

Stanislav ŠKRABL

doc.dr., dipl.inž.gradb., Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

GEOTEHNIČNA ANALIZA TEMELJNE PLOŠČE NA SLABO NOSILNIH TLEH

POVZETEK: V članku je prikazan postopek nelinearne in časovno odvisne analize interakcije med temeljno ploščo in zelo mehкими glinastimi tlemi. V analizi je upoštevan konsolidacijski proces za anizotropna, viskozna in časovno odvisna temeljna tla v pogojih prostorskih deformacijskih in napetostnih stanj. Vpliv napetosti oz. deformacij na stabilnostne razmere zemljinskih slojev je analiziran s posebnimi konsolidacijskimi končnimi elementi, ki so razviti na osnovi hkratne rešitve ravnotežnih in difuzijskih enačb za mehke glinaste zemljine. V članku so podane splošne rešitve za poljubne tipe izoparametričnih končnih elementov. Zveze med napetostmi in deformacijami v temeljni konstrukciji (plošči) so upoštevane z elastostatičnimi končnimi elementi, ki so razviti na osnovi Mindlin-ovih rešitev. Interakcijska analiza sovisnosti, med temeljno konstrukcijo in tlemi, temelji na osnovi izenačevanja pomikov v kontaktni ploskvi med temeljno konstrukcijo in tlemi. Reološke in konstitutivne sovisnosti glinastih zemljin so določene na osnovi rezultatov dolgotrajnih, počasnih, obremenilnih in razbremenilnih laboratorijskih triaksialnih preiskav. Uporabnost predlaganih rešitev je prikazana na praktičnem primeru kvadratne temeljne plošče temeljene na heterogenih glinastih tleh. Rezultati numerične analize so prikazani v obliki izolinij premikov, pornih tlakov ter varnostnih količnikov v tleh v vplivnem območju analiziranega objekta.

GEOTECHNICAL ANALYSIS FOR PLATE FOUNDATIONS ON LOW BEARING CAPACITY SOIL

SUMMARY: The procedure of non-linear and time dependent analysis of the interaction between plate foundation and very soft clay soil is presented in the paper. The consolidation process of anisotropic, viscous and time dependent foundation soil in the conditions of spatial deformation and stress states is considered throughout an analysis. The influence of stress and deformation on stability of the soil layers is analysed with special consolidation finite elements, which were developed on the basis of the simultaneous solutions of equilibrium and diffusion equations for soft clayey soil. The general solutions for arbitrary type of isoparametric finite element are given. The stress-strain relations for plate foundations are considered by elastostatic finite elements developed on the base of Mindlin's solution. The interaction analysis of dependence between foundation construction and foundation ground is based on equalizing displacements of soils and structure at the contact plane. The rheological and constitutive dependence of clayey soil are evaluated on the bases of long-term, slow, load and unload laboratory triaxial test results. The usefulness of the proposed solutions is shown on the practical case of quadratic foundation plate that lay on non-homogeneous clayey ground. The results of the numerical analysis are given as isolines of displacements, pore pressures, and factors of safety in the influenced area of ground.

UVOD

Pri statični analizi temeljnih konstrukcij iščemo hkratno rešitev deformacijskega oz. napetostnega stanja nelinearnih in časovno odvisnih glinastih zemljin in elastičnih temeljnih konstrukcij, ki se nahajajo na površini temeljnih tal. Na odnose med temeljno konstrukcijo in tlemi vplivajo mnogi materialni, geometrijski in obremenitveni pogoji, med katerimi so najpomembnejši, spremenljive reološke, hidrodinamične in stratigrafske značilnosti zemljin, propustnostne karakteristike, velikost ter časovna in prostorska razporeditev obremenitev temeljnih konstrukcij ter mnogi drugi vplivi, ki jih je v sami analizi težko natančno upoštevati.

OSNOVNE ENAČBE

Inkrementalno iterativni postopek za numerične analize interakcije temelj-tla je v skrajšani obliki prikazan v naslednjih odstavkih.

