

Primljen / Received: 19.3.2016.

Ispravljen / Corrected: 7.7.2017.

Prihvaćen / Accepted: 30.9.2017.

Dostupno online / Available online: 10.12.2018.

# Ponašanje grupe pilota pri naglom rušenju potporne konstrukcije

Autor:



Mr.sc. **Rajesh Prasad Shukla**, dipl.ing.građ.  
Institut za infrastrukturno inženjerstvo  
Građevno i infrastrukturno inženjerstvo  
Ahmedabad Gujarat, Indija  
[shuklarajesh4687@gmail.com](mailto:shuklarajesh4687@gmail.com)

Prethodno priopćenje

**Rajesh Prasad Shukla**

## Ponašanje grupe pilota pri naglom rušenju potporne konstrukcije

Pri izvođenju novih građevina u urbanim područjima i na padinama često se primjenjuju postupci podupiranja iskopa pomoću odgovarajućih potpornih konstrukcija. U ovom je radu prikazano ponašanje modela pilota raznih konfiguracija pri pomicanju tla uslijed rušenja potporne konstrukcije. Ponašanje grupe pilota u velikoj mjeri ovisi o udaljenosti između grupe pilota i potporne konstrukcije. Pojavljuje se veći pomak kod reda pilota koji je paralelan s potpornom konstrukcijom nego kod reda pilota koji je postavljen okomito u odnosu na potpornu konstrukciju.

**Ključne riječi:**

pomicanje tla, pilot, potporna konstrukcija, pomak, konfiguracije grupe

Preliminary note

**Rajesh Prasad Shukla**

## Pile groups subjected to abrupt collapse of retaining structure

Excavations supported by retaining structures are very common in the construction of new structures in urban and hilly areas. This paper presents behaviour of model piles of various configurations, when exposed to soil movement induced by collapse of the retaining structure. The performance of pile groups varies significantly with the distance between the pile group and the retaining structure. A pile row parallel to the retaining structure experiences large displacement as compared to pile rows that are perpendicular to the structure.

**Key words:**

soil movement, pile, retaining structure, displacement, group configuration

Vorherige Mitteilung

**Rajesh Prasad Shukla**

## Verhalten von Pfeilern bei plötzlichem Einsturz einer Stützkonstruktion

Bei der Ausführung neuer Gebäude in städtischen Gebieten und an Hängen werden häufig Verfahren der Unterstützung des Aushubs durch entsprechende Stützkonstruktionen angewendet. In dieser Abhandlung wird das Verhalten von Pfeilermodellen unterschiedlicher Konfigurationen bei Erdbewegung infolge des Einsturzes der Stützkonstruktion dargestellt. Das Verhalten der Pfeilergruppen hängt weitgehend von den Abständen zwischen den Pfeilergruppen und der Stützkonstruktion ab. Bei Pfeilerreihen, die parallel zur Stützkonstruktion verlaufen, treten größere Verschiebungen auf, als bei Pfeilerreihen, die senkrecht zur Stützkonstruktion angeordnet sind.

**Schlüsselwörter:**

Erdbewegung, Pfeiler, Stützkonstruktion, Verschiebung, Konfiguration der Gruppe

## 1. Uvod

Teške konstrukcije obično se temelje na pilotima. Temelji na pilotima također su učinkoviti za premoštavanje rahlog materijala u površinskim slojevima tla [1]. Po načinu prenošenja opterećenja, piloti se dijele na: aktivne pilote i pasivne pilote. Aktivni se piloti opterećuju na vrhu te se opterećenje prenosi s pilota na tlo. U slučaju pasivnih pilota, opterećenje se prenosi s tla na pilote. Pasivni piloti mogu preuzeti velika bočna opterećenja izazvana pomicanjem tla uslijed aktiviranja klizišta, opterećenja nasipa, iskopa tla, podzemne gradnje, izvođenja tunela te zbog provođenja mnogih drugih aktivnosti [2].

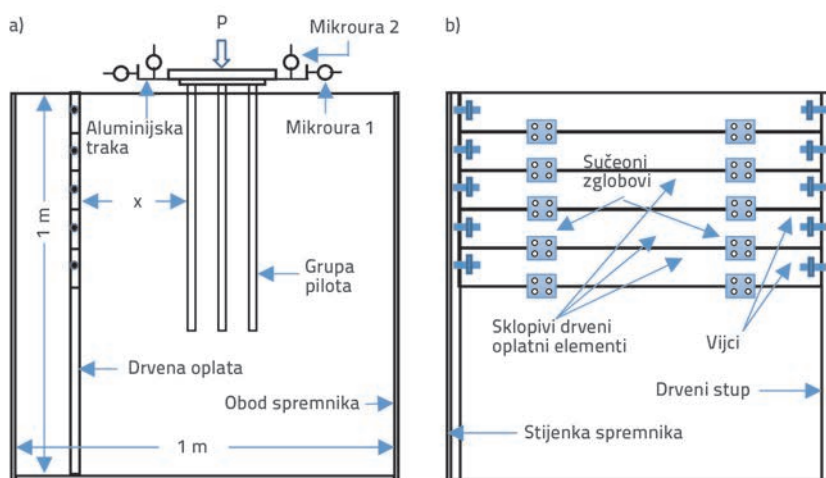
Ponekad se za potrebe gradnje trebaju obaviti veliki iskopi koji mogu izmijeniti postojeće uvjete u tlu te tako utjecati na ponašanje temelja i same građevine. Duboki iskop i rušenje potpornog zida u blizini postojećih pilota smanjuje nosivost na bazi pilota i bočne pritiske na pilot. Popuštanje vertikalnog pritiska može dovesti do slijeganja tla pa tako u konačnici i do smanjenja trenja na plaštu pilota, pojavu vlačnih pukotina u tlu, a ponekad i potpunog rušenja potporne konstrukcije i/ili temelja [3]. Kod pilota koji se nalaze uz neosigurani iskop primjećuje se veće slijeganje i bočni pomak nego kod pilota koji su smješteni uz osigurani iskop. Poulos [4] razmatra razne moguće slučajeve potporne konstrukcije tla te za iznalaženje odgovarajućeg rješenja primjenjuje pojednostavljenu analizu graničnih elemenata. Ta je analiza pokazala da pomicanje tla samo po sebi ne utječe na nosivost dubokih temelja. Međutim, u projektiranju se važnost toga parametra ipak ne smije zanemariti jer pomicanje tla utječe na integritet temelja na pilotima. U nekim slučajevima temeljenja na pilotima koji su prikazani u literaturi, pomicanje tla utječe na stabilnost građevine i temelja. Razlog tome je smanjenje gustoće tla i bočnih pritisaka uzrokovano pomicanjem tla uslijed postupka iskopa [5-8]. Ong [7] je izmjerio uleknučje instrumentizirane grupe betonskih pilota pri bočnom pomicanju tla uzrokovanom slomom kosine. Ispitivanje je provedeno na pilotima u stvarnoj veličini, a mjerenje je obavljeno prije i nakon pomicanja tla. Istraživači su do sada razvili brojne analitičke, teoretske i eksperimentalne pristupe za predviđanje odgovora pilota uslijed pomicanja tla. Međutim, u većini se istraživanja razmatraju iskopi osigurani potpornim konstrukcijama [8-25]. Abbas i dr. [26] proveli su numeričku analizu pomoću programa Plaxis, nakon čega su ustanovili da konfiguracija grupe pilota bitno utječe na njeno ponašanje u slučaju djelovanja bočnog opterećenja. Za ocjenu odgovora pilota u blizini poduprtih iskopa do sada je pripremljen velik broj projektnih dijagrama [27-28]. U nekim se istraživanjima razmatra slijeganje grupa pilota pod utjecajem pomicanja tla uslijed iskopa [29-30]. Najveći moment savijanja te deformacija pilota smanjuju

se kod pasivnih pilota usporedno s povećanjem koeficijenta prekonsolidacije [31].

