

TEMELJENJE NA ŽALUZIJSKIH KONSTRUKCIJAH

FOUNDATION ON HINGE TIED CONSTRUCTION

LUDVIK TRAUNER, prof. dr., Tehniška fakulteta Univerze v Mariboru
BOJAN ŽLENDER, dr., Tehniška fakulteta Univerze v Mariboru
STANISLAV ŠKRABL, doc. dr., Tehniška fakulteta Univerze v Mariboru

POVZETEK: *Prispevek podaja kratek pregled raziskovalnega dela, ki obravnava analizo temeljne konstrukcije na slabo nosilnih tleh. Na podlagi večletnih nelinearnih in časovno odvisnih teoretičnih in eksperimentalnih preiskav smo razvili prototip plitvega temeljenja na členkasto povezanih temeljnih ploščah. Numerične rešitve, dobljene z MKE, upoštevajo princip velikih deformacij za konstrukcijo in nelinearno časovno odvisnost napetosti, pomikov, stabilnostnih pogojev in disipacije pornih tlakov v tleh. Aplikacija na štirih prototipnih in šestindvajsetih vrstnih hišah, grajenih na zelo mehkih tleh na Ljubljanskem barju, je potrdila uporabnost predlaganega modela. Primerjave med numeričnimi rešitvami in meritvami na terenu pa nakazujejo splošno uporabnost podanih rešitev.*

SUMMARY: *The paper presents a quick report of our research work which deals with the analysis of the foundation structure on the soil of low bearing capacity. On the basis of yearlong theoretical and experimental investigations, the prototype of the spread "blind" foundation was erected on site. The numerical solutions obtained by FEM take into account large deformations for structures and non-linear time dependence in any stress, strain, stability and dissipations states for soils. The application on four prototype houses and twenty-six terraced family houses resting on soft soils of the Ljubljana marsh, shows the usefulness of the suggested model. The comparison of numerical and in-situ measurement results indicates the general usefulness of the suggested model.*

UVOD

Obstoječe metode projektiranja temeljnih konstrukcij v svetu in pri nas izhajajo iz poenostavljene linearne elastične teorije ali pa iz zahtevnejših nelinearnih, elasto-viskoplastičnih odnosov, z vrsto poenostavitve za ravninske probleme. Manjkajo relativno enostavne in uporabne metode, ki bi omogočale dovolj zanesljivo analizo tudi zahtevnejših prostorskih problemov, še posebej v primerih, ko so tla izrazito nehomogena in slabo nosilna. Zato klasične analize temeljenja objektov na slabo nosilnih tleh vodijo praviloma k metodam globokega temeljenja objektov, s katerim prenesemo obremenitve objekta v nižje ležeče, nosilnejše sloje; pogosto pa tudi k metodam izboljšav ali izmenjave slojev zemljin, s čimer povečamo nosilnost temeljnih tal do takšne mere, da je možna izvedba plitvega temeljenja. Z omenjenimi metodami temeljenja sicer dosežemo zadostno varnost gradnje, vendar so stroški temeljenja praviloma visoki in pogosto presegajo sprejemljivo mejo, ki jo objekt cenovno lahko prenese. Zato smo v Laboratoriju za mehaniko tal (LMT) na Tehniški fakulteti v Mariboru iskali alternativne rešitve temeljenja na slabo nosilnih tleh, ki bi bile ekonomsko sprejemljivejše, pa kljub temu varne in tehnično popolnoma skladne klasičnim izvedbam. Razvili smo prototip žaluzijske temeljne konstrukcije, ki predstavlja izviren pristop k plitvemu temeljenju na slabo nosilnih tleh. Poročilo podaja kratek pregled raziskovalnega dela, ki obsega razvoj prototipa od teoretične podlage do uporabe v inženirski praksi.

CILJI RAZISKOVALNEGA DELA

Osnovni cilj raziskovalnega dela je bil poiskati metode plitvega temeljenja objektov na slabo nosilnih tleh, ki bodo tehnično in ekonomsko optimalne. Za doseg cilja smo v LMT na TF v Mariboru izpeljali večletni raziskovalni projekt, ki je bil smiselno razdeljen na tri stopnje: eksperimentalno raziskovanje, razvoj teoretične podlage in aplikacijo v inženirski praksi. V eksperimentalnem raziskovanju smo načrtovali terenska sondažna dela in preiskave tal, laboratorijske preiskave zemljin, laboratorijski preizkus členkov ter izvedbo terenskih eksperimentalnih analiz z obtežilnim preizkusom temeljnih tal in modelno eksperimentalno analizo temeljenja na prototipu žaluzijske temeljne konstrukcije.

Osnovni cilj razvoja teoretične podlage je bil izdelati računalniški program za izračun interakcije objekt - tla, ki bo hkrati upošteval heterogenost in anizotropijo temeljnih tal, elasto-viskoplastične lastnosti zemljin in konsolidacijske pojave v tleh. Za to je bilo potrebno podati reološke odnose zemljin, ki tvorijo temeljna tla, opisati konsolidacijske pojave v nekoherentnih anizotropnih tleh, definirati konstitutivne odnose za zemljine, členkasto povezane temeljne konstrukcije in izpeljati numerične postopke za izračun interakcije med objektom in tlemi.

V aplikativnem delu smo načrtovali verifikacijo novih spoznanj s terenskimi preizkusi, modelnimi preiskavami in izgradnjo prototipnih temeljnih konstrukcij.

TEORETIČNA PODLAGA

Plitvo temeljenje objektov na slabo nosilnih tleh je zelo zahtevno. Geotehnično analizo izvedemo na podlagi skrbno opravljenih terenskih in laboratorijskih preiskav ter ob upoštevanju najnovejših teoretičnih in praktičnih spoznanj. Vseh prepletenih reoloških odnosov v tleh ne moremo zajeti v praktičnem računu; lahko pa s sodobnimi numeričnimi metodami in z uporabo računalniške opreme dokaj dobro simuliramo reološko obnašanje tal oz. interakcijo med tlemi in objektom. Skozi večletno teoretično-eksperimentalno raziskovalno delo smo v LMT razvili fizikalni in matematični model, ki hkrati obravnava nelinearne in časovno odvisne reološke lastnosti tal in linearno elastične lastnosti temeljne konstrukcije objekta.

Kratek pregled teoretične podlage je podan v dodatku.

EKSPERIMENTALNE ANALIZE

V sklopu raziskovalne naloge smo ob standardnih terenskih in laboratorijskih preiskavah tal izvedli na Ljubljanskem barju še modelni preizkus in obtežilni preizkus ter v laboratoriju preiskavo nosilnosti dilatacijskih členkov.

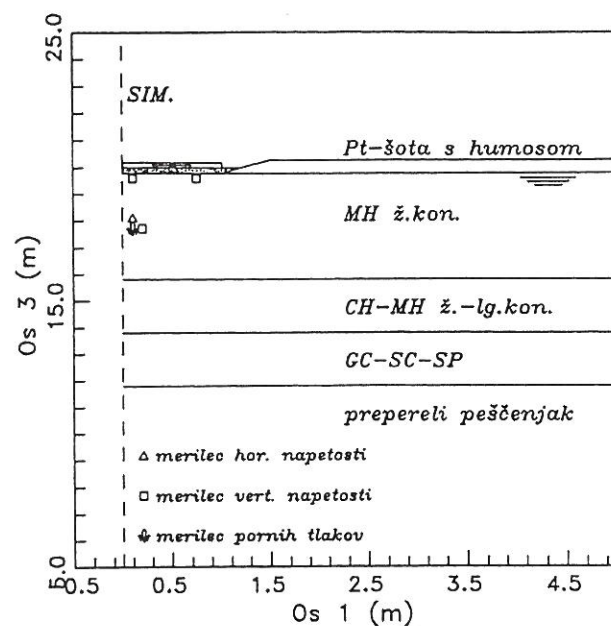
Modelni preizkus

Na modelu iz devetih členkasto povezanih temeljnih plošč smo simulirali gradnjo objekta in opazovali posledice obremenitev. Meritve kontaktnih tlakov, pornih pritiskov ter napetostno-deformacijskih odnosov v konstrukciji in tleh smo primerjali z rezultati numeričnih analiz. Modelni preizkus smo izvajali na Ljubljanskem barju, na izrazito slabo nosilnih tleh, kot je razvidno iz Slike 1.

