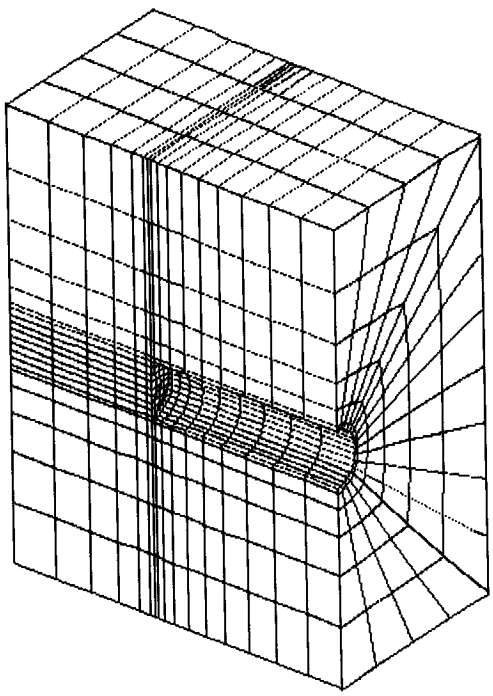
مرکز خدمات مدارک علمی ایران
تحویل مدارک
۱۳۷۸ /۲/ ۲۰

بسمه تعالی

دانشگاه تهران
دانشکده فنی

پایان نامهٔ کارشناسی ارشد رشته عمران گرایش خاک و پی

تاثیر روش اجرا در طراحی پوشش اولیه و نهایی تونلها



استاد راهنما: دکتر شهرام وهدانی

استاد مشاور: دکتر اورنگ فرزانه

نگارنده: بهراد زند

۲۵۲۷۹

زمستان ۱۳۷۷

2012/2

تقدیم به:

دکتر محمود حسابی

بنیان گذار دانشکده فنی

و

پدر و مادرم

۲۵۲۷۹

با تقدیر و تشکر از

اساتید گرامی **دکتر وهدانی**، **دکتر فرزانه** و **دکتر میرقاسمی** که از راهنمایی های ایشان در تدوین این پایان نامه استفاده شده است، **آقای مهندس مشیرفر** مدیریت محترم دفتر فنی شرکت پرلیت ، **آقای مهندس پیمان پگاهی** که در تهیه این پایان نامه به من یاری رسانده اند و **آقای بابالو** که زحمت تایپ این پایان نامه به عهده ایشان بوده است.

چکیده

مراحل اجرایی تونلهایی که در یک مرحله حفاری می شوند شامل حفاری طول کوتاه، اجرای پوشش اولیه، ادامه حفاری و اجرای پوشش نهایی است. اگر حفاری و پوشش در چند مرحله صورت بگیرد رفتار تونل نسبتاً پیچیده خواهد بود و تحلیلی که بتواند تمامی مراحل اجرایی را درنظر بگیرد تحلیلی سه بعدی، غیر خطی، چند مرحله ای و تابع زمان خواهد بود که ممکن است با ابزار فعلی ناممکن یا غیر اقتصادی باشد. بدیهی است که ساده سازی چنین تحلیلهایی باید با توجه به ملاحظات نظری صورت گیرد. برای استفاده از هر روش لازم است میزان خطای هر روش در شرایط مختلف قابل پیش بینی باشد تا بتوان حدود اعتبار هر روش را بدست آورد. در این مطالعه نتایج حاصل از روشهای تقریبی با روشهای دقیق عددی مقایسه شده اند و بر این اساس حدود اعتبار هر روش بدست آمده است و به کمک نتایج آن راهکارهایی برای طراحی پوشش تونلها ارایه شده است. به علاوه یک تحلیل موردی نیز انجام گرفته است تا نحوه بکار گیری نتایج این پایان نامه ارایه گردد.

