

Franjo VERIĆ
prof. dr., dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Krešo IVANDIĆ
dr., dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

TEMELJENJE ANTENSKIH STUPOVA

SAŽETAK: Vlačne sile na temelje nastaju kod niza različitih objekata pa tako i prilikom izgradnje visokih čeličnih stupova za dalekovode ili stupova za bežičnu telefoniju. Nosivost ovakvih temelja opterećenih vlačnim silama je uvjetovana dimenzijama temelja i parametrima posmične čvrstoće tla, ali i načinom izvedbe jame za ovakve temelje. U Hrvatskoj je predviđeno cca 200 novih stupnih mjesta visina stupova do 60.0 m za potrebe nove mreže bežične telefonije VIP-Net. U radu će biti prikazan predloženi postupak proračuna vlačno opterećenih temelja u uslojenom tlu te usporedba postupka s dosadašnjim načinima proračuna takovih temelja.

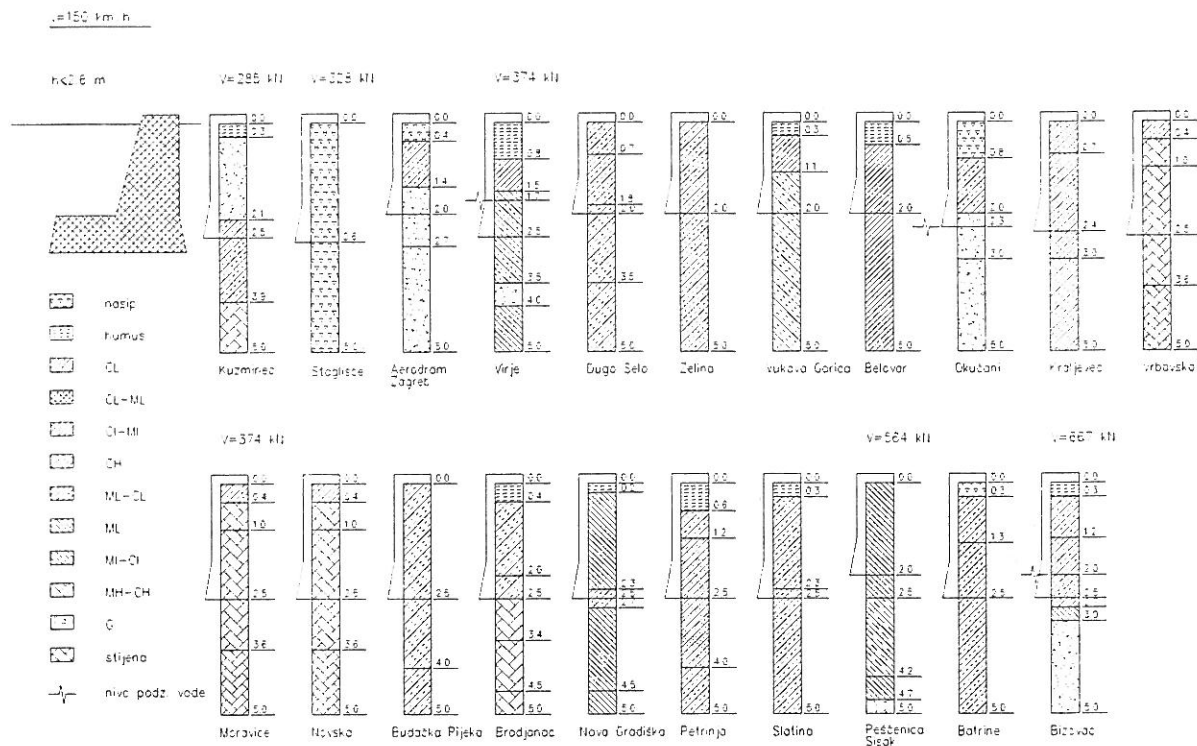
FOUNDATION OF ANTENNA MASTS

SUMMARY: Foundations of different structures are exposed to tensile forces that appear also during the construction of lifeline steel masts or masts for mobile telephony. The loadcarrying capacity of such foundations depends on their dimensions, parameters of shear strength of subsoils and the method of excavation of foundation pits. In Croatia approximately 200 new antenna masts of 60 m height are foreseen to be constructed for the mobile telephony operator VIP-Net. The paper presents the analytical method for calculating tensile loaded foundations cast in layered soil. The proposed method is compared to the present methods of calculating such foundations.

