

بررسی رفتار شالوده‌های تقویت‌شده با ژئوگرید تحت اثر بارهای سیکلی افقی

سید مجدالدین میرمحمدحسینی^۱*؛ شکوفه صادقی فرد^۲

چکیده

تحقیقات انجام شده نشان داده است که ظرفیت باربری شالوده‌ها در هنگام زلزله به علت ممان‌های چرخشی و بارهای افقی وارده کاهش می‌یابد. در این مقاله ضمن افزایش دقت و کنترل مدل عددی ساخته شده در محیط نرم‌افزاری FLAC با داده‌های حاصل از انجام آزمایش بر روی مدل‌های کوچک مقیاس شالوده مسلح به بررسی میزان نهایی ظرفیت باربری شالوده‌های ماسه‌ای مسلح تحت بارهای سیکلی افقی پرداخته شده است. در این بررسی ضمن تعریف فاکتور ظرفیت باربری افقی (HBCR) در کنار فاکتور ظرفیت باربری در حالت قائم (BCR)، تأثیر عواملی مثل تعداد سیکل‌ها و شدت بارگذاری لایه‌های ژئوگرید بر مقدار ظرفیت باربری و مقاومت شالوده مسلح مزبور در مقابل بارهای سیکلی افقی و لغزش پرداخته شده است.

کلمات کلیدی

ظرفیت باربری، شالوده سطحی، بارهای سیکلی افقی، مسلح‌کننده، ژئوگرید.

The Bearing Capacity of Reinforced Soils using Geogrids under horizontal cyclic loadings

S. M. M. M. Hosseini ; SH. Sadeghifard

ABSTRACT

It is widely known that the bearing capacity of a shallow foundation is reduced when the foundation is subjected to rocking moment and horizontal loads during an earthquake event. This paper discusses a series of numerical solution carried out in FLAC that calibrate with results of experimental testing on small scale reinforced foundation in order to measure the bearing capacity of a reinforced shallow foundation due to horizontal cyclic loading. In this study, the horizontal bearing capacity ratio (HBCR) was compared with vertical bearing capacity ratio (BCR) and the effect of such parameters as number of cycles and loading magnitude on the dynamic bearing capacity of reinforced soil was discussed.

KEYWORDS:

Bearing capacity; shallow foundation; horizontal cyclic loading; reinforcement; geogrid

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۱۲/۲۵

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۷/۹/۲۴

^۱ نویسنده مسئول و دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ Email: mirh53@yahoo.com

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی خاک و پی دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ Email: sh_sadeghi_fard@yahoo.com



سطحی مسلح، تحت بارهای سیکی افقی می‌باشد. برای اطمینان از درستی عملکرد مدل عددی، نتایج به دست آمده از نرم‌افزار با داده‌های به دست آمده از انجام آزمایش بر روی مدل‌های کوچک مقیاس از شالوده‌های نواری تحت بارگذاری قائم استاتیکی و سیکی کنترل شده است.

۲- فعالیت‌های آزمایشگاهی

مدل‌های پی استفاده شده در این مطالعه، دارای عرض ۹۰ و طول ۳۳۰ میلی‌متر طول بوده‌اند. برای تهیه این مدل‌ها از قطعات ساخته شده از چوب با ضخامت ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. این آزمایش‌ها در یک مخزن مستطیلی به طول ۰/۸، عرض ۰/۳۵ و عمق ۰/۶۵ متر انجام شده است. به منظور هرچه کمتر نمودن اصطکاک و امکان دیدن تغییر مکان‌ها در طول آزمایش، دیواره‌های داخلی از جنس شیشه شفاف انتخاب شده‌اند. برای جلوگیری از حرکت جانبی خاک، کناره‌های مخزن مهاربندی و محکم شده است. همچنین، برای اطمینان از مرکزی بودن بارگذاری، یک سوراخ در مرکز مدل قرار داده شده است. جدول (۱) خواص ماسه مورد استفاده در آزمایشها را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مشخصات ماسه مورد استفاده در آزمایشها

پارامترها	مقدار
ϕ	۴۲°
D_{50}	۱/۵۴ mm
C_u	۲/۱۸
C_c	۱/۲۸
G_s	۲/۶۶
e_{min}	۰/۵۹
e_{max}	۰/۸۵
e	۰/۶۷
D_r	۷۰٪
γ	۱/۶ kN/m ³

ماسه مورد نظر با استفاده از روش بارش و در لایه‌های ۲۵ سانتی‌متری در مخزن آزمایش ریخته شده است. در تمام آزمایش‌ها میانگین وزن واحد و جرم حجمی نسبی به ترتیب در ۱۶ کیلونیوتن بر مترمکعب و ۷۰٪ ثابت نگه داشته شده است. مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) با توجه به نتایج آزمایش سه‌محوری بر روی ماسه خشک مورد نظر برابر با ۴۲ درجه به دست آمده است. برای مسلح نمودن خاک در طول آزمایش‌ها از ضعیف‌ترین ژئوگرید موجود در بازار استفاده شده است. خواص فیزیکی ژئوگرید در جدول (۲) آورده شده است.

امروزه در بسیاری از ساختمان‌های کوچک و متوسط در مناطق زلزله‌خیز از شالوده‌های سطحی استفاده می‌شود. ظرفیت باربری این شالوده‌ها هنگامی که در طول زلزله متحمل ممان‌های چرخشی و بارهای افقی می‌شوند، به شدت کاهش می‌یابد.

Paolucci [۱] در تحلیل کران بالای سینماتیکی که در آن اثر ممان را نیز لحاظ کرده است، اثر بلندشدگی را به کمک یک پارامتر تحت عنوان λ معرفی نموده است که در آن λ قسمتی از عرض پی است که به هنگام اعمال بار افقی شبه‌استاتیکی خارج از مرکز از عرض پی کاسته می‌شود.