Model temeljne konstrukcije, prikazane na Sliki 2, predstavljajo členkasto povezane AB plošče, ki zaradi členkastih povezav delujejo kot celota, imenovana žalužijska temeljna konstrukcija. Model smo opremili z reperji za meritve posedkov objekta, merilnimi senzorji za meritve napetosti v konstrukciji in tleh, kontaktnih tlakov med tlemi in konstrukcijo in meritve pornih tlakov v tleh. Tako opremljena modelna konstrukcija nam je med preizkusom omogočila celovit vpogled v napetostno deformacijske sovisnosti v konstrukciji in tleh, vključno s konsolidacijskimi procesi.

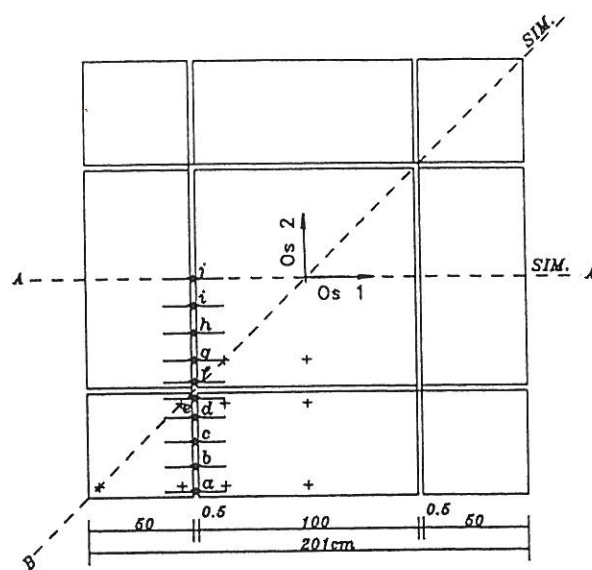
Preizkus smo izvedli tako, da smo model postopno obremenjevali z linearno naraščajočo obremenitvijo, ki je po nekaj urah dosegla končno stanje na srednji plošči 18 kPa, na robnih ploščah pa 7 kPa. Ob preizkusu smo izvajali meritve kontaktnih tlakov med

tlemi in temeljno konstrukcijo, posedanje tal, napetosti in porne tlake v tleh in napetosti v palicah členkastih zvez.



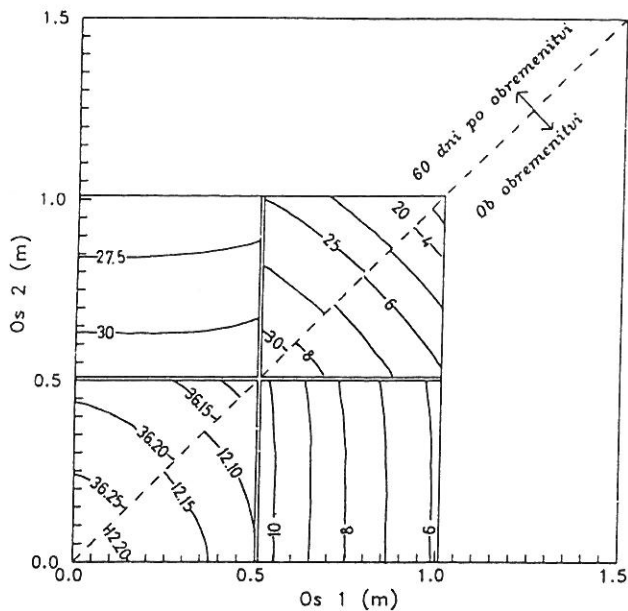
Slika 1. Stratigrafski podatki tal v osi modelne konstrukcije.

Meritve smo primerjali z rezultati numeričnih analiz. Rezultati se glede na absolutne vrednosti napetosti in deformacij dobro ujemajo, relativni pomiki pa se znatno razlikujejo, kar je v veliki meri odvisno od pogojev na terenu. Iz rezultatov tudi sklepamo, da se pomemben vpliv obremenitev pozna do globine okoli

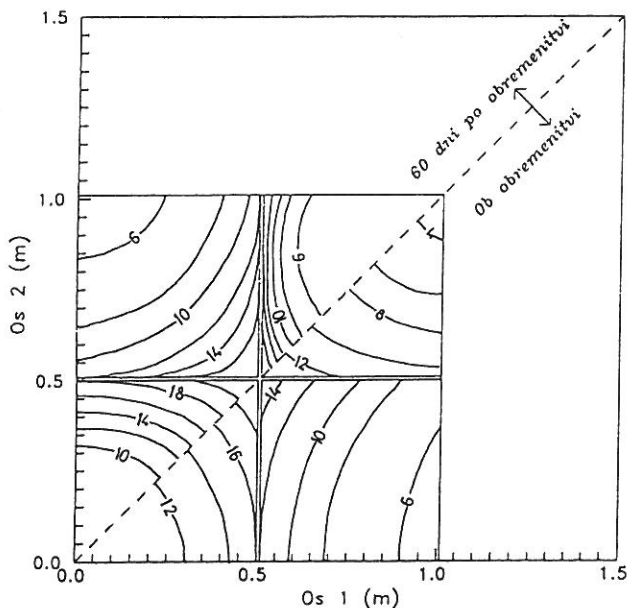


Slika 2. Geometrija modelne konstrukcije.

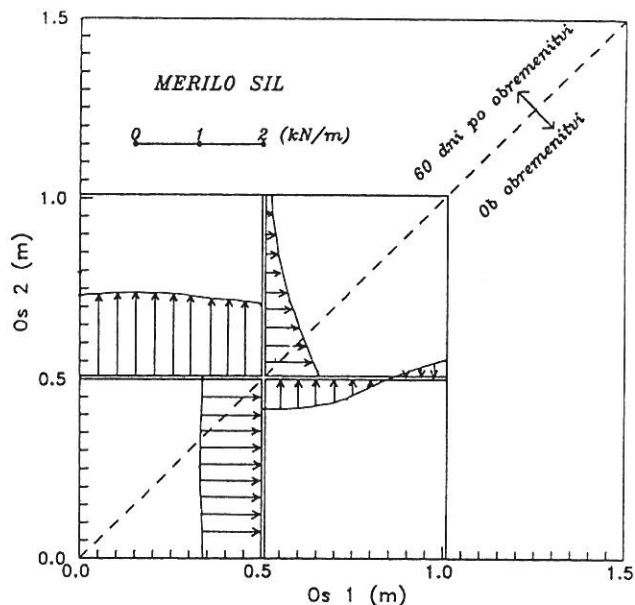
dveh širin objekta. To velja tudi za viskozne deformacije, saj so le te v radiju dveh širin plošče enake kot v širši okolici (kot posledice predhodne konsolidacije). Slike 3 do 5 prikazujejo nekaj rezultatov meritev modelnega preizkusa.



Slika 3. Izolinije vertikalnih premikov.



Slika 4. Izobare kontaktnih tlakov.



Slika 5. Strižne napetosti med ploščami.

