

ПРО МОЖЛИВІСТЬ БАГАТОХВИЛЬОВОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЕФЕКТІВ У ПАЛЯХ

Анотація. Обґрунтовано потребу в побудові узагальненої моделі палі, яка б забезпечила отримання більш правдоподібних сигналів хвильових процесів у залізобетонних палях. Використання сучасних моделей не дає змоги діагностувати дефекти в палях з достатньою точністю. Розроблено декілька хвильових моделей сигналів, що базуються на методі скінченних різниць та враховують різні види коливальних процесів у залізобетонних палях у ґрунті. Моделі здатні описати різні типи та місця розташування дефектів по довжині палі, врахувати ґрунтові умови будівельного майданчика тощо. Вони дають змогу імітувати на сигналах відлуння від дефектів із заданим кроком. Тепер можна не лише визначати довжину палі та місцезнаходження дефектів, але й здійснювати ідентифікацію дефектів малих розмірів (менше 30 % від площі поперечного перерізу палі). В одновимірному випадку отримані моделі збігаються з уже відомими, а у тривимірному — є їхнім узагальненням.

Ключові слова: ідентифікація, дефекти, паля, відбиті хвилі, чисельне моделювання.

ВСТУП

Залізобетонні палі, на відміну від інших залізобетонних конструкцій, мають декілька особливостей: довжина палі значно перевищує два інші її розміри (розміри поперечного перерізу) [1]; доступ до занурених у ґрунт залізобетонних палей обмежений одним вільним торцем та бічною поверхнею, сумарна площа яких зазвичай становить не більше 12 % від загальної площі поверхні палі [2]; у процесі влаштування залізобетонних палей у ґрунт можуть виникати дефекти, не характерні для інших типів залізобетонних конструкцій [3]; твердіння бетонної суміші палі у вертикальному її положенні призводить до нерівномірності впливу власної ваги палі по її довжині. Оптимальна на сьогодні технологія контролю цілісності палей ґрунтується на збудженні низькочастотної хвилі імпульсу з подальшим записом часової характеристики її розповсюдження приймачами, встановленими на поверхні палі (low strain integrity testing) [4–6].

Усі сучасні методики контролю влаштованих у ґрунт залізобетонних палей базуються на різновидах теоретичної моделі, що використовує лише поздовжні коливання.

1. Модель, що не враховує в'язку складову (прилад ТКС-1, Державне підприємство «Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» [7]):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (1)$$

2. Модель Максвелла (прилад КСДК-3.3, Київський національний університет будівництва та архітектури [8]):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{1}{\beta} \frac{\partial u}{\partial t} \right). \quad (2)$$

3. Модель Фойхта–Кельвіна (використовується у роботах більшості дослідників з питань діагностики палів, серед яких Liao [9], Kim [10, 11], Ambrosini [12] та ін.):

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t}. \quad (3)$$

Liao, Ambrosini та Kim [9–12] застосовували одну теоретичну модель хвильових процесів, але вона не здатна задовольнити всі вимоги щодо контролю палів, а саме, забезпечити визначення типу дефектів та геометричної форми палі, ідентифікацію дефектів малих розмірів та ін. Тому для коректної ідентифікації цих характеристик потрібно враховувати в теоретичній моделі розповсюдження в палі не лише поздовжніх, а й поперечних (зсувних) хвиль. Розглянемо побудову такої моделі.

ТРИМОВА НЕЛІНІЙНА МОДЕЛЬ ПАЛІ

Одну з перших багатомодових моделей протяжного елемента в полі масових та поверхневих сил побудували Hegemier G.A., Nair S. у роботі [13]. Однак їхня модель (як і модель балки Ейлера) є гіперболо-параболічною, тобто вона некоректно описує розповсюдження усіх типів хвиль та не підходить для ідентифікації дефектів у палях [14].

Розглянемо залізобетонну палю як розподілений протяжний об'єкт, один вимір якого значно перевищує два інших, тобто $d/L \sim 0.01$, де d — діаметр буронабивної палі, L — її довжина. Наприклад, під час влаштування пального фундаменту на будівництві багатоповерхівки в м. Києві за адресою вул. Пимоненка 14-А в лютому 2017 р. довжина палі складала понад $L \sim 40$ м, а $d \sim 0.8$ м ($d/L \leq 0.02$). Для таких припущень можемо побудувати описану нижче геометрично та фізично нелінійну тримодову модель палі в ґрунті.

Розглянемо систему координат, зображену на рис. 1. Вибір такої системи координат не є випадковим. Наприклад, у роботі [15] для побудови моделі протяжної буксованої системи взято декартову систему координат. Наслідком цього є громіздкість рівнянь та складнощі під час їхньої чисельної реалізації. Вибір природного тригранника дав змогу з самого початку «факторизувати» диференціальні рівняння за типом хвиль: на вектор дотичної проектується рівняння, що описує розповсюдження поздовжніх хвиль, а на вектори нормалі та бінормалі — рівняння, що описують конфігураційні (згинальні) хвилі тощо.

