

HIDROTEHNIČKI BETONI

Prof. dr. sc. Nina Štirmer
Izv. prof. dr. sc. Ivan Gabrijel

1. predavanje

1

HIDROTEHNIČKI BETONI

- oblik nastave predavanja, auditorne vježbe
- nastavnici i suradnici prof. dr. sc. Nina Štirmer
izv. prof. dr. sc. Ivan Gabrijel, dipl. ing. građ.
- satnica izvođenja nastave: 30+30
- 2 kolokvija + popravni kolokvij
- način polaganja ispita: pismeni i usmeni
- ispitni termini prema planu ispitnih rokova
- konzultacije prof. dr. sc. Nina Štirmer – petak 10 - 12
izv. prof. dr. sc. Ivan Gabrijel – ponedjeljak 12 - 14

2

Ponedjeljakom, 11 do 13 sati, učionica 215

PREDAVANJA

R.br.	Datum	Nastavna jedinica
1.	2.10.2017.	Uvod: karakteristike i primjena hidrotehničkih betona
2.	9.10.2017.	Toplina hidratacije: toplinska naprezanja i pukotine; volumenske promjene
3.	16.10.2017.	Kontrola pukotina u masivnom betonu
4.	23.10.2017.	Odabir sastojaka za izradu masivnih hidrotehničkih betona i projektiranje sastava
5.	30.10.2017.	Prijevoz, ugradnja i njega betona: dinamika betoniranja
6.	6.11.2017.	Betoniranje u ekstremnim klimatskim uvjetima
7.	13.11.2017.	Čvrstoća i deformacije: rizik pojave pukotina
8.	20.11.2017.	Sustavi za hlađenje masivnih betona
9.	27.11.2017.	Posebni betoni i tehnologije za izvedbu hidrotehničkih građevina: uvaljani beton, prepakt beton, betoniranje pod vodom
10.	4.12.2017.	Betoni poboljšane vodonepropusnosti
11.	11.12.2017.	Erozija betona kod hidrotehničkih građevina. Primjeri sanacije
12.	18.12.2017.	Zaštita betonskih elemenata kod hidrotehničkih građevina
13.	8.1.2018.	Procjena stanja hidrotehničkih betona u postojećim konstrukcijama
14.	15.1.2018.	Primjeri izvedbe hidrotehničkih građevina
15.	22.1.2018.	Propisi i norme u području primjene hidrotehničkih betona

Ponedjeljakom, 9 do 11 sati, učionica 215

VJEŽBE

R. br.	Datum	Nastavna jedinica
1.	9.10.2017.	Cement i toplina hidratacije; Temperatura mješavine
2.	16.10.2017.	Tijek oslobađanja topline hidratacije
3.	23.10.2017.	Proračun toplinskog toka u mladom betonu
4.	30.10.2017.	Distribucija temperature i pojava naprezanja u betonu tijekom izvedbe konstrukcija i rizik pojave pukotina
5.	6.11.2017.	Razvoj čvrstoće i krutosti u mladom betonu; ponašanje mladog betona pod opterećenjem
6.	13.11.2017.	Proračun naprezanja u mladom betonu
7.	20.11.2017.	Gubitak topline iz krutih tijela
8.	27.11.2017.	1. kolokvij
9.	4.12.2017.	Proračun toka temperature u masivnom betonu i procjena rizika pojave pukotina - rješavanje i izrada programa
10.	11.12.2017.	Rješavanje i izrada programa
11.	18.12.2017.	Rješavanje i izrada programa
12.	8.1.2018.	Rješavanje i izrada programa
13.	15.1.2018.	2. kolokvij
14.	22.1.2018.	Rješavanje i izrada programa
15.	29.1.2018.	Popravni kolokvij

Masivni beton – svaka veća količina monolitnog betona ugrađenog u konstrukcijske elemente čija minimalna dimenzija iznosi 0,5 m ili više

Masivni beton – beton čiji je volumen toliki da zahtjeva posebne metode projektiranja, ugradnje i njega zbog oslobađanja topline i prateće promjene volumena

5

Osnovni mehanizmi pojave toplinskih naprezanja

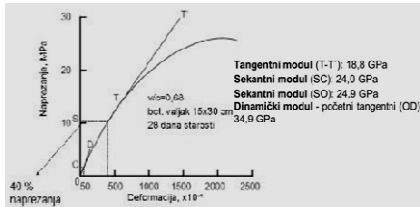
- Oslobađanje topline tijekom hidratacije cementa
 - egzoterman proces
 - dovodi do porasta temperature u jezgri elementa
- Pad temperature nakon hidratacije cementa
 - zbog razlike u vanjskoj temperaturi i temperaturi betoniranog elementa

6

Faktori koji utječu na toplinska naprezanja

E - modul elastičnosti

Beton nije potpuno elastičan materijal, no za područje praktične primjene pretpostavlja se konstantan modul elastičnosti pri uobičajenom rasponu naprezanja masivnog betona.



