

PRIMENA VALJANOG BETONA U IZGRADNJI BRANA III DEO – PROJEKTOVANJE

Vladan KUZMANOVIĆ, Ljubodrag SAVIĆ, Bojan MILOVANOVIĆ
Građevinski fakultet, Beograd

REZIME

Posle prikaza istorijskog razvoja RCC brana i analize komponenata i osobina valjanog betona (koji su dati u prethodnim člancima), u ovom radu su obrađena najvažnija pitanja u vezi sa projektovanjem gravitacionih brana od valjanog betona. Na početku su analizirani principi projektovanja, oblik poprečnog preseka i opšta stabilnost. Sledi opis dimenzionisanja, uticaji seizmike i termička analiza. Razmatranjem razdelnica, zaptivki, galerija i kontrole procurivanja dat je osvrt na najvažnije elemente upotrebljivosti. Na kraju su opisane specifičnosti temeljenja, evakuacije velikih voda i osmatranja brana od valjanog betona. Na taj način istaknute su najvažnije osobenosti RCC brana, kao i sličnosti i razlike u odnosu na klasične brane od hidrotehničkog betona, koje se moraju imati u vidu prilikom projektovanja.

Ključne reči: projektovanje, izbor poprečnog preseka, opšta stabilnost, dimenzionisanje, seizmički uticaji, termički proračun, razdelnice, procurivanje, temeljenje, prelivanje, osmatranje.

1. UVOD

Iako je način građenja brana od valjanog betona (zasnovan na razastiranju mešavine krute konsistencije i zbijanju vibro-valjcima) potpuno drugačiji od gravitacionih betonskih brana od klasičnog betona, osnovne pretpostavke i principi projektovanja su veoma slični. Ovakav pristup omogućen je samom idejom valjanog betona, a to je da se bez obzira na razlike u mešavini i načinu ugrađivanja dobiju brane istih osobina, kvaliteta i trajnosti kao od klasičnog hidrotehničkog betona.

Da bi se iskoristile mogućnosti tehnologije valjanog betona, prilikom usvajanja dispozicije, projektovanja i organizacije građenja treba uzeti u obzir sve prednosti i

nedostatke brzog građenja koje omogućava RCC. Generalno, upotreba valjanog betona po pravilu je ekonomična kod većine pregradnih profila koji imaju dovoljnu dužinu i širinu za upotrebu mehanizacije za razastiranje i zbijanje. Međutim, pri tome je veoma važno da projektanti odgovorno procene mogućnost smanjenja troškova ne dovodeći u pitanje kvalitet konstrukcije i tehničke zahteve.

Uprkos porastu popularnosti i povećanju broja izgrađenih RCC brana u svetu na blizu 250, pojedini investitori i inženjeri još uvek izražavaju nepoverenje prema ovoj tehnologiji. Najčešći komentari, [14], su sledeći:

- "Neću slabu branu";
- "RCC nije beton";
- "Koliko para, toliko muzike";
- "RCC može za niske brane, ali ja ne bih rizikovao sa njim kod visokih brana";

Umesto opovrgavanja ovakvih i sličnih tvrdnji, važnije je odgovorno i kritički preispitati dosadašnja 20-godišnja iskustva. Napredak metoda projektovanja i tehnologije izgradnje ovih brana od valjanog betona je nesporan. Međutim, neophodna je objektivna analiza osobina postojećih brana i još strožija kontrola kvaliteta. Samo tako će, bez obzira na visinu, i najstrožiji projektni kriterijumi biti zadovoljeni, kvalitet biti trajan, a sigurnost ista kao kod brana od klasičnog hidrotehničkog betona.

2. PRINCIPI PROJEKTOVANJA

Osnovni princip projektovanja gravitacionih betonskih brana, bilo od klasičnog ili valjanog betona, je da u svim uslovima eksploatacije budu **stabilne protiv klizanja i prevrtanja**. RCC brane su slične klasičnim i u pogledu čvrstoće na pritisak, koja po pravilu nije ograničavajući faktor. Osnovna razlika javlja se kod čvrstoće na zatezanje i smičuće čvrstoće duž kontakta između

slojeva valjanog betona, a posebno kod brana većih visina (preko 50 m) i strmijih nagiba nizvodne konture (strmijih od $V : H = 1 : 0,8$).

Pre početka proračuna potrebno je sagledati opterećenja koja mogu delovati na posmatranu konstrukciju, definisati moguće realne kombinacije opterećenja, geometrijske karakteristike preseka i uslove fundiranja. Osnovni uslovi za dobru vezu RCC brane i sredine u kojoj se temelji su odgovarajuće karakteristike stenske mase, čista temeljna spojnica i bokovi rečne doline sa odgovarajućom hrapavošću. Na taj način može se eliminisati, odnosno na najmanju meru smanjiti proviranje vode.

Osnovu za korektan projekat gravitacione brane (klasične i RCC) svakako čine geomehaničke podloge pregradnog profila. Analiza dosadašnjih incidenata na gravitacionim betonskim branama pokazuje da su osnovni uzroci rušenja po pravilu bili klizanje, ili erozija ispod temeljne spojnice. Zbog toga je neophodno dobro poznavanje svih osnovnih karakteristika fundamenta. Posebno je opasno ukoliko u steni ispod brane postoji potencijalna ravan klizanja. Rešenje je moguće iskopom temeljne spojnice ispod ove površine, ili povećanjem mase konstrukcije dok se ne dostigne potreban koeficijent sigurnosti protiv klizanja.

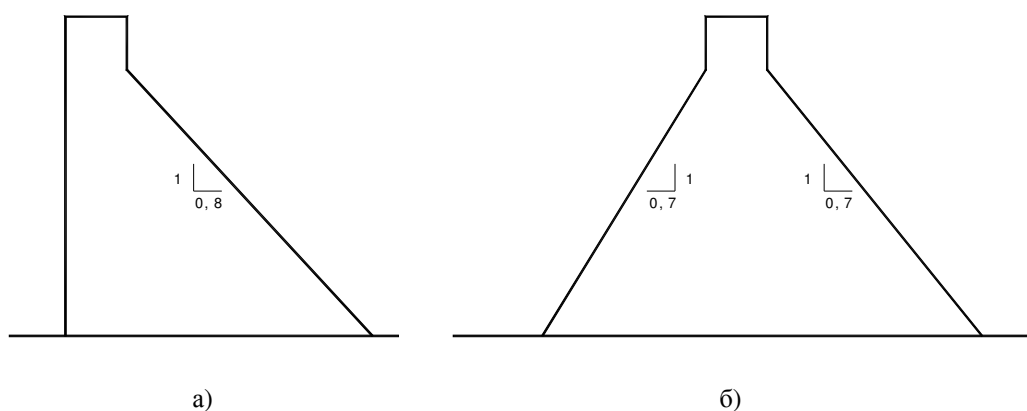
Kod brana od valjanog betona, pored navedenih postoje još dve mogućnosti. Ukoliko je klizna površ relativno uska gledano u pravcu ose brane, moguće je donji deo brane graditi bez vertikalnih razdelnica, čime se slaba zona premošćava. Ako je klizna površ previše široka, zakošenjem uzvodne i blažim nagibom nizvodne konture, uz upotrebu jeftinijeg RCC-a, može se povećati masa konstrukcije do težine potrebne da spreči klizanje.

Proračun brana od valjanog betona radi se pod pretpostavkom ravnog stanja deformacija, što omogućava da se konstrukcija aproksimira poprečnim presekom jedinične širine u pravcu ose brane. Ovako ravanski definisan problem rešava se metodom horizontalnih preseka, ili metodom konačnih elemenata.

3. OBLIK POPREČNOG PRESEKA

Da bi se potpunije objasnile mogućnosti izbora oblika poprečnog preseka brana od valjanog betona, najpre će se razmotriti dosadašnja praksa. Uobičajeni poprečni presek savremenih gravitacionih brana od klasičnog betona je približno trougaonog oblika, sa vertikalnom uzvodnom konturom i nizvodnom konturom u nagibu od 1:0,8 (slika 1.a). Ovakav, pomalo konzervativan oblik poprečnog preseka, omogućava odsustvo napona zatezanja, ili su oni veoma mali, bez obzira da li je akumulacija puna, ili prazna. U slučaju pune akumulacije mali naponi zatezanja mogu se javiti u blizini uzvodnog lica i to samo u donjoj zoni brane, neposredno iznad temeljne spojnice. Ako je akumulacija prazna, situacija je obrnuta: na uzvodnoj konturi su naponi pritiska, a na nizvodnoj mali naponi zatezanja.

Međutim, ako se isti oblik poprečnog preseka zadrži i kod veoma visokih brana (npr. viših od 100 m), usled delovanja hidrostatičkog pritiska i/ili seizmičkih uticaja, naponi zatezanja na uzvodnoj konturi u zoni temeljne spojnice mogu dostići vrednosti veće od dopuštenih. Zbog toga se kod ovakvih brana obično vrši zakošenje uzvodne konture, i/ili smanjenje nagiba nizvodne konture (blaže od 1:0,8).



