بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به او

و برادرم ...

۲۴۸۳۲

مرکز خدمات مدارک علمی ایران
نسخه مدارک

۱۳۷۸ /۴/ ۲۰

تشکر و قدردانی

در اینجا بر خود واجب می‌دانم که از زحمات استاد ارجمند جناب آقای دکتر علی اصغر میرقاسمی که با راهنمایی های خردمندانه و مستمر خویش مرا در انجام این تحقیق یاری نموده‌اند ، سپاسگزاری نمایم.

همچنین تشکر از دیگر اساتید بزرگوار دوره کارشناسی ارشد مکانیک خاک و مهندسی پی دانشکده فنی ، آقایان دکتر کامبیز بهنیا و دکتر اورنگ فرزانه ، جبران کننده ذره‌ای از محبتها و دانش‌افروزیهای بی‌دریغشان ، نخواهد بود.

در ضمن از دوست عزیزم جناب آقای مهندس محمد ابراهیمی‌کیا که در مراحل مختلف انجام این پایان نامه مرا بسیار یاری نموده است ، تشکر می‌نمایم.

سرانجام این پایان نامه را به تمام کسانی که به نحوی مشوق من در امر تحصیل بوده‌اند ، تقدیم می‌کنم.

دانشگاه تهران
دانشکده فنی
گروه مهندسی عمران

۲۴۸۳۲

1827/2

چکیـــــده:

روش المانهای مجزا "(Discrete Element Method)" با نام مخفف "DEM" یکی از روشهای موجود برای تحلیل عددی مسائل مختلفی در زمینهٔ ژئوتکنیک مانند پایداری شیروانی ها و بررسی جابجایی توده‌های سنگی نسبت به یکدیگر می‌باشد. (البته این روش دارای کاربردهایی در زمینه‌های دیگر نیز می‌باشد).

در این پایان نامه ، سعی شده است تا از این روش در مسأله ظرفیت باربری پی استفاده شود. پی می‌تواند روی سطح افقی یا نزدیک سطح شیب دار قرار داشته باشد. لذا مسأله ظرفیت باربری پی (نواری) روی سطح شیب دار یا سطح افقی در حالت استاتیکی و دینامیکی توسط این روش بررسی می‌شود. نیروی دینامیکی (زلزله) می‌تواند به صورت ضرایب شتاب افقی و قائم به صورت شبه استاتیکی به جرم خاک ، بار پی یا سربار وارد شود.

در این پایان نامه ، مفاهیم و تئوریهای لازم برای جزءبندی‌کردن یک سازه (که در اینجا سازه خاک زیر پی است) و تبدیل آن به یک شبکه المانهای مجزا ارائه شده، سپس شبکه موردنظر توسط برنامه کامپیوتری نوشته شدهٔ :

"BCAP" = (Bearing Capacity Analysis Program)

حل گردیده و نتایج آن با روشهای کلاسیک قبلی مقایسه می‌شود.

مهمترین مزیت این روش بر روشهای دیگر (علاوه بر سادگی)، توانایی اعمال اغلب شرایط طبیعی به طور همزمان می‌باشد. شرایطی نظیر: تأثیر چسبندگی و اصطکاک داخلی خاک ، تأثیر زلزله به طور قائم و افقی بر روی جرم خاک ، سربار و بار پی ، انواع بارگذاری روی پی (مانند بارگذاری یکنواخت ، مثلثی ، ذوزنقه‌ای ، خارج از مرکز، مایل و ...) ، (و به طورکلی اغلب پارامترهای محیطی و مقاومتی خاک و پی). درنهایت، این پایان نامه تلاشی است برای معرفی هرچه بیشتر این روش در علم مکانیک خاک و مهندسی‌پی.

ABSTRACT

Discrete *Element Method (DEM) is a method for numerical analysis of different geotechnical problems, such as slope stability and relative displacement of rock masses. This method has other applications as well.*

In this thesis , an effort is made to use the method in determining bearing capacity of foundation. The foundation can rest on a horizontal or adjacent slope surface. The bearing capacity of strip foundation on horizontal or inclined surfaces is analyzed by "DEM" in both static and dynamic conditions.