Knappett و همکارانش [۲]، با بررسی آزمایشگاهی شالوده‌های نواری تشکیل شده از ماسه خشک تحت بارگذاری زلزله و دیدن سازوکار گسیختگی آنها در شرایط مختلف نشان داده‌اند که برای ساختمان‌ها با فاصله مرکز جرم زیاد، فاکتورهای ارائه شده توسط Paolucci [۲] در محاسبه ظرفیت باربری مناسب می‌باشد.

Romo و Merlos [۳] نیز با مطالعه عددی سازوکار گسیختگی دو نمونه ساختمان در زلزله سپتامبر سال ۱۹۸۵ در Mexico City، دریافته‌اند که به محض شروع بارگذاری دینامیکی، سطح گسیختگی حلزونی در زیر پی تشکیل می‌شود که با توجه به جهت اعمال بار زلزله در بازه‌های زمانی مختلف، در دو جهت متفاوت چرخش می‌نماید.

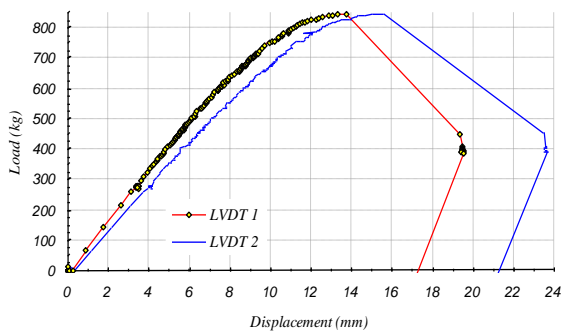
یکی از راه‌های جلوگیری از کاهش ظرفیت باربری شالوده‌ها تحت اثر بارهای سیکی افقی، بهبود کیفیت و پارامترهای مقاومتی خاک از طریق استفاده از انواع مسلح‌کننده‌ها در خاک زیر پی می‌باشد.

در طول دو دهه گذشته، نتایج تعدادی از مطالعات مربوط به ظرفیت باربری نهایی شالوده‌های سطحی مسلح شده با ژئوگرید منتشر شده است (Omar و همکاران [۴]، Yetimoglu و همکاران [۵]، Das و Omar [۶]، Khing و همکاران [۷]، Adams و Collin [۸]) اغلب این نتایج از انجام آزمایش بر روی مدل‌های کوچک مقیاس و مستقر بر سطح خاک (به عبارت دیگر عمق گیرداری پی صفر بوده است) به دست آمده است.

Shin و Das [۹]، تعدادی آزمایش بر روی شالوده‌های نواری در شرایط متفاوت انجام داده‌اند. این مطالعات بیشتر در زمینه بررسی رفتار شالوده‌ها تحت بار قائم استاتیکی و یا قائم سیکی بوده است.

هدف این مقاله بررسی عددی ظرفیت باربری شالوده‌های

شالوده (نشست ۱۴ میلی‌متر) برابر با ۸۴۳ کیلوگرم به دست آمده است.



شکل (۲): منحنی ظرفیت باربری آزمایشگاهی شالوده مسلح

۳- ساخت و کنترل دقت مدل عددی

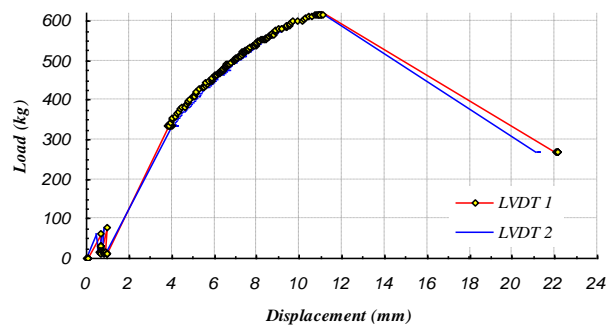
برای بررسی رفتار شالوده‌های سطحی مسلح تحت بارهای سیکنی افقی از یک مدل دو بعدی کرنش‌مسطح ساخته شده در نرم‌افزار FLAC استفاده شده است. مدل مزبور با مقایسه مدل‌های کوچک مقیاس مورد آزمایش در حالت بارگذاری قائم استاتیکی کالیبره شده است. برای کنترل دقت مدل عددی مزبور مقدار ظرفیت باربری شالوده در دو حالت غیرمسلح و مسلح ملاک عمل قرار گرفته است. بارگذاری به صورت اعمال شدت تغییرمکان در گام‌های زمانی مشخص به شالوده وارد شده است. مقدار نیروی ایجاد شده در زیر پی برای هر افزایش جزئی تغییرمکان محاسبه شده و با افزایش گام‌های بارگذاری مقدار نیروی محاسبه شده در هر مرحله با مقدار معادل آن در مرحله قبل جمع شده و به این ترتیب منحنی بار - تغییرمکان در تمام طول مدت تحلیل قابل دسترسی بوده است. شکل (۳) منحنی تنش - تغییرمکان حاصل از نرم‌افزار FLAC برای شالوده غیرمسلح را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، منحنی ظرفیت باربری در نقطه مربوط به تغییرمکان ۱۱ میلی‌متر در لحظه گسیختگی قرار گرفته و در همین لحظه بر خط افقی مربوط به ظرفیت باربری حاصل از آزمایشگاه مماس شده است. گفتنی است، در تمام گراف‌های حاصل از نرم‌افزار FLAC واحد اندازه‌گیری تنش، پاسکال و واحد تغییرمکان متر می‌باشد.