Abstract

Construction process of tunnels, which are excavated in one stage includes: excavations of a short length, performing the primary support and final support while the excavation is progressing. Behavior of multi stage excavated tunnels is even more complicated. An accurate analyses of such process must consider several phenomena such as: three dimensional behavior of the analyses, nonlinearity of the constitutive laws, effects of multi stage construction process and time dependency of material behavior. Such an analyses may be uneconomical even if it is possible. Usually, several assumptions are made to simplify the analyses and as a result different methods are suggested. At the same time a unique process of analyses has not been introduced. The main purpose of this study is to evaluate the individual effects of each simplified assumption and its limit of validity. At the same time it is tried to established a methodology do lead the designer for choosing the suitable assumption in different cases. A sample case study is performed according to the methodology discussed.

مقدمه

به منظور دستیابی به توسعه و استقلال اقتصادی در دنیای صنعتی امروز احداث تونل و بناهای زیرزمینی اجتناب‌ناپذیر است. در بسیاری از موارد مانند خطوط حمل و نقل زیرزمینی، کانالهای انتقال آب و گاز، نیروگاه‌ها، مخازن، انبار مهمات و غیره ملاحظات اقتصادی یا امنیتی احداث تونلها و بناهای زیرزمینی را ایجاب میکند. بدیهی است که بدون توجه به اصول علمی مبتنی بر ملاحظات ایمنی، اقتصادی، فنی و محیط زیستی این کار نتیجه مطلوبی به بار نخواهد آورد. بنابراین انجام مطالعات و تحقیقات علمی دراین زمینه اجتناب‌ناپذیر است.

هدف از انجام این پایان نامه مطالعه و بررسی روشهای مختلف طراحی پوشش تونل، تأثیر روش اجرا و نیز بررسی دقت روشهای تقریبی تحلیل تونل میباشد. بنابر این نتیجه این تحقیق ارایه راهکارهای عملی و تا حد امکان ساده جهت طراحی پوشش تونل است. تأثیر واقعی روش اجرا بر طراحی پوشش اولیه و نهایی تونل زمانی ملموس می‌گردد که به توزیع میدان تنش در توده پس از هر یک از عملیات اجرا توجه گردد. مراحل اجرای تونل هایی که در یک مقطع حفاری می‌گردند شامل حفاری طول کوتاه، اجرای پوشش اولیه،ادامه حفاری واجرای پوشش نهایی بافاصله از پوشش اولیه می‌باشد. تحلیل مراحل اجرا و.تخمین توزیع تنشها در تونلهایی که در چند مقطع حفاری می‌گردند بسیار پیچیده‌تر است. با اندکی دقت می‌توان دریافت که فرضیات روشهای قدیمی که در آنها پوشش دایم بصورت یک سازه تحت بار در تماس با توده در نظر گرفته می‌شود تا چه میزان به دور از واقعیت هستند. در مقابل تحلیلی که در آن کلیه مراحل حفاری بصورت واقعی در نظرگرفته شود، تحلیلی سه بُعدی، غیر خطی (رفتار ماده)، مرحله‌ای و تابع زمان خواهد بود که با ابزار فعلی و ملاحظات اقتصادی مقدور نمی‌باشد. بدیهی است که ساده سازی رفتار واقعی باید با ملاحظات نظری صورت گیرد. این ساده سازیها را می‌توان به کلیات زیر تقسیم نمود:

۱- استفاده از تحلیل کرنش مسطح با در نظرگرفتن اثرات سه بعدی.

۲- شکل هندسی واقعی مقطع در مقایسه با مقطع دایره.

۳- ساده سازی رفتار تابع زمان توده.

۴- استفاده از قوانین رفتاری ساده مانندکشسان خمیری کامل.

هر روش ساده شده بنا به فرضیاتش دارای مقداری خطا است که مقدار این خطا باید قابل پیش بینی باشد تا بر اساس آن حدود اعتبار روش مشخص گردد. بنابراین روند بررسی فعلی شامل این مراحل خواهد بود:

۱- شناخت رفتار واقعی تونل و فلسفه طراحی در روشهای نوین تونلسازی.

۲- بحث و بررسی در مورد روشهای قابل استفاد، در طراحی پوشش تونلها مانند روشهای همگرایی - همجواری، روش المان برداری و روش تحلیل قطعات.

