

مطالعه پارامتریک اثرات حفر تونل‌های جدید بر تنش‌های القایی پوشش نگهداری تونل‌های قدیمی مجاور

مهناز جهانپار مقدم^۱

کارشناس ارشد استخراج معدن از دانشگاه شهید باهنر کرمان
e-mail: mjahanyar@yahoo.com

خلاصه

افزایش احداث تونل‌های زیرزمینی در شهرهای درحال توسعه، نیاز به طراحی منطقی و استفاده مناسب از فضاهای زیرزمینی را مطرح می‌کند. بنابراین، در اکثر موارد، در نواحی توسعه یافته، تونل‌های جدید باید در مجاورت تونل‌های قدیمی احداث شوند. از این رو پیش بینی تنش‌های القایی بر تونل‌های قدیمی بسیار مهم است. در مقاله حاضر، نتایج مطالعه عددی که به منظور بررسی اثرات حفر تونل‌های جدید بر تنش‌های القایی پوشش نگهداری تونل‌های قدیمی مجاور، توسط نرم افزار $PLAXIS^{2D}$ انجام شده است، بیان و اثرات وضعیت نسبی، نزدیکی، میزان کاهش حجم (VL)، عمق حفاری و ضخامت پوشش نگهداری تونل‌ها بطور دقیق مطالعه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که چنانچه تونل جدید در بالای تاج تونل قدیمی حفر شود، گشتاور خمشی پوشش تونل قدیمی کاهش می‌یابد در حالیکه اگر تونل جدید مجاور آن احداث شود، گشتاور خمشی پوشش افزایش خواهد یافت. میزان کاهش حجم، عمق خاکبرداری و خصوصیات پوشش تونل نیز از دیگر پارامترهای مؤثر بر تغییر گشتاور خمشی پوشش تونل قدیمی بعد از اندرکنش با تونل جدید می‌باشند. بنابراین دستیابی به ایمنی و طراحی مناسب تونل می‌تواند تحت تأثیر این پارامترها نیز قرار گیرند.

کلمات کلیدی: اندرکنش، وضعیت نسبی تونل‌ها، نزدیکی، میزان کاهش حجم، عمق حفاری، ضخامت پوشش نگهداری، $PLAXIS^{2D}$.

مقدمه

توسعه شهرنشینی بطور غیرمستقیم بر روی افزایش احداث تونل‌های زیرزمینی تأثیر گذار است؛ به این ترتیب ممکن است مجبور به احداث تونل‌های جدید در مجاورت تونل‌های قدیمی از قبیل تونل‌های سیستم حمل و نقل، شبکه‌های مخابراتی و یا حتی شبکه‌های انتقال آب و فاضلاب شویم. در این شرایط برای اطمینان از اینکه تنش‌های القایی در پوشش تونل‌های قدیمی اثرات مخرب ایجاد نمی‌کنند، باید اندرکنش بین تونل‌های جدید و قدیمی به دقت ارزیابی شود. در سال ۱۹۶۹، پک، نظریه تجربی ساده‌ای برای پیش بینی نشست سطح زمین در اثر اندرکنش تونل‌های مجاور ارائه داد. همچنین در سال ۱۹۹۸، آزمایشگاهی توسط کیم و همکارانش بر روی مدل‌های فیزیکی کوچک مقیاس از تونل‌های مجاور در زمین‌های رسی انجام گرفته است. این مطالعات نشان دادند که معمولاً اندرکنش‌های قابل توجهی بین تونل‌هایی که در مجاورت یکدیگر احداث می‌شوند، رخ می‌دهد [۱ و ۲ و ۳]. هدف اصلی این مقاله مطالعه اثر پارامترهای مختلف ناشی از احداث تونل‌های جدید بر تغییرات ممان خمشی و نیروهای محوری تونل‌های قدیمی می‌باشد. همچنین وضعیت قرارگیری دو تونل نسبت به یکدیگر، فاصله بین آنها، میزان کاهش حجم، عمق خاکبرداری و ضخامت پوشش تونل بطور عمده بررسی می‌گردد.

