

بررسی عملکرد پی‌های سطحی واقع بر ماسه روانگرا با استفاده از مدلسازی فیزیکی

یاسر جعفریان

استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
Yjafarianm@iiees.ac.ir

بهروز مهرزاد سلاکجانی

دانشجوی دکتری، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
Beh_mehrzsads@yahoo.com

عبدالحسین حداد

استادیار، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
A.h.haddad@gmail.com

کلید واژه‌ها: پی سطحی، روانگرایی، نشست، فشار آب، مدلسازی فیزیکی

چکیده

روانگرایی در طی زلزله‌های مختلف باعث خسارت‌های فراوان مالی و جانی شده است. بالا رفتن فشار آب و کاهش تنش موثر ناشی از امواج زلزله باعث کاهش سختی و ظرفیت باربری پی‌ها می‌شود. خسارات پی‌های سطحی ناشی از روانگرایی می‌تواند بعثت کمبود ظرفیت باربری و یا نشست‌های تجمعی ناشی از افزایش فشار اضافی جزئی یا کامل آب حفره ای بوجود آید. مطالعات اخیر نشان‌دهنده اهمیت کرنش‌های برشی ناشی از وجود سربار سازه در کنار کرنش‌های حجمی است، با این وجود نشست‌های ناشی از روانگرایی با استفاده از کرنش‌های حجمی ناشی از بازتحکیم ماسه روانگرا تخمین زده می‌شود. در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی، اثر تولید فشار ثابت آب بر ظرفیت باربری و نشست‌های پی‌های سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. فشار ثابت آب که نماینده حداکثر فشار آب تولید شده در حین و پس از روانگرایی می‌باشد با استفاده از تراوش استاتیکی تولید شده است. نتایج نشان می‌دهد که با وجود کاهش محسوس ظرفیت باربری در اثر تولید فشار اضافی ثابت آب، در حالت روانگرایی کامل هنوز ظرفیت باربری قابل توجهی وجود دارد که می‌تواند در مسائل مهندسی مورد توجه قرار گیرد. فشار اضافی آب زیر پی همواره مقداری کمتر از فشار اطراف پی بوده و در هیچ یک از آزمایش‌ها، روانگرایی کامل دقیقاً در زیر پی مشاهده نشده است. همچنین اثر ضریب اطمینان طراحی بر نشست‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

مقدمه

روانگرایی یکی از عوامل خسارت به سازه‌ها در هنگام زلزله است. استفاده ی گسترده از پی‌های سطحی واقع بر ماسه‌های با قابلیت روانگرایی در مناطق ساحلی شمال و جنوب ایران، اهمیت بررسی این موضوع را روشن می‌کند. مطالعات فراوانی برای ارزیابی رفتار پی‌های سطحی واقع بر ماسه‌های روانگرا صورت گرفته است. خرابی‌های ناشی از روانگرایی به کاهش سختی و مقاومت برشی خاک‌ها در اثر افزایش اضافه فشار منفذی و نشست‌های تجمعی ناشی از آن در حین و پس از زلزله نسبت داده می‌شود.

در زلزله ۱۹۶۴ نیگاتا در ژاپن حدود سیصد و چهل سازه بتن مسلح با پی سطحی واقع بر لایه ضخیم خاک روانگرا نشست و کج شدگی مفرط را تجربه کردند (Kawakami and Asada, 1964; Ohsaki, 1966; Seed and Idriss, 1967). نشست‌ها با نسبت ارتفاع به عرض سازه متناسب بوده و شمعی‌های کوتاه اثر ضعیفی بر مقدار نشست‌های سازه و ظرفیت باربری پی‌ها داشته اند (Yoshimi and Tokimatsu, 1977). در زلزله ۱۹۹۰ لوزان فلیپین تعداد زیادی از سازه‌های واقع بر لایه ضخیم روانگرا دچار نشست و کج شدگی شدند (Adachi et al., 1992; Ishihara et al., 1990; Tokimatsu, 1994). در زلزله ۱۹۹۹ از میت ترکیه خرابی سازه‌های واقع بر لایه کم عمق روانگرا در اثر کمبود ظرفیت باربری گزارش شده است (Acacio et al., 2001; Yoshida et al., 2001; Bray et al., 2004). علاوه بر مشاهدات صحرائی، مطالعات فراوانی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و آزمایشگاهی توسط میز لرزه ی 1g و سانتیفریوژ برای درک بهتر پدیده روانگرایی انجام شده است. یوشیمی و تاکیماتسو (Yoshimi and



