УДК 624.131.7

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ВЗАЄМОДІЇ СПОРУДИ І ГРУНТОВОГО ПЛАСТИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА В УМОВАХ ДИНАМІЧНИХ ЕВОЛЮЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

І.І. Солодей[1],
д-р техн. наук, професор

О.Г. Рувін[2],
д-р юрид. наук, старший дослідник

В.М. Колякова[1],
канд. техн. наук, доцент

О.П. Куліков[1],
аспірант

[1]*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ*

[2]*Київський науково-дослідний інститут судових експертиз, Київ*

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.112.83-92

В роботі розглянуті аспекти моделювання взаємодії споруди і грунтового пружно-пластичного середовища в умовах динамічних еволюційних процесів. Наведено основні геометричні та фізичні співвідношення теорії пружності для неоднорідних кругових та призматичних просторових тіл. В рамках розв'язання задачі динаміки розглянуто особливості реалізації математичної моделі, щодо представлення варіації кінетичної енергії як частини рівнянь динамічної рівноваги лінійної та нелінійної механічних систем.

Ключові слова:споруда, модель грунтової основи, пружнопластичне нелінійне середовище, неоднорідні кругові та призматичні просторові тіла, динамічне навантаження.

Вступ

При проектуванні будівель і споруд ми завжди говоримо про два типи впливів: статичний і динамічний. Для першого необхідно лише розрахувати безпосередню реакцію конструкції на діючі постійні навантаження у вигляді переміщень і напружень, у випадку динамічного аналізу, діапазон можливих варіацій відгуку конструкції визначити значно складніше. І складність залежить не тільки від параметрів самого навантаження (інтенсивність, закон зміни у часі), але і від характеристик (значень та їх зміни у часі) об’єкту дослідження, що представляє собою взаємопов’язану систему споруди та грунтової основи.

До динамічних факторів впливу можна віднести періодичні вібраційні або ударні навантаження, дії вибухів, що викликають різку зміну тиску на конструкції споруди, сейсмічні коливання і т. і. В багатьох випадках навантаження є результатом хвиль напружень, що розповсюджуються у грунтовій основі. Ці фактори можуть діяти на природне середовище довготривало, порівняно недовго, короткочасно і миттєво. Час дії факторів не завжди визначає розмір шкоди, що завдається споруді. Зміна характеристик оточуючого середовища, як наслідок дії зовнішніх впливів, є також не менш важливим чинником визначення «здоров’я» конструкції.

Особливе місце, серед розмаїття об’єктів, що розглядаються за допомогою аналітичних і чисельних методів, займають тіла обертання та призматичні тіла складної форми та структури поперечного перерізу. Виділений геометричний клас використовується в якості природніх конструкцій в будівельній та машинобудівельній галузях народного господарства. Можливість значного спрощення розв’язуючих співвідношень за рахунок урахування їх геометричних особливостей завжди привертала велику увагу дослідників. Різноманітні аспекти розрахунку зазначених конструкцій широко відображені у роботах [1-3, 10, 12].

Тому розробка уточнених підходів оцінки напружено-деформованого стану конструкцій при взаємодії споруди і грунтового середовища в умовах динамічних еволюційних процесів залишається актуальною задачею сьогодення.

1. Математичні аспекти геометричних та фізичних рівнянь теорії пружності для неоднорідних кругових та призматичних просторових систем тіл. Розглянемо просторові тіла обертання та призматичні тіла в циліндричній та декартовій системах координат $Z^{i'}$ (рис. 1), що знаходяться під дією нестаціонарного навантаження, на інтервалі часу $T \in [t_0, t_1]$. Систему координат $Z^{i'}$ використовують для опису геометричних і механічних характеристик, початкових і граничних кінематичних умов, зовнішніх навантажень та називають базисною. Напружено-деформований стан тіла описується в місцевій криволінійній системі координат x^i. Координатні лінії x^1 і x^2 розміщені в області твірної поверхні, а x^3 - орієнтована вздовж напрямної.

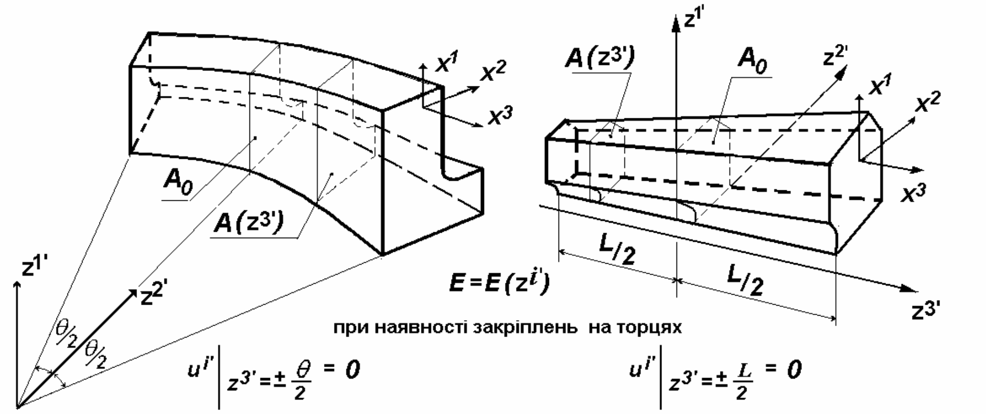

Рис. 1. Просторові тіла обертання та призматичні тіла загального вигляду

Зв'язок між базисною і місцевою системами координат визначається за допомогою прямого і зворотного тензорів перетворення координат:

$$z^{i'}_{,j} = \frac{\partial Z^{i'}}{\partial x^j}, \quad x^i_{,j'} = \frac{\partial x^i}{\partial Z^{j'}}. \tag{1}$$