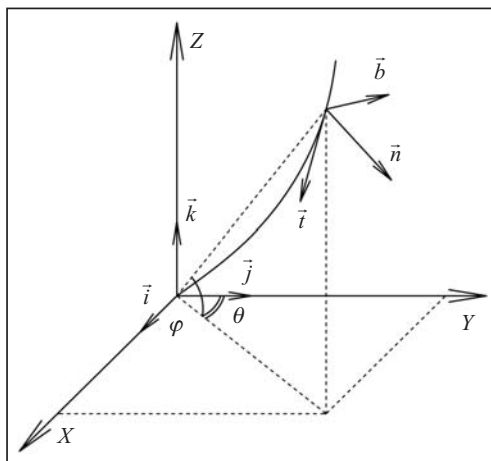


Рис. 1. Система координат $(\vec{i}, \vec{n}, \vec{b}) = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})ABC$

Розглянемо палю з постійними характеристиками поперечного перерізу. Радіус-вектор початкового положення позначимо $\vec{R}_0(S, 0)$, а деформованого — $\vec{R}(S, t)$, (рис. 1). Введемо деформацію ε палі

$$\varepsilon = \frac{(dS^2 - dS_0^2)}{dS_0^2} = \left| \frac{\partial \vec{R}}{\partial S} \right|^2 - 1. \quad (4)$$

Тоді змінні S_0 і S , що характеризують недеформовану та деформовану довжини палі, будуть пов'язані між собою співвідношенням

$$dS = \sqrt{1 + \varepsilon} \cdot dS_0, \quad \varepsilon = eT. \quad (5)$$

Введемо природну систему координат з одиничними взаємоортогональними векторами \vec{i} , \vec{n} і \vec{b} . Вектор \vec{i} — одиничний вектор дотичної, який визначається з співвідношення

$$\vec{i}(S, t) = \frac{\partial \vec{R}(S, t)}{\partial S}. \quad (6)$$

Два інших вектори, нормалі \vec{n} та бінормалі \vec{b} , є ортогональними до \vec{i} . Розглянемо похідну радіус-вектора $\vec{R}(S, t)$ у деформованому стані:

$$\frac{\partial \vec{R}(S, t)}{\partial S} = \vec{i}(1 + \varepsilon). \quad (7)$$

З іншого боку, для $\partial \vec{R} / \partial t$ маємо такий вираз:

$$\frac{\partial \vec{R}(S, t)}{\partial t} = u_t \vec{i} + u_n \vec{n} + u_b \vec{b}. \quad (8)$$

Тут u_t , u_n , u_b — проекції швидкостей хвильових коливань на вектори дотичної (поздовжні коливання), нормалі та бінормалі (поперечні та згинальні коливання).

Для трьох взаємоортогональних одиничних векторів маємо [16]

$$\begin{aligned} \vec{i} &= \vec{i} \cos \theta \cos \varphi - \vec{j} \sin \theta \cos \varphi - \vec{k} \sin \varphi, \\ \vec{n} &= -\vec{i} \cos \theta \sin \varphi + \vec{j} \sin \theta \sin \varphi - \vec{k} \cos \varphi, \\ \vec{b} &= \vec{i} \sin \theta + \vec{j} \cos \theta. \end{aligned} \quad (9)$$

Виходячи з (4), пряме і обернене перетворення системи координат можна записати так:

$$(\vec{i}, \vec{n}, \vec{b}) = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}) \cdot A, \quad (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}) = (\vec{i}, \vec{n}, \vec{b}) \cdot A^{-1},$$

де

$$A = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & -\sin \varphi \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta \cos \varphi & \sin \varphi \sin \theta & \cos \theta \\ -\sin \varphi & -\cos \varphi & 0 \end{bmatrix}, \quad A^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & -\sin \theta \cos \varphi & -\sin \varphi \\ -\cos \theta \sin \varphi & \sin \theta \sin \varphi & -\cos \varphi \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \end{bmatrix}.$$

Похідні одиничних векторів дотичної, нормалі та бінормалі (9) набудуть такого вигляду:

$$\begin{aligned} \vec{i}' &= \vec{n} \varphi' - \vec{b} \theta' \cos \varphi, \\ \vec{n}' &= \vec{i} \varphi' - \vec{b} \theta' \sin \varphi, \\ \vec{b}' &= \vec{i} \varphi' \cos \varphi - \vec{n} \theta' \sin \varphi. \end{aligned} \quad (10)$$

Введемо такі позначення:

$$(\dots)' = \frac{\partial}{\partial S}(\dots), \quad (\dots) \dot{} = \frac{\partial}{\partial t}(\dots), \quad (11)$$

де t — час, S — початкова недеформована довжина палі.

