

بخش نهم

آزمایش تحکیم

(Consolidation)

هدف از انجام آزمایش تحکیم، تعیین پارامترهای مؤثر در پیش‌بینی شدت نشست و میزان آن در سازه‌های متکی بر خاک‌های رسی است.

۱. مقدمه

وقتی خاک اشباع تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، در آغاز تمام بارگذاری توسط آب حفره‌ای تحمل می‌شود و به آن افزایش فشار آب حفره‌ای می‌گویند. در صورتی که زهکشی انجام شود، به مرور زمان حجم خاک کاهش می‌یابد که به آن تحکیم گفته می‌شود و باعث نشست می‌گردد. از طرفی ممکن است خاک در اثر جذب آب حفره‌ای یا فشار آب حفره‌ای منفی افزایش حجم دهد که به آن تورم می‌گویند.

نرخ تغییر حجم نمونه‌ی تحت بارگذاری به نفوذپذیری نمونه بستگی دارد، از این رو آزمایش تحکیم معمولاً در خاک‌های با نفوذپذیری کم (میلند رس) انجام می‌گردد.

آزمایش تحکیم در واقع آزمایشی جهت برآورد پارامترهای تحکیم یک بعدی ترزاقی است که از حل همزمان دو معادله‌ی تعادل و پیوستگی به صورت تک بعدی حاصل شده است.

در مدل‌سازی رفتاری مصالح برخی مدل‌های پلاستیک، نظیر مدل حالت حدی، پارامترهایی وجود دارد که با

آزمایش تحکیم برآورده می‌شوند. در برآورد نشست تحکیمی و درجه‌ی تحکیم خاک هم‌چنین طراحی چاه‌های

زهکشی و تعیین میزان فشار آب حفره‌ای حین ساخت در هسته‌ی سله‌های خاکی از آزمایش تحکیم استفاده می‌شود.

WWW.PARS-GEO-AZMA.COM

پارامترهای مهم خاک که از آزمایش تحکیم به دست می‌آید یکی اندیس‌های تراکم است که میزان تراکم‌پذیری نمونه‌ی خاک را مشخص می‌کند (C_r , C_c) و دیگری ضریب تحکیم (C_v) می‌باشد که شدت تراکم به علت بارگذاری را تعیین می‌کند.

برای تعیین میزان نشست خاک‌ها به علت تحکیم از تئوری تحکیم ترزاقی با فرضیات زیر استفاده می‌گردد:

۱. خاک همگن است.
۲. خاک اشباع است.
۳. زهکشی و تراکم یک بعدی است.
۴. خواص خاک ثابت است.
۵. منحنی $e-\log p$ یک خط راست را تشکیل دهد.

۲. تئوری آزمایش

وقتی خاک تحت بارگذاری قرار می‌گیرد به علت کاهش نسبت منافذ (e) تغییر شکل پلاستیک از خود نشان می‌دهد. در شکل (۲) این مطلب به وضوح مشخص است. تغییر شکل الاستیک نیز به شکل مختصر رخ می‌دهد که قبل از آن فقط نظر کردن است. وقتی بار به خاک داده‌ای خشک یا نیمه اشباع و خاک چسبنده‌ی خشک وارد شود، تغییر مکان پلاستیک در مدت کوتاهی انجام می‌گردد. خاک خشک به دلیل ویسکوزیته‌ی بسیار کم سریعاً فشرده می‌شود. در خاک‌های نیمه اشباع و اشباع، به دلیل نفوذپذیری زیاد خاک تغییر مکان پلاستیک در مدت زمان کوتاه امکان‌پذیر است.

WWW.PARS-GEO-AZMA.COM

در خاک چسبنده‌ی نیمه اشباع و یا اشباع کامل، زمان تحکیم به عوامل زیر بستگی پیدا می‌کند:

۱. درجه‌ی اشباع
۲. ضریب نفوذپذیری خاک
۳. خواص سیال

۴. طول مسیری که سیال برای رسیدن به هدف تعادل طی می کند.

