تحلیل و طراحی مبتنی بر عملکرد پوشش سگمنتی تونل‌ها

شهرام وهدانی[*1] و امیر رادپی[2]

[1]استادیار دانشکده مهندسي عمران - پردیس دانشکده هاي فني - دانشگاه تهران

[2] دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسي عمران - پردیس دانشکده هاي فني - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۴/۱۱/۲۶ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۵/۵/۳۰ ، تاریخ تصویب ۸۵/۸/۲۰)

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از روش طراحی مبتنی بر عملکرد در سازه‌ها با توجه به خصوصیات این نوع طراحی گسترش یافته است. بکارگیری این روش در طراحی و ارزیابی پوشش تونل‌ها به منظور درک عمومی رفتار پوشش تونل و توده زمین با در نظر گرفتن اهداف عملکردی بسیار سودمند می‌باشد. از میان روش‌های متداول تحلیل و طراحی تونل‌ها، روش همگرایی-همجواری با نگرش و گام‌های روش تحلیل و طراحی مبتنی بر عملکرد, تطابق خوبی دارد. در این تحقیق سعی شده است با بهره‌گیری از مفاهیم روش همگرایی-همجواری و روال طراحی مبتنی بر عملکرد، روشی برای تعیین رفتار پوشش تونل با وجود پدیده‌هایی نظیر خواص غیرخطی توده میزبان و فشار جانبی غیریکنواخت پیشنهاد گردد. با توجه به حساسیت بیشتر تونل‌های سگمنتی به پدیده‌های فوق, این نوع پوشش مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده نشان دهنده دقت مطلوب نتایج حاصل از تحلیل و طراحی به روش پیشنهادی, با وجود ساده سازی‌های صورت گرفته در آن هستند.

واژه‌های کلیدی: طراحی بر اساس عملکرد- همگرایی- همجواری - تونل‌های سگمنتی - تونل‌های دایروی - اندرکنش پوشش و محیط

مقدمه

تجربه استفاده از روش طراحی مبتنی بر عملکرد[1] در ساختمانها باعث شده است که بکارگیری این روش و بهره‌گیری از مزایای آن در تحلیل و طراحی سایر سازه‌ها مدنظر قرار گیرد. با توجه به اهمیت اقتصادی و اجتماعی سازه پوشش تونل، همراه با پیچیدگی‌های مرتبط با تحلیل و طراحی این سازه ناشی از عوامل متعدد اثرگذار در تعیین نیروهای وارد بر آن از قبیل خصوصیات توده زمین و عدم قطعیت‌های موجود در برآورد پارامترهای ژئومکانیکی لزوم استفاده از روش‌های نوین تحلیل و طراحی مانند روش طراحی مبتنی بر عملکرد[۶،۵] در این مورد بیش از پیش احساس می‌گردد. عدم آشنایی کافی طراح به رفتار سازه, تقاضای وارد بر پوشش در هر مرحله از تحلیل، ناتوانی روش‌های تحلیل الاستیک در توصیف مکانیزم شکست پوشش, چگونگی بازتوزیع نیروهای داخلی اعضا و عدم امکان بررسی آسان اثر تغییر مشخصات ژئومکانیکی در میزان نیروها و رفتار پوشش از معایب عمده روش‌های تحلیل و طراحی سازه پوشش تونل می‌باشند.

از میان روش‌های تحلیل و طراحی این نوع سازه‌ها [۱۱،۷]، مفاهیم روش همگرایی-همجواری[۱۳،۱۲،۱] به مفاهیم روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی, نظیر روش طیف ظرفیت[۵]، مورد استفاده در روش طراحی مبتنی بر عملکرد بسیار نزدیک است. در روش همگرایی-همجواری می‌توان با بررسی اندرکنش منحنی‌های تغییر شکل طولی[2]، پاسخ زمین[3] و ظرفیت سازه[4] فشار وارد از طرف زمین بر پوشش را بر حسب پیشروی جبهه حفاری تعیین نمود[۱۳،۱۲،۱]. در این روش منحنی پاسخ زمین بیانگر تقاضای نیرویی توده برحسب همگرایی حفره دایروی ناشی از حفر تونل و پیشروی جبهه حفاری، و منحنی ظرفیت سازه بیانگر ظرفیت سازه تحت اثر پروفیل بار متناظر از طرف توده زمین به پوشش می‌باشند. مشابه شیوه بکار گرفته شده, در روش طیف ظرفیت، محل تلاقی دو نمودار فوق بیانگر حالت تعادل مجموعه بوده و می‌تواند به نام نقطه عملکرد شناخته شود[۵]. به این ترتیب با بررسی منحنی‌های پاسخ زمین (تقاضا) و ظرفیت سازه (ظرفیت) می‌توان وضعیت عملکردی مجموعه را تعیین و از روی نقطه تلاقی دو نمودار نیروهای وارد بر پوشش را مشخص کرد. کاربرد روش همگرایی- همجواری دارای

* نویسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱۲۲۷۱ – ۰۲۱ , فاکس : ۶۶۴۰۳۸۰۸ – ۰۲۱ , Email: shvahdani@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

محدودیت‌هایی نیز می‌باشد. این روش عموماً برای شرایط میدان تنش یکنواخت در اطراف تونل دایروی بکار می‌رود[۱]. در این تحقیق با حفظ مقطع دایره تونل, امکان تعمیم روش به حالت میدان تنش اصلی غیریکنواخت مورد بررسی قرار گرفته و روش تحلیلی گرافیکی متناسب با آن ارائه شده است.

تونلهای با پوشش سگمنتی، عموماً توسط ماشین‌های حفار که عملیات نصب پوشش را به صورت خودکار انجام می‌دهند, حفاری می‌شوند[۴]. نیروهای وارد بر قطعات بتنی پیش ساخته به دو دسته نیروهای در حین اجرا و نیروهای گسترده بعد از نصب شامل نیروهای وارد در اثر فشار تزریق, فشار توده زمین, فشار آب و فشار ناشی از زلزله تقسیم می‌گردد[۱۰]. با توجه به نحوه اجرا و آرایش سگمنتها در طول تونل, می‌توان مسئله سه بعدی ظرفیت و رفتار تونل در اثر بارهای وارد را به صورت دو بعدی مورد بررسی قرار داد[۱۰،۲]. وابستگی توزیع نیروهای وارد بر پوشش به هندسه قرارگیری سگمنتها و همچنین سختی نسبی اتصال سگمنتها به یکدیگر در مقایسه با سختی خود قطعات از مسائل پیچیده و اساسی در طراحی تونلهای سگمنتی می‌باشد. در این مقاله روشی برای بررسی رفتار این نوع سازه‌ها ارائه شده است.

به این ترتیب با استفاده از روش پیشنهادی, ضمن بررسی رفتار پوشش سگمنتی امکان تعیین نیروهای وارد بر آن در هر مرحله از تحلیل با امکان اعمال ضرایب بار متفاوت فراهم گردیده, و با بهره‌گیری از مزایای روش طراحی مبتنی بر عملکرد امکان طراحی بهینه سازه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده زمین, وضعیت آبهای زیرزمینی محل احداث سازه و یا فشار تزریق فراهم شده است.

