

ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ УЩІЛЬНЕННІ ЛЕГКОБЕТОННИХ РОЗЧИНІВ

¹ Київський національний університет будівництва та архітектури

² Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Анотація. У роботі досліджено хвильові процеси, що виникають при ущільненні легкобетонних розчинів під дією імпульсних та періодичних навантажень. Зокрема, розглянуто особливості деформування арболітових і полістиролбетонних сумішей, які проявляють в'язкопружні властивості та передають збурення у вигляді затухаючих хвильових фронтів. Побудовано математичну модель на основі рівняння руху з урахуванням локального прискорення та змінного тиску, що описує поширення імпульсу в середовищі як хвильовий процес. Запропоновано граничні та початкові умови для моделювання процесу ущільнення в реальних формах. Показано, що внаслідок інтерференції прямих і відбитих хвиль виникають локальні зони ущільнення, форма і розподіл яких суттєво залежать від фазової швидкості та коефіцієнта затухання. Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації режимів ущільнення легких бетонів і вдосконалення конструкцій вібраційного обладнання.

Ключові слова: вібрація; легкобетонні суміші; хвильовий процес; в'язкопружне середовище; імпульсне ущільнення; хвильове рівняння; затухання; локальне ущільнення; динамічне навантаження.

Вступ. Вібраційна дія на ущільнюючу суміш має велике практичне значення лежить в основі всієї сучасної технології ущільнення сумішей. Сутність вібраційної дії полягає в тому, що при коливаннях суміш отримує властивості текучості внаслідок порушення зв'язків між частинками. Частинки, що отримують підвищену рухливість, переміщуються і під дією сил ваги прагнуть зайняти більш стійке положення. При цьому повітря, що знаходиться між частинками, витискується вгору і суміш, врешті, значно ущільнюється. Процес віброущільнення суміші має складний характер і проходить у кілька стадій: переукладання компонентів з інтенсивним витискуванням повітря, зближення частинок і завершальним витискуванням повітря, а також можливим доущільненням за рахунок деякого додаткового, наприклад статичного, тиску [1]. Означена стадія має назву компресійного тиску і може здійснюватись як під час вібрування суміші, так і по завершенні процесу вібраційної дії. У першому випадку позитивний ефект підвищення густини і міцності бетону досягається невеликим статичним тиском впродовж кількох хвилин. У другому випадку той самий ефект можна отримати лише завдяки значному питомому тиску у кілька мегапаскалей. В обох випадках ефект досягається внаслідок часткового тиску і більш рівномірного розподілу порової води, а також ущільнення контактів між зернами заповнювачів.

Викладення основного матеріалу. Процеси ущільнення легкобетонних сумішей, зокрема арболітових і полістиролбетонних, супроводжуються складними хвильовими явищами, обумовленими впливом імпульсних та періодичних навантажень [2]. Для адекватного опису механізму передачі імпульсу через середовище легкого бетону необхідно розглядати деформацію середовища як хвильовий процес у в'язкопружному тілі.

Побудова математичної моделі базується на записі рівнянь руху елемента об'єму ΔV під дією імпульсу. Припускаючи, що швидкість переміщення частинок значно менша за швидкість звуку, повне прискорення можна замінити локальним:

$$\xi = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (1)$$

Де $\zeta(x, t)$ переміщення частинок у момент часу t вточці x

Рівняння балансу сил для елемента ΔV із урахуванням змінного тиску і локального прискорення набуває вигляду:

$$\rho a l \Delta x \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = -a l \Delta x \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right) + k_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (2)$$

що, після скорочення на $a l \Delta x$, перетворюється на:

$$\rho \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + k_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (3)$$

або у канонічній формі

$$\frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{k_0}{\rho} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \quad (4)$$

Таким чином, ущільнювана суміш поводить ся як в'язкопружне хвильове середовище, що передає імпульси із затуханням амплітуди внаслідок внутрішнього тертя.

Спрощений випадок без затухання

У разі нехтування ефектами затухання (тобто $k_0 = 0$) хвильовий процес описується класичним хвильовим рівнянням:

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \quad (5)$$

Де $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – фазова швидкість поширення збурення у бетонній суміші.

Граничні та початкові умови:

Для практичного розгляду задачі ущільнення вводяться наступні початкові та граничні умови.

Початково: частинки середовища перебувають у стані спокою: $\zeta(x, 0) = 0$, (при $t = 0$ зміщення ζ в будь-якій точці ххх дорівнює нулю, тобто початково система знаходиться без деформацій).

$$\frac{\partial \zeta(x, 0)}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

(система починає рух без початкового імпульсу без початкової швидкості).

