

Тут знак мінус ідентифікує першу трубу, знак плюс – другу.
Після різницевої дискретизації умови (22) набирають форми

$$u_{l-} = u_{l+}; \quad (\lambda + 2G) \frac{u_{l,M} - u_{l,M-1}}{\Delta r} + \frac{\lambda}{r} u_{l,M} = (\lambda + 2G) \frac{u_{l,M+1} - u_{l,M}}{\Delta r} + \frac{\lambda}{r_2} u_{l,M}. \quad (23)$$

До граничних умов (20), (21), (23) додаються початкові умови. Прийемо, що у початковий момент часу при $t = 0$ елементи труб нерухомі і не мають початкових зміщень. Тоді $u(0) = 0$, $\partial u(0)/\partial t = 0$ або у дискретній формі

$$u_{r,0} = 0, \quad u_{r,N} - u_{r,-\Delta t} = 0. \quad (24)$$

Система рівнянь динаміки (17) разом з граничними умовами (20), (21), (23) і початковими умовами (24) повністю визначає динамічний процес, що розглядається у двохшаровій трубчастій конструкції під дією динамічного навантаження $P_n(t)$ заданого типу. Розв'язання цієї системи здійснюється з допомогою персональних комп'ютерів.

1. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. – М.: Госстройиздат, 1965. – 448 с.

2. Седов Л. И. Механика сплошной среды. – Т. 1, Т. 2. – М.: Наука, 1973. – 536 с., 584 с.

3. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович Г. П. и др. Физика взрыва. – М.: Наука, 1973. – 703 с.

4. Бате К., Висон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.

УДК 624.131.23.

ОБГРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПОЛОЖЕНЬ МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСОЛІДАЦІЇ ВОДОНАСИЧЕНОГО ГРУНТУ ПРИ ДІЇ ВИБУХУ В НЬОМУ

*П. П. Бондар, канд. техн. наук (ТОВ "Ірша-Граніт"),
А. І. Лучко, студ. (НТУУ "КПІ")*

Обоснован метод моделирования послевзрывной консолидации водонасыщенных грунтов, заключающийся в изготовлении геометрически подобной модели из грунтов натуры, помещении ее в герметическую камеру и нагружении избыточным давлением воздуха, определяемым из соотношений подобия. Максимальная погрешность метода не превышает 20 %, что является вполне приемлемым при исследовании такого сложного явления.

Із аналізу праць [1–3] та ряду інших джерел випливає, що розв'язання проблеми післявибухової консолидації водонасичених ґрунтів можливе тільки

при тісному поєднанні теоретичних та експериментальних досліджень. У праці [4] запропоновано стенд для експериментального дослідження методом фізичного моделювання післявибухової консолідації шару водонасиченого торф'яного ґрунту. Викладемо обґрунтування основних положень методики цих досліджень. При цьому зауважимо, що максимальну подібність між натурою та моделлю для даного процесу можна забезпечити методом відцентрового моделювання, однак в даному випадку він є неприйнятним через складність, громіздкість і дуже велику вартість обладнання. Застосування еквівалентних матеріалів суттєво обмежується основними особливостями торфів, які притаманні всім слабким ґрунтам [5]. Метод фотопружності застосовується, як правило, при моделюванні динамічних процесів у скельних ґрунтах. Не можна застосувати також метод структурних моделей, оскільки елементи цих моделей повинні виготовлятися з матеріалів-еквівалентів із дотриманням подібності механічних властивостей порід.

Із загальних правил моделювання випливає, що умовами геометричної подібності моделі та природи є співвідношення:

$$h_{0м} = h_{0н} m_l^{-1}; \quad (1)$$

$$h_{тм} = h_{тн} m_l^{-1}; \quad (2)$$

$$z_m = z_n m_l^{-1}, \quad (3)$$

де h_0 – потужність шару насипного ґрунту; h_t – початкова потужність торф'яного шару; z – вертикальна координата; $m_l = h_{0н}/h_{0м} = h_{тн}/h_{тм} = z_n/z_m$ – геометричний масштаб моделювання, індекси “м” та “н” відносяться відповідно до моделі та природи.