(Tokimatsu, 1977) با استفاده از آزمایشات میز لرزه 1g، روانگرایی در زیر پی سطحی و اثر محصورکنندگی سیر در کنار آن برای کاهش مخاطرات روانگرایی را مورد بررسی قرار داده و اثر مثبت حضور سپرها در کاهش نشست‌ها و اضافه فشار آب را گزارش کردند. تعدادی از محققین با استفاده از آزمایشهای سانتریفیوژ اثر عمق و سطح تراکم را بر کاهش خطرات روانگرایی مورد بررسی قرار دادند (Liu and Dobry, 1977; Coelho et al., 2004; Ueng et al., 2010; Dashti et al., 2010). آدالیر و همکاران (Adalier et al., 2003) اثر مثبت افزایش سختی خاک با استفاده از ستون سنگی را بر کاهش نشست‌های ناشی از روانگرایی مورد مطالعه قرار دادند.

بالا رفتن فشار آب ناشی از تحریکات زلزله موجب کاهش سختی و ظرفیت باربری پی‌های سطحی می‌گردد، در صورتیکه مقاومت باربری ماسه‌ها در شرایط وجود فشار آب بیش از تنش برشی ناشی از سازه باشد، خرابی در اثر کمبود ظرفیت باربری اتفاق نخواهد افتاد، اما به هر حال امکان وقوع نشست‌های مفرط و خارج شدن از سرویس‌دهی وجود دارد. مطالعات سانتریفیوژ دشتی و همکاران (Dashti et al., 2010) بر روی عملکرد پی‌های سطحی واقع بر ماسه‌های روانگرا نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده کرنش‌های برشی ناشی از بار سازه فوقانی و اندرکنش سازه و خاک در نشست‌های کلی است. با این حال مهندسین ژئوتکنیک نشست‌های ناشی از روانگرایی را با اندازه‌گیری کرنش‌های حجمی ناشی از بازتحکیم ماسه روانگرا که با استفاده از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری و برش ساده سیکی بدست آمده، تخمین می‌زنند (Silver and Seed, 1971; Tokimatsu and Seed, 1987; Ishihara and Yoshimine, 1992) و نشست‌های برشی را در تخمین نشست‌های سازه در نظر نمی‌گیرند.

در مطالعه حاضر اثر تولید اضافه فشار آب بر ظرفیت باربری و نشست‌های برشی پی‌های سطحی واقع بر ماسه با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته است. پی‌های سطحی شامل پی مربعی و پی نواری هستند. اضافه فشار ثابت آب توسط تراوش استاتیکی ایجاد شده و نماینده حداکثر فشار آب تولید شده در حین و پس از زلزله است. با توجه به اینکه زوال آب حفره‌ای دلیل اصلی کرنش‌های حجمی در حالت روانگرایی است، این نشست‌ها در آزمایش‌های این تحقیق بطور کامل حذف شده و نشست‌ها فقط مربوط به تنش اعمالی توسط پی خواهند بود. همچنین اثر تنش اعمالی پی و ضریب اطمینان طراحی پی بر نشست‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه توضیحات لازم در خصوص مدلسازی فیزیکی ارائه می‌شوند و سپس نتایج آزمایش‌ها برای دو پی نواری و مربعی واقع بر خاک روانگرا شده و خاک با فشارهای آب حفره‌ای ثابت نگه داشته شده در ترازهای مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در انتها، نتیجه‌گیری‌های بدست آمده از نتایج آزمایش‌ها بیان خواهد شد.

مطالعه‌ی آزمایشگاهی

تمرکز این پژوهش بر ارزیابی تغییرات ظرفیت باربری و نشست‌های بعد از روانگرایی پی‌های سطحی و بالا رفتن فشار آب است، برای این منظور عملکرد پی‌های سطحی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و تحت شرایط کنترل‌شده مورد بررسی قرار گرفته و چارت‌های طراحی ارائه گردیده است. در این آزمایش‌ها از تراوش استاتیکی رو به بالا و ایجاد فشار ثابت آب در شرایط کنترل‌شده برای مدل‌سازی رفتار پی در حین و پس از روانگرایی استفاده شده است؛ فشار آب ثابت ایجاد شده نماینده حداکثر اضافه فشار منفذی خاک در حین و بعد از امواج زلزله است. علاوه بر این، در شرایط زلزله خاک لزوماً به حالت روانگرایی کامل نمی‌رسد و ممکن است درصدهایی از روانگرایی کامل را تجربه نماید، به همین منظور آزمایش‌ها در فشارهای آب اضافی ثابت نگه داشته شده و در نرازهای مختلف انجام شده است. در ادامه جزئیات مربوط به مطالعه آزمایشگاهی ارائه خواهد شد.