Коваріантні компоненти метричного тензора місцевої системи координат можна представити через коваріантні компоненти базисної системи:

$$g_{ij} = z^{m'}_{,i} z^{n'}_{,j} g_{m'n'}. \tag{2}$$

Контраваріантні компоненти знаходяться по відомим коваріантним:

$$g^{ij} = \mathrm{A}(g_{ij}) \big/ g, \tag{3}$$

де $\mathrm{A}(g_{ij})$ - алгебраїчне доповнення до елемента g_{ij}, $g = \det[g_{ij}]$ - визначник матриці.

Геометричні співвідношення. В загальному випадку компоненти тензора деформацій в місцевій системі координат визначаються співвідношенням:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right) - u_k \Gamma^k_{ij}, \tag{4}$$

де $u_{i,j} = \dfrac{\partial u_i}{\partial x^j}$, Γ^k_{ij} - символи Кристофеля другого роду, u_i - переміщення в місцевій системі координат.

Для зручності представимо переміщення і символи Кристофеля їх значеннями в базисній системі координат:

$$u_k = z^{m'}_{,k} u_{m'}, \tag{5}$$

$$\Gamma^k_{ij} = x^k_{r'} z^{m'}_{,i} \left(z^{n'}_{,j} \Gamma^{r'}_{m'n'} + \frac{\partial z^{r'}_{,j}}{\partial z^{m'}} \right), \tag{6}$$

де

$$z^{s'}_{,k} x^{k}_{,r'} = \delta^{s'}_{r'}. \tag{7}$$

Після підстановки (5), (6) в (4) отримаємо формулу для подання компонент тензора деформацій в місцевій системі координат через компоненти переміщень в базисній [4]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(u_{k',i} z^{k'}_{,j} + u_{k',j} z^{k'}_{,i}\right) - u_{k'} z^{m'}_{,i} z^{n'}_{,j} \Gamma^{k'}_{m'n'}. \tag{8}$$

Опис призматичних тіл та тіл обертання із змінними геометричними та фізико-механічними параметрами найбільш природно проводити в ортогональній циліндричній:

$$g_{1'1'} = g_{2'2'} = 1,\ g_{3'3'} = \left(Z^{2'}\right)^2,\ \Gamma^{2'}_{3'3'} = -Z^{2'},\ \Gamma^{3'}_{3'2'} = \Gamma^{3'}_{2'3'} = \frac{1}{Z^{2'}} \tag{9}$$

та декартовій системах координат:

$$g_{1'1'} = g_{2'2'} = g_{3'3'} = 1,\ \Gamma^{k'}_{l'm'} = 0. \tag{10}$$

В цьому випадку компоненти метричного тензора в місцевій системі координат подаються через компоненти в базисній по формулі:

$$g_{ij} = z^{1'}_{,i} z^{1'}_{,j} + z^{2'}_{,i} z^{2'}_{,j} + z^{3'}_{,i} z^{3'}_{,j} g_{3'3'}. \tag{11}$$

Зв’язок між переміщеннями і деформаціями (8) можна записати у вигляді:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(u_{k',i} z^{k'}_{,j} + u_{k',j} z^{k'}_{,i}\right) - u_{2'} z^{3'}_{,i} z^{3'}_{,j} \Gamma^{2'}_{3'3'} - u_{3'} z^{2'}_{,i} z^{3'}_{,j} \Gamma^{3'}_{2'3'} - u_{3'} z^{3'}_{,i} z^{2'}_{,j} \Gamma^{3'}_{3'2'}. \tag{12}$$

Для неоднорідних кругових тіл обертання та призматичних прямолінійних тіл із змінною площею поперечного перерізу геометричні рівняння (12) значно спрощуються. В силу збіжності x^3 і $Z^{3'}$, та ортогональності їх до площини поперечного перерізу в циліндричній системі координат ($0 \le x^3 \le 2\pi$):

$$z^{3'}_{,\alpha} = z^{\alpha'}_{,3} = 0,\ z^{3'}_{,3} = 1 \tag{13}$$

в декартовій ($0 \le x^3 \le 2$):

$$z^{3'}_{,\alpha} = z^{\alpha'}_{,3} = 0,\ z^{3'}_{,3} = L/2. \tag{14}$$

Враховуючи (13) і (14), співвідношення (12) в ортогональній циліндричній системі координат:

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\left(z^{\gamma'}_{,\alpha} u_{\gamma',\beta} + z^{\gamma'}_{,\beta} u_{\gamma',\alpha}\right),\ \varepsilon_{\alpha 3} = \frac{1}{2}\left(u_{3',\alpha} + z^{\gamma'}_{,\alpha} u_{\gamma',3} - \frac{2 z^{2'}_{,\alpha} u_{3'}}{Z^{2'}}\right), \varepsilon_{33} = u_{3',3} + Z^{2'} u_{2'}, \tag{15}$$

в декартовій:

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\left(z^{\gamma'}_{,\alpha} u_{\gamma',\beta} + z^{\gamma'}_{,\beta} u_{\gamma',\alpha}\right),\ \varepsilon_{\alpha 3} = \frac{1}{2}\left(a u_{3',\alpha} + z^{\gamma'}_{,\alpha} u_{\gamma',3}\right),\ \varepsilon_{33} = a u_{3',3}. \tag{16}$$

Компоненти тензора напружень подаються в місцевій системі координат на основі узагальненого закону Гука [4]:

$$\sigma^{ij} = d^{ijkl} \varepsilon_{kl}. \tag{17}$$

В ізотропному тілі компоненти тензора пружних сталих d^{ijkl} пов'язані з коефіцієнтами Ляме λ і μ співвідношеннями [6]:

$$d^{ijkl} = \lambda g^{ij} g^{kl} + \mu\left(g^{jl} g^{ik} + g^{il} g^{jk}\right), \tag{18}$$

де $\lambda = \dfrac{E\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}$, $\mu = \dfrac{E}{2(1+\nu)}$, $E = E(Z^{i'})$, $\nu = \nu(Z^{i'})$ - значення модуля пружності і коефіцієнта Пуасона в точці тіла, що розглядається.

2. Модель нелінійної пружно-пластичної грунтової середи. Ґрунтова основа являє собою нелінійне середовище, приріст деформації якого складається з пружної і пластичної складових:

$$d\varepsilon = d\varepsilon^{e} + d\varepsilon^{p}. \tag{19}$$

В такому випадку приріст напружень $d\sigma$ буде пов'язаним з приростом деформацій $d\varepsilon^e$ наступним співвідношенням:

$$d\sigma = Cd\varepsilon^e, \tag{20}$$

де C - тензор пружних констант, компоненти якого визначаються за формулою:

$$C^{ijkl} = \frac{E}{1+\nu}\left[\frac{\nu}{1-\nu}q^{ij}q^{kl} + 0{,}5(q^{ik}q^{jl} + q^{il}q^{jk})\right], \tag{21}$$

де E- модуль пружного середовища, ν - коефіцієнт Пуасона, q^{ij} - компоненти метричного тензора.

В свою чергу приріст пластичних деформацій $d\varepsilon^p$ визначають використовуючи неасоційований закон пластичної течії:

$$d\varepsilon^p = d\lambda\frac{\partial F}{\partial\sigma}, \tag{22}$$

де F – функція пластичного потенціалу, $d\lambda$ - малий скалярний множник, який визначає абсолютну величину $d\varepsilon^p$.

Таким чином, функція пластичного потенціалу визначає лише напрямок вектору, відповідного тензору $d\varepsilon^p$, в просторі головних деформацій, тож для F достатньо прийняти умову, що визначає необхідну орієнтацію $d\varepsilon^p$ замість конкретного виразу. В дилатансійній теорії для цього використується співвідношення:

$$d\underset{ш}{\varepsilon}^p = \lambda(x)d\gamma^p. \tag{23}$$

Тут $d\gamma^p$ і $d\underset{ш}{\varepsilon}^p$ - відповідно другий інваріант девіатора і перший інваріант тензора приросту пластичних деформацій $d\varepsilon^p$, λ - коефіцієнт(швидкість) дилатансії, x - параметр зміцнення.

В якості критерію граничного стану використовується модифікована умова Мізеса-Шлейхера-Боткіна:

$$\begin{aligned} f &= T + \underset{m}{\sigma}\tan\psi - \tau_s \quad \text{при} \quad \underset{m}{\sigma} \le p_o, \\ f &= T + p_o\tan\psi - \tau_s \quad \text{при} \quad \underset{m}{\sigma} > p_o,, \end{aligned} \tag{24}$$

де $\underset{m}{\sigma}$ середній (гідростатичний) тиск:

$$\underset{m}{\sigma} = \frac{1}{3}\sigma^{ij}q_{ij}, \tag{25}$$

T – інтенсивність дотичних напружень:

$$T = \sqrt{\frac{1}{2}S^{ij}S_{ij}}, \; S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\underset{m}{\sigma}q_{ij}, \tag{26}$$

ψ - кут тертя, $H = \dfrac{\tau_s}{\tan\psi}$ - граничний опір всебічному розтягу, p_o - параметр ґрунтового середовища. Умові (24) в просторі головних напружень відповідає комбінована гранична поверхня, яка представляє собою поєднання конуса і циліндра (рис. 2).

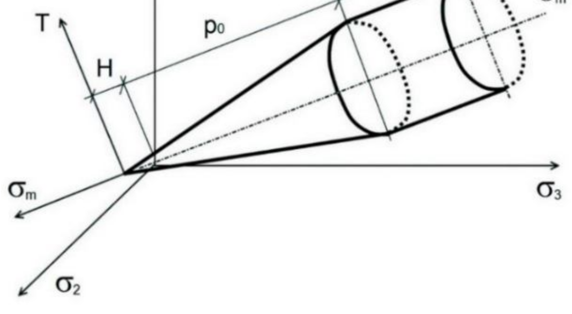

Рис. 2. Поверхня навантаження в просторі головних напружень

При великому значенні всебічного обтискання ґрунти набувають поведінки подібної до суцільного тіла, через що навіть при значних зсувних деформаціях не вдається досягнути розпушування, тобто дилатансія не проявляється, а зсувне навантаження не залежать від рівня обтискання. Такому випадку відповідає умова пластичної стисливості ґрунту $(d\underset{ш}{\varepsilon}^p = 0)$ і незалежного граничного зсувного навантаження від рівня всебічного тиску. Величина параметру p_o переходу конічної частини в циліндричну прийнята рівною $p_o = -2$ МПа у відповідності з експериментальними даними Сидорова та Сипідина [8].