مطالعه مدل شبیه سازی شده

برای مطالعه عددی مدل، روش اجزای محدود دو بعدی در محیط نرم افزار $PLAXIS$ ، روش خاکبرداری تمام مقطع برای هر دو تونل و نصب پوشش نگهداری بلافاصله بعد از خاکبرداری در نظر گرفته شده است. در این آنالیز از پارامترها و اطلاعات مربوط به تونل‌های MRT سنگاپور، استفاده شده [۴ و ۵]. پوشش نگهداری تونل‌ها الاستیک فرض شده و مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است. آنالیز اصلی بر روی تونل‌هایی با قطر ۶ متر (D) و با نسبت روباره به قطر برابر ۳/۵ به عنوان تونل‌های قدیمی، صورت گرفته است. شرایط زمین الاستیک بوده و پارامترهای آن بر اساس پیشنهاد اورپهارا و همکارانش برای لایه های رسی در یکی از ایستگاههای مسیر، در جدول ۲ آورده شده است.

۱- کارشناس ارشد مهندسی معدن- استخراج

جدول ۱- خصوصیات پوشش الاستیک تونل [۵و۴]

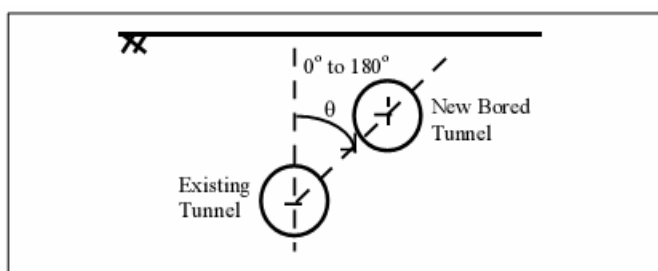
مقدار	واحد	نشانه	متغیر
۰/۲۷۵	m	T	ضخامت
۶/۶	KN/m/m	W	وزن
۳۲۰۰۰	MN/m ²	E _I	مدول یانگ
۰/۲	-	v _I	ضریب پواسون

جدول ۲- خصوصیات لایه های رسی نرم (اوریهارا، ۲۰۰۱) [۶]

مقدار	واحد	نشانه	متغیر
۱۶	KN/m ³	γ	وزن مخصوص
۰/۶۲۵	-	K ₀	ضریب فشار خاک در حالت آزاد
۶	MN/m ²	E _s	مدول یانگ
۰/۴۹۵	-	v _s	ضریب پواسون
۲۰	KN/m ²	C _u	مقاومت برشی
۲۲	°	ϕ	زاویه اصطکاک
-۲	m	G.W.L.	سطح آب زیرزمینی

