

Primljen / Received: 11.4.2023.

Ispravljen / Corrected: 19.6.2023.

Prihvaćen / Accepted: 4.8.2023.

Dostupno online / Available online: 10.11.2023.

Tehnologija kontroliranog miniranja kumulativnim nabojem za izradu dubokih podzemnih tunela

Autori:

¹Dr.sc. **Junlin Lv**, dipl.ing.građ.JLLv_sdtbu@163.com

Autor za korespondenciju

¹Dr.sc. **Binbin Zheng**, dipl.ing.građ.348392802@qq.com¹Dr.sc. **Zhen Liu**, dipl.ing.građ.201913693@sdtbu.edu.cn²Dr.sc. **Junhong Huang**, dipl.ing.građ.junhonghuang@whut.edu.cn

¹ Tehnološko i poslovno sveučilište Shandong, Kina
Fakultet za menadžment i tehnička i
tehnološka zanimanja

² Tehnološko sveučilište Wuhan, Kina
Fakultet za resurse i inženjerstvo okoliša

Prethodno priopćenje

Junlin Lv, Binbin Zheng, Zhen Liu, Junhong Huang

Tehnologija kontroliranog miniranja kumulativnim nabojem za izradu dubokih podzemnih tunela

S brzim razvojem gospodarstva i društva značajno je porasla potražnja za mineralnim sirovinama i energijom. Međutim, teško je poboljšati učinkovitost miniranja i kontrolirati stabilnost okolnih stijena tijekom izrade konstrukcija u dubokom podzemlju. U ovom je radu kao tehnička osnova upotrijebljen duboki podzemni tunel reverzibilne hidroelektrane Tianchi u Kini. Na temelju stanja preraspodjele naprezanja okolnih stijena nakon iskopa miniranjem, teorijskim analizama, numeričkim simulacijama i in situ ispitivanjima istraženi su učinci širenja pukotina i dinamički odziv okolne stijene na temelju različitih metoda miniranja. Provedena je analiza mehanizma usmjerenoga stvaranja pukotina s obzirom na utjecaj razmaka bušotina i in situ naprezanja. Pokazalo se da početno naprezanje tla potiče širenje pukotina pri miniranju u konturnoj bušotini nastalo glatkim miniranjem u smjeru pravca minske bušotine. Rezultati testiranja pokazali su da je primjenom kontroliranih metoda miniranja kumulativnim nabojem podzemnih tunela moguće povećati stopu iskorištenosti eksploziva, smanjiti vibracije pri miniranju i postići značajan učinak na usmjereno formiranje pukotina. Rezultati istraživanja od velike su važnosti za građevinarstvo jer mogu dovesti do poboljšanja tehnologije miniranja, učinka stvaranja kontura miniranjem i kontrole stabilnosti okolne stijene.

Ključne riječi:

izgradnja tunela, kontrolirano miniranje, usmjereni lom, oštećenje okolne stijene, širenje pukotine

Research Paper

Junlin Lv, Binbin Zheng, Zhen Liu, Junhong Huang

Controlled shaped-charge blasting technology for deep underground tunnel engineering

With the rapid development of the economy and society, the demand for mineral resources and energy has increased rapidly. However, it is difficult to improve the efficiency of blasting construction and control the stability of the surrounding rock in deep underground engineering. In this study, the deep underground tunnel of the Tianchi pumped-storage hydropower station in China was considered as the engineering background. Based on the stress redistribution state of the surrounding rock after blasting excavation, the crack propagation effect and dynamic response of the surrounding rock under different controlled blasting methods were studied through theoretical analyses, numerical simulations and in situ tests. The mechanism of directional crack formation was analysed by considering the influence of hole spacing and in situ stress. It was shown that the initial ground stress was conducive to the propagation of the blasting crack in the contour hole of smooth blasting towards the direction line of the blast hole. The test results showed that using controlled shaped-charge blasting methods in the blasting excavation of underground tunnels can improve the utilisation rate of explosives, reduce blasting vibration and achieve a significant effect on directional crack formation. The research results have important engineering significance as they can lead to improvements in the blasting technique, a contour-forming effect of the blasting excavation and control of the stability of the surrounding rock.

Key words:

tunnel engineering, controlled fracture blasting, directional fracture, surrounding rock damage, crack propagation

1. Uvod

Dinamičnim razvojem nacionalne infrastrukture sve se više velikih projekata izvodi duboko pod zemljom. To su prije svega projekti u područjima hidroenergetike, rudarstva, državne obrane i ostalih projekata u podzemnom građevinarstvu. Metoda bušenja i miniranja tradicionalni je postupak koji se primjenjuje za iskop podzemnih komora. Prednosti ove metode jesu visoka učinkovitosti i mogućnost da se prilagodi različitim posebnim geološkim uvjetima. Međutim, ima i mnoge negativne učinke, kao što su razbacivanje komada stijena, višak i manjak iskopa u odnosu na projektirani, vibracije pri miniranju, velika oštećenja stijenske mase u uvjetima velikih naprezanja tla i drugi štetni učinci [1]. Tehnologija kontroliranoga miniranja kumulativnim nabojem nudi značajne prednosti s tehničkog i gospodarskog aspekta za usmjereno miniranje. Tehnologija kontroliranoga miniranja kumulativnim nabojem značajno utječe na povećanje udaljenosti između minskih bušotina, smanjenje broja bušotina, povećanje stope iskorištenosti energije eksploziva i smanjenje oštećenja okolnih stijena, koja su uzrokovana miniranjem. Osim toga, ova se tehnologija također može upotrebljavati za poboljšanje nepovoljnih geoloških uvjeta (visoka napetost tla, raspucale stijene, slab međusloj itd.) tijekom podzemnog miniranja.

Pugh [2] je predložio teoriju kvazistacionarnog strujanja mlaza, koja je postavila teorijski temelj za proučavanje formiranja kumulativnog mlaza. Hirsch [3] je proučavao kumulativne mlazove pomoću teorijske analize i pružio računski model za kutnu raspodjelu koja odstupa od osi simetrije kumulativnog mlaza. Hayes [4] je proveo opsežna istraživanja o formiranju i raspadu kumulativnog mlaza. He [5] je predložio novu metodu za dvosmjerno miniranje kumulativnim nabojem i detaljno prikazao postupak miniranja kumulativnim nabojem iz perspektive mehaničkog ponašanja miniranja prema karakteristikama kumulativnih rezača. Na gradilištu je provedeno ispitivanje miniranja koje je rezultiralo optimalnim učinkom miniranja, što dokazuje da tehnologija miniranja kumulativnim eksplozivnim nabojima ima široku primjenu pri iskopu miniranjem. Fu [6] je upotrijebio softverski program DYNA3D za provedbu analize numeričke simulacije procesa nastajanja kumulativnog mlaza. Usporedbom svojstava kružnih i linijskih kumulativnih rezača iste strukture profila, analizirane su značajke raspodjele parametara kružnog kumulativnog mlaza. Duan [7] je upotrijebio numeričke simulacije i eksperimentalne metode istraživanja temeljene na teoriji linearnih kumulativnih rezača kako bi analizirao nastajanje mlaza, probijanje mete i čitav proces rezanja pri miniranju kumulativnim eksplozivnim nabojima te optimizirao parametre rezača. U testovima su postignuti zadovoljavajući rezultati rezanja. Xu [8] je proučavao učinak prodiranja različitih materijala i oblika obloge kumulativnih naboja kombinirajući pokuse i numeričke simulacije. Wang [9] je upotrijebio softver ANSYS/LS-DYNA za trodimenzionalnu dinamiku radi provođenja numeričke analize bipolarnog kumulativnog mlaza i zaključio je da se mlaz uspješno formirao, probio betonsku

metu i prouzročio štetu. Upotrijebljena je cijev od PVC-a kao materijal profilirane cijevi, a u terenskim ispitivanjima uspješno je razvijena tehnologija usmjerelog stvaranja pukotina tijekom miniranja.

Da bi nastale usmjerene pukotine između bušotina i da bi se poboljšala kvaliteta oblikovanja konturne površine nakon miniranja, istraživanje tehnologije preciznog miniranja, kao što je kontrolirano miniranje kumulativnim eksplozivnim nabojima, vrlo je važno za razvoj tehnologije podzemnog kontroliranog miniranja i pruža teorijsku osnovu za građevinske tehnologije i optimizaciju parametara podzemnog miniranja. Ima značajnu istraživačku vrijednost u oblikovanju konturnih površina i poboljšanju sigurnosti konstrukcije u niskogradnji.

2. Mehanizam širenja pukotina u stijenama, izazvanih kontroliranim miniranjem kumulativnim nabojem

2.1. Teorijska istraživanja kumulativnog mlaza

Prema osnovnoj teoriji trenutačne detonacije, produkt detonacije kreće se nakon detonacije okomito na vanjsku površinu materijala. Prema tome, nakon što je kumulativna cijev od PVC-a pričvršćena na vanjsku površinu eksploziva, detonacijski je val nakon detonacije prošao uzduž uobičajenog smjera po površini lijevka kumulativnog naboja i naposljetku konvergirao u smjeru osi lijevka kumulativnog naboja te oblikovao plinski mlaz visoke gustoće, brzine i pritiska. Kada nastali mlaz nakon pokretanja eksplozije djeluje na stijenu i potakne širenje pukotina u minskim bušotinama, eksplozivni plin brzo ulazi u pukotine i stvara učinak „klina plina“ na stijenu, koji širi pukotine još dalje i tako oblikuje usmjerene pukotine u stijenama [10].

