



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه دکتری رشته مهندسی عمران، گرایش مکانیک خاک و پی

بررسی اثر حفره و سیکل بارگذاری بر روی رفتار پی نواری

مستقر بر خاک مسلح

اساتید راهنما:

دکتر سید ناصر مقدس تفرشی

دکتر محمود قضاوی

توسط:

عادل عساکره

تابستان ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم و تشکر

ستایش خدای راست که پیوند دهنده ستایش به نعمت است و نعمت به ستایش. او را بر نعمتهایش می ستاییم چنانکه بر بلایش، و از او بر نفس خود مدد خواهیم که در آنچه باید کاهل است و بر آنچه نباید عاجل، و خواهان بخشش او هستیم در آنچه علمش آن را در بر گرفته و در کتابش برشمرده. گواهی می دهیم که پرستش شونده ای جز خدای ما نیست، یکی است بی شریک، و محمد بنده اوست و پیامبرش، که درود خدا بر او و خاندان پاکش باد.^۱

آمرزش می خواهیم پدرم را و غرق بوسه می کنم وجود مادرم را که می دانه نبوده است جز به دعای خیر ایشان، از ابتدای زندگی.

و سپاسگذار تمام دوستانی هستم که به هر گونه مرا یار شدند.

و اگر نبود فداکاریهای همسری مهربان و راهنمایی های استادی دلسوز، چنین سرانجامی می بود؟ پس بگذار این دو را در این گستره محدود سپاس نگویم که اینجا هر تلاشی ناکام است و تنها بر دستانشان بوسه می زنم و بهترین آرزوهایم را نثارشان می کنم.

چکیده

در این تحقیق، مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از یک مدل فیزیکی روی پی نواری مستقر بر بستر حفره‌دار غیرمسلح و مسلح با ژئوگرید، در دو حالت بارگذاری استاتیکی و بارگذاری سیکلی با اعمال ۵۰۰۰ سیکل بارگذاری و باربرداری انجام شده است. در این آزمایش‌ها اثر تعداد لایه‌های تسلیح، موقعیت قرارگیری حفره درون خاک (عمق مدفون حفره) و شدت بار سیکلی ارزیابی شده‌اند. در صورت قرارگیری حفره در ناحیه تاثیر پی، نشست پی با افزایش شدت بار سیکلی افزایش و با افزایش عمق مدفون حفره و افزایش تعداد لایه‌های تسلیح زیر پی کاهش می‌یابد. در صورت تسلیح مناسب بستر حفره‌دار و یا تامین عمق مدفون کافی برای حفره، نشست پی در مقایسه با خاک غیرمسلح بدون حفره کاهش یافته و به عبارتی بستر قادر به تحمل بار بیشتر در میزان نشست کمتر است. از اینرو با تسلیح بستر حفره‌دار، امکان حذف تاثیر منفی حفره روی رفتار پی فراهم می‌گردد. همچنین نشست پی تحت بار سیکلی در مقایسه با نشست پی تحت بار سیکلی در همان مقدار از بار اعمالی حدود ۴ برابر بدست آمده است، که این امر اهمیت بررسی رفتار پی تحت بار سیکلی در مقایسه با بار استاتیکی را نشان می‌دهد.

کلید واژه: بارگذاری سیکلی، حفره، ژئوگرید، مدل آزمایشگاهی، پی نواری و نشست پی.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د	فهرست جدول‌ها
ه	فهرست شکل‌ها
ک	فهرست علائم و نشانه‌ها
۱	فصل ۱- پیشگفتار
۱-۱	مقدمه
۳-۱	ضرورت انجام تحقیق
۴-۱	معرفی موضوع
۴-۱	اهداف تحقیق
۵-۱	دامنه، قلمرو و محدودیت‌های تحقیق
۶-۱	ساختار رساله
۷	فصل ۲- مروری بر مطالعات انجام شده
۷-۱	مقدمه
۷-۲	مطالعات انجام شده در زمینه اثر حفره بر ظرفیت باربری پی مستقر بر روی خاک غیرمسلح
۱۶-۲	مطالعات انجام شده در زمینه اثر مسلح‌کننده بر ظرفیت باربری پی‌ها
۱۹-۳-۲	بررسی رفتار پی‌ها تحت بارگذاری سیکلی
۲۴-۲	مطالعات انجام شده در زمینه اثر حفره بر ظرفیت باربری پی مستقر بر روی خاک مسلح
۲۹-۲	خلاصه و نتیجه‌گیری
۳۱	فصل ۳- تجهیزات آزمایش
۳۱-۱	مقدمه
۳۱-۲	تانک آزمایش
۳۲-۲-۳	معیارهای تعیین ابعاد تانک آزمایش
۳۶-۲-۳	مشخصات تانک آزمایش
۳۸-۳	قاب اصلی
۳۹-۳	طرح و اجراء سطوح تانک آزمایش
۴۰-۳	سیستم بارگذاری

۴۲	..... دستگاه بارش ماسه	۳-۶-۴
۴۲	..... تکیه‌گاه اصلی	۳-۶-۱
۴۳	..... سیستم بالابر	۳-۶-۲
۴۳	..... مخزن متحرک بارش ماسه	۳-۶-۳
۴۳	..... صفحات مشبک	۳-۶-۴
۴۴	..... ابزار اندازه‌گیری و سیستم قرائت و ثبت داده‌ها	۳-۷-۷
۴۴	..... سلول بار (Load Cell)	۳-۷-۱
۴۵	..... کالیبراسیون سلول بار	۳-۷-۱-۱
۴۶	..... سلول اندازه‌گیری نشست (LVDT)	۳-۷-۲
۴۶	..... کالیبراسیون سلول اندازه‌گیری نشست	۳-۷-۲-۱
۴۷	..... سیستم قرائت و ثبت داده‌ها	۳-۷-۳

