

ZAŠTITA GRAĐEVNE JAME ZA TRGOVAČKI CENTAR U ZAGREBU

SAŽETAK: Članak opisuje numeričko modeliranje sidrene armirano-betonske dijafragme za zaštitu 18 m duboke građevne jame trgovačkog centra u Zagrebu. Numerička je analiza uključila nelinearno ponašanje tla kao i detaljno modeliranje postupnog iskopa jame i pritezanja geotehničkih sidara. Ponašanje tla od vrlo malih do velikih deformacija kao i bitan utjecaj promjene smjera opterećenja na krutost tla uzeto je u obzir pomoću nove elasto-plastične, kinematski očvršćavajuće, konstitucijske jednadžbe. Konstitucijska jednadžba omogućuje modeliranje proizvoljne zakonitosti smanjenja posmične krutosti s povećanjem posmične deformacije. Osim ove zakonitosti, drugi parametri modela su posmični modul pri vrlo malim deformacijama, eksponent koji regulira promjenu tog modula sa srednjim pritiskom, te Mohr-Coulombovi parametri čvrstoće. Ovi su parametri za potrebe projekta dijafragme utvrđeni iz terenskih i laboratorijskih istražnih radova. Posebno treba naglasiti da je posmični modul tla pri vrlo malim deformacijama određen na temelju geofizičkog "down-hole" postupka te da je to bio osnovni parametar krutosti korišten u analizama. Tijekom iskopa građevne jame praćene su deformacije armirano-betonske dijafragme po njenoj visini. Deformacije dijafragme su mjerene pomoću inklinometara. Usporedbe mjerenih i proračunatih deformacija dijafragme pokazale su njihovo vrlo dobro slaganje u svim fazama iskopa jame. Računske analize, kao i rezultati mjerenja su pokazali da su deformacije dijafragme od natezanja sidara skoro do veličine aktivnog tlaka zanemarive. Osnovni razlog dobrom slaganju prognoziranih i mjerenih deformacija čini se da je realističan opis nelinearnog ponašanja tla od vrlo velike krutosti pri vrlo malim deformacijama do male krutosti pri velikim deformacijama kao i elasto-plastični efekt naglog povećanja krutosti pri promjeni smjera opterećenja.

PROTECTION OF A DEEP EXCAVATION FOR A SHOPPING MALL IN ZAGREB

SUMMARY: The numerical modeling of an anchored reinforced concrete diaphragm wall for the protection of an 18 m deep excavation for the construction of a shopping mall in Zagreb is described. The non-linear soil behavior was included in the numerical analysis, as well as the detailed simulation of the gradual excavation and anchor tightening. The soil behavior in the range from very small to finite deformations was taken into account through an original elasto-plastic constitutive equation with kinematic hardening, which also takes into account the important influence that the change in the loading direction has on the soil stiffness. This constitutive equation can model any given shear stiffness decrease with the increase of shear deformation. The soil parameters required are the shear modulus at very small deformations, the exponent, which governs the change of this modulus with the mean stress, and the Mohr-Coulomb strength parameters. These parameters were determined from in-situ and laboratory tests. The main stiffness parameter used in the analysis was the shear modulus at very small deformations determined by the geophysical "down-hole" method. The deformations of the reinforced concrete diaphragm wall were monitored during the excavation along the height of the wall by the use of inclinometers. The comparison of measured and calculated deformations gave a very good match in all excavation phases. The numerical analysis, as well as the monitoring of deformations, has shown that the wall deformations due to the anchor tightening, even at values almost corresponding to the active pressure, were negligible. It seems that the explanation for this very good match between measured and calculated deformations is in the realistic description of the non-linear soil behavior in the whole range of stiffness values, from a very large initial stiffness at very small deformations to low stiffness values at finite deformations, as well as in the elasto-plastic effect of the abrupt increase of stiffness with the change in the loading direction.

UVOD

Analizirana sidrena dijafragma je armirano-betonska stijena izvedena in situ, predviđena za zaštitu 18 m duboke građevne jame za novi trgovački centar u Zagrebu. Dijafragma je sidrena u tri razine prednapetim sidrima BBR. U neposrednoj okolini dijafragme i buduće građevne jame nalaze se višekratne zgrade i jedan manji neboder. Tijekom iskopa građevne jame i napinjanja sidara mjerene su deformacije dijafragme pomoću u nju ugrađenih inklinometara.

