی در تحلیل دینامیکی می‌باشد.

اثر مجموعه دامنه شتاب زمین، مولفه فرکانس آن و مدت زمان استمرار حرکت در سازه‌های مختلف با مفهوم طیف پاسخ نشان داده می‌شود. امروزه تهیه طیف طرح بر اساس توصیه آیین‌نامه‌ها برای در نظر گرفتن اثر زلزله بر روی ساختمانهای غیرمعارف اجباری شده است. «طیف

در سالهای اخیر پیشرفت‌های زیادی در توسعه روش‌های تحلیلی برای ارزیابی پاسخ زمین در شرایط بارگذاری لرزه‌ای صورت گرفته است. آسیبهای ناشی از زلزله یا سایر بارهای دینامیکی به طور قابل توجهی تحت تأثیر پاسخ لایه‌های خاک قرار می‌گیرد. به منظور بررسی و تجزیه و تحلیل آسیب‌های ناشی از زلزله، باید خصوصیات دینامیکی خاک‌ها تعیین شود.

مهمترین پارامترهای دینامیکی خاک شامل مدول برشی (G) و نسبت میرایی (D) می‌باشند که اندازه‌گیری این پارامترها از مهمترین جنبه‌های مهندسی زلزله و دینامیک خاک است. خواص دینامیکی خاک به پارامترهای مختلفی از جمله کرنش، تنش محصور کننده، تخلخل، شرایط

سرعت موج برشی این لایه سخت حداقل ۳ برابر متوسط سرعت موج برشی لایه فوقانی باشد.

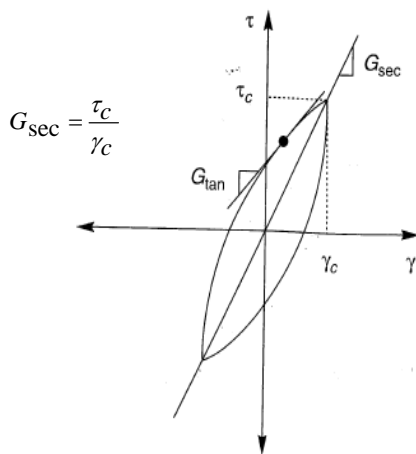
پارامترهای دینامیکی از روش‌های مختلف آزمایشگاهی و صحرایی قابل تعیین است. در این مقاله مراحل تعیین پارامترهای دینامیکی و ترسیم منحنی‌های $D-\gamma$ و $\frac{G}{G_0}-\gamma$ با استفاده از دستگاه سه محوری سیکلی موجود در شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک و تاثیر پارامترهای موثر بر آنها بررسی شده است.

۲- مروری بر خواص دینامیکی خاک

دو پارامتر دینامیکی خاک که در تحلیل پاسخ زمین در برابر زلزله مورد نیاز هستند، مدول برشی دینامیکی (G) و نسبت میرایی (D) می‌باشد. هر دو این پارامترها به سطح کرنش برشی وابسته هستند.

۲-۱- مدول برشی

رفتار خاک‌ها در بارگذاری‌های رفت و برگشتی غیرخطی است و با تغییر حالت بارگذاری به حالت باربرداری و اعمال تنش در جهت عکس و تکرار مجدد بارگذاری منحنی بسته‌ای شکل می‌گیرد. شکل شماتیک حلقه هیستریزس نمونه خاک تحت بارگذاری سیکلی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- حلقه هیستریزس یک نمونه خاک

طرح استاندارد» توسط آئین‌نامه محاسبه شده و برای استفاده از آن تنها نیاز به داشتن میزان لرزه‌خیزی منطقه، میزان اهمیت سازه، نوع خاک ساختگاه و همچنین سیستم سازه‌ای است. طیف‌های ارائه شده در آئین‌نامه ۲۸۰۰ تاثیر عواملی نظیر جنس لایه‌های خاک، تغییرات ضخامت لایه‌ها و ترتیب قرارگیری لایه‌ها را در نظر نمی‌گیرد که تمامی این موارد در طیف طرح ویژه ساختگاه بررسی می‌گردد. برای تهیه طیف طرح ویژه ساختگاه، انتخاب منحنی‌های مناسب $D-\gamma$ و $\frac{G}{G_0}-\gamma$ برای لایه‌های مختلف خاک ضروری است.

