

## An investigation of the Effects of Dip-Slip Fault Ruptures on Tunnel Damages and Remedial Measures for Damage Risk Reduction

Mojbaba Moosavi, Mohammad Kazem Jafari

Assistant Professor, Geotechnical Engineering Research Center

moosavi@iiees.ac.ir

Professor, Geotechnical Engineering Research Center

jafari@iiees.ac.ir

Hamid Tohidifar

One of the main problems for tunnels during earthquakes is the induced ground movements resulting from earthquake faulting. This forced displacement could cause the failure of the tunnels' lining and eventually blockage of the inner space of the tunnel. Because of the critical role of tunnels in supporting humans' life and transportation of the relief forces in the moments after the extreme earthquakes, they should be opened during these events. Therefore, in the design of these structures, the effects of extra forces due to the fault rupture, in addition to the seismic transient stresses, should be considered. An investigation on the literature of the tunnel-fault interaction has shown that there is a lack in the discernment of the behavior of the tunnel during the interaction with the reverse-faulting zone. Hence, the effects of this type of earthquake faulting on the behavior of alluvial tunnels have been investigated in this research project, Figure (1).

The methodology of the research in this project is divided into two sections, (i) experimentally laboratory works with geotechnical centrifuge (Figure 2-a), and (ii) numerical analyses. The type of the tunnels was continuous with cast-in-situ reinforced concrete lining where excavated in the granular alluvium.

In the laboratory works, first, a dip-slip fault simulator split-box, Figure (2-b) has been designed and constructed for the geotechnical centrifuge facility of the International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIIES). Using this split-box, three reverse-faulting centrifuge tests have been accomplished on the small-scaled model tunnels. Moreover, a 2 Tons electric crane for lifting and transportation of this heavy split-box has been designed and constructed. For monitoring of the soil and tunnel's inside deformations during the spinning of the centrifuge, the Digital Image Correlation (DIC) technique and inside Wi-Fi camera have been applied, respectively.

In the numerical modeling section, a finite-difference code has been written to analyze tunnels or pipelines against the reverse, normal, or strike-slip faulting, Figure (3), example results of numerical analysis). This finite-difference code

## بررسی اثر گسلش شیب-لغز بر خرابی تونل ها و ارائه تمهیدات عملی برای پیشگیری از خرابی آنها

سید مجتبی موسوی، محمد کاظم جعفری

استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک moosavi@iiees.ac.ir

استاد پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک jafari@iiees.ac.ir

حمید توحیدیفر

یکی از مشکلات به وجود آمده برای تونل ها در هنگام وقوع زلزله، جابه جایی های القایی ناشی از پدیده گسلش سطحی بر آنهاست که عملکرد آنها را با مشکل مواجه می سازد. تغییر شکل های اجباری زمین در این شرایط موجب گسیختگی و مسدود شدن تونل ها شده و در شرایط بحرانی پس از زلزله که می بایست این دست از تونل ها در حال سرویس دهی به نیروهای امدادی، انتقال تجهیزات پزشکی و کمک به تخلیه انسان ها به مکان های امن باشند، از سرویس دهی خارج می شوند. اگرچه به طور معمول در طراحی تونل ها اثر نیروهای حاصل از انتشار امواج زمین لرزه در نظر گرفته می شود، ولی بررسی تونل های آسیب دیده در برابر جابجایی گسل ها نشان داده است که عموماً این نوع جابه جایی ها در طرح این تونل ها در نظر گرفته نشده اند. بررسی ادبیات فنی موجود روی اثر گسلش سطحی بر تونل ها نشان می دهد که پژوهش های اندکی در این زمینه وجود دارد و از این لحاظ بررسی اندرکنش تونل و گسلش در شرایط مختلف بسیار حائز اهمیت است. از این رو، اثر گسلش شیب-لغز معکوس بر تونل های واقع در آبرفت در این پروژه پژوهشی بررسی شده است شکل (۱).

روش تحقیق در انجام این پروژه پژوهشی مشتمل بر فعالیت های آزمایشگاهی شکل (۲-الف) و عددی بوده است. این فعالیت ها برای بررسی تونل های ترافیکی در برابر اثرات جابه جایی گسلش معکوس انجام شده اند. بر اساس فرضیات در نظر گرفته شده در این پژوهش، تونل های مورد بحث دارای پوشش بتن مسلح درجا ریز بوده و در آبرفت حفاری شده اند.

در بخش فعالیت های آزمایشگاهی، در ابتدا یک جعبه گسلش ۲ قسمتی برای مدل سازی گسل های شیب-لغز طراحی و ساخته شده است، شکل (۲-ب). سپس با استفاده از این جعبه ۳ آزمایش گسلش معکوس روی تونل های مدل انجام شده است. همچنین، یک جرثقیل الکتریکی با ظرفیت ۲ تن برای برداشتن و انتقال جعبه سنگین گسلش روی سبد سانتریفیوژ طراحی و ساخته شده است. برای بررسی تغییر شکل های خاک و نیز درون تونل مدفون حین چرخش دستگاه سانتریفیوژ، به ترتیب از روش پردازش تصاویر دیجیتالی و استفاده از دوربین wifi مینیاتوری بهره گرفته شده است.

در بخش تحقیقات عددی، یک کد تفاضل محدود برای بررسی رفتار انواع تونل ها در برابر گسلش معکوس نوشته شده است (نمونه ای از نتایج این کد در شکل (۳) ارائه شده است). این کد تفاضل محدود قابلیت در نظر گرفتن اثرات برش در تونل (بر اساس تیر تیموشنکو)، رفتار الاستوپلاستیک برای بتن، فولاد و خاک و نیز در نظر گرفتن اثرات غیرخطی شدن هندسی را دارد.

در این پژوهش، مطالعات عددی جامعی با قطره های مختلف تونل

has the ability to consider the Timoshenko beam equations in solving the problems. The benefit of the Timoshenko beam theory rather than the Euler-Bernoulli beam theory is the capability to consider the shear effects in addition to the bending effects. The shear effects are important in the evaluation of the behavior of Tunnels. Moreover, the written code could consider the nonlinear behavior of concrete, steel reinforcement, and soil materials.

Comprehensive numerical analysis with different tunnel diameters (i.e., 3, 6, 8, 10, 12, and 15m), three different burial depths, four different tunnel thicknesses, and three different fault zone widths have been performed. Results have shown that depending on the soil-tunnel relative stiffness and the width of the fault rupture zone, the failure mode of the tunnels could either be in axial-bending or shear condition. The bigger the fault zone width, the bigger the required displacement for tunnel failure. By increasing the burial depth of the tunnel, smaller fault displacement would be needed for failure due to the higher confining stresses. In the short length tunnels, the lining behavior is more prone to be rigid, while in the long tunnel, the behavior is more flexible (similar to the piles' theory). For bigger tunnel diameters, the lower fault displacement is required for the lining failure.

Results of the 3403 numerical models of the tunnel and fault interaction have led to the extraction of a practical graph for tunnel engineers. This graph shows the required amount of the fault displacements necessary to bring the tunnel to the failure state, Figure (4). The type of failure, i.e., axial-bending or shear failure is also attainable using this graph. Moreover, one of the significant advantages of this graph is considering different parameters, such as the fault zone width, tunnel diameters, and the soil and tunnel's stiffnesses in one plot altogether.

The results of the centrifuge tests have shown that there is a shielding effect in the soil due to the presence of the tunnels. This effect prevents the propagation of the shear bands to the ground surface. Therefore, the fault scarp fades at a specific distance from the surface projection of the location of the embedded tunnel. The presence of the tunnel inside the soil and the geometrical locations of the flexible joints relative to the bedrock fault line, altogether, may cause the formation of the tensile cracks on the ground surface. This phenomenon is critical for the buried pipelines that are sensitive to the tensile strains.

To prevent tunnel failure during the fault offset and to reduce the probability of the tunnel collapse, the employment of the flexible joints has been investigated in this project, Figure (5). The numerical models, Figure (5-a) and centrifuge tests, Figure (5-b) have shown that the amount of the gap in the flexible joints should be such that during the reverse fault offset, the collision of the consecutive tunnel segments in a

