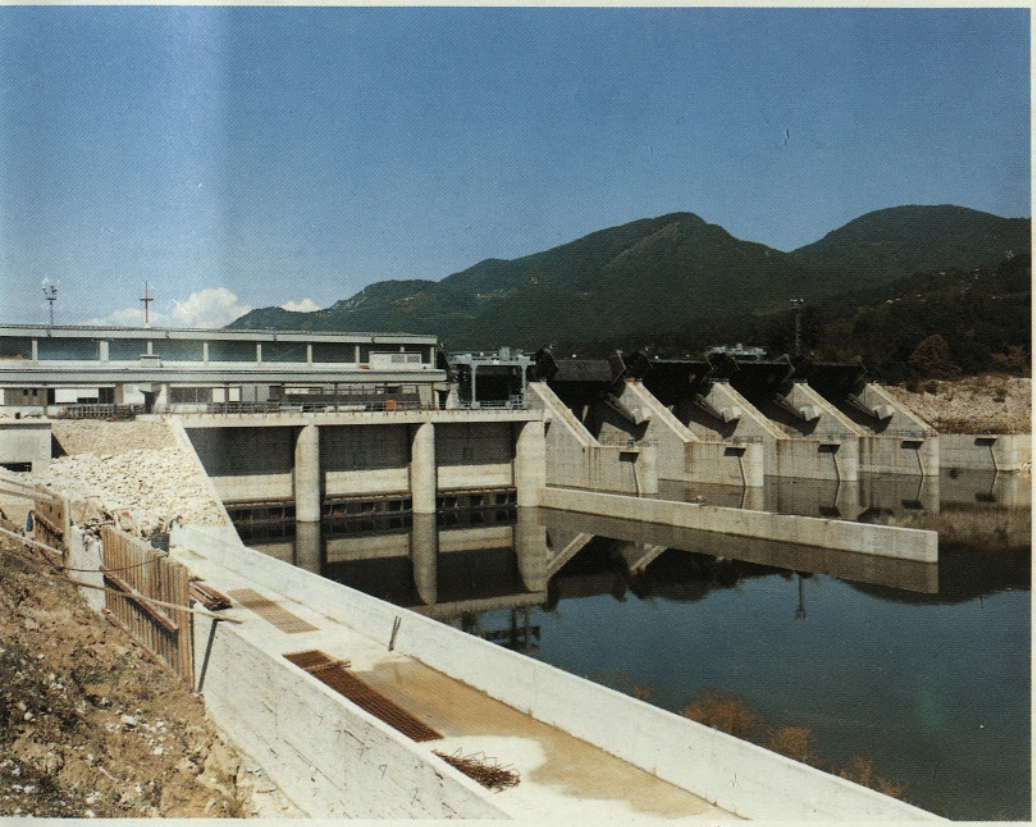
UDK-UDC 05:625;
YU ISSN 0017-2774

LJUBLJANA,
SEPTEMBER–
OKTOBER, 1992

LETNIK XXXXI
STR.: 181-212

GRADBENI VESTNIK 9-10



V HIDROELEKTRARNI VRHOVO SE NAJ BI ŠE LETOS ZAVRTELE TURBINE. IZVAJALEC DEL: GRADIS

Glavni in odgovorni urednik:

Franc **ČAČOVIČ**

Lektor:

Alenka **RAIČ**

Tehnični urednik:

Dane **TUDJINA**

Uredniški odbor:

Sergej **BUBNOV,** Vladimir **ČADEŽ,**
Vojteh **VLODYGA,** Stane **PAVLIN,**
Gorazd **HUMAR,** Ivan **JECELJ,**
Branka **ZATLER-ZUPANČIČ,**
Andrej **KOMEL,**
Jože **ŠČAVNIČAR,** dr. Miran **SAJE**

Revijo izdaja Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, Ljubljana, Erjavčeva 15, telefon: 221-587. Žiro račun pri SDK Ljubljana 50101-678-47602. Tiska Tiskarna Tone Tomšič v Ljubljani. Revija izhaja mesečno. Naročnina za člane društev znaša 840 SLT. Za študente in upokojence velja polovična cena. Naročnina za gospodarske naročnike znaša 12.600 SLT, za inozemske naročnike 100 US $. Revija izhaja ob finančni pomoči Ministrstva za znanost in tehnologijo, Zavoda za raziskavo materiala in konstrukcij Ljubljana, Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in Centra za graditeljstvo. V naročnini je vštet prometni davek.

GRADBENI VESTNIK

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE
ŠT. 9-10 • LETNIK 41 • 1992 • YU ISSN 0017-2774

VSEBINA-CONTENTS

Članki, študije, razprave
Articles studies, proceedings

Janez Duhovnik:
RAZISKAVE IN RAZVOJ V GRADBENIŠTVU 183
R & D IN CONSTRUCTION

Matjaž Skrinar, Andrej Umek:
DINAMIČNA IDENTIFIKACIJA NOSILCEV Z METODO DODATNIH MAS 188
DYNAMIC IDENTIFICATION OF BEAMS WITH ADDITIONAL MASS METHOD

Stojan Kravanja, Branko Bedenik, Zdravko Kravanja:
MATEMATIČNO PROGRAMIRANJE KONSTRUKCIJ V MEHANIKI 193
MATHEMATICAL PROGRAMMING OF MECHANICAL STRUCTURES

In memoriam

Svetko Lapanje:
DANIJEL SMREKAR, dipl. inž. 202

Poročila Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani
Proceedings of the Department of Civil Engineering University, Ljubljana

Janko Logar, Bojan Majes:
NUMERIČNA ANALIZA UČINKA ARMIRANJA TEMELJNIH TAL POD CESTNIMI NASIPI 203
NUMERICAL PROCEDURES FOR THE CONSOLIDATION ANALYSIS OF REINFORCED FOUNDATION SOILS UNDER ROAD EMBANKMENTS

Informacije Zavoda za raziskavo materiala in konstrukcij Ljubljana
Institute for testing and research in materials and structures Ljubljana

Stojan Renčelj, Franci Ceklin:
VERBET – Lahki izolacijski betoni 209
VERBET – Lightweight Insulating Concretes

ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE
LJUBLJANA, ERJAVČEVA ULICA 15

STROKOVNI IZPITI ZA GRADBENIŠTVO IN ARHITEKTURO TER PRIPRAVLJALNI SEMINARJI ZA STROKOVNE IZPITE V LETU 1993

Rok	Mesec	A. seminar	B. izpit	
			pisni	ustni
I.	Januar	18.–22. januar	19. december 1992	11.–15. januar 1993
II.	Februar	15.–19. februar	30. januar	9.–12. februar
III.	Marec	22.–26. marec	20. februar	1.–5. marec
IV.	April	19.–23. april	27. marec	5.–9. april
V.	Maj	17.–21. maj	24. april	10.–14. maj
VI.	Junij		22. maj	7.–11. junij
	September	20.–24. september		
VII.	Oktober	18.–22. oktober	16. oktober	1.–5. november
VIII.	November	22.–26. november	20. november	6.–10. december
IX.	December	13.–17. december		

A. Pripravljalni seminar organizira **ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE,** Ljubljana, Erjavčeva 15 (telefon: 061/221-587). Prijavo v obliki dopisa, skupaj z dokazilom o plačilu, pošlje plačnik stroškov seminarja. (Žiro račun: **50101-678-47602**)

B. Izpit organizira **ZAVOD ZA RAZISKAVO MATERIALA IN KONSTRUKCIJ LJUBLJANA,** Dimičeva 12, Ljubljana. Informacije dobite pri inž. Grošlju preko telefona št. 061/342-671, od 10. do 12. ure.

RAZISKAVE IN RAZVOJ V GRADBENIŠTVU

Poročilo s strateške konference raziskovalnega polja GRADBENIŠTVO

UDK 624+001.891

JANEZ DUHOVNIK

POVZETEK

Na strateški konferenci raziskovalnega polja GRADBENIŠTVO, ki je bila v aprilu 1992 v Ljubljani, so bili obravnavani predlogi v zvezi s pripravo nacionalnega raziskovalnega programa. Predlogi so bili pripravljeni na podlagi analize razmer v gradbeništvu in v raziskovalnih skupinah. V članku so opisana področja raziskav, rezultati, ki so jih dosegle pomembne raziskovalne skupine ter vsebina bodočih raziskav, ki se bodo opravljale v naslednjih nekaj letih.

R & D IN CONSTRUCTION

SUMMARY

In the strategic conference of the research field ONSTRUCTION, held in April 1992 in Ljubljana, the proposals for the national research program were discussed. The proposals were prepared using the analysis of the state in the construction industry and in the research groups. The research domains, the results reached by the significant research groups and the contents of the future researches are described in the paper.

1. UVOD

Ministrstvo za znanost in tehnologijo Republike Slovenije je z letom 1992 uvedlo raziskovalna polja kot obliko soupravljanja. Večina raziskovalnih in razvojnih dejavnosti na področju gradbeništva je vključena v raziskovalno polje **GRADBENIŠTVO,** del pa tudi v druga raziskovalna polja. Med tistimi, ki so povezana s tehniko in tehnologijo, so za gradbeništvo pomembna še **PROSTOR, ENERGETIKA, MATERIALI, MEHANIKA, RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA** ter **RAČUNSKO INTENZIVNE METODE,** med ostalimi pa **EKONOMIJA, UPRAVNE IN ORGANIZACIJSKE VEDE** ter **VARSTVO OKOLJA.** Trenutno je polj 50 (1). V okviru raziskovalnih polj je predvideno usmerjanje in spodbujanje raziskovalnega in razvojnega dela ter priprava mnenj v zvezi s financiranjem raziskovalnih in razvojnih projektov (2).

Avtor:
prof. dr. Janez Duhovnik, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo, Jamova 2, 61000 Ljubljana

Za vsako polje je minister imenoval nacionalnega koordinatorja, njegovega namestnika in ožje strokovno jedro. Mandat vseh navedenih traja tri leta in se lahko ponavlja. Koordinator **RP GRADBENIŠTVO** je J. Duhovnik, namestnik je P. Fajfar, člani ožjega strokovnega jedra so A. Zajc, L. Trauner, M. Saje, M. Tomaževič in A. Krainer, kot predstavniki gospodarstva pa sodelujejo V. Ačanski, M. Debeljak, A. Kerin, A. Rogač, D. Valentinčič in T. Zupanc.

Raziskovalna polja so kot prvo nalogo izvedla strateške konference, na katerih so bili obravnavani predlogi za nacionalni raziskovalni program. Javno sklicana strateška konferenca raziskovalnega polja **GRADBENIŠTVO** je bila na **FAGG 21. 4. 1992**. Na njej so poleg predstavnikov raziskovalnih organizacij sodelovali predstavniki gradbenih podjetij, projektivnih birojev in podjetij za proizvodnjo gradbenih materialov, Ministrstva za industrijo in gradbeništvo, Ministrstva za znanost in tehnologijo, Gospodarske zbornice – sekcije gradbeništva in IGM ter strokovnih društev.

V razpravi je bilo ugotovljeno, da sta povečanje kakovosti ter razvoj novih postopkov in proizvodov edina možnost za obstoj in prihodnji razvoj slovenskega gradbeništva v

sodobnem tržnem gospodarstvu. To pa je mogoče le z intenzivno raziskovalno razvojno dejavnostjo. Slovenija si ne more privoščiti zaostajanja v gospodarski panogi, ki tudi v sedanjih neugodnih razmerah prispeva okoli 8% družbenega proizvoda in kot delovno intenzivna dejavnost zagotavlja delo za okoli 10% zaposlenih v slovenskem gospodarstvu. Za primerjavo naj navedemo, da je delež gradbeništva v družbenem proizvodu na Japonskem v zadnjih letih okoli 17%. Torej lahko pričakujemo, da se bo z razvojem Slovenije delež gradbeništva v družbenem proizvodu povečeval.

Glede na nizko raven grajenega okolja pri nas je to pričakovanje nedvomno upravičeno. Nujna bo gradnja infrastrukturnih ter spremljajočih objektov. Oživitev katerekoli od industrijskih ali drugih gospodarskih dejavnosti bo prinašala s seboj spremembo tehnologij. Spremenjene tehnologije bodo zahtevale nove objekte ali rekonstrukcijo obstoječih. Ker bo obseg rekonstrukcij in adaptacij bistveno večji kot doslej, bo potrebno prestrukturiranje gradbenih in projektantskih podjetij, to pa bo mogoče le ob podpori dobro razvite raziskovalno-razvojne dejavnosti.

Dvig tehnološke ravni gradbeništva, ki ga omogoča raziskovalno-razvojna dejavnost, bo spodbujal zaposlovanje slovenskih delavcev v tej panogi in povečal možnosti gradbenih in projektantskih podjetij za pridobivanje dela v drugih državah. Zadnje bo posredno omogočalo tudi izvoz opreme in naprav za gradbene objekte, ki jih proizvajajo naša strojna, elektro in lesno industrijska ter obrtna podjetja. Kakovost v gradbeništvu pa je posebej pomembna tudi zato, ker gre pri graditvi objektov za dolgoročne investicije v infrastrukturo, ki pomembno vplivajo na narodno gospodarstvo nasploh.

2. ANALIZA RAZMER (3)

2.1. Raziskovalna področja

Znotraj raziskovalnega polja **GRADBENIŠTVO** poteka raziskovalno delo na šestih področjih (poleg naslovov področij je navedena vsebina raziskav):

Gradbeni materiali: trdnost, obstojnost in izolativnost gradbenih materialov, korozijski procesi v gradbenih materialih, numerična simulacija obnašanja gradbenih materialov, proizvodnja gradbenih materialov.

Geotehnika: raziskave in razvoj metod za projektiranje, analizo in gradnjo tistih delov gradbenih objektov, ki so neposredno v stiku s tlemi, preučevanje lastnosti tal.

Konstrukcije v gradbeništvu: raziskave in razvoj metod za projektiranje vseh vrst konstrukcij pri različnih obtežbah (razen potresne) in raziskave obnašanja konstrukcij in elementov pri požaru.

Potresno inženirstvo: raziskave obnašanja vseh vrst konstrukcij iz različnih materialov in infrastrukturnih objektov pri potresni obtežbi, interdisciplinarne raziskave v povezavi z inženirsko seizmologijo.

Gradbena fizika: analiza vplivov klime, mikroklimatskih zahtev in pogojev notranjega okolja za zasnovo ovoja zgradbe.

Računalniško integrirana graditev objektov: raziskave in razvoj metod za računalniško projektiranje, pripravo in planiranje proizvodnje, gradnjo, vzdrževanje in odstranjevanje gradbenih objektov.

2.2. Analiza posameznih področij

GRADBENI MATERIALI

Osnovni RR potencial na tem področju sestavljajo skupine na ZRMK, FAGG, KIBK, IJS in TFM. Dosedanje delo skupin je bilo tesno povezano s potrebami gospodarstva. Vse skupine so primerno opremljene z laboratorijsko opremo, ki pa je večinoma na meji zastarelosti. Nekatere skupine so mednarodno uveljavljene, druge so opravile številne prenose raziskovalnih rezultatov v prakso. Ti prenosi bi bili uspešnejši in še številnejši, če bi bil za kapitalsko zahtevnejše na voljo denar. To težavo bi lahko odpravil rizičen kapital, ki sedaj v Sloveniji ni na voljo. Mladi raziskovalci so vključeni le v nekatere skupine. Na področju je bilo doslej skupaj 5 mladih raziskovalcev, od katerih je ena dosegla magisterij, dva pa sta usposabljanje končala z neformalno izobrazbo. V gospodarstvu se je zaposlil 1. Od raziskovalnih enot v podjetjih sta se dve enoti registrirali kot tržno usmerjena inštituta in sta usmerjena v razvoj za potrebe podjetij, iz katerih sta se razvila. Področje je za Slovenijo pomembno zaradi lastne proizvodnje gradbenih materialov, koristne uporabe odpadkov in zmanjšanja porabe energije pri proizvodnji gradbenih materialov. Z raziskavami in razvojem novih metod proizvodnje je spodbujen tudi razvoj strojne industrije. Raziskave trenutno pokrivajo vsa aktualna področja. Obstajajo še premalo izkoriščene možnosti za izvoz storitev, izdelkov in tehnologij. Mednarodno sodelovanje je bilo doslej večinoma neformalno, v **SCT** pa je v sodelovanju z **ZRMK** in **FAGG** potekal projekt, sofinanciran s strani **UNDP.** Sedanji letni obseg financiranja s strani **MZT** je **10,3 FTE** (raziskovalec/leto), s strani gospodarstva pa **7 FTE.**

GEOTEHNIKA

Raziskovalne skupine obstajajo na **FAGG, TFM, FNT, ZRMK** in **GZ.** Skupini na **FAGG** in **ZRMK** v sodelovanju s **TFM** sta več let sodelovali v **YU – USA** projektih. Dosedanje delo vseh skupin je bilo tesno povezano s potrebami gospodarstva. Vse skupine so opremljene z laboratorijsko opremo, ki pa je zastarela in jo bo potrebno nadomestiti z novejšo, ki bo v celoti računalniško krmiljena. Mednarodni ugled uživa to področje po zaslugi akademika prof. dr. Luja Šukljeta, ki je vzgojil več uspešnih naslednikov. Raziskovalci sodelujejo pri številnih strokovnih nalogah in tako neposredno prenašajo raziskovalne rezultate v prakso. Raziskovalni rezultati se sproti prenašajo v študijske programe na visokem in podiplomskem študiju. Mladi raziskovalci so vključeni v skupini na obeh univerzah. Na področju je bilo doslej skupaj 6 mladih

raziskovalcev, od katerih so 3 dosegli magisterij in 1 doktorat. Področje je za Slovenijo pomembno zaradi velike heterogenosti temeljnih tal. Bele lise niso izrazite, potrebno pa bi bilo ojačiti raziskave na podpodročju mehanike skale, sipkih sedimentov in stohastike v geotehniki. Mednarodno sodelovanje je sedaj neformalno. Sedanji letni obseg financiranja s strani **MZT** je **2,3 FTE.**

KONSTRUKCIJE V GRADBENIŠTVU

To področje je najstarejše raziskovalno področje v gradbeništvu. Raziskovalne skupine so na **FAGG, TFM, ZRMK** in **IMK,** pri aplikativnih raziskavah pa sodelujejo tudi raziskovalne enote v gradbenih podjetjih. Številni rezultati so bili uporabljeni v konstrukterski praksi, pri spreminjanju tehničnih predpisov in vgrajeni v računalniške programe ali uporabljeni pri izdelavi praktičnih pripomočkov. Raziskovalci sodelujejo tudi pri pomembnih strokovnih nalogah. Vse skupine so primerno opremljene z računalniško opremo, laboratorijska oprema pa je delno zastarela. Skupine imajo svoje rezultate objavljene doma in v tujini. Mladi raziskovalci so vključeni v skupini na **FAGG** in **TFM.** Na področju je bilo doslej skupaj 17 mladih raziskovalcev, od katerih je 1 dosegel specializacijo, 6 pa magisterij. V gospodarstvu so se zaposlili 3, zunaj inštitucij, kjer so se usposabljali, pa 1. Raziskovalni rezultati se sproti prenašajo v študijske programe na visokem in podiplomskem študiju. Področje organizira skupaj s področjem Potresno inženirstvo vsakoletno Zborovanje gradbenih konstrukterjev. Belih lis na tem področju ni. Mednarodno sodelovanje poteka v okviru programa Tempus, obstaja pa tudi več neformalnih oblik. Vodja skupine na **FAGG** prof. dr. Miran Saje je za svoje delo prejel nagrado sklada B. Kidriča. Sedanji letni obseg financiranja s strani **MZT** je **5,1 FTE,** s strani gospodarstva pa **1,1 FTE.**

POTRESNO INŽENIRSTVO

Ker so skoraj vsa naseljena področja v Sloveniji potresno nevarna, je to področje za Slovenijo posebej pomembno. Poleg glavnih dveh skupin na **FAGG** in **ZRMK** deluje na tem področju še nekaj posameznikov s **TFM** in **IBE.** Obe skupini sta formalno, v obliki skupnih projektov, povezani z glavnimi raziskovalnimi centri na področju potresnega inženirstva v svetu. Imata številne mednarodne publikacije, njuni člani so delovali kot vabljeni predavatelji na tujih univerzah in inštitutih. Raziskovalni rezultati se sproti prenašajo v prakso v obliki računalniških programov ali tehničnih predpisov in navodil za projektiranje in gradnjo potresno varnih konstrukcij. Raziskovalci sodelujejo tudi pri pomembnih strokovnih nalogah. Raziskovalni rezultati se sproti prenašajo v študijske programe na visokem in podiplomskem študiju. Mladi raziskovalci so vključeni v obe skupini. Na področju je bilo doslej skupaj 12 mladih raziskovalcev, od katerih jih je doseglo magisterij 10 in doktorat 1. Zunaj inštitucij, kjer so se usposabljali, so se zaposlili 4. Vodja skupine na **FAGG** prof. dr. Peter Fajfar je dopisni član **SAZU.** Vodilni raziskovalci P. Fajfar, M. Tomaževič, M. Fischinger in R. Žarnić so za svoje delo prejeli nagradi sklada B. Kidriča, Raziskovalna oprema obeh skupin je ustrezna in potrebna le sprotnega posodabljanja. Skupina na **FAGG** je organizator letošnje mednarodne delavnice. V prihodnje bo treba več pozornosti nameniti preučevanju vplivov potresa na infrastrukturo, drugih belih lis na tem področju ni. Sedanji letni obseg financiranja s strani **MZT** je **5 FTE,** s strani gospodarstva pa **0,8 FTE.**

