

Mr sc. Krešimir Šaravanja, dipl. ing. građ.

«IGH-Mostar» d.o.o. Mostar i Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru e-mail: ksaravanja@igh-mostar.ba

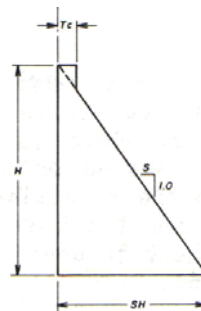
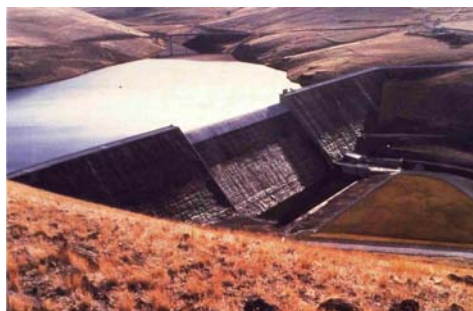
KONTROLA KVALITETE PRI GRAĐENJU UVALJANIM BETONOM

UVOD

Prema ACI Komitetu 207 "uvaljani beton predstavlja novi koncept transporta, ugradnje i zbijanja betona sa slijeganjem nula u svježem stanju korištenjem opreme za zemljane i kamene nasipe". To je suhi betonski materijal koji se konsolidira vanjskim vibriranjem, korištenjem vibro-valjaka. Od klasičnog betona se razlikuje po konzistenciji; za efikasno zbijanje uvaljani beton mora biti dovoljno suh da nosi težinu vibro-opreme, ali i dovoljno vlažan da dopusti odgovarajuću distribuciju veziva kroz masu u procesu miješanja i vibriranja. Brzina ugradnje UB je mnogo veća, a cijena mnogo niža u odnosu na klasični beton. Od granuliranog tla stabiliziranog cementom, UB se prvenstveno razlikuje po tome što sadrži krupni agregat i razvija svojstva slična klasično ugrađenom betonu.

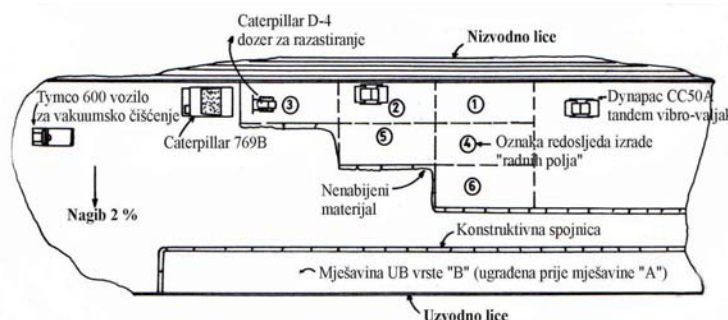
Koncept uvaljanog betona (UB) je nastao 1960-tih godina kombiniranjem ekonomičnosti i brzine (opreme) građenja nasutih brana sa sigurnošću betonskih brana. U proteklih četrdesetak godina, od nastanka ideje o građenju brana od UB, probnih građevina 1970-tih godina, preko prvih brana početkom 1980-tih i uspješno završenih velikih brana krajem 1980-tih godina, do građenja brana visine preko 200 m, UB je prešao put od ideje do opće prihvaćenog metoda građenja brana. Ugradnja UB sastoji se od transporta do mjesta ugradnje, razastiranja u vodoravne etaže i zbijanja valjcima, tj. vanjskim vibriranjem. Dosada je izgrađeno nekoliko stotina gravitacijskih i lučno-gravitacijskih brana visine preko 15 m na svim kontinentima, a mnoge su u različitim fazama projektiranja i građenja.

Od početnih brana od mršavog UB, sa sadržajem veziva $60-120 \text{ kg/m}^3$ (bez/s malim udjelom letećeg pepela ili drugog pucolana), ugrađenog u slojevima debljine 25-40 cm, uz međuslojevime od betona s većim sadržajem veziva radi poboljšanja njihove veze i smanjenja procjeđivanja, posljednjih desetak godina imamo značajan prijelaz ka branama od UB s visokim sadržajem paste, odnosno s visokim sadržajem veziva (preko 250 kg/m^3 , od čega je udio pucolana 70-80%), pri čemu se središnji dio brane smatra vodonepropusnom barijerom od UB u tankim slojevima (obično do 30 cm), a vanjska obloga je otporan omotač koji zaštićuje i izolira unutarnji beton. Karakteristična je dobra veza između slojeva, bez obrade površine etaža. Tipični primjeri su brane - Willow Creek, prva brana izgrađena u potpunosti od UB (1982), odnosno Upper Stillwater (1987), jedna od najvećih brana od UB, visine 90 m, volumena $1,281.000 \text{ m}^3$ (od čega 88% UB).



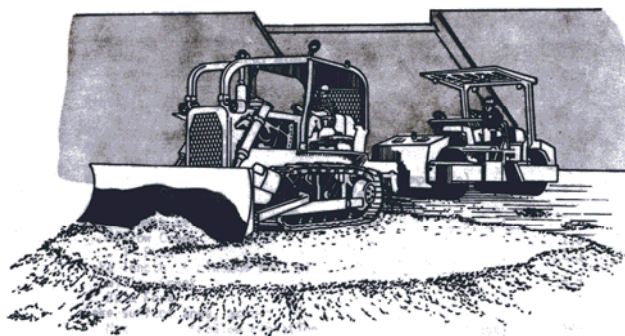
Slike 1.-2. Brana Willow Creek (SAD), prva brana od UB (1982);
Tipičan poprečni presjek brane od UB

S druge strane, u Japanu je razvijen RCD (Rolled Concrete Dam) metod, gdje se UB ugrađuje u 3-4 sloja i zbjija u debelim etažama (70-100 cm). Zbog velike debljine etaža za zbijanje, postoji obično vremenski interval od najmanje tri dana do ugradnje nove vodoravne etaže. Zbog toga se bez obrade površina etaža ne može ostvariti njihova dobra veza, pa se prije ugradnje naredne etaže na spojnici razastire sloj morta. Spojnice se režu od uzvodne ka nizvodnoj strani brane. Unutarnji UB je zaštićen slojem klasičnog betona, debljine 2-3 m, uz opsežan sustav brtvi i drenaža na svakoj spojnici. Sadržaj veziva po m^3 je 120-130 kg, od čega je 20-35 % letećeg pepela. Tipični primjeri su brane Shimajigawa i Tamagawa. To je modifikacija metoda građenja brane Alpe Gera (Italija), izgrađene početkom 60-ih godina. Završena brana je vrlo slična gravitacijskoj brani od klasičnog betona s odvojenim blokovima, iako su ovi naknadno formirani rezanjem spojnica. Metod je nešto brži nego kod brane od klasičnog betona (10-15 %), uz veći udio radne snage.



