

UDK 666.97.033.16

Primljeno 16. 3. 2004.

# Mehanizam djelovanja vibracija na plastični svježi beton

Petar Krstulović, Sandra Juradin

## Ključne riječi

vibracijski reometar,  
akcelerometar,  
plastični beton,  
pseudoplastični fluid,  
viskozni sloj,  
oscilacije zrna

## Key words

oscillatory rheometer,  
accelerometer,  
plastic concrete,  
pseudoplastic fluid,  
viscous coat,  
grain oscillation

## Mots clés

rhéomètre oscillatoire,  
accéléromètre,  
béton plastique,  
fluide pseudoplastique,  
couche visqueuse,  
oscillation des grains

## Ключевые слова

вибрационный реометр,  
акселерометр,  
пластичный бетон,  
псевдопластичный  
флюид,  
вискозный слой,  
осцилляции зерна

## Schlüsselworte

Vibrationsrheometer,  
Akzelerometer,  
plastischer Beton,  
psudoplastisches Fluidum,  
viskose Schicht,  
Kornoszillierung

P. Krstulović, S. Juradin

Izvorni znanstveni rad

## Mehanizam djelovanja vibracija na plastični svježi beton

Opisan je konstruirani vibracijski reometar koji omogućava kontinuirano zapisivanje ubrzanja klipa aparature koji oscilira u uzorku materijala. Dano je analitičko rješenje osciliranja klipa u pseudoplastičnom fluidu kojim se aproksimira ponašanje plastičnog svježeg betona. Oko svakog zrna stvara se sloj materijala približnih svojstava Newtonovu fluidu, čime se smanjuju otpori preoblikovanju i zbijanju uzorka. Opisano je djelovanje vibracije na plastični beton i slične materijale.

P. Krstulović, S. Juradin

Original scientific paper

## Mechanism of vibratory action in the fresh and plastic concrete

The designed oscillatory rheometer, enabling continuous recording of acceleration data for piston oscillating in the sample, is described. An analytical solution for piston oscillation in the pseudoplastic fluid, approximating behavior of the fresh and plastic concrete, is presented. A material coating, with properties similar to those of a Newtonian fluid, forms around every grain and hence reduces sample resistance to remodeling and compaction. The influence of vibratory action on plastic concrete and similar materials is described.

P. Krstulović, S. Juradin

Ouvrage scientifique original

## Mécanisme de l'action vibrante dans le béton frais et plastique

Le rhéomètre oscillant élaboré, permettant la prise continue des données d'accélération du piston oscillant dans l'échantillon, est décrit. La solution analytique pour l'oscillation du piston dans le fluide pseudoplastique, approximant le comportement du béton frais et plastique, est présentée. La couche des matériaux, aux propriétés similaires à celles d'un fluide newtonien, forme autour de chaque grain et, par conséquent, réduit la résistance de l'échantillon au remodelage et à la compaction. L'influence de l'action vibrante sur béton plastique et matériaux similaires est décrite.

П. Крстлович, С. Юрадин

Оригинальная научная работа

## Механизм действия вибрации на пластичный свежий бетон

В работе описан сконструированный вибрационный реометр, обеспечивающий возможность непрерывного записывания ускорения поршня аппаратуры, осциллирующей в образце материала. Дано аналитическое решение осциллирования поршня в псевдопластичном флюиде, которым аппроксимируется поведение пластичного свежего бетона. Okolo каждого зерна создаётся слой материала с приблизительными свойствами флюида Ньютона, благодаря чему уменьшаются сопротивления изменению формы и уплотнению образца. Описано действие вибрации на пластичный бетон и подобные материалы.

P. Krstulović, S. Juradin

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Mechanismus der Vibrierungswirkung auf plastischen frischen Beton

Beschrieben ist ein konstruierter Vibrationsrheometer der es ermöglicht die Beschleunigung des Kolbens der Aparatur, der in der Baustoffprobe oszilliert, kontinuierlich einzutragen. Dargelegt ist die analytische Lösung der Kolbenoszillierung im pseudoplastischen Fluidum, womit man das Verhalten des plastischen frischen Betons approximiert. Um jedes Korn herum entsteht eine Schicht des Materials mit Eigenschaften annähernd dem Newtonschen Fluidum, womit sich die Widerstände gegen die Umformung und Verdichtung der Probe verringern. Beschrieben ist die Wirkung der Vibration auf plastischen Beton und ähnliche Materiale.

Autori: Prof. dr. sc. **Petar Krstulović**, dipl. ing. građ.; dr. sc. **Sandra Juradin**, dipl. ing. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Matice hrvatske 15, Split

## 1 Uvod

Ponašanje svježeg betona izučava se već više od stotinu godina, a intenzivno od sredine prošlog stoljeća.

Većina istraživača pokazala je da se ponašanje svježeg betona pri preoblikovanju pod djelovanjem statičkih sila može prikazati Binghamovim reološkim modelom. Prva su istraživanja izvršena u rotacijskom viskozimetru koji je bio prilagođen ispitivanju svježeg betona [3]. Tattersall [6] razvio je mnogo praktičniji aparat, u obliku miješalice s vertikalnom osi. U takvom aparatu određeni su granica tečenja  $g$  i parametar plastične viskoznosti  $h$  ispitnog uzorka. Na temelju eksperimentalno određenih podataka  $N$  i  $T$ , Tattersall je također odredio granicu tečenja  $\tau_0$  i koeficijent plastične viskoznosti  $\mu$  betona kao materijala. Iz dobivenih podataka proizašlo je da se, pri dovoljno velikoj brzini rotacije, ispitni uzorak kao cjelina i beton kao materijal ponašaju kao Binghamov model:

ispitni uzorak:  $T = g + hN$

materijal:  $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$

L' Hermite i Tournon [1] istraživali su ponašanje svježeg betona u aparatu za direktni posmik, ali nisu uzeli u obzir dinamičke sile koje djeluju na ispitni uzorak. U takvim su uvjetima ustanovili da se kut unutrašnjeg trenja prividno eliminira kada se cijela aparatura izloži vibraciji, a beton poteče.

Isti autori izvršili su i poznati eksperiment s kuglom koja tone u zbijeni uzorak svježeg betona izložen vibraciji. Na temelju izmjerene brzine tonjenja kugle i pretpostavke da se beton ponaša kao Newtonov fluid, odredili su koeficijent viskoznosti betona  $\eta$ , uzevši u obzir samo statičke sile.

