

Dimenzioniranje posebnih vrst betona z določeno prostorninsko maso

Mix Proportioning of Special Concretes with Fixed Unit Weights

R. Čop¹, Fakulteta za pomorstvo in promet Portorož, Univerza v Ljubljani

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-04-21

Pri dimenzioniranju posebnih betonov z določeno prostorninsko maso sta bili uporabljeni tradicionalna in ameriška metoda. Šele preverjanje rezultatov tako dimenzioniranih betonskih mešanic v industrijski proizvodnji je dokazalo uporabnost posamezne metode. Za osnovo je bila izbrana ameriška metoda dopolnjena z uporabo rezultatov merjanja prostorninske mase posameznega uporabljenega agregata s prešanjem.

Ključne besede: posebni beton, dimenzioniranje, kontinentalna metoda, Ameriška metoda, metoda z upoštevanjem modula stisljivosti

The traditional and the American method were applied in proportioning the mix of special concretes with fixed unit weights. The applicability of individual methods was established only after having examined the results of the performance of proportioned concrete mixtures within the industrial process. The method adopted is based on the American method which included results of measuring the cubic contents by compressing individual aggregates.

Key words: special concrete, mix design, traditional method, American method, method with included compacting factor

1 Uvod

V bližnji preteklosti je proizvodnja betonskih polizdelkov z določeno prostorninsko maso slonela izključno na manufakturnem načinu izdelave. Nižanje cene betonskih polizdelkov je zahtevalo višanje produktivnosti in nižanje proizvodnih stroškov. Za to pa niso zadostovale le izkušnje, pridobljene v neposredni proizvodnji, temveč je bilo potrebno vpeljati in uporabiti tudi znanstvene metode.

Izhodišče celotne proizvodnje betonskih polizdelkov je dimenzioniranje betonskih mešanic. To pomeni:

- izbrati primerne sestavine betona
- določiti relativne količine sestavin betona.

Namen dimenzioniranja betonskih mešanic je dobiti čim bolj ekonomičen beton pri še sprejemljivih najnižjih vrednostih njegove kvalitete: konsistenci svežega betona, mehanski trdnosti mladega betona in primerni obstojnosti starega.

2 Potek dimenzioniranja betonskih mešanic

Potrebno je poudariti, da betonskih mešanic ni mogoče dimenzionirati v pravem pomenu besede. Pri izdelavi betona imamo opraviti predvsem z agregati zelo spremenljivih lastnosti, ki jih ni mogoče dokončno določiti. Zato lahko pri dimenzioniranju betonskih mešanic pogosto le empirično določimo mešanje sestavin betona na osnovi predhodnih izkušenj^{1,2,3,4}.

Laboratorijska izdelava preizkusnih mešanic še ne da dokončne rešitve za optimalno sestavo mešanic, pa čeprav smo pri tem upoštevali vse že znane vplive. Šele betonska mešanica, ki je narejena v realnih razmerah in preizkušena na mestu vgradnje, je primerna za določanje pravih lastnosti.

Očitno je, da dimenzioniranje betonskih mešanic zahteva od projektanta dobro teoretično poznavanje lastnosti betona in čim več praktičnih izkušenj z njim. Pri tem je potrebno poudariti, da projektiranje betonskih mešanic nikoli ne bo popolnoma avtomatizirano in da bo vedno potreben še dodaten praktičen preizkus.

3 Metoda absolutnih volumnov

Metoda absolutnih volumnov je najstarejša, tradicionalna, kontinentalna metoda. Je osnova vseh metod, ki slonijo na predpostavki, da je volumen vgrajenega betona enak vsoti absolutnih volumnov vseh sestavin.