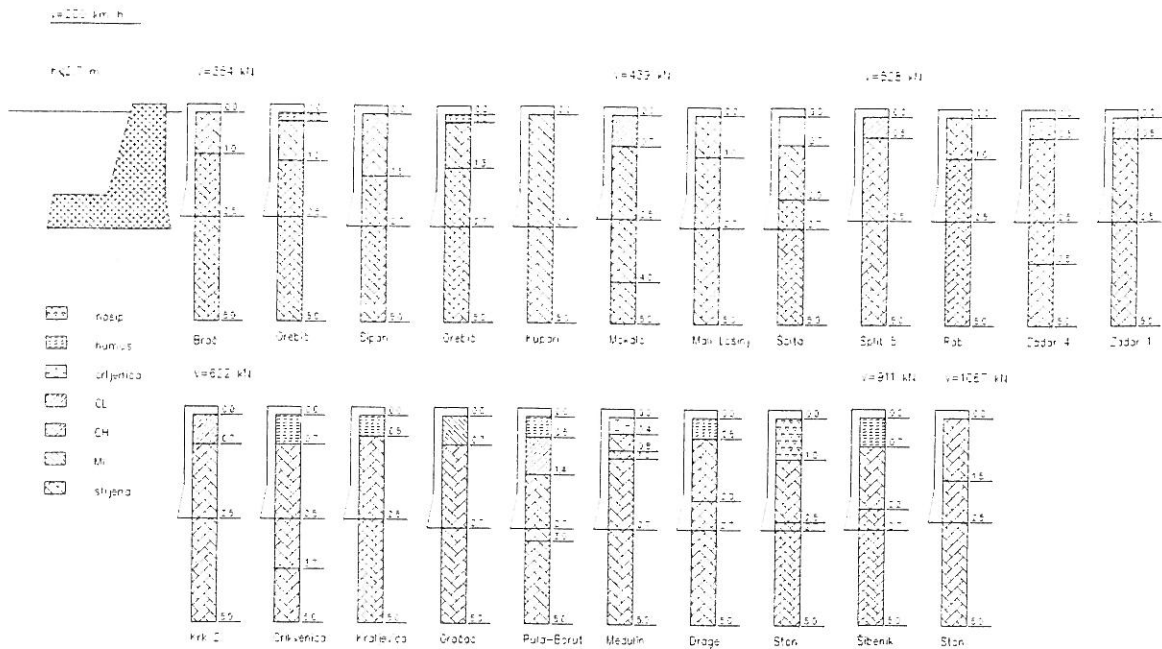
UVOD

Nova mreža mobilne telefonije VIP-Net u Hrvatskoj predviđa cca 200 stupnih mjesta sa visinama stupova od 24.0 m do 60.0 m u dvjema vjetrovnim zonama sa $v = 150 \text{ km/h}$ i $v = 200 \text{ km/h}$. Svakom se stupnom mjestu posvetila potrebna pažnja pri projektiranju i izvedbi, jer su uvjeti izvođenja bili rijetko dovoljno slični za nekritičku primjenu prethodno izvedenih rješenja. Republika Hrvatska može se grubo podijeliti na dvije zone s obzirom na vrstu tla. Prva je zona unutrašnjost Hrvatske gdje prevladavaju tla s glinom, prahom, pijeskom i šljunkom i njihovim mješavinama, dok je zona uz Jadransko more sastavljena uglavnom od stjenovitog tla. Osim ove podjele i projektna brzina vjetra je veća uz obalu u odnosu na zaleđe. Na slikama 1. i 2. prikazan je niz profila terena za spomenute vjetrovne zone, gdje se zorno može uočiti razlika u geološkim profilima obalnog dijela Hrvatske i njezina zaleđa.

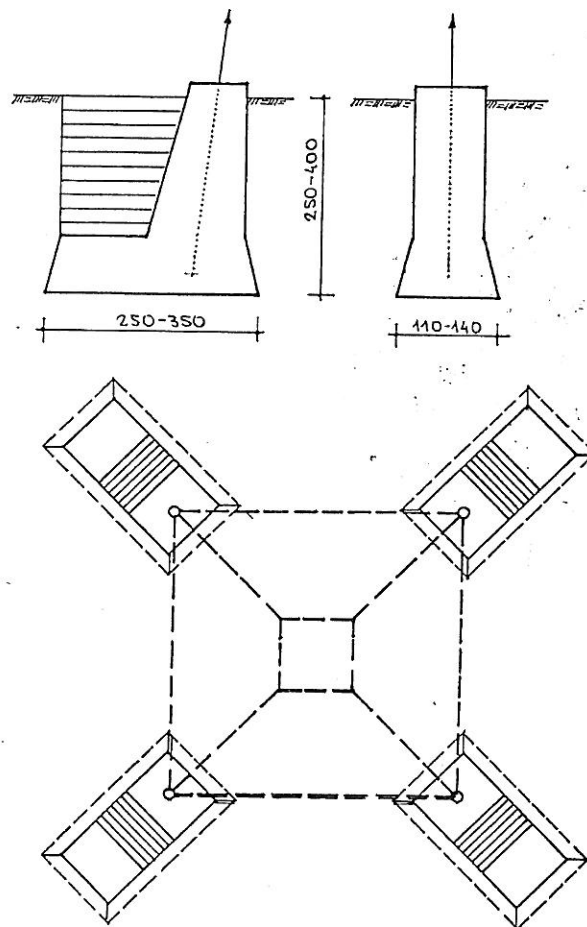
Na slikama 3. i 4. dan je tlocrtni položaj temelja te najčešće dimenzije uz njihovo prostorno oblikovanje uvjetovano željom za iskorištenjem maksimalne sile otpora prilikom čupanja temelja. Bez obzira na usvojeni način proračuna vlačno opterećenog temelja, te na njihov oblik i dimenzije, tendencija je "dirigirati" položajem potencijalne klizne plohe u tom smislu da do loma dolazi u tlu koje je u najmanjoj mogućoj mjeri nedirnuto. To znači da ploha sloma prolazi kroz materijal gdje se mogu maksimalno aktivirati parametri čvrstoće tla. To će biti moguće pravilnim oblikovanjem temelja, tj. izvedbom potkopne stope. Potkopnu stopu nije uvijek moguće izvesti npr. u nekoherentnom tlu ili u stijeni gdje je potrebno miniranje. U takvom slučaju oblikovanje temelja izvodi se bez potkopne stope sa zakošenim stranicama iskopa ili vertikalno u stijeni, potrebnih dimenzija prema projektiranom opterećenju.



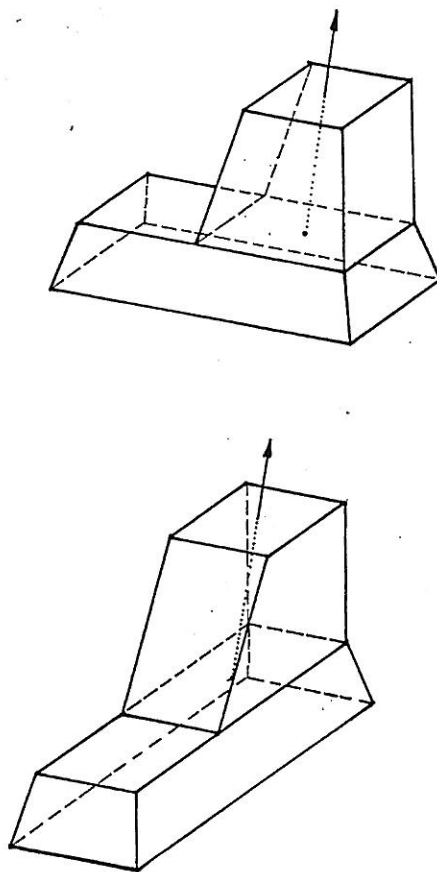
Slika 1. Primjer profila terena iz vjetrovne zone $v=150 \text{ km/h}$.