7

Faktori koji utječu na toplinska naprezanja α - toplinski koeficijent

Ovisi o sastavu betona, toplinskom koeficijentu, vlažnosti betona.

$$\alpha_b = \alpha_{cp} - \frac{2g(\alpha_{cp} - \alpha_a)}{1 + k_{cp}/k_a + g[1 - k_{cp}/k_a]}$$

g - volumni udio agregata;

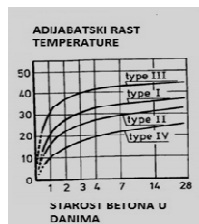
k_{cp} i k_a - krutost cementne paste i agregata

$$\alpha_b = 1 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$$

8

Faktori koji utječu na toplinska naprezanja

- Adijabatski porast temperature tijekom hidratacije cementa



9

Toplinska naprezanja

Vrijedi Hookeov zakon:

$$\sigma = E \varepsilon$$

Na što možemo utjecati?

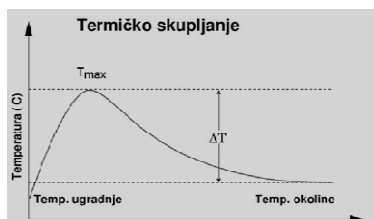
$$\varepsilon = \alpha \Delta T$$

E
 α
 ΔT

Vrlo malo, jer ovise o agregatu, koji se zbog ekonomičnosti uglavnom odabire tako da bude što bliže gradilištu.

10

ΔT – promjena temperature - jedino što se može učinkovito kontrolirati

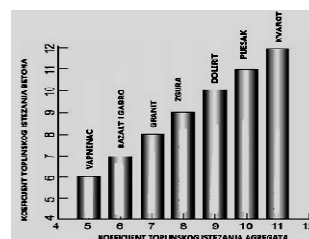


ΔT - temperatura ugradnje svježeg betona + adijabatski rast temperature - temperatura okoline – pad temperature zbog gubitka topline

11

Kako?

- Agregat s malim toplinskim koeficijentom



Vapnenac, bazalt, gablo i granit imaju manje toplinske koeficijente pa tako smanjuju toplinsko širenje betona i sprječavaju potencijalne pukotine.

12

Kako?

- Agregat većeg promjera zrna



-OPREZ - prevelika zrna agregata povećavaju rizik pojave pukotina oko zrna uslijed spriječenog skupljanja cementne paste, te povećavaju segregaciju svježeg betona i nehomogenost u očvrslom betonu

13

Kako?

- Cement

Miscralni sastojak	Toplina hidratacije (kJ/g)
C_3S	502
C_2S	260
C_4A	867
C_4AF	419

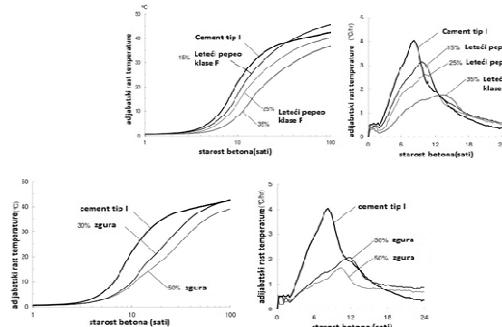
Cement niske topline hidratacije:

- specificira se prema normi **HRN EN 197-1** + zahtjev za nisku toplinu hidratacije
- gornja karakteristična vrijednost topline hidratacije **300 J/g**
- oznaka **LH**

14

Kako?

- Dodavanje pucolana/zgure



15

Kako?

- Hlađenje tekućim dušikom



- vrlo učinkovito
- skupo
- potrebna specijalizirana oprema

16

Kako?

- Naknadno hlađenje



-cijevima ugrađenima u sam element

17

Kako?

- Izolacija betoniranog elementa



18

Kako?