جدول (۱): مشخصات ژئوگرید مورد استفاده در آزمایش‌ها

مقدار	خاصیت
۱ mm	ضخامت
۴/۵ mm	اندازه روزنه
۰/۸۰ kN/m	مقاومت
۰/۱۸ kN/m ²	وزن

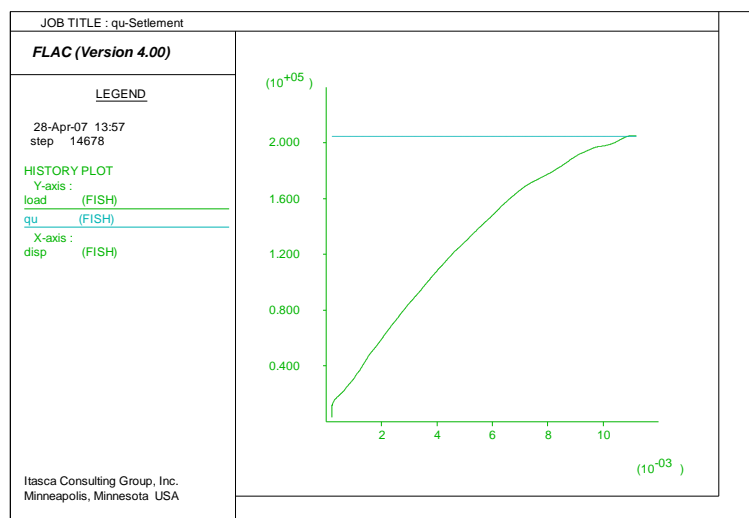
آزمایش‌های استاتیکی در دو حالت غیرمسلح و مسلح، با اعمال تدریجی بار بر مدل و قرائت بار و تغییرمکان‌های ایجاد شده در هر مرحله توسط یک لودسل (Load Cell) و دو LVDT (Linear Variable Differential Transducer) در دو طرف پی انجام شده است. با این روش با داشتن نتایج نشست ثبت شده می‌توان منحنی بار-نشست را به صورت دقیق به دست آورد. از آنجاکه میزان طول مدل نزدیک به عرض مخزن آزمایش بوده است، به طور تقریبی، می‌توان فرض نمود که در طول آزمایش شرایط کرنش مسطح برقرار بوده است.

بار استاتیکی قائم به کمک یک دستگاه سیلندر بادی که به کمک فشار هوا کار می‌کند به مدل‌ها اعمال شده است. این سیلندر قادر به اعمال بار استاتیکی تا ۱۶۰۰ کیلوگرم و بار سیکنی با فرکانس‌های مختلف (تا ۱/۰ هرتز) به صورت همزمان با بار استاتیکی می‌باشد. شکل (۱) منحنی بار - نشست به دست آمده برای حالت غیرمسلح را نشان می‌دهد. با توجه به این منحنی مقدار بار در لحظه گسیختگی برابر با ۶۲۰ کیلوگرم در نشست ۱۱ میلی‌متر محاسبه شده است.



شکل (۱): منحنی ظرفیت باربری آزمایشگاهی شالوده غیرمسلح

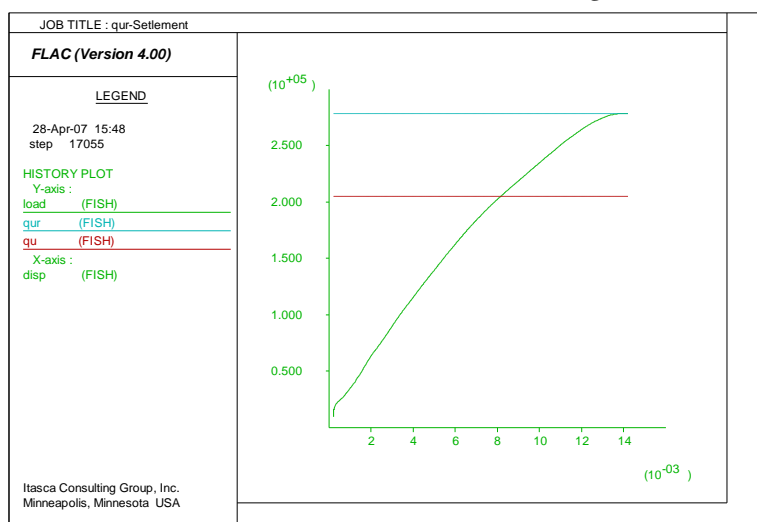
شالوده مورد مطالعه به کمک یک لایه ژئوگرید به طول ۷۶ سانتی‌متر ($b/B=8/44$) که در عمق ۴ سانتی‌متری از زیر پی قرار داده شده، مسلح شده است. شکل (۲) منحنی بار - نشست شالوده مورد مطالعه را در حالت مسلح نشان می‌دهد. با توجه به این منحنی مقدار بار در لحظه گسیختگی



شکل (۳): منحنی ظرفیت باربری عددی شالوده غیرمسلح

تنش معادل با ظرفیت باربری شالوده مسلح در آزمایشگاه و در مقدار نشست ۱۴ میلی‌متر بر خط افقی مربوط به نتایج آزمایشگاهی مماس شده است که نشان دهنده درستی پارامترهای در نظر گرفته شده برای ژئوگرید می‌باشد.

برای اطمینان از عملکرد درست المان‌های کششی (Cable) در نظر گرفته شده برای لایه‌های مسلح‌کننده، شالوده مزبور در حالت مسلح نیز مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۴) منحنی ظرفیت باربری به دست آمده از نرم‌افزار را برای شرایط مسلح شده نشان می‌دهد. در این مورد نیز منحنی حاصل در مقدار



شکل (۴): منحنی ظرفیت باربری عددی شالوده مسلح

تنش قائم و افقی ایجاد شده در زیر پی را به ازای تغییرمکان‌های مختلف اعمال شده نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری مقدار تنش قائم (ظرفیت باربری) تحمل شده در زیر پی به طور مرتب کاهش و میزان تنش افقی تحمل شده در زیر پی تا تغییرمکان در حدود ۳ میلی‌متر و بعد از تحمل تنشی در حدود ۱۶ کیلوپاسکال، با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری افزایش و با بیشتر شدن تغییرمکان، مقدار تنش رو به کاهش گذاشته است.