Zvezo med posplošenimi pomiki in obremenitvami za obe podkonstrukciji (P za ploščo ter T za tla) v analiziranem časovnem inkrementu Δt izvednotimo:

$$[P, T]\{\Delta W_P, \Delta W_T\} = \{\Delta R_P, \Delta R_T\}, \quad (1)$$

kjer sta P in T posplošeni togostni matriki temeljne konstrukcije in tal, ΔW_P in ΔW_T označujeta vektorja posplošenih vozliščnih pomikov (za ploščo vertikalni pomik in oba zasuka ter za zemljine pomiki v smereh posameznih koordinatnih osi ter porni tlak), in ΔR_P ter ΔR_T vektorja posplošenih vozliščnih obremenitev za temeljno ploščo in tla v vplivnem območju temeljne konstrukcije. Interakcijske sile Q in količino Φ izcejajoče se talne vode v procesu primarne konsolidacije v kontaktni ploskvi med ploščo in tlemi lahko v posameznem računskem inkrementu določimo z upoštevanjem že izvednotenih prirastkov pornih tlakov in vozliščnih obremenitev. Hkrati s sprotnim določanjem togostne matrike tal T in plošče P v numeričnem postopku sproti eliminiramo tiste prostostne stopnje (pomike, rotacije in porne tlake), ki niso skupni za obe podkonstrukciji. Statični sistem plošča-tla se lahko tudi med postopkom numerične analize sproti dinamično spreminja. V nekem poljubnem časovnem ali obremenitvenem inkrementu se lahko plošča v obravnavani točki dotika tal, medtem, ko ob spremembi obremenitev v naslednjem inkrementu lahko nastopi diskontinuiteta med podkonstrukcijama (primer obremenitve tal ob plošči) itd. Problematika aktiviranja diskontinuitet v kontaktni ploskvi je v obravnavanem postopku rešena z ozirom na stanje interakcijskih sil ob koncu analiziranega inkrementa t_{r-1} .

Kadarkoli je učinkovita normalna interakcijska sila v obravnavanem vozlišču N_i natezna, tedaj obravnavano prostostno stopnjo v numeričnem postopku sproti eliminiramo ter v tej prostostni stopnji interakcija med podkonstrukcijama ne nastopi. Zato je v numeričnem postopku potrebno v vseh inkrementih sproti preverjati možnosti aktiviranja posameznih diskontinuitet med podkonstrukcijama. Strižne diskontinuitete med podkonstrukcijama nastopijo, kadar je nedrenirana strižna trdnost zemljine v kontaktni ploskvi med ploščo in tlemi prekoračena.

Upogibna togostna matrika temeljne plošče je določena na osnovi Mindlin-ove teorije, medtem, ko je plošča v svoji ravnini povsem toga.

Togostno matriko tal izvednotimo z upoštevanjem ravnotežnih (2) in kontinuitetnih pogojev (3):

$$\dot{\sigma}_{ij,i} - \dot{f}_i = 0 \quad (2)$$

$$(k_{ij}u_j)_{,i} - \gamma_w(\beta \dot{u} + \dot{\varepsilon}_v) = 0, \quad (3)$$

kjer je σ_{ij} napetostni tenzor, f_i vektor volumenskih sil, k_{ij} tenzor propustnosti, u porni tlak, γ_w prostorninska teža kapljevine, β koeficient stisljivosti kapljevine (voda in plini), in ε_v

prostorninska deformacija. Z upoštevanjem spremembe napetostnega stanja $d\sigma$, ki ga sestavljata elastoplastična $d\sigma^{ep}$ in viskozna $d\sigma^v$ komponenta dobimo:

$$d\sigma_{ij}^{ep} = C_{ijkl} d\epsilon_{kl} \quad (4)$$

$$d\sigma_{ij}^v = c_{ij} dt \quad (5)$$

$$C_{ijkl} = E^* \left[\left(\frac{1}{3G} - \frac{2}{9K} + \left(\frac{2}{3L} + \frac{1}{3F} \right) p / q \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + \left(\frac{2}{3K} \right) \delta_{ik} \delta_{jl} - \left(\frac{1}{3Fq} \right) \sigma_{ij} \delta_{kl} - \left(\frac{2}{3Lq} \right) \sigma_{kl} \delta_{ij} \right] \quad (6)$$

