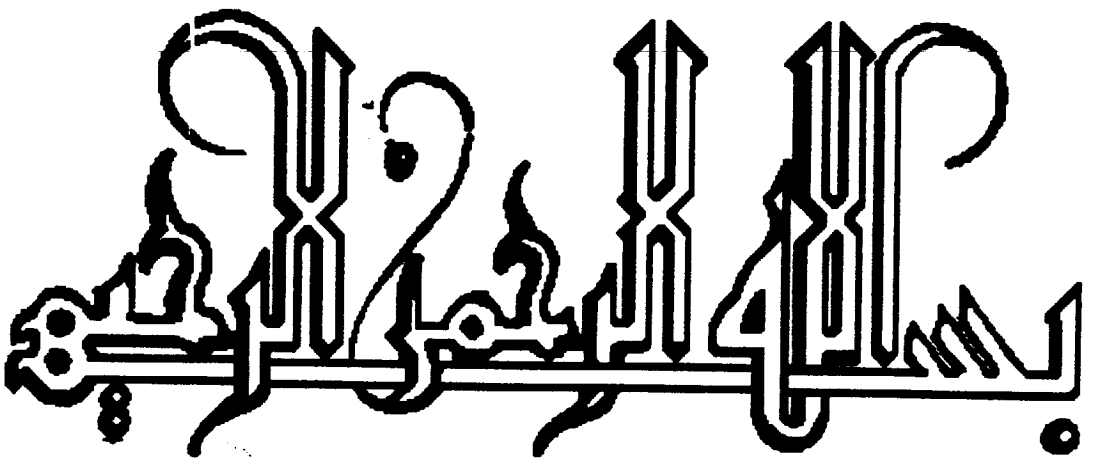

١٤٣٤٢

دانشگاه تهران

دانشکده فنی

۱۳۸۰ /۶/ ۱۳

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

پایان‌نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی عمران - گرایش خاک و پی

عنوان :

مدل سازی محیط ترک خوردهٔ سنگی با استفاده از روش ترکیبی المانهای محدود - المانهای مجزا

استاد راهنما :

دکتر سهیل محمدی

013303

استاد مشاور:

دکتر بهروز گتمیری

نگارش:

سارنگ صیرفیان

دانشگاه تهران دانشکده فنی گروه مهندسی عمران

تابستان ۱۳۸۰

۲۶۲۶۱

تقدیم به

مرحوم پدرم

او که سایه خالی از وجودش

در لحظه لحظه زندگانی من به چشم می‌خورد

و

تقدیم به

مرحوم برادرم

او که بزرگترین و بزرگوارترین

استاد من در درس زندگانی بود

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده

فصل اول – مقدمه و تاریخچه

فصل دوم – مدلهای رفتاری و رفتار اصطکاکی درزه‌ها

۲-۱- مدلهای رفتاری ٤

۲-۱-۱- مدل الاستیک خطی ٤

۲-۱-۲- مدلهای تابع زمان ۷

۲-۲- رفتار اصطکاکی درزه‌ها ۹

۲-۲-۱- کلیات ۹

۲-۲-۲- تأثیر ناهمواری‌ها ۱۱

فصل سوم – معیارهای شکست و مبانی نظریه خمیری

۳-۱- معیارهای تسلیم ۱۳

۳-۱-۱- معیار کولمب ۱۳

۳-۱-۲- تئوری ترک گریفیث ۱٦

۳-۱-۳- معیارهای تجربی ۱۹

۳-۱-٤- معیار تسلیم با استفاده از نامتغیرهای تنش ۲۲

۳-۲- مبانی نظریه خمیری ۲۳

۳-۲-۱- نظریه اول – قانون جریان همراه ۲٤

۳-۲-۲- نظریه دوم – قانون جریان غیرهمراه ۲۵

۳-۲-۳- شرط سازگاری ۲٦

عنوان | صفحه

۳-۲-٤- معادلات عمومی مدل رفتاری الاستوپلاستیک ۲۷

۳-۲-٤-۱- معادلات عمومی در حالت کنترل کرنش ۲۷

فصل چهارم - مبانی روش اجزاء محدود

٤-۱- کلیات ۳۰

٤-۲- میدان تغییر مکان ۳۱

٤-۳- تنش‌ها در المان ۳٤

٤-٤- نیروهای گرهی معادل ۳٤

٤-٥- گام نهایی ۳٦

فصل پنجم - مبانی مکانیک تماس و روش المانهای مجزا

٥-۱- کلیات ۳۸

٥-۲- ردیابی تماس و معرفی اجسام ۳۸

٥-۳- اندرکنش تماس ٤۰

٥-۳-۱- روشهای اعمال قید تماس ٤۰

٥-۳-۱-۱- روش پنالتی ٤۱

٥-۳-۱-۲- روش حداقل مربعات ٤۱

٥-۳-۱-۳- روش ضرایب لاگرانژ ٤۲

٥-۳-۱-٤- روش ضرایب لاگرانژ تعمیم یافته ٤۲

٥-۳-۱-٥- تلفیق روش ضرایب لاگرانژ و پنالتی ٤۳

٥-۳-۲- تشریح کامل روش پنالتی ٤۳

٥-٤- الگوریتم شکست ٤٥

٥-٥- نرم‌شدگی کرنش ٤٦-۱

عنوان | صفحه

فصل ششم - مدلهای محاسبانی

٦-١- مدل شماره یک ٤٨

٦-٢- مدلهای شماره دو و سه ٥٤

٦-٣- مدلهای شماره چهار و پنج ٧٧

جمع بندی و نتیجه گیری ٩٩

منابع و مراجع ١٠٠

چکیده

مدلهای مبتنی بر مکانیک محیطهای پیوسته و استفاده از روش المانهای محدود که برای تحلیل تنش در محیطهای سنگی بکار می‌روند، عمدتاً منجر به نتایجی می‌شوند که با نتایج آزمایشگاهی و مشاهدات محلی مغایرت دارد. وجود ناپیوستگی‌های مختلف اعم از درزه، گسل و ...، ایجاد و گسترش ترکهای نامنظم، رفتار اصطکاکی این ترکها و تأثیر آنها بر رفتار کلی مجموعه مهمترین دلایل عدم کفایت مدلهای تحلیلی پیوسته می‌باشند.

در این پایان نامه سعی گردیده است با ارائه مدلهای گوناگون، قابلیت روش ترکیبی المانهای محدود – المانهای مجزا و مزایای این روش در تحلیل محیط‌های سنگی معرفی گردد.

در این مدلها، محیط سنگی با یک شبکه ترکیبی از المانهای محدود / المانهای مجزا مدل گردیده و سپس تحلیل از یک محیط پیوسته شروع می‌گردد و ضمن پیش بینی ایجاد ترک، کنترل گسترش ترک بر مبنای روشهای مبتنی بر نرم شدگی مصالح، انجام می‌شود. سپس با استفاده از یک تکنیک ویژه مش‌بندی مجدد ترکها بصورت هندسی مدل شده و شبکه ریزتری در اطراف ترکها ایجاد می‌شود تا تقریب عددی بهبود یابد و چنانکه مشاهده خواهد شد؛ بدینوسیله بسیاری از نواقص مدلهای مبتنی بر مکانیک محیط پیوسته رفع خواهد گردید.

Summary

Numerical results obtained from the continuum based models; such as the finite element method, for the stress analysis of rock media usually contradict the experimental data as well as in situ observations. Presence of various discontinuties such as joints, faullts, formation and propagation of irregular cracks. Frictional behaviour of these cracks and their influence on overall behaviour, are among the most important shortcomings of continum models.

In this thesis, by examining several models, the performance of the combined finite/discrete element method for modelling rock media is investigated.

In this model, the rock medium is simulated by a combined mesh of finite/discrete elements. Analysis is started from a continous uncracked model, predicting formation of cracks from their material constitutive laws. Openning and propagation of a crack is controlled by material softening criteria, borrowed from the classical concepts of fracture mechanics.

A special remeshing technique is used to geometrically model a crack and to refine the neighbouring finite element mesh; improving the numerical approximation.

Numerical verification and several test simulations have proved that this method may overcome many disadvantages of continuum based approaches in moedelling the rock media.

فصل اول

مقدمه و تاریخچه

بسیاری از مصالح و سیستمهای فیزیکی در سطوح مختلف دارای ناپیوستگی می‌باشند. مصالحی نظیر خاک و بتن در سطح میکروسکوپیک دارای ناپیوستگی بوده و مصالحی نظیر سنگ‌ها در سطح ماکروسکوپیک دارای ناپیوستگی‌هایی نظیر درزه‌ها، گسل‌ها و ... می‌باشند.