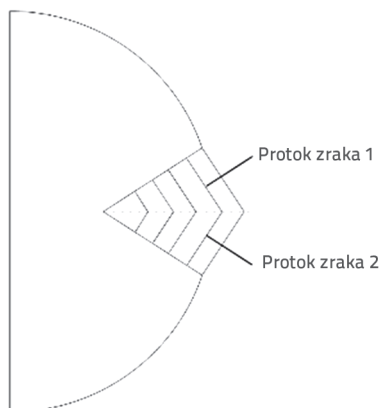
Brzina detonacije eksploziva ovisi o brzini udarnog vala, produktu detonacije i brzine širenja smjese plina. Teorijska vrijednost brzine protoka zraka u središtu protoka mlaza glasi [11]:

$$v_k = \frac{1 + \frac{U}{C} \sin \alpha + \left(\frac{U}{C}\right)^2 + \sqrt{1 + 2\frac{U}{C} \sin \alpha + \left(\frac{U}{C}\right)^2} \cos \alpha}{\sin \alpha + \frac{U}{C}} \quad (1)$$

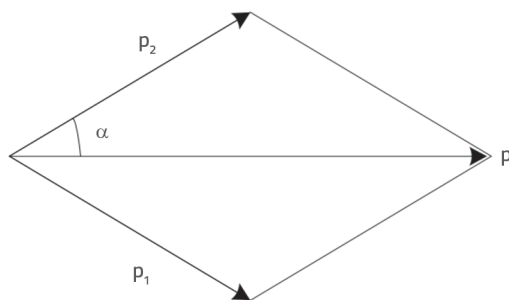
U izrazu (1), α predstavlja kut između sabirnice i osi kumulativne obloge, C je brzina zvuka nakon što udarni val dosegne vrhunac te vrijedi $C = 3/4D$, pri čemu je D brzina detonacije eksploziva. U je brzina produkta detonacije nakon udarnog vala te vrijedi $U = 1/4D$.

Na temelju rezultata istraživanja koje je proveo Li [12], učinkovit dio naboja analiziran je odvojeno u smjeru kumulativnog eksplozivnog naboja. Kao što se vidi na slici 1., produkti detonacije koji su se raspršili nakon detonacije proizveli su dvije zračne struje na površini lijevka kumulativnog naboja, čiji su tlakovi bili p_1 i p_2 , a dvije zračne struje sudarile su se na simetrali lijevka kumulativnog eksplozivnog naboja. Pod pretpostavkom da se radi o idealnom elastičnom sudaru, tlak detonacije nakon

superpozicije može se odrediti prema principu vektorske superpozicije, kao što je prikazano na slici 2.



Slika 1. Dijagram efikasnog djelomičnog rasipanja



Slika 2. Dijagram izračuna tlaka

$$p_1 = p_2 = \frac{2u^2 \rho_0 W}{W + u} \quad (2)$$

U izrazu (2), u je brzina rasipanja, W je brzina izbacivanja rasipanja po površini, a ρ_0 gustoća eksploziva. Tlak izazvan superpozicijom p_1 i p_2 iznosi:

$$p = \frac{\sin(\pi - 2\alpha)}{\sin \alpha} \quad (3)$$

Zamjenom izraza (2) izrazom (3) slijedi:

$$p = \frac{2u^2 \rho_0 \sin(\pi - 2\alpha)}{(W + u) \sin \alpha} \quad (4)$$

Nakon što su se dvije zračne struje sudarile i konvergirale, raširile su se velikom brzinom. S obzirom na to da se radi o linijskom eksplozivnom naboju, a koeficijent razdvajanja je relativno visok, sekundarni protok može se približno postići na temelju pretpostavke trenutačne detonacije, a tlak protoka zraka iznosi kako slijedi:

$$p_b = p \left(\frac{R_0}{r} \right)^{v-1} \quad (5)$$

pri čemu je R_0 polumjer eksploziva, r udaljenost od središta eksploziva, a v eksponent jednodimenzionalnog toka.

Zamjenom p iz izraza (4) izrazom (5) i $v = 2$, slijedi:

$$p_b = \frac{2u^2 \rho_0 W R_0 \sin(\pi - 2\alpha)}{(W + u) r \sin \alpha} \quad (6)$$

Kada se produkt detonacije sudari sa stijenkom bušotine, tlak koji djeluje na stijenku bušotine se povećava, a vršna vrijednost tlaka koji djeluje na stijenku bušotine u smjeru akumulacije energije iznosi:

$$p_b = \frac{2u^2 \rho_0 W R_0 \sin(\pi - 2\alpha)}{(W + u) r_0 \sin \alpha} n \quad (7)$$

U izrazu (7) n označava faktor pojačanja, a r_0 polumjer bušotine.

2.2. Mehanizam širenja pukotina nastalih eksplozijom

Prema teoriji mehanike loma, nastanak i širenje početne pukotine pod kvazistatičkim tlakom trebali bi zadovoljiti sljedeće uvjete:

$$K_I > K_{IC} \quad (8)$$

$$K_I = p F \sqrt{\pi(r_0 + l_c)} \quad (9)$$

U izrazima (8) i (9), K_I je koeficijent intenzivnosti naprezanja pri vrhu pukotine; K_{IC} je dinamička prelomna žilavost stijena; p tlak koji djeluje na stijenku bušotine; F je korekcijski faktor koeficijenta intenzivnosti naprezanja, koji je funkcija r_0 i l_c i zadovoljava odnos u izrazu (10) [13]; r_0 polumjer minske bušotine; a l_c je dužina širenja bušotine.

$$p < \frac{K_{IC}}{F \sqrt{\pi(r_0 + l_c)}} \quad (10)$$

3. Numerička analiza simulacije kontroliranog miniranja kumulativnim eksplozivnim nabojem

3.1. Numerička metoda

Proučavani su zakon i raspodjela širenja pukotina pri različitim metodama kontroliranoga miniranja. Model spajanja tekućine i čvrstog tijela primijenjen je za numeričku simulaciju iskapanja stijenske mase miniranjem, a prema računalnim svojstvima softvera dinamičkih konačnih elemenata LS-DYNA, primijenjen je Eulerov algoritam za tekuće materijale kao što su eksplozivi i zrak te Lagrangeov algoritam za čvrste materijale kao što su stijene. Ispitano je međudjelovanje različitih tekućih i čvrstih materijala. Tijekom izračuna, produkt detonacije i tekućih materijala tekli su u Eulerovoj rešetki ne uzrokujući pritom distorziju rešetke. U ovom algoritmu dolazi do međudjelovanja tekuće i čvrste tvari spajanjem tekućina i krutina te je opisan čitav proces udara

Tablica 1. Parametri emulzijskih eksploziva i JWL jednadžbe stanja, parametri emulzijskih eksploziva i JWL konstanti

ρ [g/cm ³]	D [m/s]	A [GPa]	B [GPa]	R_1	R_2	ω	E [J/m]
1,0	3200	214	0,18	4,15	0,95	0,13	4×10^9

ρ - gustoća eksploziva; D - brzina detonacije

Tablica 2. Parametri zraka

ρ_2 [g/cm ³]	C_p	S_1	S_2	S_3	0	E_2 [J/m ³]
1,02	0,1647	2,56	1,986	1,2268	0,5	1,0

Tablica 3. Parametri materijala cijevi kumulativnog naboja

Gustoća [g/cm ³]	Specifična toplina [J·K ⁻¹ ·kg ⁻¹]	Poissonov koeficijent	Talište [°C]	Modul elastičnosti [GPa]
1,3	1,18	0,38	95	31

Tablica 4. Fizikalna i mehanička svojstva stijena

Gustoća [g/cm ³]	Modul elastičnosti [GPa]	Poissonov koeficijent	Tlačna čvrstoća [MPa]	Čvrstoća na istezanje [MPa]
2,7	45	0,23	143	16

eksploziva u stijenu nakon detonacije, čime je moguće preciznije simulirati proces miniranja stijene [14, 15]. Prema tome, algoritam višematerijalnog spajanja tekućina i čvrstih tvari u programu dinamičkih konačnih elemenata LS-DYNA upotrijebljen je za izračun simulacije. Kada se izvodi numerička simulacija miniranja, primjenjuju se sljedeće jednadžbe materijala i stanja. Visokoenergetski eksplozivni materijal *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN, u kombinaciji s JWL jednadžbom stanja, upotrijebljen je za simulaciju odnosa između tlaka i obujma tijekom eksplozija. Formula glasi [16]:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (11)$$

U izrazu (11) V označava promjenu volumena, A , B , ω , R_1 , R_2 i E_0 predstavljaju konstante materijala, a specifična vrijednost određuje se na temelju odabrane vrste eksploziva. Specifični parametri navedeni su u tablici 1.

Kao konstitutivni model zračnog medija odabran je LS-DYNA konstitutivni model te je definirana *EOS_GRUNEISEN jednadžba stanja [17].

$$P = \frac{\rho_2 C_0 \mu_0 \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu_0 - \frac{\mu_0^2}{2} \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu_0 - S_2 \frac{\mu_0^2}{\mu_0 + 1} - S_3 \frac{\mu_0^2}{(\mu_0 + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + \alpha_0 \mu_0) E_2 \quad (12)$$

U izrazu (12), ρ_2 označava gustoću zraka; γ_0 Grüneisenov parametar; C_0 je sjecište krivulje; α_0 ispravak volumena prvog reda γ_0 ; S_1 , S_2 i S_3 su koeficijenti nagiba; a μ_0 je revidirana količina obujma. Vrijednosti parametara navedene su u tablici 2.