Slika 2. Primjer profila terena iz vjetrovne zone $v=200 \text{ km/h}$.



Slika 3. Tlocrtni položaj temelja.

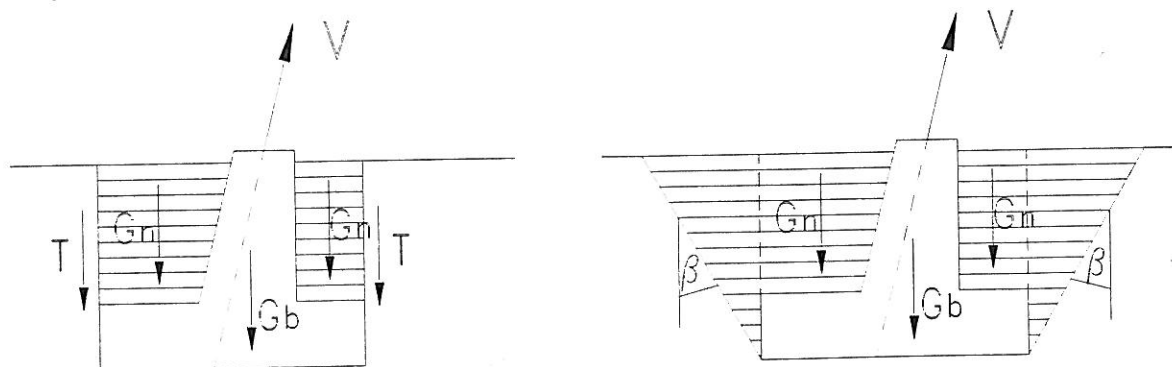


Slika 4. Oblikovanje temelja.

METODE PRORAČUNA VLAČNIH TEMELJA

Klasične metode proračuna

Klasične metode proračuna nosivosti vlačnih temelja pretpostavljaju ravne plohe sloma. Djelovanju vlačne sile suprotstavlja se vlastita težina tla temeljne konstrukcije u tijelu piramidalnog klina ili prizme (slika 5.). Konzervativno se uzima dominantni utjecaj vlastite težine iz realne pretpostavke da gravitacija nikad neće "zakazati", dok se svi ostali bitni faktori, koji imaju utjecaj na konačnu slomnu silu, ne uzimaju u razmatranje. Ako je tijelo prizmatično tj. ako se pretpostavlja vertikalna ploha sloma vanjskoj sili se suprotstavlja osim vlastite težina tla i temelja i trenje na plaštu promatrane prizme. Dakako u tom slučaju dominantni problem je određivanje bočnog pritiska na plaštu, koji može varirati od mirnog pritiska do stanja plastične ravnoteže. Kod plohe popuštanja u obliku piramidalnog tijela vlačnoj sili se isključivo suprotstavlja vlastita težina tla i temelja.

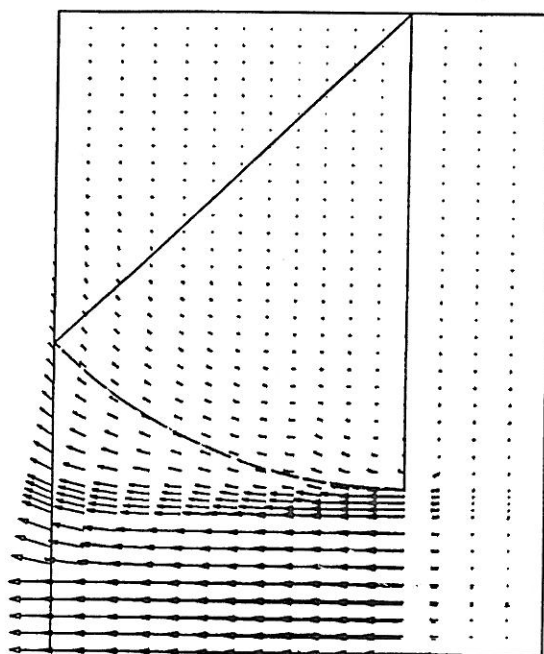


Slika 5. Klasične metode proračuna.

Prema oznakama na slici 5. može se napisati za faktor sigurnosti:

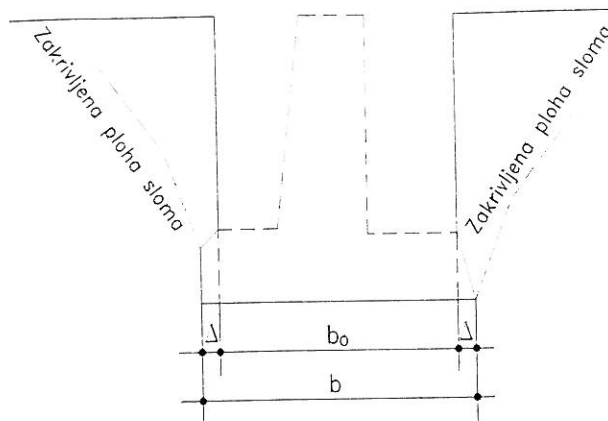
$$FS = \frac{G_b + G_n + T}{V} \quad \text{ili} \quad FS = \frac{G_b + G_n}{V}$$

Osnovni nedostatak ovih metoda je slaba teorijska podloga ili bolje reći neispravne teorijske pretpostavke metoda. Naime početne usvojene teorijske pretpostavke o ravnim plohama sloma (vertikalnim ili nagnutim pod kutem) nisu dobile potvrdu u rezultatima eksperimentalnih istraživanja. Ovi rezultati, kako u laboratoriju tako i na terenu, ali rezultati numeričkih istraživanja korištenjem metode konačnih elemenata i drugim numeričkim metodama, pokazuju da ploha sloma nije ravna već zakrivljena ploha. Primjerice na slici 6. može se vidjeti slika inkrementalnih pomaka za vlačno opterećeni temelj u homogenom tlu. Slika je dobivena korištenjem konačnih elemenata u programu PLAXIS. Općenito inkrementalni pomaci prikazuju sliku novonastalih pomaka za određeni inkrement opterećenja i govore o tendenciji smjera konačnih pomaka, pa tako i o nekoj konačnoj plohi sloma. Na slici je vidljivo da bi spoj tangenčnih linija na strelice pomaka (čija duljina govori i o veličini pomaka) dale zakrivljenu, a nikako ravnu liniju.