Векторне рівняння моделі нелінійної динаміки палі з урахуванням співвідношень (4–11) набуде такого вигляду [16]:

$$\begin{aligned} T' \vec{i} + T \varphi' \vec{n} - T \theta \cos \varphi \vec{b} - \omega (\vec{i} \sin \varphi + \vec{n} \cos \varphi) - m (\dot{u}_t - u_n \dot{\varphi} + u_b \dot{\theta} \cos \varphi) \vec{i} + \\ + \frac{\mu_t e \dot{T}}{1 + eT} \vec{i} - m (\dot{u}_n + u_t \dot{\varphi} - u_b \dot{\theta} \sin \varphi) \vec{n} + \frac{\mu_n e \dot{T}}{1 + eT} \vec{n} - \\ - m (\dot{u}_b - u_t \dot{\theta} \cos \varphi + u_n \dot{\theta} \sin \varphi) \vec{b} + \frac{\mu_b e \dot{T}}{1 + eT} \vec{b} = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

де T — поздовжня сила; m , ω — погонні маса та вага одиниці довжини палі до деформування; u_t , u_n , u_b — проєкції швидкостей хвильових коливань на вектори дотичної (поздовжні коливання), нормалі та бінормалі (поперечні та згинальні коливання).

Проекція векторного рівняння (12) на вектори дотичної, нормалі, бінормалі дає систему трьох рівнянь, яка є незамкненою. Інші три рівняння отримаємо з умови неперервності змішаної похідної радіус-вектора $\vec{R}(S, t)$:

$$\frac{\partial^2 \vec{R}}{\partial t \partial S} = \frac{\partial^2 \vec{R}}{\partial S \partial t}. \quad (13)$$

Приведемо отриману систему рівнянь до матричної форми та запишемо у вигляді матричного рівняння типу переносу стандартного вигляду [17]:

$$E \frac{\partial W}{\partial t} + B \frac{\partial W}{\partial S} = D. \quad (14)$$

де E — одинична матриця; B — матриця конвективних членів, D — вектор-стовпчик правих частин системи (12), W — вектор-стовпчик невідомих змінних.

Матрицю B запишемо у вигляді

$$B = \begin{bmatrix} \frac{-u_t}{1+eT} & \frac{-u_n}{1+eT} & \frac{-u_b}{1+eT} & \frac{-1}{m} & 0 & 0 \\ \frac{-u_n}{1+eT} & \frac{u_t}{1+eT} & \frac{u_b \operatorname{tg} \varphi}{1+eT} & 0 & \frac{u_t^2 + u_n^2}{1+eT} - \frac{T}{m} & I_1 \\ \frac{-u_b}{1+eT} & 0 & \frac{u_t - u_n \operatorname{tg} \varphi}{1+eT} & 0 & \frac{u_n u_b}{1+eT} & I_2 \\ \frac{-1}{e} & 0 & 0 & 0 & \frac{u_n}{e} & \frac{-u_b \cos \varphi}{e} \\ 0 & \frac{-1}{1+eT} & 0 & 0 & \frac{-u_t}{1+eT} & \frac{u_b \sin \varphi}{1+eT} \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1+eT) \cos \varphi} & 0 & 0 & \frac{u_n \operatorname{tg} \varphi - u_t}{1+eT} \end{bmatrix},$$

$$I_1 = \frac{u_b u_n}{1+eT} (\operatorname{tg} \varphi \sin \varphi - \cos \varphi) - \frac{2u_t u_b}{1+eT} \sin \varphi, \quad (15)$$

$$I_2 = \frac{T}{m} \cos \varphi - \frac{u_b^2 \cos \varphi}{1+eT} + (u_t - u_n \operatorname{tg} \varphi)(u_n \sin \varphi - u_t \cos \varphi) \frac{1}{1+eT},$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{-\omega \sin \varphi}{m} \\ -\omega \cos \varphi \\ m \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} u_t \\ u_n \\ u_b \\ T \\ \varphi \\ \theta \end{bmatrix}.$$

Введемо такі граничні умови на верхньому кінці палі:

$$\begin{aligned} u_t &= V_{0x} \cos \theta \cos \varphi - V_{0y} \sin \theta \cos \varphi - V_{0z} \sin \varphi, \\ u_n &= -V_{0x} \cos \theta \sin \varphi + V_{0y} \sin \theta \sin \varphi - V_{0z} \cos \varphi, \\ u_b &= V_{0x} \sin \theta + V_{0y} \cos \theta. \end{aligned} \quad (16)$$

де $\vec{V}_0 = V_{0x}\vec{i} + V_{0y}\vec{j} + V_{0z}\vec{k}$ — початкова швидкість збудження низькочастотної хвилі імпульсу. Якщо збудження здійснюється ударом з боку вільного торця палі, граничні умови набувають вигляду $u_t = u_0$; $u_n = 0$; $u_b = 0$.

Отримана теоретична модель (14) є розширенням одновимірної хвильової моделі до тривимірної. Математичну коректність моделі (14) можна довести такими шляхами.