У кожній геометрично подібній точці торф'яного шару величина пружної деформації визначається діючим тиском $P(z, t)$, модулем пружності торфу E_n та його коефіцієнтом Пуассона μ . З цих трьох параметрів можна одержати два безрозмірні: $E_n/P(z, t)$ і μ . Отже, для дотримання подібності моделі та природи необхідно виконати умови

$$\left(\frac{E_n}{P(z, t)} \right)_m = \left(\frac{E_n}{P(z, t)} \right)_n; \quad (4)$$

$$\mu_m = \mu_n. \quad (5)$$

Із співвідношення (4) випливає, що для забезпечення подібності при використанні в моделі тих же ґрунтів, що й у природі, необхідно дотримуватися рівності гідростатичного тиску $P_m(z) = P_n(z)$. У першому наближенні в природі в точці з координатою z_n тиск

$$P_n(z) = P_a + \gamma_0 h_{0н} + \gamma_t z_n, \quad (6)$$

де γ_0 – об'ємна вага насипного ґрунту; γ_t – об'ємна вага торф'яного ґрунту; P_a –

атмосферний тиск.

Аналогічно в моделі

$$P_m(z) = P_a + \gamma_0 h_{0m} + \gamma_T z_m. \quad (7)$$

Очевидно, що для забезпечення рівності $P_m(z) = P_n(z)$ при $m_1 > 1$ необхідно відповідно збільшити γ_{0m} і γ_{Tm} порівняно з γ_0 і γ_T .

У праці [6] рекомендується в таких випадках поміщати модель у герметичну камеру, де створюється надлишковий тиск повітря.

З урахуванням надлишкового тиску повітря в камері ΔP вираз для $P_m(z)$ приймає вигляд

$$P_m(z) = P_a + \Delta P + \gamma_0 h_{0m} + \gamma_T z_m. \quad (8)$$

Тоді з умови $P_m(z) = P_n(z)$, прирівнюючи (6) до (7) та використовуючи (1) і (3), отримуємо

$$\Delta P = (m_1 - 1) (\gamma_0 h_{0m} + \gamma_T z_m). \quad (9)$$

З виразу (9) випливає, що для подібності моделі та природи в будь-якій точці масиву потрібне своє значення ΔP . Тому створення над поверхнею моделі надлишкового тиску не забезпечує повної подібності між моделлю та природою. Застосувати цей метод можна з похибкою, яку визначимо з наступних міркувань.

Розрахунки виконуватимемо для моделі з такими параметрами: $\gamma_0 = 17000 \text{ Н/м}^3$; $\gamma_T = 10000 \text{ Н/м}^3$; $P_a = 10^5 \text{ Н/м}^2$; $h_{0m} = 0,2 \text{ м}$. Оцінимо відношення $P_m(z)/P_n(z)$, тобто ступінь невідповідності величин тиску в моделі та природі при усередненому значенні ΔP , наприклад, розрахованому за формулою (9) при $z_m = h_{1m}/2$:

$$\frac{P_m(z_m)}{P_n(z_m)} = \frac{1 + \frac{P_a + \Delta P}{\gamma_0 h_{0m}} + \frac{\gamma_T z_m}{\gamma_0 h_{0m}}}{\frac{P_a}{\gamma_0 h_{0m}} + \left(1 + \frac{\gamma_T z_m}{\gamma_0 h_{0m}}\right) m_1} \quad (10)$$

і за відсутності надлишкового тиску повітря над поверхнею моделі ($\Delta P = 0$).

Розрахунки показують, що створення над моделлю надлишкового тиску дозволяє забезпечити умови моделювання з похибкою, не більшою 20 %. А при $\Delta P = 0$ ця похибка досягає 50 %. Отже, створення над поверхнею моделі надлишкового тиску повітря ΔP дозволяє звести похибку до прийнятного рівня.

При розв'язанні поставлених задач слід моделювати не окремі стадії, а весь процес в цілому. У зв'язку з цим виділимо незалежні та залежні визначальні параметри (змінні) досліджуваного процесу. Незалежні змінні: початкова потужність торф'яного шару h_1 ; максимальна потужність насипу h_0 ; радіус заряду вибухової речовини (ВР) r_0 ; довжина заряду ВР l_0 ; об'ємна концентрація енергії ВР E ; коефіцієнт Пуассона для торфу μ ; модуль

