

PRIMENA VALJANOG BETONA U IZGRADNJI BRANA II DEO - KOMPONENTE I OSOBINE VALJANOG BETONA

Vladan KUZMANOVIĆ
Ljubodrag SAVIĆ
Bojan MILOVANOVIĆ
Građevinski fakultet, Beograd

REZIME

U radu su analizirane konsistencija, mogućnosti izbora i potrebne osobine cementa, pucolana, agregata i aditiva kao komponenata za valjani beton. Dat je pregled raspoloživih metoda i opšti postupak za projektovanje mešavine RCC-a. Na primeru Metode zadate konsistencije objašnjen je način određivanja sadržaja vode i vezivnih materijala, doziranje krupnih i sitnih frakcija agregata i projektovanje mešavine. Sledi prikaz osobina valjanog betona kao materijala za građenje brana kao što su: čvrstoća, elastične osobine, tečenje, zapreminske deformacije, vodopropustljivost, trajnost i zapreminska težina. Na kraju je rekapitulacija osobina mešavine i valjanog betona kao materijala, poređenje sa klasičnim betonom i najvažnije preporuke.

Ključne reči: valjani beton, betonska mešavina, agregat, vezivni materijali, osobine RCC-a, čvrstoća, vodonepropustljivost, trajnost.

1. UVOD

Glavna razlika između valjanog i klasičnog betona je u tome što konsistencija, granulometrijski sastav i sadržaj cementne paste u valjanom betonu omogućavaju njegovo ugrađivanje i zbijanje pomoću valjaka. Projektom mešavine treba omogućiti da valjani beton nakon ugrađivanja dostigne odgovarajuću čvrstoću, vodonepropustljivost i trajnost.

Sadržaj pojedinih komponenata u betonskoj mešavini, kao i njihov međusobni odnos mogu se veoma razlikovati, u zavisnosti od konkretnih uslova. Kod nekih brana korišćen je potpuno prirodni agregat sa veoma malo vezivne komponente, dok je kod drugih

upotrebljen drobljeni agregat precizno definisanog granulometriskog sastava sa znatnom količinom vezivnih materijala. Izbor materijala i projektovanje mešavine zavisi od projektnih uslova, dostupnosti materijala u okolini i usvojene tehnologije ugrađivanja. Brane sa stepenastom i strmijom nizvodnom konturom po pravilu zahtevaju valjani beton veće čvrstoće, boljeg kvaliteta i strožije kontrole proizvodnje i ugrađivanja nego brane masivnijeg poprečnog preseka. Međutim, bez obzira na usvojenu koncepciju, projekat betonske mešavine mora da obezbedi čvrstoću, trajnost i vodonepropustljivost u skladu sa svim projektnim kriterijumima stabilnosti i zahtevanim karakteristikama brane, [13].

Osnovno načelo projektovanja mešavine za valjani beton je "maksimalna količina agregata i minimalna količina vezivne komponente" koja će obezbediti zahtevane karakteristike betona uz najnižu ukupnu cenu. Iz odnosa količine agregata i vezivne komponente proističe i glavna razlika između mešavina - stepen obavijenosti čestica agregata cementnom pastom. U vezi sa ovim treba napomenuti i značaj sadržaja najsitnijih frakcija koje ispunjavaju pore između krupnijih zrna agregata.

Za razliku od klasičnog betona koji se ugrađuje pervibratorima, ugrađivanje mešavine valjanog betona krute konsistencije se vrši mehanizacijom za nasute brane. Mešavina mora biti projektovana tako da izdrži pritisak transportnih sredstava, mehanizacije za razastiranje i valjaka kojima se vrši zbijanje valjanog betona. Zbog toga se i postupak projektovanja mešavine valjanog betona i određivanja potrebne konsistencije razlikuje od postupka koji se koristi kod klasičnog betona.

Osnovni problem u projektu valjanog betona je postići dobru vezu između slojeva. Suvlja konzistencija RCC-a i mešavine koje sadrže agregat krupniji od 45 mm izazivaju probleme veze svežeg sa prethodno ugrađenim slojem valjanog betona. Poboljšanje ove veze može se ostvariti smanjenjem vremena između ugrađivanja slojeva, nanošenjem sloja vezivnog maltera (bedding mix), ili povećanjem sadržaja vezivne komponente u betonskoj mešavini.

2. KOMPONENTE VALJANOG BETONA

Beton pogodan za zbijanje vibrovaljcima umnogome se razlikuje od klasičnog betona koji ima značajnu visinu sleganja. U mešavini valjanog betona najčešće se uopšte ne može uočiti tečna cementna pasta. Zbog toga je energija potrebna za zbijanje RCC mešavine do potrebne gustine, odnosno zapremine težine, znatno veća nego energija potrebna za ugrađivanje klasičnog betona pervibratorima, [1]. Prilikom ugrađivanja valjanog betona može se koristiti proizvoljni spoljašnji metod zbijanja kojim se postiže potrebna zapreminska težina valjanog betona.

Određivanje konzistencije mešavine valjanog betona, tj. sadržaja cementne paste i/ili vlage, vrši se modifikovanom Vebe aparaturom. Smatra se da je korektan sadržaj vlage u mešavini onaj koji omogućava izdvajanje male količine paste za određeno vreme vibriranja. Vreme vibriranja može biti vrlo različito, u zavisnosti od odnosa zapremine cementne paste prema zapremini pora između finih čestica agregata.

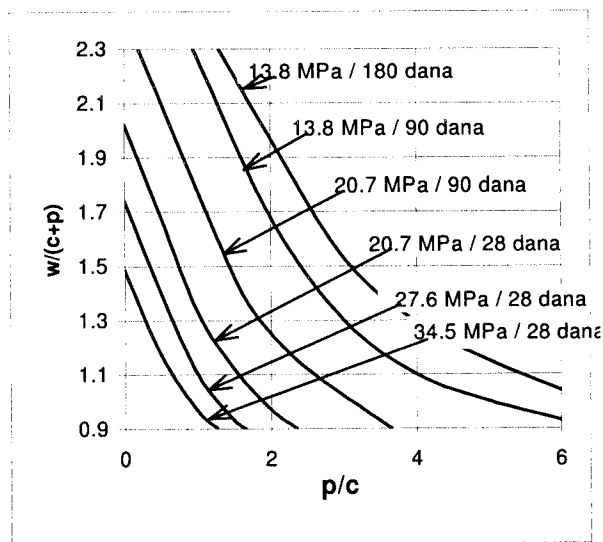
Izbor optimalne količine vode za datu RCC mešavinu zavisi od veličine, oblika i granulometrijskog sastava agregata, kao i od zapremine vezivnih materijala. Minimalna krutost mešavine dobija se iz uslova da materijal izdrži težinu mehanizacije za razastiranje i zbijanje. Varijacije sadržaja vode od 10-ak kg/m^3 smatraju se prihvatljivim, pošto se dozvoljavaju i u postupku kontrole konzistencije klasičnog betona.

Mešavinu treba projektovati sa agregatom koji će se koristiti na gradilištu i sa količinom vode koja odgovara srednjoj vrednosti vlage koja se očekuje tokom građenja. Količina vode dobijena na ovaj način predstavlja dobru polaznu osnovu za proizvodnju valjanog betona na terenu. Kao i kod laboratorijskih mešavina za klasičan beton, po pravilu postoji razlika između terenskih i laboratorijskih uslova, [2]. Zato je neophodno korigovati sastav projektovane mešavine valjanog betona pre početka građenja.

2.1. Vezivni materijali

Za spravljanje valjanog betona može se koristiti cement kao za hidrotehnički beton, [17], sa svojstvima definisanim članom 11. Pravilnika za beton i armirani beton, a prema odgovarajućim jugoslovenskim standardima za cement, ili kombinacija cementa i pucolana, [19]. Pri izboru vezivnih materijala (cement i pucolan ili elektrofilterski pepeo) mora se voditi računa o toploti hidratacije cementa i mogućim agresivnim uticajima sredine. Osnovne osobine su:

- vezivni materijali moraju obezbediti potrebnu obradljivost valjanog betona;
- treba koristiti vezivne materijale niske toplote hidratacije;
- vezivni materijali moraju biti hemijski kompatibilni sa finim česticama agregata;
- poželjno je koristiti standardne vezivne materijale;
- ukoliko se koristi više vrsta vezivnih materijala (npr. za valjani beton u telu brane, uzvodnu i nizvodnu konturu, vezivni malter između slojeva, itd.), neophodno je proveriti da li su svi oni međusobno kompatibilni;
- vezivni materijali moraju ostati stabilni i posle punjenja akumulacije.



Slika 2.1. Čvrstoća valjanog betona u funkciji p/c i w/(c+p)

Čvrstoća valjanog betona prvenstveno zavisi od kvaliteta agregata, stepena zbijenosti i odnosa cementa, pucolana i vode u betonskoj mešavini. Istraživanja su

pokazala da je za valjani beton starosti do 28 dana pogodniji sporiji priraštaj čvrstoće, jer je manji uticaj vrste upotrebljenog cementa, a konačne čvrstoće su veće.