Iz literature se vidi da je najveći broj istraživanja proveden na pilotima ispod poduprtog iskopa te da se u tim istraživanjima ne uzima u obzir radno opterećenje. Također je moguće rušenje potporne konstrukcije koja sprječava pomicanje tla u blizini pilota, i to zbog iskopa ili iz nekog drugog razloga, što bi omogućilo naknadno pomicanje poduprtog tla. U takovim slučajevima način pomicanja tla ovisi o načinu sloma potporne konstrukcije. Tlo se pomiče sporo u slučaju postupnog popuštanja potporne konstrukcija, dok je s druge strane taj pomak vrlo brz u slučaju naglog rušenja potporne konstrukcije. Na način deformacije potpornih konstrukcija utječu svojstva tla, potporni sustav te način građenja. Aktivnosti građenja na gradilištu su često nepredvidive, pa se u ovom istraživanju pretpostavlja da su građevinske aktivnosti izazvale naglo rušenje potporne konstrukcije. Takav slučaj bi mogao biti dominantan u brdovitim područjima gdje se izvode potporni zidovi i poduzimaju druge odgovarajuće mjere kako bi se onemogućilo pomicanje tla i osigurala stabilnost u zoni pored postojećih temelja i građevina. U ovom istraživanju su obavljena ispitivanja na modelima kako bi se odredio odgovor pojedinačnih modela pilota i grupa pilota pod utjecajem sile pomicanja tla uzrokovanog naglim rušenjem potporne konstrukcije. Ispitivanja su obavljena na grupama pilota (2 x 1, 1 x 2, 3 x 1, 1 x 3 i 2 x 2) i pri različitim razmacima između pilota (trostruki, četverostruki i šesterostruki promjer pilota). Varirana je i analizirana i udaljenost između potporne konstrukcije i grupe pilota. Bočni pomak pilota izmjereno je iskazan u bezdimenzijskom obliku.

## 2. Postav pokusa i program ispitivanja

Na slici 1. (nije u mjerilu) daje se shematski prikaz modela spremnika s potpunim postavom. Spremnik (1 m x 1 m x 1 m) je sastavljen od čeličnih ploča debljine 6 mm. Postav pokusa sastoji se od modela spremnika, modela pilota, mjernih uređaja poput mjernih mikroura, sustava za nanošenje opterećenja, dodatne



Slika 1. Detalji postava pokusa: a) Reprezentativni postav pokusa; b) Raspored drvene oplate

opreme, uređaja za sipanje pijeska i drvene oplata pričvršćene na stijenku spremnika.

Drvena oplata tako je projektirana da može simulirati naglo rušenje potporne konstrukcije (slika 1.b). Ta je oplata čvrsto postavljena u model spremnika i sastoji se od pet rotirajućih dijelova. Dijelovi su međusobno povezani pomoću dva sučeena zgloba. Ti zglobovi omogućuju rotaciju svakog dijela ali samo prema van, čime se simulira rušenje potporne konstrukcije. Oplata je sa spremnikom povezana pomoću dva drvena stupa. Svaki pokretni dio zasebno je povezan s drvenim stupovima pomoću dva vijka. Otpuštanje tih vijaka omogućuje rotirajućem dijelu da slobodno padne a da pritom ni na koji način ne utječe na preostale donje dijelove. Drveni su stupovi čvrsto povezani sa spremnikom pomoću vijaka i matica. Dubina pomicanja tla iskazuje se kao dužina pilota. Koeficijent dubine pomaka tla zapravo je odnos između visine srušene potporne konstrukcije i dužine pilota. Detalj koeficijenta dubine pomaka tla prikazan je u tablici 1.

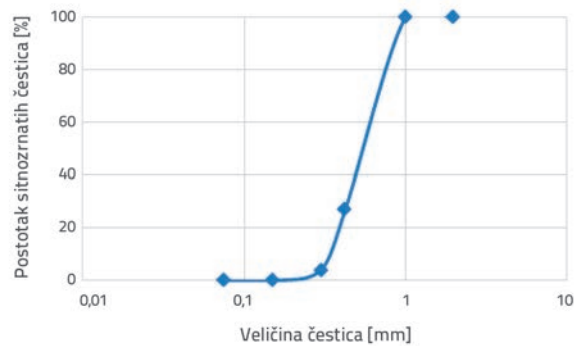
Tablica 1. Kritična visina potporne konstrukcije

Dužina pilota, L [cm]	Broj otpuštenih elemenata drvene oplata	Visina potporne konstrukcije, $H_c$ [cm]	Koeficijent dubine pomaka tla ( $H_c/L$ )
32	0	0	0
	1	10	0,312
	2	22	0,687
64	0	0	0
	1	10	0,156
	2	22	0,344
	3	34	0,532

Za temeljno tlo je korišten pijesak klase II prema indijskoj normi. Indeksna svojstva tla prikazana su u tablici 2. Uobičajeno ime tog pijeska je Ennore i za njega je karakteristično da je postojan, tj. ponašanje mu je neovisno o vremenu. Gubitak pri ekstrakciji pomoću vruće HCl iznosi samo 0,11 %. Rezultati prosijavanja prikazani su na slici 2. Ovaj se pijesak sastoji od poluuglatih zrna sivo-bijele boje.

Modeli pilota izrađeni su od šupljih aluminijskih cijevi čiji je vanjski promjer iznosio 32,0 mm, a unutarnji 30,0 mm. Kako bi se promijenio koeficijent ukopavanja, korištene su različite dužine

pilota pri čemu je njegov promjer uvijek bio isti. Upotrijebljene su dvije dužine pilota, tj. 320 mm i 640 mm, kako bi se postigao koeficijent ukopavanja 10 u prvom slučaju i 20 u drugom. Piloti su tako izrađeni da se mogu uzdužno razdvojiti na dva dijela. To je olakšalo postavljanje mjerača deformacija unutar pilota. Na vrhu pilota izvedeni su navoji kako bi se omogućilo spajanje s naglavicama.



Slika 2. Granulometrija pijeska korištenog u pokusu

Pomak pilota mjereno je pomoću dvije mikroure s magnetnim donjim dijelom, a njihova osjetljivost je iznosila 0,01 mm. Mikroure 1 služila je za mjerenje bočnog pomaka, a mikroure 2 za mjerenje vertikalnog pomaka pilota. Odgovarajući spojevi i pribor korišteni su za pričvršćenje mikroure na potrebno mjesto te za spajanje pilota s naglavicom. Stezaljke tipa C i ostali spojevi s vijkom i maticom korišteni su za povezivanje i odvajanje grupe pilota od modela spremnika. Korišteni su i drugi pomoćni uređaji i sredstva kako bi se omogućila uspješna provedba pokusa.

### 3. Eksperimentalni postupak

Tlačna ispitivanja su obavljena kako bi se odredila nosivost grupe pilota. Na temelju rezultata određeno je sigurno opterećenje kako za pojedinačne pilote tako i za grupe pilota. Sigurno opterećenje određeno tijekom tlačnih ispitivanja nanoseno je na pilote podvrgnute naglom bočnog pomicanju tla. Detaljan prikaz tlačnih ispitivanja navodi se u radu koji su objavili Shukla i Patra [32]. Za sipanje pijeska u spremnik u svrhu postizanja osnovne gustoće primijenjena je metoda kišenja (tzv. rain fall metoda) u okviru koje se pijesak ispušta s određene visine i

Tablica 2. Svojstva pijeska korištenog u pokusu

Svojstvo	Opis	Svojstvo	Opis
Maksimalna gustoća	16,8 kN/m <sup>3</sup>	Jedinična težina	15,61 kN/m <sup>3</sup>
Minimalni koeficijent pora ( $e_{min}$ )	0,58	Koeficijent pora ( $e$ )	0,672
Minimalna gustoća	14,4 kN/m <sup>3</sup>	Koeficijent zakrivljenosti	0,97
Maksimalni koeficijent pora ( $e_{max}$ )	0,78	Koeficijent nejednolikosti	1,70
Relativna gustoća pijeska	54,3 %	Trenje između pilota i tla ( $\delta$ )	20,50
Relativna gustoća	2,64	Kut unutarnjeg trenja	34°

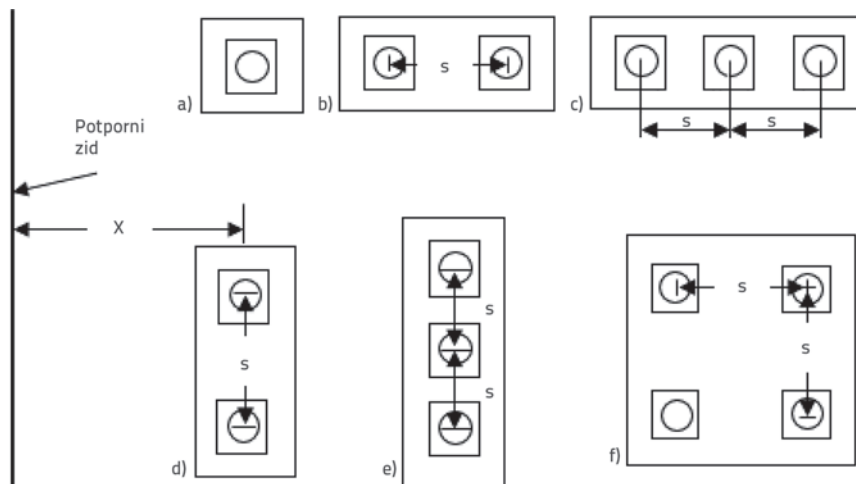
pada u spremnik. Neki su se istraživači već koristili tom tehnikom za postizanje ponovljivih gustoća [33-34].

