

ارزیابی ظرفیت باربری و نشست پی‌های سطحی واقع بر ماسه با قابلیت روانگرایی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی

یاسر جعفریان^{۱*}، عبدالحسین حداد^۲، بهروز مهرزاد سلاکجانی^۳، مجتبی وارسته^۴

۱- استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۴- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

yjafarianm@iiees.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۱/۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۸/۱۹]

چکیده- روانگرایی یکی از خسارت‌بارترین عوامل خرابی ناشی از زلزله است. بالا رفتن فشار آب منفذی و کاهش تنش موثر ناشی از تحریک موجب کاهش سختی و ظرفیت باربری پی‌ها می‌شود. حتی اگر خرابی‌های ناشی از کمبود ظرفیت باربری اتفاق نیفتد، به هر حال امکان ایجاد نشست وجود دارد که می‌تواند سازه را از حالت سرویس‌دهی خارج نماید. در کاربردهای مهندسی، نشست‌های ناشی از روانگرایی با استفاده از کرنش‌های حجمی ناشی از بازتحکیم ماسه روانگرا تخمین زده می‌شود، حال آنکه مطالعات اخیر نشان‌دهنده اهمیت سهم کرنش‌های برشی ناشی از وجود سازه در کنار کرنش‌های حجمی است. این مطالعه اثر تولید فشار آب بر ظرفیت باربری و نشست‌های برشی پی‌های سطحی را با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی بررسی کرده است. نتایج حاکی از کاهش ظرفیت باربری ناشی از تولید فشار آب بوده اما حتی در حالت روانگرایی کامل 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 هیچ‌یک از آزمایش‌ها، روانگرایی کامل دقیقاً در زیر پی مشاهده نشده است. همچنین اثر ضریب اطمینان طراحی بر نشست‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: پی سطحی، ظرفیت باربری، نشست، روانگرایی، مدل‌سازی فیزیکی.

۱- مقدمه

روانگرایی خاک‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل خرابی سازه‌ها در اثر زلزله است. استفاده گسترده از پی‌های سطحی واقع بر ماسه‌های با قابلیت روانگرایی در مناطق ساحلی کشورمان، 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 مقاومت برشی خاک‌ها در اثر افزایش اضافه فشار منفذی و نشست‌های تجمعی ناشی از تحریک‌ها نسبت داده می‌شود.

اولین داده‌های مستند در کاهش ظرفیت باربری و نشست‌های تجمعی به زلزله ۱۹۶۴ نیگاتا مربوط می‌شود که در آن حدود سیصد

و چهل سازه بتن مسلح واقع بر لایه ضخیم خاک روانگرا نشست و چرخش را تجربه کردند [۶-۱]. مشاهده صحرایی بیانگر تناسب نشست‌ها با نسبت ارتفاع به عرض سازه و اثر ضعیف شمع‌های کوتاه بر مقدار نشست‌ها و ظرفیت باربری بوده است [۴]. همچنین در زلزله ۱۹۹۰ لوزان فیلپین تعداد زیادی از سازه‌های واقع بر لایه ضخیم روانگرا دچار نشست و چرخش شدند [۷-۱۰]. زلزله ۱۹۹۹ از میت ترکیه نیز نمونه‌ای از خرابی‌های سازه‌های واقع بر لایه کم عمق روانگرا در اثر کمبود ظرفیت باربری است [۱۱-۱۳].

علاوه بر مشاهده صحرایی، مطالعات فراوانی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و آزمایشگاهی به وسیله میز لرزه‌ای 1g و سانتریفیوژ برای درک بهتر پدیده روانگرایی انجام شده است. یوشیمی و تاکیاماتسو

بررسی قرار گرفته است. در ابتدا توضیحات لازم در خصوص مدل‌سازی فیزیکی و جزئیات آزمایشگاهی ارائه می‌شوند. سپس نتایج آزمایش‌ها برای دو پی نواری و مربعی واقع بر خاک روانگرا شده و خاک با فشارهای آب حفره‌ای مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در پایان، نتیجه‌گیری‌های به دست آمده از نتایج آزمایش‌ها بیان می‌شوند.

۲- مطالعه‌ی آزمایشگاهی

رفتار پی‌های سطحی واقع بر خاک‌های با قابلیت روانگرایی را می‌توان در دو بخش مورد بررسی قرار داد، بخش اول به رفتار پی حین تحریک زلزله و بالا رفتن فشار آب و بخش دوم به رفتار بعد از تحریک مربوط می‌شود. تمرکز این پژوهش بر ارزیابی تغییرات ظرفیت باربری و نشست‌های بعد از روانگرایی پی‌های سطحی و بالا رفتن فشار آب بوده است، برای این منظور تلاش شده با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و تحت شرایط کنترل‌شده به هدف مورد نظر رسیده و در پایان چارت‌هایی برای نشان دادن اهمیت موضوع ارائه شود. مزیت این آزمایش‌ها استفاده از تراوش رو به بالا و ایجاد فشار ثابت آب در شرایط کنترل‌شده برای مدل‌سازی رفتار پس از روانگرایی پی بوده است؛ یعنی فشار ثابت آب ایجاد شده نماینده پیشینه اضافه فشار منفذی خاک در حین و بعد از تحریک‌ها است. علاوه بر این، بعد از اعمال زلزله خاک لزوماً به حالت روانگرایی کامل نمی‌رسد و ممکن است درصدهایی از روانگرایی کامل را تجربه نماید. در ادامه جزئیات مربوط به مطالعه آزمایشگاهی ارائه خواهد شد.

