

MODELIRANJE POPLAVNEGA VALA PRI PRELIVANJU PLAZU NA LUČNICI

Rudi Rajar*, Majda Zakrajšek**

UDK 627.51

Matematični model za račun parametrov vala, ki nastane zaradi porušitve pregrade, bodisi popolne in hipne (v primeru ločne pregrade) ali delne in postopne (za primer nasute zemeljske pregrade), je bil na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo razvit že pred leti. Nastajanje odprtine v pregradi zaradi preliivanja vode je bilo privzeto kot linearna funkcija. Zdaj smo model dopolnili z računom časovnega razvoja odprtine po erozijskih enačbah. Prvo verifikacijo tega modela smo izvršili s podatki za primer preliivanja plazu na Lučnici.

Prvega novembra 1990 ob približno 22. uri je zdrsnil zemeljski plaz v potok Lučnica, pritok Savinje, in formiral naravno pregrado, visoko okrog 15 m. Za njo se je akumuliralo jezero in naslednje jutro je voda začela pregrado prelivati, hitro jo je erodirala in val, ki je pri tem nastal, je poplavljal vas Luče, pribl. 1,5 km nizvodno. V vasi je bil val visok 2 do 3 metre, merjeno nad terenom izven struge. Na srečo so bili prebivalci toliko prisebni, da so potem, ko je potok presahnil, pravilno sklepali, kaj se mora nekje zgoraj dogajati, in so se pravočasno umaknili z nevarnega območja.

Taki primeri niso tako redki. Leta 1987 je v Severni Italiji plaz zaprl odtok v dolini Valtelina (Giuseppetti in Molinaro, 1989). Nastalo je akumulacijsko jezero z volumenom okrog 19 milijonov m³, ki je prav tako preliilo naravno pregrado. Med polnjenjem so raziskovalci dobili nalogo napovedati maksimalne pretoke, ki bodo nastopili nizvodno. Uporabili so tako matematični kot fizični model. Prav tako so skušali ugotoviti najučinkovitejše ukrepe za omiljenje posledic. Po njihovem nasvetu so izkopal kanal na kroni naravne pregrade; s tem so znižali maksimalno koto, ki jo je voda dosegla v akumulaciji in tudi dokaj uspešno zmanjšali maksimalni pretok nizvodno.

Ekstremni dogodek tega tipa se je zgodil na potoku Cochany v perujskih Andih aprila 1974. Zemeljski plaz je formiral 170 m visoko naravno pregrado Huaccoto (Ponce in Tsivoglou, 1981). Akumulacija se je zapolnila v pribl. 60 dneh, volumen vode je bil 670 milijonov m³ (za primerjavo: volumen Blejskega jezera je 26 milijonov m³).

Prek krone nasipa so med tem zgradili umetno utrjen kanal, ki pa ni imel praktično nobenega učinka. Ko se je voda začela prelivati, je nasip erodirala do tal v približno dveh dneh. Na univerzi v Limi sem videl film, ki so ga snemali ob poplavi: razdejanje je bilo obupno. Jekleni paličasti železniški most je naraščajoča voda zmečkala kot igračo in ga odnesla, manjšo vasico nad rečnim ovinkom je poplavljal val izpodkopal in vasica je v celoti zgrmela v reko in izginila. Pokazali so mi tudi poskus preliivanja in erozije na fizičnem modelu. Zanimivo je, da jim je uspelo

razmeroma natančno napovedati maksimalne pretoke: njihova napoved je bila med 15 in 20 000 m³/s, v resnici pa je bil pretok ocenjen na ok. 14 000 m³/s (srednji letni pretok Donave pri Beogradu je reda velikost 5000 m³/s). Ljudi so seveda pravočasno izselili, materialna škoda pa je bila ogromna.

Splošno o poružitvah pregrad

Pri takih naravno formiranih pregradah erozija pri preliivanju vedno povzroči razmeroma naglo porušitev pregrade in navadno nevaren poplavljalni val nizvodno. To je postopni način porušitve, erozija se navadno začne v manjši odprtini trikotnega preseka, ki se pogloblja in preide kasneje v trapezno obliko. Končna odprtina sega največkrat do dna nasipa, vendar navadno ne po celotni širini.