Slike 3.-4. Građenje brane Upper Stillwater

Tehnologija UB nalazi sve veću primjenu širom svijeta, ne samo za građenje i sanaciju betonskih brana, već i za građenje industrijskih kolnika, parking prostora, cesta, nosivih nasipa, auto-cesta, aerodromskih pista, te za brojne druge primjene.



Slika 5. Građenje brane tehnologijom UB

U usporedbi s konkurentnim materijalima za građenje brana (nasuti materijali, klasični beton), UB omogućuje ekonomično rješenje za mnoge brane. Jednostavnost ugradnje i brzina građenja su osnovne prednosti s izvođačkog stanovišta, a tu je mogućnost korištenja otpadnih materijala. Kod kolnika, pored smanjenja troškova, veće brzine građenja i lakoće ugradnje, postižu se i dobre čvrstoće. Korištenje otpadnih materijala ima malo značenje kod građenja kolnika od UB.

S druge strane, osnovni problemi kod primjene UB za građenje brana su kvaliteta veze između slojeva i građenje hladnim spojnicama, te pojava iznenadnih nekontroliranih pukotina. Kod građenja kolnika od UB, veći problemi su površinska tekstura, otpornost na smrzavanje/odmrzavanje, te pojava iznenadnih nekontroliranih pukotina, kao i nedostatak ispitnih metoda. Veze između slojeva, neiskustvo osoblja u radu s UB i kvalificiranost izvoditelja imaju malo ili nikakvo značenje.

U usporedbi s UB za brane, UB za kolnike ima općenito sitniji agregat, više veziva i manje pucolana (najčešće letećeg pepela), više vode, odnosno veći vodo-vezivni omjer. Pri građenju i brana i kolnika obvezno treba spriječiti pojavu segregacije betonske mješavine. Brojne terenske modifikacije opreme za miješanje, transport i ugradnju ublažile su ovaj problem kod građenja brana. Izvjesne modifikacije opreme kombinirane s primjenom finišera uvelike su smanjile mogućnost pojave segregacije pri građenju kolnika.

Primjena UB karakterizirana je visokom brzinom ugradnje (2.000-6.000 m³/dan), tako da tisuće kubičnih metara UB neodgovarajuće kvalitete mogu biti brzo ugrađene u objekt, odnosno zbijene etaže UB neodgovarajuće kvalitete mogu biti prekrivene novim etažama UB. Kratkoća građenja nekih brana od UB je impresivna u usporedbi s nasutim branama i branama od klasičnog betona. Zbog toga, kontrola kvalitete UB ima određene specifičnosti. Organizacija ljudi, materijala i strojeva je presudna za uspjeh građenja. Sve mora biti na pravom mjestu, u pravo vrijeme. Prof. Serafim je naglasio sinergistički karakter kontrole kvalitete. Ni jedno ispitivanje ne može samo biti dovoljno kao kontrola, već se zahtijeva kombinacija programa ispitivanja s vizualnim nadzorom komponenti, postrojenja za agregat i beton, konzistencije i volumne mase UB poslije miješanja i u toku procesa ugradnje. Dakle, potreban je nadzor svega!

Ako je agregat specificiranog porijekla i kvalitete, ako su vezivni materijali prethodno ispitani, ako su tehnologije miješanja, transporta, razastiranja i zbijanja projektom razrađene, uz korektno njegovanje, UB će imati prihvatljivu i projektom propisanu kvalitetu.

Očigledno, suština kontrole kvalitete UB, kao kombinacije programa ispitivanja i vizualnog nadzora, je u pravovremenom identificiranju UB neprihvatljive kvalitete i poduzimanju odgovarajućih aktivnosti korigiranja mješavine (ili postupka građenja), uz, eventualno, relativno jednostavno njegovo uklanjanje i zamjenu novim UB prije očvršćavanja.

Iz ovih razmatranja je očigledno da je na gradilištima brana od UB značajnije, nego na gradilištima brana od klasičnog betona, organizirati kontrolu kvalitete betona kao integralnog dijela tehnološkog procesa, a ne kao funkcije kontrole koja konstatira stanje i naknadno izvješćuje o rezultatima laboratorijskih i "in situ" ispitivanja. I pored ovakvog pristupa, teško je pravovremeno reagirati na ma koji dio tehnologije, od spravljanja do ugradnje UB, naročito u početnom razdoblju građenja i kod tehnološki duljih metoda ispitivanja, iz čega slijedi da je neophodna primjena specijalne ispitne opreme sa što kraćim vremenom ispitivanja.

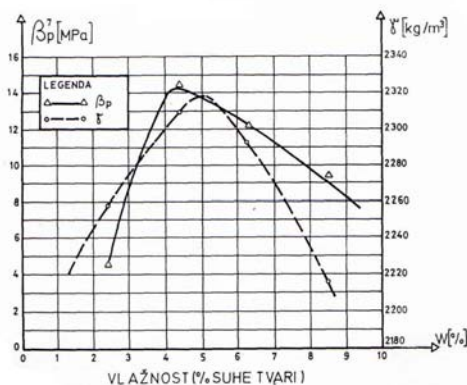
Kontrola kvalitete UB sastoji se od ispitivanja UB prije, u tijeku i nakon građenja brane, ispitivanja komponenti betona, te nerazornih ispitivanja samog tijela brane.

