

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر حفره بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی مستقر بر خاک دانه‌ای

سید ناصر مقدس تفرشیⁱ؛ بهزاد حیدری علی کمرⁱⁱ

چکیده

حفرات زیرزمینی ممکن است به علل مختلفی از قبیل حفاری‌های زیرزمینی نظیر تونل، شبکه‌های آب و فاضلاب، گاز و یا مجاری قنات‌های قدیمی به وجود آیند. وجود هر یک از این عوامل می‌تواند بر ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر سطح خاک تاثیر بسزایی داشته باشد. برای بررسی و شناخت هر چه بهتر این تاثیرات، یک مدل فیزیکی؛ که قادر به بررسی این اثر باشد، به وسیله مؤلفان در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی طراحی و ساخته شد. بخش اصلی این مدل، یک تانک آزمایش برای ایجاد حفره، ترانشه خاک با دانسیته نسبی مطلوب و مدل پی می‌باشد. یک سری آزمایش تحت شرایط بار استاتیکی وارد بر پی به وسیله مدل فوق به منظور بررسی اثر پارامترهای اصلی نظیر دانسیته نسبی خاک، عمق مدفون حفره، خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره انجام شد. براساس نتایج حاصل، یک ناحیه بحرانی زیر پی وجود دارد، که در صورت قرارگیری حفره داخل این ناحیه، پایداری و ظرفیت باربری پی به میزان قابل توجهی تحت تاثیر قرار گرفته و باید این تاثیر بر ظرفیت باربری پی در نظر گرفته شود.

کلمات کلیدی

مدل فیزیکی، حفره زیرزمینی، ظرفیت باربری، نشست، پی سطحی

Experimental Study on Effect of Void on Bearing Capacity of Shallow Foundation above Sand

S.N. Moghaddas T; B. Heydari A .K.

ABSTRACT

Underground voids can be created by different reasons such as tunneling, mining, water and gas networks and old conduits. The existence of above factors can affect the bearing capacity of shallow foundations. To study the behavior of strip foundation located above a continuous void in sand, a new physical model was developed in K.N.Toosi University of Technology. The experiments were performed in a test tank, which accommodates the soil with desired density, model void and footing. A series of different tests were carried out to study the effect of relative density of soil, embedded depth of void and eccentricity of footing against the void. The results of the tests indicate that, there is a critical region under the footing. Only when the void is located within this region, the stability and bearing capacity of the footing will be significantly affected by presence of the void and the magnitude of this effect must be considered.

KEYWORDS

Physical model, underground void, bearing capacity, settlement, shallow foundation

ⁱ استادیار دانشکده مهندسی عمران؛ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی: nas_moghaddas@kntu.ac.ir

ⁱⁱ کارشناس ارشد مهندسی عمران؛ دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی: b_heydari160@yahoo.com



استفاده از روش اجزای محدود و مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. در این مطالعات، ظرفیت باربری و نشست پی‌های نواری واقع بر روی حفرات استوانه‌ای، به منظور بررسی اثر عمق مدفون حفره تحلیل شد. بر این اساس نتیجه گرفتند که وقتی حفره به پی نزدیک است، حداکثر تنش قابل تحمل پی علاوه بر کاهش، در نشست کمتری اتفاق می‌افتد.

(Wang & Badie, 1984) یک برنامه کامپیوتری با استفاده از روش اجزای محدود به صورت سه بعدی تهیه کردند و به وسیله آن، ضمن بررسی رفتار پی‌های منفرد مربع واقع بر خاک رس شامل حفره پیوسته دایره‌ای، اثرات شکل پی و اندازه آن، ابعاد حفره و موقعیت آن نسبت به محور پی را بر روی رفتار پی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای یک D/B مشخص، با افزایش خروج از مرکزیت، میزان ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. ولی این افزایش، هنگام قرارگیری حفره در نزدیک محوری، کم است و با افزایش مقدار e/B ، نرخ تغییر در ظرفیت باربری ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و در نهایت به صفر می‌رسد. همچنین تاثیر خروج از مرکزیت، هنگام نزدیکی حفره به کف پی (عمق مدفون کمتر حفره) بیشتر می‌باشد.

(Mir Mohammad H. & Moghaddas T., 2000, 2002) ضمن بررسی آزمایشگاهی اثر بارگذاری سطحی سیلکی قائم بر رفتار لوله‌های مدفون در خاک دانه‌ای، تاثیر پارامترهای مختلف نظیر دانسیته نسبی خاک، عمق مدفون لوله، شرایط مرزی، شدت و تعداد سیکل‌های بار و خروج از مرکزیت بار را بر این رفتار بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش عمق مدفون لوله و خروج از مرکزیت بار نسبت به لوله و همچنین ایجاد شرایط مرزی نسبتاً صلب در نزدیکی لوله، میزان خسارت و تغییر شکل لوله به نحو موثری کاهش می‌یابد.

۳- دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش شامل سه قسمت اصلی تانک آزمایش، سیستم آماده‌سازی نمونه و سیستم بارگذاری است. شکل (۱) نمای کلی از دستگاه و متعلقات آن را نشان می‌دهد. در ادامه شرح مختصری از قسمت‌های مختلف دستگاه آزمایش ارائه می‌شود.