۴- تحلیل‌های انجام شده

۴-۱- روش کار

همانگونه که در بخش (۳) نیز توضیح داده شد، از آنجاکه هدف از تحقیق انجام شده بررسی نیرویی شالوده‌های سطحی تحت اثر بارهای سیکلی افقی بوده است، بارگذاری به صورت غیرمستقیم به شالوده اعمال شده است. به عبارت دیگر، بارگذاری به صورت شدت تغییرمکان در تعداد سیکل‌های مشخص به شالوده اعمال و مقدار نیروی ایجاد شده به ازای آن در هر مرحله از تحلیل محاسبه شده است. شکل (۵) تغییرات

تحمل شده توسط شالوده را با مقدار تنش قائم به صورت یک تابع درجه چهار نشان داد.

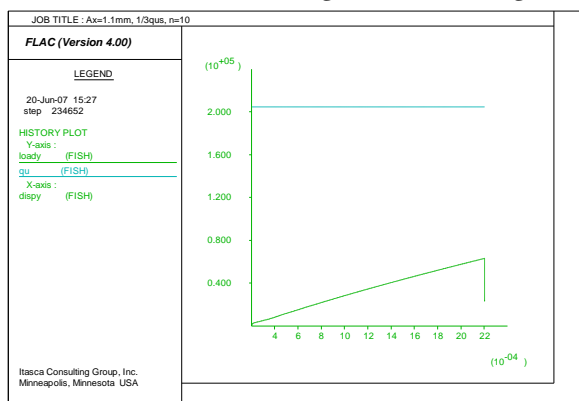
۴-۲- نتایج به دست آمده

به منظور بررسی میزان تأثیر تعداد سیکل‌های بارگذاری بر رفتار شالوده‌های سطحی مسلح، شالوده مزبور در دو حالت غیرمسلح و مسلح و برای دو دامنه متفاوت بارگذاری مورد تحلیل قرار گرفته است. در تمام حالات بررسی شده میزان یک سوم ظرفیت باربری شالوده (مسلح یا غیرمسلح) به عنوان سربار استاتیکی اولیه به صورت قائم و پس از آن بار سیکی افقی با فرکانس ۱/۰ هرتز به مدل اعمال شده است.

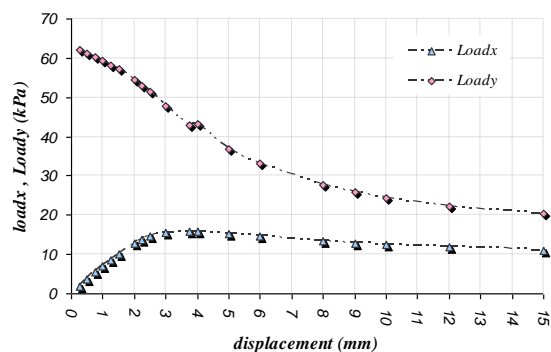
در سری اول تحلیل‌های انجام شده، از شدت تغییرمکان ۰/۵۵ میلی‌متر، معادل ۵٪ نشست استاتیکی شالوده در حالت غیرمسلح به عنوان دامنه بارگذاری‌ها استفاده شده است. در سری دوم تحلیل‌ها دامنه بارگذاری دو برابر شده و شدت تغییرمکان اعمال شده معادل ۱۰٪ نشست شالوده غیرمسلح (۱/۱۰ میلی‌متر) در نظر گرفته شده است.

تحلیل‌های انجام شده حاکی از ثابت بودن مقدار تغییرمکان در زیر پی و کاهش ظرفیت باربری با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری بوده است. شکل (۷) منحنی ظرفیت باربری در مقابل نشست قائم شالوده را برای شالوده غیرمسلح تحت تأثیر بارگذاری با شدت تغییرمکان ۱/۱۰ میلی‌متر پس از ده سیکل بارگذاری نشان می‌دهد.

در شکل (۸) نیز مقادیر ظرفیت باربری برای حالت‌های مورد بررسی در مقابل تعداد سیکل‌های مختلف بارگذاری ترسیم شده است. نمودارها در دودسته مربوط به شالوده مسلح و غیرمسلح مشخص می‌باشند به گونه‌ای که نمودارهای واقع در قسمت بالایی مربوط به حالت مسلح و نمودارهای پایین مربوط به وضعیت غیرمسلح هستند.

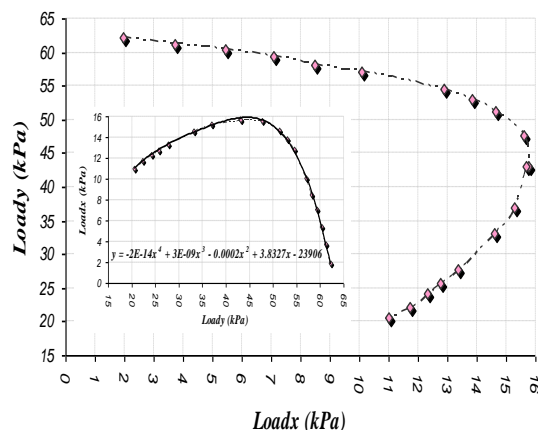


شکل (۷): منحنی ظرفیت باربری عددی در شرایط اعمال ده سیکل بارگذاری افقی سیکی با شدت ۱/۱۰ میلی‌متر