فصل ۴ - مشخصات مصالح، نحوه آماده‌سازی و تشریح آزمایش‌ها..... ۴۸

۴۸	..... مقدمه	۴-۱
۴۸	..... خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک	۴-۲
۴۹	..... مشخصات فیزیکی و مکانیکی مسلح‌کننده	۴-۳
۵۰	..... روش آماده‌سازی خاک	۴-۴
۵۰	..... کالیبراسیون دستگاه بارش ماسه	۴-۵
۵۱	..... روش ایجاد حفره	۴-۶
۵۲	..... روش انجام آزمایش	۴-۷
۵۵	..... آزمایش‌های انجام شده و پارامترهای مورد نظر	۴-۸
۵۶	..... آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی	۴-۸-۱
۵۷	..... آزمایش‌های بارگذاری سیکلی	۴-۸-۲

فصل ۵ - نتایج آزمایش‌ها و تحلیل نتایج..... ۶۰

۶۰	..... مقدمه	۵-۱
۶۰	..... تکرارپذیری نتایج	۵-۲
۶۳	..... آزمایش‌های استاتیکی	۵-۳
۶۳	..... نتایج آزمایش روی خاک غیرمسلح و بدون حفره	۵-۳-۱
۶۵	..... اثر عمق مدفون حفره در حالت خاک غیرمسلح	۵-۳-۲
۶۶	..... تعیین مقدار بهینه محل قرارگیری اولین لایه تسلیح (u/B)	۵-۳-۳
۶۹	..... اثر دانسیته نسبی خاک بر ظرفیت باربری پی واقع بر خاک حفره‌دار	۵-۳-۴

- ۵-۳-۵ - اثر تعداد لایه‌های تسلیح بر ظرفیت باربری پی در دو دانسیته مختلف..... ۷۱
- ۵-۳-۶ - اثر تعداد لایه‌های تسلیح بر ظرفیت باربری پی در اعماق مدفون مختلف..... ۷۳
- ۵-۳-۷ - اثر عمق مدفون بر ظرفیت باربری پی..... ۷۵
- ۴-۵ - آزمایش‌های سیکلی ۷۶
- ۵-۴-۱ - رفتار عمومی نشست پی تحت بارگذاری سیکلی..... ۷۷
- ۵-۴-۲ - نشست پی واقع بر خاک غیرمسلح تحت اثر بار سیکلی..... ۸۰
- ۵-۴-۳ - نشست پی واقع بر خاک مسلح حفره‌دار تحت اثر بار سیکلی..... ۸۲
- ۵-۳-۴-۱ - تأثیر دامنه بارگذاری سیکلی..... ۸۲
- ۵-۳-۴-۲ - تأثیر عمق مدفون حفره..... ۸۸
- ۵-۳-۴-۳ - تأثیر تعداد لایه‌های تسلیح..... ۹۱
- ۵-۴-۴ - تغییرشکل حفره تحت اثر بار سیکلی..... ۹۶
- ۵-۴-۵ - مقایسه نشست پی تحت اثر بارگذاری استاتیکی و سیکلی..... ۹۷

فصل ۶- اثر مقیاس، محدودیت‌ها و کاربرد نتایج تحقیق..... ۱۰۱

- ۶-۱ - مقدمه..... ۱۰۱
- ۶-۲ - تحلیل ابعادی..... ۱۰۲
- ۶-۳ - بررسی اثر مقیاس در مدل آزمایشگاهی ارائه شده..... ۱۰۳
- ۶-۳-۱ - اثر مقیاس در آزمایش‌های استاتیکی..... ۱۰۳
- ۶-۳-۲ - اثر مقیاس در آزمایش‌های سیکلی..... ۱۰۵
- ۶-۳-۳ - بحث و نتیجه‌گیری..... ۱۰۵
- ۶-۴ - محدودیت‌ها و کاربرد نتایج..... ۱۰۷

فصل ۷- خلاصه، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد..... ۱۰۹

- ۷-۱ - مقدمه..... ۱۰۹
- ۷-۲ - خلاصه‌ای از مشخصات دستگاه آزمایش و مصالح..... ۱۱۰
- ۷-۳ - آزمایش‌های انجام شده..... ۱۱۰
- ۷-۴ - اثر مقیاس..... ۱۱۱
- ۷-۵ - نتیجه‌گیری..... ۱۱۱
- ۷-۵-۱ - آزمایش‌های استاتیکی..... ۱۱۱
- ۷-۵-۲ - آزمایش‌های سیکلی..... ۱۱۲
- ۷-۶ - پیشنهادها برای مطالعات آینده..... ۱۱۵

فهرست مراجع..... ۱۱۶

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۴۹	جدول ۱-۴: مشخصات خاک
۵۰	جدول ۲-۴: مشخصات فیزیکی و مکانیکی ژئوگرید (شرکت تولیدی مشیران شبکه)
۵۱	جدول ۳-۴: کالیبراسیون سیستم بارش ماسه
۵۷	جدول ۴-۴: جزئیات آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی
۵۹	جدول ۵-۴: جزئیات آزمایش‌های بارگذاری سیکلی