1. PRETHODNA ISPITIVANJA

U okviru prethodnih ispitivanja potrebno je izvršiti detaljna ispitivanja komponenti, projektiranje sastava mješavine UB, kao i uspostaviti korelacije između pojedinih karakteristika UB koji će biti korišten u toku građenja. Koreliranjem vremena

preoblikovanja prema modificiranom Vebe-postupku s "in situ" gustoćom, kao mjerom zbijenosti raspoloživom vibro-opremom, za odabrani sastav mješavine, moguće je specificirati vrijeme preoblikovanja. Također je, za rutinsku kontrolu tijekom građenja, moguće specificirati minimalni broj prijelaza vibro-opreme, uz povremeno ispitivanje gustoće, ili specificirati minimalnu i prosječnu gustoću, bez obzira na broj prijelaza.

U okviru ovih ispitivanja mogu se zbijati uzorci modificiranim Proctor-ovim postupkom, za različite energije zbijanja, u cilju određivanje njihove gustoće u vlažnom i u suhom stanju, odnosno vlažnosti. Spajanjem parova rezultata gustoća-vlažnost dobiju se Proctor-ove krivulje, za određene radove zbijanja. Prethodnim ispitivanjima moguće je uspostaviti korelaciju gustoće i sadržaja zraka, za razne sastave mješavina. Na temelju nje, za precizno određenu "in situ" gustoću (na pr. nuklearnim denzimetrom), može se odrediti sadržaj zraka.



Slika 6. Dijagram ovisnosti tlačnih čvrstoća i gustoće o vlažnosti

Također je moguće uspostaviti korelaciju između gustoće svježeg UB i tlačne čvrstoće pri starosti od 28 dana, za razne sastave mješavina. Za precizno određenu "in situ" gustoću svježeg UB moguće je s određenom točnošću prognozirati tlačnu čvrstoću.

Pošto je kontrola kvalitete tlačne čvrstoće nakon 28, 90 ili 365 dana neodgovarajuća zbog dobivanja rezultata s velikim kašnjenjem, u okviru prethodnih ispitivanja moguće je uspostaviti korelaciju između tlačnih čvrstoća standardno i forsirano njegovanih uzoraka radi podešavanja mješavine tijekom ugradnje UB. Međutim, ova praksa je osporena od nekih autora zbog nejasnosti ili, čak, neuhvatljivosti spomenutih korelacija.

2. ISPITIVANJA «IN SITU»

2.1. Konzistencija

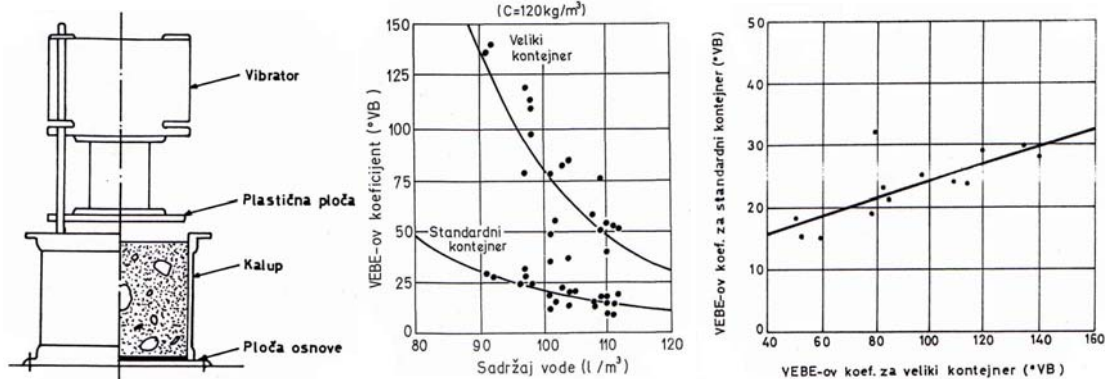
U značajnoj mjeri stabilnost i vodonepropusnost građevine od UB ovisi od sastava korištenih mješavina i rezultirajuće konzistencije i obradivosti UB. Dva ispitna postupka trebaju biti korištena radi određivanja da li je proizvedeni UB korektno konzistencije za zbijanje: ispitivanjem konzistencije i/ili vizualnim nadzorom.

Ispitivanje konzistencije mjerom slijeganja (*Slump*) nije prihvatljivo za suh, krut, mršav UB, kao ni standardni Vebe-metod mjerenja vremena preoblikovanja UB iz Abrams-ovog konusa u valjkasti lonac, promjera 240 mm i visine 200 mm. Stoga se za određivanje konzistencije UB koristi modificirano Vebe ispitivanje kao pokazatelj obradivosti UB.

Prvi eksperimenti su napravljeni od strane *USACE* i *TVA*. Dodatna proučavanja je vršio Dunstan, koji je *TVA*-ov postupak nazvao *Cannon*-ov metod. *USACE* je koristio standardnu Vebe-aparaturu, sa ili bez modificiranja opterećenja (dodavanje prstenastog utega mase 9,1 kg na standardnih 3,4 kg mase ploče Vebe-aparata, tj. ukupne mase 12,5 kg). *TVA* je koristio modifikaciju dodavanjem mase od 22,7 kg. Općenito, vrijeme vibriranja do potpunog konsolidiranja UB se smanjuje povećanjem tereta. Korištene su vibracije amplitude 0,5 mm i frekvencije 3.600 cikl./min. Gornja granica mjerenja konzistencije sa standardnim Vebe-aparatom je oko 32 s, kada počinje potreba za modificiranim aparaturom. Kod mješavina s vremenom konsolidiranja većim od 45 s dolazi do pojave perioda nemjerljive konzistencije, neovisno o metodu mjerenja, pa je 45 s razumna granica mjerenja konzistencije za kontrolu ugradnje UB. *TVA* je ustanovio da kad god je vrijeme vibriranja iznosilo 60 s (s ili bez dodatnog tereta) nema dovoljno paste u mješavini UB za ispunjenje šupljina u etaži. Prema *USACE* pogodan interval za potpuno zbijanje je od 15 do 30 s. Za branu Upper Stillwater kao pogodno vrijeme po Vebe-u je ustanovljeno cca. 15 s.