شکل ۱ شمای کلی محفظه آزمایش (ابعاد مربوط به مدل به سانتیمتر است)

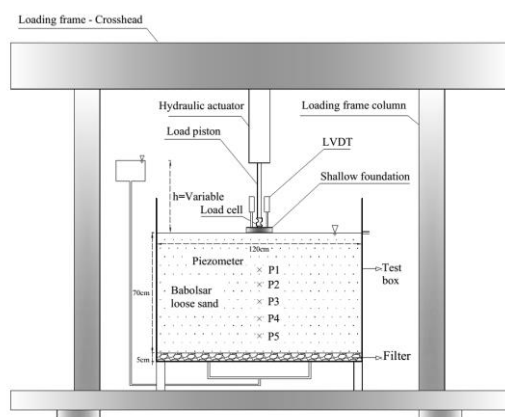


Fig. 1. Schematic view of the experimental setup

[۴] برای اولین بار با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه، روانگرایی در زیر پی سطحی و اثر محصورکنندگی سپر در کنار آن برای کاهش مخاطرات روانگرایی را بررسی کرده و کاهش نشست‌ها و اضافه فشار آب در حضور سپرها را گزارش کردند. در ادامه تعدادی از پژوهشگران با استفاده از آزمایش‌های ساتریفیوژ اثر عمق و سطح تراکم را بر کاهش خطرهای روانگرایی مورد بررسی قرار دادند [۲۲-۱۴]. آدالیر و همکاران [۲۳ و ۲۴] اثر مثبت افزایش سختی خاک در حضور ستون سنگی را بر کاهش نشست‌های ناشی از روانگرایی مورد مطالعه قرار دادند.

بالا رفتن فشار آب ناشی از تحریکات زلزله می‌تواند موجب کاهش سختی و ظرفیت باربری پی‌های سطحی شود، در صورتی که مقاومت باربری ماسه‌ها در شرایط وجود فشار آب بیش از تنش اعمالی ناشی از سازه فوقانی باشد، خرابی در اثر کمبود ظرفیت باربری اتفاق نخواهد افتاد، اما به هر حال امکان وقوع نشست‌های مفراط و خارج شدن از سرویس‌دهی وجود دارد. مطالعات ساتریفیوژ دشتی و همکاران [۲۱، ۲۲ و ۲۵] 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 سه-محوری و برش ساده سیکلی به دست آمده، تخمین می‌زنند [۳۰-۲۶] و نشست‌های برشی را در تخمین نشست‌های سازه در نظر نمی‌گیرند.

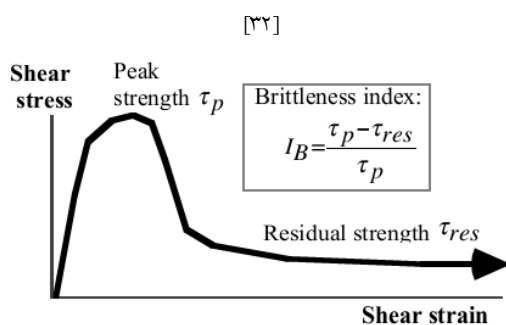
در مطالعه حاضر اثر تولید اضافه فشار آب بر ظرفیت باربری و نشست برشی پی‌های سطحی واقع بر ماسه با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی بررسی شده است. اضافه فشار ثابت آب که به وسیله تراوش استاتیکی ایجاد شده، نماینده فشار آب تولید شده در حین و پس از زلزله است. با توجه به اینکه نشست پی‌ها در شرایط روانگرایی هم ناشی از نشست‌های حجمی ناشی از رسوب‌گذاری دوباره و بازتحکیم است و هم ناشی از سربار پی سطحی، در آزمایش‌های در این پژوهش عامل اول تا حد زیادی حذف شده است و نشست‌ها فقط مربوط به تنش اعمالی به وسیله پی خواهند بود. همچنین اثر ضریب اطمینان طراحی پی بر نشست‌ها مورد

۲-۱- محفظه آزمایش

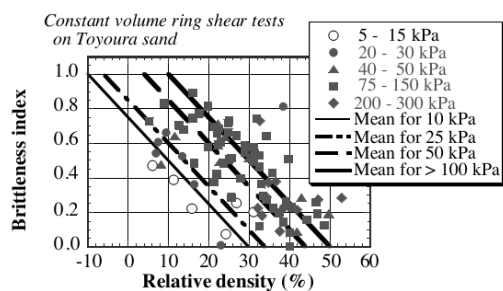
نمونه‌سازی با رسوب‌گذاری نهشته‌های جوان در طبیعت هماهنگی دارد و غرقاب شدن یکنواختی مناسبی در مدل ایجاد می‌نماید. شبیه‌سازی صحیح جابجایی و تغییر شکل‌های بزرگ ناشی از روانگرایی یکی از چالش‌برانگیزترین مراحل مدل‌سازی روانگرایی است که در تحلیل‌های ابعادی به خوبی در نظر گرفته نمی‌شود. تعیین رفتار تنش- کرنش متناسب با واقعیت در آزمایش‌های کوچک مقیاس 1g امری ضروری است، از طرفی ماسه‌های شل در تنش- های موثر پایین مانند ماسه‌های متراکم عمل کرده و رفتار اتساعی از خود نشان می‌دهند.

وارگاس [۳۲] با انجام آزمایش‌های برش حلقه^۲ در حجم ثابت روی ماسه با دانسیته‌های نسبی و فشارهای موثر مختلف اثر سطح تنش را بر نحوه نرم‌شوندگی کرنش بررسی کرد. نرم‌شوندگی کرنش ناشی از بالا رفتن فشار آب متأثر از اتساع (در سطح تنش پایین) بوده که خود به سطح تنش و دانسیته نسبی وابسته است.