تحلیل سازه‌هایی با مصالح فوق‌الذکر، غالباً با روش توانمند المانهای محدود انجام می‌پذیرد که این روش، مبتنی بر فرض پیوستگی محیط می‌باشد. فرض پیوستگی محیط در مورد خاک و بتن که سازه‌های بنیادی آنها در مقیاس کوچکتری نسبت به کل محیط قرار دارند فرض قابل قبولی می‌باشد و جوابهای نسبتاً مناسبی را ارائه می‌دهد. اما در مورد مصالح سنگی که ناپیوستگی‌ها نسبتاً دارای طول زیادی می‌باشند، استفاده از روش المانهای محدود منجر به ارائه پاسخ‌هایی دور از واقعیت می‌گردد. بعلاوه استفاده از روش اجزاء محدود در این موارد به معنای صرفنظر کردن از کلیه ترکها می‌باشد. (چه ترکهایی که از پیش در محیط موجود می‌باشند و چه ترکهایی که متعاقباً در اثر پدیده‌های نظیر پروسه حفاری و یا بارگذاریهای مختلف پدید می‌آیند).

روش المانهای مجزا که مبتنی بر فرض ناپیوستگی محیط می‌باشد، یک روش بسیار مفید و کاراً برای تحلیل محیطهای سنگی می‌باشد. ناپیوستگی محیط ، اعمال رفتار تماسی درزه‌ها و قابلیت مدل نمودن پدیده ترک خوردگی از ویژگیهای بارز این روش عددی می‌باشد که آنرا برای تحلیل مدلهای سنگی ایده‌آل می‌سازد.

ابداع روش المانهای مجزا به اواخر دهه ۶۰ میلادی باز می‌گردد. در این زمان آقایان Goodman، Taylor و Breakke روشی را برای شبیه سازی رفتار سنگهای درزه‌دار ارائه نمودند. روش ایشان در سال ۱۹۷۱ توسط آقای Cundall تکمیل گردید و روش المانهای مجزا نام گرفت. آقای Cundall بلوکهای سنگی را بصورت قطعات صلبی، فرض نمود که در درزه‌ها با یکدیگر در تماس می‌باشند. مطالعات این دهه درمورد روش المانهای مجزا با فرض قطعات صلب تداوم یافت تا آنکه در اوایل دهه هشتاد آقای قابوسی با افزودن قابلیت تغییر شکل پذیری به این روش بر دقت آن افزود، وی نخستین کسی بود که از مش بندی، نظیر روش اجزاء محدود برای این روش سود جست.

توسعه فن‌آوری رایانه در سالهای اخیر و گسترش نرم افزارهایی نظیر UDEC، DYNA، ELFEN و ... برکارآیی این روش افزوده است.

شایان ذکر است که کاربرد روش المانهای مجزا منحصر به دانش ژئومکانیک نمی‌باشد و در بسیاری از شاخه‌های مهندسی نظیر متالرژی (تحلیل شکل دهی فلزات)، مهندسی شیمی (تحلیل مواد composite) و ... موارد استفاده فراوانی دارد.

در این پایان نامه که هدف آن استفاده از قابلیت روش المانهای محدود و المانهای مجزا در تحلیل محیطهای سنگی می‌باشد، با یک شبکه ترکیبی المانهای محدود / مجزا، محیط سنگی مدل می‌گردد، سپس تحلیل از یک محیط پیوسته شروع می‌گردد و ضمن پیش بینی ایجاد ترک، کنترل گسترش ترک برمبنای روش مکانیک شکست انجام می‌شود. پس از آن با استفاده از یک تکنیک ویژه مش‌بندی مجدد، ترکها بصورت هندسی در شبکه اجزاء محدود مدل شده و شبکه ریزتری در اطراف ترکها ایجاد می‌گردد تا تقریب عددی بهبود یابد. پس از ترک خوردگی رفتار اصطکاکی درزه‌های بوجود آمده از طریق روش مکانیک تماس اصطکاکی توسط نرم‌افزار ELFEN که در سالهای اخیر برنامه‌ریزی شده است، مدل می‌گردد.

این پایان نامه دارای پنج فصل دیگر بشرح زیر است :

فصل دوم - مدلهای رفتاری و رفتار اصطکاکی درزه‌ها : در این فصل سعی گردیده است ضمن بررسی مختصر مدلهای رفتاری سنگها، مدل الاستیک خطی که در این پایان نامه به عنوان مدل رفتاری مورد استفاده قرار گرفته است، شرح داده شود و نیز در این فصل رفتار اصطکاکی درزه‌های بوجود آمده در محیط سنگی نیز به اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل سوم - معیارهای شکست و مبانی نظریه خمیری: در این فصل معیارهای شکست متداول در دانش مکانیک سنگ مورد بررسی قرار می‌گیرد، از بین معیارهای مطرح شده معیار کولمب به عنوان معیار تسلیم در این پایان نامه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه به این امر که نرم‌افزار ELFEN دارای قابلیت تحلیل پلاستیک است و از این قابلیت در این پایان نامه بهره گرفته شده است، لذا مبانی نظریه خمیری در این فصل مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل چهارم - مبانی روش اجزاء محدود : در این فصل اصول اولیه روش المانهای محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد و نیز فرمولاسیون این روش برای حالت کرنش مسطح که در دانش ژئومکانیک موارد استفاده فراوانی دارد ذکر می‌گردد.