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۲	شکل ۱-۱: وجود حفرات در زیر بناهای موجود و در حال احداث در تهران
۸	شکل ۱-۲: اثر بار سطحی و ارتفاع پوشش روی ضریب Arching (Mcnulty, 1965)
۹	شکل ۲-۲: تصویر شماتیک پی نواری واقع بر روی حفره (Baus and Wang, 1983)
۹	شکل ۳-۲: مقایسه نتایج آنالیز اجزا محدود با مدل آزمایشگاهی (Baus and Wang, 1983)
۱۰	شکل ۴-۲: مقایسه مقادیر محاسبه شده و مقادیر اندازه‌گیری شده (Baus and Wang, 1983)
۱۰	شکل ۵-۲: تغییرات منحنی‌های بار- تغییرمکان در مقابل تغییرات نسبت D/B (Baus and Wang, 1983)
۱۱	شکل ۶-۲: تغییرات منحنی‌های بار- تغییرمکان در مقابل تغییرات نسبت W/B (Baus and Wang, 1983)
۱۱	شکل ۷-۲: ظرفیت باربری پی نواری بصورت تابعی از اندازه حفره و موقعیت آن (Baus and Wang, 1983)
۱۲	شکل ۸-۲: تأثیر عرض حفره بر روی عمق بحرانی حفره (Baus and Wang, 1983)
۱۳	شکل ۹-۲: تأثیر شکل حفره بر ظرفیت باربری پی نواری (Baus and Wang, 1983)
۱۳	شکل ۱۰-۲: تأثیر عمق مدفون حفره بر ظرفیت باربری پی نواری (Baus and Wang, 1983)
۱۴	شکل ۱۱-۲: منحنی فشار-تغییرمکان برای پی نواری واقع بر روی حفره استوانه‌ای طولانی در دو حالت موازی و عمود بر هم (Wang and Badie, 1985)
۱۵	شکل ۱۲-۲: منحنی فشار-تغییرمکان برای پی مربعی روی حفره استوانه‌ای ممتد و حفره مکعبی
۱۵	شکل ۱۳-۲: تغییرات ظرفیت باربری با تغییرات نسبت D/B (Wang and Badie, 1985)
۱۶	شکل ۱۴-۲: تغییرات ظرفیت باربری با تغییرات نسبت e/B (Wang and Badie, 1985)
۱۶	شکل ۱۵-۲: تأثیر موقعیت حفره بر ظرفیت باربری پی مربعی سطحی (Wang and Badie, 1985)
۱۷	شکل ۱۶-۲: پی منفرد روی خاک مسلح (Adams and Collin, 1997)
۱۷	شکل ۱۷-۲: طرح کلی آزمایش ظرفیت باربری پی و پلان قرارگیری آنها (Adams and Collin, 1997)
۱۸	شکل ۱۸-۲: تغییرات ظرفیت باربری نهایی بدست آمده از آزمایش‌ها نسبت به d/B (Shin and Das, 2000)
۲۰	شکل ۱۹-۲: پی مربعی سطحی روی خاک مسلح شده با ژئوگرید (Das, 1998)
۲۰	شکل ۲۰-۲: تغییرات (a) شدت بار نسبت به زمان (b) نشست (Das, 1998)

شکل ۲-۲۱: نمودار تاریخچه زمانی بارگذاری استاتیکی و تناوبی وارد بر روی پی (Moghaddas Tafreshi and Dawson, 2010b) ۲۱

شکل ۲-۲۲: تغییرات تنش-نشست پی (Moghaddas Tafreshi and Dawson, 2010b) ۲۲

شکل ۲-۲۳: تغییرات نشست پی (s/B) نسبت به تعداد سیکل‌های بارگذاری متناوب برای خاک غیر مسلح، مسلح کننده سه بعدی (H/B=0.66) و مسلح کننده صفحه‌ای (N=2) تحت بارگذاری تناوبی (Moghaddas Tafreshi and Dawson, 2010b) معادل ۰.۲۰٪، ۰.۳۰٪ و ۰.۵۰٪ ۲۲

شکل ۲-۲۴: تغییرات نشست پی با تعداد سیکل‌های اعمالی در $q_{dyn}/q_{stat}=20\%$ برای بستر مسلح شده (Moghaddas Tafreshi and Dawson, 2010b) ۲۳

شکل ۲-۲۵: تغییرات ماکزیمم نشست پی نسبت به دامنه بار تناوبی برای حالت‌های بدون مسلح کننده و مسلح کننده‌های سه بعدی و صفحه‌ای (Moghaddas Tafreshi and Dawson, 2010b) ۲۴

شکل ۲-۲۶: پی نواری روی یک لایه ماسه متراکم روی رس ضعیف: (الف) بدون حفره در رس (ب) با حفره در رس (Das and Khing, 1994) ۲۵

شکل ۲-۲۷: تصویر شماتیک مدل در آزمایشگاه (Das and Khing, 1994) ۲۵

شکل ۲-۲۸: تغییرات BCR_u در مقابل b/B (Das and Khing, 1994) ۲۶

شکل ۲-۲۹: تغییرات نسبت ظرفیت باربری BCR در مقابل d/B (Das and Khing, 1994) ۲۶

شکل ۲-۳۰: تصویر شماتیک مدل آزمایشگاهی (Sireesh et al., 2009) ۲۷

شکل ۲-۳۱: تغییرات فشار در مقابل نشست پی برای ضخامت‌های مختلف لایه ماسه (H/D) روی رس حفره‌دار (Sireesh et al., 2009) ۲۸

شکل ۲-۳۲: تغییرات فشار در مقابل نشست پی با تغییر عرض ژئوسل (Sireesh et al., 2009) ۲۸

شکل ۲-۳۳: تغییرات فشار در مقابل نشست پی با اضافه شدن یک لایه ژئوگرید بین لایه رس و ماسه مسلح با ژئوسل (Sireesh et al., 2009) ۲۹

شکل ۳-۱: خطوط هم فشار (حبابهای فشار) براساس معادله‌ی بوسینسک برای پی‌های مربعی و طولی (Boussinesq, 1885) ۳۲

شکل ۳-۲: توزیع تنش‌ها در اطراف یک تونل دایره‌ای در میدان تنش هیدرواستاتیک (Nath, 1977) ۳۳