Obtežilni preizkus

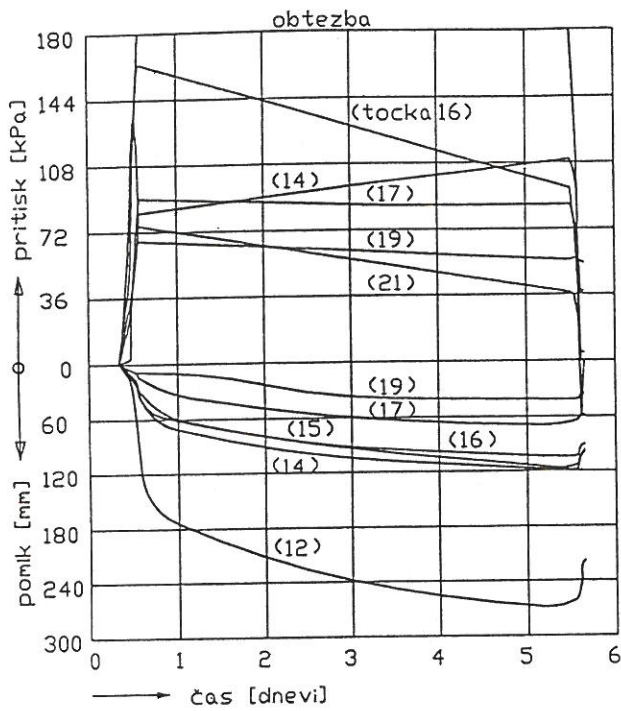
Med pripravo gradnje stanovanjske soseske na Ljubljanskem barju smo izvedli terenski obtežilni preizkus nosilnosti plitvega temeljenja na mehkih tleh. Za preizkus smo izbrali model AB temeljne plošče dimenzij 7.00m/2.00m/10cm. Plošča je bila členkasto pripeta na sosednje konstrukcije. Tako smo dobili model plošče s podajnimi členki. Konstrukcijo smo opremili z reperi za merjenje posredanja in merilnimi sondami za meritev napetosti. Med preizkusom smo zasledovali proces napetostno-deformacijskih odnosov interakcije med konstrukcijo in tlemi.

Preizkusna temeljna konstrukcija je bila zgrajena na izrazito slabo nosilnih tleh s približno 6.0 m debelim slojem polžarice, ki prehaja v okoli 6.0 m debel sloj lahkognetne glin, in še globlje v kvalitetnejše glineno prodne zemljine. Glede na dimenzije konstrukcije in izvedbo preizkusa so za analizo eksperimentalnih rezultatov pomembne reološke lastnosti sloja polžarice.

S terenskim obtežilnim preizkusom smo časovno simulirali obremenjevanje objekta med gradnjo in zasledovali napetostno-deformacijske odnose v tleh, konstrukciji in na kontaktu med tlemi in konstrukcijo. Zanimali so nas predvsem začetni vplivi sprememb obremenitev in posledice naraščanja deformacij do mejnega stanja, ko že nastopa veliko plastično popuščenje zemljin in se kažejo lokalni znaki loma tal. Preizkus smo razdelili na tri razvojne stopnje (glej Sliko 6): izvedli smo (a) zelo hitro obremenitev konstrukcije, nato smo (b) konstrukcijo pustili obremenjeno s konstantno obremenitvijo, po nekaj dnevih pa smo (c) konstrukcijo razbremenili na prvotno stanje obremenitev.

Stopnja obremenjevanja:

Konstrukcijo smo obremenili s časovno naraščajočo obtežbo, kot je prikazano na Sliki 7. Iz hkratno merjenih pomikov in napetosti v tleh in konstrukciji je razvidno, da na napetosti in deformiranje tal izrazito vplivajo deformacijski pogoji konstrukcije. Tako nastopajo med obremenjevanjem (kot posledica členkaste povezave konstrukcije) izraziti povesi plošče in s tem veliki prirastki napetosti v srednjem območju plošče. Zato prirastki napetosti v tleh pod sredino konstrukcije precej presežejo obremenitve, medtem ko so na robovih majhni. Pri preizkusu smo obremenitev stopnjevali tako, da je zaradi distorzzijskih vplivov v tleh pod sredino konstrukcije prišlo do izrazitega plastičnega popuščanja; lokalnega loma tal. Tako so kontaktni tlaki kljub naraščanju obremenitev v sredini konstrukcije upadali, deformacija pa je izrazito naraščala.

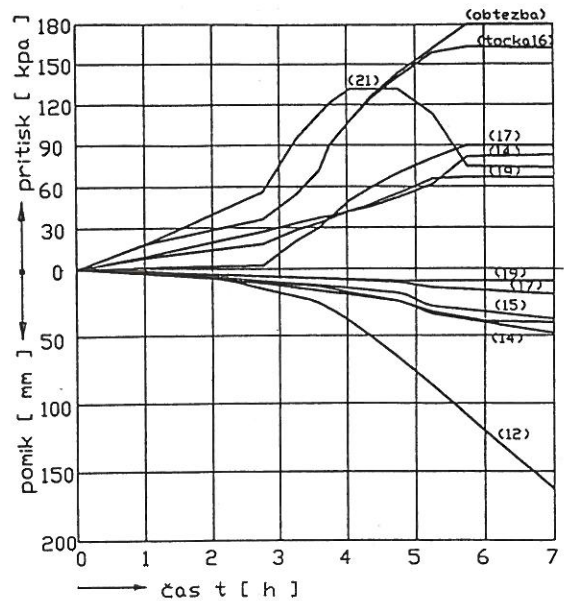


Slika 6. Časovni razvoj obremenitev, kontaktnih tlakov in deformacij.

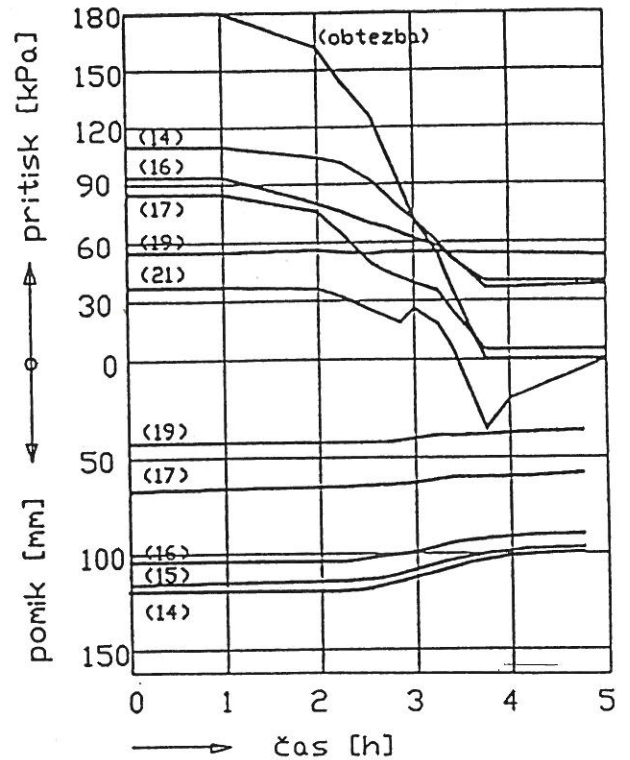
Stopnja konstantne obremenitve

V drugem delu preizkusa smo pustili obremenitve konstrukcije nekaj dni nespremenjene in opazovali časovni razvoj sprememb napetosti in deformacij. Iz meritev posejdkov je razvidno (Slika 6), da se je hitrost posedanja zmanjševala, prav tako je postajalo posedanje enakomernejše v širšem območju tal. Plastična cona v tleh se je tudi po končanem naraščanju obremenitev širila v okolico tako, da so se po nekaj dneh napetosti povsem pregrupirale v

značilno krivuljo z manjšimi tlaki v sredini in povečanimi pod robovi konstrukcije.



Slika 7. Časovni razvoj obremenitev, kontaktnih tlakov in deformacij med obremenjevanjem.



Slika 8. Časovni razvoj obremenitev, kontaktnih tlakov in deformacij med razbremenjevanjem.