Na slici 2.1. je prikazana zavisnost čvrstoće valjanog betona određene starosti u funkciji odnosa količine pucolana (p) i cementa (c) po jedinici zapremine i vodovezivnog faktora $w/(c + p)$. Ovaj dijagram može se koristiti pri projektovanju sastava mešavine valjanog betona, [15].

Značajna pažnja mora se posvetiti i toploti hidratacije vezivnih materijala. Preporučuje se upotreba cementa niske do umerene toplote hidratacije i maksimalna količina pucolana srazmerna zahtevanoj čvrstoći valjanog betona. Efikasnost pucolana u smanjenju toplote hidratacije, osim od zahtevane čvrstoće, zavisi i od mogućnosti pucolana da smanji zahtevanu količinu vode. Ekonomske pogodnosti smanjenja toplote hidratacije upotrebom pucolana zavise od odnosa cena materijala, s tim što se veći efekti uštede mogu ostvariti kod konstrukcija kod kojih se zahtevaju više čvrstoće.

Ukoliko agregat sadrži fine čestice slične veličine kao čestice vezivnih materijala, upotreba pucolana mora biti još strožije kontrolisana. Kada ukupna količina finih čestica agregata, cementa i pucolana u cementnoj pasti pređe 20 % zapremine betonske mešavine, postoji potreba za značajnim povećanjem količine vode da bi se omogućilo predviđeno zbijanje. Ovo se može nepovoljno odraziti na konačnu čvrstoću valjanog betona.

2.2. Agregat

Izbor agregata i kontrola granulometrijskog sastava su važni činioci koji utiču na kvalitet i osobine valjanog betona. Promenljivost karakteristika agregata u toku izgradnje brane znatno utiče na potrebne količine cementa i vode, što se dalje reflektuje na čvrstoću očvrslog betona. Zbog toga pri izboru agregata i usvajanju granulometrijskog sastava treba voditi računa o zahtevanoj čvrstoći na pritisak i kvalitetu veze u radnim spojnica. Ukoliko se zahteva viši kvalitet betona, potrebna je strožija kontrola granulometrijskog sastava i kvaliteta agregata.

Agregat može biti dobijen na različite načine:

- rečni agregat, iz pozajmišta u aluvionu - manje ili više dobro graduisani šljunak sa potrebnim sadržajem finih čestica;

- iz postojećih ili posebno otvorenih majdana - drobljeni agregat koji se usitnjava i separiše;
- iz postojećih deponija materijala - šljunkara.

Ovi materijali moraju se prilagoditi projektovanim zahtevima kvaliteta i granulometrijskog sastava. Metode se razlikuju po svojoj složenosti: od prostog prosejavanja, do složenih postupaka graduisanja, pranja, proizvodnje finih čestica mlevenjem, upotrebom materijala iz različitih izvora, itd. Posebno je važno da se za svaki tip agregata izvrše potrebna istraživanja koja će biti dovoljno pouzdana za sve uslove proizvodnje valjanog betona, [20].

Broj frakcija agregata u mešavini kreće se od jedne do pet, u zavisnosti od terenskih uslova i projektnih kriterijuma. Studija *Francuskog nacionalnog istraživačkog projekta "BaCaRa"*, [14], koja je obuhvatila 60 različitih RCC brana, pokazala je sledeću raspodelu u odnosu na broj upotrebljenih frakcija:

- samo jedna frakcija: 10 % brana (među kojima su Riou, Sep, Sahla, ...);
- dve frakcije: 20 % brana (Durance Weir, Villaumur, Middle Fork, Winchester, Imin el Kheng, Concepcion, ...);
- tri frakcije: 20 % brana (Les Olivettes, Choldocogagna, Aoulouz, Joumoua, Willow Creek, Galesville, Monksville, Upper Stillwater, ...);
- četiri frakcije: 30 % brana (Petit-Saut, Urugua-i, Elk Creek, većina kineskih brana, ...);
- pet frakcija: 20 % brana (La Touche-Poupard, Castilblanco, Santa-Eugenia, Sierra-Brava, Knellpoort, Wolwedans, New Victoria, Platanovryssi, ...).

Brane kod kojih je upotrebljena samo jedna frakcija obično se nalaze na mestima u čijoj blizini postoje dovoljne količine rečnog agregata pogodnog granulometrijskog sastava i sa dovoljnom količinom finih čestica. Nasuprot tome, projekti sa četiri ili pet frakcija po pravilu koriste drobljeni agregat i to za brane koje zahtevaju valjani beton veoma visokih mehaničkih karakteristika i/ili odlične vodonepropustljivost. U nekim projektima sa 5 frakcija povoljnije je bilo koristiti agregat iz dva različita pozajmišta. Takođe, da bi se poboljšao granulometrijski sastav kod mešavina sa maksimalnim zrnom agregata većim od 80 mm, pogodno je koristiti agregat sa četiri, umesto sa tri frakcije.

Separisanjem agregata u nekoliko frakcija, izborom dobrog granulometrijskog sastava i strogom kontrolom procesa proizvodnje mešavine moguće je dobiti kompaktniji valjani beton. Međutim, insistiranje na maksimalnoj kompaktnosti može dovesti do prekomerno skupog agregata. Tada je, po pravilu, ekonomičnije usvojiti što manji broj frakcija, čak iako poprečni presek treba prilagoditi karakteristikama valjanog betona koje je lakše ostvariti.

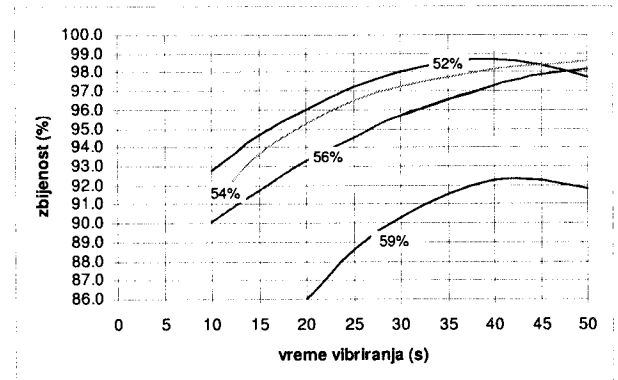
Maksimalno zrno agregata (D_{max}) u mešavini utiče na zbijenost i varira u granicama od 40 do 150 mm. Međutim, ukoliko je maksimalno zrno agregata manje od trećine debljine slojeva u kojima se RCC ugrađuje, uticaj D_{max} je mali, segregacija je minimalna i za zbijanje se mogu koristiti teški vibro-valjci. Obično se usvaja manje D_{max} i manja debljina slojeva u slučaju kada se za zbijanje koriste manji valjci, u blizini kontura, temeljne spojnice i krune brane gde je potrebno postići bolju zbijenost i veću čvrstoću. Segregacija se mora sprečiti pravilnim izborom mehanizacije i metode za transport i razastiranje betonske mešavine.

Iako postoji više značajnih brana kod kojih je D_{max} između 120 i 150 mm (Tamaganja, Guanyinge, Miyagase, ... – sve konstruisane japanskom RCD metodom), maksimalno zrno agregata veće od 80 mm još uvek se retko koristi. Upotreba većeg D_{max} povećava zapreminsku težinu i čvrstoću valjanog betona, ali zahteva veći broj frakcija agregata (obično 5) da bi se izbegla segregacija. Sve ovo ukazuje da je upotreba $D_{max} > 80$ mm ekonomična jedino kod projekata sa veoma velikim količinama RCC-a i debelim slojevima.

U većini slučajeva za dobijanje valjanog betona koristi se D_{max} između 63 i 80 mm, [15]. Time se ograničava mogućnost segregacije pri upotrebi uobičajenih metoda transporta, razastiranja i ugrađivanja. Još jedna mogućnost za smanjenje segregacije je kombinovanje krupnijih frakcija drobljenog i sitnijih frakcija prirodnog agregata.

Ponekad je korisno usvojiti još manje D_{max} i na taj način olakšati mešanje komponenata. U svakom slučaju, *maksimalno zrno agregata treba da bude manje od trećine debljine sloja, s tim da u zonama gde valjci ne mogu postići odgovarajuću zbijenost treba koristiti agregat i sa sitnijim D_{max} .*

Pored veličine D_{max} , važno pitanje pri projektovanju mešavine je i količina krupnog agregata, od koje u velikoj meri zavisi zbijanje RCC-a. Sa slike 2.2., [1], vidi se da je sa učešćem krupnog agregata od 52 do 56% u mešavini moguće postići zbijenost do 98 %, s tim što povećanjem procenta krupnog agregata raste potrebno vreme vibriranja. Međutim, sa količinom krupnog agregata od 59 %, bez obzira na dužinu trajanja vibriranja ne može se postići zbijenost veća od 92 %.



Slika 2.2. Uticaj procenta krupnog agregata na zbijenost valjanog betona

Sadržaj sitnih frakcija agregata ($\varnothing < 5$ mm) je od posebne važnosti zbog popunjavanja prostora između čestica krupnijih frakcija agregata. Sitne čestice u betonskoj mešavini mogu se dobiti:

- direktno iz prirodnog (rečnog) agregata;
- drobljenjem i mlevenjem stenske mase;
- dodavanjem finog peska;
- dodavanjem nanosa.

Sadržaj ovih čestica posebno je važan zbog nosivosti i boljeg zbijanja sveže betonske mešavine. Zbog toga je najbolje da količina sitnih frakcija bude tolika da cementna pasta jedva popunjava šupljine i pore u mešavini, posebno ako se koristi drobljeni agregat.

Slično kao kod klasičnog betona, ukoliko postoji višak cementne paste u odnosu na količinu sitnih frakcija, po pravilu neće biti segregacije, biće veća vodonepropustljivost i bolja veza između slojeva. Međutim, može doći do pojave "pokretne površine" što otežava postizanje maksimalne zbijenosti po čitavoj visini sloja.

Sadržaj finih čestica ($\varnothing < 0,08$ mm) ispitivan je nezavisno u mnogim zemljama, [1], [15], [16]: SAD,

Japan, Francuska, Brazil,... Uočeno je da ukupan sadržaj finih čestica (uključujući i vezivne materijale kao što su cement i elektrofiltarski pepeo) u granicama od 8 do 15 % omogućava dobro zbijanje valjanog betona. Ponekad fine čestice agregata imaju aktivna svojstva koja mogu biti pozitivna ili negativna. Obezbeđivanje potrebnog sadržaja finih čestica direktno utiče na cenu valjanog betona. Zbog toga one mogu biti odlučujući faktor pri izboru vrste agregata.

Glavni zadatak laboratorijskih ispitivanja je definisanje ponašanja različitih vezivnih materijala u odnosu na fine čestice. Neke od njih mogu imati pucolanska svojstva čime se omogućava smanjenje količine vezivnih materijala; druge izazivaju negativne hemijske reakcije sa vezivnim materijalima. Takođe, fine čestice iz nečistog agregata mogu znatno smanjiti čvrstoću na zatezanje i smičuću čvrstoću betona, jer obavijaju fine čestice vezivnih materijala i smanjuju njihova vezivna svojstva.

Zbog svega navedenog naročito je važno utvrditi prirodu i aktivnost finih čestica, vrste i količine vezivnih materijala potrebnih za stabilizaciju finih čestica i trajnost dobijenog valjanog betona.

2.3. Aditivi

Upotreba aditiva kod valjanog betona nije previše rasprostranjena. Najčešće se primenjuju usporivači vezivanja koji pružavaju obradljivost i time omogućavaju bolju vezu između slojeva. Usporivači se mešaju sa cementom i elektrofiltarskim pepelom, pošto je zbog male količine vode i vezivnih materijala teško dobiti homogenu mešavinu iz in situ fabrike betona.

Ostali aditivi, kao što su aeranti i/ili plastifikatori koriste se samo u izuzetnim okolnostima (brane Pandjiakou, Santa-Cruz, De Mist Kraal, Zaaihoek), [14]. Da bi se uvukao vazduh u mešavinu valjanog betona, pasta mora biti što tečnija, a mešanje veoma intenzivno, što je u suprotnosti sa reološkim osobinama RCC-a i upotrebom uobičajenih mešalica.

2.4. Projektovanje mešavine

Valjani beton je relativno jednostavna tehnika građenja, ali do danas još nije usvojena jedinstvena metodologija projektovanja mešavine, doziranja komponenata i laboratorijskog ispitivanja. Postoji više različitih metoda za projektovanje mešavine koje su uspešno primenjivane na brojnim RCC branama širom sveta.

Razlike među metodama zavise od lokacije, zahteva nosivosti konstrukcije, dostupnosti materijala, upotrebljene mehanizacije i vremenskih ograničenja. Postupci projektovanja mešavine veoma se razlikuju i u zavisnosti od filozofije pripreme agregata: *kao agregata za klasičan beton ili kao agregata za stabilizovane nasipe*.

Opšti postupak za projektovanje mešavine može se ukratko opisati na sledeći način, [15]:

- 1) Izabрати dve teorijske kontinualne granulometrijske krive, jednu iznad druge, da bi se varirao odnos krupnog i sitnog agregata u mešavini.
- 2) Upotrebom izabranih granulometrijskih krivih napraviti veći broj uzoraka - mešavina, koristeći različite količine vezivnih materijala, aditiva i vode.
- 3) Za svaku mešavinu izmeriti sledeće parametre:
 - zapreminska težina;
 - konsistencija;
 - čvrstoće na pritisak, zatezanje i smicanje;
 - modul elastičnosti;
 - vodonepropustljivost.
- 4) Izabрати mešavinu potrebne konsistencije koja ima najmanje vezivnih materijala i istovremeno relativno najbolje ostale izmerene parametre.
- 5) Ako je potrebno ponavljanjem postupka izvršiti odgovarajuće korekcije.
- 6) Izabranu mešavinu verifikovati testiranjem uzoraka.

Može se reći da je projektovanje mešavine *proces određivanja sastava betona kao odgovarajuće ekonomične kombinacije veziva, agregata, vode i aditiva koja ispunjava zahtevane uslove u toku izgradnje i rada konstrukcije*.

Metode projektovanja mešavine RCC-a mogu se podeliti na sledeće:

- 1) Metoda zadate konsistencije (Proportioning RCC to meet specified limits of consistency);
- 2) Metoda probnog doziranja (Trial mixture proportioning for the most economical aggregate/cementitious materials combination);
- 3) Metoda zasnovana na konceptu zbijanja nasipa (Proportioning RCC using soils compaction concepts);
- 4) Japanska RCD metoda (RCD Japanese concept), [7], [11];
- 5) USACE metoda (US Army Corps of Engineers method), [22].

Svaka od navedenih metoda ima svoje specifičnosti, ali je osnovni zadatak u projektovanju mešavine da se upotrebom najekonomičnije kombinacije dostupnih materijala proizvede beton koji se ugrađuje zbijanjem i koji zadovoljava tražene osobine. Željene fizičke karakteristike mešavine zavise od funkcije objekta, lokacije i usvojenog projekta konstrukcije.

Pre početka projektovanja mešavine moraju se razmotriti sledeći aspekti:

- tip konstrukcije;
- dostupni materijali i njihova cena;
- kvalitet agregata;
- maksimalno zrno agregata;
- tip cementa;
- upotreba i količina pucolana.

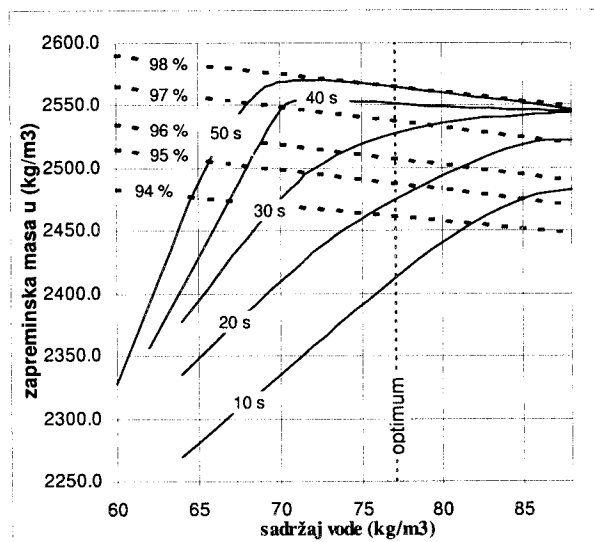
Sve metode obuhvataju pripremu probnih mešavina koje treba da potvrde da li je konsistencija pogodna za ugrađivanje valjcima. Ovo se obično dokazuje na probnim poljima upotrebom planirane metode ugrađivanja i izabrane mehanizacije. Ako se laboratorijski određena mešavina pokaže nepogodnom, postupak projektovanja mešavine mora se ponoviti, a nedostaci korigovati. Kao i kod klasičnog betona, posebno treba voditi računa o sledećim osobinama RCC-a:

- zapreminska težina;
- vodonepropustljivost;
- čvrstoća;
- trajnost;
- mogućnost transporta, razastiranja i zbijanja bez štetne segregacije;
- koštanje.

U nastavku će se detaljnije objasniti metoda zadate konsistencije.