Pri poznani masi vode, cementa, drobnega agregata in grobega agregata: W, C, A_1, A_2 , ter pri poznanih njihovih prostorninskih masah ρ lahko za kubični meter betona izpišemo izraz:

$$W/1000 + C/(1000 \cdot \rho_C) + A_1/(1000 \cdot \rho_1) + A_2/(1000 \cdot \rho_2) = 1$$

Enačba je še popolnejša, če vanjo vpeljemo popravke:

- za različne vlažnosti posameznih agregatov
- glede na želeno približevanje idealni sejalni krivulji z mešanjem več vrst agregatov med seboj.

Dosedanje praktične izkušnje pri dimenzioniranju betonov z določeno prostorninsko maso po tej metodi kažejo pri industrijsko izdelanih betonih precejšnje odstopanje od teoretičnih izračunov. Mase industrijsko

¹ Mag. Rudi ČOP
Fakulteta za pomorstvo in promet
Univerza v Ljubljani
Pot pomorščakov 4, 6320 Portorož

izdelanih vrst betona so manjše od predvidenih. Zato je bilo potrebno za vsako mešanico posebej vpeljati izkustveni faktor, ki je odvisen od same sestave mešanice in od načina vgrajevanja betona.

Testni izračun betona z določeno prostorninsko maso iz umetnega agregata 0/5, ki ima prostorninsko maso $4,8 \text{ kg/dm}^3$, po metodi absolutnih volumnov in njegov praktični preizkus v industrijskih razmerah, je pokazal najslabši izkustveni faktor 0,773.

Pri 22 preizkušenih receptih je bila ugotovljena srednja vrednost izkustvenega faktorja 0,85 ($1 + 0,082 - 0,059$) s standardno deviacijo 0,025.

4 Ameriška metoda dimenzioniranja

American Concrete Institute (ACI) je razvil svojo metodo določevanja betonskih mešanic, ki pomeni standard za druge podobne metode. Te izhajajo iz drugačnih predpostavk kot tradicionalna metoda:

- Metoda ACI izhaja iz ugotovitve, da je obdelavnost betona odvisna predvsem od največje mere agregata in od količine vode v kubičnem metru betona, manj pa od granulacijske sestave agregata.
- Naslednja predpostavka te metode je, da je razmerje nasipne mase surovega agregata in prostornine zbitega betona odvisno predvsem od največjega premera agregata in od količine drobnozrnatih primesi v njem.

Ameriška metoda je pomanjkljiva prav zaradi prevelikega zanemarjanja vpliva drobnih agregatnih frakcij na lastnosti betona. Na obdelovalnost betona v veliko večji meri vplivajo drobnozrnatost kot pa debelozrnatost frakcije agregatov.

Testni izračun mešanice težkega betona je bil narejen na osnovi linearne interpolacije podatkov lažjih naravnih agregatov, ki so bili dosegljivi v literaturi¹. Pri izdelanem težkem betonu iz umetnega agregata 0/5, ki ima prostorninsko maso $4,8 \text{ kg/dm}^3$, je bil dokazan izkustveni faktor 0,954.

Ker je mehanska trdnost težkega betona manj pomembna in je najpomembnejša njegova prostorninska masa, je za dimenzioniranje natančnejša metoda ACI. Poleg tega pa je ta metoda zelo primerna za načrtovanje betonskih mešanic z računalnikom.

5 Merjenje prostorninske mase v stisnjem stanju

Za boljše poznavanje lastnosti posameznega agregata in posameznih mešanic težkih betonov je poznavanje njihovih prostorninskih mas v zbitem stanju pri različnih stopnjah zbitosti zelo pomembno. Postopki za zbijanje oziroma vgrajevanje betona so:

- zbijanje z nabijalno palico ali batom
- stresanje na stresalni mizi
- vibriranje z iglastim potopnim vibratorjem ali na vibracijski mizi

d) stiskanje v preši, kjer je možno dodatno vakuumiranje.

Določevanje prostorninske mase posameznega agregata in posameznih mešanic s stiskanjem je najtočnejši način merjenja, ki je uporaben za različne module stisljivosti. Omogoča nam posredno merjenje prostorninske mase zrelega betona. Merjenje prostorninske mase v stisnjem stanju smo zato izbrali kot izhodiščno meritev za preučevanje lastnosti sestavin pri posebnih vrstah betona z določeno prostorninsko maso in za sestavljanje receptov za njihovo izdelavo.