Slika 1. Klasičan a) i "hardfill" b) tip poprečnog preseka RCC brana

Uobičajena količina cementa kod klasičnih brana je od 150 do 200 kg po m³ betona, što sa kvalitetnim i dobro graduisanim agregatom posle 90 dana daje beton čvrstoće preko 25 MPa. Ako se posmatraju maksimalni naponi pritiska u telu brane, ovako visoka čvrstoća je potpuno nepotrebna. Na primer, za branu visoku cca 100 m, maksimalni napon pritiska (koji se javlja na nizvodnoj konturi u zoni temeljne spojnice) je svega oko 2,5 MPa. To znači da "faktor sigurnosti" za čvrstoću na pritisak kod ovakve brane iznosi 10, a u slučaju brane visoke 50 m i preko 20, [16].

Postoji nekoliko razloga za upotrebu velike količine cementa, odnosno postizanje visoke čvrstoće na pritisak:

- 1) sa malom količinom cementa nije moguće postići homogen i lako ugradljiv klasičan beton;
- 2) visoka čvrstoća na pritisak garantuje dovoljno visoku čvrstoću na zatezanje i smičuću čvrstoću;
- 3) uslovi trajnosti i otpornosti na mraz mogu zahtevati veće količine cementa bar u zoni uzvodne i nizvodne konture.

Najvažniji je drugi razlog. Pojava napona zatezanja većih od dozvoljene čvrstoće betona na zatezanje na uzvodnoj konturi nije dozvoljena, jer može izazvati prsline u koje zatim ulazi voda, povećavajući sile uzgona i dovodeći u pitanje stabilnost brane. Pošto visoka čvrstoća na zatezanje onemogućava nastanak prslina, a čvrstoća na zatezanje je srazmerna čvrstoći na pritisak, očigledno je da se kod klasičnih brana dobijaju znatno veće čvrstoće na pritisak, odnosno koriste se veće količine cementa od potrebnih.

Kao odgovor na ovako "neprimerenu" i veoma skupu upotrebu klasičnog betona kod gravitacionih brana, pojavila se metoda valjanog betona. Nasuprot klasičnom betonu, RCC mešavine su izvanredno prilagodljive zahtevanoj čvrstoći. Ako je potreban beton visokog kvaliteta, RCC ga može dostići. Međutim, što je posebno važno, ukoliko nije potrebna velika čvrstoća moguće je napraviti ugradljiv valjani beton sa malom količinom vezivnih materijala.

Razmatraće se prethodni primer brane visoke 100 m, sada od valjanog betona, sa količinom cementa od 60 kg/m³. Istraživanja, [9], su pokazala da se dobijaju čvrstoće na pritisak od oko 12 MPa, što je više nego dovoljno za maksimalnih 2,5 MPa. Odgovarajuća čvrstoća na zatezanje od oko 1,5 MPa onemogućava pojavu prslina za statička opterećenja, pa čak i za zamljotres čija je horizontalna komponenta 0,1g, jer isti izaziva napone zatezanja od 1,3 MPa.

Ipak u prethodnoj analizi treba imati u vidu da je koeficijent sigurnosti za čvrstoću na zatezanje jedva malo veći od 1,0. Pored toga, čvrstoća na zatezanje u horizontalni spojnicama za RCC sa količinom cementa od 60 kg/m³ je manja od napona zatezanja usled zemljotresa. Rešenje je povećanje količine cementa na 120 kg po m³ betona, ili zakositi uzvodnu konturu u nagibu 1:0,1. Oba ova rešenja dovode do povećanja koeficijenta sigurnosti na 2,0.

Ovakva razmatranja dovela su do ideje da se uzvodna kontura još više zakosi, (npr. do 1:0,5) uz upotrebu jeftinog lokalnog agregata i minimalne količine cementa u valjanom betonu. Rezultati su bili više nego zanimljivi. Maksimalni naponi zateza usled zemljotresa bili su manji od čvrstoće betona na zatezanje, a čvrstoća na pritisak od 6 MPa sasvim dovoljna. Pored toga, ispostavilo se da je ovakva brana jeftinija od RCC brane klasičnog poprečnog preseka sa kvalitetnijim valjanim betonom.

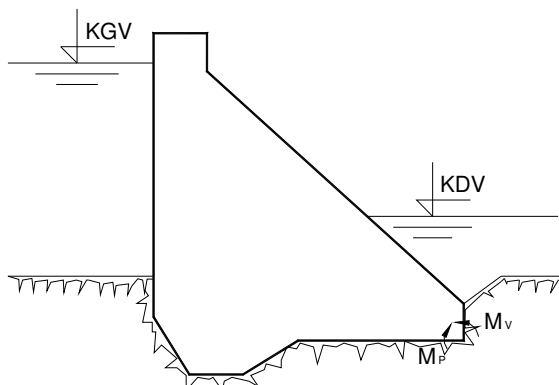
Dalja istraživanja francuskih stručnjaka dovela su do *simetričnog tipa* brana od valjanog betona sa nagibima obeju kontura od 1:0,7. Ovakav oblik poprečnog preseka (slika 1.b) potpuno je eliminisao pojavu napona zatezanja. Upotrebom jeftinog agregata i male količine cementa, sa membranom na uzvodnom licu brane kojom se rešava problem vodopropustljivosti, dobijen je takozvani "*hardfill*" tip RCC brana. Proračun napona usled zemljotresa, ili usled izuzetnog opterećenja od vode, pokazao je značajne prednosti ovog tipa brane u odnosu na RCC branu klasičnog poprečnog preseka. Dodatna prednost je da se "*hardfill*" tip može koristiti i za temeljenje u stenama veoma slabih mehaničkih karakteristika.

4. STABILNOST PROTIV PREVRTANJA

Proračun stabilnosti protiv prevrtanja brana od valjanog betona zasniva se na proračunu brana od klasičnog hidrotehničkog betona. Stabilnost protiv prevrtanja izražava se **koeficijentom sigurnosti protiv prevrtanja** (K_p) koji se po pravilu računa oko najniže nizvodne ivice konstrukcije, slika 2.

Koeficijent K_p predstavlja odnos momenata vraćanja, M_v , i momenta prevrtanja, M_p , i pokazuje da li je konstrukcija u stanju da preda momente sredini u koju je fundirana, a da pri tome ne dođe do njenog prevrtanja:

$$K_p = \frac{M_v}{M_p} \quad (1)$$



Slika 2. Proračun koeficijenta sigurnosti protiv prevrtanja

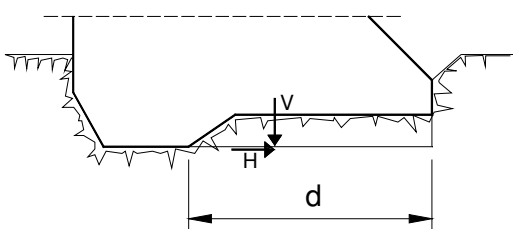
Dobijeni koeficijent K_p potrebno je uporediti sa minimalnim dozvoljenim vrednostima u zavisnosti od kombinacije opterećenja, [19], tabela 1.

Tabela 1. Minimalne dozvoljene vrednosti koeficijenta K_p

Kombinacija opterećenja	II	III	IV
min K_p	1,50	1,30	1,10

5. STABILNOST PROTIV KLIZANJA (SMICANJA)

Proračunom stabilnosti protiv klizanja kod RCC brana potrebno je dokazati da **koeficijent sigurnosti protiv klizanja** (K_k) zadovoljava minimalne dozvoljene vrednosti, kako za konstrukciju kao celinu, tako i za svaku horizontalnu spojnicu pojedinačno. Proračun se sprovodi za sve kombinacije opterećenja.



Slika 3. Proračun koeficijenta K_k za celu konstrukciju

Da bi se odredio **koeficijent K_k za konstrukciju kao celinu** treba nacrtati šemu opterećenja i u težištu najverovatnije moguće klizne ravni izračunati ukupnu horizontalnu i vertikalnu silu, (slika 3.). Detaljnim

istražnim radovima potrebno je definisati vrednost koeficijenta trenja i koheziju sredine u kojoj je RCC brana temeljena. Prema istraživanjima ACI, [10], koeficijent trenja u temeljnoj spojnici na relativno glatkom kontaktu stene i betona iznosi od 0,7 do 0,8.

Koeficijent K_k određuje se prema izrazima:
- za horizontalnu kliznu ravan

$$K_k = \frac{f \cdot V + c \cdot d}{H} \quad (2)$$

gde su:

V – ukupna vertikalna sila u (kN);

H – ukupna horizontalna sila u (kN);

f – koeficijent trenja;

c – kohezija duž klizne ravni (kN/m²);

d – dužina klizne ravni (m).

- za kosu kliznu ravan

$$K_k = \frac{f \cdot (V + H \cdot \operatorname{tg} \alpha) + c \cdot d \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)}{H - V \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (3)$$

gde je:

α – ugao nagiba klizne ravni ($^{\circ}$), a ostale oznake kao u prethodnoj formuli.