استفاده از توابع مثلثاتی برای تجزیه میدان جابجایی و تنش

اگر تحلیل عددی مجموعه پوشش و توده میزبان شامل خواص غیرخطی توده، تأثیر روند حفاری روی توزیع تنش در توده و تلاش‌های بوجود آمده در پوشش و همچنین معادل‌سازی مدل دو بعدی مجموعه به جای مدل سه بعدی را تحلیل دقیق بنامیم، نتیجه این تحلیل محاسبه تغییرشکل و توزیع تنش در مرز حفاری و پوشش خواهد بود. صرف‌نظر از پدیده‌های غیرخطی اتفاق افتاده در طول تحلیل، می‌توان نتایج جابجایی، تنش شعاعی و تنش مماسی بین توده و پوشش را با استفاده از توابع مثلثاتی به مودهای مختلف تقسیم کرده و سعی نمود پدیده‌های فیزیکی غالب نظیر همگرایی شعاعی، اعوجاج شکل اولیه مقطع از دایره به بیضی با قطرهای موازی با افق را, در هر مورد مشخص نمود. تجزیه نتایج با کمک توابع مثلثاتی که جملات سری فوریه می‌باشند، به غیر از اطمینان از همگرایی این تجزیه که از خواص ذاتی بسط فوریه است، کمک شایانی به ساده‌سازی تفسیر نتایج با مفاهیم فیزیکی شناخته شده فوق ذکر می‌نماید.

با تجزیه میدان جابجایی با استفاده از روابط زیر, شامل چهار جمله اول سری فوریه, می‌توان پدیده‌های فیزیکی اصلی شناخته شده در رفتار توده میزبان, پوشش و اندرکنش آنها را بیان نمود.

$$U_r(\theta) = \Delta_d + R_x \cos\theta + R_y \sin\theta + \Delta_{si} \cos 2\theta \quad (۱)$$

$$U_\theta(\theta) = -C_1 R_x \sin\theta + C_2 R_y \cos\theta - C_3 \Delta_{si} \sin 2\theta \quad (۲)$$

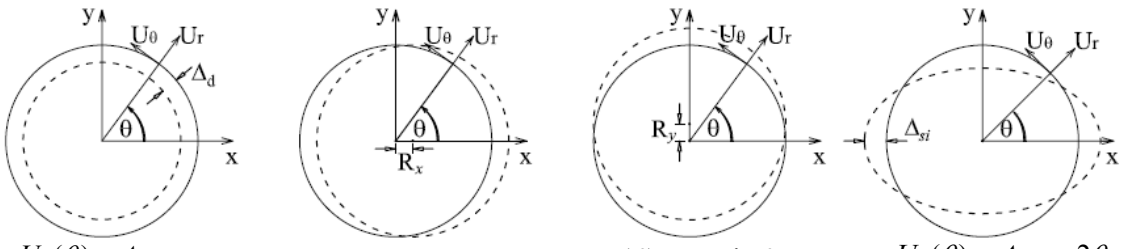
بسط میدان جابجایی

مودهای اصلی تغییرشکل مرز حفاری که در شکل (۱) نمایش یافته‌اند, عبارتند از:

مود همگرایی[۵]: این مود که متناظر با جمع‌شدگی شعاعی یکنواخت مرز دایروی, Δ_d می‌باشد, برای توصیف همگرایی توده میزبان به علت کاهش سختی ناشی از حفر تونل, در شرایط تنش یکنواخت و یا پوشش دایروی, تحت اثر تنش‌های یکنواخت شعاعی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مودهای حرکت صلب: مودهای با ضرایب R_x و R_y, به ترتیب نشان‌دهنده مودهای حرکت صلب در جهت‌های افقی و قائم می‌باشند. مود جابجایی افقی، در شرایط بارگذاری نامتقارن استاتیکی و مود جابجایی قائم ناشی از حذف توده داخل مرز حفاری و برقراری شرایط تعادل جدید در جهت قائم ایجاد می‌شود. فرض حرکت صلب برای این مودها زمانی برقرار می‌باشد که مقدار ضرایب C_1 و C_2 برابر یک باشند؛ بر اساس بررسی‌های انجام گرفته با توجه به محدوده تغییرات این ضرایب, می‌توان پذیرفت که این مودها, نشان‌دهنده حرکت صلب باشند.

Archive of SID
www.SID.ir



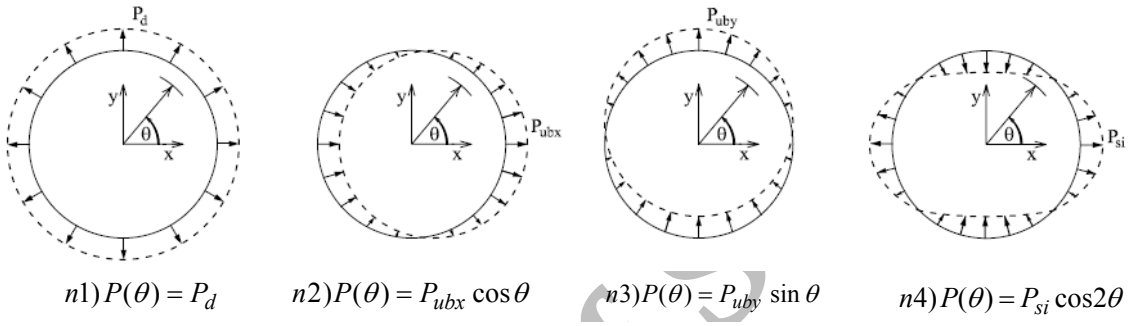
1) $U_r(\theta) = \Delta_d$, $U_\theta(\theta) = 0.0$

2) $U_r(\theta) = R_x \cos\theta$, $U_\theta(\theta) = -c_1 R_x \sin\theta$

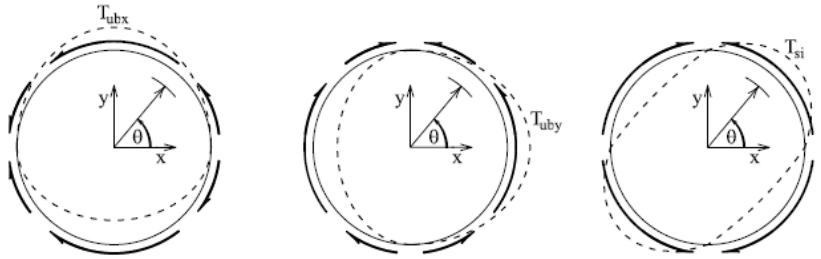
3) $U_r(\theta) = R_y \sin\theta$, $U_\theta(\theta) = c_2 R_y \cos\theta$

4) $U_r(\theta) = \Delta_{si} \cos 2\theta$, $U_\theta(\theta) = -c_3 \Delta_{si} \sin 2\theta$

شکل ۱: مودهای تغییرشکل اصلی.



$n1) P(\theta) = P_d$ $n2) P(\theta) = P_{ubx} \cos\theta$ $n3) P(\theta) = P_{uby} \sin\theta$ $n4) P(\theta) = P_{si} \cos 2\theta$



$t1) T(\theta) = T_{ubx} \sin\theta$ $t2) T(\theta) = T_{uby} \cos\theta$ $t3) P(\theta) = T_{si} \cos 2\theta$

شکل ۲: تنش‌های نرمال و مماسی متناظر با مودهای تغییرشکل اصلی.