مطابق شرایط ارائه شده در آئین‌نامه ۲۸۰۰، در صورتی که یکی از شرایط زیر در ساختمان یا ساختگاه موجود باشد، تهیه طیف طرح ویژه ساختگاه الزامی است:

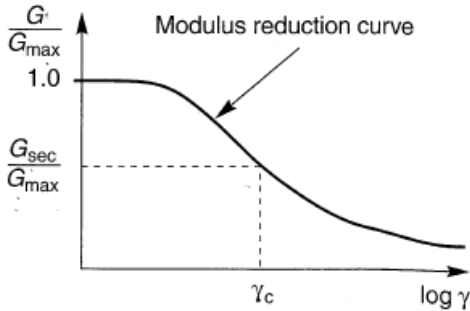
- ساختمان با ارتفاع بیش از ۱۵۰ متر از تراز پایه و دارای زمان تناوب اصلی نوسان (T) بیشتر از ۳/۵ ثانیه
- ساختمان‌های با اهمیت خیلی زیاد و زیاد که بر روی زمین‌های غیر از نوع I، II و یا III ساخته می‌شوند.
- ساختمان‌های بلندتر از ۵۰ متر که بر روی زمین‌های غیر از نوع I، II و یا III ساخته می‌شوند.
- ساختمان‌های بلندتر از ۵۰ متر که بر روی زمین‌های نوع II و III، با ضخامت لایه خاک بیش از ۶۰ متر ساخته می‌شوند.

- برای ساختگاه‌هایی که دارای خصوصیتی غیر از زمین‌های نوع I تا IV هستند.

- برای ساختگاه‌هایی که زمین آنها متشکل از رس یا لای نرم دارای درصد رطوبت زیاد با حداقل ضخامت ۱۰ متر و $PI > 40$ است.

- در ساختگاه‌هایی که لایه‌های خاک با سرعت موج برشی معادل خاک‌های نوع III یا IV و ضخامت بین ۵ تا ۲۰ متر بر روی یک لایه سخت از نوع طبقه I قرار گرفته و

به منظور درک بهتر رفتار خاک و مقایسه خاکهای مختلف با یکدیگر می‌توان نمودارهای $G-\gamma$ را با استفاده از G_{max} بی‌بعد کرد. تغییرات $\frac{G}{G_{max}}$ با کرنش برشی مطابق شکل ۳ روندی کاهشی دارد.

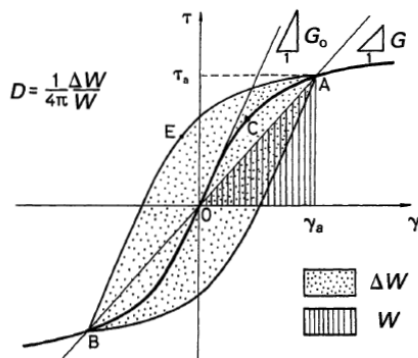


شکل ۳- تغییرات تپ $\frac{G_{sec}}{G_{max}}$ با کرنش برشی

۲-۲- نسبت میرایی

در منحنی هیستریزس حاصل از یک بارگذاری و باربرداری (شکل ۴)، مساحت زیرخط OA انرژی ذخیره شده در یک المان مصالح تحت بار (W) و سطح محصور در حلقه انرژی مستهلک شده خالص (ΔW) می‌باشد. نسبت میرایی تابعی از W و ΔW بوده و به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود.

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (2)$$



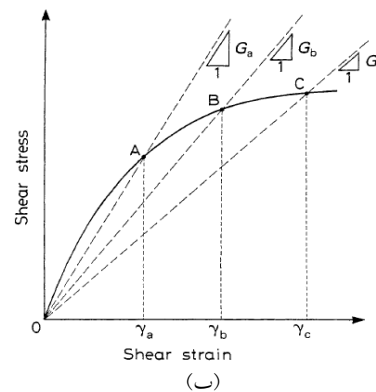
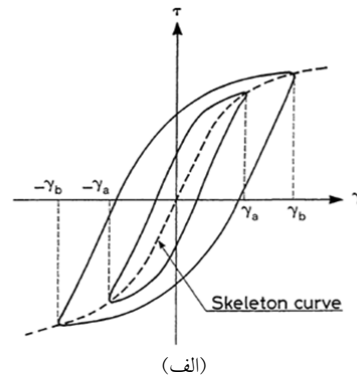
شکل ۴- حلقه هیستریزس خاک و نحوه محاسبه نسبت میرایی

به دلیل رفتار غیرخطی خاک، با تغییرات کرنش، تغییرات مدول برشی به وجود می‌آید (شکل ۲- الف). پوش نقاط متناظر با نقاط فوقانی حلقه‌های هیستریزس متعلق به کرنش‌های سیکلی مختلف در شکل ۲- ب نمایش داده شده است.