1. Спрощення розмірності виразу (14). Якщо під час отримання системи рівнянь (14) не брати до уваги координати, що задаються одиничними векторами нормалі \vec{n} та бінормалі \vec{b} , замість системи з шести рівнянь отримаємо систему з двох:

$$\frac{\partial u_t}{\partial t} - \frac{1}{m} \frac{\partial T}{\partial S} = \frac{-\omega \sin \varphi}{m}, \quad (17)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{e} \frac{\partial u_t}{\partial S} = 0.$$

У результаті диференціювання першого рівняння системи по t , а другого — по S отримуємо

$$\frac{\partial^2 u_t}{\partial t^2} - \frac{1}{m} \frac{\partial^2 T}{\partial t \partial S} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial S \partial t} - \frac{1}{e} \frac{\partial^2 u_t}{\partial S^2} = 0.$$

Після підстановки другого рівняння в перше отримуємо

$$\frac{\partial^2 u_t}{\partial t^2} - \frac{1}{em} \frac{\partial^2 u_t}{\partial S^2} = 0. \quad (19)$$

Оскільки $m = \rho_0$, $e = \frac{1}{E_0}$, де E — модуль пружності, Δ_0 — площа перерізу, то

$$\frac{1}{em} = \frac{E}{\rho} = c_0^2. \quad (20)$$

У результаті підстановки (20) у (19) отримуємо рівняння (1).

2. Доведення теореми про коректність задачі Коші для моделі (14) [18]. З огляду на обмеженість загального обсягу статті, цей крок можна виконати за бажання самостійно.

3. Згущення розрахункової сітки, що є традиційним для чисельного моделювання [17]. Однією з особливостей систем, що описують динаміку паль, є їхня мала деформованість за довжиною. Внаслідок цього коефіцієнти при похідній $\frac{\partial T}{\partial S}$ є малими (порядку 10^{-5} – 10^{-8}). Це свідчить про сингулярність матриці B (14) та її погану обумовленість. Фізично ця особливість матриці B характеризує велику розбіжність швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль. Тому, щоб задовольнити умову Куранта–Фрідрікса–Леві для всіх коефіцієнтів матриці B , потрібно кінцево-різницевою сітку задачі вибирати таким чином, щоб відношення кроку розрахункової сітки за лагранжевою координатою до кроку розрахункової сітки за часом перевищувало безрозмірну швидкість поширення поздовжніх хвиль у палі. А це, своєю чергою, свідчить про складнощі у застосуванні явних різницевих схем для аналізу системи гіперболічних рівнянь (14).

У цій роботі проведено дослідження стійкості чисельного алгоритму для розрахунку шести рівнянь (14) за допомогою неявної кінцево-різницевої схеми Кранка–Ніколсона. Чисельні результати, отримані шляхом розрахунку на грубій сітці (що складається з п'яти ділянок за лагранжевою координатою), а також на сітці, подрібненій у два рази (10 ділянок за лагранжевою координатою), є зіставними. Відмінності відповідних характеристик є незначними. Таким чином, трьома способами було доведено математичну коректність моделі (14).

Для практичного застосування (14) можна рекомендувати схему Кранка–Ніколсона для моделювання процесів поширення і відбиття хвиль у палях [16].

ДВОМОДОВА МОДЕЛЬ ПАЛІ

Однією з модифікацій моделі (14) є двохвильова модель поздовжньо-згинальних коливань, що описує розповсюдження хвиль у палі для поперечного удару по її торцю (рис. 2, модель балки Тимошенка [19]). Рівняння моделі можна записати у вигляді канонічного матричного рівняння типу переносу, у якому змінними є швидкість зсувних коливань u_y , швидкість згинальних коливань u_φ , поперечне зусилля V^* та згинальний момент M :

$$E \frac{\partial W^*}{\partial t} + B^* \frac{\partial W^*}{\partial S} = D^* , \quad (21)$$

де

$$B^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{\rho F^*} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\rho I^*} \\ k^* F^* G^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -E^* I^* & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D^* = \begin{bmatrix} -g \\ -V^* \\ \rho I^* \\ k^* F^* G^* u_\varphi \\ 0 \end{bmatrix}, \quad W^* = \begin{bmatrix} u_y \\ u_\varphi \\ V^* \\ T \end{bmatrix}. \quad (22)$$