U Japanu se za ispitivanje konzistencije koriste dvije različite veličine kontejnera za Vebe-aparat. Za UB s maksimalnim zrnim većim od 40 mm koristi se kontejner promjera 480 mm i visine 400 mm (Sl. 7), s plastičnom pločom na betonu i dodatnim teretom od 20 kg na vrhu ploče. Koriste se vibracije amplitude 1 mm i frekvencije 4.000 cikl./min. Uočena je dobra korelacija rezultata sa standardnim i velikim kontejnerom Vebe-aparata (Sl. 9). Odgovarajuća vremena vibriranja su iznosila oko 20 s, odnosno 60 s. Prosječni rezultat na brani Shimajigawa je bio 15 s (uz st. devijaciju s = 7 s), a na brani Ohkawa 14 s (uz st. devijaciju s = 5 s). Također je ustanovljena bliska veza između ovih vrijednosti i zahtijevanog broja prijelaza vibro-valjka za zbijanje.

Granulometrijski sastav je, uglavnom, fiksiran, a vlažnost se može kontrolirati nadzorom; to su činitelji koji zajedno dobro definiraju obradivost materijala bez slijeganja.



Slike 7.-9. Modificirani RCD-konzistometar 480/400 mm;
Dijagram ovisnosti Vebe-koeficijenta o sadržaju vode, za standardni i veliki kontejner;
Dijagram odnosa Vebe-koeficijenata



Slike 10.-12. Vebe-aparat sa dodatnim teretom od 22,7 kg;
Zbijeni uzorak UB u Vebe-loncu;
Određivanje konzistencije na Vebe-stolu

Uzorki betona se obično uzimaju s kraja transportne trake ili s mjesta ugradnje, prije zbijanja. Vrijeme po Vebe-u korišteno u toku građenja, koje se obično početno odredi tokom prethodnih ispitivanja mješavine, može se eventualno prilagoditi tokom izrade probne dionice. Daljnja podešavanja mogu biti napravljena, ako je to potrebno, u toku izgradnje. Kada je jednom određeno vrijeme po Vebe-u, treba nastojati održati konzistentno vrijeme podešavanjem dodate vode pri miješanju u cilju kompenziranja promjena vlažnosti agregata, kao i promjena vjetera, te vlažnosti i temperature zraka. Također, usporedo s Vebe ispitivanjem mogu biti određivane i nadzirane i gustoće UB.

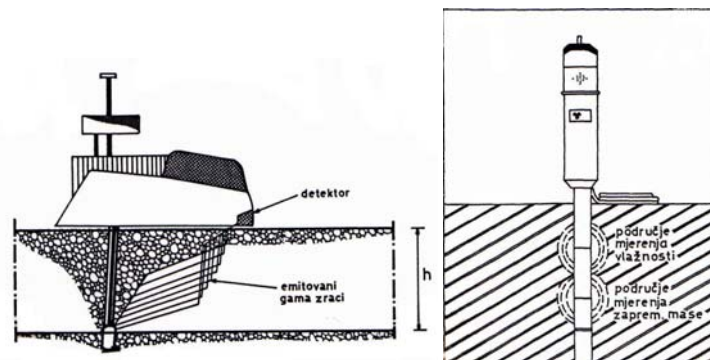
Neki projekti su imali teškoće s Vebe ispitivanjem u praćenju konzistencije i obradivosti. U tim slučajevima vizualni nadzor operacija miješanja i ugradnje UB postaje osnovno sredstvo monitoringa. U većini slučajeva Vebe ispitivanje je najbolji način da iskusni nadzor razvije svoje sposobnosti vizualnog zapažanja.

2.2. Vlažnost i gustoća

Klasični metodi mehanike tla za određivanje gustoće - metod kalibriranog pijeska ili volumometara različitih konstrukcija, teško su primjenljivi za UB zbog predugačkog trajanja ispitivanja, ali i zbog toga što je UB previše zbijen i što ne dopušta iskop u razumnom vremenu, bez gubitka okolnog materijala.

Najsigurniji način određivanja vlažnosti UB je sušenje do stalne mase, korištenjem sušionika, vruće ploče ili mikrovalne pećnice. Međutim, ono traje nekoliko sati, pa se ne može upotrijebiti kao "in situ" ispitivanje jer bi u međuvremenu UB počeo vezati. Određivanje vlažnosti agregata treba biti određeno najmanje jedanput dnevno radi pravilne kontrole vlažnosti UB. Rezultati ispitivanja dopuštaju početna podešavanja na betonari, kao i podešavanja u toku dana, kao rezultat promjena vlažnosti agregata. Kada se koriste aditivi neophodna su proširena ispitivanja radi osiguranja da agregati budu dovoljno vlažni u cilju izbjegavanja gubitka efikasnosti mješavine. Određivanje vlažnosti UB vrši se u cilju monitoringa mješavine od miješanja, preko transporta, ugradnje ili neposredno prije zbijanja.

Za određivanje "in situ" gustoće i vlažnosti, odnosno za kontrolu zbijenosti UB, najviše se koriste nuklearni mjerači (denzimetri), raznih tipova i konstrukcija. Princip rada se zasniva na emitiranju radijacije iz malog radioaktivnog izvora u UB, koji se ispituje. Kao izvor radioaktivnog zračenja koristi se cezij 137, koji emitira gama-zrake. Ako je gustoća UB mala, većina gama-zraka će proći i biti detektirana u Gaiger-Mueller-ovom brojaču smještenom u sondi mjerača. U suprotnom, dobiva se nisko očitavanje na displeju u istom vremenskom intervalu, budući da materijal veće gustoće više apsorbira gama-zrake i djeluje kao radioaktivni štiti. Za određivanje vlažnosti se koristi americij 241: berilij, koji emitira neutrone visoke energije, a koje usporavaju atomi vodika iz vlage (voda u UB). Detektorom vlažnosti otkriva se samo niska energija usporanih neutrona. Vlažni UB pokazuje visoku reakciju u istom vremenskom intervalu, i obrnuto.



