

## АНАЛИЗА ПОНАШАЊА СИДАРА У СИДРИШНОЈ ЗОНИ УСЛЕД ДЕЈСТВА ЗЕМЉОТРЕСА

Александар Прокић<sup>1</sup>  
Наташа Мрђа<sup>2</sup>  
Елефтерија Златановић<sup>3</sup>

УДК: 624.137.6:624.042.7

DOI: 10.14415/konferencijaGFS2014.121

**Резиме:** У раду је приказан утицај дејства земљотреса у сидришној зони, код тунелских конструкција ојачаних експанзионим сидрима. Решења су добијена на основу претпоставки да се ради о дубоко положеном, кружном тунелу у хомогеној и изотропној стенској маси. При моделирању је претпостављено равно стање деформација и еластичне особине стенске масе. Анализиран је утицај земљотреса на померања котве експанзионог сидра, у првом случају без садејства стенске масе и тела сидра, а у другом случају са моделираним контактом који симулира садејство тј. трење.

**Кључне речи:** Тунел, експанзиона сидра, земљотрес, стенска маса, нумеричко решење

### 1. УВОД

Подземне конструкције спадају међу најсигурније конструкције у условима земљотреса. Ова констатација се базира првенствено на подацима о оштећењима које су подземне конструкције претрпеле у прошлости услед дејства земљотреса.

Подземне конструкције поседују особине које их, гледано са аспекта сеизмике, веома разликују у односу на површинске конструкције. То се пре свега односи на чињеницу да се комплетна конструкција налази унутар стенске масе, и да ове конструкције имају изражену једну димензију, односно велику дужину у односу на димензије попречног пресека. Стога се сеизмичко пројектовање подземних конструкција разликује у односу на површинске конструкције, и потребна су даља истраживања како би се унапредило разумевање сеизмичког одговора и метода асеизмичког пројектовања подземних конструкција.

<sup>1</sup> Prof. dr Aleksandar Prokić, dipl.inž. građ., University of Novi Sad, Faculty of Civil Eng. Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: ++381 24 554 300, e – mail: [aprokic@EUnet.rs](mailto:aprokic@EUnet.rs)

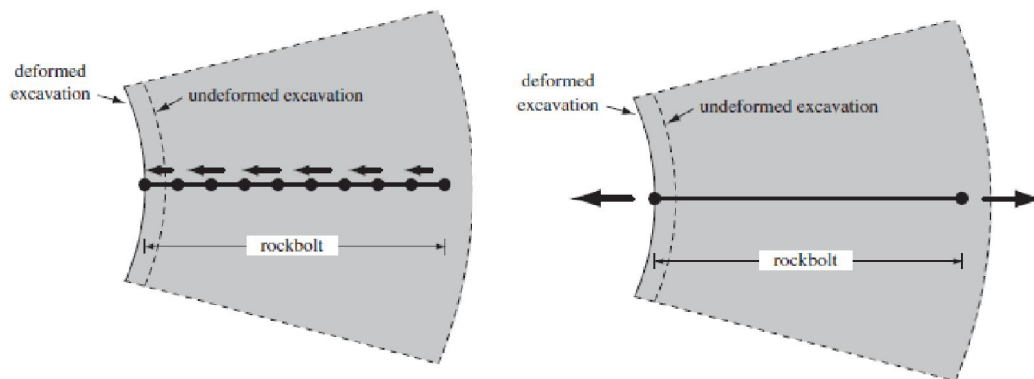
<sup>2</sup> Nataša Mrda, PhD student, University of Novi Sad, Faculty of Civil Eng. Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: ++381 24 554 300, e – mail: [mnatasa@agfbl.org](mailto:mnatasa@agfbl.org)

<sup>3</sup> Asistent Elefterija Zlatanović, dipl.inž. građ., Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, Niš, Srbija, tel: ++381 18 588 200, e – mail: [elefterija2006@yahoo.com](mailto:elefterija2006@yahoo.com)

У овом раду разматра се одговор подземне конструкције ојачане сидрима на утицај земљотреса. Сидрење представља метод ојачања стенске масе. Под ојачањем подразумевамо поступак побољшања механичких карактеристика стенске масе, на тај начин да се у стенску масу, уметањем структуралних елемената по обиму тунела, вештачки унесу унутрашње силе чији правац и интензитет се бира тако да мења напонску слику у одређеној зони око тунелског отвора.

На основу начина на који сидро преноси оптерећење на стенску масу, разликује се:

- Континуално механички (СМС), или преко трења (СФС) спојена сидра са стенском масом – атхезиона сидра
- Дискретно механички или преко трења спојена сидра са стенском масом – експанзиона сидра (DMFC) [3].



Слика 1 – Шема СМС/СФС (лево) и DMFC сидара (десно)  
Figure 1 – Schematics of CMC/CFC (left) and DMFC rockbolts (right)

Пренос оптерећења код атхезионог сидра се врши целом дужином сидра, док се код експанзионих сидара пренос оптерећења врши само на једном, малом делу обима, на најудаљенијем делу сидра од тунелског отвора. Уградња сидара у стенску масу полази од идеје да када се стенска маса почне померати ка отвору, сидро трпи напоне затезања (под претпоставком да је сидришна зона у стабилном делу стенске масе), који се у стенску масу преносе као напони притиска, и самим тим придржавају стенску масу. Уколико се ради о преднапрегнутим сидрима, у стенску масу се у почетној фази уносе напони притиска као последица напона затезања у сидру.

Сидра која су са стенском масом повезана само преко котве на крају сидра и главе сидра на слободној површини стене (DMFC) су услед померања тла оптерећена само преко тих делова, те је и њихово понашање при оптерећењу независно од околног тла. За разлику од овог типа сидара, СМС/СФС су сидра која су континуално спојена са стенском масом (трењем преко омотача) и понашају се као арматура, па се њихово понашање не може посматрати независно од стенске масе [3].

Предност коришћења сидара, у односу на неке друге методе, је у томе што се могу веома једноставно прилагодити потребама ојачања стенске масе, на пример у случају нестабилних блокова стенске масе користе се *локална ојачања* сидрима само једног дела обима ископа тунела на местима нестабилних блокова. Уколико се деформације јављају на целој повшини ископа тунела потребно је користити *генерална или систематична ојачања*, односно сидра се постављају на целом обиму тунела.

У овом раду разматрају се померања тачака тунела при дејству земљотреса. Померања су испитивана за DMFC сидра. Претпостављено је да је аксијална крутост сидра много већа од крутости сидра на смицање што је омогућило да се сидро може третирати као идеализован једнодимензионални елемент [3]. Ова претпоставка претпоставка има оправдања само уколико у стенској маси нема дисконтинуитета, односно уколико имамо континуално поље померања.

У досадашњој литератури је много више пажње посвећено сидрима повезаним са стенском масом трењем преко омотача, док сидра везана на крају (експанзиона сидра) нису толико често испитивана, иако могу имати предности, као што је омогућавање иницијалног преднапрезања околне стене.

При моделирању сидара, укотвљених на једном месту, потребно је обратити пажњу на детаље, посебно на места на којима је сидро повезано са околним тлом. У неком од програмских пакета, при изради модела и прорачуну, омогућена је поједностављена веза сидара са тлом, као што је симулација везе преко константе опруге [2].