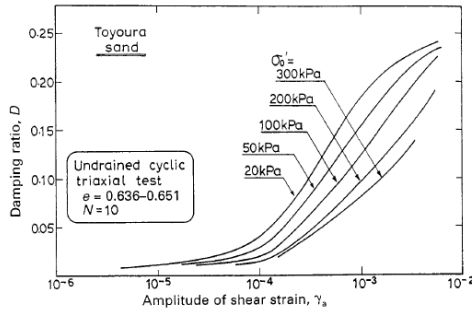
۲-۲- مدول برشی ماکزیمم G_{max}

مدول برشی ماکزیمم هم از طریق آزمایش‌های لرزه‌ای درون چاهی و هم بر اساس آزمونهای آزمایشگاهی قابل دستیابی است. از آنجاکه اغلب آزمایش‌های ژئوفیزیکی لرزه‌ای کرنش برشی کمتر از 0.0003 درصد تولید می‌نمایند و دست‌خوردگی نمونه‌ها وجود ندارد، سرعت موج برشی (V_s) با دقت نسبتاً خوبی اندازه‌گیری شده و برای محاسبه G_{max} قابل استفاده می‌باشد (رابطه ۱).

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

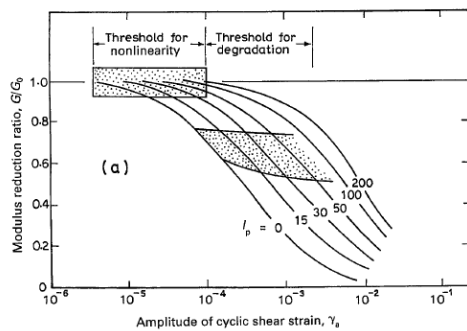


شکل ۲- پوش منحنی $G-\gamma$ نقاط متناظر با حلقه‌های هیستریزس مختلف

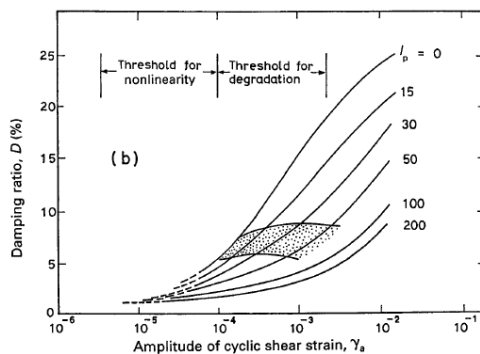


شکل ۶- مقایسه منحنی $D-\gamma$ برای تنش‌های محصورکننده مختلف

در رس‌ها، تغییر تنش محصور کننده موجب تغییر نسبت مدول برشی و نسبت میرایی نمی‌شود، بلکه مقدار پراکندگی با تغییرات دامنه خمیری مرتبط می‌باشد. در واقع دامنه خمیری خاک‌ها، منحنی $\gamma-\frac{G}{G_{max}}$ و $D-\gamma$ را تحت تأثیر قرار می‌دهد به طوریکه با افزایش دامنه خمیری نسبت مدول $\frac{G}{G_{max}}$ افزایش و نسبت میرایی D کاهش می‌یابد. (شکل‌های ۷ و ۸)



شکل ۷- مقایسه منحنی $\gamma-\frac{G}{G_0}$ برای خاک‌های با دامنه خمیری مختلف

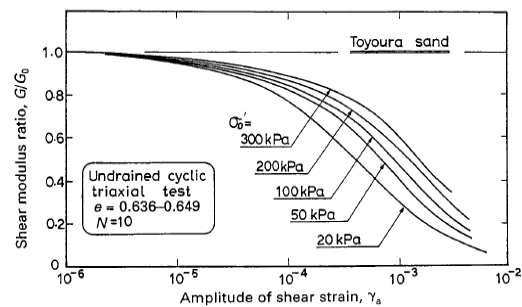


شکل ۸- مقایسه منحنی $D-\gamma$ برای خاک‌های با PI مختلف

اگر γ_a بسیار کوچک و جزئی باشد رفتار خطی است و حلقه تشکیل نمی‌شود، در نتیجه نسبت میرایی برابر صفر می‌گردد. از آنجا که روند افزایش سطح حلقه بیشتر از روند افزایش سطح مثلث است در کرنش‌های بزرگ نسبت میرایی بیشتر است.

۳- تأثیر عوامل مختلف روی پارامترهای دینامیکی

بر اساس مطالعات آزمایشگاهی سیکلی، نسبت مدول برشی برای خاک‌های چسبنده به خاصیت خمیری خاک و نسبت پیش تحکیمی و برای خاک‌های دانه‌ای به فشار محصورکننده وابسته می‌باشد. اثرات فشار محصورکننده بر رفتار نسبت مدول برشی و نسبت میرایی برای خاک‌های غیرخمیری مطابق نتایج آزمایش‌های Kokusho در سال ۱۹۸۰ به صورت شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.