GRADBENA FIZIKA

Varčevanje z energijo, zaščita pred hrupom in vlago ter ustvarjanje ugodnih delovnih in bivalnih razmer so razlog za obstoj posebnega področja. Na tem področju so aktivne skupine na **FAGG, KIBK, ZRMK** in **TFM.** Delo skupin je komplementarno s področjem gradbeni materiali in RP ENERGETIKA. Skupine so primerno opremljene, opremo bo potrebno sproti modernizirati. Skupini na **FAGG** in **KIBK** sta mednarodno uveljavljeni, zadnje tri so opravile več aplikativnih raziskav in jih prenesle v prakso. Mladi raziskovalci so vključeni na **FAGG** in **KIBK.** Na področju je bilo doslej skupaj 8 mladih raziskovalcev, od katerih jih je 5 doseglo magisterij. V gospodarstvu sta se zaposlila 2. Mednarodno sodelovanje se odvija v okviru programa **TEMPUS** in neformalno v raznih oblikah sodelovanja. Sedanji obseg financiranja s strani **MTZ** je **1,8 FTE.**

RAČUNALNIŠKO INTEGRIRANA GRADITEV OBJEKTOV

Integracija postopkov pri dejavnostih od zamisli do zgraditve objekta, pri njegovi uporabi in odstranitvi je danes smiselna le z uporabo računalnikov. Na tem področju so bile doslej dejavne skupine na **FAGG** in **TFM.** Dosedanje delo obeh skupin je bilo doslej tesno povezano s potrebami gospodarstva. Poleg izjav o zbornikih mednarodnih konferenc sta obe skupini bistveno prispevali k uporabi računalnikov v slovenskem gradbeništvu. Razviti so bili računalniški programi za dejavnosti, ki jih ne pokrivajo ostala področja v polju gradbeništvo. Predmet raziskav je bilo doslej računalniško projektiranje in vodenje projektov v gradbeništvu. Skupina na **FAGG** izmenično vsako drugo leto organizira dve strokovni srečanji, na katerih so bili doslej udeleženci iz nekdanje Jugoslavije, letos pa tudi iz drugih držav. Skupini sta primerno opremljeni, potrebno bo le posodabljanje opreme. Mladi raziskovalci so vključeni v obe skupini. Na področju je bilo doslej skupaj 17 mladih raziskovalcev, od katerih jih je 8 doseglo magisterij, 1 pa doktorat. V gospodarstvu se jih je zaposlilo 5. Aktivnosti v zvezi s tem področjem potekajo tudi v raziskovalnih enotah podjetijh **SCT, GRADIS, PIONIR, IBE** in **AMBIENT.** Mednarodno sodelovanje poteka v okviru dveh programov **TEMPUS (TMF in FAGG)** in v drugih neformalnih oblikah. Sedanji obseg financiranja s strani **MZT** je **2,4 FTE,** s strani gospodarstva pa **1,2 FTE.**

2.3. Analiza RP GRADBENIŠTVO

Iz analize posameznih področij je razvidno, da v **RP GRADBENIŠTVO** poteka široka paleta raziskovalne dejavnosti, ki pokriva večino področij gradbeništva. Na določenih področjih oziroma pri posameznih raziskovalnih

skupinah so rezultati enakovredni svetovnim, nekatere skupine uspešno prenašajo znanje iz razvitejših okolij, v večini pa so skupine uspešne tudi pri raziskovalno-razvojnem delu. Raziskovalne skupine organizirajo več strokovnih srečanj, na katerih pridobivajo novo znanje strokovnjaki iz prakske. Sodelovanje z raziskovalnimi oddelki podjetij je vzpostavljeno na vseh področjih. Najuspešnejše so tiste skupine, ki se lahko izkažejo z rezultati vseh treh vrst. Ugotovimo lahko, da se stanje na vseh področjih počasi, toda stalno razvija v to smer. Zagotovilo za to, da bo tako tudi v bodoče, so predvsem na novo usposobljeni magistri in doktorji, ki so zrasli znotraj sedanjih raziskovalnih skupin in ki so doslej predvsem bistveno izboljšali izobrazbeno strukturo raziskovalnih skupin, nekaj pa se jih je že zaposlilo v gospodarstvu, kamor bo odšla tudi velika večina tistih, ki se še usposabljajo.

Na začetku sedanjega kriznega obdobja smo bili priča povečanju zanimanja gospodarstva za raziskovalno dejavnost. Začeti so bili novi projekti in vzpostavljeno tesno sodelovanje med raziskovalnimi skupinami v **RO** in podjetjih. Nove razmere, v katerih veliki sistemi razpadajo na manjša podjetja, pri tem pa pogosto zanemarjajo razvojno dejavnost, ogrožajo že doseženo. Priča smo razpadanju strokovnih jeder v podjetjih, ki so bila glavni pobudnik za vzpostavljanje stikov z raziskovalno dejavnostjo. To zlasti ogroža raziskovalno razvojno dejavnost, ki je nujen člen v verigi med temeljnimi raziskavami in gospodarsko dejavnostjo, po merilih **MZT** pa je pogojena s sofinanciranjem gospodarstva. Predvidevamo, da bo za vzpostavitev normalnega stanja potrebno neko prehodno obdobje, v katerem bi morali glede sofinanciranja veljati spremenjeni pogoji.

Poseben problem, ki je močno povezan z raziskovalno dejavnostjo, je neurejenost zakonov in tehničnih predpisov na področju gradbeništva. Zlasti pri prilagajanju naših tehničnih predpisov evropskim in mednarodnim bo potrebno intenzivno raziskovalno delo, ki bo obsegalo tako temeljne kot aplikativne raziskave. Mnenje nekaterih predstavnikov gospodarstva na strateški konferenci je bilo, da bi v okviru **RP GRADBENIŠTVO** zasnovali celo posebno področje za ta namen. Prevladuje pa mnenje, da je pripravo, preverjanje in usklajevanje predpisov in standardov treba takoj vključiti na vseh šestih področjih. V to delo bi bilo smiselno poleg RO vključiti tudi zmogljivosti raziskovalnih enot v podjetjih. Nove predpise bi bilo treba pripraviti tako v klasični kot kompjuterizirani obliki.

3. STRATEŠKI PROBLEMI RAZVOJA SLOVENIJE IN RP GRADBENIŠTVO

Oživitev gospodarstva je glavni imperativ bodočega razvoja Slovenije. Ta pa bo mogoč le ob splošnem varčevanju pri vseh razpoložljivih virih. Splošen razvoj v Sloveniji bo zahteval tudi razvoj grajenega okolja: cest, železnic, mostov, industrijskih, energetskih, trgovskih, javnih, kulturnih, šolskih, stanovanjskih, turističnih in drugih objektov. Nove tehnologije v drugih gospodarskih panogah bodo zahtevale nove objekte, prilagajanje obstoječih tehnologij pa prilagajanje, rekonstrukcijo in obnovo obstoječih. Tudi sicer pa bo potrebna sanacija obstoječih dotrajanih objektov in tistih, ki ne ustrezajo sedanjim standardom. Če se bo Slovenija razvijala, bo pomen gradbeništva naraščal in dosegel nivo, ki ga zavzema v razvitih državah. Razvoj grajenega okolja v Sloveniji je najtesneje povezan z raziskovalno dejavnostjo v RP GRADBENIŠTVO. Samo z raziskovalno in razvojno dejavnostjo podprto gradbeništvo bo lahko konkuriralo gradbenim podjetjem iz drugih držav. Vključitev gradbeništva v razvojne načrte Slovenije lahko bistveno prispeva k večji zaposlenosti in posredno k razvoju več drugih industrijskih panog, ki proizvajajo izdelke za opremljanje objektov.

4. PREDLOGI ZA REŠEVANJE STRATEŠKIH PROBLEMOV RAZVOJA SLOVENIJE

RP GRADBENIŠTVO lahko prispeva k reševanju strateških problemov razvoja Slovenije tako, da omogoči:

- smotrno uporabo obstoječih zmogljivosti gradbene industrije
- smotrno proizvodnjo gradbenih materialov
- smotrno uporabo materialov za gradnjo objektov
- smotrno uporabo energije:
  - pri izdelavi gradbenih materialov
  - pri graditvi objektov
  - pri uporabi objektov.
- tako obnovo obstoječih objektov, pri kateri se bo zagotovila:
  - ustrezna potresna varnost
  - smotrna uporaba energije v obnovljenih objektih.

Gradbeni objekti so dolgoročne naložbe, pri katerih se sredstva povrnejo v daljšem časovnem obdobju. Zato je škoda zaradi vsakega narobe naloženega tolarja večkratna. Če upoštevamo še, da vsak gradbeni objekt zasede del skromnega slovenskega ozemlja, lahko ugotovimo, da napačne odločitve pri graditvi lahko blokirajo celoten razvoj Slovenije.

Gradbeništvo kot gospodarsko panogo in s tem tudi raziskovalno polje **GRADBENIŠTVO** je treba obravnavati kot pomemben dejavnik pri prihodnjem razvoju Slovenije.

V zvezi s tem je bilo na strateški konferenci ponovno ugotovljeno, da bi gradbeništvo glede na svoj pomen kot panoga moralo biti zastopano v svetu za znanost in tehnologijo Republike Slovenije, kjer sedaj nima svojega predstavnika.

Osnovni pogoj za uresničitev navedenih možnosti je ureditev zakonskih podlag na področju gradbeništva. Poleg splošnih, ki zadevajo vsa področja, so za gradbeništvo najpomembnejši zakon o graditvi objektov in ustrezni tehnični predpisi. Zadnje je mogoče pripraviti le ob sodelovanju raziskovalne dejavnosti. Ta naloga naj bo zanjo prioritetna. Državna podpora naj bo namenjena predvsem tistim temeljnim in aplikativnim raziskavam, ki imajo poleg drugih tudi ta cilj.

5. PREDLOG RAZVOJA PODROČIJ V RP GRADBENIŠTVO

Podpirajo naj se raziskave, ki imajo naslednje, za področja značilne cilje:

Gradbeni materiali:
- Ustvarjanje osnov za razvoj novih gradbenih materialov z novimi lastnostmi
- Razvoj izdelkov iz novih materialov
- Razvoj tehnologij izdelave in uporabe gradbenih materialov.

Geotehnika:
- Razvoj metod za analizo obnašanja tal in geotehničnih konstrukcij
- Razvoj eksperimentalnih metod
- Razvoj metod za gradnjo geotehničnih objektov

Konstrukcije v gradbeništvu:
- Razvoj računskih metod za projektiranje novih konstrukcij in preverjanje obstoječih pri običajni obtežbi in pri požaru
- Razvoj eksperimentalnih metod
- Razvoj novih konstrukcij.

Potresno inženirstvo:
- Razvoj metod za projektiranje novih konstrukcij in preverjanje obstoječih pri potresni obtežbi
- Razvoj novih potresno varnih konstrukcij
- Razvoj metod za določanje projektnih seizmični parametrov.

Gradbena fizika:
- Znižanje obratovalnih stroškov gradbenih materialov
- Preprečevanje poškodb nosilnih in zaščitnih konstrukcij, ki so posledica temperaturnih nihanj in vlage
- Znižanje stopnje hrupa zunaj in znotraj.

Računalniško integrirana graditev objektov:

- Razvoj in uvajanje nove programske opreme
- Razvoj metod za integracijo vseh postopkov pri graditvi objektov vključno z logistiko.

Skupni cilji vseh področij pa morajo biti:
- povečati varnost, trajnost in zanesljivost obstoječih in novih gradbenih objektov in konstrukcij v običajnih razmerah in pri naravnih nesrečah;
- izboljšati energetski izkoristek pri vseh tehnologijah, ki se uporabljajo od zamiskli prek projektiranja, planiranja gradnje, gradnje, obratovanja, vzdrževanja in odstranitve objektov in tako prispevati k zmanjšanju škodljivih vplivov na okolje;
- izboljšati razmere stroškov in učinkov, produktivnost in kakovost pri načrtovanju, projektiranju, gradnji in upravljanju objektov;
- izboljšati razumevanje vseh problemov, ki preprečujejo uporabo naprednih tehnologij pri graditvi objektov in iskanje postopkov za rešitev teh problemov;
- uvajanje vseh tehnologij in idej, doseženih pri raziskavah, v študijske programe na univerzah, kar bo diplomantom omogočilo neposredno uporabo razvitih orodij v praksi;
- ustvarjanje osnov za prevzem mednarodnih standardov in njihovo prilagajanje posebnim zahtevam pri nas.

Predlagamo, da se v prihodnje odobrava le projekte, ki vsebujejo navedene cilje in ki so medsebojno usklajeni z že tekočimi projekti.

Ocenjujemo, da bi bilo smotrno glede na potrebe gospodarstva, dosedanje rezultate raziskovalnih skupin in kadrovske zmogljivosti posameznih področij namenjati za raziskave v raziskovalnem polju Gradbeništvo letno za **45 FTE** sredstev. Od tega naj bi gospodarstvo kot svoj neposredni prispevek, če bo ta tudi v bodoče znašal polovico sredstev za raziskovalno razvojne projekte, prispevalo **15 FTE, 30 FTE** pa naj bi bil delež **MZT.** Na področjih, ki so bila doslej usmerjena predvsem v temeljne raziskave, bi bilo treba v sodelovanju z gospodarstvom izvajati tudi raziskovalno-razvojne projekte. Za veliko opremo bodo raziskovalne skupine potrebovale od **MZT** letno **450.000 USD.** Na celotnem polju bi bilo treba letno začeti na novo financirati po 10 mladih raziskovalcev.

6. OCENA RAZVOJA V SVETU IN MOŽNOSTI SLOVENIJE

Raziskovalna dejavnost v **RP GRADBENIŠTVO** je bila doslej uspešna, kar dokazuje strokovna usposobljenost naših gradbenih in projektantskih podjetij za delo na tujem. Razvojne težnje v svetu so ta čas zgled za ravnanje raziskovalcev v **RP GRADBENIŠTVO.** Raziskovalni projekti, ki se izvajajo, so deloma komplementarni s podobnimi v tujini, s tem, da so pri nas upoštevane naše razmere. Nekateri projekti se po rezultatih lahko kosajo s svetovnimi. V več primerih gre za spoznavanje na tujem nastalega znanja in prenašanje tega znanja v prakso. V določenih primerih predkonkurenčnih raziskav je prenos znanja v prakso celo hitrejši kot v svetu. Ugotavljamo, da je na različnih področjih dejavnost različno intenzivna glede na vrsto raziskav (temeljne, aplikativne, razvojne), vendar se pri vseh vrstah raziskav dosega rezultate, ki so primerljivi s tistimi v podobnih okoljih. Intenziviranje mednarodnega sodelovanja to stanje lahko bistveno izboljša. Zato bi bilo smotrno, da bi bila vključitev v mednarodne projekte eden izmed neizključujočih dejavnikov, ki se upoštevajo pri razvrščanju predlogov projektov.

LITERATURA

1. Raziskovalna polja, Sporočila s strateških konferenc raziskovalnih polj, Raziskovalec, letnik 22, št. 2, junij 1992, Ljubljana, 1992.
2. Namen in delovanje raziskovalnih polj, Novice MZT, št. 22, 7. 2. 1992.
3. A. Zajc, L. Trauner, M. Saje, P. Fajfar, M. Tomaževič, A. Krainer, J. Duhovnik, Gradiva za strateško konferenco raziskovalnega polja GRADBENIŠTVO, Ljubljana, 23. 4. 1992.

DINAMIČNA IDENTIFIKACIJA NOSILCEV Z METODO DODATNIH MAS

UDK 624.072.2:620.1

MATJAŽ SKRINAR, ANDREJ UMEK

POVZETEK

Prispevek podaja izvirni postopek za izvajanje dinamične identifikacije nosilcev z metodo dodatnih mas v bistvenih prostostnih stopnjah.

Metoda spada v področje parametrične identifikacije, kjer na podlagi izmerjenih lastnih frekvenc identificiramo maso in togost modela.

DYNAMIC IDENTIFICATION OF BEAMS WITH ADDITIONAL MASS METHOD

SUMMARY

This paper deals with the new method of dynamic identification of beams. This method involves the term of additional masses placed in the essential degrees of freedom.

This method belongs to the field of the parametric identification, which facilitates the identification of the mass and the stiffness of the beam on hand of the eigen (natural) frequencies measured.

1. UVOD IN PREDSTAVITEV PROBLEMA

Leta 1989 smo v laboratoriju za teoretično in eksperimentalno analizo konstrukcij in optimizacijo na TF Maribor pričeli z izvajanjem eksperimentov na enostavnih modelih. Zanimali so nas inverzni problemi s področja identifikacije konstrukcij, kjer smo želeli s pomočjo izmerjenih dinamičnih karakteristik konstrukcije (lastne frekvence in lastni vektorji) dobiti podatke o fizikalnih karakteristikah konstrukcije (togost in razporeditev mas). Preučevali smo izključno parametrične metode identifikacije, torej sisteme, za katere smo poznali zgradbo matrik lastnega nihanja (podajnostna in masna matrika), nismo pa poznali numeričnih vrednosti za posamezne koeficiente.

Pri iskanju rešitev v literaturi smo preučili dve v svetu uporabljeni metodi: metodo s spremembo robnih pogojev [G. M. L. Gladwell *Inverse problems in vibration*], ter identifikacijo z metodo končnih elementov. Problema smo se lotili tudi na izviren način, ki v primerjavi s prej omenjenima postopkoma prinaša določene prednosti.

Vse tri metode (metodi, povzeti iz literature, ter novo metodo) smo preizkusili z eksperimenti. Posebno pozornost smo posvetili preizkusom, s katerimi smo želeli potrditi uporabnost metode z dodajanjem mas. Ta je v celoti upravičila naša pričakovanja. Še več, dala je uporabne rezultate tudi zunaj začetno definiranega področja.

2. TEORETIČNE OSNOVE METODE Z DODATNO MASO

Gre za metodo, ki nam omogoča brez drastičnih posegov v konstrukcijo (brez spremembe robnih pogojev) identificirati maso in togost nosilca. Ena izmed glavnih pomanjkljivosti metode s spremembo robnih pogojev je namreč ta, da moramo zagotoviti dve kombinaciji robnih pogojev konstrukcije:

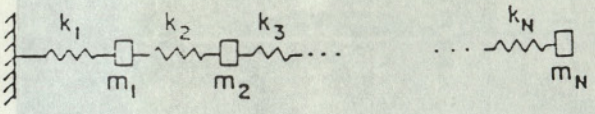
– konzolno vpetost in
– obojestransko vpetost,

kar je v praksi največkrat nemogoče izvesti. V nasprotju s tem je dodajanje znanih mas enostavno izvedljivo na vsakem nosilcu, ne glede na njegove robne pogoje.

Avtor:
Matjaž Skrinar, dipl. inž. gr., Tehniška fakulteta Maribor
mentor: prof. dr. Andrej Umek, dipl. inž. gr., Tehniška fakulteta Maribor

2.1. Model

Model nosilca postavimo kot sistem koncentriranih mas, medsebojno povezanih z brezmasnimi vzmetmi. Predpostavljeno je, da so vse bistvene fizikalne lastnosti sistema koncentrirane v posameznih elementih (vzmeti in mase).



Slika 1: **Model nosilca**

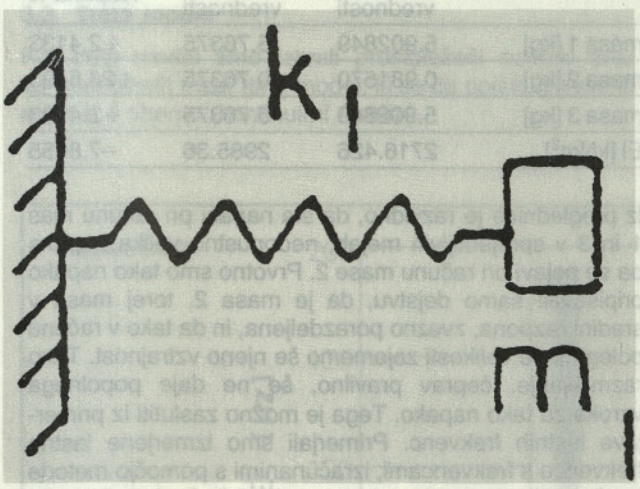
Pri sestavi enačbe lastnega nihanja bomo upoštevali samo bistvene prostostne stopnje. Te so v izbranem primeru horizontalni pomiki posameznih mas.