شکل ۳-۳: مکانیزم گسیختگی برشی کلی خاک ۳۴

شکل ۳-۴: ابعاد مدل جهت تحلیل (الف) بستر غیرمسلح بدون حفره، (ب) بستر غیرمسلح با حفره، (ج) بستر مسلح حفره‌دار با سه لایه تسلیح ۳۵

شکل ۳-۵: منحنی‌های هم‌تراز تنش (الف) پی بر بستر غیرمسلح بدون حفره، (ب) پی بر بستر غیرمسلح حفره‌دار، (ج) پی بر بستر مسلح حفره‌دار ۳۶

شکل ۳-۶: طرح تانک آزمایش (ابعاد به میلی‌متر) ۳۷

- شکل ۳-۷: مقطع افقی از تانک آزمایش ۳۷
- شکل ۳-۸: تصویر تانک آزمایش در حالت قائم ۳۸
- شکل ۳-۹: طرح قاب اصلی دستگاه آزمایش (اندازه‌ها به میلی‌متر) ۳۹
- شکل ۳-۱۰: تصویر جداره‌های داخلی تانک آزمایش ۳۹
- شکل ۳-۱۱: سیلندرهای هیدرولیک دوطرفه ۴۰
- شکل ۳-۱۲: بخش کنترل کننده تولید بار ۴۲
- شکل ۳-۱۳: مخزن بارش ماسه (ابعاد برحسب میلی‌متر) ۴۳
- شکل ۳-۱۴: سیستم بارگذاری و سیستم بارش و متعلقات آنها ۴۴
- شکل ۳-۱۵: تصویر سلول بار ۴۵
- شکل ۳-۱۶: کلاهک‌های تحتانی و فوقانی سلول بار ۴۵
- شکل ۳-۱۷: منحنی کالیبراسیون سلول بار ۴۵
- شکل ۳-۱۸: تصویر سلول اندازه‌گیری نشست (LVDT) ۴۶
- شکل ۳-۱۹: نمودار کالیبراسیون (LVDT) ۴۶
- شکل ۴-۱: توزیع اندازه ذرات مصالح مورد استفاده ۴۹
- شکل ۴-۲: تصویر ژئوگرید CE131 ۴۹
- شکل ۴-۳: تصویر تانک پس از آماده شدن خاک ۵۴
- شکل ۴-۴: قرارگیری صفحه شفاف جلوی تانک و پشت‌بند نگهدارنده ۵۴
- شکل ۴-۵: قرارگیری میله بارگذاری، صفحه بارگذاری و سنسورها در محل مربوطه ۵۴
- شکل ۴-۶: طرح کلی آزمایش‌ها ۵۵
- شکل ۴-۷: نمونه منحنی پیش بارگذاری استاتیکی و بارگذاری سیکلی با فرکانس ۱ هرتز روی پی ۵۸
- شکل ۵-۱: تغییرات فشار- نشست پی در ماسه سست ($D_r=40\%$) در حالت $H/D=2.0$ و (الف) یک لایه مسلح‌کننده و (ب) دو لایه مسلح‌کننده ۶۱
- شکل ۵-۲: تغییرات فشار- نشست پی در ماسه متراکم ($D_r=74\%$) در حالت $H/D=2.0$ و (الف) غیرمسلح و (ب) دو لایه مسلح‌کننده ۶۱
- شکل ۵-۳: تغییرات نشست پی با تعداد سیکل بارگذاری برای پی روی ماسه غیرمسلح بدون حفره در شدت بار سیکلی (الف) $q_d/q_u=20\%$ و (ب) $q_d/q_u=30\%$ ۶۲
- شکل ۵-۴: تغییرات نشست پی با تعداد سیکل بارگذاری برای پی روی ماسه مسلح با ۲ لایه ژئوگرید در $H/D=3.0$ در شدت بار سیکلی (الف) $q_d/q_u=10\%$ ، (ب) $q_d/q_u=30\%$ ۶۲
- شکل ۵-۵: تغییرات فشار- نشست پی برای پی واقع بر ماسه غیرمسلح با دو دانسیته نسبی 40% و 74% در حالت بدون حفره ۶۳

شکل ۵-۶: سطوح گسیختگی در خاک ماسه‌ای؛ (الف) متراکم، (ب) سست ۶۴

شکل ۵-۷: تغییرات ظرفیت باربری در مقابل نشست برای پی روی ماسه غیرمسلح با و بدون حفره در اعماق مدفون مختلف ۶۵

شکل ۵-۸: تغییرات فشار- نشست برای مقادیر مختلف u/B برای حالت وجود حفره با عمق مدفون $H/D=2.0$ ۶۷

شکل ۵-۹: تغییرات ظرفیت باربری در مقابل عمق قرارگیری اولین لایه مسلح کننده در حالت خاک حفره‌دار با عمق مدفون $H/D=2.0$ (الف) برای سطوح مختلف نشست $s/B=3\%,6\%,9\%,15\%,20\%$ و (ب) در نقطه گسیختگی ۶۷

شکل ۵-۱۰: تغییرات فشار- نشست پی برای حفره در عمق مدفون $H/D=2.0$ در حالت غیر مسلح ۶۹

شکل ۵-۱۱: تغییرات فشار- نشست پی برای حفره در عمق مدفون $H/D=2.0$ برای (الف) یک لایه، (ب) دو لایه، (ج) سه لایه و (د) چهار لایه مسلح کننده ۷۰

شکل ۵-۱۲: تغییرات فشار-نشست پی در عمق مدفون $H/D=2.0$ در دو دانسیته نسبی (الف) 0.4 و (ب) 0.74 ۷۲