- Betoniranje noću/rano ujutro



19

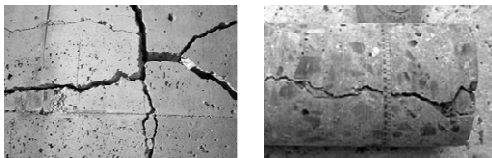
Kako?

- Prethodno hlađenje
 - hlađenje vode za miješanje betona (na 2 °C)
 - zamjena dijela vode ledom (1 kg leda apsorbira 334 kJ energije kada se otopi)
 - proizvodnja agregata tijekom hladnijih klimatskih uvjeta te skladištenje u zasjenjenom prostoru
 - uranjanje krupnog agregata u hladnu vodu (jedan od najučinkovitijih načina)
 - hlađenje agregata hladnim zrakom (agregat zauzima velik volumen u betonu te ima najveću utjecaj na početnu temperaturu betona)
- Manje količine cementa

20

Pukotine

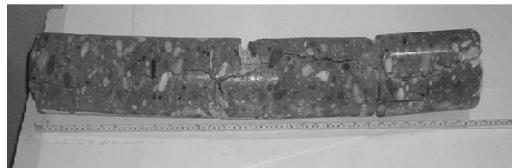
- javljaju se nekoliko dana nakon betoniranja, ali se mogu pojaviti i nakon više tjedana.
- smanjuju trajnost, stabilnost konstrukcije, omogućuju prodor tvari kroz strukturu te koroziju armature, stoga je važno smanjiti njihov rizik pojave



21

Pukotine

- sanacija toplinskih pukotina je složena
- troškovi sanacije često veći od troškova betoniranja elemenata



22

Reprezentativni primjeri građenja masivnim betonom

- Hooverova brana, 1935.g., 2,4 mil. m³ betona



23

Reprezentativni primjeri građenja masivnim betonom

- Brana Grand Coulee, 1942.g., 8,0 mil. m³ betona



24

Reprezentativni primjeri građenja masivnim betonom

- Brana Glen Canyon, 1963.g., 4,1 mil. m³ betona



25

KRITERIJI

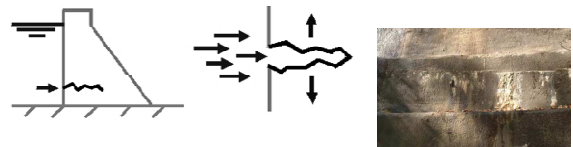
- Obradljivost
- Niska toplina hidratacije
- Minimum pukotina
- Vodonepropusnost
- Trajnost
- Ekonomičnost
- Čvrstoća

26

PROBLEMI U MASIVNOM BETONU

- Toplina hidratacije
- Zagrijavanje, pa zatim hlađenje velike mase betona
- Promjene volumena
- Znatna vlačna naprezanja

27



- Gubitak konstrukcijske cjelovitosti
- Pukotine
- Znatno procurivanje
- Skraćenje životnog vijeka konstrukcije
- Estetski nedostaci

28

Ime brane (zemlja)	God. završe- tki	Cement	Pucolan	Pijesak	Krupni agregat	Max. zmo agregata (mm)	Voda (kg/m ³)	v/(c+p) ili v/c	Uvu- čeni zrak	Gustoća (kg/m ³)	Do da ci
		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³						
Hoover (SAD)	1936	225	0	552	1589	225	130	0.58	0	2488	Ne
Bartlett (SAD)	1939	276	0	713	1346	75	160	0.58	0	2480	Ne
Grand Coulee (SAD)	1942	224	0	582	1523	150	134	0.6	0	2464	Ne
Pieve di Cadore (Italija)	1949	150	150	700	1239	120	126	0.63	2	2560	Da
Hungry Horse (SAD)	1952	111	53	499	1672	150	77	0.47	3	2437	Ne
Salamonde (Portugal)	1953	250	0	438	1554	200	133	0.54	0	2376	-
Warragamba (Australija)	1960	196	0	503	1687	150	104	0.53	0	2469	Ne
Krasnojarsk (Rusija)	1970	230	0	-	-	100	126	0.55	-	-	Da
Pueblo (SAD)	1974	134	44	565	1535	89	100	0.56	3.5	2379	Da
Peace Site 1 (Kanada)	1979	94	63	575	1549	75	101	0.67	3.6	2379	Da
Itaipu (Brazil-Paragvaj)	1982	108	13	582	1837	150	85	0.7	4	2537	Ne

29

Edwards Dam (SAD)