Вирази τ_s і $\tan\psi$ як функції від нормованих параметрів: зчеплення - c і кута внутрішнього тертя - φ, мають вигляд:

$$\tau_s = \frac{6\sqrt{3}C\cos\varphi}{9-\sin^2\varphi},\ \tan\psi = \frac{6\sqrt{3}\sin\varphi}{9-\sin^2\varphi}. \tag{27}$$

У відповідності до [7], характер функції пластичного потенціалу, що відповідає дилатансійній моделі, залежить від знаку коефіцієнту дилатансії λ і представляється виразом:

$$F = T^2 - \lambda\tan\psi(\underset{m}{\sigma}+H)^2. \tag{28}$$

При $\lambda < 0$ поверхня, що відповідає функції F, має вигляд дуги еліпса, при $\lambda = 0$ – відрізку прямої, при $\lambda > 0$ – дуги гіперболи.

Для визначення коефіцієнта дилатансії використовується наступна формула:

$$\lambda = -\sqrt{1-(\rho/\rho^{кр})^2} \text{ при } \rho < \rho^{кр},\ \lambda = \sqrt{1-(\rho/\rho^{кр})^2} \text{ при } \rho > \rho^{кр}, \tag{29}$$

де ρ - поточна щільність, $\rho^{кр}$ - критична щільність при даному гідростатичному тиску $\rho^{кр} = \rho^{кр}(\underset{m}{\sigma})$. Кут внутрішнього тертя також змінний і визначається за формулою:

$$\varphi = \varphi_0 + \arcsin\lambda, \tag{30}$$

де φ_0 - кут внутрішнього тертя ґрунту при досягненні в ньому критичної щільності.

Змінна величина кута внутрішнього тертя φ визначає характер зміцнення дилатансійної пружно-пластичної моделі, при цьому поверхні навантажень являють собою сімейство прямих ліній на площині $\left(\underset{m}{\sigma},T\right)$ (рис. 3).

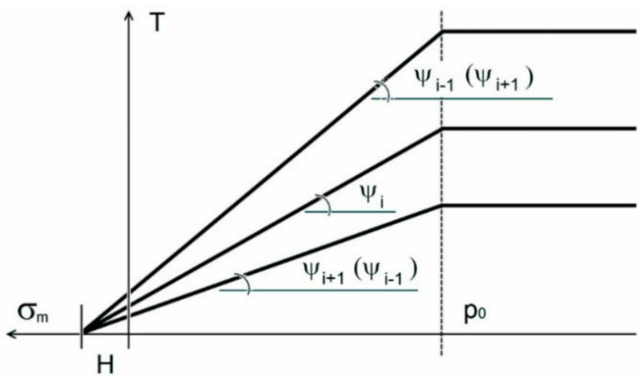

Рис. 3. Меридіональні перерізи поверхні навантажень

При викладенні поняття критичної щільності треба вказати на необхідність врахування її залежності від рівня гідростатичного тиску. При малих тисках суттєвої зміни критичної щільності не відбувається, проте при досягненні $\underset{m}{\sigma}$ порядку 1÷2 МПа вона може значно збільшуватися, а при $\underset{m}{\sigma} > 2$ МПа досягти дилатансійного розпушування майже не вдається. Для опису даного явища в [5] введена залежність критичної щільності від гідростатичного тиску у вигляді:

$$\rho_{кр} = \rho_{кр}^o \text{ при } \underset{m}{\sigma} > 0,$$
$$\rho_{кр} = -\frac{2\rho_{кр}^m - \rho_{кр}^o}{P_o^3}\underset{m}{\sigma}^3 + \frac{3(\rho_{кр}^m - \rho_{кр}^o)}{P_o^2} + \rho_{кр}^o \text{ при } p_o \le \underset{m}{\sigma} \le 0, \tag{31}$$
$$\rho_{кр} = \rho_{кр}^m \text{, при } \underset{m}{\sigma} < p_o,$$

де $\rho_{кр}^o$ - критична щільність при відсутності гідростатичного тиску, $\rho_{кр}^m$ - максимальна щільність даного ґрунту, параметр ґрунтового середовища прийнятий p_o =-2 МПа. Графічне представлення (31) наведено на рис. 4.

ISSN 2410-2547
Опір матеріалів і теорія споруд/Strength of Materials and Theory of Structures. 2024. № 112

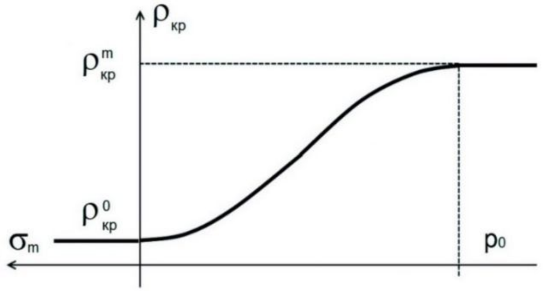

Рис. 4. Залежність критичної щільності від гідростатичного тиску

Введення визначення (31) в дилатансійну модель дає змогу моделювати для одного і того ж елементарного об’єму ґрунту дилатансію обох знаків, тоді як в вихідній моделі цей об’єм при зсуві може або ущільнюватися (при $\rho < \rho_{кр}$), або розрихлюватися (при $\rho > \rho_{кр}$).