2.2. Ideja

Naša naloga je poiskati neznane vrednosti mas in togosti.

S pomočjo merske opreme lahko izmerimo lastne frekvence sistema, vendar nam le-te v splošnem niso dovolj za izvedbo identifikacije. Manjkajoče podatke, ki nam omogočajo identifikacijo, dobimo s pomočjo lastnih frekvenc modelov, ki imajo v posameznih prostostnih stopnjah dodano znano maso.

Za ponazoritev ideje si oglejmo enostaven primer:



Slika 2: **Enostaven primer**

Gibalna enačba sistema na sliki 2 je

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1 + k_1 \cdot x_1 = 0$$

kar nas privede do lastne frekvence sistema

$$\omega_1^2 = \lambda_1 = \frac{k_1}{m_1}$$

Sedaj dodajmo masi m_1 znano maso M. Lastna frekvenca sistema je potem:

$$\overline{\omega}_1^2 = \overline{\lambda}_1 = \frac{k_1}{m_1 + M}$$

Če eksperimentalno določimo lastni frekvenci za oba sistema (ω_1 in $\overline{\omega}_1$), lahko ob poznavanju mase M izračunamo k_1 in m_1:

$$k_1 = \overline{\omega}_1^2 \cdot (m_1 + M) \quad \text{in} \quad m_1 = M \cdot \frac{\overline{\omega}_1^{*2}}{\omega_1^{*2} - \overline{\omega}_1^{*2}}$$

Na tem enostavnem primeru smo videli, kako lahko na podlagi znanih lastnih frekvenc osnovnega sistema in sistema z dodatno maso M identificiramo osnovni sistem.

2.3. Sistem z več prostostnimi stopnjami

Pri identifikaciji sistema z več prostostnimi stopnjami (več masami), dobimo gibalno enačbo sistema v matrični obliki

$$[k] \cdot \{x\} + [m] \cdot \{\ddot{x}\} = \{0\} \tag{1}$$

Enačbo (1) preuredimo in zapišemo v obliki

$$x + d \cdot m \cdot \ddot{x} = 0 \tag{2}$$

kjer je $[d] \equiv [k]^{-1}$

Lastne frekvence sistema izračunamo iz lastnih vrednosti matrike [dm], ki predstavlja produkt podajnostne in mastne matrike. Zveza med lastnimi frekvencami sistema in lastnimi vrednostmi matrike dm je:

$$\nu_i = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{\lambda_1}} \tag{3}$$

kjer so λ_i lastne vrednosti, ν_i pa pripadajoče lastne frekvence.

Za izračun posameznih mas potrebujemo lastne frekvence sistema, ki ima dodatno maso v tisti prostostni stopnji, katere maso želimo identificirati. Na enak način zapišemo enačbo (2) za vsak sistem z dodatno maso in poiščemo pripadajoče lastne frekvence. Tako imamo za sistem z n-prostostnimi stopnjami (torej tudi z neznanimi masami) n lastnih frekvenc, in za vsako izmed njih lahko s pomočjo enačbe (3) izračunamo pripadajočo lastno vrednost enačbe (2).

Če z A_p označimo vsoto lastnih vrednosti sistema z dodatno maso v *p*-ti prostostni stopnji, z det_p njihov produkt, ter z M_p dodatno maso, dobimo enostavna izraza za mase in člene podajnostne matrike.

$$\boxed{d_{pp} = \frac{A_p - A_o}{M_p}} \qquad \boxed{m_p = M_p \cdot \frac{det_o}{det_p - det_o}} \tag{4, 5}$$

Za izvendiagonalne člene podajnostne matrike ne obstaja splošen izraz, temveč samo izrazi, odvisni od števila prostostnih stopenj sistema.

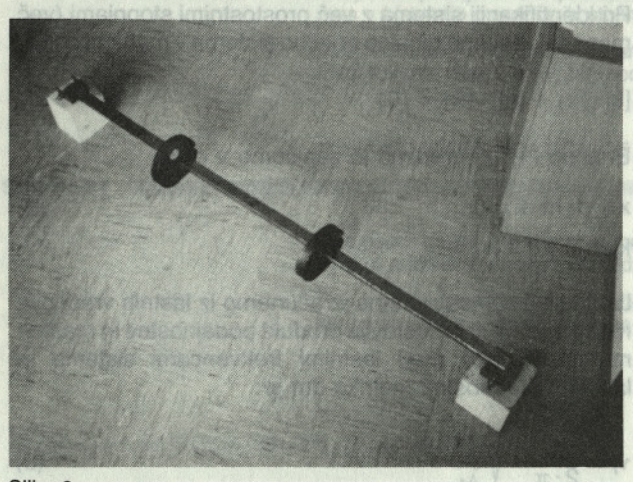
3. PRAKTIČNE MERITVE Z REZULTATI

Vse metode so bile preverjene na modelih. Največjo pozornost smo namenili preizkusom metode z dodatno maso.

Na prostoležečem nosilcu smo simulirali tri različne modele:

– sistem z izrazito koncentriranimi masami: (dve prostostni stopnji)
– kombinacija koncentriranih mas in zvezne porazdelitve mase (tri prostostne stopnje)
– sistem z zvezno porazdeljeno maso (tri prostostne stopnje).

3.1. Prvi model



Slika 3

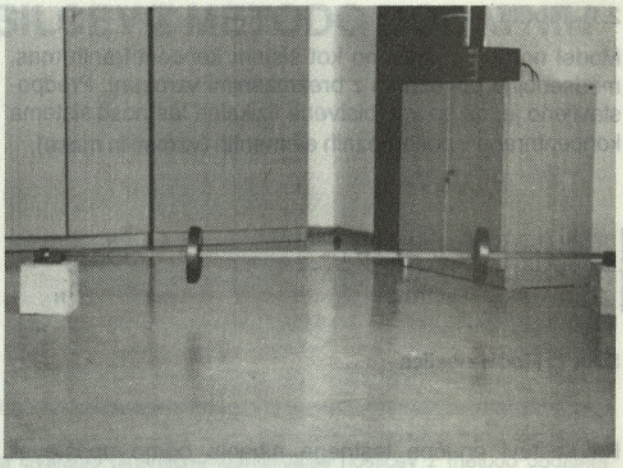
Na nosilec smo na tretjinah razpona pritrdili dve uteži z maso 5 kg (slika 3). Tako smo v vsaki prostostni stopnji dobili maso uteži, povečano za tretjino mase celotnega nosilca. Identificirane so bile naslednje vrednosti:

	Računske vrednosti	Teoretične vrednosti	Napaka %
masa 1 [kg]	6.001452	6.01833	–0.2805
masa 2 [kg]	6.001452	6.01833	–0.2805
EI [kNm^2]	3034.495	2985.36	+1.6458

Dosežena je bila odlična natančnost.

3.2. Drugi model

Celoten postopek smo ponovili na sistemu, kjer smo premaknili masi bliže podporam, natančneje na četrtino razpona od vsake podpore (slika 4). To je sistem, ki nima treh izrazitih koncentriranih mas, temveč samo dve, tretja (sredinska) masa pa je samo masa nosilca. Sistem je nekakšna kombinacija modela s koncentriranimi masami in zveznega modela. Stranski masi sta enaki masi uteži in četrtini mase celotnega nosilca, srednja masa pa četrtini mase nosilca.



Slika 4

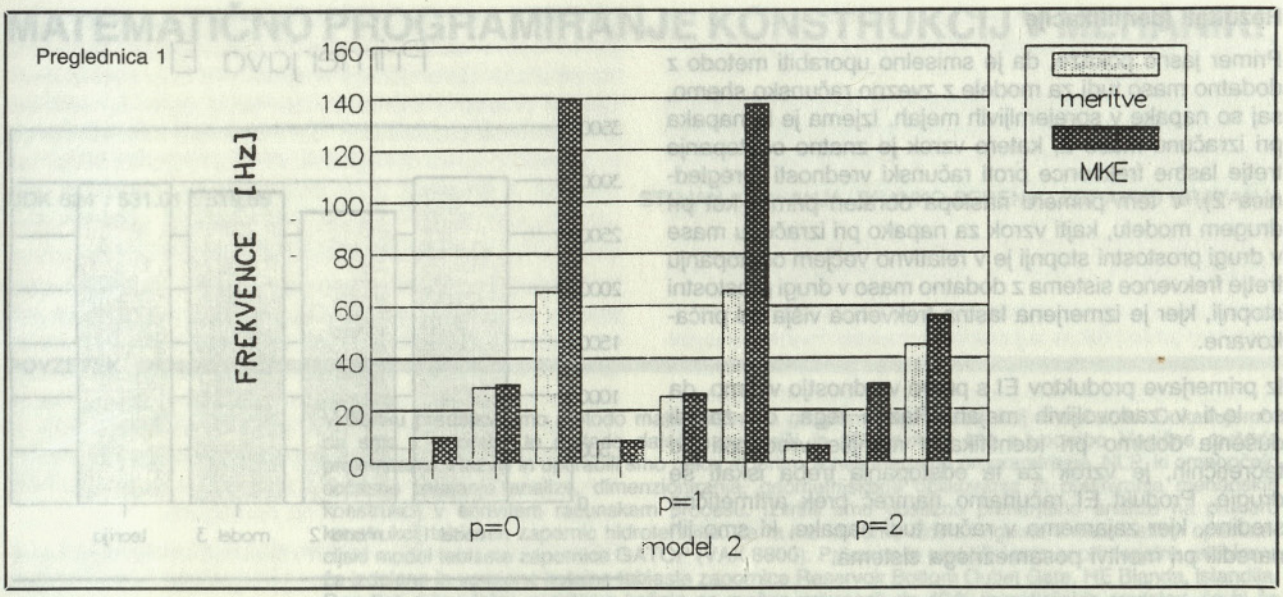
S takim modelom smo hoteli ugotoviti, kako se metoda obnaša pri takšnih kombiniranih modelih. Pri izvajanju metode se namreč izhaja iz predpostavke, da je vsa masa koncentrirana v točki.

Dodatne mase smo izvedli tako, da smo posamezni stranski masi nadomestili z maso 10 kg in tako dobili dodatni masi $M_1 = M_3 = 5$ kg. V srednji masi smo dodali maso 10 in tako dobili $M_2 = 10$ kg.

Rezultati identifikacije so bili naslednji:

	Računske vrednosti	Teoretične vrednosti	Napaka %
masa 1 [kg]	5.902849	5.76375	+2.4133
masa 2 [kg]	0.981570	0.76375	+28.5195
masa 3 [kg]	5.902849	5.76375	+2.4133
EI [kNm^2]	2716.426	2985.36	–7.8855

Iz preglednice je razvidno, da sta napaki pri računu mas 1 in 3 v sprejemljivih mejah, nedopustno velika napaka pa se pojavi pri računu mase 2. Prvotno smo tako napako pripisovali samo dejstvu, da je masa 2, torej masa v sredini razpona, zvezno porazdeljena, in da tako v računu poleg njene velikosti zajamemo še njeno vztrajnost. Tako razmišljanje, čeprav pravilno, še ne daje popolnega vzroka za tako napako. Tega je možno zaslutiti iz primerjave lastnih frekvenc. Primerjali smo izmerjene lastne frekvence s frekvencami, izračunanimi s pomočjo metode končnih elementov (preglednica 1). Vidimo, da prihaja do občutnega odstopanja tretje frekvence za osnovni model in za model z dodatno maso v prvi prostostni stopnji, in da se tretja frekvenca za model z dodatno maso v drugi prostostni stopnji dokaj dobro ujema s pričakovano. Iz enačb (4) in (5) je razvidno, da je natančnost izračuna posamezne mase odvisna samo od natančnosti meritev osnovnega sistema in sistema z dodatno maso v prostostni stopnji, katere maso želimo identificirati. Prav tako je mogoče pokazati, da se vplivi napak, kolikor so vsi iste vrste, pri identifikaciji mase dokaj uspešno medsebojno uničujejo. Praktični dokaz za to trditev je ta primer, saj

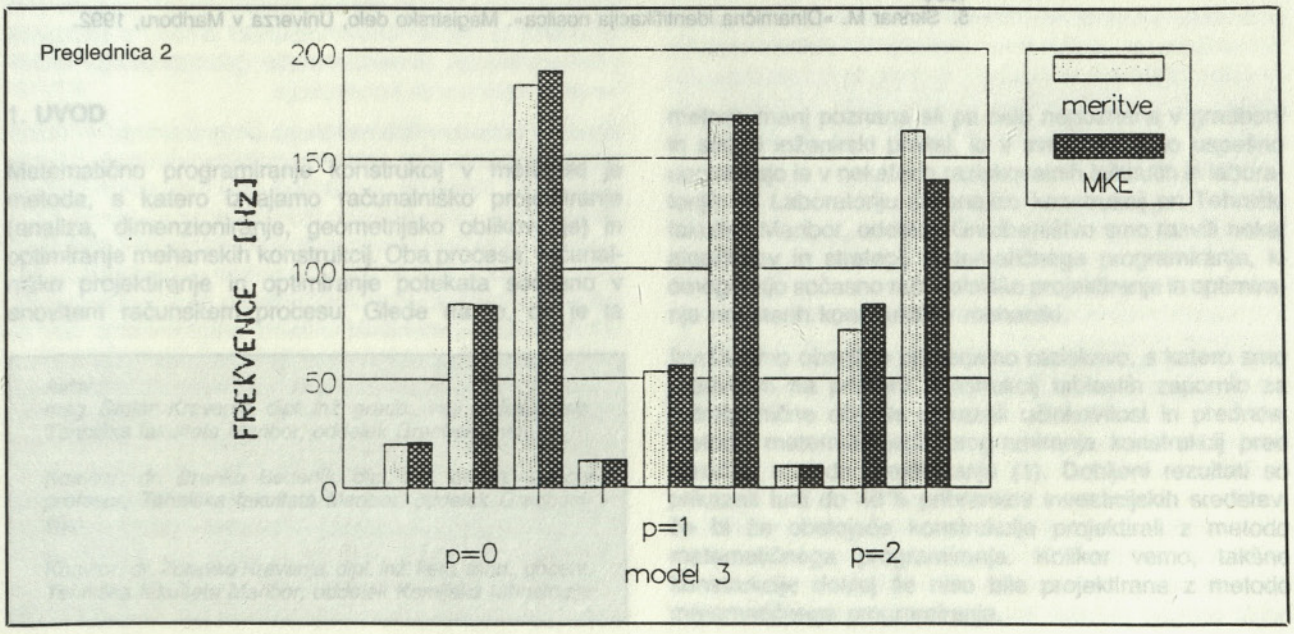


napaka meritve tretje frekvence osnovnega sistema ne vpliva na izračun mase v prvi prostostni stopnji (saj smo pri meritvah sistema z dodatno maso v prvi prostosni stopnji naredili približno enako napako pri meritvi tretje lastne frekvence), temveč na identifikacijo mase v drugi prostostni stopnji (kjer smo tretjo frekvenco relativno natančno izmerili).

	Računske vrednosti	Teoretične vrednosti	Napaka %
masa 1 [kg]	0.789823	0.76375	+3.4138
masa 2 [kg]	0.865471	0.76375	+13.3186
masa 3 [kg]	0.789823	0.76375	+3.4138
EI [kNm^2]	2902.374	2985.36	–2.77976

3.3. Tretji model

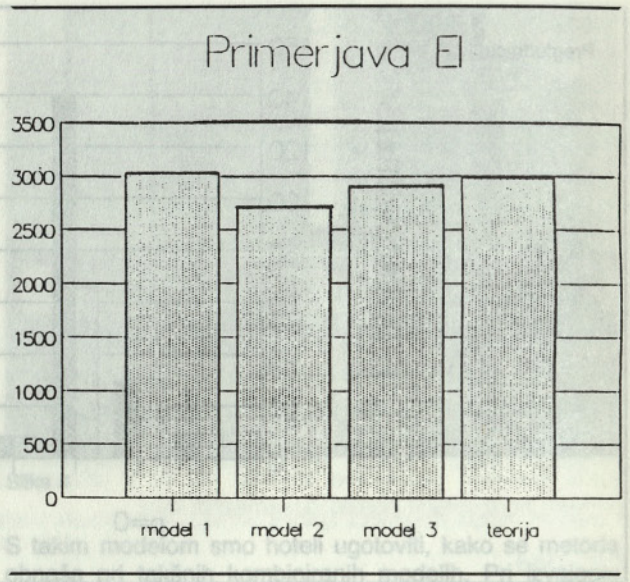
Kot tretji model smo izbrali prostoležeči nosilec brez koncentriranih mas, torej model, ki se da opisati z zvezno računsko shemo (kontinuirni sistem).



Rezultati identifikacije

Primer jasno pokaže, da je smiselno uporabiti metodo z dodatno maso tudi za modele z zvezno računsko shemo, saj so napake v sprejemljivih mejah. Izjema je le napaka pri izračunu mase 2, katere vzrok je znatno odstopanje tretje lastne frekvence proti računski vrednosti (preglednica 2). V tem primeru nastopa obraten primer kot pri drugem modelu, kajti vzrok za napako pri izračunu mase v drugi prostostni stopnji je v relativno večjem odstopanju tretje frekvence sistema z dodatno maso v drugi prostostni stopnji, kjer je izmerjena lastna frekvenca višja od pričakovane.

Iz primerjave produktov EI s pravo vrednostjo vidimo, da so le-ti v zadovoljivih mejah. Razen tega, da zaradi dušenja dobimo pri identifikaciji manjše vrednosti od teoretičnih, je vzrok za ta odstopanja treba iskati še drugje. Produkt EI računamo namreč prek aritmetične sredine, kjer zajamemo v račun tudi napake, ki smo jih naredili pri meritvi posameznega sistema.



4.0. SKLEPI

Praktični preizkusi so torej pokazali, da je nova metoda uporabna. Dejanski oviri za njeno splošnejšo uporabnost sta premalo zmogljiva merska oprema (iskanje višjih frekvenc) in neustrezno vzbujanje sistema (nesposobnost ustreznega vzbujanja višjih frekvenc). Preizkusi so namreč jasno pokazali, da tretje (in višjih) frekvenc največkrat ne moremo ustrezno zbuditi. Te pomanjkljivosti bodo kmalu odpravljene, saj bo na razpolago nova oprema za meritve. Takrat bo prikazana metoda lahko še uspešneje rabila za enostavno in hitro direktno identifikacijo nosilcev – brez iteriranja ali sprememb robnih pogojev.

LITERATURA

1. Gladwell G.M.L. »Inverse problems in vibration«, Martimus Nijhoff Publishers, 1986
2. Fajfar P. »Dinamika gradbenih konstrukcij«; Ljubljana: FAGG, 1984
3. Kikuchi F., Aizarva T., »A Numerical Method for Free Vibration Analysis of Structures with Small Design Changes«, Bulletin of JSME, Vol. 27, No 229, 1984
4. Golub G.H., Van Loan, C. F. »Matrix Computations«, Baltimore: John Hophins University Press, 1990
5. Skrinar M. »Dinamična identifikacija nosilca«. Magistrsko delo, Univerza v Mariboru, 1992.

MATEMATIČNO PROGRAMIRANJE KONSTRUKCIJ V MEHANIKI

UDK 624 : 531.01 : 519.85

STOJAN KRAVANJA, BRANKO BEDENIK, ZDRAVKO KRAVANJA

POVZETEK

V članku predstavljamo metodo matematičnega programiranja konstrukcij v mehaniki. Dokazujemo, da smo z uporabo te metode daleč uspešnejši in učinkovitejši kot z uporabo klasične metode projektiranja. Razvili in uporabili smo nekaj algoritmov nelinearnega programiranja, NLP, ki omogočajo sočasno izvajanje analize, dimenzioniranja, geometrijskega oblikovanja in optimiranja mehanskih konstrukcij v enovitem računskem procesu. Izvršili smo obsežno primerjalno analizo na primeru konstrukcij tablastih zapornic hidrotehnike. Za ta namen smo izdelali rigorozni matematični optimizacijski model tablaste zapornice GATOP (VAX 8800). Prikazan je praktični primer primerjalne raziskave že izdelane in vgrajene kotalne tablaste zapornice Reservoir Bottom Outlet Gate, HE Blanda, Islandija. Rezultati primerjalne raziskave kažejo na možen prihranek do 40 % investicijskih sredstev, če bi že izdelane konstrukcije zapornic projektirali z metodo matematičnega programiranja.

