

ارزیابی رفتار غیرخطی تونل‌های دایروی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی

محمد علیایی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

امید نعیمی‌فر (مربی)

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ملارد

مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۳۹۲)
دوری ۲ - ۲۹، شماره‌ی ۳، ص. ۵۳-۴۵

رفتار تونل‌های دایروی در آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران، با استفاده از مدل‌های رفتاری موهر-کولمب و دانکن-چانگ تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر بررسی تأثیر رفتار غیرخطی و نوع خاک، مطالعه‌ی پارامتری روی متغیرهای ضریب فشار جانبی خاک و عمق تونل که تأثیر قابل توجهی در تغییر شکل‌ها و نیروها دارند، انجام شده است. نتایج بیان‌گر افزایش تأثیر رفتار غیرخطی خاک روی ممان‌ها و نشست‌ها با کاهش مقدار ضریب فشار جانبی خاک هستند. همچنین رفتار غیرخطی خاک با افزایش عمق و به عبارت دیگر، افزایش تنش همه جانبه، اثر بیشتری داشته است. ضمناً مقادیر ممان‌های بیشینه و پس‌ماند ناشی از بارگذاری دینامیکی برای ضریب فشار جانبی کم، با عمق افزایش می‌یابد؛ در حالی که برای ضریب فشار جانبی بالا، افزایش عمق تأثیر نامحسوسی دارد.

واژگان کلیدی: تونل دایروی، رفتار غیرخطی، تحلیل استاتیکی، تحلیل دینامیکی، ضریب فشار جانبی خاک.

۱. مقدمه

انتخاب نوع مدل رفتاری در ارزیابی رفتار خاک و اندرکنش آن با سازه‌های مختلف اهمیت خاصی دارد. با توجه به آنکه رفتار واقعی خاک حتی در تنش‌های کم نیز به صورت غیرخطی است؛ لذا در برخی شرایط بارگذاری، عدم مدل‌سازی رفتار غیرخطی خاک می‌تواند منجر به نتایج غیرواقعی شود.

طبق پژوهش انجام شده بر مبنای مدل‌سازی‌های انجام‌شده با روش FEM در حالت سه بعدی نشان داده شد که سیستم‌های دیوار میخکوبی شده با مدل غیرخطی دانکن-چانگ، رفتار دیوار را بسیار نزدیک به حالت واقعی پیش‌بینی می‌کند.^[۱] همچنین به منظور معادل‌سازی پارامترهای مدل‌های خطی و غیرخطی، تحلیل‌های مختلفی با استفاده از مدل‌های موهر-کولمب و هوک - براون انجام شد و روابط بین پارامترهای این دو مدل ارائه شد.^[۲] در پژوهشی دیگر از دو مدل رفتاری موهر-کولمب و دانکن-چانگ به منظور بررسی رفتار لوله‌های مدفون در خاک تحت بارهای جانبی استفاده شده است.^[۳] نتایج این پژوهش نشان داد که مقاومت بیشینه‌ی خاک در مدل موهر-کولمب خیلی زودتر نسبت به آزمایش‌های صحرایی تمام مقیاس رخ می‌دهد، در حالی که نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده با مدل دانکن-چانگ به نحو مناسبی رفتار بار-تغییرمکان مشاهده شده در مدل‌های واقعی را بازسازی می‌کند.

علاوه بر نحوه‌ی مدل‌سازی رفتار خاک، تأثیر پارامترهای مختلف در نتایج تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی تونل‌ها از مسائل مورد توجه در پژوهش‌های اخیر

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۳/۲، اصلاحیه ۱۳۹۱/۲/۳، پذیرش ۱۳۹۱/۴/۳۱.

بوده است. از مهم‌ترین این پارامترها می‌توان نوع خاک، عمق تونل و شکل آن را نام برد. برای مثال تحقیقات انجام شده نشان داده‌اند که با افزایش عمق، تغییرمکان‌های اطراف تونل افزایش می‌یابد. ضمناً در تونل‌های غیردایروی تغییرمکان‌های نسبی در زاویه‌های مختلف به ویژه در محل تاج و دیواره‌ها مقادیر متفاوتی دارد.^[۴] همچنین استفاده از مدل‌سازی فیزیکی در آزمایشگاه و مدل‌سازی عددی با روش المان محدود نشان داد که با حفر تونل در خاک‌های دانه‌بی، نشست‌هایی در اعماق مختلف رخ خواهند داد که با دور شدن از سطح زمین مقدار آنها افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش عمق، توزیع نشست‌ها روی پروفیل وسیع‌تری از سطح زمین پخش خواهد شد.^[۵]

بررسی‌های انجام‌شده‌ی عددی و آزمایشگاهی در مورد تأثیر جنس خاک و ضخامت آن نشان داد وجود لایه‌های درشت دانه در اطراف تونل موجب کاهش قابل توجه در ممان‌های به وجود آمده در پوشش^۱ تونل خواهد شد. ضخامت بیشتر یا قرارگیری لایه‌های درشت دانه در فاصله‌ی نزدیک‌تر به تونل، اثر فوق را افزایش خواهد داد.^[۶] نتایج پژوهشی دیگر نیز نشان‌دهنده‌ی آن است که وجود لایه‌های سخت‌تر در بالای تونل منجر به کاهش نیرو و افزایش پایداری خواهد شد.^[۷] در بررسی‌های صورت‌گرفته در پژوهشی نیز با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی نشان داده شده است که وجود لایه‌های سخت‌تر در بالای تونل، موجب کاهش تغییرمکان‌ها در تاج تونل خواهد شد.^[۹]

هدف اصلی این نوشتار بررسی اثر رفتار غیرخطی خاک، نوع خاک، ضریب

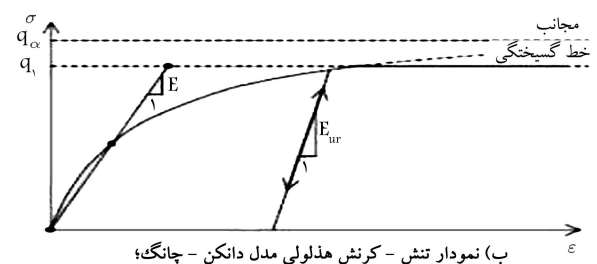
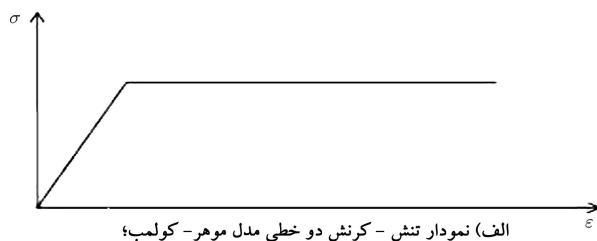
فشار جانبی خاک و عمق تونل است، که تأثیر قابل توجهی در تغییر شکل‌ها و نیروهای سازه تونل دارند. این موضوع برای تونل‌های دایروی در آبرفت درشت دانه‌ی تهران، بر مبنای روش عددی تفاضل محدود و تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی ارزیابی شده است.