شکل ۵-۱۳: تغییرات ظرفیت باربری در مقابل تعداد لایه‌های تسلیح برای سطوح مختلف نشست $s/B=3\%,6\%,9\%,15\%,20\%$ در دو دانسیته نسبی (الف) 0.4 و (ب) 0.74 ۷۳

شکل ۵-۱۴: تغییرات فشار-نشست پی در دانسیته نسبی 0.74 و در اعماق مختلف مدفون حفره (الف) $H/D=2.5$ و (ب) $H/D=3.0$ (عمق مدفون $H/D=2.0$ در شکل ۵-۱۲-ب نشان داده شده است) ۷۴

شکل ۵-۱۵: تغییرات ظرفیت باربری در مقابل تعداد لایه‌های تسلیح برای سطوح مختلف نشست $s/B=3\%,6\%,9\%,15\%,20\%$ در دانسیته نسبی 0.74 و در اعماق مختلف مدفون حفره (الف) $H/D=2.5$ و (ب) $H/D=3.0$ (عمق مدفون $H/D=2.0$ در شکل ۵-۱۳-ب نشان داده شده است) ۷۴

شکل ۵-۱۶: تغییرات فشار-نشست پی در دانسیته نسبی 0.74 و در اعماق مختلف مدفون حفره و (الف) یک لایه، (ب) دو لایه، (ج) سه لایه و (د) چهار لایه مسلح کننده ۷۶

شکل ۵-۱۷: تغییرات نشست پی روی ماسه مسلح حفره‌دار تحت ترکیب بارگذاری استاتیکی و سیکلی (الف) منحنی سیکل-نشست و (ب) منحنی هیستریزس ۷۷

شکل ۵-۱۸: تغییرات نشست پی روی ماسه غیرمسلح حفره‌دار تحت ترکیب بارگذاری استاتیکی و سیکلی (الف) منحنی سیکل-نشست و (ب) منحنی هیستریزس ۷۸

شکل ۵-۱۹: رفتار عمومی تغییرات نشست پی با تعداد سیکل بارگذاری (الف) شرایط حالت پایدار و (ب) شرایط حالت ناپایدار ۷۹

شکل ۵-۲۰: تغییرات نشست پی با تعداد سیکل بارگذاری برای ماسه غیرمسلح بدون حفره ۸۱

شکل ۵-۲۱: تغییرات نشست پی با تعداد سیکل بارگذاری برای ماسه غیرمسلح حفره‌دار با عمق مدفون
 (الف) $H/D=2.0$ ، (ب) $H/D=2.5$ و (ج) $H/D=3.0$ ۸۲

شکل ۵-۲۲: تغییرات نشست پی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری در $H/D=2.0$ و شدت‌های مختلف
 بارگذاری سیکلی، برای تسلیح با (الف) یک لایه، (ب) دو لایه، (ج) سه لایه و (د) چهار لایه (منحنی‌های
 خط‌چین $U_n.N_v$) مربوط به حالت بستر غیرمسلح بدون حفره می‌باشند). ۸۳

شکل ۵-۲۳: تغییرات نشست پی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری در $H/D=2.5$ و شدت‌های مختلف
 بارگذاری سیکلی، برای تسلیح با (الف) یک لایه، (ب) دو لایه، (ج) سه لایه و (د) چهار لایه (منحنی‌های
 خط‌چین $U_n.N_v$) مربوط به حالت بستر غیرمسلح بدون حفره می‌باشند). ۸۴

شکل ۵-۲۴: تغییرات نشست پی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری در $H/D=3.0$ و شدت‌های مختلف
 بارگذاری سیکلی، برای تسلیح با (الف) یک لایه، (ب) دو لایه، (ج) سه لایه و (د) چهار لایه (منحنی‌های
 خط‌چین $U_n.N_v$) مربوط به حالت بستر غیرمسلح بدون حفره می‌باشند). ۸۵

شکل ۵-۲۵: تغییرات نشست پی در شدت بارگذاری سیکلی روی ماسه مسلح و غیرمسلح در (الف)
 $H/D=2.0$ ، (ب) $H/D=2.5$ و (ج) $H/D=3.0$ ۸۶

شکل ۵-۲۶: تغییرات I_{Δ} در مقابل شدت بارگذاری سیکلی، حفره در عمق مدفون 3D برای تعداد
 سیکلهای مشخص و لایه‌های تسلیح (الف) ۱ لایه، (ب) ۲ لایه، (ج) ۳ لایه و (د) ۴ لایه. ۸۸

شکل ۵-۲۷: تغییرات نشست پی با تغییرات عمق مدفون حفره برای ماسه مسلح و غیرمسلح (الف)
 $q_d/q_u=10\%$ ، (ب) $q_d/q_u=20\%$ و (ج) $q_d/q_u=30\%$ ۸۹

شکل ۵-۲۸: تغییرات I_{Δ} در مقابل اعماق مدفون مختلف حفره و در شدت بار سیکلی $q_d/q_u=20\%$ و در
 تعداد سیکلهای مشخص حاصل از آزمایش برای لایه‌های مختلف تسلیح (الف) ۱ لایه، (ب) ۲ لایه، (ج) ۳
 لایه و (د) ۴ لایه. ۹۰

شکل ۵-۲۹: تغییرات نشست پی با تعداد سیکل بارگذاری برای پی روی ماسه غیرمسلح و مسلح در
 $H/D=2.0$ در شدت بار سیکلی (الف) $q_d/q_u=10\%$ ، (ب) $q_d/q_u=20\%$ و (ج) $q_d/q_u=30\%$ ۹۲

شکل ۵-۳۰: تغییرات نشست پی با تعداد سیکل بارگذاری برای پی روی ماسه غیرمسلح و مسلح در
 $H/D=2.5$ در شدت بار سیکلی (الف) $q_d/q_u=10\%$ ، (ب) $q_d/q_u=20\%$ و (ج) $q_d/q_u=30\%$ ۹۳