MATHEMATICAL PROGRAMMING OF MECHANICAL STRUCTURES

SUMMARY

This paper describes the mathematical programming method of mechanical structures. The method has been found to be much more efficient and advantageous than classical designing methods. We have developed and used some nonlinear programming algorithms (NLP) for simultaneous performance of analysis, dimensioning, shaping and optimization of mechanical structures in an uniform calculation process. A comprehensive comparative research has been performed using mathematical programming on hydrotechnic's steel gate structures. A rigorous mathematical optimization model of gate structure GATOP (VAX 8800) has been developed. The practical example of mathematical programming on already constructed gate Resorvoir Bottom Outlet Gate, Hydroelectric Project Blanda, Iceland, is presented. The obtained results of comparative research show up to 40 % savings of investment costs, if already constructed gate structures to be analised by method of mathematical programming.

1. UVOD

Matematično programiranje konstrukcij v mehaniki je metoda, s katero izvajamo računalniško projektiranje (analiza, dimenzioniranje, geometrijsko oblikovanje) in optimiranje mehanskih konstrukcij. Oba procesa, računalniško projektiranje in optimiranje potekata sočasno v enovitem računskem procesu. Glede na to, da je ta metoda manj poznana ali pa celo nepoznana v gradbeni in strojni inženirski praksi, jo v svetu trenutno uspešno uporabljajo le v nekaterih raziskovalnih inštitutih in laboratorijih. V Laboratoriju za analizo konstrukcij pri Tehniški fakulteti Maribor, oddelek Gradbeništvo smo razvili nekaj algoritmov in strategij matematičnega programiranja, ki omogočajo sočasno računalniško projektiranje in optimiranje nekaterih konstrukcij v mehaniki.

Izvršili smo obsežno primerjalno raziskavo, s katero smo predvsem na primeru konstrukcij tablastih zapornic za hidrotehnične objekte dokazali učinkovitost in prednost metode matematičnega programiranja konstrukcij pred klasično metodo projektiranja (1). Dobljeni rezultati so prikazali tudi do 40 % prihrankov investicijskih sredstev, če bi že obstoječe konstrukcije projektirali z metodo matematičnega programiranja. Kolikor vemo, takšne konstrukcije doslej še niso bile projektirane z metodo matematičnega programiranja.

Avtor:
mag. Stojan Kravanja, dipl. inž. gradb., višji raziskovalec, Tehniška fakulteta Maribor, oddelek Gradbeništvo

Koavtor: dr. Branko Bedenik, dipl. inž. gradb., izredni profesor, Tehniška fakulteta Maribor, oddelek Gradbeništvo

Koavtor: dr. Zdravko Kravanja, dipl. inž. kem. tehn., docent, Tehniška fakulteta Maribor, oddelek Kemijska tehnologija

2. KLASIČNA METODA PROJEKTIRANJA KONSTRUKCIJ IN NJENE POMANJKLJIVOSTI

Projektiranje konstrukcij v mehaniki je računski proces, s katerim izvajamo analizo, dimenzioniranje in geometrijsko oblikovanje mehanskih konstrukcij. Analizo, dimenzioniranje in geometrijsko oblikovanje izvajamo zaporedoma tolikokrat, dokler ne dobimo tistega optimalnega rezultata, ki (najbolj) zadovoljuje vse bistvene predpostavke o funkcionalni, stabilni, estetski ter cenovno privlačni konstrukciji.

Rečemo lahko, da se na splošno klasična metoda projektiranja mehanskih konstrukcij sestoji iz štirih glavnih delovnih faz, ki jih večinoma izvajamo zaporedno in iterativno, nekatere od njih (po dve ali celo tri) pa velikokrat tudi sočasno:

a) V prvi fazi določimo zasnovo, s katero objektu in/ali konstrukciji predvidimo funkcionalnost, obliko, stabilnost, estetsko ter okvirno cenovno vrednost.

b) Za ta namen potem v drugi fazi pri izbiri različnih stališčnih sistemov, razponov, razporeditev konstrukcijskih elementov, vozlišč, veznih sredstev, materialov, idr. izdelamo več variant možnih konstrukcij. Za vsako možno varianto izvedemo preliminarno analizo in dimenzioniranje (dimenzije, napetosti, deformacije glavnih nosilih elementov) ter izdelamo preliminarno kalkulacijo.

c) Zatem se v tretji fazi odločimo za najbolj primerno izbirno varianto (tudi lahko dve varianti ali več), kjer se dokončno odločimo za statični sistem, razpone ter število in razporeditev konstrukcijskih elementov. Preliminarno analizo in dimenzioniranje izbrane variante konstrukcije nato zaporedno iterativno tolikokrat ponavljamo, dokler polno ne izkoristimo materiala in ne dosežemo (najbolj) optimalne cenovne kalkulacije. Zadnji dobljeni rezultat predstavlja končno izboljšavo izbrane konstrukcije.

d) Za le-to še na koncu, v četrti fazi, izvršimo končno podrobno, oziroma »eksaktno« analizo (napetostno, deformacijsko in stabilitetno analizo) in dimenzioniranje (končne dimenzije in razponi), in sicer za konstrukcijo kot celoto, za vse posamezne konstrukcijske elemente, vozlišča in vezna sredstva; izdelamo tudi še končno in eksaktno kalkulacijo.

Čeprav je klasična metoda projektiranja mehanskih konstrukcij v svetu splošno priznana metoda in jo domala vsi inženirji konstruktorji oziroma statiki, bolj ali manj uspešno uporabljajo v svojem vsakdanjem delu, lahko trdimo, da ima klasična metoda dve bistveni pomanjkljivosti:

a) Prva pomanjkljivost uporabe klasične metode se kaže v nezmožnosti, da kljub velikemu številu izvedenih zaporednih in iterativnih delovnih faz projektiranja ne moremo doseči končnega najboljšega, tjčnega programiranja so matebi pomenil absolutno najcenejšo konstrukcijo v odvisnosti od vhodnih podatkov iz zasnove, sočasnih zahtev funkcionalnosti, estetike in stabilnosti ter uporabljenih analitičnih ali numeričnih računskih metod analize in dimenzioniranja konstrukcije. Prej opisani absolutno najboljši dobljeni rezultat imenujemo optimum konstrukcije. S klasično metodo projektiranja konstrukcij lahko dosežemo samo dobro ali slabo aproksimacijo optimuma konstrukcije. Da bi dosegli njegovo zelo dobro aproksimacijo, bi praktično morali izvesti nekaj deset ali celo sto iterativnih faz projektiranja. Sam optimum konstrukcije pa bi teoretično lahko dosegli šele v nekaj milijonih, milijardah oziroma s številom blizu neskončnosti, iterativnih faz; odvisno od velikosti števila vseh možnih obravnavanih parametrov in variantnih kombinacij konstrukcije.

b) Druga pomanjkljivost uporabe klasične metode projektiranja konstrukcij je kljub uspešni uporabi modernih numeričnih računskih metod in računalnikov velika poraba računskega časa. Poraba časa se povečuje pri večanju števila iterativnih faz projektiranja, torej takrat, kadar želimo dobiti boljši rezultat neke konstrukcije. Da bi izračunali optimum konstrukcije z velikim številom konstrukcijskih parametrov, bi morali imeti na razpolago neomejen čas, kar pa je praktično nemogoče.

Sklenemo lahko, da je raven kakovosti dobljenega rezultata pri projektiranju konstrukcije v premem sorazmerju s količino porabljenega računskega časa, ki je potreben, da dosežemo omenjeni dobljeni rezultat. S klasično metodo projektiranja mehanskih konstrukcij je praktično nemogoče sprojektirati absolutno najboljšo konstrukcijo oziroma doseči optimum konstrukcije.

3. METODA MATEMATIČNEGA PROGRAMIRANJA KONSTRUKCIJ V MEHANIKI

Na drugi strani pa z uporabo metode matematičnega programiranja pri projektiranju mehanskih konstrukcij odpravimo obe prej omenjeni pomanjkljivosti klasične metode. Nadalje lahko v odvisnosti od vhodnih podatkov ter privzete metode za analizo in dimenzioniranje dosežemo optimum konstrukcije samo v enem računskem procesu (redko v dveh ali več). Pri tem odpadejo tudi vse iterativne faze klasične metode, saj z matematičnim programiranjem kontrukcij izvajamo enovit računski proces s sočasnim potekom analize, dimenzioniranja, geometrijskega oblikovanja in optimiranja konstrukcije.

Splošno metodo matematičnega programiranja so matematiki in strokovnjaki vseh mogočih strok razvijali zadnjih dvajset let, vendar pa so bistveno kakovostno raven dosegli šele v zadnjih petih letih. Metoda matematičnega programiranja je sestavljena iz velikega števila pridruženih optimizacijskih tehnik, tako linearnih in nelinearnih, kot zveznih in diskretnih ter vseh njihovih možnih kombinacij. V konstrukcijski mehaniki linearno programiranje, LP, ne pride v poštev zato, ker kljub vsem mogočim aproksimacijam in linearizacijam problemov ne moremo dobiti zadovoljivih realnih rezultatov, saj so domala vsi problemi v mehaniki nelinearni. Zaradi tega smo razvili in uporabili nekaj algoritmov in strategij za zvezno nelinearno programiranje, NLP. Razvili in uporabili smo tudi kombinacijo zvezno-nelinearne in diskretno-linearne optimirne metode mešanocelоštevilsko nelinearno programiranje, MINLP, katero smo uspešno uporabili pri sočasnem optimiranju topologije in parametrov mehanskih konstrukcij, tj. pri

sočasnem optimiranju števila konstrukcijskih elementov (nosilcev in ploščinskih elementov) ter njihovih dimenzij in razponov. V tem članku se bomo zadržali samo pri problemu NLP, s katerim ob fiksni topologiji konstrukcije uspešno računamo parametre konstrukcijskih elementov, tj. vse potrebne dimenzije in razpone.

Tako NLP metoda, kakor tudi druge diskretne in kombinatorne tehnike optimiranja zahtevajo veliko hitrost in natančnost računalniških računskih operacij, ker so matematični modeli konstrukcij večinoma izredno obsežni. Več sto analitičnih funkcij, od katerih mnoge dosegajo velikost izpisa več strani A4 formata, je potrebnih, da opišemo matematični model konstrukcije. Za vnos vhodnih/izhodnih podatkov in za zapis matematičnih modelov konstrukcij smo uporabili višji algebrajski modelni jezik GAMS (2), računske operacije pa smo izvajali z računalnikom VAX 8800.

3.1. Sočasnost izvajanja analize, dimenzioniranja in optimiranja konstrukcij

Poudariti moramo, da pri matematičnem programiranju mehanskih konstrukcij potekata procesa analize in dimenzioniranja konstrukcij bistveno drugače kot pri klasični metodi projektiranja, pa čeprav v obeh metodah uporabljamo popolnoma iste osnovne enačbe.

Bistvo vsakega projektiranja mehanskih konstrukcij, tudi analize in dimenzioniranja, je geometrijsko oblikovanje konstrukcij, tj. določevanje geometrijskih parametrov: dimenzij, razponov, števila in razporeditev konstrukcijskih elementov. Kadar želimo konstrukcije tudi optimirati, dobimo kot rezultat optimalne dimenzije, razpone idr. V klasični metodi projektiranja konstrukcij optimiranje poteka nekako diskretno in dokaj neučinkovito z nizom zaporednih in iterativnih faz. Na začetku predpostavimo vse dimenzije in razpone ter izračunamo pridružene obremenitve, napetosti in deformacije. V vsaki naslednji fazi računa pa nekatere dimenzije in/ali razpone spremenimo oziroma popravimo ter vsakokrat izvedemo preliminarno analizo in dimenzioniranje z namenom, da dobimo boljši rezultat.

Kot smo že prej omenili, pri matematičnem programiranju analizo konstrukcij, dimenzioniranje, računsko oblikovanje in optimiranje izvajamo sočasno v enovitem računskem procesu. V tem računskem procesu vse dimenzije in razpone konstrukcije obravnavamo kot neznane spremenljivke. Zaradi tega so posledično vse pridružene obremenitve, napetosti in deformacije tudi neznanke. Vhodni podatki konstrukcije (obtežba, geometrija, topologija, dopustne napetosti in deformacije) ter celovit sistem enačb in neenačb za analizo konstrukcije in dimenzioniranje tvorijo matematični model konstrukcije. Matematični model konstrukcije, skupaj z enačbo namenske funkcije (npr. cena konstrukcije, teža ali drugo) in nekaterimi drugimi stavki, kot so npr. rešitveni stavki, s katerimi minimiziramo ali maksimiramo namensko funkcijo, pa tvorijo matematični optimizacijski model konstrukcije. V odvisnosti od zahtev, ki smo jih podali in zapisali z vhodnimi podatki ter enačbami matematičnega optimizacijskega modela, so omenjene neznane spremenljivke, tj. dimenzije konstrukcije, razponi, itd. vzajemno sočasno izračunane v enovitem računskem procesu tedaj, kadar je dosežen optimum v smeri minimiziranja namenske funkcije oziroma optimum konstrukcije. Te izračunane neznane spremenljivke, ki tvorijo optimum konstrukcije, imenujemo optimalne spremenljivke oziroma optimalne dimenzije in razpone, itd.

3.2. Optimizacijski proces

V Laboratoriju za analizo konstrukcij izvajamo optimizacijski proces mehanskih konstrukcij z različnimi optimizacijskimi računalniškimi programi. Za nelinearno optimiranje uporabljamo optimizacijski program MINOS (3), ki je zapisan v programskem jeziku FORTRAN. Uporaben je za reševanje obsežnih nelinearnih optimizacijskih problemov, katerih namenske in omejitvene funkcije so gladke in dvakrat zvezno odvedljive. Pogram MINOS je razvit kot posebna oblika Wolfovega algoritma reduciranih gradientov (4).

Omenjena metoda je bila razvita za reševanje problemov linearnega programiranja z nelinearno namensko funkcijo. Osnovna ideja metode reduciranih gradientov je v tem, da razsežnost matematičnega problema zmanjšamo tako, da neznane spremenljivke razdelimo na odvisne in neodvisne, ter prejšnje izrazimo s slednjimi. Enačbo namenske funkcije F (cena ali teža konstrukcije) optimiramo v smeri minimizacije ter podvržemo pogojem, ki jih predstavlja celotni sistem enačb omejitvenih ali pogojnih funkcij (enačbe za analizo, dimenzioniranje in geometrijsko oblikovanje konstrukcije):

$$\min F = f(x)$$

$$\text{pri pogojih } [A] \cdot \{x\} = \{b\}$$

3.3. Prednosti uporabe metode matematičnega programiranja konstrukcij

Glavne prednosti metode matematičnega programiranja konstrukcij pred klasično metodo projektiranja konstrukcij bi lahko strnili na naslednji način:

a) Z matematičnim programiranjem je možno doseči daleč boljši rezultat kot s klasično metodo, tj. predvsem bistveno cenejšo in lažjo konstrukcijo oziroma optimum konstrukcije.

b) Ker dosežemo optimum konstrukcije direktno v enem samem računskem procesu (bez zamudnih iterativnih faz), je pri matemtičnem programiranju poraba računskega časa neprimerno manjša kot pri klasični metodi.

c) Z matematičnim programiranjem dosežemo realnejši rezultat kot s klasično metodo (vsak projekt in račun je nenazadnje samo aproksimacija dejanskega stanja objekta in/ali konstrukcije v naravi), ker je pri matematičnem programiranju mogoče upoštevati neprimerljivo večje število konstrukcijskih parametrov, oziroma spremenljivk kot v klasični metodi.

d) Glede na to, da uporaba matematičnega programiranja konstrukcij zahteva od inženirja konstruktorja dodatno obvladovanje ne samo raznih optimizacijskih tehnik, numeričnih metod in matematičnega modeliranja, temveč tudi čimboljše poznavanje tehnologije proizvodnje, ekonomike, konstrukcijskega oblikovanja, arhitekture, ekologije itd., je jasno, da ob slabostih, ki nastopajo pri projektiranju zaradi razdrobljenosti in neučinkovitega sodelovanja vseh različnih strok, prav matematično programiranje zahteva od inženirja konstruktorja, da nekako sintetizira ta različna znanja na višjem nivoju, s čimer postaja bistveno uspešnejši od klasičnega projektanta in/ali statika.

3.4. Učinkovitost in uporaba metode matematičnega programiranja konstrukcij

Najboljšo učinkovitost uporabe matematičnega programiranja bomo dosegli pri projektiranju tipskih konstrukcij, ki se izdeljujejo v velikem številu in pri projektiranju funkcionalno ter oblikovno enkratnih, popolnoma netipskih konstrukcij velikih razsežnosti in višjih cenovnih vrednosti. Ta omejitev učinkovite uporabe matematičnega programiranja je pogojena z veliko porabo časa, ki je potreben za izdelavo matematičnega optimizacijskega modela konstrukcije. V povprečju je mogoče kompleksnejši matematični model konstrukcije uspešno razviti v času od nekaj tednov do več mesecev. To pa je tudi edina slaba lastnost uporabe metode matematičnega programiranja konstrukcij.

Nadalje je metoda matematičnega programiranja najučinkovitejša pri projektiranju čistih inženirskih konstrukcij, kjer je v navadi, da inženir konstruktor sam nadzira proces projektiranja. Pri mešanih konstrukcijah, kjer poleg inženirskih zahtev, enakopravno nastopajo ali celo prevladujejo arhitektonski, oblikovni, tehnološki, ekonomski in drugi pogoji, pa je izrednega pomena, da je sodelovanje različnih strok dobro usklajeno in povezano. Mnogokrat projektanti oblikovalci ponudijo statiku in drugim sodelavcem v statično presojo že dokončno izoblikovan objekt ali konstrukcijo. Takšen način dela seveda ne zadovoljuje osnovnih kriterijev za uspešno projektiranje niti po klasični metodi, kaj šele za matematično programiranje. Statik se tedaj upravičeno imenuje statik, saj je njegovo delo omejeno samo na izvedbo statične analize in dimenzioniranja že določene konstrukcije. Za razliko od statika je delo inženirja konstruktorja mnogo kompleksnejše saj mora skonstruirati najcenejšo možno konstrukcijo pri upoštevanju vseh možnih parametrov, tj. optimum konstukcije.

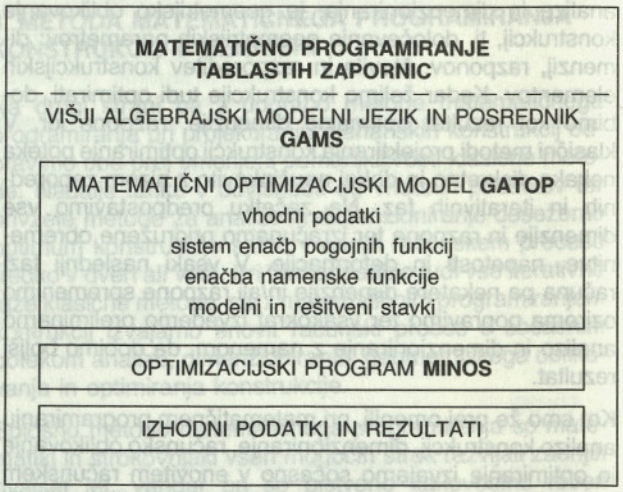
Ker tehnologija proizvodnje in ekonomika narekujeta bistvene zahteve predvsem pri oblikovanju ekonomske namenske funkcije, je zaradi primerjalnih ekonomsko-tehničnih raziskav konstrukcij zelo pomembno, da konstrukcije, ki jih projektiramo po metodi matematičnega programiranja, izdeluje kakovosten in cenovno stabilen izvajalec. Samo s takšnim izvajalcem lahko uspešno sodelujemo in učinkovito izboljšamo poslovni rezultat.

Za ta namen smo izdelali nekaj matematičnih optimizacijskih modelov in primerjalnih raziskav za jeklene tablaste zapornice, ki jih Metalna Maribor izdeluje v sklopu hidromehanske opreme za hidroelektrarne in druge hidrotehniške objekte. Tako izbira matematičnega programiranja tipskih konstrukcij zapornic kakor tudi njihovega izvajalca Metalne Maribor dobro ustrezata prej opisanim pogojem za učinkovito uporabo matematičnega programiranja konstrukcij. Rezultati raziskav so samo potrdili našo izbiro.

