

مدل سازی عددی اندرکنش تونل و گسلش نرمال در آبرفت ماسه‌ای

پژوهشی

سارا بهمنی^۱؛ علی نبی زاده^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، bahmani.geo@gmail.com

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ali.nabizadeh@sru.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱

شماره صفحات: ۳۶۹ تا ۳۸۱

شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.23223111.1399.9.4.3.2

واژگان کلیدی	چکیده
گسلش نرمال تونل مدل سازی المان مجزا مدل سازی سانتریفیوژ	پدیده زلزله یکی از مهم‌ترین خطرات زندگی بشر است. زلزله‌های بزرگ مقیاس رخ داده در دهه‌های اخیر تغییر مکان‌های دائمی بزرگی در زمین ایجاد کرده و خود منجر به خسارات زیادی به سازه‌های بزرگ از قبیل سد، پل و شریان‌های حیاتی واقع در ناحیه گسلش شده است. پژوهش حاضر به بررسی ویژگی‌های انتشار گسیختگی گسل زلزله و رفتار تونل‌های در معرض جابجایی‌های گسل برای افزایش عملکرد سازه‌های مقاوم در برابر زلزله پرداخته است. در این پژوهش تاثیر حضور یا عدم حضور تونل در جبهه گسترش گسلش نرمال به وسیله نرم‌افزار المان مجزا مدل‌سازی گردیده است. به منظور صحت سنجی مطالعات عددی انجام شده در این پژوهش، نتایج حاصله با نتایج تعدادی از آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام شده در زمینه اندرکنش تونل و گسلش نرمال، مورد مقایسه قرار گرفته است. وجود تونل سبب تغییر مسیر گسلش گردیده همچنین ناحیه برشی در سطح و داخل لایه خاک با وجود تونل گسترش وسیعی داشته است. مقایسه بین مدل مطالعات عددی و آزمایش‌های سانتریفیوژ نشان داد که اثر متقابل گسلش زلزله و تونل به فشار سربار تونل، صلبیت تونل، موقعیت تونل نسبت به مرکز گسلش و پارامترهای مکانیکی خاک بستگی دارد؛ همچنین انحراف مسیر گسلش، تغییر مکان‌های سطحی خاک و افزایش خطر گسلش نرمال بر سازه‌های سطحی را به خوبی نشان می‌دهد.

۱- پیش‌گفتار

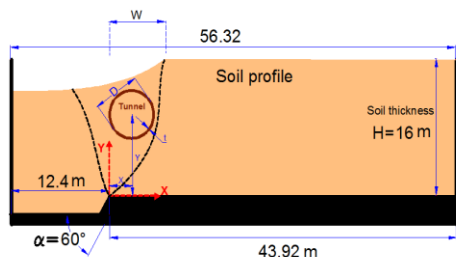
زمان گذشته، در طول آن جابجایی رخ داده است. جابجایی گسل‌ها می‌تواند یا بصورت جابجایی آرام باشد که هیچ گونه لرزشی در زمین ایجاد نمی‌کند و یا این‌که بصورت ناگهانی اتفاق بیفتد که جابجایی‌های ناگهانی در طول گسل‌ها عامل ایجاد اغلب زلزله‌ها است. به هر حال، تغییر مکان‌های دائمی زمین که توسط گسلش در پوسته زمین ایجاد می‌شوند، یک خطر جدی برای سازه‌های زیر سطحی و همچنین ناپایداری پی‌های سازه‌های سطحی هستند که در نهایت منجر به ناپایداری کل سازه است. سازه‌های زیر زمینی از قبیل تونل

گسل‌ها شکستگی‌هایی در پوسته زمین هستند که در طول آن‌ها تغییر شکل‌های قابل توجهی ایجاد شده است. گسل‌های کوچک در ترانشه‌های جاده، مکان‌هایی که لایه‌های رسوبی چند متر جابه‌جا شده‌اند، قابل تشخیص هستند. گسل‌ها زمانی تعریف می‌شوند که دو بلوک مجاور سنگی در پاسخ به تنش‌های ایجاد شده نسبت به یکدیگر حرکت کنند. (Kiani, et al., 2016; Tahghighi, et al., 2017). در واقع حضور گسل در یک منطقه نشان می‌دهد که در

در این پژوهش، تحلیل عددی به روش المان مجزا، به جهت مطالعه در عملکرد تونل داخل آبرفت ماسه‌ای خشک در معرض گسلش نرمال مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، به جهت اعتبارسنجی داده‌های به دست آمده از مدل‌سازی نرم‌افزارهای المان مجزا، نتایج این مدل‌سازی با نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام شده در دانشگاه بین المللی مرکزی تایوان (NCU) مقایسه شده است.

۲- تعریف مساله

هندسه و ابعاد جعبه مدل‌سازی شده در شکل ۱ و شکل ۲، نمایش داده شده است. در این پژوهش، ابعاد مدل‌سازی در نرم‌افزار PFC^{2D} مشابه با ابعاد نمونه آزمایشگاهی در دستگاه سانتریفیوژ در نظر گرفته شده و دارای طول و ارتفاع به ترتیب ۲۰ و ۷۰/۴ سانتی‌متر می‌باشند و همچنین فرودبواره و فرادبواره به ترتیب دارای طول ۵۴/۹ و ۱۵/۵ سانتی‌متر است. خط گسل با زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق به سمت پایین حرکت می‌کند. تونل دارای قطر D و ضخامت t است که در مکان‌های متفاوت و با فواصل X و Y از مرکز گسلش و مشابه شرایط آزمایشگاهی جانمایی شده است.



Hanging wall

شکل ۱- هندسه و ابعاد نمونه مدل‌سازی شده در واقعیت

۳- روش مدل‌سازی عددی

۳-۱- نرم‌افزار المان مجزا (PFC2D Particle Flow Code)

مدل‌سازی براساس روش المان مجزا، برای اولین بار توسط (Cundall & Strack, 1979) ارائه شده است تا یک ماده که در واقعیت به صورت دانه‌ای است را به عنوان ذرات صلب متراکم مدل کند. PFC^{2D} particle flow code (PFC2D) یک نرم‌افزار رایج است که شبیه‌سازی‌های المان مجزا انجام می‌دهد. مجموعه ذرات متراکم به همراه ریز پارامترهای