Slika 6. Inkrementalni pomaci vlačno opterećenog temelja u homogenom tlu.

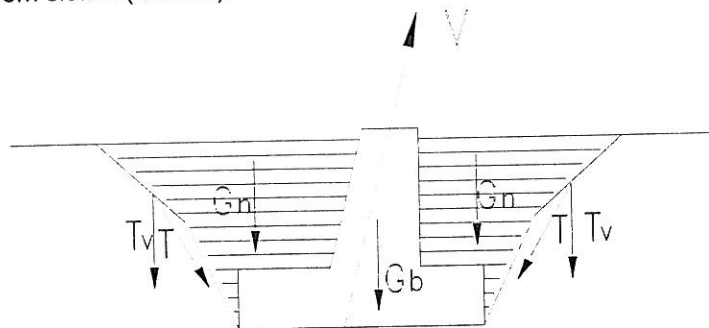
Klasične metode ne valja unaprijed odbaciti, jer postoje situacije kada se njihovom upotrebom mogu dobiti točna rješenja. Naime nije uvijek moguće iskopati temeljnu jamu s potkopnom stopom (slika 7.). Ovakav oblik temeljne jame omogućava izvedbu temelja najveće vlačne nosivosti. Lom se odvija kroz prirodno (intaktno) tlo te se razvija po zakrivljenoj plohi. S druge strane ako su stijenke iskopa okomite ili blago zakošene bez potkopne stope one postaju privilegirane plohe sloma što u proračunu treba uvažiti. Isto tako ako se jama izvodi u nagibu u nekoherentnom tlu (pijesak ili šljunak) ili slabo koherentnim tlima u podzemnoj vodi mogu se primijeniti klasični i suvremeni postupci proračuna, gdje treba paziti na parametre nasutog tla koje se ugrađuje oko izbetoniranog temelja.



Slika 7. Iskop temeljne jame s potkopnom stopom i potencijalne plohe sloma.

Novi metode proračuna

Suvremene metode pretpostavljaju zakrivljene plohe sloma pri proračunu granične sile. Metode se baziraju na analizi naprezanja i rezultatnih sila na graničnim površinama sloma, dok je sama slomna sila određena iz uvjeta ravnoteže mase tla ograničene površinom terena, temeljnom stopom i graničnom površinom sloma (slika 8.).



Slika 8. Noviji modeli proračuna.

Tako se pretpostavljaju torusne plohe sloma ili pak plohe sloma čiji je vertikalni presjek krivulja zvana logaritamska spirala. Povoljnim odabirom parametara ove krivulje (kut φ) može se proračun dosta pojednostaviti, ali ne na račun točnosti konačnog rješenja.

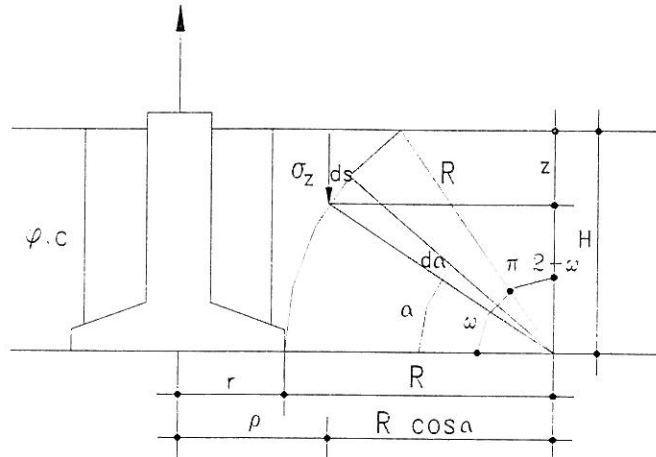
Niz autora je razradilo postupke određivanja lomne sile kao što su Balla (1961) koji je analizirao kružnu temeljnu ploču i kružnu plohu sloma, zatim Podsiadlo (1969), te Sarač (1975) s korištenjem logaritamske spirale. Sve ove metode promatraju homogeno tlo bez uslojenosti, a rezultati se relativno dobro poklapaju s rezultatima eksperimentalnih istraživanja. Najčešći slučaj u praksi je ipak taj da je tlo uslojeno, čak i na relativno malim dubinama na kojima se radi ovakvi temelji. Točnija analiza granične vlačne sile može biti napravljena korištenjem dostupnih programa baziranih na naprednim numeričkim metodama, uzimajući u obzir ovisnost odabranog modela popuštanja tla i dobivene lomne sile.

Predložena metoda proračuna

Predložena metoda bazira se na pretpostavci o torusnom obliku plohe sloma u uslojenom tlu. Proračun se provodi za proizvoljnu horizontalnu uslojenost tla sa slojevima različitih karakteristika. Promatra se statičko stanje ravnoteže bez D'Alembert-ove sile i brzine deformacije, nema očvršćavanja s vremenom, tlo je neosjetljivo na povijest opterećenja i deformiranja, dok su parametri posmične čvrstoće konstantni i dovoljni tj. samo oni karakteriziraju cjelokupni otpor sredine na pomak. Usvojen je Mohr-Coulomb-ov model za kriterij popuštanja tla.