۳- بررسی حساسیت مسئله نسبت به شاخصهای رفتاری محیط.

۴- تعیین حدود خطا در روشهای تقریبی.

۵- بررسی چگونگی تبدیل مسئله از حالت سه بعدی به حالت دو بعدی کرنش مسطح.

۶- نتیجه گیری و ارایه راهکار برای طراحی پوشش.

علاوه بر موارد فوق در این پایان نامه یک بررسی موردی نیز انجام گرفته است و نتایج آن با مقادیر اندازه گیری شده تطبیق داده شده است.

در این تحقیق از نرم‌افزارهای FLAC، PHASES و SAP90 استفاده شده است. بخش عمده‌ای از تحلیلها توسط نرم‌افزار PHASES انجام گرفته است زیرا مدلسازی به کمک این نرم‌افزار به سادگی انجام می‌شود و زمان لازم برای انجام تحلیل نسبتاً کوتاه است. برای انجام تحلیلها در حالت تقارن محوری و تحلیلهای چند مرحله‌ای (بیش از دو مرحله) در فصلهای چهارم و آخر این پایان نامه از نرم‌افزار FLAC استفاده شده است زیرا نرم‌افزار PHASES قابلیت انجام چنین تحلیلهایی را ندارد. از نرم‌افزار SAP90 برای انجام تحلیلهای سه بعدی کشسان خمیری فصل چهارم و نیز تعین نیروی محوری پوشش به کمک اعمال جابجاییهای بدست آمده از نرم‌افزار PHASES استفاده شده است.

فهرست مطالب

صفحه

فصل اول : مفاهیم اولیه در رفتار تونلها و بناهای زیرزمینی و فلسفه روشهای نوین اجرای تونل

۱ - ۱ . مقدمه ۱

۱ - ۲ . روشهای قدیمی ۲

۱ - ۳ . رفتار تونلها ۴

۱ - ۴ . روشهای نوین تونلسازی اتریشی (N.A.T.M) ۸

۱ - ۵ . بکارگیری روش اتریشی در زمینهای سست و مناطق شهری ۱۴

فصل دوم : بررسی روشهای طراحی پوشش در بناهای زیرزمینی

۲ - ۱ . مقدمه ۲۲

۲ - ۲ . روشهای تجربی ۲۳

۲ - ۳ . روش همگرایی - همجواری ۳۶

۲ - ۴ . روش تحلیل قطعات ۴۴

۲ - ۵ . روشهای عددی ۴۶

پیوست اول ۴۹

فصل سوم : بررسی روشهای تقریبی و عوامل مؤثر در رفتار تونلها

۳ - ۱ . مقدمه ۵۱

۳ - ۲ . عوامل مؤثر در نیروی وارد بر پوشش تونل ۵۲

۳ - ۳ . مقایسه نتایج بدست آمده از رابطه پانه و برنامه PHASES ۶۱

۳ - ۴ . بررسی خطاهای ناشی از تخمین ناحیه خمیری به کمک تحلیل خطی ۶۴

۳ - ۵ . بررسی رفتار تونلها در محیطی با تنشهای درجای ناهمگن - مقاطع دایره‌ای ۶۶

۳ - ۶ . بررسی رفتار تونلها در محیطی با تنشهای درجای ناهمگن - مقاطع غیردایره‌ای ۷۸

صفحه

۳ - ۷. ارایه یک روش تقریبی برای تحلیل تونلها ۸۱

فصل چهارم: درنظر گرفتن اثرات سه‌بعدی در تحلیل تونلها

۴ - ۱. مقدمه ۹۲
۴ - ۲. تغییر شکل در مجاورت سینه کار در محیط کشسان خطی و در حالت تقارن محوری ۹۴
۴ - ۳. تغییر شکلها در محیط کشسان خطی با تنشهای درجای همگن در مجاورت سینه کار ۹۶
۴ - ۴. تغییر شکلها در مجاورت سینه کار در محیط کشسان خطی با تنشهای درجای ناهمگن ۱۰۱
۴ - ۵. تغییر شکل مقطع دایره در محیط کشسان خمیری کامل در حالت تقارن محوری ۱۰۳