۳-۱- سیستم بارگذاری

سیستم بارگذاری شامل قاب اصلی، سیلندرهای پنوماتیک، کمپرسور هوا و واحد کنترل بارگذاری است. قاب اصلی از دو ستون با مقطع قوطی به ارتفاع 1600 mm و یک تیر صلب در بالا به طول 1270 mm تشکیل شده است. ستون‌های قائم بر

امروزه 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 به شکل گسترده‌ای توسعه یافته است. در این خصوص نمونه‌های متعددی از سازه‌های واقع بر روی حفره‌ها و تونل‌ها وجود دارد. این حفره‌ها ممکن است به علت ساخت تونل‌ها برای تردد شهری، احداث کانال‌های زیرزمینی برای فاضلاب و تاسیسات زیرزمینی و یا قنات‌های قدیمی ایجاد شده باشند، که در هر صورت میزان ظرفیت باربری پی‌های نزدیک به خود را به میزان قابل ملاحظه تحت تاثیر قرار می‌دهند و این موضوع باید در محاسبات ظرفیت باربری پی‌ها مد نظر قرار گیرند.

تاکنون هیچ رابطه‌ای به طور عمومی برای محاسبه ظرفیت باربری پی بر روی خاک شامل حفره ارائه نشده است که از مقبولیت عمومی برخوردار باشد. البته روابطی را برخی محققین ارائه کرده‌اند، که به گفته خود آنها دامنه کاربرد این روابط به زمینه مطالعات مورد نظر محدود می‌شود. به دلیل وسعت مطلب و تعدد پارامترها، کارهای آزمایشگاهی و حتی عددی انجام شده در این زمینه، هیچگاه نتوانسته‌اند همه پارامترهای موثر را به طور کامل لحاظ کنند، از این رو نتایج آنها نیز با محدودیت‌های زیادی همراه بوده است. به همین دلیل انجام یک سری مطالعات آزمایشگاهی و عددی برای بررسی بیشتر و دقیق‌تر این مساله ضروری به نظر می‌رسد.

در این تحقیق، به منظور روشن شدن جنبه‌های مختلف اثر حفره بر ظرفیت باربری پی‌ها، یک مدل فیزیکی؛ که قادر به بررسی این اثر باشد، طراحی و ساخته شد. تعداد ۴۴ آزمایش به منظور مطالعه نحوه تاثیر عوامل مختلف نظیر دانسیته نسبی خاک، عمق مدفون حفره و میزان خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره بر ظرفیت باربری تحت شرایط بار استاتیکی وارد بر پی به وسیله مدل فوق انجام گردید. در ادامه تشریح مدل فیزیکی و نتایج آزمایش‌ها ارائه خواهد شد.

۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

طبق بررسی‌های انجام شده، مطالعات در زمینه رفتار پی‌ها واقع بر حفرات زیرزمینی بسیار محدود و عمدتاً بر روی خاک‌های رسی متمرکز است که به بعضی از آنها به اختصار اشاره می‌شود:

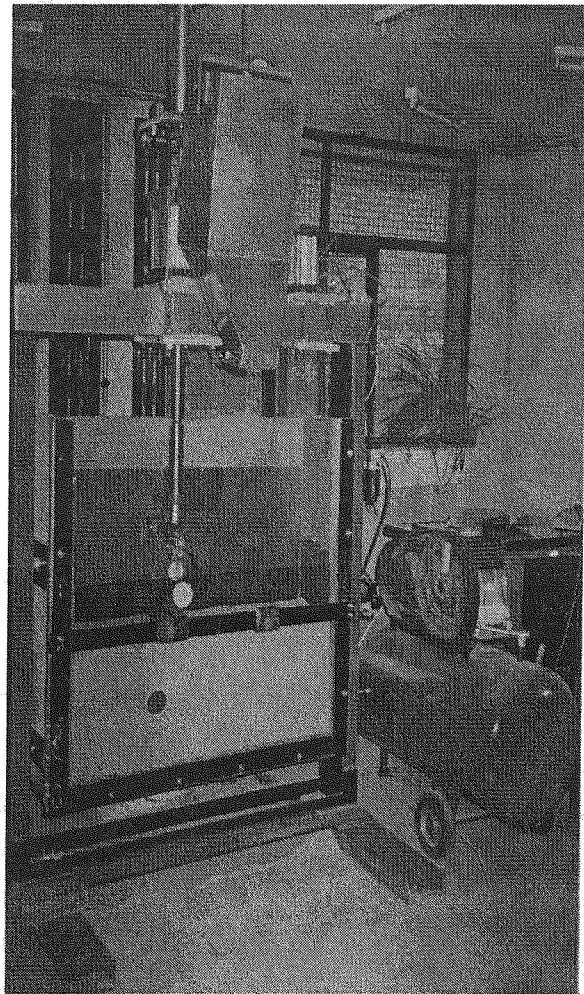
(Baus & Wang, 1983) پایداری پی نواری را بر روی یک حفره طویل با شکل مقطع دایره در یک لایه خاک همگن رسی با

انتخاب شد که قابلیت جدا شدن از تانک را داشته باشد. تامین صلیبیت کافی در وجه جلویی، با استفاده از نصب یک پشت‌بند فلزی در وسط آن، ایجاد شد. از آنجا که آماده‌سازی نمونه به منظور ایجاد یکنواختی خاک اطراف حفره با قراردادن تانک آزمایش در حالت افقی انجام می‌شود، بنابراین تانک آزمایش از طریق دو محور افقی متصل شده به قاب اصلی، قابلیت قرارگیری در دو حالت افقی و قائم را دارد.