$$c_{ij} = E^* \left[\dot{r} \left(S_{ij} / (Fq) - d_{ij} / G \right) + \dot{s} \left(d_{ij} / L - S_{ij} / (3Kq) \right) \right] \quad (7)$$

$$E^* = 3KGLF / (LF - 3KG), \quad (8)$$

kjer sta p in q oz. r in s normalna in distorzijska komponenta napetosti oziroma deformacij ter K , G , L in F deformacijski moduli, ki jih iz vrednotimo:

$$K = r_p \quad (9); \quad G = s_q \quad (10); \quad L = r_q \quad (11); \quad F = s_p \quad (12)$$

Togostno matriko tal iz vrednotimo:

$$T = \int_V \begin{bmatrix} L_{i,k} L_{j,l} C_{1kl1} & L_{i,k} L_{j,l} C_{1kl2} & L_{i,k} L_{j,l} C_{1kl3} & -L_{i,1} S_j \\ L_{i,k} L_{j,l} C_{2kl1} & L_{i,k} L_{j,l} C_{2kl2} & L_{i,k} L_{j,l} C_{2kl3} & -L_{i,2} S_j \\ L_{i,k} L_{j,l} C_{3kl1} & L_{i,k} L_{j,l} C_{3kl2} & L_{i,k} L_{j,l} C_{3kl3} & -L_{i,3} S_j \\ -L_i S_{j,1} & -L_i S_{j,2} & -L_i S_{j,3} & -\beta S_i S_j - S_{i,k} S_{j,l} k_{kl} \Delta t_r / 2\gamma_w \end{bmatrix} dV, \quad (13)$$

kjer so L oz. S interpolacijske funkcije za pomike in porne tlake v poljih prostorskih končnih elementov.

Na osnovi podanih teoretičnih osnov je izdelan računalniški program SPACESOIL, ki omogoča konsolidacijske ter druge zahtevne geotehnične analize. Program je zgrajen modugno, razpolaga s sorazmerno bogato knjižnico končnih elementov, ki omogočajo sorazmerno natančno modeliranje zahtevnih geotehničnih primerov. Pomanjkljivost programa je predvsem v dejstvu, da ga je možno uporabljati le na večjih računalniških sistemih (VAX 8800 ipd.).

Praktični primer

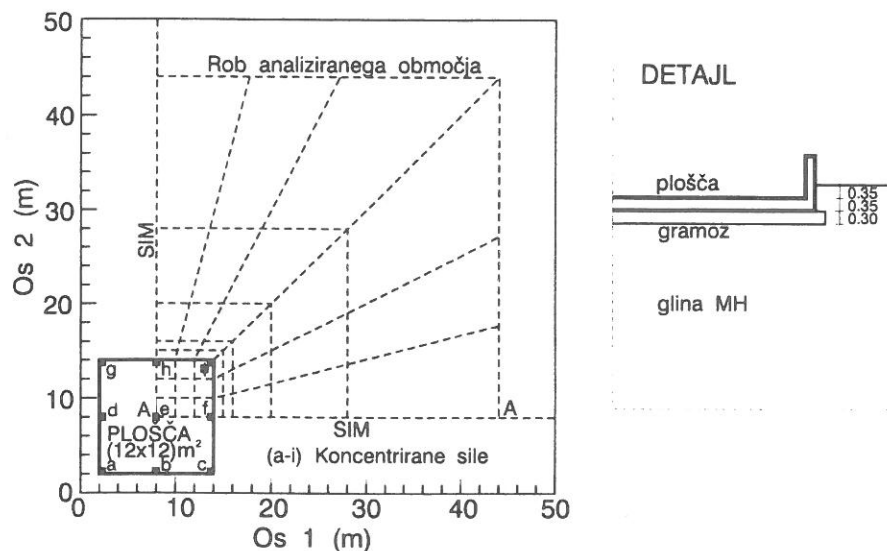
S programom SPACESOIL je analizirana interakcija AB temeljne plošče s tlemi v pogojih prostorskih deformacijskih in disipacijskih stanj. Plošča je kvadratne oblike, velikosti $(12 \times 12) \text{ m}^2$, debeline 35 cm ter leži na 30 cm debelem sloju gramoznega nasutja, v globini 70 cm pod površino obstoječega terena. Temeljna tla sestavlja 7 m debel sloj barjanske gline MH, ki leži na nepodajni podlagi. Nivo talne vode je v globini 1 m pod površino.