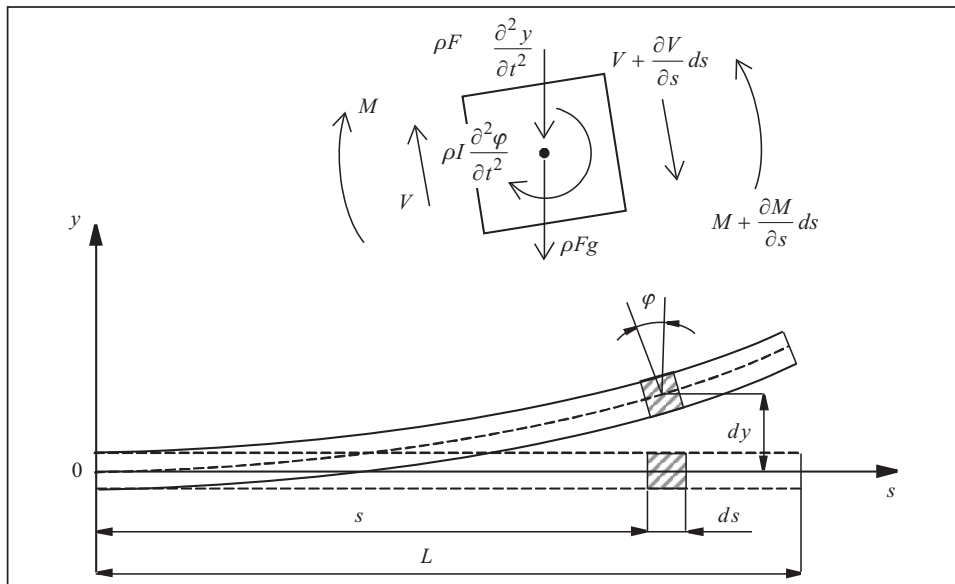


Рис. 2. Геометричне зображення діючих сил у двохвильовій моделі палі

Тут F^* — площа перерізу балки; g — прискорення вільного падіння; ρ — щільність матеріалу балки; E^* , G^* — модулі пружності та зсуву матеріалу балки; I^* — момент інерції поперечного перерізу відносно нейтральної осі; k^* — коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу дотичних напружень по перерізу балки та залежить від її форми.

Відповідність моделі (21) реальним процесам продемонстровано видатним україно-американським вченим С.П. Тимошенком під час уточнених розрахунків балок та хмарочосів у США [20], але для діагностики дефектів у палях цю модель раніше не застосовували.

РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 3 та 4 наведено результати математичного моделювання за моделлю (21) сигналів, відбитих від нижнього кінця палі. На рис. 3 зображено змодельовані сигнали, що надходять до датчиків швидкості, розташованих вертикально посередині основи палі, а також їхні амплітудні спектри під час зав-

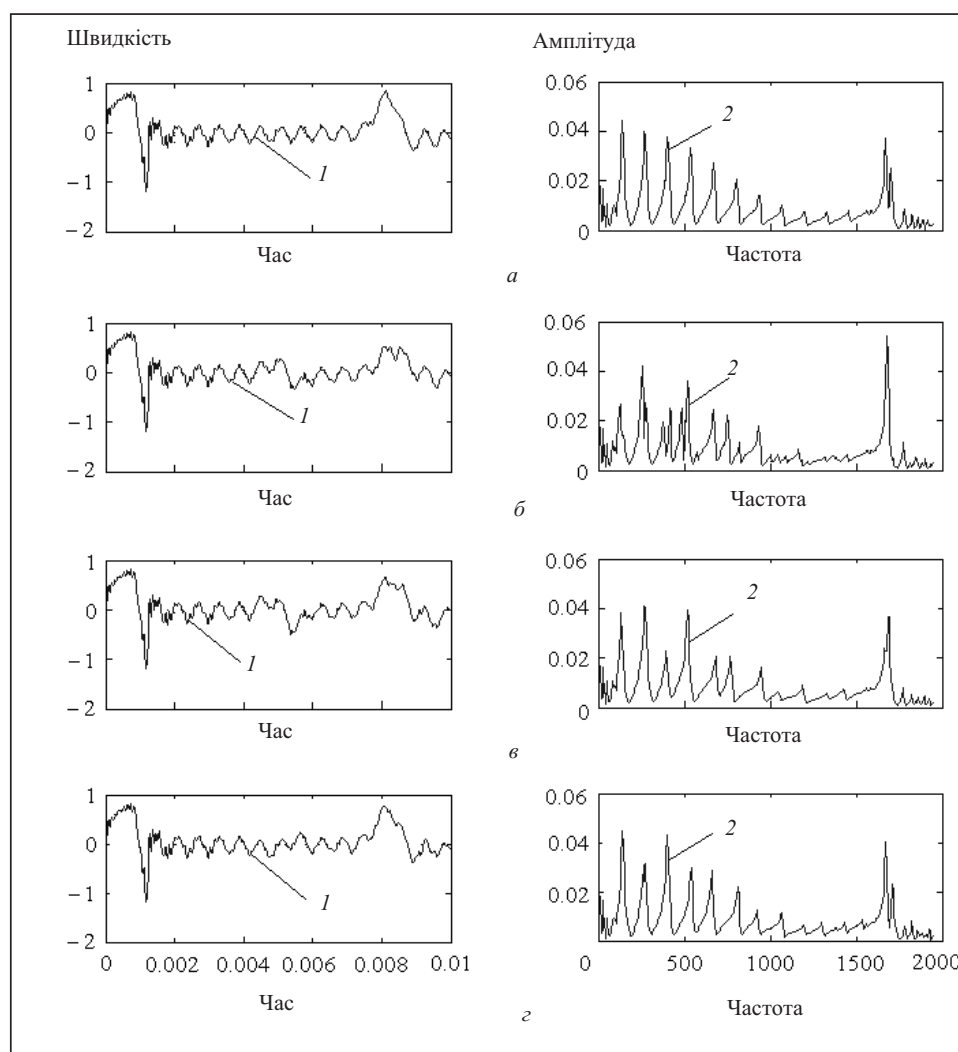


Рис. 3. Змодельовані сигнали (1), а також їхні амплітудні спектри (2) під час завдання вертикального удару по оголовку палі: яка не містить дефектів (а); з асиметричною тріщиною (б); з шийкою (в); з потовщенням стовбура (г)