(یعنی، ۳، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، و ۱۵ متر)، سه عمق مدفون مختلف، چهار ضخامت پوشش تونل مختلف، و سه عرض ناحیه گسلش متفاوت انجام شده است. نتایج این تحلیل‌ها نشان داده است که بسته به سختی نسبی خاک-تونل و عرض ناحیه گسلش، مود گسیختگی تونل می‌تواند به یکی از دو صورت محوری-خمشی و یا برشی باشد. هرچه عرض ناحیه گسلش بیشتر باشد، میزان جابه‌جایی مورد نیاز برای گسیختگی تونل نیز بیشتر است. اما با افزایش عمق مدفون تونل، به دلیل افزایش فشار همه‌جانبه خاک، جابه‌جایی کمتری برای شکست تونل نیاز خواهد بود. رفتار تونل‌های کوتاه‌تر بیشتر تمایل به رفتار تیرهای صلب دارد، در حالی که برای تونل‌های طولی این رفتار به صورت انعطاف‌پذیر است (همانند نظریه رفتار شمع‌ها). برای تونل‌های با قطر بیشتر، جابه‌جایی گسیختگی کمتری مورد نیاز است. با استفاده از نتایج ۳۴۰۳ تحلیل عددی مختلف روی حالات مختلف اندرکنش تونل‌ها و خاک، یک گراف کاربردی برای مهندسين تونل استخراج شده است. این گراف، مقدار جابه‌جایی اعمالی از سمت گسل را که موجب آغاز شکست در پوشش تونل می‌شود را نشان می‌دهد، شکل (۴). تعیین مود گسیختگی تونل نیز توسط این گراف امکان‌پذیر است. یکی از مزایای مهم این گراف، در نظر گرفتن تمام پارامترهای مختلف مانند عرض ناحیه گسلش، قطر تونل، و سختی خاک و تونل به همراه هم در برآورد میزان جابه‌جایی گسیختگی تونل است. نتایج آزمایشات سانتریفیوژ نشان داده است که وجود تونل در ناحیه گسلش از انتشار باندهای برشی تا سطح زمین جلوگیری کرده و موجب محو شدن ناحیه اسکارپ (افراز) گسلی در سطح زمین می‌شود. این پدیده که اثر سپری نام دارد جابه‌جایی‌ها و تغییرشکل‌های سطح زمین را متأثر می‌نماید. همچنین، وجود تونل در داخل آبرفت و چیدمان هندسی درزهای انعطاف‌پذیر آن نسبت به مکان گسل سنگ بستر می‌تواند باعث شکل‌گیری ترک‌های کششی در سطح زمین شود. این ترک‌ها برای لوله‌های مدفون در عمق اندکی از سطح زمین که نسبت به کرنش‌های کششی حساس هستند، بسیار خطرناک است.

به منظور پیشگیری از خرابی تونل‌ها در هنگام حرکت گسل و برای کاهش احتمال فروریزش آنها، استفاده از مفهوم درزهای انعطاف‌پذیر در این پروژه پژوهشی مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۵). مدل‌های عددی (شکل ۵-الف) و تست‌های سانتریفیوژ (شکل ۵-ب) نشان دادند که مقدار فاصله آزاد در نظر گرفته شده در درزهای انعطاف‌پذیر باید به گونه‌ای باشد که در اثر جابه‌جایی گسلش معکوس، این فاصله آزاد بسته نشود و قطعات مجاور هم به یکدیگر برخورد نکنند. درزهای انعطاف‌پذیر همچنین باید دارای مقداری سختی باشند تا از دوران و حرکت آزاد قطعات تونل در محل درزها جلوگیری شده و یک پله‌شدگی در این مکان‌ها اتفاق نیافتد.

در این پروژه پژوهشی، یک فیوز ویژه از جنس مقطع فولادی توخالی (Hollow Section Steel) برای قرارگیری در درزهای انعطاف‌پذیر طراحی شده است (شکل ۵-الف). مشخصات اساسی برای طراحی این فیوز بر اساس یافته‌های ارائه شده در پاراگراف قبلی بنا شده است. این درز مخصوص قابلیت حفظ عملکرد تونل را پس از جابه‌جایی گسلش دارد. از ترکیب این فیوز با بتن الیاف فولادی که در پوشش تونل استفاده خواهد شد، ریسک فروریزش تونل به نحو قابل توجهی کاهش می‌یابد. برای مثال، در

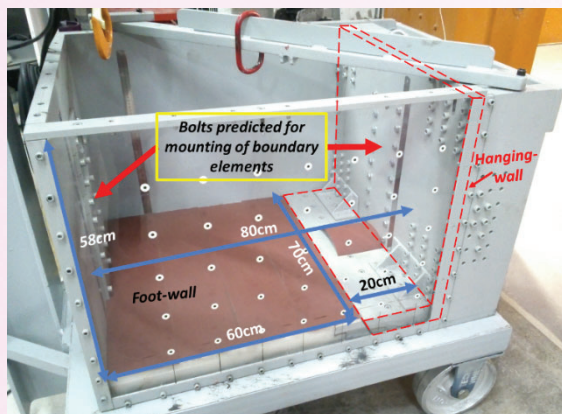


common joint can be prevented. The flexible joint should also prohibit the formation of differential vertical step-like displacements at the location of each joint. In this regard, the flexible joint itself should have some degree of stiffness.