شکل ۲ الف: مفهوم اندیس تردی، ب: ترکیب‌هایی از اندیس تردی و فشار سربار



الف



ب

Fig. 2. (a) Conceptual sketch of brittleness index, (b) Combination of relative density and effective stress level which keeps brittleness index constant [32]

برای مدل‌سازی باربری پی‌ها در فشارهای اضافی آب از محفظه آزمایش شکل (۱) استفاده شده است. این محفظه دارای ابعاد ۱۲۰×۹۰×۷۰ سانتیمتر بوده و از دو صفحه شفاف پلکسی‌گلاس^۱ برای مشاهده تغییرات زیر پی استفاده شده است. برای ارزیابی دقیق تغییرات عمودی و جانبی ماسه زیر پی، از ماسه رنگی برای شبکه-بندی‌های ۵*۵ سانتیمتری استفاده شده است. فشارهای اضافی آب با استفاده تراوش رو به بالا و تغییر ارتفاع محفظه آب به وجود آمده‌اند. این روش پیش از این به وسیله پژوهشگران دیگر نیز برای ارزیابی رفتار بعد از تولید فشار آب مورد استفاده قرار گرفته است، برای نمونه کالوتی و همکاران [۳۱] تغییر مکان‌های لوله‌های مدفون ناشی از ایجاد فشار آب و روانگرایی را بررسی کردند.

در این پژوهش ظرفیت باربری پی‌ها در نسبت‌های اضافی فشار آب حفره‌ای ۰، ۰/۳، ۰/۷ و ۱ بررسی شده است. این نسبت به- صورت زیر تعریف می‌شود:

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

که در رابطه بالا، r_u نسبت اضافه فشار آب، Δu اضافه فشار حفره‌ای و σ'_{v0} سربار موثر اولیه است.

۲-۲- مصالح مصرفی

مصالح مورد استفاده برای محیط خاکی، ماسه بابلسر بوده که به صورت توده‌ای از اعماق سطحی سواحل بابلسر تهیه شد. این ماسه دارای تخلخل کمینه ۰/۵۷۳، تخلخل بیشینه ۰/۸۰۴، توده ویژه ۲/۸۳ و $D_{50} = 0.25 \text{ mm}$ بوده و ماسه بدانه‌بندی شده (SP) در طبقه‌بندی متحد است. 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 پژوهش روش نمونه‌سازی غرقابی استفاده شد. 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 به دست آمد. این روش

وارگاس [۳۲] اندیس تردی^۱ را مطابق رابطه (۲) و شکل (۲-الف) تعریف کرد:

$$I_B = \frac{\tau_p - \tau_{res}}{\tau_p} \quad (2)$$

که در آن I_B اندیس تردی، τ_p مقاومت بیشینه و τ_{res} مقاومت باقیمانده است. هر یک از این پارامترها در شکل ۲-الف به صورت شماتیک نشان داده شده است. منظور از مقاومت باقیمانده در این پژوهش، مقاومت پس از روانگرایی^۲ است. در واقع اندیس تردی نشان‌دهنده میزان کاهش مقاومت پس از وقوع روانگرایی است. نمونه‌هایی که دارای اندیس تردی یکسانی باشند رفتار نرم‌شوندگی مشابهی خواهند داشت، با توجه به تعریف اندیس تردی و فشار سربار موجود، با استفاده از نمودارهای شکل (۲-ب) رفتار ماسه مشابه رفتار ماسه‌ای با دانسیته متوسط ۵۰ درصد در مدل واقعی خواهد بود.

۲-۳- پی‌ها

برای بررسی رفتار دقیق یک مدل خاص، لازم است که مدل در ابعاد واقعی ساخته شود. با توجه به پرهزینه بودن ساخت چنین مدل‌هایی می‌توان آن‌ها را در ابعاد کوچک‌تر ساخته و رفتار واقعی را با توجه به موضوع مورد مطالعه با استفاده از تحلیل‌های ابعادی پیش‌بینی کرد. برای میزهای I_g روابط گوناگونی به وسیله پژوهشگران مختلف ارائه شده است که می‌توانند در این زمینه راهگشا باشند [۳۵-۳۳].

هدف از این تحقیق، مطالعه رفتار باربری و ارزیابی نشست پی‌های مربعی و نواری واقع بر ماسه‌های سست اشباع در شرایط وجود فشار اضافی آب حفره‌ای بوده است؛ پی‌های مربعی با ابعاد 15×15 سانتیمتر و پی‌های نواری با ابعاد 90×15 سانتیمتر ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به وجود صفحات پلکسی‌گلاس و اصطکاک ناچیز بین ماسه و جدار، می‌توان رفتار پی در نزدیکی پلاکسی را به صورت دوبعدی در نظر گرفت و شرایط پی نواری را برای آن صادق دانست.

۲-۴- بارگذاری

با توجه به اهداف، 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 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 τ_{II} ‌های ۰، ۰/۳، ۰/۷ و ۱ بر روی پی‌های مربعی و نواری است.