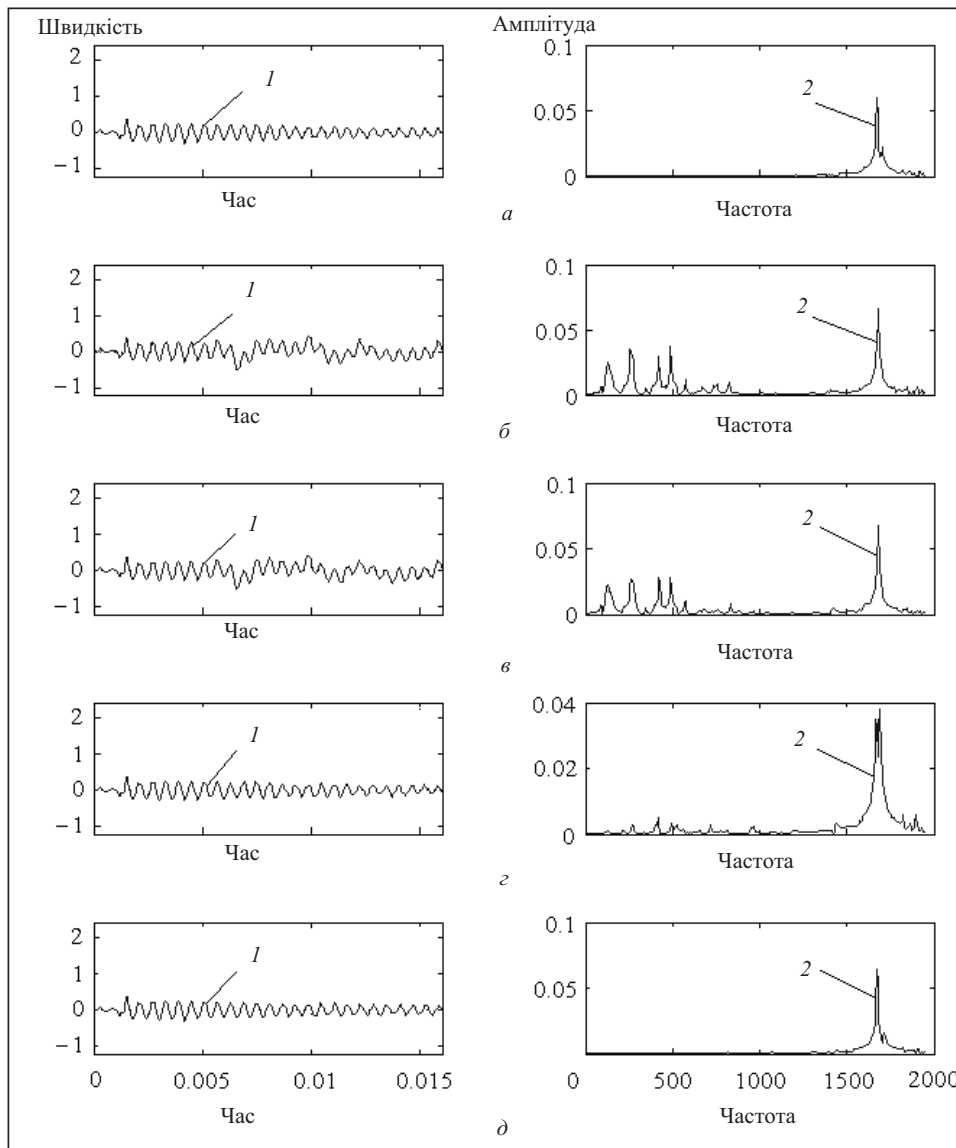


Рис. 4. Змодельовані сигнали (1) під час завдання горизонтального удару по бічній поверхні біля межі з основою палі: що не містить дефектів (а); з тріщиною (б); з каверною (в); з шийкою (г); з потовщенням стовбура (д)

дання вертикального удару по оголовку палі: яка не містить дефектів (а); з асиметричною тріщиною (б); з шийкою (в); з потовщенням стовбура (г). На рис. 4 зображено змодельовані сигнали, що надходять до датчиків швидкості, розташованих у вертикальному напрямку посередині оголовка палі, під час завдання горизонтального удару по бічній поверхні біля межі з основою палі: що не містить дефектів (а); з тріщиною (б); з каверною (в); з шийкою (г); з потовщенням стовбура (д).

Як впливає з рис. 3, часові сигнали на часовому відрізку [0–0,008 с] на графіках (а)–(г) не дуже сильно відрізняються, а на часовому відрізку [0,008–0,01 с] вони відрізняються суттєво. Це свідчить про взаємодію хвилі початкового імпульсу з одним з дефектів палі (тріщиною, шийкою або потовщенням стовбура), її відбиття від нижнього кінця палі, додаткову взаємодію з дефектом та досягнення нею

приймача у початковому положенні на верхньому торці палі. Причому під час порівняння часових сигналів на рис. 3, *a–г* можна побачити суттєві відмінності як в амплітуді відбитих хвиль, так і в їхніх графічних відображеннях. Подібна картина спостерігається і в амплітудно-частотних спектрах відбитих сигналів. Відмінності на рис. 3, *a–г* мають місце як у величині амплітуди, так і у формі спектрів сигналів.

