

۹۷,۷,۲۱

اصول و مبانی مهندسی طراحی تونل ها در محیط های سنگی
(مراهم با شبیه سازی و تحلیل با نرم افزارهای تخصصی)

مؤلفین

مهندس امید سپهر نیکوئی

مهندس داه دانه بی مقصود

مهندس رضا بابائی

۱۳۹۷

سرشناسه	:	نیکویی، سیدسپهر، ۱۳۷۰ -
عنوان و نام پدیدآور	:	اصول و مبانی مهندسی طراحی تونل‌ها در محیط سنگی (همراه با شبیه‌سازی و تحلیل با نرم‌افزارهای تخصصی)/مؤلفین سیدسپهر نیکویی، داود کامرانی مقصود، رضا بابائی.
مشخصات نشر	:	تهران: راز نهان، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری	:	۳۴۵ص.
شابک	:	978-600-448-513-5
وضعیت فهرست نویسی	:	فیا
موضوع	:	تونل‌سازی
موضوع	:	Tunneling
موضوع	:	مکانیک سنگ
موضوع	:	Rock mechanics
شناسه افزود	:	کامرانی مقصود، داود، ۱۳۶۹ -
شناسه افزوده	:	بابائی، رضا، ۱۳۷۱ -
رده بندی کنگره	:	الف ۹/ن ۵/۶TA۸۰۵ ۱۳۹۷
رده بندی دیویی	:	۶۲۰/۱۹۰
شماره کتابشناسی ملی	:	۵۳۵۰ ۱۶

آدرس: میدان انقلاب، رول جید ۱، زاد جنوبی، کوچه دانشور، پلاک ۱۲، واحد ۲ شماره تماس:
 ۰۹۱۲۲۳۳۰۲۶۹ - ۰۲۱۶۴۹۰
 آدرس اینترنتی: raznahanbook@gmail.com
 آدرس سایت: www.raznahanbook.com



عنوان کتاب: اصول و مبانی مهندسی طراحی تونل‌ها در محیط‌های سنگی
 که مؤلف: سیدسپهر نیکویی، داود کامرانی مقصود، رضا بابائی
 که صفحه آرا: علی کامرانی
 که طراح جلد: مهناز محمدی
 که ناشر: راز نهان
 که شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه
 که نوبت چاپ: اول ۱۳۹۷
 که قیمت: ۲۵۰۰۰ تومان

ISBN: 978-600-448-513-5

Perfectly plastic

Brittle Plastic

Strain Softening

تونل‌ها فضاهای (سازه‌های) زیرزمینی هستند که به‌صورت گذرگاه برای ارتباط مستقیم دو نقطه بدون برداشتن سنگ اضافی روی آن و بدون برهم زدن وضعیت سطح زمین احداث می‌شوند. شروع تونل‌سازی در حقیقت به شروع زندگی انسان بر روی زمین بر می‌گردد. زندگی غارنشینی، آغاز تونل‌سازی هم هست.

تکنیک و فنون تونل‌سازی نیز سابقه‌ای حدود ۴۰۰۰ ساله دارد که در بین‌النهرین و زیر رودخانه فرات با طول یک کیلومتر ساخته شد. با توجه به گسترش و توسعه سازه‌های زیرزمینی اعم از معدنی و عمرانی و در نتیجه پیچیده شدن مسائل طراحی و تأمین پایداری ضرورت برنامه‌ریزی و پیش‌بینی جنبه‌های مختلف طرح، اجرا و رفتار تونل را برای مهندسین اجتناب ناپذیر نموده است. پس از حفرتونل بدیهی است که انتظار یک سری ناپایداری وجود دارد یکی از آن ناپایداری‌ها ناپایداری به علت تنش زیاد در سنگ است.

تنش‌های موجود در توده سنگ به هم نخورده مربوط می‌شود به وزن طبقات روی سنگ و تاریخ زمین‌شناسی آن و علت‌های دیگر مانند تنش‌های ترمودینامیکی و... وضعیت تنش‌ها در اثر ایجاد تونل و یا هرگونه حفاری زیرزمینی به‌هم‌خورده در مواقعی به علت این به هم خوردگی تنش‌های ایجادشده به‌اندازه‌ای است که از حد مقاومت سنگ می‌گذرد و موجب خرابی سنگ در جدار تونل می‌گردد. در چنین مواقعی شکست سنگ در مجاورت و اطراف تونل منجر به ناپایداری آن می‌شود.

این ناپایداری به اشکال مختلف از قبیل هم‌گرایی بیش‌ازحد تونل (کاهش قطر) ریزش سقف و تکه شدن دیواره‌ها و در حالت حدی به‌صورت ریزش انفجاری ظاهر می‌گردد. همان‌طور که ذکر شد به علت حفاری شرایط تنش در اطراف تونل به میزان زیادی تغییر می‌کند و منجر به شرایط جدیدی می‌گردد که به آن "شرایط ثانویه" می‌گویند. در انتقال از شرایط تنش اولیه به شرایط تنش ثانویه (القایی) تغییر سس الاستیک و الاستیک در اطراف تونل رخ می‌دهد. با توجه به مواردی که ذکر شد تحلیل و محاسبه تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییر شکل در اطراف مقاطع حفاری‌شده از مهم‌ترین بخش‌ها و پیچیده‌ترین بخش‌ها در طراحی فضای زیرزمینی است. بسته به این که رفتار مصالح به چه صورتی باشد یعنی رفتار الاستیک یا پلاستیک داشته باشد، محیط پیوسته بوده و همگن باشد یا وقتی که غیر همگن و ناهمگن باشد روش تحلیل و محاسبه متفاوت است.

بنابراین آگاهی از تئوری‌های مختلف در حل این مسائل ضروری است. برای مثال تنش‌هایی که به علت سست شدن سطح حفاره ایجاد می‌شوند (تنش‌های ثانویه) چنانچه محیط سنگ الاستیک باشد و مقدار تنش‌ها در محدوده الاستیک باقی بمانند در موارد خاصی مانند مقطع دایره‌ای یا مقاطع با هندسه منظم مانند بیضی می‌توان با استفاده از تئوری الاستیسته مقدار تنش‌ها را توسط روابط حل بسته محاسبه کرد.

تحلیل رفتار تونل تحت شرایط تنش هیدرو استاتیک توسط محققین در گذشته انجام شده است. مطالعات نشان می‌دهند که روش‌های مختلفی جهت تعیین توزیع تنش و تغییر مکان در اطراف تونل حفرشده در توده سنگ‌های با رفتار کاملاً

پلاستیک^۱، شکننده^۲ و نرم شوند^۳ بیان شده است. امروزه استفاده از مدل‌های رفتاری که بتواند ویژگی‌هایی از جمله الاستیک، الاستو پلاستیک کامل و شکننده و نرم شوند را مشخص کند بسیار مهم است. روش‌هایی مانند روش کرش برای تونل‌های دایره‌ای و در محیط الاستیک و روش هوک-براون برای الاستیک پلاستیک مطرح هستند. با توجه به این که هر تئوری بر اساس فرضیات خود رفتار توده سنگ را مورد بررسی قرار می‌دهد نتایج مختلفی به دست می‌آید که بعضاً ممکن است با واقعیت تطبیق کامل و دقیقی نداشته باشد و دقیقاً این مشکل روش‌های تحلیل در محاسبه تنش‌ها و تغییر شکل‌ها است.