مود تغییرشکل اعوجاجی[۶]: مود تغییرشکل با ضریب Δ_{si}، بیانگر حداکثر تغییرشکل شعاعی اعوجاجی در راستای افق می‌باشد. این مود برای بیان رفتار حفره دایروی تحت اثر بارهای استاتیکی وارد از طرف زمین در شرایط فشار جانبی غیریکنواخت مورد استفاده قرار گرفته است.

شایان ذکر است که جملات بعدی سری فوریه مربوط به اعواج با تعداد انحنای بیشتر پوشش، بوده، در عمل سهم کمی از جابجایی کل را تشکیل داده و قابل صرف نظر کردن می‌باشند. حتی اگر در موارد خاصی ضرایب مودهای بالاتر نسبت به ضرایب جملات فوق قابل ملاحظه بودند، افزودن این مودها به میدان جابجایی فرض شده کاملاً عملی بوده و خللی در اصول روش ایجاد نمی‌نماید.

تجزیه میدان تنش‌های شعاعی و مماسی

متناظر با مودهای تغییرشکل، میدان تنش‌های شعاعی[۷] و مماسی[۸] شامل چهار جمله اولیه سری فوریه مطابق روابط ۳ و۴و به صورت نمایش داده شده در شکل (۲)، می‌توانند پدیده‌های اصلی مورد بحث را توصیف نمایند.

$$P(\theta) = P_d + P_{ubx} \cos\theta + P_{uby} \sin\theta + P_{si} \cos 2\theta \quad (۳)$$

$$T(\theta) = T_{ubx} \sin\theta + T_{uby} \cos\theta + T_{si} \sin 2\theta \quad (۴)$$

در این روابط، P_d تنش با توزیع یکنواخت شعاعی بوده و متناظر با مود تغییرشکل همگرایی می‌باشد. ضرایب P_{ubx} و P_{uby} تنش‌های شعاعی و مماسی با توزیع $\cos\theta$

Archive
www.SID.ir

و $\sin\theta$ در مرز دایروی بوده و بیانگر میزان تنشهای نامتعادل در جهت های افقی و قائم هستند. این ضرایب در شرایط تعادل مجموعه مورد بررسی, برابر صفر می‌باشند. P_{si} و T_{si} تنش‌های شعاعی و مماسی با توزیع $\cos2\theta$ و $\sin2\theta$ در مرز دایروی بوده و شرایط بارگذاری غیریکنواخت در توده میزبان را توصیف می‌کنند, تغییرشکل‌های اعوجاجی متناظر آنها Δ_{si} می‌باشد.

حل دستگاه معادلات و تعیین ضرایب جملات سری فوریه

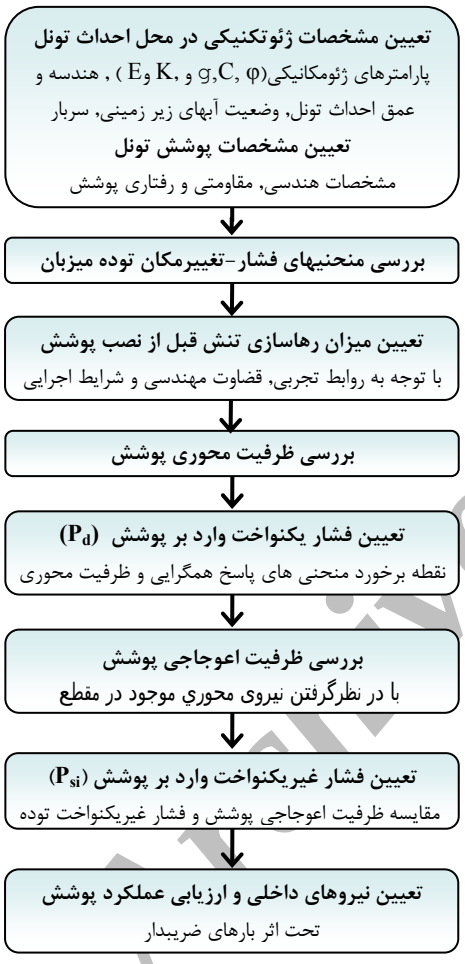
برای تعیین ضرایب مجهول معادلات ۱ الی۴ لازم است تا حداقل به اندازه تعداد این ضرایب, نقاط با میدان تنش و تغییرشکل معلوم روی مرز دایروی انتخاب شود؛ همچنین می‌توان به منظور افزایش دقت در تعیین ضرایب سری فوریه با افزایش نقاط اندازه گیری, از روش برازش منحنی استفاده نمود. نقاط اندازه‌گیری باید به نحوی انتخاب شوند که کل میدان‌های تنش و تغییرشکل مرز دایروی را در بر گیرند. به این ترتیب می‌توان میدان تغییرشکل مرز دایروی را برای زمین‌ها و پوشش‌ها, با مشخصات مختلف, به صورت مجموع جملات با ضرایب سری فوریه تجزیه نمود.

مراحل ارزیابی و طراحی مبتنی بر عملکرد پوشش تونل

مراحل گام به گام ارزیابی پوشش تونل به روش پیشنهادی، در شکل (۳) نشان داده شده است. جزئیات مربوط به هر مرحله از مراحل ارزیابی, در عنوان‌های اشاره شده در این روندنما, ارائه شده است.

منحنی‌های فشار- تغییرمکان توده میزبان

اولین گام در روش همگرایی- همجواری تحلیل تونل بدون وجود پوشش است. به این ترتیب، در جداره تونل با حذف تدریجی عکس العمل خاک یا سنگ، تغییرشکل متناسب با کاهش سختی تعیین شده و با رسم تغییرات تنش عمود بر سطح بر حسب جابجایی شعاعی، منحنی پاسخ زمین حاصل می‌گردد. با استفاده از این منحنی می‌توان تنش یکنواخت وارد بر پوشش و نیروی محوری متناظر با آن را در شرایط تنش یکنواخت در اطراف مرز دایروی, به نحو مطلوبی برآورد کرد. در شرایط فشار غیریکنواخت (حالت $K_o \neq 1$) با روشهای معمول همگرایی- همجواری، علاوه بر محدودیت موجود در تعیین نیروی محوری, امکان تعیین لنگرخمشی وارد بر پوشش نیز وجود ندارد. بررسی‌های انجام شده در تحقیق حاضر نشان می‌دهد که می‌توان با تعریف منحنی‌های پاسخ اعوجاجی و همگرایی توده زمین و اصلاح روش همگرایی- همجواری، از آن در شرایط فشار غیریکنواخت نیز استفاده کرد.



شکل ۳: مراحل ارزیابی پوشش تونل.