برای مدل‌سازی رفتار باربری پی‌های سطحی در فشارهای آب اضافی ثابت از محفظه‌ای به ابعاد $120 \times 90 \times 70$ سانتیمتر استفاده شد. برای ارزیابی دقیق تغییرات عمودی و جانبی ماسه زیر پی، از ماسه رنگی برای شبکه‌بندی‌های 5×5 سانتیمتری استفاده شده است. فشارهای اضافی ثابت آب با استفاده از تراوش استاتیکی رو به بالا و بوسیله تغییر ارتفاع محفظه آب بوجود آمده‌اند، همچنین در جدار محفظه و در ارتفاع سطح خاک سرریزهایی تعبیه شده تا از بالا آمدن سطح آب در درون محفظه در حین آزمایش جلوگیری شود. این روش پیش از این توسط محققین دیگر نیز برای ارزیابی رفتار بعد از تولید فشار آب مورد استفاده قرار گرفته است، برای مثال کالوتی و همکاران (Calvetti et al., 2004) تغییر مکان‌های لوله‌های مدفون ناشی از ایجاد فشار آب و روانگرایی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ظرفیت باربری پی‌ها در نسبت‌های اضافی فشار آب حفره‌ای صفر، 0.3 ، 0.7 و 1 مورد بررسی قرار گرفته است. این نسبت به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} \quad (1)$$

که در رابطه فوق، r_u نسبت اضافه فشار آب، u اضافه فشار حفره‌ای و σ'_{v0} سربار موثر اولیه است. ماسه بابلسر با مشخصات جدول (۱) که به صورت توده‌ای از اعماق سطحی سواحل بابلسر تهیه شد بعنوان مصالح مورد استفاده برای محیط خاکی انتخاب گردید. با توجه به رفتار اتساعی ماسه‌ها در فشار سربار پایین، در جعبه‌های 1g برای رسیدن به رفتار ماسه‌های سست در حین روانگرایی لازم است که ماسه با حداقل دانسیته نسبی ممکن ساخته شود؛ برای رسیدن به این منظور، در این تحقیق روش نمونه‌سازی غرقایی مورد

استفاده قرار گرفت. در این روش بعد از پر شدن محفظه آزمایش از آب، ماسه خشک از ارتفاع ۱۰ سانتیمتری از سطح آب به درون آن ریخته شد تا دانه‌های ماسه تحت وزن خود ته‌نشین شده و بدین ترتیب ماسه با دانسیته نسبی ۳۰ درصد بدست آمد. این روش نمونه سازی با رسوبگذاری نهشته های جوان در طبیعت مطابقت دارد و غرقاب شدن یکنواختی مناسبی در مدل ایجاد می نماید.

جدول ۱. مشخصات ماسه بابلسر

مشخصه فیزیکی	مقدار
min (kN/m ³)	۱۵/۱۳
max (kN/m ³)	۱۷/۳۵
G _s	۲/۷۲
D ₅₀ (mm)	۰/۲۲
D _r (%)	۳۰
C _u	۱/۶۴
C _c	۰/۹

پی‌های مربعی با ابعاد ۱۵×۱۵ سانتیمتر و پی‌های نواری با ابعاد ۹۰×۱۵ سانتیمتر ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به اهداف تحقیق، آزمایش‌ها در دو گروه طراحی شدند. هدف از آزمایش‌های گروه اول ارزیابی ظرفیت باربری پی‌ها در نسبت‌های مختلف فشار آب حفره‌ای بوده است. در این گروه بعد از ساخت نمونه‌های ماسه‌ای و جایگذاری پی، فشار اضافی ثابت آب مورد نظر تولید شده و پی‌ها تا رسیدن به ظرفیت باربری کامل تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. این گروه از آزمایش‌ها شامل ۸ آزمایش در α_{II} های ۰، ۰/۳، ۰/۷ و ۱ بر روی پی‌های مربعی و نواری است. آزمایش‌های گروه دوم برای ارزیابی این نشست پی‌های سطحی با ضریب اطمینان‌های مختلف در برابر ظرفیت باربری طراحی شده‌اند. این گروه از آزمایش‌ها شامل ۱۲ آزمایش بوده که در آن پی‌های نواری و مربعی ابتدا تا ضریب اطمینان‌های ۲ و ۳ در برابر ظرفیت باربری بارگذاری شده و سپس فشار اضافی آب تحت شرایط بار ثابت ایجاد شده و به پی اجازه داده می‌شود تا نشست کرده و به تعادل جدید برسد. پس از آماده شدن محیط ماسه‌ای، پی‌های مربعی و نواری بر روی ماسه مستقر شده و تحت بارگذاری قرار گرفتند. بار و تغییرمکان به ترتیب توسط نیرو سنج و تغییرمکان سنج (LVDT) اندازه‌گیری شده و ثبت شده‌اند. کلیه حسگرها قبل از شروع آزمایش‌ها کالیبره شده‌اند. شکل (۱) نمونه‌ای از بارگذاری پی نواری به همراه ابزار اندازه‌گیری را نشان می‌دهد، برای کنترل کج شدگی پی از سه LVDT در وسط و گوشه‌های پی استفاده شده است.