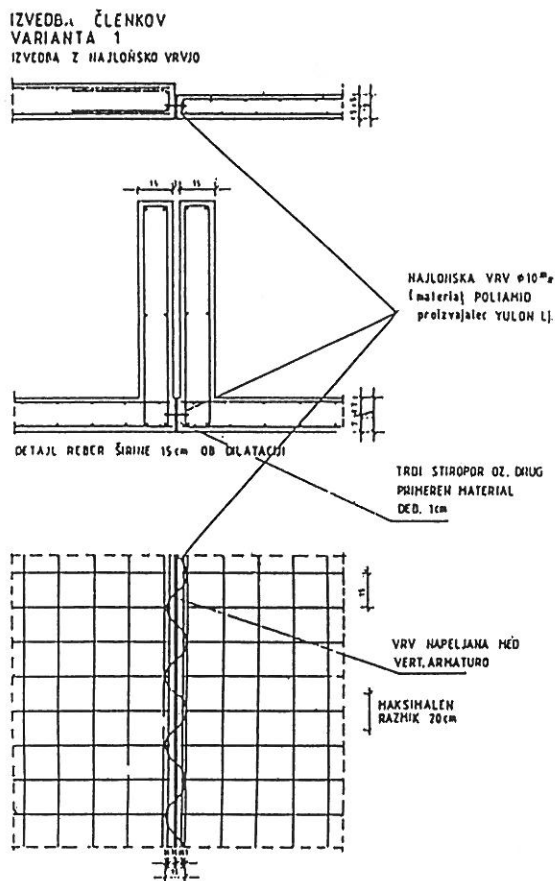
Stopnja razbremenitve

Po razbremenitvi smo skoraj hipno vzpostavili začetno stanje obremenitve in opazovali spremembe napetosti in deformacij. Kontaktni tlaki so praktično hipno upadli na začetno stanje, izmerili pa smo tudi precejšnje povratne deformacije (cca 20%), ki pa so po našem mnenju v veliki meri tudi posledica povratnih deformacij konstrukcije.

Iz rezultatov meritev preizkusa lahko sklepamo, da imajo robni pogoji ustvarjeni s konstrukcijo velik vpliv na napetostno-deformacijske odnose v tleh. To je še posebej pomembno na robovih objektov, kjer se pojavljajo visoke distorzijske napetosti. Kot posledica se pojavljajo plastifikacije tal, izrivi zemljine izpod objekta in s tem nevarnost rušitve tal. Na preizkusnem modelu, kjer je lokalna rušitev tal že v precejšnji meri delovala, se opazi zmožnost tal, da ob stabiliziranju ponovno prevzamejo del napetosti obremenjene konstrukcije.

Preizkus členkastih zvez

Poleg preizkusa členkastih zvez v sklopu modelnega preizkusa smo izvedli še laboratorijske preiskave.



Slika 9. Členek iz najlonske vrvi.

Preizkuse smo izvedli na AB elementih s tremi izvedbami členkov: (a) klasični členek z jeklenimi armaturnimi palicami, (b) členek z vododržnim gumijastim trakom in (c) našo zamisel - členek iz najlonske vrvi. Ugotovili smo, da lahko prvi dve različici izvedbe členkov brez težav dimenzioniramo tako, da odgovarjajo zahtevam konstrukcije. Različica členka iz najlonske vrvi je lahko ekonomsko optimalna. Tak členek prenaša velike obremenitve, ne da bi pri tem prišlo do pretrga vrvi; velika prednost pa je tudi njegova trajnost, medtem ko so klasični členki iz jeklenih palic občutljivi na korozijo. Šibka stran členka iz najlonske vrvi pa je velika deformabilnost, kar bi lahko imelo neugodne posledice pri praktični uporabi. Zato menimo, da bi bile za praktično uporabo takšnega členka potrebne še nadaljne podrobnejše preiskave.

PROTOTIPNO TEMELJENJE

Med leti 1988 do 1989 so bile na izrazito slabo nosilnih tleh na Ljubljanskem barju zgrajene štiri prototipne stanovanjske hiše, temeljene na dilatiranih in členkasto povezanih temeljnih konstrukcijah

Terenske in laboratorijske preiskave

Terenske in laboratorijske preiskave temeljnih tal na lokacijah gradnje so pokazale, da gre za izrazito slabo nosilnost gornjega sloja tal iz polzarice. Tla po nekaj metrih globine preidejo v lahko do srednje gnetne glin in šele na globini med 10 in 12 m v zaglinjena prodna tla, ki imajo ugodne reološke značilnosti z majhno deformabilnostjo. Na podlagi rezultatov preiskav smo določili reološke odnose zemljin. Izbrali smo elasto-viskoplastičen model tal.

Projekt temeljenja

Projekt gradnje štirih Marlesovih vzorčnih hiš je bil zasnovan tako, da je izvedba enostavna in po potrebi časovno kontrolirana. Hiše so zasnovane kot vrstne in so dilatacijsko povezane v niz objektov. Temeljene so na AB temeljni konstrukciji, ki jo tvorijo medsebojno členkasto povezane rebraste in gladke AB plošče, kot je prikazano na Slikah 10 in 11. Na rebraste plošče so preko talne konstrukcije temeljene hiše, medtem ko gladke plošče po obodu objektov omogočajo enakomernjšo razporeditev kontaktnih tlakov med konstrukcijo in tlemi. S korekcijo višine zasutja obodnih plošč dosegamo manjše absolutne posejke objektov, enakomernost relativnih posejkev in večjo stabilnost. Konstrukcija na členkastih dilatacijah omogoča minimalne relativne pomike in medsebojne zasuke objektov, ki so v mejah dopustnih.

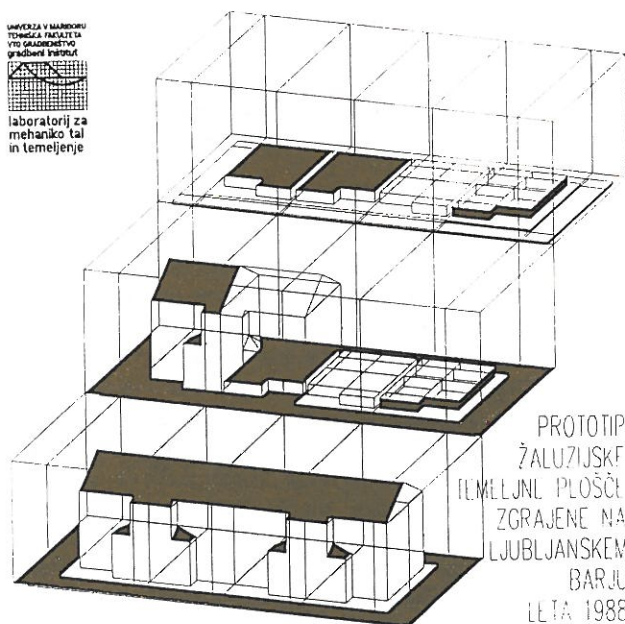
Analiza temeljenja na žaluzijski konstrukciji

Analizo interakcije med tlemi in objektom smo najprej izvedli po MKE s programom FINEL. Tla smo obravnavali kot elastičen, anizotropen in heterogen polprostor. Analiza konsolidacije tal je bila izvedena vzporedno. To klasično analizo interakcije smo primerjali z analizo, izvedeno s programom SPACESOIL, izdelanim v LMT na TF v Mariboru. Program SPACESOIL omogoča analizo interakcije po zahtevni elastoviskoplastični teoriji ob hkratnem upoštevanju procesa konsolidacije tal. Primerjave rezultatov obeh analiz kažejo v konkretnem primeru na majhna odstopanja v velikostih končnih posedkov objektov, kontaktnih tlakov med objekti in tlemi ter napetosti v tleh. Program SPACESOIL daje izrazito boljši vpogled v procese v tleh (med samo gradnjo in kasneje) kot npr. razvoj disipacije pornih tlakov, distorzijskih vplivov, časovni razvoj posedkov, lezenja itd. V analizah so upoštevani zemeljski izkopi in nasipi, lastna teža plošče ter linearno naraščanje obremenitev zaradi gradnje objektov.