пружності для торфу $E_{т1}$; коефіцієнт Пуассона для насипного ґрунту μ_0 ; модуль пружності для насипного ґрунту E_0 ; коефіцієнт фільтрації насипного ґрунту $k_{\Phi 0}$; початковий коефіцієнт фільтрації торфу $k_{\Phi т1}$; коефіцієнт фільтрації підстиляючого мінерального ґрунту k_{Φ} ; початковий модуль стиснення торфу $E_{0т}$; коефіцієнт фільтраційної стисливості торфу a_{Φ} ; щільність води ρ_w ; акустична жорсткість торфу $\rho_{т1} c_{т1}^2$ ($\rho_{т1}$ і $c_{т1}$ – щільність торфу і швидкість поширення в ньому пружних поздовжніх хвиль); коефіцієнт вторинної стисливості торфу $a_{т1}$; граничне напруження зсуву для торф'яного ґрунту τ_t ; зчеплення торфу c_0 ; максимальне навантаження від ваги насипу q_{\max} ; швидкість нарощування навантаження від ваги насипу \dot{q} ; час від моменту початку відсіпки насипу до стабілізації навантаження від ваги насипу t_0 ; час від моменту початку навантаження торф'яного шару до моменту підриву заряду ВР t_1 ; постійна сили тяжіння g ; атмосферний тиск P_a ; час t ; вертикальна координата z ; радіальна координата r . Залежні змінні: відносне осідання шару s/h_t ; нейтральний тиск у торфі (надлишковий поровий тиск) як функція просторових координат і часу $P_w(r, z, t)$. Безрозмірні незалежні визначальні змінні: тангенс кута внутрішнього тертя насипного ґрунту $\text{tg}\varphi_0$; показник адиабати продуктів детонації χ ; початкове значення коефіцієнта пористості торфу $e_{т1}$; мінімальне значення коефіцієнта пористості e_{\min} ; коефіцієнт, що характеризує зменшення водопроникності торфу при збільшенні його щільності α_{Φ} ; середнє за процес консолідації значення коефіцієнта пористості торф'яного ґрунту $e_{\text{ср}}$; максимально можлива відносна деформація λ_{\max} .

Згідно з π -теоремою [7] з 35 незалежних змінних, якщо є три незалежні розмірності, можна отримати 32 безрозмірні величини, що визначають процес ущільнення торф'яного шару. За змінні з незалежними розмірностями приймаємо величини: h_0 , g , τ_t . Тоді шукані функціональні залежності мають такий вигляд:

$$\frac{s}{h_t} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{32}); \quad (11)$$

$$\frac{P_w}{\tau_t} = \varphi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{32}), \quad (12)$$

$$\text{де } x_1 = \frac{h_t}{h_0}, \quad x_2 = \frac{r_0}{h_0}, \quad x_3 = \frac{l_0}{h_0}, \quad x_4 = \frac{E_w}{\tau_t}, \quad x_5 = \frac{E_{т1}}{\tau_t}, \quad x_6 = \frac{E_0}{\tau_t}, \quad x_7 = \frac{k_{\Phi 0}}{\sqrt{gh_0}},$$

$$x_8 = \frac{k_{\Phi т1}}{\sqrt{gh_0}}, \quad x_9 = \frac{k_{\Phi}}{\sqrt{gh_0}}, \quad x_{10} = \frac{E_{0т}}{\tau_t}, \quad x_{11} = \alpha_{\Phi} \tau_t, \quad x_{12} = \frac{\rho_w g h_0}{\tau_t}, \quad x_{13} = \frac{\rho_{т1} c_{т1}^2}{\tau_t}, \quad x_{14} = a_{т1} \tau_t,$$

$$x_{15} = \frac{c_0}{\tau_t}, \quad x_{16} = \frac{q_{\max}}{\tau_t}, \quad x_{17} = \frac{\dot{q} \sqrt{h_0/g}}{\tau_t}, \quad x_{18} = t_0 \sqrt{\frac{g}{h_0}}, \quad x_{19} = \frac{P_a}{\tau_t}, \quad x_{20} = t_1 \sqrt{\frac{g}{h_0}},$$

$$x_{21} = t \sqrt{\frac{g}{h_0}}, \quad x_{22} = \frac{r}{h_0}, \quad x_{23} = \frac{z}{h_0}, \quad x_{24} = \mu, \quad x_{25} = \mu_0, \quad x_{26} = \text{tg}\varphi_0, \quad x_{27} = \chi, \quad x_{28} = e_{т1}, \quad x_{29} =$$

$$e_{\min}, \quad x_{30} = e_{\text{ср}}, \quad x_{31} = \alpha_{\Phi}, \quad x_{32} = \lambda_{\max}.$$