۳-۳- سیستم بارش و نحوه آماده‌سازی ترانشه

روش استفاده شده برای آماده سازی ترانشه خاکی در برگزیده حفره، با تراکم یکنواخت و مشخص و قابلیت تکرار در تانک آزمایش، براساس کارهای (Koulbuszewski, 1948) استوار است، که روش بارش نامیده می‌شود. مخزن بارش به ابعاد مقطع ۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴۵۰ میلی‌متر است که در قسمت پایینی آن یک قیف به صورت مایل با ابعاد انتهایی ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر تعبیه شده است تا امکان پر کردن قسمت‌های میانی تانک آزمایش در هنگام بارش ماسه فراهم شود. در قسمت انتهایی قیف مذکور یک دریچه کشویی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر طراحی شد، تا امکان نصب صفحات مشبک مختلف برای کنترل نرخ بارش ماسه و همچنین نصب درب تحتانی مخزن فراهم شود. سیستم بارش، بر حسب ارتفاع بارش و نوع صفحات مشبک، به منظور آماده سازی ترانشه با تراکم‌های مختلف کالیبره شده است. برای ایجاد ترانشه مورد نظر قبل از انجام عمل بارش ماسه، تانک آزمایش به حالت افقی درمی‌آید، سپس ضمن قراردادن مدل حفره در تانک، با استفاده از یک تخته چوبی، ارتفاع ترانشه خاک؛ که تابعی از عمق مدفون برای حفره موردنظر است، تنظیم می‌شود. برای ایجاد حفره نیز از یک لوله پلاستیکی بسیار نازک و با انعطاف‌پذیری زیاد به قطر ۱۰۰ میلی‌متر استفاده می‌شود (با توجه به ضخامت کم این لوله‌ها که حدود ۱/ میلی‌متر است و جنس آنها می‌توان از سختی خمشی و محوری آنها صرفنظر کرد و وضعیت حاصل را به عنوان حفره در نظر گرفت) که قبل از بارش ماسه به صورت قائم در داخل تانک و در محل مورد نظر قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه امتداد بارش در امتداد محور حفره است، بنابراین نحوه بارش برای آماده سازی ترانشه، اثر محسوس بر تغییر شکل حفره (عدم وجود تغییر شکل حفره) ندارد. ذکر این نکته لازم است که به منظور عدم تماس دو انتهای لوله با دو طرف تانک، دو انتهای آن از داخل نوار فوم چسبانده می‌شود. همچنین برای جلوگیری از پر شدن حفره حین بارش ماسه، قسمت باز بالای آن به وسیله یک نایلون پلاستیکی پوشانده می‌شود.

روی دو تیر افقی مستقر بر زمین از همان مقطع به طول ۱۳۰۰ mm قرار گرفتند، تا پایداری سیستم تامین شود. تیر افقی بالایی، تکیه‌گاه سیلندرهای بارگذاری محسوب می‌شود و دو سیلندر بارگذاری با قطرهای موثر ۸۰ و ۱۶۰ میلی‌متر که به وسیله یک سیستم ساده (مارپیچ و فلکه) قابلیت جابجایی در طول تیر را دارند، برای بارگذاری در محدوده‌های مختلف بار بر روی تیر افقی قرار گرفته‌اند. واحد کنترل بارگذاری شامل یک واحد مکانیکی (برای تنظیم فشار هوای ورودی) و واحد فرمان دهنده الکترونیکی است، به طوری که سیلندرهای پنوماتیک مذکور، با توجه به تنظیمات قابل انجام در واحد کنترل، قابلیت انجام بارگذاری استاتیکی و تناوبی، با دامنه بار تا ۲ تن و فرکانس تا ۱ هرتز دارند.



شکل (۱): نمای کلی دستگاه آزمایش

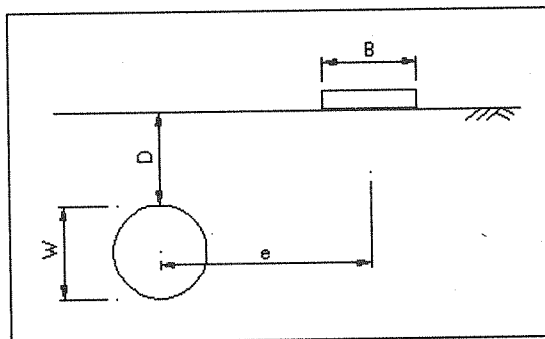
۳-۲- تانک آزمایش

تانک آزمایش به صورت صلب و از مصالح فولادی به ابعاد ۲۲۰×۱۰۰×۱۰۰ mm ساخته شده است. برای مشاهده و کنترل آزمایش و همچنین آماده سازی نمونه، وجه جلویی تانک از جنس پلاستیک شفاف (Plexy Glass) به ضخامت ۲۰ mm

۲و۱/۵و۱	۱	۳	۰
۲و۱/۵و۱	۲	۳	۰
۱/۵و۱	۳	۲	۰

جدول (۲): آزمایش های انجام شده در خاک شل

عمق مدفون حفره (D/B)	خروج از مرکزیت حفره نسبت به پی (e/B)	تعداد آزمایش اصلی	تعداد تکرار (علاوه بر آزمایش اولیه)
--	--	۱	۴
۱	۰	۱	۰
۱/۵	۰	۱	۲
۲/۵و۲	۰	۲	۰
۱/۵و۱	۱	۲	۰
۲	۱	۱	۲
۲و۱/۵و۱	۲	۳	۰
۲و۱/۵و۱	۳	۲	۰
۱/۵و۱	۴	۲	۰