Seveda je bilo v svetu že precej poružitve umetnih pregrad (ki jih je zgradil človek). Tu v grobem (glede na možni način porušitve) ločimo tri tipe pregrad: a) ločne pregrade, b) težnostne (betonske) in c) nasute pregrade (zemeljske ali skalometne – »rockfill«).

Povejmo samo na kratko, da so se ločne pregrade že porušile v celoti in praktično v trenutku (primer pregrade Malpasset v J. Franciji l. 1959). Pri težnostnih pregradah je možna delna, toda trenutna porušitev, medtem ko je rušenje nasutih pregrad vedno postopno, saj ogromna masa materiala v pregradi (tudi do več milijonov m³) ne more kar izginiti, ampak jo lahko voda le erodira. Navadno traja to nekaj ur. Najbolj znan primer je porušitev zemeljske pregrade Teton v ZDA l. 1976. Voda je zaradi napake v gradnji začela pronicati skozi pregrado ob 9^h dopoldne, okrog 12^h je izjedla luknjo, zgornji del pregrade se je posul vanjo, potem pa je približno eno tretjino pregradnega preseka voda erodirala do poznih popoldanskih ur. Maksimalni pretok nizvodno je bil 66 000 m³/s. Časa za opozorilo prebivalstva in za umik je bilo dovolj, žrtve so bile

minimalne, seveda pa je bila ogromna materialna škoda (ocenjena na 70 milijonov dolarjev).

O nevarnosti oziroma verjetnosti porušitev je bilo narejenih že veliko analiz in statističnih obdelav glede na tip pregrade, leto izgradnje, višino itd. Zelo težko je podati neko realno statistično številko o verjetnosti porušitve. Celotna analiza bi zahtevala opis v posebnem članku.

Tu naj povem le naslednje. Še najbolj realna analiza verjetnosti porušitve je podana v članku Goubete (1979). Avtor ugotavlja, da je verjetnost porušitve 10⁻⁴ na leto na pregrado. To bi npr. pomenilo, da je za Ljubljancane možnost, da v teku 50 let doživimo poplavo zaradi porušitve pregrade Medvode (ki pa sicer ne bi povzročila bistveno nevarne poplave) le 0,5-odstotna. Omenjeni avtor tudi poudarja, da ljudje v dolinah pod pregradami ne živijo v nekem hudem in nesprejemljivem tveganju. Statistične raziskave so tudi pokazale, da so pregrade, zgrajene v novjšem času, varnejše, saj je tehnologija gradnje in tudi kontrola na višji ravni in zato tudi bolj varna.

Moje osebno mnenje je, in tudi vsi vemo, da se nam hiša, v kateri živimo, lahko nekoč zaradi potresa sesuje na glavo, pa kljub temu ne živimo pod šotori! Vsekakor pa je treba narediti absolutno vse za čimvečjo varnost prebivalstva. Zakon v večini držav zahteva, da se za vse pregrade, ki so že zgrajene ali v fazi projektiranja, naredijo študije o tem, kakšen poplavljalni val bi nastal v primeru morebitne porušitve. Tak zakon je imela že bivša Jugoslavija, v Sloveniji pa je v pripravi nov zakon, ki bo na bolj strokovnih osnovah določal, kakšni izračuni naj se izvršijo in s kakšnimi predpostavkami o načinu porušitve.

Upoštevati je treba različne možne načine porušitve za različne zgoraj omenjene tipe pregrad. Upoštevati je treba tudi možnosti porušitve zaradi erozije tako pri umetnih kot tudi pri naravnih pregradah (ki nastanejo zaradi zdrsa zemeljskih plazov). Matematičnega modela, ki bi lahko to simuliral, do zdaj v Sloveniji še ni bilo, pa tudi v svetu je še v razvojni fazi.

Zemeljski plaz na Lučnici je bila lepa priložnost, da natančneje proučimo fizikalni fenomen in da rezultate meritev

* Dr. prof., FAGG, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana.

** FAGG, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana.

78 uporabimo pri izdelavi in predvsem za verifikacijo matematičnega modela, ki bo v prihodnje lahko služil za oceno posledic porušitev take vrste.