Slike 13.-14. Površinski i dubinski nuklearni denzimetar

Površinskim denzimetrom (Sl. 13) brzo i točno se određuje gustoća i vlažnost na raznim mjestima duž etaže zbijenog UB. Učestalost ispitivanja (vremenska i prostorna duž etaže) se propisuje projektom. Prethodno se izbuši mala rupa, a uređaj se postavi na površinu betona iznad nje. Preko pokretne šipke radioaktivni izvor se spušta u rupu po 5 cm (ili po 2,5 cm) do dubine 20 ili 30 cm. Denzimetri s mikroprocesorom daju izravna očitavanja gustoće u raznim jedinicama ili postotak zbijenosti u odnosu na Proctor-ovu ili drugu optimalnu vrijednost, za razne dubine. Podaci iz očitavanja mjerača se koriste tokom procesa zbijanja radi potvrđivanja da je sastav mješavine korektan za dobivanje traženih gustoća i za određivanje da li su gustoće jednolične kroz etažu. Očitavanja terenskog nuklearnog mjerača trebaju se porediti s laboratorijski mjerenim gustoćama UB.

Za “in situ” određivanje gustoće i vlažnosti UB na dubinama od 20-tak centimetara do 10 m, duž pripremljene rupe koriste se dubinski denzimetri (Sl. 14). Denzimetri sa mikroprocesorom omogućavaju direktno očitavanje i memoriranje do 400 rezultata.

Prednosti nuklearnih denzimeta su u njihovoj brzini (samo nekoliko minuta za mjerenje vlažnosti i gustoće), ekonomičnosti i praktičnosti, a nedostaci su što ne reagiraju dobro za UB niske gustoće, ne prate izvjesne oscilacije debljine etaža (pošto su stavljeni na specijalnu konstantnu dubinu). Posljedica su nešto veća očitavanja gustoće (najčešće 1-3 %) za UB sklon segregaciji ili nepotpuno zbijen UB na dnu etaža. U pogledu mjerenja vlažnosti, na brani Galesville (SAD) prosječna razlika dobivenih rezultata u odnosu na rezultate sušenja je iznosila oko 2,5 %. Poželjno je voditi dijagrame gustoće i vlažnosti sa brojem dnevnih ispitivanja, srednjom vrijednošću i standardnom devijacijom dnevnih rezultata, kao i srednjom vrijednošću zadnjih 50 rezultata. Na taj način su lako uočljive globalne vrijednosti, eventualni trendovi i promjene, bez izučavanja slučajnih loših rezultata.

Optimalna vlažnost određena laboratorijski koristi se za određivanje optimalne vlažnosti “in situ”, gdje postoji neki drugi skup uvjeta i druga oprema, pa se mogu dosta razlikovati. Stoga se kao najbolja “in situ” kontrola vlažnosti preporuča vizualni nadzor zbog činjenice da je vlažnost optimalna kada mješavina UB počinje da pokazuje slab val ispred vibro-opreme. Ako je vlažnost neznatno veća od optimalne dolazi do izraženog stvaranja valova, uz lijepljenje morta za doboše valjka. Smanjenjem vlažnosti ispod optimalne sklonost ka segregaciji pri istovaru i razastiranju je izraženija, a mješavina se ne može zbiti do maksimalne zbijenosti. Dakle, kontinuiranim nadzorom moguće je vršiti mala podešavanja vlažnosti ovisno o temperaturi, varijaciji sadržaja finih čestica, vremenu dopreme, itd. Stoga je poželjna radio-veza mjesta ugradnje s betonarom.

U Japanu se prati povećanje gustoće nakon zbijanja vibro-valjkom u odnosu na gustoću nakon razastiranja buldozerom. Doprinos buldozera sastoji se u povećanju gustoće od 2.000 do 2.350 kg/m³, bez znatnijeg povećanja čvrstoće. Vibro-valjak povećava gustoću na 2.450 kg/m³, uz nagli porast čvrstoće.

2.3. Ostala ispitivanja

Ova ispitivanja se koriste za monitoring konzistencije, u cilju dobivanja svojstva miješanja i za kontroliranje ugradnje na terenu:

(1) **Granulacija sitnog i krupnog isporučenog agregata.** Ovaj ispitni postupak služi za praćenje konzistencije osiguravajući kontrolu potencijalnog korištenja nejednoliko granuliranih materijala. Ispitivanja treba provoditi najmanje jedanput dnevno na svim agregatima. Masa uzorka UB treba biti određena, a zatim isprana preko sita od 0,090 mm, a zatim osušena i prosijana kroz sita u cilju određivanja granulacije.

(2) **Postotak štetnih finih čestica** u sitnom i krupnom agregatu korištenom za spravljanje mješavine. Varijabilnost ovog podatka može voditi do devijacija u sastavu mješavine i utjecati na ujednačenost mješavine, zahtijevani sadržaj vode, obradivost ili čvrstoću.

(3) **Određivanje sadržaja morta.** Sadržaj morta u UB može biti određen radi verificiranja sastava betonske mješavine i obično se određuje uz ispitivanja jednolikosti betonske mješavine. Ispitivanje se provodi ispiranjem uzorka UB kroz sito od 4 mm.

(4) **Određivanje ciljne gustoće.** Za dobivanje postotka zbijanja treba odrediti ciljnu gustoću jednom od metoda:

(a) Nakon završetka proračuna mješavine, odbire se optimalna gustoća u vlažnom stanju. Tokom ugradnje probne dionice, ciljna gustoća može biti verificirana ili određena iz rezultata ispitivanja terenskog prototipa.