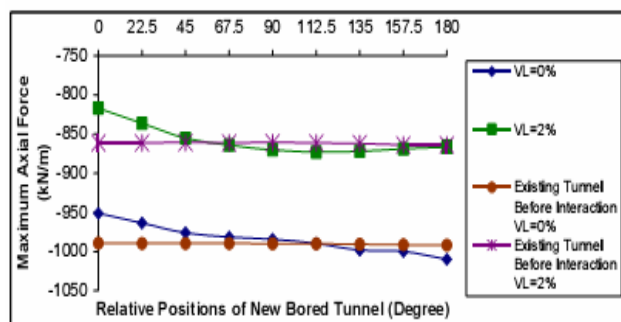
تأثیر وضعیت نسبی قرارگیری تونلها

وضعیت نسبی با اندازه گیری زاویه " θ " بین خط واصل مراکز دو تونل و خط عبوری از مرکز و تاج تونل، مطابق شکل ۱، تعیین می شود. بطوریکه چنانچه این زاویه صفر درجه باشد، تونل جدید درست در بالای تاج تونل قدیمی قرار دارد در حالیکه زاویه ۹۰ درجه بیانگر قرار گرفتن تونل جدید در مجاورت تونل قدیمی و در عمق یکسان می باشد. در این مطالعه، فاصله بین تونلها ثابت و ۳ برابر شعاع تونل (مرکز به مرکز) در نظر گرفته شده است و خصوصیات خاک و پوشش نگهداری در مدت انجام تحلیل عددی ثابت می باشد. بررسی نتایج مربوط به دو میزان کاهش حجم (۰٪ و ۲٪) بیانگر این امر است که نتایج به شدت به این پارامتر وابسته هستند. وضعیت مربوط به کاهش حجم ۰٪ نشان دهنده خاکبرداری کاملاً ایده آل است در حالیکه کاهش حجم ۲٪ مقدار خاکبرداری را به بیشتر از ۹۳٪ افزایش میدهد (شیرلاو، ۲۰۰۱) [۵].

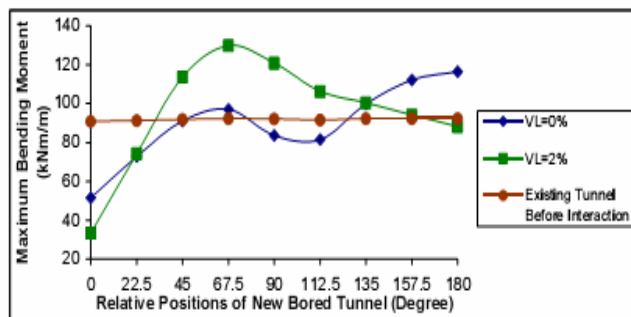


شکل ۱- تأثیر وضعیت نسبی قرارگیری تونلها [۵]

شکلهای ۲ و ۳ به ترتیب ماکزیموم نیروی محوری و ماکزیموم ممان خمشی ایجاد شده در تونل قدیمی، قبل و بعد از اندرکنش با تونل جدید، برای وضعیت نسبی قرارگیری از صفر تا ۱۸۰ درجه را تحت دو وضعیت کاهش حجم ۰٪ و ۲٪ نشان می دهند [۷].



شکل ۲- تغییرات نیروی محوری ماکزیموم (تونل قدیمی بعد از اندرکنش) با وضعیت نسبی قرارگیری تونل جدید



شکل ۳- تغییرات ممان خمشی ماکزیموم (تونل قدیمی بعد از اندرکنش) با وضعیت نسبی قرارگیری تونل جدید

حالت ۱: بدون کاهش حجم (VL=0%)

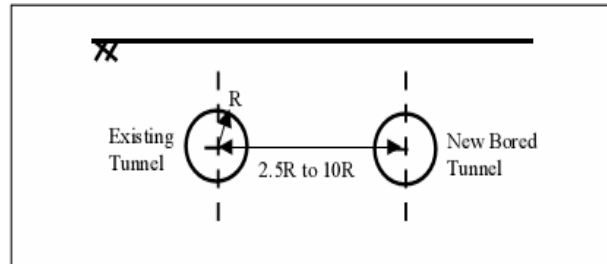
شکل ۲ نشان می دهد وقتیکه تونل جدید بالای تونل قدیمی احداث شود، ماکزیموم نیروی محوری در تونل قدیمی کاهش می یابد. می توان این شرایط را به کاهش فشار عمودی وارد بر تونل قدیمی در اثر باربرداری ناشی از برداشتن توده ای از خاک واقع در بالای تونل نسبت داد. همچنین از این شکل می توان مشاهده کرد که احداث تونل جدید در مجاورت یا پایین تونل قدیمی بر ماکزیموم نیروی محوری ایجاد شده در پوشش نگهداری اثر جزئی می گذارد. شکل ۳ نشان می دهد که اثر وضعیت نسبی قرارگیری تونل جدید بر ممان خمشی ایجاد شده در تونل قدیمی در مقایسه با نیروی محوری شدیدتر است. برای حالت بدون کاهش حجم، ممان خمشی در پوشش نگهداری تونل قدیمی بعد از اندرکنش با تونل جدیدی که در بالای تونل قدیمی و با وضعیت نسبی صفر تا حدود ۴۵ درجه احداث می شود، کاهش می یابد که می توان این شرایط را به کاهش فشار عمودی وارد بر تونل قدیمی بعد از احداث تونل جدید نسبت داد. هنگامیکه تونل جدید پایین تونل قدیمی احداث شود، ممان خمشی پوشش نگهداری تونل قدیمی شدیداً افزایش می یابد؛ این وضعیت را می توان اینگونه تعریف کرد که احداث تونل جدید پایین تونل قدیمی، سختی زمین را در راستای عمودی کاهش می دهد و منجر به تغییرات عمودی بیشتری در نگهداری شده و بنابراین ممان خمشی افزایش می یابد. در این شرایط ماکزیموم تغییرات در ممان خمشی تونل قدیمی در حدود ۳۰٪ ممان قبل از اندرکنش با تونل جدید می باشد.