Dovršena 1837., uklonjena 1999.
radi zaštite okoliša
Vrsta: nasipna (drvo, kamen, beton)
7 milijuna \$ cijena uklanjanja

Folsom Dam (SAD)

Dovršena 1956. uz trošak od 81,5
milijuna \$, a 1995. je došlo do
pucanja propusnog otvora koji je
popravljen za 20 milijuna \$ srećom
ne dovodeći do katastrofe

<http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/dam/index.html>

30

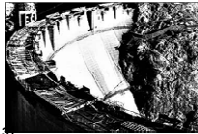
Hoover Dam (SAD)

- Radovi: 1931.-1936.
- Cijena: 165 milijuna \$
- Tip: gravitacijska
- Materijal: Beton

ZANIMLJIVOSTI:

-prvi put korišteno hlađenje ugrađenog betona pomoću vode u sustavu ugrađenih cijevi

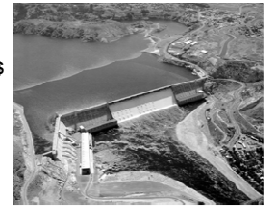
-velike težine i debljine pa nije trebala biti zakrivljena, no projektanti su mislili da će se ljudi osjećati sigurnije



31

Grand Coulee Dam (SAD)

- Radovi: 1933.-1942.
- Cijena: 300 milijuna \$
- Tip: gravitacijska
- Materijal: Beton

**ZANIMLJIVOSTI:**

-Da nije korišteno hlađenje sustavom ugrađenih cijevi, betonu bi trebalo 200. god. da se ohladi prirodnim putem (da se cijevi korištene za hlađenje postave kraj na kraj protezale bi se 3000 km)

-Baza je skoro 4 puta veća od baze piramide u Gizi

-Sadrži toliko betona da bi se mogla napraviti autocesta preko SAD-a

-Ugrađeno 410 020 m³ betona mjesečno



32

Three Gorges Dam (Kina)

- Cijena: 17-100 milijardi \$
- Tip: gravitacijska
- Svrha: kontroliranje poplave, hidroelektrična energija, navodnjavanje, plovidba
- Materijal: Beton

ZANIMLJIVOSTI:

-preseljeno više od milijun ljudi - ljudi koji se brinu o okolišu kažu da će brana istrijebiti rijetke vrste

-rezervoar će uhvatiti milijune tona sirovih zagađivača izbačenih iz najvećeg kineskog industrijskog grada (Chongqing)



33

Primjer - gradnja hidroelektrane Lešće

34

Primjer - gradnja hidroelektrane Lešće

35

UVALJANI BETON

36

ŠTO JE UVALJANI BETON ?

- Novija posebna tehnologija masivnog betona, posebno razvijena za gradnju velikih brana
- Uvaljani beton predstavlja novi koncept transporta, ugradnje i zbijanja betona
- Ugrađuje se opremom za zemljane i kamene nasipe
- Mora biti dovoljno suh da nosi težinu vibroopreme i dovoljno vlažan da dopusti distribuciju veziva kroz masu



37

- uvaljani beton najčešće se koristi za izgradnju:

- BRANA**- PROMETNICA**

38

Ugradnja uvaljanog betona

- Građenje u horizontalnim slojevima (od nizvodne prema uzvodnoj strani brane)
- Razastiranje u 3 – 5 slojeva debljine 50 – 75 cm.
- Težnja debljim slojevima zbog smanjenja broja horizontalnih spojnica.



39



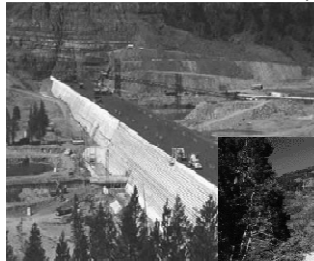
- Prva brana koja je upotpunosti izgrađena od uvaljanog betona

- Visoka oko 90 m, volumena 1,124 000 m³ (od čega 80 % uvaljani beton)

Bran Willow Creek (SAD)

40

- Jedna od najvećih brana izgrađenih od UB
- visine 90 m, volumena 1.281.000 m³ (od čega 88 % UB)

**Upper Stillwater**

41

Kemijska djelovanja

- Za većinu hidrotehničkih objekata štetna kemijska djelovanja na očvršli portlandcementni beton male poroznosti su toliko spora da su zanemariva
- Razaranje betona u kiselom okolišu
- Lužnata tla koja sadrže sulfat magnezija, natrija i kalcija u prisustvu vlage također napadaju beton tako što stvaraju kemijske spojeve koji upijajući vlagu bujaju i tako razaraju beton
- Kemijska djelovanja su najrazornija u sanitarnim sistemima gdje nastaju vodik-sulfidi

42

Biološka djelovanja na beton

- Beton može biti odlična podloga za vegetaciju, neke mikroorganizme, pa i krupnije organizme kao npr. školjke.
- Školjke prodiru duboku u strukturu betona i mogu u potpunosti uništiti zaštitni sloj armature.