4.0. MATEMATIČNI OPTIMIZACIJSKI MODEL GATOP

Za matematično programiranje različnih tablastih zapornic (drsnih in kotalnih) smo razvili računalniški matematični optimizacijski model GATOP (GATe OPtimization). Ta model smo zapisali tako, da omogoča izračun konstrukcije tablaste zapornice pri poljubni določitvi topologije konstrukcije. Z optimizacijskim modelom GATOP smo izvajali nelinearno programiranje zapornic, NLP, ker so skoraj vse enačbe, ki smo jih vpisali v model, nelinearne. Zato tudi lahko rečemo, da smo izdelali NLP verzijo matematičnega optimizacijskega modela GATOP. Model GATOP smo zapisali v višjem algebrajskem modelnem jeziku GAMS. GAMS pa je istočasno tudi posrednik (Sl. 1) med:

a) matematičnim optimizacijskim modelom GATOP
b) optimizacijskim računalniškim programom MINOS
c) izhodnimi podatki in rezultati



Slika 1: **Matematično programiranje tablastih zapornic z optimizacijskim modelom GATOP**

4.1. Sestava matematičnega optimizacijskega modela GATOP

Matematični optimizacijski model tablaste zapornice sestavljajo:

a) vhodni podatki
b) sistem enačb pogojnih funkcij
c) enačba namenske funkcije
d) modelni in rešitveni stavki

Vhodne podatke optimizacijskega modela GATOP sestavljajo prijave in definicije zaporedij, konstant (skalarjev,

parametrov) in spremenljivk ter prijava sistema enačb pogojnih funkcij in enačbe namenske funkcije. Z zaporedji smo definirali število horizontalnih nosilcev (del topologije). S skalarji smo definirali velikost vodne obtežbe na zapornico, vrsto obtežnega primera, geometrijo odprtine, ki jo zapiramo, globalno geometrijo (tesnilni okvir) in drugi del topologije zapornice (število vertikalnih nosilcev, zgornji in spodnji rebrastejnih normalnih napetosti vseh tlačno obrdopustne deformacije in napetosti. V prvi verziji modela GATOP smo s parametri definirali koeficiente sodelujoče širine zajezne stene ν in koeficiente ploščinskih napetosti v zajezni steni k3 ter k4, glej Schmausser [5] in DIN 19704 [6]. Pozneje pa smo le-te vstavili v model kot spremenljivke, katerih vrednosti se recipročno sočasno izračunavajo v odvisnosti od vhodnih podatkov, trenutnih vrednosti ostalih spremenljivk in rezultirajočega optimuma spremenljivke namenske funkcije. Z (neznanimi) spremenljivkami smo definirali vse dimenzije vseh konstrukcijskih elementov zapornice, njihove medsebojne razdalje, obremenitve, prerezne karakteristike in nekatere napetosti. Spremenljivka pa je tudi teža ali cena zapornice, s katero smo definirali enačbo namenske funkcije. Neodvisne spremenljivke so vse dimenzije in medsebojne razdalje med konstrukcijskimi elementi. Vse ostale navedene spremenljivke so odvisne spremenljivke, kar je logično: primarni rezultat in bistvo vsakega računskega projektiranja konstrukcij je vedno le geometrija konstrukcije, vsi ostali vzporedni procesi, tudi sam proces projektiranja, so sekundarni. Vsako spremenljivko definiramo z določitvijo njene spodnje meje, zgornje meje in njene začetne vrednosti. Tako bi npr. neznani spremenljivki debelini pasnice horizontalnega nosilca DP namenili spodnjo mejo 8 mm, DP.LO = 8, zgornjo mejo 40 mm, DP.UP = 40, in začetno pričakovano vrednost 20 mm, DP.L = 20. Take vrednosti namenimo spremenljivki DP tedaj, kadar pričakujemo, da se bo vrednost izračunane optimalne spremenljivke debeline pasnice DP znašla v bližini definirane začetne vrednosti 20 mm, vsekakor pa znotraj intervala med 8 in 40 mm. S temi omejitvami prostora oziroma intervala vseh spremenljivk, predvsem pa z določitvijo njihove začetne pričakovane vrednosti, omogočimo realni in hitrejši izračun optimuma pri problemu matematičnega programiranja konstrukcij. Na koncu še prijavimo vse enačbe sistema pogojnih funkcij in enačbo namenske funkcije.

Sistem enačb pogojnih funkcij definiramo v vrstnem redu, kakor smo jih predhodno prijavili. Z definiranjem enačb mislimo natančen zapis enačb v matematični optimizacijski model zapornice. Zapisane enačbe so v glavnem zelo dolge, tudi več strani A4 formata, ker vsebujejo substituirane izraze vseh neodvisnih in odvisnih neznanih spremenljivk ter konstrukcijskih parametrov. Nadalje morajo biti vse enačbe analitične in zvezno odvedljive. Zaradi tega smo tudi vsem numerično, oziroma tabelarično določenim spremenljivkam iz [5] in [6], tj. koeficientom sodelujoče širine zajezne stene ν, koeficientom ploščinskih napetosti zajezne stene k3 in k4 ter drugim subsituiranim nezveznim izrazom kot je funkcija krivulje izbočenja vitkih stojin $\varkappa p = f(\lambda p)$ [7] in [8], izoblikovali zvezne analitične funkcije po metodi vsote najmanjših kvadratov [9]. Le-te smo potem vstavili v enačbe modela. Sistem enačb pogojnih funkcij predstavlja celotni rigorozni sistem enačb in neenačb za analizo (kompletna statična, napetostna in deformacijska analiza), dimenzioniranje in geometrijsko oblikovanje konstrukcije tablaste zapornice. Sistem enačb pogojnih funkcij konkretno sestavljajo:

a) Množica enačb osnovnih normalnih in strižnih napetosti vseh horizontalnih nosilcev.
b) Množica enačb osnovnih normalnih napetosti vseh ploščinskih elementov zajezne stene.
c) Množica enačb primerjalnih napetosti vseh horizontalnih nosilcev s vsemi sosednjimi ploščinskimi elementi zajezne stene.
d) Množica enačb mejnih normalnih in strižnih napetosti pri izbočenju vseh tlačno in strižno obremenjenih vitkih stojin horizontalnih nosilcev.
e) Množica enačb kontrole varnosti bočnega uklona vseh tlačno obremenjenih pasnic horizontalnih nosilcev.
f) Množica enačb mejnih normalnih napetosti vseh tlačno obremenjenih ploščinskih elementov zajezne stene.
g) Množica pogojnih enačb, ki pogojujejo, da račun poteka v okviru zahtev teorije I. reda.
h) Množica enačb največjih deformacij vseh horizontalnih nosilcev zapornice.
i) Množica geometrijsko-oblikovnih enačb, ki definirajo vse karakteristike prerezov vseh nosilnih elementov in nekatere geometrijsko-konstruktivne zahteve (najmanjša dopustna dimenzija odprtin med sosednjimi pasnicami horizontalnih nosilcev in najmanjša dopustna vertikalna oddaljenost stojin sosednjih horizontalnih nosilcev).
j) In ostale pogojne enačbe (rebrasti nosilci...).

Vseh osnovnih enačb, ki smo jih prijavili v matematičnem optimizacijskem modelu GATOP, je 76. Ker je večina teh enačb indeksiranih glede na število horizontalnih nosilcev in vmesnih ploščinskih elementov, se število vseh definiranih enačb modela bistveno poveča.

Z enačbo namenske funkcije definiramo enačbo tiste odvisne spremenljivke, ki jo želimo optimirati: npr. vertikalni prerez zapornice ali težo konstrukcije zapornice itd. Običajno pa definiramo enačbo ekonomske namenske funkcije, ki predstavlja vrednost stroškov za izdelavo zapornice (poraba materiala, rezanje pločevin, varjenje, antikorozijska zaščita, sestava konstrukcije, transport).

Z modelnimi stavki grupiramo enačbe v razne sisteme enačb, tj. modele, definiramo vmesne izpise, opcije, itd. Z rešitvenimi stavki pa definiramo vrsto optimizacijske metode in smer optimiranja, v našem primeru torej zvezno nelinearno programiranje in minimiziranje spremenljivke namenske funkcije: prereza, teže ali cene konstrukcije zapornice.

Ob zagonu računalniški posrednik GAMS najprej spozna vse simbole pod katerimi smo v vhodnih podatkih modela GATOP prijavili in definirali zaporedja, konstante, spremenljivke ter prijavili enačbe. Zatem prepozna definirane enačbe, jih prevede in z modelnimi stavki razvrsti v sistem enačb pogojnih funkcij, tako da skupaj z enačbo namenske funkcije definira matematični optimizacijski model konstrukcije zapornice. GAMS z vstavljenimi rešitvenimi

stavki določi smer definiranega nelinearnega optimiranja, tj. minimiziranje, nakar posreduje dobljeni definirani matematični optimizacijski model GATOP optimizacijskemu programu MINOS v razrešitev. Na koncu, zatem ko program MINOS doseže optimum, posrednik GAMS še posreduje izpis modela GATOP (če želimo), potek izračuna in vse rezultate.

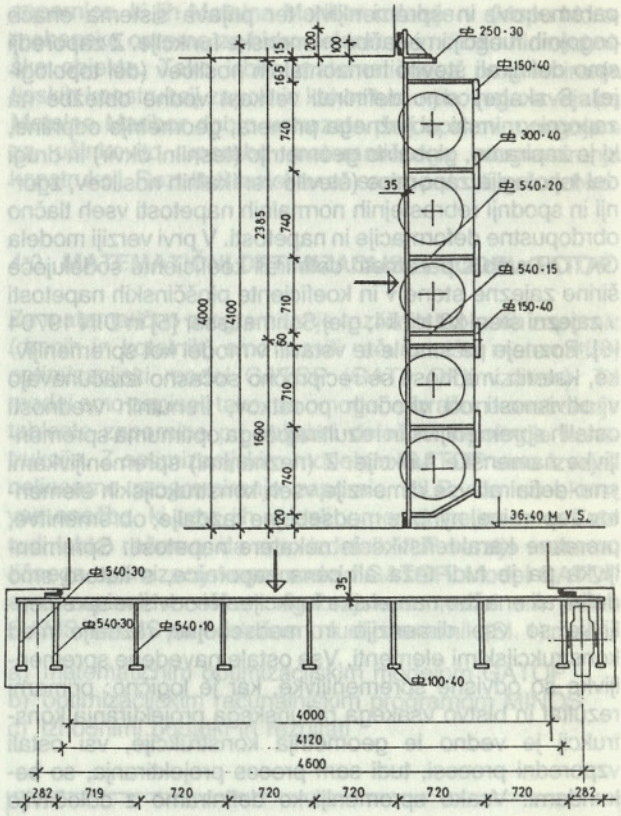
5.0. PRIMERJALNA RAZISKAVA IN PRAKTIČNI PRIMER

Z namenom, da bi dokazali prednost matematičnega programiranja pred klasično metodo projektiranja mehanskih konstrukcij, smo izvršili precej obsežno primerjalno raziskavo. Raziskavo smo konkretno izvršili na primeru računskega projektiranja konstrukcij tablastih zapornic. Učinkovitost metode matematičnega programiranja konstrukcij in s tem tudi konkretnega matematičnega optimizacijskega modela GATOP smo testirali tako, da smo izvršili primerjalno matematično programiranje konstrukcij že izdelanih in montiranih zapornic, dobljene rezultate pa primerjali z obstoječim stanjem. Dobljena razlika med rezultatom, npr. ceno konstrukcije, ki smo jo izračunali z matematičnim programiranjem in dejansko ceno obstoječe konstrukcije zapornice, pomeni možen prihranek finančnih sredstev, če bi obstoječo zapornico projektirali z metodo matematičnega programiranja. Raziskava je pokazala, da bi z uporabo metode matematičnega programiranja prihranili tudi do 40 % investicijskih sredstev pri izgradnji zapornic.

5.1. Matematično programiranje kotalne tablaste zapornice Reservoir Bottom Outlet Gate, HE Blanda, Islandija

Prikazati želimo praktični primer, pri katerem smo dosegli enega od boljših rezultatov primerjalne raziskave: matematično programiranje že izdelane in vgrajene konstrukcije tablaste zapornice Reservoir Bottom Outlet Gate temeljnega izpusta vodne akumulacije HE Blanda v Islandiji (sl. 2). Konstrukcija izdelane zapornice je bila projektirana s klasično metodo [10]. Glavni podatki so bili definirani s pogodbenim dokumentom Contract Documents 9535-Gates, Hydroelectric Project Blanda, Iceland:

– odločujoča hidrostatična obtežba $p = 364.00\ kN/m^2$,
I. obtežni primer
– svetla višina odprtine HS = 4,00 m
– svetla širina odprtine LS = 4,00 m
– tesnilna višina zapornice HT = 4,10 m
– tesnilna širina zapornice LT = 4,12 m
– nosilna širina zapornice LN = 4,60 m
– dopustne napetosti za material zapornice St 44-2:
– $\sigma_y = 26{,}00\ kN/cm^2$
– $\sigma_u = 42{,}00\ kN/cm^2$
– $\sigma_{all} = 15{,}60\ kN/cm^2$
– $\tau_{all} = 10{,}40\ kN/cm^2$
– $\sigma_r = 19{,}50\ kN/cm^2$
– dopustna največja deformacija zapornice d = 0,50 cm
– najmanjša debelina vgrajene pločevine $\delta = 1{,}00$ cm



Slika 2: **Kotalna tablasta zapornica Reservoir Bottom Outlet Gate HE Blanda, Islandija (vertikalni in horizontalni prerez)**

5.2. Rezultati praktičnega primera kotalne zapornice HE Blanda

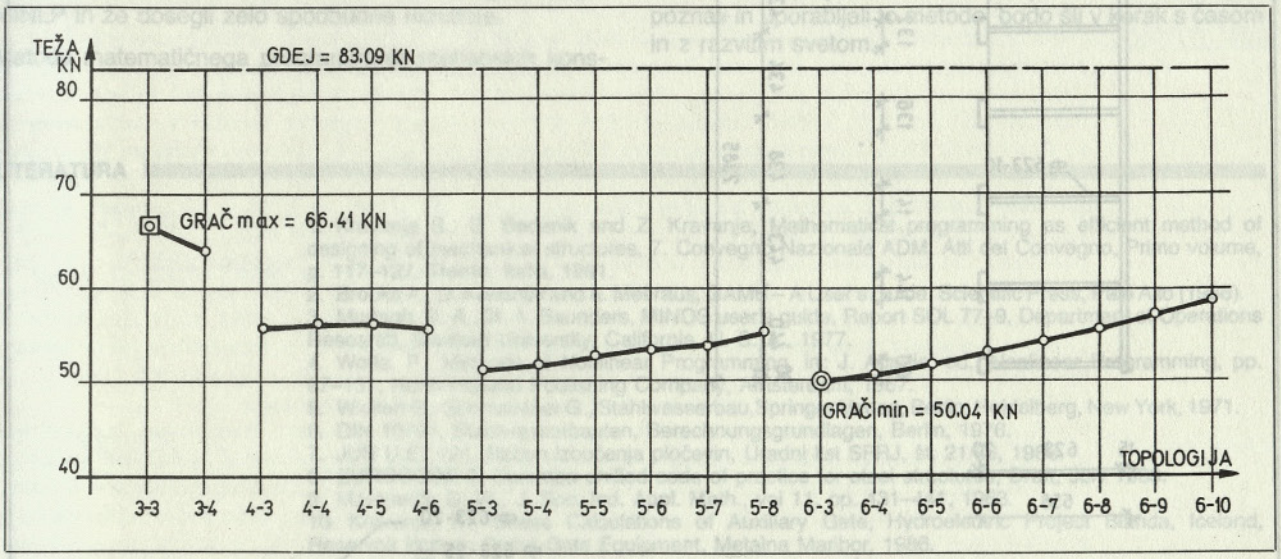
Za članek smo pripravili rezultate primera matematičnega programiranja kotalne tablaste zapornice HE Blanda, ki smo jih ovrednotili pri minimiziranju spremenljivke TEŽE konstrukcije ZGORNJEGA ELEMENTA zapornice. Sam računski proces smo izvajali v dveh zaporednih hierarhičnih fazah. V prvi fazi smo izračunali teoretični optimum teže konstrukcije zapornice s tem, da smo dopustili izračun teoretičnih vrednosti zveznih spremenljivk dimenzij konstrukcijskih elementov (vrednosti izračunanih debelin pločevin so lahko bila poljubna realna števila znotraj definiranih zgornjih in spodnjih mej). V drugi fazi smo izračunali realni optimum teže konstrukcije zapornice, ki smo ga dosegli z variiranjem privzetih realnih vrednosti standardnih debelin pločevin. V računu smo vsako debelino pločevine definirali z možnostjo optimalnega izbora določenega števila realnih vrednosti standardnih debelin pločevin, in sicer tistih, katerih standardne vrednosti so se nahajale v bližini izračunanih teoretičnih zveznih vrednosti debelin pločevin iz predhodne prve faze. Čeprav smo ugotovili, da so na splošno dobljene vrednosti realnega optimuma nekoliko slabše od vrednosti teoretičnega optimuma, je bila njihova razlika v primeru HE Blanda skoraj zanemarljiva.

Ker je tukaj uporabljena metoda NLP primerna samo za

izračun konstrukcijskih parametrov (dimenzij, razponov...) pri nespremenljivi topologiji konstrukcije (pri nespremenljivem številu nosilcev in ploščinskih elementov), smo izvajali račun za vsako različno topologijo konstrukcije zgornjega elementa zapornice posebej (sl. 3).

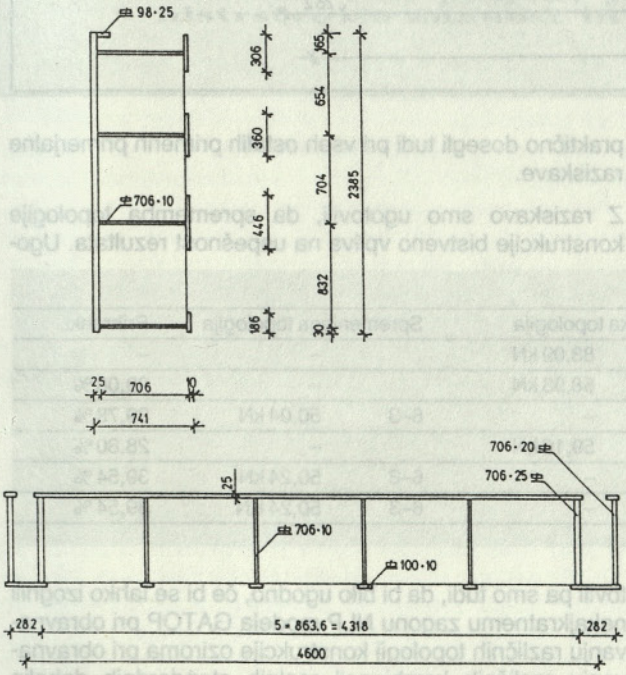
miranjem dobili rezultat 59,16 kN (Sl. 4) oziroma 28,80 % prihranka glede na dejansko težo konstrukcije zgornjega elementa izdelane zapornice: 83,09 kN.

Programiranje smo izvršili za vse možne variantne topologije konstrukcije zgornjega elementa zapornice, od topologije 3-3 (3 horizontalni in 3 vertikalni nosilci) do topologije 6-10 (6 horizontalnih in 10 vertikalnih nosilcev). Tako smo pri spreminjanju topologije dosegli najboljši realni rezultat, tj. realni optimum teže, pri topologiji konstrukcije 6-3 (6 horizontalnih in 3 vertikalni nosilci): 50,24 kN oziroma 39,54 % prihranka teže (sl. 5). Zadnji rezultat je optimum konstrukcije zgornjega elementa zapornice Reservoir Bottom Outlet Gate, HE Blanda, in sicer glede na vhodne podatke, privzeto metodo analize in dimenzioniranja ter težo konstrukcije kot definirano spremenljivko namenske funkcije. Ob solidnem poznavanju metode nelinearnega programiranja je mogoče ta rezultat doseči v času 10 minut (na VAX 8800).