تحکیم در واقع تغییر مکان پلاستیک همراه با کاهش نسبت منافذ است و به صورت تابعی از زمان تعریف

می شود:

$$s = f(t)$$

وقتی بار Δp بر نمونه داخل حلقه فلزی وارد می گردد فشار سنجها در نقطه‌ی مورد نظر فشار را به اندازه‌ی

Δh از سطح قبلی آب بالاتر نشان می دهند. چون ضریب نفوذپذیری کم است فشار آب حفره‌ای سریع از بین

نمی رود. با گذشت زمان و خارج شدن آب حفره‌ای، این اختلاف فشار کم تر شده، در نهایت به صفر میل می کند. در

این حالت تحکیم اولیه پایان می پذیرد و بعد از این مرحله تحکیم ثانویه شروع می شود.

در آزمایش تحکیم، تغییر شکل جلبي صفر است و تمامی تغییر شکل در جهت قائم اتفاق می افتد که به این

حالت تحکیم یک بعدی گفته می شود ولی در واقعیت به بعدی می باشد. آزمایش تحکیم معمولاً روی

نمونه‌هایی با ضخامت ۲۰ الی ۴۰ میلی متر و با قطر ۴۵ تا ۱۱۳ میلی متر انجام می گردد. حلقه‌ی فلزی به کار برده شده،

می تواند ثابت (Fixed-ring) یا شناور (Floating-ring) باشد. در آزمایش تحکیم با حلقه‌ی فلزی شناور، به دلیل

کاهش اصطکاک در جداره‌ی حلقه امکان انجام آزمایش با سرعتی تا ۴ برابر حالت حلقه‌ی ثابت وجود دارد و حلقه‌ی

فلزی ثابت بیشتر برای تعیین نفوذپذیری به کار می رود. ضمناً در حلقه‌ی فلزی، نسبت قطر به ارتفاع باید از ۲/۵ بیشتر

باشد.

در برخی دستگاه‌های تحکیم فشار آب حفره‌ای قابل کنترل است. در این دستگاه‌ها امکان اعمال پس فشار

(Back Pressure) نیز وجود دارد. به عنوان مثال در نمونه‌ای که در عمق ۳ متری آب زیر زمینی قرار دارد فشار آب

حفره‌ای موجود $29/4 \text{ kPa} = 9/8 \times 3$ است که با این دستگاه‌های قابل اعمال می باشد. اعمال فشار در آزمایشگاه تحکیم

معمولاً به صورتی است که $\Delta P/p = 1$ می باشد. برای مثال می توان از بارگذاری به ترتیب زیر استفاده کرد:

۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۶۰۰ Kpa

وقتی $\Delta P/p$ خیلی بزرگ نباشد، خاک تمایل دارد که مقاومت داخلی خود را مجدداً تجدید کند که در نتیجه

تغییر مکان کل نمونه کمتر از حالت $\Delta P/p = 1$ می‌گردد.

آزمایش استاندارد تحکیم زمان‌گیر است و برای رفع این مشکل اخیراً ۲ روش جدید دیگر پیشنهاد شده است.

این دو روش عبارتند از: ۱. آزمایش تحکیم بانرخ کرنش ثابت ۲. آزمایش تحکیم باگرادیان ثابت.

در آزمایش تحکیم استاندارد که بار مشخصی به مدت ۱ روز روی نمونه قرار داده می‌شود، مقداری تحکیم

ثابت نیز در خاک اتفاق می‌افتد. در صورتی که مدت زمان اعمال بار بیش از ۱ روز شود میزان تحکیم ثانویه نمونه

بیشتر خواهد شد که در منحنی $e-\log p$ اثر می‌گذارد. شرایط زهکشی در سلول تحکیم می‌تواند به حالت‌های مختلفی

باشد. زهکشی می‌تواند از بالا، بالا و پایین، جدار حلقه و مرکز حلقه به صورت شعاعی باشد. هم‌چنین بار را می‌توان

طوری اعمال نمود که حالت کرنش آزاد و یا کرنش یکسان در سطح نمونه به وجود آید. در حالت اول روی نمونه

صفحه‌ی منعطف و در حالت دوم صفحه‌ی صلب قرار می‌گیرد.