Numerička analiza ponašanja dijafragme tijekom izgradnje građevne jame provedena je programom FLAC, verzija 3.40 (ITASCA, Minneapolis, SAD). Pri tome je korišten je novi kinematsko-očvršćavajući elasto-plastični model ponašanja tla. Osnovne karakteristike ovog modela su (a) moguće modeliranje bilo kojeg odnosa posmičnih deformacija i posmičnih naprezanja u području od vrlo malih do velikih deformacija, i (b) pravilno modeliranje naglog povećanja krutosti pri prijelazu iz opterećenja u rasterećenje. Ovo posljednje je važno kod sidrenih dijafragma kod kojih se pri iskopu građevne jame izmjenjuju faze iskopa i faze natezanja geotehnički sidara. Prva karakteristika, mogućnost modeliranja proizvoljnog odnosa naprezanja i deformacija pri smicanju posebno je važna u pogledu novijih saznanja o ponašanju tla pri smicanju u području malih deformacija. Tek je relativno nedavno postalo jasno da uobičajeni laboratorijski pokusi precjenjuju deformacije zbog nepreciznosti mjerenja vrlo malih i malih deformacija u kojem se području mehaničko ponašanje tla pokazalo izrazito nelinearnim (vidi na primjer Jardine i dr. 1986, Burland 1989, Simpson 1992).

Proračunati pomaci dijafragme uspoređeni su s mjerenim pomacima tijekom različitih faza izgradnje.

PROFIL TLA I POSMIČNA KRUTOST TLA

Izbor parametara tla, potrebnih za numeričku analizu i novi model tla, temeljen je na rezultatima terenskih i laboratorijskih mjerenja. Mjerenje brzine posmičnih valova pomoću "down-hole" postupka bio je važan izvor podataka. Nekoliko je istraživača nedavno ukazalo da se posmična krutost iz mjerene brzine posmičnih valova može koristiti kao statička posmična krutost pri vrlo malim deformacijama (na primjer Tatsuoka & Shibuya 1991, Tatsuoka & Kohata 1995). Posmična čvrstoća sitnozrnih tla određena je u laboratorijskim pokusima direktnog smicanja, te troosnim UU i CIU pokusima. Rezultati terenskog standardnog penetracijskog pokusa korišteni su za određivanje čvrstoće šljunkovitog tla. Troosni pokusi rađeni su sa i bez uređaja za lokalno mjerenje deformacija na uzorku. Jedan broj troosnih pokusa s lokalnim mjerenjem deformacija na uzorku korišten je za modeliranje izrazito nelinearnog ponašanja tla u području malih do srednjih deformacija.

Profil tla na lokaciji građevne jame prikazuje slika 1. K tome, slika 1 prikazuje mjerene i računске brzine posmičnih valova.

Računski parametri čvrstoće korišteni u numeričkim analizama prikazani su u tablici 1. Referentni posmični modul kao i modulski eksponent su parametri novog modela tla. Oni su određeni iz mjerene brzine posmičnih valova. Posmični modul pri vrlo malim deformacijama ključni je parametar novog modela tla.

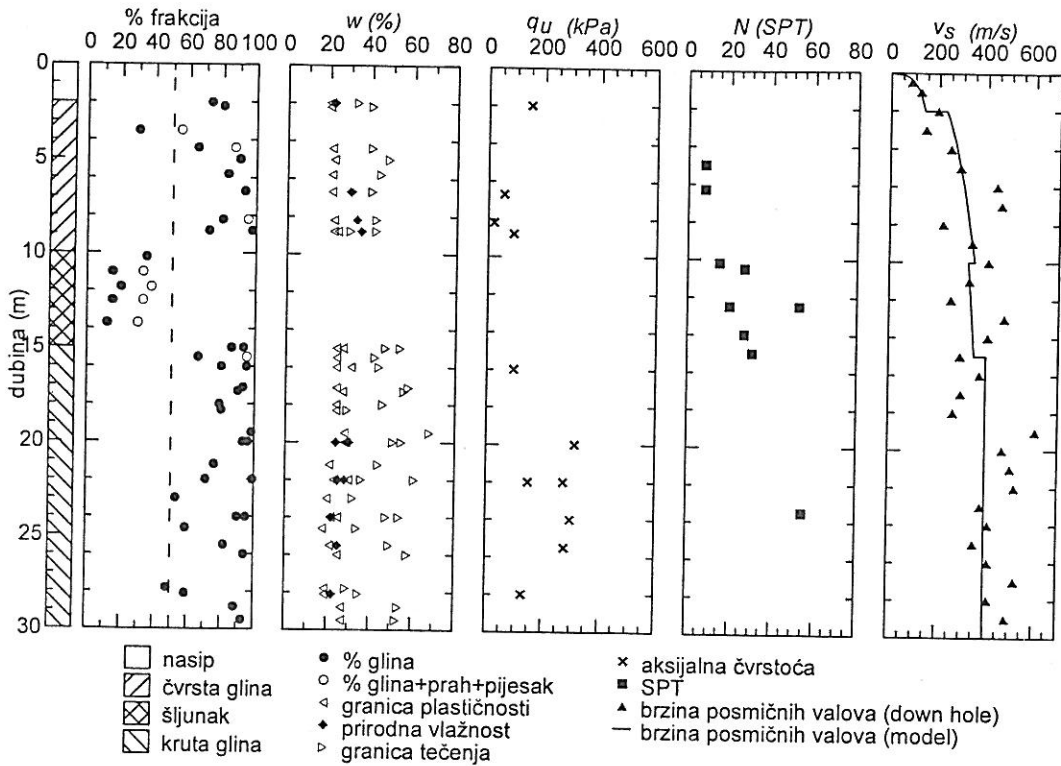
Tablica 1. Projektni parametri tla (profil tla sa slike 1) te pripadajuće vrste analiza.