فصل پنجم: راهکارهای عملی طراحی تونل (الگوریتهای طراحی)

۵ - ۱. مقدمه ۱۰۷
۵ - ۲. بکارگیری روشهای ساده شده و حدود کاربرد ۱۰۷
۵ - ۳. استفاده از روش همگرایی - همجواری ۱۰۹
۵ - ۴. تحلیلهای رایانه‌ای ۱۱۲
۵ - ۵. مقایسه نتایج حاصل از روش همگرایی - همجواری و تحلیل کامپیوتری در مقاطع نعل‌اسبی و نیم‌دایره‌ای ۱۱۶

فصل ششم: بررسی موردی یک تونل دوقلو در تهران

۶ - ۱. مقدمه ۱۲۷
۶ - ۲. شکل هندسی تونل و روش اجرا ۱۲۹
۶ - ۳. مدلهای تحلیلی ۱۳۰
۶ - ۴. تحلیل حساسیت ۱۳۳
۶ - ۵. نتایج تحلیلها ۱۳۷
۶ - ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۳۹

۱

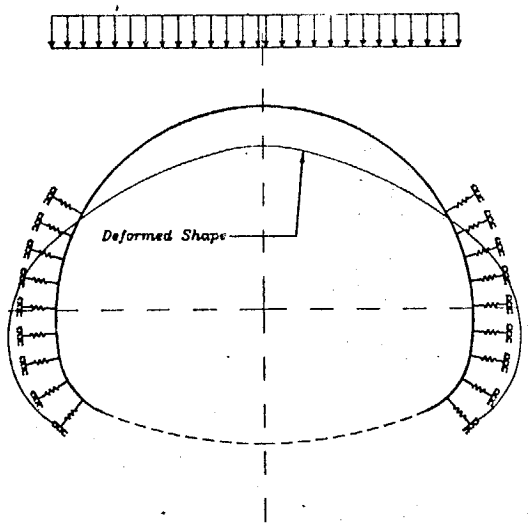
مفاهیم اولیه در رفتار تونلها وبناهای زیرزمینی وفلسفه روشهای نوین اجرای تونل

۱ـ۱ مقدمه:

در این فصل ابتدا مروری برفلسفه طراحی تونل در روشهای قدیمی ومشکلات آن روشها خواهیم داشت و سپس چگونگی رفتار تونل و بناهای زیرزمینی و عوامل مؤثر بر نیروی وارد بر پوشش وجابجاییهای ناشی از حفاری در زمین اطراف بررسی می‌شوند و درادامه روشهای نوین تونلسازی مورد بحث قرار می‌گیرند. درانتهای فصل روشهای ویژه برای حفاری و پوشش تونل در زمینهای سست و روشهایی که برای محدود کردن تغییر مکانها در مناطق شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند به اختصار توضیح داده می‌شوند. بحثی که در مورد روشهای نوین تونلسازی ارایه می‌شود به طور عمده از تعداد زیادی مقاله استخراج شده و سعی ما در اینجا این بوده که خواننده بامطالعه این بخش از سوء تعبیرها وکج فهمی‌هایی که از روشهای نوین می‌شود، دوری کند. برای مثال بسیاری از اشخاص روش ناتم رایک روش طراحی می‌دانند که منحصر به استفاده از پیچ سنگ و شاتکریت است و همانگونه که خواهیم دید این تعبیری بسیار نادرست از این روش است.