در عمل در موارد زیادی شکل مقطع تونل غیر دایره بوده و شرایط تنش‌های اولیه نیز غیر ایزوتروپ است که در این شرایط عملاً روش‌های تحلیلی جوابگو نیستند. از طرفی وزن سنگ شکسته در اطراف تونل (طی پلاستیک شدن) سبب می‌شود حالت تقارن محوری صادق نباشد و از این رو در روش تحلیلی از این وزن صرف‌نظر می‌شود که طبعاً در شرایط تنش‌های ثانویه و تغییر شکل‌های ایجاد شده در اطراف تونل تأثیر گذاشته که عملاً در روش‌های تحلیلی قابل ارزیابی نیست. از طرف دیگر روش‌های عددی به واقعیت شبیه‌تر هستند ولی مشکل آن حجم زیاد محاسبات و در نتیجه پایین آمدن سرعت محاسبات است. مقایسه روش‌های عددی و تحلیلی به ما این دید را می‌دهد که روش‌های تحلیلی استفاده شده تا چه اندازه به واقعیت نزدیک و تا چه اندازه قابل اعتماد هستند یا برعکس آن.

همچنین اگر مقاطع با منحنی منظم شبیه به دایره یا بیضی نداشته باشیم روشی تحلیلی برای به دست آوردن تنش‌های اطراف موجود نیست. برای مثال اگر تونلی با مقطع نعل اسبی و D شکل باشد فقط با روش‌های عددی و نرم‌افزار می‌توان از شرایط تنش و تغییر شکل در پاسخ به همین دلیل خلاصه نوعی معادل‌سازی روش عددی با تحلیلی یا یافتن روش تحلیلی مجزا کاملاً حس می‌شود.

در این کتاب سعی شده که برای بررسی‌های تحلیلی که دغدغه تحلیل طراحی اصولی تونل‌ها در محیط‌های سنگی را دارند روش‌های مختلف در مراحل ابتدایی تا پایانی با توجه به صحیح و اصولی توضیح داده شود و همچنین در نهایت با نرم‌افزارهایی که بسیار پرکاربرد و مهم هستند مراحل طراحی کاملاً تمام توضیح داده شود. در این کتاب سعی بر این شده است که هم روش‌های مختلف تحلیلی و هم طراحی و تحلیل با نرم‌افزارهای مختلف و پرکاربرد با زبانی شیوا و با ترتیبی منظم و اصولی بیان شود.

امید به آن است که در جهت کمک و راحتی مهندسين عزيز كاري داشته باشد.

گروه مولفین

شهریور ۱۳۹۷

^۱ Perfectly plastic

^۲ Brittle Plastic

^۳ Strain Softening

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

فصل ۱ طبقه بندی مهندسی توده های سنگی با نگرشی بر طراحی تونل.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۳
۲-۱ طبقه بندی مهندسی توده های سنگی.....	۴
۳-۱ مفاهیم طبقه بندی مهندسی توده سنگ.....	۵
۴-۱ انواع مختلف طبقه بندیهای موجود برای توده سنگ.....	۷
۱-۴-۱ طبقه بندی توده سنگ به روش ترزاقی.....	۷
۲-۴-۱ رده بندی بر مبنای زمان پابرجایی.....	۱۱
۱-۴-۱ طبقه بندی توده های سنگی از نظر مقاومت.....	۱۳
۱-۴-۱ طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ به روش (RMR).....	۱۳
۵-۴-۱ طبقه بندی توده های سنگی به روش SMR.....	۳۰
۶-۴-۱ طبقه بندی مهندسی توده های سنگی بر اساس ساختار سنگ (RSR).....	۳۳
۷-۴-۱ طبقه بندی بر اساس شاخص کیفیت سنگ (RQD).....	۳۹
۸-۴-۱ طبقه بندی مهندسی سیستم کیفیت توده سنگ (Q).....	۴۳
۹-۴-۱ طبقه بندی مهندسی توده ها: سنگی به روش (WC).....	۶۱
۱۰-۴-۱ رده بندی مهندسی توده های سنگی به روش عدد توده سنگ.....	۶۳
فصل ۲ تنش در اطراف تونلها.....	۶۵
۱-۲ آشنایی با تنش در توده های سنگی.....	۶۶
۲-۲ تنشهای برجا.....	۶۶
۱-۲-۲ مقادیر تنوری تنشهای برجا.....	۶۷
۲-۲-۲ اندازه گیری عملی تنشهای برجا.....	۷۵
۳-۲-۲ نقشه های جهانی تنشهای برجا.....	۸۳
۴-۲-۲ چگونگی برآورد تنشهای برجا.....	۸۷
۳-۲ وضعیت تنشها پس از حفر تونل.....	۸۸
۴-۲ وضعیت تنش در توده های سنگی متجانس، همسانگرد و الاستیک.....	۹۱
۱-۴-۲ تونلهای دایزهای.....	۹۱
۲-۴-۲ تونلهای با مقطع بیضی.....	۱۰۱
۳-۴-۲ تونلهای با مقطع چهار گوش.....	۱۰۶