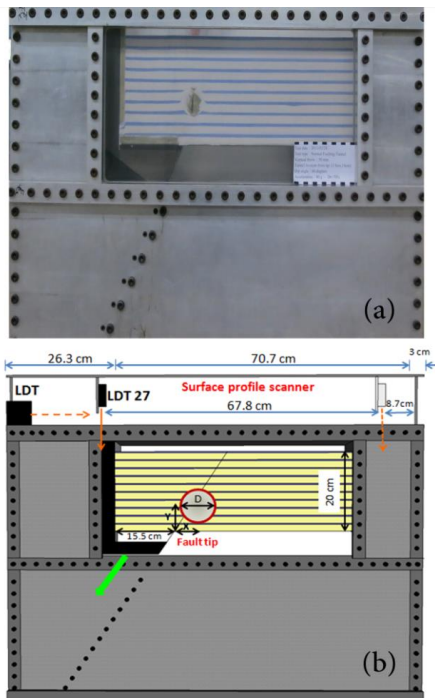
های راه و راه آهن، تونل‌های هیدرولیکی، غارهای آبی، شریان‌های حیاتی برای حمل و نقل نفت و گاز طبیعی و... عناصر استراتژیک در حمل و نقل به شمار می‌آیند. تخریب سازه‌های زیرزمینی به شدت می‌تواند اقتصاد یک منطقه را به دلیل زمان مورد نیاز برای بازسازی عملکرد شبکه‌های آسیب دیده تحت تاثیر قرار دهد. به منظور کاهش احتمال فقدان سرویس این سازه‌ها، کاهش خطر احتمالی و اثرات تخریب ضروری است. (Konagai, 2005; Konagai & Wang, et al., 2001; Johansson, 2007).

با توجه به طول تونل‌ها در مقایسه با سایر سازه‌ها، عبور تونل از گسل زیرزمینی اجتناب ناپذیر است و این موضوع یک چالش در طراحی و ساخت تونل است (Lin, et al., 2007; Baziar, et al., 2014; Baziar, et al., 2016; Baziar, et al., 2019). مقیاس که در ترکیه (Kocaeli, 1999, Turkey)، تایوان (Chi Chi, 1999) و چین (Sichaun, 2008) رخ داده است، ثابت می‌کند که گسیختگی‌های گسل می‌تواند خطرات قابل توجهی به سازه‌های زیر سطحی وارد کند و در مقایسه با بزرگی زلزله‌ها دلیل اصلی شکست تونل‌ها است؛ بنابراین، عبور گسل از تونل بخش مهم طراحی تونل در مواجهه با گسیختگی زمین است و تونل باید توانایی مقاومت در برابر جابجایی گسل را داشته باشد.

تا به امروز بیشتر تحقیقات در زمینه عملکرد شالوده‌ها و لوله‌های مدفون متمرکز بوده است (Anastasopoulos, et al., 2007 and 2008; Tsatsis, et al., 2019; Gazetas, et al., 2014; Loli, et al., 2012 and 2011; Baziar, et al., 2012 and 2015) و تحقیقات کمتری در زمینه اندرکنش تونل و گسلش انجام شده است (Baziar, et al., 2014, 2016 and 2020).

به هر حال، تغییر مکان‌های دائمی زمین که توسط گسلش در پوسته زمین ایجاد می‌شوند، یک خطر جدی برای سازه‌های زیرسطحی هستند که در نهایت منجر به ناپایداری کل سازه خواهد شد.

برخورد تونل‌ها با گسله‌ها به دلیل طولانی بودن این نوع سازه در مناطق لرزه‌خیز اجتناب ناپذیر است و بنا به اهمیت تونل در حمل و نقل شهری و بین شهری و قرارگیری ایران در منطقه‌ای لرزه‌خیز، در این پژوهش اثرات اندرکنش تونل و گسلش نرمال بررسی خواهد شد.



شکل ۲- جعبه سانترفیوژ (a) تصویر گسلش نرمال؛ (b) مقطع دستگاه آزمایش (ابعاد به سانتی‌متر)

۳-۲- محدودیت‌های مدل‌سازی المان مجزا

در حالی که روش المان مجزا ابزار قدرتمندی برای تجزیه و تحلیل عددی در ژئومکانیک است، بیان و درک محدودیت‌های آن از اهمیت زیادی برخوردار است. محدودیت اصلی استفاده از این نرم‌افزار، مدل‌سازی تعداد زیاد ذرات که در حجم عظیمی از خاک موجود است؛ همچنین برای تحلیل عددی تعداد ذرات مشابه با واقعیت، به ابر رایانه‌ها و زمان بیش از حد انتظار نیاز است.

هر چه تعداد دیسک‌های در نظر گرفته شده بیشتر باشد، مدل‌سازی به شرایط واقعی نزدیک‌تر است، با این که دیسک بیشتر و سرعت لحاظ شده کمتر به دیواره‌ها، نتایجی نزدیک واقعیت ارائه می‌دهد، اما از لحاظ زمان، روشی بهینه محسوب نشده که این به نوبه‌ی خود مشکل اساسی تحلیل عددی المان مجزا است (O'Sullivan, et al., 2006).

۳-۲-۱- مدل‌سازی عددی به روش المان مجزا

مدل‌سازی در *PFC* به این صورت است که مواد مرکب شامل، گروهی از دانه‌های صلب را فراهم می‌کند که در محل تماسشان در تعامل هستند. این مواد مرکب شامل فضای

مناسب اختصاص داده شده برای مدل‌سازی دانه بندی خاک استفاده می‌شود. محاسبات در یک چرخه شبیه‌سازی *PFC2D* بین قانون دوم نیوتن (اعمال شده بر روی ذرات) و قانون نیرو-جابجایی (اعمال شده در تماس بین ذرات) در حال تغییر است (Coetzee & Els, 2009). این ذرات اجازه دارند تا در محل تماسشان هم‌پوشانی داشته باشند. تماس برشی در جهت تماس نرمال برای جلوگیری از نیروی کششی بین ذرات استفاده می‌شود، در حالی که تماس برشی در جهت مماسی به ذرات اجازه می‌دهد، زمانی که مقاومت اصطکاکی زیاد است (اصطکاک کولمب) نسبت به یکدیگر لغزش داشته باشند. قابل ذکر است که پارامترهای مدل می‌تواند به طریقی لحاظ شود که در جهت تماس نرمال مقداری کشش و همچنین در جهت تماس مماسی چسبندگی ایجاد شود.

یک تحلیل المان مجزا، تحلیل کوتاه یا دینامیکی است. در هر گام زمان‌بندی (*time step*) نیروی کلی بر هر ذره با توجه به نیروهای تماسی و نیروهای اعمالی به ذره تعیین می‌شود. سپس نیروهای حاصله برای محاسبه جابجایی تدریجی داخلی هر ذره برای هر گام استفاده می‌شود. همانطور که نیروهای تماس به محاسبه همپوشانی خیلی حساس هستند، هندسه تماس‌ها باید با دقت خیلی بالایی تعیین شوند.