تحریک‌های زلزله موجب بالا رفتن فشار آب حفره‌ای در ماسه‌های سست اشباع شده و اگرچه می‌تواند ظرفیت باربری پی‌های واقع بر آن را کاهش دهد، اما لزوماً خرابی ناشی از کمبود ظرفیت باربری اتفاق نخواهد افتاد ولی نشست‌های ناشی از آن می‌تواند سازه فوقانی را از حالت سرویس‌دهی خارج کند؛ بنابراین ارزیابی این دسته از نشست‌ها از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. آزمایش‌های گروه دوم برای ارزیابی این نشست‌ها انجام شد. این گروه از آزمایش‌ها شامل ۱۲ آزمایش بوده که در آن پی‌های نواری و مربعی ابتدا در شرایط اشباع و عدم وجود فشار اضافی تا ضریب اطمینان-های ۲ و ۳ 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 نمونه‌سازی مصالح ماسه‌ای، پی‌های مربعی و نواری بر روی ماسه مستقر شده و تحت بارگذاری قرار گرفتند. بار و تغییر مکان به ترتیب به وسیله بار سنج^۳ و تغییر مکان-سنج^۴ اندازه‌گیری شده و به وسیله دستگاه ثبات^۵ ثبت شده‌اند. کلیه حسگرها قبل از شروع آزمایش‌ها کالیبره شده‌اند. برای کنترل چرخش پی از سه تغییر مکان‌سنج در وسط و گوشه‌های پی استفاده شده است.

۳- نتایج

در شرایط زلزله در ماسه‌های سست اشباع، لزوماً روانگرایی کامل رخ نمی‌دهد، اما به هر حال امکان تولید مقداری از اضافه فشار آب حفره‌ای وجود خواهد داشت. این افزایش فشار آب حفره‌ای می‌تواند باعث کاهش سختی و ظرفیت باربری و ایجاد نشست‌های

3 Loadcell

4 LVDT

5 Datalogger

1 Brittleness Index

2 Post-liquefaction strength

شکل ۴ نمودار تنش-نشست پی‌های نواری در فشارهای اضافی آب مختلف

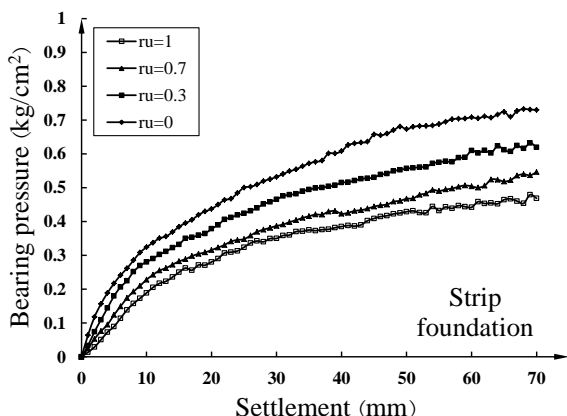


Fig. 4. Bearing pressure-foundation settlement curves for strip foundation at different values of r_u .

آزمایش‌های گروه دوم برای شبیه‌سازی شرایط واقعی و ارزیابی نشست‌های ناشی از تولید فشار آب در ضرایب اطمینان 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، مهندسین بار مجاز پی را مطابق رابطه (۳) با اعمال ضرایب اطمینان بر ظرفیت باربری نهایی طراحی می‌کنند:

$$B.C._{all} = \frac{B.C._{ult}}{FS} \quad (3)$$

که در رابطه بالا $B.C._{all}$ ظرفیت باربری مجاز، $B.C._{ult}$ ظرفیت باربری نهایی و FS ضریب اطمینان است.

شکل ۵ نمودار تنش-نشست پی نواری برای ضرایب اطمینان‌های ۲ و ۳ و روانگرایی کامل

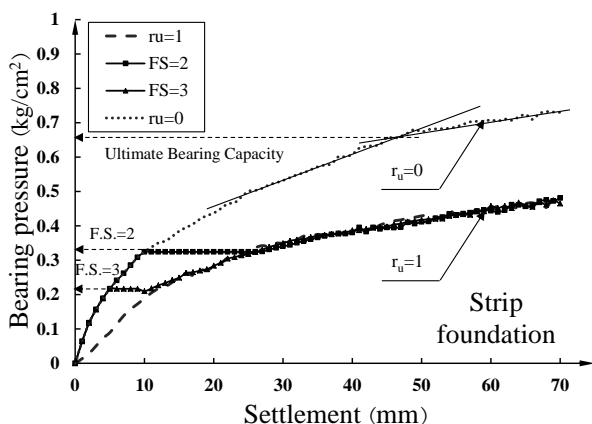


Figure 5. Bearing pressure-settlement of strip foundation at $r_u=1$ and safety factor= 2 and 3.

محسوس گردد. در این پژوهش آزمایش‌هایی در نسبت‌های فشار آب حفره‌ای ۰، ۰/۳، ۰/۷ و ۱ رو پی‌های مربعی و نواری انجام شد که در ادامه نتایج مربوطه تشریح می‌شود. کلیه نتایج ارائه شده در نمودارها مربوط به داده‌های مدل است، در صورتی که نتایج نموداری با استفاده از نتایج ابعاد واقعی به دست آمده باشد گفته خواهد شد.

شکل ۳ نمودار تنش-نشست پی‌های مربعی در فشارهای اضافی آب مختلف

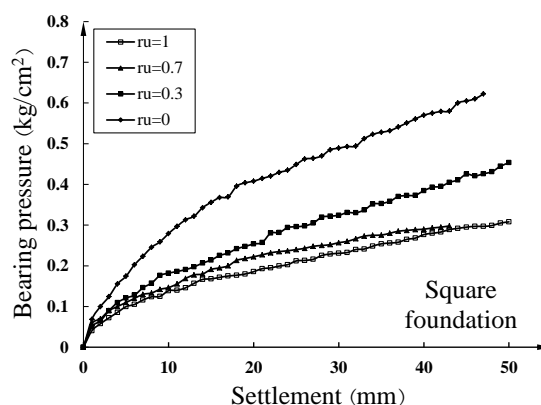


Fig. 3. Bearing pressure-foundation settlement curves for square foundation at different values of r_u .

