تحلیل برگشتی داده‌های همگرایی‌سنجی و برداشت نشست سطحی زمین در حین اجرای زوج تونل رسالت

ملو آقامالیان[۱]، اورنگ فرزانه*[۲] و امیر عباس بصیری تهرانی[۱]

[۱] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

[۲] دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۸۵/۱۱/۲۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۸۹/۱۲/۲۲، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۳/۳۰)

چکیده

در جریان اجرای زوج تونل بزرگراه رسالت سیستم ابزار دقیق و رفتارسنجی نسبتا کاملی پیاده شده و داده‌های آن پردازش شده‌است. این پروژه از معدود پروژه‌های تونل شهری با ابعاد دهانه بزرگ (۱۶ متر) و روباره کم (۶ تا ۳۰ متر) است که به علت بزرگی دهانه‌ها، حفاری هر کدام از تونل‌ها در چندین مرحله صورت گرفته‌است. با توجه به اینکه اندازه‌گیری پارامترهای ژئوتکنیکی آبرفت درشت‌دانه تهران به ویژه ضریب چسبندگی ناشی از سیمانتاسیون، ضریب فشار جانبی خاک در حال سکون K_0 و تا حدی مدول ارتجاعی E ازطریق آزمایش‌های آزمایشگاهی رایج مکانیک خاک و آزمون‌های برجا در خاک تهران مشکل و بعضاً غیرممکن است یکی از بهترین روش‌های ارزیابی این پارامترها در مقیاس توده زمین انجام تحلیل برگشتی بر اساس نتایج ابزاردقیق است. دراین مقاله با مدل‌سازی مراحل حفاری زوج تونل رسالت با نرم افزار عددی بر مبنای اجزا محدود و انجام تحلیل برگشتی به تخمین مجموعه پارامترهای محتمل زمین پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل برگشتی، تونل رسالت، رفتارسنجی، ابزار دقیق

مقدمه

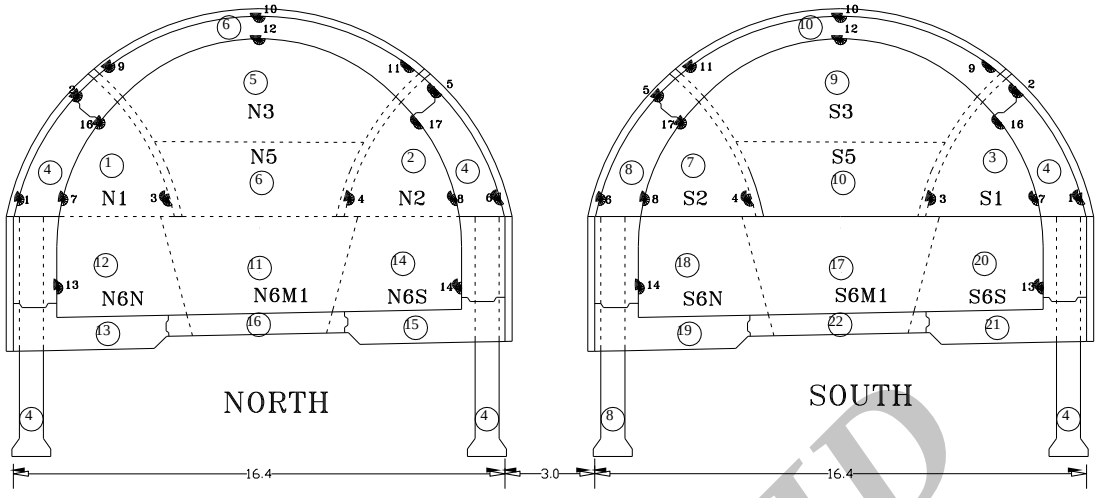
زوج تونل رسالت از دو تونل موازی با طول تقریبی ۱۰۰۰ متر و عرض دهانه حفاری حدود ۱۶متر تشکیل یافته‌است. روش اجرای تونل به شیوه اتریشی جدید (NATM) بر مبنای تبدیل مقطع بزرگ حفاری به بخش‌های کوچکتر و استفاده از روش حفاری چند مرحله‌ای بوده است. ضخامت روباره در امتداد طول تونل از ۶ تا ۳۴ مترمتغیر بوده و توده به طور عمده از شن و ماسه رس‌دار همراه با قلوه‌سنگ تشکیل یافته‌است. دره نظامی گنجوی مسیر تونل‌ها را قطع کرده و آنرا به دو بخش موسوم به تونل کوتاه و تونل بلند تقسیم کرده‌است. ابتدای تونل بلند در دره نظامی گنجوی با کیلومتراژ ۵۶۰+۱ و انتهای آن در میدان آفریقا با کیلومتراژ ۳۵۰+۲ می‌باشد. در طی اجرای این تونل سیستم ابزار دقیق نسبتاً کاملی پیاده شد و اطلاعات ارزشمندی از رفتار توده خاک بدست آمد که از جمله آنها داده‌های همگرایی‌سنجی و برداشت نشست سطح زمین می‌باشد که در این مقاله برای تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی توده خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لازم است ذکر شود که نتایج رفتارسنجی حین اجرای تونل در مراحل اولیه اجرای آن قبلاً موضوع سه مطالعه مشتمل بر تحلیل‌برگشتی قرار گرفته‌است. در مطالعه نخست فرزانه، وهدانی و زند[۱] [۵] نتایج همگرایی سنجی گالری N1 را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در مطالعه دوم امیرعباس بصیری [۲] از نتایج همگرایی سنجی گالری N1 برای انجام یک مطالعه موردی بهره برده‌است. در مطالعه سوم، صالحی و فخیمی[۳] نتایج همگرایی سنجی حین حفاری گالری‌های N1 وN2 را با نگرشی به نتایج کشیدگی سنجی برای تحلیل برگشتی به کار برده‌اند. نتایج تحقیق اخیر حاکی از اینست که ضریب رانش خاک در حال سکون باید در حدود ۰/۴ تا ۰/۵ باشد.