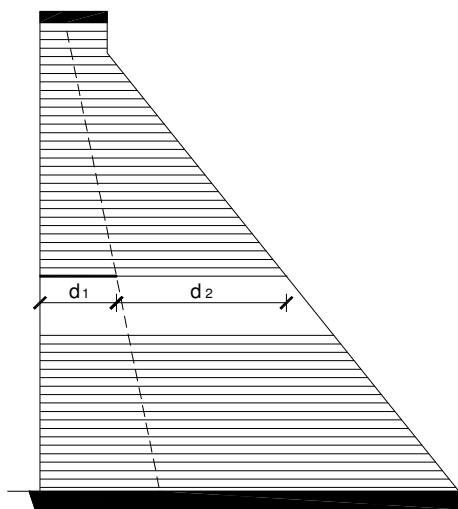
Dobijene koeficijente K_k treba uporediti sa minimalnim dozvoljenim vrednostima, u zavisnosti od kombinacije opterećenja. U tabeli 2. su date uobičajene vrednosti koje se usled nedostatka propisa koriste za brane od klasičnog betona u inženjerskoj praksi kod nas, [19], a koje se mogu primeniti i na RCC brane.

Tabela 2. Minimalne dozvoljene vrednosti koeficijenta K_k za konstrukciju

Kombinacija opterećenja	II	III	IV
min K_k bez kohezije	1,30	1,10	1,05
min K_k sa kohezijom	3,00	2,20	1,50

Koeficijent sigurnosti protiv klizanja (smicanja) (K_s) u horizontalnim spojnicama brana od valjanog betona može se odrediti prema izrazu (2), ali se donekle razlikuje od prethodno izloženog. Osnovna razlika se javlja zbog neravnomerne vrednosti kohezije i/ili koeficijenta trenja duž horizontalne spojnice i o ovome se mora voditi računa pri proračunu stabilnosti protiv smicanja.

Na slici 4. prikazan je poprečni presek RCC brane kod koje je u uzvodnoj zoni u svakoj horizontalnoj spojnici izveden sloj vezivnog maltera. Koeficijent K_s glasi:



Slika 4. Proračun koeficijenta K_s u horizontalnim spojnicama

$$K_s = \frac{(f_1 \cdot d_1 + f_2 \cdot d_2) \cdot \frac{V}{d} + c_1 \cdot d_1 + c_2 \cdot d_2}{H}, \quad (4)$$

gde su:

- f_1 – koeficijent trenja u zoni sa vezivnim malterom;
- f_2 – koeficijent trenja u zoni bez vezivnog maltera;
- c_1 – kohezija u zoni sa vezivnim malterom (kN/m^2);
- c_2 – kohezija u zoni bez vezivnog maltera (kN/m^2);
- d_1 – širina dela spojnice sa vezivnim malterom (m);
- d_2 – širina dela spojnice bez vezivnog maltera (m);
- a ostale oznake kao u formuli (2).

Određivanje parametara smičuće čvrstoće (kohezija i trenje) u horizontalnim spojnicama vrši se ispitivanjem uzoraka na smicanje i direktno zatezanje. U fazi projektovanja mešavine, uzorci se posebno proizvode za potrebe ispitivanja, a u fazi građenja i/ili eksploatacije dobijaju se vađenjem kernova iz probnog polja ili same brane. Ukoliko se pokaže da rezultati ispitivanja ne zadovoljavaju propisane vrednosti, neophodno je preduzeti jednu od sledećih mera (ili neku od njihovih kombinacija):

- korigovati sastav mešavine;
- promeniti oblik poprečnog preseka brane;
- modifikovati način ugrađivanja.

Prema [11], kod spojnica preko kojih je *blagovremeno ugrađen novi sloj* (zrelosti do cca 600°Ch), čvrstoća na smicanje je od 0,7 do 1,4 MPa, čak i kod posnih mešavina. Koeficijent trenja varira u granicama od 0,7

do 2,9, a najčešće iznosi od 1,0 do 1,4. Prema ovome, za početne faze projektovanja preporučuje se čvrstoća na smicanje od 0,7 MPa i koeficijent trenja 1,0. Ove vrednosti mogu se povećati ili smanjiti, u zavisnosti od kvaliteta agregata.

Koeficijent trenja u spojnicama kod kojih je naredni sloj *nanet nakon očvršćavanja prethodnog sloja* zavisi od hrapavosti prethodnog i ugradljivosti narednog sloja. Ako čvrstoća na smicanje u spojnici iznosi 50 do 75 % od čvrstoće na smicanje u sloju, koeficijent trenja u spojnicama sa vezivnim malterom iznosi od 0,70 do 1,05.

Stvarne vrednosti kohezije i koeficijenta trenja koje se koriste u glavnom projektu moraju se zasnivati na rezultatima ispitivanja i podacima o već izgrađenim branama sličnog kvaliteta agregata i količine vezivnih materijala. Projektant mora biti siguran da su usvojene pretpostavke i projektni kriterijumi realni i da se mogu postići sa usvojenim tipom konstrukcije i raspoloživim agregatom.

6. DIMENZIONISANJE

6.1. Opterećenja i kombinacije

Da bi se izvršilo dimenzionisanje brane od valjanog betona, potrebno je slediti praktično istu proceduru kao kod brana od klasičnog betona. Prvi korak je analiza mogućih opterećenja i njihova podela prema karakteru delovanja, učestalosti i mogućnosti kombinovanja. Pošto u našoj zemlji ne postoje propisi iz ove oblasti najpre će se prikazati preporuke USBR.

Prema preporukama USBR, [1], glavna opterećenja koja deluju na gravitacione betonske brane (pa prema tome i na brane od valjanog betona) su:

1. sopstvena težina;
2. pritisak vode na uzvodnu i nizvodnu konturu;
3. uzgon;
4. pritisak leda;
5. pritisak nanosa;
6. uticaji od temperature;
7. seizmički uticaji.

Navedena opterećenja svrstana su u četiri kombinacije:

1. Uobičajena (*usual*) – opterećenja od 1. do 6.;
2. Neuobičajena (*unusual*) – opterećenja od 1. do 6., s tim da je voda na koti maksimalnog uspora, tj. pri pojavi maksimalne velike vode (Maximum Probably Flood – MPF);
3. Izuzetna (*extreme*) – opterećenja od 1. do 7.;

4. Ostala (*other loadings and investigations*) – sastoji se od tri nezavisne kombinacije opterećenja:
- 4.1. prva ili druga kombinacija uz pretpostavku da ne funkcioniše drenažni sistem;
 - 4.2. samo opterećenje od sopstvene težina;
 - 4.3. projektantova kombinacija opterećenja – kod specifičnih hidrotehničkih konstrukcija, kod kojih prethodne kombinacije ne obuhvataju sve moguće nepovoljne slučajevne opterećenja.

Prema projektantskoj praksi u našoj zemlji, [8], najvažnija opterećenja koja deluju na gravitacione betonske brane se mogu podeliti na:

- osnovna opterećenja:
 1. sopstvena težina;
 2. težina stene;
 3. pritisak vode na koti normalnog uspora (KNU);
 4. uzgon za vodu na KNU;
 5. pritisak nanosa;
- dopunska opterećenja:
 6. uticaji od temperature;
- izuzetna opterećenja:
 7. pritisak vode na koti maksimalnog uspora (KMU);
 8. uzgon za vodu na KMU;
 9. seizmičko opterećenje.

Imajući u vidu projekte najvažnijih gravitacionih betonskih brana izgrađenih u našoj zemlji, navedena opterećenja se, [8], grupišu u sledeće kombinacije opterećenja.

Prva kombinacija predstavlja opterećenje konstrukcije neposredno po završetku građenja. To znači da proračun treba uraditi samo za **delovanje sopstvene težine**.

Druga kombinacija obuhvata **osnovna opterećenja**: sopstvena težina, težina stene, pritisak vode na KNU, uzgon za vodu na KNU (pretpostaviti da injekciona zavesa i/ili drenaža funkcioniše prema kriterijumima USBR) i pritisak nanosa.

Treća kombinacija predstavlja **izuzetno opterećenje od vode**. Znači da konstrukciju treba sračunati za delovanje

- osnovnih opterećenja:
 - sopstvena težina,
 - težina stene,
 - pritisak nanosa,
- izuzetnih opterećenja:
 - pritisak vode na KMU,
 - uzgon za vodu na KMU (injekciona zavesa i drenaža ne rade) i
- dopunskog opterećenja od temperature.

Četvrta kombinacija analizira **izuzetno opterećenje usled delovanja zemljotresa**. Znači da uticajima iz druge kombinacije treba dodati uticaje usled zemljotresa i uticaje od temperature.

6.2. Dozvoljeni naponi i faktori sigurnosti

Maksimalni dopušteni naponi pritiska za gravitacionu branu od valjanog betona usvajaju se u zavisnosti od kombinacije opterećenja i čvrstoće betona na pritisak. Prema preporukama USBR-a, [1], [3],:

$$\sigma_p^{\text{dop}} = \frac{f_p}{a}, \quad (5)$$

gde je:

σ_p^{dop} – maksimalni dopušteni napon pritiska;

f_p – čvrstoća betona na pritisak;

a – koeficijent sigurnosti u zavisnosti od kombinacije opterećenja.