شکل (۵): تغییرات تنش قائم و افقی ایجاد شده در مقابل تغییرمکان افقی شالوده

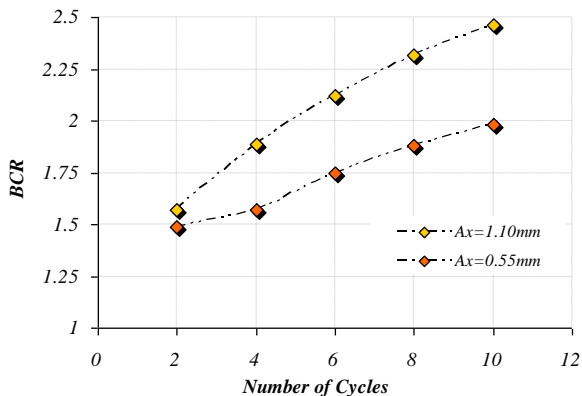
در شکل (۶) نیز تغییرات مقدار تنش قائم ایجاد شده در زیر پی (ظرفیت باربری) در مقابل تنش افقی ایجاد شده ترسیم شده است. ملاحظه می‌گردد که تا مقدار تنش افقی در حدود ۱۶ کیلوپاسکال، با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری ظرفیت باربری شالوده پیوسته کاهش و مقدار تنش افقی ایجاد شده در زیر پی به طور مرتب افزایش یافته است. پس از این مقدار، تنش افقی و قائم تحمل شده توسط شالوده، هر دو با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری دچار افت شده‌اند.



شکل (۶): تغییرات تنش قائم در مقابل تنش افقی ایجاد شده در شالوده با توجه به شکل (۶)، می‌توان چگونگی تغییرات تنش افقی

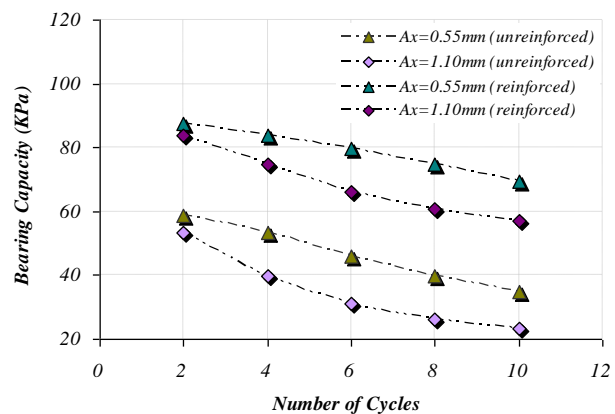
محاسبه شده برای دامنه‌های مختلف بارگذاری در سیکل دوم بارگذاری ناچیز و با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری افزایش یافته است.

شکل (۱۰) تغییرات تنش افقی تحمل شده توسط شالوده در مقابل تغییر شکل افقی شالوده را در سیکل دهم بارگذاری نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که این منحنی پس از طی یک مرحله خطی و رسیدن به مقدار ماکزیمم خود در تغییر مکان ۳ میلی‌متر ناگهان دچار افت و لغزش شده است.



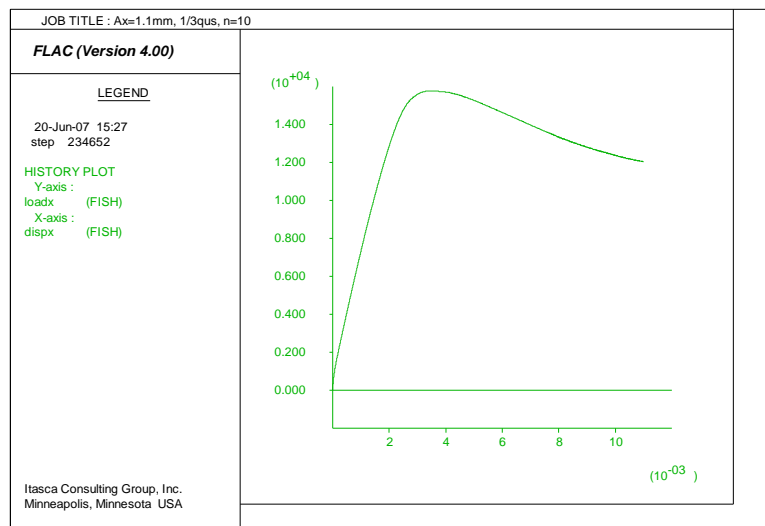
شکل (۹): تغییرات فاکتور ظرفیت باربری در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری

همچنین، ملاحظه می‌شود که در تمام نمودارها با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری ظرفیت باربری شالوده به طور مرتب کاهش یافته است. در شکل (۹) نیز مقادیر فاکتور ظرفیت باربری محاسبه شده برای هر دو دامنه بارگذاری در مقابل تعداد سیکل‌های مختلف بارگذاری ارائه شده است. مقادیر فاکتور ظرفیت باربری در هر دو حالت با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری افزایش یافته است. همچنین، این مقدار برای شالوده با ماکزیمم دامنه نوسان تغییر مکان ۱/۱۰ میلی‌متر همواره بیش از مقدار متناظر با آن برای دامنه نوسان ۰/۵۵ میلی‌متر بوده است.