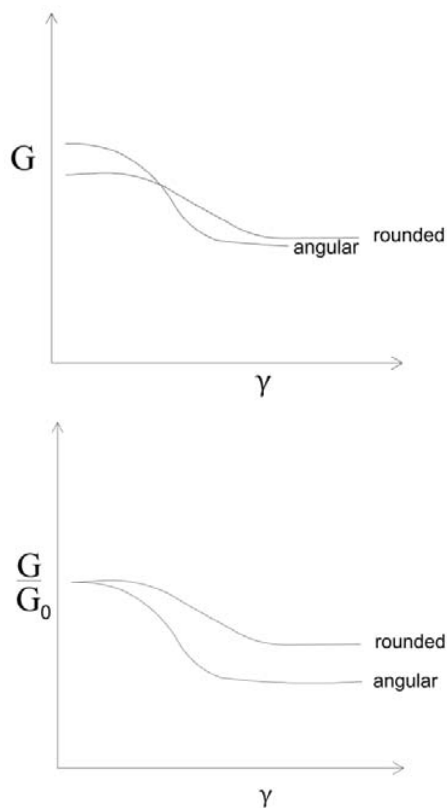
شکل ۵- مقایسه منحنی نرمال شده $\gamma-\frac{G}{G_0}$ برای تنش‌های محصورکننده مختلف

این نتیجه حاصل می‌شود که وقتی فشار محصورکننده افزایش می‌یابد مقادیر مدول برشی از باند پایین به سمت باند بالا افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش تنش محصورکننده، حرکت دانه‌ها کمتر و در نتیجه خاک سخت‌تر و نسبت میرایی کمتر می‌شود.

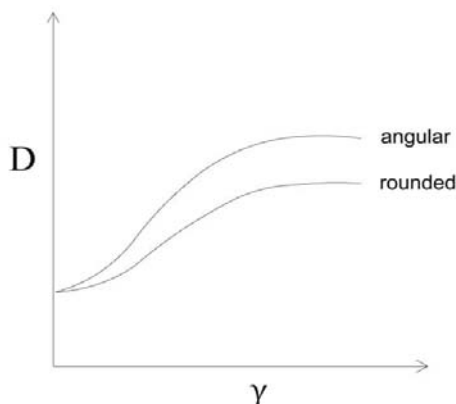
لایه‌های سطحی زمین تنش محصورکننده کمتری دارند، پس دارای رفتار غیرخطی‌تر و نسبت میرایی بیشتری هستند و در عمق زیاد با افزایش تنش محصورکننده استهلاک انرژی (D) کمتر است (شکل ۶).

۳-۲ تاثیر شکل دانه‌ها بر پارامترهای دینامیکی

ماسه و شن‌های تیز گوشه مدول برشی G_0 بزرگتری نسبت به ذرات گرد دارند. در واقع هر چه دانه‌ها تیز گوشه‌تر باشند در اثر بارگذاری قسمت‌های تیز سنگدانه‌ها می‌شکنند. وقتی شکست رخ می‌دهد، در نمودار $G-\gamma$ مقدار مدول برشی با نرخ بیشتری افت می‌کند. لذا در نمودار نسبت مدول برشی، در کرنش‌های بالا، مقدار نسبت مدول برشی مصالح تیز گوشه کمتر از مصالح گرد گوشه می‌باشد (شکل ۹). شکست دانه‌ها در هر محیطی میزان زیادی از انرژی را مستهلک می‌کند، بنابراین در تیز گوشه‌ها با شکست قسمت‌های تیز نمونه رفتار غیرخطی آن بیشتر شده، باعث افزایش نسبت میرایی می‌شود (شکل ۱۰).



شکل ۹- مقایسه منحنی $G-\gamma$ و منحنی نرمال شده $G/G_0-\gamma$ برای مصالح گرد گوشه و شکسته