نرم‌افزار *PFC^{2D} (V5.0)* نسخه ۵، یک نرم‌افزار شبیه‌ساز فیزیکی پیشرفته و سریع که از روش المان مجزا (*DEM*) استفاده می‌کند (*Itasca: PFC2D (3.1)* (Manual).

چانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ تحقیقاتی در زمینه ارزیابی پروفیل تغییر شکل سطح و گسترش مسیر گسیختگی زیر سطح زمین ناشی از گسلش معکوس تحت زاویه ۶۰ درجه در لایه‌های ماسه با استفاده از آزمایش‌های سانترفیوژ و شبیه‌سازی عددی *PFC^{2D}* انجام داده‌اند (شکل ۳). همچنین این پژوهش یک روش عددی به منظور کالیبراسیون پارامترهای میکرو مورد استفاده در این شبیه‌سازی ارائه داده است. آزمایش‌های سانترفیوژ در دانشگاه بین‌المللی تایوان انجام شده‌اند.

دانه یا دانه به دیوار) و در نقطه‌ای که نیروهای تماس اعمال می‌شود رخ می‌دهد. هر مدل تماس از سه قسمت تشکیل شده است:

- (۱) مدل تماس-سختی (*Contact-Stiffness Models*)
- (۲) مدل لغزش و جدایی (*Slip and Separation Models*)
- (۳) مدل متصل (*Bonding Models*). (*Itasca: PFC2D (3.1) Manual*)

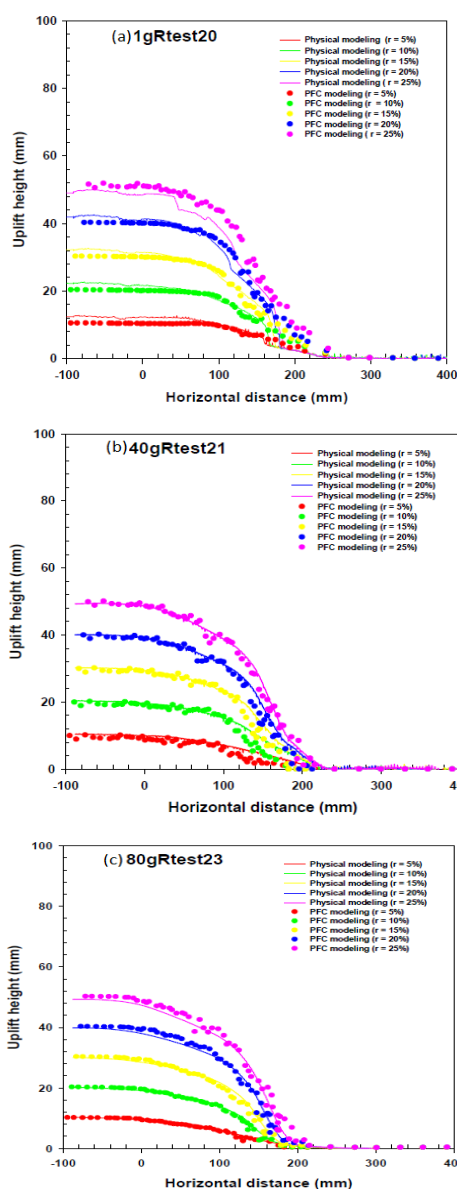
در این پژوهش تماس دانه به دانه خاک ماسه و همچنین تماس دانه با دیواره‌ها، توسط مدل لغزش و جدایی (*Slip and Separation*) و سپس تونل توسط مدل متصل، دانه‌های متصل و چسبیده (*parallel bonds*)، شبیه‌سازی می‌شود.

در مدل لغزش و جدایی که توسط پارامترهای سختی نرمال Kn ، سختی برشی KS و ضریب اصطکاک μ تعریف می‌شود، اگر دانه‌ها متصل نباشند و نیروی کششی بین آن‌ها وجود نداشته باشد، به دانه‌ها اجازه داده می‌شود تا نسبت به یکدیگر لغزش داشته باشند و جدا شوند. با توجه به دانه‌ای بودن خاک ماسه این مدل بهترین روش شبیه‌سازی اتصال بین دانه‌ها است.

دو مدل متصل مطابق با احتمالات فیزیکی وجود دارد: (۱) تماس متصل (*contact bonds*) اثر عمل چسبندگی را بر یک منطقه بسیار کوچک از نقطه تماس ایجاد می‌کند، در نتیجه اسم تماس نقطه متصل نامیده می‌شود (تماس متصل ساده) و (۲) اتصالات موازی (*parallel bonds*) اثر یک ماده اضافی را ایجاد می‌کند که بعد از تماس دانه‌ها به وجود می‌آید. برای شبیه‌سازی سیمان اغلب از مدل‌های متصل (اتصالات موازی *parallel bonds*) استفاده می‌شود. مجموعه‌های متصل ذرات در کنار یکدیگر نمایانگر موادی مانند بتن یا سنگ هستند

در این تحقیق شبیه‌سازی جعبه سانتریفیوژ توسط هفت دیوار صلب (*Wall1, Wall2, Wall3, Wall4, Wall5, Wall6, Wall7*) تعریف شده‌است. فقط دیوارهای ۱ و ۴ متحرک هستند که با زاویه ۶۰ درجه در طول صفحه گسیختگی از پیش تعیین شده با اعمال سرعت مناسب به سمت پایین حرکت می‌کنند. مشخصات فیزیکی مدل‌سازی و جانمایی تونل و همچنین تصویر هندسه و ابعاد جعبه ماسه در توده خاک در جدول ۱ و شکل ۴ و شکل ۵ آمده است.

وسیع میکروساختاری هستند و تنها بخش کوچکی از این فضا مورد بررسی قرار گرفته است. دستورات لازم به منظور مدل‌سازی در قالب یک مجموعه کامل از توابع *FISH* نوشته شده و توسط نرم‌افزار خوانده می‌شود (*Itasca: PFC2D (3.1) Manual*)

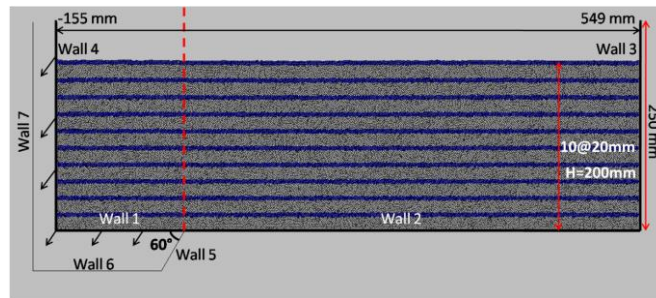


شکل ۳- مقایسه بین تغییر مکان‌های سطحی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های فیزیکی و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی *PFC2D* در شرایط $g = 1, 40, 80$ (Chang, al., 2013)