۳. وسایل آزمایش

۱. دستگاه بارگذاری

دستگاهی بایک سری وزنه‌های مناسب برای وارد نمودن بار عمودی بر روی نمونه است. این وزنه‌ها باید بار

مورد نظر را برای مدت زمان طولانی با خطای کمتر از $\pm 5\%$ ثابت نگه‌دارند. هر افزایش بار باید در فاصله‌ی زمانی ۲

ثلیه وبدون وارد کردن ضربه اعمال شود.

۲. دستگاه تحکیم

که شامل قسمت‌های زیر است

WWW.PARS-GEO-AZMA.COM

۱-۲. بلندهی دستگاه تحکیم

ظرف استوانه‌ای است که در داخل آن حلقه‌ی فلزی جای داده می‌شود. سه جدار ظرف استوانه‌ای دو عدد

نیر و سنج جهت مشاهده‌ی سطح آب نصب و حد فاصل حلقه‌ی فلزی و جدار ظرف استوانه‌ای آب ریخته می‌شود. در

نتیجه نمونه در طول آزمایش همیشه در داخل آب غوطه‌ور بوده، به حالت اشباع باقی می‌ماند.

۲-۲. حلقه‌ی فلزی

از برنج یا یک فلز زنگ نزن دیگر ساخته می‌شود و نمونه را در بر می‌گیرد. این حلقه باید شرایط زیر را داشته

باشد:

الف. متناسب با حداقل قطر نمونه باشد. حداقل قطر نمونه ۲ اینچ (۵cm) است.

ب. متناسب با حداقل ضخامت نمونه باشد. حداقل ضخامت نمونه ۰/۵ اینچ (۱۳mm) است. باید توجه داشت که

این حداقل ضخامت نباید از ۰/۱ برابری قطر در شدیدترین دانه‌ی موجود در خاک کمتر باشد.

ج. متناسب با حداقل نسبت قطر به ضخامت نمونه باشد (حدود ۲/۵).

د. سختی و استحکام حلقه در بیش‌ترین فشار هیدرواستاتیک وارد بر نمونه باید طوری باشد که افزایش قطر آن

از ۳٪ تجاوز نکند. حلقه‌ی فلزی باید از فلز ضدزنگ ساخته شده، در برابر مواد موجود در خاک نیز مقاوم باشد. سطح

داخلی حلقه باید کاملاً صیقلی بوده، یا از ماده‌ای با حداقل قابلیت اصطکاک پوشانده شده باشد. گریس سیلیکون یا پلی

تترافلوریتیلن بر ای خاکه‌ای غیر ماسه‌ای پیشنهاد می‌شود.

۳-۲. سنگه‌ای متخلخل

در بالا و پایین نمونه قرار می‌گیرند و باید دارای مشخصات زیر باشند:

الف. سنگه‌ای متخلخل باید از سیلیکون کاربید، اکسید آلومینیوم یا فلزی ساخته شوند که مواد موجود در

خاک و رطوبت خاک روی آنها تأثیر نداشته باشد. خلل و فرج سنگه‌ها باید به حدی باشد که دانه‌های ریز خاک به

داخل آنها نفوذ نکند. بهتر است از فیلتر کاغذی که بین سنگه‌ای متخلخل و نمونه قرار داده می‌شود استفاده کرد تا از

داخل شدن دانه‌های ریز خاک به خلل و فرج سنگ جلوگیری شود. البته زهکشی نمونه نیز نباید به تأخیر افتد. همچنین

سنگه‌ای متخلخل باید همیشه تمیز، بدون ترک و لب‌پریدگی و غیریکنواختی‌ها باشند.

ج. قطر سنگ متخلخل بالای نمونه ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر کوچک‌تر از قطر داخلی حلقه‌ی فلزی است. اگر از

حلقه‌ی شناور استفاده می‌شود، قطر سنگ متخلخل زیر نمونه مساوی قطر سنگ متخلخل بالایی باشد.

د. ضخامت سنگ‌های متخلخل بایستی به اندازه‌ای باشد که در اثر بار گذاری نشکنند.