Polivinil klorid (PVC) trenutačno je jedan od najupotrebljavanijih plastičnih materijala te je odabran kao materijal za cijevi za

prikupljanje energije. Njegova fizikalna svojstva su sljedeća. PVC omekšava na temperaturama između 65 i 85 °C, dostiže tekuće stanje na temperaturi od 170 °C, razgrađuje se povećanjem temperature i oslobađa veliku količinu plina kada dosegne temperaturu od 190 °C [18, 19]. Johnson-Cookov model materijala tipično se primjenjuje za simulaciju kućišta kumulativnog naboja. Sljedeća jednadžba opisuje efektivnu granicu razvlačenja u Johnson-Cookovom modelu.

$$\sigma_y = (A + B \bar{\epsilon}^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (13)$$

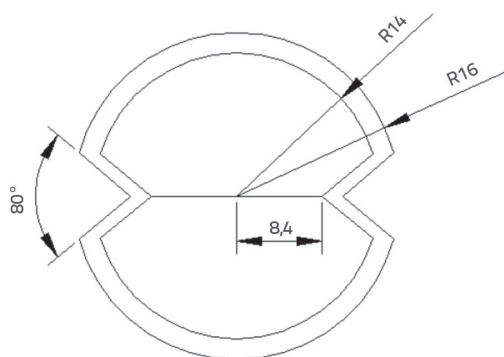
U izrazu (13) σ_y je efektivna granica razvlačenja, $\bar{\epsilon}^p$ je jednako plastično napinjanje, $\dot{\epsilon}^*$ je standardna brzina efektivnog plastičnog napinjanja, T^* je relativna temperatura, A je granica razvlačenja, B je koeficijent intenzivnosti naprežanja, n je indeks intenzivnosti naprežanja, C je korelacijski koeficijent brzine deformacije; a m korelacijski koeficijent temperature. $(A + B \bar{\epsilon}^n)$ prikazuje funkciju naprežanja i deformacije, pri čemu vrijedi $\epsilon^* = 1,0$ i $T^* = 0$. $(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)$ i $(1 - T^{*m})$ prikazuju utjecaje brzine deformacije i temperature.

Za stijene je upotrijebljen uzorak materijala *MAT_PLASTIC_KINEMATIC. Kako bi se izravno odrazili nastanak i širenje pukotina pri procesu miniranja, dodana je ključna riječ *MAT_ADD_EROSION. Program je tijekom postupka izračuna automatski uklonio jedinice naprežanja koje su zadovoljile kriterij sloma, što je jasno pokazalo raspored pukotina.

3.2. Rezultati numeričkog izračuna širenja pukotina nastalih detonacijom pri različitim razmacima između bušotina

Proučavan je mehanizam usmjerenog nastajanja pukotina miniranjem kumulativnim nabojem i širenje pukotina između

minskih bušotina. Dinamički konačni element ANSYS/LS-DYNA primijenjen je za simulaciju procesa nastajanja pukotina u podzemnim stijenama pri kontroliranom standardnom miniranju i kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem. Kako bi se olakšala komparativna analiza, postavljeni su isti uvjeti za numerički proračun za obje kontrolirane metode miniranja. Prema rezultatima analize koje je proveo Zhou [20], u slučaju kontroliranog miniranja kumulativnim nabojem debljina cijevi kumulativnog naboja iznosila je 2 mm, kut lijevka kumulativnog naboja bio je 80°, a dubina utora 5,6 mm. Slika 3. prikazuje model cijevi kumulativnog naboja.



Slika 3. Model cijevi kumulativnog naboja (jedinica: mm)

Izrađen je dvodimenzionalni računalni model u kojem su ograničenja u smjeru osi Z primijenjena na prednje i stražnje sučelje modela, simetrična ograničenja primijenjena su na lijeve i desne granice modela, a nereflektirajući granični uvjeti primijenjeni su na gornju granicu.

Metoda glatkog miniranja primijenjena je za iskapanje podzemnog tunela reverzibilne hidroelektrane na jezeru Tianchi. Stoga je postavljena slobodna granica na donjoj granici modela za simulaciju iskapanja eksplozivnog sloja. U modelu izračuna promjer bušotine iznosio je 42 mm, promjer eksploziva 32 mm, a udaljenost između bušotina bila je X.

3.2.1. Učinak kontroliranog standardnog miniranja na širenje pukotina pri različitim razmacima između bušotina

Standardno miniranje izvedeno je pomoću konturnih bušotina. Projektirani promjer bušotina bio je 42 mm, a upotrijebljen je emulzijski eksploziv br. 2 kao punjenje u patronama promjera 32 mm, duljine 220 mm i težine 200 g. Svojstva eksplozivnog punjenja minske bušotine bile su sljedeća: dubina zalomne bušotine iznosila je 3,4 m, dubina pomoćnih bušotina 3 m, dubina konturnih bušotina bila je 3,1 m, razmak između konturnih bušotina iznosio je 0,5 m, debljina eksplozivnog sloja bila je 0,5 m, razmak između konturnih bušotina 0,5 do 0,8 m, debljina minskih bušotina bila je između 0,6 i 0,9 m, a razmak između konturnih bušotina iznosio je 0,5 m. U tablici 5. navedeni su specifični parametri bušenja i miniranja.

Da bismo proučili zakon širenja pukotina pri kontroliranom standardnom miniranju, za izračun su odabrani razmaci između pet bušotina kako je prikazano na slici 4. Kao što se može uočiti iz učinaka pet različitih uvjeta miniranja na širenje pukotina, broj pukotina nastalih između bušotina i stupanj oštećenja okolne stijenske mase znatno se razlikuje ovisno o udaljenosti između dviju bušotina. Osim toga, nakon istovremene detonacije dviju bušotina, nastala je glavna pukotina određene duljine ravno u smjeru bušotine. Istovremeno, budući da se energija eksploziva prenosi u svim smjerovima stijenske bušotine nakon detonacije, došlo je do nasumičnog oštećenja stijene od stijenske bušotine prema unutrašnjosti, uzrokujući stvaranje pukotina i jako oštećenje okolne stijene. Najveća dubina oštećenja okolne stijene uzrokovana kontroliranim standardnim miniranjem iznosila je 40 cm. Slobodne površine djelotvorno usmjeravaju širenje detonacijskih pukotina; stoga su broj i duljina pukotina na strani blizu slobodne površine znatno veći u odnosu na one na strani zatvorene stijenske mase.

Nakon aktiviranja eksplozije, energija eksplozije iz bušotine prenijela se na stijensku masu i oštetila stijenu. Energija eksplozije postupno se raspršivala i smanjila tijekom prijenosa. Kada se energija smanjila do mjere da nije mogla oštetiti

Tablica 5. Projektirani parametri standardnog miniranja

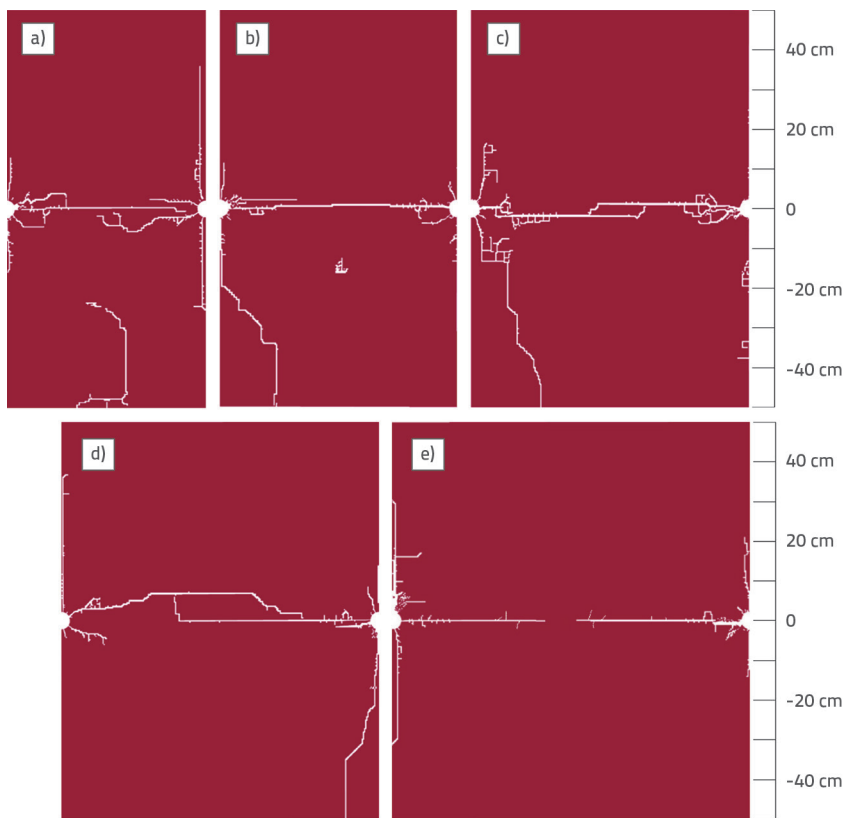
Oznaka bušotine	Broj bušotina (A)	Dubina bušotine [m]	Punjenje bušotine		Broj usporenje detonatora (Dio)
			Masa po bušotini [kg/bušotina]	Ukupna masa [kg]	
Zalomna	4	3,4	2,2	8,8	Ms1
Pomoćna bušotina	8	3	2	16	Ms3
Pomoćna bušotina	12	3	2	24	Ms5
Pomoćna bušotina	26	3	2	52	Ms7
Pomoćna bušotina	16	3	2	32	Ms9
Podna bušotina	9	3	2	18	Ms11
Konturna	32	3,1	0,6	19,2	Ms13
Ukupno	107	/	/	172	/

stijenu, duljina minske pukotine prestala je rasti. Prema tome, kako se povećavao razmak između dviju bušotina, smanjivali su se broj i dužina minskih bušotina. Iz glavnih pukotinama pri različitim razmacima između bušotina na slici 4. može se uočiti da se glavne pukotine nastale između dvije minske bušotine pri kontroliranom standardnom miniranju ne mogu dobro povezati duž smjera spajanja minske bušotine. Samo na udaljenostima između minskih bušotina od 50 i 60 cm glavne pukotine nastale između dviju minskih bušotina grubo su se povezale duž smjera spajanja minske bušotine kako je prikazano na slici 4.a i 4.b, čime je postignuta svrha iskopa miniranog sloja. Međutim, zbog prijenosa energije eksplozije oko bušotine, nije se mogla usredotočiti na smjer povezivanja bušotine, što je dovelo to jakog oštećenja zatvorene stijenske mase, što ne pogoduje stvaranju stabilne strukture podzemlja nakon iskopa.