۲. تئوری مدل‌های رفتاری

مدل موهر- کولمب یک مدل رفتاری کشسان خمیری کامل^۲ بوده است که سطح تسلیم آن در فضای تنش‌های اصلی ثابت است و تحت تأثیر کرنش قرار ندارد. برخلاف مدل موهر- کولمب، سطح تسلیم مدل دانکن- چانگ در فضای تنش‌های اصلی ثابت نیست و بسته به کرنش می‌تواند گسترش یابد.

مزیت مدل دانکن- چانگ بر مدل موهر- کولمب، نه فقط استفاده از منحنی تنش-کرنش هذلولی^۳ به جای منحنی تنش-کرنش دو خطی^۴ برای توصیف رفتار خاک است (شکل‌های ۱الف و ۱ب)، بلکه در نظر گرفتن وابستگی سختی به سطح تنش از مزایای اصلی آن است (شکل ۱ج). به عبارت دیگر هرچند مقدار سختی در رفتار واقعی خاک وابسته به سطح تنش است، اما در مدل موهر- کولمب مقادیر ثابتی برای مدول کشسانی انتخاب می‌شود.^[۱۰]

در شکل ۱ب، q_a مقاومت برشی مجانب یا نهایی،^۵ q_f مقاومت برشی گسیختگی،^۶ و E سختی وابسته به تنش همه جانبه است. خاطر نشان می‌شود که q_f از معیار گسیختگی موهر- کولمب به دست می‌آید. زمانی که تنش انحرافی به q_f برسد، گسیختگی رخ می‌دهد و تسلیم خمیری کامل مطابق مدل موهر- کولمب رخ می‌دهد. رابطه‌ی بین q_a و q_f با نسبت گسیختگی^۷ R_f بیان شده است که



شکل ۱. مقایسه فرضیات مدل‌های مورد استفاده

مقداری کوچک‌تر از ۱ است:

$$R_f = \frac{q_f}{q_a} \quad (۱)$$

در مدل رفتاری دانکن- چانگ، مدول کشسانی مماسی (E_t) مطابق با رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$E_t = \left[\lambda - \frac{R_f(\lambda - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 K_{pl} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (۲)$$

در این رابطه، σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه، C و φ پارامترهای مقاومت برشی موهر- کولمب، R_f نسبت تنش نهایی به تنش گسیختگی، K_{pl} و n پارامترهای مصالح و P_a فشار اتمسفر هستند.

در مدل رفتاری دانکن- چانگ، برای مسیرهای تنش بارگذاری- باربرداری مجدد، سختی دیگری (E_{ur}) که آن نیز وابسته به تنش همه جانبه است، به شکل رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (۳)$$

در این رابطه، σ_3 تنش اصلی کمینه، K_{ur} و n پارامترهای مصالح و P_a فشار اتمسفر هستند.

۳. مدل‌سازی عددی و پارامترهای مصالح

در این نوشتار، مدل‌سازی عددی بر مبنای روش عددی تفاضل محدود دو بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC انجام شده است. مدل‌سازی برای تونل‌های دایروی که به وسیله‌ی ماشین‌های ویژه حفاری تونل (TBM) ساخته می‌شوند، صورت گرفته است. مدل FLAC ساخته‌شده در راستاهای افقی و قائم به ترتیب دارای ابعاد ۷۰ و ۵۰ متر بوده و ابعاد شبکه‌ی آن مربعی و به بعد ۰/۵ متر انتخاب شده است. تونل مدل‌سازی شده در وسط این شبکه قرار گرفته است، بنابراین در راستای افقی از هر طرف حدود ۳۰ متر مدل‌سازی شده است تا تأثیر مرزها از بین برود.

روند مدل‌سازی شامل ایجاد هندسه‌ی مدل، تعیین پارامترهای مصالح، اعمال شرایط مرزی و اولیه، بارگذاری استاتیکی (حفر تونل، آزادسازی تنش‌ها و نصب پوشش)، بارگذاری دینامیکی (اعمال شتاب نگاشت) و تحلیل حساسیت روی پارامترهای مؤثر در تغییر شکل‌ها و نیروها بوده است. تحلیل حساسیت شامل نوع مدل رفتاری، نوع خاک، ضریب فشار جانبی خاک و عمق تونل است.

برای مدل‌های رفتاری، مدل دوخطی موهر- کولمب و مدل هذلولی دانکن- چانگ انتخاب شده‌اند. نوع خاک، آبرفت درشت دانه‌ی تهران در نظر گرفته شده است که براساس میزان تراکم و سیمانتاسیون آن، دو نوع خاک با تراکم و سیمانتاسیون بالا و خیلی بالا (به ترتیب خاک ۱ و خاک ۲) که بتوانند محدوده‌ی کلی از این آبرفت را پوشش دهند، انتخاب شده‌اند. تونل مدل‌سازی شده دارای قطر ۱۰ متر است و تحلیل‌های انجام شده با در نظر گرفتن محور تونل در سه عمق ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر انجام شده‌اند. به منظور بررسی تأثیر ضریب فشار جانبی خاک، مقدار آن از ۰/۴ تا ۱ متغیر در نظر گرفته شده است. شکل ۲، نمونه‌ی نتایج تغییر شکل‌های قائم استاتیکی را برای تونل با عمق محور ۱۵ متر، ضریب فشار جانبی ۰/۷۵، خاک ۱ و مدل رفتاری موهر کولمب نشان می‌دهد.

مقادیر پارامترهای مصالح انتخاب شده مدل‌های موهر- کولمب و دانکن- چانگ برای دو نوع خاک مورد مطالعه در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌اند. خاطر نشان می‌شود

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مدل موهر-کولمب.

پارامترهای مدل	خاک ۱	خاک ۲
φ زاویه اصطکاک	Degree ۳۲	۳۶
C چسبندگی	Kg/cm ^۲ ۰٫۲	۰٫۴
E_{ave} مدول الاستیسیته	Kg/cm ^۲ ۵۰۰	۸۰۰
ν نسبت پواسون	- ۰٫۳۲	۰٫۳۲

جدول ۲. مقادیر پارامترهای مدل دانکن-چانگ.

پارامترهای مدل	خاک ۱	خاک ۲
φ زاویه اصطکاک	Degree ۳۲	۳۶
C چسبندگی	Kg/cm ^۲ ۰٫۲	۰٫۴
R_f Failure ratio	- ۰٫۸	۰٫۸
K_{pl} Modulus number*	- ۶۰۰	۹۷۵
n Modulus exponent	- ۰٫۲۶	۰٫۲۶
P_a Atmospheric pressure	Kg/cm ^۲ ۱	۱
K_{ur} Unloading/reloading modulus number*	- ۱۰۰۰	۱۶۲۵

* K_{ur} و K_{pl} بر حسب ضریب فشار جانبی خاک متغیر هستند (در جدول فوق $K=۰٫۵$).

جدول ۳ الف. نشست سطح زمین (mm) برای مدل شکل ۲.