ACI – Committee 309 još je 1981. [4] dao kompletan prikaz svih aspekata vibriranoga svježega betona i zaključio da je poznavanje teorije i mehanizma vibriranja iznenađujuće skromno, a istraživanje se obavlja gotovo isključivo empirijskim metodama. Ispitivanje reoloških svojstava mora biti izvedeno na način da *izvor oscilacija, ispitni uzorak i svi dijelovi aparature tvore jedinstveni oscilacijski sustav* čiji se parametri mogu dovoljno precizno mjeriti.

Godine 1998. isti ACI – Committee 309 objavio je reviziju svoga prikaza [9]. Ustvrdio je da je u proteklom vremenu istraživanje ponašanja svježeg betona pod utjecajem vibracije bilo veoma opsežno, ali nije utvrđen konkretan doprinos poznavanju mehanizma djelovanja vibracije na svježem betonu.

U svojem ranijem istraživanju [10] autori ovog rada konstruirali su aparaturu kojom se obuhvaćaju preporuke ACI. Za aparaturu je predložen naziv vibracijski reome-

tar. Utvrdili su da se ispitni uzorak svježeg betona u takvoj aparaturi ponaša kao Binghamov model. Međutim, takav zaključak vrijedi samo za usko područje stabilnih uzoraka [12] pripremljenih s prirodnim agregatom sa zaobljenim zrnima.

Valja istaknuti da se u ovome radu za ispitni uzorak upotrebljava i samo izraz uzorak (engl. *specimen*). Jedan od najvažnijih zaključaka koji vrijede za sve vibracijske aparature jest da je tečenje uzorka svježeg betona velikim dijelom posljedica svladavanja otpora preoblikovanja i zbijanja zbog djelovanja dinamičkih sila na ispitni uzorak.

U posljednjih dvadesetak godina ispitivanjem betona pod utjecajem vibracije bavili su se brojni istraživači, koji su usavršili navedene klasične metode ispitivanja ili su razvili potpuno nove aparature. Među tim aparaturnama ističu se:

- Tattersallov aparat tipa miješalice, koji je učvršćen na vibrostol s vertikalnim oscilacijama. Mjerenja su izvršena na vibriranom betonu [6].
- Aparat koji se sastoji od vertikalne cijevi u koju je smješten beton. Beton pod utjecajem vibracije istječe u posudu, a mjeri se brzina istjecanja [11]. Razne verzije aparata razvilo je više autora.

Većina autora predlaže da se ponašanje betona prikaže tečenjem pseudoplastičnog fluida. Izvode se i jednostavni empirijski izrazi kojima se definira veza između parametara svojstava svježeg betona i parametara izvora oscilacija. Svaki izraz, najčešće u obliku potencije, sadrži konstante koje se određuju eksperimentalno.

U posljednjem desetljeću istraživači su mnogo veću pažnju posvetili izučavanju tonjenja zrna u betonu pod utjecajem vibracije. Za eksperimentalni dio istraživanja konstruirano je više aparatura, među kojima valja istaknuti sljedeće:

- Aparatura u kojoj je beton smješten u valjkastu posudu, a na površinu je položen kamen koji predstavlja veliko zrno agregata [13]. Oscilacije su vertikalne. Mjeri se dubina i brzina tonjenja kamena, pomoću električnog uređaja. U drugoj verziji ovakve aparature kamen je zamijenjen kuglicom uronjenom u beton [8]. Kuglica je učvršćena na tanku vertikalnu šipku koja strši iz betona i omogućava mjerenje iznad njegove površine.
- Slična aparatura u kojoj su na površinu betona smještene tri kuglice jednakog promjera, ali različitih gustoća [14]. Kuglice slobodno tonu, a svaka ima ugrađen izvor zračenja. Uz rub posude smješten je uronjavajući vibrator s pomoću sofisticirane kamere registrira se tonjenje kuglica.

U istraživanjima tonjenja zrna u beton nije uspostavljena veza između parametara izvora oscilacija i parametara tonjenja zrna. Rezultati su potvrdili ono što je već dugo bilo poznato, primjerice zrno tone brže što je bliže vibratoru; kuglica veće gustoće tone brže i slično. Unatoč tome, objavljeni radovi sadrže brojčane vrijednosti i teorijska razmatranja tih pojava, što je veoma značajno za daljnji razvoj teorije vibriranog betona.

Cilj ovdje prikazanog istraživanja je daljnji razvoj vibracijskog reometra i preciznije definiranje mehanizma djelovanja vibracije na beton.

## 2 Uređaji i metoda ispitivanja

Na temelju navedenog i rezultata vlastitih ispitivanja [9], razvijena je aparatura – vibracijski reometar. Glavni su dijelovi aparature vibrostol s vertikalnim oscilacijama, valjkasta posuda i valjkasta kruta masa u obliku klipa koji prodire u ispitni uzorak (slika 1.). Vibrostol se, u principu, sastoji od mase u obliku teške ploče, opruga i vibromotora, te tvori jedan oscilacijski podsustav, a klip i ispitni uzorak drugi. Za ispitivanja oba podsustava moraju tvoriti jedinstven oscilacijski sustav čiji se parametri mjere. Da bi se mogli odrediti parametri osciliranja podsustava uzorka s klipom, parametri osciliranja vibrostola moraju ostati konstantni.