(b) Prosječna maksimalna gustoća se određuje iz ugradnje probne dionice i verificira periodično korištenjem kontrolnih dionica dugih najmanje 25-30 m i širokih 4,5-6 m. Pošto je dionica zbijena, treba izvršiti ispitivanje ugrađene gustoće u vlažnom stanju poslije svakog prijelaza vibro-valjka do postizanja maksimalne očekivane gustoće etaže. Prosječna maksimalna gustoća kontrolne dionice treba biti određena iz prosjeka na najmanje 6 odabranih mjesta. Ova vrijednost ne treba biti prihvaćena dok ispitana dionica ne bude dokazano da su operacije miješanja, ugradnje, razastiranja i zbijanja zadovoljavajuće i da korištena mješavina daje druge prihvatljive rezultate ispitivanja.

(c) Ispitni postupak modificiranog zbijanja tla može također biti korišten za određivanje ciljne gustoće. Međutim, ispitivanje zbijanja je ograničeno maksimalnim zrnom agregata odabranim za mješavinu UB. Višak zrna preko 16 mm rezultira povećanim pucanjem ili premošćenjem zrna agregata, što rezultira nekonzistentnim i netočnim gustoćama. Postupak zbijanja koristi kalup promjera cca 150 mm, uz pedesetak udaraca svakog od 5 slojeva pad čekićem s visine od cca pola metra. Gustoća u vlažnom stanju se izračuna iz izmjerene mase i volumena tako zbijenog uzorka. Za UB s manjim maksimalnim zrnom agregata ovaj metod može biti korišten kao još jedno korisno oruđe za monitoring konzistencije mješavine.

(5) **Monitoring temperature** treba biti proveden najmanje jedanput dnevno. Kada dnevne temperature rastu/padaju iznad/ispod dopuštenog intervala temperatura uvaljanog betona, treba vršiti češća očitavanja temperature zraka i UB.

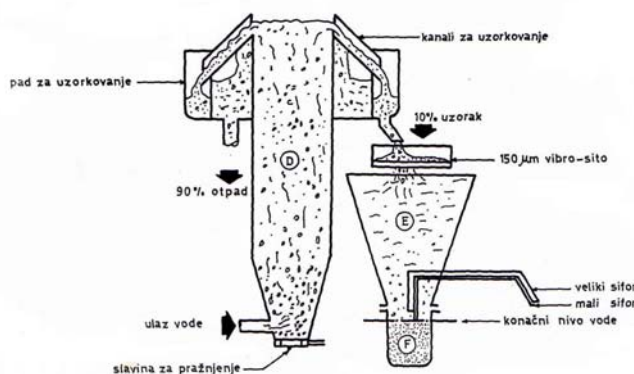
(6) **Sadržaj zraka** se obično ne ispituje na UB zbog teškoća u održavanju konzistentne razine sadržaja zraka u betonu sa slijeganjem nula. UB se prvo prosije kroz sito od 32 mm, a zatim ugrađuje u 3 sloja i zbjija na VeBe stolu ili pneumatskim čekićem. Porometar može također biti korišten za određivanje gustoće prije ispitivanja sadržaja zraka.

(7) **Spravljanje betonskih uzoraka** za određivanje tlačnih čvrstoća UB je dodatno oruđe za monitoring sastava mješavine UB. Konzistencija mješavine UB značajno utječe na sposobnost proizvodnje prihvatljivih uzoraka koji mogu biti korelirani s ugrađenim UB. Uzorci se obično zbijaju vanjskim vibriranjem. Prekomjerno vibriranje nije problem zbog vrlo vrlo malog sadržaja uvučenog zraka unutar mješavina od UB. S druge strane, premalo vibriranje krutih mješavina će proizvesti neželjene šupljine unutar uzoraka, te rezultirati nižim i nekonzistentnim čvrstoćama. Metodi zbijanja uzoraka za ispitivanje čvrstoća slijede 2 različita pristupa: korištenjem vibro-stola (primjenom dodatnog tereta i vibriranja na svaki od 3 sloja svježeg UB), odnosno pneumatskog nabijača ili električnih udarnih čekića s kružnim metalnim pločama za zbijanje. Slojevi UB se zbijaju na sličan način kao kod vibro-stola.

2.3. Sadržaj cementa

Sadržaj cementa u uvaljanom betonu može se odrediti pomoću monitora kvalitete betona. Modifikacija za UB (Sl. 15) sadrži dodatak 200-gramskog omekšivača vode za ispiranje. Koristi se veći uzorak (4,5-6,8 kg) i veći broj sita radi odvajanja krupnijeg agregata pri ispiranju s poznatom količinom vode (37,9 l). Oprema sadrži viseći rezervoar vode s pumpom za cirkulaciju, motor za miješanje, seriju sita sa donjim sitom od 0,15 mm i kalcijev analizador. Nakon završenog ispiranja uzorka svježeg UB kroz sita, pobuđuje se suspenzija materijala sitnijeg od 0,15 mm. Vrlo mali uzorak se analizira u kalcijevom analizatoru. Iz kalibracijskog dijagrama dobije se sadržaj cementa u jedinici volumena UB. Rezultat se dobije najkasnije jedan sat nakon početka miješanja.

Sadržaj cementa može se jednostavno i brzo dobiti i *RAM*-metodom (*Rapid Analysis Machine*), prvi put publiciranim prije 30 godina (Sl. 16).



Slike 15.-16. Ispitivanje sadržaja cementa s CQM;
Shema *Rapid Analysis Machine* (RAM) za analizu sastava UB

Ispitni ciklus započinje ubacivanjem uzorka u stub D, uz raspršivanje vode sa dna stuba koja razbija strukturu UB, uz dizanje suspenzije finih čestica cementa, prašine i sitnog pijeska i njeno prelijevanje na vrhu. Oko 90 % suspenzije ide u otpad, a ostatak se odvodi preko vibro-sita # 0,15 mm u posudu E i miješa uz dodatak 2 flokulirajuća agensa. Flokulirane čestice padaju na dno posude E, a voda se sifonira brzo pomoću velike sifonske cijevi, zatim polako pomoću male sifonske cijevi, do konstantne konačne razine. Posuda F se zatim skida i vaga na osnovu čega se iz kalibracijskog dijagrama dobije sadržaj cementa.