2.5. Metoda zadate konsistencije

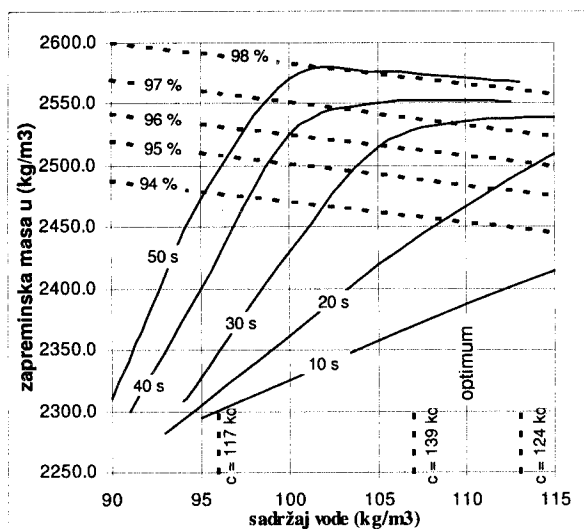
Određivanje optimalne ugradljivosti mešavine pogodna za zbijanje valjcima pomoću **Metode zadate konsistencije** zasniva se na modifikovanom Vebe testu zbijenosti, [15]. Aparatura se sastoji od vibro ploče stalne frekvencije i amplitude, sa kontejnerom zapremine 0,01 m³. Rastresit uzorak RCC-a stavlja se u kontejner, pritiska se tegom mase 9,0 ili 22,5 kg i vibrira se do potpune konsolidacije. Meri se vreme i poredi sa testovima zbijanja na probnom polju pomoću vibro-valjaka.



Slika 2.3. Zapreminska masa RCC-a bez portland cementa u funkciji sadržaja vode i vremena vibriranja

Optimalno Vebe vreme određuje se na osnovu ocene zapreminske težine uzorka jezgra. Ovo vreme zavisi od odnosa komponenata u mešavini, a naročito od sadržaja vode, veličine maksimalnog zrna agregata i sadržaja peska i finih čestica ($\varnothing < 0,08$ mm). Uobičajene mešavine, kod kojih je veličina D_{max} od 38 do 50 mm, zahtevaju najčešće 20 ÷ 30 s vibriranja da bi sleganje uzorka bilo potpuno.

Sadržaj vode u mešavini direktno utiče na potrebnu energiju i troškove zbijanja da bi se postigla potpuna konsolidacija valjanog betona. Optimalna količina vode u posmatranoj mešavini je ona čija varijacija najmanje utiče na postupak zbijanja. Uticaj vremena vibriranja i količine vode u mešavini koja sadrži samo elektrofiltarski pepeo ili samo portland cement prikazan je na slici 2.3., odnosno na slici 2.4., [1]. Kao što se sa slika vidi, zapreminska težina (gustina) raste sa povećanjem količine vode u mešavini i vremenom vibriranja. Maksimalne vrednosti dobijaju se ako je vreme vibriranja 50 s i praktično su konstantne bez obzira na dalje povećavanje vremena vibriranja. Optimalna količina vode za mešavinu samo sa elektrofiltarskim (letećim) pepelom iznosi 77 kg/m³, a za mešavinu samo sa portland cementom oko 110 kg/m³. Ukoliko se koriste mešavine koje sadrže i leteći pepeo i cement, optimalna količina vode bila bi negde između ovih vrednosti.



Slika 2.4. Zapreminska masa RCC-a sa čistim portland cementom u funkciji sadržaja vode i vremena vibriranja

Sadržaj vezivnih materijala predstavlja ukupnu količinu cementa i pucolana (elektrofilterski pepeo i sl.) u mešavini. Količina vezivnih materijala zavisi od zahtevane čvrstoće, athezije i potrebnih termičkih osobina betona. Mešavine koje treba da postignu višu čvrstoću betona, zahtevaju veću količinu vezivnih materijala pri istoj količini vode. Povećanje količine pucolana, u odnosu na količinu cementa, smanjuje toplotu hidratacije i, po pravilu, snižava jediničnu cenu mešavine.

Za usvojenu količinu vezivnih materijala, čvrstoća betona određene starosti biće maksimalna ukoliko je zapremina cementne paste koja ispunjava šupljine

između čestica agregata minimalna. Veća količina vode i višak cementne paste izazivaju smanjenje čvrstoće zbog višeg $w/(c + p)$ faktora. Zato, ako se povećava sadržaj cementne paste, količina vode se može smanjiti, što daje optimalnu čvrstoću betona bez smanjenja ugradljivosti, [5].

Doziranje krupnog agregata zavisi od zbirnog efekta zapremine šupljina između zrna agregata, specifične površine (surface area) i oblika čestica. Zapremina šupljina može se kontrolisati ako se doziranje vrši prosejavanjem i separisanjem agregata po frakcijama. Zapreminska težina u suvom stanju zavisi od sastava mešavine, broja frakcija i promena granulacije unutar svake frakcije.

Povećanjem veličine maksimalnog zrna agregata raste zapreminska težina i smanjuje se zapremina šupljina. Takođe, ukupna specifična površina će se smanjiti sa povećanjem udela krupnih frakcija po jedinici zapremine.

Ugradljivost, tj. mogućnost zbijanja raste ako je oblik zrna agregata okrugao ili kubičast, a smanjuje se ako je pljosnatog oblika. S tim u vezi, treba voditi računa i o mogućoj segregaciji. Problemi sa segregacijom mogu se izbeći ako se usvoji granulometrijski sastav agregata u kome nedostaju zrna pojedinih veličina, na račun povećanja sadržaja krupnijih frakcija. U klasičnom betonu obično se povećava sadržaj sitnijih frakcija da bi se smanjila segregacija. U ekonomskom smislu, da bi se smanjio gubitak zrna agregata sitnijih frakcija pri projektovanju mešavine koristi se veći broj frakcija. Zapremina krupnog agregata po jedinici zapremine RCC-a prikazana je u tabeli 2.1, [10], [15].

Tabela 2.1. Zapremina krupnog agregata po jedinici zapremine betona

Oznaka frakcije (mm)	152	114	76	38	19	9,5
Zapremina (% / m ³)	63-64	61-63	57-61	52-56	46-52	42-48

Za bilo koje maksimalno zrno agregata može se odrediti minimalna zapremina krupnog agregata koja daje vrlo krutu (no slump) konsistenciju mešavine, [10]. Pri tome, najpre treba dozirati sitne frakcije, tako da se postigne zahtevana čvrstoća, a potom uskladiti količinu krupnog agregata da se dobije sleganje jednako nuli. Prilikom ovih usklađivanja, odnos sitnih čestica, vezivnih materijala i vode mora ostati nepromenjen.

Doziranje sitnih frakcija agregata obično se kreće u granicama od 34 do 42 %, a stvarna zapremina šupljina može biti i nešto manja, s obzirom na nepreciznost merenja. Ovo stvara malu razliku pošto minimum ukupne količine cementa, pucolana (ako se koristi), vazduha i vode treba da bude jednak zapremini šupljina između zrna sitnih frakcija i da obavi sve zrna agregata. Prema tome, minimum zapremine cementne paste može se odrediti pomoću krive maksimalne

zapreminske težine, na isti način kako se određuje optimalna količina vode pri zbijanju nasipa. Postupak je sledeći, [15]:

1. Koristeći zahtevani (zapreminski) vodocementni (w/c), ili $w/(c + p)$ faktor, (ako mešavina sadrži i pucolan), dodavati sitan agregat u jednakim inkrementima i meriti gustinu uzoraka pomoću procedure zbijanja nasipa ili produženog vibriranja.
2. Nacrtati dijagram zapreminske težine u funkciji od sračunate zapremine cementne paste.
3. Odrediti zapreminu cementne paste prema maksimalnoj zapreminskoj težini uzorka maltera. Ovu

zapreminu paste, kao deo ukupne zapremine maltera treba povećati za 5-10%. Kod specijalnih mešavina cementnih maltera za obradu kontakta između slojeva, minimalnu zapreminu cementne paste treba povećati za 20-25%.

Projektovanje mešavine. Čak ni korektno projektovana vrlo kruta (no slump) konsistencija neće uvek da izdrži težinu velikih vibro-valjaka bez prilagođavanja postupka projektovanja specifičnostima valjanog betona, [10]. Zbog toga sadržaj vode u mešavini treba da odgovara tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Zavisnost potrebne količine vode od veličine D_{max}

Količina vode zavisno od vrste mešavine (kg/m^3)	Maksimalno zrno agregata, D_{max} (mm)					
	9,5	19	38	76	114	152
RCC	116	107	98	86	80	77
Vezivni malter	128	119	100	/	/	/

Koristeći postupak projektovanja mešavine kao za klasičan masivan beton i količinu vode prema ovoj tabeli, za mešavine valjanog betona bez pucolana preporučuje se *težinski* vodocementni faktor od 0,6. Ovaj faktor obezbeđuje dovoljnu zapreminu cementne paste da ispuni šupljine između zrna agregata. Međutim, dobiće se više čvrstoće od potrebnih i veći priraštaj temperature nego što je poželjno u telu gravitacione betonske brane. Zbog toga se preporučuje zamena cementa pucolanom do količine koja je neophodna za dostizanje projektovane čvrstoće i potrebne redukcije toplote hidratacije. Metoda zadate konsistencije je zasnovana na metodi projektovanja mešavine koja sledi koncept maksimalne zapremine. Osnovni koraci ove metode su sledeći, [22]:

1. Odrediti minimalnu zapreminu paste. Umesto ispitivanja uzoraka, obično se usvaja odnos zapremine paste prema zapremini maltera p_v u iznosu od 0,38 za RCC u telu brane, odnosno 0,42 za vezivni malter između slojeva ("bedding mix").
2. Izabrati p/c i $w/(c + p)$ odnose sa slike 2.1.
3. Odrediti zapreminu krupnog agregata (V_{ca}) prema tabeli 2.1. ili probanjem u skladu sa opisanim postupkom.

4. Izračunati zapreminu maltera (bez vazduha), V_m , pretpostavljajući 2% zarobljenog vazduha, prema formuli:

$$V_m = 0,98 \cdot C_v - V_{ca} ,$$

gde je C_v jedinična zapremina betona.

5. Izračunati zapreminu paste (bez vazduha), V_{paste} , koristeći faktor p_v usvojen u prvom koraku ove metode:

$$V_{paste} = V_m \cdot p_v .$$

6. Odrediti zapreminu finog (sitnog) agregata V_{fa} prema formuli

$$V_{fa} = V_m (1 - p_v) \text{ ili } V_{fa} = V_m - V_{paste} .$$

7. Odrediti probnu zapreminu vode, V_w , kao

$$V_w = V_{paste} [w/(c + p)] / [1 + w/(c + p)] .$$

8. Odrediti zapreminu cementa, V_c , kao

$$V_c = V_w / [w/(c + p) \cdot (1 + p/c)] .$$

9. Odrediti zapreminu pucolana (ili elektrofiltarskog pepela), V_p , kao

$$V_p = V_c \cdot (p/c) .$$

10. Utvrditi težine svih komponentata mešavine množenjem odgovarajućih zapremina njihovim jediničnim težinama.

11. Proveriti konsistenciju mešavine prema opisanom postupku Metode zadate konsistencije u cilju određivanja minimalnog vremena vibriranja (u sekundama) potrebnog za postizanje maksimalne zapremine težine betona u zbijenom stanju.

12. Sa usvojenom zapreminom krupnog agregata, projektovati još dve dodatne mešavine: jednu sa višim, a drugu sa nižim odnosom $w/(c + p)$. Nacrtati dijagram zavisnosti čvrstoće od odnosa $w/(c + p)$ i na osnovu zahtevane čvrstoće RCC-a usvojiti konačni projekat mešavine.

3. OSOBINE VALJANOG BETONA

Najznačajnije osobine očvrstlog valjanog betona kao materijala su: čvrstoća na pritisak, čvrstoća na zatezanje, modul elastičnosti, Poasonov koeficijent, biaksijalna i triaksijalna smičuća čvrstoća, zapreminske deformacije usled sušenja i temperature, termički koeficijent širenja, specifična toplota, tečenje, termička provodljivost, koeficijent termičkog naprezanja, difuzija, vodonepropustljivost, trajnost i jedinična težina.

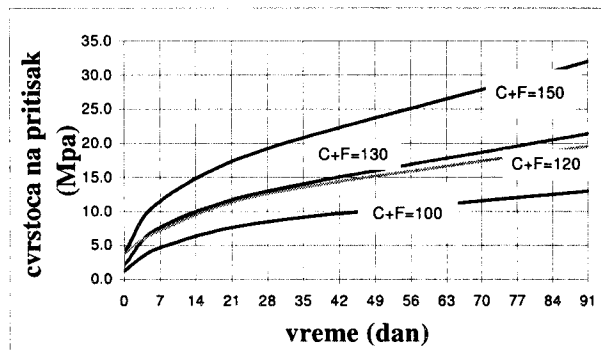
Razlike između osobina očvrstlog RCC-a i klasičnog betona proističu prvenstveno iz proporcija mešavine, doziranja i sadržaja pora. Kao što je istaknuto u prethodnom poglavlju, slično kao i kod klasičnog betona, postoji veliki broj RCC mešavina različitih karakteristika. Iako je teško kvantifikovati karakteristične vrednosti svake mešavine, RCC generalno ima manje cementa, paste i vode, i nema uvučenog vazduha. Takođe, moguća je upotreba prašine ili drugih finih čestica za popunjavanje šupljina i pora u agregatu.

Kod konvencionalnih betona najveći uticaj na mehaničke karakteristike imaju doziranje, kvalitet i fizičke osobine agregata. Ovi faktori imaju još veći uticaj kod valjanog betona, jer se u nekim RCC mešavinama koriste agregati lošijih karakteristika (prema konvencionalnim standardima), pa razlike u osobinama valjanog betona mogu biti znatno veće nego kod klasičnih betona.

3.1. Čvrstoća

Čvrstoća na pritisak RCC-a određene starosti direktno utiče na većinu osobina valjanog betona. Obično se zahteva kontrola posle 90, 180 i 365 dana. Ovi periodi omogućavaju razvoj eksploatacionih čvrstoća kod valjanog betona koji sadrži pucolanske materijale i

njihov izbor zavisi od konkretnih uslova, vremena opterećivanja konstrukcije, proporcije mešavine itd. Merenje čvrstoće na pritisak vrši se obično na uzorcima oblika prizme ili cilindra.



Slika 3.1. Priraštaj čvrstoće na pritisak u zavisnosti od količine vezivnih materijala

Čvrstoća RCC-a na pritisak zavisi prvenstveno od kvaliteta agregata, granulometrijskog sastava, stepena zbijenosti i količine vode, cementa i pucolana. Za većinu RCC mešavina, čvrstoća na pritisak je funkcija $w/(c + p)$ faktora, slično kao kod klasičnog betona.

Čvrstoća na pritisak se povećava sa smanjenjem količine vode, sve dok je moguće potpuno zbijanje RCC-a. Maksimalna čvrstoća za određenu mešavinu dobija se upotrebom optimalne količine vode i propisanog postupka zbijanja. Manja količina vode od optimalne daje niže čvrstoće na pritisak. Ovo pokazuje da postojanje pora u mešavini ima veći negativan uticaj na čvrstoću, nego što je pozitivan uticaj na smanjenje količine vode. Za većinu brana ispitivanje konsistencije potvrđuje relativno konstantnu količinu vode koja zavisi od Vebe vremena potpune konsolidacije, ili vremena, u RCD metodi definisanog kao "vrednosti zbijanja", VC.

Za usvojenu količinu vode i postupak zbijanja, čvrstoća betona na pritisak prvenstveno zavisi od sadržaja cementa i pucolana. Kao što se vidi na slici 3.1., [10], valjani betoni sa 120 kg/m³ cementa i pucolana dostižu čvrstoće od preko 20 Mpa, a sa 150 kg/m³ vezivnih materijala čvrstoće na pritisak su veće od 30 Mpa.

Ipak, veoma je teško generalno govoriti o čvrstoći na pritisak, bez istovremene analize sadržaja cementnih materijala. Zbog toga je uveden pojam "efikasnost mešavine", (η), [16], koji se definiše kao:

η = čvrstoća na pritisak / sadržaj cementnih materijala.

Poređenjem ovog faktora za brane od valjanog i klasičnog betona, uočava se da je kod betona starijih od 180 dana veći za RCC nego za klasičan beton, što ukazuje da se potrebna čvrstoća na pritisak može dobiti sa manje cementa i više pucolana. U zavisnosti od optimalne kombinacije cementa i pucolana, ovakve mešavine mogu postići više čvrstoće na pritisak.

U tabeli 3.1. date su vrednosti za nekoliko brana pri starostima betona od 7, 28, 90 i 365 dana, [8], [16]. Radi potpunijeg sagledavanja prirode ovog koeficijenta za svaku branu dat je i sadržaj vezivnih materijala u mešavini.

Tabela 3.1. Efikasnost mešavina (η) različite starosti i sadržaja vezivnih materijala

Brana	c (kg/m ³)	P (kg/m ³)	c + p (kg/m ³)	efikasnost mešavine (η)			
				7 dana	28 dana	90 dana	1 god
Tamaganja	91	39	130	0,85	1,08	1,52	2,25
Sakaiganja	91	39	130	0,39	0,82	1,54	/
Urugua-i	60	0	60	0,94	1,24	1,63	/
NJillonj Creek	47	19	66	0,43	0,85	1,25	/
Monksville	64	0	64	0,52	0,73	0,78	1,85
Capanda	70	0	70	0,79	1,15	1,35	1,62
Upper Stillnjater	80	173	253	0,35	0,58	0,96	1,42
Jordao	75	0	75	0,43	0,61	0,84	/

Čvrstoća na zatezanje, kao procenat čvrstoće valjanog betona na pritisak, generalno je niža nego kod klasičnog betona. Ovo je naročito izraženo kod RCC mešavina slabije ugradljivosti.

Odnos čvrstoće na zatezanje prema čvrstoći na pritisak kod mešavina valjanog betona po pravilu iznosi od 7 do 13 %, u zavisnosti od kvaliteta agregata, starosti, upotrebljene količine cementa i čvrstoće. Slede podaci o ovom odnosu prema istraživanjima brazilskih stručnjaka, [16]:

- Urugua-i 10 - 18 %;
- Willow Creek 8 - 13 %;
- Monksville 9 - 14 %;
- Capanda 9 - 14 %;
- Upper Stillwater 4 - 8 %;
- Jordao 10 - 18 %;
- Miel I 9 - 15 %;
- Les Ollivetes 19 - 21 %;

Veoma mršave RCC mešavine i/ili mešavine sa agregatom slabih mehaničkih karakteristika, imaju značajno niže čvrstoće na zatezanje. Nasuprot njima, RCC mešavine napravljene sa klasičnim agregatom i visokom količinom paste imaju znatno višu čvrstoću na zatezanje, naročito u ranim fazama.

Smičuća čvrstoća valjanog betona zavisi od njegove kohezije i ugla unutrašnjeg trenja. Minimalna čvrstoća javlja se u radnim spojnica, duž površina između

slojeva RCC-a. Granice slojeva su na svakih 30 do 100 cm vertikalnog rastojanja konstrukcije. Zbog toga je kontrola smičuće čvrstoće na mestima kontakata površina slojeva značajnija nego bilo gde po debljini sloja.

Karakteristična radna spojnica u masivnom betonu predstavlja horizontalnu, prethodno izbetoniranu površinu, koja je postala toliko kruta da novi beton ne može potpuno da se sjedini sa prethodnim. U stranoj literaturi postoji veći broj naziva za radne spojnice: "construction joints", "lift joints", "cold joints", i sl. i često se u našoj praksi nazivaju "razdelnicama".

Autor na ovom mestu želi da ukaže na suštinsku razliku između "spojnice" i "razdelnice". Spojnice su planirani ili slučajni prekidi pri betoniranju koji se pre nastavka betoniranja po pravilu obrađuju da bi se dobio nastavak što sličnijih mehaničkih karakteristika. Nasuprot tome, "razdelnica" je konstruktivna mera kojom se odvajaju dva dela iste konstrukcije kako bi njihov rad u statičkom smislu bio nezavistan.

Ukupna smičuća čvrstoća može se odrediti Kulonovim izrazom:

$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

gde je C - kohezija;
 σ - normalni napon;
 φ - ugao unutrašnjeg trenja.

Tabela 3.2. Vrednosti kohezije i ugla trenja u monolitnom RCC-u i spojnica bez maltera

Brana	Kohezija (Mpa)		Ugao trenja (⁰)	
	u sloju	u spojnici	u sloju	u spojnici
Galesville	2,3	0,76	52	67
Urugua-i	2,5	0,4	48	56
Jordao	1,9	0,9	50	58

Kohezija se često naziva i **napon prijanjanja** ili **atezija**, dok $\sigma_{tg\phi}$ predstavlja **otpor trenja**. Za određivanje kohezije i ugla unutrašnjeg trenja obično se koristi opit direktnog smicanja zasnovan na normalnim naponima.

Ispitivanja pokazuju, [12], [16], da se smičuća čvrstoća neće povećati u slučaju prekomernog povećanja količine cementa u vezivnom malteru, jer će tada lom nastati neposredno ispod ili iznad radne spojnice. U tom slučaju, vrednost približno je jednaka smičućoj čvrstoći u monolitnom RCC-u, unutar sloja između radnih spojnica, [3].

Vrednosti kohezije i ugla unutrašnjeg trenja u monolitnom delu sloja, kao i u horizontalnim spojnica bez vezivnog maltera date su u Tabeli 3.2. Kao što se može videti na primeru navedenih brana, kohezija unutar sloja iznosi cca 2 - 3 Mpa, a u spojnici bez obrade vezivnim malterom cca 0,5 - 1,0 Mpa. Ugao unutrašnjeg trenja unutar sloja obično je oko 50⁰, dok je u neobrađenoj spojnici nešto veći.

Da bi se postigla odgovarajuća smičuća čvrstoća valjanog betona potrebno je posvetiti naročitu pažnju radnim spojnica, trajanju prekida betoniranja i tretmanu spojnica radi ujednačavanja smičuće čvrstoće po visini slojeva.

3.2. Elastične osobine

Modul elastičnosti valjanog betona (Jangov modul) najviše zavisi od starosti betona, vrste agregata, čvrstoće i količine cementnih materijala. Agregati boljeg kvaliteta (npr. koji sadrže kvarc) obično daju veće module elastičnosti nego što ih imaju drugi betoni iste čvrstoće. Slično tome, upotrebom peščara i sličnih agregata dobijaju se manji moduli elastičnosti. Mešavine valjanog betona u kojima se koriste klasični agregati i relativno visok sadržaj cementa (ili cementa i pucolana) imaju module elastičnosti slične klasičnom betonu.

Kod većine masivnih betona poželjni su niži moduli elastičnosti, jer se na taj način smanjuje mogućnost pojave prslina. Ovo se može postići sa mešavinama mršavog RCC-a, kod kojih se kao fine čestice koriste prirodni ili veštački punioci, jer imaju veoma male module elastičnosti.

Istraživanja i merenja na izgrađenim branama (Willow Creek, Zintel Canyon, Elk Creek, Monksville, Upper Stillwater, Itaipu, Capanda, Salto Caxias,...) pokazuju da su moduli elastičnosti RCC-a generalno znatno niži nego kod konvencionalnog betona i to:

- oko 50 % u periodu od 7 od 28 dana;
- oko 65 % u periodu od 90 dana i kasnije.

Poasonov koeficijent (kao kod klasičnog betona) predstavlja odnos transversalne (poprečne) i odgovarajuće aksijalne deformacije, koja se dobija iz jednakopodeljenog aksijalnog napona manjeg od granice proporcionalnosti materijala. Dosadašnji raspoloživi podaci ukazuju da su vrednosti ovog koeficijenta kod valjanog betona slične vrednostima kod klasičnog betona i iznose od 0,17 do 0,22. Pri tome, RCC u početnoj fazi (do 90 dana starosti) ima manje vrednosti Poasonovog koeficijenta, nego kasnije nakon očvršćavanja.

3.3. Tečenje

Deformacija betona pod pritiskom može se podeliti na trenutnu (elastičnu) i vremenski zavisnu zvanu **tečenje**. Elastična deformacija zavisi od modula elastičnosti, a tečenje zavisi od vremenskog perioda u kome je beton izložen opterećenju. Tečenje počinje odmah po nanošenju opterećenja i nastavlja se sve dok opterećenje traje težeći asimptotski nekoj konačnoj vrednosti. Ukupno tečenje prvenstveno zavisi od modula elastičnosti agregata i od vrste finih čestica upotrebljenih pri projektovanju mešavine.

Glavna razlika između testa ispitivanja tečenja kod konvencionalnog i valjanog betona je u tome što se kod RCC-a deformacija meri na površini umesto u telu

uzorka. Razlog je upotreba pneumatskog čekića za zbijanje RCC uzorka.

Jednačina tečenja glasi:

$$\varepsilon = 1/E + f_k \cdot \log(t + 1),$$

gde je:

- ε - tečenje;
- E - modul elastičnosti;
- f_k - koeficijent tečenja;
- t - vreme.

Na osnovu ispitivanja uočeno je da je član (1/E) kod valjanog betona u ranoj fazi veći nego kod klasičnog betona. Takođe, koeficijent tečenja (f_k) je veći nego kod klasičnog betona kod koga je upotrebljen sličan agregat. Generalno, agregati sa nižim modulima elastičnosti daju betone sa većim tečenjem.

Za većinu masivnih betona poželjno je da imaju sposobnost relaksacije zaostalih napona, kako bi termička naprezanja bila što manja. Mešavine veće čvrstoće generalno imaju manje tečenje, što utiče na smanjenje termičkih napona. Nasuprot njima, mešavine RCC-a sa malo cementnih materijala i mešavine sa neaktivnim finim česticama imaju tečenje veće od prosečnog.

3.4. Zapreminske deformacije

Skupljanje usled sušenja predstavlja zapreminsku deformaciju zbog gubitka vlage i značajno je manje kod valjanog nego kod klasičnog betona. Uzrok je znatno manji sadržaj vode u RCC-u nego kod klasičnog betona. Sušenje se obavlja preko slobodnih površina betona. Međutim, zbog manje količine cementne paste na površini valjanog betona i veće zapremine agregata, površinsko sušenje valjanog betona nije naročito izraženo. Pozitivan efekat ove pojave je eliminisanje mikroprslina cementne paste oko zrna agregata na površini RCC-a.