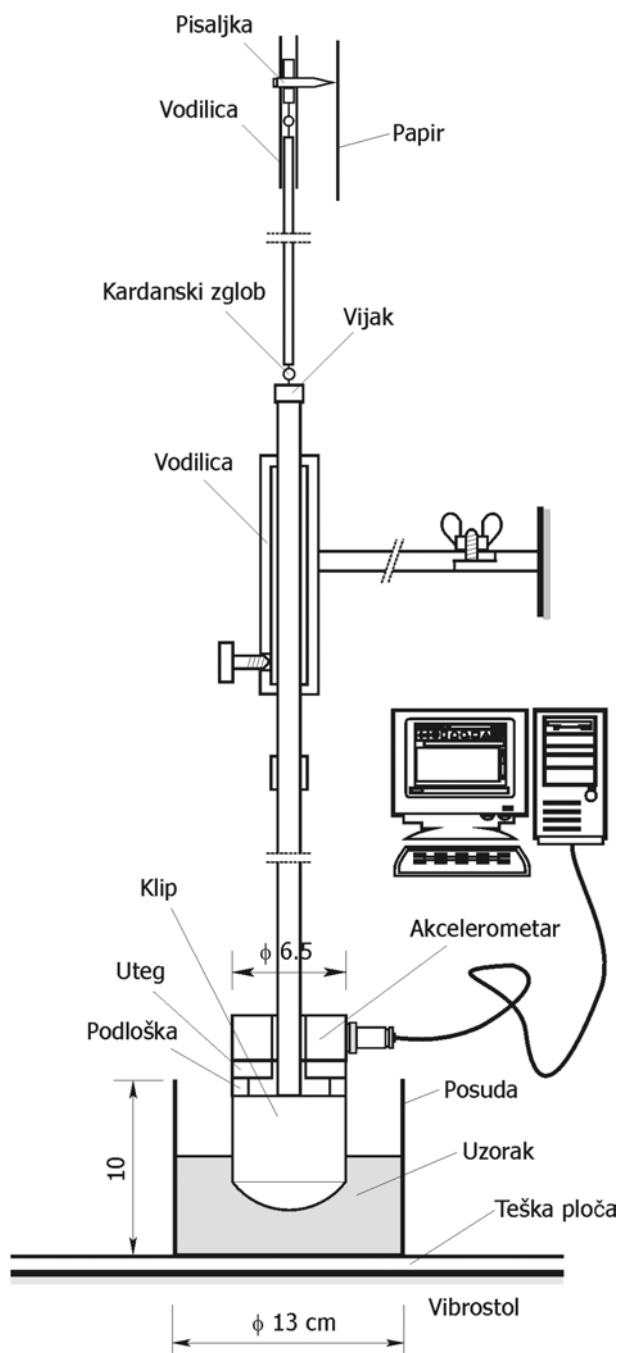
To je moguće postići s dovoljnom preciznošću samo ako vibrostol ima dovoljno jake opruge i izvor oscilacija, a oscilirajuća masa mu je višestruko veća od mase ispitnog uzorka i klipa zajedno. Budući da se na tržištu ne može naći vibrostol željene snage i preciznosti, veličina ispitnog uzorka ograničena je jakošću vibrostola. Za ovo ispitivanje odabran je standardni vibrostol za ispitivanje cementa s vibromotorom snage 450 W, koji proizvodi približno harmonijske oscilacije stalne frekvencije od 50 Hz. Amplituda se može mijenjati u području 0;1 – 0;5 mm.

Idealno bi bilo kada bi klip bio oblika kugle uronjene u ispitni uzorak koji bi tada morao imati preveliku visinu i masu. Za tonjenje klipa cijeli uzorak mora teći. U protivnom, za svaki sastav uzorka stvorila bi se drukčija granica izvan koje se materijal ponaša kao kruto tijelo pa bi veličina uzorka postala nepoznanica pri obradi rezultata.

Nakon brojnih pokušaja utvrđeni su oblik i veličina klipa i posude za uzorak, tako da svi navedeni uvjeti budu zadovoljeni. Međutim, za eksperimenta klip se može samo djelomično uroniti u uzorak, što stvara odgovarajuće teškoće pri definiciji mase klipa. Površina kalote klipa mora biti hrapava. Vibrostol je također morao biti modificiran na način da je vibrirajuća masa povećana dodatnom čeličnom pločom mase oko 17 kg.

Vibracijski reometar ima dva mjerna uređaja.

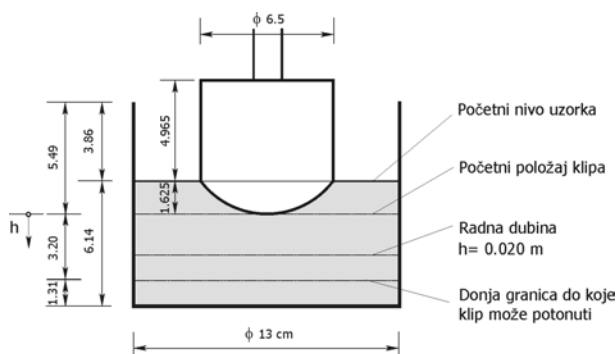
Za vrh vodilice klipa spojen je *mehanički pisač* kojim se zapisuje tonjenje klipa u ovisnosti o vremenu. Na raspo-



Slika 1. Shematski prikaz vibracijskog reometra

laganju je bio i elektronski pisač, ali se mehanički pokazao mnogo praktičnijim.

U sastavu klipa su *piezoelektrični akcelerometar* i utezi. Različitim kombinacijama utega može se mijenjati masa klipa. Mjerno područje akcelerometra je 0 – 3,5 g, a priključen je na računalo s ugrađenom mjernom karticom i mjernim programom kojim se zapis može prikazati brojčano ili grafički. U jednom razdoblju od 0,02 s može se zapisati 13 ili 46 parova podataka vrijeme-ubrzanje, ovisno o potrebama ispitivanja.



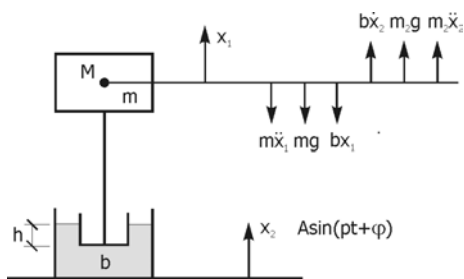
Slika 2. Ispitni uzorak

Za ispitivanje se u posudu aparata ubaci beton ili drugi Binghamov materijal odabranog volumena (slika 2). i kratko vibrira dok se površina grubo poravna. Nakon toga se brzo slože svi dijelovi aparata i ponovno uključi vibracija. Vrijeme slaganja aparature treba biti približno jednak za sva ispitivanja i ne znatno veće od 15". Tek se tada smije osloboditi klip, da slobodno prodire u uzorak, čime se aktivira i mehanički pisac. Neznatno prije drugi ispitivač pokrene akcelerometar. Svi se uređaji konačno isključuju kada klip potone do zadane dubine.

### 3 Reološki model oscilacijskog sustava

Budući da većina istraživača predlaže da se ponašanje ispitnog uzorka svježeg betona prikaže tečenjem pseudo-plastičnog fluida, taj je stav usvojen kao polazište i u ovom radu. Međutim, ovo je istraživanje pokazalo da se tako ponašaju samo plastični materijali, odnosno materijali kod kojih je volumna koncentracija paste u ispitnom uzorku [5] sličnog reda veličine ili veća od volumne koncentracije šupljina u agregatu. Takav je znatan dio betona u primjeni.

Kako bi se analitička formulacija dovoljno pojednostavnila da se može primijeniti teorija oscilacija, usvojeno je da se tečenje uzorka pod djelovanjem vibracije definira koeficijentom dinamičke prividne viskoznosti. To znači da se ponašanje uzorka pri određenom opterećenju i brzini deformacije aproksimira Newtonovim modelom.



Slika 3. Shematski prikaz reološkog modela

Ponašanje oscilacijskog sustava (slika 1.) tada se može prikazati reološkim modelom pod prisilnim oscilacijama, prema slici 3., gdje znači:

$b$  - parametar prividne dinamičke viskoznosti ispitnog uzorka

$g$  - gravitacijska konstanta

$m_2$  - uzgon koji djeluje na klip.