ابتدا با ساختن مدل عددی توده زمین با مشخصات نشان داده شده در جدول (۱) وضعیت تنش موجود در توده شبیه‌سازی می‌گردد. برای این منظور در این تحقیق از روش عددی المان محدود با بهره‌گیری از نرم‌افزار Plaxis-v.7.2 استفاده شده است. مرزهای مدل از دو طرف و از پائین بین ۳ الی ۵ برابر قطر تونل امتداد یافته‌اند و از بالا تا سطح زمین در نظر گرفته شده است. شرایط تکیه‌گاهی در مرزهای قائم دو طرف با استفاده از

Archive of SID

www.SID.ir

غلتک‌های افقی که حرکت نقاط مرزی را در جهت افقی محدود می‌سازد مدلسازی شده و در مرز افقی تحتانی، تغییرمکان‌های افقی و قائم بسته در نظر گرفته شده است. شبکهٔ المان محدود با استفاده از المان‌های مثلثی ۶ گرهی و بصورت خودکار ساخته شده است. لازم به ذکر است که امکان بهره‌گیری از روش پیشنهادی مستقل از نرم‌افزار انتخابی می‌باشد. با تجزیه میدان تنش روی مرز دایروی به صورت مجموع جملات سری فوریه, ضرایب P_d، P_{si} و T_{si} تعیین می‌شوند. برای این منظور المان‌های درون مرز تونل حذف شده و نیروهای نامتعادل گرهی در چند گام به تعادل رسانده می‌شود[۸]. به این ترتیب در هر گام از آنالیز تنش‌های نامتعادل موجود در مرز حفره دایره‌ای و تغییرمکان‌های متناظر تعیین و به کمک روابط ۱ الی ۴، مقادیر ضرایب مجهول سری فوریه در توابع میدان‌های تنش نرمال, تنش مماسی و تغییرمکان, محاسبه می‌گردند. در آخرین گام تحلیل، تنش‌های نامتعادل گرهی برابر صفر و جابجایی توده زمین به حداکثر مقدار خود می‌رسد. بر این اساس می‌توان منحنی‌های پاسخ همگرایی و اعوجاجی توده زمین را به صورت زیر تعریف نمود.

جدول ۱: مشخصات توده زمین‌های انتخابی.

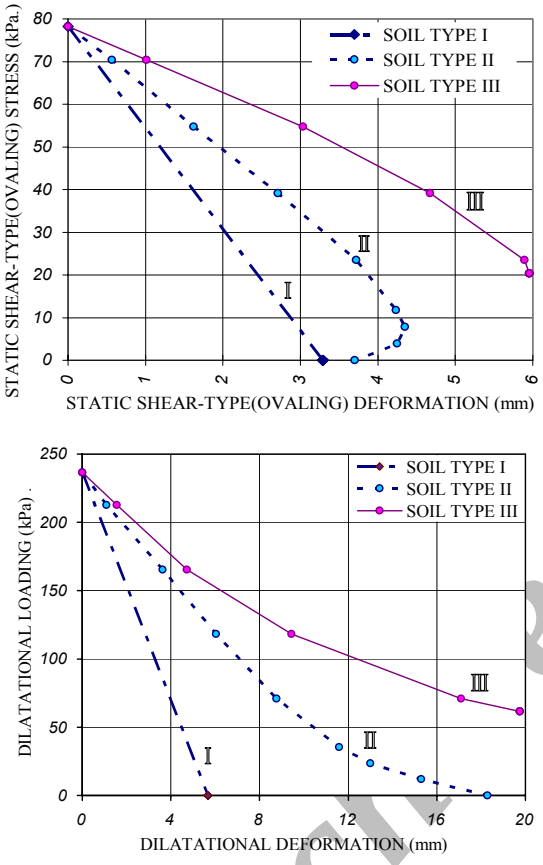
مشخصات توده زمین	نوع I	نوع II	نوع III
E (MPa)	۲۴۰	۱۲۰	۸۴
C (MPa)	–	۰/۰۴	۰/۰۲۸
φ(Deg)	–	۳۸	۲۶/۶
K_o	۰/۵	۰/۵	۰/۵
R (m)	۴/۲۵	۴/۲۵	۴/۲۵
H_e (m)	۱۵	۱۵	۱۵
γ_(kN/m3)	۲۱	۲۱	۲۱
ν	۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۴۹

منحنی پاسخ همگرایی

با قرار دادن مقادیر P_d حاصل از هر گام تحلیل و تغییرشکل همگرایی Δ_d متناظر با آن، منحنی پاسخ همگرایی رسم می‌شود. در این منحنی محورهای قائم و افقی به ترتیب مقادیر تنش یکنواخت عمود بر سطح و میزان همگرایی شعاعی، Δ_d را نشان می‌دهند. این منحنی در شکل (۴) برای سه نوع مختلف زمین رسم شده است.

منحنی پاسخ اعوجاجی

با قرار دادن مقادیر P_{si} حاصل از هر گام تحلیل و تغییرشکل اعوجاجی Δ_{si} متناظر با آن، منحنی پاسخ اعوجاجی رسم می‌شود. در این منحنی محورهای قائم و افقی به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر ضرایب تنش غیریکنواخت P_s و تغییرشکل غیریکنواخت شعاعیΔ_{si}، در بسط فوریه میدان تنش و تغییرشکل می‌باشند.



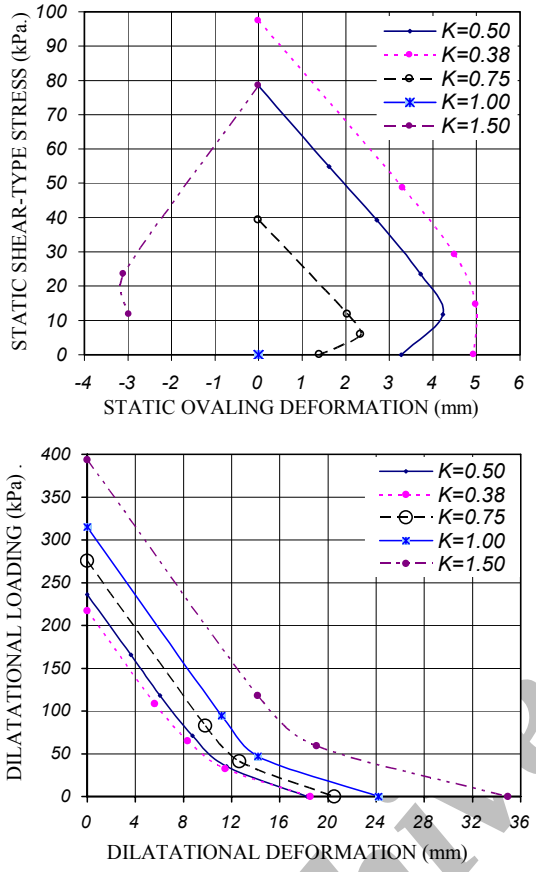
شکل ۴: منحنی‌های پاسخ همگرایی و پاسخ اعوجاجی.