حالت ۲: با کاهش حجم (VL=2%)

از شکل ۳ مشاهده می شود که در حالت کاهش حجم ۲٪، وضعیت قرارگیری تونل جدید نسبت به تونل قدیمی شدیداً بر ممان خمشی ماکزیموم مؤثر است. ماکزیموم ممان خمشی موجود در تونل قدیمی بعد از اندرکنش با تونل جدید، هنگامیکه تونل جدید با وضعیت نسبی حدوداً ۴۵ درجه تا ۱۳۵ درجه و یا نسبتاً نزدیک به خطوط مرزی تونل قدیمی حفاری می شود، افزایش می یابد. بیشترین تغییر در ممان خمشی در حدود ۵۰٪ مقدار آن قبل از احداث تونل جدید می باشد که می توان این افزایش ممان را ناشی از کاهش مقاومت افقی زمین بعد از احداث تونل جدید در نزدیکی خطوط مرزی تونل قدیمی دانست. کاهش مقاومت افقی زمین، افزایش تغییر شکل تونل و در نتیجه افزایش ممان خمشی را به دنبال دارد.

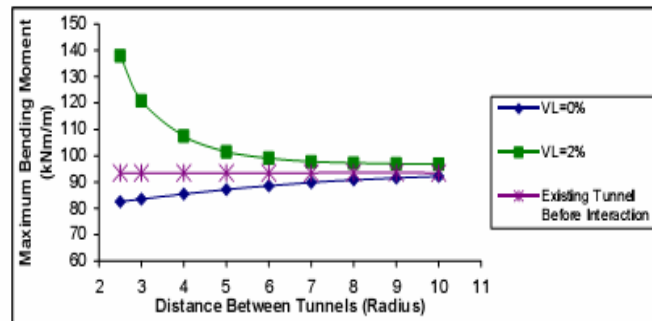
تأثیر فاصله بین دو تونل

در مطالعه انجام شده، دو تونل در یک عمق ($\theta = 90^\circ$) و فاصله بین دو تونل افقی و موازی، بین $2/5$ تا 10 برابر شعاع تونل (R)، مرکز به مرکز، مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شده است. خصوصیات خاک و پوشش نگهداری تونل در مدت آنالیز عددی ثابت بوده و در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. نتایج حاصل از مطالعه در دو حالت کاهش حجم 0% و 2% نیز در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۴- تأثیر فاصله بین دو تونل [۵]

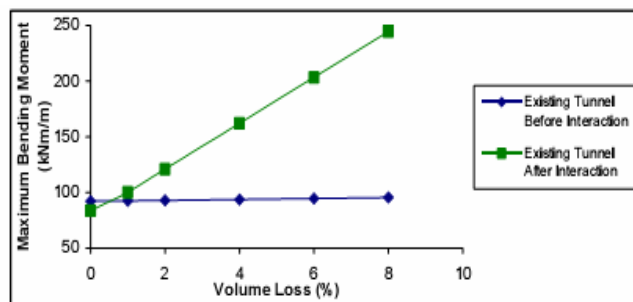
شکل ۵ نشان می دهد که در حالت کاهش حجم 2% ، مجاورت تونل جدید با تونل قدیمی شدیداً بر ممان خمشی تونل قدیمی در مقایسه با حالت کاهش حجم 0% تأثیر می گذارد. برای حالت کاهش حجم 2% ، احداث تونل جدید ممکن است منجر به افزایش بسیار شدید ممان خمشی ماکزیموم در تونل قدیمی شود و هنگامیکه فاصله بین دو تونل کاهش می یابد، افزایش ماکزیموم ممان خمشی بیشتر می شود. از شکل ۵ همچنین می توان مشاهده کرد که فاصله بحرانی بین دو تونل یعنی زمانیکه ممان خمشی شدیداً افزایش می یابد در حدود 5 برابر شعاع تونل است و هنگامیکه تونل جدید در فاصله 3 برابر شعاع تونل احداث می شود، افزایش ممان خمشی 30% خواهد بود. همچنین باید توجه کرد که در حالت کاهش حجم 0% ، هیچ افزایش ممان خمشی در پوشش نگهداری تونل نخواهیم داشت [۷].



شکل ۵- تغییرات ماکزیموم ممان خمشی - فاصله بین دو تونل

تأثیر کاهش حجم

در این مرحله از مطالعه دو تونل مجاور هم، در عمق یکسان و به فاصله 3 برابر شعاع تونل در نظر گرفته شده اند و کاهش حجم 0% تا 8 درصد در هر دو تونل مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۶ خلاصه ای از ماکزیموم ممان خمشی ایجاد شده در تونل قدیمی بعد از اندرکنش ارائه شده است. در شکل می توان مشاهده کرد که کاهش حجم اثر شدیدی بر ممان خمشی ایجاد شده در تونل قدیمی دارد. در حالتی که کاهش حجم در حدود $5/0\%$ است، تغییری در میزان ماکزیموم ممان خمشی نخواهیم داشت. بعد از اندرکنش، در حالتی که کاهش حجم کمتر از $5/0\%$ باشد، کاهش جزئی و در حالتی که کاهش حجم بیشتر از $5/0\%$ باشد، برای مقادیر بالاتر ممان خمشی های بزرگتری را مشاهده خواهیم نمود. در شرایطی که کاهش حجم 2% باشد، افزایش ممان خمشی در تونل قدیمی بعد از اندرکنش در حدود 30% است. این نتایج اهمیت کنترل کاهش حجم در احداث تونل جدید را بیان می کنند [۷].



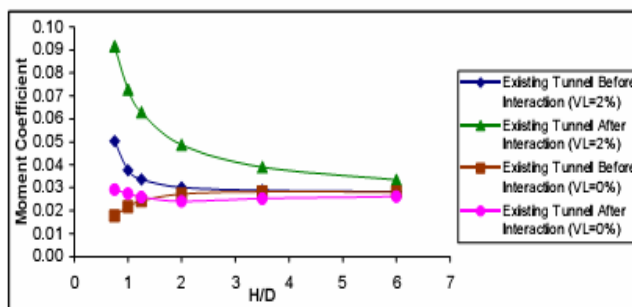
شکل ۶- تغییرات ماکزیموم ممان خمشی - کاهش حجم

تأثیر عمق خاکبرداری

در این تحقیق هر دو تونل بطور موازی و افقی و به فاصله ۳ برابر شعاع تونل از یکدیگر در نظر گرفته شده اند. نسبت روباره به قطر (H/D) برای هر دو بین ۰/۷۵ تا ۶ متغیر بوده و کاهش حجم ۲٪ برای هر دو در نظر گرفته شده است. در شکل ۷ تغییرات ضریب مومنتوم با عمق بدون بعد خاکبرداری نشان داده شده است. رابطه زیر نیز این ارتباط را بیان می کند:

$$\text{Moment - Coefficient } t = \frac{M}{\gamma H R^2} \quad (1)$$

که در آن، M ماکزیموم ممان خمشی ایجاد شده در پوشش نگهداری است [۷]. همانطور که از شکل ۷ می توان دید، بعد از اندرکنش تونل قدیمی با تونل جدید و در شرایط کاهش حجم ۲٪، ضریب مومنتوم برای تونل قدیمی قابل توجه بوده و با کاهش H/D افزایش می یابد. در شرایطی که روباره بسیار کم است ($H/D=0.75$)، بعد از اندرکنش، این ضریب در حدود دو برابر مقدار اولیه خود بزرگتر می شود.