Na sve su pilote nanese oznake do dvije trećine dubine ukopavanja. Piloti su povezani s naglavnicom izvan spremnika. Označene su i stijenke spremnika kako bi se definirala razina vrha pilota prilikom punjenja pijeskom. Nakon što je pijesak dosegnuo određenu razinu u spremniku, piloti su obješeni pomoću četiri stezaljke tipa C i dvije plosnate čelične ploče. U ovom je koraku potrebna vrlo visoka razina preciznosti kako bi naglavnica pilota bila potpuno ravna. Ravnost naglavnice pilota provjerena je pomoću libele, te je ravnost pomogla i u održavanju vertikalnog opterećenja

naglavnice pilota. Zatim je nastavljeno unošenje pijeska, što je trajalo sve dok nije postignuta razina označena na obodu pilota. Kako je do tada postignuta dovoljna dubina pilota u pijesku, stezaljke su otpuštene a obje plosnate ploče brižljivo su odvojene od naglavnice pilota. Još jednom je provjerena razina naglavnice kako bi se potvrdila horizontalna poravnost. Ponovno je dodan pijesak, i to sve do vrha spremnika. Nakon toga je još jednom provjerena ravnost naglavnice.

Mjerne mikroure su postavljene u odgovarajući položaj pomoću dviju željeznih pločica i čeličnog stupa. Dvije L - trake i dvije ravne aluminijske trake povezane su s naglavnicom pilota pomoću vijaka i matica. Igle dviju mikroure (pomoću kojih se mjeri bočni pomak) postavljene su na traku u obliku slova L, a igle preostalih dviju mikroure (kojima se mjeri vertikalni pomak) postavljene su na ravne aluminijske trake. Na taj se način omogućilo izravno nanošenje opterećenja na naglavnicu pilota. Još jednom je provjerena ravnost naglavnice te je na nju pričvršćena ravna okrugla ploča. Ta ploča prenosi opterećenje u slučaju jednog pilota i redova pilota, a u slučaju kvadratnih grupa pilota, opterećenje se izravno nanosi na naglavnicu pilota. Sigurno opterećenje pilota, definirano tijekom tlačnih ispitivanja, nanese se na sredinu naglavnice. Gustoća pijeska provjerena je prije i nakon nanošenja opterećenja kako bi se ustanovilo da faza opterećenja nije utjecala na njegovu gustoću. Gustoća pijeska izmjerena je dinamičkim penetrometrom. Pokus je privremeno zaustavljen kako bi se omogućilo slijeganje pilota nakon nanošenja opterećenja. Pokus je nastavljen nakon stabiliziranja očitavanja na mikrourama.

Rušenje potporne konstrukcije simulirano je tako što je omogućen pad gornjeg dijela drvene oplata. Nakon nekog vremena očitane su i zabilježene vrijednosti iskazane na mikrourama. Za pilote čiji koeficijent ukopavanja iznosi 10, iskop je nastavljen sve do koeficijenta dubine 0,65, a kod pilota s koeficijentom ukopavanja 20, iskop je obavljen do koeficijenta dubine 0,52. Vrijednosti vertikalnog i horizontalnog pomaka očitane su izravno s mikroura. Profil pomaka tla izmjeren je



Slika 3. Konfiguracije grupa pilota korištene u ovom istraživanju: a) jedan pilot; b) 1 x 2; c) 1 x 3; d) 2 x 1; e) 3 x 1; f) 2 x 2

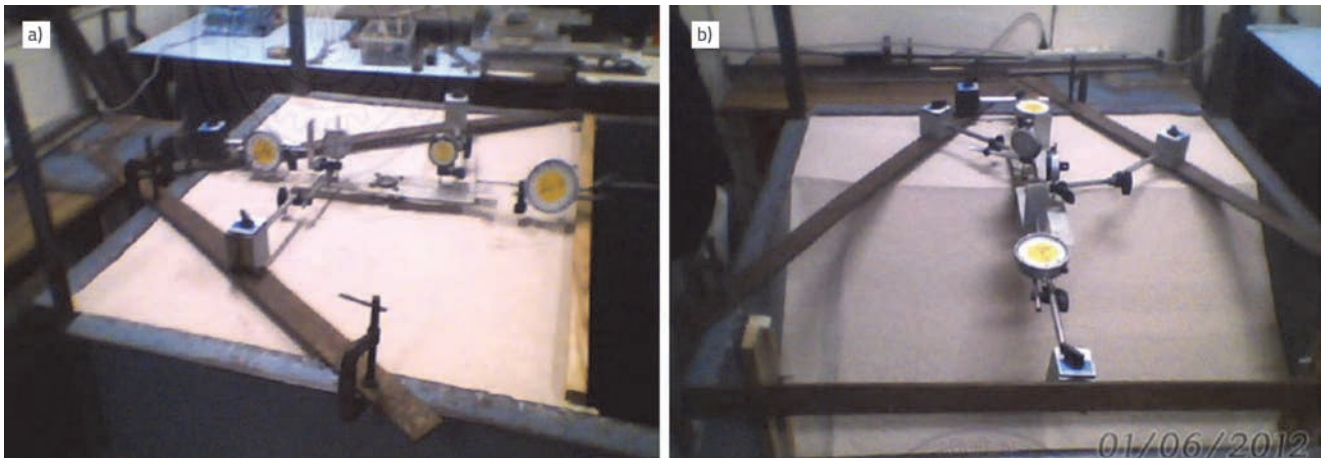
pomoću vertikalnih linija koje su ucrtane na stijenu spremnika. Te vertikalne linije označavaju bočnu udaljenost od potporne konstrukcije.

Konfiguracije grupa pilota korištene u ovom istraživanju prikazane su na slici 3. Udaljenost (X) između pilota i potporne konstrukcije izmjerena je od sredine prvog reda pilota i potporne konstrukcije. Grupe pilota 2 x 1 i 3 x 1 paralelne su s potpornom konstrukcijom, a grupe 1 x 2 i 1 x 3 okomite su na potpurnu konstrukciju. U analizi je razmatrano ukupno šest konfiguracija. Neki su pokusi ponovljeni u svrhu provjere rezultata.

#### 4. Rezultati i rasprava

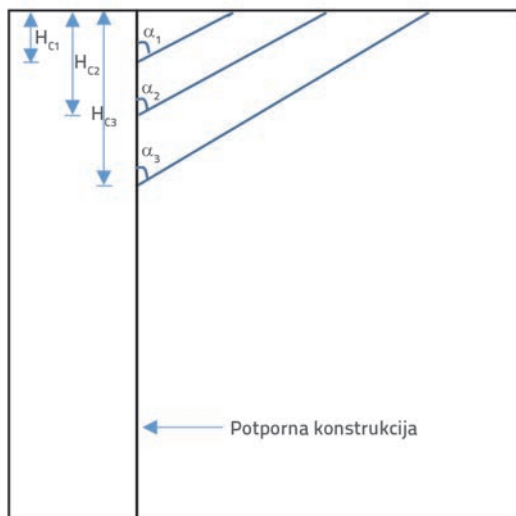
Bočni pomak (eng. *Lateral displacement* - LD) pilota prikazan je u bezdimenzijskom obliku kao odnos pomaka pilota i visine srušene potporne konstrukcije. Isto tako, razmak između pilota i potporne konstrukcije izražen je na osnovi visine potporne konstrukcije. Na slici 4. prikazan je razmještaj uređaja za jedan neopterećeni pilot prije i nakon rušenja potporne konstrukcije. U prijašnjim istraživanjima sile koje su djelovale na pilote postupno su se povećavale usporedno s povećanjem dubine pomicanja tla i to zbog postupnog sloma potporne konstrukcije [3, 21]. Međutim, u ovom istraživanju je bočno opterećenje pilota po jedinici dužine povećavano brzo zbog naglog rušenja potporne konstrukcije. Za razliku od prethodnih istraživanja, pomak tla uzrokovan je rušenjem potporne konstrukcije, a ne uslijed iskopa [8-22]. Rezultati ovog istraživanja ne mogu se izravno primijeniti na uvjete u naravnoj veličini zbog niskog odziva pritiska (visoka dilatacija / niska krutost) u ovom istraživanju.