Statička ravnoteža modela ne postoji. Prema D'Alambertovu principu, dinamička ravnoteža modela glasi:

$$-m\ddot{x}_1 + m_2\ddot{x}_2 - b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - (m - m_2)g = 0 \quad (1)$$

Rješenje ove jednadžbe je moguće ako se usvoji da je uzgon konstantan za vrijeme jednog razdoblja. Tada je:

$$m_2 = A_k \rho h,$$

gdje je  $A_k$  površina presjeka klipa i  $\rho$  volumna masa materijala uzorka. Ova pretpostavka vrijedi za visokofrekventnu vibraciju i malu vrijednost amplitude  $A$ , što je veoma čest slučaj u praksi, gdje frekvencija iznosi 50 – 200 Hz, a amplituda ne prelazi 2 mm. Pri određivanju vrijednosti  $m_2$  mora se uzeti u obzir cijeli uzgon na klip i podizanje površine ispitnog uzorka zbog tonjenja klipa. Za vibracijski reometar upotrijebljen u ovom istraživanju tada vrijedi:

$$m_2 = (0.0000292 + 0.004424h)\rho$$

Opće rješenje diferencijalne jednadžbe (1) glasi:

$$x_1 = C_1 + C_2 e^{-\frac{b}{m}t} - \frac{m_1 g}{b} t + A_1 \sin(pt - \varepsilon),$$

gdje znači:

$C_1, C_2$  - integracijske konstante

$t$  - vrijeme, s

$p$  - kutna frekvencija,  $p = 2\pi f$

$f$  - frekvencija, Hz

$m_1 = m - m_2$

$A_1$  - parcijalna amplituda

$$A_1 = \sqrt{\frac{m_2^2 p^2 + b^2}{m^2 p^2 + b^2}} A$$

$\varepsilon$  - fazni pomak

$$\varepsilon = \arctg \frac{m_1 p b}{m m_2 p^2 + b^2}$$

Izrazi za integracijske konstante izvode se za *stacionarno stanje* oscilacijskog sustava. To je stanje kada oscilacije materijalne točke  $M$  postanu periodične, s jednakom frekvencijom kao izvor oscilacija. Tada  $C_1$  definira početak osciliranja a  $C_2 \rightarrow 0$ .

Vrijednosti  $A_1$  i  $\varepsilon$  su parametri gibanja s obzirom na stanje mirovanja. Praktičnije je ove parametre izraziti u od-

nosu na podlogu koja vibrira, tj. posudu u kojoj se nalazi ispitni uzorak. Izrazi za pomake materijalne točke M oscilacijskog sustava tada glase:

$$x_1 = -\frac{m_1 g}{pb} pt + A_1 \sin(pt - \varepsilon) \quad (2)$$

$$x_1 = -\frac{m_1 g}{pb} pt + A \sin pt - A_2 \cos(pt - \delta), \quad (2')$$

gdje znači:

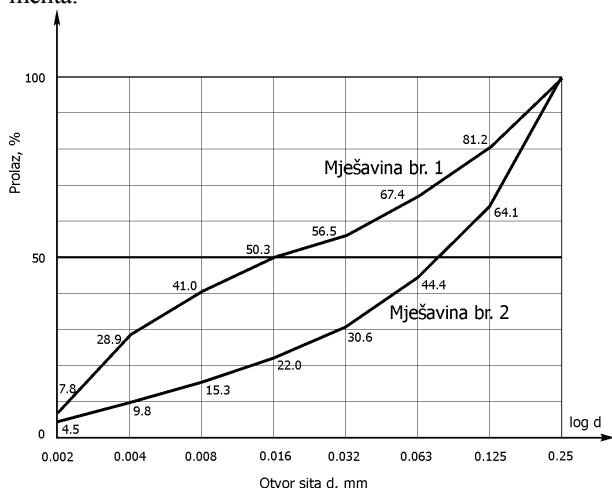
$$A_2 = \frac{pm_1}{\sqrt{p^2 m^2 + b^2}} A \quad (3)$$

$$\delta = \arctg \frac{pm}{b}$$

$A_2$  je amplituda oscilacija, a  $\delta$  fazni pomak materijalne točke M u odnosu na posudu aparature.

#### 4 Ispitni uzorci

Da bi se rezultati ispitivanja mogli međusobno uspoređivati, svi uvjeti eksperimenta moraju tijekom ispitivanja ostati nepromijenjeni. Budući da se uzorak svježeg betona relativno brzo mijenja, za svako novo ispitivanje trebalo je pripremiti novi uzorak, uz gotovo savršenu reproduktivnost. Veličinu uzorka i zrna agregata diktirala je veličina aparature pa je usvojeno maksimalno zrno agregata od 4 mm. Receptura ovog mikrobetona – morta odabrana je tako da je na ispitnom uzorku moguće izvršiti ispitivanje s 4 odabrane mase klipa i 4 odabrane amplitude oscilacija vibrostola. Mort se pripremao po standardnoj proceduri kakva se primjenjuje za ispitivanje cementa.



Slika 4. Granulometrijski sastav mješavina br. 1 i 2

Da bi se na istom ispitnom uzorku moglo izvršiti višekratno ponavljanje eksperimenta, svaki put s drukčijim parametrima oscilacija, napravljeni su stabilni referentni materijali koji odgovaraju tim uvjetima i ostaju stabilni

gotovo neograničeno dugo. Kao tekuća faza upotrijebljena su standardna mineralna ulja, a kao kruta faza čestice veličine do 0,25 mm. Pripremljena su dva referentna materijala od kojih se onaj označen brojem 1 ponašao gotovo kao idealan Newtonov fluid, a onaj s oznakom br. 2 imao je jasno izraženu granicu tečenja. Granulometrijski sastav krutih čestica prikazan je na slici 4. Za pripremu mješavine br. 1 upotrijebljeno je motorno ulje SAE 15W-40 u volumnoj koncentraciji 0,324, a za mješavinu br.2 mineralno ulje INA-“Instrumentol” (SAE – 5) bez aditiva, u volumnoj koncentraciji 0,394.

Priprema referentnih mješavina zahtijeva temeljito i dugotrajno miješanje. Za pripremu veće količine materijala odgovarao bi mehanizirani postupak miješanja kakav se primjenjuje za pripremu raznih vrsta kitova. Taj postupak osigurava homogenost i mali sadržaj uvučenog zraka, što je nuždan uvjet da orak bude praktično nestišljiv. Kako takav uređaj zbog veličine nije primjenjiv, miješanje se obavljalo ručno, lopaticom (špatulom) na staklenoj ploči. Miješanje se obavljalo u malim partijama od oko 120 g i trajalo je dok se nije postignula homogenost. Za ispitivanje u vibracijskom reometru potrebno je pripremiti petnaestak takvih mješavina. Na kraju se cijeli materijal homogenizira ručnim miješanjem u većoj posudi.

#### 5 Rezultati ispitivanja

*Amplituda vibrostola.* Teorijski je moguće izraditi uređaj koji oscilira potpuno vertikalno. Međutim, na uređaj mora biti učvršćena ploča vibrostola s ispitnim uzorkom, koje treba dodatnim mehanizmom pridržavati da i oni osciliraju vertikalno. To nije moguće postići u potpunosti pa oscilacije ploče vibrostola nisu čisto harmonijske. Električni uređaj vibrostola stoga pokazuje nazivnu amplitudu kojom on sam harmonijski oscilira. Zbog toga je trebalo ispitati kako oscilira ploča vibrostola i metodom korelacije odrediti njenu stvarnu amplitudu harmonijskog osciliranja. Polazne su jednadžbe:

$$x_2 = A \sin(pt + \varphi)$$

$$\ddot{x}_2 = -Ap^2 \sin(pt + \varphi)$$

gdje je  $\varphi$  fazni kut radi definiranja početka osciliranja. Nepoznanice su  $A$  i  $\varphi$ . Rezultati ispitivanja dani su u tablici 1.

Tablica 1. Prikaz rezultata ispitivanja

Nazivna amplituda, mm	Stvarna amplituda, mm	Indeks korelacije, $R_y$
0,25	0,2446	0,941
0,20	0,1999	0,934
0,15	0,1561	0,922
0,10	0,1098	0,904

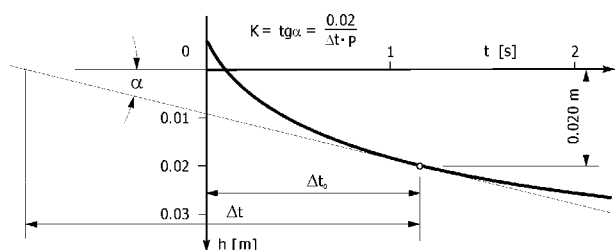
U daljnjem postupku uvijek se navode nazivne amplitude, a u proračunima se koriste vrijednosti stvarne amplitude.

*Ispitivanje uzorka u vibracijskom reometru.* Da bi rezultati bili valjani, tj. da bi se mogli međusobno uspoređivati, potrebno je da volumen i oblik svih uzoraka budu jednaki. Materijal se ugrađuje ručno, žlicom ili lopaticom, pazeći da zbijeni ispitni uzorak ima što manji sadržaj zraka. Volumen uzorka odabran je tako da bude približno jednak volumenu umanjenog Abramsova stošca promjera donje baze 13 cm. Da bi se mogla izračunati odgovarajuća masa uzorka, za svaku vrstu materijala potrebno je prethodno odrediti njegovu volumnu masu. Potrebna se masa uzorka, za zadani volumen, tada određuje vaganjem.

Prodiranjem klipa oblik uzorka se mijenja. Konstantni oblik kod kojega se obavljaju mjerenja definiran je položajem klipa na dubini 20 cm, što je označeno kao radna dubina na slici 2. Na toj dubini blizina površine uzorka i dna posude imaju prihvatljiv utjecaj na tonjenje klipa.

Ispitivanja su izvršena s 4 različita opterećenja, tj. mase klipa, i to  $m = 588$  g, 705 g, 811 g, i 928 g. te 4 nazivne amplitude vibrostola  $2A = 0,2$  mm, 0,3 mm, 0,4 mm i 0,5 mm. Različite mase dobivene su kombinacijom utega na klipu (slika 1.).

Za svako se ispitivanje na dubini 0,020 m odredi brzina tonjenja klipa kao koeficijent smjera tangente na zapis mehaničkog pisača, u koordinatama  $x_1, pt$  (slika 5.).

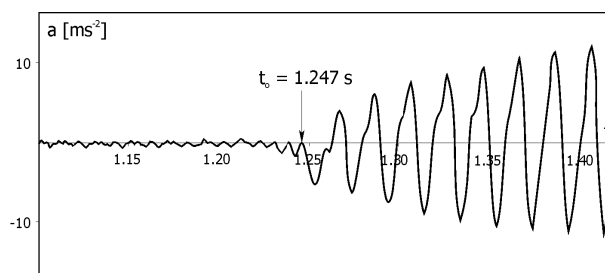


Slika 5. Zapis mehaničkog pisača. Mješavina br. 2,  $2A = 0.4$  mm,  $m = 0.811$  kg

Na slici 6. prikazan je dio zapisa akcelerometra. Vrijeme  $t_0$  je trenutak kada klip počinje tonuti. Taj trenutak odgovara ishodištu koordinatnog sustava na zapisu mehaničkog pisača, tj.  $t = 0$ . Na tom zapisu određuje se vrijeme  $\Delta t_0$  kada je klip potonuo na dubinu 0,020 m. Na zapisu akcelerometra klip se našao na toj dubini u vremenu

$$t = t_0 + \Delta t_0,$$

čime je točno definirano razdoblje kada se to dogodilo. U tom razdoblju ili u dva uzastopna razdoblja očitaju se zapisana vremena i ubrzanja za daljnju obradu, primjerice 46 parova podataka u razdoblju.



Slika 6. Početni dio zapisa akcelerometra

Rezultat koji se traži jest amplituda  $A_2$ . Polazne jednadžbe su izraz (3) i ubrzanje, tj. druga derivacija izraza (2'):

$$A_2 = \frac{pm_1}{\sqrt{p^2 m^2 + b^2}} A$$

$$\ddot{x}_1 = -Ap^2 \sin(pt + \varphi) + A_2 p^2 \cos(pt + \varphi - \delta),$$

gdje je  $\varphi$  fazni kut radi definiranja početka osciliranja. Nakon što su izračunane teorijske vrijednosti  $\ddot{x}_1$  u svim točkama, metodom korelacije određeni su kut  $\varphi$  i parametar  $b$  kao međurezultati, a zatim amplituda  $A_2$  za svaku odabranu nazivnu amplitudu vibrostola i masu klipa.