۴-۲. صفحه‌ی بار گذاری

صفحه‌ی فلزی ضدزنگی با قطر مساوی سنگ متخلخل بالایی است. بار وارده از طریق یک گلوله‌ی فلزی به

صفحه‌ی سربار و به نمونه وارد می‌شود و در نتیجه موجب سلام ملدن سنگ متخلخل بالایی می‌گردد.

۵-۲. گنج اندازه گیری تغییر ضخامت نمونه با دقت ۰/۰۲۵ میلی‌متر

۳. وسیله‌ی آماده‌سازی نمونه

استوانه‌ای است. باله‌ی تیز که می‌توان به وسیله‌ی آن نمونه‌ی اولیه را که قطر آن بیش‌تر از قطر داخلی حلقه

است به راحتی و با کم‌ترین دست‌خوردگی بریده، به اندازه‌ی قطر داخلی در آورد و سپس به داخل آن منتقل نمود.

سطح داخلی این استوانه باید کاملاً صیقلی شده، با ماده‌ای با حداقل ضریب اصطکاک پوشانده شود.

۴. جک برای بیرون آوردن نمونه‌ی قالب

۵. سایر وسایل

شامل ترازو با حساسیت ۰/۸ گرم، گرم‌خانه با کنترل درجه‌ی حرارت، اره‌ی سیمی، کارد و کاردک، قوطی‌های

تعیین رطوبت و کرنومتر.

وقتی در طی آزمایش تحکیم، بار به نمونه‌ی خاک وارد می‌شود، اصطکاک ایجاد شده بین محیط داخلی

حلقه‌ی برنجی و محیط جلبی نمونه برای دو نوع تحکیم سنج با حلقه‌ی ثابت و شناور تفاوت دارد. در اغلب موارد،

اصطکاک جلبی در حدود ۱۰٪ بار اعمال شده است.

۳-۱. تهیه‌ی نمونه WWW.PARS-GEO-AZMA.COM

آزمایش می‌تواند بر روی نمونه‌های دست‌خورده یا دست‌خورده انجام شود. در نمونه‌های دست‌خورده، برای

آن که دست‌خورده‌گی حداقل باشد، از قالب‌های شلبی (یا قالب‌های دیگر) که جدار نازکی دارند استفاده می‌شود. سپس

در آزمایشگاه به وسیله‌ی جک یا دست‌قالب تحکیم را که وزن گردیده و سطح داخلی آن کمی چرب شده است به

داخل خاک می فرستیم و سر و ته آن را صاف نموده، داخل محفظه‌ی خود قرار می‌دهیم. هم‌چنین می‌توان از وسیله‌ی آماده‌سازی نمونه که در قسمت قبل به آن اشاره شد، برای تهیه‌ی نمونه استفاده کرد. نمونه‌های دست‌تخورده‌ی داخل نمونه‌گیرها یا نمونه‌های موم گرفته شده باید در شرایطی نگهداری شوند که رطوبت آنها مطلقاً کاسته نشود و انقباض پیدا نکنند. مدت نگهداری نمونه باید به حداقل زمان ممکن کاهش یابد به‌خصوص در حالتی که امکان واکنش شیمیایی خاک با جدار لوله‌ی نمونه‌گیری وجود داشته باشد.

هنگام آماده کردن نمونه‌ی تحکیم باید شرایط محیط‌طوری تنظیم شود که کاهش رطوبت نمونه کمتر از ۰.۲٪ باشد. برای این منظور از اتاق‌های رطوبت استفاده می‌گردد. هنگام آزمایش نیز دستگاه تحکیم را باید در محیطی قرار داد که تغییرات درجه‌ی حرارت کمتر از ± 4 درجه‌ی سلتی گراد باشد. هم‌چنین دستگاه نباید زیر تابش مستقیم نور خورشید قرار گیرد.