Sloj tla	γ kN/m ³	c' kN/m ²	ϕ' Stup.	c_u kN/m ²	G_0 kN/m ²	m -	Analiza
Nasip	19	5	30	-	60	0.5	drenirana
Čvrsta glina	19	15	22	-	170	0.5	drenirana
Šljunak	21	5	38	-	170	0.5	drenirana
Kruta glina	20	-	-	150	320	0.0	nedrenirana

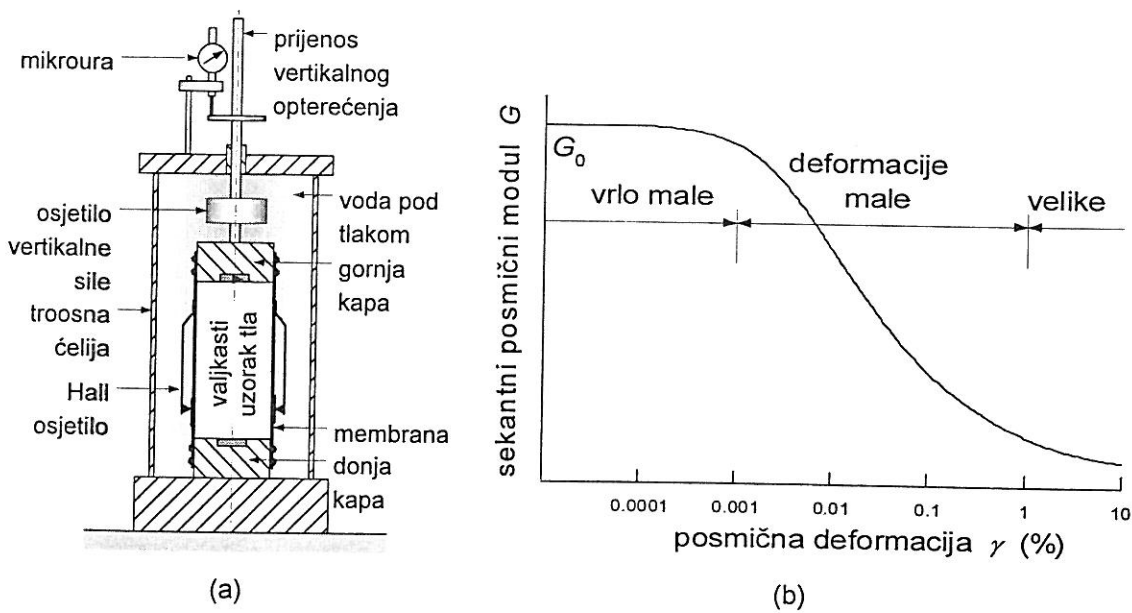
γ = zapreminska težina; c' = kohezija; ϕ' = kut trenja; c_u = nedrenirana čvrstoća;
 G_0 = posmični modul pri izotropnom naprezanju $s_0 = 100$ kN/m²;
 m = modulski eksponent.

Posmična krutost krute gline mjerena je u troosnom uređaju u izotropno konsolidiranom nedreniranom pokusu (CIU). Krutost pri malim deformacijama mjerena je lokalno na uzorku pomoću Hall-ovog