مدل	تفاضل محدود	اجزاء محدود
تحلیل استاتیکی	۷٫۵	۶٫۷۵
تحلیل دینامیکی	۱۱٫۷	۱۰٫۹

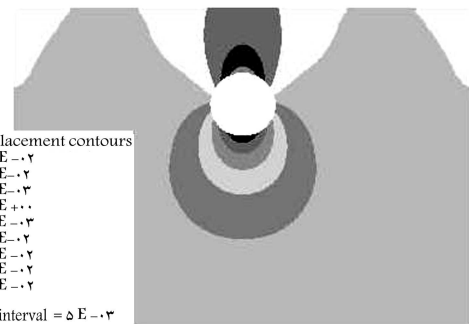
جدول ۳ ب. ممان پوشش (Ton-m) برای مدل شکل ۲.

مدل	تفاضل محدود	اجزاء محدود
تحلیل استاتیکی	۲٫۰	۱٫۹
تحلیل دینامیکی	۲۲٫۰	۲۵٫۲

جدول ۳ ج. نیروی محوری پوشش (Ton) برای مدل شکل ۲.

مدل	تفاضل محدود	اجزاء محدود
تحلیل استاتیکی	۷۴	۷۳
تحلیل دینامیکی	۱۲۵	۱۳۶

* نتایج تحلیل دینامیکی مربوط به مقادیر بیشینه هستند.



شکل ۲. تغییر شکل‌های قائم استاتیکی تونل (عمق ۱۵ متر، ضریب فشار جانبی ۰٫۷۵، خاک ۱ و مدل موهر-کولمب).

که پوشش بتنی به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر به‌منزله‌ی سیستم نگهدارنده‌ی دائمی در نظر گرفته شده است. مدل موهر-کولمب به‌منزله‌ی مدل رفتاری سیستم نگهدارنده‌ی دائمی مورد استفاده قرار گرفته است.

تفاضل محدود و اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته است و تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهند. مقایسه‌ی مقادیر ممان، نیروی محوری و نشست برای نمونه‌ی مدل نشان داده‌شده در شکل ۲، در جدول ۳ ارائه شده است.

۵. نتایج عددی

در این بخش، نتایج عددی تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف مورد بررسی آورده شده‌اند. این پارامترها شامل: اثر رفتار غیرخطی خاک، نوع خاک، ضریب فشار جانبی خاک و عمق تونل هستند. این تذکر لازم است که

۴. صحت‌سنجی مدل

فرایند ارزیابی مدل برای دو حالت تحلیل استاتیکی و دینامیکی انجام شده است. جهت صحت‌سنجی مدل از نرم افزار اجزاء محدود PLAXIS استفاده شده است. مدل PLAXIS ساخته‌شده در راستاهای افقی و قائم به ترتیب دارای ابعاد ۸۰ و ۵۰ متر بوده و با المان‌های مثالی شکل ۱۵ گره‌ی شبکه‌بندی شده است. در حدود ۱۵ متر از اطراف تونل، شبکه نسبت به بقیه‌ی نواحی ریزتر انتخاب شده است تا دقت نتایج بالاتر باشد. تونل مدل‌سازی شده در وسط این شبکه قرار گرفته است. مقادیر ممان و نیروی محوری در پوشش و نشست سطح زمین برای هر دو مدل

دانکن- چانگ با نماد (D-C) مشخص شده‌اند. همچنین نمودارهای خط چین مربوط به خاک ۱ و نمودارهای توپر مربوط به خاک ۲ هستند. خاطرنشان می‌شود که به منظور بررسی تأثیر ضریب فشار جانبی خاک، مقدار آن از ۰/۴ تا ۱ متغیر در نظر گرفته شده است.

۱.۱.۵. اثر تغییرات ضریب فشار جانبی خاک

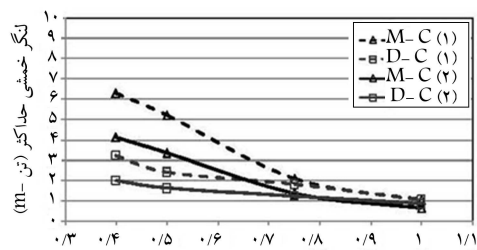
همان‌گونه که در شکل‌های ۳ الف و ۳ ب و ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب فشار جانبی خاک از ۰/۴ تا ۱، مقدار بیشینه‌ی نیروی محوری به وجود آمده در پوشش تونل در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد (بسته به عمق تونل) نسبت به مقدار اولیه افزایش یافته، در حالی که مقدار بیشینه‌ی ممان دچار کاهش شده است (مقدار این کاهش در حدود ۵۰ تا ۸۵ درصد برای شرایط مختلف متفاوت

تغییرات بیشینه‌ی ممان در پوشش تونل،^۸ بیشینه‌ی نیروی محوری در پوشش تونل،^۹ بیشینه‌ی نشست سطح زمین،^{۱۰} و بیشینه‌ی نشست تاج تونل^{۱۱} برای بررسی رفتار تونل مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

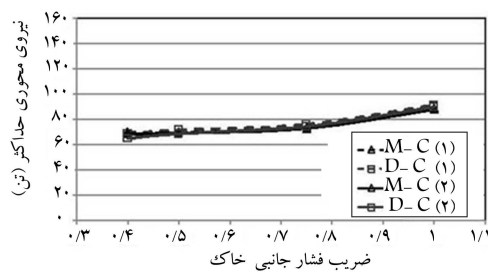
۱.۵. نتایج تحلیل استاتیکی

نتایج تحلیل استاتیکی تونل با عمق محوری ۱۵ و ۲۵ متر در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند کلی تغییرات پارامترهای مختلف برای دو عمق تقریباً مشابه است.

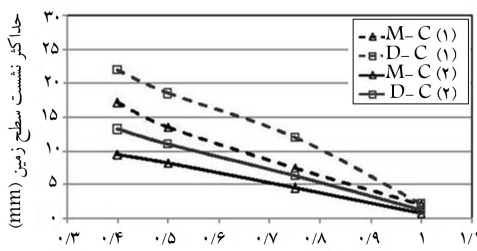
در شکل‌های مذکور، نتایج مدل موهر- کولمب با نماد (M-C) و نتایج مدل



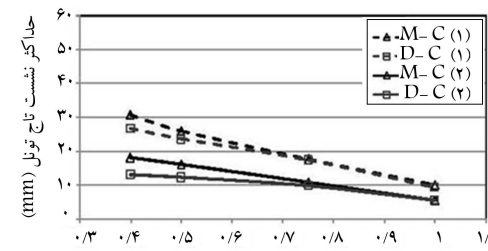
ب) تغییرات بیشینه‌ی ممان پوشش؛



الف) تغییرات بیشینه‌ی نیروی محوری پوشش؛

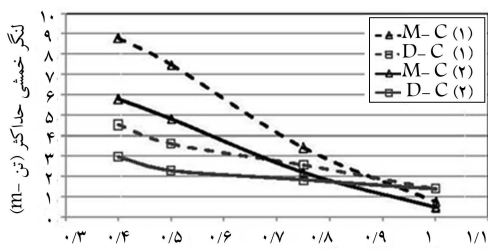


د) تغییرات بیشینه‌ی نشست سطح زمین.