ب



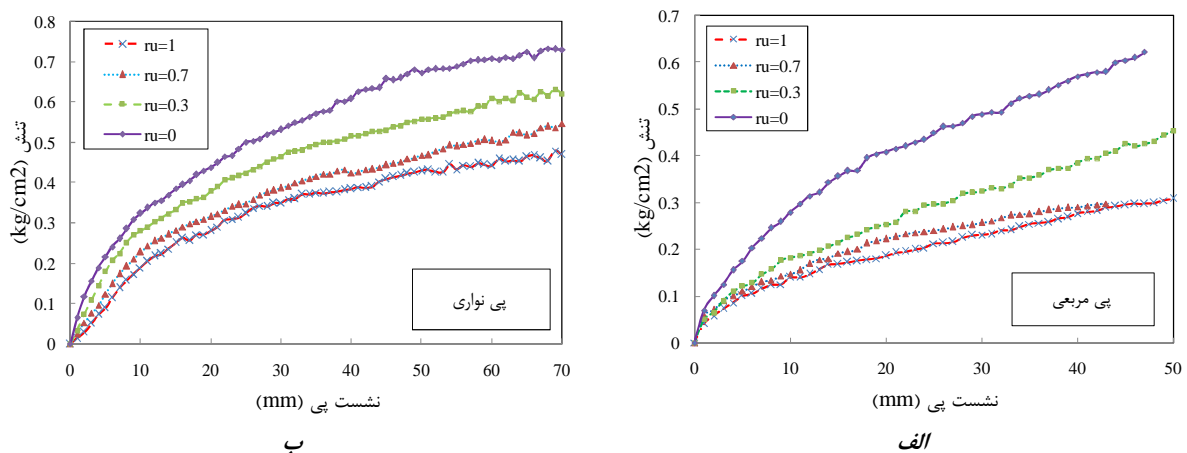
الف

شکل ۱. الف: قاب بارگذاری و محفظه آزمایش، ب: پی نواری تحت بارگذاری



در صورت اعمال امواج زلزله به ماسه‌های سست اشباع، لزوماً روانگرایی کامل رخ نمی‌دهد، اما امکان تولید اضافه فشار آب حفره‌ای جزئی وجود خواهد داشت. افزایش فشار آب حفره‌ای باعث کاهش سختی و ظرفیت باربری و ایجاد نشست‌های محسوس خواهد شد. بنابراین مطالعه رفتار محیط‌های ماسه‌ای در صورت وجود فشار اضافی جزئی آب نیز حائز اهمیت است. برای بررسی عملکرد پی‌های سطحی در شرایط مذکور، آزمایشات گسترده‌ای در نسبت‌های فشار آب حفره‌ای صفر، $0/3$ ، $0/7$ و 1 بر روی پی‌های مربعی و نواری انجام شد که در ادامه نتایج آن ارائه می‌گردد.

شکل (۲-الف) و (۲-ب) برترتیب نمودارهای تنش-نشست پی‌های مربعی و نواری در r_{ii} های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، نمودارهای بار-نشست، رفتار این خاک می‌تواند رفتار ماسه با دانسیته نسبی متوسط است. با افزایش نسبت اضافه فشار حفره‌ای ظرفیت باربری کاهش پیدا کرده است. رفتار باربری پی‌های مربعی و نواری در r_{ii} های بالا به یکدیگر نزدیک شده است، تا جاییکه باربری این پی‌های در نسبت‌های فشار حفره‌ای $0/7$ و 1 تقریباً یکسان است. بنابراین نشست‌های پی‌های سطحی در مواردی که ضریب اطمینان در برابر روانگرایی بالاتر از یک است می‌تواند دارای اهمیت بالایی بوده و مورد توجه مهندسی قرار گیرد. همین‌طور که ملاحظه می‌شود، با وجود کاهش محسوس در ظرفیت باربری بعثت افزایش نسبت اضافه فشار آب، هنوز ماسه از مقاومت قابل توجهی برخوردار است که به مقاومت پس از روانگرایی مربوط می‌شود.