В практиці проектування для проведення інженерних розрахунків дуже часто використовується найпростіша ґрунтова модель Кулона-Мора. Модель є логічним продовженням лінійно-пружньої моделі та заснована на законі Гука та умові міцності Кулона. Незважаючи на недоліки моделі (ігнорування нелінійних залежностей між деформаціями та напруженнями, незмінний модуль деформації) вона має ряд суттєвих переваг (традиційні параметри, визначення яких чітко регламентовано нормами) та продовжує цікавити вітчизняних та закордонних вчених. Надбаннями сучасної механіки ґрунтів є достатньо велика кількість математичних моделей ґрунту: Hardening Soil Model та її похідні (HardeningSoilSmall-strain), Soft Soil та її похідні, Cam-Clay, які враховують зміцнення ґрунту при збільшенні рівня напружень [11]. Найбільші проблеми при використанні моделі виникають через велику кількість параметрів, визначення яких не регламентовано нормами.

В даній роботі пропонується використання підходу [9], який дозволяє поряд із врахуванням зон фізично нелінійної роботи матеріалу основи у відповідності до гіпотез і співвідношень теорії нелінійного деформування малопов'язаних ґрунтів, моделювати зміцнення грунтової основи при узгодженні її параметрів із чинними будівельними нормами.

3. Вибір методу розв'язання задачі динаміки та особливості його реалізації. В процесі експлуатації, споруди та обладнання зазнають впливу різноманітних динамічних навантажень. Для опису процесів динамічного деформування конструкцій використовується рівняння, що є наслідком варіаційного принципу Гамільтона [6], покомпонентна форма якого має вигляд:

$$\delta T + \delta W - \delta A = 0. \tag{32}$$

Тут $\delta W = \int\limits_V \tilde{\sigma}^{ij} \delta\tilde{\varepsilon}_{ij} dV$ - варіація потенційної енергії деформації записана в термінах фізичних компонент тензорів напружень та деформацій [4]:

$$\tilde{\varepsilon}_{ij} = \varepsilon_{ij} \Big/ \sqrt{g_{(ii)} g_{(jj)}}\,, \ \tilde{\sigma}^{ij} = \sigma^{ij} \sqrt{g_{(ii)} g_{(jj)}}\,,$$
$$\tilde{\sigma}^{ij} = \tilde{d}^{ijkl} \tilde{\varepsilon}_{kl}\,, \ \tilde{d}^{ijkl} = d^{ijkl} \sqrt{g_{(ii)} g_{(jj)} g_{(kk)} g_{(ll)}}\,, \tag{33}$$

$\delta A = \int\limits_V f^{i'} \delta u_{i'} dV + \int\limits_S p^{i'} \delta u_{i'} dS$ - варіація роботи внутрішніх та зовнішніх сил, δT - варіація кінетичної енергії:

$$\delta T = -\int\limits_{x^1}\int\limits_{x^2}\int\limits_{x^3} \rho \ddot{u}^{k'} \delta u_{k'} \sqrt{g}\, dx^1 dx^2 dx^3. \tag{34}$$

Однозначність розв’язання (32) забезпечується запровадженням відповідних початкових і граничних умов. Початкові умови становить відомий розподіл переміщень та швидкостей в тілі у деякий фіксований момент часу t_0:

$$u(Z^{i'}, t_0) = u_0(Z^{i'})\,, \ \dot{u}(Z^{i'}, t_0) = \dot{u}_0(Z^{i'})\,, \ Z^{i'} \in V. \tag{35}$$

Припускається, що на частині поверхні S_u задані кінематичні граничні умови:

$$u(Z^{i'}, t) = \tilde{u}(Z^{i'}, t)\,, \ Z^{i'} \in S_u\,, \tag{36}$$

а на поверхні S_p з нормаллю $\vec{n} = n_j e^j$ - довільно орієнтована у просторі та у часі система навантажень:

$$z^{k'}_{,i} \sigma^{ij} n_j = \tilde{p}\left(Z^{k'}, t\right),\ Z^{k'} \in S_p. \tag{37}$$

Математично, опис зазначених процесів може бути представлено у вигляді модифікацій формул для визначення варіації кінетичної енергії (34), що визначаються параметрами навантаження, а саме законом його зміни, рівнем інтенсивності, швидкістю зростання та тривалістю.

Навантаження та коливання, які можуть бути представлені у часі у вигляді функцій синуса чи косинуса, називають періодичними коливаннями просторових тіл.

$$f^{j'} = \sum_{r=1}^{R} f_r^{j'} \sin \omega_r t\ ,\ p^{j'} = \sum_{r=1}^{R} p_r^{j'} \sin \omega_r t\ ,\ \omega_r = \frac{r\pi}{T}, \tag{38}$$

де T - період дії навантаження; R - число гармонік, необхідне для опису розподілу навантаження в інтервалі $[t_0, t_1]$.