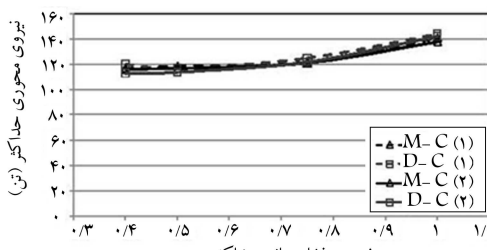


ج) تغییرات بیشینه‌ی نشست تاج تونل؛

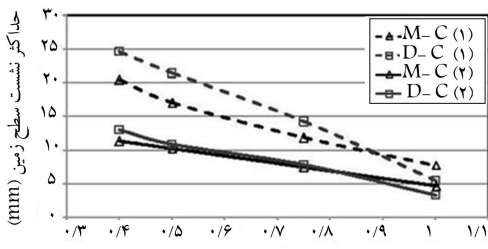
شکل ۳. نتایج تحلیل استاتیکی (عمق محوری تونل ۱۵ متر).



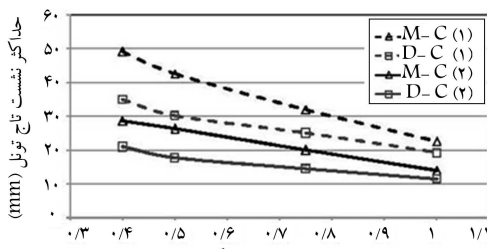
ب) تغییرات بیشینه‌ی ممان پوشش؛



الف) تغییرات بیشینه‌ی نیروی محوری پوشش؛



د) تغییرات بیشینه‌ی نشست سطح زمین.



ج) تغییرات بیشینه‌ی نشست تاج تونل؛

شکل ۴. نتایج تحلیل استاتیکی (عمق محوری تونل ۲۵ متر).

یک نمونه تونل مدل‌سازی شده با مدل موهر- کولمب و ضریب فشار جانبی ۰٫۵ ارائه شده است. در شکل ۵ نیز توزیع کرنش برشی برای همین مدل با مشخصات مشابه و با استفاده از مدل رفتاری دانکن- چانگ نشان داده شده است. مقایسه‌ی شکل‌های ۵الف و ۵ب نشان می‌دهد که در مدل موهر- کولمب توزیع کرنش‌های برشی نامتقارن است و در بالا و پایین تونل تمرکز بیشتر و در دیواره‌ها تمرکز کمتر می‌شود. این مسئله موجب می‌شود تا ممان‌های ایجاد شده در تونل مدل‌سازی شده با مدل موهر- کولمب به مقدار قابل توجهی بیشتر باشند، در حالی که همان‌طور که در شکل ۵ب مشاهده می‌شود، توزیع کرنش‌های برشی در مدل دانکن- چانگ به شکل نسبتاً متقارن‌تری صورت گرفته است که در نتیجه ممان‌های کمتری را باعث خواهد شد.

به منظور بررسی تأثیر ضریب فشار جانبی خاک، نتایج ارائه شده در شکل ۵، با در نظر گرفتن ضریب فشار جانبی خاک برابر با ۱ در شکل ۶ ارائه شده اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش مقدار ضریب فشار جانبی خاک موجب توزیع متقارن کرنش‌های برشی در هر دو مدل رفتاری شده است. این موضوع موجب می‌شود تا همان‌گونه که در شکل‌های قبل نیز نشان داده شد، با افزایش مقدار ضریب فشار جانبی خاک، ممان‌های به وجود آمده در پوشش تونل کمتر شده و مقادیر آنها نیز برای دو مدل رفتاری به یکدیگر همگرا شوند.

در شکل‌های ۳ج و ۴ج مشاهده می‌شود که روند تغییرات ممان به صورت متناظر در مورد تغییرات نشست تاج نیز دیده می‌شود. به عبارت دیگر، در مقادیر ضرایب فشار جانبی کم نشست‌های تاج پیش‌بینی شده با مدل دانکن- چانگ کمتر است که با افزایش ضرایب فشار جانبی، این اختلاف کمتر می‌شود. اما نکته‌ی قابل ملاحظه در شکل‌های ۳د و ۴د آن است که تغییرات نشست سطحی از روند فوق تبعیت نمی‌کند. این مسئله مؤید آن است که مدل دانکن- چانگ برای اعماق سطحی که فشار همه جانبه در آن کم است، جواب‌های مناسبی به دست نمی‌دهد.

۳.۱.۵. اثر نوع خاک

مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به دو نوع خاک مختلف در شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که با کاهش تراکم و سیمانتاسیون خاک، هر دو مدل موهر- کولمب و دانکن- چانگ مقادیر ممان‌ها و تغییرشکل‌های بیشتری را پیش‌بینی کرده‌اند. برای مثال، می‌توان مشاهده کرد که مقادیر ممان با بهبود پارامترهای خاک در حدود ۳۰٪ کاهش یافته است که البته این اختلاف در مقادیر فشارهای جانبی بالا ناچیز شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، افزایش تراکم و سیمانتاسیون و نتیجتاً افزایش سختی خاک، منجر به جذب تنش‌های بیشتر در خاک، کاهش نیروهای انتقالی به

است. با توجه به آنکه توزیع نیروی محوری در پوشش تونل به صورت فشاری است، افزایش ضریب فشار جانبی خاک به مفهوم نزدیک تر شدن تنش‌های افقی به تنش‌های عمودی در تراز تونل و در نتیجه ایجاد نیروی بزرگ‌تر و یک‌نواخت‌تر در پوشش تونل است. برخلاف نیروی محوری، توزیع ممان در پوشش تونل به صورت فشاری و کششی است. به عبارت دیگر، قسمتی از پوشش تونل دارای ممان منفی و قسمت دیگر دارای ممان مثبت خواهد بود. این مسئله به دلیل اعمال تنش قائم بیشتر نسبت به تنش افقی روی تونل است که منجر به بیضوی شدن شکل تونل و در نتیجه ایجاد ممان‌های بزرگ مثبت و منفی می‌شود. با افزایش ضریب فشار جانبی، تنش‌های افقی و قائم به هم نزدیک می‌شوند و در نتیجه تمایل تونل برای تغییرشکل از حالت دایروی به بیضوی را کاهش می‌دهد که این موضوع روی ممان به وجود آمده در پوشش تونل به شدت تأثیرگذار است و آن را به نحو محسوسی کاهش می‌دهد.

در شکل‌های ۳ج و ۴ج و ۳د و ۴د مشاهده می‌شود که افزایش ضریب فشار جانبی خاک موجب کاهش قابل ملاحظه‌ی مقادیر بیشینه‌ی نشست‌های تاج تونل و سطح زمین شده است. این موضوع به دلیل افزایش نسبت تنش‌های افقی به تنش‌های قائم خاک است که از نشست بیشتر خاک جلوگیری کرده است، به طوری که در مقادیر بالای ضریب فشار جانبی مقدار نشست نسبتاً ناچیز شده است.