43

Osnovni parametri za procjenu potencijalne trajnosti AB konstrukcije

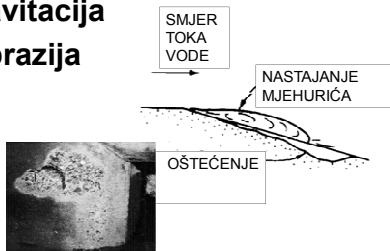
- **VODOPROPUSNOST** - postupak i kriterije sukladnosti trebaju usuglasiti uvjetovatelj i proizvođač, ispitivanje prema **HRN EN 12390-8**.
- **PLINOPROPUSNOST** – nije propisano TPBK-om, ispitivanje prema: **EN 993-4**, **HRN EN ISO 7783-1**, **HRN EN ISO 7783-2**
- **KAPILARNO UPIJANJE** – nije propisano TPBK-om, ispitivanje prema: **HRN EN 1338**, **HRN EN 1339**, **HRN EN 13369**, **HRN EN 13057**



44

Erozija betona kod hidrotehničkih građevina

- **Kavitacija**
- **Abrazija**



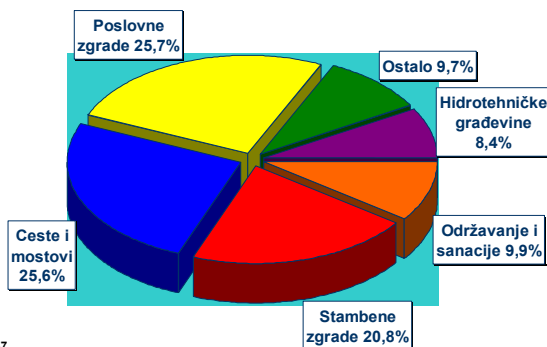
45

Betoni poboljšane vodonepropusnosti

Primjer:

- Polimerom modificirani betoni
- Polimerni beton

46

Postotak uporabe cementa prema vrstama konstrukcija

47

SVOJSTVA CEMENATA (A, B, C, D)

- **A - običan portlandski cement**, uobičajenih svojstava i primjene
- **B - ima najveći prirast čvrstoća (rane čvrstoće)**, ali i povećanu toplinu hidratacije - sanacije
- **C - niska toplina hidratacije** - masivni betoni
- **D - sulfatnootporni cement**

48

**PRIMJERI CEMENTA POGODNIH ZA
IZRADU MASIVNOG BETONA**

Holcim

CEM II/B-M(S-V) 42,5N



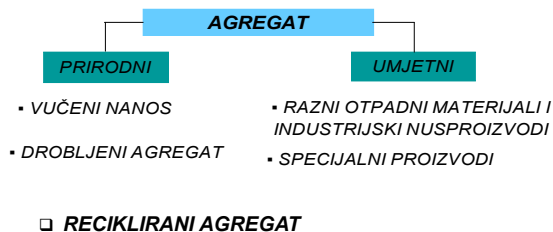
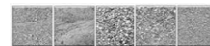
CEM II/B-M (S-LL) 42,5N

CEM III/B 32,5N SR-LH



CEM III/A-M(S-V) 42,5N

49

AGREGAT

50

Agregat

- Cijena
- Dimenzijska stabilnost
- Utječe na modul elastičnosti, tvrdoću i otpornost na habanje



51

Mineralni dodaci - TPBK

52

Kemijski dodaci

- Plastifikatori
- Superplastifikatori
- Aeranti
- Ubrzivači vezivanja
- Usporivači vezivanja
- Dodaci za zadržavanje vode
- Ubrzivači očvršćivanja
- Dodaci za vodonepropusnost
- Usporivači vezivanja/plastifikatori
- Usporivači vezivanja/superplastifikatori
- Ubrzivači vezivanja/plastifikatori
- Ubrzivači vezivanja/superplastifikatori
- Dodaci za betoniranje pri niskim temperaturama

53