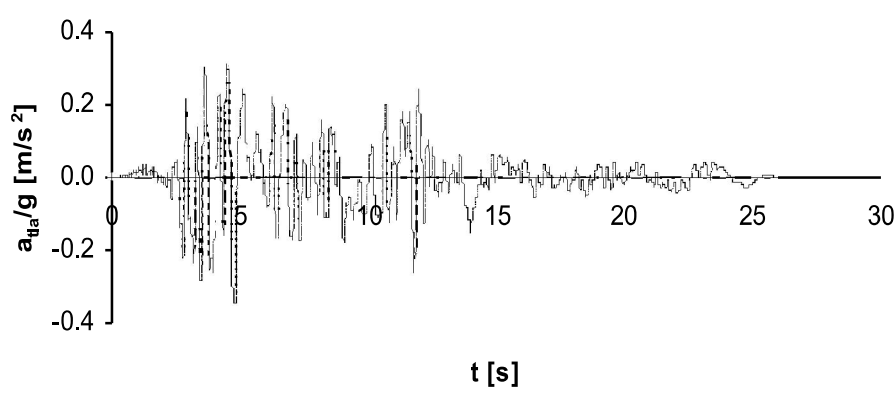
У овом раду анализирана је сидришна зона дубоко положених тунела са преднапрегнутим сидрима уз следеће претпоставке:

- Еластично понашање стенске масе и сидара;
- Кружни попречни пресек тунела;
- За дубоко положени тунел: занемарује се тежина тла изнад тунела, уколико се тунел налази на дубини бар три пута већој од пречника тунела [2];
- Анализа дводимензионалног проблема – равно стање деформација.
- Не постоји могућности кидања сидра при дејству оптерећења.

## 2. НУМЕРИЧКИ ПРОРАЧУН ПОМЕРАЊА

У наредним примерима анализирана су експанзиона сидра изложена дејству земљотреса *Düzce*, магнитуде 7.2, који је погодио Турску 12.11.1999. године. Акцелерограм земљотреса приказан је на слици 2.

Резултати који су анализирани добијени су коришћењем програмског пакета ABAQUS. ABAQUS 6.7 је комерцијални MKE софтверски пакет развијен од стране Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc. Састављен је од низа инжењерских програма заснованих на методу коначних елемената, и омогућава решавање многих проблема, од једноставних до веома сложених.



*Slika 2 – Akcelerogram zemljotresa Düzce*  
*Figure 2 – Düzce earthquake accelerogram*

Због претпоставке о равном стању деформација усвојен је 2D модел, при чему је анализиран попречни пресек тунела са сидрима и околним тлом. Овакав модел је усвојен из разлога што се деформације тунела, услед гравитационог оптерећења тла [5], дешавају управо у овој равни. Приликом моделирања у ABAQUS-у усвојени су дводимензионални плочасти коначни елементи. Плоча је напрегнута у својој равни, те су стога и анализирани случајеви деловања земљотреса на тунел у равни попречног пресека.

Приликом дискретизације, за тло и слој прсканог бетона је коришћен STRI3 коначни елемент, који припада породици елемената који се користе за анализу равнoг стања деформација, док је за сидро коришћен двочворни линеарни гредни елемент B31 [1].

Обзиром на St. Venant-ов принцип по коме утицаји који настају при формирању отвора нагло опадају са повећањем растојања од тунела, модел бесконачне плоче може се заменити са моделом плоче коначних димензија. У овом раду усвојена је ширина и висина плоче величине 5 пречника тунелског отвора, под претпоставком да ће се граница зоне поремећених напона простирати до двоструке вредности ширине отвора [5]. Пошто се анализира сидришна зона дубоко положеног тунела, занемарује се тежина тла изнад тунела.

У примерима је анализирана линеарно еластична, хомогена и изотропна стенска маса, за коју је веза између напона и деформација дефинисана са константама еластичности:

Poisson-овим коефицијентом  $\nu = 0.2$ , Young-овим модулом еластичности  $E = 500 \text{ MPa}$ , угао унутрашњег трења стенске масе је  $\phi^p = \phi^r = 30^\circ$ , вршна и резидуална чврстоћа  $c^p = c^r = 0.1 \text{ MPa}$ .

Анализирани су тунели кружног попречног пресека, при чему је извршена анализа једног сидра и његове околине до пола распона између сидара са једне и са друге стране.