Opis primera in zbiranje podatkov

Zelo težko je bilo na terenu zbrati dovolj podatkov za verifikacijo matematičnega modela. Ker so bili nekateri rezultati nezanesljivi, smo skušali kombinirati različne tipe podatkov, od katerih so bili eni merjeni, drugi pa le ocenjeni.

Kot je znano, so bile zadnje dni oktobra 1990 padavine v povodju Savinje izredno intenzivne, tako da so na Savinji povzročile visoke vode reda velikosti stoletnih voda. Zaradi izredne namočenosti je 1. novembra zdrsnil zemeljski plaz z levega brega Lučnice v potok in ga popolnoma zaježil. Visok je bil ok. 15 m, vzdolžni profil plazu je prikazan na sliki 1 b. Zgornja dva metra te naravne pregrade je sestavljala v glavnem zemlja, narita s pobočja. Tudi zgornja polovica pregrade je bila večinoma iz sipkega, nekoherentnega materiala, s tipičnim premerom zrn pod desetinko milimetra.

Pretok Lučnice je bil takrat ok. 25 m³/s. Jezero za pregrado se je polnilo okrog 8 ur, volumen vode je bil ok. 730 000 m³. Naslednjega jutra ob 6. uri in 40 minut je jezero začelo prelivati naravno pregrado. Po ocenjeni rekonstrukciji dogodka se je manjši zgornji del pregrade (visok pribl. 1 m in širok nekaj metrov) zrušil skoraj trenutno, preostali del pregrade pa je voda erodirala v 10 do 15 minutah. Erozijska se je ustavila 9 m pod krono pregrade, ker je pod to koto pregrada sestavljena iz debelejšega kamna in skal.

A. Geometrija pregrade in akumulacije.

$Z_0 = 540,8$ m

Maksimalna koto vode, dosežena v akumulaciji, je bila razmeroma točno določena naknadno po sledovih na poplavljenih hišah v akumulaciji.

$H_0 = 15$ m

Višina pregrade in njena oblika je bila dobljena po kasnejših meritvah in iz kart, vendar šele nekaj dni po končani eroziji, zato je bilo treba obliko celotnega plazu pred erozijo oceniti.

$V = 730\,000$ m³

Volumen vode v akumulaciji je bil dobljen iz kart 1 : 1000. Tudi oblika akumulacije (prečni preseki), ki smo jo potrebovali za izračune nestalnega toka po porušitvi, je bila dobljena iz kart.

$D_1 = 0,05$ mm

$D_2 = 10$ mm

Velikost zrn materiala v treh slojih v pregradi,

$D_3 = 400$ mm

ocenjena na mestu (glej sliko 1). To je osnovni primer A, v računih pa smo upoštevali tudi variacije premerov zrna v mejah možne ocene (primeri računa so podani v tabeli 1).

Tabela 1. Podatki štirih računanih primerov

primer	D_1 (mm)	D_2 (mm)	začetna odprtina
A	0,05	10	trikotna
B	0,05	30	trikotna
C	1,0	10	trikotna
D	0,05	10	trapezna

V računih smo upoštevali dve različni začetni odprtini: trikotno (višina 1,3 m, naklon stranskih sten 63 stopinj) in trapezno (višina 1 m, širina dna 3 m, stranski naklon 63 stopinj).

B. Maksimalne kote vode nizvodno. Dobljene so na osnovi kasnejših meritev na terenu. Večinoma so bili merjeni sledovi maksimalne vode na poplavljenih hišah v vasi Luče. Ti podatki so predstavljali glavno osnovo za verifikacijo modela. Rezultati meritev so skupaj z izračunanimi prikazani na sliki 2.