Izraz (3) može se pisati u obliku:

$$A_2 = A_2 \cdot A$$

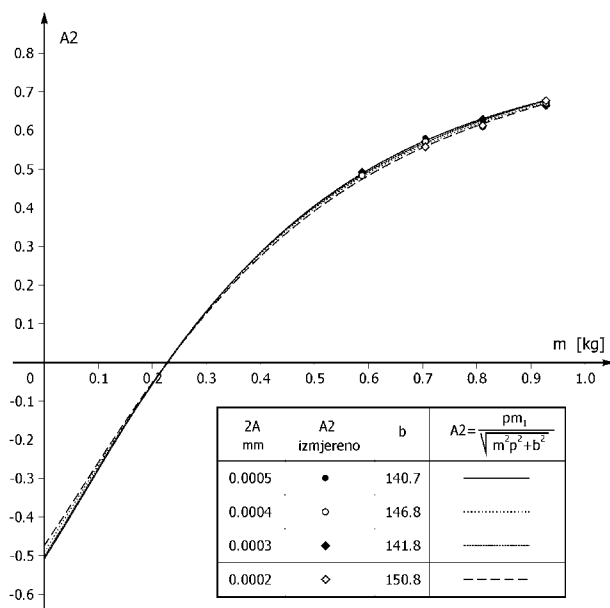
$$A_2 = \frac{pm_1}{\sqrt{p^2 m^2 + b^2}} \quad (4)$$

Izraz za  $A_2$  definira ovisnost relativne parcijalne amplitude  $A_2$  o masi klipa  $m$  i svojstvu materijala ispitnog uzorka, tj. parametru prividne dinamičke viskoznosti  $b$  i masi klipa  $m$ . Ovisnost o amplitudi vibrostola je linearna. Ovako raščlanjen izraz za  $A_2$  praktičniji je za analizu rezultata ispitivanja.

Rezultati ispitivanja i proračuna za sva tri ispitna uzorka prikazani su na slikama 7., 8. i 9. Potreban broj točaka za konstrukciju dijagrama  $m - A_2$  izračunat je prema izrazu (4). Vrijednosti za  $b$  iz tabela uz dijagrame dobivene su metodom korelacije prema polaznom izrazu (4), koristeći se prije navedenim međurezultatima za  $b$ .

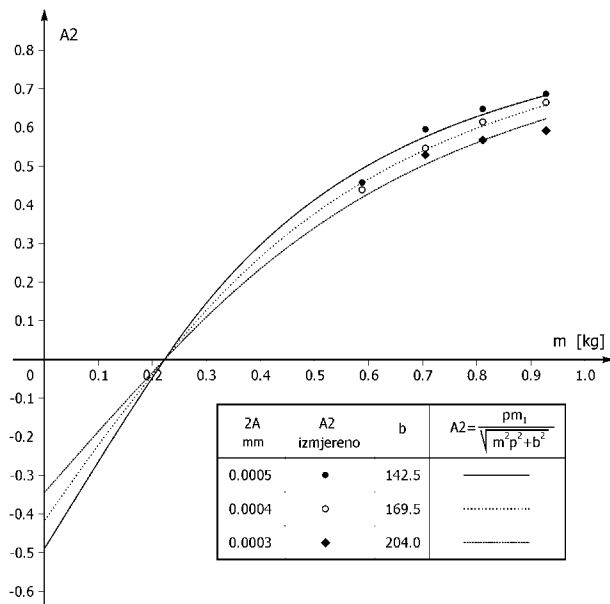
## 6 Rasprava o rezultatima ispitivanja

Iz dijagrama  $m - A_2$  jasno je uočljivo da je koeficijent  $A_2$  proporcionalan masi klipa, ali nelinearno, što znači da klip veće mase oscilira s većom relativnom amplitudom  $A_2$  i obratno. Ako je masa klipa manja od uzgona, amplituda  $A_2$  postaje negativna i klip ne može tonuti, već pod utjecajem vibracije ispliva na površinu uzorka. Ovaj je efekt kod lakih čestica i mjehurića zraka već odavno poznat i detaljno opisan, ali nije bio teorijski analiziran.



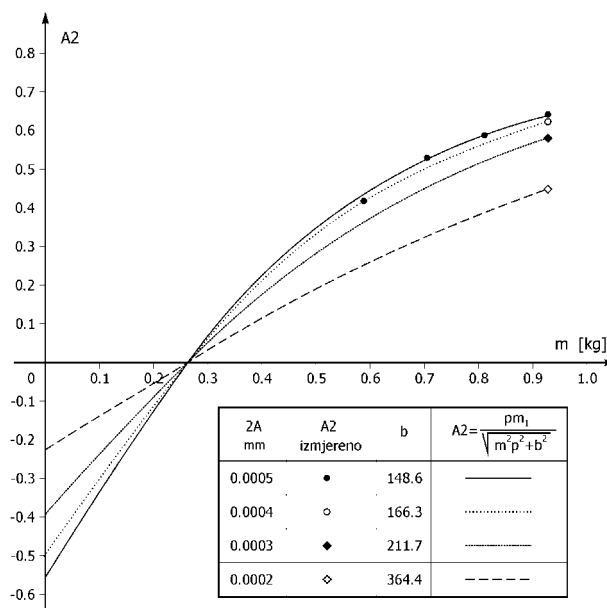
Slika 7. Dijagram m – A2 za mješavinu br. 1

Na istim slikama navedene su i vrijednosti parametra **b**. Uočava se da materijal ima veći parametar **b** pri manjoj relativnoj amplitudi što znači da su izlaganjem materijala vibraciji njegova svojstva postala ovisna o parametrima oscilacija. Ovo je i dokaz ispravnosti pretpostavke da se ispitani materijal izložen vibraciji ponaša kao pseudoplastični fluid. Ekstremni slučaj je uzorak od mješavine br. 1 (slika 7.) koji gotovo ne mijenja parametar **b** izlaganjem vibraciji i ponaša se kao Newtonov fluid, odnosno jednako kao pri preoblikovanju bez vibracija.



Slika 8. Dijagram m – A2 za mješavinu br. 2

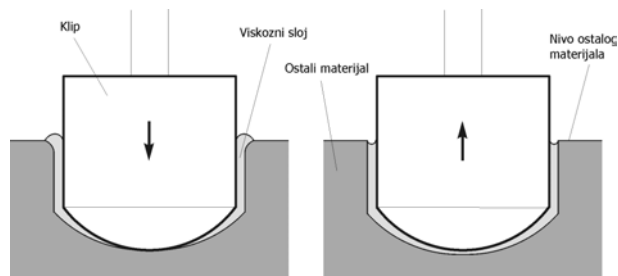
Pri gibanju klipa prema dolje površina ispitnog uzorka se izdiže i deformira, a pri izvlačenju klipa se spušta.