Dynamic seismic forces could be calculated as horizontal or vertical acceleration factors in a semi-static manner on soil, foundation loading or surcharge.

In this thesis, on the basis of concepts and theories for developing a discrete element grid, a grid for the soil under the foundation is solved by "BCAP" (Bearing Capacity Analysis Program software).

These results are compared with previous classic methods. The most important advantage of "DEM" , is the possibility to simultaneously apply most of natural conditions, such as soil internal friction , cohesion, seismic h/v impacts on the soil mass, foundation loading and surcharge , different loading conditions (e.g uniform , triangular ,trapezeum, eccentric inclined & etc) and other environmental and resistance parameters of soil and foundation.

Finally, the thesis is an effort towards developing a better understanding of "DEM" in soil mechanics and foundation engineering.

فهرست مطالب

موضــوع | صفحــه

فصل اول - مروری بر تحقیقات انجام شده ۱

روش Bowles ۱

روش Myslivec,Kysela ۲

روش Spencer ۳

روش Meyerhof ۵

روش Hansen ۶

روش Kusakabe ۷

روش Giroud ۸

نتیجه ۹

فصل دوم - معرفی روش المانهای مجزا ۱۰

تعریف ضریب اطمینان ۱۶

فصل سوم - روش آنالیز ۱۸

جابجایی نسبی قطعات ۱۸

انتقال مقادیر جابجایی از مختصات سراسری (x,y) به مختصات محلی (n,s) ۲۲

روش محاسبهٔ نیروها روی سطوح المان ۲۵

نحوهٔ تشکیل ماتریس سختی کلی سازه ۳۲

چگونگی پلاستیک شدن فنرها و اعمال شرایط غیرخطی ۳۷

روند سعی و خطا ۳۹

تعریف سعی (Iteration) ۳۹

بار پایه (Q-basic) ۳۹

مراحل روند غیرخطی در اجرای برنامه ۴۱

موضوع — صفحه

روند محاسبهٔ مقادیر بردار نیروهای داخلی وارد بر المانها[F_{IN}] .....
الف ـ قرائت مقادیر جابجایی ۴۷
ب ـ تعیین مقادیر جابجایی المانها نسبت به یکدیگر ۴۷
ج ـ انتقال مقادیرجابجایی نسبی المانهاازمحورهای اصلی (x,y) به مختصات محلی (n,s) ۴۸
د ـ محاسبهٔ تنش کششی ـ فشاری (σ_n) روی سطوح مشترک المانها ۴۸
ه ـ محاسبهٔ تنش برشی حداکثر (τ_p) ۵۰
و ـ تعیین مقدار ($\Delta^i p$) یا مقدار کرنش متناسب با تنش ($\tau^i p$) ۵۰
ز ـ محاسبهٔ مقادیر تنش برشی ($\tau^i s$) ۵۱
ح ـ تعیین مقادیر نیرو روی سطح مشترک در دستگاه مختصات محلی (n,s) ۵۱
ط ـ انتقال نیروها روی سطوح مشترک از مختصات محلی به مختصات اصلی (x,y) ... ۵۲
ی ـ محاسبهٔ نیروهای داخلی وارد بر هر المان ۵۲
محاسبهٔ مقادیر بردار نیروهای خارجی وارد بر المانها[F_{EX}] ۵۳
فصل چهارم ـ حل دستی یک مثال ۵۵
تعیین مختصات نقاط ۵۶
تعیین طول سطوح مشترک ۵۷
تعیین سطوح قطعات ۵۷
زوایای بین بردارهای عمود بر سطوح و محور xها ۵۷
تعیین مؤلفه‌های در جهت x و y مربوط به بردارهای متصل‌کنندهٔ مراکز سطوح به‌نقاط میانی سطوح مشترک ۵۸
تشکیل ماتریسهای R و R^T ۵۹
تشکیل ماتریسهای T و T^T ۶۰