C. Nizvodni hidrogram – krivulja Q (t). Še eno možnost verifikacije je predstavljala merjeni hidrogram na Savinji na vodomerni postaji Nazarje, pribl. 22 km nizvodno od vtoka Lučnice v Savinjo. Ta podatek ni popolnoma zanesljiv zaradi dveh problemov: 1. propagacijo porušitvenega vala je bilo treba simulirati z računom vzdolž 24 km dolgega odseka Savinje, pri tem pa nismo imeli točnih podatkov o dotoku iz manjših pritokov v Savinjo in tudi ne o vzdolžnem bočnem dotoku v Savinjo zaradi močnih padavin; 2. pozneje se je izkazalo, da konsumpcijska krivulja na vodomerni postaji Nazarje ni zanesljiva. Merjeni in izračunani hidrogram sta prikazana na sliki 4.

D. Način oziroma časovni potek porušitve. Tega podatka ni bilo mogoče dobiti

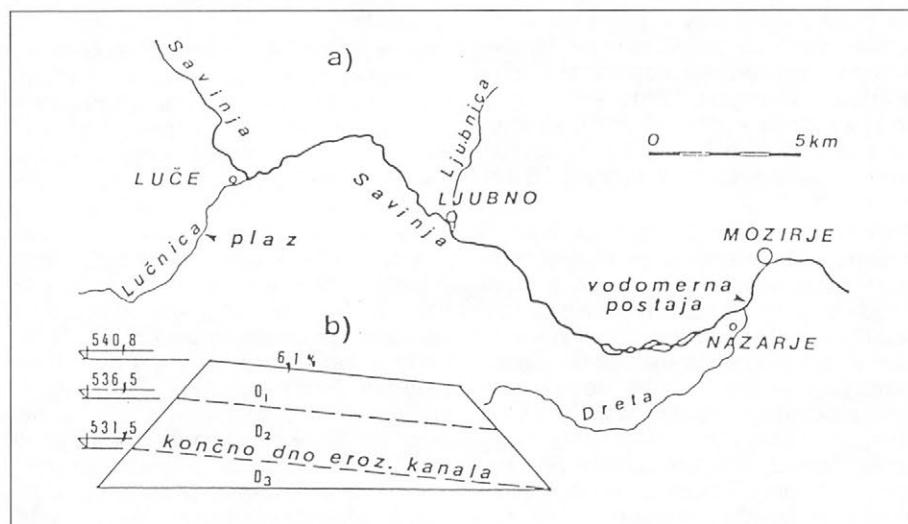
iz opazovanj, saj sta se prelivanje in erozija dogajala ponoči v nenaseljenem delu doline. Dejansko je bil način porušitve glavna neznanka v problemu. Zato smo raziskovali po naslednje postopku.

Najprej smo z matematičnim modelom simulirali dogajanje za nekaj možnih načinov porušitve (kjer smo časovni razvoj odprtine podali kot podatek). Rezultate teh izračunov smo primerjali z maksimalnimi kotami vode nizvodno in z merjenim hidrogramom na v. p. Nazarje. Tako smo v bistvu z metodo poskušanja ugotovili (do neke točnosti) resnični potek rušenja pregrade. To je bila osnova za verifikacijo pravilnosti izračuna časovnega razvoja odprtine z erozijo, pa tudi za verifikacijo celotnega matematičnega modela.

Opis matematičnega modela

Model je splošen, uporabljamo ga za simulacijo vseh vrst porušitev, tako trenutne in popolne, kot delne in tudi postopne. Pri tem je simulacija erozije pri prelivanju naravne ali umetne pregrade izpopolnitev modela v l. 1992. Ker tu ni namen podajati detajlnega opisa modela, je opisan le osnovni princip. Nekaj podobnih matematičnih modelov je že bilo razvitih (Ponce in Tsivoglou, 1981; Singh in sod., 1986; Giuseppetti in Molinaro, 1989), toda vsi ti modeli pri simulaciji predpostavljajo horizontalno gladino v akumulaciji, medtem ko tu predlagani model točneje simulira ves potek nestalnega toka v akumulaciji. Razvili smo tudi model za simulacijo toka v akumulacijah, kjer je tok v dveh dimenzijah (dvodimenzijski model, Rajar in Četina, 1984).

Simuliranje pojava poteka implicitno, vsi pojavi (hidravlični in erozijski) so povezani oziroma vplivajo drug na drugega. Model je sestavljen iz štirih delov:



Slika 1. a) situacija, b) podložni profil plazu.

