

УДК 691.002

В.Й. Сівко, д-р техн. наук, професор КНУБА,
Б.Я. Константинівський, канд. техн. наук, доцент КНУБА

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРУ НА РОБОЧІ ОРГАНИ МАШИНИ ПРИ ВІБРОУЩІЛЬНЕННІ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ

Ефективність віброущільнення бетонних сумішей на практиці може бути оцінена розподілом густини суміші за габаритами виробу після ущільнення

$$\rho = f(x). \quad (1)$$

Вигляд функції (1) визначається параметрами вібраційної машини (маси, яка коливається M та площі робочої частини (F), режимом віброущільнення (амплітуди коливань X_0 та частоти коливань f) і механічними властивостями бетонної суміші, яка ущільнюється.

Знаходження функції (1) теоретичним шляхом може полягати в дослідженні задачі про залишкові деформації (ε_0) після ряду послідовних імпульсів вібраційної машини заданих розмірів і маси, яка рухається з відомою швидкістю по півпростору і займає суцільне середовище із певними властивостями, що характеризують бетонну суміш. Задача в такій постановці названа нами задачею віброущільнення. Перехід від залишкових деформацій до густини визначає формула

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \varepsilon_0}. \quad (2)$$

Вигляд цієї функції визначається параметрами вібраційної машини, режимом, способом ущільнення. Доведено, що відносна деформація, α , відповідно, і густина бетонної суміші залежать від напружень σ , що утворюються ударними хвилями, які розповсюджуються від джерела коливань та швидкості переміщення частинок V .

Таким чином, задача віброущільнення може бути сформульована наступним чином – для півпростору, заповненого бетонною сумішшю, необхідно знайти значення напружень σ та швидкостей переміщень V в різних точках середовища при його ущільненні. Визначення цих параметрів дозволяє встановити: ефективність використання вібраційних машин, тобто їх основний показник, режими і способи силової дії на суміш в залежності від методу формування та конфігурації виробу, що формується; параметри силової дії на робочий орган машини і форми; деформаційні характеристики сумішей, що ущільнюються.

Аналітичне описання засновано на використанні наукової гіпотези про циклічне накопичення деформацій, що розвиваються у суміші при кожному циклі силової дії. В цій загальній постановці задача дуже складна.

Хоча є значні успіхи в динамічній теорії пластичності (роботи Х.А. Рахматуліна, В.С. Ленського, Г.С. Шапіро і ін.), які дозволяють одержати практично цікаві результати вирішення більш простішої задачі про динамічну дію штамп на пружно-пластичний стовп, що схематизує бетонну суміш. Це визначення є етапом на шляху до рішення раніше сформульованої задачі про динамічну дію на півпростір.

Особливості способу віброформування в цьому випадку будуть враховуватися умовами, які виникають на межі робочого органу і середовища. Ці умови будуть визначатися способом передачі коливань в середовищі. Таким чином, задача віброущільнення в першому наближенні може бути зведена до задачі про динамічну дію твердого тіла (віброзбудника) коливань на пружно-пластичний стержень з бетонної суміші.

Питання співудару тіл з пружними властивостями розглядає класична механіка. Допускаючи пружний характер удару віброштампу на бетонну суміш, автори робіт [1] розробили рекомендації по визначенню параметрів віброштампу для ефективного ущільнення жорстких бетонних сумішей.

Механіка пружного удару дозволяє визначити загальну швидкість двох тіл, що вдаряються, в кінці удару і імпульс миттєвої сили. Але при їх співударах відносна швидкість удару звичайно настільки велика, що кожен кінцевий переріз одного з двох тіл, одержує значні кінцеві залишкові деформації. Подібні незворотні явища обумовлюються



перетвореннями кінетичної енергії в залишкові перекося структури матеріалу та розсіюванням цієї енергії в об'ємі. При цьому механізм розвитку деформацій не може бути визначеним ні рівнянням пружно-в'язкого стану, ні теорією пружно-в'язкого удару [2, 3], ні теорією фільтрації газової фази [4]. Він може бути пояснений основними співвідношеннями, які враховують великі напруження та залишкові деформації, що виникають в цьому процесі. Задовольнити ці вимоги можуть дві теорії: гідродинамічна, яка враховує властивості суцільних тіл, та теорія розповсюдження пластичних хвиль або пластичної течії.