Pomak pijeska mjereno je tijekom nekoliko ispitivanja i ustanovljeno je da pokos pijeska nije potpuno slobodan pokos (tzv. free slope), iako je zapravo vrlo blizu tome. Slika 5. prikazuje tipičan profil pokosa za različite visine srušene potporne konstrukcije za slučaj grupe pilota 2 x 1 koja je od potporne konstrukcije udaljena 20,4 cm. Profil pomicanja tla ovisi o nekoliko faktora. Međutim, taj profil ipak značajno ovisi o visini



Slika 4. Razmještaj uređaja za pilot bez opterećenja: a) prije rušenja; b) nakon rušenja potporne konstrukcije

( $H_c$ ) srušene potporne konstrukcije. Izmjereni kut " $\alpha$ " bitno je porastao kada je vrijednost  $H_c/L$  porasla s 0,156 na 0,344. Ipak, kut  $\alpha$  raste tek neznatno ako se vrijednost  $H_c/L$  poveća na 0,534. Potrebna su dodatna opsežna istraživanja kako bi se odredio profil pomicanja tla za različite vrijednosti relativne gustoće, udaljenosti između pilota i potporne konstrukcije, za efekt interakcije grupe pilota te visine srušene potporne konstrukcije, a pritom se trebaju provoditi pokusi u velikom mjerilu.

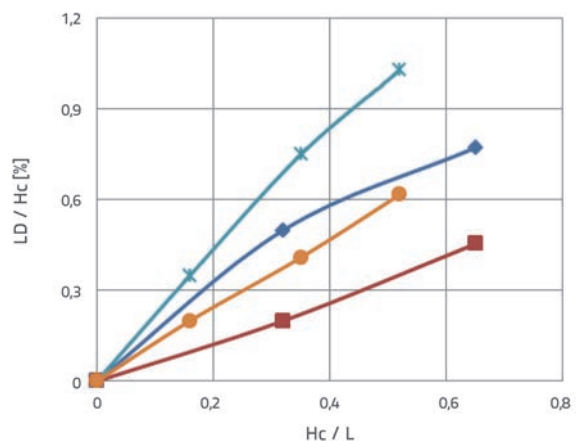


Slika 5. Profil pomaka tla s visinom srušene potporne konstrukcije

#### 4.1. Pojedinačni piloti

Bočni pomak jednog pilota prikazan je na slici 6. Bez obzira na druge parametre, pomaci pojedinačnog pilota su se povećavali s povećanjem visine srušene potporne konstrukcije. Isto tako, pomaci su se povećavali usporedno sa smanjenjem razmaka između pilota i potporne konstrukcije.

Za neki određeni koeficijent dubine pomaka tla, bočni pomak je veći kod pilota s većim koeficijentom ukopavanja ( $L/d = 20$ ) u usporedbi s pilotima s manjim koeficijentom ukopavanja ( $L/d = 10$ ).



Slika 6. Bočni pomak jednog pilota

#### 4.2. Grupe pilota

Ponašanje grupe pilota ovisi o koeficijentu ukopavanja pilota ( $L/d$ ), razmaku između grupe pilota i potporne konstrukcije ( $X$ ), koeficijentu dubine pomicanja tla ( $H_c/L$ ) i o uvjetima opterećenja. Osim tih faktora, ponašanje grupe pilota također ovisi i o interakcijskom efektu grupe, koji se može analizirati uzimajući u obzir konfiguraciju grupe, razmak između pilota ( $s$ ) i broj pilota ( $n$ ) u grupi pilota. Na ponašanje grupe pilota utječe i svodno djelovanje tla. U nekoherentnom tlu, svodno djelovanje ovisi o lokaciji prvog reda grupe pilota, a bitno se smanjuje kod ostalih (sekundarnih) redova grupe pilota [35]. Prvi red pilota djeluje kao štit protiv pomicanja tla te smanjuje bočni i vertikalni pomak.

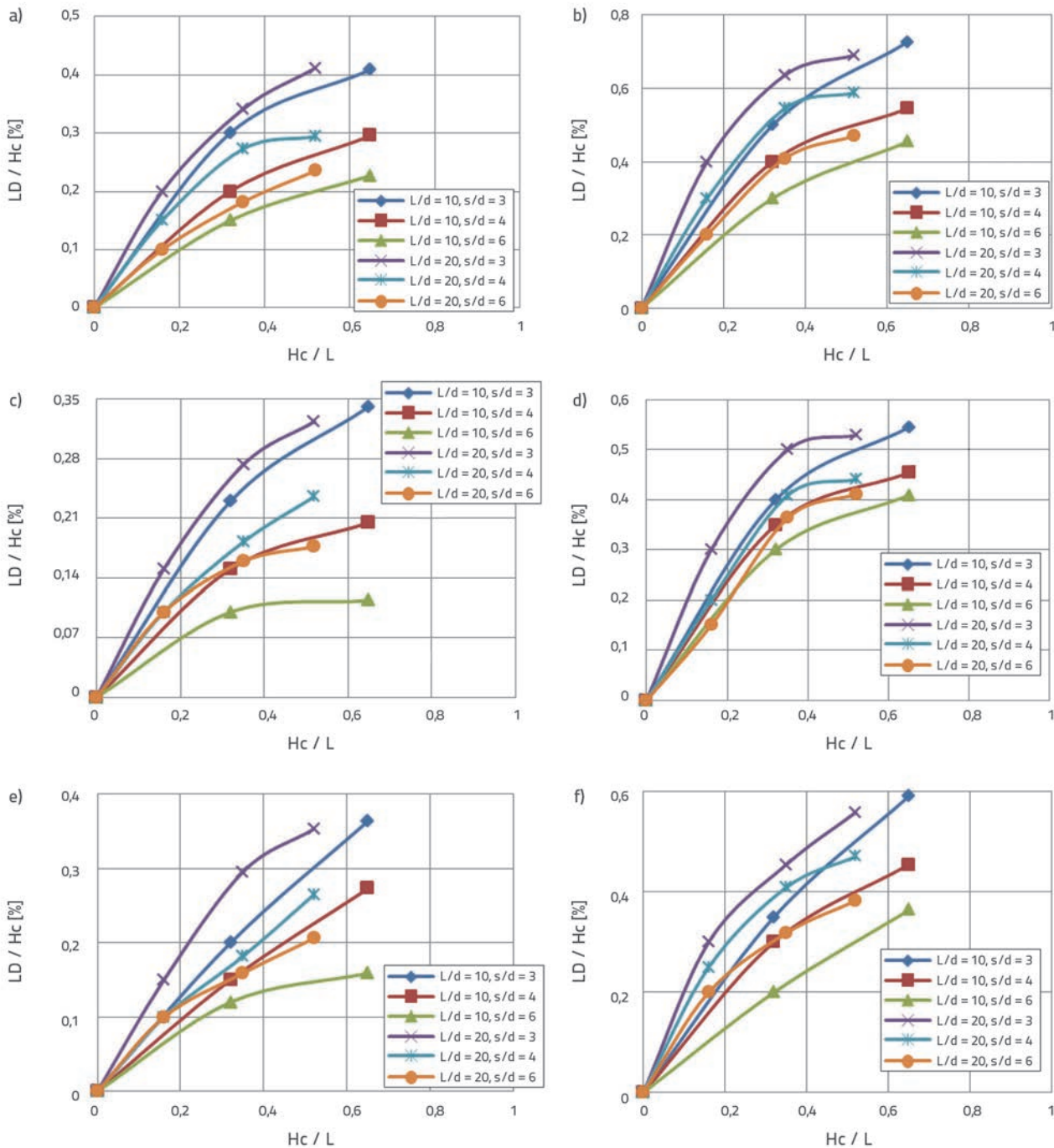
##### 4.2.1. Utjecaj koeficijenta dubine pomaka tla

Utjecaj koeficijenta dubine pomaka tla na bočni pomak grupa pilota prikazan je na slici 7. za različite grupe pilota. Slično kao i kod ponašanja pojedinačnih pilota, pomak grupe pilota povećava se s povećanjem koeficijenta dubine pomaka tla