۱۰۹.....	۴-۴-۲ مقایسه مقاطع مختلف
۱۱۲.....	۵-۴-۲ منطقه تاثیر تونلها
۱۱۵.....	۶-۴-۲ تونلهای چندگانه
۱۲۴.....	۵-۲ وضعیت تنش در سنگهای با لایه‌بندی افقی
۱۲۸.....	۶-۲ وضعیت تنش در سنگهای با لایه‌های شیبدار
۱۳۱.....	۷-۲ رفتار خمیری (مومسان) سنگها در اطراف تونل
۱۳۶.....	۸-۲ رفتار وابسته به زمان تونلها
۱۳۷.....	۱-۸-۲ تونل دایره‌ای بدون پوشش در میدان دوماحوری
۱۳۹.....	۲-۸-۲ تونل دایره‌ای پوشش شده در میدان تنش هیدروستاتیک
۱۴۴.....	فصل ۳ چگونگی تحلیل پایداری تونلها
۱۴۵.....	۱-۳-۱ آشنایی
۱۴۵.....	۳-۲ روشهای تجربی
۱۴۶.....	۱-۲-۳ ترزاقی
۱۴۷.....	۲-۲-۳ ر هبند
۱۵۰.....	۳-۲-۳ طبقه بندی تومانیکی
۱۵۱.....	۴-۲-۳ طبقه بندی MRM
۱۵۱.....	۳-۳ روشهای مدلسازی آزمایشگاهی
۱۵۵.....	۴-۳ روش تحلیل تنش
۱۵۹.....	۵-۳ روش استفاده از منحنی مشخصه
۱۵۹.....	۱-۵-۳ مبانی روش
۱۶۱.....	۲-۵-۳ تحلیل اندرکنش سیستم نگهداری
۱۶۴.....	۳-۵-۳ تغییر شکل تونل فاقد سیستم نگهداری
۱۶۷.....	۴-۵-۳ منحنی مشخصه تغییر شکل سیستم نگهداری
۱۶۹.....	۵-۵-۳ نحوه استفاده از روش منحنی مشخصه
۱۷۲.....	۶-۵-۳ مثالی از کاربرد روش منحنی مشخصه
۱۷۳.....	۶-۳ روش نمودار پایداری
۱۷۳.....	۱-۶-۳ مبانی روش
۱۷۴.....	۲-۶-۳ عدد پایداری N
۱۷۸.....	۳-۶-۳ فاکتور شکل S
۱۷۹.....	۴-۶-۳ نمودار پایداری
۱۷۹.....	۷-۳ روش تحلیل بلوکی