На вільній поверхні ($x = H$):

$$\frac{\partial \zeta(H, t)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

На робочій поверхні ($x = 0$), де діє імпульсне навантаження:

$$\zeta(0, t) = \mu(t) \quad (8)$$

де $\mu(t)$ описує форму та тривалість імпульсу.

Розв'язання рівняння хвиль при заданих умовах отримується методом поширення хвиль. Загальне рішення для часу до першого відбиття хвилі записується у вигляді:

$$\zeta(x, t) = \mu\left(t - \frac{x}{c}\right) \quad (9)$$

При подальшому врахуванні відбиття хвиль від вільної поверхні (в точці $x = H$) рішення ускладнюється і має форму суми кількох хвильових фронтів

Для випадку з урахуванням затухання хвильовий процес описується рівнянням:

$$\zeta(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\mu\left(t - \frac{x + 2nH}{c}\right) e^{-\beta^*(x+2nH)} - \mu\left(t + \frac{x - 2nH}{c}\right) e^{-\beta^*(x-2nH)} \right] (-1)^n + \mu\left(t - \frac{x}{c}\right) e^{-\beta^*x} \quad (10)$$

де β^* — коефіцієнт затухання в середовищі.

Рішенням отриманих залежностей здійснені розрахунки параметрів імпульсного ущільнення легкобетонних сумішей.

Висновки

1. Отримані аналітичні залежності описують процеси інтерференції прямих і відбитих хвиль, локальні зони ущільнення легкобетонних сумішей.
2. Ущільнення легкобетонних сумішей під дією імпульсного навантаження супроводжується виникненням серій хвиль переміщення, що інтенсивно взаємодіють у середовищі через відбиття від вільних та закріплених меж форми. Інтерференція прямих і відбитих хвиль призводить до локального ущільнення, яке розповсюджується у вигляді хвильових фронтів.
3. Особливості в'язкопружної поведінки легких бетонів, таких як арболіт і полістиролбетон, обумовлюють необхідність врахування затухання, щоб правильно оцінити глибину та рівномірність ущільнення матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Назаренко І. І., Дяченко О. С. Експериментальні дослідження робочого процесу вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей зі змінним режимом роботи // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2019. – № 92. – С. 24–31. <https://doi.org/10.31493/gbdmm1892.0301>
2. Маслов О. Г., Нестеренко М. П., Складенко Т. О. Аналітичні дослідження коливань вібраційної установки для формування бетонних виробів для дорожнього будівництва у режимі холостого ходу // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Вип. 4 (34). – С. 249–254.

Назаренко Іван Іванович — д.т.н., професор завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, e-mail: ii_nazar@ukr.net

Нестеренко Микола Миколайович — канд. техн. наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» e-mail: nesterenkonikola@gmail.com

Ведмідь Василь Васильович — аспірант, кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Нестеренко Тетяна Миколаївна — канд. техн. наук, доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

INVESTIGATION OF WAVE PROCESSES ARISING DURING THE COMPACTION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE MIXTURES

Abstract. The study investigates wave processes that arise during the compaction of lightweight concrete mixtures under the influence of impulse and periodic loads. In particular, it examines the deformation behavior of arbolite and polystyrene concrete mixtures, which exhibit viscoelastic properties and transmit disturbances in the form of attenuating wave fronts. A mathematical model was developed based on the motion equation that incorporates local acceleration and variable pressure, describing impulse propagation in the medium as a wave process. Boundary and initial conditions were proposed for modeling the compaction process in real molds. It is shown that the interference of incident and reflected waves results in the formation of local compaction zones, the shape and distribution of which significantly depend on the phase velocity and attenuation coefficient. The findings of the study can be used to optimize compaction regimes for lightweight concretes and to improve the design of vibration equipment.

Key words: lightweight concrete mixtures; wave process; viscoelastic medium; impulse compaction; wave equation; attenuation; local compaction; dynamic loading.

Ivan Nazarenko— Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Machinery and Equipment of Technological Processes, Kyiv National University of Construction and Architecture. Kyiv, Ukraine. e-mail: ii_nazar@ukr.net

Mykola Nesterenko— PhD, Associate Professor, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine, e-mail: nesterenkonikola@gmail.com

Vasyl Vedmid — postgraduate, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

Tetiana Nesterenko — PhD, Associate Professor, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine