

RAZVOJ VIBRACIJSKIH MIZ ZA VGRADNJO BETONA V KALUPE

DEVELOPING VIBRATING TABLES FOR CASTING CONCRETE INTO MOLDS

RUDI AOP

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet, Pot pomorščakov 4, 6320 Portorož

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

Dolge vibracijske mize za vgradnjo betona v kalupe se uporabljajo tudi za industrijsko proizvodnjo polizdelkov iz betona. Med preizkušanjem take nove vibracijske mize nove konstrukcije smo želeli izbrati najprimernejšo frekvenco vibracij. Med meritvami smo opazili napake v sami mehanski konstrukciji. Uspelo nam jih je odstraniti žele na osnovi matematičnega modela in rezultatov računalniške simulacije.

Ključne besede: beton, vibracijske mize, računalniška simulacija

Within the serial manufacturing semi-finished concrete products long vibrating tables for casting concrete into molds are used. While testing a newly constructed vibrating table, we also tried to determine the frequency of vibrators. Gauging the mechanical construction of the table errors were disclosed, which were removed only after a computational simulations, using an original mathematical model.

Key words: concrete, vibrating table, computational simulations

1 UVOD

V industriji betonskih polizdelkov vgrajujemo beton v kalupe s prežanem ali z vlivanjem na vibracijskih mizah. Industrijska proizvodnja na dolgih vibracijskih mizah ima predvsem to prednost, da omogoča istočasno vlivanje velikega števila polizdelkov. Čeprav so ti polizdelki lahko zelo zahtevnih oblik, so njihovi odlitki zelo natančni in imajo gladke površine^{1,2,3}.

Razvoj dolgih vibracijskih miz za vgrajevanje betona v kalupe traja že nekaj desetletij. Preizkušanje novega tipa take mize smo do sedaj opravljali s preizkusnim vlivanjem. Analiza izdelkov glede na njihovo kvaliteto in na mesto na vibracijski mizi nam je dala podatek o kvaliteti izdelane vibracijske mize.

Pri razvoju novega tipa vibracijske mize nas je tokrat zanimala tudi optimalna frekvenca vibracij pri vgrajevanju betona. Zato smo prototipno vibracijsko mizo opremili s kvalitetnejšimi električnimi vibratorji, ki smo jih napajali z napetostjo spremenljive frekvence iz frekvenčnega pretvornika.

2 PRESKUŠANJE PRAZNE VIBRACIJSKE MIZE

Pregled prazne vibracijske mize je pokazal, da je njeno nihanje neenakomerno po dolžini in širini. Zato smo si na njej izbrali testno mesto s povprečno amplitudo. Na tem mestu smo nato opravili meritve vgrajevanja posebnega betona.

Za preskušanje smo si izbrali posebni beton iz industrijske proizvodnje. Narejen je iz več vrst naravnih in umetnih agregatov. Glede na njihovo granulometrijo bi ta beton lahko uvrstili med drobnozrnatega ali tudi med

grobno malto. Ko tak beton doseže popolno trdnost, ima prostorninsko maso $\rho = 3,28 \text{ kg/dm}^3$. V proizvodnji betonskih polizdelkov so imeli z njim težave prav zaradi njegove nagnjenosti k razslojevanju.

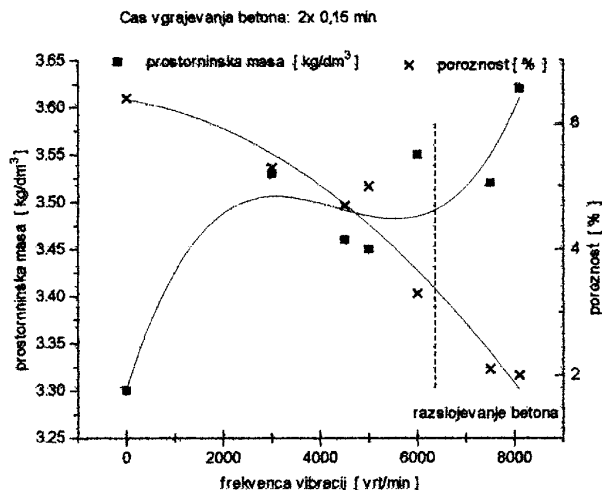
Prostorninsko maso in poroznost svežega testnega betona smo merili s porozimetrom z volumnom 1 liter, narejenem po tehničnem standardu DIN 1164. Po vgradnji testnega betona v lonc porozimetra smo najprej izmerili prostorninsko maso, nato pa še poroznost.