شکل ۲. نمودار تنش-نشست: الف: پی مربعی و ب: پی نواری در فشارهای اضافی آب مختلف

آزمایش‌های گروه دوم برای شبیه‌سازی شرایط واقعی و ارزیابی نشست‌های ناشی از تولید فشار آب در ضریب اطمینان‌های مختلف انجام شده است. با توجه به استقلال رفتار ماسه از مسیر تنشی که از پیش تجربه کرده این آزمایش‌ها ابزاری مناسب برای ارزیابی نشست‌های برشی پس از تحریکات زلزله خواهد بود. در شرایط واقعی، مهندسی بار مجاز پی را مطابق رابطه (۲) با اعمال ضرایب اطمینان بر ظرفیت باربری نهایی طراحی می‌کنند:

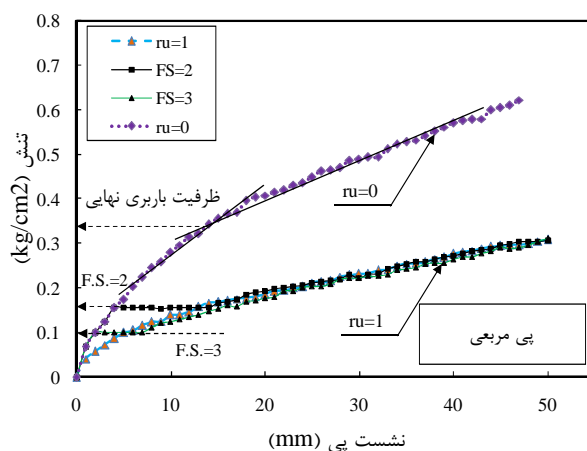
$$B.C._{all} = \frac{B.C._{ult}}{FS} \quad (2)$$

که در رابطه فوق $B.C._{all}$ ظرفیت باربری مجاز، $B.C._{ult}$ ظرفیت باربری نهایی و FS ضریب اطمینان است. مقدار ظرفیت باربری نهایی در فشارهای آب مختلف در آزمایش‌های گروه اول بدست آمده است. شکل (۳) نمونه‌ای از نتایج مربوط به آزمایش‌های بار ثابت برای ضریب اطمینان-های 2 و 3 و $r_{ii}=1$ را برای پی مربعی نشان می‌دهد. مطابق شکل، بارگذاری تا ضریب اطمینان‌های مورد نظر انجام شده (مرحله اول) و سپس با بالا بردن فشار آب نشست‌های پی آغاز شده و تا رسیدن به تعادل جدید ادامه پیدا کرده‌اند (مرحله دوم)، این نشست‌ها نماینده نشست‌های پس از تولید فشار آب و روانگرایی پی‌ها در ضریب اطمینان مورد نظر هستند.

با توجه به شکل (۳)، مقدار نشست‌های پی برای $r_{ii}=1$ با افزایش ضریب اطمینان از 2 به 3 حدوداً سه برابر شده است. بارگذاری مجدد بر روی مسیر باربری آزمایش‌های گروه اول و تا رسیدن به ظرفیت باربری نهایی در حالت روانگرایی کامل ادامه پیدا کرده است (مرحله سوم). همان‌طور که مشاهده می‌شود، رفتار باربری پی‌ها در مراحل اول و سوم تقریباً مطابق بر باربری پی‌ها در آزمایشات گروه اول و نشست‌ها تقریباً برابر با تفاوت نمودارهای مربوط به ظرفیت باربری بوده است. نتایج مربوط به آزمایش‌های در r_{ii} های دیگر و برای پی‌های نواری نیز به همین صورت بوده است.

تغییرات ظرفیت باربری

جدول (۲) نتایج ظرفیت باربری بر اساس معیار مقاومت و نسبت فشار آب اضافی حفره‌ای را برای پی‌های مربعی و نواری نشان می‌دهد. با افزایش نسبت فشار آب حفره‌ای تنش موثر بین ماسه‌ها کاهش یافته و متعاقباً سختی و زاویه اصطکاک کاهش خواهد یافت و در نتیجه از باربری پی‌ها کاسته می‌شود. نکته قابل توجه این است که، اگرچه ظرفیت باربری با افزایش نسبت فشار آب حفره‌ای تا روانگرایی کامل کاهش یافته است، اما همچنان دارای مقدار قابل توجهی است. نتایج حاصل از ثبت فشار آب نشان‌دهنده کاهش فشار آب زیر پی نسبت به اطراف آن با افزایش مقدار بار وارد بر آن است، محققین این کاهش را به وجود اتساع و باز توزیع فشار آب و تنش‌ها در زیر پی نسبت می‌دهند (Yoshimi and Tokimatsu, 1977; Liu and Dobry, 1977; Dashti et al., 2010). با توجه به نسبت فشار آب حفره‌ای کمتر در زیر پی نسبت به مناطق دور از آن جهت جریان در زیر و اطراف پی متفاوت خواهد بود، بگونه‌ای که آب از اطراف پی به سمت زیر آن جریان پیدا می‌کند. به هر حال با توجه به مشاهدات در زیر پی به هیچ وجه روانگرایی کامل ($r_u=1$) اتفاق نخواهد افتاد، مقدار قابل ملاحظه‌ی ظرفیت باربری در نسبت‌های فشار آب حفره‌ای بالا را می‌توان به این مکانیسم نسبت داد. مقدار کاهش ظرفیت باربری در پی‌های مربعی و نواری بترتیب ۶۰ درصد و ۵۰ درصد بوده است. کاهش بیشتر ظرفیت باربری در پی‌های مربعی نسبت به پی‌های نواری را می‌توان به اثر بعد سوم نسبت داد.