V analizi je upoštevana lastna teža plošče $g=10 \text{ kPa}$ ter koristna obremenitev z devetimi koncentriranimi silami (a do l), ki so prikazane na slikah 1 in 2. Ob plošči je predviden dodatni zemljinski nasip višine 0.5 m s prostorninsko težo $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$. Geometrijski, stratigrafski in obremenilni podatki temeljne plošče so prikazani na slikah 1 in 2.

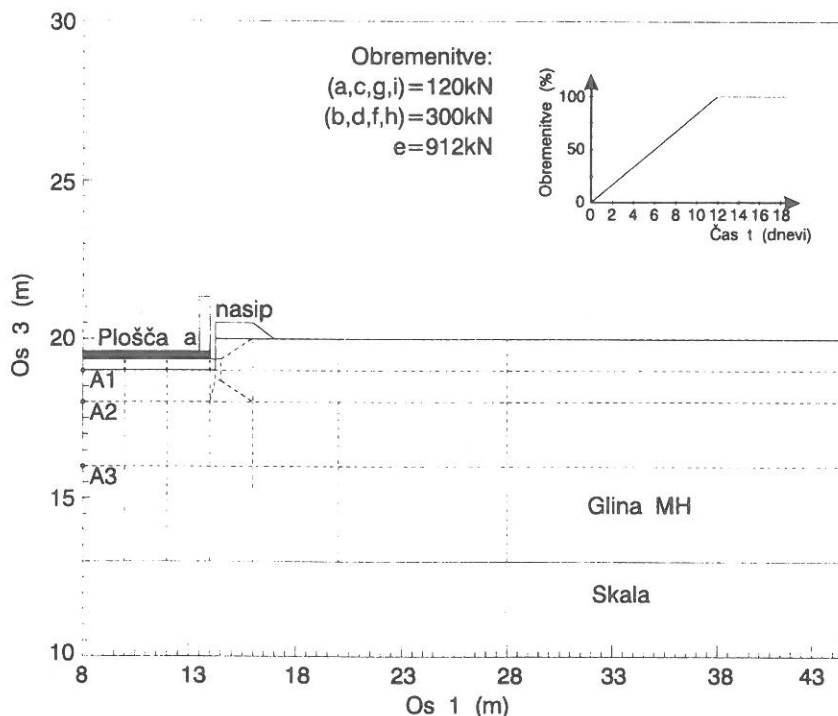
Za zemljino MH so upoštewane enake reološke in konstitutivne sovisnosti, ki so podane v [3],

začetna sferna deformacijska hitrost $\dot{\epsilon} = 10^{-11} \text{ s}^{-1}$, količnik mirnega zemeljskega pritiska $K_0 = 0.67$ ter izotropna propustnost zemljine ($k_{ij} = \delta_{ij} k$), kjer je k koeficient propustnosti, ki ga za poljubno napetostno in deformacijsko stanje iz vrednotimo v odvisnosti od poroznosti

$k = k_0 \exp(k_1 e)$ (e označuje količnik por, k_0 in k_1 pa sta za izbrano zemljino konstanti). V analizi sta upoštevani vrednosti $k_0 = 10 \text{ m/s}$ ter $k_1 = 2.3$.