Гідродинамічна теорія розповсюдження хвиль в тілах розглядає середовища, як рідини, що стискається і не чинять опір зсуву і в першому наближенні не мають в'язкості. Цей висновок вірний при дослідженні хвилі напруження з амплітудами, порядок яких близький модуля пружності матеріалу, що досліджується (для рихлих бетонних сумішей) при майже вертикальному хвильовому фронті. Імпульси подібного типу називають ударними хвилями. При нехтуванні модулем зсуву матеріалу всі залишкові деформації розглядають як результат зміни модуля об'ємного стиснення $K = E/3(1-2\mu)$, що еквівалентно, зміни щільності ρ середовища. Використання цієї теорії визначається законами збереження маси, кількості руху та енергії при одночасному розгляді рівняння стану, що зв'язує тиск P , щільність та термодинамічну постійну, наприклад, ентропію або температуру.

Теорія розповсюдження пластичних деформацій базується на основних положеннях статичної теорії пластичності.

Властивості середовища звичайно визначаються кінцевим модулем зсуву, та пружно-пластичними залежностями, що включають напруження, деформації та швидкості деформацій.

Характер протікання процесу ущільнення бетонних сумішей може бути оцінений характером розподілення щільності по габаритах виробу

$$\rho = f(x, y, z). \quad (3)$$

Вид цієї функції визначається параметрами вібраційної машини (коливальна маса m і площа робочого органа F), режимом віброущільнення (амплітуда коливань x_0 і частота коливань f) і механічними властивостями бетонної суміші.

Знаходження цієї функції теоретичним шляхом полягає в дослідженні задачі про залишкові деформації ε_0 після ряду послідовних імпульсів вібраційної машини. Перехід від залишкових деформацій до щільності відображує формула

$$\rho = \rho_0 / (1 - \varepsilon_0). \quad (4)$$

Для вивчення динамічних процесів, що виникають при віброущільненні бетонних сумішей, розглядається динамічна система "робочий орган – бетонна суміш". Під дією змушуючої сили $Q \sin \omega t$ робочий орган масою t діє на бетонну суміш. Диференціальне рівняння руху суміші в напрямку координати x за час t буде мати вигляд

$$\frac{d\sigma}{dx} = \rho \frac{d^2 u}{dt^2}. \quad (5)$$

Для рішення цього рівняння необхідно мати залежність між напруженнями і деформаціями для бетонної суміші. Ця залежність, як показано в дослідженнях В.Й.Сівка [4] має вигляд петлі гістерезису і містить в собі пружну і в'язку складові опору

$$\sigma = f(E, \eta, f), \quad (6)$$

де E і η - динамічний модуль пружної деформації і коефіцієнт динамічної в'язкості; f - коефіцієнт сухого тертя.

Рівняння (5) і (6) повинні вирішуватись спільно і таким чином можна описати процес поширення хвиль в середовищі.

Задача про взаємодію робочого органу і середовища надзвичайно складна, якщо її вирішувати в суворій постановці. По-перше, середовище в процесі віброущільнення змінює свої фізичні властивості і, відповідно, змінюються параметри E , η , f . По - друге, робочий орган знаходиться під впливом опору середовища, що теж змінюється. Тому така задача може бути вирішена двома способами. Перший спосіб полягає в моделюванні властивостей середовища однією з відомих реологічних моделей і в спільному вирішенні рівнянь (5) і (6). Другий спосіб полягає в представленні петлі гістерезисна кусочно-лінійною функцією. Рівняння (5) і (6) вирішуються чисельними способами.

Так в роботах Маслова О.Г. [5] ця задача вирішена для поверхневих вібраційних машин. Бетонна суміш була представлена наступною моделлю

$$\sigma = E_1 \frac{du}{dx} + \eta_1 \frac{d^2u}{dxdt} + f_1 u, \quad (7)$$

де E_1, η_1, f_1 - усереднені значення параметрів суміші.

Рівняння (4) і (7) вирішені при граничних

$$\begin{aligned} & -m \frac{d^2u(0,t)}{dt^2} - b \frac{du(0,t)}{dt} - Cu(0,t) + \\ & + F \left[E_1 \frac{du(0,t)}{dx} + \eta_1 \frac{d^2u(0,t)}{dxdt} + f_1 u(0,t) \right] + Q \sin[\omega t + \varphi] = 0; \quad (8) \\ & u(H,t) = 0. \end{aligned}$$

і початкових умовах

$$u(x, 0) = 0; \quad du(x,0)/dt = V_1 \quad (9)$$

Тут F - опорна поверхня віброплити ; φ - кут зсуву фаз між параметрами віброплити і змушуючої сили в момент удару по середовищу; V_1 - швидкість віброплити в момент удару.

Знайдено рішення (5) спільно з (8) і (9) у вигляді

$$\begin{aligned} u(x,t) = & \frac{A_2 \omega}{\rho} \cdot \frac{\sin[\rho_0(H-x)/a_1]}{\sin(\rho_0 H / a_1)} \cdot e^{-(\delta_1 x + \alpha_3 t)} \cdot \sin \rho t + \\ & + A e^{-\delta_1 x} \cdot \frac{\sin K_1(H-x)}{\sin K_1 H} \cdot (\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \Delta e^{-\alpha_3 t} \cdot \sin(\rho t + \beta)), \quad (10) \end{aligned}$$

де $A, A_2, C, \rho, \alpha_3, \delta, \psi, \beta, \Delta$ - коефіцієнти.