Po ideji v predlogu italijanskega standarda UNI 7549, razdelek 7a, smo izdelali cilindrično merilno posodo z volumnom $1,4 \text{ dm}^3$ in prečnim presekom $1,0 \text{ dm}^2$. Merilnemu batu smo določili steblo dolžine 57,8 mm, tako da skupaj s podaljškom meri 78,0 mm. Prileganje bata na steno merilne posode smo izvedli tako, da prašni delci ne morejo ovirati njegovega gibanja.

Merilno posodo, napolnjeno z agregatnim vzorcem in zaprtje z merilnim batom, smo vstavili pod cilindrično hidravlično stiskalnice za merjenje mehanske trdnosti. Pri odmerjeni preostali dolžini batnega droga, ki še sega iz merilne posode, smo odčitali silo, s katero stiskalnica deluje na agregat. Z merilnimi rezultati in njihovo obdelavo smo našli uporabno enačbo stisljivosti.

Ugotavljanje prostorninske mase surovin za izdelavo težkih vrst betona so osnovne meritve. Opravljamo jih pri cementu in vseh agregatih, ki sestavljajo posebni beton. Ponavljamo jih ob preverjanju lastnosti že uporabljenih sestavin, ali ko prispe nova pošiljka cementa ali agregatov.

Meritve suhih mešanic posebnih vrst betona iz proizvodnje po znani recepturi in znani prostorninski masi zrelega betona nam rabijo kot primerjalne. Opravljali smo jih v času izhodiščnih raziskav. Danes občasno tako preverjamo le rezultate. Ugotovimo izkustvene faktorje, ki nakazujejo razmerja med prostorninsko maso zrelega betona in vsoto prispevkov prostorninskih mas, ki jih prispevajo sestavine mešanic. Na omenjene faktorje vpliva poleg velikosti zrn agregatov še njihova oblika, dodatki, dosežen v/c faktor med pripravo betona, način vgrajevanja svežega betona in vrsta kalupa.

6 Prostorninske mase v stisnjem stanju posameznih sestavin betona

Na osnovi merilnih rezultatov in oblike pripadajočih krivulj je odvisnost prostorninske mase v stisnjem stanju od tlaka podana z izrazom:

$$(a) M_{vz} (\text{kg/dm}^3) = A \cdot p^B (\text{MPa});$$

A, B ... parametra regresije

Regresijska funkcija (a) ima naslednjo logaritemsko obliko:

$$(b) \ln M_{vz} = \ln A + B \cdot \ln p.$$

Logaritemska oblika regresijske funkcije (b) omogoča izračun parametrov A in B nelinearne regresije (a) z linearno.

Odvisnost med izmerjenimi rezultati in njihovo srednjo vrednostjo podaja regresijski ali korelacijski koeficient $R^{5,6}$. Čim bolj se ta koeficient približa vrednosti $R=1$, tem bolj se bo linearna regresija približala izmerjenim vrednostim.

Rezultat linearne regresije je naslednji:

$$\ln M_{vz} \cong \ln A + B \cdot \ln p \pm SD,$$

ki dobi po antilogaritmiranju obliko

$$M_{vz} \cong A \cdot p^B \cdot \exp(\pm SD).$$

Ker je standardna napaka SD majhna, velja približek:

$$\exp(\pm SD) \approx 1 \pm SD.$$

Standardno napako SD zato lahko predstavimo kot relativno napako regresijskega modela.