Tabela 3. Vrednosti koeficijenata sigurnosti kod dopuštenih napona pritiska

Kombinacija opterećenja	II	III	IV
a	3,0	2,0	1,1

Maksimalne dopuštene vrednosti napona zatezanja za branu od valjanog betona usvajaju se prema analogiji sa Pravilnikom BAB 87, član 123, [4], u kome se daju dopušteni ivični naponi pri zatezanju u nearmiranom hidrotehničkom betonu:

$$\sigma_z^{\text{dop}} = \frac{\sigma_p^{\text{dop}}}{10}, \quad (6)$$

Za delovanje seizmičkog opterećenja, dopušteni napon zatezanja se prema kriterijumima USBR-a uvećava faktorom 1,50 u odnosu na statičku vrednost σ_z^{dop} .

6.3. Ostali kriterijumi

Prvi uslov za dimenzionisanje: Potrebno je da vertikalni normalni napon na nizvodnoj konturi poprečnog preseka brane za I kombinaciju opterećenja bude napon pritiska, [19],:

$$\sigma_{v,n} > 0, \text{ za I k.o.} \quad (7)$$

Drugi uslov za dimenzionisanje: Potrebno je da manji glavni napon na uzvodnoj konturi poprečnog preseka brane za II i III kombinaciju opterećenja bude napon pritiska:

$$\sigma_{1,u} > 0, \text{ za II i III k.o.} \quad (8)$$

Treći uslov za dimenzionisanje: Potrebno je da maksimalni napon pritiska u telu brane od valjanog betona bude manji od dopuštenog napona pritiska u betonu na tom mestu preseka:

$$\max \sigma_p < \text{dop} \sigma_p \quad (9)$$

Četvrti uslov za dimenzionisanje: Potrebno je da maksimalni napon zatezanja u telu brane od valjanog betona bude manji od dopuštenog napona zatezanja u betonu na tom mestu preseka:

$$\max \sigma_z < \text{dop} \sigma_z \quad (10)$$

Peti uslov za dimenzionisanje: Potrebno je da maksimalni smičući napon u telu brane od valjanog betona bude manji od dopuštenog smičućeg napona u betonu na tom mestu preseka:

$$\max \tau < \text{dop} \tau \quad (11)$$

6.4. Kriterijumi stabilnosti fundamenta

Kriterijumi stabilnosti fundamenta proističu iz analize naprezanja u temeljnoj spojnici. Temeljna spojnica predstavlja spoj temelja konstrukcije brane od valjanog betona sa stenskom masom u kojoj je brana temeljena. Da bi se ispitala stabilnost fundamenta potrebno je:

- odrediti ukupne uticaje u težištu preseka temeljne spojnice;
- izračunati vertikalne normalne napone u temeljnoj spojnici;
- dobijene napone uporediti sa dopuštenim naponima za oslonačku stenu.

Prvi kriterijum: Čvrstoća stene pri zatezanju se zanemaruje pa zato **u temeljnoj spojnici ne smeju da se javе naponi zatezanja.**

Drugi kriterijum propisuje dopušteno naprezanje stene pri pritisku u temeljnoj spojnici. Na osnovu izvršenih istražnih radova usvaja se **čvrstoća monolita na pritisak** (σ_m), a pomoću nje i **računska čvrstoća stene na pritisak** (σ_s):

$$\sigma_s = \frac{\sigma_m}{20} \quad (12)$$

Usvajaju se dozvoljeni naponi pritiska u steni u temelju gravitacione brane od valjanog betona, prema kriterijumima USBR za gravitacione betonske brane kao

$$\text{dop} \sigma_s = \frac{\sigma_s}{k} \quad (13)$$

gde je:

- $\text{dop} \sigma_s$ – dozvoljeni naponi pritiska u steni;
- k – koeficijent sigurnosti koji zavisi od kombinacije opterećenja za koju se računa dozvoljeni napon pritiska u steni.

Tabela 4. Vrednosti koeficijenta sigurnosti napona pritiska u steni (k)

Kombinacija opterećenja	II	III	IV
k	4,0	2,7	1,3

7. UTICAJ SEIZMIKE

Uticaj seizmike na gravitacione brane od valjanog betona praktično se ne razlikuje od uticaja na brane od klasičnog betona. Pri delovanju zemljotresa nastaju sledeća opterećenja:

- inercijalna sila od sopstvene težine;
- dinamički pritisak vode;
- aktivan seizmički pritisak nanosa;
- aktivan i pasivan seizmički pritisak zemlje;
- seizmički pritisak talasa vode.

Od navedenih opterećenje, pri analizi delovanja zemljotresa na brane od valjanog betona najčešće se uzimaju inercijalna sila od sopstvene težine i dinamički pritisak vode. Proračun ovih uticaja može se raditi približnim ili tačnijim metodama seizmike.

Inercijalne seizmičke sile usled sopstvene težine konstrukcije u proračunu opšte stabilnosti i dimenzionisanju obično se određuju približnom statičkom metodom koeficijenata:

$$P_i = G_i \cdot \alpha \cdot k_s \quad (14)$$

gde je:

G_i – sopstvena težina posmatranog dela konstrukcije, (slika 5.);

$\alpha = 1 + 0,5 \cdot \frac{h_1}{h_2}$ – koeficijent položaja;

h_1 – rastojanje težišta posmatranog preseka od kote uklještenja;

h_2 – rastojanje težišta dela brane iznad uklještenja od kote uklještenja;

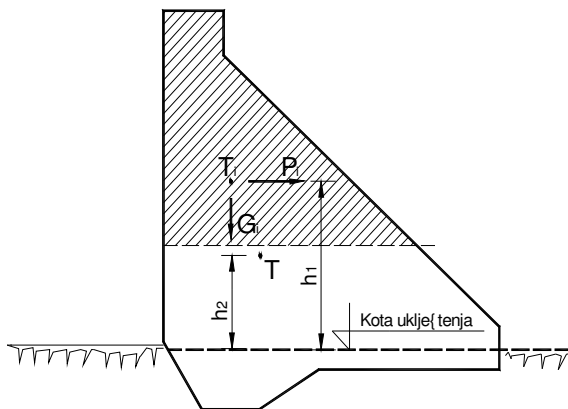
k_s – koeficijent seizmičnosti.

Dinamički pritisak vode usled delovanja zemljotresa u proračunu opšte stabilnosti i dimenzionisanju računati prema Zangar-ovom postupku, [19]:

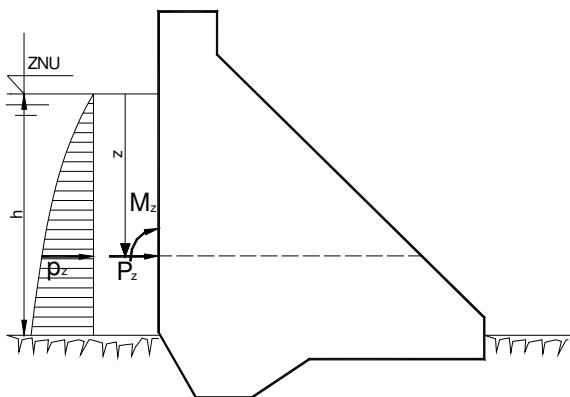
$$p_z = C \cdot \alpha_s \cdot \gamma_v \cdot h, \quad (15)$$

gde je

p_z – ordinata hidrodinamičkog pritiska na dubini "z" od nivoa vode, (slika 6.);



Slika 5. Proračun inercijalne seizmičke sile



Slika 6. Proračun dinamičkog pritiska vode usled zemljotresa

C – koeficijent seizmičkog pritiska, dat izrazom:

$$C = 0,5 \cdot C_m \cdot \left[\frac{z}{h} \cdot \left(2 - \frac{z}{h} \right) + \sqrt{\frac{z}{h} \cdot \left(2 - \frac{z}{h} \right)} \right];$$

C_m – maksimalna vrednost koeficijenta seizmičkog pritiska;

z – dubina vode na kojoj se traži veličina p_z ;

h – najveća dubina vode ispred brane;

$\alpha_s = \frac{\max a}{\mu}$ – koeficijent seizmičkog intenziteta;

$\max a$ – maksimalno horizontalno ubrzanje tla;

μ – faktor duktilnosti;

γ_v – zapremnska težina vode.

Horizontalna sila hidrodinamičkog pritiska na dubini "z" (P_z) i njen moment (M_z), dobijaju se odgovarajućom integracijom opterećenja p_z kao:

$$P_z = 0,726 \cdot p_z \cdot z \quad (16)$$

$$M_z = 0,299 \cdot p_z \cdot z^2. \quad (17)$$

Za slučaj kose konture javljaju se i vertikalne komponente hidrodinamičke sile i momenta, koje se računaju analogno izloženom postupku, samo što opterećenje deluje na horizontalnu projekciju posmatrane kose konture.

Dinamički proračun brana od valjanog betona treba raditi metodom analize spektra odgovora konstrukcije, uz pomoć metode konačnih elemenata. Pri tome na odgovarajući način modelirati interakciju konstrukcije sa akumulacijom i stenskom masom.

8. TERMIČKA ANALIZA

S obzirom na znatno manje količine cementa po jedinici zapremine RCC-a u odnosu na klasičan beton, moglo bi se zaključiti da je analiza uticaja temperature kod brana od valjanog betona nepotrebna. Međutim, iako je toplota hidratacije relativno niska, iskustva sa dosadašnjih brana pokazuju da je termička analiza neophodna, naročito kod visokih brana. Uzrok ovome je:

- kraće vreme građenja;
- tehnologija ugrađivanja u slojevima;
- izloženost površine slojeva temperaturnim uticajima sredine,

čime se u velikoj meri onemogućava odavanje toplote. Kao posledica, dolazi do pojave termičkih napona zatezanja i dilatacija. Ukoliko je napon veći od čvrstoće betona na zatezanje, odnosno ukoliko je dilatacija veća od granične dilatacije, javiće se prslina.