شکل (۳) نمودارهای تنش-نشست پی‌های مربعی در r_u های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، نمودارهای بار-نشست، رفتار این خاک مبین رفتار ماسه با دانسیته نسبی متوسط است. با افزایش نسبت اضافه فشار حفره‌ای ظرفیت باربری با یک نرخ نزولی کاهش پیدا می‌کند؛ به عبارت دیگر رفتار باربری پی‌های مربعی در r_u های بالا به یکدیگر نزدیک شده است، تا جایی که باربری این پی در نسبت‌های فشار حفره‌ای ۰/۷ و ۱ تقریباً یکسان است. همین‌گونه که ملاحظه می‌شود، با وجود کاهش محسوس در ظرفیت باربری به علت افزایش نسبت اضافه فشار آب، هنوز ماسه از مقاومت قابل توجهی برخوردار است که به مقاومت پس از روانگرایی مربوط می‌شود. شکل (۴) نمودارهای تنش-نشست مربوط به پی‌های نواری در r_u های مختلف را نشان می‌دهد. ظرفیت باربری پی‌های نواری با افزایش r_u با روندی مشابه به پی‌های مربعی کاهش پیدا کرده است. روند نمودارهای تنش-نشست برای r_u های مختلف تقریباً یکسان بوده و مشابه رفتار ماسه‌های با تراکم نسبی متوسط و پایین است.

به وجود اتساع و باز توزیع فشار آب و تنش‌ها در زیر پی نسبت می‌دهند [۴، ۱۴، ۱۵، ۲۱ و ۲۴]. 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، به گونه‌ای که آب از اطراف پی به سمت زیر آن جریان پیدا می‌کند. به هر حال با توجه به مشاهده‌ها، در زیر پی به هیچ وجه روانگرایی کامل ($I_{II}=1$) اتفاق نخواهد افتاد، مقدار قابل ملاحظه‌ی ظرفیت باربری در نسبت‌های فشار آب حفره-ای بالا را می‌توان به این فرآیند نسبت داد.

۳-۳- نشست‌های پس از روانگرایی

تحریک‌های زلزله موجب بالا رفتن فشار آب و ماسه‌های اشباع و کاهش سختی و ظرفیت باربری پی‌ها می‌شود، اگرچه سازه ممکن است دچار خرابی‌های ناشی از کمبود باربری نشود اما به هر حال مقداری نشست را تجربه خواهد کرد. بنابراین تخمین نشست‌های ناشی از تحریک‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. 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 [۳۰-۲۶]. حال آنکه مطالعات اخیر نشان-دهنده اهمیت نقش تغییرشکل‌های برشی در نشست‌های کلی سازه-هاست؛ یعنی در صورت وجود سازه و تنش برشی، کرنش‌های برشی سهم بیشتری در نشست‌های کلی سازه دارند [۲۵-۲۱]. بنابراین برای کنترل نشست‌ها، تعیین ضریب اطمینان مناسب در طراحی سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود.

همان طور که پیش‌تر بیان شد، با تولید فشار آب نشست‌های برشی شروع شده و با رسیدن به تعادل جدید متوقف می‌شوند. شکل‌های (۶) و (۷) رابطه بین تغییرشکل‌های نرمال شده (به عرض پی) و ضریب اطمینان طراحی را برای پی‌های مربعی و نواری نشان می‌دهد. در ضریب اطمینان ثابت مقدار نشست‌ها با افزایش I_{II} افزایش پیدا کرده است، تغییرشکل‌ها برای ضرایب اطمینان بیش از ۲ محسوس نبوده ولی برای ضرایب اطمینان کمتر از آن به سرعت افزایش یافته است.

مقایسه بین پی‌های مربعی و نواری نشان می‌دهد که در ضریب اطمینان ثابت، پی‌های نواری نشست بیشتری نسبت به پی‌های مربعی کرده‌اند و همچنین نشست پی‌های سطحی کمتر تحت تأثیر

مقدار ظرفیت باربری نهایی در فشارهای آب مختلف در آزمایش-های گروه اول به دست آمده است. شکل (۵) نمونه‌ای از نتایج مربوط به آزمایش‌های بار ثابت برای ضریب اطمینان‌های ۲ و ۳ در شرایط $I_{II}=1$ را برای پی نواری نشان می‌دهد. مطابق شکل، بارگذاری تا ضرایب اطمینان مورد نظر انجام شده است (مرحله اول) و سپس با بالا بردن فشار آب نشست‌های برشی 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 (۵)، مقدار نشست‌های پی برای $I_{II}=1$ با افزایش ضریب اطمینان از ۲ به ۳، سه برابر شده است. بارگذاری دوباره روی مسیر باربری آزمایش‌های گروه اول و تا رسیدن به ظرفیت باربری نهایی در حالت روانگرایی کامل ادامه پیدا کرده است (مرحله سوم). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، رفتار باربری پی‌ها در مراحل اول و سوم تقریباً مطابق بر باربری پی‌ها در آزمایش‌ها گروه اول و نشست‌ها تقریباً برابر با تفاوت نمودارهای مربوط به ظرفیت باربری بوده است. نتایج مربوط به I_{II} های دیگر در پی‌های نواری و پی‌های مربعی نیز به همین صورت بوده است.