3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

3.1. Optimalna vlažnost

Optimalna vlažnost UB određuje se laboratorijskim metodom modificiranog Proctor-a. Postupak se ponavlja više puta, uz postupno povećanje vlažnosti. Rezultati se nanose na dijagram ovisnosti gustoće (i poroznosti) o vlažnosti. Optimalna vlažnost je ona koja odgovara maksimalnoj gustoći.

Iako je energija zbijanja veća nego kod metoda standardnog Proctor-a, ipak se ne može reproducirati rad vibro-valjka. Radi boljeg simuliranja tog rada korišteni su teži maljevi, tanji slojevi i veće energije zbijanja. Ovo ispitivanje je pogodno za mršavije mješavine UB s krupnijim agregatom.

Modificirani VeBe-postupak se također koristi za određivanje optimalne vlažnosti na terenu. Pogodan je za mješavine UB sa sitnijim agregatom i većim sadržajem vode, ali nije u potpunosti korektan i primjenljiv za stvarne terenske uvjete.

3.2. Gustoća

Gustoća svježeg UB može se odrediti kao količnik razlike masa kalupa s UB i praznog kalupa sa volumenom kalupa. Međutim, na ovaj način ne mogu se uzeti u obzir šupljine oko oboda valjka.

Gustoća očvrstlog UB najtočnije se može odrediti prije ispitivanja tlačne čvrstoće metodom hidrostatske vage, na kontrolnim uzorcima izrađenim od svježeg UB ili jezgrama izvađenim iz ugrađenog UB.

Dakle, očigledna je analogija sa ispitivanjem klasičnog betona, a dobiveni rezultati se, osim međusobno, upoređuju i s “in situ” rezultatima.

3.3. Čvrstoće

Tlačne i vlačne čvrstoće uvaljanog betona laboratorijski se određuju kao i kod klasičnih betona. Međutim, postignuti stupanj zbijenosti kontrolnih uzoraka, bez obzira na način njegovog zbijanja, ne može odgovarati onom “in situ”. Čvrstoće najbolje pripremljenih uzoraka su cca. 30 % manje od čvrstoća ugrađenog materijala u objektu. Gustoća uzoraka je manja za nekoliko postotaka.

Mršavi UB zbjija se u kalupima (Sl. 17) raznim mehaničkim i pneumatskim nabijačima sa specificiranom ukupnom energijom ekvivalentnom metodu modificiranog Proctor-a, odnosno do stanja kada materijal počinje da se raspada, odskače oko stope nabijača i izlijeće iz valjka (obično 15-20 s po sloju). Daljnje zbijanje nema efekta. Vrijeme potrebno da se mješavina dobije, donese u laboratorij, ugradi u kalupe i zbjije, treba biti, radi minimiziranja njenog isušivanja i hidratiziranja, što kraće. Osim nabijačem, u nekim slučajevima, uvaljani beton se zbjija vibracijama u kalupu pričvršćenom na modificiranom VeBe-stolu, uz dodatni teret, kao u slučaju određivanja konzistencije. Međutim, dobiveni su loši rezultati, pogotovo za kalupe većih dimenzija. Općenito, ni jedan od primjenjivanih postupaka u potpunosti ne konsolidira uzorke, čak ni njihova kombinacija, tj. zbijanje pneumatskim nabijačem uzorka u kalupu pričvršćenom na vibro-stolu. Postupak je skuplji, bez značajnijeg efekta. Po obodu uzoraka i na kontaktu slojeva prisutne su zračne šupljine. Prema japanskom *RCD*-metodu, zbijanje uzoraka se vrši u kalupima na Vebe-stolu, uz dodatno opterećenje (o čemu je prethodno pisano).

Masni UB sa većim sadržajem veziva i vode moguće je zbijati u kalupima na standardnom Vebe-stolu. Tipičan primjer je brana Upper Stillwater. Za kontrolu kvalitete zbijenosti laboratorijskih uzoraka koriste se “in situ” gustoće i prosječna gustoća jezgri izvađenih iz očvrstlog uvaljanog betona brane ili, eventualno, probne dionice.

Iz očvrstlog ugrađenog UB vade se, radi određivanja čvrstoća, jezgre promjera od 10 do 30 cm, analogno kao kod klasičnog betona. One daju korektniju indikaciju “in place” kvalitete UB.

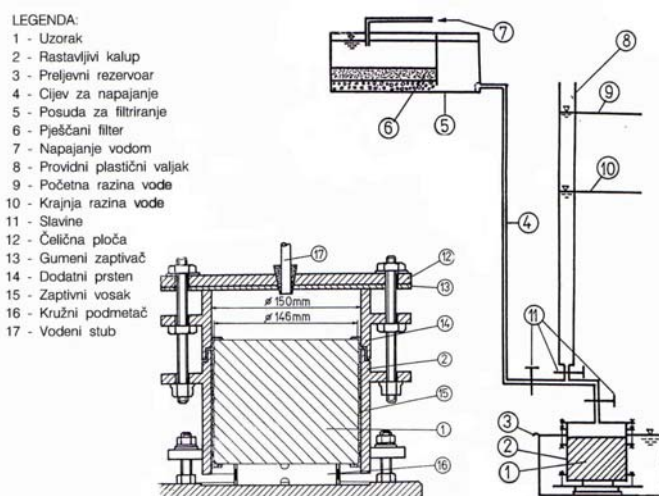
Za određivanje čvrstoće na posmik koristi se veliki *U.S. BuRec*-ov uređaj za izravni posmik. Koristi se za uzorke oblika valjka, promjera od 10 do 30 cm. Ispitivanje izravne čvrstoće na posmik i kuta klizanja se provode u dvije faze: prvi korak je ispitivanje izravnim posmikom uzorka, a zatim slijedi određivanje parametara trenja klizanja na smaknutom uzorku.