Slika 3: **Vrednosti teoretičnih optimumov teže konstrukcije pri spreminjanju topologije konstrukcije zgornjega elementa zapornice**

Pri dejanski topologiji konstrukcije 4-6 (4 horizontalnih, 6 vertikalnih nosilcev in pripadajočem številu ploščinskih elementov), tj. tisti topologiji, s katero je zasnovan zgornji element izdelane zapornice, smo z matematičnem progra-



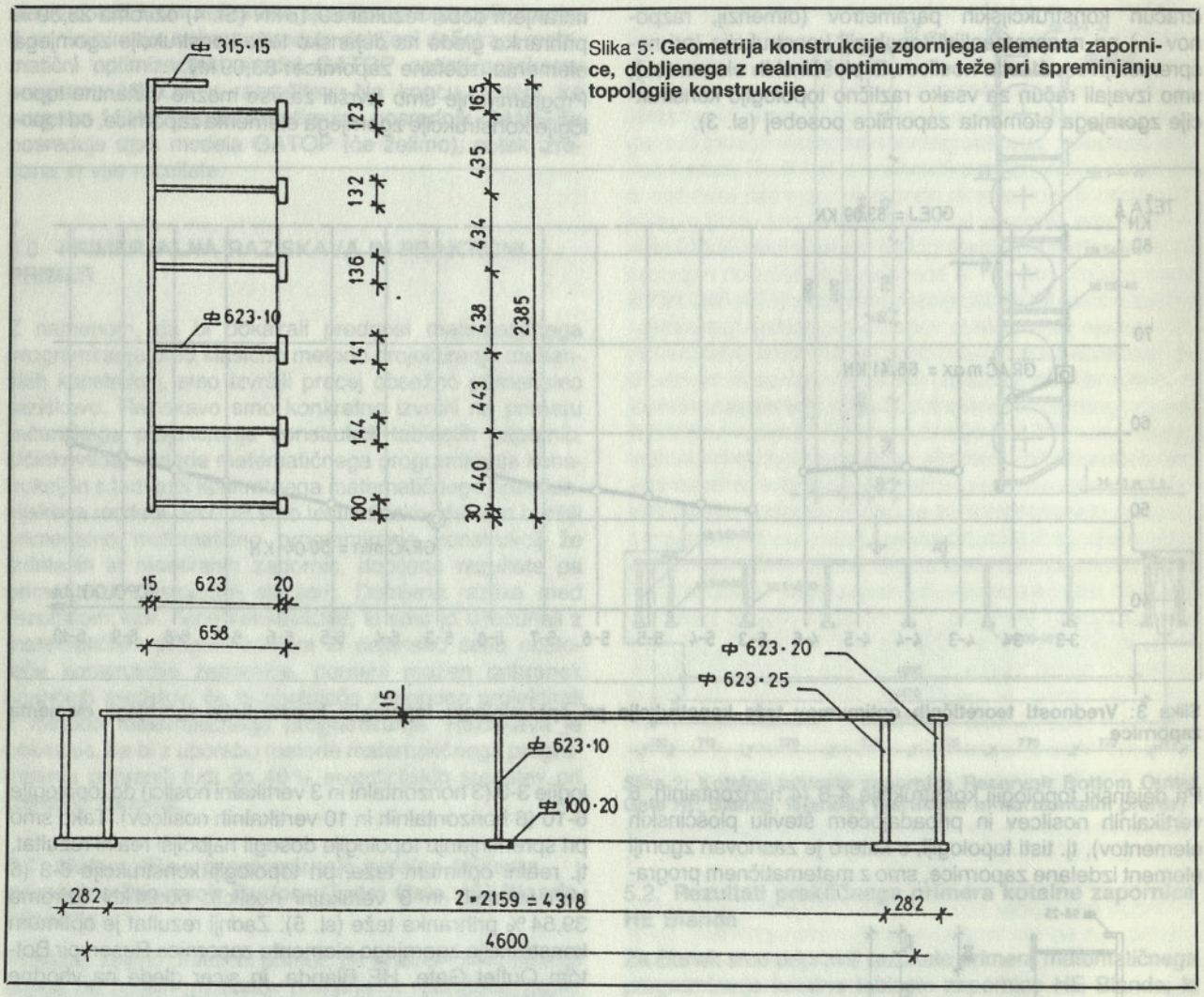
Slika 4: **Geometrija konstrukcije zgornjega elementa zapornice dobljenega z realnim optimumom teže pri dejanski (obstoječi) topologiji konstrukcije**

OBVESTILO:

Obveščamo vse naročnike Gradbenega vestnika, da je izvršni odbor ZDGITS na svoji zadnji seji sprejel sklep, da je potrebno naročnino za Gradbeni vestnik letnik 1992 poravnati najkasneje do konca meseca decembra.

Prosimo vse naročnike, ki do danes niso poravnali te obveznosti, da to storijo v najkrajšem času pri svojem matičnem društvu ali na žiro račun Zveze št. 50101-678-47602.

UREDNIŠTVO



Slika 5: **Geometrija konstrukcije zgornjega elementa zapornice, dobljenega z realnim optimumom teže pri spreminjanju topologije konstrukcije**

Na koncu še tabelarično prikazujemo rezultate (tab. 1), tj. teoretične in realne optimume teže konstrukcije zgornjega elementa zapornice pri dejanski in spremenjeni topologiji konstrukcije ter njihove možne prihranke teže.

Tabela 1: **Izvrednoteni optimumi teže konstrukcije zapornice in prihranki**

Teža konstrukcije	Dejanska topologija		Spremenjena topologija		Prihranki
dejanska teža	4–6	83,09 kN		–	–
teoretični optimum	4–6	58,93 kN		–	29,08 %
		–	6–3	50,04 kN	39,78 %
realni optimum	4–6	59,16 kN		–	28,80 %
		–	6–3	50,24 kN	39,54 %
optimum konstrukcije		–	6–3	50,24 KN	39,54 %

6.0. SKLEP

Z dobljenimi rezultati prej opisanega praktičnega primera HE Blanda smo dokazali bistveno prednost metode matematičnega programiranja pred klasično metodo projektiranja konstrukcij v mehaniki. Tako ugodne rezultate pa smo praktično dosegli tudi pri vseh ostalih primerih primerjalne raziskave.

Z raziskavo smo ugotovili, da sprememba topologije konstrukcije bistveno vpliva na uspešnost rezultata. Ugotovili pa smo tudi, da bi bilo ugodno, če bi se lahko izognili nekajkratnemu zagonu NLP modela GATOP pri obravnavanju različnih topologij konstrukcije oziroma pri obravnavanju različnih kombinacij realnih standardnih debelin pločevin konstrukcijskih elementov. Zaradi tega smo se namenili izdelati takšno metodo matematičnega programi-

ranja, s katero bomo v enovitem računskem procesu sočasno poleg optimalnih dimenzij in razponov lahko določili tudi optimalno število elementov konstrukcije, tj. optimalno topologijo konstrukcije. Za ta namen smo priredili matematični optimizacijski model GATOP za avtomatsko mešanocelоštevilsko nelinearno programiranje, MINLP in že dosegli zelo spodbudne rezultate.

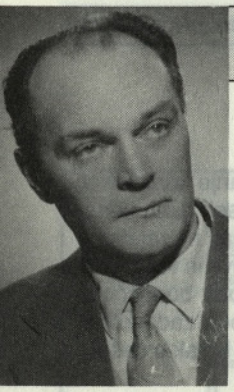
Metoda matematičnega programiranja mehanskih konstrukcij seveda ni primerna samo za reševanje konstrukcij v hidrotehniki, temveč tudi za reševanje vseh tistih konstrukcij v mehaniki, ki jih je mogoče izračunati na relativno enostaven analitični način (zvezne, odvedljive in večinoma konveksne funkcije). To je projektna metoda bodočnosti in samo tisti projektanti konstruktorji, ki bodo zadovoljivo poznali in uporabljali to metodo, bodo šli v korak s časom in z razvitim svetom.

LITERATURA

1. Kravanja S., B. Bedenik and Z. Kravanja, Mathematical programming as efficient method of designing of mechanical structures, 7. Convegno Nazionale ADM, Atti del Convegno, Primo volume, p. 117–127, Trento, Italia, 1991.
2. Brooke A., D. Kendrick and A. Meeraus, GAMS – A User's Guide. Scientific Press, Palo Alto (1988).
3. Murtagh, B. A., M. A. Saunders, MINOS user's guide, Report SOL 77–9, Department of Operations Research, Stanford University, California, U. S. A., 1977.
4. Wolfe, P., Methods of Nonlinear Programming, in: J. Abadie, ed., Nonlinear Programming, pp. 97–131, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1967.
5. Wickert G., Schmausser G., Stahlwasserbau,Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1971.
6. DIN 19704, Stahlwasserbauten, Berechnungsgrundlagen, Berlin, 1976.
7. JUS U.E7.121, Račun izbočenja pločevin, Uradni list SFRJ, št. 21/86, 1986.
8. EUROCODE 3, Common unified code of practice for steel structures, Draft, July 1983.
9. Marquardt, D. W., J. Soc. Ind. Appl. Math., vol 11, pp. 431–441, 1963.
10. Kravanja, S., Stress Calculations of Auxiliary Gate, Hydroelectric Project Blanda, Iceland, Reservoir Bottom Outlet Gate Equipment, Metalna Maribor, 1986.

ZAHVALA

Raziskovalni projekt je finančno podprlo Ministrstvo za znanost in tehnologijo.



IN MEMORIAM

DANIJEL SMREKAR, dipl. inž.

Sredi avgusta smo se za vselej poslovili od našega tovariša v delu in prijatelja Daneta. Vrhunskemu statiku in konstrukterju v času nekaj desetletij po zadnji vojni posvečamo tele spominske besede:
Rodil se je 21. 7. 1915. leta v Mokronogu v obrtniški rodbini; oče Dolenjec, mati Kraševka, torej res pravi Slovenec. Osnovno šolo je končal leta 1926, klasično gimnazijo leta 1934, oboje v Mariboru, kamor sta se starša priselila. Univerzitetni študij je končal v Ljubljani med drugo svetovno vojno leta 1943. Vse z odličnim uspehom. Mladosti ni imel rožnate, saj se je že v srednji šoli moral sam preživljati z inštrukcijami, prav tako tudi med študijem na univerzi. Že kot študent, še bolj pa kot absolvent, je poleg inštrukcij opravljal posamezne statično-konstruktivne naloge in tako poskrbel za ugled svojih naročnikov inženirjev, katerih znanje je hitro presegel. Konec vojne je dočakal v službi podjetja E. Colombo v Trstu, v operativnem delu kot šef gradbišča. Po vojni je bil najprej v službi na Ministrstvu za gradnje v Ljubljani, nekaj časa tudi kot inšpektor delovodskih gradbenih šol. Stalno je bil nameščen leta 1946 kot statik-konstrukter pri Projektivnem podjetju Ministrstva za gradnje v Ljubljani, ki se je kmalu preimenovalo v Slovenija-projekt. V tej službi je bil vseskozi glavni statik, l. 1952 si je pridobil pooblastilo za samostojno odgovorno inženirsko delo, od l. 1957 je bil šef statičnega biroja, od l. 1960 je imel naslov »svetnik«. Iz dobe po l. 1947 izvirajo njegova največja konstruktivna dela, predvsem pri izgradnji naše industrije. Po tridesetih letih ustvarjalnega dela se ga je lotila trdovratna bolezen, ki mu je polagoma, toda neizprosno jemala moči in omejevala delavnost. V letu 1976 je bil invalidsko upokojen, vendar je še nadalje občasno sodeloval pri statičnem biroju Slovenija-projekta. Dne 10. 8. 1992 ga je smrt rešila trpljenja, saj je bil zadnje leto vezan na dom in posteljo.
Naš kolega Dane je odlično obvladal svetovne jezike: angleščino, nemščino, francoščino, italijanščino in ruščino. Pri svojem odličnem znanju višje matematike in teorije elastičnosti je študiral svetovno literaturo stroke in na tej podlagi uvajal nove, gospodarske in lepe tipe konstrukcij v ojačenem betonu, predvsem več vrst lupinskih konstrukcij. Njegov trud je razviden iz velikega števila dvoranskih objektov v naši domovini: v Ljubljani tri litostrojske dvorane raznih vrst konstrukcij, tovarna močnih krmil, pržanjska elektronika, v Kranju objekti tovarne gum in Tekstilindus, na Jesenicah hladna valjarna in predelovalni obrati, v Strnišču (Kidričevem) livarna, v Slovenski Bistrici Impol, v Štorah jeklarna, kotlarna, skladišča, v Mariboru hala za TAM, v Begunjah Elanove dvorane, v Kopru Tomos, v Straži na Dolenjskem Novoles, in še druge. Pri manjših razponih (do 16 m) je sprva izbiral glavne okvirne nosilce z močno ojačenimi prerezi proti vozlišču in prefinjenimi profili tako v sredini razpona kot proti ležiščem stebrov: gospodarna in lepa rešitev. Pri večjih razponih je izbiral montažna paličja iz ojačenega betona, pri čemer je s pridom izkoriščal masivne žerjavne proge za montažne namene. Razume se, da je bila tudi detajlna konstrukcija legic in strešnih krovnih elementov prefabricirana. Oblika paličij ustreza ponekod klasični obliki z ravno kritino, ponekod pa ločni obliki z vezjo. Okrog leta 1950 je bil prvi, ki se je lotil preračunavanja in konstruiranja lupinskih dvoranskih zgradb. ljubljansko sejmišče krije kupolna lupina na kvadratnem tlorisu izmere 42 × 42 m. Na litostrojskih predelovalnih obratih je prvič v Sloveniji izvedena šedna polkrožna lupina z razmiki stebrov 8 × 12 m. Naslednja večja lupina krije koprski Tomos v razponih 10 × 22 m. Tudi ljubljanskim peronskim streham v obliki Aimondovih konoidnih lupin je botroval naš Dane kot prijatelj svojega kolega železničarja inž. Stepišnika. Kolega Dane si je tudi na računalnik sprogramiral membransko reševanje kupolastih Pucherjevih lupin in nam na željo priskočil na pomoč s svojo analizo. Posebno zanimivost predstavlja strešna konstrukcija dela litostrojske obdelovalnice, pri kateri je žerjavna proga, ki poteka po sredini dvorane, obešena na trikotno krovno vešalno konstrukcijo. Ta se vidi od daleč, saj štrli precej visoko nad strešno kritino. Projektiral je tudi zelo veliko raznovrstnih drugih industrijskih konstrukcij: njegove vsebinske zgradbe silosov in bunkerjev zasledimo v kranjski Savi, v begunjskem Elanu, v tovarni glinice v Kidričevem, v Anhovem za cement in klinker. Znane so vinske kleti v Metliki in v Dobrovem (v Brdih). Konstrukcije za zaščito rotacijskih peči v Anhovem, v Idriji, in klasičnih peči v Štorah in na Jesenicah so njegovo delo. Med večje industrijske objekte spada tudi Nuklearni Institut Jožef Štefan v Podgorici (pri Ljubljani), skladišče hmelja v Žalcu, klavnice v Ljubljani in v Tolminu. Skeletov za visoke gradnje še nismo omenili. Med največjimi so objekt Radiotelevizije v Ljubljani, novi klinični center v Ljubljani, poslovni center Bežigrad. To je le grob oris največjih del, nešteto pa je še drugih industrijskih in visokih gradenj, za katere nam ni uspelo dobiti podatkov in na tem mestu niso zajete. Arhitektonska znamenitost je njegov nadvse vitek in prožen 20 m visok razgledni stolp v Dobrovem v Brdih.
Kolega Danijel Smrekar je bil skromen in tih. Rezultatov svojega študija ni objavljal, prav tako ne poročil o realizacijah projektiranih del, katerih logika zasnove in mojstrsko dimenzioniranje ne predstavlja le gospodarnostni prispevek, ampak vsebuje tudi estetske vrednote. Mlajši kolegi niso izkoristili njegove kapacitete niti niso pripravili kake objave njegovih izsledkov in izkušenj. Tako nam ostane kot nema priča njegovega življenjskega truda obilica uspelih gradbenih konstrukcij in spomin na prijetno prijateljsko sodelovanje.

Svetko Lapajne

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ARHITEKTURO, GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO
61001 Ljubljana, Jamova 2, p. p. 579

GV XXXXI • 9-10 POROČILA 26

NUMERIČNA ANALIZA UČINKA ARMIRANJA TEMELJNIH TAL POD CESTNIMI NASIPI

UDK 519.61/64:624.13

JANKO LOGAR, BOJAN MAJES

POVZETEK

Na FAGG Univerze v Ljubljani smo več let razvijali numerične postopke za analizo konsolidacije nelinearnih viskoznih zemljin. V zadnjem času smo splošne rešitve, ki temeljijo na metodi končnih elementov, dopolnili in izdelali program, ki omogoča tudi analizo armiranih temeljnih tal. Program smo uporabili za analizo vpliva nekaterih parametrov zemljine, armature in obtežbe na posedke in varnost cestnih nasipov.

NUMERICAL PROCEDURES FOR THE CONSOLIDATION ANALYSIS OF REINFORCED FOUNDATION SOILS UNDER ROAD EMBANKMENTS

SUMMARY

During the last decade at the University in Ljubljana numerical procedures for the consolidation analysis of nonlinear viscous soils have been developed. Basic solutions based on finite element method have recently been improved and a new computer program has been elaborated for the consolidation analysis of reinforced foundation soils. This program has been applied for the analyses of the influence of some parameters of soil, reinforcement and load on settlements and safety of road embankments.

UVOD

Armiranje zemljin se je v preprostih oblikah pojavilo že v starih civilizacijah. Osnove tedanje tehnologije so opisane celo v Bibliji. V sodobno gradbeništvo ga je vnesel francoski gradbenik Vidal v šestdesetih letih in tudi uvedel termin »armirana zemljina.«

Avtorja:
Janko Logar, mag., dipl. gradb. inž., stažist raziskovalec
Bojan Majes, dr., dipl. gradb. inž., univerzitetni docent

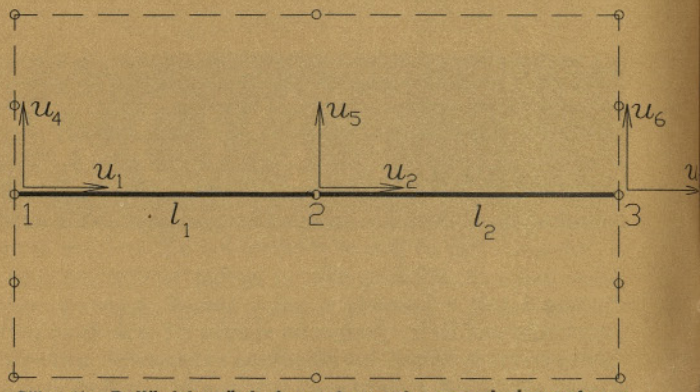
V Sloveniji smo začeli armirano zemljino uporabljati v poznih sedemdesetih letih kot obliko podpornih konstrukcij. Pri gradnji avtoceste Vrhnika–Ljubljana je bil uporabljen geotekstil med temeljnimi tlemi in gramoznim povoznim slojem, da je bil omogočen pristop mehanizacije do gradbišča.

Danes poznamo vrsto materialov, ki jih je mogoče uporabiti za ojačitev temeljnih tal pod temelji zgradb oziroma cestnimi in železniškimi nasipi. Razvoj programske opreme za analizo konsolidacije nelinearnih viskoznih zemljin na ljubljanski univerzi danes omogoča tudi analizo ojačenih tal. Pregled raziskav s tega področja in uporabljeni reološki model za zemljine sta bila v Gradbenem

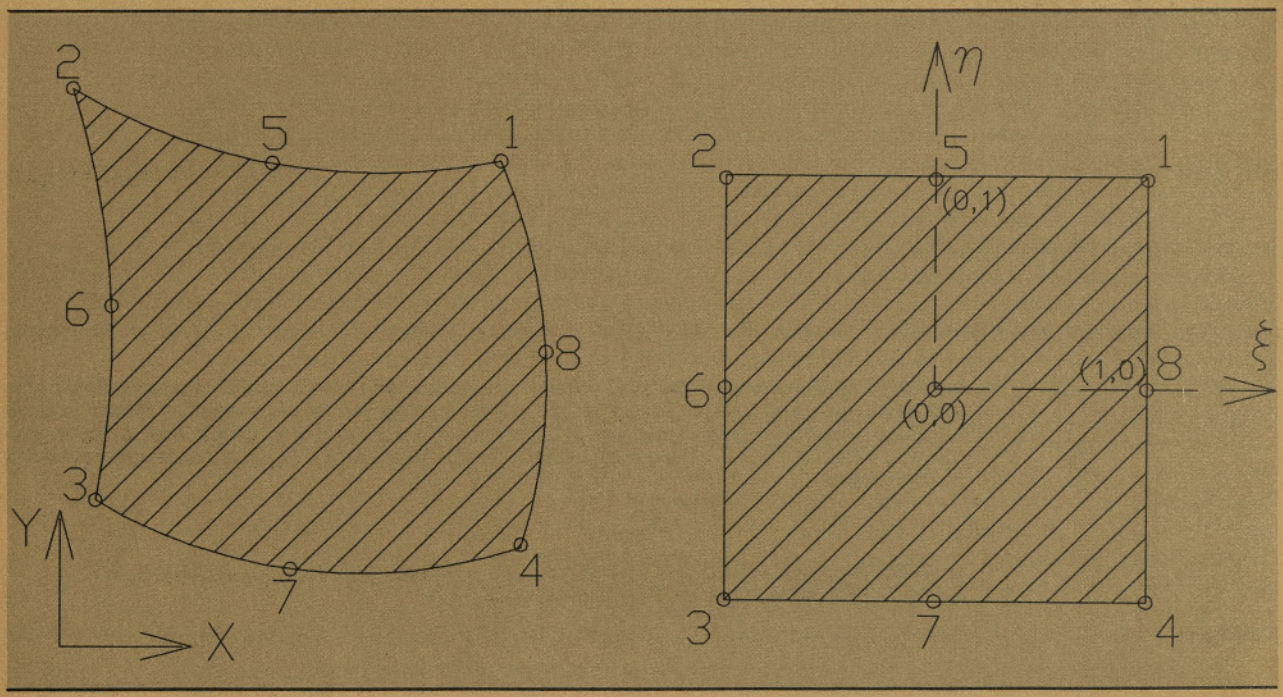
vestniku že objavljena [4], [5], v tem članku pa želimo na kratko pojasniti uporabo paličnega elementa za simulacijo ojačitve temeljnih tal ter prikazati rezultate izvedenih numeričnih analiz.