۳-۱- تغییرات ظرفیت باربری

ظرفیت باربری پی‌های مربعی در I_{II} های ۰، ۰/۳، ۰/۷ و ۱ به ترتیب برابر با ۰/۳۲، ۰/۱۹۲، ۰/۱۸۵ و ۰/۱۶ بوده است. همچنین ظرفیت باربری پی‌های نواری در I_{II} های ۰، ۰/۳، ۰/۷ و ۱ به ترتیب برابر با ۰/۶۳، ۰/۴۷، ۰/۳۹ و ۰/۳۴ بوده است. با افزایش نسبت فشار آب حفره‌ای تنش موثر بین ماسه‌ها کاهش یافته و در ادامه 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. ظرفیت باربری ارائه شده بر اساس معیار مقاومت بوده و در صورتی که معیار تغییرشکل در نظر گرفته شود (مقاومت مربوط به درصدی از عرض پی)، مقادیر متفاوت دیگری به دست خواهند آمد. نتایج حاصل از ثبت فشار آب نشان‌دهنده کاهش فشار آب زیر پی نسبت به اطراف آن با افزایش مقدار بار وارد بر آن است، پژوهشگران این کاهش را

صورت استفاده‌ی گسترده در کارهای مهندسی به مطالعات بیشتر نیاز است. اما به هر حال در صورت وجود چنین نمودارهایی امکان تخمین نشست‌ها برای ارزیابی اولیه وجود دارد. به این صورت علاوه بر در دست بودن نمودارهایی که می‌تواند در طراحی‌ها مورد استفاده قرار گیرد، می‌تواند موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه گردد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به وجود سازه‌های کوتاه مرتبه فراوان واقع بر ماسه‌های اشباع مناطق ساحلی کشور که بر پی‌های سطحی مستقرند و در صورت وقوع زلزله امکان تولید فشار آب اضافی و روانگرایی و خسارات ناشی از آن وجود دارد، در این پژوهش به بررسی عملکرد پی‌های سطحی در حضور فشار آب اضافی پرداخته شد. برای این منظور با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی ظرفیت باربری و نشست پی-های سطحی واقع بر ماسه اشباع مورد بررسی قرار گرفت.

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، درحالی‌که در روابط ظرفیت باربری برای روانگرایی کامل ظرفیت باربری در نظر گرفته نمی‌شود. ظرفیت باربری پی‌های مربعی تأثیر 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 ۰/۳ حدود ۴۰ درصد کاهش و برای نسبت‌های فشار آب بالاتر به کندی کاهش پیدا می‌کند تا جایی که ظرفیت باربری در I_{II} ‌های ۰/۷ و ۱ تقریباً یکسان است. با توجه به مشاهده 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 آب منفذی اضافی ۶۰ درصد کاهش پیدا کرده است.

ظرفیت باربری پی‌های نواری با شیب ملایم‌تری کاهش پیدا کرده و با اعمال نسبت فشار آب ۰/۳ حدود ۲۵ درصد کم شده است. ظرفیت باربری پی نواری در حالت روانگرایی کامل نسبت به حالت عدم وجود فشار اضافی آب منفذی ۵۰ درصد کاهش پیدا کرده است.

I_{II} بوده است. با توجه به امکان تخمین I_{II} با توجه به شتاب ورودی زلزله و مقاومت روانگرایی خاک موجود با استفاده از مطالب موجود در ادبیات فنی [۳۶ و ۳۷] 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 I_{II} امکان تخمین اولیه نشست‌ها وجود خواهد داشت. البته این نشست‌ها شامل نشست‌های ناشی از بازتحکیم و رسوب‌گذاری دوباره نمی‌شود که با روش‌های متداول موجود در شرایط میدان آزاد محاسبه می‌شوند.

شکل ۶ نمودار ضریب اطمینان در مقابل نشست نرمال شده به عرض پی

برای پی مربعی

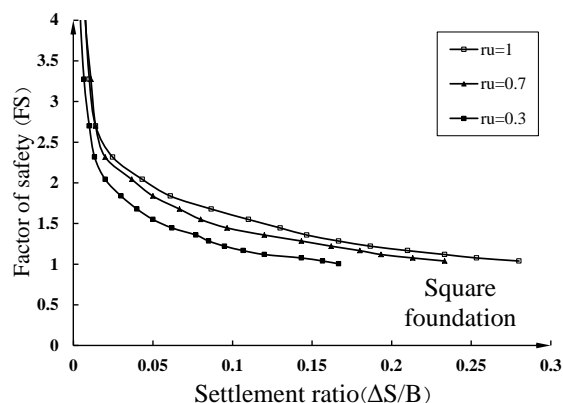


Fig. 6. Variations of normalized foundation settlement versus safety factor for square foundation

شکل ۷ نمودار ضریب اطمینان در مقابل نشست نرمال شده به عرض پی برای پی

نواری

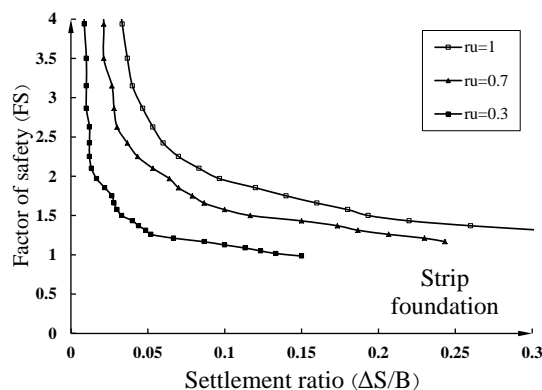


Fig. 7. Variations of normalized foundation settlement versus safety factor for strip foundation

گفتن این نکته ضروری است که نتایج این پژوهش برای یک دانشیته خاص و شرایط آزمایش‌های این پژوهش معتبر بوده و در

[5] Nagase, H., and Ishihara, K. "Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes."; J. of Soils and Found.; 1988, 28(1), 65-76.

[6] Seed, H. B., and Idriss, I. M. "Analysis of soil liquefaction: Niigata earthquake."; J. Soil Mech. And Found. Divission; ASCE; 1967, 93(3), 83-108.

[7] Adachi, T., Iwai, S., Yasui, M., and Sato, Y. "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; 1992, 147-152.

[8] Ishihara, K., Acacio, A., and Towhata, I. "Liquefaction-induced ground damage in Dagupan in the July 16, 1990 Luzon earthquake."; Soils Found.; 1993, 33(1), 133-154.

[9] Tokimatsu, K., Kojima, J., Kuwayama, A. A., and Midorikawa, S "Liquefaction-induced damage to buildings I 1990 Luzon Earth-quake."; J. Geotech. Engrg.; 1994, 120(2), 290-307.

[10] Acacio, A. A., Kobayashi, Y., Towhata, I., Bautista, R. T., and Ishihara, K. "Subsidence of building foundation resting upon liquefied subsoil case studies and assessment"; Soils and Found.; 2001, 41(6), 111-128.

[11] Yoshida, N., Tokimatsu, K., Yasuda, S., Kokusho, T., and Okimura, T. "Geotechnical aspects of damage in Adapazari city during 1999 Kocaeli, Turkey earthquake"; Soils Found.; 2001, 41(4), 25-45.

[12] Bray, J., Sancio, R., Durgunoglu, T., Onalp, A., Youd, T., Stewart, J., Seed, R., Cetin, O., Bol, E., Baturay, M., Christensen, C., and Karadayilar, T. "Subsurface characterization at ground failure sites in Adapazari, Turkey"; J. Geotech. Geoenviron. Eng.; 2004, 130(7), 673-685.

[13] Sancio, R., Bray, J. D., Durgunoglu, T., and Onalp, A. "Performance of buildings over liquefiable ground in Adapazari, Turkey." Proc., 13th World Conf. on Earthquake Engineering, St. Louis, Mo., Canadian Association for Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 935; 2004.

[14] Liu, L., and Dobry, R. "Seismic response of shallow foundation on liquefiable sand."; J. Geotech. Geoenviron. Eng.; 1997, 123(6), 557-567.

[15] Liu, L. "Centrifuge earthquake modelling of liquefaction and its effect on shallow foundations."; PhD thesis, Dept. Of Civ. And Envir. Engrg.; Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N.Y.; 1992.

[16] Liu, L. And Dobry, R. "Centrifuge study of shallow foundation on saturated sand during earthquakes."; Proc. 4th Japan-U.S. workshop on earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Soil Liquefaction, Nat. Ctr. For Earthquake Engrg. Res., State

فشار آب زیر پی به صورت قابل ملاحظه‌ای نسبت به 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 ($\Delta S/B$) مربوط به پی‌های مربعی و نواری در ضریب اطمینان ۲ در روانگرایی کامل به ترتیب ۰/۴ و ۰/۱ بوده است. با افزایش ضریب اطمینان مقدار نشست‌ها به سرعت افزایش پیدا کرده است. اثر افزایش I_{II} بر نشست پی‌های نواری بیشتر بوده است، در حالی که در پی‌های مربعی تأثیر محسوسی نداشته است. البته نکته قابل ذکر این که تغییر شکل‌های گفته‌شده فقط تغییر شکل‌های برشی بعد از روانگرایی را شامل می‌شوند و نشست‌های نهایی از مجموع نشست‌های برشی و حجمی در حین و بعد از روانگرایی به دست خواهد آمد.

۵- قدردانی

این مقاله در راستای پروژه پژوهشی مصوب و تحت حمایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با کد فعالیت ۶۷۲۷ و کد پروژه ۶۰۷ و با همکاری آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه سمنان انجام شده است که بدین وسیله از همکاران گرامی قدردانی می‌شود.

References

۶- مراجع

- [1] Kawakami, F., and Asada, A. "Damage to the ground and earth structures by Niigata earthquake of June 16, 1964."; J. soils and found.; 1966, 6(1), 14-30.
- [2] Kishida, H. "Damage to reinforced concrete buildings in Niigata City with special reference to foundation engineering"; J. Soils and Found.; 1966, 6(1), 71-88.
- [3] Ohsaki, Y. "Niigata earthquakes, 1964 building damage and soil condition." J. of Soils and Found.; 1966, 6(2), 14-37.
- [4] Yoshimi, Y., and Tokimatsu, K. "Settlement of buildings on saturated sand during earthquakes." Soils Found.; 1977, 17(1), 23-38.