نیازهای خمشی, برشی و محوری ناشی از شرایط تنش غیریکنواخت متعادل در توده زمین وارد بر پوشش تونل, بوسیله این منحنی تعیین می‌شوند. با تجزیه میدان تنش، به مودهای انبساطی و برشی(اعوجاجی) به کمک روابط ۳ و ۴، تنش‌های غیریکنواخت نرمالP_{si} و مماسی T_{si}، موجود در توده میزبان تعیین می‌گردند؛ این ضرایب بیانگر مولفه برش خالص تنشهای درجای موجود در مرز تونل در توده زمین هستند. به این ترتیب, با قراردادن مقادیر تنش اعوجاجی ($P_{si}^* = P_{si} = T_{si}$) بر حسب مقادیر تغییرشکل اعوجاجی (Δ_{si})، منحنی پاسخ اعوجاجی رسم می‌شود(شکل ۴).

Archive of SID
www.SID.ir

بررسی پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از منحنی‌های پاسخ

در روش پیشنهادی, بررسی پارامترهای ژئومکانیکی زمین در شرایط مختلف امکان‌پذیر است؛ با توجه به اینکه همواره مهندسین ژئوتکنیک در تعیین پارامترهای ژئومکانیکی زمین با محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌هایی مختلف روبرو هستند، می‌توان با استفاده از روش تحلیل حساسیت, برای انتخاب مقادیر پارامترهایی که امکان تعیین مقدار دقیق آنها وجود ندارد، تصمیم‌گیری کرد. قابلیت بررسی کیفی و کمی نمودن امکان نتیجه‌گیری صحیح از ملزومات روش مورد استفاده برای انجام چنین تحلیلی می‌باشد. استفاده از روش همگرایی-همجواری متداول, امکان تغییر پارامترها در کوتاه‌ترین زمان ممکن، بررسی کامل مسئله با امکان تغییر همزمان چندین پارامتر مرتبط, امکان بررسی گرافیکی تغییر پارامترها و فراهم انجام این تحلیل را برای شرایط فشار یکنواخت فراهم می‌کند؛ با استفاده از روش پیشنهادی این امکان, برای شرایط فشار غیریکنواخت موجود در توده میزبان فراهم شده است. در بخش قبل نمونه انجام تحلیل حساسیت برای سه نوع زمین با مشخصات مقاومتی مختلف مشاهده گردید. در شکل (۵) حساسیت زمین نوع II به مقدار نسبت تنش افقی به قائم, مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش مقدار K_o برای یک تونل با عمق مشخص، مقدار فشار یکنواخت همگرایی و تغییرشکل متناظر افزایش می‌یابد. در این حالت بدلیل ثابت بودن مشخصه‌های مقاومتی توده زمین شیب منحنی‌های پاسخ ثابت باقی می‌ماند. پاسخ اعوجاجی توده زمین با نزدیک شدن مقدار K_o به یک, کاهش می‌یابد. در این حالت مقادیر قدرمطلق حداکثر تنش غیریکنواخت برای مقادیر ضریب فشار جانبی ۰/۵ و ۱/۵ به علت برابر بودن اختلاف آنها با مقادیر تنش در مقایسه با حالت K_o=۱/۰ مساوی هستند.



شکل ۵: منحنی‌های پاسخ زمین نوع II, برای ضرایب فشار جانبی ۰/۳۸, ۰/۵, ۰/۷۵, ۱/۰ و ۱/۵.

جدول ۲: مشخصات پوشش‌های تونل

مشخصات پوشش	LI	LII	LIII	LIV	LV
مدول الاستیسیته (GPa)	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳
ضخامت (mm)	۳۵۰	۳۵۰	۲۰۰	۳۵۰	۵۰۰
شعاع تونل (m)	۴/۲۵	۴/۲۵	۴/۲۵	۴/۲۵	۴/۲۵
روش انجام تحلیل	الاستیک	غیرخطی	غیرخطی در اتصالات	غیرخطی در اتصالات	غیرخطی در اتصالات
نوع پوشش	یکپارچه	یکپارچه	سگمنتی (n=۵+۱)	سگمنتی (n=۵+۱)	سگمنتی (n=۵+۱)
آرماتور پوشش یا اتصال	–	*T20@250* در هر وجه	آرماتور اتصالات *2T20 (AIII)*	آرماتور اتصالات 2T20 (AIII)	آرماتور اتصالات *2T20 (AIII)*
مقاومت فشاری بتن(MPa)	–	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰

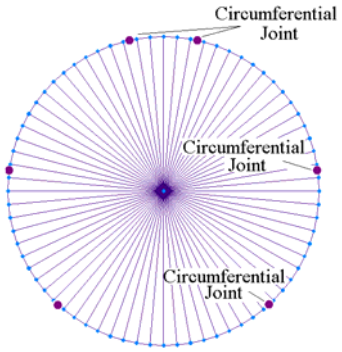
Archive of SID

www.SID.ir

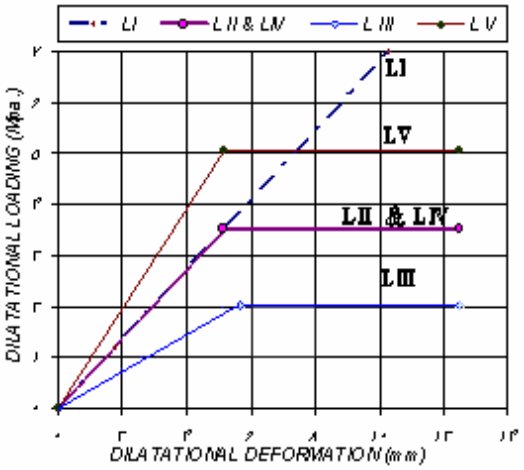
بررسی منحنی‌های ظرفیت پوشش

با جایگزین شدن پوشش تونل بجای توده حفاری شده, بخشی از تنش‌های موجود در توده به پوشش منتقل می‌شود. صرفنظر از اثر اندرکنش پوشش و توده میزبان در تغییر توزیع تنش، توزیع بارهای وارد بر پوشش با توزیع تنش‌های موجود در مرز حفاری مطابقت دارد. بنابراین بارهای وارد بر پوشش به صورت ترکیبی از توزیع مثلثاتی تنش‌های شعاعی و مماسی، مطابق با مودهای تنش تعریف شده در روابط ۳ و۴ قابل بیان می‌باشد.

در شکل (۶) مدل پوشش سگمنتی نشان داده شده است. در این تحقیق به منظور بررسی ظرفیت پوشش و مدلسازی رفتار غیرخطی آن از نرم‌افزار Sap2000 استفاده شده است. لازم به ذکر است که امکان بهره‌گیری از روش پیشنهادی در این تحلیل نیز مستقل از نرم‌افزار انتخابی می‌باشد. بررسی رفتار پوشش, در اثر اعمال پاسخ‌های همگرایی و اعوجاجی توده زمین, بوسیله منحنی‌های ظرفیت محوری و ظرفیت اعوجاجی انجام می‌پذیرد که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



شکل ۶: نحوه مدلسازی تونل سگمنتی.



شکل ۷: منحنی‌های ظرفیت محوری.

منحنی ظرفیت محوری

به منظور بررسی ظرفیت و رفتار پوشش, در اثر اعمال فشار یکنواخت، از منحنی ظرفیت محوری استفاده می‌شود. این منحنی با استفاده از ثبت گام به گام تغییرمکان یکنواخت شعاعی Δ_d، در اثر اعمال فشار یکنواخت P_d بر پوشش، رسم می‌شود. در شکل(۷) این منحنی برای پنج نوع پوشش LI تا LV, با مشخصات ذکر شده در جدول (۲) رسم شده است.