۱-۲ روشهای قدیمی

فلسفه طراحی پوشش تونل در روشهای قدیمی این بود که براساس جنس سنگ یا خاک نیرویی ثابت تعیین می‌شد و به طور مستقیم روی سازه پوشش قرار می‌گرفت و بر این اساس نیروی محوری و لنگر در پوشش تعیین می‌گشت و حتی معمولاً از نیروی مقاوم خاک نیز صرف‌نظر می‌شد که باعث ایجاد لنگرهایی بسیار بزرگ در پوشش تونل می‌گشت که کاملاً خلاف واقع است. در این روشها از عوامل مهمی



شکل ۱ - ۱، مدل تیر بر بستر ارتجاعی

مانند عمق قرارگیری تونل، فشارهای تکنونیکی جانبی،اثر سختی پوشش روی نیروی وارد بر پوشش و اثر سینه کار در محدود کردن جابجاییهای محیط در مجاورت سینه کار صرفنظر می‌شد.که این کار منجر به نتایجی خلاف واقع می‌شود. برای مثال اگر فشاری در خلاف جهت فشار وارد بر پوشش، به محیط تونل وارد شود و برای زمین نیز قانون رفتاری مناسبی فرض شود قاعدتاً تغییر شکلهای پوشش و مقطع حفاری باید سازگار باشند، همانگونه که در عمل اتفاق می‌افتد، ولی اگر بار وارد بر پوشش از روشهای قدیمی تعیین شود این سازگاری به ندرت اتفاق می‌افتد. بعدها روشهای دیگری بکارگرفته شد که در آنها فشار وارد بر پوشش به همان شکل تعیین می‌گشت ولی هنگام تحلیل پوشش برای ملحوظ کردن اثر سختی پوشش و فشار مقاوم محیط از فنرهای فشاری عمود و در صورت لزوم مماس بر پوشش دراطراف پوشش استفاده می‌شد. این روشها بنام روشهای هیپراستاتیک[1] یاتیر بر بستر ارتجاعی[2] موسوم هستند. (شکل ۱ - ۱) بدیهی است که در این روش فنرهای کششی باید حذف گردند. چراکه محیط معمولاً کشش زیادی تحمل نمی‌کند.

---

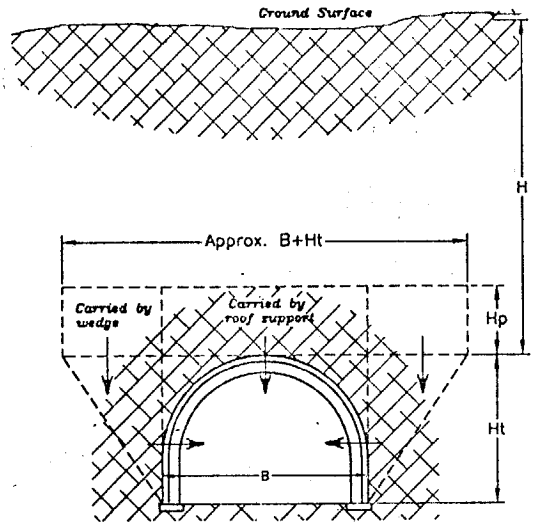
1 - Hyperstatic

2 - Beded Beam Model

اکنون به منظور یادآوری دو روش قدیمی متدول بازگو می‌شود.

۱ - روش ترزاقی :

در این روش بارهای قائم و جانبی وارد بر پوشش مطابق شکل ۱ - ۲ تعیین می‌شوند این روش در سال ۱۹۴۶ ارایه شد و برای تعیین نیروی وارد بر پوشش متداول در آن زمان یعنی قوسهای فلزی مورد استفاده قرار می‌گرفت.



شکل ۱ - ۲، روش ترازقی

در این روش نیروی وارد بر پوشش (C,Hp) تابع وابعاد مقطع (B,Ht) و نوع سنگ است و وجود یا عدم وجود آب زیرزمینی نیز در نظرگرفته می‌شود.

این روش برای مدتی طولانی مورد استفاده قرار می‌گرفت ولی امروزه تقریباً منسوخ شده است و استفاده از آن به جزء در تونلهایی با سربارکم به هیچ عنوان منطقی نیست. ترزاقی برای ملحوظ کردن نوع سنگ و اثر آب زیرزمینی طبقه بندی ارایه داده که روی این طبقه بندی بعدها اصلاحاتی انجام شده است. بررسیهای دقیقی که توسط Cecil در سال ۱۹۷۰ انجام شد نشان داد که طبقه بندی مورد استفاده در روش ترزاقی بسیارکلی است و بسیاری از خواص سنگ را در نظر نمی‌گیرد.