Рівності між відповідними змінними моделі та природи в правих частинах рівнянь (11) і (12) являють собою співвідношення (критерії) подібності. У зв'язку з тим, що напруження $\rho_0 g h_0$, q_{\max} і P_a мають характер гідростатичних, об'єднаємо безрозмірні комплекси, що мають у своєму складі ці напруження, шляхом складання в один комплекс з урахуванням того, що $q_{\max} = \rho_0 g h_0$. Тоді співвідношення подібності матиме вигляд

$$\left(\frac{\rho_0 g h_0 + \rho_a g h_0 + P_a}{\tau_T} \right)_M = \left(\frac{\rho_0 g h_0 + \rho_a g h_0 + P_a}{\tau_T} \right)_n. \quad (13)$$

Із (13) з урахуванням того, що в моделі використовуються ґрунти природи, тобто $\tau_{TM} = \tau_{Tn}$, а також враховуючи надлишковий тиск повітря в камері, маємо рівність

$$(\rho_0 g h_0 + \rho_a g h_0 + P_a + \Delta P)_M = (\rho_0 g h_0 + \rho_a g h_0 + P_a)_n, \quad (14)$$

звідки

$$\Delta P_M = g (\rho_0 + \rho_a) (h_{0M} - h_{0n}). \quad (15)$$

Із (11) і (12) впливає також вираз для визначення коефіцієнтів фільтрації ґрунтів у моделі (при $g_M = g_n$):

$$k_{\Phi M} = k_{\Phi n} \sqrt{\frac{h_{0M}}{h_{0n}}}, \quad (16)$$

або для масштабу коефіцієнта фільтрації

$$m_{k\Phi} = m_l^{-\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

Крім того, масштаб часу

$$m_t = m_l. \quad (18)$$

З умови

$$\left(\frac{\dot{q}}{\tau_T} \sqrt{\frac{h_0}{g}} \right)_M = \left(\frac{\dot{q}}{\tau_T} \sqrt{\frac{h_0}{g}} \right)_n, \quad (19)$$

маємо:

$$m_{\dot{q}} = \frac{\dot{q}_n}{\dot{q}_M} = m_l^{-\frac{1}{2}}. \quad (20)$$

Оцінимо значення безрозмірних параметрів із (11) і (12) на основі даних про параметри фізико-механічного стану ґрунтів, геометричних розмірів досліджуваної системи та заряду ВР, а також властивостей ВР. Значення параметрів фізико-механічного стану торфів прийняті за даними [5]. Приймаємо, що довжина заряду дорівнює потужності торф'яного шару. Радіус заряду визначатимемо з умови камуфлетності дії вибуху. Згідно з [8] для забезпечення камуфлетної дії вибуху глибина закладання верхнього торія вертикального циліндричного заряду повинна бути не меншою за 200...220 r_0 . Тоді очевидно, що

$$R_0 = 0,005 h_0. \quad (21)$$

Границі зміни значень визначальних параметрів наведено в табл. 1. Лічимо

Таблиця 1. Значення визначальних параметрів

Параметри	Значення	Параметри	Значення
h_r , м	0,5...3,0	a_ϕ , м ² /Н	$(0,3...0,55)10^{-3}$
h_0 , м	0,5...3,0	$\rho \cdot c^2_{пр}$, Н/м ²	$(0,49...256,0)10^7$
r_0 , м	0,0025...0,015	$a_{пр}$, м ² /Н	$(0,02...0,13)10^{-3}$
l_0 , м	0,5...3,0	c_0 , Н/м ²	$(0,02...0,2)10^{-3}$
E_v , Н/м ²	$(3,9...9,28)10^9$	\dot{q} , Н/м ² с	$2,6 \cdot 10^{-4} \dots \infty$
τ_v , Н/м ²	$(0,05...0,3)10^3$	t_0 , с	$0...3,15 \cdot 10^7$
E_m , Н/м ²	$(1,0...8,0)10^6$	t_1 , с	$0...3,15 \cdot 10^7$
E_0 , Н/м ²	$(1,0...4,6)10^7$	t , с	$0... \infty$
$k_{\phi 0}$, м/с	$(0...1,5)10^{-3}$	r , м	0,0025... 15,0
$k_{\phi n}$, м/с	$1,0 \cdot 10^{-6} \dots 5,8 \cdot 10^{-4}$	μ	0,35
k_ϕ , м/с	$(0...5,8)10^{-4}$	μ_0	0,3...0,45
E_{0r} , Н/м ²	$0,9...5,0 \cdot 10^5$	$\lambda_{\phi 0}$	0,07...0,47
χ	1,25...3,0	λ_{max}	0,25...0,75
e_n	3...25	$e_{сп}$	7,5...22,6
e_{min}	2,5...6,0	g_1 , м/с ²	9,81
α_ϕ	0,1...1,0	P_{a1} , Н/м ²	10^5