شکل (۸): تغییرات ظرفیت باربری در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری

با توجه به این شکل، اختلاف مقادیر فاکتور ظرفیت باربری



شکل (۱۰): منحنی تنش افقی تحمل شده توسط شالوده غیر مسلح پس از ده سیکل بارگذاری افقی با ماکزیمم دامنه نوسان تغییر مکان ۱/۱۰ میلی‌متر

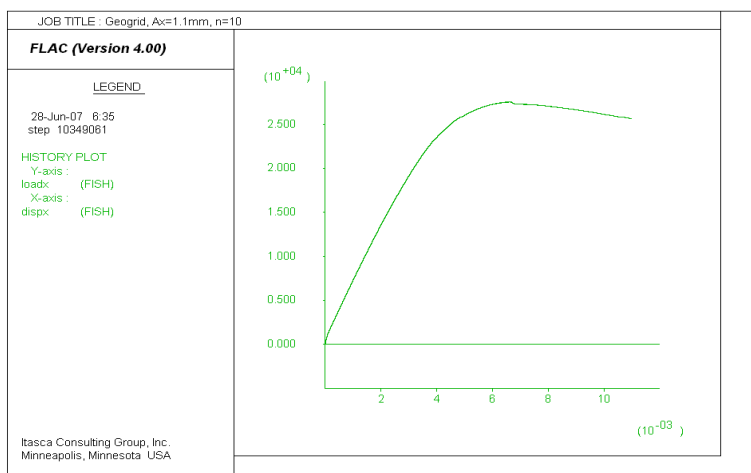
نشان داده شده است. دیده می‌شود که با مسلح نمودن خاک منحنی تنش افقی تحمل شده توسط شالوده انتقال ملایم‌تری را از وضعیت الاستیک اولیه به سمت وضعیت پلاستیک یا خمیری

برای مقایسه، در شکل (۱۱) تغییرات تنش افقی تحمل شده توسط شالوده در حالت مسلح تحت بارگذاری با ماکزیمم دامنه نوسان تغییر مکان ۱/۱۰ میلی‌متر، پس از ده سیکل بارگذاری



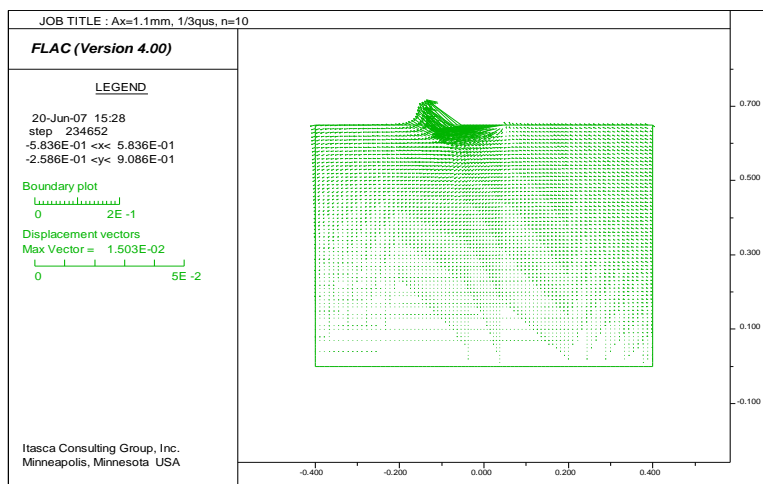
ماکزیم نیز در شرایط مسلح به میزان حدود ۲۸ کیلوپاسکال افزایش یافته است.

از خود نشان می‌دهد. همچنین، ملاحظه می‌گردد که مقدار تغییرمکان افقی قابل تحمل در حالت مسلح به حدود ۷ میلی‌متر افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که مقدار تنش افقی



شکل (۱۱): منحنی تنش افقی تحمل شده توسط شالوده مسلح پس از ده سیکل بارگذاری افقی با ماکزیم دامنه نوسان تغییرمکان ۱/۱۰ میلی‌متر در شکل (۱۲) نیز بردارهای تغییرمکان ایجاد شده در شالوده تحت بارگذاری با شدت تغییرمکان ۱/۱۰ میلی‌متر، پس از ده سیکل بارگذاری نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با اعمال بار سیکلی افقی به شالوده‌های مسلح یک سطح لغزش حلزونی در زیر پی تشکیل شده است. این

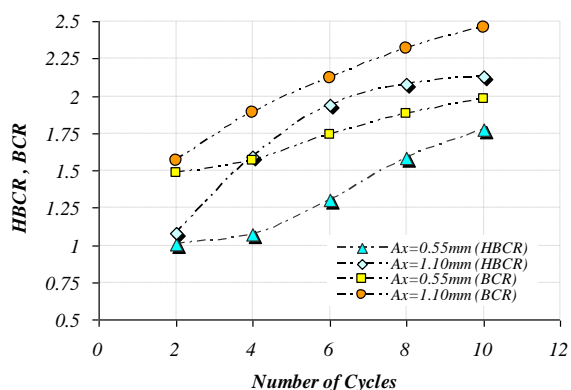
نتیجه منطبق بر نتایج به دست آمده از تحقیقات قبلی انجام شده توسط J.A.Knappett [۲] و همکارانش و M. P. و J. Merlos و Romo [۳] می‌باشد. هرچند این محققین از روش‌های تحلیلی و با استفاده از آنالیزهای شبه استاتیکی به این نتیجه رسیده‌اند.



شکل (۱۲): بردارهای تغییرشکل در شالوده غیرمسلح پس از ده سیکل بارگذاری افقی با ماکزیم دامنه نوسان تغییرمکان ۱/۱۰ میلی‌متر توسط شالوده تا مقدار حدود ۲۸ کیلوپاسکال با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری به طور مرتب افزایش یافته است. برای شالوده تحت بارگذاری با ماکزیم دامنه نوسان تغییرمکان ۱/۱۰ میلی‌متر مقاومت شالوده پس از رسیدن به سطح تنش در حدود ۲۸ کیلوپاسکال در سیکل ششم بارگذاری دچار افت و کاهش شده است.