۲ ـ روش پروتودیاکونوف[1]

این روش مشابه روش ترزاقی است با این تفاوت که در این روش ناحیه و افشرده به شکل یک سهمی فرض می‌شود. (شکل ۱ ـ ۳)

این روش در طراحی تونلهای متروی شهر مسکو مورد استفاده قرارگرفته است. امروزه این روش نیز مانند روش ترزاقی منسوخ شده است. در این روش از روابط زیر استفاده می‌شود :

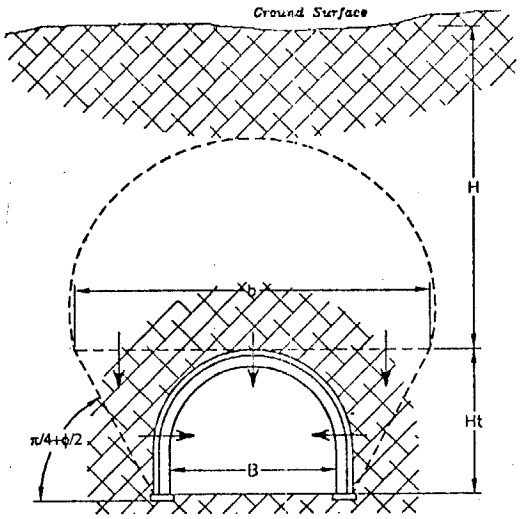
---

1 - M.Protodinakonov

$$H_p = \frac{b}{2f} \qquad (۱-۱)$$

$$b = B + 2H_t \, tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \qquad (۱-۲)$$

f ضریبی است که تابع شرایط و جنس زمین می‌باشد و مقادیر آن از جدول طبقه‌بندی پروتودیاکونوف بدست می‌آیند.(به منبع ۱ مراجعه شود)



شکل ۱ - ۳، روش پروتودیاکونوف

۱-۳ رفتار تونلها

دراین بخش رفتار تونلها مورد بررسی قرار می‌گیرند. همانگونه که خواهیم دید رفتار یک تونل پوشش شده علاوه بر جنس زمین تابع سختی پوشش، مراحل و روش اجرای تونل و موارد دیگر خواهد بود در زیر نکاتی که در شناخت رفتار تونلها و بناهای زیرزمینی و طراحی آنها باید مورد توجه قرارگیرند گفته می‌شوند:

۱ ـ اگر در محیطی که در آن تنشهای اولیه‌ای موجوداست حفره‌ای حفر شود و بعد از اتمام کامل حفاری (با فرض پایدار بودن حفره) حفره پوشش شود هیچ نیرویی به پوشش وارد نخواهد شد مگر در اثر رفتار خزشی محیط و اگر در همان محیط پوششی صلب ابتدا در خاک فرو برده شود به گونه‌ای که دست‌خوردگی ایجاد نکند و سپس داخل آن حفاری گردد تمام تنشهای اولیه موجود در محل به پوشش وارد می‌شود. در همین حالت اگر بجای پوششی صلب از غشایی باظرفیت و سختی خمشی ناچیز و مقاومت محوری بینهایت استفاده گردد محیط و غشاء به گونه‌ای تغییر شکل می‌دهند که تعادل حاصل شود و در حالت تعادل توزیع فشارهای وارده به غشاء به گونه‌ای است که در پوشش فقط نیروی محوری ایجاد می‌شود. از

این توضیح مشخص می‌گردد که رفتار یک تونل تابع انعطاف پذیری پوشش و فاصله پوشش از سینه کار در هنگام نصب آن می‌باشد، به این نکته نیز توجه شود که وجود سینه کار در مجاورت محدوده پوشش نشده از مقطع حفاری مانند یک حایل عمل می‌کند و باعث محدود شدن تغییر شکلهای تونل می‌شود.