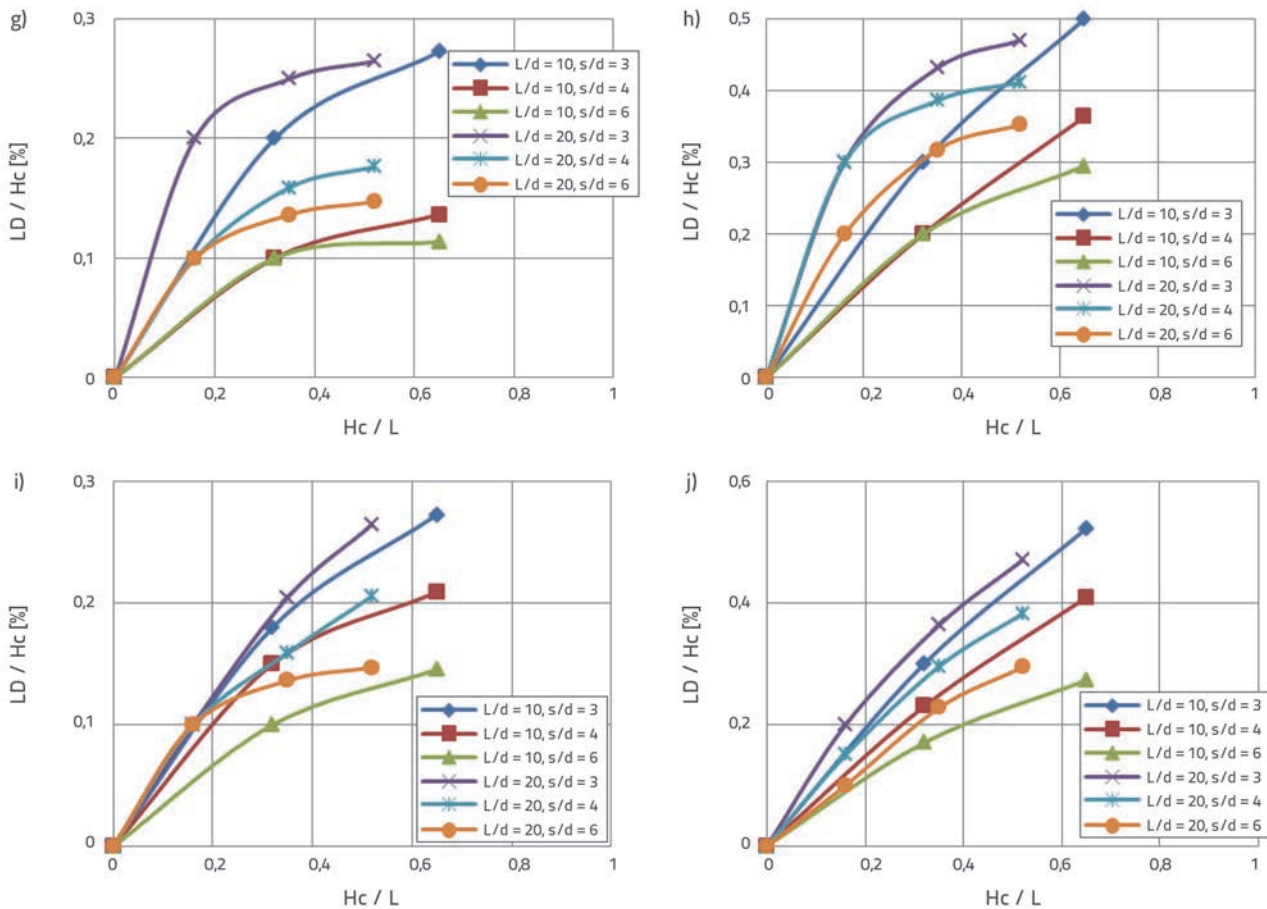


( $H_c/L$ ). Bočna sila koja djeluje na pilote povećava se usporedno s povećanjem visine srušene potporne konstrukcije, što u konačnici dovodi do povećanja bočnog pomaka. Nakon određenog koeficijenta dubine pomaka tla, stopa povećanja pomaka smanjuje se za grupu pilota s koeficijentom ukopavanja 20. Kod pilota s malim koeficijentom ukopavanja ( $L/d = 10$ ), pomak se povećava usporedno s koeficijentom dubine pomaka tla.

Za grupu pilota s koeficijentom ukopavanja 20, koja je postavljena okomito na potpornu konstrukciju, povećanje koeficijenta dubine pomaka tla s 0,344 na 0,52 ne dovodi do značajnog povećanja bočnog pomaka pilota. Iako su bočni pomaci u ovom slučaju relativno veliki, trend krivulja vrlo je sličan onome kako je iskazao Dominic [3]. Pomak je velik jer su piloti podvrgnuti brzom pomaku tla relativno velikog volumena. Konfiguracija pilota bitno utječe na ponašanje



Slika 7. Utjecaj koeficijenta dubine pomaka tla na bočni pomak grupa pilota: a) 2 x 1,  $X/H_c = 0,6$ ; b) 2 x 1,  $X/H_c = 0,9$ ; c) 1 x 2,  $X/H_c = 0,6$ ; d) 1 x 2,  $X/H_c = 0,9$  e) 3 x 1,  $X/H_c = 0,6$ ; f) 3 x 1,  $X/H_c = 0,9$



Slika 7. Utjecaj koeficijenta dubine pomaka tla na bočni pomak grupa pilota: g) 1 x 3,  $X/H_c = 0,6$ ; h) 1 x 3,  $X/H_c = 0,9$ ; i) 2 x 2,  $X/H_c = 0,6$ ; j) 2 x 2,  $X/H_c = 0,9$  (nastavak slike)

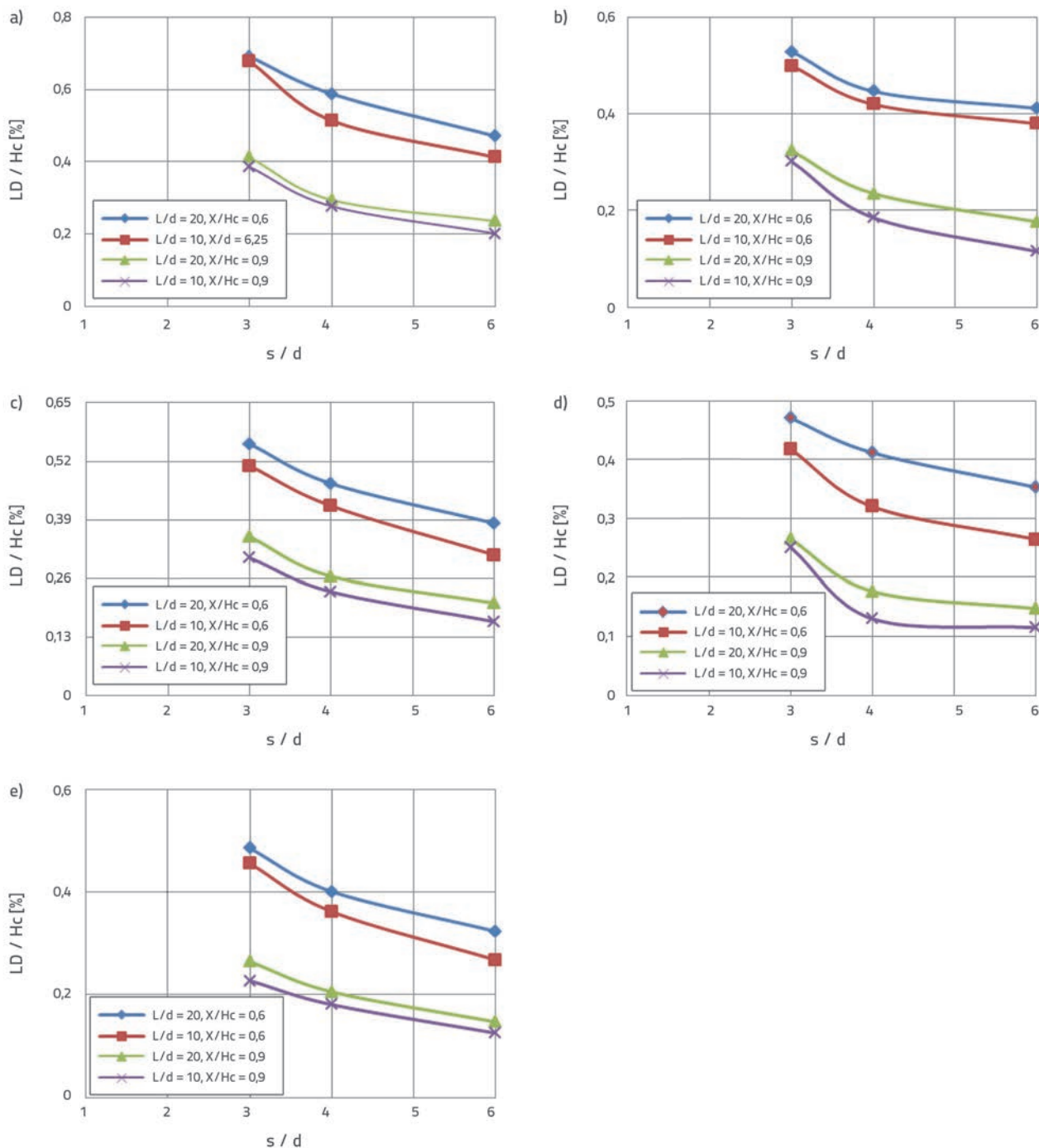
pilota. Kada je grupa pilota (1 x 2, 1 x 3) postavljena okomito na potpornu konstrukciju, tada piloti sekundarnih redova dodatno povećavaju otpornost grupe [19]. Zato se kod tih grupa pilota uočava relativni manji bočni pomak u usporedbi s pilotima koji su postavljeni paralelno s potpornom konstrukcijom. Dodatni otpor koji se javlja u pilotima sekundarnih redova nastaje zbog smanjene preraspodjele opterećenja. Preraspodjela opterećenja omogućuje pilotima sekundarnih redova unosenje dodatne stabilnosti u grupu pilota. Međutim, do preraspodjele opterećenja ne dolazi u grupama pilota koji su postavljeni paralelno s potpornom konstrukcijom (2x1, 3x1) jer se svi piloti nalaze na istoj udaljenosti od potporne konstrukcije i na njih djeluje isto opterećenje.