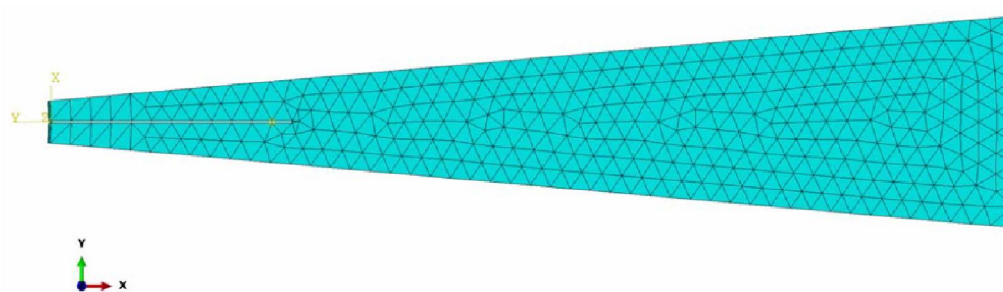
Усвојене су следеће димензије тунела и карактеристике сидра:

- Полупречник тунелског отвора  $r_0 = 3m$ , дужина сидра  $L = 3m$ , пречник сидра  $d_s = 25mm$ , модул еластичности сидра  $E_s = 210MPa$ , Poisson-ов коефицијент челика  $\nu_s = 0.3$ , дебљина прсканог бетона  $3cm$ .

Од излазних параметара анализирана су померања на крају сидра, при чему су са U1 означена померања у правцу глобалне осе X док су са U2 означена померања у правцу глобалне осе Y.

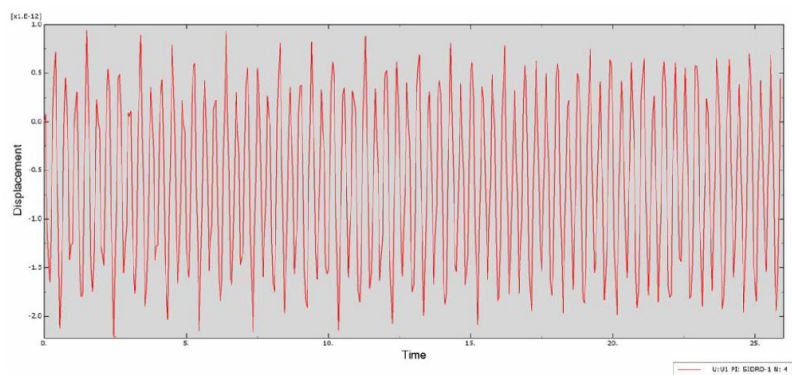
## 2.1. Пример 1.

У овом примеру је анализирано експанзионо сидро укотвљено на свом крају у околну стенску масу и прскани бетон. Сидро је преднапрегнуто силом  $P = 177kN$ , где је утицај који се на околну стенску масу преноси преко подложне плоче, услед преднапрезања, моделирано као притисак на стенску масу. На другом крају, сила притиска апроксимирана је расподељеним оптерећењем по унутрашњој контури тунелског отвора,  $p = 338.2kN/m^2$ . Разматрају се утицаји од земљотреса чији је правац деловања у правцу осе сидра, управно на правац осе сидра и под углом од  $45^\circ$ . Сидра се налазе на растојањима од  $10^\circ$  по контури отвора. Дужина сидрења износи  $d_s = 25cm$ , и ова деоница моделирана је као укљештен крај сидра. Сидро је повезано са стенском масом на два места, преко котве и главе сидра док је тело сидра неповезано са стенском масом.