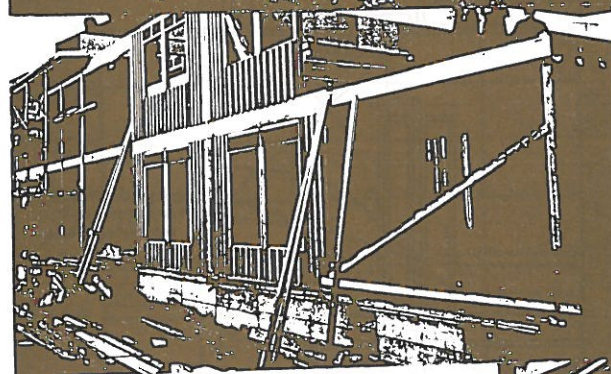
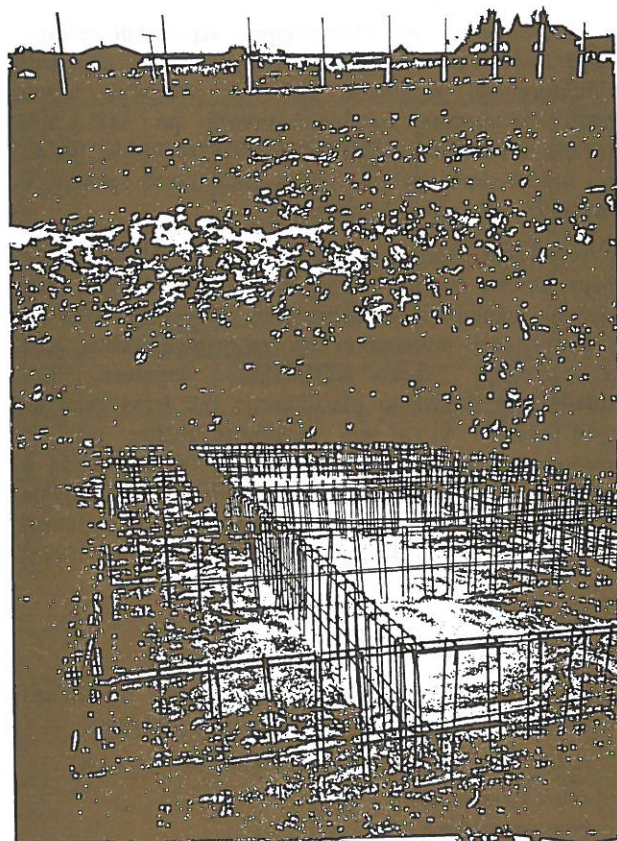
Gradnja

Gradnja štirih prototipnih vrstnih hiš je prikazana na Slikah 10 in 11.

UNIVERZA V MARIBORU
TOMEVA FAKULTETA ZA
VINO GRAJENSTVO
gradbeni inštitut
laboratorij za
mekaniko tal
in temeljenje



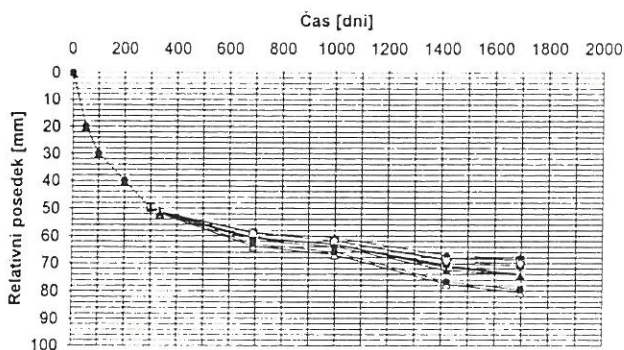
Slika 10. Shema poteka izgradnje soseske.



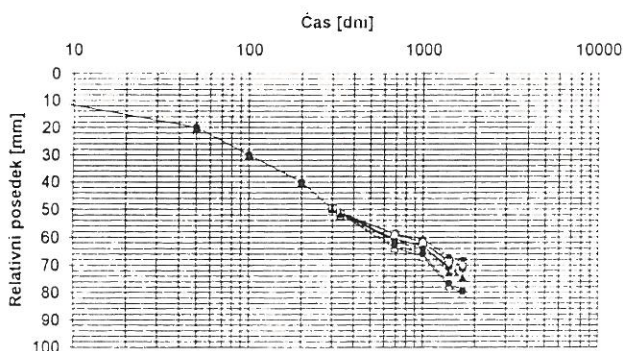
Slika 11. Potek izgradnje soseske.

Meritve posedkov

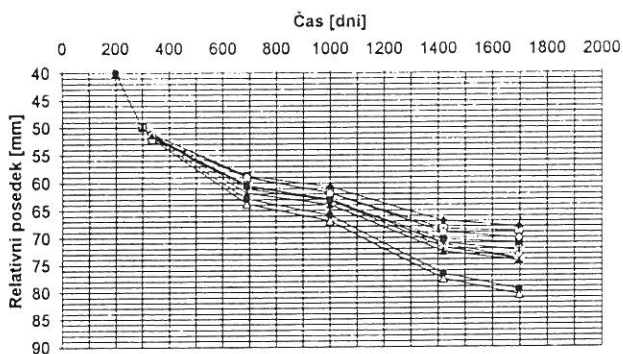
Po izgradnji objektov so bile redno izvajane meritve posedkov. Iz meritev posedkov je razvidno, da so posedki v okviru pričakovanj, dobljenih z numeričnimi analizami. Ker žal ne razpolagamo z meritvami med



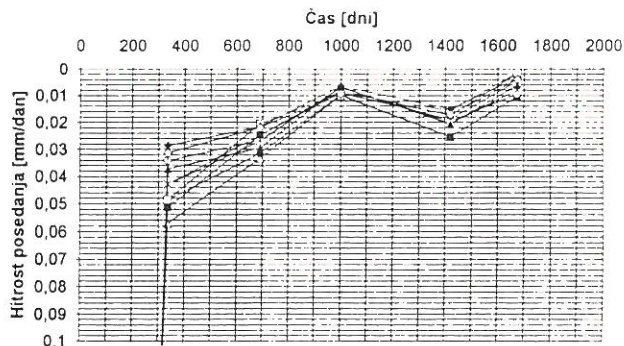
Slika 12. Časovni razvoj posedkov objekta.



Slika 13. Logaritemski prikaz posedanja objekta.



Slika 14. Časovni razvoj posedanja objekta po izgradnji.



Slika 15. Časovni razvoj hitrosti posedanja objekta.

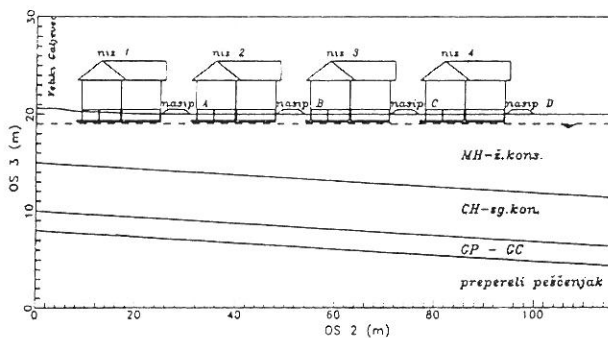
samo gradnjo konstrukcije objektov, lahko le predvidevamo, da je najprej prišlo do okoli 2 cm inicialnih in 3 cm distorzijskih (nedreniranih) posedkov. Nadaljni posedki, merjeni po izgradnji, pa so celo nekoliko manjši od napovedi. Tako absolutni posedki naraščajo skladno s časovno krivuljo konsolidiranja tal, medtem ko so relativni posedki med objekti praktično zanemarljivi. Rezultati meritev so delno prikazani na Slikah 12 do 15.

GRADNJA VZORČNE STANOVANJSKE SOSESKE

Med leti 1989 in 1991 je bila na lokaciji ob Jurčkovi poti na Ljubljanskem barju zgrajena soseska šestindvajsetih vrstnih stanovanjskih hiš, temeljenih na žaluzijski temeljni konstrukciji. Hiše so bile zasnovane kot vrstne v štirih nizih, zgrajene v manjših časovnih zamikih.