Ovim se modelom želi dati jedno opće rješenje koje će obuhvatiti uslojenost tla, a koje može poslužiti kao baza i provjera rezultata budućih eksperimentalnih istraživanja. Predloženim modelom moguće je proučiti kakve razlike nastaju u konačnoj veličini slomne sile kada se promatra uslojeno u odnosu na homogeno tlo. Osim proračuna slomne sile za uslojeno tlo moguće je i varirati oblike kliznih ploha odnosno radijuse kružnih lukova torusnih ploha.

Za homogeno tlo s parametrima c , φ , γ konačni izraz za vlačnu nosivost temelja može se dobiti prema oznakama na slici 9.:



Slika 9. Homogeno tlo

$$\rho = r + (R - R \cos \alpha) = r + R(1 - \cos \alpha)$$

$$\sigma_z = \gamma z$$

$$\sigma_n = \sigma_z \cdot \sin \alpha = \gamma z \sin \alpha$$

$$\tau_f = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi = c + \gamma z \operatorname{tg} \varphi \sin \alpha$$

Diferencijal površine:

$$df = 2\rho\pi ds = 2\rho\pi ds R d\alpha = 2R\pi[r + R(1 - \cos \alpha)]d\alpha$$

Diferencijal sile posmičnog otpora u smjeru plohe loma:

$$dT = \tau_f df = (c + \gamma z \operatorname{tg} \varphi \sin \alpha) 2R\pi[r + R(1 - \cos \alpha)]d\alpha$$

Okomita sastavnica je:

$$dT_v = dT \cos \alpha$$

$$dT_v = 2R\pi [c r \cos \alpha + \gamma r H \operatorname{tg} \varphi \sin \alpha \cos \alpha - \gamma r R \operatorname{tg} \varphi \sin^2 \alpha \cos \alpha + c R(1 - \cos \alpha) \cos \alpha +$$

$$+ \gamma R H \operatorname{tg} \varphi (1 - \cos \alpha) \sin \alpha \cos \alpha - \gamma r R \operatorname{tg} \varphi \sin^2 \alpha (1 - \cos \alpha) \cos \alpha] d\alpha$$

Rezultantna sila za homogeni sloj:

$$T_v = \int_0^{\omega_n} dT_v$$

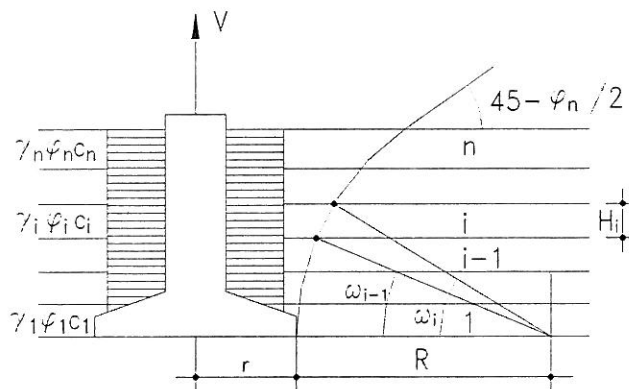
$$T_v = 2R\pi \left[rc \int_0^\omega \cos \alpha d\alpha + \gamma r H \operatorname{tg} \varphi \int_0^\omega \sin \alpha \cos \alpha d\alpha - \right. \\ \left. - \gamma r R \operatorname{tg} \varphi \int_0^\omega \sin^2 \alpha \cos \alpha d\alpha + Rc \int_0^\omega (1 - \cos \alpha) \cos \alpha d\alpha + \right. \\ \left. + \gamma R H \operatorname{tg} \varphi \int_0^\omega (1 - \cos \alpha) \sin \alpha \cos \alpha d\alpha - \gamma R^2 \operatorname{tg} \varphi \int_0^\omega (1 - \cos \alpha) \sin^2 \alpha \cos \alpha d\alpha \right]$$

U slučaju kada promatramo proizvoljan broj n slojeva tla (slika 10.) izraz za diferencijal sile posmičnog otpora u smjeru plohe loma za sloj i izgleda ovako:

$$dT_{vi} = 2R\pi \left\{ c_i + \left[\sum_{j=i}^{n-1} \gamma_{j+1} (\sin \omega_{j+1} - \sin \omega_j) + \gamma_i (\sin \omega_i - \sin \alpha) \right] R \operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha \right\} \\ [r + R(1 - \cos \alpha)] d\alpha$$

Ukupna okomita sastavnica za n slojeva tla.

$$T_{vi} = \int_{\omega_{i-1}}^{\omega_i} dT_{vi} \quad T_v = \sum_{i=1}^n T_{vi} = \sum_{i=1}^n \int_{\omega_{i-1}}^{\omega_i} dT_{vi} \quad \text{gdje } \omega_0 = 0$$