۲.۱.۵. اثر مدل رفتاری

مقایسه‌ی نتایج تحلیل برای مدل‌های رفتاری موهر- کولمب و دانکن- چانگ (شکل‌های ۳ و ۴، بیان‌گر آن است که نوع مدل رفتاری تأثیر خاصی روی بیشینه‌ی نیروی محوری به وجود آمده در پوشش ندارد، در حالی که مدل موهر- کولمب بیشینه‌ی ممان بیشتری را نسبت به مدل دانکن- چانگ نتیجه داده است (در حدود ۱۰۰٪). برای هر دو نوع خاک مورد مطالعه، با توجه به شکل‌های ۳ب و ۴ب، می‌توان مشاهده کرد که اختلاف ممان‌ها در مقادیر ضریب فشار جانبی کم دارای بیشترین مقدار است و با افزایش ضریب فشار جانبی این اختلاف کاهش می‌یابد؛ به طوری که در مقادیر ضریب فشار جانبی بیش از ۰٫۷۵، مقدار بیشینه‌ی ممان به دست آمده از دو مدل رفتاری تقریباً یکسان است. این موضوع ناشی از آن است که مدل دانکن- چانگ، سختی متناظر با افزایش فشار همه جانبه را به نحو مطلوب‌تری مدل می‌کند. در حقیقت، همان‌گونه که از رابطه‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، مدل دانکن- چانگ در ضرایب فشار جانبی کمتر (و به طور متناظر تنش‌های اصلی کمینه‌ی پایین‌تر)، عمق متناظر بیشتری را برای رسیدن به فشاراتمسفر در نظر می‌گیرد. به منظور بیان علت روند مشاهده شده، در شکل ۵الف توزیع کرنش برشی برای

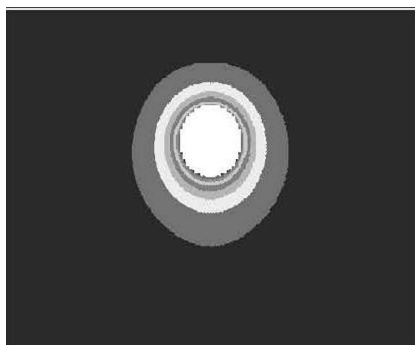


ب) مدل رفتاری دانکن- چانگ.

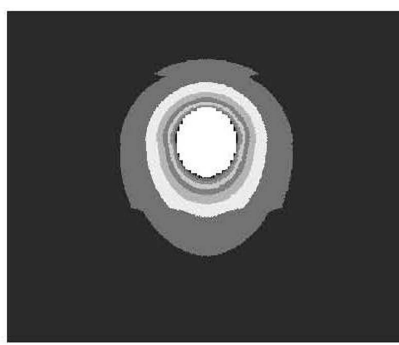


الف) مدل رفتاری موهر- کولمب؛

شکل ۵. توزیع کرنش‌های برشی در اطراف تونل (عمق ۱۵ متر، خاک ۱، ضریب فشار جانبی ۰٫۵).

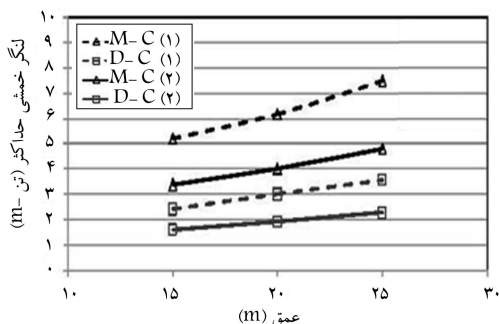


الف) مدل رفتاری موهر- کلمب؛

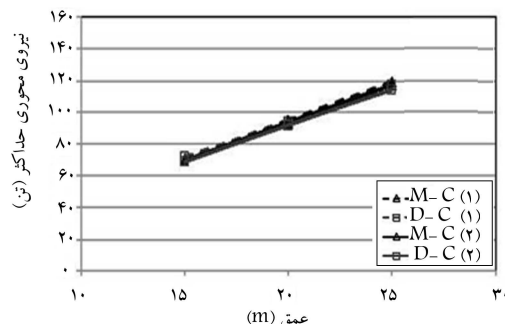


ب) مدل رفتاری دانکن- چانگ.

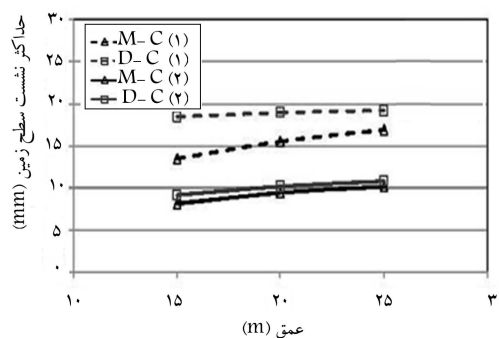
شکل ۶. توزیع کرنش‌های برشی در اطراف تونل (عمق ۱۵ متر، خاک ۱، ضریب فشار جانبی ۱).



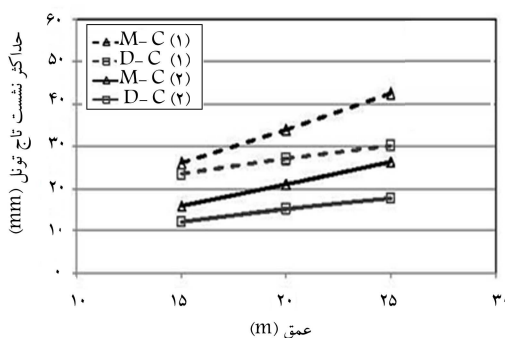
الف) تغییرات بیشینه ی نیروی محوری پوشش؛



ب) تغییرات بیشینه ی نشست سطح زمین.



ج) تغییرات بیشینه ی نشست تاج تونل؛



شکل ۷. اثر عمق بر رفتار تونل در حالت استاتیکی (ضریب فشار جانبی خاک ۰/۵).

وجود در شکل ۷د مشاهده می‌شود، با فاصله گرفتن تونل از اعماق سطحی زمین، مقدار نشست‌های سطحی تقریباً ثابت مانده است که بیانگر کاهش تأثیر حفاری تونل روی سطح زمین است.

نکته‌ی قابل توجه دیگری که در این نمودارها مشاهده می‌شود، آن است که با افزایش عمق تونل، مقدار ممان پوشش و نشست تاج تونل که با مدل‌های موهر- کولمب و دانکن- چانگ محاسبه شده‌اند، به تدریج دارای اختلاف بیشتری می‌شوند. این موضوع مجدداً مؤید آن است که تأثیر مدل دانکن- چانگ با افزایش سطح تنش افزایش می‌یابد و نتایج مطلوب‌تری به دست خواهد آمد.

۲.۵. نتایج تحلیل دینامیکی

به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ی تونل دایروی در آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران، مدل‌های تحلیل استاتیکی تحت بارگذاری لرزه‌ی با شتاب‌نگاشت زلزله‌ی لوماپریتا قرار گرفته‌اند

پوشش و نهایتاً کاهش بیشینه‌ی تغییرشکل‌ها و ممان به وجود آمده در پوشش شده است.

۴.۱.۵. اثر عمق

به منظور بررسی تأثیر عمق بر رفتار تونل، روند تغییرات تغییرشکل‌ها و نیروها نسبت به تغییرات عمق محور تونل برای ضریب فشار جانبی ثابت برابر ۰/۵، مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل ۷).