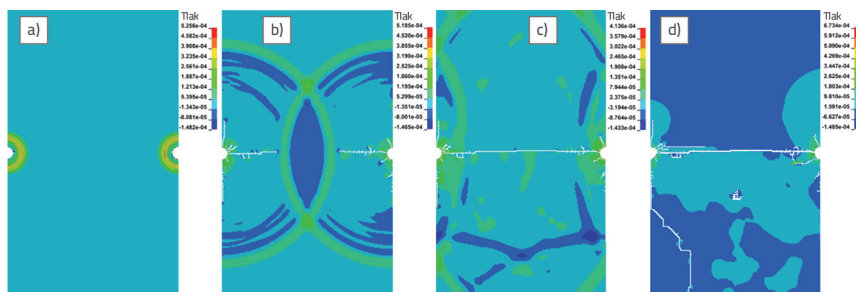
Kada su razmaci između bušotina iznosili 70 i 80 cm, kao što je prikazano na slici 4.c i 4.d, nakon aktiviranja eksplozije, kada se nastala glavna pukotina proširila do određene duljine u smjeru povezivanja bušotine, postupno smanjivanje energije eksplozije dovelo je do skretanja pukotine; prema tome, pukotina je odstupila od smjera povezivanja bušotine i polako se širila na obje strane sve dok nije došlo do presijecanja vrha pukotine i glavne pukotine. Razlog je širenje pukotine pri čemu se pri stvarnom iskopu u građevinske svrhe javlja izražen fenomen prekopa i nedovoljnog iskopa te se ne mogu postići zadovoljavajući učinci iskopa. Kada je razmak između bušotina iznosio 90 cm, kao što je prikazano na slici 4.e, glavna minska pukotina između dvije bušotine nije se spojila zbog prevelikog razmaka između bušotina.

Ukratko, pri kontroliranom standardnom miniranju, kada je udaljenost između dviju bušotina manja od 60 cm, nastale glavne pukotine spojile su se u smjeru gotovo usporednom s pravcem minskih bušotina. Međutim, nastale su i dugačke pukotine iz drugih pravaca bušotine te brojne sekundarne pukotine s obje strane glavnih pukotina, koje su znatno oštetile okolnu stijenu. Prame tome, učinak kontroliranog standardnog miniranja na pukotine nije zadovoljavajući. Kako bi se što intuitivnije prikazao čitav proces nastanka, širenja i prodora pukotina nastalih kontroliranim standardnim miniranjem, model s razmakom od 60 cm između bušotina

upotrijebljen je kao primjer za analizu procesa širenja pukotina između dviju bušotina nakon detonacije. Kako je prikazano na slici 5., nakon detonacije dviju bušotina došlo je do oštećenja stijene oko bušotine i stvaranja početnih pukotina. Nakon detonacije, naprezanje izazvano eksplozijom i plin ubrzali su širenje pukotina. Pri 100 μ s nastala je glavna pukotina određene duljine u pravcu linije povezivanja između dviju minskih bušotina. Glavna pukotina je tijekom širenja odstupala od pravca linije minske bušotine te su nastale sekundarne pukotine s obje strane glavne pukotine. Nakon toga, pukotina se nastavila širiti kombiniranim djelovanjem plina detonacije, naprezanja izazvanog eksplozijom i reflektiranih tlačnih valova koji su se formirali na slobodnoj površini. Pri 220 μ s nakon detonacije glavna pukotina dviju bušotina spojila se u pravcu približno usporednom s linijom minskih bušotina, dok



Slika 4. Učinci standardnog miniranja pri različitim razmacima između bušotina: a) 50 cm; b) 60 cm; c) 70 cm; d) 80 cm; e) 90 cm



Slika 5. Proces prodiranja pukotina pri kontroliranom standardnom miniranju: a) t = 20 μ s; b) t = 100 μ s; c) t = 200 μ s; d) t = 600 μ s

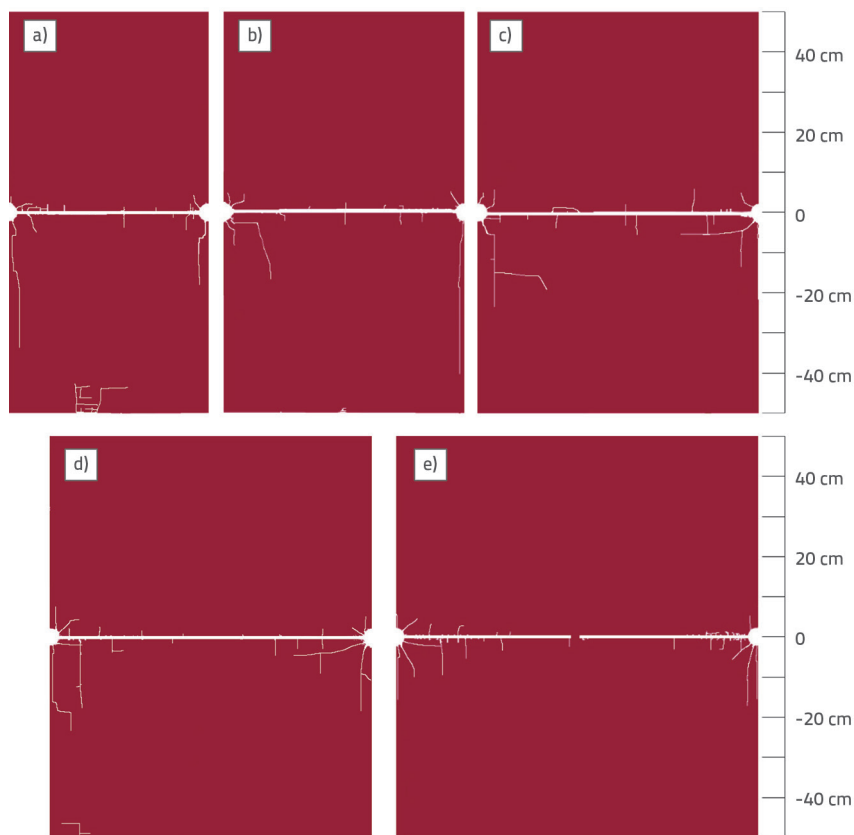
se pukotina nastavila širiti u drugim smjerovima oko bušotine. Nakon povezivanja glavne pukotine, eksplozivni plin nastavio se širiti unutar pukotine, potičući povećanje širine pukotine. Djelovanjem reflektiranih tlačnih valova pukotina se proširila na slobodnu površinu. Raspršivanjem i smanjivanjem energije pukotine u stijeni prestale su se širiti.

3.2.2. Učinak kontroliranog miniranja kumulativnim nabojem na širenje pukotina pri različitim razmacima između bušotina

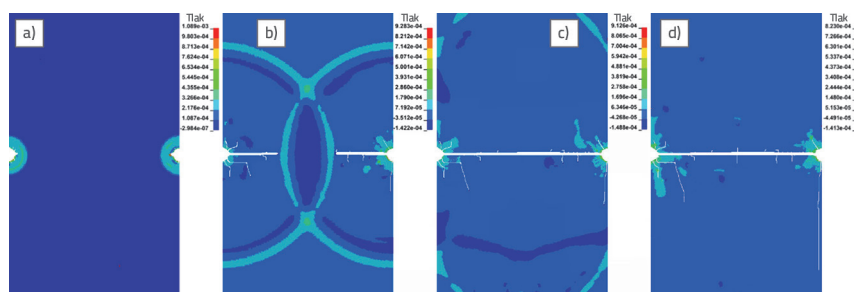
Da bismo proučili zakon širenja pukotina pri kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem, za izračun i analizu odabrani su razmaci između pet bušotina kako je prikazano na slici 6. Na temelju raspodjele pukotina pod uvjetima ovih pet različitih razmaka između bušotina, može se uočiti da broj pukotina koje nastaju kontroliranim miniranjem kumulativnim nabojem, oblik raspodjele i stupanj oštećenosti okolne stijene pokazuju značajne razlike. Kako je prikazano na slikama 6.a do 6.d, s razmakom između 50 i 80 cm između dviju bušotina, glavne pukotine nastale su u pravcu spajanja između minskih bušotina nakon istovremene detonacije. Time se idealno utječe na stvaranje usmjerenih pukotina, čime se postiže svrha iskopa miniranjem i smanjuje stupanj oštećenosti okolne stijene. Osim toga, nije došlo do fenomena prekopa i nedovoljnog iskopa. Zahvaljujući učinkovitosti lijevka kumulativnog naboja kao vodiča, više energije eksplozije djeluje na stijenu u pravcu između minskih bušotina. To omogućuje stvaranje glavnih pukotina, pritom smanjujući energiju koja djeluje na stijenu u nepovezanom pravcu između bušotina. Stoga nastaje samo mali broj kratkih pukotina u nepovezanom pravcu. Raspon oštećenja okolne stijene kontroliranim miniranjem kumulativnim nabojem bio je unutar 15 cm ispod pet različitih razmaka između bušotina, a stupanj oštećenja okolne stijene bio je relativno nizak. Broj i duljina pukotina na strani blizu slobodne površine znatno se povećava u odnosu na pukotine na strani zatvorene stijenske mase, jer tlačni val po slobodnoj površini stvara reflektirane vlačne valove. Pri razmaku između bušotina od 50 do 70 cm, kao što je prikazano na slikama 6.a do 6.c, nastale

su brojne sekundarne pukotine s obje strane glavne pukotine tijekom nastanka i širenja glavne pukotine, a te sekundarne pukotine bile su nasumično raspoređene. To pokazuje da je nakon miniranja stijena uglavnom uništena, napukla i razvila se da stvori glavnu pukotinu u smjeru akumulacije energije na stijenci bušotine. Istovremeno je tijekom procesa širenja glavne pukotine plin eksploziva neprestano prodirao u glavnu pukotinu, a sveobuhvatno djelovanje tlačnog vala nakon izazvanog eksplozijom rezultirao je stvaranjem sekundarnih pukotina s obje strane glavne pukotine.