شکل (۲): طرح کلی آزمایش های انجام شده (W/B=۱) برای تمامی آزمایش ها

۶- نتایج آزمایش ها

مکانیزم گسیختگی خاک زیر پی در حالت عدم وجود حفره تابعی از نوع خاک و تراکم آن است؛ اما در صورت وجود حفره با ابعاد مشخص، این مکانیزم علاوه بر نوع خاک و تراکم آن، به عمق مدفون حفره و خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره بستگی دارد. برای ارزیابی تاثیر حفره بر ظرفیت باربری پی های سطحی، ابتدا ظرفیت باربری پی واقع بر خاک ماسه ای متراکم و شل در حالت بدون حفره، $q_{u(novoid)}$ و سپس در حالت وجود حفره، $q_{u(void)}$ از طریق آزمایش به دست آمد و به منظور درک بهتر از میزان تاثیر حفره، پارامتر بدون بعد ظرفیت باربری R_{BC} ، مطابق رابطه (۱) بیان شد:

پس از بارش ماسه و پر شدن تانک، روی نمونه با یک خطکش فلزی صاف شده و وجه شیشه ای در محل خود نصب می شود. در نهایت، تانک آزمایش به آرامی دوران داده می شود و به حالت قائم درمی آید. سپس با قراردادن مدل پی (صفحه فولادی) به عرض ۱۰۰ میلی متر، طول ۲۱۰ میلی متر (در امتداد محور حفره) و ضخامت ۲۰ میلی متر در محل مورد نظر، سیستم آماده انجام بارگذاری می شود.

۴- مصالح استفاده شده در آزمایش

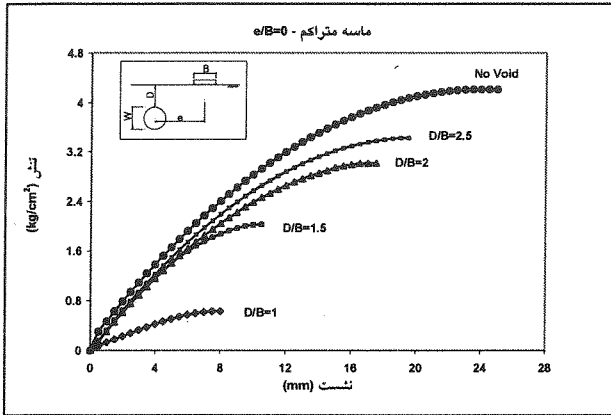
مصالح استفاده شده در این برنامه آزمایشی یک نوع ماسه یکنواخت با کانی واحد و از سنگ سیلیس طبیعی معدن فیروزکوه است که به وسیله شرکت تاوان سیلیس در اندازه های مختلف تهیه شده اند. این ماسه، دانه بندی یکنواخت دارد و اندازه ذرات بین ۰/۲۵ و ۰/۸ میلی متر و $D_{60}=۰/۶۴$ است. ضریب خمیدگی و یکنواختی آن به ترتیب $C_u=۱/۵۱$ و $C_c=۱/۲۹$ ، توده ویژه $G_s=۲/۶۷$ و ماکزیمم و مینیمم تخلخل به دست آمده در آزمایشگاه به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۵۵ می باشند.

۵- آزمایش های انجام شده

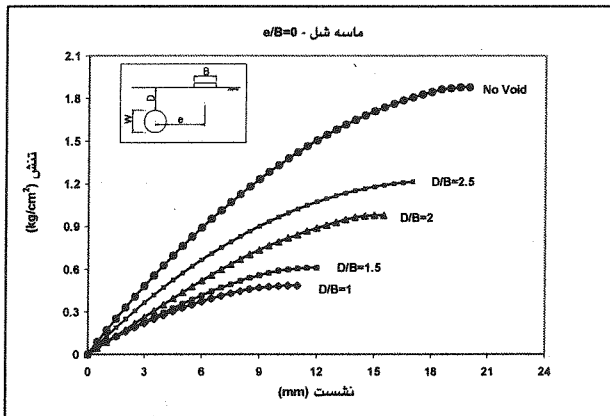
پارامترهای بررسی شده در این تحقیق عبارتند از: دانسیته نسبی خاک (D_r)، عمق مدفون حفره (D)، خروج از مرکزیت حفره نسبت به پی (e). به منظور بررسی اثر عوامل مذکور، ۴۴ آزمایش انجام شد، ۲۹ آزمایش به صورت مستقل (۱۶ آزمایش در خاک شل و ۱۳ آزمایش در خاک متراکم)، ۱۲ آزمایش به منظور بررسی تکرارپذیری و کنترل صحت عملکرد سیستم و ۳ آزمایش نیز برای مشاهده سطوح گسیختگی و با استفاده از ماسه رنگی همراه با فیلم برداری انجام شده است. جداول (۱) و (۲) به ترتیب برنامه آزمایش ها در خاک متراکم ($D_r=۷۱/۶\%$) و شل ($D_r=۲۴/۵\%$) و شکل (۲) طرح کلی آزمایش ها و پارامترهای مورد نظر را نشان می دهند.