Ще більш виражені відмінності спостерігаються в амплітудно-частотних спектрах на рис. 4, *a–д* під час горизонтального удару по бічній поверхні палі, який ініціює більш потужний імпульс згинальної хвилі. У цьому випадку спостерігаються відмінності як у величинах амплітуд (рис. 4, *г* суттєво відрізняється від інших), так і в наявності або відсутності додаткових піків (max, min; див. графіки сигналів на рис. 4, *б* та рис. 4, *в* у порівнянні з графіками на рис. 4, *а, б* та *д*).

Таким чином, у результаті аналізу зображень на рис. 3 та рис. 4 для палей, що не містять дефектів, та палей з різними типами дефектів можна виявити багато відмінностей як у часових сигналах, так і в амплітудно-частотних спектрах (не лише за величиною, а й за графічним зображенням — наявністю чи відсутністю на графіках сигналів додаткових максимумів (мінімумів)). Все це слугує теоретичним підґрунтям для створення у найближчому майбутньому автоматизованого мобільного комплексу коректної ідентифікації дефектів різного типу в палях за наявності відповідної бази математичних розрахунків та експериментальних даних.

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано потребу у створенні узагальненої моделі палі, яка б дала змогу отримувати більш правдоподібні теоретичні сигналограми хвильових процесів у залізобетонних палях у ґрунті, оскільки використання сучасних моделей неруйнівного контролю не дозволяє діагностувати палі з достатньою точністю [2–12, 21]. Розроблено узагальнену модель сигналограм хвильових процесів у залізобетонних палях, що враховує два різні типи хвиль. Продемонстровано її здатність до ідентифікації дефектів різного типу, наявних у залізобетонних палях.

2. Побудовано чисельний алгоритм та програму, які дають змогу імітувати на сигналограмах відлуння від різного типу дефектів із заданим кроком за часом та довжиною палі. Їхню відповідність реальним хвильовим процесам, що розповсюджуються у палі в результаті ударного збудження, підтверджено шляхом порівняння для окремих випадків з відомими однохвильовими моделями, деякими даними експериментів та результатами, отриманими шляхом згущення кінцево-різницевої сітки.

3. Чисельне розв'язання системи рівнянь (14) для конкретних граничних умов, що залежать від способу збудження низькочастотної хвилі імпульсу, дає змогу отримати більш повну інформацію про цілісність палі. За цією інформацією можна не лише визначити довжину палі та місцезнаходження дефектів, але й ідентифікувати дефекти малих розмірів (менше 30 % від площі поперечного перерізу палі), визначити тип дефектів та геометричну форму палі, оскільки зміну поперечного перерізу можна визначити за поперечними (згинальними) коливаннями у палі, які тепер враховуються побудованою моделлю. В одновимірному випадку отримана модель збігається з уже відомими, а у тривимірному — є їхнім узагальненням.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kaliukh I., Senatorov V., Marienkov N., Trofymchuk O., Silchenko K., Kalyukh T. Arrangement of deep foundation pit in restricted conditions of city build-up in landslide territory with considering of seismic loads of 8 points. *Proc. XVI ECSMGE* (Edinburgh, 13–17 Sept. 2015). 2015. P. 535–540.
2. Kaliukh I., Senatorov V., Khavkin O., Kaliukh T., Khavkin K. Experimental and analytic researches on technical state, design and operation of reinforced concrete anti-landslide structures for seismic dangerous regions of Ukraine. *Proc. of the Fib Symposium* (Tel-Aviv, 22–24 Apr. 2013). 2013. P. 625–628.
3. Улицкий В.М. Богов С.Г. Контроль качества изготовленных свай на сплошность ствола. *Реконструкция городов и техническое строительство*. 1999. № 1. С. 1–4.
4. ASTM Standards C 1383-98. Impact-echo method (Test method for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method).
5. ASTM D5882-00. Standard test method for low strain integrity testing of piles. ASTM International.
6. Sansalone M., Streett W. *Impact-Echo: nondestructive evaluation of concrete and masonry*. New York: Bullbrier Press, 1997. 339 p.
7. Глуховский В.П., Марьенков Н.Г. Методика и программно-технический комплекс для контроля качества свайных фундаментов. *Світ геотехніки*. 2004. № 2. С. 7–10.
8. Ярас В.І. Автоматизована система експрес-діагностики бетонних стовпів і паль у ґрунті: дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2006. 193 с.
9. Shu-Tao Liao, Jian-Hua Tong, Cheng-Hao Chen, Tsung-Tsong Wu. Numerical simulation and experimental study of parallel seismic test for piles. *International Journal of Solids and Structures*. 2006. Vol. 43. P. 2279–2298.
10. Kim D.S., Seo W.S., Lee K.M. IE-SASW method for nondestructive evaluation of concrete structure. *NDT&E International*. 2006. Vol. 39. P. 143–154.
11. Kim D.S., Kim H.W., Kim W.C. Parametric study on the impact-echo method using mock-up shafts. *NDT&E International*. 2002. Vol. 35. P. 595–608.
12. Ambrosini D., Ezeberry J. Long piles integrity trough impact echo technique. *Mecanica Computacional*. 2005. Vol. XXIV. P. 651–669.
13. Hegemier G.A., Nair S. A nonlinear dynamical theory for heterogeneous, anisotropic, elastic rods. *AIAA*. 1977. Vol. 15, N 1. P. 8–15.
14. Селезов И.Т. Концепция гиперболичности в теории управляемых динамических систем. *Кибернетика и вычислит. техника*. 1969. Вып. 1. С. 131–137.
15. Yuan Z., Jin L. and Chi W. Finite difference method for solving the nonlinear dynamic equation of underwater towed system. *International Journal of Computational Methods*. 2014. Vol. 11, N 4. P. 85–89.
16. Калюх Ю.І. Статика, динаміка та оптимізація канатних транспортуючих систем в потоці: дис. ... докт. техн. наук. Київ, 1993. 320 с.
17. Хруц В.К. Численные методы газовой динамики. Днепропетровск: Днепропетровский ун-т, 1981. 102 с.
18. Курант Р. Уравнения с частными производными. Москва: Мир, 1964. 830 с.
19. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. Москва: Гос. тех. из-во. физ.-мат. лит., 1959. 400 с.
20. Брега Г.С. Тимошенко С.П. *Енциклопедія історії України: у 10 т.* Київ: Наук. думка, 2013. Т. 10. С. 79.
21. Trofymchuk O., Kaliukh I., Silchenko K., Polevetskiy V., Berchun V., Kalyukh T. Use accelerogram of real earthquakes in the evaluation of the stress-strain state of landslide slopes in seismically active regions of Ukraine. *Engineering Geology for Society and Territory*. Lollino G. et al. (Eds). Cham: Springer, 2015. Vol. 2. P. 1343–1346.