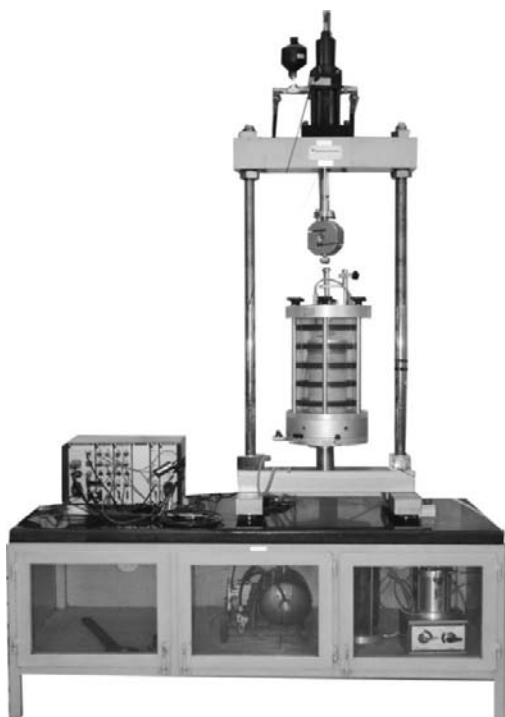


شکل ۱۰: مقایسه منحنی $D-\gamma$ برای مصالح گرد گوشه و شکسته

۴- مراحل انجام آزمایش سه محوری سیکلی

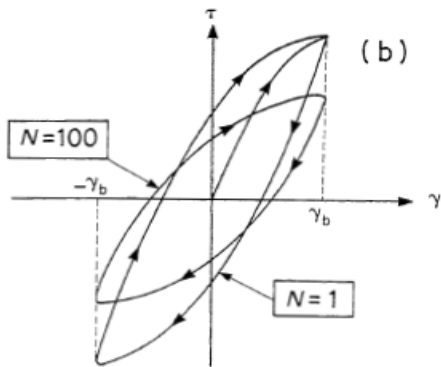
مراحل انجام آزمایش سه محوری به ترتیب عبارتند از:

- ۱- تهیه و آماده‌سازی نمونه در آزمایش سه محوری سیکلی کاملاً مشابه آزمایش‌های سه محوری استاتیکی می‌باشد. (شکل ۱۱)



شکل ۱۱- دستگاه سه محوری سیکلی شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک

به سمت محور کرنش‌ها متمایل می‌شود و مدول برشی کاهش می‌یابد. قبل از سیکل ۱۰ تا ۲۰ این احتمال وجود دارد که کاهش سختی رخ دهد. در سیکل‌های بعد از ۱۰ تا ۲۰، حلقه جابجا نمی‌شود و روی حلقه قبلی می‌افتد. همچنین با توجه به تغییر حجم نسبتاً بالا در چند سیکل اول، میزان نسبت میرایی زیاد است و بعد از سیکل ۱۰ تا ۲۰ با توجه به کاهش تغییر حجم، میزان نسبت میرایی تقریباً ثابت می‌ماند (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- تغییرات حلقه هیستریزس در سیکل‌های مختلف

در استاندارد ASTM D3999-11، مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی بر اساس مقادیر به دست آمده در اولین سیکل از هر گام بارگذاری محاسبه می‌شود. درحالی‌که استاندارد JGS 0542-2000 ژاپن با توجه به مطالب فوق مقادیر مربوط به سیکل دهم را توصیه می‌کند.

۲- در کرنش‌های بالاتر از $10^{(-3)}$ ، با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری رفت و برگشتی، فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد و احتمال وقوع پدیده روانگرایی و تخریب نمونه وجود دارد.

استاندارد ASTM D3999-11 تعداد سیکل‌های بارگذاری در هر گام را ۴۰ سیکل در نظر می‌گیرد. درحالی‌که استاندارد JGS 0542-2000 ژاپن ۱۱ سیکل برای انجام مراحل بعدی آزمایش توصیه می‌کند.

۲- در این آزمایش اعمال تحکیم غیر ایزوتروپ با نسبت مشخص امکانپذیر می‌باشد.

۳- مراحل بارگذاری مطابق فرآیند زیر انجام می‌گردد:

در آزمایش زهکشی نشده، شیرهای زهکشی را بسته و ۱۱ بار محوری سیکلی با کرنش محوری تک دامنه کمتر از 0.01% و با فرکانس 0.5 تا 1 هرتز اعمال می‌شود. بارمحوری، کرنش محوری و فشار آب منفذی حین بارگذاری ثبت شده و بعد از اتمام بارگذاری محوری سیکلی شیرهای زهکشی را بازنموده تا زمانی که افزایش فشار آب منفذی ایجاد شده به تعادل برسد. در انتها تغییر حجم و ارتفاع نمونه اندازه‌گیری می‌شود.

در ادامه شیر زهکشی را بسته، بار محوری سیکلی مشابهی به نمونه با استفاده از یک مقدار بار محوری سیکلی تک دامنه در حدود ۲ برابر گام اول اعمال می‌شود. این فرآیند تا زمانی که بتوان بارگذاری سیکلی را ادامه داد، تکرار می‌شود.

۴- محاسبات

مقادیر مدول سکانت (E_s) و نسبت میرایی (D) مرتبط با کرنش محوری تک دامنه برای سیکل دهم از هر گام بارگذاری بر اساس حلقه هیستریزس حاصله تعیین می‌گردد. مقادیر مدول برشی (G) و کرنش برشی (γ) را با استفاده از روابط موجود محاسبه نموده و منحنی تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی در مقابل لگاریتم کرنش برشی ترسیم می‌شود.