شکل ۷- تغییرات ضریب مومنتوم - H/D

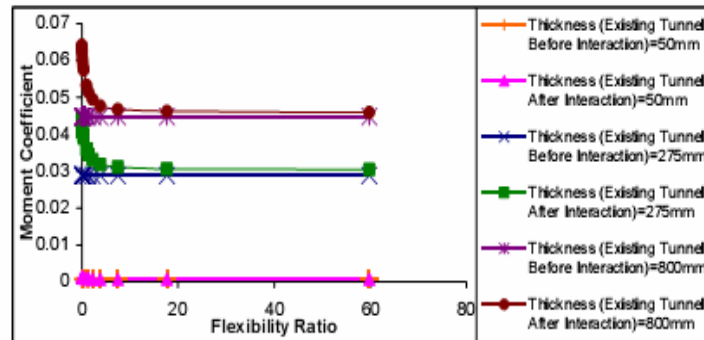
تأثیر ضخامت پوشش نگهداری

سه مقدار برای ضخامت پوشش نگهداری در تونل قدیمی در نظر گرفته شده است که عبارتند از: ۵۰ میلیمتر برای نگهداری انعطاف پذیر، ۲۷۵ میلیمتر برای نگهداری نسبتاً صلب و ۸۰۰ میلیمتر برای نگهداری بسیار صلب. برای هر کدام از این مقادیر، ضخامت پوشش نگهداری در تونل جدید بین ۵۰ تا ۸۰۰ میلیمتر متغیر در نظر گرفته شده و اثر آن بر ممان خمشی ایجاد شده در تونل قدیمی بررسی گردیده است. شکل ۸ نشان می دهد که ضریب مومنتوم تابعی از نرخ انعطاف پذیری است. این مقدار بدون بعد بصورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Flexibility - Ratio} = \frac{\frac{E_s}{(1 + \nu_s)}}{6E_t I_t \frac{1}{(1 - \nu_t^2) R^3}} \quad (2)$$

که در آن I_t ممان اینرسی پوشش نگهداری در واحد طول است [۷].

شکل ۸ بیانگر این مطلب است که برای یک تونل قدیمی با نگهداری انعطاف پذیر، اندرکنش بین تونل قدیمی و تونل جدید دارای اثرات جزئی بر ممان خمشی ایجاد شده در تونل قدیمی است. در شرایط نگهداری صلب، ضریب مومنتوم با افزایش نرخ انعطاف پذیری کاهش می یابد. تغییرات در ضریب مومنتوم زمانیکه نرخ انعطاف پذیری بزرگتر از ۱۰ باشد، چندان قابل توجه نیست. این امر بدین معنی است که پوشش نگهداری با نرخ انعطاف پذیری بیشتر از ۱۰، رفتاری مشابه با پوشش نگهداری از نوع انعطاف پذیر دارد.