منحنی ظرفیت اعوجاجی

به منظور بررسی ظرفیت و رفتار پوشش, در اثر اعمال بخش غیریکنواخت فشار وارد بر پوشش, از منحنی ظرفیت اعوجاجی استفاده می‌شود. با توجه به وابستگی ظرفیت اعوجاجی، یا به عبارت دیگر ظرفیت خمشی پوشش, بویژه پوشش سگمنتی، به مقدار نیروی محوری, لازم است تا حدود نیروی محوری در مقطع در حالت تعادل نهایی بوسیله روش شرح داده شده در بخش بعد تعیین شود, پس از اعمال فشار یکنواخت متناظر با این نیروی محوری بر پوشش، تنش‌های اعوجاجی عمود بر سطح (P_{si}) و مماسی (T_{si}) به صورت گام به گام افزایش داده می‌شوند و در هر مرحله، با تجزیه میدان تغییرشکل در روی مرز، مقدار ضریب تغییرشکل اعوجاجی Δ_{si} متناظر با آن تعیین می‌گردد. افزایش تنش‌های اعوجاجی تا زمان ناپایدار شدن پوشش در اثر ترکیب بارهای وارد ادامه می‌یابد.

در شکل (۸) منحنی ظرفیت اعوجاجی برای پوشش‌های معرفی شده در جدول (۲)، تحت اثر تنش یکنواخت ۰/۱۲MPa رسم شده است. به منظور مدلسازی پوشش برای تعیین منحنی‌های ظرفیت می‌توان از نرم‌افزارهایی که قابلیت مدلسازی رفتار غیرخطی پوشش و اتصالات را دارند استفاده نمود[۹]. به کمک چنین نرم‌افزارهایی می‌توان با تعیین منحنی رفتاری اتصالات و پوشش به ازای هر نیروی محوری، رفتار غیرخطی پوشش را بررسی کرد.

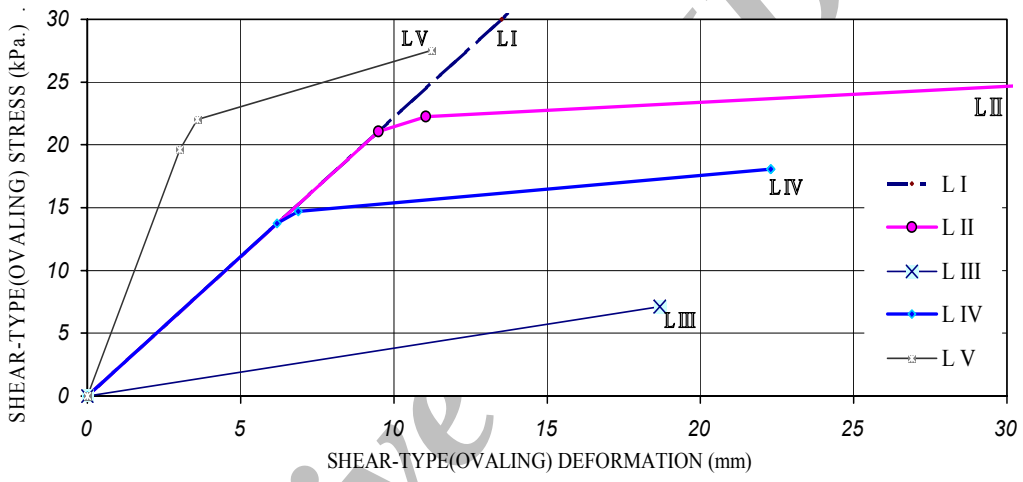
در شکل (۹) نحوه گسترش مفصل‌های پلاستیک و تغییرشکل با افزایش گام به گام تنش‌های اعوجاجی برای پوشش با مشخصات نوع IV ارائه شده است. با توجه به فرض رفتار الاستیک برای قطعات بتنی و رفتار غیرخطی برای اتصالات در این پوشش، و سختی بیشتر سگمنت‌ها

Archive of SID
www.SID.ir

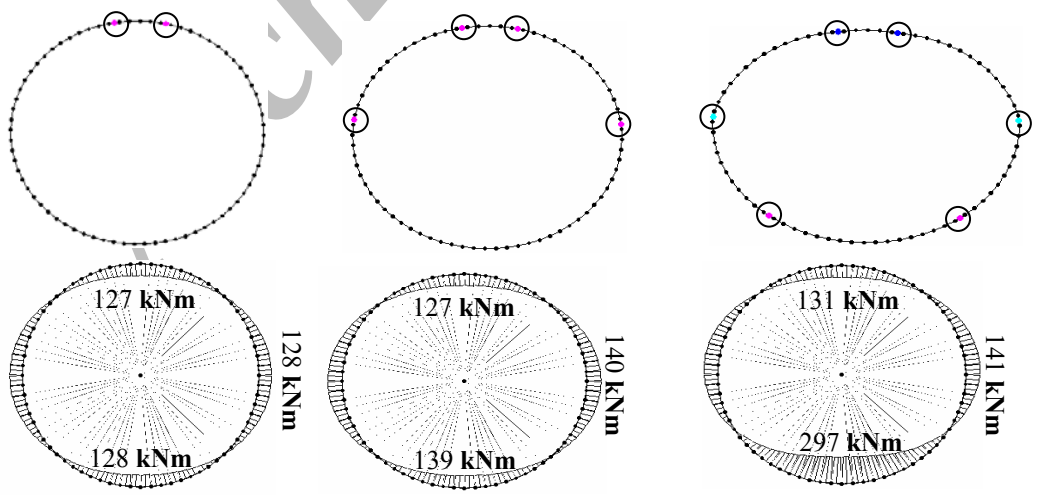
نسبت به اتصالات, با کاهش ظرفیت اتصال سهم قطعات بتنی در باربری افزایش می‌یابد و بنابراین در صورتیکه نیروهای وارده بر این قطعات از ظرفیت آنها بیشتر شود, لازم است تا رفتار غیرخطی قطعات مانند مدل تحلیلی پوشش نوع II نیز در نظرگرفته شود. در تحلیل حاضر تنها رفتار غیرخطی اتصالات در بررسی پوشش‌های سگمنتی, در نظرگرفته شده است. بنابراین رفتار پوشش سگمنتی از رفتار در نظر گرفته شده برای اتصالات تبعیت می‌کند و نقاط تغییر سختی در منحنی ظرفیت پوشش با نقاط مشابه منحنی رفتاری اتصالات متناظرند.

تعیین نیروهای داخلی تحت اثر بارهای استاتیکی ضریبدار

بر اساس مفاهیم روش همگرایی-همجواری محل تلاقی منحنی‌های ظرفیت پوشش و پاسخ زمین, معرف وضعیت تعادل نهایی تنش و تغییرشکل حاصل از اندرکنش خاک با پوشش می‌باشد. در این روش مسئله سه بعدی اندرکنش پوشش و زمین به صورت دو بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای در نظر گرفتن اثرات سه بعدی, از پروفیل تغییرشکل شعاعی LDP و ضریب کاهش محصورشدگی استفاده می‌شود[۱۳،۱۲،۱].