موضوع — صفحه

تشکیل ماتریسهای K ۶۲

تشکیل ماتریسهای A ۶۳

تشکیل ماتریس سختی کل ۶۵

تعیین بردار کلی نیروهای خارجی ۶۹

تعیین جابجایی نسبی بین سطوح مشترک ۷۰

تعیین تنشها روی سطوح مشترک ۷۳

تعیین مقادیر برش حداکثر (τp) روی سطوح مشترک ۷۴

تعیین (Δp) حداکثر جابجایی برشی متناظر (σp) ۷۴

تعیین مقادیر تنش برشی روی سطوح مشترک ۷۵

محاسبهٔ ضرایب اطمینان کلی و جزیی ۷۶

تعیین مقدار نیروهای عمودی و برشی در مختصات محلی (n,s) ۷۶

تعیین مقادیر نیروها روی سطوح مشترک در دستگاه مختصات (x,y) ونیروهای حجمی، (body force) وارد بر قطعات ۷۸

مثالی دیگر ۸۲

فصل پنجم ـ تشریح برنامهٔ کامپیوتری "BCAP" (Bearing Capacity Analysis Program) ۸۵

معرفی پارامترها و متغیرهای بکار رفته در برنامهٔ "BCAP" ۸۵

معرفی زیربرنامه های (Procedure) بکار رفته در برنامهٔ "BCAP" ۹۳

ساختار فایل خروجی با پسوند (.INP) ۹۷

ساختار فایل خروجی با پسوند (.OUT) ۹۸

فصل ششم ـ حل کامپیوتری مسائل نمونه ۱۰۱

فهرست مطالب ـــ

موضوع — صفحه

بررسی مقادیر N_c حاصل از برنامهٔ "BCAP" و مقادیر کلاسیک مکانیک خاک..... ۱۰۱

مثال (۶-۱) ۱۰۲

اجرای دوم مثال (۶-۱) ۱۰۳

مثال (۶-۲) ۱۰۴

اجرای دوم مثال (۶-۲) ۱۰۵

مثال (۶-۳) ۱۰۶

اجرای دوم مثال (۶-۳) ۱۰۶

اجرای سوم مثال (۶-۳) ۱۰۹

نتایج حاصل از بررسی N_c.....

بررسی مقادیر N_γ حاصل از برنامهٔ کامپیوتری و مقادیر کلاسیک مکانیک خاک..... ۱۱۲

مثال (۶-۴) ۱۱۳

اجرای دوم مثال (۶-۴) ۱۱۴

مثال (۶-۵) ۱۱۵

اجرای دوم مثال (۶-۵) ۱۱۶

مثال (۶-۶) ۱۱۶

اجرای دوم مثال (۶-۶) ۱۱۷

مثال (۶-۷) ۱۱۷

اجرای دوم مثال (۶-۷) ۱۱۸

دلایل اختلاف مقادیر N_γ بدست آمده از تئوریهای مختلف ۱۱۹

نتایج حاصل از برسی N_γ ۱۲۰

بررسی ظرفیت باربری پی روی سطح شیبدار..... ۱۲۱

موضوع — صفحه

مثال (۶-۸) ۱۲۲

مثال (۶-۹) ۱۲۴

مثال (۶-۱۰) ۱۱۵

مثال (۶-۱۱) ۱۲۶

نتایج حاصل از اجرای برنامهٔ کامپیوتری در مورد پی روی سطح شیبدار ۱۲۷

بررسی ظرفیت باربری دینامیکی پی ۱۲۸

مثال (۶-۱۲) ۱۲۸

فصل هفتم ـ شرایط قابل اعمال و چشم‌انداز روش المانهای مجزا ۱۳۱

تأثیر سفرهٔ آب زیرزمینی ۱۳۱

تعریف رابطهٔ مور-کولمب به صورت غیرخطی ۱۳۲

حالت خاک لایه ـ لایه ۱۳۳

پی درون شیب ۱۳۴

بررسی تأثیر فاصلهٔ پی از شیب بر روی ظرفیت باربری ۱۳۴

تغییر در نحوهٔ المان بندی سطح گسیختگی ۱۳۴

آنالیز سه بعدی ۱۳۵

بررسی مناطق خمیری خاک زیر پی ۱۳۵

انواع بارگذاری روی پی ۱۳۵

استفاده از پارامترهای مقاومتی بسماند ۱۳۵

چشم انداز ۱۳۶

ضمیمه .....