Як наслідок, реакція системи також повинна задовольняти періодичному закону, аналогічному (38):

$$u_{i'} = \sum_{s=1}^{S} u_{i'}^{s} \sin \omega_s t \ => \tilde{\varepsilon}_{ij} = \sum_{s=1}^{S} \tilde{\varepsilon}_{ij}^{s} \sin \omega_s t \ => \tilde{\sigma}^{ij} = \sum_{s=1}^{S} \tilde{\sigma}^{ij,s} \sin \omega_s t. \tag{39}$$

У випадку лінійних коливань, рішення просторової задачі динаміки може бути представлено у вигляді суми незалежних квазістатичних періодичних рішень для кожної гармоніки в розкладі заданих і невідомих функцій по часовій координаті з урахуванням інерційних сил:

$$\delta T = -\omega_p^2 \int_{x^1} \int_{x^2} \int_{x^3} \rho u_p^{i'} \delta u_{i'}^{p} \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3. \tag{40}$$

Представлення грунтової основи із використанням моделей пружного середовища також задовольняє описаному підходу і може бути розповсюджене на навантаження з різними функціями часу. В деяких випадках подібні припущення та спрощення дають достатньо точні результати.

Зміна зон контактної взаємодії або поява та розповсюдження областей пружно-пластичних деформацій змінюють властивості досліджуваного об’єкта, що в свою чергу потребує перегляду встановлених інтегральних характеристик конструкції, тобто циклічного вирішення початкових задач.

Найбільш загальним підходом, що охоплює всі особливості нелінійної поведінки деформівної системи, включаючи і фізичну і конструктивну нелінійності, є формулювання варіації кінетичної енергії у вигляді (34) із введенням додаткових гіпотез, щодо закону зміни прискорення точок елементарного об’єму тіла $\ddot{u}^{k'}(t)$ у часі.

Висновки

Для ефективного пошуку рішення задач динаміки, на сьогоднішній день, потрібно володіти всім набором засобів аналізу, чітко представляти правила і границі їх застосування. Уміння правильно оцінити інженерно-геологічні умови майданчика будівництва, властивості ґрунтів, спільну роботу цих ґрунтів із фундаментами і конструкціями споруди завжди було і залишається основою надійного та ефективного інженерного проєктування. Подальше удосконалення конструктивних рішень багато в чому залежить від повноти і достовірності інформації про особливості зміни напружено-деформованого стану,який залежить не тільки від поточних параметрів діючого навантаження, але і від зміни характеристик (фізичних чи геометричних) самого об’єкту спостереження.

Наведена постановка задачі є теоретичним базисом для побудови чисельних підходів до дослідження процесів вібраційних коливань неоднорідних просторових тіл при їх контактній взаємодії із пружно-пластичним середовищем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Баженов В.А., Гуляр О.І., Пискунов С.О., Сахаров О.С.* Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах руйнування просторових тіл. – КНУБА, 2005. – 298 с.
2. *Баженов В.А., Гуляр А.И., Козак А.Л., Рутковский В.А., Сахаров А.С.* Численное моделирование разрушения железобетонных конструкций по методу конечных элементов. – Киев: Наукова думка, 1996. – 360 с.
3. *Баженов В.А., Гуляр О.І., Сахаров О.С., Солодей І.І.* Напіваналітичний метод скінченних елементів в задачах динаміки просторових тіл. – К., КНУБА, 2012. – 248 с.
4. *Блох В.И.* Теория упругости. - Харьков: Изд-во Харьк. ун-та.- 1964. –483с.
5. *Бойко И.П.* Прогрессивные методы проектирования оснований фундаментов на ЭВМ. – К.: Знание, 1986. - 20 с.
6. *Сахаров А.С., Кислоокий В.Н., Киричевский В.В. и др.* Метод конечных элементов в механике твердых тел.- Киев: Вища школа, 1982.- 479с.
7. *Николаевский В.Н.* Дилатансия и законы необратимого деформирования грунтов //Основания, фундаменты и механикагрунтов. – 1979. - № 5. - С. 29-32
8. *Сидоров Н.И., Спидин В.П.* Современные методы определения характеристик механических свойств грунтов. – Л., Стройиздат, 1972. - 136 с.
9. *Солодей І.І., Затилюк Г.А.* Дослідження достовірності та ефективності використання моделей зміцнюваного ґрунту в рамках метода скінченних елементів // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 109. – С. 30-37.
10. *Pyskunov S., Shkryl O., Maksimiuk Y.* Determination of crack resistance of a tank with a semi-elliptic crack // Strength of Materials and Theory of Structures – 2021. – Vol. 106 . – P. 14-21.
11. *Solodei I.I., PetrenkoE.Yu., ZatyliukGh.A.* The stress-strain state investigation of undergroundstructures on the basis of soil models with adjusted input parameters // Strength of Materialsand Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv:KNUBA, 2019. – Issue103.– P. 63-70.
12. *Solodei I.I., Vabishchevich M.O., Stryhun R.L.* Semianalytical finite elements method efficiency in the geometrically nonlinear elastic-plastic problems // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technicalcollectedarticles – Kyiv: KNUBA, 2019. – Issue 103. – P. 71-81.