PALIČNI ELEMENT KOT ELEMENT OJAČITVE TEMELJNIH TAL

V numerični analizi konsolidacije armiranih tal smo uporabili za ponazoritev zemljine osemvozliščni izoparametrični končni element (slika 1a). Zaradi kompatibilnosti z elementom zemljine je formalno en palični končni element sestavljen iz dveh delov (slika 1b). Za palični element armature veljajo naslednje predpostavke:



Slika 1b. **Palični končni element armature med elementoma zemljine**



Slika 1a. **Izoparametrični končni element zemljine**

a) prerez elementa je konstanten: $dV = Adx$
b) material je linearno elastičen: $\sigma = E\varepsilon$
c) interpolacija pomikov vzdolž elementa je linearna:

$$u = < (1 - x/L), (x/L) > \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{Bmatrix} \tag{1}$$

d) upoštevana je geometrijska nelinearnost s predpostavko:

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_1 \tag{2}$$

$$\epsilon_0 = \frac{N}{EA} \tag{2a}$$

$$\epsilon_1 = \frac{du_x}{dx} + \frac{1}{2}\left(\frac{du_y}{dx}\right)^2 \tag{2b}$$

Enačbo paličnega elementa določimo s pomočjo izreka o minimumu potencialne energije, ki pove, da je razlika variacij deformacijskega dela in dela zunanjih sil nična:

$$\delta\mathcal{D} - \delta\mathcal{W} = 0 \tag{3}$$

kjer je deformacijsko telo:

$$\mathcal{D} = \int_V \left(\int_{\epsilon_0}^{\epsilon_0+\epsilon_1} \sigma \, d\epsilon \right) dV \tag{4}$$

delo zunanjih sil pa opravljajo vozliščne sile:

$$\mathcal{W} = \{P\}^T \{U\} \tag{5}$$

Enačbo (4) integriramo, upoštevamo naštete predpostavke ter zanemarimo tretje in višje potence odvodov pomikov. Izvedemo variiranje, ki ga nakazuje enačba (3),

in kot rezultat dobimo enačbo paličnega elementa:

$$([K_e]+[K_g])\{U\}=\{N\}-\{P\} \qquad (6)$$

V njej pomeni:

$[K_e]$ ... elastični del togostne matrike
$[K_g]$ ... geometrijski del togostne matrike
$\{U\}$ ... vektor vozliščnih pomikov
$\{N\}$ ... vektor notranjih sil
$\{P\}$ ... vektor zunanjih sil

Enačba končnega elementa zemljine združuje dve matrični enačbi (difuzijsko in ravnovesno) s skupnimi neznankami: vozliščnimi premiki in presežnimi pornimi tlaki. Izpeljava te sovprežne enačbe je prikazana npr. v magistrski nalogi [2].

$$\begin{bmatrix} [K]_i & -[L]_i^T \\ -[L]_i & -\Delta t_i/2\,[M]_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta U\}_i \\ \{\Delta \Pi\}_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\Delta P\}_i \\ \Delta t_i\,[M]_i\,\{\Pi\}_{i-1} \end{Bmatrix} \qquad (7)$$

Oznake pomenijo:

$[K]_i$ ... simetrična togostna matrika, odvisna od geometrije elementa in deformabilnosti zemljine
$[L]_i$ ... matrika, odvisna od geometrije elementa
$[M]_i$ ... simetrična matrika, odvisna od geometrije elementa in od prepustnosti zemljine
$\{\Delta U\}_i$ ... vektor prirastkov vozliščnih pomikov
$\{\Delta \Pi\}_i$ ... vektor prirastkov presežnih pornih tlakov
$\{\Delta P\}_i$ ... vektor prirastkov zunanje obtežbe
$\{\Pi\}_{i-1}$ ... vektor presežnih pornih tlakov ob koncu prejšnjega časovnega intervala
Δt_i ... dolžina časovnega intervala

Enačbe posameznih paličnih elementov seštejemo skupaj z enačbami posameznih elementov zemljine v skupni sistem nelinearnih enačb, katerih rešitve so pomiki mreže končnih elementov ter prirastki vozliščnih presežnih pornih tlakov.

Iterativno reševanje tega sistema enačb v posameznih korakih naraščanja obtežbe s časom pomeni numerično analizo procesa konsolidacije armiranih tal.

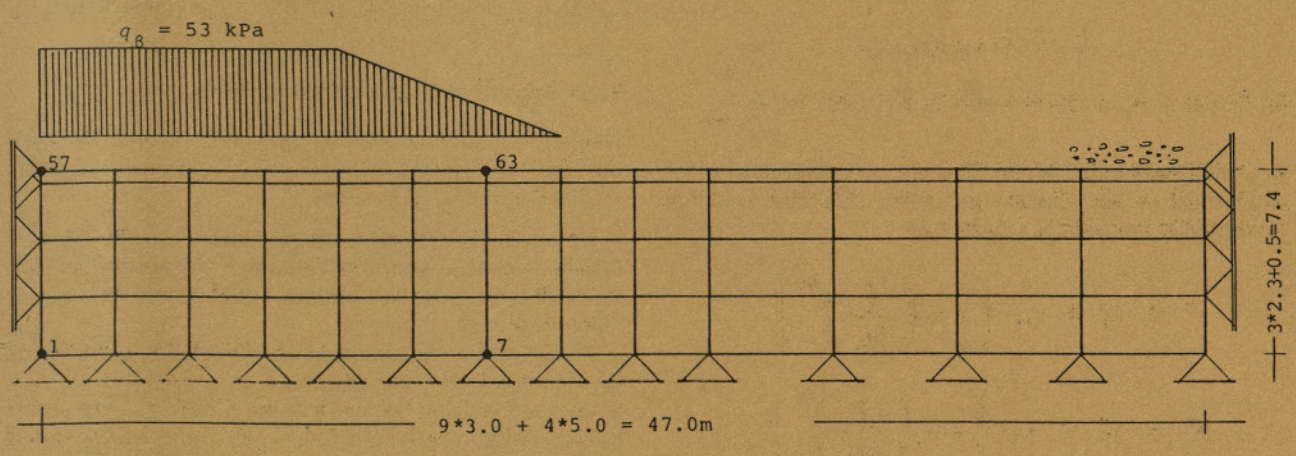
VPLIV NEKATERIH PARAMETROV ZEMLJINE, ARMATURE TER OBTEŽBE NA UČINKOVITOST ARMIRANJA TAL

Z računalniškim programom KARTA (Konsolidacija ARmiranih TAl) smo izvedli večje število računskih analiz, s katerimi smo želeli prikazati vpliv armature na konsolidacijo temeljnih tal pri različnih karakteristikah za prepustnost, deformabilnost, viskoznost in hitrost predhodne sekundarne konsolidacije pri različni togosti in količini armature ter pri različno hitri gradnji nasipa.

Analize smo izvajali z mrežo štirikotnih elementov, prikazano na sliki 2. S slike 3 je razvidna tudi razporeditev armature pod nasipom. Temeljna tla predstavlja 7.4 m debel sloj barjanske polžarice MH. Alternativno smo analizirali tudi sloj gline CI manjše deformabilnosti. Karakteristike obeh zemljin so zbrane v preglednici I.

Obtežba naraste do končne vrednosti 53 kPa v 6 bremenskih stopnjah po 3 letih in 8 mesecih. Zaradi simetrije obravnavamo samo polovico profila.

Togost armaturnih mrež $\varkappa = EA/l = 200$ kN/m smo povzeli po prospektu tovarne Analit Osijek za njihovo najmočnejšo mrežo. Alternativno smo računali z železno armaturo togosti $\varkappa = 105.000$ kN/m.



Slika 2. **Mreža končnih elementov v numeričnih analizah**

Preglednica I

Količina	MH	CI	Količina	MH	CI
prepustnost			**viskoznost**		
e_{in}	2.92	0.78	a_1	0.00129	0.00041
k_1	$2.383 \cdot 10^{-11}$ m/s	$1.449 \cdot 10^{-12}$ m/s	b_1	0.0	0.0
k_2	1.55	4.60	$t_{0\varepsilon}$	10^6s	10^6s
deformabilnost			m	–0.002	–0.002
a	100 kPa	1400 kPa	f_1	0.00283	0.001149
b	8.0	17.5	g_1	0.000014	0.0
f	5.275	12.46	h_1	0.0	0.0
c'	3.0 kPa	10.0 kPa	$t_{0\gamma}$	10^6s	10^6s
φ'	23°	26°	n	–0.002	–0.002

Oznake snovnih konstant iz preglednice pojasnjujemo z osnovnimi enačbami, v katerih nastopajo (podrobneje glej članek [5]).

S parametri deformabilnosti izrazimo kompresijski in strižni modul v odvisnosti od oktaederskih napetosti:

$$K_0 = a + b\,\sigma^{o\prime}$$

$$G_0 = f\,(\,\tau_f^o - \tau^o\,)$$

$$\tau_f^o = 2\sqrt{2}\cos\varphi' \,\frac{c' - \sigma^{o\prime}\tan\varphi'}{3 - \sin\varphi'}$$

oziroma primerjalne vrednosti oktaedrskih deformacij:

$$\epsilon_0^o = \frac{1}{3\,b}\,\ln\,(\,1 + \frac{b}{a}\,\sigma^{o\prime}\,)$$

$$\gamma_0^o = \frac{1}{f}\,\ln\,\frac{\tau_f^o}{\tau_f^o - \tau^o}$$

Vodoprepustnost izrazimo z enačbo:

$$k = k_1 \exp(\,k_2 \cdot e\,)$$

pri čemer je e_{in} začetna vrednost količnika por e.

Z viskoznostnimi parametri izrazimo prirastke oktaedrskih deformacij zaradi viskoznega lezenja. Celotna vrednost oktaedrskih deformacij v času t je:

$$\epsilon^o = \epsilon_0^o + \epsilon_K \left[\,1 - \left(\frac{t}{t_{0\epsilon}}\right)^m\right]$$

$$\gamma^o = \gamma_0^o + \gamma_K \left[\,1 - \left(\frac{t}{t_{0\gamma}}\right)^n\right]$$

Časa $t_{0\varepsilon}$ in $t_{0\gamma}$ sta tista, katerima ustrezata oktaedrski deformaciji ε_0^o in γ_0^o. Viskozna prirastka deformacij ε_K in γ_K pa sta:

$$\epsilon_K = -\frac{1}{m}\,(a_1 + b_1\sigma^{o\prime})$$

$$\gamma_K = -\frac{1}{n}\left(f_1 + g_1\,\sigma^{o\prime} + h_1\frac{\tau^o}{\tau_f^o}\right)$$

V preglednici II je predstavljen seznam računskih primerov z vpisanimi vrednostmi variiranih parametrov viskoznosti (m in n) ter hitrosti predhodne sekundarne konsolidacije ($\dot{\varepsilon}_p^o$ in $\dot{\gamma}_p^o$). Vsak od navedenih računskih primerov je računan za vse variante razporeditve armature (slika 3) ter za primer, ko armatura ni upoštevana.

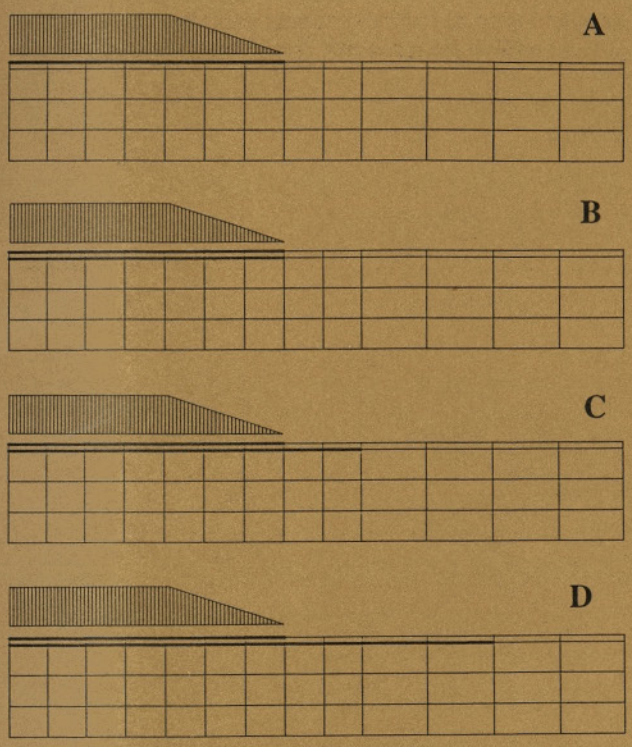
Preglednica II

Primer	Material	$m = n$	$\dot{\varepsilon}^o_p = \dot{\gamma}^o_p$	Posebnost
R1	MH			brez upošt. viskoznosti
R2	MH	–0.002	10^{-9} s^{-1}	
R3	MH	–0.002	10^{-12} s^{-1}	
R4	MH	–0.2	10^{-9} s^{-1}	
R5	MH	–0.2	10^{-12} s^{-1}	
R6	MH	–0.002	10^{-9} s^{-1}	železna armatura
R7	MH	–0.002	10^{-9} s^{-1}	hitrejša gradnja
R8	MH	–0.002	10^{-9} s^{-1}	manjša propustnost
R9	MH	–0.002	10^{-9} s^{-1}	sloj debeline 12.0 m
R10	MH	–0.002	10^{-9} s^{-1}	obtežba 75 kPa
R11	CI	–0.002	10^{-9} s^{-1}	sloj debeline 12.0 m

Vpliv togosti in razporeditve armature

Najprej nas zanima, kakšen vpliv ima ojačitev temeljnih tal pod nasipi glede na njeno razporeditev in kakovost. Računske analize pokažejo:

– da plastična armatura po podatkih podjetja Analit iz Osijeka nekoliko poboljša varnost v temeljnih tleh in le malo zmanjša posedke nasipa v središčnem delu profila (slike 4, 5 in 6),
– da plastična armatura nima zaznavnega vpliva na razvoj presežnih pornih tlakov,
– da ima plastična armatura ugoden vpliv na zmanjšanje bočnih deformacij ter da delno izenači posedke vzdolž prečnega prereza nasipa – zmanjša se maksimalni posedek v osi nasipa in zmanjša se morebitni dvižek zunaj nasipa (slika 6),
– da dosežemo večji učinek, če razporedimo armaturo v več slojih pod nasipom kot ob uporabi manjšega števila



Slika 3. **Lega armature v posameznih računskih primerih**

slojev armature z znatnim presegljajem zunaj območja nasipa (slika 4),
– da ima armatura večje togosti (železna) znaten vpliv tako na velikost kot na razporeditev posedkov in na povečanje varnosti v temeljnih tleh (slika 4),
– da dosežemo največji učinek armature na varnost temeljnih tal ob koncu gradnje nasipa. Z napredujočo konsolidacijo se učinek armature zmanjšuje.

Uporaba kovinske armature je vprašljiva zaradi korozije. Vendar je mogoče armiranje tal zaradi ugotovitve v zadnji točki šteti kot začasen ukrep. Razvoj materialov pa ponuja že tudi umetne snovi velikih togosti.

Vpliv debeline sloja in njegove deformabilnosti

Pri analizi sloja debeline 12.0 m so absolutne vrednosti posedkov ustrezno večje, za učinke armature pa veljajo sklepi prejšnjega razdelka.

Količniki varnosti so za debelejši sloj manjši, učinek armature pa je nekoliko bolj izrazit.

Pri analizi sloja bistveno manj deformabilne in manj prepustne gline Cl debeline 7.4 m ali 12.0 m smo ugotovili, da armatura pri danem nivoju in časovnem naraščanju obtežbe nima pomembnega vpliva. Tudi ponovljeni račun z dvakrat večjo obtežbo 106 kPa ni pokazal izrazitejšega vpliva ojačitve v temeljnih tleh.

Iz sklepov prejšnjega in tega razdelka lahko povzamemo, da je učinek armature tem večji, čim večja je razlika med deformabilnostjo zemljine in armature.

Vpliv prepustnosti

Analize za sloj polžarice MH smo ponovili z znatno nižjo vrednostjo prepustnosti (k_1/100). Bočni premiki so v tem primeru izrazito večji; zato je tudi učinek armature pod nasipom večji.

Vertikalni posedki pod nasipom so vzdolž prečnega profila izrazito neenakomerni in tudi zato je armatura dobrodošla.

Vpliv velikosti in hitrosti naraščanja obtežbe

Hitrejša gradnja nasipa povzroči večje presežne porne tlake v temeljnih tleh pod nasipom. Zato iz izvedenih analiz sledijo enaki sklepi kot iz analize sloja manjše prepustnosti.

Višji nasip povzroči večje deformacije temeljnih tal in posledično manjše varnosti v temeljnih tleh. Armatura ima zato v primeru večje obtežbe pomembnejši vpliv kot pri manjših nivojih obtežbe.

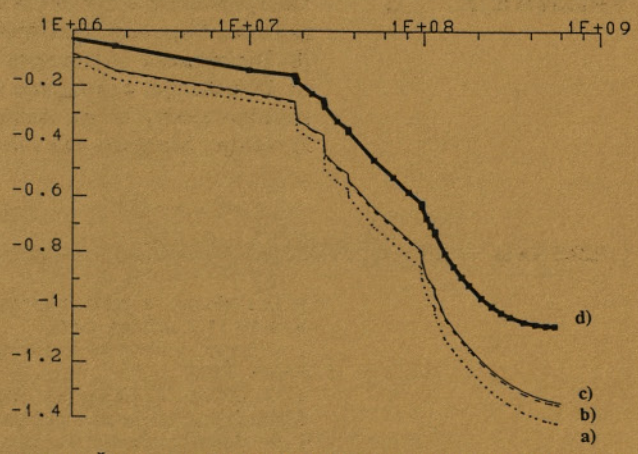
Vpliv viskoznosti in hitrosti predhodne sekundarne konsolidacije

Geološko starost sloja temeljnih tal moremo izraziti s hitrostjo predhodne sekundarne konsolidacije. Če je ta hitrost velika, pomeni, da je sloj geološko mlajši. Analogno majhna hitrost predhodne sekundarne konsolidacije pomeni geološko starejši sloj.

Vpliv hitrosti predhodne sekundarne konsolidacije na razvoj posedkov sta opisala Šuklje in Majes [6]. Pri geološko starejših slojih temeljnih tal pričakujemo manjše končne posedke kot pri mlajših temeljnih tleh pod enako obtežbo. To potrjujejo tudi računi s programom KARTA.

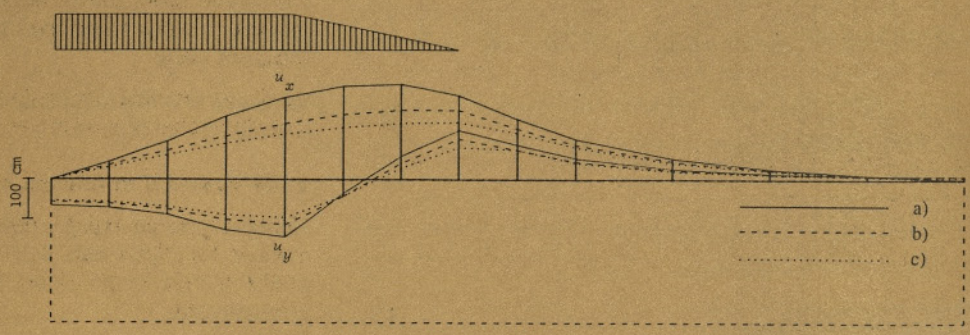
Iz izvedenih analiz lahko sklepamo:

– vpliv hitrosti predhodne sekundarne konsolidacije na učinkovitost armiranja temeljnih tal je majhen, vendar bolj izrazit pri večjih hitrostih predhodne sekundarne konsolidacije,

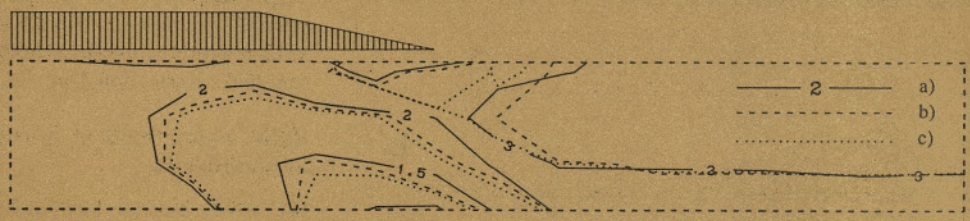


Slika 4. **Časovni potek posedkov v osi nasipa: a) nearmirano (R2), b) armirano z dvema slojema armature (R2), c) armirano z dvema slojema armature in z zmernim presegljajem preko roba nasipa (R2), d) kot c) z upoštevanjem kovinske armature (R6).**

– različna viskoznost temeljne zemljine ne kaže značilnega vpliva na posedke ali varnost pod cestnimi nasipi. armaturo in so tla močno deformabilna. Uporaba armature je priporočljiva pri temeljnih tleh z majhno vodoprepust-



Slika 5. Horizontalni in vertikalni pomiki površja temeljnih tal – računski primer R8: a) nearmirano, b) en sloj armature, c) dva sloja armature



Slika 6. **Izolinije količnika varnosti – računski primer R5: a) nearmirano, b) en sloj armature, c) dva sloja armature**

SKLEP

Izdelali smo računsko orodje, ki omogoča razmeroma cenen in zanesljiv račun obnašanja armiranih temeljnih tal pod obtežbo s cestnimi nasipi.