شکل ۵-۳۱: تغییرات نشست پی با تعداد سیکل بارگذاری برای پی روی ماسه غیرمسلح و مسلح در
 $H/D=3.0$ در شدت بار سیکلی (الف) $q_d/q_u=10\%$ ، (ب) $q_d/q_u=20\%$ و (ج) $q_d/q_u=30\%$ ۹۳

شکل ۵-۳۲: تغییرات نشست پی در مقابل تعداد لایه‌های تسلیح برای مقادیر مختلف q_d/q_u در (الف)
 $H/D=2.0$ ، (ب) $H/D=2.5$ و (ج) $H/D=3.0$ ۹۴

شکل ۵-۳۳: تغییرات I_{Δ} در مقابل تعداد لایه‌های مختلف تسلیح و $H/D=2.5$ در تعداد سیکلهای
 مشخص در شدت بار سیکلی (الف) $q_d/q_u=10\%$ ، (ب) $q_d/q_u=20\%$ و (ج) $q_d/q_u=30\%$ ۹۵

شکل ۵-۳۴: تغییرشکل حفره در انتهای آزمایش برای حفره واقع در عمق مدفون $H/D=2.0$ ، خاک غیرمسلح و مسلح با ۲ و ۴ لایه برای سه شدت بار سیکلی (الف) $q_d/q_u=10\%$ ، (ب) $q_d/q_u=20\%$ و (ج) $q_d/q_u=30\%$ ۹۷

شکل ۵-۳۵: تغییرشکل حفره در انتهای آزمایش برای خاک مسلح با ۲ لایه برای سه شدت بار سیکلی $q_d/q_u=10\%$ و حفره واقع در اعماق مدفون (الف) $H/D=2.0$ ، (ب) $H/D=2.5$ و (ج) $H/D=3.0$ ۹۷

شکل ۵-۳۶: تعریف پارامترهای مورد نظر برای مقایسه نشست در حالت استاتیکی و سیکلی (الف) بارگذاری استاتیکی و (ب) بارگذاری سیکلی ۹۸

شکل ۵-۳۷: تغییرات نشست تحت اضافه بار سیکلی (s_d/B) و اضافه بار استاتیکی $(\Delta s_s/B)$ برای ماسه غیرمسلح و بدون حفره ۹۸

شکل ۵-۳۸: تغییرات نشست تحت اضافه بار سیکلی (s_d/B) و اضافه بار استاتیکی $(\Delta s_s/B)$ برای ماسه مسلح حفره‌دار با ۲ لایه تسلیح در عمق مدفون (الف) $H/D=2.0$ ، (ب) $H/D=2.5$ و (ج) $H/D=3.0$ ۹۹

شکل ۵-۳۹: تغییرات نشست تحت اضافه بار سیکلی (s_d/B) و اضافه بار استاتیکی $(\Delta s_s/B)$ برای ماسه مسلح حفره‌دار با ۴ لایه تسلیح در عمق مدفون (الف) $H/D=2.0$ ، (ب) $H/D=2.5$ و (ج) $H/D=3.0$ ۱۰۰

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
عرض پی	B
عرض مسلح‌کننده	b
عمق قرارگیری اولین لایه تسلیح	u
فاصله بین لایه‌های تسلیح	h
تعداد لایه‌های تسلیح	N
تعداد بهینه لایه‌های تسلیح	N_{opt}
تعداد سیکل بار	n
سیکل بار حداکثر	n_{cr}
عمق مدفون حفره	H
قطر حفره	D
ارتفاع ناحیه تسلیح زیر پی	d
دانسیته نسبی خاک	D_r
ظرفیت باربری نهایی پی در حالت غیرمسلح	q_u
شدت پیش بارگذاری استاتیکی	q_s
دامنه بار سیکلی	q_d
شدت بار استاتیکی معادل بار سیکلی q_d	Δq_s
تفاضل نشست در بار $q_s + q_d$ به بار q_s	Δs_s
نشست پی تحت بار سیکلی q_d	s_d
ضریب مقیاس	λ
مدول برشی خاک	G
سختی مسلح‌کننده	J

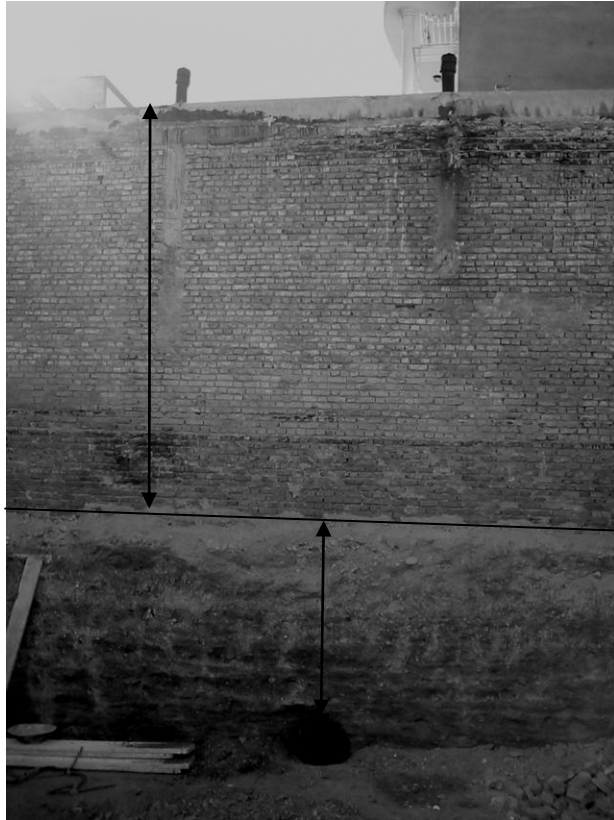
فصل ۱ - پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

در صورت احداث یک سازه روی خاک، وزن ناشی از سازه بصورت اضافه بار از طریق پی به خاک اعمال می‌شود. از اینرو نباید فشار حاصل از بار وارده از پی به خاک از یکطرف از مقاومت ایمن خاک در مقابل گسیختگی تجاوز نماید، و از طرف دیگر باعث نشستهای بیش از حد مجاز برای سازه مورد نظر گردد. به عبارتی گسیختگی برشی خاک زیر پی و یا نشستهای بیشتر از حد مجاز پی، می‌تواند منجر به تغییرشکل زیاد سازه و حتی خرابی آن گردد.