Skupljanje usled sušenja takođe zavisi i od vodocementnog (vodovezivnog) faktora. Ako pasta nije dovoljno gusta, ili ako je zbijanje nedovoljno da spreči ili ograniči migraciju vlage, površinske prsline usled skupljanja mogu prodrati dublje u masu betona. Isti efekat može se javiti i upotrebom agregata slabijih mehaničkih karakteristika, jer oni zahtevaju veću količinu vode.

Termička promena zapremine valjanog betona usled disipacije toplote hidratacije značajno je manja nego kod klasičnog betona. Na termičke osobine valjanog betona prvenstveno utiču vrsta i količina agregata u mešavini i sadržaj vlage. Razlike termičkih karakteristika u odnosu na klasičan beton potiču samo od razlika među mešavinama. Najvažnije termičke osobine RCC-a su:

- specifična toplota;
- provodljivost;
- koeficijent širenja.

3.5. Naponi i deformabilnost

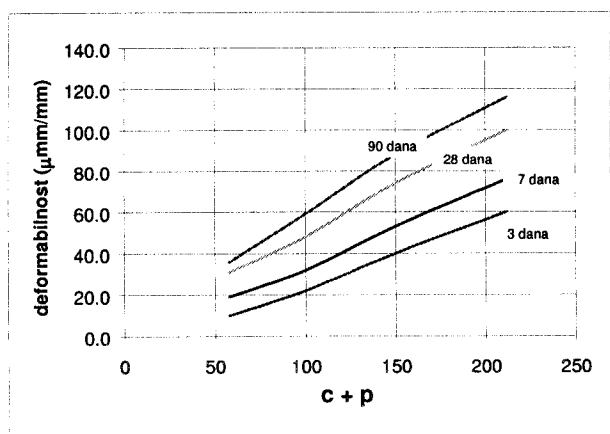
Koeficijent termičkog napona predstavlja odnos modula elastičnosti i koeficijenta termičkog širenja u toku razmatranog vremenskog perioda. Ovaj koeficijent je pokazatelj promene napona kroz vreme za svaki stepen promene temperature. Viši koeficijent termičkog napona znači veći priraštaj napona za bilo koju promenu temperature.

Koeficijent termičkog napona kod valjanog betona iznosi od 0,5 do 5,0 kPa/°C, [1], [6]. Poređenja radi, uobičajene vrednosti ovog koeficijenta za klasičan beton iznose od 3,7 do 10,6 kPa/°C. Veće vrednosti dobijaju se ukoliko se koristi lomljeni agregat, ukoliko je starost betona veća, veće čvrstoće i više cementa u mešavini.

Granična dilatacija je ona dilatacija koju može podneti beton pre pojave prsline. Kada promena zapremine izazove dilatacije koje prekoračuju nosivost materijala, javljaju se prsline. Dilatacije u betonu mogu se javiti usled delovanja spoljašnjeg opterećenja, promene zapremine sušenjem ili toplote hidratacije.

Kao i kod drugih materijala, granična dilatacija valjanog betona može se znatno razlikovati u zavisnosti od karakteristika mešavine i upotrebljenog agregata. Glavni faktori koji utiču na deformabilnost su brzina porasta opterećenja, vrsta i oblik agregata i količina cementa. Lomljeni agregati dobrih mehaničkih karakteristika snižavaju granične dilatacije, dok je mleveni materijal obično povećavaju jer daju veće čvrstoće na zatezanje. Vrednost granične dilatacije izražava kao 10^{-6} mm/mm.

Zavisnost deformabilnosti klasičnog betona određene starosti od količine vezivnih materijala u mešavini prikazana je na slici 3.2., [16].



Slika 3.2. Deformabilnost u funkciji vremena i količine vezivnih materijala

Upoređivanjem rezultata ispitivanja RCC-a kod brana Capanda i Urugua-i sa prikazanim graficima, dobija se da su odgovarajuće vrednosti slične. Naime, kod brane Capanda, RCC-1 (sa 65 kg cementnih materijala po m^3 mešavine) imao je dilataciju od $20 \cdot 10^{-6}$ mm/mm posle 7 dana, odnosno $34 \cdot 10^{-6}$ mm/mm posle 28 dana, dok je RCC-2 ($c + p = 100 \text{ kg/m}^3$) iznosila $28 \cdot 10^{-6}$ mm/mm posle 7 dana, odnosno $39 \cdot 10^{-6}$ mm/mm posle 28 dana. Slične vrednosti dobijene su i kod brane Urugua-i. Mešavina RCC-a sa $c + p = 58 \text{ kg/m}^3$ imala je deformabilnost $20 \cdot 10^{-6}$ mm/mm posle 7 dana, odnosno $32 \cdot 10^{-6}$ mm/mm posle 28 dana.

3.6. Vodonepropustljivost

U odnosu na vodonepropustljivost, masivni beton koji se koristi u izgradnji betonskih brana može se podeliti u tri kategorije:

- 1) *klasičan beton* - veća količina cementa u betonskoj mešavini kojom se obezbeđuje potrebna vodonepropustljivost;
- 2) *valjani betoni prve generacije* - počeci primene RCC-a kada se nije dovoljno znalo o uticaju finih čestica na vodonepropustljivost;
- 3) *savremeni valjani betoni* - mešavine sa većom količinom finih čestica što daje koeficijent vodonepropustljivosti praktično iste vrednosti kao kod klasičnih betona sa istom količinom cementnih materijala.

Vodonepropustljivost betona najviše zavisi od količine zarobljenog vazduha i stepena poroznosti, pa se može

skoro potpuno kontrolisati pomoću projekta mešavine, kontrole kvaliteta i stepena zbijenosti. Valjani beton će biti relativno vodonepropustljiv, ukoliko ima dovoljno finih čestica koje su ravnomerno raspoređene (smanjuje se sistem vazdušnih pora) i ako je obezbeđena potpuna zbijenost. Generalno, vodonepropustljivost RCC-a može biti slična kao kod klasičnog betona, ukoliko je RCC spravljen od čistog, klasičnog agregata, sa dovoljno cementne paste, ili mršavi RCC sa kontrolisanim granulometrijskim sastavom agregata koji sadrži dovoljno finih čestica, [4], [18].

Graditelji brana od valjanog betona najveću pažnju moraju posvetiti in situ vodonepropustljivosti. Čak iako je vodonepropustljivost mase RCC-a mala, problem može nastati u radnim spojnica između slojeva. Ukupno procurivanje kroz branu predstavlja zbir vodonepropustljivosti kroz sam materijal i procurivanje kroz prsline i razdelnice. Ipak, iskustvo pokazuje da je moguće izgraditi monolitnu vodonepropustljivu konstrukciju, iako se valjani beton ugrađuje u slojevima.

Vodonepropustljivost valjanog betona direktno zavisi od količine vezivnog materijala. Iskustva pokazuju da bi količina paste u RCC mešavini trebalo da bude veća od zapremine pora u agregatu. Više cementnih materijala daje pastu manje vodonepropustljivosti, čime se kontroliše vodonepropustljivost betona. Postoji i drugi pristup, kojim se vododrživost može povećati kombinovanjem povećanja količine cementnih materijala, veće zbijenosti, dovoljno finih čestica, agregata odgovarajućeg granulometrijskog sastava i odgovarajuće nege. Sve ove mere smanjuju poroznost RCC-a.

Poboljšane mešavine RCC-a sa približno istim koeficijentom vodonepropustljivosti kao klasičan beton treba koristiti za visoke gravitacione i lučno-gravitacione brane od valjanog betona. Upotreba većeg procenta finih čestica (filler, punilac), ili pucolana je posebno pogodna jer smanjuje vodonepropustljivost bez povećanja mogućnosti pojave termičkih prsline.

Ispitivanja, [16], pokazuju da koeficijent vodonepropustljivosti za mešavine sa 60-250 kg/m^3 cementnih materijala iznosi od 10^{-4} do 10^{-10} cm/s, u poređenju sa vrednostima 10^{-7} - 10^{-10} cm/s kod klasičnih betona sa sličnom količinom cementa. Koeficijent vodonepropustljivosti u dobro obrađenim radnim spojnica kreće se od 10^{-7} do 10^{-9} cm/s, što je uporedivo sa vodonepropustljivošću klasičnog betona.

3.7. Trajnost

Da bi se ocenila trajnost valjanog betona potrebno je uporediti njegovu otpornosti na mraz, habanje i hemijske uticaje sa odgovarajućim osobinama klasičnog betona. Kao i kod klasičnog betona, najveći uticaj na trajnost valjanog betona ima vodocementni (vodovezivni) faktor. O ovome treba posebno voditi računa s obzirom na vrlo krutu konsistenciju mešavine RCC-a.