Standardna deviacija ali standardna napaka podaja srednjo vrednost odstopanja merilnih rezultatov od izračunanih po enačbi, ki smo jo dobili po linearni regresiji. Čim bliže je ta napaka vrednosti $SD = 0$, tem bolj se dobljeni rezultati ujemajo s pravo vrednostjo odvisne spremenljivke M_{vz} :

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

y_i ... izmerjena vrednost

\hat{y}_i ... izračunana vrednost

Koeficient stisljivosti χ oziroma modul stisljivosti κ sta definirana z naslednjo enačbo:

$$(c) \quad \chi = \frac{1}{\kappa} = \frac{1}{M_{vz}} \frac{dM_{vz}}{dp} = \frac{d}{dp} (\ln M_{vz})$$

Na osnovi enačb (a) ali (b) in (c) sledi:

$$(d) \text{ koeficient stisljivosti: } \chi = \frac{B}{p},$$

$$(e) \text{ modul stisljivosti: } \kappa = \frac{p}{B}.$$

Merilne rezultate smo obdelali tudi s polinomsko regresijo višjega reda. Ker pri tem nismo dosegli bistveno boljših regresijskih koeficientov in vrednosti standardne napake, smo za obdelavo merilnih rezultatov izbrali opisano linearno regresijo.

7 Analiza rezultatov merjenja suhih mešanic za posebne vrste betona iz proizvodnje

1)

Najenostavnejši način dimenzioniranja mešanic za posebne vrste betona z določeno prostorninsko maso je odstotkovni prispevek posamezne komponente k prostorninski masi zrelega betona.

Enačbo linearne regresije (b) iz 6. poglavja uporabljamo lahko tudi za določanje prostorninske mase mešanice za posebne vrste betona z znano prostorninsko maso v zrelem stanju.

$$(a) \quad \ln M_{vz} = \ln A + B \cdot \ln p$$

Prispevek posamezne sestavine lahko izračunamo na osnovi odstotka vrednosti vsebnosti v mešanici. Za vsako mešanico posebej smo ugotovili vrednosti po enačbi (a), ki so se od izmerjenih razlikovali za ustrezna izkustvena faktorja K_1 in K_2 :

$$(b) \quad \ln M_{vz} = K_1 \cdot \ln A + K_2 \cdot B \cdot \ln p$$

Med raziskavo je bilo preizkušenih deset mešanic. Pri sestavljanju mešanic po enačbi (b) je bila ugotovljena standardna napaka $SD = 0,097$. Najslabši rezultati so nastopili v primeru sestavljanja mešanice iz cementa in enega samega agregata. V primeru petih mešanic, kjer je bilo vmešano večje število agregatov, je bila dosežena vrednost standardne napake $SD = 0,037$ in največja relativna napaka 0,250.

2)

Pri merilnih rezultatih za prostorninsko maso v stisnjenem stanju vzorcev posameznih mešanic posebnih vrst betona smo uporabili tudi večkratno regresijo (Multiple Regression) po regresijski formuli:

$$(c) \quad \ln M_{vz} = \ln C_0 + B \ln p + C c_{\text{cement}} + D c_{\text{agregat}}$$

Po antilogaritmiranju dobi končna formula obliko:

$$(d) \quad M_{vz} = C_0 C_1^{B \ln p} C_2^{c_{\text{cement}}} C_3^{c_{\text{agregat}}}$$

Pri takšni obdelavi na štirih testnih mešanicah so rezultati izkazovali največjo relativno napako 0,02.

3)

Na osnovi dobrih rezultatov večkratne regresije za enostavne mešanice je bila uporabljena še linearna enačba z več neznankami, ki ima takšno splošno obliko:

$$(e) \quad y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n.$$

Opravljene meritve prostorninske mase v stisnjenem stanju M_{vz} (kg/dm^3) so dale vrednosti odvisnih spremenljivk $y_1 \dots y_m$. Neodvisne spremenljivke so odstotkovne vrednosti posamezne surovine v mešanici težkega betona in pritisk p (MPa). Za meritev posamezne mešanice lahko napišemo skupino linearnih enačb, ki imajo naslednjo splošno obliko:

$$(f) \quad y_1 = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n + \epsilon_1,$$

...

$$y_m = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n + \epsilon_m.$$

Odstopanja meritev od linearnih vrednosti so predstavljena z $\epsilon_1 \dots \epsilon_m$.