Slika 17. Priprema ispitnih uzoraka od UB
Slike 18.-19. Ispitivanje čvrstoće uzoraka UB

3.4. Vodopropusnost

Vodopropusnost UB se ispituje opremom razvijenom iz uređaja prema *DIN 18130E* (Sl. 20), pri promjenljivom protoku vode, tj. mjeri se vrijeme spuštanja razine vode. Uzorci su zbijeni do maksimalne volumne mase po Proctor-u i njegovani 25 dana prije ispitivanja na temperaturi od 20 °C i relativnoj vlazi od 98 %.



Slika 20. Uređaj za ispitivanje vodopropusnosti, s detaljom

4. NAKNADNA ISPITIVANJA

Naknadna ispitivanja UBtona sastoje se u ispitivanju jezgara izvađenih iz očvrstlog betona sa različitih lokaliteta i u različitim vremenskim intervalima nakon ugradnje UB, ispitivanja vodopropusnosti na rupama preostalim nakon njihovog vađenja, kao i u nedestruktivnim ispitivanjima tijela brane specijalnom opremom.

Na jezgrama promjera od 10 do 30 cm, ispituju se vodopropusnost, gustoća i čvrstoće (tlačna, razne vlačne i čvrstoća na posmik) duž spojnica i van njih, čime se stječe uvid u kvalitetu izvršenih radova pri građenju UB.

Na brani Ohkawa (Japan) vodopropusnost je ispitivana uz djelovanje vode pod tlakom u rupama, dobivenim vađenjem jezgara, dubine cca. 3 m (kroz 6 etaža debljine po cca. 50 cm). Koeficijenti k , dobiveni mjerenjem u pet točaka na sredini etaža i na pet spojnica etaža, su bili manji od koeficijenata dobivenih na uzorcima od svježeg UB.

5. LITERATURA

- (1) ... (1988): ROLLER COMPACTED MASS CONCRETE, Reported by ACI Committee 207, ACI Materials Journal, Detroit, Vol. 85, No. 5, IX-X 1988.
- (2) Beslač, J., Sarić, M. (1989): KONTROLA KVALITETA I PROBLEMI PRIMJENE VALJANOG BETONA NA OBJEKTIMA BRANE MOSUL, Saopćenja sa 14. kongresa JDVB, Struga, X. 1989, Knjiga 1, 1989.
- (3) Dhir, R.K., Munday, J.G.L., Yong Ho, N. (1982): ANALYSIS OF FRESH CONCRETE: DETERMINATION OF CONTENT BY THE RAPID ANALYSIS MACHINE, Magazine of Concrete Research, Vol.34., No.119, VI 1982.
- (4) McLean, F.G., Pierce, J.S. (1988): COMPARISON OF JOINT SHEAR STRENGTHS FOR CONVENTIONAL AND ROLLER COMPACTED CONCRETE, Proceedings of the ASCE Conference on Roller Compacted Concrete, San Diego, II-III 1988., published by the ASCE, New York, 1988.
- (5) Reeves, G.N., Yates, L.B.Jr. (1985): SIMPLIFIED DESIGN AND CONSTRUCTION CONTROL FOR ROLLER COMPACTED CONCRETE, Proceedings of the ASCE Symposium on Roller Compacted Concrete, Denver, V 1985., published by the ASCE, New York, 1985.
- (6) Selimović, M., Šaravanja, K., Rogić, V., Dasović, D. i Zebić, S. (1989): PRISTUP ISTRAŽIVANJU I PRIMJENI UVALJANOG BETONA ZA BRANE, Saopćenja sa 14. kongresa JDVB, Struga, X. 1989, Knjiga 1, 1989.
- (7) Shimizu, S., Yanagida, T., Jojima, S. (1986): THE DEVELOPMENT OF THE R.C.D. METHOD IN JAPAN, International Water Power and Dam Construction, London, Vol. 38, No. 1, I 1986.
- (8) Šaravanja, K. (1995): PRIMJENA UVALJANOG BETONA ZA GRAĐENJE KOLNIKA, Zbornik radova 1. Hrvatskog kongresa o cestama Opatija/Proceedings of the 1st Croatian Road Congress Opatija, Knjiga 2/Volume 2, Hrvatsko društvo za ceste "Via - Vita", Zagreb, X. 1995.
- (9) Šaravanja, K. (1995): TEHNOLOGIJA UVALJANOG BETONA S POSEBNIM OSVRTOM NA MOGUĆNOSTI KORIŠTENJA ELEKTROFILTERSKOG PEPELA, Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1995.
- (10) Šaravanja, K. (1996): UVALJANI BETON ZA GRAĐENJE BRANA, Časopis HDGI «Građevinar» Zagreb, Vol. 48, No. 2, II. 1996.
- (11) Šaravanja, K. (2001): TEHNOLOGIJA IZVOĐENJA BRANA OD UVALJANOG BETONA, Znanstveni glasnik časopis za prirodne i tehničke znanosti Sveučilišta u Mostaru, br. 10, Mostar, X. 2001.

(12) ... (2000): ROLLER-COMPACTED CONCRETE, USACE, Engineering Manual EM 1110-2-2006, Washington, 2000.

6. KRATICE

ACI – American Concrete Institute, Detroit (SAD)

ASCE – American Society for Civil Engineers, New York (SAD)

DIN – Deutsche Industrien Normen

HDGI - Hrvatsko društvo građevinskih inženjera

JDVB – (ex)Jugoslavensko društvo za visoke brane

RAM - Rapid Analysis Machine

RCC – Roller Compacted Concrete

RCD – Rolled Concrete Dam

SAD – Sjedinjene američke države

TVA - Tennessee Valey Authority

UB – uvaljani beton

USACE - U.S. Army Corps of Engineers, Washington (SAD)

USBuRec - U.S. Bureau of Reclamation, Denver (SAD)