۸-۳	بررسی موردی: تحلیل پایداری تونل انحراف یک سد	۱۸۰
۱-۸-۳	موقعیت و مشخصات تونل	۱۸۰
۲-۸-۳	زمینشناسی مسیر تونل	۱۸۰
۳-۸-۳	تحلیل پایداری بر اساس رده‌بندی مهندسی توده سنگ	۱۸۱
۴-۸-۳	تحلیل پایداری به روش تحلیل تنشها	۱۸۱
۵-۸-۳	تحلیل پایداری به روش رسم منحنی مشخصه	۱۸۴
۶-۸-۳	تحلیل بلوکی	۱۸۴
۴	فصل ۴ روش‌های پایدارسازی و نگهداری تونل	۱۸۶
۱-۴	انواع روش‌های پایدارسازی و نگهداری تونل	۱۸۷
۱-۱-۴	پیش نگهدارنده‌ها	۱۸۸
۱-۱-۴	سیستم نگهداری اولیه	۱۹۰
۳-۱-۴	سیستم نگهداری ثانویه تونل‌ها	۱۹۲
۲-۴	کاربرد الیاف در بتن	۱۹۵
۱-۲-۴	آزمایش‌های لازم بر روی شاتکریت	۲۰۱
۲-۲-۴	خواص مکانیکی بتن و شاتکریت الیافی	۲۰۴
۳-۲-۴	کاربرد شاتکریت الیافی در ساخت تونل	۲۰۵
۴-۲-۴	خصوصیات مقاومتی، مکانیکی نفوذپذیری بتن و شاتکریت الیافی	۲۱۰
۵	فصل ۵ حائلگذاری	۲۲۳
۱-۵	سیستم حائل و تقویت سنگ در جدار تونل	۲۲۴
۲-۵	مفروضات روش تحلیل نظری اندرکنش حائل-سنگ	۲۲۵
۳-۵	تعیین محدوده خرابی در اطراف تونل با استفاده از شرط توازن تنشها	۲۲۷
۴-۵	روش تحلیل نظری تونلهای دایره‌ای	۲۳۰
۵-۵	میدان تنشها در منطقه پلاستیک	۲۳۱
۶-۵	توزیع تنش در منطقه الاستیک	۲۳۲
۷-۵	شعاع منطقه پلاستیک	۲۳۳
۸-۵	مبانی تقویت سنگ و سیستم حائل	۲۳۹
۹-۵	طرح حائل برای بلوکها و گوه‌هایی که در معرض سقوط قرار میگیرند	۲۴۵
۱۰-۵	در چه مواردی از سنگدوزه‌ها و میل مهارها استفاده کرد	۲۴۶
۱۱-۵	ضریب اطمینان سنگدوزه‌ها (ضریب پایداری)	۲۴۶
۱۲-۵	طرح سنگدوز برای بلوکها یا گوه‌هایی که در لغزش آزادند	۲۴۷