جدول (۱): آزمایش های انجام شده در خاک متراکم

عمق مدفون حفره (D/B)	خروج از مرکزیت حفره نسبت به پی (e/B)	تعداد آزمایش اصلی	تعداد تکرار (علاوه بر آزمایش اولیه)
--	--	۱	۳
۱	۰	۱	۰
۱/۵	۰	۱	۲
۲	۰	۱	۱
۲/۵	۰	۱	۱



(الف)



(ب)

شکل (۴): منحنی‌های فشار-نشست برای D/B های مختلف با $e/B=0$
(الف) خاک متراکم و (ب) خاک شل

۶-۱- تأثیر خروج از مرکزیت

شکل (۵) تغییرات نسبت ظرفیت باربری پی R_{BC} ، در مقابل تغییرات نسبت e/B برای مقادیر مختلف D/B در ماسه متراکم و شل را نشان می‌دهد. در هر دو حالت ماسه متراکم و شل، برای یک D/B ثابت، با افزایش خروج از مرکزیت حفره نسبت به پی، میزان R_{BC} نیز افزایش می‌یابد، تا در نهایت با رسیدن نسبت (e/B) به مقدار $(e/B)_{cr}$ ، مقدار R_{BC} برابر یک می‌شود. به علاوه، ملاحظه می‌شود نرخ افزایش R_{BC} ، در اثر ازدیاد خروج از مرکزیت، برای D/B های کوچک‌تر، به خصوص در ماسه متراکم بیشتر از D/B های بزرگ‌تر است.

مطابق شکل (۵) برای ماسه متراکم، مقدار $(e/B)_{cr}$ برای پی سطحی واقع بر حفره با $D/B=1\sim 2$ ، تقریباً ۳ برابر عرض پی است؛ لذا رعایت حداقل فاصله خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره برابر ۳ توصیه می‌شود.

برای ماسه شل، $(e/B)_{cr}$ مقدار بزرگ‌تری دارد؛ ولی با افزایش عمق مدفون حفره (D/B) مقدار آن کاهش می‌یابد.

براین اساس، محدوده تأثیر حفره بر ظرفیت باربری پی در

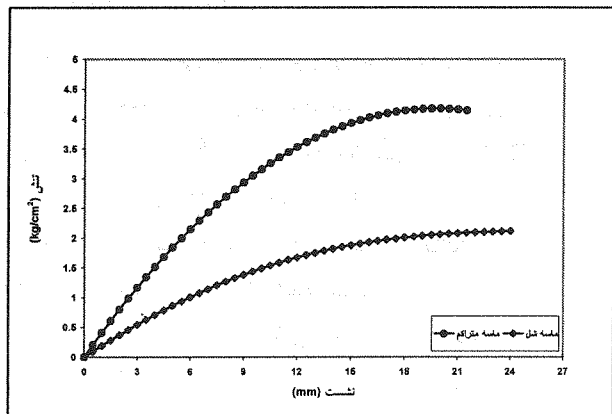
$$R_{BC} = \frac{q_{u(void)}}{q_{u(novoid)}} \quad (1)$$

شکل (۳) منحنی‌های فشار-نشست برای حالت بدون حفره در دو خاک متراکم و شل را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، پی واقع بر خاک متراکم، بار نهایی به مراتب بیشتری نسبت به پی واقع بر خاک شل، تحمل می‌کند. در خاک متراکم، با افزایش بار، میزان نشست افزایش پیدا می‌کند و وقتی مقدار بار به مقدار نهایی خود رسید، خاک زیر پی به صورت ناگهانی گسیخته می‌شود و سطح گسیختگی ضمن تشکیل کامل تا سطح ترانشه ادامه پیدا می‌کند (گسیختگی در اثر برشی کلی). در این زمان ضمن کاهش مقدار بار به صورت ناگهانی، مقدار نشست به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند.

در ماسه شل، با افزایش بار، مقدار نشست افزایش پیدا می‌کند و با نزدیک شدن بار به مقدار نهایی خود، شیب منحنی بار-نشست به تدریج کمتر و منحنی به خط افقی نزدیک‌تر می‌شود، به طوری که با افزایش مقدار جزئی بار، نشست زیادی در پی اتفاق می‌افتد. در این حالت، سطوح گسیختگی بطور کامل تشکیل نمی‌شود (گسیختگی برشی موضعی).

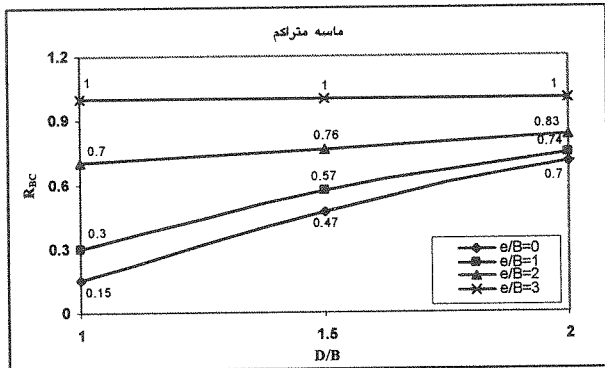
شکل (۴) نشان دهنده منحنی‌های فشار-نشست تیپ برای

پی به عرض $B=100\text{ mm}$ ، واقع بر روی حفره‌ای با عمق‌های مدفون $(D/B=1, 1/5, 2, 2/5)$ و بدون خروج از مرکزیت نسبت به پی $(e/B=0)$ در خاک متراکم و شل می‌باشد. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که وجود حفره، ظرفیت باربری پی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و میزان این تأثیر به فاصله پی تا حفره بستگی دارد، به طوری که وقتی حفره به پی نزدیک است (D/B) کوچک، حداکثر تنش قابل تحمل ضمن کاهش، در نشست کمتری نیز اتفاق می‌افتد؛ زیرا در این حالت خاک زیر پی تا روی حفره یک لایه نازک می‌باشد و فقط مقدار کمی کرنش برشی تا قبل از گسیختگی می‌تواند از خود نشان دهد.