Sve u svemu, kontrolirano miniranje kumulativnim nabojem može proizvesti jasan učinak na stvaranje usmjerenih pukotina te i dalje potaknuti pobijanje pukotina između bušotina



Slika 6. Učinak kontroliranog miniranja kumulativnim nabojem pri različitim razmacima između bušotina: a) 50 cm; b) 60 cm; c) 70 cm; d) 80 cm; e) 90 cm



Slika 7. Proces širenja pukotina pri kontroliranom miniranju kumulativnim eksplozivnim nabojem: a) $t = 20 \mu s$; b) $t = 100 \mu s$; c) $t = 200 \mu s$; d) $t = 600 \mu s$

pri razmaku od 80 cm između dviju bušotina. Istovremeno, kontroliranim miniranjem kumulativnim nabojem mogu se izbjeći fenomeni prekopa i nedovoljnog iskopa, smanjiti oštećenje okolne stijene, poboljšati stabilnost iskopanog prostora, postići ravnu konturnu površinu i ostvariti učinak glatkog kontroliranog miniranja.

Kako bi se što jasnije prikazao čitav proces nastanka, širenja i prodora pukotina nastalih kontroliranim miniranjem kumulativnim nabojem, model s razmakom od 60 cm između rupa upotrijebljen je kao primjer za analizu procesa širenja pukotina izazvanih eksplozijom između dviju bušotina nakon detonacije. Kako je prikazano u slici 7., 20 μ s od detonacije stijenska bušotina bila je izložena snažnom učinku eksplozije. Budući da je lijevak kumulativnog naboja služio za usmjeravanje energije eksplozije, stijena stijenske minske bušotine bila je izložena silovitom plinskom mlazu u pravcu kumulativnog mlaza, pritom tvoreći početne pukotine u stijenci minske bušotine. Zatim je plin detonacije brzo prodirao u početne pukotine i pritom uzrokovao širenje pukotina u pravocrtnom smjeru minske bušotine da bi stvorio glavnu pukotinu, a s obje strane glavne pukotine nastala je nekolicina sekundarnih pukotina. 200 μ s nakon detonacije glavne pukotine dviju bušotina spojile su se u pravcu približno usporednom s linijom minske bušotine, a pukotine su se nastavile širiti u drugim smjerovima oko bušotine. Nakon povezivanja glavne pukotine, eksplozivni plin nastavio se širiti unutar pukotine, potičući povećanje širine pukotine. Djelovanjem reflektiranih tlačnih valova pukotina se proširila na slobodnu površinu. Raspršivanjem i smanjivanjem energije, pukotine u stijeni prestale su se širiti.

Sveobuhvatna komparativna analiza zakona raspodjele pukotina izazvanih eksplozijom na temelju ovih dviju različitih metoda miniranja dokazuje da je kontroliranim standardnim miniranjem moguće izazvati stvaranje povezanih pukotina samo u pravocrtnom smjeru između minske bušotine samo ako je razmak između bušotina relativno mali, a učinak je formiranja usmjerenih pukotina relativno loš. To nije pogodno za stvaranje ravne konturne površine, a prevladavajući prekopi i nedovoljni iskopi javljaju se u samom procesu miniranja u građevinske svrhe. Mnoge pukotine nastaju na strani sačuvane stijenske mase i šire se na okolnu stijenu, što uzrokuje visok stupanj oštećenosti okolne stijene i utječe na sigurnost i kvalitetu miniranja. Uz razmak između bušotina od 50 do 80 cm, kontrolirano miniranje kumulativnim nabojem stvorilo je povezane pukotine u pravocrtnom smjeru između minske bušotine, a učinak formiranja usmjerenih pukotina bio je idealan. Sekundarne pukotine koje su se oblikovale na objema stranama glavne pukotine i one formirane u drugim smjerovima od minske bušotine brojčano su bile manje i kraće, a stupanj oštećenosti okolne stijene bilo je nizak. Moguće je poboljšati kvalitetu iskopa uz istodobno udovoljavanje zahtjevima za miniranje na terenu.

4. Terensko ispitivanje kontroliranog miniranja kumulativnim eksplozivnim nabojem

4.1. Inženjerski pregled lokacije za ispitivanje na terenu

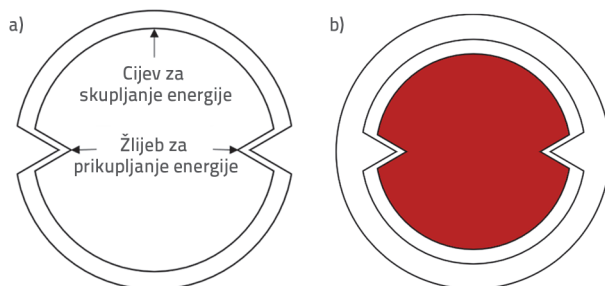
Reverzibilna hidroelektrana Tianchi nalazi se u kineskoj pokrajini Henan. Sastoji se od gornje akumulacije, sustava prijenosa vode, sustava podzemne strojarnice, donje akumulacije i rasklopnog postrojenja. U podzemnoj strojarnici ugrađene su četiri jedinice za proizvodnju električne energije pojedinačnog instaliranog kapaciteta od 300 MW, ukupnog instaliranog kapaciteta od 1200 MW. Normalna razina vode u gornjoj akumulaciji iznosi 1063,0 m s odgovarajućim skladišnim kapacitetom od 14,05 milijuna m^3 ; razina vode stajačice je 1020,0 m s odgovarajućim skladišnim kapacitetom od 2 milijuna m^3 , a prilagođeni skladišni kapacitet iznosi 12,05 milijuna m^3 . Normalna razina vode u donjoj akumulaciji iznosi 537,5 m s odgovarajućim skladišnim kapacitetom od 16,34 milijuna m^3 ; razina vode stajačice je 510,0 m s odgovarajućim skladišnim kapacitetom od 4,31 milijuna m^3 , a prilagođeni skladišni kapacitet iznosi 12,03 milijuna m^3 . Sveobuhvatna shema reverzibilne hidroelektrane Tianchi prikazana je na slici 8.



Slika 8. Sveobuhvatna shema reverzibilne hidroelektrane Tianchi u pokrajini Henan

4.2. Tehnologija izrade pomoću miniranja kumulativnim eksplozivnim nabojem

Metoda kumulativnih naboja: cijevi od PVC-a za prikupljanje energije napunjene su eksplozivima. Shematski prikaz strukture cijevi kumulativnog naboja i dijagram kumulativnog naboja prikazani su na slici 9.



Slika 9. Shematski prikaz metode kumulativnih naboja: a) Struktura cijevi kumulativnog naboja; b) Položaj kumulativnog naboja

PVC je primijenjen kao materijal za cijevi za prikupljanje energije, kako je prikazano na slici 10. Dodatni postupak: postupak kumulativnog naboja provodi se punjenjem eksploziva u cijev kumulativnog naboja kako je prikazano na slici 11.



Slika 10. Shematski prikaz cijevi kumulativnog naboja

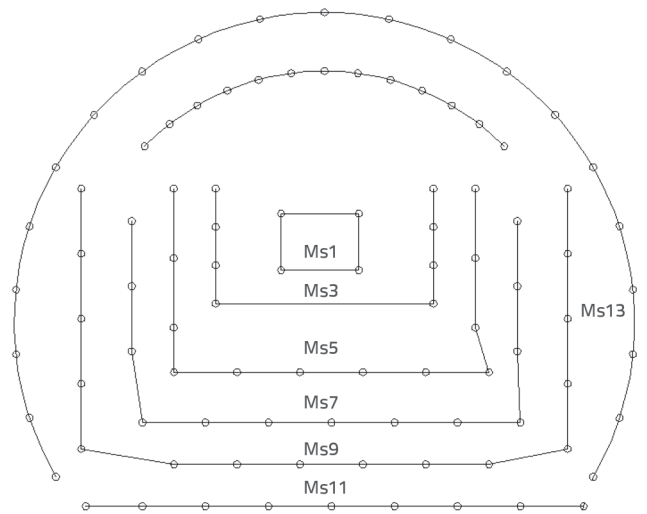


Slika 11. Postupak punjenja cijevi kumulativnog naboja

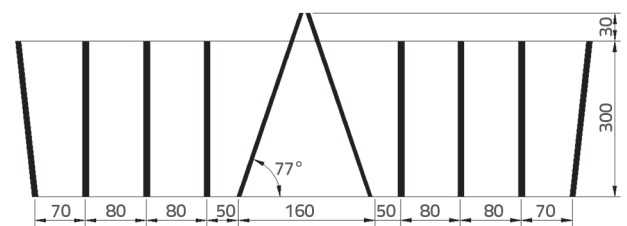
4.3. Plan bušenja i miniranja kontroliranog miniranja kumulativnim eksplozivnim nabojem