Preiskave

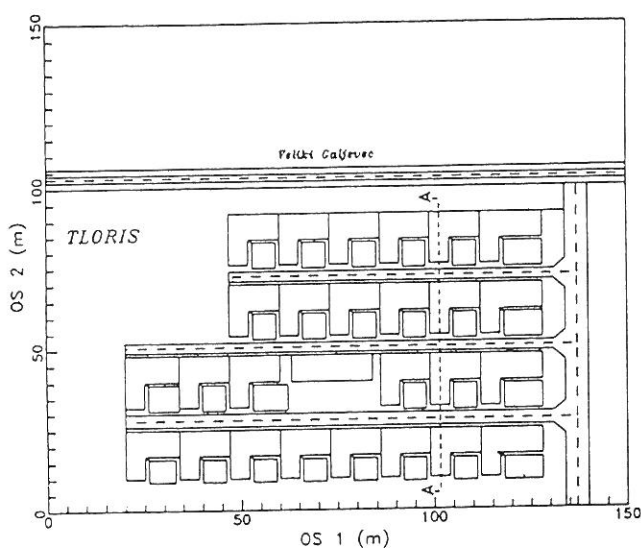
Terenske in laboratorijske preiskave tal na lokacijah gradnje so pokazale (Slika 16), da gre za izrazito slabo nosilnost tal, s skoraj enakim sestavom zemljin kot pri prototipni izgradnji.



Slika 16. Stratigrafski podatki tal.

Projekt temeljenja soseske

V projektu temeljenja smo sosesko hiš zasnovali kot povezano celoto, ki je temeljena na žalužijski temeljni konstrukciji. Temeljno konstrukcijo tvorijo členkasto povezane AB rebraste in gladke plošče. Z rebrastimi ploščami, na katere preko talne konstrukcije temeljimo posamezne hiše, dosežemo zadostno togost temeljne konstrukcije. Rebraste plošče so medsebojno členkasto dilatirane, tako da na dilatacijah med posameznimi hišami ni bistvenih relativnih pomikov, omogočeni pa so medsebojni zasuki hiš. Rebraste plošče so medsebojno povezane z gladkimi ploščami, kar daje sistemu dodatno stabilnost, hkrati pa tudi zmanjšuje velikost absolutnih posedkov. Gladke plošče pod intervencijskimi potmi služijo hkrati tudi kot podlaga za komunalne in energetske vode. Gladke plošče po obodu soseske zmanjšujejo vplive distorzij na robovih objektov. Na Sliki 17 je prikazan tloris prototipnega naselja s šestindvajsetimi hišami.



Slika 17. Geometrijski podatki.

Analiza interakcije med tlemi in sosesko je bila izvedena po MKE na 2-D in 3-D modelih s programi FINEL in SPACESOIL. V analizi smo upoštevali hkratno izvedbo temeljenja objektov, komunalne ureditve in prometnic. Tako bi naj gradnja objektov potekala na podlagi, ki bi bila že delno utrjena zaradi predhodne obremenitve s temeljno konstrukcijo in nasipi za interventne poti in po obodu objektov. Projekt izgradnje soseske je zasnovan tako, da je gradnja enostavna in z relativno nizkimi stroški. Za celotno sosesko se zgradi temeljna konstrukcija, ki predstavlja enoten sistem temeljenja. Na konstrukciji se izvedejo vsa komunalna dela, nakar se izvedejo nasipi na mestih transportnih poti

in po obodu konstrukcije. Na tako pripravljeno konstrukcijo se nato gradijo stanovanjske hiše.

Gradnja soseske

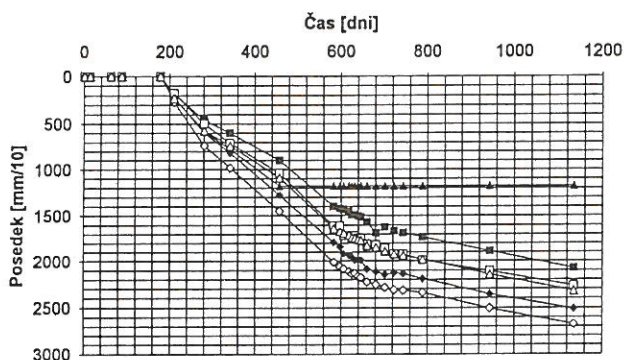
Razvoj gradnje šestindvajsetih hiš je prikazan na sliki-18.



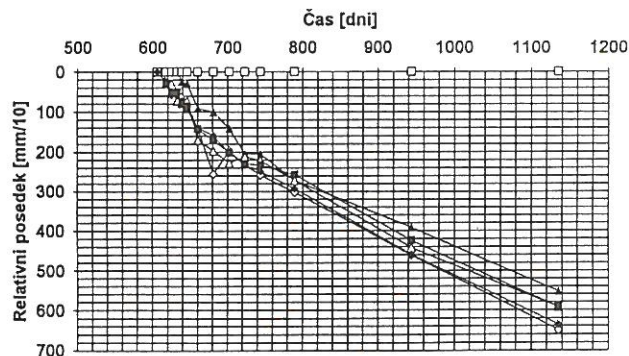
Slika 18. Potek izgradnje soseske.

Analiza posedkov

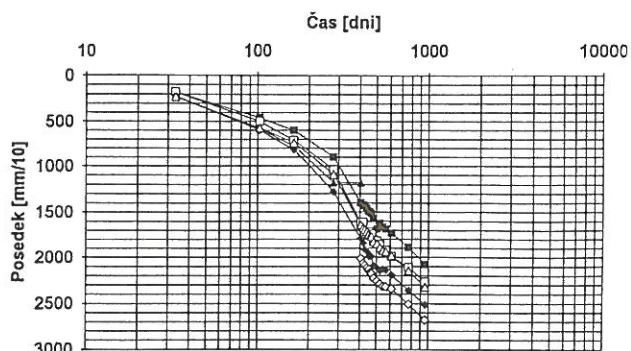
Na vzorčni soseski so bile med samo gradnjo in kasneje redno izvajane meritve posedkov objektov. Iz meritev je razvidno, da posedki nekoliko presegajo prvotne numerične napovedi. Prekoračitve je povzročilo več faktorjev hkrati, predvsem pa nedosledna tehnologija gradnje. Tako se je temeljna konstrukcija zgradila brez prečnih povezav, tako da je temeljen vsak niz hiš zase, kar je ob nesimetrični geometriji objektov neugodno. Gradnja je potekala hitro in v zaporednih zamikih posameznih nizov; nasutja s prodnim materialom so bila izvedena nekontrolirano, zato so nastopile rotacije objektov. Komunalna ureditev soseske se je izvajala po izgradnji objektov, s kasnejšimi nedopustnimi odprtimi izkopi kanalov za komunalne vode (glej Sliko 18), kar je povzročilo velike distorzijske deformacije tal in s tem velike posedke objektov. Po končani gradnji se je posedanje objektov umirilo, tako da je nadaljne posedanje v mejah numeričnih napovedi. Rezultati meritev so delno prikazani na Slikah 19 do 23.



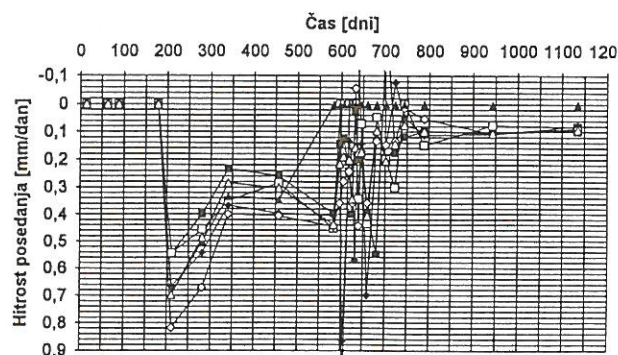
Slika 19. Časovni razvoj posedkov hiš v četrtem nizu.



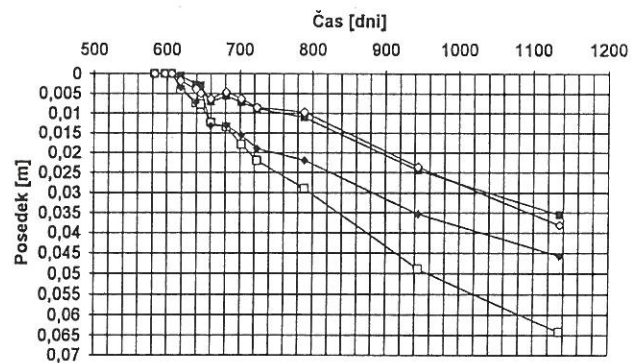
Slika 20. Časovni razvoj posedkov hiše po izgradnji.