Цей метод має ряд недоліків. По-перше, фізико-механічні властивості суміші беруться постійними і незалежними від швидкості деформацій середовища і характеру взаємодії хвиль в середовищі. По-друге, процес моделювання середовища пружно-в'язкою моделлю теж вносить в розрахунок похибки. Тому, на наш погляд, краще розглядати середовище з розподільними параметрами і використати числові методи розрахунку.

Диференційне рівняння руху суміші (5) використовуючи метод характеристик приводиться до системи рівнянь в формі кінцевих різниць [1]

$$(x_{k,e} - x_{k,e-1}) \cdot (V_{k,e-1} + C_{k,e-1}) \cdot (t_{k,e} - t_{k,e-1}) = 0; \quad (x_{k,e} - x_{k-1,e}) \cdot (V_{k-1,e} - C_{k-1,e}) \cdot (t_{k,e} - t_{k-1,e}) = 0; \quad (11)$$

$$\frac{S}{C_{k,e-1}} (\sigma_{y_{k,e}} - \sigma_{y_{k,e-1}}) + \rho (\sigma_y)_{k,e-1} (V_{k,e} - V_{k,e-1}) + \quad (12)$$

$$+ \left[\frac{2f_{k,e-1}}{\alpha} \sigma_{y_{k,e-1}} + g \rho (\sigma_y)_{k,e-1} \right] \cdot (t_{k,e} - t_{k,e-1}) = 0;$$

$$\frac{S}{C_{k,e-1}} (\sigma_{y_{k,e}} - \sigma_{y_{k-1,e}}) + \rho (\sigma_y)_{k-1,e} (V_{k,e} - V_{k-1,e}) + \quad (13)$$

$$+ \left[\frac{2f_{k-1,e}}{\alpha} \sigma_{y_{k-1,e}} + g \rho (\sigma_y)_{k-1,e} \right] \cdot (t_{k,e} - t_{k-1,e}) = 0,$$

де $t_{k,e}, x_{k,e}$ - координати (час, положення), в яких визначаються значення параметрів; $\sigma_{k,e}, V_{k,e}$ - вишукуванні параметри напруженого стану (радіальне напруження, швидкість деформацій); $x_{k,e-1}, t_{k,e-1}, \sigma_{k,e-1}, V_{k,e-1}, x_{k-1,e}, t_{k-1,e}, \sigma_{k-1,e}, V_{k-1,e}$ - параметри середовища у відомих точках (знаходяться із початкових і граничних умов); $C_{k,e-1}, C_{k-1,e}$ - швидкість руху хвиль в відомих точках відповідно з густиною середовища; $\rho(\sigma_y)_{k,e-1}, \rho(\sigma_y)_{k-1,e}$ - густина середовища; g - прискорення вільного падіння; f - коефіцієнт тертя суміші по бортах форми; a - ширина виробу; S - величина, обернена коефіцієнту бокового розпору (2; 2,5).

Рівняння (11) описують звукові хвилі в середовищі, а рівняння (12) визначають напружено-деформований стан, обумовлений хвильовими процесами.

Для вирішення задач віброущільнення необхідні дві початкові і дві граничні умови.

А – початкові умови: при $t = 0$

$$1) \sigma_y = \sigma_{y_0} = \sigma_y(x, 0);$$

$$2) V = V_0 = V(x, 0).$$

- закони розподілення горизонтального тиску і модуля вектора швидкості по висоті виробу в початковий момент часу;

Б - граничні умови:

$$1) \text{ при } x = x_0(t) \quad \sigma_y[x_0(t), t] = 0;$$

$$2) \text{ при } x = h \quad F[\sigma_y(h, t); V(h, t)] = 0.$$

Суть першої граничної умови - рівність нулю σ_y на поверхні виробу (при станковому способі формування). Суть другої граничної умови - певна залежність між функціями σ_y і V в зоні контакту робочого органу і середовища. Вид цієї залежності визначається режимом роботи робочого органу.