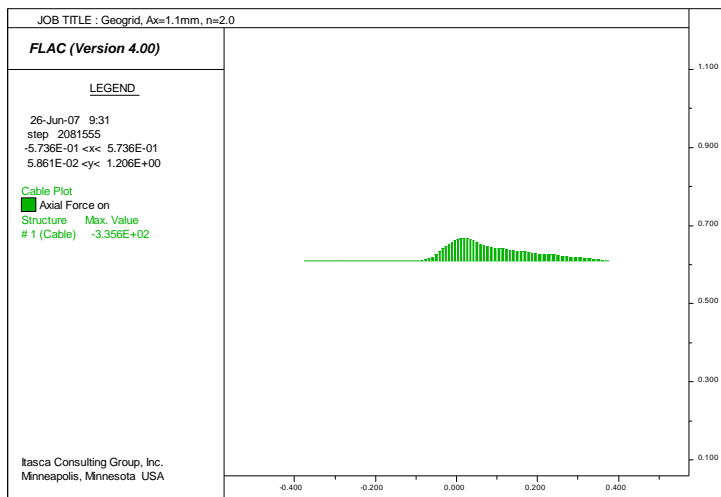
شکل (۱۳) تغییرات مقادیر تنش افقی تحمل شده توسط شالوده را برای حالت‌های مختلف بارگذاری در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود منحنی‌های مربوط به شرایط غیرمسلح برای هر دو دامنه بارگذاری، پس از رسیدن به مقدار تنشی در حدود ۱۶ کیلوپاسکال دچار لغزش و افت در مقاومت شده‌اند. در شالوده مسلح، به هنگام اعمال بارگذاری با ماکزیم دامنه نوسان ۰/۵۵ میلی‌متر، تا سیکل دهم بارگذاری هیچ نشانه‌ای از لغزش و افت مقاومت در نمودار دیده نشد و مقدار تنش افقی قابل تحمل





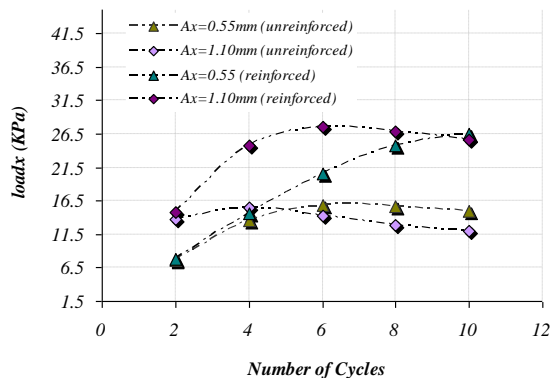
شکل (۱۴): تغییرات فاکتور ظرفیت باربری افقی در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری

شکل (۱۵) چگونگی توزیع نیروی محوری در لایه مسلح‌کننده را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که بیشتر بار و تنش ایجاد شده، همانند شرایط اعمال بارگذاری قائم، توسط قسمت مرکزی (محل اعمال بار) لایه مسلح‌کننده تحمل شده است. هرچند، مقدار ماکزیمم به طور دقیق در نقطه مرکزی نبوده است. همچنین، ملاحظه می‌شود که با توجه به جهت اعمال بارگذاری (در این حالت از راست به چپ) بخشی از لایه ژئوگرید که در قسمت فشاری شالوده قرار گرفته است در عمل نقشی در تحمل بارهای سیکی افقی وارده نداشته است.



شکل (۱۵): نحوه توزیع نیروی محوری ایجاد شده در لایه ژئوگرید در حالت اعمال بار سیکی افقی

شکل (۱۶) نحوه تغییرات ماکزیمم نیروی محوری ایجاد شده در لایه ژئوگرید را برای هر دو دامنه نوسان تغییرمکان در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری نشان می‌دهد. دیده می‌شود که در مورد شالوده با ماکزیمم دامنه نوسان تغییرمکانی برابر با



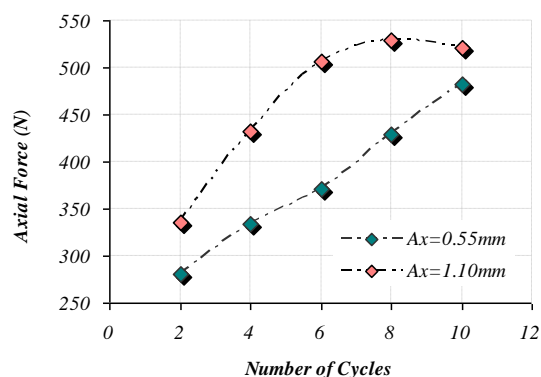
شکل (۱۶): تغییرات تنش افقی تحمل شده توسط شالوده در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری

شکل (۱۴) تغییرات مقادیر فاکتور ظرفیت باربری در حالت افقی را برای سیکل‌های مختلف بارگذاری نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر ظرفیت باربری در جهت قائم نیز برای امکان مقایسه ارائه شده است. دیده می‌شود که مقادیر فاکتور ظرفیت باربری در جهت افقی نیز با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری روندی افزایشی داشته است.

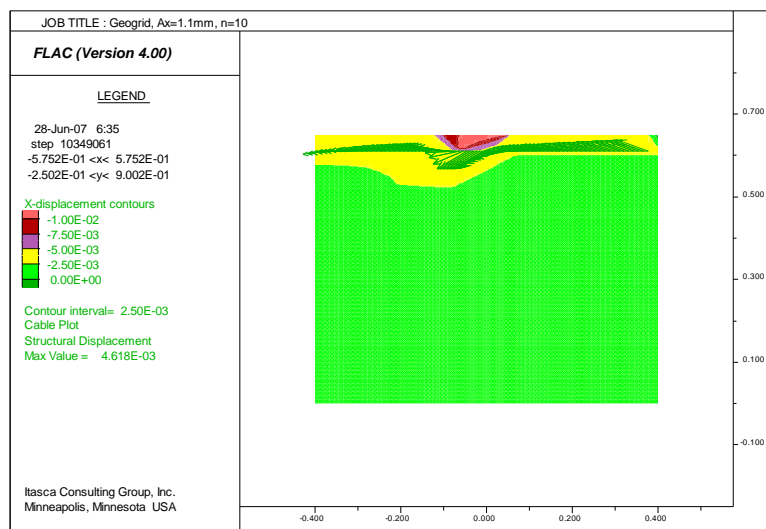
با توجه به این شکل، می‌توان گفت که مقادیر فاکتور ظرفیت باربری در جهت افقی همواره و در تمام سیکل‌های بارگذاری کمتر از مقادیر معادل آن در حالت قائم می‌باشد. این موضوع نشان دهنده عملکرد بهتر ژئوگرید در افزایش ظرفیت باربری شالوده نسبت به مقاومت آن در برابر لغزش و نیروهای افقی می‌باشد. هرچند مقدار این اختلاف کم می‌باشد.

برای مشخص‌تر شدن موضوع در شکل (۱۷) خطوط هم‌تراز تغییرمکان افقی رخ داده در شالوده، همچنین، بردارهای تغییرشکل ایجاد شده در لایه ژئوگرید در شرایط اعمال تغییرمکان با دامنه نوسان ۱/۱۰ میلی‌متر در سیکل دهم بارگذاری نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۶) و بررسی خطوط هم‌تراز تغییرشکل اتفاق افتاده در زیر پی در مراحل مختلف تحلیل، می‌توان گفت که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری و نزدیک شدن شالوده به آستانه لغزش، سطوح گسیختگی ایجاد شده در زیر پی به تدریج کوچکتر شده و به سمت بالا تغییرمکان می‌دهد. به این ترتیب و با فاصله گرفتن سطوح لغزش از محدوده قرارگیری لایه مسلح‌کننده، نیروی محوری ایجاد شده در آن نیز کاهش می‌یابد.

تغییرمکان ۱/۱۰ میلی‌متر، مقدار ماکزیمم نیروی تحمل شده توسط ژئوگرید، پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم خود (در حدود ۵۳۰ نیوتن) در سیکل هشتم بارگذاری و پس از وقوع لغزش و آشفتنی در سیستم دچار افت و کاهش شده است.



شکل (۱۶): تغییرات ماکزیمم نیروی محوری ایجاد شده در ژئوگرید در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری



شکل (۱۷): کانتورهای تغییرشکل افقی در شالوده و بردارهای تغییرشکل در لایه ژئوگرید

۳-۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

بارگذاری باعث افت بیشتر ظرفیت باربری شالوده، چه در شرایط مسلح و چه در شرایط غیرمسلح، شده است. آهنگ کاهش ظرفیت باربری با افزایش سیکل‌های بارگذاری خطی است.

۲- مقادیر فاکتور ظرفیت باربری محاسبه شده برای دامنه‌های بزرگتر بارگذاری، بیشتر و با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش سیکل‌های بارگذاری افقی با توجه به وجود سربار استاتیکی ثابت (ناشی از وزن سازه فوقانی)، مؤلفه افقی نیروی متمایل وارد بر شالوده نسبت به نیروی قائم به طور

مدل عددی ساخته شده در محیط نرم‌افزاری FLAC با نتایج آزمایشگاهی حاصل از بررسی رفتار شالوده‌های مسلح کوچک مقیاس تحت بارگذاری قائم استاتیکی کنترل شده است. سپس، با اعمال بار سیکلی افقی بر مدل عددی مزبور رفتار شالوده‌های تقویت شده با ژئوگرید تحت بارهای سیکلی افقی مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از نتایج مهم این مطالعه عبارتند از:

۱- با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری افقی، تغییرمکان قائم (نشست) شالوده ثابت و بدون تغییر مانده اما مقدار ظرفیت باربری به طور مرتب کاهش خواهد یافت. افزایش دامنه

مسلح‌کننده در ناحیه فشاری خاک قرار گرفته و به این ترتیب
نقشی در تحمل تنش‌های کششی اعمال شده نخواهد داشت.

پیوسته افزایش یافته و در پایان منجر به لغزش شالوده در
مرحله‌ای از تحلیل خواهد شد.

۴- در حالت اعمال بارگذاری افقی بر شالوده‌ها بخشی از لایه

۵- مراجع

- [۶] Das, B., M.; Omar, M., T.; "The effects of foundation width on model tests for the bearing capacity of sand with geogrid reinforcement", *Geotechnical and Geological Engineering* 12 (2), p.p. 133-141, 1994.
- [۷] Khing, K., H.; Das, B., M.; Puri, V., K.; Cook, E., E.; Yen, S., C.; "The bearing capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced sand" *Geotextiles and Geomembranes* 12 (4), p.p. 351-361, 1993.
- [۸] Adams, M., T.; Collin, J., C.; "Large model spread footing load tests on geogrid-reinforced soil foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*", ASCE 123 (1), p.p. 66-72, 1977.
- [۹] Shin, E., C.; Das, B., M.; "Experimental study of bearing capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced sand", *Geosynthetics International* 7 (1), p.p. 59-71, 2000.
- [۱] Paolucci, R. and Pecker, A., "Seismic bearing capacity of shallow strip footings on dry soils", *Soils Found*, 1997. pp. 37(3): 68-79
- [۲] Knappett, J., A.; Haigh, S., K.; Madabhushi, S., P., G.; "Mechanisms of failure for shallow foundations under earthquake loading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.26, p.p. 91-102, 2006.
- [۳] Merlos, J.; and Rombo M., P.; "Fluctuant bearing capacity of shallow foundation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.26, pp. 103-114, 2006.
- [۴] Omar, M., T.; Das, B., M.; Puri, V., K.; Yen, S., C.; "Ultimate bearing capacity of shallow foundations on sand with geogrid reinforcement", *Canadian Geotechnical Journal* 30 (3), p.p. 545-549, 1993.
- [۵] Yetimoglu, T., Wu, J.T.H.; Saglamer, A.; "Bearing capacity of rectangular footings on geogrid reinforced sand", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 120 (12), p.p. 2083-2089, 1994.