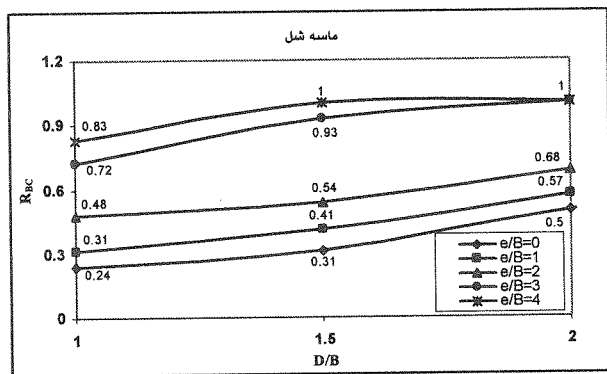


شکل (۳): منحنی‌های فشار-نشست برای پی واقع بر خاک متراکم و شل در حالت بدون حفره

این حالات با توجه به فاصله زیاد پی تا حفره (زیاد بودن e/B)، حفره تاثیر قابل ملاحظه ای بر ظرفیت باربری نداشته و رفتار پی به سمت رفتار پی واقع بر خاک بدون حفره میل می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل (۶): تغییرات ظرفیت باربری با تغییرات نسبت D/B برای نسبت های مختلف e/B : (الف) خاک متراکم، (ب) خاک شل

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت، برای یک خروج از مرکزیت معین، در صورتی که فاصله کف پی تا روی حفره (D/B) از یک مقدار مشخصی بیشتر شود، می‌توان از تاثیر حفره بر ظرفیت باربری پی صرفنظر کرد. این مقدار از (D/B)، همان $(D/B)_{cr}$ است و با افزایش e/B مقدار آن کاهش می‌یابد.

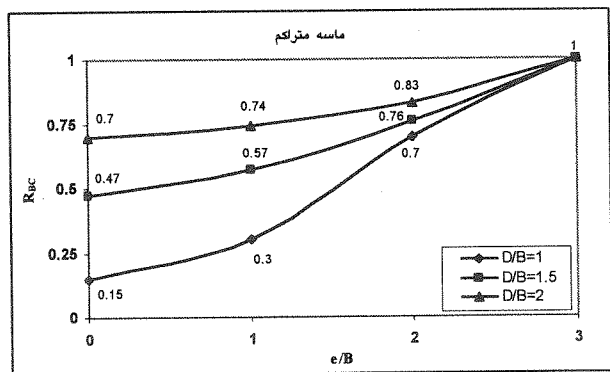
۶-۳- تاثیر تراکم خاک

به منظور بررسی میزان تاثیر تراکم خاک بر ظرفیت باربری پی واقع بر حفره، مقادیر ظرفیت باربری نهایی q_u ، و نسبت ظرفیت باربری R_{BC} ، در ماسه متراکم ($D_r=71/6\%$) و شل ($D_r=24/5\%$) برای مقادیر مختلف عمق مدفون و در حالت عدم خروج از مرکزیت حفره نسبت به پی ($e/B=0$) به ترتیب در شکل (۵-۷-الف) و (ب) ارائه شده است.

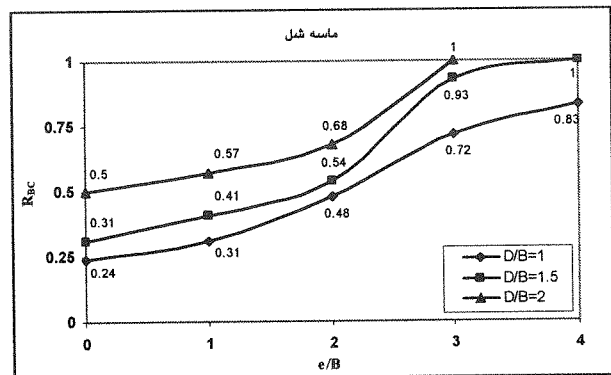
مطابق شکل (۷-الف)، وقتی عمق مدفون حفره خیلی کم است ($D/B=1$ و $e/B=0$)، مقادیر ظرفیت باربری نهایی پی در ماسه متراکم و شل تفاوت چندانی ندارند.

ماسه شل، سطح وسیع‌تری در مقایسه با ماسه متراکم دارد. این امر بدان علت است که در ماسه شل، امکان جابجایی توده‌های خاک بیشتر است، از این رو در اثر بارگذاری محدوده وسیع‌تری از خاک تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت در صورتی که فاصله مرکز پی تا مرکز حفره e/B ، برای عمق‌های مدفون مورد نظر، بیش از مقدار $(e/B)_{cr}$ باشد، می‌توان از اثر حفره بر ظرفیت باربری پی صرفنظر کرد.