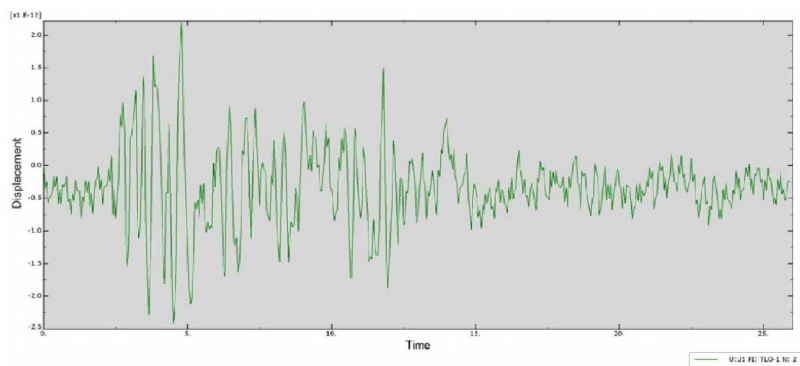


Слика 3 – Модел сидра са околном стенском масом, мрежа коначних елемената  
Figure 3 – Model of rockbolt with ground surrounding it, mesh of finite elements

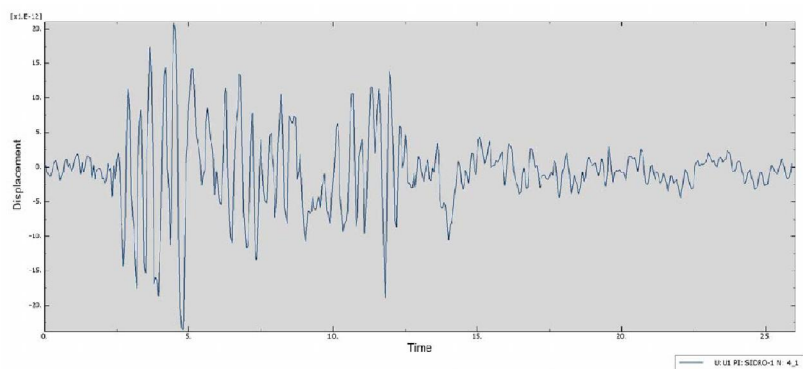
Вредности померања (displacement) на наредним дијаграмима дате су у метрима, док је време (time) изражено у секундама. Због обима рада приказује се само померање U1.



Слика 4 – Померања  $U1$  на крају сидра услед земљотреса у правцу осе сидра  
 Figure 4 – Displacements  $U1$  at the end of the rockbolt due to an earthquake in the direction of the axis of rockbolt



Слика 5 – Померања  $U1$  на крају сидра услед земљотреса у правцу  $Y$  осе  
 Figure 5 – Displacements  $U1$  at the end of the rockbolt due to an earthquake in the direction of the  $Y$  axis

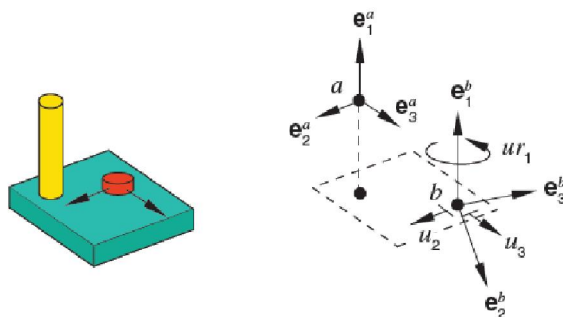


Слика 6 – Померања  $U1$  на крају сидра услед земљотреса под углом од 45 степени у односу на  $X$  осу  
 Figure 6 – Displacements  $U1$  at the end of the rockbolt due to an earthquake at a 45 degree angle to the  $X$  axis

## 2.2. Пример 2

У претходном примеру, разматран је случај када између стенске масе и тела сидра нема трења. Међутим, приликом утицаја земљотреса, неминовно је да ће тело сидра доћи у контакт са стенском масом. Да би се овакво стање реално приказало, потребно је у модел стенске масе са сидром унети и утицај трења при контакту тела сидра са стенском масом. У литератури овај проблем је решаван на различите начине, а један од најчешћих је када се тело сидра моделира као опруга, о чему је већ било речи. У овом раду, приказани су резултати другачијих приступа овом проблему, преко модела којима се врши симулација трења тела сидра о тло.