1. Tok v akumulaciji in nizvodno od pregrade. To je nestalni tok, ki ga je možno dovolj dobro simulirati z osnovnimi enačbama enodimenzijskega (1D) nestalnega toka t. i. St. Venantovi enačbi). Osnovni model je sprva lahko simuliral le popolno in trenutno porušitev, račun je potekal zvezno od začetka akumulacije do zadnjega profila na koncu nizvodnega odseka (Rajar, 1972; Rajar, 1978).

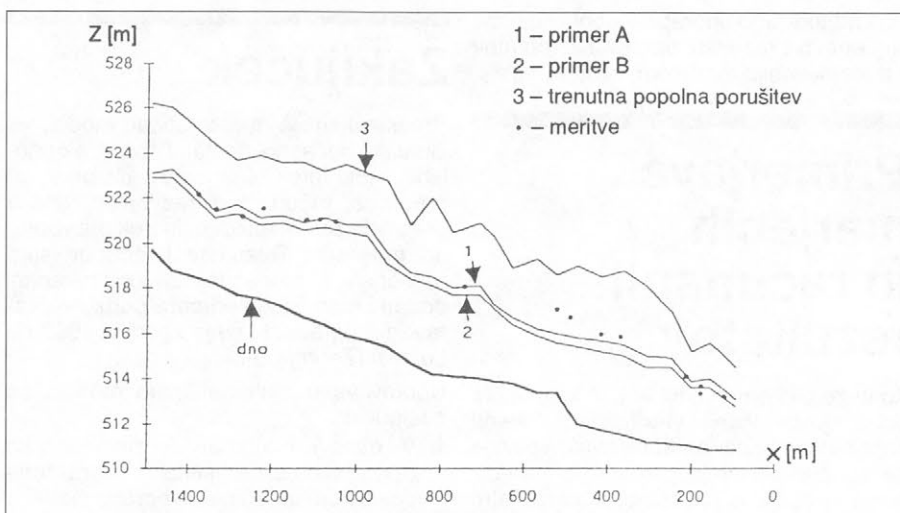
2. Simulacija toka na mestu delno porušene pregrade. Ker je pri delni ali postopni porušitvi v določenem računskem času del pregrade še neporušen, prek nje teče voda v obliki preliva in med zgornjo in spodnjo vodo je nezveznost. Zato je na mestu pregrade treba upoštevati dvojni profil, med njima pa je profil delno porušene pregrade. Prek njega se računa pretok po enačbi preliva. Časovno spreminjanje tega profila je bilo prej podano s podatki, v novem modelu pa se razvoj odprtine računa na osnovi zakonitosti erozije.

3. Oblika odprtine. Oblika odprtine je v računu predpostavljena (medtem ko se spreminjanje njene velikosti s časom računa na osnovi procesa erozije). V začetnem času se predpostavi neka majhna odprtina trikotne ali trapezne oblike (po oceni). Predpostavlja se, da je prečni presek ves čas trapezne oblike, naklonski kot stranic je konstanten in enak nasipnemu kotu materiala. Podložni naklon erozijskega kanala je tudi ves čas konstanten, določen pa je na osnovi začetne geometrije. Spreminjanje višinske lege dna kanala pa se spet izračunava na osnovi zakonov erozije. Hitrost toka po erozijskem kanalu računamo po enačbah stalnega enakomernega toka (ker je naklon navadno zelo strm, je tok v deročem režimu, enakomerni tok pa se ustvari že na razmeroma kratki razdalji.)

4. Erozijska odprtina. Za simulacijo procesa erozije smo izbrali Einsteinovo enačbo (Gisepetti in Molinaro, 1989). Ko je pretok materiala izračunan, se upošteva kontinuitetna enačba za material (Exnerjeva enačba), na osnovi katere se izračuna časovni potek razvoja odprtine oziroma erozijskega kanala v pregradi. Pri tem upoštevamo omenjene predpostavke o obliki odprtine.