در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش عمق، مقادیر نیروی محوری و ممان به وجود آمده در پوشش تونل افزایش یافته است که ناشی از افزایش تنش‌های اعمالی بر تونل است. مقدار نیروی محوری در حدود ۷۰٪ نسبت به مقدار اولیه افزایش یافته است، در حالی که مقدار افزایش ممان نسبت به مقدار اولیه در حدود ۲۵ تا ۵۰ درصد (بسته به نوع خاک و مدل رفتاری مورد استفاده) متغیر است. افزایش تنش مورد اشاره منجر به افزایش نشست مورد انتظار در تاج تونل نیز خواهد شد. با این

۴۰٪ برای ممان بیشینه و در حدود ۸۰ تا ۸۵ درصد برای ممان پسماند برآورد می‌شود.

نکته‌ی قابل توجه آن است که با افزایش ضریب فشار جانبی خاک اختلاف بین ممان‌های بیشینه و پسماند بیشتر شده است. به عبارت دیگر، افزایش فشار جانبی خاک روی مقدار کاهش ممان پس‌ماند تأثیر بیشتری داشته است. همچنین برای مقادیر بالای ضرایب فشار جانبی روند کاهش ممان‌ها متوقف شده و ممان‌های بیشینه و پس‌ماند تولید شده بر اثر زلزله تقریباً ثابت مانده است.

۲.۲.۵. اثر نوع خاک

مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به دو نوع خاک مختلف در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش تراکم و سیمانتاسیون خاک، مقادیر ممان‌های پوشش تونل کاهش یافته، اما در مقادیر نیروی محوری تغییر محسوسی مشاهده نمی‌شود. با بهبود پارامترهای خاک، مقادیر ممان بیشینه به طور متوسط در حدود ۳۰٪ و مقادیر ممان پسماند در حدود ۳۵٪ کاهش یافته است، بیشترین کاهش در ضرایب فشار جانبی پایین رخ داده است و مقدار اختلاف با افزایش ضریب فشار جانبی خاک ناچیز شده است.

۳.۲.۵. اثر عمق

به منظور بررسی تأثیر عمق در رفتار تونل، روند تغییرات ممان بیشینه و پسماند نسبت به تغییرات عمق محور تونل مورد بررسی قرار گرفته است. (شکل ۱۲). نتایج تحلیل بیان‌گر آن است که برخلاف حالت استاتیکی که تغییرات ممان به ازاء مقادیر مختلف ضریب فشار جانبی، یک روند مشابه دارند؛ در حالت دینامیکی روندهای مختلفی را نشان می‌دهند. برای بیان این موضوع، نتایج شکل ۱۲ برای دو مقدار بالا و پایین ضریب فشار جانبی ارائه شده است.

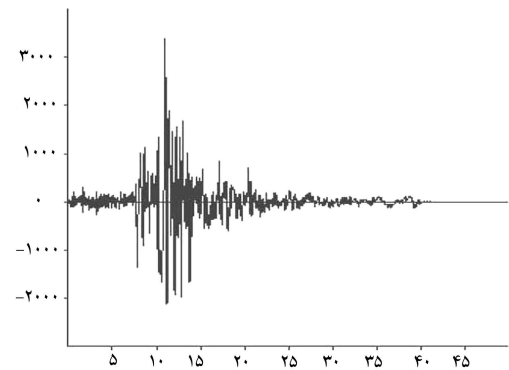
همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقادیر ممان‌های بیشینه و پس‌ماند برای ضریب فشار جانبی پایین (برابر با ۰/۴) با عمق افزایش می‌یابد و سپس ثابت می‌شود، در حالی که برای ضریب فشار جانبی بالا (برابر با ۱)، افزایش عمق تأثیر محسوسی در مقادیر فوق ندارد.

نتیجه‌ی قابل توجه دیگر آن است که برای مقادیر بالای ضریب فشار جانبی، اثر نوع خاک در ممان پس‌ماند کاهش یافته است (شکل ۱۲ ب)، به عبارت دیگر، در مقادیر بالای ضریب فشار جانبی، عملاً نوع خاک تأثیری در مقدار ممان پس‌ماند ندارد. این نتیجه در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نیز قابل مشاهده است.

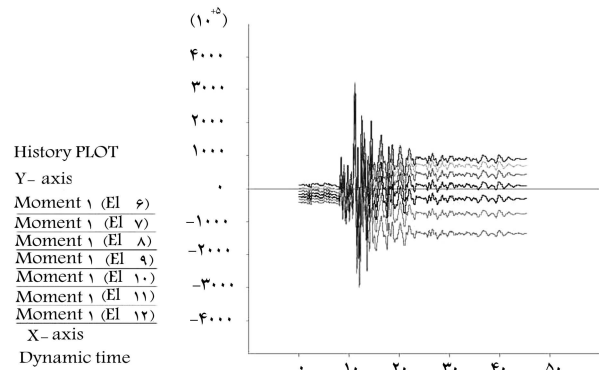
۳.۵. مقایسه‌ی نتایج بارگذاری استاتیکی و دینامیکی

به منظور بررسی میزان تأثیر بارگذاری لرزه‌یی در ممان‌ها و نیروهای پوشش نسبت به حالت استاتیکی، در شکل ۱۳ تغییرات پارامترهای فوق در حالت دینامیکی و استاتیکی در مقابل ضریب فشار جانبی برای یک نوع خاک (خاک ۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ الف مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب فشار جانبی، ممان پس‌ماند از حدود ممان بیشینه‌ی دینامیکی به سمت ممان استاتیکی میل می‌کند. می‌توان مشاهده کرد که با اعمال بارگذاری دینامیکی مقدار ممان استاتیکی موجود در پوشش تونل در حدود ۴۰٪ تا رسیدن به مقدار بیشینه افزایش یافته است. مقدار ممان پس‌ماند ناشی از بارگذاری دینامیکی نیز در حدود ۲۶٪ نسبت به ممان حالت استاتیکی بیشتر است، که البته این اختلاف با افزایش مقدار ضریب فشار جانبی خاک ناچیز شده است.

شکل ۱۳ ب نیز نشان‌دهنده‌ی آن است که نیروی محوری بیشینه‌ی دینامیکی



شکل ۸. شتاب‌نگاشت لوما پریتا مورد استفاده در تحلیل دینامیکی.



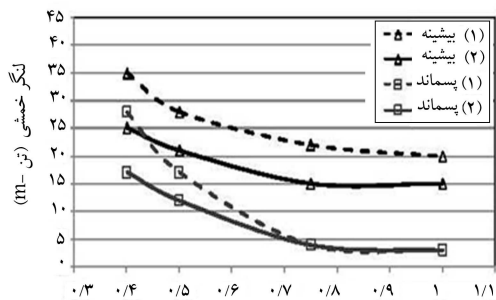
شکل ۹. نمونه‌یی از تغییرات ممان در المان‌های پوشش حین زلزله.