#### 4.2.2. Utjecaj razmaka

Iz slike 8. se može vidjeti da se nominalni pomak grupe pilota smanjuje s povećanjem razmaka. Dodatan otpor pilota sekundarnih redova povećava se s povećanjem razmaka između pilota i stoga dolazi do smanjenja bočnog pomaka pilota. U svim grupama pilota bočni se pomak bitno smanjuje kada se razmak poveća s 3d na 4d, a tome je razlog svodno

djelovanje. Daljnje povećanje razmaka s 4d na 6d manje utječe na pomak pilota. To nam pokazuje da se utjecaj razmaka smanjuje nakon nekog određenog razmaka te da će se svaki pilot ponašati kao pojedinačni pilot bez ikakva utjecaja susjednih pilota.

Iako utjecaj interakcije grupe postoji kod razmaka od 6d, optimalan utjecaj interakcije grupe može se postići kod razmaka od 4d. Razmak od 4d može se usvojiti kao razmak kod kojeg se postiže maksimalan efekt interakcije grupe i svodnog djelovanja [36]. Pan i dr. [14] su ustanovili da utjecaj grupe postoji čak i kod razmaka od 5d. Isto tako, na slici 8. se vidi da se nominalni pomak bitno smanjuje s povećanjem razmaka za grupe pilota 1 x 2 i 1 x 3, za razliku od pomaka kod grupa pilota 2 x 1 i 3 x 1. Abbas i dr. [26] analizirali su pilot podvrgnut izravnom djelovanju bočnog opterećenja. Kao i u ovom istraživanju, uočeno je da se bočni pomak smanjuje s povećanjem razmaka i broja pilota. Sličnosti između zaključaka Abbas-a i dr. [26] i zaključaka ovog istraživanja pokazuju da pomak pilota u slučaju bočnog opterećenja pomicanjem tla može biti sličan pomaku pilota pod utjecajem bočne sile iz bilo kojeg drugog izvora. Međutim, veličina pomaka može ovisiti o izvoru pomicanja tla.



Slika 8. Utjecaj razmaka na bočni pomak grupa pilota: a) 2 × 1; b) 1 × 2; c) 3 × 1 d) 1 × 3; e) 2 × 2

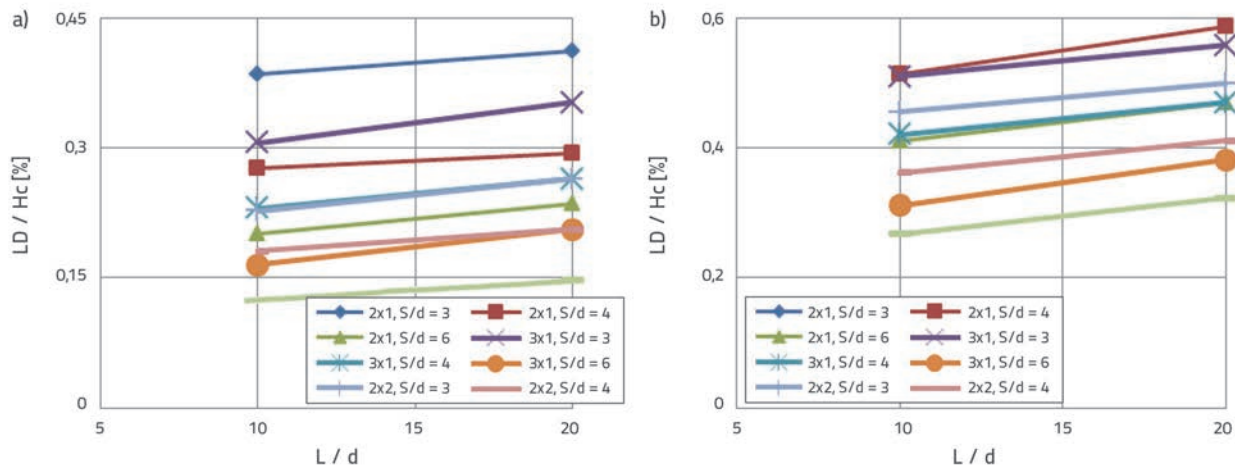
### 4.2.3. Utjecaj koeficijenta ukopavanja pilota

Utjecaj koeficijenta ukopavanja pilota na bočni pomak grupe pilota prikazan je na slici 9. Kod fiksnog razmaka i koeficijenta dubine pomaka tla, bočni se pomak povećava usporedno s povećanjem koeficijenta ukopavanja grupa pilota. Grupe pilota s nižim koeficijentom ukopavanja ponašaju se kao krute grede, međutim, s povećanjem dubine ukopavanja, piloti se počinju ponašati kao elastične grede. Stoga to može uzrokovati

povećanje bočnog pomaka pilota, a to se može dogoditi iz dva razloga:

- a) visina srušenog zida normalizirana je u odnosu na dužinu pilota pa tako, kod dužih pilota, manje vrijednosti koeficijenta dubine pomicanja tla zapravo upozoravaju na veliku dubinu pomaka tla.
- b) zbog većeg radnog opterećenja dužih pilota. Veće radno opterećenje dovodi do relativno velikog momenta na naglavnici pilota i to čak i kod malih pomaka dužih pilota.

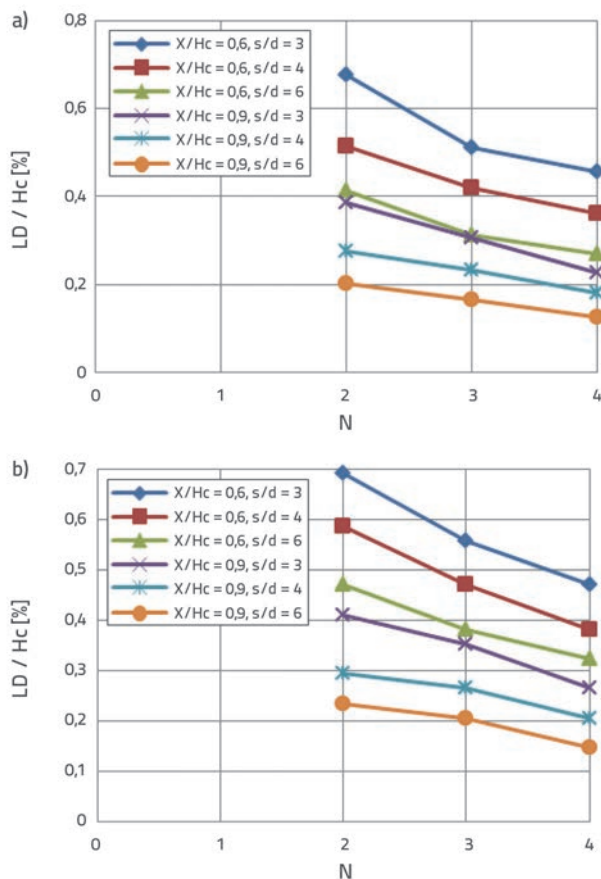




Slika 9. Utjecaj koeficijenta ukopavanja pilota: a)  $X/H_c = 0,95$ ; b)  $X/H_c = 0,60$

#### 4.2.4. Utjecaj broja pilota

Promjena bočnog pomaka grupe pilota ovisno o broju pilota iskazana je na slici 10. Bočni pomak grupe pilota uvijek je manji od pomaka samo jednog pilota. Bočni pomak grupe pilota smanjuje se s povećanjem broja pilota u grupi pri određenom razmaku i dubini ukopavanja.