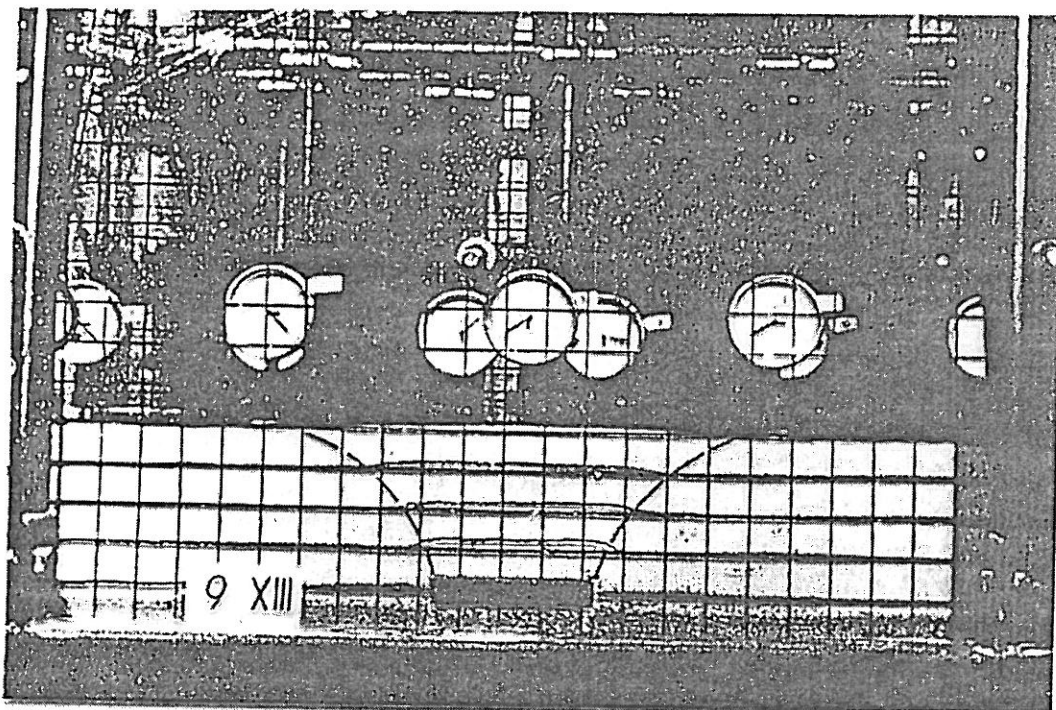
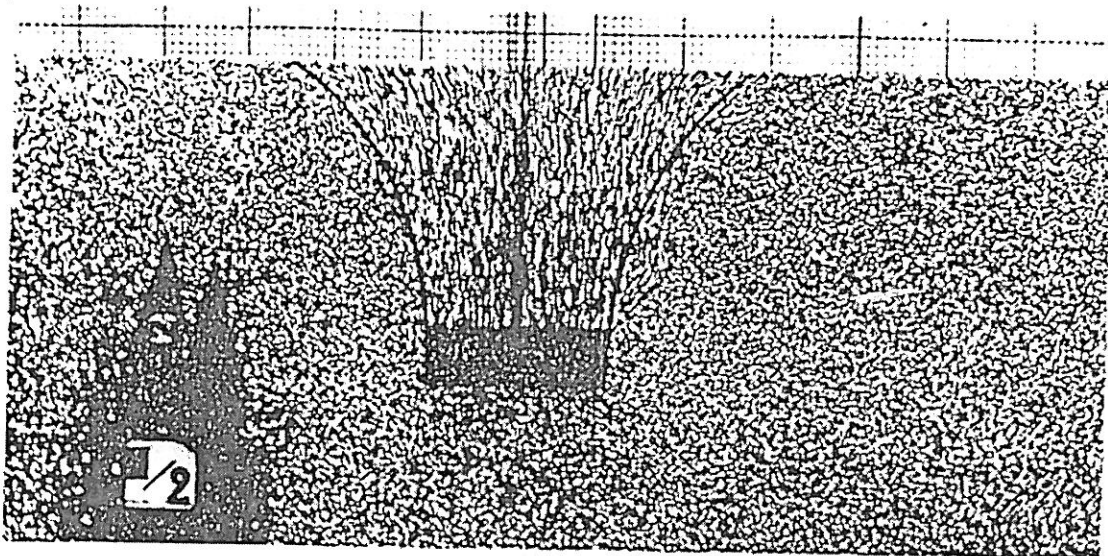


Slika 10. Proračun vlačne nosivosti temelja u uslojenom tlu.

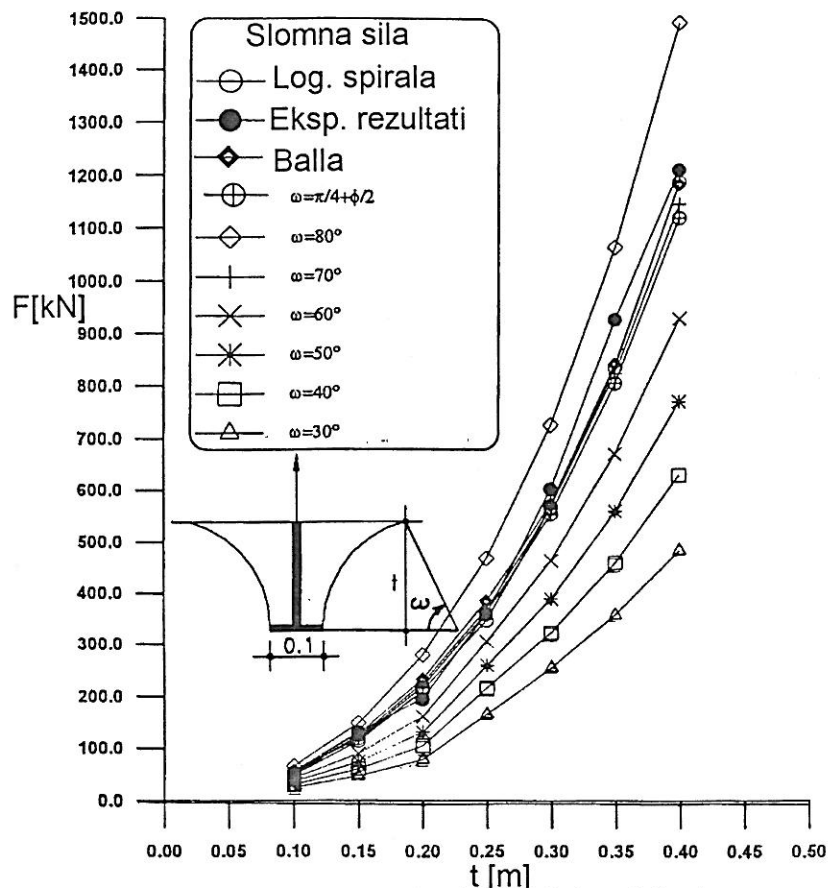
Usporedba predloženog postupka s postojećim rješenjima

Predloženi postupak uspoređivan je s dostupnim rezultatima istraživanja slomne vlačne sile na temelje različitih geometrijskih karakteristika u različitim tlima. Ovdje se daje prikaz usporedbi s eksperimentalnim istraživanjima provedenim u laboratoriju i na samom terenu u prirodi.