Na podlagi izvedenih analiz smo preučili vpliv številnih parametrov na učinek armature v temeljnih tleh. Ugotovili smo, da je vpliv armaturnih mrež majhne togosti (plastične mreže) na posedke in varnosti v temeljnih tleh pod cestnimi nasipi majhen. Armatura pod nasipi je torej učinkovita predvsem v primerih, ko uporabimo zelo togo nostjo oziroma pri hitri gradnji nasipov ter pri večjih debelinah slabonosilnega sloja temeljnih tal. Armatura v temeljnih tleh vpliva predvsem na zmanjšanje bočnih deformacij ter na povečanje varnosti v temeljnih tleh. Ugoden je tudi vpliv na zmanjševanje diferenčnih posedkov vzdolž prečnega profila nasipa.

Ker je učinek armiranja temeljnih tal odvisen od mnogih parametrov, mora biti odločitev o uporabi armiranja slabonosilnih tal vselej rezultat skrbne **tehnične in ekonomske** analize.

PRIZNANJE

Delo je nastalo delno kot rezultat skupnega ameriško-jugoslovanskega raziskovalnega projekta Napoved ponašanja mehkih tal pod cestnimi zgradbami, ki sta ga financirala US Department of transportation ter Raziskovalna skupnost Slovenije, vodil pa prof. dr. Lujo Šuklje; dokončano je bilo kot magistrsko delo v okviru projekta 2000 mladih raziskovalcev, ki ga financira Ministrstvo za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Mentorja sta bila dr. Darinka Battelino in dr. Bojan Majes.

LITERATURA

1. D. Battelino: 10 let podpornih konstrukcij iz armirane zemljine v Sloveniji, *Gradbeni vestnik,* XXXIX, št. 9-10-11, Ljubljana 1990.
2. J. Logar: Vpliv armiranja temeljnih tal na posedke in varnost cestnih nasipov, *Magistrska naloga,* FAGG, 1990.
3. B. Majes, J. Logar, D. Battelino: Reinforcement of soft soils under road structures, *Acta Geotechnica,* Univerza v Ljubljani, No. 100, 1–17, Ljubljana, 1989.
4. B. Majes, L. Šuklje: Pregled raziskav vpliva lezenja na konsolidacijo zemljin, *Gradbeni vestnik,* XXXIX, št. 9-10-11, Ljubljana, 1990.
5. B. Majes, J. Logar: Uporaba deformacijskih izotah v analizi konsolidacije tal, *Gradbeni vestnik,* XXXXI, št. 1-2, Ljubljana, 1992.
6. L. Šuklje, B. Majes: Consolidation and creep of soils in plain-strain conditions, *Géotechnique,* Vol. 39, No. 2, 231–250, 1989.

INFORMACIJE 304

ZAVODA ZA RAZISKAVO MATERIALA IN KONSTRUKCIJ V LJUBLJANI

LETNIK XXXIII • 9-10 SEPTEMBER-OKTOBER 1992

VERBET
Lahki izolacijski betoni – Lightweight Insulating Concretes

UDK 691.3

STOJAN RENČELJ, FRANCI CEKLIN

POVZETEK

V članku je predstavljena skupina lahkih betonov **Verbet,** izdelanih iz ekspandiranega vermikulitnega agregata. Zaradi specifičnih lastnosti tega minerala so takšni betoni zelo primerni za aplikacije, kjer se zahtevajo majhna masa, negorljivost, odpornost proti ognju, toplotnoizolacijske lastnosti, sposobnost absorpcije zvoka ter preprečevanje nastajanja kondenzata.

VERBET – LIGHTWEIGHT INSULATING CONCRETES

SUMMARY

A group of lightweight concrete **Verbet** made of exfoliated vermiculite aggregate is presented in this paper. On account of the specific properties of this mineral such a concrete is very well suited to applications, where low weight, noncombustibility, fire resistance, thermal insulation, sound absorption or protection against condensation are required.

UVOD

V podjetju Standard p.o. se že več let ukvarjamo z ekspandiranjem vermikulita, ki ga uspešno uporabljamo za izdelavo izolacijskih oblog, odpornih proti ognju. Pozitivne izkušnje, ki so si jih po svetu pridobili pri večdesetletni uporabi izolacijskih betonov iz vermikulitnega agregata, pa so nas spodbudile, da tudi pri nas bolje spoznamo ta kompozitni material, kar je osnovni pogoj za razširitev spektra njegove uporabe. Skupino lahkih toplotno- in zvočnoizolacijskih betonov smo poimenovali **Verbet**.

Avtorja:
Stojan Renčelj, dipl. inž., Standard Ljubljana
Franci Ceklin, dipl. inž., ZRMK Ljubljana

SPLOŠNO

Verbet, ki smo ga razvili v sodelovanju z ZRMK Ljubljana, je ime za skupino lahkih betonov, izdelanih na osnovi ekspandiranega vermikulita. Spada med tako imenovane visokoporozne betone, izdelane iz lahkega naravnega agregata, v I. skupino izolacijskih betonov Pravilnika za lahke betone (Ur. list SFRJ 15/90).

Betoni se lahko pripravljajo tako v betonarnah kakor tudi v običajnih mešalnikih betona na mestu uporabe. Izdelava teh betonov poteka tako, da je vnaprej pripravljeni suhi mešanici betona potrebno dodati samo še zadostno količino vode. Primerni so tako za prevoz z avtomobilskimi mešalniki kakor tudi za manipulacijo z rotacijskimi betonskimi črpalkami.

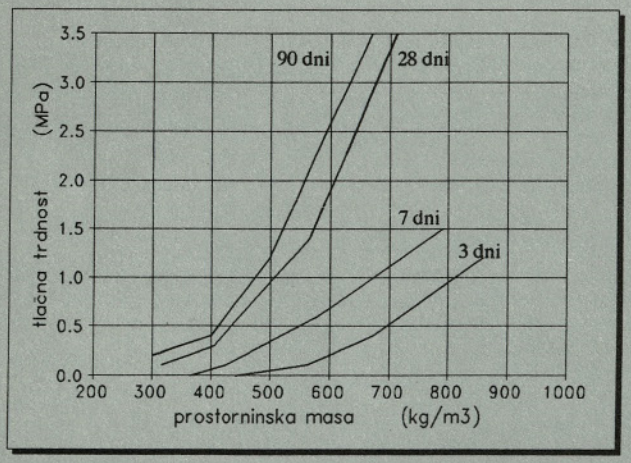
LASTNOSTI

• Suha mešanica je sestavljena iz klasičnih mineralnih materialov, kot so cement, ekspandirani vermikulit in dodatki. Z minimalno količino dodatkov dosežemo predvsem izboljšanje toplotnoizolacijskih lastnosti ter lastnosti, ki vplivajo na kakovost vgradnje (plastičnost sveže mešanice, obstojnost po vgradnji, sposobnost zaglajevanja ipd.).

• Možnost izdelave takšnih betonov, kjer lahko spreminjamo razmerja med njegovimi sestavinami, nam daje paleto lahkih izolacijskih betonov z ustreznimi prostorskimi masami v obsegu od 250 kg/m^3 do približno 900 kg/m^3. Če pa poleg ekspandiranega vermikulita uporabimo še kakšno drugo polnilo (pesek, mivka ipd.), dobimo tudi betone z večjo prostorninsko maso in z drugačnimi lastnostmi.

• Zaradi specifične oblike vermikulitnih zrn potrebuje lahek izolacijski beton Verbet precej vode. Za primerno plastično konsistenco takih betonov se razmerje med potrebno količino vode in preostalo količino suhe mešanice giblje v območju od 0.7 do 1.6. Prostorninska masa svežega betona bo v tem primeru v območju med 550 in 1000 kg/m^3 Taki betoni so izredno plastični, kar jim omogoča dobro obdelovalnost tudi dalj časa po njihovi izdelavi.

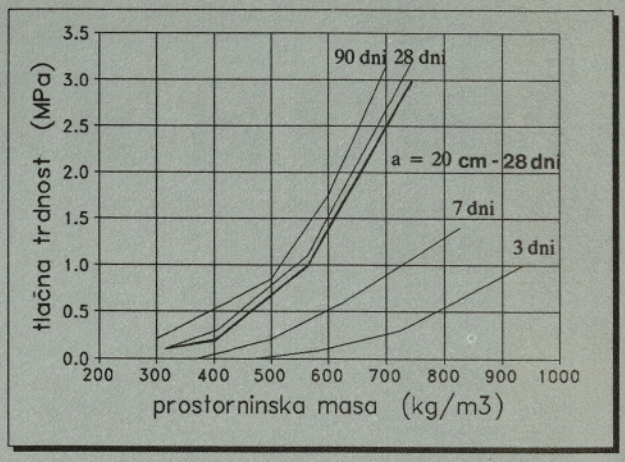
• Odprta poroznost lahkega izolacijskega betona **Verbet** je precej velika (tudi do 45 vol. %) ter se s časom tudi nekoliko spremeni. Po 30 minutah se le-ta zmanjša za približno 10 %, s tem pa se ustrezno poveča prostorninska masa svežega betona.



Slika 1: **Odvisnost tlačne trdnosti od prostorninske mase lahkega izolacijskega betona Verbet pri različnih starostih na vzrocih 4 × 4 × 16 cm**

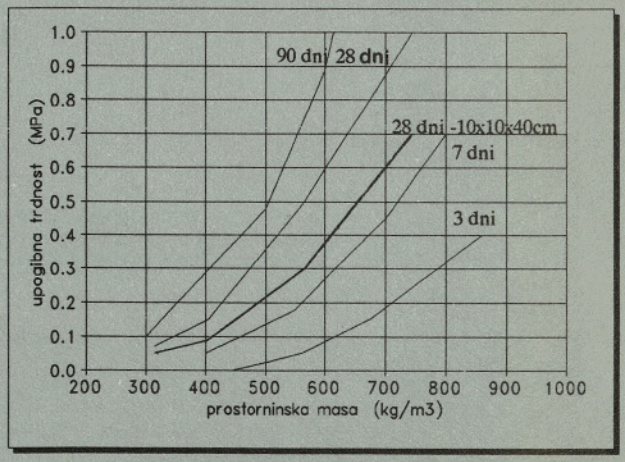
• Prostorninska masa strjenega betona **Verbet** je odvisna od začetne sestave suhe mešanice in od vlažnosti betona, ki je neposredno povezana s starostjo betona pri preiskavi ter od oblik preizkušanca. Ta se s časom zmanjšuje zaradi sušenja betona ter s tem vpliva na druge lastnosti.

• Na slikah 1 in 2 je predstavljena odvisnost tlačne trdnosti od prostorninske mase strjenih betonov **Verbet** pri starostih betona 3, 7, 28 in 90 dni. Na prvi sliki je ta odvisnost prikazana glede na rezultate, ugotovljene na prizmah 4 × 4 × 16 cm, na drugi sliki pa glede na rezultate, ugotovljene na kockah s stranico a = 15 cm ter samo pri



Slika 2: **Odvisnost tlačne trdnosti od prostorninske mase betona Verbet pri različnih starostih na kockah s stranico a = 15 cm in a = 20 cm**

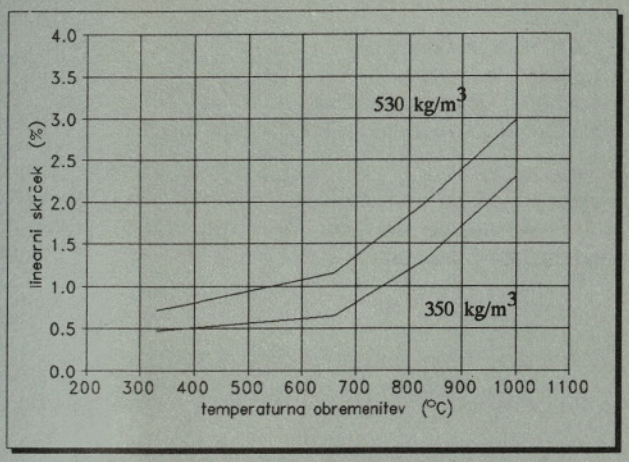
28-dnevnem terminu še na standardnih kockah s stranico a = 20 cm. Rezultati tlačnih trdnosti betonov, ugotovljenih na manjših vzorcih, so boljši od rezultatov, ugotovljenih na večjih vzorcih. Razmerje med tlačnimi trdnostmi teh betonov, ugotovljenimi na kockah s stranico a = 20 cm, in tistimi s stranico a = 15 cm, je 0.9 do 0.95, kar se približno ujema s podanimi razmerji v Pravilniku.



Slika 3: **Odvisnost upogibne trdnosti od prostorninske mase betona Verbet pri različnih starostih in dimenzijah preizkušancev (4 × 4 × 16 cm in 10 × 10 × 40 cm)**

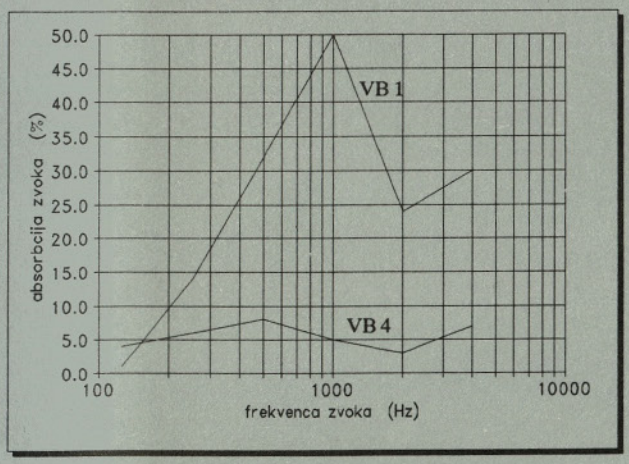
• Funkcijska odvisnost upogibne trdnosti strjenih betonov **Verbet** od ustrezne prostorninske mase je razvidna s slike 3. Rezultati upogibnih trdnosti betonov so bili ugotovljeni za termine 3, 7, 28 oziroma 90 dni na vzorcih dimenzij 4 × 4 × 16 cm, na vzorcih dimenzij 10 × 10 × 40 cm pa le pri terminu 28 dni.

• Ekspandirani vermikulit omogoča zaradi svojih specifičnih lastnosti zelo dobro obstojnost lahkih izolacijskih betonov **Verbet** pri visokih temperaturah. Vermikulit ima namreč točko sintranja pri temperaturi približno 1300 °C. Ta lastnost omogoča uporabo lahkega betona **Verbet** pri raznovrstnih aplikacijah, kjer se zahtevata odpornost proti ognju ter povečana požarna varnost konstrukcijskih elementov. Mejna temperatura uporabnosti takih betonov znaša približno 1050 °C in je odvisna tudi še od uporabljenega veziva. Na sliki 4 so prikazane vrednosti linearnega skrčka vermikulitnega betona **Verbet** s prostornin-



Slika 4: **Linearni skrček betona Verbet po 3-urni obremenitvi pri povišanih temperaturah**

skima masama 350 kg/m^3 oziroma 530 kg/m^3, in sicer potem, ko sta bila 3 ure izpostavljena povišanim temperaturam do 1000 °C.

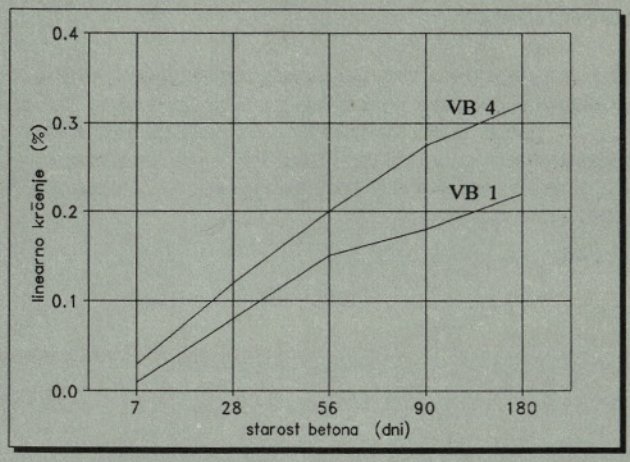


Slika 5: **Odvisnost absorpcije zvoka od frekvence zvoka za dve različni mešanici Verbeta**

• Zaradi značilne strukture zrn ekspandiranega vermikulita ima **Verbet** zelo dobre toplotnoizolacijske lastnosti. Koeficient toplotne prevodnosti lahkega betona se giblje v območju med 0.10 in 0.20 W/mK. Poleg teh izolacijskih lastnosti ima **Verbet** veliko uporabnost pri aplikacijah, kjer se od izdelka zahteva absorpcija zvoka. Na sliki 5 je prikazana odvisnost koeficienta absorpcije zvoka pri različnih frekvencah dveh betonov **Verbet** z mejnima prostorninskima masama. Vrednost specifične toplote betonov **Verbet** lahko pričakujemo v območju od 650 J/kgK do 1200 J/kgK.

• Koeficient prepustnosti pare skozi betone **Verbet** je v območju med 1.8 in 5.0. Zaradi lastnosti ekspandiranih vermikulitnih zrn lahki vermikulitni betoni iz skupine **Verbet** zelo dobro prepuščajo pline in paro, na njih pa se ne pojavlja kondenzat.

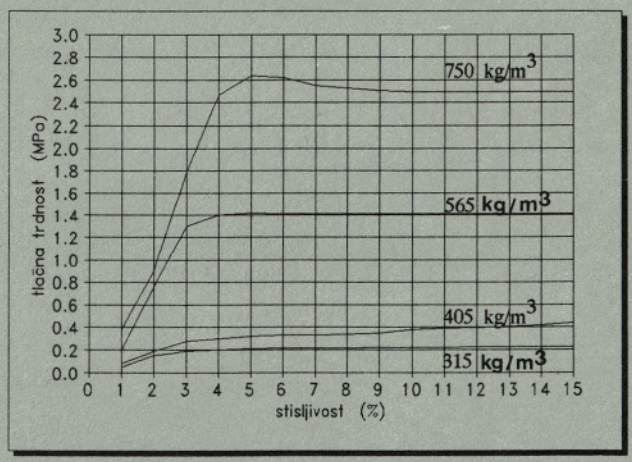
• Linearno krčenje lahkih izolacijskih betonov **Verbet** je razmeroma veliko. Po približno 180 dneh odležavanja v laboratorijskih klimatskih pogojih znaša le-to od 0.2 % do 0.3 %. Te vrednosti pa so povsem običajne pri betonih s tako majhnimi prostorninskimi masami (slika 6).



Slika 6: **Območje vrednosti linearnega skrčka betona Verbet pri laboratorijskih klimatskih pogojih v odvisnosti od njegove starosti**

• Zaradi specifične oblike zrn ekspandiranega vermikulita, ki so v določenem smislu podobna mehu harmonike, sodijo betoni **Verbet** med elastične betone. Pri tlačni obremenitvi se tak beton zelo deformira, pri tem pa bistveno ne spremeni mehanskih lastnosti. Tlačna trdnost **Verbeta,** ugotovljena na ploščah dimenzij 15 × 15 × 4 cm, v odvisnosti od skrčka plošče zaradi njegove stisljivosti je prikazana na sliki 7. Betoni **Verbet** se bodo pod lokalno delujočo silo tudi le lokalno deformirali, površina okoli delovanja te sile pa bo ostala nespremenjena.

• Strjene betone **Verbet** lahko enostavno žagamo ter vanje zabijemo žeblje. Skratka, primerni so tako za strojno kakor tudi za ročno obdelavo z običajnim delovnim orodjem.



Slika 7: **Tlačna trdnost lahkega betona Verbet v odvisnosti od stisljivosti vzorca**

ZAVOD ZA RAZISKAVO MATERIALA IN KONSTRUKCIJ V LJUBLJANI

UPORABNOST

Glede na opisane lastnosti je uporabnost skupine lahkih izolacijskih betonov **Verbet** zelo velika predvsem zaradi izredno dobrih lastnosti njihovega osnovnega materiala – ekspandiranega vermikulita. Kjerkoli v gradbeništvu oziroma drugih industrijskih panogah se pojavijo zahteve po izdelkih, ki morajo biti

- lahki,
- negorljivi,
- odporni proti ognju,
- toplotno izolacijski,
- sposobni absorbcije zvoka,
- sposobni preprečevanja kondenzata ipd.,

je mogoča uporaba vseh vrst betonov **Verbet.** Širok spekter možnosti uporabe takih betonov omogoča tudi njihova enostavna priprava ter prilagodljivost sestave posameznim zahtevam.