شکل ۳. نمودار تنش-نشست پی مربعی برای ضریب اطمینان‌های ۲ و ۳ در روانگرایی کامل در آزمایش‌های گروه دوم

جدول ۲. ظرفیت باربری پی‌ها در ابعاد مدل با استفاده از معیار مقاومت

r_u	پی مربعی (kg/cm^2)	پی نواری (kg/cm^2)
۰	۰.۳۲	۰.۶۳
۰.۳	۰.۱۹۲	۰.۴۷
۰.۷	۰.۱۸۵	۰.۳۹
۱	۰.۱۶	۰.۳۴

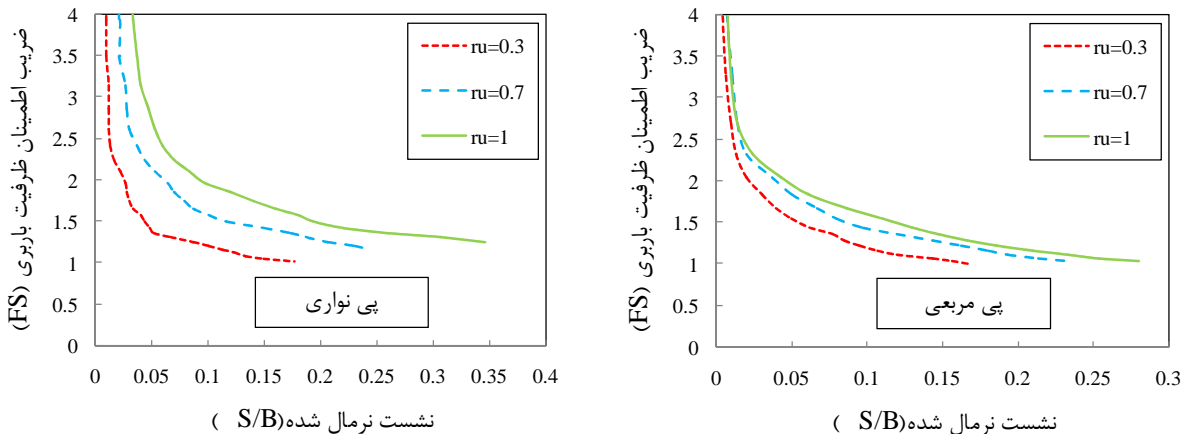
نشست‌های ناشی از تولید فشار آب

تحریک‌های زلزله موجب بالا رفتن فشار آب در ماسه‌های اشباع و کاهش سختی و ظرفیت باربری پی‌ها می‌گردد، اگرچه سازه ممکن است دچار خرابی‌های ناشی از کمبود باربری نگردد اما امکان مقداری نشست وجود خواهد داشت. علاوه بر این پس از پایان تحریکات و قبل از شروع روند بازتحکیم خاک پی‌ها مقداری نشست بعلت سربار ناشی از سازه خواهند داشت. در کاربردهای مهندسی، نشست‌های ناشی از بالا رفتن فشار آب با استفاده از روابط موجود برای کرنش حجمی ناشی از بازتحکیم حاصل از زوال فشار آب تخمین زده می‌شود، حال آنکه مطالعات اخیر نشان‌دهنده اهمیت نقش تغییرشکل‌های برشی در نشست‌های کلی سازه‌هاست؛ یعنی در صورت وجود سازه و تنش برشی، کرنش‌های برشی سهم بیشتری در نشست‌های کلی سازه دارند (Dashti et al., 2010). بنابراین برای کنترل نشست‌ها، تعیین ضریب اطمینان مناسب در طراحی سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود.