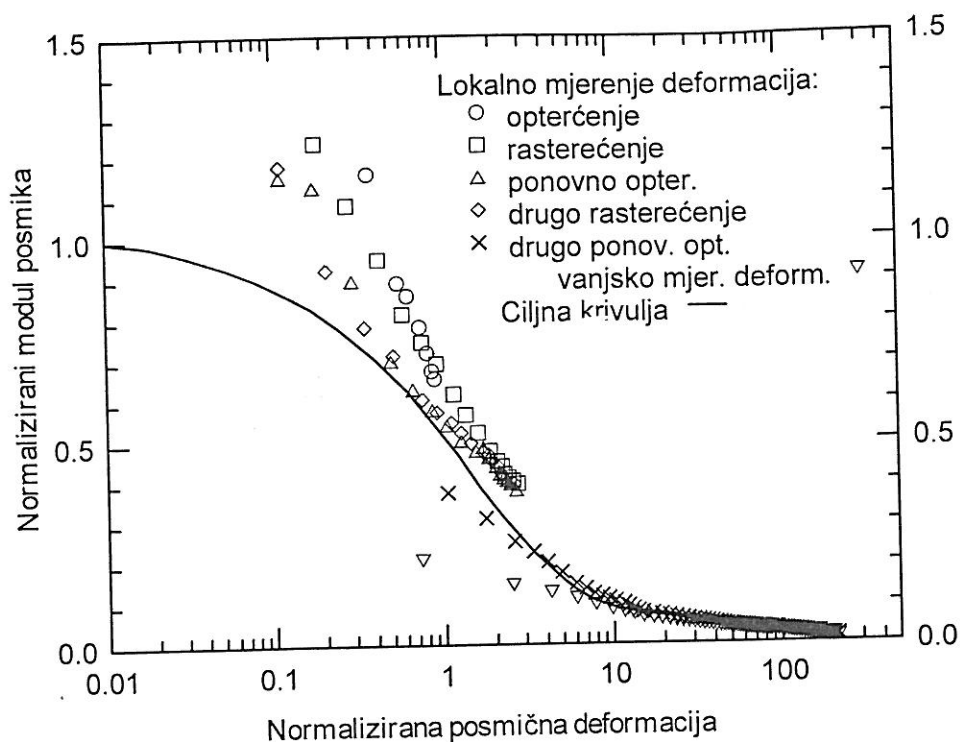
mjerača (Clayton i Khatrush, 1986; slika 2a). Pri tome je, zbog nedreniranih uvjeta vodom zasićene gline, pretpostavljeno da je posmična deformacija $\gamma = \frac{1}{2} \varepsilon_1$ (ε_1 je vertikalna deformacija uzorka). Na sličan je način definiran tangentni posmični modul kao $G = (\sigma_1 - \sigma_3) / (3\varepsilon_1)$; gdje su σ_1 i σ_3 vertikalno odnosno horizontalno naprezanje na uzorku. Tipična mjerena ovisnost posmičnog modula o posmičnim deformacijama prikazana je na slici 3. Puna linija na toj slici (označena kao ciljana krivulja) prikazuje računsku ovisnost sekantnog posmičnog modula o posmičnoj deformaciji, kakva je korištena u numeričkim analizama.



Slika 1. Parametri profila tla na mjestu dijafragme



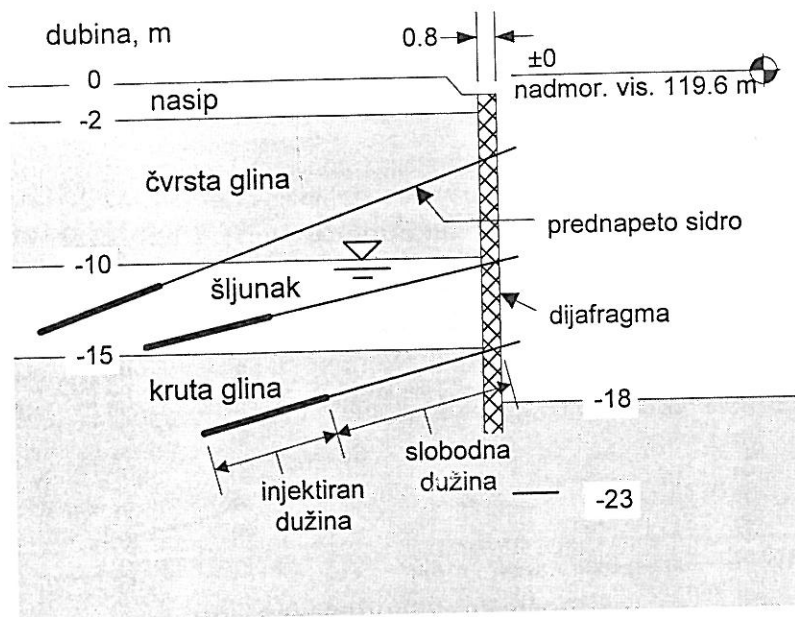
Slika 2. Lokalno mjerenje deformacija na uzorku tla u troosnom uređaju (a); ovisnost posmičnog modula G o posmičnoj deformaciji tijekom smicanja od vrlo malih deformacija do sloma



Slika 3. Modul posmika u ovisnosti o posmičnoj deformaciji, normaliziran s maksimalnim modulom pri vrlo malim deformacijama

OPIS DIJAFRAGME I FAZE IZGRADNJE

Presjek kroz sidrenu dijafragmu prikazan je na slici 4. Dijafragma je visoka 22 m, a debela je 0,8 m. Youngov modul betona pretpostavljen je sa $3 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$. Za komercijalna geotehnička sidra iz čelika visoke čvrstoće pretpostavljen je Youngov modul od $1.95 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$. Faze iskopa i prednapinjanje sidara prikazane su u tablici 2.