Надійшла до редакції 29.03.2017

А.Н. Трофимчук, Ю.И. Калюх, В.А. Дунин, Я.А. Берчун
О ВОЗМОЖНОСТИ МНОГОВОЛНОВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ В СВАЯХ

Аннотация. Обоснована необходимость создания обобщенной модели сваи, которая позволяла бы получать более правдоподобные сигналограммы волновых процессов в железобетонных сваях. Использование существующих на сегодняшний день моделей не позволяет диагностировать дефекты в сваях с достаточной точностью. Разработано несколько волновых моделей сигналограмм, основанных на методе конечных разностей и учитывающих различные виды колебательных процессов в железобетонных сваях в грунте. Модели способны описать различные типы и местоположения дефектов по длине сваи, учесть грунтовые условия строительной площадки и др. Они позволяют имитировать на сигналограмме эхо от дефектов с заданным шагом. Теперь можно будет не только определять длину сваи и местонахождение дефектов, но и делать идентификацию дефектов малых размеров (менее 30% площади поперечного сечения сваи). В одномерном случае полученные модели совпадают с уже известными, а в трехмерном — являются их обобщением.

Ключевые слова: идентификация, дефекты, свая, отраженные волны, численное моделирование.

О.М. Trofymchuk, Yu.I. Kaliukh, V.A. Dunin, Y.A. Berchun
ON THE POSSIBILITY OF MULTI-WAVE IDENTIFICATION OF DEFECTS IN PILES

Abstract. The authors substantiate the necessity of creating a generalized pile model, which would allow obtaining more plausible signalograms of wave processes in reinforced concrete piles. Using currently available models does not allow detecting defects in piles with sufficient accuracy. Several wave models of signalograms are developed, which are based on the finite difference method and take into account different types of oscillatory processes in reinforced concrete piles in the ground. The models are able to describe different types and locations of defects by length of the pile, take into account ground conditions of the construction site, etc. They allow simulating on the signalogram the echo of defects with specified increments. Now it will be possible not only to determine the length of the pile and location of defects, but also to identify small defects (less than 30% of the cross-sectional area of the pile). In the one-dimensional case, the obtained models coincide with those already known, and in three-dimensional case the obtained models are a generalization of the already known ones.

Keywords: identification, defects, pile, reflected waves, numerical simulation.

Трофимчук Олександр Миколайович,
чл.-кор. НАН України, доктор техн. наук, професор, директор Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, e-mail: itelua@kv.ukrtel.net.

Калюх Юрій Іванович,
доктор техн. наук, професор, заступник завідуючого відділу Державного науково-дослідного інституту будівельних конструкцій, Київ, e-mail: kalyukh2002@gmail.com.

Дунін Володимир Андрійович,
науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту будівельних конструкцій, Київ, e-mail: kalyukh2002@gmail.com.

Берчун Ярослав Олександрович,
аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, e-mail: berchun93@gmail.com.