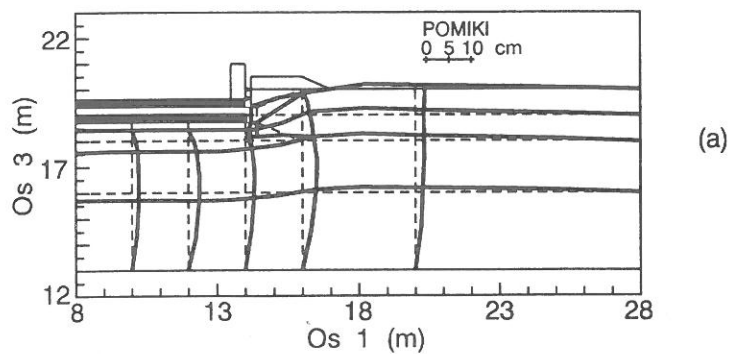


Slika 1: Tloris temeljne plošče z geometrijskimi, stratigrafskimi in obremenilnimi podatki

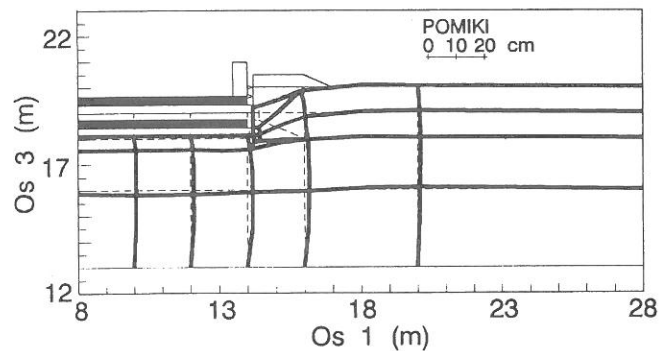


Slika 2: Prerez A-A analiziranega območja

Temeljna tla so diskretizirana z 90 prostorskimi končnimi elementi (s po 68 prostostnimi stopnjami), temeljna plošča pa s petimi elementi (s po 40 prostostnimi stopnjami). Za ponazoritev primernosti predlaganega inkrementalno iteracijskega postopka konsolidacijske analize tukaj navajamo nekaj najzanimivejših rezultatov. Slika 3 prikazuje pomike v prerezu A-A ob koncu obremenjevanja in tri mesece kasneje. Na sliki 4 so prikazane izobare pornih tlakov ob istem času kot pomiki. Slika 5 prikazuje izololinije varnostnih količnikov ob koncu obremenjevanja ter deset dni in tri mesece kasneje.

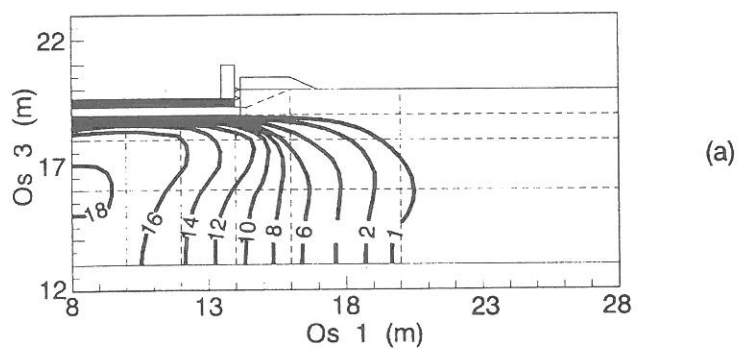


(a)

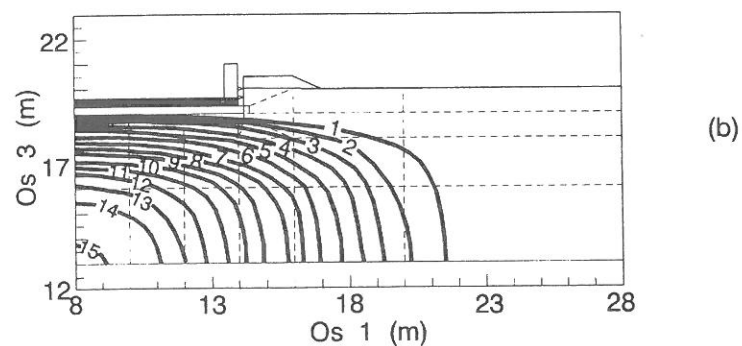


(b)

Slika 3: Izolinije pomikov v prerezu A-A; (a) ob koncu obremenjevanja ter (b) tri mesece kasneje