Statistične metode

V literaturi je najti tudi več statističnih metod, s katerimi se določa maksimalni pretok prek pregrade na osnovi statistično obdelanih podatkov primerov porušitev, ki so se že zgodile v preteklosti. Pretok je podan bodisi v odvisnosti od maksimalne višine pregrade H , bodisi od volumna akumulacije V , najboljše korelacije pa dajejo enačbe, ki podajajo odvisnost maksimalnega pretoka od t. i. »faktorja pregrade« (»dam-factor«), to je produkt višine in volumna H^3V . Dobimo enačbe, ki so seveda le približne, saj je raztros točk



Slika 2. Maksimalne kote vode po porušitvi v območju vasi Luče.

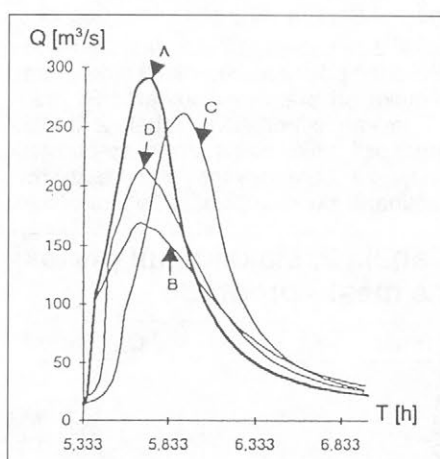
velik. Vendar pa imajo te metode neko praktično vrednost, saj napovedujejo na osnovi dogodkov, ki so se resnično že zgodili v naravi.

Nekatere od teh metod obravnavajo preliivanje in erozijo pregrad skupaj za umetne in naravne pregrade, boljše pa so metode, ki ta dva tipa pregrad ločita. Znano je namreč, da imajo naravne pregrade pri isti višini bistveno večji volumen materiala kot umetne, zato je tudi čas erozije večji in maksimalni pretok manjši kot pri umetnih pregradah (čeprav je material pri umetnih pregradah dosti bolj utrjen – konsolidiran). Za omenjeno naravno pregrado Huacotto v Peruju npr. navajajo, da bi z materialom te pregrade lahko zgradili trikrat višjo umetno zgrajeno pregrado.

Costa (1985) podaja korelacije ločeno za umetne in za naravne pregrade (višina pregrade H je podana v metrih, volumen akumulacije V pa v milijonih kubičnih metrov):

Naravne pregrade	Umetne pregrade
$Q_{\max} = 6,3 \cdot H^{1,59}$	$Q_{\max} = 10,5 \cdot H^{1,87}$
$Q_{\max} = 672 \cdot V^{0,56}$	$Q_{\max} = 961 \cdot V^{0,48}$
$Q_{\max} = 181 \cdot (H^3V)^{0,43}$	$Q_{\max} = 325 \cdot (H^3V)^{0,42}$

Te enačbe podajajo najboljše prilaganje opazovanim primerom (»best estimate«), medtem ko enačbe ekstremnih dogodkov



Slika 3. Časovni potek pretokov pri preliivanju pregrade za posamezne računske primere.

(»upper estimate«) dajejo nekajkrat večje pretoke.

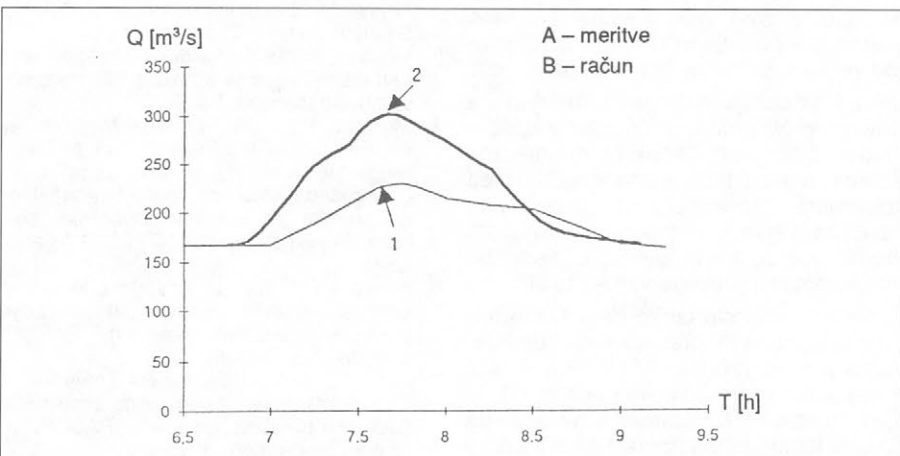
Molinaro (1990) je uporabil brezdimenzijsko analizo, da je prišel do naslednjih relacij:

Naravne pregrade

$$Q_{\max} = 0,00319 \cdot (V/H^3)^{0,564} \cdot G^{0,5} \cdot H^{2,5}$$

Umetne pregrade

$$Q_{\max} = 0,116 \cdot (V/H^3)^{0,221} \cdot G^{0,5} \cdot H^{2,5}$$



Slika 4. Merjeni in računani hidrogram $Q(t)$ na vodomerni postaji Nazarje.

Primerjava merjenih in računanih rezultatov

Ko je že bilo omenjeno, je bilo zelo težko dobiti dovolj točne vrednosti nekaterih parametrov, ki pa lahko bistveno vplivajo na končne rezultate. Zato smo naredili serijo izračunov, kjer smo te parametre spreminjali v mejah možne ocenitve. Tabela 1 daje pregled računanih primerov. Primer A lahko imamo za »osnovni primer«, ker je najbližji realnemu dogodku. Slika 2 prikazuje maksimalne kote vode nizvodno od pregrade, slika 3 hidrograme pretoka pri prelivanju ob različnih predpostavkah o porušitvi. Tabela 2 podaja vrednosti maksimalnih pretokov pri prelivanju za obravnavane primere in tudi računane po dveh statističnih metodah.

Tabela 2. Maksimalni pretoki na mestu pregrade

Primer	Q_{max} (m ³ /s)
A	290
B	170
C	260
D	215
Trenutno – popolno rušenje	1980
Postopno 30-minutno rušenje	265
Statistična metoda (Costa)	506
Statistična metoda (Molinaro)	182

Osnovni primer A daje razmeroma dobre rezultate (če jih primerjamo z meritvami maksimalnih kot nizvodno), medtem ko primera B in C kažeta, da je metoda zelo občutljiva na velikost srednjega zrna materiala in tudi na velikost in obliko začetne odprtine. Ker te parametre lahko navadno le ocenimo, moramo biti previdni pri uporabi rezultatov. Ko gre za vprašanje zaščite prebivalstva, je dobro, da izračune naredimo po več metodah ali pa upoštevamo neki varnostni faktor. Vendar pa omenjene metode dajo pravi red velikosti pretokov in maksimalnih kot. Slika 4 prikazuje hidrogram, merjen na Savinji pri Nazarjih v primerjavi z izračunanim. Čas propagacije je razmeroma dobro simuliran, toda očitna je razlika med volumnom računane in merjenega vala. Kot je že bilo omenjeno (poglavje 2), merjeni hidrogram ni zanesljiv, nismo pa mogli ugotoviti pravega vzroka razlik.

Statistične metode lahko dajo samo red velikosti prelivnih pretokov. Če upoštevamo pretok, računani v primeru A, kot točen, potem daje Costova metoda 175 % tega pretoka, Molinarova metoda pa 60 %. Metode lahko uporabljamo za prve ocene in tudi za primerjavo z drugimi metodami.

Zaključek

Predstavljen je matematični model, ki simulira sočasno nestalni tok v akumulaciji, tok prek (naravne ali umetne) pregrade, računa tudi razvoj odprtine v pregradi zaradi erozije in tok nizvodno od pregrade. Rezultate izračunov smo primerjali z merjenimi ali opazovanimi podatki resničnega primera porušitve naravne pregrade, ki se je zgodil l. 1990 na Lučnici (Zgornja Savinjska dolina).