A special Hollow Section Steel (HSS) fuse for placement in the flexible joints has been designed in this research project (Figure 5-a). The fundamental specifications of these HSS fuses were in accordance with the suggestions proposed in the last paragraph. This particular joint could maintain the tunnel's performance after large fault displacements. The combination of this countermeasure method with Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) for the lining effectively reduces the risk of the collapse of the tunnel. For a sample jointed tunnel with 11 segments, 12 HSS fuses in-between, and SFRC for lining, 1m of fault displacement could not lead to the collapse (Figure 6-a). In contrast, a similar continuous tunnel under 18cm fault movements has experienced the failure conditions (Figure 3).

Other methods for reducing the hazard of tunnel failure are the increase of the reinforcement content inside the tunnel lining and injection of the compressible materials, like geofoam, in the surrounding soil of the tunnel. Numerical analyses in this research project have shown that the optimum longitudinal reinforcement content in continuous tunnels is  $\rho_s = 6\%$ . Moreover, geofoam injection could reduce the surface faulting's destructive effects on the tunnels by decreasing the soil induced shear forces on the lining. Figure (6-b) shows that in a segmented tunnel with HSS flexible joints, injection of the geofoam material reduced the compressive strains by about 80% compared to the similar tunnel but without injection.

**Keywords:** Tunnel, Reverse faulting, Damage, Centrifuge tests, Numerical modelling

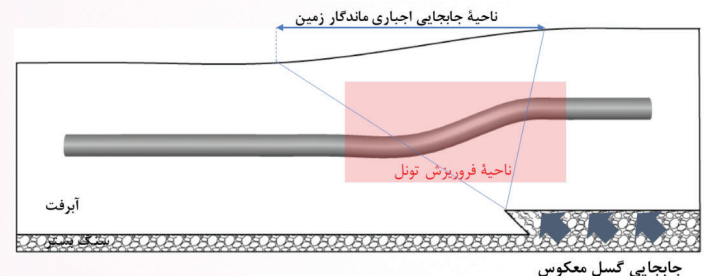


(ب)

یک تونل با ۱۱ قطعه طولی و ۱۲ فیوز HSS عرضی، و نیز بکارگیری بتن الیاف فولادی در پوشش، تحت ۱ متر جابه‌جایی قائم از گسلش معکوس، فروریزش اتفاق نیافتاده است، شکل (۶-الف). این در حالی است که برای یک تونل مشابه ولی به صورت پیوسته که پیش از این در شکل (۳) ارائه شد، تحت ۱۸ سانتی‌متر جابه‌جایی گسل خرابی رخ داده بود.

سایر روش‌های مورد بررسی در این پژوهش برای کاهش خطر گسیختگی تونل عبارت از افزایش درصد آماتورهای طولی تونل و تزریق مواد با فشردگی‌پذیری بالا، مانند ژئوفوم، در خاک اطراف تونل است. تحلیل‌های عددی انجام شده در این پژوهش نشان داده‌اند که مقدار بهینه درصد آماتور طولی برای کاهش صدمات وارده، ۶٪ است. همچنین، تزریق ژئوفوم در خاک پشت تونل می‌تواند باعث کاهش صدمات وارد بر تونل در اثر کاهش نیروهای برشی وارد بر پوشش تونل شود. شکل (۶-ب) نشان می‌دهد که در یک تونل قطعه‌ای با درزهای انعطاف‌پذیر HSS، تزریق ژئوفوم موجب کاهش ۸۰٪ در کرنش‌های فشاری نسبت به حالت تونل مشابه بدون تزریق شکل (۶-الف) شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تونل، گسلش، خرابی، آزمایش سانتریفیوژ، مدلسازی عددی