منابع و مآخذ .....

مقدمه :

یکی از روشهای تحلیل ظرفیت باربری پی روی سطوح شیبدار، روش المانهای مجزا (DEM)،میباشد.در این روش تودهٔ خاک درون سطح گسیختگی توسط قطعاتی از هم تفکیک شده و سپس این قطعات توسط فنرهایی با مدل رفتاری "الاستو- پلاستیک"، به هم متصل میشوند.

بالحاظ کردن شرایط تعادل و سازگاری میان قطعات،تنشها روی سطوح گسیختگی و نهایتا"ظرفیت باربری پی بدست می آید. تنشهای مرزی محاسبه شده در این روش ،کاملا" شرایط تعادل نیروها را ارضاء کرده و در هیچ نقطه ای از مقاومت خاک، تجاوز نمی کند.

در این پایان نامه ، فرمولهای مورد احتیاج این روش با شرح و تفصیل آورده شده است . همچنین مثالهای متعددی از انواع خاکهای چسبنده ،اصطکاکی ، وزن دار و نیز شرایط مختلف بار گذاری آورده شده ، تا توانایی این روش در محاسبهٔ ظرفیت باربری پی بهتر مشخص شود .

این پایان نامه مشتمل بر هفت فصل است:

در فصل اول به طور اجمالی مروری بر تحقیقات و کارهای انجام شده در مورد مسأله ظرفیت باربری پی روی شیب ، آورده شده است . روشهای به کار رفته در این تحقیقات شامل روش تعادل حدی ، آنالیز حدی و خطوط مشخصه می باشند. در فصل دوم به معرفی روش المانهای مجزا پرداخته شده و نحوهٔ تعریف ضریب اطمینان مورد بحث قرار گرفته است . در فصل سوم به تفصیل روش آنالیز و فرمولاسیون این روش که شامل چگونگی پلاستیک شدن فنرها ، روند سعی و خطا و نیز چگونگی اعمال روند غیر خطی در تحلیل کامپیوتری ، می باشد ، ذکر گردیده است .

در فصل چهارم یک مثال ساده از پی روی سطح شیبدار ، که سطح گسیختگی آن شامل ٤ المان ، بصورت دستی حل گردیده تا مفاهیم و فرمولاسیون بکار رفته در این روش بهتر تبیین شود .

در فصل پنجم ، برنامه کامپیوتری " BCAP " وزیر برنامه های به کار رفته در آن ، ساختار فایلهای ورودی و خروجی و

نحوهٔ اجرای برنامه تشریح شده است . فصل ششم ، اختصاص به بررسی نتایج حاصل از برنامهٔ کامپیوتری و مقادیر کلاسیک N_c و N_γ ، برای پی روی سطح افقی و همچنین ظرفیت باربری پی روی شیب دارد . تأثیر نحوهٔ المان بندی ، تعداد المانها ، سختی فنرها ،... در این فصل به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است . در فصل هفتم نیز به شرایطی که می توان برای تکمیل تر شدن بررسی مسألهٔ ظرفیت باربری پی ، اعمال نمود و همچنین چشم انداز این روش اشاره شده است .