Slika 4. Poprečni presjek kroz dijafragmu

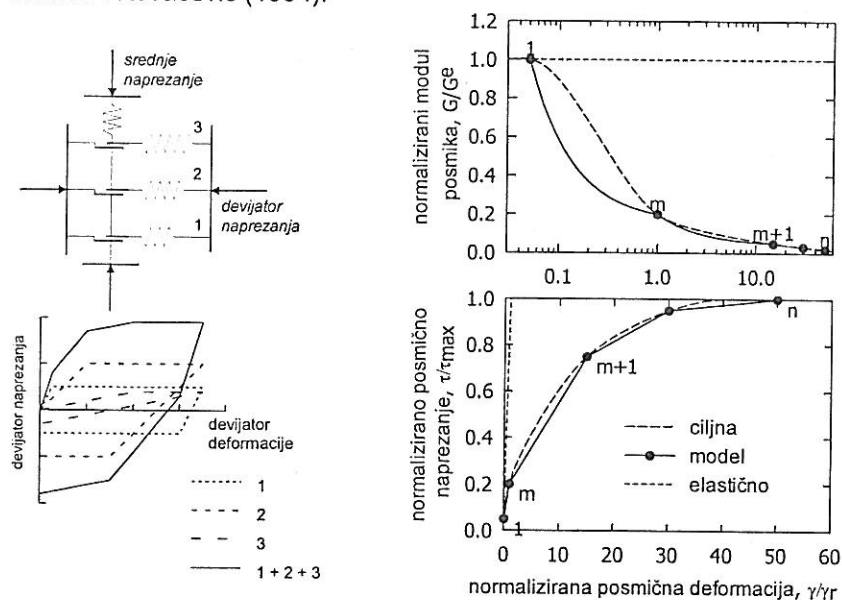
Tablica 2. Faze izgradnje i karakteristike sidara.

Faza	Opis	z m	L m	GL m	β stup.	a m	A cm ²	F_0 kN
1	Iskop	-5						
2	I red sidara	-4	27	7	20	2.6	6.6	420
3	Iskop	-11						
4	II red sidara	-10	20	7	12	2.6	9.7	400
5	Iskop	-16						
6	III red sidara	-15	17	7	15	2.6	9.7	400
7	Iskop	-18						

z = dubina; L = dužina sidra; GL = injektirana dužina; β = nagib sidra; a = vodoravni razmak sidara; A = površina presjeka sidra; F_0 = sila prednapinjanja.

MODEL TLA

Ovdje će se dati samo osnovne značajke novog modela tla, dok se detalji mogu naći kod Szavits i Kovačević (1994) i Szavits i dr. (1999). Novi je model razvijen s jedne strane na ideji paralelnog spoja elasto-idealno plastičnih modela (Iwan 1967), a s druge strane na ideji normalizacije odnosa posmičnog modula i posmične deformacije pri smicanju (Anderson i Richart 1976, Richart 1977, 1978, 1982). Razne oblike normaliziranih odnosa sekantnog posmičnog modula i posmične deformacije pri smicanju razmatrali su Puzrin i Burland (1996). Normaliziranu krivulju za Toyoura pijesak razvili su Szavits i Kovačević (1994).



Slika 5. Osnovna koncepcija novog kinematski očvršćavajućeg elasto-plastičnog modela tla

Za elastične deformacije u novom modelu korištena je jednostavna nelinearna izotropno elastična konstitucijska jednačba s Poissonovim koeficijentom za ukupne deformacije jednakim nuli (prema Vermeer 1978, 1984). Prema toj jednačbi je efektivno naprezanje proporcionalno elastičnoj deformaciji. Faktor proporcionalnosti je elastični posmični modul koji je ovisan o m -tom korijenu invarijante efektivnog naprezanja (m je moduluski broj). Taj elastični posmični modul je modul s kojim se normalizira sekantni posmični modul da bi se dobio ranije spomenuti normalizirani odnos posmičnog modula i posmične deformacije. Pri tome se posmična deformacija normalizira referentnom deformacijom koja se definira kao elastična deformacija pri slomu. Slom se pak definira pomoću standardnog Mohr-Coulombovog zakona.

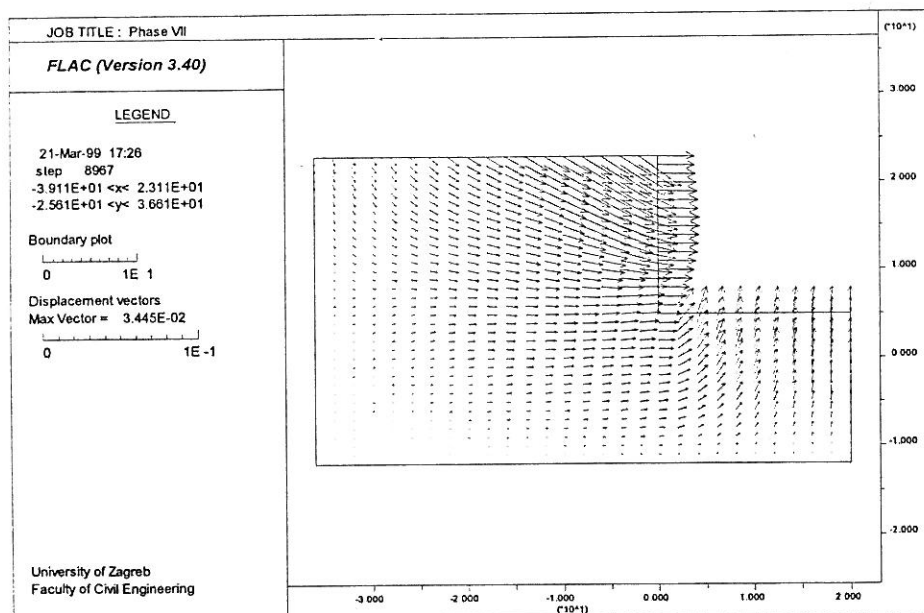
Plastična komponenta deformacije razvija se preko paralelnog spoja jednostavnih neočvršćavajućih elasto-plastičnih elemenata. Svaki element prolazi istu povijest deformacija, a efektivno naprezanje jednako je zbroju lokalnih naprezanja svih elemenata (vidi sliku 5 lijevo gore i dolje). Povoljnim