Istraživanja, [10], pokazuju da su glavni razlozi koji utiču na pojavu prslina:

- porast temperature u masi RCC-a ubrzo po ugrađivanju;
- hlađenje tela brane do prosečne godišnje temperature vazduha;
- tečenje;
- ograničenost promene zapremine tj. "ukleštenost" dela konstrukcije.

Prsline se po pravilu pojavljuju u toku prve ili druge zime po završetku građenja. Najčešća mesta nastanka su na uzvodnom i nizvodnom licu brane, u blizini temeljne spojnice, gde je ograničenost promene zapremine najveća. Daljim hlađenjem betona po dubini, prsline se propagiraju vertikalno naviše i horizontalno prema unutrašnjosti. Ako je promena zapremine dovoljno velika, horizontalne prsline se mogu razviti kroz čitav poprečni presek brane, od uzvodnog do nizvodnog lica. Razvoj prsline u vertikalnom pravcu pre svega je uslovljen ograničenošću promene zapremine unutar mase koja najviše zavisi od dužine brane u zoni temeljne spojnice.

Pojava prsline može biti uslovljena i brzim hlađenjem horizontalnih spojnica u odnosu na unutrašnjost slojeva, jer je ograničeno skupljanje površine sloja. Dubina ovih prsline obično iznosi od 0,5 do 1,0 m, [10]. Međutim, ako je razlika u temperaturi suviše velika, prsline će se proširiti u vertikalnoj ravni po čitavoj površini poprečnog preseka. Termička analiza obuhvata:

- 1) proračun temperaturnog polja;
- 2) proračun termičkih napona;
- 3) proračun prsline.

Proračun temperaturnog polja treba da predvidi temperaturu u svakoj tački tela brane u bilo kom trenutku vremena. Stoga je neophodno raspolagati detaljnim podacima o *klimatskim uslovima* u zoni brane, *termičkim* (i mehaničkim) *osobinama materijala* i *uslovima ugrađivanja valjanog betona*.

Poznavanje klimatskih uslova važno je kako zbog tačnog određivanja temperature u konstrukciji, tako i za optimizaciju dinamičkog plana izgradnje brane. Da bi se odredile temperature na spoljašnjim površinama (uzvodno i nizvodno lice i horizontalna površina sloja) treba poznavati dnevne i noćne spoljašnje temperature. Takođe, u slučajevima gde uzvodno i nizvodno lice imaju značajno različitu izloženost sunčevim zracima, treba znati i količinu apsorbovane solarne energije po jedinici površine konstrukcije.

Termičke i mehaničke osobine materijala podrazumevaju ne samo osobine valjanog betona, već i sredine u kojoj je brana temeljena, klasičnog betona i vezivnog maltera. Osnovne veličine su:

- toplota hidratacije;
- difuzija;
- provodljivost;
- koeficijent termičkog širenja;
- čvrstoća na zatezanje;
- modul elastičnosti;

- granična dilatacija;
- koeficijent tečenja.

Toplota hidratacije zavisi pre svega od vrste i količine vezivnih materijala i znatno je niža nego kod klasičnog betona. Najčešće se izražava u W/m^3 , uz podatak o ukupnom trajanju procesa oslobađanja toplote. Prema podacima francuskih istraživača, [9], toplota hidratacije za valjane betone sa istom količinom vezivnih materijala ($120 kg/m^3$) može biti veoma različita:

brana Riou $25 W/m^3$ za 168 časova;

brana Petit-Saut $100 W/m^3$ za 48 časova,

pa je neophodna veoma detaljna termomehanička studija da bi se precizno odredio ovaj parametar.

Difuzija predstavlja odnos termičke provodljivosti i toplotnog kapaciteta po jedinici zapremine i izražava se u mm^2/s . Najčešće vrednosti su od 0,7 do 1,1 mm^2/s i nešto su više nego kod klasičnog betona (oko 0,8 mm^2/s).

Provodljivost toplote izražava se u $W/(m \cdot K)$. Za većinu valjanih betona, vrednosti se mogu uzeti iz literature, jer je na osnovu dosadašnjih ispitivanja zaključeno da se praktično ne razlikuje od provodljivosti klasičnog betona i iznosi 2,0 $W/(m \cdot K)$.

Koeficijent termičkog širenja se obično određuje na osnovu laboratorijskih uzoraka i kao kod klasičnog betona izražava se u $1/^\circ C$. Uobičajene vrednosti su približno 10 % niže nego kod klasičnog betona, pa se usvaja koeficijent od $0,9 \cdot 10^{-5} /^\circ C$.

Ostale navedene veličine koje se koriste u proračunu temperaturnog polja predstavljaju mehaničke karakteristike i one su opisane u osobinama valjanog betona.

Uslovi ugrađivanja presudno utiču na početnu temperaturu ugrađenog valjanog betona. Najčešće se odnose na srednju temperaturu u periodu transporta i ugrađivanja, temperaturu agregata i vreme između ugrađivanja dva uzastopna sloja. Ovi uslovi moraju biti definisani pre početka građenja brane, a njihovo beleženje svakodnevno.

Na osnovu svih navedenih podataka vrši se proračun temperaturnog polja u telu brane tokom vremena. Po pravilu se koristi dvodimenzionalni model, a proračun se radi metodom konačnih elemenata. Proračunom treba odrediti period maksimalnog gradijenta temperature između unutrašnjosti i kontura brane, kao i vreme izjednačavanja temperature betona u telu brane i

spoljašnje temperature vazduha. Ovo omogućava definisanje kriterijuma za završetak proračuna, jer nakon tog trenutka temperatura u telu brane više ne zavisi od toplote hidratacije. Po pravilu, kritični periodi su prva zima nakon završetka građenja i/ili prvo punjenje akumulacije.

Proračun termičkih napona sastoji se od *modeliranja geometrijskih karakteristika brane, izbora modela mehaničkog ponašanja valjanog betona, usvajanja mehaničkih karakteristika betona i proračuna napona*. Proračun treba uraditi za kritičan dan, kada je temperatura vazduha najniža, jer je tada najveća razlika između temperature betona prilikom ugrađivanja i temperature na spoljašnjim površinama brane. U tom trenutku, termički efekti izazivaju najveće napone zatezanja u blizini uzvodnog i nizvodnog lica brane, pa je najveća i mogućnost pojave prslina.

Modeliranje geometrijskih karakteristika brane vrši se pomoću 3D mreže konačnih elemenata. Na taj način može se obuhvatiti pojava termičkih napona u pravcu ose brane, između dve obale, jer su oni najznačajniji u smislu rizika od pojave prslina. Ovim se uzima u obzir uticaj ograničenosti promene zapremine u temeljnoj spojnici. Konstrukcija se deli na lamele između vertikalnih konstruktivnih razdelnica i proračun se radi nezavisno za svaku lamelu.

Izbor modela mehaničkog ponašanja valjanog betona treba da se zasniva na realnom ponašanju konstrukcije. Pri tome treba imati u vidu da čak ni kada je valjani beton veće starosti, njegovo ponašanje nije ni elastično (uticaj tečenja i skupljanja), ni linearno (modul elastičnosti raste sa vremenom). Zbog toga principijelno postoje dva moguća modela mehaničkog ponašanja:

- kvazielastičan linearan model
- nelinearan model.

Kvazielastičan linearan model omogućava postizanje dobre aproksimacije naponskog stanja u brani primenom linearne termo-elastične analize. Skupljanje se uvodi u obliku zadate deformacije, a tečenje smanjenjem modula elastičnosti. Naponi dobijeni pomoću ovog modela su po pravilu precenjeni. Precenjenost je veća ukoliko stvarno ponašanje više odstupa od linearnog.

Nelinearan model zasniva se na uvođenju nelinearnih pojava, posebno oštećenja betona i njegove zrelosti. Nelinearnim modelom određuju se naponi u bilo kom

trenutku vremena, pri čemu se koristi prethodno naponsko stanje (koje takođe mora biti sračunato).

Da bi se model primenio pri određivanju termomehaničkog ponašanja brane u fazi građenja, neophodna je njegova prethodna verifikacija na već izgrađenim konstrukcijama.

Usvajanje mehaničkih karakteristika valjanog betona vrši se na osnovu rezultata ispitivanja na laboratorijskim uzorcima i na probnom polju. Neophodne veličine za termo-elastičnu analizu konstrukcije su: modul elastičnosti, koeficijent tečenja, Poasonov koeficijent, koeficijent termičkog širenja, vreme vezivanja, dilatacija skupljanja i čvrstoća na zatezanje.