Slika 9. Dijagram m – A2 za mort

Takvo ponašanje površine u skladu je s osnovnim zakonima hidromehanike.

Međutim, uočeno je da se uza sam klip izluči tanki sloj materijala koji je već na prvi pogled drukčiji od ostalog dijela ispitnog uzorka. Kada se klip utiskuje u uzorak, spomenuti se sloj po cijelom opsegu klipa istiskuje iznad nivoa okolnog materijala, kako je prikazano na slici 10. Pri izvlačenju klipa materijal tog sloja uvlači se približno do nivoa okolnog materijala i ispod klipa. Radi izučavanja sloja, na šipku vodilice klipa je nakon završene faze eksperimenta vibriranjem zakvačen poseban dinamometar s mjernom skalom. Podizanjem dinamometra na šipku djeluje odgovarajuća statička sila, a klip miruje. Kada ta sila dosegne vrijednost  $m_1 \cdot g$ , počinje izvlačenje klipa iz uzorka, bez daljnjeg povećanja sile, odnosno pojave granice tečenja. To znači da se materijal sloja ponaša gotovo kao idealan Newtonov fluid. Zbog takvih karakteristika za navedeni sloj odabran je naziv *viskozni sloj*.

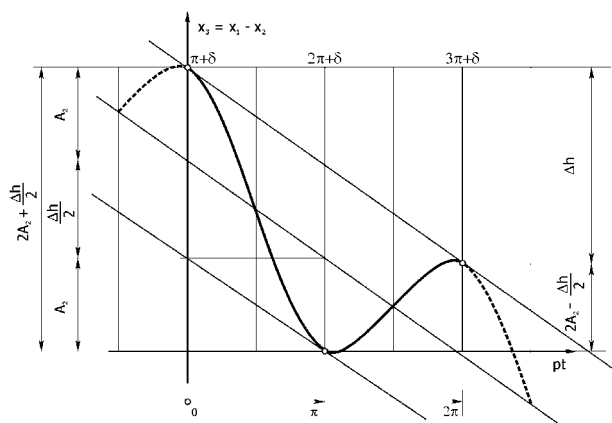


Slika 10. Shematski prikaz viskoznog sloja

Takvo izvlačenje klipa ima neku granicu kada je za daljnji pomak potrebno djelovati na šipku sve većom silom, jer se počinje deformirati cijeli uzorak. Budući da se vi-

bracijskim reometrom mjeri ukupni efekt, opisano izvlačenje klipa je u skladu s pretpostavkom da se uzorak ponaša kao pseudoplastični fluid, s promjenljivim parametrom dinamičke prividne viskoznosti  $b$ .

U zapisu mehaničkog pisara prikazano je prosječno tonjenje klipa na svakom mjestu zapisa. U jednom razdoblju ono iznosi  $\Delta h$  i može se izračunati iz podataka obrade zapisa za odabranu dubinu 0,020 m. Mehanički pisar ne može registrirati oscilacije klipa jer su premale pa bi zapis bio gotovo glatka krivulja. Naprotiv, akcelerator ne može registrirati ubrzanja zbog prosječnog tonjenja klipa jer su premala, te bi u slučaju bez vibracija njegov zapis bio horizontalna ravna linija. Zbog toga se ukupno gibanje klipa može prikazati ako se gibanja na temelju oba zapisa zbroje, kako je prikazano na slici 11. Iz slike se vidi da bi pomak klipa u poluperiodu kada on tone trebao iznositi  $2A_2 + \Delta h/2$ , a u sljedećem poluperiodu kada se klip izvlači  $2A_2 - \Delta h/2$ .

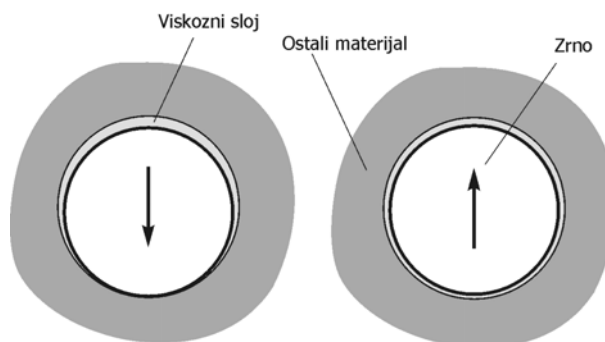


Slika 11. Teorijski prikaz osciliranja mase m

Međutim, stvarno izmjereni pomak na dinamometru je više nego dvostruko veći od vrijednosti  $2A_2 + \Delta h/2$ . To znači da je viskozni sloj trajno izlučen iz okolnog materijala i da se klip većim dijelom jednog razda giba blizu tom sloju, bez dodirivanja ostalog materijala uzorka. Uočljivo je da je količina materijala viskoznog sloja, koju klip istisne iznad nivoa okolnog materijala u poluperiodu utiskivanja, primjetno veća negoli količina koju klip uvuče u poluperiodu izvlačenja iz uzorka. Količina viskoznog sloja koja čini tu razliku može ići samo ispod klipa koji tada ne dodiruje ostali materijal uzorka. Viskozni sloj može se vidjeti na kraju eksperimenta, nakon potpunog izvlačenja klipa.

**Ponašanje zrna agregata.** Za sada nije moguće konstruirati uređaj koji bi mjerio oscilacije zrna agregata uobičajenih veličina, ali se s velikom sigurnošću može uzeti da klip vibracijskog reometra predstavlja veliko zrno. Budući da je u ovom radu istraženo ponašanje klipova različitih masa i u različitim materijalima, nije nađen ni jedan efekt koji bi pokazivao da se zrna agregata ponašaju drukčije.

Zrno agregata giba se u uzorku zbog vlastite mase i ekscitacije podloge. Veći dio poluperioda kada se kreće prema dolje, dno zrna je u direktnom kontaktu s ostalim materijalom uzorka. S gornje strane zrna postoji formiran i zadebljan viskozni sloj. U sljedećem poluperiodu kada se zrno kreće prema gore, viskozni sloj postoji iznad i ispod njega (slika 12.). Dakle, u betonu izloženom vibraciji zrna se međusobno ne dodiruju, već se dodiruju samo njihovi viskozni slojevi pa su otpori preoblikovanju i zbijanju uzorka veoma smanjeni.



Slika 12. Shematski prikaz gibanja zrna

Empirijski eksperimentalni dokaz ove teorije autori ovog rada izveli su na veoma jednostavan način: Ako se u uzorak betona koji se vibrira polako uvlači prst, osjeća se neugodan otpor odozdo jer je prst probio viskozni sloj i u direktnom je kontaktu s ostalim materijalom, odnosno zrnima agregata. Kada se prst izvlači ima se osjećaj da se radi o plastičnoj pasti, jer se prst kreće isključivo u viskoznom sloju, bez kontakta sa susjednim zrnima agregata. Sličan eksperiment izveo je Powers [3], ali s nešto drukčijim tumačenjem.