3 REZULTATI MERITEV

Testni beton smo v lonc porozimetra vgrajevali zaporedno 2-krat po 9 sekund. Pri različnih frekvencah vibracij smo dobili prostorninsko maso svežega betona (slika 1), ki narašča kot polinom tretje stopnje. Poroznost betona pri tem upada s kvadratom naraščanja vrtiljavov električnih vibratorjev. Pri frekvenci nad 6000 vrt/min se med vgrajevanjem pojavi značilno brizganje betona, kar je bil znak, da se je beton razslojil.

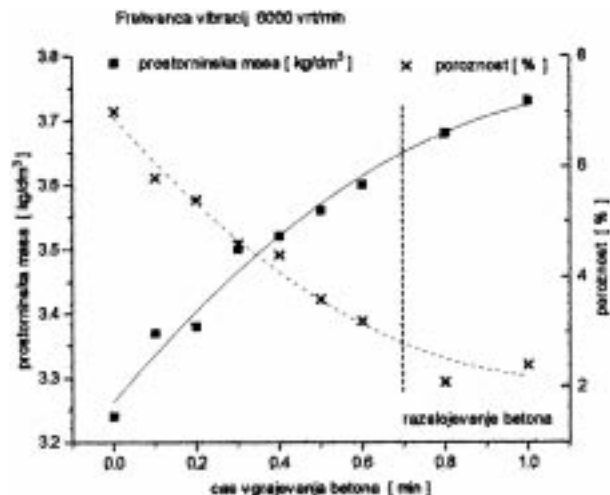
Druga skupina meritev je bila narejena pri stalni frekvenci 6000 vrt/min. Z daljšanjem časa vgrajevanja testnega betona se je povečevala njegova prostorninska masa, poroznost pa je upadala po krivulji, ki jo lahko opišemo z enačbo druge stopnje (slika 2). Če je vgrajevanje potekalo več kot 40 sekund so se pokazali znaki razslojevanja betona.

Na osnovi teh dveh skupin meritev smo za prototipno dolgo vibracijsko mizo določili optimalno frekvenco vibracij 3000 vrt/min. To je bila tudi najcenejša rešitev, ki je omogočala dobro vgradnjo testnega betona z zadostno verjetnostjo, da ne bo prišlo do razslojevanja.



Slika 1: Odvisnost prostorninske mase in poroznosti posebnega betona od frekvence vibracij

Figure 1: Relationship between the vibration frequency and unit weight and porosity of the special concrete



Slika 2: Odvisnost prostorninske mase in poroznosti posebnega betona od časa vgrajevanja

Figure 2: Relationship between the vibration time and unit weight and porosity of the special concrete

4 PREIZKUSNO VLIIVANJE

@e pri preizkusu prazne vibracijske mize smo opazili pokanje posameznih spojev. To se je ponovilo tudi med preizkusnim vliivanjem betonskih polizdelkov v kalupe.

Podroben pregled izdelkov iz betona po 12 urah strjevanja je dokazal 'e opa'eno neenakomerno nihanje prototipne dolge vibracijske mize. Pri posameznemu odlitku smo najprej ocenili njegov zunanji izgled. Nato smo ga stehali in razlomili. Na prelomih smo ocenjevali enakomernost umetnega konglomerata, zato ker nas je zanimalo, ~e se je beton med vgrajevanjem razslojil. Kon-no oceno smo dobili z dolo~evanjem prostorninske mase posameznih delov betonskega polizdelka po vi'ini.

Vpis rezultatov v tabelo, ki je po obliki odgovarjala povr'ini prototipne vibracijske mize, je pokazal, da le-ta neenakomerno niha, ne samo po dol'ini, temve~ tudi po 'irini.

Nekajkrat smo posegli v mehansko konstrukcijo prototipne dolge vibracijske mize. Spreminjali smo lastnosti elektri-nih vibratorjev. Neenakomernega nihanja mize nam ni uspelo popolnoma odpraviti. Zato smo se odlo~ili, da bomo njeno nihanje preverili {e z ra-unalniko simulacijo.

5 MATEMATI^NI MODEL

Matemati-ni model sestavlja glavna rezultanta sil (**slika 3**):

$$F = \sum_{i=1}^n F_i, \text{ kjer so } F_i = f_i \sin(\omega t - \omega_i) \text{ in} \\ f_i = m_i e_i \omega^2, \quad (1)$$

in glavni moment:

$$M_0 = \sum_{i=1}^n x_i F_i \quad (2)$$

pri ~emer je

$I = \frac{mL^2}{12}$... vztrajnostni moment za plo~o

F_i ... posamezna sila ekscentra

m ... masa mize

x_i ... polo'aj posamezne sile ekscentra

L ... dol'ina mize

ϕ_i ... fazni premik posamezne sile ekscentra

$i = 1, \dots, n$; n je {tevilo vseh ekscentrov

m_i ... masa posameznega ekscentra

e_i ... elasti-nost posameznega ekscentra.

Transformacija masnih to-k v te'i~e mize, ki je pri $x = L/2$ (**slika 4**), se opravi pri pogoju, da so premiki vibracijske mize majhni glede na njeno dol'ino. Zato lahko predpostavimo, da je $\sin \phi \approx \phi$.

Ena-bi, ki pojasnjujeta nihanje vibracijske mize sta⁵:

$$m\ddot{y}_T + 2ky_T = F, \quad (3)$$

$$I\ddot{\phi} + \frac{kL^2}{2}\phi = \frac{L}{2}F - M_0. \quad (4)$$

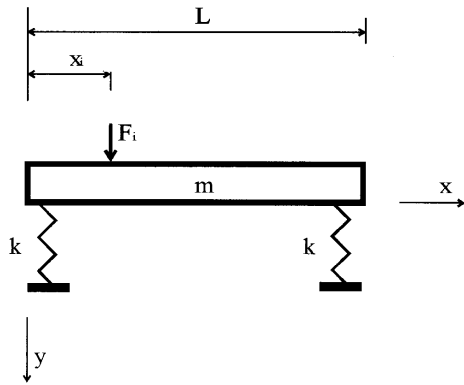
Na osnovi vpeljane nove enote (5) in brezdimenzijskih veli-in (6)

$$\omega_0^2 = \frac{2k}{m} \quad (5)$$

je na novo uvedena enota:

$$\frac{y_T}{L} \rightarrow Y_T, \quad \frac{x_i}{L} \rightarrow X_i, \quad \frac{f_i}{mL} \rightarrow f_i, \quad (6)$$

dobimo:



Slika 3: Matematični model
Figure 3: Mathematical model

$$\ddot{y}_T + \omega_0^2 \cdot y_T^2 = \sum_{i=1}^n f_i \sin(\omega t - \phi_i), \quad (7)$$

$$\ddot{\phi} + 3\omega_0^2 \cdot \phi = 6 \sum_{i=1}^n (1-2x_i) f_i \sin(\omega t - \phi_i). \quad (8)$$

V najosnovnejšem primeru lahko matematični model poenostavimo tako, da predpostavljamo za amplitude sil ekscentrov in njihove fazne zamike:

$$f_1 = f_2 = \dots f_n = f \text{ in } \phi_1 = \phi_2 = \dots \phi_n = \phi, \quad (9)$$

ter novih označb

$$nf = F_n \text{ in } 6f \sum_{i=1}^n (1-2x_i) = M_n, \quad (10)$$

ki dajo poenostavljen dinamični model:

$$\ddot{y} + \omega_0^2 \cdot y_T = F_n \sin \omega, \quad (11)$$

$$\ddot{\phi} + 3\omega_0^2 \cdot \phi = M_n \sin \omega \quad (12)$$

Diferencialni enačbi (11) in (12) imata svojo pozitivno rešitev:

$$y_T = \frac{F_n}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin \omega t, \quad (13)$$

$$\phi = \frac{M_n}{3\omega_0^2 - \omega^2} \sin \omega t. \quad (14)$$

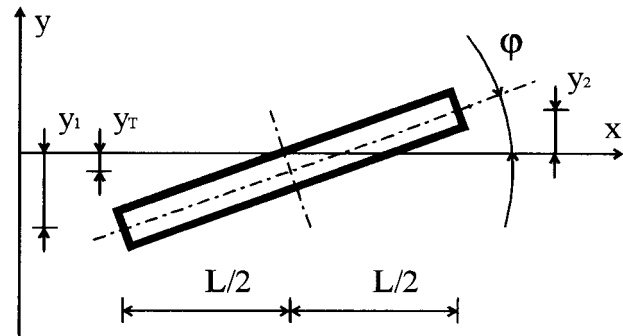
Vzbujenost vibracijske mize bo enakomerna, če ne bo prišlo do dodatnega nihanja:

$$M_n = 0.$$

V tem primeru mora biti: 12345

$$\sum_{i=1}^n (1-2x_i) = 0 \text{ ali } n = 2 \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow \sum_{i=1}^n x_i = \frac{n}{2}.$$

To bo doseženo ob enakomerni razporeditvi ekscentrov.



Slika 4: Premik težišča matematičnega modela
Figure 4: The moving of the center of gravity

$$x_i = x_{i-1} + \Delta x, \quad \Delta x = \frac{1}{n+1} \text{ in}$$

$$x_i = i\Delta x \quad \Delta x \sum_{i=1}^n i = \Delta x \frac{n(n+1)}{2} = \frac{n}{2}.$$

Pri tem sta resonančni frekvenci:

za y : $\omega = \omega_0$,

za ϕ : $\omega = 3\omega_0$.

6 REZULTATI SIMULACIJE NIHANJA DOLGE VIBRACIJSKE MIZE

Na osnovi postavljenega matematičnega modela smo izdelali računalniški program v programskem jeziku C++. Poleg grafične predstavitve nihanja vibracijske mize na ekranu se računske vrednosti vpisujejo v datoteko. Te vrednosti rabijo za nadaljnjo obdelavo podatkov in za njihov izpis na tiskalniku.

Po uspešnem testiranju programa smo opravili simulacijo nihanja dolge vibracijske mize. Na osnovi teh rezultatov smo opravili nekaj uspešnih posegov v konstrukcijo mize. Premaknili smo njene podpore in na novo razmestili vibratorje ter poskrbeli za njihov istočasni zagon.

Najboljše betonske odlitke na izpopolnjeni dolgi vibracijski mizi smo dosegli s skrbno pripravo betonske mešanice, s pravilno vgradnjo svežega betona v kalupe in z njegovo revibracijo.

7 SKLEP

Opisan postopek izboljšave vibracijske mize je dal najboljše rezultate. Da bi dokončno potrdili veljavnost matematičnega modela, bi bilo potrebno izmeriti te dinamične lastnosti in lastno frekvenco nihanja vibracijske mize⁶. Opisani preprosti matematični model in računalniški program sta lahko dobra osnova za nadaljnje delo. Z ustreznimi dopolnitvami matematičnega modela in računalniškega programa bi lahko izpeljali simulacijo vgrajevanja betonov v kalupe, upoštevajoč oblike kalupov in mehanske lastnosti betona.

8 LITERATURA

¹ T. C. Powers: *The Properties of Fresh Concrete*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1968

² P. Kumar Mehta: *CONCRETE Structure, Properties, and Materials*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1986

⁴ V. Mar-elja: *Beton i komponente*, Tehni-ka knjiga Zagreb, Zagreb, 1982

⁵ S. Timoshenko, D. H. Young: *Vibration Problems in Engineering*, Princeton, New Jersey, 1955

⁶ *The Fundamentals of Modal Testing*, Application Note 243-3, Hewlett-Packard Co., Palo Alto, California, USA