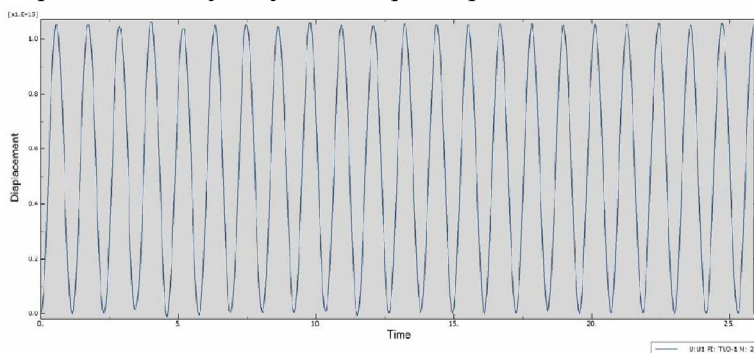
Да би тело сидра имало садејство са сенском масом, на одређеном броју места је повезано са околном стенском масом, тако што су везе моделиране елементима који се у ABAQUS-овој библиотеци називају конектори. Из библиотеке конектора изабрани су елементи типа PLANAR приказани на слици 7 код кога су омогућена померања у правцу  $U_2$  и  $U_3$  и обртање око осе 1,  $Ur_1$ , док су спречени степени слободе померања у правцу локалне осе  $x - U_1$ , те обртања око локалних оса 2 и 3 односно  $Ur_2$  и  $Ur_3$ . Силе веза у равни 2-3 су дефинисане као силе трења, због чега је овај елемент погодан за моделирање трења између тела сидра и стенске масе.



Слика 7 – Конектор типа PLANAR (слика преузета из[1])

Figure 7 – Connector element PLANAR (image taken from [1])

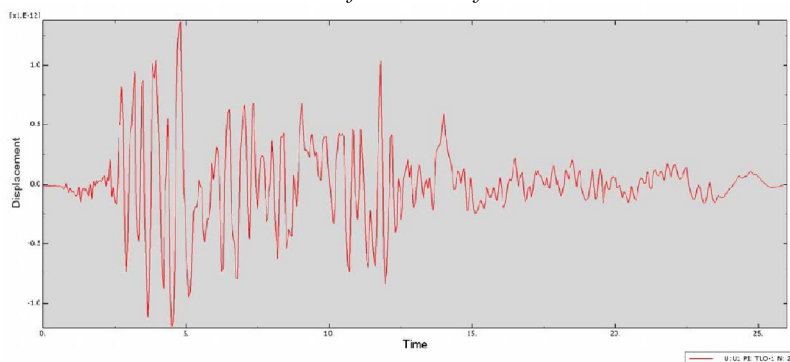
На наредним дијаграмима приказана су померања за утицај земљотреса за модел са истим карактеристикама као у претходном примеру, при чему једину разлику праве конектор елементи којима је моделирано трење.



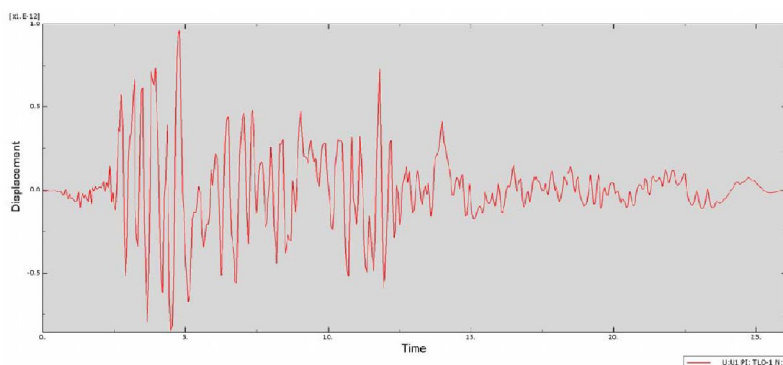
Слика 8 – Померања  $U_1$  на крају сидра услед земљотреса у правцу осе сидра