نکته‌ی دیگر در تهیه‌ی نمونه‌های دست‌تخورده، دقت در جهت نمونه‌گیری و اعمال بار مطابق با شرایط طبیعی زمین می‌باشد. ابتدا نمونه‌های با قطر ۵ اینچ (۱۲.۵cm) و ضخامت $1\frac{3}{4}$ اینچ (۴.۴cm) تهیه کرده، سپس هر سطح آن را برش می‌دهیم. از قطعه خاک‌های برش‌یافته، با دستگاه‌ی گردشی نمونه را به طوری که کمترین تغییری در نمونه اخذ شده ایجاد نشود، در حلقه فرومی‌نماییم. قسمت‌های بالایی و پایینی نمونه را با اهرهای یابی برمی‌داریم تا انصافی در آنها نباشد. برای خاک‌های ریزدانه و نرم جهت بریدن سر و ته نمونه را با اهری سیمی و در خاک‌های سفت از یک تیغه‌ی لب تیز استفاده می‌شود. سنگ متخلخل پایینی را در کف دستگاه تحکیم قرار داده، سپس حلقه‌ی شامل نمونه را روی سنگ متخلخل قرار می‌دهیم. باید دقت شود که در هنگام تراشیدن و آماده کردن نمونه، حداقل دست‌خوردگی و تغییر رطوبت و تغییر وزن مخصوص طبیعی در خاک رخ دهد.

WWW.PARS-GEO-AZMA.COM
در خاک‌های آلی و خاک‌هایی که هنگام تراشیدن به راحتی خرد می‌شوند برای جلوگیری از دست‌خوردگی باید آنها را مستقیماً از لوله‌های نمونه‌گیر صحرایی به داخل رینگ نمونه‌ی تحکیم وارد نمود، در این صورت لازم است که قطر دو نمونه‌ی فوق‌الذکر کاملاً یک اندازه باشند.

برای تهیه‌ی نمونه‌ی دست‌تخورده، مقداری از خاک را آب زده، به رطوبت حد روانی می‌رسانیم. سپس آن را

کاملاً ورز داده، داخل رینگ ریخته، سر و ته آن را صاف می‌کنیم و بقیه‌ی عملیاتش ملند روش قبل صورت می‌گیرد.

در آزمایش تحکیم باید از نمونه‌های دست‌خورده استفاده کرد چرا که نتایج حاصل برای تخمین نشست با

دست‌خورده‌گی نمونه به شدت تغییر می‌کند.

۲-۳. تعیین خواص فیزیکی خاک

قبل از انجام آزمایش، وزن،بعاد نمونه و درصد رطوبت نمونه تعیین می‌گردد. از این داده‌ها مقدار نسبت منافذ

اولیه e_0 سطح مقطع نمونه A و ارتفاع اولیه H_i آن محاسبه می‌گردد.

آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود اتربرگ، قبل و بعد از آزمایش تحکیم جهت شناسایی خاک و رفتار آن انجام

می‌گیرد. G_s خاک نیز محاسبه می‌گردد.

۴. روش انجام آزمایش

۱. دستگاه تحکیم باید طوری سوار شود که نمونه خواص خود را در حین تحکیم از دست ندهد. صفحات

متخلخل و صافی‌ها برای خاک‌های منبسط‌شونده و سایر خاک‌ها باید خشک باشند برای خاک‌های اشباع از صفحه‌ی مرطوب استفاده می‌شود.

نمونه را درون حلقه قرار می‌دهیم و صفحات متخلخل و صافی‌ها و نمونه را در دستگاه سوار می‌نماییم. باید دقت

کرد که بین حلقه و بلنده‌ی دستگاه تحکیم، آبنندی کامل با واشر لاستیکی انجام گردد تا در طول آزمایش بتوان نمونه

را اشباع نگه داشت. صفحه‌ی سر بار را بر روی سنگ متخلخل بالایی قرار داده، مخزن اطراف نمونه را از آب پر

می‌کنیم. حال دستگاه آماده‌ی بارگذاری است.

۲. دستگاه تحکیم را در دستگاه بارگذاری قرار داده، باری به میزان 5 kPa بر آن وارد می‌نماییم. به محض وارد

شدن این بار، تغییر مکان را خوانده، مقدار قرائت اولیه d_0 را ثبت می‌نماییم. در صورت نیاز برای جلوگیری از تورم

نمونه باید بار بیش‌تری اعمال نمود و اگر پیش‌بینی گردد که بار 5 kPa تحکیم بیش از اندازه را به همراه خواهد داشت

(برای خاک‌های خیلی نرم)، باید بار را تا ۲ تا ۳ کیلوپاسکال یا کم‌تر کاهش داد.