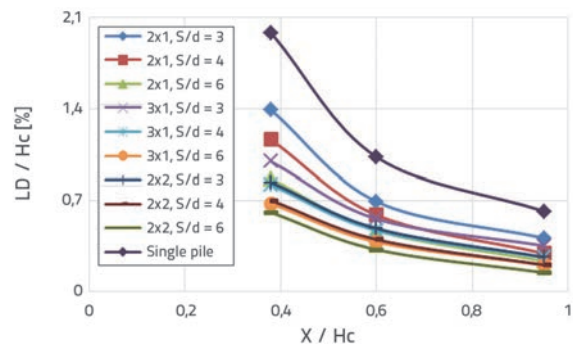


Slika 10. Utjecaj broja pilota: a)  $L/d = 10$ ; b)  $L/d = 20$

To znači da učinak interakcije u grupi pozitivno djeluje na pasivne pilote podvrgnute bočnom pomicanju tla. Učinak "štita" povećava se s povećanjem broja pilota, što pruža dodatni otpor pomicanju tla, pa stoga dolazi do smanjenja bočnog pomaka grupe pilota. Utjecaj broja pilota na bočni pomak ovisi o razmaku i o dužini ukopavanja. Pri manjem razmaku, zone naprezanja pilota se međusobno preklapaju s porastom broja pilota, a grupa pilota se ponaša kao kontinuirani zid. Kod većih razmaka, piloti se ponašaju neovisno pa je pomicanje tla kroz zonu pilota u velikoj mjeri neometano. Zato je stopa smanjenja bočnog pomaka ovisno o broju pilota relativno viša kod manjih razmaka ( $s/d = 3$ ) nego kod grupa pilota s većim razmakom ( $s/d = 4$  i  $s/d = 6$ ). Može se primijetiti da se stopa smanjenja bočnog pomaka povećava s povećanjem dužine pilota pri određenom razmaku pilota i udaljenosti grupe pilota od potporne konstrukcije, (slika 7.).

#### 4.2.5. Utjecaj razmaka između pilota i potporne konstrukcije

Slika 11. prikazuje bočni pomak grupa pilota s koeficijentom ukopavanja 20. Bočni se pomak nelinearno smanjuje s povećanjem razmaka između pilota i potporne konstrukcije. Slična je situacija i kod pilota s koeficijentom ukopavanja 10. Također Leung i dr. [19] i Liyanapathirana i Nishanthanmade [31] uočili su istu pojavu kod jednog pilota uslijed bočnog pomicanja tla.



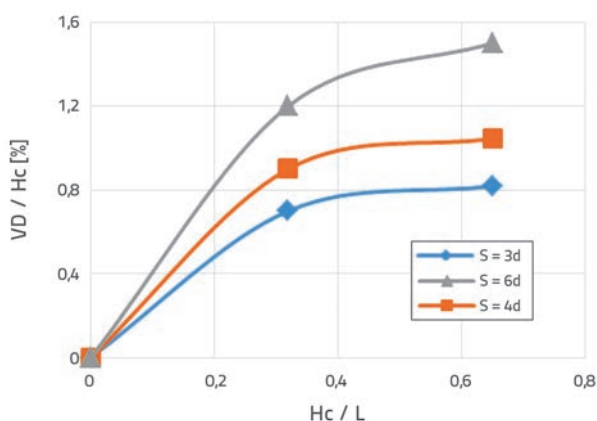
Slika 11. Utjecaj razmaka između pilota i potporne konstrukcije

Pomak je velik u slučaju grupe pilota 2 x 1 kod razmaka od tri promjera pilota. Utjecaj razmaka između pilota i potporne konstrukcije smanjuje se s povećanjem broja pilota i razmaka. Brzina pomicanja tla u blizini srušene potporne konstrukcije je velika, te nameće značajnu silu na pilote u blizini potporne konstrukcije. Utjecaj udaljenosti između pilota i potporne konstrukcije smanjuje se s povećanjem broja pilota i razmaka. Qiu i Grabe [35] navode da na učinak "štita" znatno utječe udaljenost između pilota i potporne konstrukcije dok je utjecaj ostalih faktora, poput promjera pilota i razmaka pilota, samo nominalan.

Slike 6. do 10. pokazuju da nominalni bočni pomak u velikoj mjeri ovisi o udaljenosti između pilota i potporne konstrukcije, u usporedbi s brojem pilota, razmakom i koeficijentom ukopavanja pilota. Čvrstoća pijeska ovisi o naprezanju [37, 38]. Parametri čvrstoće temeljnog tla (pijeska) bitno se smanjuju kada je udaljenost između srušene potporne konstrukcije i pilota mala, ako se usporede sa slučajevima kod kojih je prisutna veća udaljenost. Stoga je utjecaj udaljenosti relativno uočljiviji ako ga usporedimo s drugim parametrima.

## 5. Slijeganje grupe pilota

Naglo rušenje potpornog zida dovodi do slijeganja grupe pilota. Isto kao i kod bočnog pomaka grupe pilota, slijeganje grupe pilota ovisi o nizu parametara. Slika 12. prikazuje slijeganje grupe pilota (2 x 1). Slike 12.a i 12.b prikazuju variranje slijeganja pilota (VD) u odnosu na povećanje visine srušene potporne konstrukcije i razmak pilota. Kao i kod bočnog pomaka, slijeganje pilota također se povećava s povećanjem visine srušene potporne konstrukcije. Slika 12.b pokazuje da se slijeganje povećava s povećanjem razmaka. Sličnu su pojavu uočili i Shan i dr. [39-40]. Stopa povećanja slijeganja u odnosu na razmak relativno je velika u slučaju veće visine/veličine srušene potporne konstrukcije.

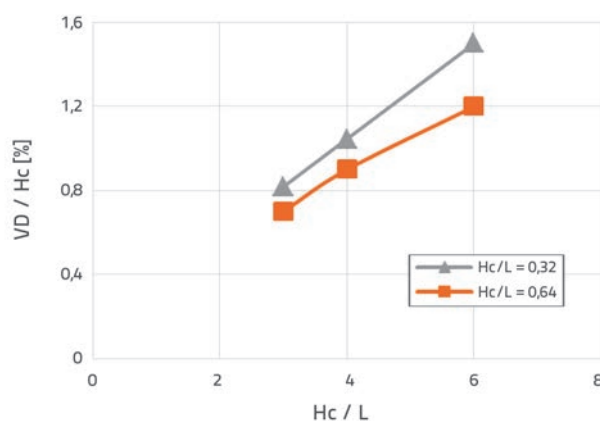


## 6. Zaključak

Naglo rušenje potpornog zida ima značajan utjecaj na ponašanje pilota. Normalizirani pomak grupe pilota povećava se s povećanjem visine srušene potporne konstrukcije. Piloti postavljeni okomito na potpornu konstrukciju pokazuju manji pomak u odnosu na paralelno postavljene pilote radi smanjene preraspodjele opterećenja. Bočni pomak pilota smanjuje se s nanošenjem opterećenja na pilote. Osim toga, taj se pomak smanjuje s povećanjem razmaka i broja pilota u grupi. Stopa smanjenja bočnog pomaka s brojem pilota relativno je veća u slučaju manjeg razmaka i dužih pilota. Međutim, normalizirani se pomak povećava s povećanjem omjera ukopavanja pilota i grupe pilota. Velik pomak zabilježen je kod grupe pilota koja se nalazi pored srušene potporne konstrukcije. Bočni pomak se značajno smanjuje s povećanjem udaljenosti između potporne konstrukcije i pilota. U ovom je istraživanju koeficijent ukopavanja promijenjen mijenjanjem dužine pilota. Slijeganje pilota povećava se s kritičnom visinom potporne konstrukcije i razmakom grupe pilota. U budućim bi se istraživanjima mogao varirati promjer pilota kako bi se odredio utjecaj promjera na ponašanje pilota podvrgnutih pomicanju tla. Također bi se u budućim istraživanjima mogao koristiti širok raspon razmaka pilota, broja pilota i gustoće pijeska. Posebnu bi pozornost trebalo usmjeriti na slijeganje grupe pilota zbog naglog rušenja potporne konstrukcije.

## Zahvala

Autori izražavaju zahvalnost predstojniku Zavoda za graditeljstvo Indijskog tehnološkog instituta u Kanpuru na financijskoj podršci koja je omogućila uspješno provođenje laboratorijskih ispitivanja.