REFERENCES

1. *Bazhenov V.A, Hulyar O.I., Pyskunov S.O., Sakharov O.S.* Napivanalitychnyi metod skinchenykh elementiv v zadachakh ruinuvannia prostorovykh til (Semi-analytical method of finite elements in problems of destruction of 3D bodies). – KNUCA, 2005. – 298 p.
2. *Bazhenov V.A, Hulyar O.I., Kozak O.L., Rutkovskii V.O., Sakharov O.S.* Chislennoe modelirovanie razrusheniya zhelezobetonnyih konstruktsiy po metodu konechnyih elementov (Numerical modeling of the reinforced concrete structures destruction using the finite element method). – Kyiv: Naukova dumka, 1996. – 360 p.
3. *Bazhenov V.A, Hulyar O.I., Sakharov O.S., Solodei I.I.* Napivanalitychnyi metod skinchennykh elementiv v zadachakh dynamiky prostorovykh til (Semi-analytical method of finite elements in problems of dynamics of 3D bodies). – K., KNUCA, 2012. – 248 p.
4. *Blokh V.I.* Teoria upruhosti (Elasticity theory). - Kharkiv: KHUni- 1964. –483p.
5. *Boyko I.P.* Progressivnyie metody proektirovaniya osnovaniy fundamentov na EVM (Progressive methods for designing foundations on a computer). – K.: Znanie, 1986. - 20 p.
6. *Sakharov O.S., Kyslookii V.M., Kyrychevskii V.V.* Metod konechnyih elementov v mehanike tverdyih tel (Finite element method in solid mechanics). - Kyiv: Vyscha schkola, 1982.- 479 p.
7. *Nikolaevskii V.M.* Dilatansiya i zakony neobratimogo deformirovaniya gruntov (Dilatancy and the laws of irreversible deformation of soils) // Foundations and soil mechanics. – 1979. - № 5. - P. 29-32
8. *Sydorov V.I., Spidin V.P.* Sovremennyie metodyi opredeleniya harakteristik mehanicheskih svoystv gruntov (Modern methods for determining the characteristics of the soils mechanical properties). – L., Stroyizdat, 1972. - 136 p.
9. *Solodei I.I., Zatyliuk Gh.A.* Doslidzhennia dostovirnosti ta efektyvnosti vykorystannia modelei zmitsniuvanoho gruntu v ramkakh metoda skinchennykh elementiv (Investigation of the reliability an deffectiveness of the hardening soil models use in range of the finite element method) // Strength of Materials and Theory of Structures – K.: KNUCA, 2022. – Issue 109. – P. 30-37.
10. *Pyskunov S., Shkryl O., Maksimiuk Y.* Determination of crack resistance of a tank with a semi-elliptic crack // Strength of Materials and Theory of Structures – 2021. – Vol. 106 . – P. 14-21.
11. *Solodei I.I., PetrenkoE.Yu., ZatyliukGh.A.* The stress-strain state investigation of undergroundstructures on the basis of soil models with adjusted input parameters // Strength of Materialsand Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv:KNUBA, 2019. – Issue103.– P. 63-70.
12. *Solodei I.I., Vabishchevich M.O., Stryhun R.L.* Semianalytical finite elements method efficiency in the geometrically nonlinear elastic-plastic problems // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technicalcollectedarticles – Kyiv: KNUBA, 2019. – Issue 103. – P. 71-81.

Стаття надійшла 03.04.2024

Солодей І.І., Рувін О.Г., Колякова В.М., Куліков О.П.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ВЗАЄМОДІЇ СПОРУДИ І ГРУНТОВОГО ПЛАСТИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА В УМОВАХ ДИНАМІЧНИХ ЕВОЛЮЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

Одним із важливих чинників, що впливає на проєктні рішення при зведенні будівель і споруд є динамічні впливи. У випадку динамічного аналізу, діапазон можливих варіацій відгуку конструкції визначити дуже складно. Складність визначається не тільки параметрами самого навантаження (інтенсивність, закон зміни у часі), але і характеристиками об'єкту дослідження (їх значеннями та зміною у часі), що представляє собою взаємопов'язану систему споруди та грунтової основи. До динамічних факторів впливу можна віднести періодичні вібраційні або ударні навантаження, дії вибухів, що викликають різку зміну тиску на конструкції споруди, сейсмічні коливання і т. і. В багатьох випадках навантаження є результатом хвиль напружень, що розповсюджуються у грунтовій основі. Ці фактори можуть діяти на природне середовище довготривало, порівняно недовго, короткочасно і миттєво. Тому розробка уточнених підходів оцінки напружено-деформованого стану конструкцій при взаємодії споруди і грунтового середовища в умовах динамічних еволюційних процесів залишається актуальною задачею сьогодення.

Для ефективного пошуку рішення задач динаміки, на сьогоднішній день, потрібно володіти всім набором засобів аналізу, чітко представляти правила і границі їх застосування. Уміння правильно оцінити інженерно-геологічні умови майданчика будівництва, властивості ґрунтів, спільну роботу цих ґрунтів із фундаментами і конструкціями споруди завжди було і залишається основою надійного та ефективного інженерного проєктування.

Наведена постановка задачі є теоретичним базисом для побудови чисельних підходів до дослідження процесів вібраційних коливань неоднорідних просторових тіл при їх контактній взаємодії із пружно-пластичним середовищем. В роботі розглянуті аспекти моделювання взаємодії споруди і грунтового пружно-пластичного середовища в умовах динамічних еволюційних процесів. Наведено основні геометричні та фізичні співвідношення теорії пружності для неоднорідних кругових та призматичних просторових тіл. В рамках розв'язання задачі динаміки розглянуто особливості реалізації математичної моделі, щодо представлення варіації кінетичної енергії як частини рівнянь динамічної рівноваги лінійної та нелінійної механічних систем.