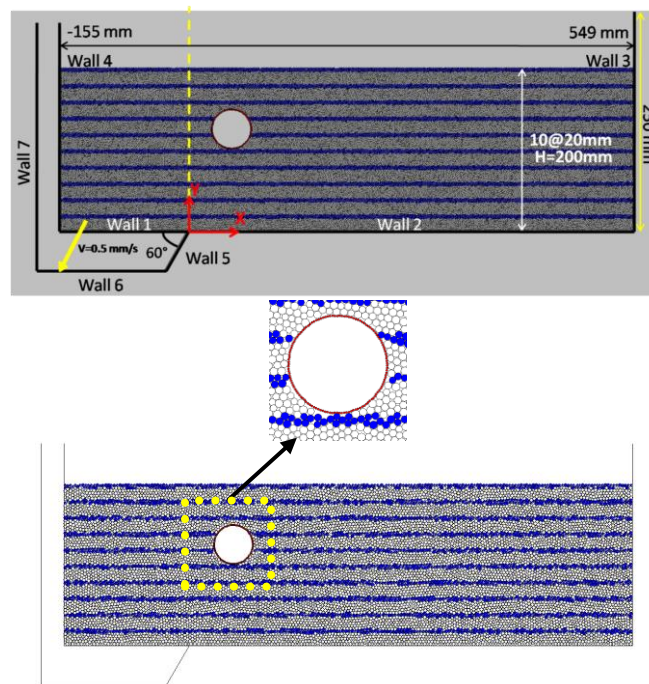
در *PFC2D*، هر تماس شامل دو بخش است (دانه به

جدول ۱- مشخصات فیزیکی تونل مدل‌سازی شده در نرم‌افزار PFC2D

شماره آزمایش	موقعیت تونل (cm)	قطر خارجی تونل (cm)	ضخامت تونل (cm)	تراکم خاک (درصد)
آزمایش ۱	-	-	-	۷۰
آزمایش ۲	$x=5/5$ $y=12/5$	$D=5/3$	$t=0/3$	۷۰
آزمایش ۳	$x=2/5$ $y=7/5$	$D=5/4$	$t=0/35$	۷۰



شکل ۴- تصویر هندسه و ابعاد جعبه ماسه مدل‌سازی شده در PFC2D



شکل ۵- تصویر هندسه و ابعاد جعبه ماسه مدل‌سازی شده در PFC2D با حضور تونل

(*al., 2013*) به دلیل تشابه در نوع خاک و دستگاه‌ها و مدل‌های سانتریفیوژ استفاده شده‌است. جدول ۲، پارامترهای مکانیکی استفاده شده خاک و تونل و همچنین جدول ۳، جدول ۴ و جدول ۵ پارامترهای ورودی در نرم‌افزار PFC^{2D} برای تعریف خصوصیات مواد را نشان می‌دهد.

قابل ذکر است که تمامی ابعاد استفاده شده مشابه با ابعاد در آزمایشگاه است و همچنین جنس تونل همانند واقعیت بتنی است. شرایط مرزی مناسبی برای نمونه در نظر گرفته شده است تا بتوان نشست‌ها را کنترل کرد. در این پژوهش از پارامترهای کالیبره شده در مقاله (*Chang, et*

جدول ۲- پارامترهای مکانیکی خاک و تونل

پارامترها	علامت اختصاری	مقادیر	واحد	درصد تراکم خاک
مدول یانگ (خاک)	E_s	۲۵	Mpa	-
مدول یانگ (بتن)	E_c	۲۵	Gpa	-
وزن واحد حجم (خاک)	γ_s	۱۵/۶۵	KN/m^3	۷۰
وزن واحد حجم (بتن)	γ_c	۲۴	KN/m^3	-
ضریب پواسن (خاک)	ν_s	۰/۳	-	-
ضریب پواسن (بتن)	ν_c	۰/۲۸	-	-
زاویه اصطکاک	ϕ	۳۶	$Degree$	-
زاویه اتساع	Ψ	۷	$Degree$	-
تنش تسلیم چسبندگی	C	۰/۵	kPa	-
ضریب اصطکاک (خاک-تونل)	μ	۰/۳۵	-	-

جدول ۳- پارامترهای خاک مدل شده در نرم‌افزار PFC2D

ضریب اصطکاک بین دیسک‌ها	چگالی (kg/m^3)	سختی برشی $K_s (N/m)$	سختی نرمال $K_n (N/m)$
۱/۱	۱۸۵۰	$۱۰^۷ \times ۰/۳$	$۱۰^۷ \times ۱$

جدول ۴- پارامترهای دیوار مدل شده در نرم‌افزار PFC2D

سختی برشی $K_s (N/m)$	سختی نرمال $K_n (N/m)$
$۱۰^۷ \times ۶$	$۱۰^۷ \times ۶$

جدول ۵- پارامترهای تونل مدل شده در نرم‌افزار PFC2D

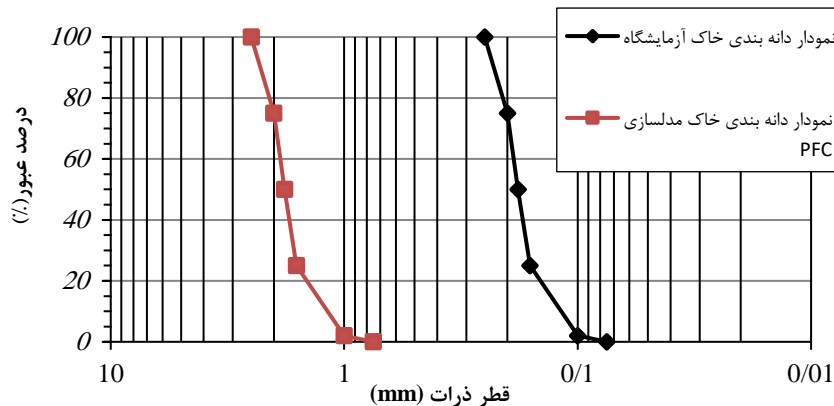
پارامتر	اصطلاح انگلیسی	مقادیر	واحد
مقاومت برشی باند موازی	$bond\ shear\ strength\ (cl_pbsparallel)$	$۱۰^۵ \times ۵$	N/m
مقاومت نرمال باند موازی	$strength\ (cl_pbn)\ parallel\ bond\ normal$	$۱۰^۵ \times ۵$	N/m
سختی نرمال باند موازی	$stiffness\ (cl_pbkn)\ parallel\ bond\ normal$	$۱۰^۷ \times ۱$	N/m
سختی برشی باند موازی	$stiffness\ (cl_pbks)\ parallel\ bond\ shear$	$۱۰^۷ \times ۱$	N/m
سختی نرمال ذره	$(cl_kn)\ particle\ normal\ stiffness$	$۱۰^۷ \times ۱$	N/m
سختی برشی ذره	$(cl_ks)\ particle\ normal\ stiffness$	$۱۰^۷ \times ۱$	N/m
مقاومت نرمال باند تماسی	$normal\ strength\ (cl_nb)\ contact\ bond$	$۱۰^۵ \times ۵$	-
مقاومت برشی باند تماسی	$contact\ bond\ shear\ strength\ (cl_sb)$	$۱۰^۵ \times ۵$	-
ضریب اصطکاک بین ذرات	$coefficient\ (cl_fric)\ particle\ friction$	۰/۷۵	-
چگالی ذره	$particle\ density\ (cl_dens)$	۲۴۰۰	kg/m^3