Figure 8 – Displacements  $U1$  at the end of the rockbolt due to an earthquake in the direction of the axis of rockbolt



Слика 9 – Померања  $U1$  на крају сидра услед земљотреса у правцу  $Y$  осе  
Figure 9 – Displacements  $U1$  at the end of the rockbolt due to an earthquake in the direction of the  $Y$  axis



Слика 10 – Померања  $U1$  на крају сидра услед земљотреса под углом од 45 степени у односу на  $X$  осу  
Figure 10 – Displacements  $U1$  at the end of the rockbolt due to an earthquake at a 45 degree angle to the  $X$  axis

### 3. ЗАКЉУЧАК

Анализом урађених примера се види да се померања анкера изазвана дејством земљотреса разликују зависно од типа анкера и правца деловања земљотреса, па се може закључити да ће се и напонска стања у анкеру и околној стени у тим случајевима разликовати, што ће бити задатак даљих испитивања.



**ЗАХВАЛНОСТ**

Аутор рада се захваљује на подршци Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у оквиру научно–истраживачког пројекта ТР36043 (2011–2014) и ТР36028 (2011-2014).

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] ABAQUS: *Finite Element Program*, from Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc. 1080 Main Street, Pawtucket, RI, USA. **2005**.
- [2] ABAQUS: *Theory manual.version 6.7*. Dassault systems, **2007**.
- [3] Bobet, A.: A Simple Method for Analysis of Point Anchored Rockbolts in Circular Tunnels in Elastic Ground, *Rock Mech. and Rock Eng.* **2005.**, 39 (4), pp. 315 – 338.
- [4] Bobet, A., Einstein, H.H.: Tunnel reinforcement with rockbolts, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **2011.**, 26 (2011), pp. 100-123.
- [5] Bobet, A.: Elastic solution for deep tunnels. application to excavation damage zone and rockbolt support. *Rock Mech. and Rock Eng.* **2009.** 42 (2), pp.147–174.
- [6] Brady, B.H.G., Brown, E.T.: *Rock Mechanics for Underground Mining*, 3rd ed. Kluwer Academy Publishers, Dordrecht, The Netherlands, **2004**.
- [7] <http://peer.berkeley.edu>
- [8] Carranza-Torres, C.: Analytical and numerical study of the mechanics of rockbolt reinforcement around tunnels in rock masses. *Rock Mech. and Rock Eng.* **2009.**, 42 (2), pp. 175–228.
- [9] Chen, S.-H., Qiang, S., Chen, S.-F., Egger, P.: Composite element model of the fully grouted rock bolt. *Rock Mech. and Rock Eng.* **2004.**, 37 (3), pp. 193–212.
- [10] Li, C.: *Analytical study of the behavior of rock bolts*. In: Girard, Liebman, Breeds, Doe (Eds.), *Pacific Rocks 2000*. Balkema, The Netherlands, **2000**.

## **THE ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF ROCKBOLTS UNDER THE EARTHQUAKE**

**Summary:** *This paper presents a numerical examination of the behavior of rockbolts under the earthquake when tunnel construction is reinforced with point–anchored rockbolts. The solution is based on the assumption of a deep, circular tunnel surrounded with a homogeneous and isotropic rock. Plane strain condition and elastic response of rock are also assumed. A model of point–anchored rockbolt exposed to seismic activity is presented, and displacements of the rockbolt at the distal point of the rockbolt from the tunnel perimeter are analyzed. In the first case, displacements of rockbolts without contact of rockbolts body and rock are analyzed, and in the second case the contact is modeled to simulate friction.*

**Keywords:** *Tunnel, expansion anchors, earthquake, elastic rock, numerical solution*