Ключові слова: споруда, модель грунтової основи, пружнопластичне нелінійне середовище, неоднорідні кругові та призматичні просторові тіла, динамічне навантаження.

Solodei I.I., Ruvin O.H., Koliakova V.M., Kulikov O.P.

THE PROBLEM OF THE STRUCTURE AND THE SOIL PLASTIC ENVIRONMENT INTERACTION IN THE CONDITIONS OF DYNAMIC EVOLUTIONARY PROCESSES

Dynamic influences are one of the important factors affecting project decisions during the construction of buildings and structures. In the case of dynamic analysis, the range of possible variations in structural response is very difficult to determine. The complexity is determined not only by the parameters of the load itself (intensity, the law of change over time), but also by the characteristics of the research object (their values and change over time), which is an interconnected system of the structure and the soil base. Dynamic factors of influence can include periodic vibration or shock loads, the effects of explosions that cause a sharp change in pressure on the structure of the building, seismic fluctuations, etc. In many cases, the load is the result of stress waves propagating in the soil base. These factors can act on the natural environment long-term, relatively short-term, short-term and instantaneous. Therefore, the development of refined approaches for assessing the stress-strain state of structures during the interaction of the structure and the soil environment under the conditions of dynamic evolutionary processes remains an actual task today.

In order to effectively find a solution to the dynamics problems, it is necessary to possess the entire set of analysis tools, to clearly present the rules and limits of their application. The ability to correctly assess the engineering and geological conditions of the construction site, the properties of the soils, the joint work of these soils with the foundations and structures of the building has always been and remains the basis of reliable and effective engineering design.

The given statement of the problem is a theoretical basis to build the numerical approaches to the study of the vibrational processes of heterogeneous spatial bodies during their contact interaction with an elastic-plastic medium. The paper considers the modeling aspects of the structure and the soil elastic-plastic environment interaction under the conditions of dynamic evolutionary processes. The basic geometric and physical equations of the elasticity theory for heterogeneous circular and prismatic spatial bodies are given. In the range of solving the dynamics problem, the peculiarities of the mathematical model implementation, regarding the representation of the variation of kinetic energy as part of the equations of dynamic equilibrium of linear and nonlinear mechanical systems, are considered.

Key words: structure, model of the soil base, elastic-plastic nonlinear environment, non-homogeneous circular and prismatic spatial bodies, dynamic loads.

УДК 624.131.7

Солодей І.І., Рувін О.Г., Колякова В.М., Куліков О.П. **Постановка задачі взаємодії споруди і грунтового пластичного середовища в умовах динамічних еволюційних процесів** // Опір матеріалів і споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. 2024. – Вип. 112. – С. 83-92.

В роботі розглянуті аспекти моделювання взаємодії споруди і грунтового пружно-пластичного середовища в умовах динамічних еволюційних процесів. Наведено основні геометричні та фізичні співвідношення теорії пружності для неоднорідних кругових та призматичних просторових тіл. В рамках розв'язання задачі динаміки розглянуто особливості реалізації математичної моделі, щодо представлення варіації кінетичної енергії як частини рівнянь динамічної рівноваги лінійної та нелінійної механічних систем.

Іл. 4. Бібліогр. 12 назв.

UDC 624.131.7
Solodei I.I., Ruvin O.H., Koliakova V.M., Kulikov O.P. **The problem of the structure and the soil plastic environment interaction in the conditions of dynamic evolutionary processes** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. 2024. – Issue 112. – P. 83-92.
The paper considers the modeling aspects of the structure and the soil elastic-plastic environment interaction under the conditions of dynamic evolutionary processes. The basic geometric and physical equations of the elasticity theory for heterogeneous circular and prismatic spatial bodies are given. In the range of solving the dynamics problem, the peculiarities of the mathematical model implementation, regarding the representation of the variation of kinetic energy as part of the equations of dynamic equilibrium of linear and nonlinear mechanical systems, are considered.

Fig. 4. Ref. 12.

Автор: доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельної механіки СОЛОДЕЙ Іван Іванович
Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури
Робочий тел.: +38 (044) 241-55-55
Мобільний тел.: +38 (050)357-44-90
E-mail: solodei.ii@knuba.edu.ua
ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-7638-3085

Автор: доктор юридичних наук, старший дослідник РУВІН Олександр Григорович
Адреса робоча: 03057 Україна, м. Київ, вул.Сім'ї Бродських 6, Київський науково-дослідний інститут судових експертиз.
Мобільний тел.: (044) 200-29-11, +38 (096) 777-77-79
E-mail: ruvin@kndise.gov.ua
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0162-4686

Автор: кандидат технічних наук, доцент кафедри залізобетонних та кам’яних конструкцій КОЛЯКОВА Віра Маркусівна
Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури
Мобільний тел.: +38 (067) 509-06-05
E-mail: koliakova.vm@knuba.edu.ua
ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-6879-8520

Автор: аспірант кафедри будівельної механіки КУЛІКОВ Олександр Петрович
Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури
Мобільний тел.: +38 (066) 108-91-99
Email: kulikov_op-2023@knuba.edu.ua
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0003-2614-7318