محاسبه ظرفیت باربری نهایی پی‌ها از دیرباز مد نظر بوده و در این بین عوامل و پارامترهای بسیاری از جمله پارامترهای مقاومت برشی خاک، شکل و ابعاد پی، عمق پی، شیب سطح زمین، شیب پی، مایل بودن و یا خروج از مرکزیت بار، سطح آب زیرزمینی، لایه‌بندی خاک و میزان تراکم خاک بر مقدار آن موثر می‌باشند.

در این بین عوامل دیگری نیز وجود دارند که علیرغم موارد کم برخورد با آنها، در موقع حضور، تأثیر بسیاری بر ظرفیت باربری نهایی پی می‌گذارند. از جمله این موارد می‌توان به وجود حفرات زیرزمینی و یا لوله‌های مدفون در خاک اشاره کرد که در صورت مجاورت با پی، ممکن است ظرفیت باربری آن را تحت تأثیر قرار دهند.



شکل ۱-۱: وجود حفرات در زیر بناهای موجود و در حال احداث در تهران

امروزه ساخت بناهای زیرزمینی به شکل گسترده‌ای توسعه یافته است، بطوریکه با توجه به نیازهای روزافزون بشر و با پیشرفت دانش و تکنولوژی، دامنه فعالیت انسان به زیر خاک و حتی در زیر سازه‌های موجود در مناطق شهری رسیده است. در این خصوص نمونه‌های متعددی از سازه‌های واقع بر روی حفره‌ها و تونلها وجود دارد. این حفره‌ها می‌توانند نتیجه فعالیت‌هایی از قبیل اکتشاف معدن و یا حفر تونل باشند. فعالیت‌های مربوط به معادن از دیرباز وجود داشته و حفره‌های زیادی در اثر آنها بوجود آمده است. افزایش جمعیت باعث توسعه زندگی شهری به محلهایی می‌شود که از قبل حفره‌های معادن در آن

مناطق وجود دارند. همچنین در سطح کشور قناتهای زیادی نیز از زمانهای قدیم بجای مانده‌اند که اکنون در محدوده‌های شهری و در زیر سازه‌های سطحی واقع شده‌اند (شکل ۱-۱). علاوه بر اینها، در پاسخ به افزایش جمعیت، نیاز به مترو در مناطق شهری، روز به روز زیادتر می‌شود. فعالیت‌های دیگری از قبیل احداث کانالهای زیرزمینی جهت فاضلاب و یا تأسیسات زیرزمینی نیز از جمله بناهای زیرزمینی هستند. البته ممکن است این حفره‌ها در اثر عوامل طبیعی از قبیل آب شستگی و یا حل شدن بدلیل قرار گرفتن در مسیر جریان آبهای زیرزمینی بوجود بیایند.

هرچند در گذشته، سازه‌های احداث شده بر روی حفره‌ها مانند شکل ۱-۱ کوتاه (بین ۱ تا ۳ طبقه) بوده‌اند و ممکن است عملکرد پی آنها تحت تاثیر حفره‌ها قرار نگیرند، اما با احداث سازه‌های بلندتر و افزایش میزان بار وارده، امکان افزایش تاثیر حفره بر رفتار پی‌ها بیشتر می‌گردد. در هر صورت حفره به هر نحوی بوجود آمده باشد در صورت واقع شدن در حوزه تاثیر پی‌ها از میزان ظرفیت باربری آنها خواهد کاست و این مسئله باید در محاسبه ظرفیت باربری و نشست این گونه پی‌ها مد نظر قرار گیرد.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

هنگامی که طراحی یک پی واقع بر بستر خاکی حاوی حفره مورد نظر باشد، مهندسین ژئوتکنیک ممکن است راه حل‌های مختلفی را برای از بین بردن اثر حفره بر رفتار پی (در صورت وجود اثر) در نظر گیرند. این راه حل‌ها می‌توانند شامل موارد ذیل باشند:

۱. پر کردن حفره با مصالح مناسب باربر،
۲. استفاده از شمع و پل زدن روی حفره بمنظور انتقال بار پی به خاک یا سنگ باربر واقع در پایین تراز کف حفره،
۳. خاکبرداری و قرار دادن پی در تراز پایین حفره و
۴. جابجا کردن محل پی و قرار دادن آن در خارج از ناحیه تاثیر حفره.

از میان راه حل‌های مذکور جابجایی محل پی (راه حل ۴) تنها زمانی ممکن است که فضای کافی موجود باشد. دیگر راه حل‌ها (۱، ۲ و ۳) در اغلب اوقات بطور قابل ملاحظه‌ای پر هزینه، غیرممکن یا غیرعملی می‌باشند. از اینرو استفاده از تسلیح خاک برای کاهش یا خنثی کردن اثر حفره بر ظرفیت باربری و نشست پی‌های واقع بر بستر حاوی حفره می‌تواند به عنوان یک راه حل مناسب، در تحقیق حاضر مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد.