روش اجرا

به منظور حفظ پایداری و کنترل تغییر شکل‌های ناشی از عملیات تونل‌سازی، حفاری مقطع تونل با تقسیم سطح مقطع به بخش‌های کوچکتر به صورت چند مرحله‌ای انجام

*نویسنده مسئول: تلفن: فاکس: Email: ofarzane@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱: مراحل حفاری و نام‌گذاری گالری‌ها و شماره پین‌های قرائت همگرایی‌ها در تونل بلند رسالت.

شده‌است. سازه نگهدارنده اولیه که برای تحمل باری‌های حین ساخت طراحی شده‌است از ۱۵ الی ۲۵ سانتی‌متر شاتکریت، شبکه فولادی و قاب‌های فولادی یا تیرهای مشبک به فواصل ۰/۵ الی ۱ متر تشکیل یافته‌است. سازه نهایی تونل از بتن مسلح درجا به ضخامت ۱/۲ متر در کف و دیواره‌ها و ۰/۷ متر در تاج تشکیل یافته‌است که برای تحمل بخشی از نیروهای حین ساخت، بار وزن سازه، بار ناشی از زوال مقاومت سازه اولیه در طول عمر مفید سازه، بارهای ناشی از کاهش پارامترهای ژئوتکنیکی توده خاک و بارهای لرزه‌ای ناشی از زلزله طراحی شده‌است. در شکل (۱) مراحل مختلف اجرایی زوج تونل بلند رسالت همراه با پین‌های همگرایی سنجی نمایش یافته‌است.

وضعیت ژئوتکنیکی زمین در مسیر تونل

مسیر تونل رسالت کلاً در زمین‌های آبرفتی و کنگلومرایی شهر تهران واقع است. به منظور شناسایی لایه‌های خاک و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی تعدادی گمانه دستی و ماشینی در طول مسیر پروژه زده شده و طبق طبقه‌بندی متحد خاک در رده خاک‌های GC, GP و GW قرار گرفته‌است. همچنین در گالری N1 برجا انجام شده‌است. تعدادی آزمایش در جدول (۱) نتایج حاصل از آزمایش‌های اولیه و آزمون‌های برجا جداگانه ارائه شده‌است. مقایسه نتایج حاکی از تفاوت چشمگیر در مدول الاستیسیته و چسبندگی در آزمون‌ها می‌باشد.