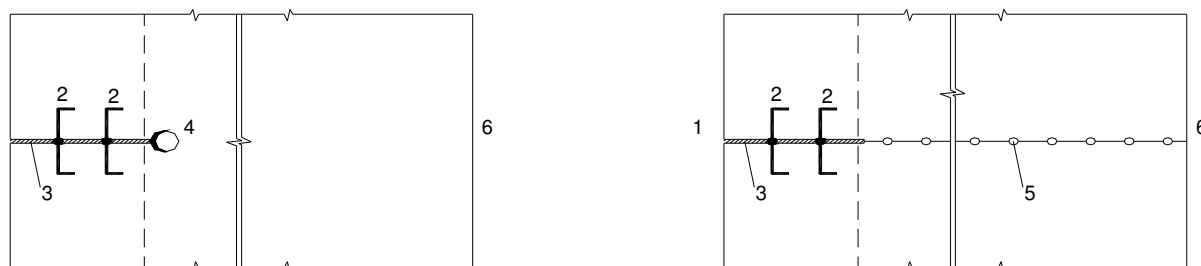
Proračun prslina sledi iz proračuna naponsko-deformacijskog stanja konstrukcije. Opisanim postupkom najpre se određuju dilatacije, a na osnovu njih termički naponi zatezanja. Potom se porede horizontalni naponi u pravcu ose brane sa čvrstoćom valjanog betona na zatezanje i procenjuje mogućnost pojave prslina. Na osnovu toga usvajaju se razdelnice kojima se ograničavaju naponi i sprečava pojava prslina usled uticaja temperature.

9. RAZDELNICE

Pojava prslina u gravitacionim branama od valjanog (kao i od klasičnog) betona narušava izgled brane, smanjuje trajnost i povećava procurivanje. Zato je neophodna stroga kontrola pojave prslina, naročito onih koje se prostiru po čitavoj visini i širini brane, od uzvodnog do nizvodnog lica. Rastojanje između ovakvih prslina predstavlja "*kritično rastojanje*", [9], i prvenstveno zavisi od promene temperature, ograničenosti promene zapremine u zoni temeljne spojnice i čvrstoće betona na zatezanje.

Transverzalne razdelnice (Transverse Contraction Joints) predstavljaju glavnu konstruktivnu meru kojom se sprečava pojava prslina usled termičkih napona zatezanja. One se postavljaju u ravnima upravnim na osu brane (vertikalne transverzalne razdelnice) na rastojanju manjem od *kritičnog rastojanja*. Na taj način se ograničavaju naponi i onemogućava pojava prslina usled uticaja temperature. Postoji nekoliko pravila, [15], koja određuju mesta gde se "obavezno" postavljaju razdelnice:

- na mestima gde se značajno menja oblik pregradnog profila;
- sa obe strane prelivnog dela brane;
- na mestima gde postoje značajne razlike u betoniranju.



Slika 7. Razdelnice Tip 1 i Tip 2: 1-uzvodna kontura, 2-zaptivna traka, 3-ispuna, 4-drenažna bušotina, 5-indukcione bušotine, 6-nizvodna kontura

Položaj ostalih razdelnica proističe iz termičkog proračuna. Karakterističan izgled razdelnica u branama od valjanog betona prikazan je na slici 7. Tip 1 je kratka razdelnica sa drenažnom bušotinom, a tip 2 se često naziva "poštanska marka", jer bušotine kojima se slabi ravan razdelnice i indukuje položaj prslina podsećaju na njih.

U početku izgradnje brana od valjanog betona (naročito u SAD) smatralo se da upotreba razdelnica nije neophodna, [3], jer je zbog manje količine cementa i dodatka pucolana znatno manja toplota hidratacije. Zato su sve RCC brane u SAD (do 1988. godine) izgrađene bez razdelnica. Međutim, ubrzo je postalo jasno da pitanje razdelnica nije moguće tretirati tako jednostrano. U prilog tome išle su i brojne prsline i pojava procurivanja na branama Willow Creek, Middle Fork, Winchester, Galesville, idr. Osnovni zaključci sa ovih brana su sledeći:

- prsline su se najčešće javljale posle iznenadnih padova spoljašnjih temperatura neposredno nakon završetka građenja, ili za vreme prekida betoniranja;
- prsline su se obično javljale na mestima diskontinuiteta (promene u poprečnom preseku, ispusti, isl.);

- pravac pružanja prslina je bio od uzvodne ka nizvodnoj konturi;
- procurivanje je bilo umereno, ali relativno veliko u poređenju sa procurivanjem kroz telo brane i horizontalne spojnice;
- mere za smanjenje vodopropustljivosti (tretman prslina na uzvodnom licu, injektiranje brane, isl.) su davale izvesne rezultate, ali nisu mogle potpuno eliminisati procurivanje;
- usled kalcifikacije i/ili zapunjavanja prslina finim česticama nanosa iz akumulacije, procurivanje je po pravilu bilo znatno manje posle izvesnog perioda eksploatacije.

Da bi se stekao uvid u odnos dimenzija brane, temperaturnih uticaja i širina lamela, tj. rastojanja između transverzalnih razdelnica, u tabeli 5. su prikazani podaci za nekoliko kineskih brana, [15]. Kao što se može uočiti, rastojanje između vertikalnih razdelnica varira od 15 m (kao kod brana od klasičnog betona) do 70 m, pa i više, u zavisnosti od konkretnih topografskih i klimatskih uslova i sastava mešavine.

Tabela 5. Podaci o transverzalnim razdelnicama kod kineskih brana

Ime brane	Visina (m)	Dužina (m)	Širina temelja (m)	Prosečna godišnja t (°C)	Max pros. mesečna t (°C)	Min pros. mesečna t (°C)	Rastojanje razdelnica (m)
Panjiakou	25	277	36	9,9	25,0	-8,1	57
Tonjiezi	88	1029	81	17,0	26,0	7,6	16-21
Shuikou	101	191	68	19,6	25,5	10,0	40
Yantan	111	525	73	20,4	27,3	11,6	20-46
Jinjiang	60	229	38	19,5	35,5	0,4	15
Daguangba	57	719	42	24,3	33,0	24,6	20-40
Jiangya	128	336	105	16,7	28,4	4,8	25
Shibanshui	84	445	60	18,3	29,0	7,5	41-70
Dachaoshan	118	480	85	20,5	25,3	12,8	18-36

Pored transversalnih razdelnica – u pravcu uzvodno-nizvodno, iskustva japanskih stručnjaka su pokazala da kod veoma visokih brana (viših od cca 150 m) može postojati i potreba za vertikalnim longitudinalnim razdelnicama – u pravcu ose brane. Zbog toga se građenje ovakvih brana može predvideti u fazama, pri čemu spoj delova konstrukcije prve i druge faze predstavlja longitudinalnu razdelnicu.

10. ZAPTIVKE

Zaptivke se postavljaju u transversalnim razdelnicama sa ciljem da onemoguće procurivanje vode kroz razdelnicu, slika 7. Materijal, položaj, oblik, veličina, broj i ostale osobine zaptivnih traka slične su kao kod brana od klasičnog betona.

Zaptivne trake se rade najčešće od bakra ili od gume. Širina je orijentaciono od 25 do 80 cm; oblik je profilisan da bi se obezbedio što bolji kontakt sa betonom. Po pravilu zaptivke se postavljaju na rastojanju od cca 50 cm od uzvodne i nizvodne konture. Često se sa uzvodne strane postavljaju dve zaptivne trake i tada je rastojanje između njih takođe cca 50 cm. Prostor od konture do zaptivnih traka ispunjava se mikroporoznim materijalima.

11. GALERIJE

Funkcija galerija kod brana od valjanog betona slična je kao kod klasičnih betonskih brana. Međutim, veoma je važno da predviđeni broj galerija bude minimalan, jer su istraživanja pokazala da je produktivnost 15 % manja prilikom ugrađivanja slojeva kroz koje prolaze galerije.

Zbog toga je u velikom broju RCC brana primenjena samo jedna galerija, u zoni temeljne spojnice. Ova galerija ima višestruku funkciju:

- za pregled tela brane;
- za pristup instrumentima za osmatranje;
- za prikupljanje procednih voda iz dranežnih bušotina;
- za injektiranje.

Dimenzije galerije treba da budu dovoljno velike da obezbede nesmetano obavljanje svih funkcija (posebno injektiranja), ali principijelno što manje zbog smanjenja troškova. Uobičajen oblik poprečnog preseka (svetlog otvora) je potkovičast, širine 2,5 – 3,5 m i visine 3,0 do 4,0 m. Sa spoljašnje strane oblikovanje treba da bude pravolinijsko, bez zaobljenih delova, jer se na taj način omogućava lakše i efikasnije ugrađivanje valjanog

betona. Posebnu pažnju treba posvetiti dimenzionisanju zidova i svoda galerije da ne bi došlo do pojave prslina.

12. KONTROLA PROCURIVANJA

Na osnovu svih dosadašnjih iskustava, kontrola procurivanja je jedan od glavnih zadataka prilikom projektovanja brana od valjanog betona. Procurivanje može biti kroz sredinu u kojoj je brana fundirana, ili kroz telo brane.

Procurivanje kroz sredinu kontroliše se najpre izborom pregradnog profila koji treba da bude vododrživ, od materijala sa malim koeficijentima vodopropustljivosti. Prilikom izgradnje temelja brane i uklanja sloja raspadnute stene ne sme se minirati do linije temeljne spojnice, već se poslednjih cca 50 cm kopa pikhamerima. Na ovaj način sprečava se pojava pukotina u temelju. Konačno, primenjuju se razne antifiltracione mere (injekciona zavesa, drenažni sistem, uzvodni zastor, isl.) kojima se takođe smanjuje procurivanje kroz pregradni profil. Sve ove mere su iste kao kod klasičnih betonskih brana.