شکل ۸: منحنی‌های ظرفیت اعوجاجی.



الف) $T_{si}=P_{si}=$ ۱۳/۷ kPa ب) $T_{si}=P_{si}=$ ۱۴/۷ kPa پ) $T_{si}=P_{si}=$ ۱۸/۱ kPa

شکل ۹: تغییرشکل اعوجاجی, نحوه گسترش مفاصل پلاستیک و توزیع لنگر خمشی در پوشش نوع IV, در گام‌های افزایش تنش‌های اعوجاجی.

www.SID.ir

در تونلهای حفاری شده به وسیله ماشین حفار، تغییرشکلهای شعاعی زمین قبل از شروع باربری پوشش، عبارتند از تغییرشکلهای در جلوی جبهه حفاری ناشی از تغییر توزیع تنش در اثر حفاری و کاهش سختی، اضافه حفاری ماشین حفار به منظور کاهش اصطکاک و هدایت ساده‌تر سپر حفاری، حفاری زیگزاگی مسیر به علت سختی هدایت سپر در مسیر مستقیم، تغییرشکل ناشی از پر شدن فضای باقی مانده از عبور سپر محافظ (ضخامت سپر)، فاصله آزاد بین سپر حفاری و سگمنتهای کار گذاشته شده و عدم تزریق کامل بین پوشش و توده[۱۴]؛ با توجه به پیچیدگی‌های موجود در تعیین میزان تغییرشکل قبل از نصب پوشش، به کمک روش ارائه شده در این تحقیق می‌توان اثر زمان فعالسازی پوشش را نیز در تعیین عملکرد سازه مورد بررسی قرار داد.

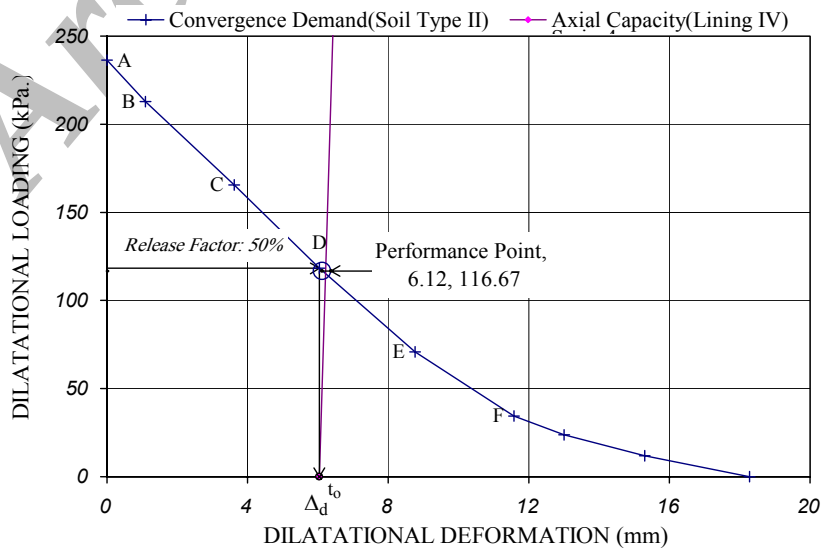
با انتخاب درصد رهاسازی تنش قبل از نصب پوشش، به عنوان مثال ۵۰٪، میزان تغییرشکلهای اعوجاجی Δ_{si}^{to} و همگرایی Δ_{d}^{to} تعیین می‌شوند. مبدأ منحنی ظرفیت محوری در نقطه Δ_{d}^{to} در منحنی پاسخ همگرایی قرار داده می‌شود. محل برخورد منحنی‌های ظرفیت و تقاضای محوری بیانگر نقطه تعادل اندرکنش توده زمین و سازه می‌باشد و بوسیله آن مقدار تنش یکنواخت عمود بر سطح، P_d تعیین می‌شود. با استفاده از این تنش، به روش شرح داده شده در بخش قبل، منحنی ظرفیت اعوجاجی پوشش رسم می‌شود. مبدأ این منحنی در نقطه Δ_{si}^{to} در منحنی پاسخ اعوجاجی متناظر قرار داده می‌شود. این منحنی‌ها برای توده II و پوشش IV با ویژگیهای مشخص شده در جداول (۱) و (۲) در شکل (۱۰) نمایش یافته‌اند. در استفاده از منحنی پاسخ اعوجاجی از شیب بخشی از منحنی که متناظر با محل تلاقی منحنی‌های پاسخ محوری و ظرفیت محوری می‌باشد, استفاده می‌شود. به عبارت دیگر اگر محل برخورد منحنی‌های پاسخ همگرایی و ظرفیت محوری در بخش DE نمودار پاسخ همگرایی باشد، در این صورت نقطه تعادل اعوجاجی، نقطه برخورد منحنی ظرفیت اعوجاجی با امتداد بخش DE در منحنی پاسخ اعوجاجی متناظر خواهد بود.

با استفاده از منحنی‌های شکل (۱۰) ضرایب P_d و P_s تعیین می‌شوند. در حالت الاستیک نیروهای داخلی می‌توانند به کمک روابط ۵ الی ۷ مشخص شوند[۱۷]. زمانیکه محل تلاقی منحنی پاسخ و ظرفیت در بخش غیر خطی منحنی ظرفیت باشد، می‌توان تنش‌های تعیین شده را در مدل تحلیلی ظرفیت پوشش جایگزین کرد و وضعیت توزیع نیروها را مشاهده نمود.

$$A(\theta) = P_d R + P_s^{Static} R \cos 2\theta \quad (۵)$$

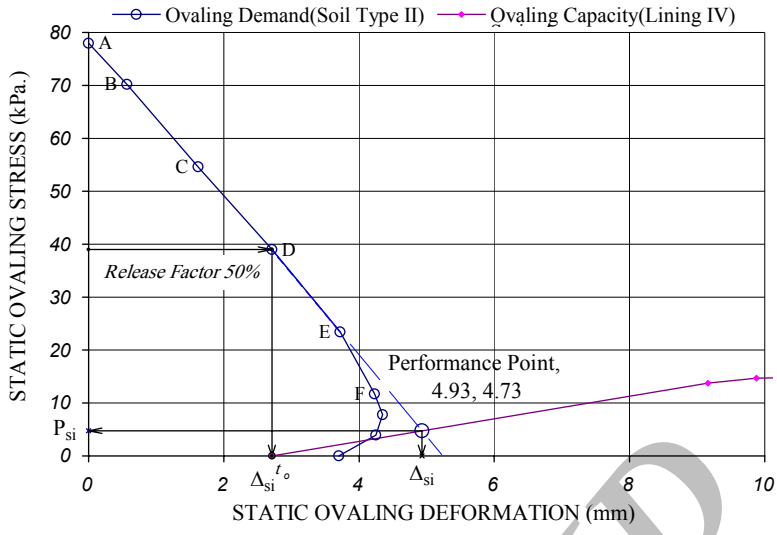
$$V(\theta) = P_s^{Static} R \sin 2\theta \quad (۶)$$

$$M(\theta) = 0.5 P_s^{Static} R^2 \cos 2\theta \quad (۷)$$



شکل ۱۰: بررسی عملکرد پوشش و توده میزبان.