- [27] Tokimatsu, K. and Seed, H.B. "Evaluation of settlements in sand due to earthquake shaking,"; *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE; 1987, Vol. 113, No. 8, pp. 861-878.
- [28] Ishihara, K. and Yoshimine, M. "Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes"; *Soils and Foundations*; 1992, 32(1), 173-188.
- [29] Shamoto, Y., Zhang, J.-M., and Tokimatsu, K. "Methods for evaluating residual post-liquefaction ground settlement and horizontal displacement"; *Soils and Foundations*; Special Issue, 1998, No. 2, 69-83.
- [30] Wu, J. and Seed, R.B. "Estimation of liquefaction-induced ground settlement (case studies)"; *Proceedings, Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York; 2004, 1-8.
- [31] Calvetti, F., Prisco, C. And Nova, R. "Experimental and Numerical Analysis of Soil-Pipe Interaction."; *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*; 2004, 130(12), 1292-1299.
- [32] Vargas-Monge, W. "Ring shear tests on large deformation of sand"; Ph.D. Thesis, University of Tokyo; 1998.
- [33] Iai, S. "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field"; *Soils and Foundations*; 1989, 29(1), 105-118.
- [34] Kagawa, T. "On the similitude in model vibration tests of earth-structures."; *Proc. JSCE*; 1978, 275, (in Japanese).
- [35] Kokusho, T. and Iwatate, T. "Scaled model tests and numerical analyses on nonlinear dynamic response of soft grounds", *Proc. JSCE*; 1979, 285, 57-67 (in Japanese).
- [36] Marcuson, W.F. and Hynes, M.E. "Stability of slopes and embankments during earthquakes"; *Proceedings, ASCE Pennsylvania Department of Transportation Geotechnical Seminar, Hershey, Pennsylvania*; 1990.
- [37] Marcuson, W.F. and Hynes, M.E. and Franklin, A.G. (1990). "Evaluation and use of residual strength in seismic safety analysis of embankments"; *Earthquake Spectra*; 1990, 6(3), 529-572.
- Univ. Of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.; 1992, 493-508.
- [17] Dobry, R., and Liu, L. "Centrifuge modelling of soil liquefaction."; *Proc., 10th World Conf. on Earthquake Engineering*, International Association for Earthquake Engineering (IAEE); Madrid, Spain; 1994, 7801-6809.
- [18] Coelho P., Haigh S. K., Madabhushi S. P and O'Brien T. "Centrifuge modeling of the use of densification as a liquefaction resistance measure for bridge foundations"; 13 the World Conference on Earthquake Engineering; 2004.
- [19] Coelho, P.A.L.F., Haigh, S.K., Madabhushi, S.P.G., "Centrifuge modeling of liquefaction of saturated sand under cyclic loading"; *Intern. Conf. CBS04*, Bochum, Germany; 2004.
- [20] Ueng, T.S., Wu, C.W., Cheng, H.W., Chen, C.H., "Settlement of saturated clean sand deposits in shaking table tests"; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*; 2010, 30(1); 50-60.
- [21] Dashti, S., Bray, J. D., Pestana, J. M., Riemerm M. and Wilson D., "Mechanisms of Seismically Induced Settlement of Buildings with Shallow Foundations on Liquefiable Soil"; *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*; 2010, 136(1).
- [22] Dashti, S., Bray, J.D., Pestana, J.M., Riemer, M.R., and Wilson, D. "Centrifuge testing to evaluate and mitigate liquefaction-induced building settlement mechanisms."; *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*; 2010, 136(7), 918-929.
- [23] Adalier, K., Elgamal, A., Meneses, J., Baez, J.I. "Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils"; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*; 2003, 23(7), 571-584.
- [24] Adalier, K., Elgamal, "Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns"; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*; 2004, 72(3), 275-291.
- [25] Dashti, S., Bray, J.D. "Numerical simulation of building response on liquefiable sand."; *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*; 2013, 139(8), 1235-1249.
- [26] Silver, N.L. and Seed, H.B. "Volume changes in sands during cyclic loading"; *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*; ASCE; 1971, Vol 97, No. SM9, pp. 1171-1180.

Evaluating Bearing capacity and settlement of shallow footings rested on liquefied sand using physical modelling

Y. Jafarian^{1*}, A. Haddad², B. Mehrzad Selakjani³, M. Varaste⁴

- 1- Assistant Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.
- 2- Associated Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University.
- 3- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Semnan University.
- 4- Graduated M.Sc., Department of Civil Engineering, Semnan University.

*yjafarianm@iiees.ac.ir

Abstract

Bearing capacity failure and seismically-induced settlement of buildings resting on liquefied soils have resulted in significant damage in recent earthquakes. Majority of engineers still estimate seismic building settlement using procedures developed to calculate post-liquefaction reconsolidation settlement in the free-field. Previous studies of this problem have identified important factors involving shaking intensity, the liquefied soil's relative density and thickness, and building's weight and width. Recent studies have also showed that shear deformation combined with localized volumetric strains during partially drained loading are dominant mechanisms. Bearing capacity degradation due to high excess pore water pressure development has also been reported in previous studies.

In this study, two series of physical modelling experiments involving square and strip footings rested on saturated sand have been performed to identify the mechanisms involved in liquefaction-induced building settlements and bearing capacity degradation. The experiments have performed on Babolsar sand with moderate relative density in a box with transparent sides. Although earthquake waves can cause pore water pressure build up in saturated sands, complete liquefaction always do not occur. Anyhow, excess pore water pressure generation can cause damages to structures by bearing capacity degradation and excessive settlements. Various constant pore water pressure ratios were generated by static seepage through the base of the box to assess bearing capacity degradation and excessive settlements before and during complete liquefaction conditions. Constant pore water pressure ratio is representative of excess pore water pressure ratio generated during and sustained after earthquake excitation. First series of the experiments involved eight tests to evaluate bearing capacity of square and strip foundation in constant pore water pressure conditions. The results showed bearing capacity reduction due to excess pore water pressure development, but there was remarkable strength even during complete liquefaction that is related to post-liquefaction strength of liquefied sand. The square foundations are more affected than the strip ones at different constant excess pore water pressure ratios. Pore water pressure under the centerline of foundation decreased with loading increment because of particle rearrangement and it was always smaller than the applied excess pore water pressure. Complete liquefaction has never observed under the footings. Safety factor selection is a challenging step in shallow foundation designs for most of engineers because of economical aspects. Recent studies show the important role of shear deformations in shallow foundations as discussed before. In the second test series of this experimental study, the foundations were loaded in three stages. first, initial loading was applied upto some safety factors and then settlements due to constant pore water pressure build up were measured in the second stage. Since then, loading was increased to complete bearing capacity failure in the third stage. This series include twelve tests for two types of foundations and various excess pore water pressures. Only shear deformations were assessed in these series because there was no volumetric deformation as excess pore water pressure was constant during the tests. The results demonstrate increase of foundation settlements with safety factor reduction progressively and settlements for safety factors larger than two were negligible.

Keywords: Shallow foundation, Bearing Capacity, Settlement, Liquefaction, Physical Modelling.