Prema numeričkoj analizi, razmak bušotina kod kontroliranog standardnog miniranja ne smije biti veći od 50 cm, dok kontrolirano miniranje kumulativnim nabojem može proizvesti učinak usmjerene pukotine kada razmak između dviju minskih bušotina iznosi 80 cm. Stoga, u kombinaciji sa stvarnim geološkim uvjetima tunela za donju

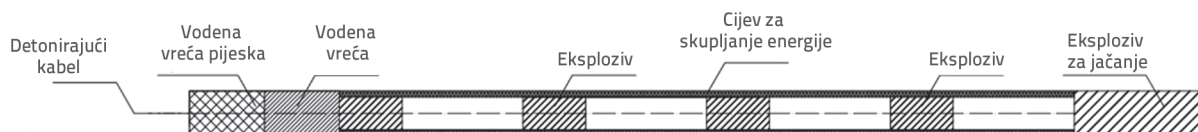
vodu reverzibilne hidroelektrane Tianchi, razmak minskih bušotina povećao se s približno 50 cm na 75 cm u projektnoj shemi kontroliranog miniranja s kumulativnim nabojem, a raspored minskih bušotina, pomoćnih bušotina i parametara miniranja bili su u skladu s projektom standardnog glatkog miniranja. Raspored bušotina pri kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem prikazan je na slici 12., a slika 13. prikazuje raspored presjeka bušotina. Prazna površina između dijelova eksplozivnog naboja predstavlja zrak, naboj jačanja predstavlja donji naboj jačanja, a omjer mase naboja i donjeg naboja jačanja iznosi 0,7 kako je prikazano na slici 14. Specifični parametri bušenja i miniranja navedeni su u tablici 6.



Slika 12. Shematski prikaz rasporeda bušotina u kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem



Slika 13. Shematski prikaz rasporeda presjeka minskih bušotina (jedinica: cm)



Slika 14. Shematski prikaz strukture punjenja bušotina u kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem

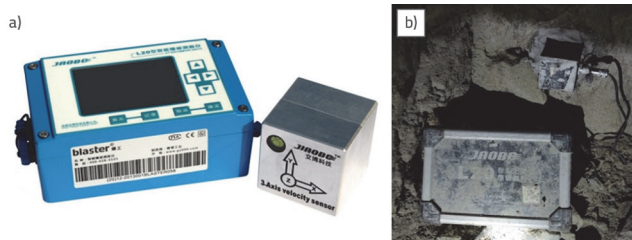
Tablica 6. Projektni parametri kontroliranog miniranja kumulativnim nabojem

Oznaka bušotine	Broj bušotina (A)	Dubina bušotine [m]	Naboj bušotine		Usporenje detonatora (Dio)
			Masa po bušotini [kg/bušotina]	Ukupna masa [kg]	
Zalom	4	3,4	2,2	8,8	Ms1
Pomoćna bušotina	8	3	2	16	Ms3
Pomoćna bušotina	12	3	2	24	Ms5
Pomoćna bušotina	26	3	2	52	Ms7
Pomoćna bušotina	16	3	2	32	Ms9
Podna bušotina	9	3	2	18	Ms11
Konturna bušotina	21	3,1	0,6	12,6	Ms13
Ukupno	96	/	/	163,4	/

4.4. Analiza terenskog ispitivanja

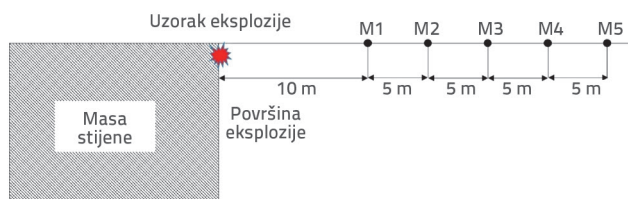
4.4.1. Raspored mjernih točaka

Da bi se dobio kvantitativni indeks za procjenu utjecaja miniranja na stabilnost okolne stijene tunela, upotrijebljen je L20 mjerač vibracija pri miniranju proizvođača Chengdu Jiaobo Science and Technology Co., Ltd. za mjerenje brzine vibracija pri miniranju i praćenje učinka vibracija pri miniranju na okolnu stijenu tunela. Učinak odabranog uređaja zadovoljava; može mjeriti vibracijske valove u tri različita smjera istovremeno. Brzina ispitivanja bila je između 0,001 i 35,5 cm/s, raspon ispitne frekvencije bio je postavljen na 1–1000 Hz, točnost ispitivanja iznosila je 5 %, a točnost očitavanja uređaja 0,1 %. Vibrometar i senzor vibracija prikazani su na slici 15.a, a slika 15.b prikazuje ugradnju uređaja na terenu.



Slika 15. Uređaj i ugradnja na terenu: a) Mjerač vibracija pri miniranju; b) Ugradnja uređaja na terenu

U skladu sa zahtjevima praćenja vibracija pri miniranju navedenih u sigurnosnim propisima prilikom miniranja, uglavnom se ispituju vibracije u srednje udaljenim i udaljenim područjima od izvora miniranja. Stoga su za određivanje brzine vibracija pri miniranju u srednje udaljenim i udaljenim područjima od izvora miniranja ugrađeni ispitni uređaji na stijenci tunela na vodoravnoj udaljenosti 10 m od čela iskopa. Vertikalna visina svake mjerne točke od tla iznosila je oko 0,5 m, a po osi tunela bilo je raspoređeno pet mjernih točaka. Mjerne točke označene su s M1, M2, M3, M4 i M5, od najbliže do najdalje. Raspored mjernih točaka prikazan je na slici 16.



Slika 16. Shema mjernih točaka vibracija pri miniranju

4.4.2. Priprema materijala i proces ispitivanja

Cijev primijenjena u terenskom ispitivanju kontroliranog miniranja s kumulativnim nabojem u tunelu s donjom vodom u reverzibilnoj hidroelektrani Tianchi imala je oblik slova "C", a duljina svake cijevi s kumulativnim nabojem podijeljena je na 1, 2, 3 m i druge standardne veličine. Dubina bušenja minskih bušotina za kontrolirano standardno miniranje kumulativnim nabojem iznosila je 3 m. Prema tome, kako bi se olakšao rad, smanjilo vrijeme punjenja i poboljšala učinkovitost konstrukcije tijekom ispitivanja, postavljena je cijev s kumulativnim nabojem od 1 m, a dvije cijevi s kumulativnim nabojem postavljene su u svaku konturnu bušotinu. Pri procesu punjenja kumulativnih naboj, emulzijski eksploziv ravnomjerno je podijeljen na dva dijela horizontalno, postavljen u cijev s kumulativnim nabojem u aksijalnim razmacima, a istodobno je spojen detonirajući štapin. Čitav proces punjenja jednostavan je i učinkovit i bez dodatnih složenih postupaka. Slika 17. prikazuje strukturu kumulativnog naboj.

Osim toga, korištene su vreće s vodom (slika 18.) i s vodom i pijeskom koje odgovaraju promjeru minskih bušotina kako bi se blokirao prolaz, smanjio zamoran i dugotrajan proces začepijavanja bušotina i poboljšala učinkovitost cjelokupnog procesa punjenja. Primjena vreća s vodom i vreća s vodom i pijeskom za čepljenje minskih bušotina može smanjiti prašinu uzrokovanu lomljenjem stijena nakon miniranja, poboljšati kvalitetu zraka u tunelu nakon miniranja, povećati sigurnost graditeljskog okruženja i poboljšati psihofizičko zdravlje građevinskih radnika. Budući da se radi o malom iskopu u svrhu

ispitivanja, moguća je ručna izrada potrebnih vreća za vodu i vreća za vodu i pijesak. Omjer vode i riječnog pijeska u vrećama s vodom i pijeskom iznosio je 0,5.



Slika 17. Punjenje i ugradnja cijevi s kumulativnim nabojem: a) Punjenje cijevi kumulativnim nabojem; b) Ugradnja na terenu

U proizvedenim vrećama s vodom i vodom i pijeskom ne smije biti mjehurića, a proširenje za punjenje trebalo bi biti dostatno kako bi se minska bušotina mogla zatvoriti na najbolji mogući način.



Slika 18. Vreće s vodom i primjena na terenu: a) Vreće s vodom i vreće s vodom i pijeskom



Slika 18. Vreće s vodom i primjena na terenu: b) Začepljivanje bušotina vrećom s vodom i pijeskom

4.5. Analiza eksperimentalnih rezultata

Promatranjem i bilježenjem tragova polovičnih bušotina ostavljenih na stijenci tunela nakon miniranja i plosnatosti konturne površine, utvrđeni su podaci o postotku polovičnih bušotina za kontrolirano standardno miniranje i kontrolirano miniranje kumulativnim nabojem (vidi tablicu 7.).