۵- مقایسه استانداردهای مربوط به آزمایش تعیین پارامترهای دینامیکی خاک با استفاده از دستگاه سه محوری سیکلی

۱- در کرنش‌های حدود $10^{(-3)}$ در بارگذاری‌های رفت و برگشتی تغییر حجم در نمونه رخ می‌دهد، که منجر به پدیده کاهش سختی می‌شود. به عبارتی حلقه بارگذاری

تنش‌های سیکلی ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ادامه پیدا می‌کند.

از آنجایی که ماسه مورد مطالعه تحمل کشش را ندارد، امکان اعمال تنش سیکلی بیش از ۱۰۰ کیلو پاسکال بر روی نمونه نیست. حین اعمال بارگذاری لازم است میزان تغییر شکل‌ها و فشار آب حفره‌ای به گونه‌ای کنترل شود که بتوان قبل از گسیختگی نمونه، دستگاه را متوقف نمود.

به ازای هر یک از تنش‌های محوری سیکلی اعمالی، خروجی آزمایش حاوی اطلاعاتی مشابه جدول ۱ می‌باشد. بر اساس اطلاعات فایل خروجی میزان تنش انحرافی و کرنش محوری در هر یک از فواصل زمانی محاسبه می‌شود (جدول ۲).

۳ - رابطه بین کرنش محوری و برشی استاندارد ASTM D3999-11 به صورت $\gamma = \frac{\varepsilon}{1+\nu}$ ارائه شده است. در حالی که بر اساس روابط موجود می‌توان ثابت نمود که رابطه بین γ و ε به صورت رابطه ۳ صحیح است.

$$\gamma = \varepsilon(1+\nu) \quad (3)$$

۶-۱ مطالعه موردی ۱

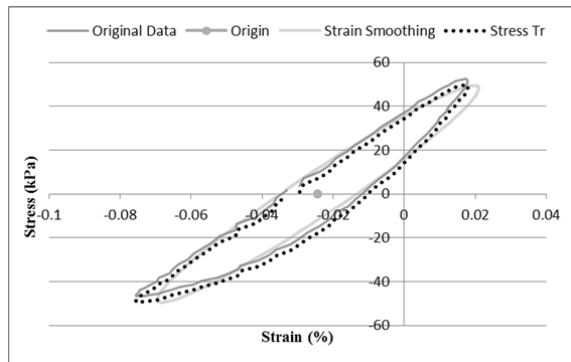
بر روی مصالح دانه‌ای ماسه گرد گوشه فیروزکوه که تحت فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال تحکیم یافته است، ۱۱ سیکل تنش رفت و برگشتی به میزان ۵ کیلو پاسکال در شرایط زهکشی نشده اعمال شد. پس از اتمام بارگذاری شیر زهکشی باز می‌شود تا اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده زایل شود. در ادامه ۱۱ سیکل تنش رفت و برگشتی ۱۰ کیلو پاسکال اعمال می‌شود و این روند تحت

جدول ۱- نتایج خروجی آزمایش

Cycle	Time (sec)	Load (kN)	Cell pressure (kPa)	Back pressure (kPa)	Pore pressure (kPa)	Axial Displacement (mm)
10	9.00	0.015	200.012	99.792	122.711	-4.144
	9.02	0.040	200.012	99.640	122.955	-4.135
	9.04	0.063	200.012	100.067	123.291	-4.130
	9.06	0.087	199.981	100.463	123.535	-4.122
	9.08	0.109	200.012	99.915	123.718	-4.114
	9.10	0.129	200.042	99.670	123.962	-4.108
	9.20	0.198	200.012	99.854	124.359	-4.084
	9.30	0.193	200.042	100.311	124.053	-4.078
	9.40	0.117	200.012	100.433	123.626	-4.091
	9.50	0.002	200.012	99.976	122.955	-4.118
	9.60	-0.108	200.012	99.640	121.795	-4.156
	9.70	-0.174	200.012	99.884	120.422	-4.197
	9.80	-0.171	200.042	100.341	120.208	-4.207
9.90	-0.098	200.012	100.463	121.398	-4.182	
11	10.00	0.016	199.981	99.884	123.046	-4.146