Archive of SID
www.SID.ir



ادامه شکل ١٠: بررسی عملکرد پوشش و توده میزبان.

جدول٣: مقایسه تغییرشکلهای مرز حفاری و نیروهای داخلی پوشش نوع IV حاصل از روش پیشنهادی و روش تحلیل عددی.

Soil Type	Analysis Method	A_{max} kN	M_{max} kN.m	V_{max} kN	Δ_d mm	Δ_{si} mm
Type I	New Method (PBD)	486	29.1	13.7	3.00	3.15
	FEM	571	27.2	12.1	2.99	2.77
	Difference (%)	14.8	6.9	13.2	0	13.7
Type II	New Method (PBD)	516	43.0	20.1	6.12	4.93
	FEM	574	44.6	21.4	6.20	4.57
	Difference (%)	10.0	3.6	1.3	8.0	7.8
Type III	New Method (PBD)	528	64.4	30.3	9.62	8.01
	FEM	602	67.5	32.6	9.49	7.75
	Difference (%)	12.3	4.60	7.0	1.3	3.35

با استفاده از دسته منحنی‌های ارائه شده، وضعیت عملکردی پوشش تحت اثر بارهای استاتیکی بررسی می‌شود. منحنی‌های بالا علاوه بر اینکه نحوه رفتار پوشش در بارگذاری گام به گام را نشان می‌دهند، حداکثر ظرفیت و نیروهای طراحی را مشخص کرده و به این ترتیب می‌توان کفایت مقطع را در این حالت بررسی نمود. با استفاده از این روش و به کمک منحنی‌های تقاضای افزایش یافته و ظرفیت اصلاح شده, امکان بررسی کفایت مقطع تحت اثر بارهای ضربدار وجود دارد. در جدول (٣)، به منظور بررسی صحت نتایج حاصل از روش ارائه شده, مقادیر نیروهای وارد بر پوشش دایروی با مشخصات پوشش نوع I (پوشش الاستیک) در زمین‌های معرفی شده در جدول (١) با بهره‌گیری از روش‌های حل عددی و روش پیشنهادی تعیین و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در جدول (۴) اختلاف نیروها و تغییرشکلهای حاصل از روش پیشنهادی و روش‌های حل عددی برای پوشش‌ها و توده‌های میزبان مورد بحث با فرض ضریب کاهش محصورشدگی۰/۵، ارائه شده است. مقایسه نتایج روشهای تحلیل مذکور با یکدیگر نشاندهنده دقت مناسب نتایج حاصل از روش طراحی مبتنی بر عملکرد، پیشنهادی در این تحقیق با توجه به ساده‌سازی‌های صورت گرفته در آن می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۴: مقایسه درصد تفاوت نیروهای داخلی پوشش حاصل از روش پیشنهادی و حل عددی در خاک‌های‌مختلف.

Soil Type	Lining Type	A_{max} (%)	M_{max} (%)
Type I	III	17	11
	IV	14.8	6.9
	V	11.3	14.4
Type II	III	13	15
	IV	10	3.6
	V	7.1	9.5
Type III	III	15	12
	IV	12.3	4.6
	V	7.0	3.3

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ارزیابی کفایت پوشش تونل‌ها مبتنی بر رفتار توده میزبان, رفتار پوشش و اندرکنش آنها بررسی شده است. با توجه به حساسیت پوشش‌های سگمنتی به موارد ذکر شده، روش پیشنهادی برای ارزیابی عملکرد و طراحی این پوشش‌ها ارائه گردیده است. مزیتهای روش پیشنهادی را می‌توان در موارد زیر بیان نمود:

۱- در روش پیشنهادی, با توصیف نموداری کمیتهای ظرفیت و تقاضا, امکان بررسی کفایت پوشش تونل، با توجه به رفتار توده میزبان به روشنی فراهم شده است. استفاده از نمایش گرافیکی موجب افزایش درک عمومی طراح از رفتار پوشش و نیازهای طراحی آن می‌گردد.

۲- در روش پیشنهادی می‌توان حساسیت طراحی به عدم قطعیت پارامترهای ژئومکانیکی توده میزبان را بررسی نمود.

۳- روش پیشنهادی شامل تاثیرات روش اجرا در طراحی پوشش با در نظر گرفتن اندرکنش پوشش و توده میزبان می‌باشد. با تبدیل اثرات سه بعدی احداث تونل به دو بعدی و تعیین زمان نصب پوشش و یا تزریق در صورت وجود, نیروهای وارد بر پوشش تعیین می‌گردند.

۴- با توجه به بررسی مستقل منحنی‌های تقاضا و ظرفیت پوشش, امکان بهره‌گیری از نتایج تحلیل در هر مورد, به صورت مجزا از یکدیگر, وجود دارد.

مراجع

1 - Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C. (2000). "Application of convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy hoek-brown failure criterion." *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 15, No. 2, PP. 187-213.

2 - Yukinori Koyama. (2003). "Present status and technology of shield tunneling method in Japan." *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 18, PP.145–159.

3 - Wu, C. L. and Penzien, J. (1998). "Stresses in linings of bored tunnels." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* Vol. 27, PP.283-300.

4 - Wanger, H. and Scholter, A. (1996). "Tunnel boring machines." *Trends in Design and Construction of Mechanized Tunneling,* Rotterdam : Published by A.A.Balkema.

5 - *ATC* Report No.40, Applied Technology Concil (Seismic Safty Commission, State Of California 1996), Seismic Evaluation and Retrofit Of Concrete Buildings Volume 1.

6 - *Fema 356*, Federal Emergency Management Agency ,November 2000. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings.

7 - *Design of tunnels and shafts in rock*, EM 1110-2-2901 30 May 1997, Department of the Army, Engineering Manuals, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000

8 - *Plaxis Reference Manual*. PlAXIS: Finite element Package for Analysis of Geotechnical Structures, Delft, Netherland.

9 - *CSI Analysis Reference Manual*, Sap2000 Version 9.03. Berkeley California, USA.

Archive of SID
www.SID.ir

10 - I.T.A Working Group No.2 (2000). "Guidelines for the design of shield tunnel lining." *Tunneling and Underground Space Technology,* Vol. 15, No. 3, PP. 303-331.

11 - I.T.A Working Group (1988). "Guidelines for the design of tunnels." *Tunneling and Underground Space Technology,* Vol. 3, No. 3, PP. 237-249.

12 - AFTES, French Association for Underground Works. (1978). "Analysis of tunnel stability by the convergence-confinement method." *Underground Space*, Vol. 4, No. 4, PP.221-223.

13 - AFTES, French Association for Underground Works. (2001). *Recommendation on the Convergence-Confinement Method.*

14 - AFTES, French Association for Underground Works. (1995). *Recommendation on settlements induced by Tunneling*, Presented by Y.Leblais.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Performance Based Design
2 - Longitudinal Deformation Profile
3 - Ground Reaction Curve
4 - Support Characteristic Curve
5 - Dilatational mode
6 - Ovaling Deformation
7 - Normal Stress
8 - Tangential Stress

Archive of SID

www.SID.ir