- ۱۳-۵ تحلیل اندرکنش حائل-سنگ با استفاده از معیار هوک-براون..... ۲۴۹
- ۱۴-۵ تحلیل تنشها..... ۲۵۰
- ۱۵-۵ فشار حائل بحرانی..... ۲۵۲
- ۱۶-۵ تحلیل تغییر شکلها..... ۲۵۳
- ۱۷-۵ معادله منحنی مشخصه یا خط حائل مورد نیاز..... ۲۵۵
- ۱۸-۵ در نظر گرفتن بار مرده ناشی از سنگشکسته (پلاستیک)..... ۲۵۵
- ۱۹-۵ تحلیل حائل موجود و معادله رفتار حائل..... ۲۵۶
- ۲۰-۵ حائل موجود برای پوشش (حائل) بتنی یا شاتکریت..... ۲۵۷
- ۲۱-۵ حائل موجود برای مجموعه های فولادی..... ۲۵۹
- ۲۲-۵ حائل موجود برای سنگ دوزهای غیر تزریقی..... ۲۶۰
- ۲۳-۵ حائل ایستاده توسط میل یا کابل های تزریقی..... ۲۶۴
- ۲۴-۵ عملکرد سیستم های حائل مرکب..... ۲۶۵
- ۲۵-۵ خلاصه معادلات اندرکنش حائل-زمین..... ۲۶۵
- ۲۵-۵-۱ حله ای: خط حائل مورد نیاز برای توده سنگ..... ۲۶۵
- ۲۵-۵-۲ مرحله دوم: سطح حائل و حداکثر فشار حائل برای پوشش بتنی یا شاتکریت..... ۲۶۷
- ۲۵-۵-۳ مرحله سوم: ختم حائل و حداکثر فشار برای مجموعه های فولادی..... ۲۶۷
- ۲۵-۵-۴ مرحله چهارم: سختی حائل و حداکثر فشار حائل..... ۲۶۸
- ۲۵-۵-۵ مرحله ششم: منحنی حائل مورد نیاز برای سیستم حائل مرکب..... ۲۶۹
- ۲۶-۵ روش های مختلف مدل سازی ورق - سنگشکسته..... ۲۷۰
- ۲۶-۵-۱ روش پیشنهادی پانت..... ۲۷۱
- ۲۶-۵-۲ مدل پیشنهادی دتورنی..... ۲۷۱
- ۲۷-۵ مثال حل شده..... ۲۷۲
- فصل ۶ روش های عددی..... ۲۷۸
- ۶-۱ روش های عددی در ژئوتکنیک..... ۲۷۹
- ۶-۲ مدل سازی تونل با استفاده از نرم افزار FLAC2D..... ۲۷۹
- ۶-۲-۱ مدل سازی یک تونل ساده با FLAC 2D..... ۲۸۱
- ۶-۲-۲ ساخت هندسه یک تونل دایروی در FLAC 2D..... ۲۸۳
- ۶-۲-۳ هندسه تونل در FLAC..... ۲۸۶
- ۶-۲-۴ ساختن زون های با ابعاد مختلف در FLAC 2D..... ۲۸۸
- ۶-۲-۵ بستن مرز های مدل در FLAC 2D..... ۲۸۹
- ۶-۲-۶ اعمال نیروها و تنش های اولیه (برجا) در FLAC..... ۲۹۱

۲۹۲	۷-۲-۶ ایجاد تعادل اولیه
۲۹۳	۸-۲-۶ ذخیره سازی فایل نتایج در Flac
۲۹۴	۹-۲-۶ حفاری تونل
۲۹۶	۱۰-۲-۶ اعمال سیستم نگهداری
۲۹۸	۱۱-۲-۶ کنترل نتایج
۲۹۹	۱۲-۲-۶ تحلیل کفایت نگهداری موقت در تونل
۳۰۱	۳-۶ ساخت مدل عددی با استفاده از نرم افزار آباکوس
۳۰۲	۱-۳-۶ ابعاد هندسی مدل
۳۰۴	۲-۳-۶ انتخاب مشخصات مصالح
۳۰۷	۳-۳-۶ اندرکنش لاینینگ و خاک
۳۰۸	۴-۳-۶ شرایط مرزی
۳۱۰	۵-۳-۶ بارگذاری
۳۱۱	۶-۳-۶ حفاری تونل
۳۱۲	۷-۳-۶ شبکه بندی مان خاک
۳۱۵	۸-۳-۶ مراحل تحلیل
۳۱۸	۹-۳-۶ انجام تحلیل روش هده
۳۲۰	۴-۶ مدلسازی با استفاده از نرم افزار FEMAS
۳۲۰	۱-۴-۶ تنظیمات پروژه
۳۲۱	۲-۴-۶ وارد کردن مرزها
۳۲۲	۳-۴-۶ مش زدن
۳۲۳	۴-۴-۶ شرایط مرزی
۳۲۳	۵-۴-۶ تنش برجا
۳۲۴	۶-۴-۶ ویژگی مصالح
۳۲۷	۷-۴-۶ پردازش
۳۲۷	۸-۴-۶ تفسیر
۳۲۷	۹-۴-۶ تنش اصلی
۳۲۹	۱۰-۴-۶ ساختن بررسی
۳۳۰	۱۱-۴-۶ فاکتور مقاومت
۳۳۲	۱۲-۴-۶ تغییر مکان