در آزمایش‌های گروه دوم، نشست‌های برشی با تولید فشار آب شروع شده و با رسیدن به تعادل جدید متوقف می‌شوند. شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) رابطه بین تغییر شکل‌های نرمال شده (نشست‌ها به عرض پی نرمال شده‌اند) و ضریب اطمینان طراحی را بترتیب برای پی‌های مربعی و نواری نشان می‌دهد. مقدار نشست‌ها با افزایش r_{II} افزایش پیدا کرده است، تغییر شکل‌ها برای ضرایب اطمینان بیش از ۲ محسوس نیست. در ضریب اطمینان یکسان، پی‌های نواری نشست بیشتری نسبت به پی‌های مربعی را تجربه کرده‌اند. با توجه به امکان تخمین r_{II} با توجه به شتاب ورودی زلزله و مقاومت روانگرایی خاک موجود با استفاده از مطالب موجود در ادبیات فنی (Marcuson and Hynes, 1990) و استقلال رفتار ماسه از مسیر تنش پیشین، چنین نمودارهایی می‌تواند در طراحی‌های مهندسی مورد توجه قرار گیرند. در این صورت با استفاده از ضریب اطمینان و مقدار r_{II} امکان تخمین اولیه نشست‌ها وجود خواهد داشت.

نتایج این تحقیق برای یک دانسیته مشخص و شرایط آزمایش‌ها معتبر بوده و در صورت استفاده‌ی گسترده نیاز به آزمایش‌های بیشتر وجود دارد. اما به هر حال در صورت وجود چنین نمودارهایی امکان تخمین نشست‌ها برای طراحی اولیه وجود خواهد داشت. به این صورت علاوه بر دست بودن نمودارهایی که می‌تواند در طراحی‌ها مورد استفاده قرار گیرد، می‌تواند موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه گردد.



شکل ۴. نمودار ضریب اطمینان در مقابل نشست نرمال شده به عرض پی برای الف: پی مربعی و ب: پی نواری

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی عملکرد پی‌های سطحی در حضور فشار ثابت آب اضافی پرداخته شد. برای این منظور با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی واقع بر ماسه روانگرا مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور دو گروه آزمایش 1g در فشار آب‌های مختلف و بر روی پی‌های مربعی و نواری انجام شد. خلاصه نتایج بدست آمده به شرح زیر است.

افزایش فشار آب با کاهش سختی و زاویه اصطکاک خاک باعث کاهش محسوس ظرفیت باربری شده اما حتی در حالت روانگرایی کامل، پی از باربری محسوس برخوردار است، در حالی که در روابط ظرفیت باربری معمولاً برای حالت روانگرایی کامل ظرفیت باربری در نظر گرفته نمی‌شود. ظرفیت باربری پی‌های مربعی تاثیر بیشتری از تولید فشار آب پذیرفته است که آن را می‌توان به حالت سه‌بعدی تنش در زیر پی مربعی مرتبط دانست.

ظرفیت باربری پی مربعی با اعمال نسبت فشار آب $0.3/40$ درصد کاهش پیدا کرده و برای نسبت‌های فشار بالاتر به کندی کاهش پیدا می‌کند تا جاییکه ظرفیت باربری در r_{II} ‌های بالا تقریباً یکسان است. با توجه به مشاهدات فوق اهمیت بررسی پی‌ها در حالاتی که در آن‌ها روانگرایی کامل رخ نمی‌دهد مشخص است. همچنین ظرفیت باربری پی مربعی در حالت روانگرایی کامل نسبت به حالت عدم وجود فشار اضافی آب منفذی ۶۰ درصد کاهش پیدا کرده است. ظرفیت باربری پی‌های نواری با شیب ملایم‌تری کاهش پیدا کرده است. ظرفیت باربری پی نواری در حالت روانگرایی کامل نسبت به حالت عدم وجود فشار اضافی آب منفذی ۵۰ درصد کاهش پیدا کرده است.

فشار آب زیر پی بصورت قابل ملاحظه‌ای با فشار آب نقاط دور از آن کمتر بوده و به هیچ‌وجه روانگرایی کامل در آن اتفاق نمی‌افتد که علت این امر رفتار اتساعی خاک در نقاط زیر پی و باز توزیع تنش‌ها و فشارهای آب تولید شده است.

تعیین ضریب اطمینان مناسب برای مقاصد طراحی همواره از مسائل چالش‌برانگیز مهندسیین بوده است. نتایج نشان‌دهنده مقدار ناچیز تغییر شکل‌ها در ضریب اطمینان‌های بالای ۲ است. نشست‌های نسبی (S/B) مربوط به پی‌های مربعی و نواری در ضریب اطمینان ۲ در روانگرایی کامل بترتیب $0.1/0.4$ و $0.1/1$ بوده است. با افزایش ضریب اطمینان مقدار نشست‌ها بسرعت افزایش پیدا کرده است. اثر افزایش r_{II} بر نشست پی‌های

نواری بیشتر بوده است، در حالی که در پی‌های مربعی تاثیر محسوسی نداشته است. البته نکته قابل ذکر این که تغییرشکل‌های مذکور فقط تغییرشکل‌های برشی بعد از روانگرایی را شامل می‌شوند و نشست‌های نهایی از مجموع نشست‌های برشی و حجمی در حین و بعد از روانگرایی بدست خواهد آمد.