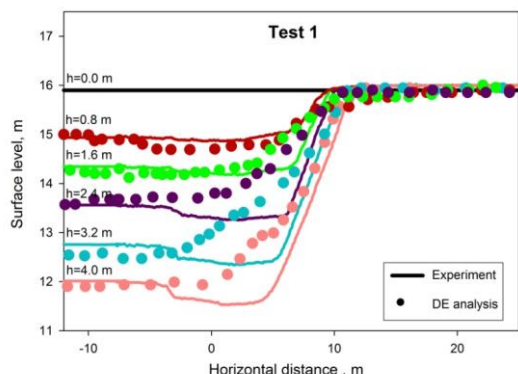
شکل مقدار $D50=0/18$ ، $D75=0/2$ و $D25=0/16$ است. در شبیه‌سازی PFC2D از ۱۲،۳۴۴ دیسک دایره‌ای با دامنه قطر ۱/۶ تا ۲ میلی‌متر استفاده شده است. به منظور تحلیل

شکل ۶، نمودار توزیع ابعاد دانه‌های ماسه‌ای استفاده شده در آزمایش‌های سانتیفریوژ و همچنین ابعاد دانه‌های استفاده شده در این مدل‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به

صحيح، مخصوصاً در مورد عرض ناحیه برشی، تعداد کم دانه‌ها ناحیه برشی بیشتری را نشان می‌دهد. (Jiang, et al., 2011). با انتخاب مقادیر حداکثر و حداقل یک بازه، نرم‌افزار به‌صورت خودکار تمام اعداد آن بازه را به‌عنوان شعاع به‌صورت تصادفی انتخاب کرده و از ایجاد یک محیط مصنوعی جلوگیری می‌کند که دارای شعاع محدود است.

صحيح این مدل‌سازی مقادیر حداکثر و حداقل قطر، تقریباً حدود ۱۰ برابر مقادیر $D75$ و $D25$ انتخاب شده‌اند که در این حالت نمودار توزیع اندازه دیسک‌های دایره‌ای به موازات نمودار توزیع دانه بندی ماسه آزمایشگاهی است؛ در حالیکه اغلب تحقیقات اخیر از متوسط دانه‌بندی بزرگتر و تعداد دانه‌های کمتری استفاده کرده‌اند. برای دستیابی به اطلاعات





شکل ۸- مقایسه پروفیل جابجایی قائم سطح خاک در ۶ مرحله جابجایی در حالت زمین آزاد- تراکم نسبی ۷۰ درصد، مقایسه مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل عددی المان مجزا

۴-۲- بررسی مدل‌سازی عددی اندرکنش تونل و

گسلش نرمال - تراکم نسبی ۷۰ درصد

۴-۲-۱- بررسی مسیر گسلش

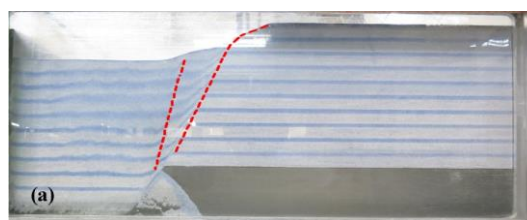
بعد از صحت‌سنجی نرم‌افزار المان مجزا با نتایج آزمایشگاهی در زمین آزاد، بررسی اثر حضور تونل در پدیده‌ی گسلش نرمال در این نرم‌افزار انجام شد. آزمایش ۲ در این قسمت مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به جدول ۱، تونل در موقعیت (۵/۵)۲/۵ سانتی‌متر جانمایی شده‌است. همانطور که در حالت بدون تونل بررسی شده بود، این نرم‌افزار توانایی پیش‌بینی مسیر گسیختگی و عرض ناحیه برشی را به خوبی دارد. شکل ۹ (b) مسیر گسیختگی در نرم‌افزار المان مجزا نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که نتایج مطالعات مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی نیز در این مدل‌سازی همگونی مناسبی دارد.

مسیر تشکیل شده در سمت چپ تونل و همچنین آشفتگی‌های بوجود آمده در بالای تونل سطحی در نرم‌افزار المان مجزا با ایجاد بی‌نظمی در دیسک‌ها به وضوح نشان داده شده است.

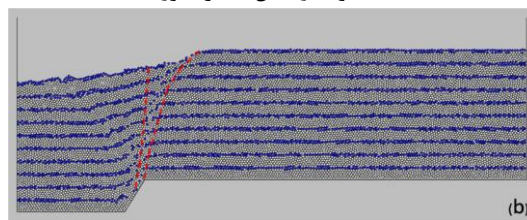
۴-۲-۲- بررسی تغییر مکان سطحی خاک

بررسی‌ها نشان داد که تحلیل عددی المان مجزا به‌دلیل داشتن محیط دانه‌ای و غیر پیوسته، در پیش‌بینی محل رخنمون گسل، شیب سطح خاک جایجا شده و مسیر جابجایی سطحی خاک تطابق قابل‌قبولی با آزمایش‌های

شکل ۷ (b)، مشاهده می‌شود، مسیر پیش‌بینی شده در نرم‌افزار المان مجزا با تصاویر به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی در تطابق خوبی بوده و می‌توان صحت توانایی این نرم‌افزار را در پیش‌بینی مسیر گسلش و ناحیه برشی در حالت بدون تونل تأیید کرد. البته به نظر می‌رسد، یک مسیر اضافه در فرادیواره ایجاد شده که ناشی از شرایط مرزی و دیواره فرادیواره است که منجر به ایجاد بی‌نظمی در این قسمت فرادیواره شده است و به عبارت دیگر مسیر گسیختگی نمی‌باشد.