فصل پنجم - مبانی مکانیک تماس و روش المانهای مجزا : در این فصل سعی برآن است که اصول اولیه مکانیک تماس و روش المانهای مجزا مورد بررسی قرار گیرد.

فصل ششم - مدلهای محاسباتی : در این فصل مدلهای محاسباتی معرفی گردیده و نتایج تحلیل این مدلها توسط نرم‌افزار ELFEN ارائه گردیده است.

در این فصل پنج مدل مورد تحلیل قرار می‌گیرند، مدل اول؛ مدلی برای کنترل عملکرد برنامه می‌باشد؛ در این مدل یک نمونه، از دو طرف تحت کشش مستقیم قرار می‌گیرد؛ باتوجه به این امر که پاسخ‌های تحلیلی این نمونه در مراجع موجود می‌باشد، این مدل تنها برای کنترل عملکرد برنامه مورد استفاده قرار گرفته است. مدلهای دوم و سوم آزمایش تک محوری سنگ با سرعت کرنشهای متفاوت می‌باشد، مدل چهارم تحلیل یک حفره در محیط سنگی تحت بار قائم تابع زمان و مدل پنجم تحلیل حفره مزبور تحت بارهای قائم و افقی تابع زمان می‌باشد.

فصل دوم

مدلهای رفتاری
و
رفتار اصطکاکی درزه‌ها

۲-۱- مدلهای رفتاری

۲-۱-۱- مدل الاستیک خطی

معمولترین و متداولترین مدل رفتاری برای سنگ‌ها که در عمل کاربرد بیشتری نیز دارد، مدل الاستیک خطی می‌باشد. طبق این مدل، تغییر شکل برشی و تغییر شکل محوری بترتیب با تنش‌های برشی و تنش‌های محوری ارتباط خطی دارند، با فرض ایزوتروپیک بودن سنگ این قانون رفتاری را می‌توان بصورت رابطه زیر نمایش داد :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (۲-۱-۱-۱)$$

همانگونه که مشاهده می‌گردد، این مدل در حالت ایزوتروپ دارای دو پارامتر مستقل یعنی ضریب پواسون (ν) و مدول الاستیسیته (E) می‌باشد: این دو پارامتر را می‌توان مستقیماً از آزمونهایی که مقدار تنش اعمال شده معلوم و کرنشها اندازه‌گیری می‌شوند و با کمک رابطه فوق تعیین نمود، در مواردی که کرنش اعمال شده معلوم و تغییرات تنش اندازه‌گیری می‌شود می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود :

$$\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\\ \tau_{xy}\\ \tau_{yz}\\ \tau_{zx}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\lambda+2G & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0\\ \lambda & \lambda+2G & \lambda & 0 & 0 & 0\\ \lambda & \lambda & \lambda+2G & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{xz}\end{bmatrix} \qquad (۲-۱-۱-۲)$$

در رابطه فوق، λ و G به ضرایب لامه موسومند و طبق روابط زیر با E و ν در ارتباط می‌باشند :

$$G=\frac{E}{2(1+\nu)}$$
$$\lambda=\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \qquad (۳-۱-۱-۲)$$

اما در عمل بدلیل عوامل مختلف نظیر لایه‌بندی وجود درزها و ... سنگها، رفتار غیر ایزوتروپ دارند لذا نمی‌توان فرض نمود که توده سنگی یک توده ایزوتروپ است. اما در اغلب **موارد فرض ارتوتروپ بودن برای سنگ معقول و منطقی بنظر می‌رسد، که در حالت اخیر جسم** دارای سه محور تقارن است که به محورهای اصلی تقارن موسومند، در این حالت رابطه بین تنش و کرنش را می‌توان به فرم زیر نمایش داد :

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{xz}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{\nu_{zx}}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_z} & \frac{1}{E_x} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}}\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\\ \tau_{xy}\\ \tau_{yz}\\ \tau_{zx}\end{bmatrix} \qquad (۴-۱-۱-۲)$$