Otpornost na habanje prvenstveno zavisi od čvrstoće na pritisak, veličine maksimalnog zrna i kvaliteta agregata. Otpornost na habanje RCC-a ispituje se kao kod klasičnog betona. Iskustvo pokazuje da valjani betoni spravljeni sa kvalitetnim agregatom veće krupnoće i niskog vodovezivnog faktora imaju veoma dobru otpornost na habanje. Primeri su sledeće brane:

- Tarbela;
- Zintel Canyon (MSA = 38 mm, brzina vode 20 m/s);
- Detroit Dam (brzina vode od 20 do 32 m/s);
- Kerrville Dam (5 m/s);
- Salto Caxias (u periodu od avgusta do novembra 1997. pet puta prelivena poplavnim talasom od preko 5.500 m³/s).

Otpornost na mraz valjanog betona zavisi od otpornosti upotrebljenog agregata na mraz, čvrstoće i količine uvučenog vazduha. Količina uvučenog vazduha zavisi od količine vode u mešavini. Pošto je konsistencija RCC mešavine vrlo kruta, kao aditiv mogu se koristiti aeranti. Na taj način dobija se sistem vazdušnih šupljina koji povećava otpornost na smrzavanje i odmrzavanje. Procenat uvučenog vazduha kod RCC znatno više varira nego kod klasičnog betona, pa mešavine valjanog betona zahtevaju veću količinu aeranata da bi se ostvarili odgovarajući efekti. Međutim, i u tom slučaju količina uvučenog vazduha nije velika, zbog čega se otpornost na mraz mora postići povećanom čvrstoćom i manjom vodopropustljivošću. Iako postoji više brana od valjanog betona izgrađenih u zonama gde su ciklusi smrzavanja i odmrzavanja česti, površine izložene uticaju mraza obično se osiguravaju klasičnim betonom sa dodatkom aeranata.

3.8. Zapreminska težina

Zapreminska težina valjanog betona je ista ili nešto veća (od 2 do 4 %) nego kod klasičnog betona od istog materijala. Zapremina agregata u mešavini iznosi oko 80 %, pa zapreminska težina betona najviše zavisi od

zapreminske težine agregata. RCC ima malu količinu vazduha (obično 1 do 2 %) i malu početnu količinu vode, tako da jediničnu zapreminu popunjava prvenstveno čvrsta faza. Glavni razlog nešto većih zapreminskih težina valjanog u odnosu na klasičan beton su manja količina vode i veći stepen zbijanja. Iskustva pokazuju da se zapreminske težine RCC-a kreću u granicama od 22,40 kN/m³ do 25,60 kN/m³, [22].

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih osobina komponenta i karakteristika valjanog betona kao materijala za građenje brana, sledi da se mešavina RCC-a znatno razlikuje od mešavine klasičnog hidrotehničkog betona. Razlog proističe iz potrebe da se omogući ugrađivanje betona mehanizacijom za nasute brane. Zato je konsistencija veoma kruta, veći je sadržaj agregata u mešavini, manje je cementa, veliki deo vezivnih materijala čine pucolani, manje je vode, upotreba aditiva je znatno reda.

I pored toga što su navedene osnovne osobine komponenta valjanog betona zajedničke, svetska iskustva sa već izgrađenih brana su veoma različita. Agregat može biti prirodan, gotovo bez ikakvog tretmana, ili drobljen, strogo propisanog granulometrijskog sastava; broj frakcija kreće se od jedne do pet; maksimalno zrno agregata od 40 do 125 mm; sadržaj finih čestica od 8 do 15 %.

Ako se posmataju karakteristike RCC-a može se uočiti da čvrstoće na pritisak, zatezanje i smicanje zavise direktno od količine vezivnih materijala i zbijenosti. Moduli elastičnosti su 50 - 65 % niži, Poasonov koeficijent sličan, a tečenje nešto veće nego kod klasičnog betona. Zbog manje količine vode, odnosno mogućnosti odavanja toplote hidratacije, skupljanje i termička promena zapremine nisu izražene. Vodopropustljivost valjanog betona (posebno u horizontalnim spojnica) generalno je veća nego kod klasičnog betona. Trajnost najviše zavisi od otpornosti na mraz i habanje koji su proporcionalni čvrstoći RCC-a, [23].

Zbog svega navedenog mora se obezbediti odgovarajući sastav mešavine, stroga kontrola kvaliteta i efikasan način ugrađivanja. Na taj način, uz maksimalno iskorišćenje brojnih prednosti tehnologije valjanog betona, mogu se dobiti brane istih osobina, kvaliteta i trajnosti kao od klasičnog hidrotehničkog betona.

LITERATURA

- [1] American Concrete Institute Committee 207, "Roller Compacted Concrete", Manual of Concrete Practice, ACI 207.5R-80, Detroit, 1980, 22 pp.
- [2] Dennis Hopman, Oswin Keifer, and Fred A. Anderson: "Current Corps of Engineers' Concepts for Roller Compacted Concrete in Dams", Proceedings of the Symposium on RCC, ASCE, New York, May 1985, pp. 1-10.
- [3] Honjard L. Boggs and Alan T. Richardson: "USBR Design Considerations for Roller Compacted Concrete Dams", Proceedings of the Symposium on RCC, ASCE, New York, May 1985, pp. 123-139.
- [4] Ernest K. Schrader: "Permeability and Seepage Control in Roller Compacted Concrete Dams", Proceedings of the Symposium on RCC, ASCE, New York, May 1985, pp. 11-30.
- [5] Gary N. Reeves and Lewis B. Yates, Jr.: "Simplified Design and Construction Control for Roller Compacted Concrete", Proceedings of the Symposium on RCC, ASCE, New York, May 1985, pp. 48-61.
- [6] William F. Parent, William A. Moler, and Ronald W. Southard: "Construction of Middle Fork Dam", Proceedings of the Symposium on RCC, ASCE, New York, May 1985, pp. 71-89.
- [7] Shigeyoshi Nagataki, Tsutomu Yanagida, and Tadahiko Okumura: "Construction of Recent RCD Concrete Dam Projects in Japan", Proceedings of the Symposium on RCC, ASCE, New York, May 1985, pp. 90-101.
- [8] Richard W. Karl Jr.: "Upper Stillwater Dam RCC Construction Program", Proceedings of the Symposium on RCC, ASCE, New York, May 1985, pp. 102-110.
- [9] Kenneth D. Hansen, William G. Reinhardt: "Roller Compacted Concrete Dams", McGraw-Hill, 1986.
- [10] G. Lombardi: "Roller Compacted Concrete for Gravity Dams", Report to ICOLD Committee on Materials for Concrete Dams, Draft, November 1987.
- [11] Japanese National Committee on Large Dams: "Dams in Japan, No. 11", 1988.
- [12] G. S. Sarkaria, F. R. Andriolo: "Special factors in design of high RCC gravity dams", International Water Power & Dam Construction, 1996.
- [13] Kenneth D. Hansen: "Diverging views on RCC", International Water Power & Dam Construction, 1996.
- [14] French National Research Project BaCaRa: "Roller Compacted Concrete, RCC for dams", Paris, 1997.
- [15] American Concrete Institute: "Roller Compacted Mass Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Materials and General Properties of Concrete, 1997.
- [16] Francisco R. Andriolo: "The Use of Roller Compacted Concrete", São Paulo-Brazil, 1997.
- [17] Petar Petrović: "Hidrotehničke konstrukcije, prvi deo", Beograd, 1997.
- [18] Ljubomir Tančev: "Brani i pridružni hidrotehnički objekti", Skopje, 1999.
- [19] D. Arizanović, B. Ivković: "Uvaljani beton", Monografija Specijalni betoni i malteri, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1999.
- [20] Jiazheng Pan and Jim He: "Large Dams in China a Fifty-Year Review", China Water Power Press, Beijing, 2000.
- [21] ICOLD Committee of Cost: "The Gravity Dam a Dam for the Future", Paris, 2000.
- [22] USACE: "Engineering and Design. Roller-Compacted Concrete", Manual No 1110-2-2006, Washington, 2000.
- [23] V. Kuzmanović, Lj. Savić, B. Milovanović: "Razvoj i osobine brana od valjanog betona", Zbornik radova Drugog kongresa JDVB, knjiga 2, Kladovo, 2003.

ROLLER COMPACTED CONCRETE IN DAM CONSTRUCTION
PART TWO - MIXTURE PROPORTIONING AND PROPERTIES OF RCC

by
Vladan KUZMANOVIĆ
Ljubodrag SAVIĆ
Bojan MILOVANOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

This paper deals with properties of cement, fly ash, aggregate and admixtures as ingredients of RCC. Mixture proportioning methods are analyzed, particularly *The Method of proportioning RCC to meet specified limits of consistency*. The main properties of RCC: strength, elastic properties, creeping, watertightness, density and durability are discussed.

Finally, comparative analysis with conventional concrete is done to define the most important design recommendations

Key words: Roller compacted concrete, concrete mixture, aggregate, cementitious materials, properties of RCC, strength, watertightness, durability.

Redigovano 12.11.2003.