رفتار سنجی و نتایج اندازه‌گیری

در طول زوج تونل بلند تعداد ۳۵ ایستگاه ابزاردقیق

جدول ۱: نتایج آزمایشهای ژئوتکنیکی

Lab. Test results	In situ test results	
$\gamma = 1800 \approx 2100\ kg/m^3$ $C = 0.1 \approx 0.2\ kg/cm^2$ $\varphi = 24^\circ \approx 30^\circ$ $E = 350\ kg/cm^2$	1+992 Location	1+815 Location
	$C = 0.8 kg/cm^2$ $\varphi = 41^\circ$	$C = 0.5 kg/cm^2$ $\varphi = 31^\circ$
	$E = 1300 kg/cm^2$	

پیش‌بینی و فعال گردیده‌است که بر حسب ترکیب پارامترهای مورد سنجش به پنج تیپ A،B،C،D و E تقسیم شده‌است. نوع اندازه‌گیری‌های انجام شده در ایستگاه‌های مزبور در جدول (۲) ارائه شده‌است. در اشکال (۳) الی (۵) نمونه‌ای از نتایج همگرایی‌سنجی در مراحل مختلف حفاری که با استفاده از متر همگرایی با دقت اسمی ۰/۰۱ ± میلی‌متر و همچنین نشست سطحی که با استفاده از دوربین ترازیاب دقیق N3 با دقت اسمی ۰/۰۱ ± میلی‌متر انجام شده‌است، نمایش یافته‌است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲: ایستگاه‌های ابزار دقیق در زوج تونل رسالت

Underground measurements	Surface measurements	No	type
convergence	settlement	23	A
-	settlement	7	B
convergence	settlement	2	C
-	settlement extensometer	2	D
convergence pressure cell	settlement extensometer	2	E

مدل‌سازی مراحل اجرایی

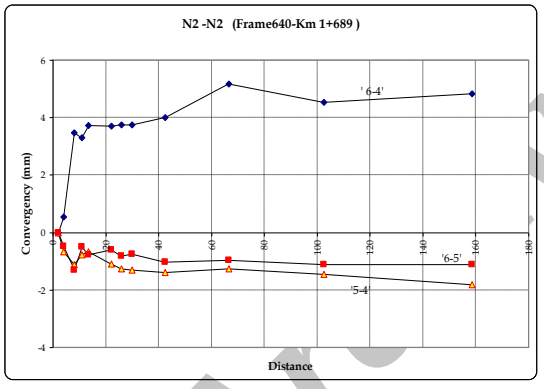
در تحقیق حاضر کلیه مراحل عملیات اجرایی زوج تونل در محل ایستگاه‌های ۹۹۲+۱ و ۶۸۹+۱ با در نظر گرفتن اندرکنش کامل سازه نگهدارنده تونل و توده خاک پیرامون با استفاده از روش المان محدود مدل‌سازی شده و میدان‌های تنش- تغییر شکل در توده خاک، همگرایی دیواره تونل و نشست سطح زمین در اثر هر یک از مراحل حفاری، با در نظر گرفتن توالی دقیق مراحل اجرا بازای مقادیر مختلف پارامترهای مدل رفتاری توده خاک تعیین گردیده و با مقادیر حاصل از اندازه گیری‌ها مقایسه شده‌است[۴].

به منظور انجام تحلیل‌های اندرکنش خاک- سازه از نرم‌افزار PHASE2 (version 6) استفاده شده‌است. این نرم‌افزار قادر به مدل‌سازی دو بعدی مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه می‌باشد. روش حل عددی در این برنامه روش المان‌های محدود بوده و در آن تحلیل محیط پیوسته با رفتارهای ارتجاعی خطی و ارتجاعی- خمیری کامل با معیار خمیری موهر-کولمب صورت می‌گیرد[۶]. این مدل دارای ۱۲۲۶۷ المان و ۶۱۹۷ تعداد نقاط گرهی می‌باشد. در شکل(۶) مدل محاسباتی به‌کار رفته برای انجام تحلیل‌های اندرکنش خاک- سازه نمایش یافته‌است. در انجام تحلیل‌های برگشتی فرضیات زیر به کار رفته‌است:

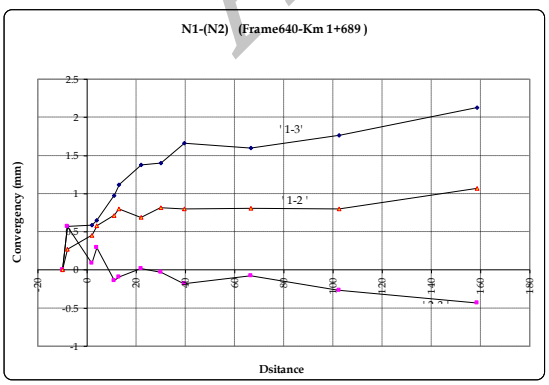
- محیط خاک در اطراف تونل به صورت همگن با رفتار ارتجاعی- خمیری کامل با معیار خمیری مور-کولمب می‌باشد.
- تحلیل دو بعدی و به صورت کرنش مسطح بوده و اثرات سه بعدی جبهه حفاری با اعمال نرم‌شدگی به وسیله کاهش مدول الاستیسیه خاک قبل از حفاری و اجرای پوشش اولیه، اعمال گردیده‌است. برای مدل‌سازی المان‌های پوشش اولیه از المان‌های خمشی پیش‌فرض برنامه و برای مدل‌سازی پوشش نهایی از المان‌های مثلثی ۶ گرهی استفاده شده‌است.

تحلیل برگشتی پارامترهای رفتاری توده خاک

به منظور تعیین بازه محتمل پارامترهای مدل رفتاری توده خاک با استفاده ار نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در طول مراحل ساخت، تحلیل مراحل کامل اجرای تونل به‌ازای مقادیر مختلف پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک تکرار شده و همگرایی جداره سازه اولیه و نشست‌سطحی ناشی از مراحل مختلف حفاری محاسبه گردیده و با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌ها مقایسه شده‌است. در این تحقیق، از نتایج همگرایی‌سنجی روی جداره سازه اولیه و نشست‌های سطحی اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه با روباره‌های ۳۳/۵ متر واقع در کیلومتراژ ۹۹۲+۱ و ۱۹ متری واقع در کیلومتر ۶۸۹+۱ استفاده شده‌است[۴].



شکل۲: نمودار همگرایی گالری S1 تحت اثر حفاری گالری S1 درایستگاه ۹۹۲+۱(روباره ۳۳/۵ متر).

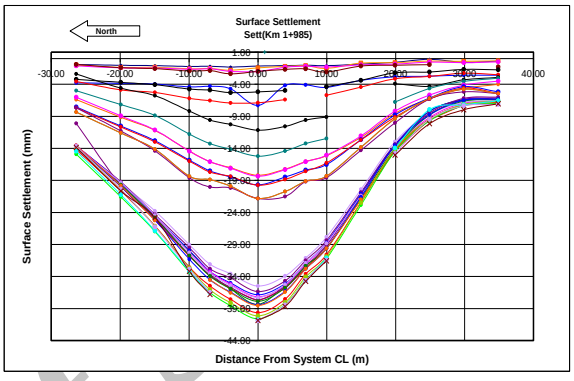


شکل۳: نمودار همگرایی گالری N1 تخت اثر حفاری گالری N2 در ایستگاه ۶۸۹+۱ (روباره ۱۹ متر).

Archive of SID

www.SID.ir

در جدول (۳) حدود تغییرات پارامترهای مدل رفتاری توده خاک برای انجام تحلیل‌های برگشتی نمایش یافته‌است. نتایج همگرایی‌سنجی در گالری N1 تحت اثر حفاری گالری N2 که نمونه‌ای از آن در شکل (۴۶) ارائه شده، نشان دهنده آن است که وتر ۳-۱ همواره تحت اثر حفاری گالری مجاور، همگرا شده‌است. این روند به جز در ایستگاه‌های



شکل۴: نشست سطح زمین درایستگاه ۱+۹۹۲□ (روباره ۳۳/۵ متر) درطول اجرا.