مراجع

- Acacio AA, Kobayashi Y, Towhata I, Bautista RT and Ishihara K (2001) Subsidence of building foundation resting upon liquefied subsoil case studies and assessment, *J. of Soils and Found.*, 41(6): 111-128
- Adachi T, Iwai S, Yasui M, and Sato Y (1992) Settlement and inclination of reinforced concrete buildings in Dagupan City due to liquefaction during the 1990 Philippine earthquake, *Proc. 10th World Conf. on Earthquake Engineering, International Association for Earthquake Engineering (IAEE)*, Madrid, Spain, 147-152
- Adalier K, Elgamal A, Meneses J and Baez JI (2003) Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(7): 571-584
- Adalier K and Elgamal A (2004) Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 72(3): 275-291
- Bray JD (2004) Subsurface characterization at ground failure sites in Adapazari, Turkey, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130(7): 673-685
- Calvetti F, Prisco C and Nova R (2004) Experimental and Numerical Analysis of Soil-Pipe Interaction, *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, 130(12): 1292-1299
- Coelho P, Haigh SK, Madabhushi SP and O'Brien T (2004) Centrifuge modeling of the use of densification as a liquefaction resistance measure for bridge foundations, *13th World Conference on Earthquake Engineering*
- Dashti S, Bray JD, Pestana JM, Riemerm M and Wilson D (2010) Mechanisms of Seismically Induced Settlement of Buildings with Shallow Foundations on Liquefiable Soil, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136(1)
- Dashti S, Bray JD, Pestana JM, Riemer MR and Wilson D (2010) Centrifuge testing to evaluate and mitigate liquefaction-induced building settlement mechanisms, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136(7): 918-929
- Dashti S and Bray JD (2013) Numerical simulation of building response on liquefiable sand, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 139(8): 1235-1249
- Ishihara K, Acacio A and Towhata I (1993) Liquefaction-induced ground damage in Dagupan in the July 16, 1990 Luzon earthquake, *J. of Soils and Found.*, 33(1): 133-154
- Ishihara K and Yoshimine M (1992) Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *J. of Soils and Found.*, 32(1): 173-188
- Kawakami F and Asada A (1966) Damage to the ground and earth structures by Niigata earthquake of June 16, 1964, *J. Soils and Found.*, 6(1): 14-30
- Liu L and Dobry R (1997) Seismic response of shallow foundation on liquefiable sand, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 123(6): 557-567
- Marcuson WF and Hynes ME (1990) Stability of slopes and embankments during earthquakes, *Proceedings, ASCEI Pennsylvania Department of Transportation Geotechnical Seminar, Hershey, Pennsylvania*
- Marcuson WF, Hynes ME and Franklin AG (1990) Evaluation and use of residual strength in seismic safety analysis of embankments, *Earthquake Spectra*, 6(3): 529-572
- Ohsaki Y (1966) Niigata earthquakes, 1964 building damage and soil condition, *J. of Soils and Found.*, 6(2): 14-37
- Seed HB and Idriss IM (1967) Analysis of soil liquefaction: Niigata earthquake, *J. Soil Mech. and Found. Division, ASCE*, 93(3): 83-108
- Silver NL and Seed HB (1971) Volume changes in sands during cyclic loading, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97(SM9): 1171-1180
- Tokimatsu K and Seed HB (1987) Evaluation of settlements in sand due to earthquake shaking, *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, 113(8): 861-878



SEE 7

Tokimatsu K, Kojima J, Kuwayama AA and Midorikawa S (1994) Liquefaction-induced damage to buildings I 1990 Luzon Earthquake, *J. Geotech. Engrg.*, 120(2): 290–307

Ueng TS, Wu CW, Cheng HW and Chen CH (2010) Settlement of saturated clean sand deposits in shaking table tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(1): 50-60

Yoshida N, Tokimatsu K, Yasuda S, Kokusho T and Okimura T (2001) Geotechnical aspects of damage in Adapazari city during 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, *J. of Soils and Found.*, 41(4): 25–45

Yoshimi Y and Tokimatsu K (1997) Settlement of buildings on saturated sand during earthquakes, *J. of Soils and Found.*, 17(1): 23–38