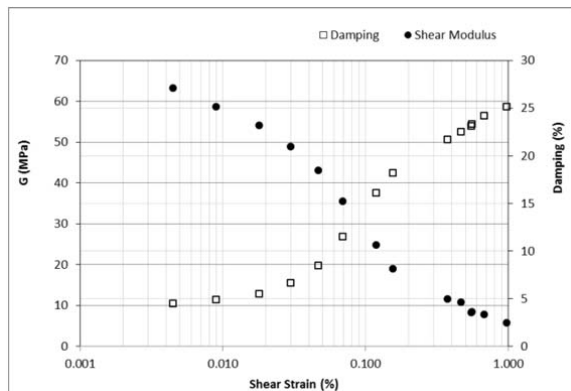
جدول ۲- نتایج خروجی محاسبه تنش و کرنش

Cycle	Time (sec)	Load (kN)	Axial Displacement (mm)	Stress (kPa)	Strain (%)
10	9	0.015	-4.144	3.809	-0.029
	9.02	0.040	-4.135	10.162	-0.024
	9.04	0.063	-4.130	16.123	-0.019
	9.06	0.087	-4.122	22.279	-0.014
	9.08	0.109	-4.114	27.848	-0.008
	9.1	0.129	-4.108	33.126	-0.004
	9.2	0.198	-4.084	50.620	0.013
	9.3	0.193	-4.078	49.446	0.017
	9.4	0.117	-4.091	30.098	0.008
	9.5	0.002	-4.118	0.487	-0.011
	9.6	-0.108	-4.156	-27.751	-0.038
	9.7	-0.174	-4.197	-44.461	-0.067
	9.8	-0.171	-4.207	-43.875	-0.074
9.9	-0.098	-4.182	-25.015	-0.057	
11	10	0.016	-4.146	4.007	-0.031



شکل ۱۴- حلقه هیستریزس مربوط به سیکل دهم در تنش سیکلی ۵۰ مگاپاسکال

به ازای هر یک از تنش‌های محوری سیکلی ۵ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال، حلقه بارگذاری سیکل دهم ترسیم و مقادیر D و G محاسبه شد. به عنوان مثال حلقه هیستریزس مربوط به سیکل دهم تنش سیکلی ۵۰ کیلوپاسکال در شکل ۱۴ نشان داده شده است که بر اساس این حلقه کرنش برشی (γ) برابر ۰/۰۶۹٪ و مدول برشی (G) برابر ۳۵/۴ مگاپاسکال و نسبت میرایی برابر ۱۱/۵ درصد به دست آمد. منحنی‌های $G-\gamma$ و $D-\gamma$ نیز مشابه شکل ۱۵ برای تمامی تنش‌های سیکلی اعمالی به دست آمد.



شکل ۱۵- منحنی $G-\gamma$ و $D-\gamma$ مربوط به ماسه گرد گوشه

۲-۶ مطالعه موردی ۲

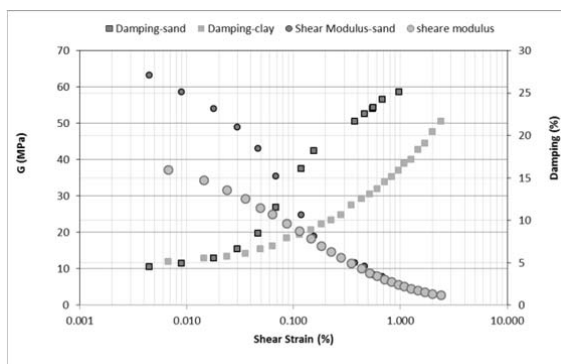
در این بخش نتایج آزمایش تعیین مدول و نسبت میرایی و منحنی‌های $G-\gamma$ و $D-\gamma$ انجام شده توسط دستگاه سه‌محوری دینامیکی شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک بر روی دو نوع مصالح دانه‌ای و رسی ارائه و مقایسه شده است. مشخصات نمونه‌ها به صورت زیر می‌باشد.

۱- رس خمیری CL با شاخص خمیری $PI=22$ و حد روانی $LL=43$

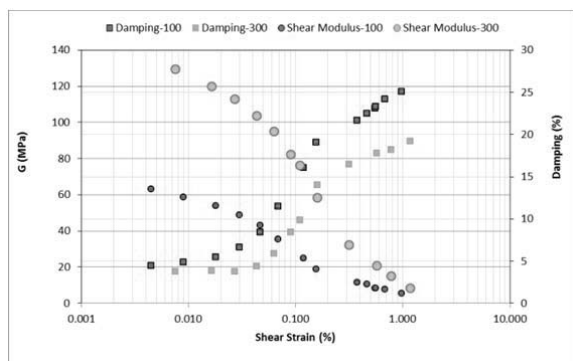
۲- ماسه گرد گوشه فیروزکوه، مانده روی الک شماره ۴، $R_4=0.9\%$ و عبوری از الک شماره ۲۰۰، $F_{200}=0.5\%$

همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، مقادیر مدول برشی و میرایی مصالح دانه‌ای بزرگ‌تر از مصالح رسی می‌باشد.

مقایسه نتایج آزمایش‌های مربوط به خاکهای دانه‌ای تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال در شکل ۱۷ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش فشار همه‌جانبه مدول برشی افزایش و میرایی کاهش یافته است.