Na slici 11. dan je prikaz rezultata određivanja slomne sile na osnovu laboratorijskih pokusa provedenih u Sarajevu i Gdanku (1975. Dž. Sarač, F. Verić, K. Horvat). Provedena su istraživanja na ravninskim i prostornim modelima. Ovdje su prikazani rezultati određivanja lomne sile na ravninskom modelu (slika 11.) i to za temelj kružnog poprečnog presjeka. Temelj se nalazio u homogenom sloju pijeska sa slijedećim karakteristikama: kut trenja $\varphi=48^\circ$, kohezija $c=0$, i zapreminska težina $\gamma=17.05 \text{ kN/m}^3$. Najbolje poklapanje s dobivenim eksperimentalnim rezultatima, ali i s postojećim teorijskim rješenjima (Sarač i Balla) dobiva se za kliznu plohu koja siječe razinu terena pod kutem $\omega=\pi/4+\varphi/2$. Na slici su prikazani i rezultati dobiveni za različite radijuse kliznih ploha odnosno kuteve kružnih isječaka. Ovi rezultati mogu biti od koristi u situacijama kada je tlo uslojeno i kada nije unaprijed poznat oblik slomne plohe.

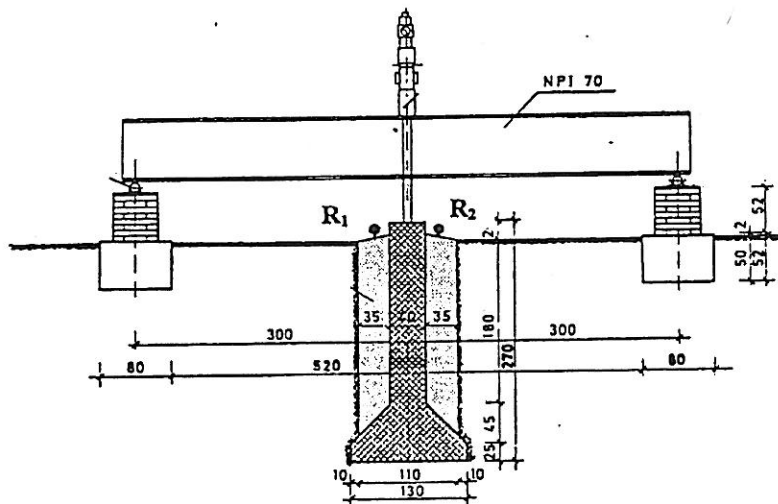


Slika 11. Modelsko ispitivanje pomaka čestica tla iznad sidrišne ploče (Taylor-Schneebeli; ravninski model s aluminijskim valjčicama Sarač 1975.) te ravninski modeli s pijeskom (Sarač 1975.).

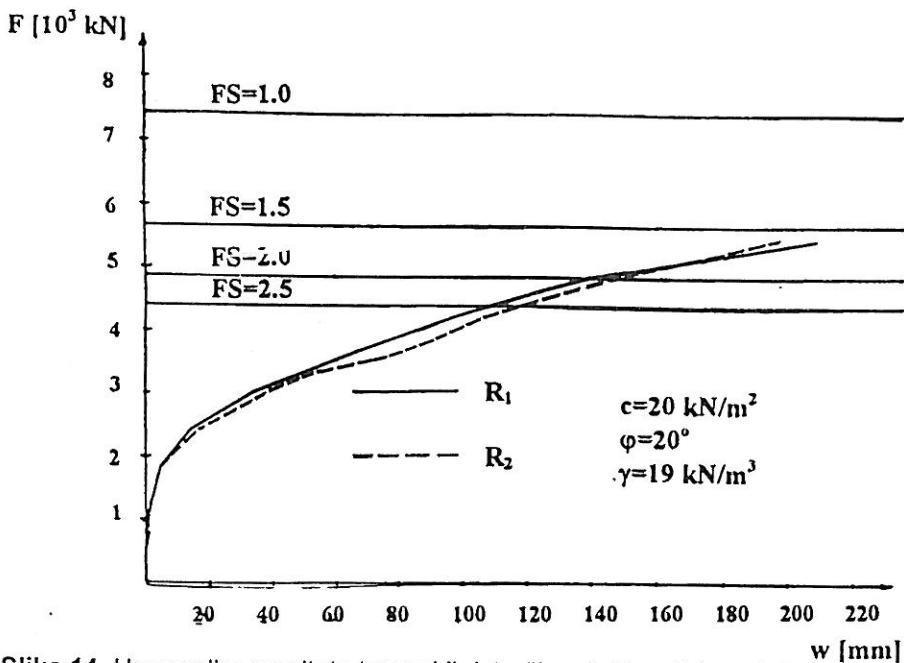


Slika 12. Usporedba rezultata laboratorijskih istraživanja i teorijskog rješenja.

Na slici 12. prikazan je terenski model izveden u Ivanić Gradu (1975. Dž. Sarač, F. Verić, K. Horvat). Izvedena su tri temelja dok su ispitivanja vršena s kratkotrajnim i dugotrajnim opterećenjem. Tlo na promatranoj lokaciji sastojalo se od anorganskih glina srednje i niske plastičnosti teško gnječive konzistencije sa slijedećim karakteristikama: kut trenja $\varphi=20^\circ$, kohezija $c=20 \text{ kN/m}^2$, i zapreminska težina $\gamma=19.0 \text{ kN/m}^3$. Na slici 13. dana je eksperimentalno dobivena zakonitost promjene vlačne sile i vertikalnog pomaka temelja. Na toj slici ucrtane su vrijednosti lomne sile dobivene prema predloženom postupku i to za više vrijednosti faktora sigurnosti s obzirom na parametre ispitivanog tla. Granične sile s obzirom na faktore sigurnosti dobro se uklapaju u dobivene rezultate, a istovremeno se može provjeriti i kriterij maksimalnog dozvoljenog vertikalnog pomaka temelja.

