

УДК 624.131

ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ҐРУНТУ ПІДВАЛИН ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ

О. В. Титко

ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ҐРУНТУ ПІДВАЛИН ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ

О. В. Титко

ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ҐРУНТУ ПІДВАЛИН ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ

О. В. Титко

Запропоновано використання підвищувального коефіцієнта, який вводитьься в розрахункові значення роботи ущільнення і деформації формозміни і дозволяє врахувати вплив ущільнених зон ґрунту від забитих раніше інших паль групи на палю, що забивається наступною.

Визначено стан напружено-деформованого ґрунту, який виникає в процесі забивання палі в ґрунтовий масив, що характеризується силами тертя бічної поверхні палі по ґрунту; силами, які здійснюють об'ємну деформацію та силами зсувної деформації формозміни ґрунту.

Ключові слова: *напружено-деформований стан, ґрунт, основа, підвалина, фундамент, паля, розрахунок фундаментів, ущільнення.*

Предложено использование повышающего коэффициента, который вводится в расчетные значения работы уплотнения и деформации формоизменения и позволяет учесть влияние уплотненных зон почвы от забитых ранее других свай группы на сваю, которая забивается следующей.

Определено состояние напряженно-деформированного грунта, возникающее в процессе забивания сваи в грунтовый массив, характеризующееся силами трения боковой поверхности сваи о грунт; силами, которые осуществляют объемную деформацию и силами сдвига деформации формоизменения почвы.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, ґрунт, основа, фундамент, фундамент, свая, расчет фундаментов, уплотнения.*

The use of step-up ratio, which is introduced in the calculation of the work of compression and deformation forming and allow for the effect of soil compaction zones slaughtered before the other piles in pile group that slaughtered next.

The condition of the stress-strain of soil that occurs during pile piles in the soil mass, characterized by the friction of the lateral surface of the pile on the ground, the forces engaged volumetric strain and shear strain forces forming soil.

Keywords: *stress-strain state, ground, foundation, foundation, foundation pile, the calculation bases, seals.*

Вступ

Фундаменти з групи взаємозалежних паль, як правило, влаштовують під великі потужні споруди промислового виробництва та під будови на слабких ґрунтах. Об'єми витрат при виконанні таких фундаментів сягають 15-30 % від загальних витрат на будівництво і пов'язані, насамперед, з тим, що сучасна теорія розрахунків підвалин фундаментів з групи паль не дозволяє дати вичерпні відповіді на чисельні запитання, що виникають в процесі дослідження напружено-

деформованого стану ґрунту в навколо пальовому просторі [1, 2]. Тому виникає актуальність та доцільність в додаткових дослідженнях моделі “фундамент – основа” та розробці методів розрахунку із знижені витрат на влаштування таких фундаментів.

Постановка задачі

Задачею роботи є визначення стану напружено-деформованого ґрунту, який виникає в процесі забивання палі в ґрунтовий масив, що характеризується силами тертя бічної поверхні палі по ґрунту; силами, які здійснюють об’ємну деформацію (ущільнення ґрунту); силами зсувної деформації формозміни ґрунту. Визначення підвищувального коефіцієнта, який вводиться в розрахункові значення роботи ущільнення і деформації формозміни.

Основна частина

Проаналізуємо ущільнення ґрунтового масиву при забиванні одиночної палі. Якщо занурення виконується без лідируючої шпари, то майже весь ґрунт із контуру порожнини, утвореною палею іде на ущільнення масиву за її бічною поверхнею. Це ущільнення менш значне лише на невеликих ділянках біля земної поверхні, де відбувається випирання ґрунту, і при завершенні забивання, де частину ґрунту паля виштовхує не убік, а вниз, ущільнюючи масив під п’ятою. Але при забиванні досить довгих паль згаданими крайовими ефектами, що порушують основну закономірність ущільнення, можна знехтувати.

Розрахунок ущільнення ґрунту дозволяє визначити додаткові витрати на забивання сусідніх паль по ущільненому ґрунті. Обґрунтуємо, аналогічно [4] методику розрахунку обсягу робіт з ущільнення ґрунту і відповідні формозміни (проти сил зчеплення і тертя) при забиванні палі.

Якщо не брати до уваги теплові й інші втрати енергії при ударі молота по палі, робота із забивання палі на одиницю глибини Δh у загальному випадку складається з трьох складових. Одна з них $A_{\text{тп}}$ визначається тертям бічної поверхні палі по ґрунту при просуванні палі на Δh , друга A_y здійснює об’ємну деформацію відповідного шару ґрунту висотою Δh , третя A_{ϕ} робить пластичну зсувну деформацію кільця ґрунту, що оточує палю, при його переміщенні:

$$\sum A = \sum A_{\text{тп}} + \sum A_y + \sum A_{\phi} \quad (1)$$

Елементарна робота тертя $dA_{\text{тп}}$ при просуванні палі на елемент довжини dh дорівнює добутку цього елемента переміщення на силу, рівну силі тертя всієї бічної поверхні палі по ґрунту Q :

$$dA_{\text{тп}} = Qdh, \quad Q = r_{\text{св}} \text{tg}\phi \int_0^h \int_0^{2\pi} \sigma_2 dh d\alpha = \pi r_{\text{св}} \lambda_0 h^2 \mu \text{tg}\phi \quad (2)$$

де $r_{\text{св}}$ – радіус палі;
 $\text{tg}\phi$ – коефіцієнт тертя бічної поверхні палі по ґрунту;
 μ – коефіцієнт бічного тиску ґрунту ($\mu = \sigma_2 / \sigma_1$);
 σ_1, σ_2 – компоненти напруг у ґрунті на даній глибині h ;
 $d\alpha$ – елементарний кут у полярній системі координат;
 λ_0 – початкова щільність ґрунту.