۳. اگر نمونه‌ی دست‌نخورده اشباع باشد یا عمق برداشت نمونه زیر تراز آب زیر زمینی باشد، بعد از اعمال بار نشیمن (همان ۵kpa) به آرامی نمونه را غرقاب نموده، با افزایش فشار وارد بر نمونه جلوی تورم رami گیریم. بار لازم برای جلوگیری از تورم و هم‌چنین تغییر مکان ایجاد شده را ثبت می‌کنیم.

۴. افزایش فشار باید مطابق قسمت (۵) باشد. اگر شیب و شکل منحنی تراکم با تعیین فشار پیش‌تحکیمی لازم باشد فشار نهایی باید تا ۴ برابر بیش‌تر از فشار پیش‌تحکیمی باشد. برای تعیین پارامترهای بارگذاری مجدد در خاک‌های رسی لازم است یک بار بر داری و بارگذاری مجدد در طول آزمایش انجام داد. بهتر است بار بر داری تا دو دوری کاهش بارگذاری انجام گردد.

۴-۱. همان‌طوری که گفته شد، لازم است $\frac{\Delta p}{p}$ برابر واحد باشد (۱۲kpa، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ...).

۴-۲. در مورد بار بر داری نیز باید مورد قبل در جهت معکوس رعایت شود. برای نمونه‌های خیلی نرم یا وقتی هدف به دست آوردن فشار پیش‌تحکیمی با دقت بیش‌تر است می‌توان افزایش بارگذاری‌ها را کم‌تر کرد.

۵. قبل از اعمال هر بار اضافی، ارتفاع اولیه‌ی نمونه‌ی d_f را ثبت می‌کنیم. دوروش برای انجام آزمایش وجود دارد که زمان خوندن و حداقل مدت زمان بارگذاری را مشخص می‌کند. آزمایش با بارگذاری طولانی مدت بیش‌تر برای تعیین شیب خط تحکیم ثلثویه در نمودار تغییر مکان - زمان به کار می‌رود. برای هر افزایش بار، قرائت تغییر مکان در انتهاهای افزایش فشار خوندده می‌شود. لازم نیست در طول آزمایش، مدت بارگذاری‌های بعدی را افزایش داد.

افزایش بارگذاری باید هر ۲۴ ساعت باشد. برای حداقل دو دوره بارگذاری (به اضافه‌ی حداقل یک دوره بارگذاری بعد از فشار پیش‌تحکیمی) تغییر ضخامت نمونه‌ی d را در زمان‌های ۰.۸، ۰.۲۵، ۰.۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵ و ۳۰

دقیقه و ۱، ۲، ۴، ۸ و ۲۴ ساعت بعد از شروع هر بارگذاری ثبت نموده، در صورت عدم اطمینان از پایان یافتن تحکیم اولیه، اجازه داده می‌شود که زمان بارگذاری از ۲۴ ساعت هم بگذرد. به هر حال، زمان بارگذاری باید ضریبی از ۲۴

ساعت باشد و پیش‌بینی این که آزمایش در بیش‌تر از ۲۴ ساعت انجام گردد به تجربه‌ی شخص آزمایش‌کننده و نوع خاک بستگی دارد.

۶. پس از خاتمه‌ی آزمایش قبل از بیرون آوردن نمونه برای این که تورم ناشی از برابری به حد اقل کاهش

یابد، بهتر است نمونه را تحت فشار کم (۵kpa) قرار داده، به محض برداشتن فشار، نمونه خارج شود. نمونه را از حلقه

خارج کرده، به دقت وزن می‌کنیم و سپس داخل گرمخانه قرار می‌دهیم و بعد از ۲۴ ساعت در صد رطوبت آن را

محاسبه می‌نماییم.



WWW.PARS-GEO-AZMA.COM