Slika 21. Logaritemski prikaz časovnega razvoja posedanja objekta.



Slika 22. Časovni razvoj hitrosti posedanja objekta.



Slika 23. Časovni razvoj posedanja kanalizacije.

SKLEP

Na podlagi večletnih skrbno vodenih terenskih in laboratorijskih preiskav ter primerne numerične analize interakcije med tlemi in objektom smo podali izvirno rešitev plitvega temeljenja objektov na medseboj členkasto povezanih temeljnih konstrukcijah (imenovanih žaluzijske temeljne konstrukcije).

Rešitev smo eksperimentalno preiskovali z modelnimi preizkusi na Ljubljanskem barju, ki je znano po izrazito slabo nosilnih tleh. Tla tvorí pod povrhnjico iz šote sloj polžarice, ki ima izrazito slabe reološke lastnosti in je v klasičnem geotehničnem pogledu neprimerna za plitva temeljenja.

Na podlagi rezultatov numeričnih analiz in eksperimentalnih preizkusov smo izdelali projekte plitvega temeljenja za štiri prototipne vzorčne hiše, zgrajene med 1988 in 1989 letom in za šestindvajset vrstnih hiš, zgrajenih med leti 1989 in 1991.

Eksperimentalni preizkusi in kasnejša izvedba temeljenja vzorčnih hiš so potrdili naše napovedi, da je tudi na slabo nosilnih in izrazito stisljivih tleh s primernim tehnološkim pristopom možno uspešno izvajati plitvo temeljenje objektov.

Temeljenje objektov na žaluzijski temeljni konstrukciji predstavlja tehnološko inovacijo, ki ima nekaj bistvenih prednosti pred klasičnimi metodami temeljenja na slabo nosilnih tleh.

Prednosti so:

- V ekonomskem pogledu je opisani sistem temeljenja optimalen in predstavlja bistveni prihranek stroškov, kar je še posebej očitno pri gradnji nižjih in cenejših objektov, ki velikih stroškov globokega temeljenja cenovno ne bi prenesli.
- Čas gradnje je bistveno krajši.
- Sistem temeljenja je sprejemljiv tudi v ekološkem pogledu (npr. prihranek lesa, ki se pogosto uporabi pri temeljenju objektov in komunalnih vodov)
- Izvedba je tehnično enostavna in lahko zadovolji vse kriterije kvalitete gradnje.
- Z vzporedno komunalno ureditvijo pri gradnji sosesk je sistem tehnično sprejemljivejši od ostalih načinov temeljenja, saj odpade posebno temeljenje komunalnih vodov, ni relativnih posedkov med objekti in okolico itd. Tako se visoki gradbeni stroški, ki sicer nastajajo pri komunalni ureditvi bistveno znižajo.

Pomankljivosti so:

- Potreben je zahteven geotehnični pristop z dobrim poznavanjem reologije zemljin in interakcije tla - objekt.
- Tehnologija in hitrost izgradnje morata biti dobro načrtovana in sprotno nadzorovana, sicer lahko prihaja do izrazitih distorzijskih deformacij tal.
- varnost temeljenja se zmanjšuje z naraščanjem višine objektov.

Rezultati opravljenih meritev napetosti, deformacij, pornih tlakov in posedkov objektov potrjujejo naše teoretične rešitve in nas ohrabrujejo pri nadaljnjem delu.

ZAHVALA

Avtorji prispevka se skupaj s sodelavci, ki so sodelovali pri izvedbi raziskovalnega projekta zahvaljujemo Ministrstvu za znanost in tehnologijo Republike Slovenije za sofinanciranje naloge. Prav tako se zahvaljujemo izvajalcema, podjetjema Marles in Ingrad, ki sta izvajala operativna dela na gradbišču.

LITERATURA

- Trauner, L. (1986). *Computer Aided Design of Time Depending Structure-Soil Interaction*, Proc. of 10th TCICBRSD-CIB 86, Washington, 1, p.215
- Trauner, L. (1986). *Interaction between Elastic Structure and Nonlinear Viscous Soils*, Proc. of 68th PAMM, Budapest, BAM 398'86, XLII, p.213.
- Škrabl, S. (1991). *Interakcija členkasto povezanih temeljnih konstrukcij s tlemi*, Doktorska disertacija, Tehniška fakulteta Univerze v Mariboru, Maribor.
- Trauner, L. (1991). *Rheological Properties of Soft Soils*, Proc. of 3th ICCLEM, Tuscon, p.329
- Trauner, L., Škrabl, S. (1992). *Consolidation analysis of plate foundations*, V. International Conference Computational plasticity, Barcelona, p.1007-1018.
- Trauner, L., Škrabl, S. (1992). *Soils consolidation using FEM*, Symposium on finite element methods, Cape Town, South Africa, p.549-556.
- Trauner, L., Škrabl, S. and Žlender, B. (1992). *Numerical analysis of consolidation for soft soils*, V. Bulletins for Applied Mathematics, Budapest, p.161-168.
- Trauner, L., Škrabl, S. and Žlender, B. (1992). *Hinge tied foundation soil interaction*, International conference computational methods in engineering, Singapore, p.293-298.

DODATEK: TEORETIČNA PODLAGA

Reološki odnosi v tleh

Reološke karakteristike tal podamo v tenzorski obliki z relacijami med invariantami napetosti (J), deformacij (I) ter časa (t). Normalne (p) in strižne (q) invariante napetostnega tenzorja (J) ter normalne (r) in strižne (s) invariante deformacijskega tenzorja (I) so:

$$p = \frac{\delta_{ij} \sigma_{ij}}{3}, q = \sqrt{\frac{S_{ij} S_{ij}}{3}}, S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} p \quad (1)$$

$$r = \frac{\delta_{ij} \varepsilon_{ij}}{3}, s = \sqrt{\frac{4\gamma_{ij} \gamma_{ij}}{3}}, \gamma_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij} r \quad (2)$$

kjer pomenijo σ_{ij} in S_{ij} komponente tenzorja efektivnih napetosti J, ε_{ij} in γ_{ij} pa komponente deformacijskega tenzorja I. Deformacije r in s lahko izrazimo:

$$r = (r_e + r_p) + r_v \quad (3)$$

$$s = (s_e + s_p) + s_v \quad (4)$$

Indeksi e , p in v pomenijo elastične, plastične in viskozne deformacije.

Konsolidacija tal

Pri inkrementalni analizi konsolidacije tal morajo biti v vsakem časovnem inkrementu izpolnjeni ravnotežni in kontinuitetni pogoji precejjanja kapljevine v vseh diferencialno majhnih elementih analiziranega območja:

$$\sigma_{ij, j} - f_i = 0 \quad (5)$$

$$(k_{ij} u_{w, j})_{, i} - \gamma_w (\beta u_w - \varepsilon_v) = 0 \quad (6)$$

kjer je σ_{ij} napetostni tenzor, f_i vektor volumenskih sil, k_{ij} tenzor propustnosti zemljine, u_w porni tlak, γ_w prostorninska teža vode, β kompresijski modul fluida in ε_v volumenska deformacija. Napetostne spremembe $d\sigma_{ij}$, ki jih lahko razstavimo na elastoplastične $d\sigma_{ij}^{ep}$ in viskozne $d\sigma_{ij}^v$ komponente, so naslednje:

$$\begin{aligned} d\sigma_{ij} &= d\sigma_{ij}^{ep} + d\sigma_{ij}^v + \delta_{ij} du_w \\ &= C_{ijkl} d\varepsilon_{kl} + c_{ij} dt + \delta_{ij} du_w \end{aligned} \quad (7)$$

kjer je C konstitutivna matrika, ki jo lahko izrazimo:

$$\begin{aligned} C_{ijkl} &= E^* \left(\left(\frac{1}{3G} - \frac{2}{9K} + \left(\frac{2}{3L} + \frac{1}{3F} \right) \frac{p}{q} \right) \delta_{ij} \delta_{kl} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{2}{3K} \right) \delta_{ik} \delta_{jl} - \left(\frac{1}{3Fq} \right) \delta_{kl} \delta_{ij} - \left(\frac{2}{3Lq} \right) \delta_{kl} \delta_{ij} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

in c vektor viskoznega lezenja:

$$c_{ij} = E^* \left(r \left(\frac{S_{ij}}{9q} - \frac{\delta_{ij}}{G} \right) + s \left(\frac{\delta_{ij}}{L} - \frac{S_{ij}}{3Kq} \right) \right) \quad (9)$$