(الف)



(ب)

شکل (۵): تغییرات ظرفیت باربری با تغییرات نسبت e/B برای نسبت های ثابت D/B : (الف) خاک متراکم، (ب) خاک شل

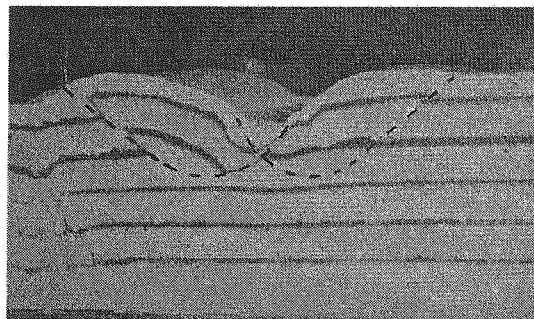
۶-۴- تاثیر عمق مدفون

شکل (۶) تغییرات نسبت ظرفیت باربری R_{BC} ، در مقابل تغییرات نسبت D/B را برای مقادیر مختلف از e/B در ماسه متراکم و شل نشان می‌دهد. مطابق شکل (۶) ملاحظه می‌شود، برای یک e/B مشخص، صرفنظر از تراکم خاک، ظرفیت باربری با افزایش عمق مدفون حفره افزایش می‌یابد. این امر به علت عملکرد قوسی مناسب تر خاک اطراف حفره (Arching) با افزایش عمق مدفون و انتقال تنش به کناره‌ها است.

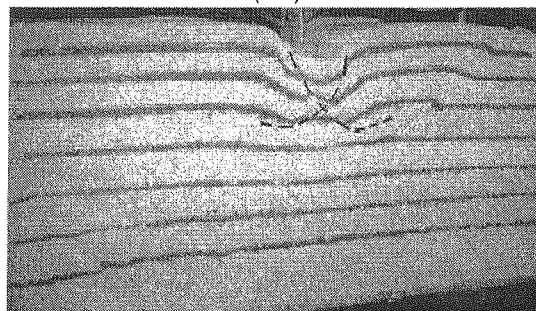
از طرفی ملاحظه می‌شود، روند افزایش R_{BC} ، برای مقادیر بالای e/B (به خصوص در ماسه متراکم) کندتر است؛ زیرا در

۷- مکانیسم گسیختگی

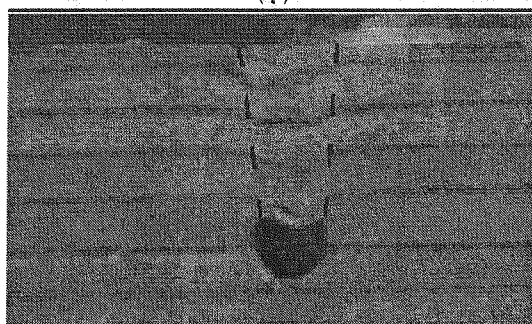
شکل (۸) سطوح گسیختگی برای حالت بدون حفره در ماسه شل و برای حالات با حفره و بدون حفره در ماسه متراکم را (با استفاده از ماسه لایه‌بندی شده با ماسه رنگی) نشان می‌دهد.



(الف)



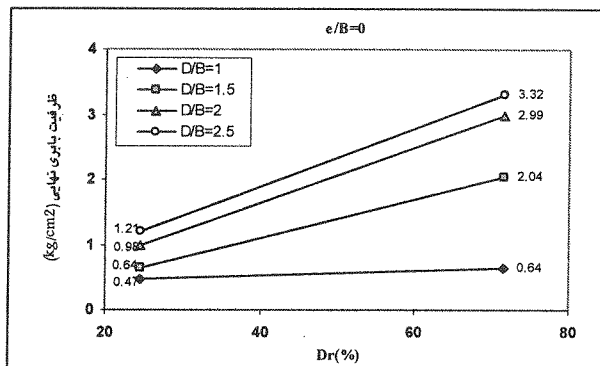
(ب)



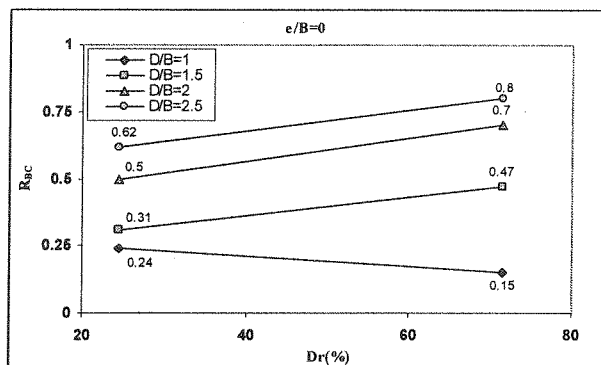
(ج)

شکل (۸): سطوح گسیختگی در سه حالت: (الف) ماسه متراکم، (ب) ماسه شل، (ج) ماسه متراکم با وجود حفره

ملاحظه می‌شود، برای ماسه متراکم و در حالت بدون حفره سطح خاک مجاور پی تا فاصله‌ای از کناره‌های پی بالا آمده و متورم می‌شود و شبکه گسیختگی به طور کامل تشکیل شده است (شکل ۸-الف)؛ اما در ماسه شل، بخشی از خاک زیر پی (گوه مثلثی)، همراه پی به زمین فرورفته و تقریباً حالت پانچ در خاک رخ داده است، به طوری که تورم خاک و تشکیل شبکه کامل گسیختگی مانند حالت ماسه متراکم منتفی و مبین حالت گسیختگی بین حالت پانچ تا موضعی است (شکل ۸-ب). در حالت ماسه متراکم با وجود حفره (شکل ۸-ج)، عمدتاً خاک زیر پی (بالای حفره) تحت تاثیر قرار گرفته است و رفتاری تقریباً



(الف)



(ب)