(شکل ۸). زلزله‌ی ورودی دارای بیشینه‌ی شتاب ۳/۴۵ متر بر مجذور ثانیه، بیشینه‌ی سرعت ۰/۴۴ متر بر ثانیه و نیز تغییرمکان افقی ۱۳/۴ سانتی‌متر است. نمونه‌یی از تغییرات ممان المان‌های پوشش، حین زلزله، در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج تحلیل دینامیکی تونل با عمق محوری ۱۵ و ۲۵ متر در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند کلی تغییرات پارامترهای مختلف برای دو عمق تقریباً مشابه است. در شکل‌های مذکور، ممان و نیروی محوری بیشینه‌ی به وجود آمده در پوشش تونل حین زلزله، با نماد (Max) و ممان و نیروی محوری پسماند ناشی از بارگذاری زلزله با نماد (Res) مشخص شده‌اند.

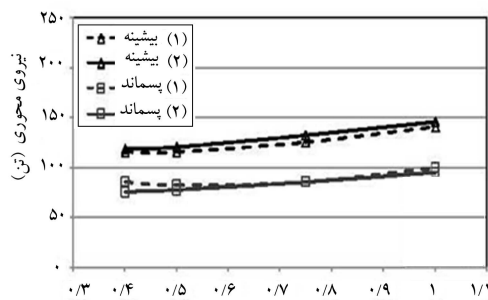
لازم به ذکر است که تحلیل‌های استاتیکی نشان‌دهنده آن هستند که مدل دانکن-چانگ در اعماق سطحی که فشار همه‌جانبه کم است، نتایج مناسبی را به دست نمی‌دهد. این موضوع در بارگذاری زلزله‌های قوی که منجر به ایجاد تنش کششی در اعماق سطحی و نهایتاً ناپایداری عددی می‌شود، نمود بیشتری داشته است. لذا در این تحقیق نتایج تحلیل دینامیکی فقط برای مدل موهر-کولمب ارائه شده‌اند.

۱.۲.۵. اثر تغییرات ضریب فشار جانبی خاک

مشابه رفتار استاتیکی، در تحلیل دینامیکی نیز همان‌گونه که در شکل‌های ۱۰ الف و ۱۱ الف و ۱۰ ب و ۱۱ ب مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب فشار جانبی خاک مقادیر نیروهای محوری بیشینه و پسماند به وجود آمده در پوشش تونل افزایش یافته است، در حالی که مقادیر ممان‌های بیشینه و پسماند پوشش دچار کاهش شده است. مقدار افزایش نیروهای محوری بیشینه و پسماند نسبت به مقدار اولیه‌ی آن در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد بوده است. مقدار کاهش ممان نیز در حدود

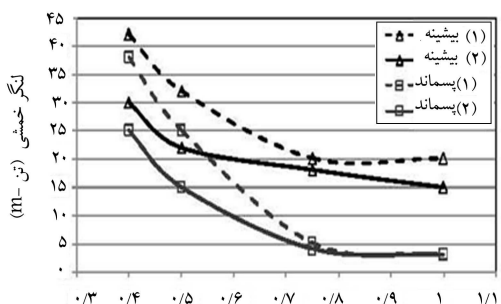


ضریب فشار جانبی خاک
(ب) تغییرات ممان بیشینه و پس ماند.

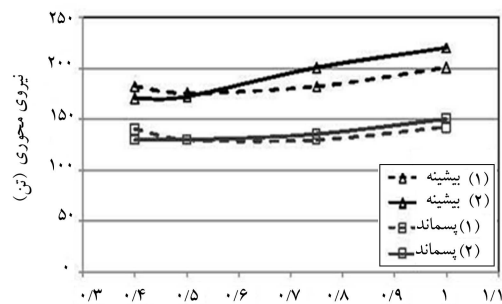


ضریب فشار جانبی خاک
(الف) تغییرات نیروی محوری بیشینه و پس ماند؛

شکل ۱۰. نتایج تحلیل دینامیکی (عمق محوری تونل ۱۵ متر).

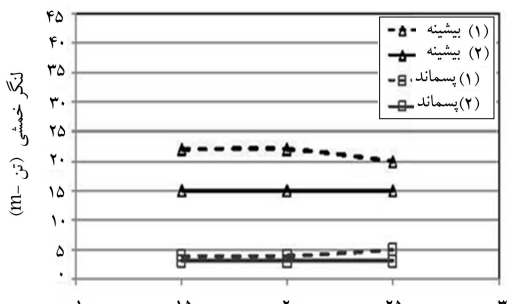


ضریب فشار جانبی خاک
(ب) تغییرات ممان بیشینه و پس ماند.

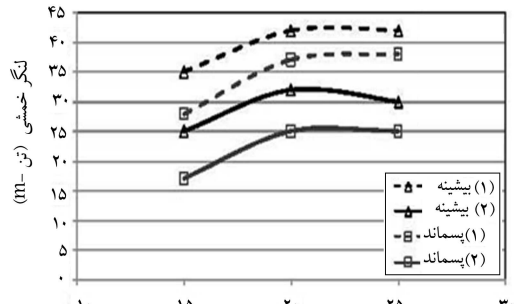


ضریب فشار جانبی خاک
(الف) تغییرات نیروی محوری بیشینه و پس ماند؛

شکل ۱۱. نتایج تحلیل دینامیکی (عمق محوری تونل ۲۵ متر).

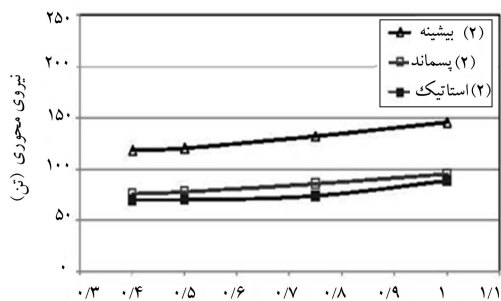


عمق (m)
(ب) K(-۱) .K

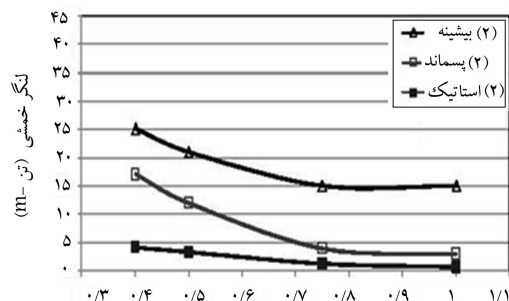


عمق (m)
(الف) K(۰/۴) .K

شکل ۱۲. تغییرات ممان بیشینه و پس ماند در مقابل عمق.



ضریب فشار جانبی خاک
(ب) تغییرات نیروی محوری.



ضریب فشار جانبی خاک
(الف) تغییرات ممان؛

شکل ۱۳. مقایسه‌ی نتایج بارگذاری استاتیکی و دینامیکی (عمق محوری تونل ۱۵ متر).

روندهای مختلفی را نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، مقادیر ممان‌های بیشینه و پس‌ماند برای ضریب فشار جانبی کم، با عمق افزایش می‌یابد؛ در حالی که برای ضریب فشار بالا، افزایش عمق تأثیر محسوس در این مقادیر ندارد.