Moduli K, G, L in F so določeni z enačbami:

$$K = r, p; \quad G = s, q; \quad L = r, q; \quad F = s, p \quad (10)$$

Z MKE torej izrazimo konsolidacijo:

$$G \Delta W_G = \Delta R_G \quad (11)$$

kjer G, ΔW in ΔR predstavljajo konsolidacijsko matriko, vektor pomikov in vektor obtežb v vozliščih končnih elementov za časovni inkrement t_r .

$$G = \int_V [G_{mn}] dV \quad (12)$$

s posameznimi členi

$$\begin{aligned} G_{11} &= L_{i, k} L_{j, l} C_{1kl1} & G_{12} &= L_{i, k} L_{j, l} C_{1kl2} \\ G_{13} &= L_{i, k} L_{j, l} C_{1kl3} & G_{14} &= -L_{i, 1} S_j \\ G_{21} &= L_{i, k} L_{j, l} C_{2kl1}; & G_{22} &= L_{i, k} L_{j, l} C_{2kl2}; \\ G_{23} &= L_{i, k} L_{j, l} C_{2kl3}; & G_{24} &= -L_{i, 2} S_j; \\ G_{31} &= L_{i, k} L_{j, l} C_{3kl1}; & G_{32} &= L_{i, k} L_{j, l} C_{3kl2}; \\ G_{33} &= L_{i, k} L_{j, l} C_{3kl3}; & G_{34} &= -L_{i, 3} S_j; \\ G_{41} &= -L_i S_{j, 1}; & G_{42} &= -L_i S_{j, 2}; & G_{43} &= -L_i S_{j, 3}; \end{aligned}$$

$$G_{44} = \frac{-\beta S_i S_j (-\Delta t) k_{kl} S_{i, k} S_{j, l}}{2\gamma_w} \quad (13)$$

kjer pomenijo L_i in S_i interpolacijske funkcije pomikov in pornih tlakov v poljih končnih elementov.

$$\Delta W_G = \{ \Delta W_1, \Delta W_2, \Delta W_3, \dots, \Delta W_j, \dots, \Delta W_n \}_G^T \quad (14)$$

$$(\Delta W_j)_G = \{ \Delta V_{1j}, \Delta V_{2j}, \Delta V_{3j}, \Delta U_j \}_G^T \quad (15)$$

$$\Delta R_G = \{ \Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \dots, \Delta R_j, \dots, \Delta R_n \}_G^T \quad (16)$$

Žaluzijska temeljna konstrukcija

Žaluzijske konstrukcije so geometrijsko nelinearne. Pri majhni ukrivljenosti lahko njihovo deformacijsko stanje izrazimo s superpozicijo deformacijskih stanj elastičnih plošč in membran. Z uporabo principa virtualnega dela oz. metode utežnih ostankov, ob pogojih za minimalizacijo napak numerične rešitve, izrazimo zvezo med prirastki vozliščnih pomikov ΔW_F in ekvivalentnih vozliščnih obremenitev ΔR_F

$$F \Delta W_F = \Delta R_F \quad (17)$$

F je togostna matrika žaluzijskega elementa, ki jo določimo z izrazi:

$$F = \int_S [F_{ij}] dS; \quad F_{ij} = F_{ji} \quad (18)$$

s posameznimi členi:

$$F_{11} = aL_{i,1}L_{j,1} + L_{i,2}L_{j,2};$$

$$F_{12} = vaL_{i,1}L_{j,2} + bL_{i,2}L_{j,1}; \quad \text{itd...} \quad (19)$$

kjer indeksi i ali j podajajo vozlišča, h je debelina plošče, konstante

$$a = \frac{Eh}{(1-\nu^2)}; \quad b = \frac{Eh}{2(1+\nu)}; \quad c = \frac{Eh^2}{12(1-\nu)}$$

$$d = \frac{Eh}{2\alpha(1+\nu)}; \quad e = \frac{Eh^2}{24(1+\nu)} \quad (20)$$

pa podamo z integracijo po debelini plošče:

Vpliv členkov

Z ozirom na način prenosov med sorazmerno togimi temeljnimi elementi, ki sestavljajo žaluzijsko temeljno konstrukcijo, ločimo toge in gibke členkaste zveze. Za toge zveze je značilno, da so medsebojni pomiki posameznih elementov minimalni, zato lahko zanemarimo vplive geometrijske nelinearnosti glede na vertikalne pomike. Za gibke zveze, ki so izrazito geometrijsko nelinearne, lahko uporabimo linijske (palične) končne elemente. Togostno matriko izvednotimo za posamezen inkrement na deformiranem statičnem sistemu ob upoštevanju deformacij na začetku inkrementa. Zvezo med spremembami vozliščnih obremenitev in vozliščnimi pomiki izrazimo v lokalnem koordinatnem sistemu z odnosom:

$$F^* \Delta W_F^* = \Delta R_F^* \quad (21)$$

kjer so F, ΔW_F^* in ΔR_F^* togostna matrika členka, vektor pomikov in obtežb na členku. Togostno matriko členkov v praksi določimo eksperimentalno z preizkusi v naravi in/ali v laboratoriju. Togostne matrike vseh gibkih členkastih zvez izvednotimo hkrati s končnim elementom, ki ga imenujemo makroelement. Togostno matriko makročlena v nekem časovnem inkrementu t_r določimo na deformiranem statičnem sistemu z upoštevanjem pomikov ob koncu prejšnjega inkrementa t_{r-1} .

$$F^* = \int_S \frac{E_m S_r}{l_r^2} [F_{ij}^*] dS; \quad F_{ij}^* = F_{ji}^*; \quad (22)$$

s členi:

$$F_{11}^* = (1 + \nu_{1^*,1})^2 L_{j,1} L_{i,1};$$

$$F_{22}^* = \nu_{2^*,2}^2 L_{j,2} L_{i,2};$$

$$F_{12}^* = (1 + \nu_{1^*,1})^2 \nu_{1^*,2} L_{j,1} L_{j,2};$$

$$F_{13}^* = (1 + \nu_{1^*,1})^2 \nu_{3^*,3} L_{j,1} L_{j,3};$$

$$F_{23}^* = \nu_{2^*,2}^2 \nu_{3^*,3}^2 L_{j,2} L_{i,3};$$

$$F_{33}^* = \nu_{2^*,2}^2 \nu_{3^*,3}^2 L_{j,2} L_{i,3} \quad (23)$$

kjer E_m , S_r and l_r pomenijo modul elastičnosti, povprečni prerez členkastih zvez na enoto dolžine zveze in kvadrat razmerja dolžin gibkih zvez, ki ga izvednotimo:

$$l_r = 1 + 2\nu_{1^*,1} + \nu_{2^*,2}^2 + \nu_{3^*,3}^2 \quad (24)$$

Interakcija tla - objekt

Interakcijske probleme med tlemi in konstrukcijo, analizirane v časovnih inkrementih rešujemo s statično proceduro, ki hkratno obravnava napetostno-deformacijske odnose fizikalnega modela. Fizikalni model tvorijo tri podkonstrukcije; tla (G), temelj (F) in konstrukcija (S). Odnose zapišemo v matrični obliki:

$$\begin{bmatrix} S & - & - \\ - & F & - \\ - & - & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta W_S \\ \Delta W_F \\ \Delta W_G \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta R_S \\ \Delta R_F \\ \Delta R_G \end{Bmatrix} \quad (25)$$

kjer pomenijo S, ΔW_S in ΔR_S ter F, ΔW_F in ΔR_F togostno matriko, vektor vozliščnih pomikov in obtežb; G, ΔW_G in ΔR_G pa konsolidacijsko matriko in vektorje pomikov in obtežb v tleh.