شکل ۱۶: مقایسه منحنی‌های $G-\gamma$ و $D-\gamma$ خاکهای دانه‌ای با خمیری



شکل ۱۷: مقایسه منحنی‌های $G-\gamma$ و $D-\gamma$ مصالح دانه‌ای تحت فشار همه‌جانبه ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال

۷- نتیجه‌گیری

مهمترین پارامترهای دینامیکی خاک شامل مدول برشی G و نسبت میرایی D می‌باشد که اندازه‌گیری این پارامترها از مهمترین جنبه‌های مهندسی زلزله و دینامیک خاک است. تغییرات مدول برشی دینامیکی و نسبت میرایی در سطوح مختلف کرنش (منحنی‌های $G-\gamma$ و $D-\gamma$) از پارامترهای اساسی در تحلیل دینامیکی خاک بوده و بطور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر پارامترهای مختلفی از جمله تنش محصور کننده، خاصیت خمیری و شکل ذرات دانه‌ای می‌باشند. تاثیر پارامترهای فوق‌الذکر به شرح ذیل می‌باشد.

- در خاک‌های دانه‌ای با افزایش تنش محصور کننده، مقادیر نسبت مدول برشی افزایش و نسبت میرایی کاهش می‌یابد.

- در خاک‌های رسی با افزایش خاصیت خمیری، مقادیر نسبت مدول برشی افزایش و نسبت میرایی کاهش می‌یابد.

- در کرنش‌های بالا، مقدار نسبت مدول برشی مصالح تیز گوشه کمتر از مصالح گرد گوشه و نسبت میرایی مصالح تیز گوشه بیشتر از مصالح گرد گوشه می‌باشد.

6. ASTM, C. "ASTM D 3999." Philadelphia: American Society for Testing Materials, 2011.
7. Woods, Richard D. "Measurement of dynamic soil properties." From Volume I of Earthquake Engineering and Soil Dynamics--Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference, June 19-21, 1978, Pasadena, California. Sponsored by Geotechnical Engineering Division of ASCE in cooperation with: No. Proceeding. 1978.
8. Kallioglou, P., T. H. Tika, and K. Pitilakis. "Shear modulus and damping ratio of cohesive soils." Journal of Earthquake Engineering 12.6 (2008): 879-913.
9. Seed, H. Bolton, et al. "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils." Journal of geotechnical engineering 112.11 (1986): 1016-1032.
10. Ashmawy, A. K., et al. "Soil damping and its use in dynamic analyses." (1995).
11. JGS. "Method for cyclic triaxial test to determine deformation properties of geomaterials" JAPANESE GEOTECHNICAL SOCIETY STANDARDS Laboratory Testing Standards of Geomaterials, 2009.

۱۲. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، "آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)"، ۱۳۹۶.

بر اساس مقایسه روش‌های انجام آزمایش سه‌محوری دینامیکی مطابق با استانداردهای ASTM و JGS دو اختلاف اساسی مشاهده می‌شود.

- اختلاف اول مربوط به سیکل مورد استفاده برای ترسیم منحنی‌های $D-\gamma$ و $\frac{G}{G_0}-\gamma$ می‌باشد. استاندارد ASTM نتایج اولین سیکل بارگذاری را استفاده می‌کند، در حالی که استاندارد ژاپن نتایج سیکل دهم را انتخاب می‌کند. با توجه به اینکه در چند سیکل اول پدیده کاهش سختی و افزایش تغییر حجم رخ می‌دهد، انتخاب سیکل دهم ترجیح داده می‌شود.

- اختلاف دوم مربوط به تعداد سیکل‌های بارگذاری در هر مرحله می‌باشد. استاندارد ASTM، تعداد ۴۰ سیکل بارگذاری را در نظر می‌گیرد، در حالیکه استاندارد JGS، تعداد ۱۱ سیکل را انتخاب می‌کند. با توجه به احتمال وقوع پدیده روانگرایی با افزایش تعداد سیکل‌ها، انتخاب ۱۱ سیکل ترجیح داده می‌شود.

۷- مراجع

1. Kumar, Shiv Shankar, A. Murali Krishna, and Arindam Dey. "Parameters influencing dynamic soil properties: a review treatise." National conference on recent advances in civil engineering. 2013.
2. Kokusho, Takeji. "Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range." Soils and foundations 20.2 (1980): 45-60.
3. Silver, Marshall L., and H. Bolton Seed. "Deformation characteristics of sands under cyclic loading." Journal of Soil Mechanics & Foundations Div (1971).
4. Towhata, Ikuo. Geotechnical earthquake engineering. Springer Science & Business Media, 2008.
5. Ishihara, K. "Soil Behavior in Earthquake Geotechnics Oxford Science Publication UK." (1996).