Osim tri ispitna uzorka referentnog materijala i plastičnog betona, ispitan je i cijeli niz drugih, drukčijeg sastava, jer je uočeno da se druge vrste betona mogu ponašati bitno drukčije. Cilj tog dijela istraživanja bio je opisati različitosti ponašanja, dok definiranje modela ponašanja prelazi opseg ovog rada i sadašnjeg stanja znanja.

## 7 Zaključak

Primjenom akceleraometra kao sastavnog dijela vibracijskog reometra, po prvi je put bilo moguće kontinuirano precizno zapisivanje ubrzanja klipa aparature kao krute mase koja oscilira u ispitnom uzorku materijala, pod djelovanjem ekscitacije podloge. Rezultati ispitivanja jasno su pokazali da se ponašanje svježeg betona i sličnih materijala izloženih djelovanju vibracije općenito ne može prikazati jedinstvenim modelom, već je za svaku karakterističnu vrstu materijala potrebno odabrati drukčiji reološki model ili drugi način prikazivanja ponašanja. U ovom radu istraživanje je usmjereno na plastični beton i odgovarajuće referentne materijale.



Mjerenja, opažanja i teorijska razmatranja pokazala su da se oko svakog zrna takvih materijala, uključivši i klip kao veliko zrno, stvara sloj svojstava gotovo kao idealan Newtonov fluid, što je jedan od najvažnijih rezultata ovog istraživanja. Ispitni uzorak se ponaša kao pseudoplastični fluid s parametrom dinamičke prividne viskoznosti **b**. Na temelju analize ponašanja klipa s viskoznim slojem i ispitnog uzorka kao cjeline, proizlazi sljedeći mehanizam djelovanja vibracije na materijal:

Od izvora oscilacija, preko tekuće faze, oscilacije se prenose na zrna krupnija od 0,25 mm koja se obavijaju viskoznim slojem i osciliraju u preostaloj masi materijala čija je granica tečenja veća izvan viskoznog sloja. Zbog toga svako pojedinačno zrno teži da se ne dodiruje sa susjednim, što ubrzava tonjenje. Svako zrno titra s drukčijom amplitudom i miješa okolnu masu. Veću amplitudu imaju veća zrna. Mjehurići zraka osciliraju sa suprotnim predznakom, kreću se prema gore i izlaze iz materijala. Oba efekta zajedno manifestiraju se kao zbijanje materijala.

Oko najsitnijih čestica (do 0,25 mm) očito nema viskoznog sloja jer one same tvore taj sloj. Zbog toga vibracija praktički ne djeluje na materijal pripremljen od takvih

čestica, tj. ispitni uzorak se ponaša kao u stanju bez vibracije. Takav je primjerice referentni materijal br. 1, a u praksi cementna pasta.

Ako je volumna koncentracija stabilne paste u ispitnom uzorku sličnog reda veličine ili manja od volumne koncentracije šupljina u agregatu, nema ni prostora ni materijala za stvaranje viskoznog sloja pa zrna ne mogu samostalno oscilirati. Zrna agregata ipak teže da osciliraju samostalno pa traže prostor tamo gdje je jedino moguće – prema površini uzorka. Zbog toga se krupna zrna umjesto da tonu grupiraju na površini uzorka, što je poznata pojava kod mršavog betona [12].

Dakle, općenito postoje dviju vrsta betona: normalni i mršavi beton. Između ovih dvije vrste, uključivši i njih, postoji široko područje gdje beton ima svojstva i jedne i druge vrste pa bi njegovo ponašanje općenito trebalo biti definirano, osim s parametrom dinamičke prividne viskoznosti **b**, i s parametrom koji definira ponašanje mršavog betona.

Na žalost, ponašanje mršavog betona gotovo se uopće nije istraživalo. Čini se da ponašanje takvog betona najbolje karakterizira njegova stabilnost koja može biti izražena preko volumne koncentracije izlučene vode [12].

## LITERATURA

- [1] L' Hermite, R. L. ;Tourmon, G.: *La vibration du beton frais*, Centre de etudes et de recherches de l'industrie des liants hydrauliques, Technical publication, No.2, Paris, 1948.
- [2] Powers, T.C.: *The Properties of Fresh Concrete*, John Willey & Sons, Inc., New York, 1968.
- [3] Reiner, M.: *Deformation, Strain and Flow*, H. K. Lewis & Co., London, 1969.
- [4] ACI Committee 309: *Behaviour of Fresh Concrete During Vibration*, ACI Journal, 78 (1981) 1, 36 – 53.
- [5] Krstulović, P.: *Geometrijske i fizikalne karakteristike uzorka svježeg betona*, Građevinar, 35 (1983) 9, 349-358.
- [6] Tattersall, G.H.: *Workability and Quality Control of Concrete*, E. & F. N. Spon, London, 1991.
- [7] Wunsch, O.: Oscillating sedimentation of spheres in viscoplastic fluids, *Rheologica Acta*, 33 (1994), 292 – 302.
- [8] Teranishi, K.; Tanigawa, Y.; Mori, H.; Tarada, K.: Study on sinking behavior of coarse aggregate in fresh concrete subjected to vibration, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 17 (1995), 1 – 8
- [9] ACI Committee 309: *Behaviour of Fresh Concrete During Vibration*, Reapproved 1998.
- [10] Krstulović, P.; Juradin, S.: Modelling of fresh concrete behaviour under vibration, *International Journal for Engineering Modelling*, 12 (1999), 1 - 4, 43 - 51.
- [11] Banfill, P.F.G.; Yongmo, X.; Domone, P.L.J.: Relationship between the rheology of unvibrated fresh concrete and its flow under vibration in a vertical pipe apparatus, *Magazine of Concrete Research*, 51 (1999) 3, 181 - 190.
- [12] Krstulović, P.: *Svojstva i tehnologija betona*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu i Institut građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.
- [13] Petrou, M.F.; Wan, B.L.; Gadala-Maria, F.; Kolli, V.G.; Harries, K.A.: Influence of Mortar Rheology on Aggregate Settlement, *ACI Materials Journal*, 97 (2000) 4, 479 – 485.
- [14] Petrou, M.F.; Harries, K.A.; Gadala-Maria, F.; Kolli, V.G.: A unique experimental method for monitoring aggregate settlement in concrete, *Cement & Concrete Research*, 30 (2000) 5, 809-816.