Iz podataka u tablici 7. uočava se da kod kontroliranog standardnog miniranja postotak polovičnih bušotina(%) iznosi samo 38 %, što upućuje na to da je iskop prouzročio značajna oštećenja okolne stijene te da je došlo do očitih prekopa i nedovoljnog iskopa. Kada je iskapanje provedeno kontroliranim miniranjem kumulativnim nabojem, postotak polovičnih bušotina iznosio je 95 %, to jest, stopa polovičnih bušotina povećala se za 57 postotnih bodova u odnosu na stopu u slučaju kontroliranog standardnog miniranja. To pokazuje da se metodom kontroliranog miniranja kumulativnim nabojem može dobiti ravna konturna površina i smanjiti stupanj oštećenosti okolnih stijena. Prema geološkim podacima hidroelektrane, stijena koja okružuje lokaciju ispitivanja miniranja je tvrda stijena. Kako je prikazano u tablici 8., stopa polovičnih bušotina pri kontroliranom standardnom

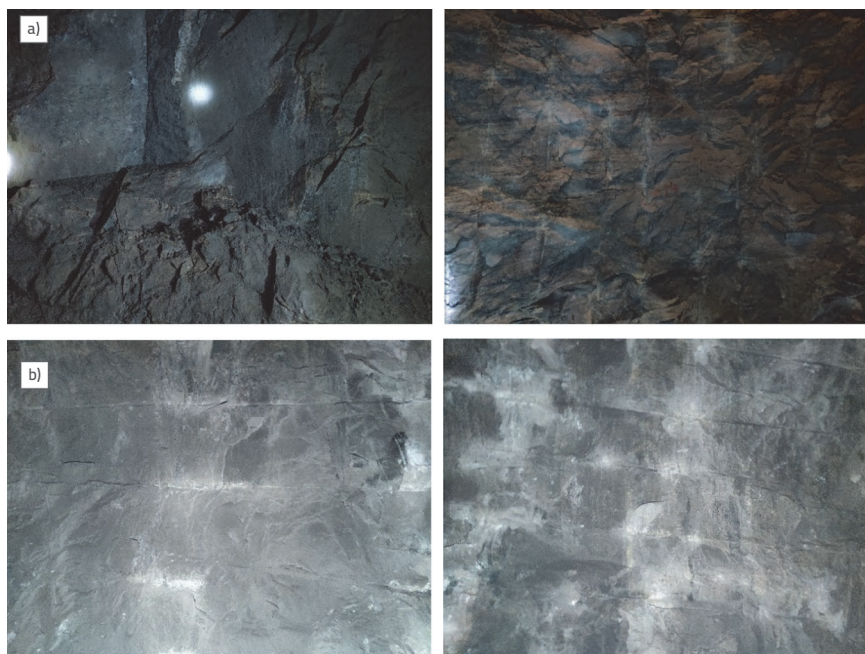
Tablica 7. Statistička tablica s podacima o postotku polovične bušotine

Metoda miniranja	Broj konturnih bušotina [broj]	Broj polovičnih bušotina [broj]	Postotak polovičnih bušotina [%]
Kontrolirano standardno miniranje	32	12	38
Kontrolirano standardno miniranje kumulativnim nabojem	21	20	95

Tablica 8. Kriteriji vrednovanja stope polovičnih bušotina

Litologija	Stopa polovičnih bušotina [%]	Ocjena kakvoće			
		Dobro	Bolje	Općenito	Loše
Tvrda stijena	> 90	> 90	70 – 90	50 – 70	< 50
Srednja stijena	> 70	> 70	50 – 70	30 – 50	< 30
Meka stijena	> 50	> 50	30 – 50	20 – 30	< 20

miniranju bila je manja od 50 %, a kvaliteta iskopa bila je loša. Nasuprot tomu, stopa polovičnih bušotina pri kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem bila je veća od 90 %, a ocjena kakvoće iskopa bila je dobra, čime se ističe superiornost kontroliranog miniranja kumulativnim nabojem u stvarnim iskopima. U kombinaciji s učinkom kontura dobivenim terenskim iskapanjem, na slici 19.a može se uočiti da je kvaliteta formiranja stijenske tunela pri kontroliranom standardnom miniranju bila loša te je postojao očit fenomen prekomjernog iskopa. Dubina viška iskopa iznosila je oko 20 cm, što je uzrokovalo jaka oštećenja sačuvane stijenske mase. Učinak miniranja bio je nezadovoljavajući i nije udovoljavao građevinskim zahtjevima. Istovremeno, prema slici 19.b, smanjenjem broja minskih bušotina za 30 % i pratećim smanjenjem količine eksploziva, konturna površina tunela nakon kontroliranog miniranja kumulativnim nabojem bila je vrlo glatka i ravna te su na njoj bili vidljivi tragovi polovičnih bušotina preostalih nakon eksplozije. Dokazano je da je moguće postići dobar učinak usmjerenog stvaranja pukotina pomoću metode miniranja kumulativnim nabojem u stvarnim iskopima, pri čemu energija eksploziva u potpunosti djeluje na stijensku masu u pravcu linije povezivanja između bušotina zahvaljujući učinku lijevka kumulativnog naboja kao vodiču. To može dovesti do stvaranja usmjerenih pukotina u stijenskoj masi, smanjiti štetu u smjeru povezivanja bušotina, smanjiti stupanj oštećenosti okolne stijene i poboljšati sigurnost i stabilnost podzemne konstrukcije. Postignuti su učinci iskapanja miniranjem visoke kvalitete i visoke učinkovitosti.



Slika 19. Učinak konture iskopa pri kontroliranom standardnom miniranju i kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem: a) Konturna površina iskopa nastala pri kontroliranom standardnom miniranju; b) Konturna površina iskopa nastala pri kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem

4.6. Rasprava o rezultatima mjerenja vibracija

Navedene brzine vibracija predstavljaju maksimalne vrijednosti čitavog događaja dobivene analizom vibracija pri miniranju. Trostrukim praćenjem brzine vibracija pri kontroliranom standardnom miniranju i kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem, komponente brzine vibracija praćene uređajem u svakom testu analizirane su u tri smjera, pri čemu je uzdužni smjer paralelan s osi tunela, vertikalni smjer je okomit na horizontalnu ravninu, a poprečni smjer je horizontalan i okomit na os tunela. Rezultati ispitivanja pri standardnom miniranju prikazani su u tablici 9., a rezultati ispitivanja pri kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem prikazani su u tablici 10. D označava udaljenost od središta miniranja, V_L označava brzinu vibracije u uzdužnom smjeru, V_V brzinu vibracije u vertikalnom smjeru, a V_T označava brzinu vibracije u poprečnom smjeru. Slika 20 prikazuje krivulje rezultata ispitivanja. Trendovi promjene vršne brzine vibracija pri kontroliranom standardnom miniranju i kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem bili su približno slični, kako je prikazano na slici 20. S povećanjem udaljenosti između mjerne točke i izvora detonacije, vršna brzina vibracija u svim smjerovima pri kontroliranom standardnom miniranju i kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem imala je očit trend pada. Krivulje vršne brzine vibracija pri kontroliranom standardnom miniranju i kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem dokazuju da se vršna brzina vibracija smanjivala brže kada je udaljenost od izvora detonacije bila bliža točki mjerenja, odnosno smanjivala sporije kada je udaljenost od izvora detonacije veća, što je bilo izraženije u slučaju

miniranja kumulativnim nabojem. Usporedbom rezultata praćenja vibracija triju skupina zabilježeni su tipični fenomeni i zakonitosti. U prvom nizu ispitivanja, maksimalna brzina vibracija pri kontroliranom standardnom miniranju u uzdužnom smjeru iznosila je 5,68 cm/s. Maksimalna brzina vibracija pri kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem iznosila je 4,60 cm/s u uzdužnom smjeru. U drugom nizu ispitivanja maksimalna brzina vibracija pri kontroliranom standardnom miniranju bila je 6,28 cm/s u uzdužnom smjeru, a pri kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem 5,23 cm/s, također u uzdužnom smjeru. U trećem nizu ispitivanja maksimalna brzina vibracija pri kontroliranom standardnom miniranju bila je 6,32 cm/s u uzdužnom smjeru, a pri kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem 5,21 cm/s u poprečnom smjeru.

Rezultati triju testova praćenja vibracija pri miniranju dokazuju da vršna

Tablica 9. Pregled rezultata ispitivanja standardnog miniranja

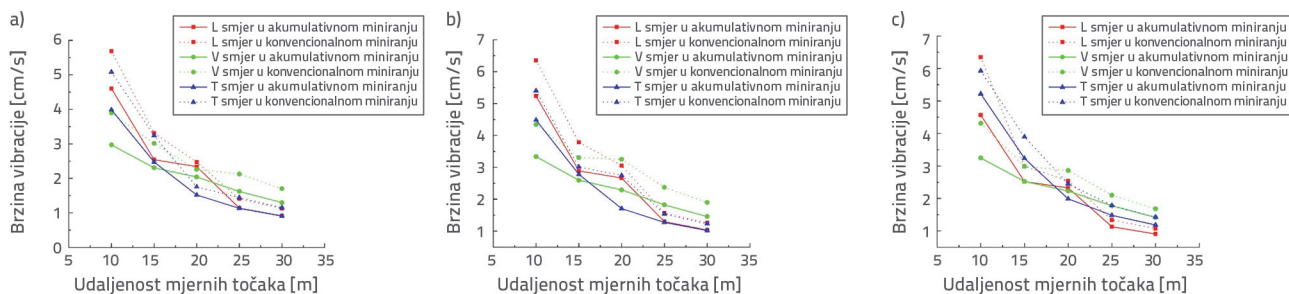
Broj testa	Broj mjerne točke	D [m]	V_L [cm/s]	Dominantna frekvencija, f [Hz]	V_V [cm/s]	Dominantna frekvencija, f [Hz]	V_T [cm/s]	Dominantna frekvencija, f [Hz]
1	MP1	10	5,68	109,9	3,91	359,9	4,03	420,9
	MP2	15	3,35	203,8	3,12	203,8	3,28	123,8
	MP3	20	2,60	57,2	2,16	57,2	1,81	312,2
	MP4	25	1,48	274,7	2,09	169,2	1,48	95,7
	MP5	30	1,01	123,8	1,75	137,9	1,03	95,8
2	MP1	10	6,28	156,2	4,47	91,9	5,47	156,2
	MP2	15	3,82	142,2	3,23	142,2	2,99	30,2
	MP3	20	3,29	403,6	3,42	127,4	2,90	29,2
	MP4	25	1,50	95,1	2,35	95,4	1,49	142,9
	MP5	30	1,24	113,2	1,97	83,4	1,23	285,2
3	MP1	10	6,32	313	4,48	90,1	5,98	260,4
	MP2	15	2,98	176	3,93	85,2	2,98	293
	MP3	20	2,52	313	2,91	88,4	2,48	334,8
	MP4	25	1,37	156	2,15	156,2	1,76	187,5
	MP5	30	1,21	99,7	1,55	58,6	1,47	195,3