(a) نمونه آزمایش سانتریفیوژ



(b) مدل‌سازی المان مجزا

شکل ۷- مقایسه پیش‌بینی مسیر گسلش در جابه‌جایی ۴ متر سنگ بستر در زمین آزاد - تراکم نسبی ۷۰ درصد

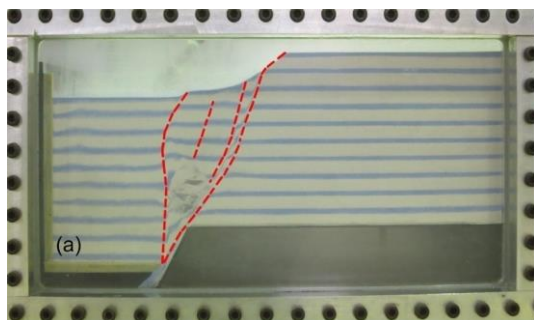
۴-۱-۲- بررسی تغییر مکان سطحی خاک

به‌منظور بررسی تغییرات سطح خاک، پروفیل سطحی خاک در سطوح متفاوت جابه‌جایی رسم شده است. شکل ۸، نتایج حاصل از تحلیل عددی المان مجزا و آزمایش‌های آزمایشگاهی را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که نرم‌افزار *PFC* محل رخنمون گسل در سطح زمین و تغییر مکان‌های سطحی خاک را علی‌الخصوص در محل ریزش خاک (جایی از سطح خاک که شیب زیادی دارد) نسبتاً خوب پیش‌بینی کرده، می‌توان ادعان داشت، این مهم به‌دلیل یکسان بودن محیط نرم‌افزار *PFC*^{2D} با محیط خاک است. اندک اختلاف موجود به علت انتخاب سرعت بالا است که به‌دلیل زمان‌بر شدن تحلیل کامپیوتری استفاده از سرعتی مشابه با سرعت آزمایش‌های آزمایشگاهی میسر نمی‌باشد.

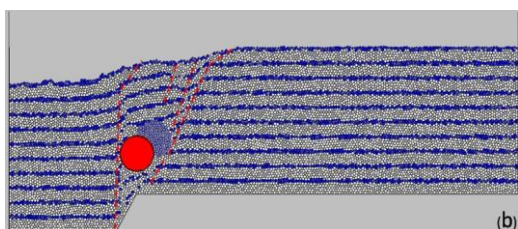
۴-۲- بررسی مدل‌سازی عددی اندرکنش تونل و گسلش نرمال-اثر عمق و صلبیت

در این بخش اثر عمق و صلبیت تونل بررسی می‌شود، تونل در عمقی بیشتر از حالت قبل قرار گرفته به عبارتی دیگر سربار بیشتری را متحمل شده و همچنین ضخامت تونل بیشتر شده است. با توجه به جدول ۱، تونل در موقعیت (۲/۵ و ۷/۵) سانتی‌متر جانمایی شده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش قبل و نتایج مشاهده شده، این مطالعه عددی پیش‌بینی رضایت بخشی در مورد مسیر گسیختگی و عرض ناحیه برشی داشته است. شکل ۱۱، (a) و در این آزمایش مسیر ایجاد شده در بالای تونل در نرم‌افزار المان مجزا شکل ۱۱ (b) به صورت اندکی آشفتگی در ترتیب دیسک‌ها قابل مشاهده است.



شکل ۱۱ (a) نمونه آزمایش سانتی‌متری

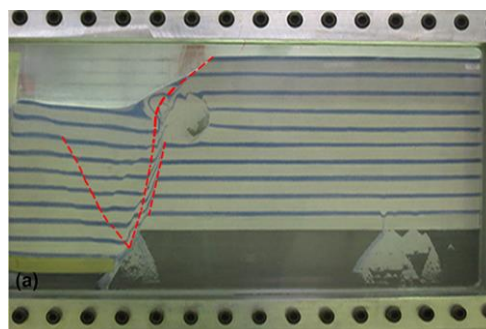


شکل ۱۱ (b) مدل‌سازی المان مجزا

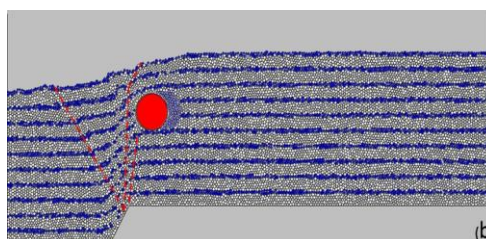
شکل ۱۱- مقایسه پیش‌بینی مسیر گسلش در جابه‌جایی ۴ متر (۵ سانتی‌متر در آزمایش) سنگ بستر با حضور تونل عمیق - تراکم نسبی ۷۰ درصد

با توجه به شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که تغییر مکان‌های سطحی پیش‌بینی شده برای ۴/۲۵ سانتی‌متر جابه‌جایی در نرم‌افزار المان مجزا (شکل ۱۲) به نتایج حاصل از آزمایش‌های سانتی‌متری نزدیک است و باز هم در این مدل‌سازی سرعت بالای حرکت دیواره منجر به اختلاف

آزمایشگاهی داشته است و اختلاف جزئی موجود بنا به دلایلی است که در توضیحات قبل شرح داده شد. (شکل ۱۰).

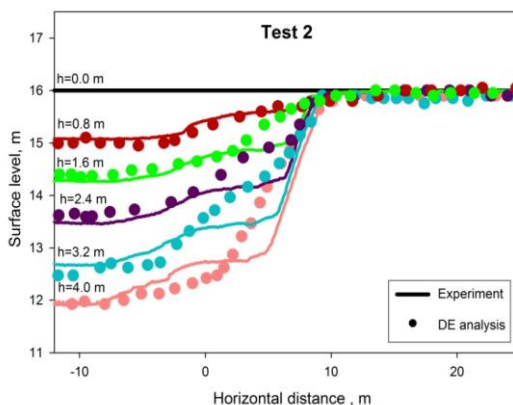


شکل ۱۰ (a) نمونه آزمایش سانتی‌متری



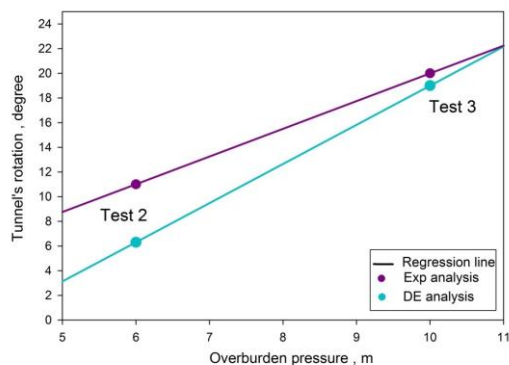
شکل ۱۰ (b) مدل‌سازی المان مجزا

شکل ۹- مقایسه پیش‌بینی مسیر گسلش در جابه‌جایی ۴ متر سنگ بستر با حضور تونل سطحی - تراکم نسبی ۷۰ درصد



شکل ۱۰- مقایسه پروفیل جابه‌جایی قائم سطح خاک در ۶ مرحله جابه‌جایی در حالت با حضور تونل سطحی - تراکم نسبی ۷۰ درصد. مقایسه مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل عددی المان مجزا

دوران تونل عمیق حدوداً سه برابر دوران تونل سطحی هنگام پدیده گسلش است. این بدین معناست که تونل‌های ژرف و نزدیک به مرکز گسلش بیشتر از تونل‌های سطحی در معرض خطر قرار دارند.