۱-۳- معرفی موضوع

در دهه‌های اخیر مطالعاتی در خصوص پایداری پی‌های واقع بر حفره توسط محققین مختلف انجام شده است (Baus and Wang, 1983; Badie and Wang, 1984; Wang and Hsieh, 1987; Wang et al., 1991). همچنین تسلیح خاک با انواع ژئوسنتتیک‌ها به علت کاربرد نسبتاً ساده و اقتصادی بودن آن توسعه زیادی در مهندسی ژئوتکنیک به خصوص افزایش باربری خاک‌ها یافته است (Shin and Das, 2000; Dash et al., 2004; Yoon et al., 2004; Deb et al., 2005; Ghosh et al., 2005; Patra et al., 2005; Patra et al., 2006; Hufenus et al., 2006; El Sawwaf, 2007; Alamshahi and Hataf, 2009; Bathurst et al., 2009; Sharma et al., 2009; Ghazavi and Alimardani Lavasan, 2008; Nayeri and Fakharian, 2009; Abdi et al., 2009; Moghaddas Tafreshi and Dawson, 2010a; Moghaddas Tafreshi and Dawson, 2010b). در این میان در خصوص مطالعه اثر تسلیح خاک واقع بر روی حفره مطالعات آزمایشگاهی محدودی در حالت بارگذاری استاتیکی انجام شده است (Das and Khing, 1994; Wang et al., 1996; Briancon and Villard, 2008; Sireesh et al., 2009). بدین منظور استفاده از تسلیح خاک روی حفره، می‌تواند ضمن افزایش ظرفیت باربری سیستم، در کاهش اثر حفره بر ظرفیت باربری و نشست پی به میزان قابل توجهی موثر باشد. همچنین استفاده از تسلیح خاک ممکن است، ضمن کاهش یا خنثی نمودن اثر حفره، افزایش باربری و کاهش نشست پی را در مقایسه با حالت بستر خاکی بدون حفره فراهم نماید.

۱-۴- اهداف تحقیق

بطور خلاصه در این تحقیق رفتار پی نواری واقع بر خاک مسلح و غیرمسلح حاوی حفره طویل (طول پی نواری در امتداد محور طولی حفره قرار دارد)، تحت اثر بارگذاری استاتیکی و ترکیب بار استاتیکی و سیکلی (اثر توام بار استاتیکی اولیه و بار سیکلی) با در نظر گرفتن اثر عوامل ذیل مورد نظر است:

۱. اثر دانسیته نسبی خاک
۲. اثر عمق مدفون حفره
۳. اثر تعداد لایه‌های تسلیح
۴. بررسی اثر شدت بار سیکلی بر میزان نشست پی
۵. بررسی اثر تعداد سیکل بارگذاری
۶. مقایسه میزان نشست پی در دو حالت بارگذاری سیکلی و بارگذاری استاتیکی در یک میزان مشخص بار

۱-۵- دامنه، قلمرو و محدودیت‌های تحقیق

در این تحقیق اهمیت و کاربرد تسلیح خاک با ژئوگرید برای پی‌های مستقر بر خاک حفره‌دار تحت اثر بارهای استاتیکی و ترکیب بارهای استاتیکی و سیکی مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه نتایج حاصل از این تحقیق قابل اهمیت می‌باشند، اما مانند هر مطالعه آزمایشگاهی دامنه کاربرد نتایج محدود به شرایط مورد نظر در آزمایش‌ها می‌باشد. بدین منظور توجه به نکات ذیل ضروری می‌باشد:

۱. نتایج تجربی حاصل از این تحقیق، تنها برای یک نوع ژئوگرید، یک نوع ماسه، یک اندازه عرض پی و یک اندازه قطر حفره بدست آمده است.

۲. نتایج حاصل از آزمایش‌ها بر اساس آزمایش روی یک پی نواری کوچک مقیاس مستقر بر خاک مسلح حفره‌دار پیوسته، در حالت کرنش مسطح بدست آمده است. برای شرایط دیگر از قبیل پی‌های مربع و دایره‌ای با ابعاد بزرگتر واقع بر بستر خاکی حاوی حفره، یک مدل فیزیکی سه بعدی می‌تواند نتایج بهتری ارائه کند.

۳. اگرچه Adams and Collin (1997) و Milligan (1986) در مطالعات انجام شده بر روی مدل‌های بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس روی ماسه‌های مسلح شده با ژئوگرید دریافتند که مکانیزم رفتار در مدل کوچک مقیاس، شباهت زیادی با مدل بزرگتر دارد، با این وجود انجام آزمایش‌های بیشتر برای پی و حفره با اندازه، شکل و عمق مختلف و همچنین ژئوگرید با مشخصات فیزیکی و مکانیکی متفاوت و در مقیاس بزرگ مفید خواهد بود.

۴. با این حال، برای انطباق مدل آزمایشگاهی با شرایط بزرگ مقیاس، ارائه نتایج بصورت بدون بعد بسیار مفید می‌باشد. بطور کلی می‌توان با افزایش سختی مسلح کننده و افزایش مدول برشی خاک (اثر مقیاس) نتایج حاصل از مدل کوچک مقیاس را به نتایج مدل بزرگ مقیاس تعمیم داد.

۵. هر چند ممکن است نتایج این تحقیق در عمل متفاوت با رفتار پی بزرگ مقیاس باشد، ولی می‌توان انتظار داشت روند کلی مشابه‌ای داشته باشند.

این مطالعه با هدف بدست آمدن درک و بینش کلی نسبت به رفتار یک پی نواری تحت بار سیکی روی خاک مسلح حفره‌دار انجام شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند برای طراحی یک مدل بزرگ مقیاس، انجام مطالعات عددی و درک مفاهیم در مقیاس بزرگ بسیار مفید باشد.