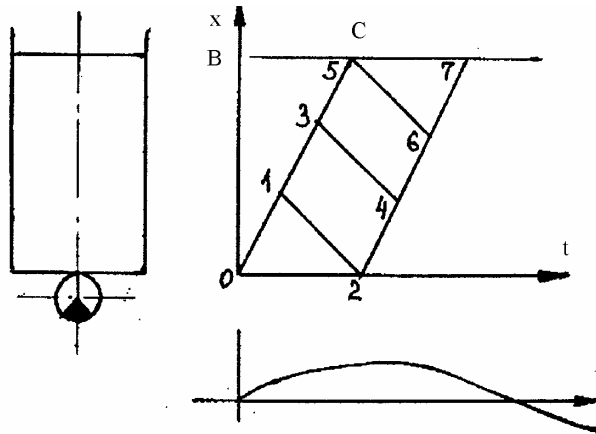


Рис.1. Схема рішення задачі

Схему рішення задачі наведено на рис.1. Лінія ОВ - лінія початкових умов, на якій задаються значення σ_{y_0} і V_0 . (середовище нерухоме, а горизонтальний тиск розподіляється за законом трикутника $\sigma_{y_0} = \frac{g\rho x}{2,5}$). В точках 1, 3, 5 значення параметрів будуть

$$\sigma_{y_0} = \frac{g\rho x}{2,5}; V_0 = 0; \sigma_1 = \frac{2g\rho h}{3 \cdot 2,5}; V_1 = 0; \sigma_3 = \frac{g\rho h}{2,5 \cdot 3}; V_3 = 0; \sigma_5 = 0; V_5 = 0. \quad (14)$$

На початку, коли середовище нерухоме, від робочого органу поширюється пружна хвиля з швидкістю $C_0 = \sqrt{d\sigma_x / d\rho} = \sqrt{E_0 / \rho}$. Значення модуля пружності для різних середовищ вибирають з [4]. Лінія ОС проводиться під кутом $\alpha = h/t = C_0$.

Параметри напруженого стану в точці 2 визначаються із рівнянь

$$x_2 = u(0, t_2) = \frac{Q - 2,5\sigma_2 F}{\sqrt{(C - m\omega^2)^2 + b^2\omega^2}} \cdot \cos \omega t_2; \quad (15)$$

$$(x_2 - x_1) - (V_1 - C_1)(t_2 - t_1) = 0; \quad (16)$$

$$V_2 = \omega \frac{Q - 2,5\sigma_2 F}{\sqrt{(C - m\omega^2)^2 + b^2\omega^2}} \cdot \sin \omega t_2; \quad (17)$$

$$\frac{S}{C_1}(\sigma_2 - \sigma_1) - \rho_1(V_2 - V_1) - \left[\frac{2t_1}{\alpha} \sigma_1 - g\rho_1 \right] \cdot (t_2 - t_1) = 0. \quad (18)$$

В точці 7 параметри напруженого стану

$$(x_7 - x_6) - (V_6 + C_6)(t_7 - t_6) = 0 \quad x_7 = h; \quad (19)$$

$$\frac{S}{C_6}(\sigma_7 - \sigma_6) - \rho_6(V_7 - V_6) + \left[\frac{2f_6}{\alpha} \sigma_6 + g\rho_6 \right] \cdot (t_7 - t_6) = 0, \quad \sigma_{y_7} = 0. \quad (20)$$

В проміжних точках параметри напруженого стану визначаються рівняннями (11) і (12), в яких перші рівняння визначають параметри руху і напруженого стану від прямих хвиль, а другі рівняння - від зворотних хвиль.

Амплітуда коливань робочого органа визначається по формулі

$$u_0(0, t) = \frac{Q - 2,5\sigma_0 F}{\sqrt{(c - m\omega^2)^2 + b^2\omega^2}}, \quad (21)$$

а статичний момент маси дебалансів

$$m_0 r_0 = \frac{u_0 \sqrt{(C - m\omega^2)^2 + b^2\omega^2} + 2,5\sigma_0 F}{\omega^2}, \quad (22)$$

де σ_0 - максимальне значення напружень.

Література

1. Савинов О.А., Лавринович Е.В. Об основных закономерностях процессов виброштампования жестких бетонных смесей.// Автоматизация и усовершенствования процессов приготовления, укладки и уплотнения бетонных смесей. Сб. научн. трудов НИИЖБ. – М.: Госстройиздат, 1961. - вып.21. - С.216-231.
2. Руководство по технологии формования железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1977. -95 с.
3. Руденко И.Ф. Формование изделий поверхностными виброустройствами. – М.: Стройиздат, 1972. – 104 с.
4. Рафалес-Ламарка Э.Э., Лишанский Б.А., Петров А.С. Особенности уплотнения бетонных смесей при виброударных колебаниях.// Гор., строит. и дор. машины. Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1981. – вып. 31. – С.82-86.
5. Сівко В.Й. Основи механіки вібруємих бетонних сумішей. К.: Вища школа, 1988. -168с.
6. Маслов О.Г. Научные основы и разработка поличастотных вибрационных машин для обработки и уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей. Автореферат дис. д-ра техн. наук. Х.: ХДАДТУ, 1994. – 50 с.