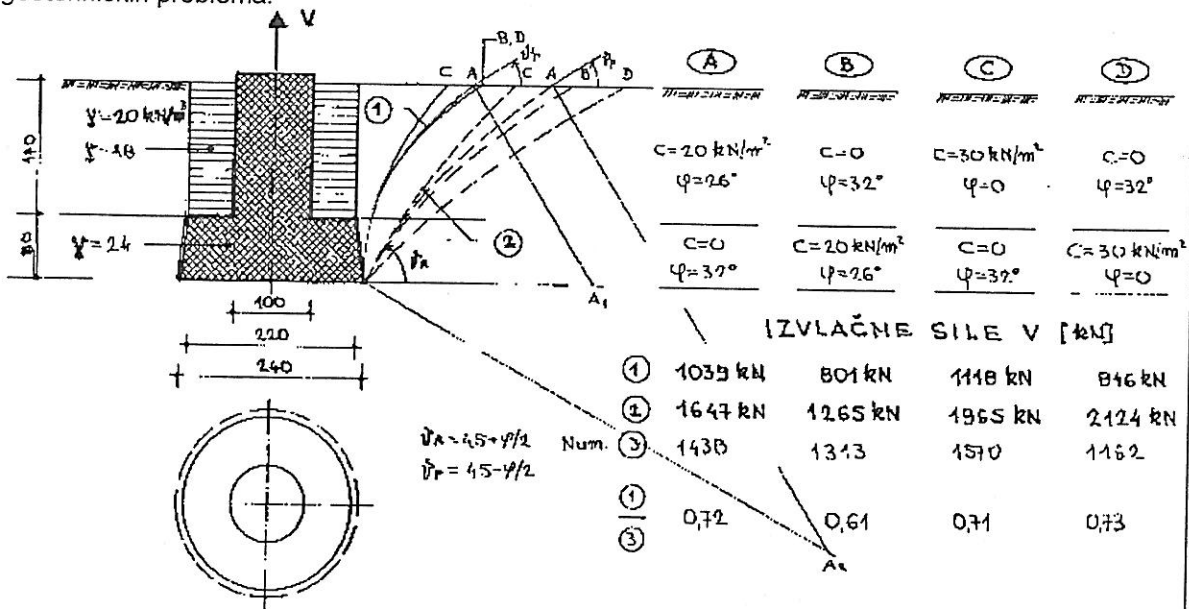


Slika 13. Terenski model



Slika 14. Usporedba rezultata terenskih istraživanja i teorijskog rješenja

Nadalje analizirana je usporedba rezultata dobivenih s različitim radijusima slomnih ploha (slika 14.), i to za dvoslojno tlo. U prvom slučaju je vertikalni kut na dnu temelja 90° , dok je u drugom slučaju on jednak $\nu_A=45-\varphi/2$. Za oba slučaja je kut izlaza slomne plohe $\nu_P=45+\varphi/2$. Na slici 14. je vidljivo da se veće granične sile dobivaju za duže radijuse slomnih ploha, jer su i njihove površine veće uz dakako veći volumen tla kojeg okružuju. Pravilan odabir radijusa odabrane slomne plohe mora biti uvjetovan direktnim ispitivanjem na samom terenu uz podršku dostupnim komercijalnim programima za proračun geotehničkih problema.



Slika 15. Usporedba rezultata za razne oblike slomnih ploha u uslojenom tlu

ZAKLJUČAK

Projektiranjem i izvedbom do sada cca 150 stupnih mjesta na djelovanje vlačnih, ali i tlačnih sila na temelje stupova za novu mrežu mobilne telefonije u Republici Hrvatskoj stečeno je novo iskustvo u njihovu projektiranju i izvođenju. Predloženi postupak proračuna granične vlačne sile plitkog temelja samca dobro se poklapa s već postojećim teoretskim rješenjima, ali i rezultatima eksperimentalnih istraživanja kako u laboratoriju tako i na samom terenu. Proračuni su provedeni za homogena tla i uspoređivani s podacima iz dostupne literature. Prikazanim rješenjima moguće je računati slomnu silu i za uslojeno tlo tj. za proizvoljan broj slojeva tla različitih parametara čvrstoće. Isto tako moguće je varirati i dimenzije samih kliznih ploha, koje su općenito torusne plohe s kružnom izvodnicom. Na taj način rezultati dobiveni predloženim postupkom na samom terenu, gdje je u većini slučajeva tlo uslojeno, mogu se usporediti s eksperimentalno dobivenim rezultatima. Tako se može, uz odgovarajuće numeričke modele, ali i iskustvo projektanta i istraživača, dobiti realna slika kako ukupne slomne sile vlačno opterećenog temelja, tako i samog oblika plohe popuštanja. Bez obzira na uslojenost tla i sam oblik plohe loma (ako se uopće može govoriti u tom slučaju o nekoj točnoj geometrijskoj formi te plohe), važno je na odgovarajući način izvoditi jame za tako opterećene temelje tj. s potkopnom stopom. Takav način izvedbe omogućit će maksimalno iskorištenje temeljnog tla.

LITERATURA

Balla, A.: Resistance to breaking out of mushroom foundations for pylons, *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, 1961.

Podsiadlo, R.: Graniczna siła wrywania z gruntu okrągłej płyty, *Rozprawy hydrotechniczne Instytutu Budownictwa wodnego*. Warszawa, 1969.

Sarač, Dž.: Bearing Capacity of Anchor Foundations as Loaded by Vertical Force, *Institute for Geotechnics and Foundation Engineering, Publications 5*, Sarajevo, 1975.

Sarač, Dž., Verić, F., Horvat, K.: Dimenzioniranje temelja dalekovodnih stupova prema vlačnoj sili, *Fond radova poduzeća "Geoexpert"*, Zagreb, 1976.

Chattopadhyay, B.C., Pise, P.J.: Breakout Resistance of Horizontal Anchors in Sand, *Soils and Foundations, Vol.26, No.4, 16-22, Dec. 1986*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.

VIP-Net, Arhiva Dalekovoda, Zagreb

VIP-Net, Arhiva Građevinskog fakulteta, Zagreb