Slika 12. Varijacije u slijeganju pilota: a) s povećanjem Hc; b) s povećanjem razmaka

## LITERATURA

- [1] Berezentzav, V.G.: Design of Deep Foundation. 6<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 8-15 September, Montreal, Canada, 1965.
- [2] De Beer, E.E., Wallays, M.: Forces induced in piles by unsymmetrical surcharges on the soil around the piles, 5<sup>th</sup> European Conf. on Soil Mech, Foundation Eng., Madrid, pp. 325-332, 1972.
- [3] Dominic, L.O.K.: Pile behaviour subject to excavation-induced soil movement in clay, Ph.D. Thesis, National University of Singapore, Singapore, 2004.
- [4] Poulos, H.G.: Ground movements: A hidden source of loading on deep foundations, Journal of the Deep Foundations Institute, 1 (2007) 1, pp. 37-53.
- [5] Poulos, H.G.: Failure of a building supported on piles, Int. Conf. on Foundation Failures, Singapore, 1997, pp. 53-66.
- [6] Finno, R.J., Lawrence, S.A., Harahap, I.S.: Analysis of performance of pile groups adjacent to deep excavation, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117 (1991) 6, pp. 934-955.
- [7] Ong, D.E.L., Leung, C.F., Chow, Y.K., Ng, T.G.: Severe damage of a pile group due to slope failure, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141 (2015) 5, pp. 04015014.
- [8] Kok, S.T., Kim Huat, B., Noorzaie, J., Jaafar, M.S., Gue, S.S.: Modeling of passive piles an overview, EJGE, 13 (2009) P, pp. 1-22.
- [9] Matsui, T., Won, P.H., Ito, T.: Earth pressures on piles in a row due to lateral soil movements, Soils and Foundations, 22 (1982) 2, pp. 71-80.
- [10] Anthony, G.T.C., Sin, W.K., Ing, T.C.: Pile behaviour from excavation-induced soil movements, Civil Engineering research, Nanyang technical University Singapore, ISSN 0219-037017, 2004.
- [11] El Sawwaf, M., Nazir, A.K.: The effect of deep excavation-induced lateral soil movements on the behaviour of strip footing supported on reinforced sand, Journal of Advanced Research, 3 (2011) 4, pp. 337-344
- [12] Kim, B.T., Yoon, G.L.: Laboratory modelling of laterally loaded pile groups in sand, KSCE Journal of Civil Engineering, 15 (2011) 1, pp. 65-75.
- [13] Zhang, R., Zheng, J., Pu, H., Zhang, L.: Analysis of excavation-induced responses of loaded pile foundations considering unloading effect, Tunneling and Underground Space Technology, 26 (2011), pp. 320-335, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.11.003>
- [14] Pan, J.L., Goh, A.T.C., Wong, K.S., Teh, C.I.: Ultimate soil pressures for piles subjected to lateral soil movements, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128 (2002) 6, pp. 530-535.
- [15] Ong, D.E.L., Leung, C.F., Chow, Y.K.: Behaviour of pile groups subject to excavation-induced soil movement in very soft clay I, of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135 (2009) 10, pp. 1462-1474.
- [16] White White, D.J., Thompson, M.J., Suleiman, M.T., Schaefer, V.R.: Behaviour of Slender Piles Subject to Free-Field Lateral Soil Movement, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 134 (2008) 4, pp. 428-436.
- [17] Goh, A.T.C., Wong, K.S., Teh, C.I., Wen, D.: Pile response adjacent to braced excavation, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129 (2003) 4, pp. 383-386.
- [18] Chen, L.T., Poulos, H.G.: Piles subjected to lateral soil movements, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123 (1997) 9, pp. 802-811.
- [19] Leung C.F., Shen, R.F., Chow, Y.K.: Behaviour of pile subject to excavation-induced soil movement, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126 (2000) 11, pp. 0947-0954.
- [20] Leung C.F., Ong, D.E.L., Chow Y.K.: Pile behaviour due to excavation-induced soil movement in clay. I: Stable Wall, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132 (2006) 1, pp. 36-44.
- [21] Leung C.F., Ong, D.E.L., Chow Y.K.: Pile behaviour due to excavation-induced soil movement in clay. II: Collapsed Wall, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132 (2006) 1, pp. 45-53.
- [22] Leung C.F., Lim J.K., Shen, R.F., Chow Y.K.: Behaviour of pile groups subject to excavation-induced soil movement, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129 (2003), pp. 58-65, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:1\(58\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:1(58))
- [23] Pan, J.L., Goh, A.T.C., Wong, K.S., Teh, C.I.: Ultimate Soil Pressures for Piles Subjected to Lateral Soil Movements, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128 (2012) 6, pp. 530-535
- [24] Poulos, H.G.: The Influence of construction "Side Effects" on existing pile foundations, University of Sydney, Australia, 2000.
- [25] Liang, F., Yu, F., Han, J.: A simplified analytical method for response of an axially loaded pile group subjected to lateral soil movement, KSCE Journal of Civil Engineering, 17 (2013) 2, pp. 368-376.
- [26] Abbas, J.M., Chik, Z., Taha, M.R.: Influence of group configuration on the lateral pile group response subjected to lateral load, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 15 (2010), pp.761-772.
- [27] Poulos, H.G., Chen, L.T.: Pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement, Canadian Geotechnical Journal, 33 (1996), pp. 670-677, <https://doi.org/10.1139/t96-091-312>
- [28] Poulos, H.G., Chen, L.T.: Pile response due to excavation-induced lateral soil movement, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123 (1997) 2, pp. 94-99.
- [29] Shukla, R.P., Patra, N.R.: Settlement of pile groups exposed to excavation induced soil movement, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 20 (2015) 10, pp 4293-4304.
- [30] Shan, H.F., Tang-dai, X., Feng Y.U.: Settlement of pile groups associated with excavation beneath existing basement, Chinese J. Geot. Eng., 37 (2015) zk1, pp. 46-50.
- [31] Liyanapathirana, D.S., Nishanthan, R.: Influence of deep excavation induced ground movements on adjacent piles, Tunnelling and Underground Space Technology, 52 (2016), pp. 168-181.
- [32] Shukla, R.P., Patra, N.R.: Experimental study of vertically loaded piles group. 5th Young Indian Geotechnical Engineers Conference 2015 March 14-15, Vadodara, India, pp 30-35.
- [33] Patra, N.R., Pise J.: Ultimate lateral resistance of pile groups in sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127 (2001), pp. 481-487, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:6\(481\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:6(481))
- [34] Chattopadhyay, B.C., Pise, P.J.: Uplift capacity of piles in sand, Journal of geotechnical engineering, ASCE, 112 (1996) 9, pp. 888-903.
- [35] Qiu, G., Grabe, J.: Active earth pressure shielding in quay wall constructions: numerical modeling, Acta Geotechnica, 7 (2012) , pp. 343-355, <https://doi.org/10.1007/s11440-012-0186-3>

- [36] Kourkoulis, R., Gelagoti, F., Anastasopoulos, I., Gazetas, G.: Slope stabilizing piles and pile groups: Parametric study and design insights, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137 (2010) 7, pp. 663-677.
- [37] Chiaro, G., Koseki, J., De Silva, L.N.: A density-and stress-dependent elasto-plastic model for sands subjected to monotonic undrained torsional shear loading, *Geotechnical Engineering Journal SEAGS*, 44 (2013) 2, pp. 18-26.
- [38] Lo Presti, D.C.F., Jamiolkowski, M., Pallara, O., Pisciotto, V., Ture, S.: Stress dependence of sand stiffness, 3<sup>rd</sup> International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, April 12-7, 1995, St. Louis, Missouri, pp. 71-76.
- [39] Shan, H., Xia, T., Feng, Y.U.: Settlement of pile groups associated with excavation beneath existing basement, *Chinese J. Geot. Eng.*, 37 (2015) zk1, pp. 46-50.
- [40] Shan, H., Liu, X., Zhan, X., Xia, T.: Settlement of Pile Group Foundation Associated with Excavation Beneath Basement of Existing Building, *EJGE*, 20 (2015) 2, pp. 479-489.

Connecting Global Competence

Messe München

The future of building

Osigurajte si svoju ulaznicu već sada:  
bau-muenchen.com/tickets

**BAU 2019**  
14.-19. siječnja · München  
Vodeći svjetski stručni sajam za arhitekturu, građevinske materijale i sustave  
www.bau-muenchen.com

**BELIMPEX**  
office@belimpex.hr  
Tel. +385 1 3638 363  
Fax +385 1 3648 276

Budi dio BAU zajednice!

mag.bau-muenchen.com/en  
 facebook.com/BAUMuenchen  
 linkedin.com/company/baumuenchen  
 youtube.com/BAUMuenchen  
 twitter.com/bau\_Muenchen