Tablica 10. Pregled rezultata ispitivanja miniranja kontroliranim eksplozivnim nabojem

Broj testa	Broj mjerne točke	D [m]	V_L [cm/s]	Dominantna frekvencija, f [Hz]	V_V [cm/s]	Dominantna frekvencija, f [Hz]	V_T [cm/s]	Dominantna frekvencija, f [Hz]
1	MP1	10	4,60	31,9	3,07	156,2	4,10	312,5
	MP2	15	2,56	59,2	2,35	3,5	2,57	142,2
	MP3	20	2,38	137,9	2,21	59,2	1,54	142,9
	MP4	25	1,23	33,5	1,69	132,5	1,22	8,5
	MP5	30	0,90	102,7	1,47	97,4	0,91	7,9
2	MP1	10	5,23	234,1	3,35	99,7	4,54	76,8
	MP2	15	2,91	162,2	2,58	104,2	2,78	97,7
	MP3	20	2,80	123	2,35	260,4	1,82	293
	MP4	25	1,28	82,2	1,81	66	1,27	79,4
	MP5	30	1,02	85,2	1,61	73,2	1,01	82,2
3	MP1	10	4,56	173,6	3,24	66	5,21	15,7
	MP2	15	2,46	93,8	3,39	156,2	2,46	82,2
	MP3	20	2,42	93,8	2,36	75,6	1,98	85,2
	MP4	25	1,21	114,3	1,76	63,3	1,48	82,2
	MP5	30	0,87	76,8	1,47	80,8	1,34	76,8

brzina vibracija pri kontroliranom standardnom miniranju i kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem zadovoljava sigurnosne standarde za iskopavanje tunela miniranjem. Standardni raspon za miniranje tunela propisuje da vršna brzina vibracija mjerne točke na horizontalnoj udaljenosti od 10 m od izvora eksplozije treba biti manja od 10 cm/s. Vršna brzina vibracija svake mjerne točke od tri skupine u svim smjerovima pri kontroliranom standardnom miniranju bila je

veća od brzine odgovarajuće mjerne točke pri kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem, a vršna je brzina vibracija pri kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem smanjena za 10 % do 21 % u usporedbi s onom kod kontroliranoga standardnog miniranja. To pokazuje da se pri kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem može primijeniti veća energija eksplozije za formiranje usmjerenih pukotina između dviju minskih bušotina i lomljene stijene. Time se može učinkovito smanjiti



Slika 20. Usporedba vršne brzine vibracija u trima testovima miniranja: a) Prvi test; b) Drugi test; c) Treći test

brzina vibracija pri miniranju i smanjiti šteta na stijenskoj masi, što pogoduje stabilnosti podzemne komore i učinkovitije osigurava kvalitetu gradnje.

5. Zaključak

U ovom su radu kao pozadina istraživanja razmatrani stvarni građevinski problemi uočeni tijekom miniranja podzemnog tunela reverzibilne hidroelektrane Tianchi u Kini. Numerički izračuni i analize provedeni su pomoću računalnog programa i metode dinamičkih konačnih elemenata ANSYS/LS-DYNA i analizirana su svojstva tunela pod uvjetom *in situ* naprezanja. Utvrđen je dvodimenzionalni model spajanja fluida i čvrste tvari za simuliranje miniranja stijena i uspoređeni su i analizirani učinci širenja pukotina između dviju minskih bušotina nastalih pri kontroliranom standardnom miniranju i kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem. Ispitan je mehanizam stvaranja usmjerenih pukotina pri kontroliranom miniranju i zakonitost raspodjele pukotina pod različitim razmacima između bušotina i *in situ* naprezanja, a rezultati numeričke analize potvrđeni su terenskim ispitivanjem. Glavni zaključci su sljedeći.

- U kombinaciji s metodom glatkog miniranja, računalni program dinamičkih konačnih elemenata ANSYS/LS-DYNA primijenjen je za analizu svojstava naprezanja trodimenzionalnog modela miniranja tunela i izračunano je stanje raspodjele naprezanja sloja miniranja pod početnim uvjetima naprezanja.
- Kada je promjer bušotine 42 mm, pri kontroliranom standardnom miniranju mogu nastati pukotine otprilike duž smjera spajanja između bušotina s razmakom od 50 cm, što

je približno za 12 puta veće od promjera. Dubina oštećenja okolne stijene iznosi do 40 cm, što ne pogoduje stvaranju ravne konturne površine nakon miniranja. Pri kontroliranom standardnom miniranju mogu nastati pukotine otprilike duž smjera spajanja između bušotina s razmakom od 80 cm, što je približno za 20 puta veće od promjera. Dubina oštećenja okolne stijene kontrolira se do 15 cm, što pogoduje stvaranju ravne konturne površine nakon miniranja.

- Rezultati ispitivanja miniranja na terenu pokazuju da se razmak između bušotina pri kontroliranom miniranju kumulativnim nabojem povećao za 50 % u usporedbi s razmakom pri kontroliranom standardnom miniranju, a postotak polovičnih bušotina povećao se za 57 postotnih bodova nakon iskopa. Rezultati praćenja vibracija *in situ* miniranja pokazuju da je vršna brzina vibracija izazvana kontroliranim miniranjem kumulativnim nabojem smanjena za 10 do 21 % u usporedbi s brzinom pri kontroliranom standardnom miniranju. Prilikom miniranja dubokog tunela primjenjuje se kontrolirano miniranje kumulativnim nabojem kako bi se dobila glatka i ravna kontura površine i postigao idealan učinak miniranja u kontroliranom smjeru.

Zahvala

Ovo istraživanje podržali su Zaklada za doktorska znanstvena istraživanja Tehnološkog i poslovnog sveučilišta Shandong, Kina (Br. odobrenja BS202009), Nacionalna prirodoslovna zaklada Kine (Projekti br. 51804178 i br. 52109165) i Zaklada za doktorska znanstvena istraživanja Tehnološkog i poslovnog sveučilišta Shandong, Kina (Br. odobrenja BS201931).

LITERATURA

- [1] Wei, W.L., Chen, Y.Q., Ren, X.J., Wang, J.H., Wang, Z.Q., et al.: Experimental and numerical study on the influence of plastic modified concrete as attenuation layer on explosion effect. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2250116 (2022), <https://doi.org/10.1142/S0219455422501164>.
- [2] Pugh, E.: *Theory of Jet Formation by Charges with Lined Conical Cavities*, 1952.
- [3] Hirsch, E.: The natural spread and tumbling of the shaped charge jet segments. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 6 (1981) 4, pp. 104-111.
- [4] Hayes, G.: Linear shaped-charge (LSC) collapse model. *Journal of materials science*, 19 (1984) 9, pp. 3049-3058.
- [5] He, M., Cao, W., Shan, R., et al.: New technique of bidirectional shaped charge tensile blasting. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 12 (2003), pp. 2047-2051.

- [6] Fu, L., Wang, W., et al.: Comparison of jet forming mechanism between ring and linear shaped charge. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 29 (2014) 5, pp.470-474.
- [7] Duan, B., Zhou, Y., Zheng, S., et al.: Blasting demolition of steel structure using linear cumulative cutting technology. *Advances in Mechanical Engineering*, 9 (2017) 11, 2071941996.
- [8] Xu, W., Wang, C., Chen, D.: The jet formation and penetration capability of hypervelocity shaped charges. *International Journal of Impact Engineering*, 132 (2019).
- [9] Wang, F., Li, B., et al.: Effect of cone angle on cutting performance of linear shaped charge. *Initiators and pyrotechnics*, 3 (2019), pp. 22-25.
- [10] Wan, D., Zhu, Z., Liu, R., Liu, B., Li, J.: Measuring method of dynamic fracture toughness of mode I crack under blasting using a rectangle specimen with a crack and edge notches. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 123 (2019), 104104, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104104>.
- [11] Li, H., Liu, T., Liu, Y., Li, J., Xia, X., Liu, B.: Numerical modeling of wave transmission across rock masses with nonlinear joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49 (2019) 3, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0766-2>.
- [12] Li, B.: *Numerical Simulation of Elastic Resistance of Gradient Composites*. Changsha: Central South University, 2013.
- [13] Liu, H., Lv, S., Zhang, L., Yuan, X.: A dynamic damage constitutive model for a rock mass with persistent joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 75 (2015), pp. 132-139, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.01.013>.
- [14] Huang, J., Li, X., Luo, Y., Liu, T., Dong, Q., Xu, K.: Numerical simulation of influence of filled joint on the crack formed by notch hole blast. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2017 (2017), pp. 1-17, <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1392366>.
- [15] Wang, Z., Li, Y., Shen, R.: Numerical simulation of tensile damage and blast crater in brittle rock due to underground explosion [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44 (2007) 5, pp. 730-738.
- [16] Xie, H., Ruan, H.: *Directional fracture blasting numerical simulation and experimental study*, Chengdu, China: IEEE Computer Society, 2012.
- [17] Yang, R., Bawden, W.F., Katsabanis, P.D.: A new constitutive model for blast damage. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 33 (1996) 3, pp. 245-254, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00064-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00064-X).
- [18] Xiao D., Li B., Pu C., et al.: *Model test and numerical simulation for directional pressure relief blasting*, Taichung, Taiwan: Trans Tech Publications Ltd., 2013.
- [19] *LS-DYNA keyword user's manual Version 971*, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2007.
- [20] Zhou, Y., Gou, D., et al.: Numerical simulation analysis of rock breaking effect of cumulative blasting. *Safety in coal mines*, 45 (2014) 12, pp. 218-220.