۲ - با توجه به توضیح قبلی رفتار یک حفره زیرزمینی تابع روش اجراء نیز می‌باشد. مواردی مانند تأخیر در اجرای پوشش و یا انجام حفاری و پوشش در چند مرحله (یعنی مقطع حفاری به چند بخش تقسیم شود) در میزان بار وارد بر پوشش و جابجاییهای محیط تأثیر می‌گذارند.

۳ - بر خلاف آنچه در روشهای قدیم فرض می‌شد، رفتار پوشش یک بنای زیرزمینی مانند یک سازه که روی آن بار مشخص و ثابتی وارد شود نیست. آنچه در عمل اتفاق می‌افتد اندرکش سازه - محیط است که در آن خصوصیات محیط بیشتر از سازه مؤثر است.

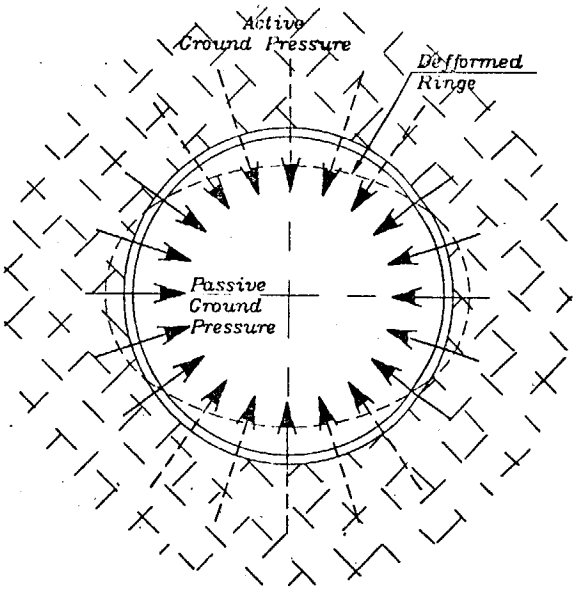
۴ - رفتارحقیقی یک تونل مسئله‌ای سه بعدی وتابع زمان است.

۵ - باتوجه به مورد ۱ مشخص می‌شود که سینه کار مانند یک حایل باعث کاهش تغییر مکانها در ناحیه حفاری شده مجاور خود می‌شود. بنابراین با نزدیک شدن جبهه حفاری به یک مقطع خاص و قبل از حفاری آن مقطع مقداری از تغییر شکلهاانجام می‌شود. تجربه نشان می‌دهد که بسته به جنس خاک یا سنگ و روش اجراء بین ۳۰ درصد الی نصف جابجاییهای یک مقطع قبل از حفاری آن مقطع صورت می‌گیرد.

۶ - در بناهای زیرزمینی به خصوص در محیط سست مهمترین مسئله سازه‌ای که بنا را تهدید می‌کند وجود حفره و یا لایه ضعیف بین پوشش و محیط است.

۷ - وجود مقاومت محیط در حالتی که تغییر شکل پوشش به سمت خارج تمایل دارد باعث کاهش این تغییر شکل و در نتیجه کاهش لنگر خمشی پوشش می‌گردد. (به شکل ۱ - ۴ توجه شود) به عبارت دیگر وجود خاک یا سنگ دراطراف پوشش مانع از بوجود آمدن تغییرات تند و نقاط عطف در تغییر شکلهای مربوط به پوشش می‌شود و این موضوع باعث کاهش لنگر خمشی در پوشش می‌گردد. به همین دلیل وجود حفره یا ناحیه ضعیف در پشت پوشش خطرناک است. برای استفاده از ظرفیت کامل پوشش لازم است پوشش در تماس کامل با محیط اطراف باشد.

در نظر نگرفتن فشار مقاوم خاک در روشهای قدیمی باعث ایجاد لنگرهایی بسیار بزرگ در تحلیل پوشش می‌گشت و این منجر به طرح پوششهایی ضخیم می‌گردید. ترزاقی که در سال ۱۹۴۰ مشاور در زمینه ساخت متروی شهر شیکاگو بود این مسئله را خاطر نشان ساخت و پشنهاد کرد که بجای استفاده از یک پوشش ۷۵ سانتیمتری از پوششی انعطاف پذیر به ضخامت ۲۰ سانتیمتر استفاده شود !