izborom krutosti i čvrstoće svakog pojedinog elementa može se aproksimirati proizvoljna krivulja odnosa devijatorskog naprezanja i devijatorske deformacije pri smicanju. Aproksimirana krivulja je n -linearna, gdje je n broj paralelnih elemenata u spoju (vidi sliku 5). Čvrstoća svakog od elemenata opisana je Mohr-Coulombovim zakonom čvrstoće. Na slici 5 desno prikazana je odnos između normaliziranog posmičnog naprezanja i normalizirane posmične deformacije te odgovarajući odnos normaliziranog posmičnog modula i normalizirane posmične deformacije. Posmično naprezanje normalizirano je posmičnom čvrstoćom, a posmična deformacija referentnom posmičnom deformacijom koja je definirana kao elastična posmična deformacija pri slomu. Navedene krivulje na slici 5 desno odgovaraju modelu s 5 paralelnih elemenata. Tako definirana konstitucijska jednadžba opisuje histerezu prilikom cikličkog opterećenja. Histereza zadovoljava poznata Masingova pravila (Masing 1926) pri pravilnim ciklusima, a prirodno proširuje pravila pri nepravilnim ciklusima bez dodatnih pretpostavki (vidi Pyke 1979). Model je također u suglasnosti s istraživanjima Tatsuoke i Ishihare (1974) jer kinematski očvršćavajuće plohe popuštanja koincidiraju s plohama jednakih posmičnih deformacija.

Opisani model spada u kategoriju elasto-plastičnih modela s kinematskim očvršćavanjem. Takvo očvršćavanje mnogo bolje opisuje ponašanje tla pri slijedu rasterećenje-opterećenje nego klasično izotropno očvršćavanje. Ovo svojstvo modela pogodno je pri razmatranju slijeda faza iskopa i pritezanja sidara kod dijafragmi zbog razvoja naprezanja u tlu koje doživljava niz opterećenja i rasterećenja. Model zadovoljava Mohr-Coulombov zakon čvrstoće. Model zahtijeva slijedeće materijalne parametre: Posmični modul G_0 pri izotropnom pritisku od 100 kPa, moduluski broj m (ranije opisan), parametre čvrstoće c' i ϕ' , te krivulju koja opisuje odnos normaliziranog modula posmika i normalizirane posmične deformacije. Osim posljednje krivulje, ostali parametri mogu se dobiti iz standardnih laboratorijskih i terenskih geotehničkih istražnih radova te geofizičkih istražnih radova za određivanje brzine posmičnih valova (za određivanje modula G_0). Normaliziranu krivulju potrebno je odrediti iz posebnih laboratorijskih pokusa s lokalnim mjerenjem deformacija na uzorku tla. Za manje značajne projekte moguće je koristiti takvu krivulju iz literature jer ima indikacija da se te krivulje između raznih vrsta tla ne razlikuju previše. No tu tvrdnju bi trebalo dalje istraživati.