شکل ۱۳- مقایسه چرخش تونل در مدل‌سازی آزمایشگاهی و مدل‌سازی المان مجزا PFC^{2D}

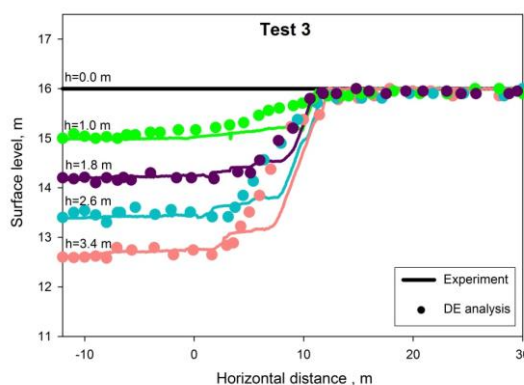
۵- نتایج تحقیق

از طریق تجزیه و تحلیل عددی با استفاده از روش المان مجزا (DEM)، مسیر گسیختگی و تغییر مکان‌های سطحی ناشی از جابجایی قائم فرادیواره در گسلش مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور مدل‌سازی عددی یک زمین آزاد و مدل‌سازی با حضور تونل به جهت بررسی اندرکنش تونل و گسلش انجام شده است.

تونل‌ها باعث شدند، گسیختگی گسل زلزله از مسیرهای مشاهده شده در آزمایشات زمین آزاد دور شود و همچنین صفحات گسیختگی اضافی ایجاد شود (مشابه آزمایش‌های گسل معکوس انجام شده توسط محققان دیگر (Baziar, et al., 2014, 2016 and 2020)

علی‌رغم اینکه آزمایشات بیشتری باید انجام شود برای بررسی اینکه آیا انحراف ناشی از حضور تونل بوده است، مسیرهای گسیختگی پیش‌بینی شده در این روش مدل‌سازی به خوبی با مسیرهای به‌دست آمده از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی تطابق داشته و همچنین تغییر مکان‌های سطحی پیش‌بینی شده، ناشی از سطوح مختلف جابجایی فرادیواره در مدل‌سازی عددی المان مجزا به واقعیت آزمایشگاهی نزدیک است، به دلیل آن که نرم‌افزار المان مجزا محیطی مشابه با محیط طبیعی خاک داشته و

جزئی در پیش‌بینی تغییر مکان‌های سطحی شده است. سرعت بالای دیواره‌ها منجر می‌شود که دیسک‌هایی که نزدیک به سطح هستند، فرصت کافی برای لغزیدن روی یکدیگر را نداشته و شیب سطحی حاصله با آزمایش‌های آزمایشگاهی اندکی اختلاف داشته باشد، در صورتی که لایه‌های مجاور تونل که به مرکز گسلش نزدیکتر هستند، به خوبی تغییر مکان داده‌اند و شیب مناسبی را ایجاد کرده‌اند. قابل ذکر است که تلاش شده با اندکی افزایش ضریب اصطکاک بین دیسک‌ها، مشکل شیب سطحی جبران شود، اما مشاهده می‌شود که اثر سرعت دیواره‌ها در این نرم‌افزار چشم گیر بوده و استفاده از سرعت مناسب مهمترین عامل رسیدن به نتایج مطلوب است.



شکل ۱۴- مقایسه پروفیل جابه‌جایی قائم سطح خاک در ۵ مرحله جابه‌جایی در حالت با حضور تونل عمیق- تراکم مسبی ۷۰ درصد. مقایسه مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل عددی المان مجزا

۴-۳- بررسی چرخش تونل در خاک

در این بخش تغییر مکان و همچنین چرخش‌های اندازه‌گیری شده تونل در حالت عددی و آزمایشگاهی را با یکدیگر مقایسه و در شکل ۱۳، نشان داده شده است. هر دو مدل‌سازی چرخشی را در تونل پیش‌بینی می‌کنند، اما مدل‌سازی آزمایشگاهی چرخش اندکی بیشتر را نسبت به مدل‌سازی المان مجزا برای تونل در هنگام گسلش نرمال در شرایط مشابه پیش‌بینی می‌نماید. در حقیقت مدل‌سازی المان مجزا به علت داشتن فضای دانه‌ای و غیرپیوسته می‌تواند روند تخمین نزدیکی به نمونه آزمایشگاهی داشته باشد. به هر حال روند چرخش تونل با افزایش عمق افزایشی است و

گسلش قرار می‌گیرد و علاوه بر خود تونل سازه‌های سطحی نیز در معرض آسیب هستند. از اینرو، در صورت عدم آگاهی نسبت به محل دقیق خط گسل، می‌بایست محدوده‌ای از جانمایی‌های گوناگون گسل در طراحی مد نظر قرار گیرد. همچنین جابجایی تونل در جهت پادساعتگرد بوده است، به عبارت دیگر موافق با حرکت جابجایی سنگ بستر است. نهایتاً، با توجه به مشاهدات و نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها می‌توان اذعان داشت، علی‌رغم عدم دسترسی به ابر کامپیوتر که منجر به انتخاب دانه‌های کمتر، مدل‌سازی با هندسه و ابعاد نمونه آزمایشگاه و همچنین سرعت بیشتر فرادیواره شده است، شبیه‌سازی اندرکنش تونل و گسلش در نرم‌افزار المان مجزا در مجموع نتایج مناسب و قابل قبولی ارائه می‌دهد.