Da bi se onemogućilo procurivanje kroz telo brane, odnosno da bi se svelo na najmanju meru, pre svega treba obezbediti odgovarajući sastav mešavine, dobro ugrađivanje slojeva i kvalitetnu vezu u horizontalnim spojnica. Takođe, termičkim proračunom i postavljanjem transversalnih razdelnica treba sprečiti pojavu prslina. Ovo su mere koje su sastavni deo svakog projekta. Pored toga, moguće je preduzimanje dodatnih mera za kontrolu procurivanja:

- izgradnja uzvodne konture od klasičnog hidrotehničkog betona;
- postavljanje vodonepropusne membrane na uzvodnom licu;
- obrada horizontalnih spojnica vezivnim malterom;
- upotreba kvalitetnijeg RCC-a na uzvodnom delu brane;
- izrada drenažnih bušotina i drenažne galerije u telu brane.

Izgradnjom uzvodne konture od klasičnog hidrotehničkog betona dobija se vodonepropustljiva barijera koja sprečava procurivanje i istovremeno ima veliku otpornost na mraz. Ovo rešenje se veoma često koristi. Debljina obloge je od 1,0 do 2,0 m, sa proširenjem u zoni galerija, tako da sa poprečnim presekom galerije čini celinu. Obloga obezbeđuje dobru vezu sa krunom brane i temeljnom spojnicom. Na

mestima transversalnih razdelnica u oblozi se postavljaju zaptivne trake.

Vodonepropusna membrana na uzvodnom licu se u poslednje vreme često primenjuje. Problemi koji se mogu javiti su zaštita membrane od oštećenja i trajnost, jer ne postoje podaci o ponašanju ovih materijala posle 30 ili 50 godina. Međutim, s obzirom na veliki napredak u tehnologiji materijala, garancije proizvođača i razliku u ceni u odnosu na ostale mere, upotreba vodonepropusnih membrana postaje veoma konkurentna.

Obrada horizontalnih spojnica vezivnim malterom primenjuje se i samostalno i kao dodatna mera za sprečavanje procurivanja. Ukoliko se primenjuje samostalno, obično se čitava površina horizontalnih spojnica pokriva slojem ovog "sitnozrnog betona". U suprotnom, dovoljna je obrada na delu uz uzvodnu konturu, približno 20 % od širine spojnice, ali je uslov da je vodopropustljivost po visini sloja kao kod klasičnih betona, (slika 4.).

Upotreba kvalitetnijeg RCC-a na uzvodnom delu brane uspešno je primenjena na znatnom broju brana, naročito u kombinaciji sa obradom spojnica vezivnim malterom. Nedostatak ove mere je naizmenična proizvodnja dve vrste valjanog betona, brojnija (i skuplja) mehanizacija i obimnija kontrola kvaliteta.

Izrada drenažnih bušotina i drenažne galerije u telu brane po pravilu se koristi kao dodatna mera osiguranja od procurivanja. Obično se na rastojanju od 3,0 do 5,0 m od uzvodne konture buše vertikalne (ili približno vertikalne) bušotine koje počinju od kote maksimalnog uspora i završavaju se u drenažnoj galeriji u zoni temeljne spojnice. Kod brana veće visine nekada se rade i 2 – 3 drenažne galerije koje se nalaze jedna ispod druge na približno jednakom rastojanju.

13. TEMELJENJE

Sredina u kojoj se mogu temeljiti brane od valjanog betona praktično je ista kao za klasične betonske brane. To znači da se, po pravilu, zahteva stenovita podloga. Pojedine zone mogu biti slabijih mehaničkih karakteristika, sa prosljocima od gline i zonama smicanja. Tada se pre početka izgradnje brane vrši injektiranje, armiranje ili čak kompletan iskop zone slabijeg kvaliteta i popunjavanje klasičnim betonom.

Najvažnije mehaničke karakteristike stenske mase koju utiču na uslove temeljenja su:

- čvrstoća na pritisak;
- smičuća čvrstoća;
- modul deformacije;
- Poasonov koeficijent;
- koeficijent vodopropustljivosti.

Da bi se pravilno ocenili uslovi temeljenja potrebno je uraditi proračun konstrukcije i sadejstvujuće stenske mase. Ako je modul deformacije stene približno ujednačen po čitavoj površini temeljne spojnice, može se raditi 2D analiza. U suprotnom, neophodan je 3D proračun da bi se obuhvatila preraspodela napona i otkrili delovi temeljne spojnice kod kojih naponi mogu biti znatno veći od dopuštenih.

Ako je stena dobrih mehaničkih karakteristika, praktično ne postoji ograničenje visine brana od valjanog betona, a poprečni presek je kao kod gravitacionih brana od klasičnog betona. Međutim, ukoliko je stena slabijeg kvaliteta, visoke RCC brane mogu se graditi, jedino ako se poprečni presek prilagodi uslovima temeljenja – "*hardfill*" tip brane, [16]. Pošto je zbog približno simetričnog poprečnog preseka (kao kod nasutih brana) zapremina ovog tipa brane znatno veća, postavlja se pitanje konkurentnosti, imajući u vidu troškove izgradnje. Rešenje je u upotrebi mršavog valjanog betona sa jeftinim agregatom, bez obrade horizontalnih spojnica, sa većom debljinom slojeva i većim maksimalnim zrnom agregata.

Važno tehničko-ekonomsko pitanje predstavlja i obrada temeljne spojnice. U dosadašnjoj praksi izdvojila su se dva pristupa. Prvi je *upotreba RCC-a* gde je moguća njegova ugradnja, sa minimalnom količinom klasičnog sitnozrnog betona. Drugi pristup pretpostavlja *upotrebu klasičnog betona* debljine cca 1,0 – 1,5 m kojom se formira ravna površina i od koje počinje ugrađivanje valjanog betona u slojevima.

14. EVAKUACIONI ORGANI - PRELIVI

Jedna od najvećih prednosti brana od valjanog betona u odnosu na nasute je *mogućnost prelivanja*, pa RCC brane ne zahtevaju odvojen i skupu konstrukciju preliva. Poredeći otpornost na prelivanje u fazi građenja, brane od valjanog betona su najpovoljnije od *svih* tipova brana.

Konstrukcija preliva se ne razlikuje od klasičnih betonskih brana. Preliv može biti slobodan, ili sa ustavama. Češće rešenje je slobodan preliv praktičnog

profila. Zbog značajne hrapavosti valjanog betona, prelivna kontura se završno obrađuje klasičnim ili prskanim betonom.

Nizvodna kontura prelivnog dela brane može biti stepenasta, ili ravna. Stepenasta kontura radi se i od

klasičnog i od valjanog betona. Ovim rešenjem se znatan deo energije vode troši pre upuštenja u umirujući bazen, što omogućava manje dimenzije bazena. U narednoj tabeli dati su primeri brana sa stepenastom nizvodnom konturom.

Tabela 6. Brane sa stepenastom nizvodnom konturom prelivne lamele

Ime brane	God. izgradnje	Dužina preliva (m)	Nagib nizv. konture (V:H)	Visina stepenika (m)	Max. visina mlaza (m)	Specifični proticaj (m^3/sm')
Zaaihoek	1986	160	1:0,62	1,00	3,80	15,63
Monksville	1987	61	1:0,78	0,60	2,60	9,30
Les Olivettes	1987	40	1:0,75	0,60	2,30	6,70
Conception	1990	80	1:0,80	0,80	3,20	11,54
New Victoria	1991	130	1:0,80	0,60	1,80	5,77
Sierra Brava	1993	166	1:0,75	0,60	1,50	3,93
Sahla	1993	40	1:0,90	0,60	2,00	6,08
Petit Saut	1994	60	1:0,80	0,60	1,50	4,00

Kao što se može uočiti, prema dosadašnjim iskustvima i modelskim ispitivanjima, [9], postoji ograničenje specifičnih proticaja koji ne bi trebalo da budu veći od cca $15 m^3/sm'$. Visina stepenika je obično od 60 do 100 cm, što kod konture od valjanog betona odgovara debljini od dva do tri sloja.

Ravna nizvodna kontura prelivne lamele se zbog velikih brzina radi od klasičnog betona sa značajnom količinom cementa. Na taj način se postiže visoka marka koja obezbeđuje trajnost i otpornost betona. Konstrukcija i rešenje su kao kod klasičnih betonskih brana. Ovakvi prelivni mogu se primeniti bez obzira na veličinu jediničnog proticaja. Postoje brojni primeri primene, kao što su npr. sve japanske i većina kineskih RCC brana. Umirenje energije vode nizvodno od prelivne lamele je pomoću ski-odskoka, ili umirujućeg bazena.

15. OSMATRANJE

Osmatranje brana od valjanog betona ne razlikuje se mnogo od osmatranja klasičnih betonskih brana. Osnovni cilj osmatranja je dobijanje podataka na osnovu kojih se može oceniti sigurnost brane. Pored toga, osmatranjem treba proveriti usvojene projektne kriterijume radi poboljšanja projekata budućih brana od valjanog betona.