مورد مطالعه، در سایر ایستگاه‌های همگرایی‌سنجی نیز اتفاق افتاده‌است. در شکل (۷) دونمونه از تغییرات همگرایی محاسباتی وتر ۳-۱ در گالری N1 تحت اثر حفاری گالری N2 بازای مقادیر مختلف ضریب چسبندگی (C) و ضریب و ضریب فشار جانبی در حال سکون(K_0) و دو مقدار مختلف مدول الاستیسیته (E) و زاویه اصطکاک داخلی(φ) نمایش یافته‌است. با بررسی روند تغییرات همگرایی محاسباتی به ازای K_0های مختلف و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق، ملاحظه می‌شود که تنها به ازای مقادیر نسبتاً کوچکتر K_0 نتایج همگرایی محاسباتی بیانگر همگرا شدن وتر ۳-۱ می‌باشد. به این ترتیب با مقایسه روند تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر حاصل از محاسبات عددی می‌توان با تقریب خوبی مقدار ضریب فشار جانبی توده خاک در حال سکون را برابر $K_0 \approx 0.4$ در نظر گرفت. فرض فوق در ادامه روند تحلیل برگشتی در نظر گرفته شده‌است. محاسبات نشان می‌دهند که با کاهش K_0 مناطق پلاستیک تشکلیل یافته اطراف حفاری افزایش می‌یابند. با توجه به طبیعت غیر خطی رفتار توده خاک، نمی‌توان به مجموعه پارامترهای یکتایی دست یافت که نتایج حاصله از اندازه‌گیری را باز تولید کرده و به بیان ریاضی تابع خطا را حداقل نماید. لذا در این تحقیق سعی گردیده‌است با استفاده از نتایج چند مرحله حفاری شامل گالری‌های N1، N2، S1 و S2 و همچنین تأثیر حفاری گالری N2 روی گالری N1 و نتایج حاصل از نشست زمین بازه محدودتری برای دسته پارامتر توده خاک تعیین شود[۹].

با استفاده از روش تحلیل برگشتی مستقیم و انتخاب تابع خطای مناسب، نتایج همگرایی حاصل از چهار مرحله حفاری و نتایج حاصل از نشست سطحی زمین در پایان اجرای تونل پردازش می‌شوند.

جدول۳: حدود تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی در تحلیل‌های برگشتی.

	min	max	step	unit
C	0.02	0.08	0.02	MPa
Φ	34	40	2	deg
E	85	160	25	MPa
K_0	0.4	1	0.2	-

این تابع برای نتایج همگرایی سنجی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Error = f(\mathrm{E},\mathrm{C},\varphi,\mathrm{K}_0) = \left|\frac{\Delta_c - \Delta_m}{\Delta_m}\right| \qquad (۱)$$

Δ_c : مقدار همگرایی محاسباتی

Δ_m : مقدار همگرایی واقعی

با اعمال تابع خطا به نتایج همگرایی‌سنجی مراحل حفاری در نظر گرفته شده می‌توان متوسطی از مجموع خطاها برای وترهای مختلف، به ازای پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی را به دست آورد. در مورد نتایج نشست سطحی بهتر است از مفهوم خطای مطلق بجای خطای نسبی استفاده شود. با تعیین حداقل‌های تابع خطای مطلق به ازای پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی برای نشست‌های سطحی دو طرف محور تونل‌ها (center-line) تحلیل

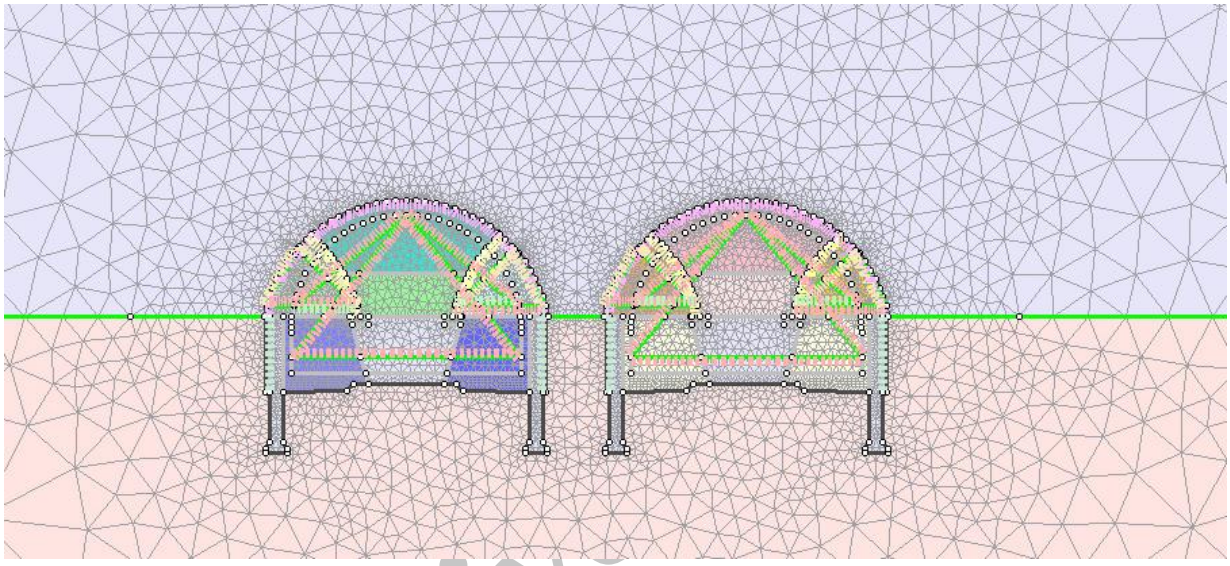
Archive of SID

www.SID.ir

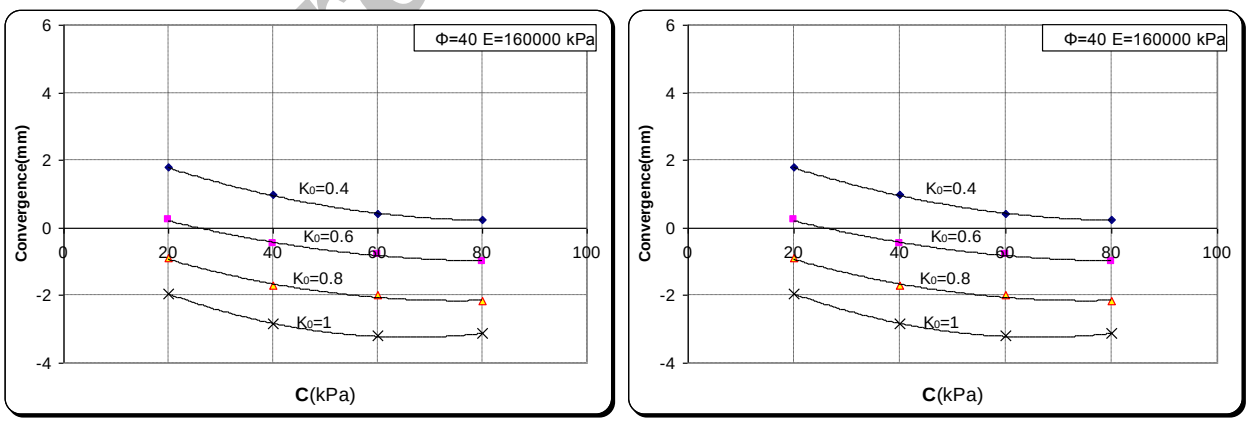
برگشتی داده‌های نشست سطحی انجام می‌شود. تابع خطای مطلق نشست سطحی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$f(E,C,\varphi,k_0)=|\Delta_m-\Delta_c| \qquad (۲)$$

به طوری که Δ_m نشست اندازه گیری شده و Δ_c نشست محاسباتی می‌باشد. شکل (۸) نمونه‌ای از تغییرات خطای نسبی میانگین نتایج همگرایی‌سنجی در ایستگاه‌های ۱+۹۹۲ و ۱+۶۸۹ و مرز خطای قابل قبول آنها و همچنین روند تغییرات خطای مطلق میانگین نتایج نشست سطحی زمین و مرز خطای قابل قبول در ایستگاه ۱+۹۹۲ را به ازای پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی نشان می‌دهد.



شکل۵: مدل المان محدود تونل.

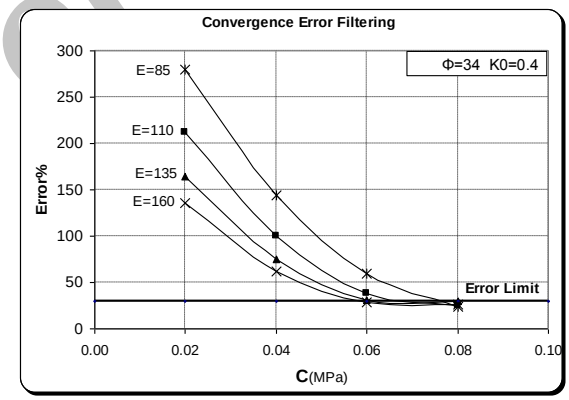


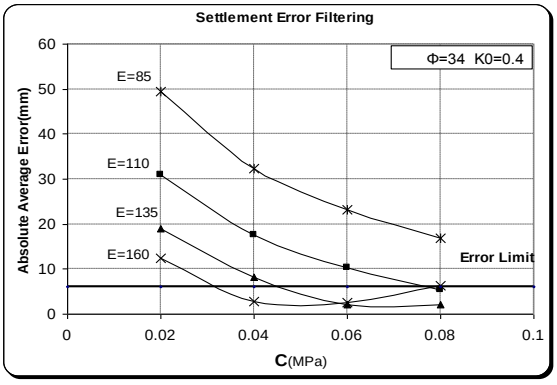
شکل ۶: نتایج همگرایی وتر ۱-۳ در گالری N1 تحت اثر حفاری گالری N2 در محور عرض‌ها مقادیر مثبت همگرایی ومقادیر منفی واگرایی هستند

www.SID.ir

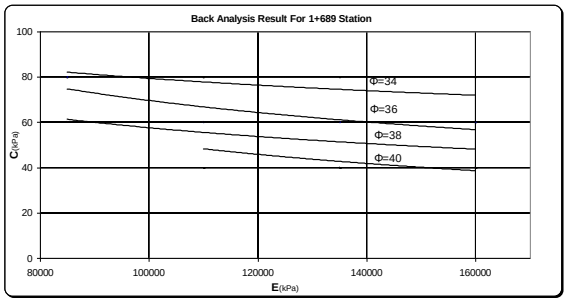
مرز خطای قابل قبول بر اساس تعداد زیادی سعی و خطا و همچنین با قضاوت مهندسی برای هر مساله خاص بایستی به گونه‌ای انتخاب شود تا با کمترین خطای ممکن نتایج ابزار دقیق را باز تولید کند. بازه محتمل پارامترهای ژئوتکنیکی در ایستگاه ۹۹۲+۱ و ۶۸۹+۱ در نمودار شکل‌های (۹) و (۱۰) نمایش یافته‌است. منحنی‌های شکل (۹) و (۱۰) به گونه‌ای می‌باشند که ضمن ارائه بازه محدودی برای پارامترهای توده، بیانگر روندی منطقی از تغییرات پارامترها به نحوی می‌باشند که نتایج همگرایی سنجی و نشست سطحی را با قبول مقداری خطا باز تولید می‌کنند[۴].

شکل (۱۱) نمونه ای از بازتولید نتایج همگرایی سنجی و نشست سطحی را به ازای پارامترهای به دست آمده در تحلیل برگشتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده از تحلیل برگشتی انطباق خوبی با نتایج اندازه‌گیری دارند.

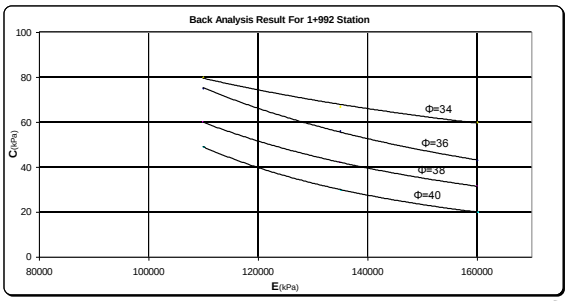




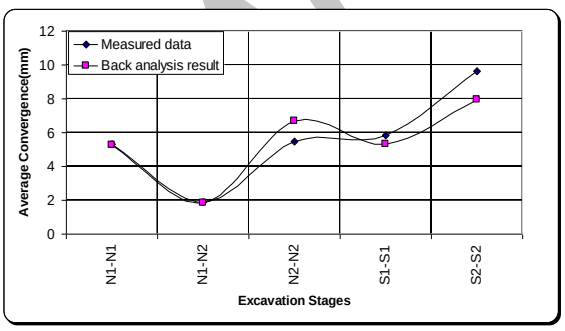
شکل ۷: تغییرات تابع خطا به ازای پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی در ایستگاه ۶۸۹+۱.



شکل۸: بازه محتمل پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک در تحلیل برگشتی ایستگاه ۶۸۹+۱.



شکل ۹: بازه محتمل پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک در تحلیل‌برگشتی ایستگاه ۹۹۲+۱



شکل ۱۰: مقایسه نتایج همگرایی‌سنجی اندازه گیری‌شده با نتایج تحلیل برگشتی در ایستگاه ۶۸۹+۱ بازای

$K_0 = 0.4\ E = 160000kPa\ C = 60kPa\ \varphi = 34^\circ$

Archive of SID

www.SID.ir

جمع‌بندی و نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، با استفاده از نتایج همگرایی حاصل از حفاری چهار گالری و نتایج برداشت نشست سطح زمین در طی اجرای تونل‌ها، به تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی محتمل توده خاک پرداخته شده‌است. اگرچه به دلیل رفتار غیرخطی توده خاک نمی‌توان با استفاده از تحلیل برگشتی مجموعه پارامترهای یکتایی را برای توده خاک محل پروژه تعیین کرد اما می‌توان با تقریب مهندسی معقولی حدود تغییرات و رابطه بین پارامترهای مدل رفتاری توده خاک را مشخص کرد. بررسی‌های انجام شده در این تحقیق منجر به تعیین محدوده تغییرات ضریب فشار جانبی در حال سکون و تعیین بازه کوچکی برای محدوده تغییرات محتمل سه پارامتر اصلی C، φ و E گردیده که می‌تواند در طراحی سازه‌های زیرزمینی منطقه مورد بررسی به عنوان داده‌های اولیه بکار برده شود.

تقدیر و تشکر

طراحی و اجرای رفتارسنجی تونل‌های رسالت بوسیله شرکت پرلیت صورت گرفته‌است. در اینجا از مدیران محترم این شرکت به خاطر در اختیار گذاشتن داده‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در این مقاله صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

1. Zand, Amir Ghasem. (1999). *Instrumentation Design and Analysis of Monitoring Data in a Urban Tunneling* Project. M.S.Thesis, School of Civil Engineering -University of Tehran. Tehran : s.n.,.
2. Bassiri Tehrani, Amir Abbas. (2001). *Inverse Analysis of Tunnel Lining with Minimum of Sum of square Value Method with one Urban Tunnel Case Study*. M.S. Thesis School of Civil Engineering of University of Tehran. Tehran : s.n.,.
3. Davood Salehi, Ahmad Ali Fakhimi. (2002). *Using Inverse Analysis for Estimating Soil Parameters in Resalat Tunnel Project*. 6th Tunnel Confrence . Tehran : s.n.,.
4. Aghamalian, Mello. (2006). *Inverse Analysis of Monitoring Data during Multi-Stage Construction of Resalat Twin Tunnels in Tehran*. M.S.Thesis,School of Civil Engineering-University of Tehran. Tehran : s.n.,.
5. Orang Farzaneh, Shahram Vahdani, Amir Ghasem Zand. (2001). *Instrumentation Design and Analysis of Monitoring Data in a Urban Tunneling Project*. 5th Tunnel Confrence . Tehran : s.n.,.
6. 6- *Rock Science Company* "PHASE^2 Manual "www.rocscince.com
7. 7 - Sakurai, S. (1993). *Back Analysis in Rock Engineering Comprehensive Rock Engineering* , Vol. 4, PP. 543-568.
8. 8 - ITA working Group on General Approaches to the design of tunnels ,(1998). " Guideline for the design of Tunnels, *Tunneling and Underground space technology* , Vol. .3. PP. 149-237.
9. 9 - Geoida, G. (1985). "Some remarks on back analysis and characterization problems in geomechanics." *In Proc. 5th Int.Conf. Nume . Methods in Geomech. Nagoya*(Edited by T.Kawamoto), PP. 47-61.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Shotcrete
2 - Convergence-Distance

Archive of SID

www.SID.ir