-- در بارگذاری استاتیکی، نوع مدل رفتاری تأثیر خاصی در نیروی محوری به وجود آمده در پوشش ندارد، اما ممان ناشی از مدل موهر-کولمب در مقادیر ضریب فشار جانبی پایین‌تر به مقدار قابل توجهی بیشتر است. این اختلاف با افزایش ضریب فشار جانبی کاهش می‌یابد.

-- ارزیابی رفتار تونل مؤید آن است که مدل دانکن-چانگ برای اعماق سطحی که فشار همه‌جانبه در آن کم است، جواب‌های مناسبی به دست نمی‌دهد. به عبارت دیگر، تأثیر این مدل با افزایش سطح تنش افزایش می‌یابد و نتایج مطلوب‌تری را به دست خواهد داد. این موضوع در بارگذاری زلزله‌های قوی که منجر به ایجاد تنش کششی در اعماق سطحی و نهایتاً ناپایداری عددی می‌شود، نمود بیشتری داشته است. خاطرنشان می‌شود که اصلاح مدل فوق برای در نظر گرفتن این اثر توسط این پژوهشگران در حال انجام است.

-- با افزایش ضریب فشار جانبی، ممان پس‌ماند از حدود ممان بیشینه‌ی دینامیکی به سمت ممان استاتیکی میل می‌کند. در مقادیر بالای ضریب فشار جانبی، عملاً نوع خاک تأثیری در مقدار ممان پس‌ماند ندارد.

به مقدار قابل توجهی نسبت به حالت استاتیکی بیشتر است، اما مقدار پس‌ماند آن دارای تفاوت چندانی با مقدار نیروی محوری ناشی از بارگذاری استاتیکی نخواهد بود. بر اساس نتایج مقدار نیروی استاتیکی موجود در پوشش تونل با اعمال بارگذاری دینامیکی در حدود ۵۰ تا ۶۵ درصد افزایش یافته است.

۶. نتیجه‌گیری

رفتار تونل‌های دایروی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی، در آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران، مورد ارزیابی قرار گرفته است. تأثیر رفتار غیرخطی، نوع خاک، ضریب فشار جانبی خاک و عمق تونل در رفتار تونل بررسی شده است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به این قرارند:

-- در بارگذاری استاتیکی و دینامیکی، با افزایش ضریب فشار جانبی خاک، مقادیر نیروی محوری در پوشش تونل افزایش یافته، در حالی که مقادیر ممان پوشش کاهش می‌یابند.

-- در بارگذاری استاتیکی، با افزایش عمق، مقادیر نیروی محوری و ممان به وجود آمده در پوشش تونل افزایش می‌یابند. برخلاف حالت استاتیکی که تغییرات ممان به ازاء مقادیر مختلف ضریب فشار جانبی، یک روند مشابه دارند؛ در حالت دینامیکی

پانویس‌ها

Lining .\

2. elastic-perfect plastic
3. hyperbola
4. bilinear
5. asymptotic or ultimate shear strength
6. failure shear strength
7. failure ratio
8. max. moment
9. max. axial force
10. max. surface settlement
11. max. crest settlement

منابع (References)

1. Mingju, Z., Erxiang, S. and Zhaoyuan, C. "Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM)", *Computers and Geotechnics*, **25**, pp. 191-204 (1999).
2. Sofianos, A. and Nomikos, p. "Equivalent Mohr-Coulomb and generalized Hoek-Brown strength parameters for supported axisymmetric tunnels in plastic or brittle rock", *J. Rock Mechanics & Mining Sciences*, **43**, pp. 683-704 (2006).
3. Karimian, H., Wijewickreme, D. and Honegger, D. "Buried pipelines subjected to transverse ground movement: Comparison between full-scale testing and numerical modeling", 25th International Conference on Off-

shore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg, Germany (4-9 June 2006).

4. Nicieza, C., Vigil, A., Diaz, A. and Palacio, C. "Influence of the depth and shape of a tunnel in the application of the convergence confinement method", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23**, pp. 25-37 (2008).
5. Yong-Joo, L. "Investigation of subsurface deformations associated with model tunnels in a granular mass", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**, pp. 654-664 (2009).
6. Nunes, M.A. and Meguid, M.A. "A study on the effects of overlying soil strata on the stresses developing in a tunnel lining", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**, pp. 716-722 (2009).
7. Hagiwara, T., Grant, R.J., Calvello, M. and Taylor, R.N. "The effect of overlying strata on the distribution of ground movements induced by tunnelling in clay", *Soils and Foundations*, **39**(3), pp. 63-73 (1999).
8. Grant, R.J. and Taylor, R.N. "Stability of tunnels in clay with overlying layers of coarse grained soil", In: *GeoEng 2000, An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, Melbourne, Australia (2000).
9. Bin-Lin, C. and et al. "Mechanical behavior of a twin-tunnel in multi-layered formations", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **22**, pp. 351-362 (2007).
10. Duncan, J.M. and Chang, C.Y. "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", *J. of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE*, **96**(5), pp. 629-653 (1970).

EVALUATION OF NONLINEAR BEHAVIOR OF CIRCULAR TUNNELS UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADING

M. Oliaei (corresponding author)

m.olyaei@modares.ac.ir

Dept. of Civil and Environmental Engineering

Tarbiat Modares University

O. Naeemifar

o.naeemifar@yahoo.com

Islamic Azad University

Malard Branch

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 4, Page 45-54, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 23 May 2011; received in revised form 22 April 2012; accepted 21 July 2012.

Abstract

The effect of different parameters on the static and dynamic behavior of tunnels has been one of the main concerns in previous studies. The effects most investigated are as follows: Soil type and thickness, tunnel depth and shape of tunnel section, coarse grain layers around the tunnel, interaction of twin tunnels and the distance between them, and method of tunnel construction. Generally, the investigations have been followed using physical and numerical methods. Using these methods, the effects of the mentioned parameters on the values of axial forces and lining moments, the relation between depth and settlement variations around the tunnels, the shape of the distribution profile of the surface settlements and etc, have been investigated.

In this paper, the behavior of circular tunnels in Tehran coarse grain alluvium has been investigated using Mohr-Coulomb and Duncan-Chang constitutive models under static and dynamic loading. In addition to the evalua-

tion of nonlinear behavior and soil type effects, a parametric study has been performed on the coefficient of the lateral soil pressure and tunnel depth, due to their significant effects on deformations and forces. Numerical modeling has been performed for tunnels with 15, 20 and 25 meter depths and 10 meter diameter. The Loma Prieta earthquake has been used for dynamic loading. Numerical modeling has been performed based on the finite difference method using Flac 2D software .

Numerical results show an increase in the effects of nonlinear soil behavior on the moments and settlements with a decrease in the coefficient of lateral soil pressure. Nonlinear soil behavior effects have been increased with an increase in depth or confinement pressure. The maximum and residual moments of dynamic loading have been increased with an increase in depth for low values of lateral pressure coefficient, but, for high values of lateral coefficient, the increase in depth has no significant effect on moments. In contrast, moment variations of static loading show a similar trend for all values of lateral pressure coefficient. In static and dynamic loading, increasing the lateral pressure coefficient will result in more axial forces and less moment values in the tunnel lining .

Key Words: Circular tunnel, nonlinear behavior, static analysis, dynamic analysis, coefficient of lateral soil pressure.