REZULTATI ANALIZE I USPOREDBE S MJERENJIMA

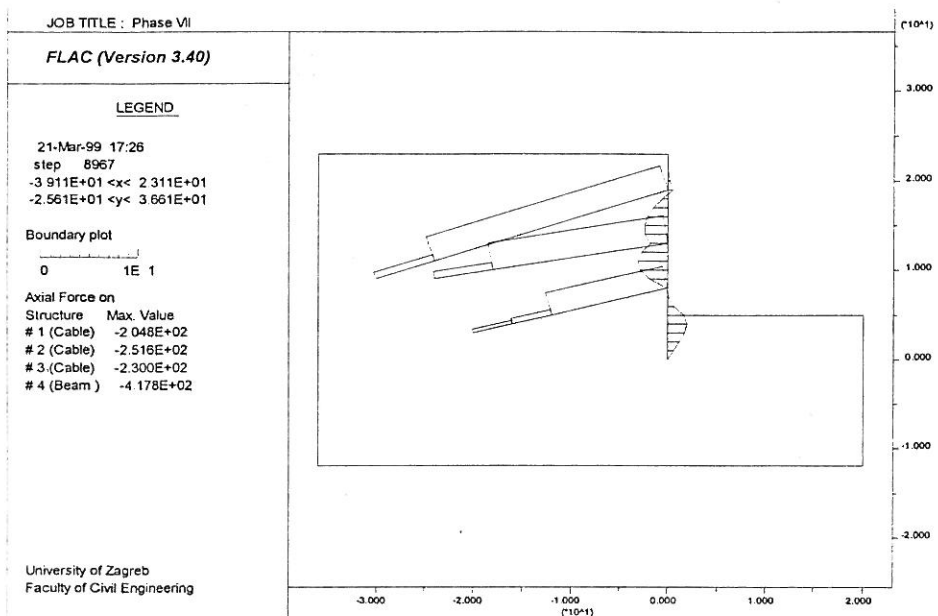
Na slikama 6 i 7 prikazani su neki tipični rezultati analize provedene programom FLAC. Prva od tih slika prikazuje vektore pomaka nakon zadnje faze iskopa, druga slika prikazuje raspodjelu momenata savijanja u dijafragmi te uzdužnih sila u sidrima, također nakon posljednje faze iskopa. Posebno je



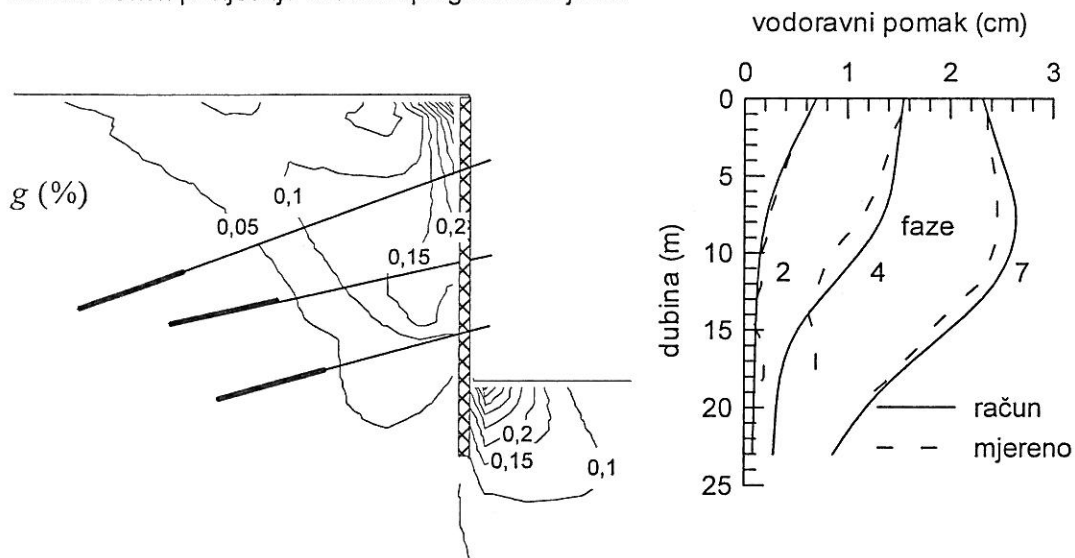
Slika 6. Vektori pomaka nakon posljednje faze iskopa građevne jame

zanimljiva slika 8 na kojoj se uspoređuju izračunati i mjereni vodoravni pomaci dijafragme u 2., 4. i 7. fazi izgradnje. Pomaci u drugoj fazi praktično su jednaki onima u prvoj fazi, kao što su i pomaci četvrte

faze u odnosu na treću, te pete u odnosu na šestu. Razlog tome je naglo povećanje krutosti tla pri rasterećenju (iskop jame izaziva opterećenje tla jer povećava devijatorska naprezanja, dok pritezanje sidara izaziva rasterećenje u tlu jer smanjuje devijatorska naprezanja). Usporedba računa i mjerenja se može ocijeniti kao vrlo dobra i to usprkos tome što je slika mjerenih pomaka pomaknuta tako da se mjereni i proračunati pomaci poklapaju na površini terena. To je učinjeno stoga što mjerenja inklinometrom zahtijevaju određivanja pomaka jedne točke nekom drugom metodom, na primjer geodetski. Nažalost, u ovom slučaju geodetska mjerenja nisu bila dovoljno precizna da bi bila uporabiva. To znači da je ispravno uspoređivati samo izračunate i mjerene relativne pomake po visini dijafragme. No i kad se slika 8 razmatra na taj način, može se usporedba ocijeniti dobrom.