Ugotovitve o matematičnem modelu so naslednje:

1. V osnovi matematični model lahko razmeroma točno simulira hidravlične posledice porušitve pregrad, simulira lahko tudi proces rušenja naravnih ali umetnih pregrad zaradi erozije.
2. Vendar pa so rezultati modela zelo občutljivi na vrednost nekaterih vhodnih podatkov, ki jih navadno lahko samo ocenimo. To je predvsem velikost začetne odprtine v pregradi (od nje je bistveno odvisna nadaljnja erozija). Tudi velikost srednjega zrna materiala v pregradi zelo vpliva na razvoj erozije in s tem na hidravlične posledice nizvodno. Zato moramo biti previdni pri uporabi rezultatov.
3. Statistične metode, ki temeljijo na obdelavi podatkov o resničnih porušitvah v preteklosti, dajo pravi red velikosti pretoka prek pregrade, toda rezultati različnih metod se lahko med seboj razlikujejo tudi za nekaj sto odstotkov.
4. Zaradi izjemnega pomena za varnost prebivalstva je priporočljivo narediti izračune tako z matematičnim modelom kot s statističnimi metodami in upoštevati tiste rezultate, ki so bolj neugodni (bolj nevarni). To metodo uporabljajo v Italiji.

1. Costa, J. E., 1985. Floods from Dam Failures (Poplave zaradi porušitve pregrad). U. S. Geological Survey, Report 85-560.
2. Giuseppetti, G., P. Molinaro, 1989. A mathematical Model of the Erosion of an Embankment Dam by Overtopping (Matematični model erozije nasute pregrade pri prelivanju). International Symposium on Analytical Evaluation of Dam Related Safety Problems, Copenhagen.
3. Goubet, A., 1979. Risques associes aux barrages (Tveganja v zvezi s pregradami). La houille Blanche, No. 8.
4. Molinaro, P., 1990. Statistical Methods for the Estimate of the Peak Discharge Following the Breach of an Earth Dam (Statistične metode za oceno maksimalnega pretoka pri porušitvi zemeljske pregrade). Internal Report ENELCRIS, Milano, Italija.
5. Ponce, V. M. in A. J. Tsivoglou. Modeling Gradual Dam Breaches (Modeliranje postopne porušitve pregrad). PASCE, J. Hydraulics Division, HY7.
6. Rajar, R., 1978. Mathematical Simulation of Dam break Flow (Matematično simuliranje toka pri porušitvi pregrad). PASCE, J. Hydraulics Division, HY7.
7. Rajar, R., M. Cetina, 1984. Numerical and Experimental Simulation of 2-Dim. Trubu-

- lent Flow (Numerična in eksperimentalna simulacija 2-dim. turbulentnega toka). Hydrosoft Conference, Portorož, Slovenija.
8. Rajar, R., 1972. Recherche theorique et experimentale sur la propagation des ondes de rupture de barrage dans une vallee naturelle (Teoretične in eksperimentalne raziskave valov, ki nastajajo pri porušitvah pregrad v naravnih rečnih dolinah). Doktorska disertacija, Univerza Paul Sabatier, Toulouse, Francija.
 9. Singh, V. P., P. D. Scarlatos, M. R. Jourdan, 1986. Simulation Aspects of Earth Dam Failures (Simulacija porušitve zemeljskih pregrad). Computational Methods Conference, Proceedings, Springer-Verlag, Berlin.

Rudi Rajar, Majda Zakrajšek

Modelling of a Flood Wave, Caused by Overtopping of a Landslide-Created Dam

A mathematical model is described, which simulates the unsteady flow in the reservoir, flow over the dam (natural or artificial), the breach development by the erosion and the downstream wave. The results of simulation were compared with measured and observed data of a real case: erosion of a landslide-created natural dam on the Lučnica Creek (1990).

Conclusions about the mathematical model:

1. Basically the mathematical model can simulate the hydraulic consequences of the dam collapse relatively well, it can simulate also the breach development due to erosion.
2. The results are pretty sensitive to the value of some input data which can often only be estimated. This is especially valid for the form of the initial breach (at time $t = 0$), the latter development of the breach depends much on this (estimated) parameter. Also the mean grain size of the dam material highly influences the breach erosion and also the hydraulics consequences downstream.
3. Statistical methods, based on the data from real cases in the past, give the right order of magnitude of the maximum overflow discharge but results after different methods can differ for some hundred percents.
4. Because of the extrem importance for the security of the inhabitants, it is advisable to execute the computations by the mathematical model as well as by statistical methods and take into account the more unconviniant (more dangerous) results. This procedure is used in Italy.