Таблиця 2. Значення безрозмірних параметрів

Параметри	Значення	Параметри	Значення
h_r/h_0	0,167...6,0	$k_\phi/\sqrt{gh_0}$	$0...2,62 \cdot 10^{-4}$
r_0/h_0	0,005	E_{0r}/τ_r	3,0... 100,0
l_0/h_0	0,167...6,0	$a_\phi \cdot \tau_r$	0,015...0,165
E_v/τ_r	$(1,3...18,56)10^3$	$\rho \cdot c^2_{пр}/\tau_r$	$163,3...5,12 \cdot 10^3$
E_m/τ_r	33,33...1600,0	$a_{пр} \tau_r$	0,001...0,039
E_0/τ_r	333,33...9200,0	c_0/τ_r	0,067...4,0
$k_{\phi 0}/\sqrt{gh_0}$	$0...6,77 \cdot 10^{-6}$	$\dot{q}\sqrt{h_0/g}/\tau_m$	$2,0 \cdot 10^{-9} \dots \infty$
$k_{\phi n}/\sqrt{gh_0}$	$1,843 \cdot 10^{-7} \dots 2,62 \cdot 10^{-4}$	$t_0\sqrt{g/h_0}$	$0...1,4 \cdot 10^8$
$t_1/\sqrt{g/h_0}$	$0...1,4 \cdot 10^8$	$\lambda_{\phi 0}$	0,07...0,47
$t/\sqrt{g/h_0}$	$0... \infty$	χ	1,25...3,0
$((\rho_0 + \rho_a)gh_0 + P_a)/\tau_r$	3,726...35,9	e_n	3...25
r/h_0	0,005...30,0	e_{min}	2,5...6,0
z/h_0	0...6,0	$e_{сп}$	7,5...22,6
μ	0,35	α_ϕ	0,1...1,0
μ_0	0,3...0,45	λ_{max}	0,25...0,75

На основі даних табл. 1 оцінимо величину безрозмірних параметрів з (11) і (12). Границі зміни значень цих безрозмірних параметрів наведено в табл. 2.

Підбір ґрунтових матеріалів і ВР повинен здійснюватися з урахуванням необхідності дотримання рівності між відповідними параметрами моделі та природи у випадку моделювання конкретних умов виконання робіт. Якщо ж розв'язується задача встановлення загальних закономірностей досліджуваних процесів, то значення безрозмірних величин, отриманих по параметрах моделі, повинні попадати в границі зміни відповідних безрозмірних величин, наведених у табл. 2. Крім того, рекомендується в моделі використовувати неволокнистий торф. Це пов'язано з тим, що до фізико-механічних властивостей торфів та їх деформування під навантаженням додається ще один – лінійний визначальний параметр.

1. *Зарецкий Ю. К., Гарицелов М. Ю.* Глубинное уплотнение грунтов ударными нагрузками. – М.: Энергоиздат, 1989.

2. *Menard L.* La Consolidation dynamique des sols de fondation // Annales de l'ITRTP. – № 320, Sept.

3. *Кушнир В. Я.* Консолидация неоднородных намывных оснований при глубинном виброуплотнении // Инж. геология. – 1988. – № 5.

4. *Бондар П. П., Лучко А. І.* Стенд для дослідження консолідації водонасиченого торф'яного ґрунту при дії вибуху в ньому // Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. – Київ: НТУУ "КПІ": ЗАТ "Техновібух", 2000. – Вип. 4.

5. *Евгеньев И. Е., Казарновский В. Д.* Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах. – М.: Транспорт, 1976.

6. *Боровиков В. А., Ванягин И. Ф.* Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород. – М.: Недра, 1990.

7. *Седов Л. И.* Методы подобия и размерности в механике. – М.: Госиздат физ.-мат. лит., 1965.

8. *Гундарев К. А., Кравец В. Г.* Параметры взрывных работ при ликвидации просадочных свойств лессовых массивов // Использование энергии взрыва на объектах ирригационного и мелиоративного строительства в грунтах. – Киев: Наук. думка, 1976.

УДК 624.534.142

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В КОНСТРУКЦИЯХ ШАХТНОЙ КРЕПИ ПРИ ПОЖАРЕ

Т. Рембеляк, докт.- инж. (Краковская металлургическая академия, РП)

Процес тепломасопереносу в тілі конструкції кріплення можна моделювати у вигляді витаровування потоку рідини в каналі, обрамленому проникливими матрицями.