شکل ۱ - ۴، تأثیر فشار مقاوم محیط در تعدیل لنگر خمشی وارد بر پوشش

۸ ـ تجربه و اندازه گیریها نشان می‌دهد که زیاد کردن سختی خمشی پوشش بدون ایجاد تغییر در سختی محوری لنگر وارد بر پوشش را افزایش می‌دهد ولی روی جابجایهای محیط تأثیر ناچیزی می‌گذارد. بنابراین برای بهینه کردن طراحی لازم است تا حد امکان پوشش انعطاف پذیر باشد.این موضوع را حتی با انجام تحلیل خطی نیز می‌توان تحقیق کرد [۱].

۹ ـ در بناهای زیرزمینی رفتار محیط تقریباً همیشه غیر خطی و تابع زمان است. در خاکها و سنگهای سست (مانند سنگهای رسی) و یا اعماق زیاد که تنشهای در جا نسبتاً زیاد می‌باشند و مانع از باز شدن درزه‌ها در سنگها می‌شوند، آنچه تعیین کننده است چگونگی گسترش ناحیه خمیری در اطراف حفره می‌باشد. ولی در سنگهای سخت یا هنگامی که سر بار حفره کم باشد لغزش و جابجایی قطعات سنگ در

---

۱ - Richard 1964

امتداد ناپیوستگیها حاکم بر رفتار محیط می‌گردد.

۱۰ - تجربه نشان می‌دهد که پوششهای اولیه مانند شاتکریت معمولاً دارای نفوذپذیری بیشتری نسبت به محیط می‌باشند. و این از ایجاد فشار هیدرواستاتیکی روی پوشش جلوگیری می‌کند بنابراین در هنگام طراحی پوشش معمولاً از این نیروها صرف نظر می‌شود. در پوشش نهایی نیز باایجاد زه‌کش در پشت پوشش می‌توان فشارآب را تقلیل داد. در خاکهای چسبنده وجود آب در خاک می‌تواند باعث تغییر مشخصات خاک شود (مثلاًکاهش چسبندگی یا تورم) و یا باعث شود که پدیده تحکیم اتفاق بیفتد. که این موضوع در طراحی پوشش باید مورد توجه قرارگیرد. در محاسباتی که مربوط به مسئله اندرکش پوشش - محیط است معمولاً از تنش مؤثراستفاده می‌شود و اگر لازم باشد فشار آب بر فشار وارد بر پوشش افزوده می‌شود. در اثر ایجاد تغییر شکل در محیط و تغییرتوزیع تنشها در محیطهای غیر نفوذپذیر توزیع فشار آب حفره‌ای تغییر می‌کند و این موضوع خود باعث تغییر رفتار می‌شود ولی این پدیده به جزء در حالات خاص (مثلاً تونلهای زیردریا) قابل چشم پوشی است.

۱۱ - رابطه‌ای که برای مشخص کردن و جداسازی فشار مؤثراز فشار آب حفره‌ای در مکانیک خاک بکار می‌رود به این شکل است :

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + u\,\delta_{ij} \qquad (۳-۱)$$

δ_{ij}: تابع دلتای کرونکر

این رابطه در مکانیک سنگ جای بحث زیادی دارد و رابطه‌ای که پیشنهاد شده به این صورت نوشته می‌شود. (رابطه زنیکویچ[1] واسکمیتون[2])

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \eta \,.\, u \,.\, \delta_{ij} \qquad (۴-۱)$$

$$\eta = (1 - K) / Km \qquad (۵-۱)$$

که K ضریب تغییر حجم پذیری جامد متخلخل در حالت $u = 0$ ست و Km مدول تغییر شکل پذیری جامد است.

---

1 - Zienkiewicz

2 - Skempton