Instrumenti za osmatranje postavljaju se na pažljivo izabranim mestima u telu brane i temelju, tako da se može pratiti ponašanje konstrukcije za vreme građenja i

tokom eksploatacije. Naročito treba biti obazriv kada je u pitanju broj, vrsta i položaj instrumenata koji se ugrađuju u toku građenja, jer oni mogu usporavati izgradnju i na taj način povećavati cenu građenja. Najčešće veličine koje se osmatraju su:

- pomeranja;
- procurivanje;
- uzgon;
- temperatura;
- naponi i deformacije;
- seizmička ubrzanja.

Pomeranja se obično mere direktnim ili obrnutim klatnom, slično kao kod brana od klasičnog betona. Posebnu pažnju treba posvetiti izboru mesta u masi betona gde će se postaviti tabla za očitavanje klatna. Položaj mora biti reprezentativan, dovoljno udaljen od krune brane da bi se izbegli termički efekti.

Procurivanje se meri na kontrolnim prelivima postavljenim obično u drenažnim galerijama. Kod manjih brana sistemom drenažnih kanala moguće je sve procedne vode sakupiti na jednom mestu. Ukupno procurivanje u početku je obično nešto veće nego kod brana od klasičnog betona, ali se vremenom vrlo brzo smanjuje. Povećanje procurivanja u toku upotrebe je znak neželjenih pojava u telu ili temelju brane. Povremeno treba izvršiti i hemijsku analizu procednih voda jer može ukazati na procese degradacije materijala.

Uzgon se po pravilu meri na kontaktu konstrukcije i sredine u kojoj je fundirana, u zoni temeljne spojnice.

Zbog toga se obično na početku izgradnje tela brane, dok je beton još niske čvrstoće, iskopa mali rov u temelju u koji se postave ćelije i kablovi. Ovo je moguće i nakon očvršćavanja betona bušenjem odgovarajućih bušotina.

Merenje *temperature* obično se zahteva kod svih brana viših od cca 50 m. Merni instrumenti (termometri) su relativno jeftini, a pružaju veoma korisne podatke o stanju temperaturnog polja u telu brane na osnovu kojih se mogu predvideti termički naponi i analizirati pojava prslina. Funkcionisanje termometara je neophodno u periodu od izgradnje do prve zime i/ili prvog punjenja akumulacije. Posle toga podaci o temperaturnom režimu nisu naročito važni za ocenu sigurnosti brane.

Merenje *deformacija* vrši se mernim trakama. Kao i kod brana od klasičnog betona, da bi se odredile deformacije u ravni, trake se postavljaju u obliku rozete u najmanje tri pravca. Prostorno stanje deformacija određuje sa postavljanjem rozeta u različitim ravnima. Pri tome postoji problem obezbeđivanja dobrog kontakta između trake i valjanog betona. Na osnovu poznatog stanja deformacija, i mehaničkih karakteristika RCC-a određuje se *naponsko stanje* u telu brane. Postavljanje instrumenata za merenje napona i deformacija je prilično složeno (i skupo), tako da treba dobro proučiti njihov raspored, a broj svesti na najmanju meru.

Uređaji za merenje *seizmičkog ubrzanja* – akceleroграфи postavljaju se obično kod brana koje se nalaze u područjima sa višim stepenom seizmičnosti. Broj i položaj instrumenata treba odrediti prema Pravilniku o tehničkim normativima za osmatranje visokih brana, [16], koji se može primeniti i na brane od valjanog betona. Jedan akceleroграф se postavlja u telo brane, neposredno ispod krune, u poprečnom preseku približno najveće visine, a drugi na obali u blizini brane. Akceleroграфи se preko startera povezuju tako da rade zajednički. Prvi instrument pokazuje reakciju brane na seizmičko delovanje, a drugi snima ulazno ubrzanje u branu u toku delovanja zemljotresa.

Pored navedenih, kao i kod klasičnih brana, potrebno je vršiti i geodetska i vizuelna osmatranja. Za sva navedena osmatranja predvideti:

- vremenski plan osmatranja;
- način obrade i arhiviranja podataka;
- prikaz i analiza rezultata osmatranja;
- tehnički uslovi instrumenata i njihove ugradnje.

Da bi osmatranje bilo sveobuhvatno, a osmatrani podaci relevantni za ocenu sigurnosti brane neophodno je uraditi Projekat tehničkog osmatranja RCC brane. Posebno je važno da se *nulto osmatranje* izvrši neposredno nakon završetka građenja, pre prvog punjenja akumulacije, kako bi se obezbedili uslovi za analizu rezultata svih kasnijih merenja i njihovo poređenje sa projektnim kriterijumima.

15. ZAKLJUČAK

Iako su gravitacione RCC brane po svojim karakteristikama slične branama od klasičnog hidrotehničkog betona, zbog brojnih osobenosti neophodno je biti veoma pažljiv u postupku projektovanja. Mogućnosti promene oblika poprečnog preseka, upotreba mešavina bitno različitih osobina, a naročito tehnologija ugrađivanja u slojevima, pružaju projektantima priliku da konstrukciju maksimalno prilagode uslovima sredine u kojoj se brana gradi.

Da bi se dobila brana koja na najbolji način koristi sve prednosti tehnologije valjanog betona, neophodno je imati u vidu principe projektovanja i dimenzionisanja, uticaje seizmike i termičku analizu, pitanje razdelnica, zaptivki i galerija, specifičnosti temeljenja, preliivanja i osmatranja. Na taj način negativni stavovi na račun brana od valjanog betona biće najbolje demantovani, dobiće se relativno jeftina konstrukcija i biće maksimalno ispunjeni svi zahtevi kvaliteta, upotrebljivosti, stabilnosti i trajnosti.

LITERATURA

- [1] USBR: "Design criteria for concrete arch and gravity dams", Denver, Colorado, 1974.
- [2] American Concrete Institute Committee 207, "Roller Compacted Concrete", Manual of Concrete Practice, ACI 207.5R-80, Detroit, 1980, 22 pp.
- [3] Kenneth D. Hansen, William G. Reinhardt: "Roller Compacted Concrete Dams", McGraw-Hill, 1986.
- [4] Pravilnik BAB 87 o tehničkim normativima za beton i armirani beton, Beograd, 1987.
- [5] G. Lombardi: "Roller Compacted Concrete for Gravity Dams", Report to ICOLD Committee on Materials for Concrete Dams, Draft, November 1987.
- [6] Pravilnik o tehničkim normativima za osmatranje visokih brana, Službeni list SFRJ broj 6 od 22. 1. 1988., Beograd, 1988.

- [7] Japanese National Committee on Large Dams: "Dams in Japan, No. 11", 1988.
- [8] Petar Petrović: "Hidrotehničke konstrukcije, prvi deo", Beograd, 1997.
- [9] French National Research Project BaCaRa: "Roller Compacted Concrete, RCC for dams", Paris, 1997.
- [10] American Concrete Institute: "Roller Compacted Mass Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Materials and General Properties of Concrete, 1997.
- [11] Francisco R. Andriolo: "The Use of Roller Compacted Concrete", São Paulo-Brazil, 1998.
- [12] Proceedings of International Symposium on Roller Compacted Concrete Dam, Volume I, Chengdu, China, 1999.
- [13] Proceedings of International Symposium on Roller Compacted Concrete Dam, Volume II, Chengdu, China, 1999.
- [14] Ljubomir Tančev: "Brani i pridružni hidrotehnički objekti", Skopje, 1999.
- [15] Jiazheng Pan and Jim He: "Large Dams in China a Fifty-Year Review", China Water Power Press, Beijing, 2000.
- [16] ICOLD Committee of Cost: "The Gravity Dam a Dam for the Future", Paris, 2000.
- [17] ICOLD Bulletin: "State-of-the-art of Roller Compacted Concrete Dams", Paris, 2000.
- [18] USACE: "Engineering and Design. Roller-Compacted Concrete", Manual No 1110-2-2006, Washington, 2000.
- [19] Petar Petrović: "Hidrotehničke konstrukcije, drugi deo", Beograd, 2002.
- [20] M. Muravljov, V. Kuzmanović: Glavni projekat brane Bogovina, Knjiga "Tehnološki proces izgradnje brane 'Bogovina' od RCC-a", Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, 2003.

ROLLER COMPACTED CONCRETE IN DAM CONSTRUCTION PART THREE - DESIGN

by

Vlada KUZMANOVIĆ, Ljubodrag SAVIĆ, Bojan MILOVANOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

After the chronological review of the RCC dams development, and the analysis of the RCC components in the previous articles of this serial, this paper presents the most important issues of the gravity RCC dams design. In the beginning, the principles of the design are described; the cross-section shape and the stability issues are discussed. Follows the detailed description of the design procedure, including the seismic and thermal analysis. Joints, water stops, galleries and percolation control are considered next. Finally, foundation

features, spillways and monitoring of the RCC dams are described. In such a way, the most important characteristics of the RCC dams are emphasized, as well as the similarities and differences in comparison to the gravity dams of conventional concrete, which has to be bared in mind during the design procedure.

Key words: RCC dam design, stability, seismic load, thermal analysis, transverse contraction joints, seepage, foundation, spillways, monitoring.

Redigovano 15.11.2004.