Slika 7. Raspodjela momenata savijanja u armirano-betonskoj dijafragmi i uzdužnih sila u napetim sidrima nakon posljednje faze iskopavanja građevne jame



Slika 8. Usporedba izračunatih vodoravnih pomaka dijafragme i pomaka mjerenih inklinometrom u dijafragmi u drugoj, četvrtoj i sedmoj fazi gradnje (desno); raspodjela izračunatih posmičnih deformacija u tlu nakon sedme faze izgradnje (lijevo)

ZAKLJUČCI

Prikazani primjer analize ponašanja armirano-betonske sidrene dijafragme tijekom faza iskopavanja građevne jame i pritezanja sidara pokazuje da je moguće dobro predvidjeti njeno ponašanje ako:

- a) se uvažava nelinearno ponašanje tla od vrlo malih do velikih deformacija,

- b) se uvažuje elasto-plastično ponašanje pri rasterećenju,
 c) se koristi krutost tla pri vrlo malim deformacijama, određena iz brzine širenja posmičnih valova *in situ* kao pouzdan i koristan parametar tla pri statičkim analizama.

Kinematski očvršćavajuća konstitucijska jednadžba može se koristiti u praktičnim problemima jer dobro opisuje ključne elemente ponašanja tla u ciklusima opterećenja i rasterećenja, a parametri te jednadžbe uglavnom su parametri koji se mogu odrediti iz standardnih geotehničkih i geofizičkih istražnih radova; U grubim analizama se može koristiti krivulja normaliziranog ponašanja pri smicanju iz literature, a u preciznijim proračunima poželjno je ispitivanje tla u troosnom uređaju s lokalnim mjerenjem deformacija na uzorku tla.

Zahvala

Zahvaljujem se suradnicima dr.sc. Mehi Saši Kovačeviću i prof.dr.sc. Vlasti Szavits-Nossan bez kojih istraživanje prikazano u ovom radu ne bi ugledao svjetlo dana.

REFERENCE

- Anderson, D.J. & Richart Jr., F.E. 1976. Effects of straining on shear modulus of clays. *ASCE Jour. Geotechnical Engineering Division* 102(9): 975-987.
- Burland, J.B. 1989. "Small is beautiful"-the stiffness of soils at small strains. *Canadian Geotechnical Journ.* 26: 499-516.
- Clayton, C.R.I. & Khatrush, S.A. 1986. A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens. *Géotechnique* 36: 593-597.
- Iwan, W.D. 1967. On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems. *Journ. of Applied Mechanics* 34(3): 612-617.
- Jardine, R.J., Potts, D.M., Fourie, A.B. & Burland, J.B. 1986. Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction. *Géotechnique* 36: 377-396.
- Masing, G. 1926. Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing. In *Proc. 2nd intern. congr. applied mechanics, Zürich*.
- Puzrin, A.M. & Burland, J.B. 1996. A logarithmic stress-strain function for rocks and soils. *Géotechnique* 46(1): 157-164.
- Pyke, R.M. 1979. Nonlinear soil models for irregular cyclic loadings. *ASCE Journ. Geotechnical Engineering Division* 105(6): 715-726.
- Richart Jr., F.E. 1977. Part 1 of "Soil dynamics and its application to foundation engineering" by Y. Yoshimi, F.E. Richart Jr., S. Prakash, D.D. Barkan, & V.A. Ilychev; *Proc. IX intern. conf. soil mechanics and foundation engineering, Tokyo, Vol. 2: 605-612*.
- Richart Jr., F.E. 1978. Field and laboratory measurements of dynamic soil properties. In B. Prange (ed.), *Proceedings int. symp. dynamical methods in soil and rock mechanics, Karlsruhe*. Rotterdam: Balkema, Vol. 1, 3-36.
- Richart Jr., F.E. 1982. Discussion. In S. Prakash (ed.), *Recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics; Proc. intern. conf., St. Louis*. St. Louis: University of Missouri-Rolla, Vol. III, 914-915.
- Simpson, B. 1992. Retaining structures: Displacement and design. *Géotechnique* 42: 541-576.
- Szavits-Nossan, A. & Kovačević, M.S. 1994. A kinematic hardening soil model for wide shear strain ranges. *International Journal for Engineering Modelling* 7(3-4): 55-63.
- Szavits-Nossan, A., Kovačević, M.S., Szavits-Nossan, V. (1999). Modeling of an anchored diaphragm wall. *Proc. Internatl. FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics: FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*. Minneapolis. eds.: Detournay & Hart, Balkema, Rotterdam, 451-458.
- Tatsuoka, F. & Kohata, Y. 1995. Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications. *University of Tokyo, Report of the Institute of Industrial Science* 38(5).
- Tatsuoka, F., Ishihara, K. 1974. Yielding of sand in triaxial compression. *Soils and Foundations* 14: 63-76.
- Tatsuoka, F. & Shibuya, S. 1991. Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests. Key note lecture for session no. 1. *Proc. 9-th Asian regional conf. on soil mechanics and foundation engineering, Bangkok*.
- Vermeer, P.A. 1978. A double hardening model for sands. *Géotechnique* 28(4): 413-433.
- Vermeer, P.A. 1984. A five-constant model unifying well established concepts. In Gudehus et al. (eds.), *Constitutive relations for soils*. Rotterdam: Balkema, 175-197.