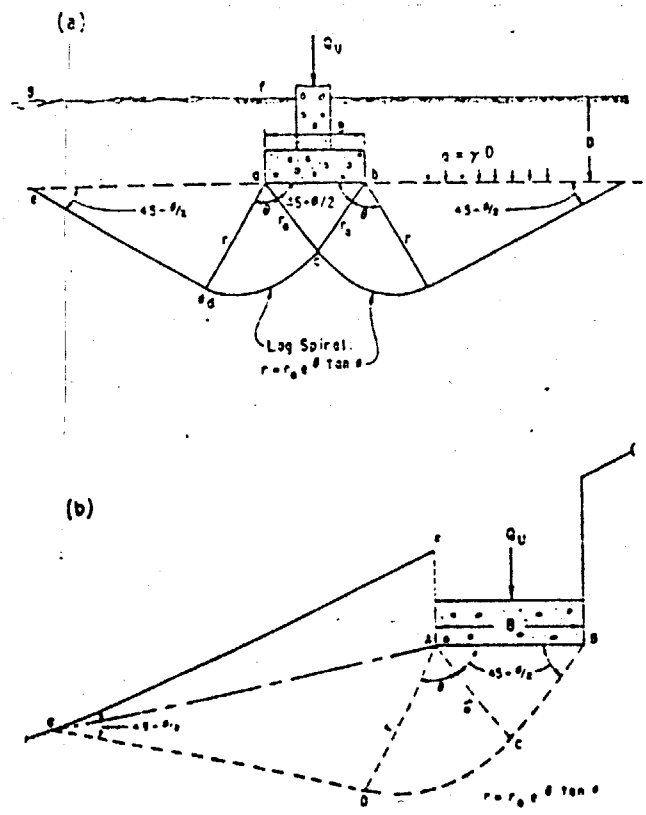
فصل اول

مروری بر تحقیقات انجام شده

مروری بر تحقیقات انجام شده :

روش (Bowles) :

روش (Bowles) برای پی‌های نواری که بر روی خاکهای بدون چسبندگی بنا شده‌اند ، انجام گرفته است. این روش شامل اصلاح مقدار (N_q) در معادله عمومی ظرفیت باربری است تا تأثیر شیب را نمایان سازد. (Bowles) یک مکانیزم شکست مانند شکل (۱-۱) را فرض نمود:



شکل (۱-۱) مکانیزم مورد استفادهٔ (Bowles)

a) سطح زمین افقی b) سطح زمین شیبدار

یک (N_q) کاهش داده شده به نام (N'_q) بوسیله ضرب کردن ضریب (N_q) برای یک پی روی زمین افقی در نسبت (A_1/A_o) محاسبه می‌شود که در آن (A_o) برابر است با سطح زیر منحنی (gfac) در شکل (a-1-1) و (A_1) برابر است با سطح زیر منحنی (FAE) در شکل (b-1-1) که در آن :

$$N'_q = N_q \, (A_1/A_o) \qquad (۱-۱)$$

$$N_q = \exp (\pi \, tg\phi).tg^2 \, (45 + \frac{\phi}{2}) \qquad (۲-۱)$$

سپس ظرفیت باربری نهایی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود :

$$Q/B = q \, N'_q + \frac{1}{2} \gamma \, B \, N_\gamma \, d_\gamma \qquad (۳-۱)$$

$$N_\gamma = 1.5 \, (N_q - 1) \, tg\phi \qquad (۴-۱)$$

که در آن d_γ ، ضریب تصحیح عمق و $q = \gamma D$ می‌باشد.

مشکلی که در این روش وجود دارد این است که برای حالتی که پی سطحی واقع در تاج شیبی از خاک بدون چسبندگی قرار دارد ، نسبت نواحی ($A_1/A_o = 1$) می‌باشد ، لذا ($N'_q = N_q$) بوده و در این شرایط ظرفیت باربری نهایی محاسبه شده ، همان ظرفیت باربری یک پی بر روی یک سطح صاف افقی می‌باشد که مسلماً اشتباه است . خلاصه اینکه این روش برای همهٔ زوایای اصطکاک، ظرفیت باربری بزرگتری از فشارهای باربری اندازه‌گیری شده در عمل ارائه می‌نماید. در ضمن (Bowles) استفاده از زاویه اصطکاک تعیین شده بوسیله آزمون سه محوری را پیشنهاد می‌کند.

روش (Myslivec,Kysela):

این روش ، یک روش تعادل حدی می‌باشد و مکانیزم شکست فرض شده در آن در شکل (۱-۲) دیده می‌شود. نیروهای وارد بر گوه ها نیز در همان شکل نشان داده شده است.