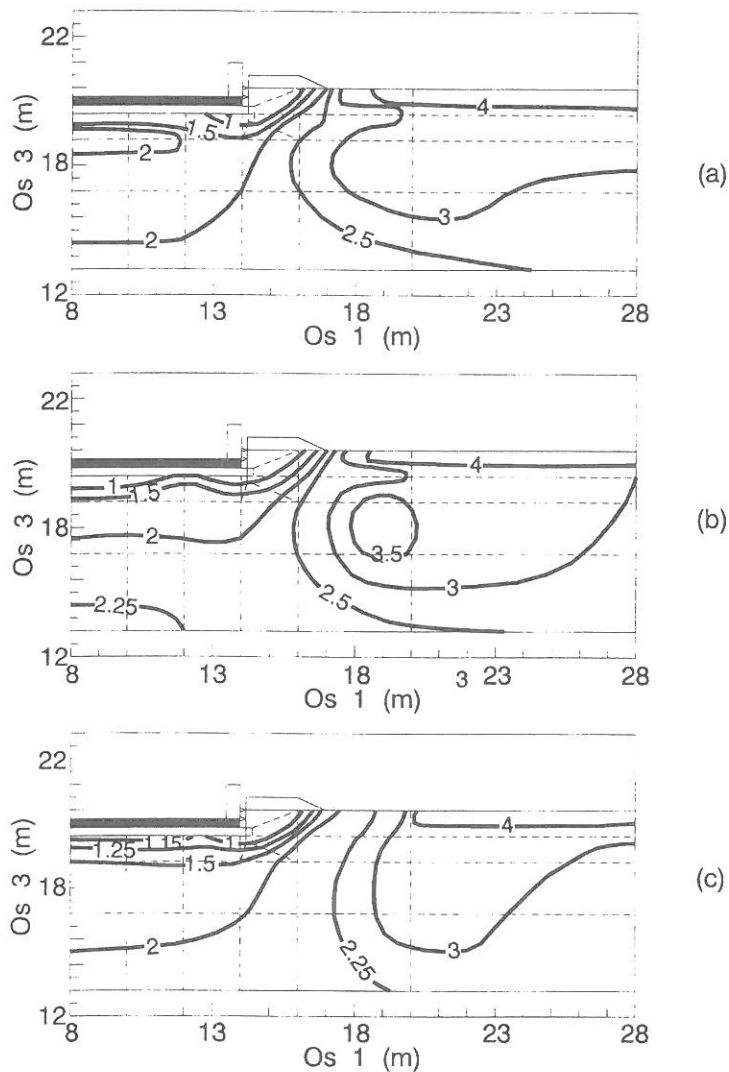


(a)



(b)

Slika 4: Izobare pornih tlakov; (a) ob koncu obremenjevanja ter (b) tri mesece kasneje



Slika 5: Izolinije varnostnih količnikov; (a) ob koncu obremenjevanja, (b) deset dni ter (c) tri mesece kasneje

Zaključki

Rezultati opravljenih analiz kažejo, da je predlagani numerični postopek primeren za zahtevnejše geotehnične analize. Ocenjujemo, da se lahko kritično stanje nosilnosti oz. stabilnosti slabo nosilnih temeljnih tal pojavi v daljšem ali krajšem času po doseženi maksimalni obremenitvi nato pa se razmere postopno izboljšujejo. Menimo, da je časovni zamik nastopa kritičnega stanja v veliki meri odvisen od propustnosti in pogojev dreniranja zemljin saj se za obravnavane, sorazmerno dobro propustne zemljine stabilnostne razmere izboljšajo že tri mesece po obremenitvi. Vidimo, da je propustnost zelo pomembna in hkrati tudi zelo težavno določljiva lastnost mehkih glinastih zemljin.

LITERATURA

- [1] Trauner, L., Škrabl, S. (1992). Soils Consolidation Using FEM, FEMSA92, South Africa, Cape Town, 549-556.
- [2] Trauner, L., Škrabl, S. (1991). Numerical Solution of Hinge-Tied Foundation Construction Interaction, BAM, Budapest, 144-150.
- [3] Škrabl, S. (1991). Interakcija členkasto povezanih temeljnih konstrukcij s tlemi, Doktorska disertacija, Univerza v Mariboru, Tehniška fakulteta.