شکل ۸- تغییرات ممان خمشی ماکزیموم (تونل قدیمی بعد از اندرکنش) - ضخامت پوشش نگهداری (تونل جدید)

نتیجه گیری

در این مقاله برای ارزیابی اثرات ناشی از حفر تونلهای جدید بر ممان خمشی و نیروهای محوری ایجاد شده در پوشش نگهداری تونلهای قدیمی مجاور، مطالعه ای عددی با استفاده از روش المان محدود و نرم افزار PLAXIS انجام شد. تأثیرات مربوط به وضعیت نسبی قرارگیری تونلها، فاصله بین آنها، کاهش حجم، عمق خاکبرداری و ضخامت پوشش نگهداری مورد بررسی قرار گرفت و نهایتاً نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- موقعیت تونل جدید نسبت به تونل قدیمی، فاصله بین آنها، کاهش حجم، عمق خاکبرداری و ضخامت پوشش نگهداری تأثیرات قابل توجهی بر ممان خمشی ایجاد شده در تونل قدیمی بعد از اندرکنش با تونل جدید دارند.
- ۲- هنگامیکه تونل جدید در بالای تونل قدیمی احداث شود، ماکزیموم ممان خمشی ایجاد شده در نگهداری تونل قدیمی کاهش می یابد.
- ۳- در شرایط کاهش حجم کم (کمتر از ۰/۵٪)، احداث تونل جدید در پایین تونل قدیمی منجر به افزایش ممان خمشی در نگهداری تونل قدیمی می شود.
- ۴- احداث تونل جدید در مجاورت تونل قدیمی ممکن است منجر به افزایش قابل توجهی در ممان خمشی پوشش نگهداری تونل قدیمی شود.
- ۵- کاهش فاصله بین تونلها ممکن است منجر به افزایش بسیار زیاد ممان خمشی ایجاد شده در تونل قدیمی شود. فاصله بحرانی بین دو تونل جایی است که ممان خمشی به میزان زیادی افزایش می یابد. این فاصله در حدود ۵ برابر شعاع تونل است (مرکز به مرکز). افزایش ممان خمشی در تونل قدیمی بعد از اندرکنش با تونل جدید در فاصله بسیار کم (۲/۵ برابر شعاع) در حدود ۵۰٪ میزان ممان قبل از اندرکنش در حالت کاهش حجم ۲٪ است.
- ۶- وقتیکه میزان کاهش حجم افزایش می یابد، ممان خمشی ایجاد شده در نگهداری تونل قدیمی افزایش می یابد.
- ۷- انعطاف پذیری پوشش نگهداری در مورد هر دو تونل، نقش مهمی در میزان ممان خمشی ایجاد شده بعد از اندرکنش بازی می کند. برای پوشش های نگهداری صلب، افزایش ماکزیموم ممان خمشی بعد از اندرکنش بزرگتر است.

مراجع

1. Peck, R.B. (1969) Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground, *Proceeding Of The 7th International Conference Of Soil Mechanics, Mexico, State-of-art Volume*, 225-290.
2. Peck, R.B. Hendron, A.J.; Mohraz, B. (1972) State of the art of soft ground tunneling, *1st North AM. Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Chapter 19.
3. Kim, S.H., Burd, H.J., Milligan, G.W.E. (1998) Model testing of closely spaced tunnels in clay, *Geotechnique*, 375-388.

4. Sebastian, P. and Nadarajah, P. (2000) Construction of North East Line tunnels at Singapore River Crossing, Tunneling in soft ground, *Proceeding of the International Conference on Tunnels and Underground Structures*, Singapore, 191-198.
5. Shirlaw, J.N., Ong, J.C.W., Rosser, H.B., Osborne, N.H., Tan, C.G. and Heslop, P.J.E. (2001) Immediate Settlements Due to Tunneling for The North East Line, *Proceedings of Underground Singapore 2001*, Singapore, 29-30 November 2001, Session 3.
6. Orihara, K., Chan, M.L., Chabayashi, K., Okamoto, S., Teo, P.T.P. and Tan, C.G. (2001) Excavation of New Dhoby Ghaut Station for MRT North East Line, *Proceeding of Underground Singapore 2001*, Singapore, 29-30 November 2001, Session 5.
7. Yamaguchi, I., Yamazaki, I. and Kiritani, Y. (1998) Study of Ground-Tunnel Interactions of Four Shield Tunnels Driven in Close Proximity, in Relation to Design and Construction of Parallel Shield Tunnels, *Tunneling and Underground Space Technology*, 13 (3), 289-304.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.