شکل (۷): تاثیر دانسیته نسبی خاک بر ظرفیت باربری پی برای حفره با $e/B=0$ و نسبت های مختلف D/B (الف) q_u ، (ب) R_{BC}

این امر با توجه به مکانیزم گسیختگی و سطح تحت تاثیر بارگذاری در ماسه متراکم (بدون حفره و با حفره) قابل توجیه است؛ زیرا در عمق مدفون کم، به دلیل قرارگیری حفره داخل گوه مثلثی زیر پی، ماهیت گسیختگی شبیه حالت گسیختگی پانچ می‌شود، بنابراین در ماسه متراکم و در عمق مدفون کم به دلیل تبدیل نوع گسیختگی از حالت کلی (در حالت بدون حفره) به گسیختگی پانچ (در حالت حفره کم عمق) ظرفیت باربری به میزان قابل ملاحظه ای کاهش یافته و نزدیک به حالت خاک شل عمل می‌کند؛ اما با افزایش D/B ، میزان ظرفیت باربری پی در ماسه متراکم به مراتب بیشتر از ماسه شل است، به طوری که با افزایش عمق مدفون، نسبت آن در ماسه متراکم به ماسه شل زیاد می‌شود؛ اما در ماسه شل، به دلیل ماهیت گسیختگی از نوع پانچ (در حالت با حفره و بدون حفره)، میزان تاثیر نزدیکی پی به حفره از نظر عمق قرارگیری مانند حالت ماسه متراکم، شدید نیست؛ زیرا در هر صورت مکانیزم گسیختگی پانچ حاکم است. این موضوع با توجه به شکل (۷-ب) و مقایسه مقادیر R_{BC} در ماسه متراکم و شل نیز قابل ملاحظه است.

Badie, A.; Wang, M. C.; "Stability of Spread Footings above Void in Clay", Journal of Geotechnical eng., vol. 110, No. 11 pp. 1591-1604, 1984.

Kolbuzewski, J.; "An experimental study on the maximum and minimum porosities of sands", Proc. of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, vol. I, p.p.158-165, 1948.

Mir Mohammad Hosseini, S. M.; Moghaddas Tafreshi, S. N.; "A New Physical Model to Study the Behavior of Buried Pipes under Cyclic Load Condition", Proc. of the 12th World Conf. on Earthquake Eng., Rocketbyte Information System: Auckland New Zealand, P.No. 0889 2000.

Mir Mohammad Hosseini, S.M.; Moghaddas Tafreshi, S. N.; "Soil-Structure Interaction of Embedded Pipes Under Cyclic Loading Conditions", International Journal of Engineering, vol. 15 No. 2, p.p. 117-124, 2002.

- [۲] مشابه گسیختگی پانچ در خاک‌های شل دارد. به عبارتی، وجود حفره در زیر پی مکانیسم گسیختگی را از حالت برش کلی به برش پانچ تبدیل می‌کند. بدیهی است با افزایش خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره و کم شدن تاثیر حفره بر پی مکانیسم گسیختگی در خاک متراکم به مکانیسم گسیختگی کلی تبدیل می‌شود.

[۳]

۸- نتیجه

مولفان، با هدف بررسی تاثیر حفره زیرزمینی بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی، یک مدل فیزیکی را طراحی کرده و ساختند. ترانشه خاک (شامل حفره) و مدل پی در تانک آزمایش آماده شده و با تغییر موقعیت مدل پی نسبت به حفره در تانک آزمایش، ضمن بررسی نحوه گسیختگی و تعیین ظرفیت باربری نهایی، تاثیر عمق مدفون حفره و خروج از مرکزیت آن نسبت به پی بر روی خاک ماسه ای با دو دانسیته نسبی متراکم و شل با انجام ۴۴ آزمایش مطالعه شد.

براساس نتایج حاصل، یک ناحیه بحرانی زیر پی وجود دارد که در صورت قرارگیری حفره داخل این ناحیه، پایداری پی به میزان قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. میزان این تاثیر (کاهش در ظرفیت باربری) به موقعیت قرارگیری حفره در ناحیه بحرانی بستگی دارد. بدیهی است اندازه این ناحیه بحرانی به عواملی نظیر تراکم خاک، خصوصیات خاک، قطر حفره و عرض پی وابسته خواهد بود. محدوده این ناحیه بحرانی با دو پارامتر بی بعد عمق مدفون بحرانی $(D/B)_{cr}$ و خروج از مرکزیت بحرانی $(e/B)_{cr}$ بیان می‌شود. این ناحیه بحرانی برای ماسه شل در مقایسه با ماسه متراکم، ابعاد بزرگتری دارد که در هر مورد از روی نمودارهای مورد نظر، قابل استخراج است. به هر حال، در صورت قرار گرفتن حفره در داخل منطقه موثر، باید میزان اثر آن را بر ظرفیت باربری پی در نظر گرفت. باید توجه کرد که احداث پی بر روی خاک شل به دلیل رخ دادن گسیختگی پانچ، توصیه نمی‌شود؛ اما برای حالت خاک متراکم به منظور عدم تاثیر حفره بر ظرفیت باربری می‌توان مقادیر حداقل D/B و e/B را به ترتیب برابر ۲،۵ و ۳ در نظر گرفت.

۹- مراجع

- [۱] Baus R. L.; Wang, M. C.; "Bearing Capacity of Strip Footings above Void", Journal of Geotechnical eng., vol. 109, No. 1, p.p. 1-14, 1983.