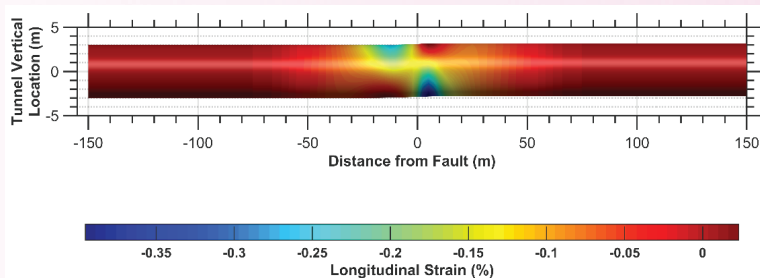
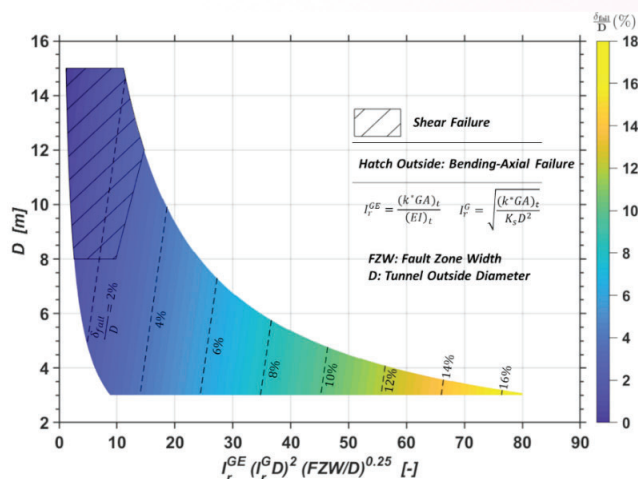


شکل (۱): تعریف مسأله اندرکنش یک تونل حفر شده در آبرفت با جابه‌جایی اجباری ناشی از گسلش معکوس



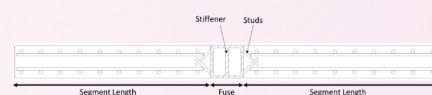
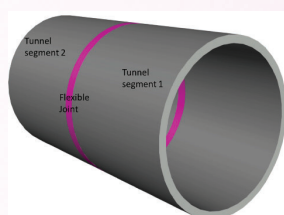
(الف)

شکل (۲): (الف) دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیک پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در آزمایشگاه پیشرفته مدلسازی فیزیکی، (ب) جعبه گسلش ساخته شده در این پروژه برای قرارگیری در سبد دستگاه سانتریفیوژ



شکل (۳): نمونه‌ای از نتایج مدل‌سازی عددی با روش ارائه شده در این پروژه پژوهشی. طیف کرنش طولی در امتداد یک تونل پیوسته با قطر ۶م و عمق مدفون ۱۰م تحت جابه‌جایی قائم ۱۸cm از یک گسلش معکوس ۶۰ درجه ارائه شده است

شکل (۴): گراف ارائه شده برای تخمین جابه‌جایی گسل مورد نیاز که موجب آغاز فاز گسیختگی تونل می‌شود (از روی ۳۴۰۳ تحلیل عددی)

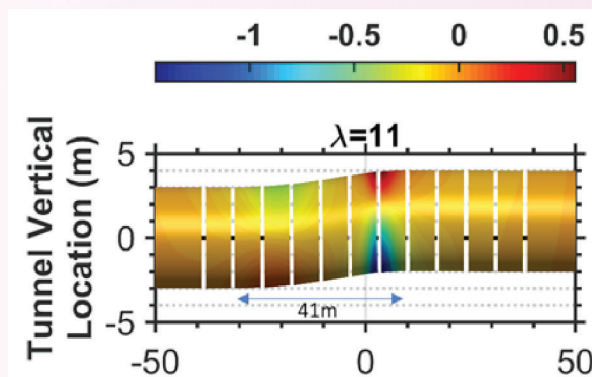
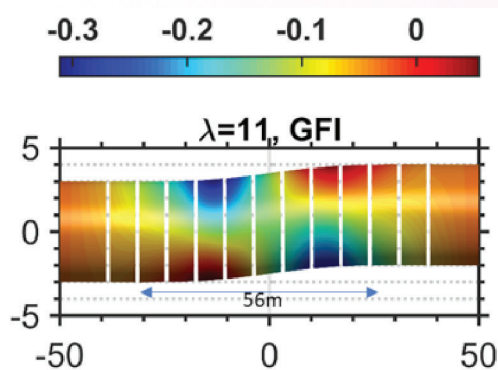


Flexible joint details in numerical analysis

(ب)

(الف)

شکل (۵): استفاده از درز انعطاف‌پذیر برای تطبیق جابه‌جایی تونل با حرکت زمین و کاهش صدمات وارد بر پوشش آن، (الف) در تحلیل عددی، (ب) در مدل‌سازی فیزیکی با سانتریفیوژ



(ب)

(الف)

شکل (۶): توزیع کرنش‌های طولی در امتداد یک تونل قطعه‌ای، (الف) ۱۱ قطعه و ۱۲ درز HSS با بتن الیافی در پوشش، (ب) ۱۱ قطعه و ۱۲ درز HSS با بتن الیافی در پوشش و ژئوفوم تزریق شده در خاک پشت پوشش تونل