Skupino enačbe z več neznankami (f) lahko izrazimo tudi v matrični obliki (g).

$$(g) \quad \bar{y} = X\bar{a} + \underline{\epsilon}$$

Matrična enačba z več neznankami (g) je optimalno rešljiva pri pogoju, da je napaka najmanjša.

$$(h) \quad |\underline{\epsilon}|^2$$

Rešitev matrične enačbe (g) pri postavljenem pogoju (h) da vrednosti koeficientov neodvisnih spremenljivk a_0, a_1, \dots, a_n .

$$(j) \quad \bar{X}^T X \bar{a} = \bar{X}^T \bar{y}$$

$$\bar{X}^T X = C$$

$$C \bar{a} = \bar{X}^T \bar{y}$$

\bar{X}^T ...transponirana matrika matrike X

$$(k) \quad \bar{a} = C^{-1} \bar{X}^T \bar{y}$$

V okviru raziskave smo na osnovi linearnega matematičnega modela (c) in ob upoštevanju njegove optimalne rešitve (h) rešili z matričnim računom sistem enačb (k), kjer je nastopalo šest neznank. Uporabili smo meritve prostorninske mase v stisnjem stanju za štiri testne mešanice. Pri tem smo ugotovili največjo relativno napako z vrednostjo 0,07.

8 Sklep

Pri dimenzioniranju težkega betona po tradicionalni metodi so izhodiščni podatki prostorninske mase uporabljenih agregatov. Izkustveni faktor, ki ga moramo vpeljati pri sestavljanju posameznih receptur, močno variira. Nanj vplivajo predvsem:

- uporabljeni agregati - zahtevan je stalen nadzor vhodnih surovin in načina prilagajanja na spremembo njihovih lastnosti
- oblika kalupov - za posamezno obliko kalupa je potrebno poznati modul stisljivosti betona, ki ga lahko dosežemo s posameznim strojem

c) način vgrajevanja betona.

Mehanska trdnost betona z določeno prostorninsko maso je manj pomembna. Najpomembnejša je njihova prostorninska masa. Zato je za njihovo dimenzioniranje natančnejša metoda ACI. Izhodišče pri tej metodi je poznavanje prostorninske mase agregatov v nasutem stanju.

Za še boljše poznavanje lastnosti posameznega agregata in posameznih mešanic betona z določeno prostorninsko maso je pomembno poznavanje njihovih prostorninskih mas v zbitem stanju pri različnih stopnjah zbitosti.

Določevanje prostorninske mase posameznega agregata in posameznih mešanic s prešanjem ponuja najtočnejši način merjenja pri različnih modulih stisljivosti. To nam omogoča posredno merjenje prostorninske mase zrelega betona. Zato smo ta način tudi izbrali kot izhodiščno meritev za preučevanje njegovih lastnosti in izdelavo računalniškega programa, ki rabi kot orodje pri dimenzioniranju betona z določeno prostorninsko maso. Raziskava bo končana potem, ko bo zbrano dovolj podatkov po načelu linearnih enačb z več neznankami in ustrezno popravljen tudi računalniški program.

9 Literatura

- ¹ A. M. Neville: *Properties of Concrete*, Longman Scientific & Technical, 3rd Edition
- ² T. C. Powers: *The Properties of Fresh Concrete*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1968
- ³ P. Kumar Mehta: *Concrete Structure, Properties, and Materials*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1986
- ⁴ R. Marotta: *Il calcestruzzo, controllo della qualità*, Servizio centrale Controlli e Ricerche della Cementir - Cementerie del Tirreno S.p.A., Roma, 1976
- ⁵ I. Vidav: *Višja matematika 2*, Državna založba Slovenije, Ljubljana 1975
- ⁶ R. Jamnik: *Matematična statistika*, Državna založba Slovenije, Ljubljana, 1980