ریزش خاک در سمت فرادیواره را بهتر شبیه‌سازی می‌کند. چرخش تونل که از مدل‌سازی عددی المان مجزا و مدل‌سازی آزمایشگاهی به دست آمده است، با یکدیگر در توافق هستند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که سربار بیشتر بر تونل منجر به چرخش بیشتر شده، اما صلبیت بیشتر منجر به تغییر مکان بیشتر تونل نمی‌شود، به عبارتی تونل‌های ژرف، بیشتر در معرض تخریب و چرخش هستند. حضور تونل‌های با عمق کم، سطح بیشتری از زمین را دست‌خوش تغییرات کرده و به زبان ساده‌تر، سطح بیشتری از زمین نسبت به حالت زمین آزاد دچار تغییر شکل شده و همین‌طور ناحیه برشی (*shear zone*) تشکیل شده زیر سطح زمین گسترش می‌یابد، این بدین معناست که سطح بیشتری تحت تاثیر

۶- مراجع

- Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M. F., Davies, M. C., Nahas, A. EI. (2007). Fault Rupture Propagation through Sand: Finite-Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 8.
- Anastasopoulos, I., Gerolymos, N., Drosos, V., Georgarakos, T., Kourkoulis, R., Gazetas, G. (2008). Behavior of deep immersed tunnel under combined by normal fault rupture deformation and subsequent seismic shaking. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 213–239
- Baziar, M. H., Nabizadeh, A., Khalafian, N., Lee, C.J., Hung, W. Y. (2020). Evaluation of reverse faulting effects on the mechanical response of tunnel lining using centrifuge tests and numerical analysis. *Géotechnique*, 70 (6), 490-502.
- Baziar, M. H., Nabizadeh A., Jabbari M. (2012). Evaluation of Fault– foundation interaction using numerical studies, 15th World Conference on Earthquake Engineering.
- Baziar, M. H., Nabizadeh A., Lee CJ, Hung W. Y. (2014). Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 65 (2014) 151–164.
- Baziar, M. H., Nabizadeh A., Jabbari M. (2015). Numerical modeling of interaction between dip slip fault and shallow foundation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 13, pp. 1613-1632.
- Baziar, M. H., Nabizadeh A., Mehrabi R, Lee CJ and Hung WY. (2016). Evaluation of underground tunnel response to reverse fault rupture using numerical approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 83: 1-17.
- Cundall, P. A., Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29, No. 1, 47-65.
- Chang, Y.Y., Lee, C.J. Huang, W.C., Huang, W.J., Lin, M.L., Hung, W.Y., Lin, Y. H. (2013). Use of

- Centrifuge Experiments and Discrete Element Analysis to Model the Reverse Fault Slip. *International Journal of Civil Engineering* 11(2):79-89.
- Ghadimi Chermahini, A., Tahghighi, H. (2019). Numerical finite element analysis of underground tunnel crossing an active reverse fault: a case study on the Sabzkouh segmental tunnel. *Geomechanics and Geoengineering*. 14(3):155-166.
- Ghadimi Chermahini, A. (2016). Finite element analysis of tunnels behavior due to reverse fault displacement. Thesis(MSc). University of Kashan, Iran
- Itasca: PFC2D (3.1) Manual, Itasca Consulting Group, USA.
- Johansson J., Konagai K. (2007). Fault induced permanent ground deformations: Experimental verification of wet and dry soil, numerical findings' relation to field observations of tunnel damage and implications for design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27:938-956.
- Konagai, K., Johansson, J. (2006). Fault induced permanent ground deformations and experimental comparison of wet and dry soil and implications for buried structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 45-53.
- Konagai, K. (2005). Data archives of seismic fault induced damage. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25, 559-570.
- Lin, M. L., Chung, C. F., Jeng, F. S. (2007). The deformation of the overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels. *Engineering Geology*, 92, 110-132.
- Loli, M., Bransby, M. F., Anastasopoulos, I., Gazetas, G. (2012). Interaction of caisson foundations with a seismically rupturing normal fault: centrifuge testing versus numerical simulation. *Geotechnique* 62, No. 1, 29-43.
- O'Sullivan, C., Bray, J. D., Cui, L. (2006). Experimental Validation of Particle-Based Discrete Element Methods. *Géotechnique* 56 (7), 455-468.
- Tahghighi, H. and Hajnoruzi, M.M. (2017). Finite element analysis of buried pipelines crossing reverse fault. *Modares Civil Engineering Journal*, Volume 17 , Number 2; Page(s) 67 To 79.
- Towhata, I. (2008). *Geotechnical earthquake engineering*. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering.
- Wang, W.L., Wang, T. T., SU, J. J., Lin, C. H., Seng, C. R., Huang, T. H. (2001). Assessment of damage in mountain tunnels due to Taiwan Chi-Chi earthquake. *Tunneling and Underground Space Technology*. 16: 133-150.
- Yimsiri S. and Soga K. (2000). Micromechanics-based stress-strain behavior of soils at small strains, *Geotechnique*, 50(1), 559-571.

Numerical modeling of interaction between tunnel and normal faulting in sandy soil

S. Bahmani¹; A. Nabizaheh²

1- School of Civil Engineering; Iran University of Science and Technology, Tehran,
bahmani.geo@gmail.com

2- Assistant Professor; School of Civil Engineering, Shahid Rajae Teacher Training University, Tehran,
ali.nabizadeh@sru.ac.ir

Received: 6 Dec 2020; Accepted: 22 Aug 2021

DOR: 20.1001.1.23223111.1399.9.4.3.2

Keywords

Normal faulting
Tunnel
Discrete element modeling
Centrifuge modeling

Extended Abstract

Summary

In the present paper, an investigation is made on the propagation characteristics of the fault rupture and the behavior of the tunnel exposed to the fault displacements in order to increase the performance of earthquake-resistant structures. In this study, the effect of the presence or absence of the tunnel in

the normal fault rupture propagation has been modeled by discrete element method (DEM). In addition, in order to validate the numerical studies performed in this research, the results have been compared with a series of centrifuge experiments results conducted at NCU centrifuge laboratory. The results indicate that the presence of the tunnel has changed the direction of the fault rupture, and also, the shear zone in the surface and subsurface of the soil layer has widely been spread.

Introduction

The main objective of the study is to provide an understanding into the shear zone and ground deformation taking place in sand with the presence of a tunnel in the faulting zone. The paper begins with an explanation on the construction of the soil model using the DEM. The research continues with validation and comparison of the DEM simulations using centrifuge results to gain a better understanding of this numerical modeling in order to replace laboratory tests.

Methodology and Approaches

The DEM is a suitable numerical method for defining the mechanical behavior of spheres and integrated disks in which the particle-to-particle contact interaction is controlled and the particle motion is modeled particle by particle. In PFC modeling, the composite material consists of a group of rigid grains that interact at their point of contact. The process of the modeling and the problem solving in the PFC^{2D} involve in several steps that are accomplished by using appropriate Fish functions.

Results and Conclusions

The results of this research indicate that the presence of the tunnel has changed the direction of the fault rupture, and also, the shear zone in the surface and subsurface of the soil layer have widely been widely spread with the presence of the tunnel. A comparison between numerical studies and centrifugal experiments shows that the interaction between faulting and tunnel depends on the tunnel overhead pressure, tunnel stiffness, tunnel position relative to the fault tip and soil mechanical parameters. It also shows the deviation of the faulting path, the surface displacements and the increase of the risk of normal faulting on the surface structures.