Підставивши Q із другого (2) в перше рівняння (1) визначимо шляхом його інтегрування в межах від 0 до Δh першу складову питомої сумарної роботи із забивання палі, обумовленої тертям по її бічній поверхні:

$$\sum A_{\text{тп}} = \pi r_{\text{св}} \lambda_0 h^2 \mu \text{tg}\phi \Delta h \quad (3)$$

Робота ущільнення dA_y елементарного об’єму ґрунту dV , у її «чистому» вигляді, тобто без врахування неминуче супутньої їй роботи зі зміни його форми, може бути визначена через тиск P та об’ємну деформацію Θ [5]:

$$dA_y = P\Theta dV \quad (4)$$

У нашому випадку пружна модель ґрунту визначається співвідношенням:

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1, \quad \sigma_1 = \mu\sigma_2 = \mu\sigma_3, \quad P = \sigma_1(1 + 2\mu)/3 = E\Theta(1 + 2\mu)/3, \quad (5)$$

$$\Theta(r_0) = \Theta^* r_0^{-\nu} \quad \text{при} \quad r_0 \geq 1, \quad (6)$$

де E – модуль об’ємної деформації ґрунту,
 Θ^* – граничне значення об’ємної деформації ($r_0 = 1$),
 ν – показник ущільнення, що залежить від складу, властивостей і вологості ґрунту.
 Після перетворень формул (5) і (6) наведений раніше вираз (4) прийме вигляд:

$$dA_y = E(1 + 2\mu)\Theta^* r_0^{-2\nu} dV/3. \quad (7)$$

Роботу ущільнення довільного об’єму ґрунту від контакту з палю ($r_0=1$) до окружності радіуса $r=r_n$ визначимо шляхом інтегрування в потрібних межах:

$$A_y = 2\pi_{ce} \Delta h E (1 + 2\mu) \Theta^* \int_1^n r_0^{2-2\nu} dr_0 = 2\pi_{ce} \Delta h E (1 + 2\mu) \Theta^* (n^{3-2\nu} - 1)/(3 - 2\nu). \quad (8)$$

Для визначення повної роботи ущільнення ΣA_y прийемо n рівним нескінченності. Отримана шляхом інтегрування (8) при такій верхній межі друга складова загальної роботи із забиванні палі дорівнює:

$$\Sigma A_y = 2\pi_{ce}^2 \Delta h E (1 + 2\mu) \Theta^* / (2\nu - 3). \quad (9)$$

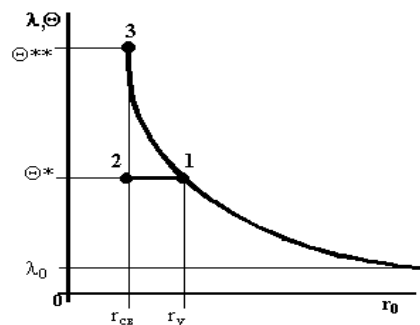


Рис. 1. Графік зміни щільності та об’ємної деформації ґрунту навколо палі при великій початковій щільності λ_0 та великих діаметрах паль (ділянка 1-2 – дійсна, 1-3 – фіктивна зміна деформації)

Аналогічно може бути визначена повна робота ущільнення при деформуванні ґрунту, описуваним кусково-ламанною функцією [6]. У цьому випадку інтегрування проводиться по обох її відрізках і отримані вирази додаються. На ділянці, що примикає до палі, (відрізок 1-2 на рис. 1), де деформація, досягши граничної величини, залишається постійною ($\Theta = \Theta^* = \text{const}$), напруги змінюються за тою ж закономірністю, що і на криволінійній ділянці. Для спрощення продовжимо криволінійну ділянку зміни деформації до палі (відрізок кривої 1-3 на рис. 1), і отримане фіктивне значення граничної деформації Θ^{**} використовуємо при розрахунку напруг у цій області. Упускаючи проміжні перетворення наводимо кінцеву розрахункову формулу:

$$\Sigma A_y = 2\pi_{ce}^2 \Delta h E (1 + 2\mu) \Theta^* [\Theta^* / (2\nu - 3) + \Theta^{**} / (\nu - 2)] \quad (10)$$

Визначення третьої складової роботи із забивання палі – зсувної деформації формозміни ґрунту, що оточує палю, при його переміщенні всередину масиву, за рахунок ущільнення віддалених далі від палі шарів, викликає більш значні математичні труднощі, чим для двох інших, визначених вище. Робота зі здійснення розглянутої деформації формозміни dA_ϕ елементарного

об'єму ґрунту dV визначає добуток його і других (основних) інваріантів девіаторів тензорів напруг і деформацій $\sigma_{(2)}$ і $\varepsilon_{(2)}$ [5]:

$$dA_{\phi} = \sigma_{(2)} \varepsilon_{(2)} dV. \quad (11)$$

Інваріант девіатора тензора напруг складає:

$$\sigma_{(2)}(r_0) = \sigma_{(1)}(r_0)(1 + 2\mu)/3 = \Theta^* E r_0^{-\nu} (1 + 2\mu)/3. \quad (12)$$

Інваріант девіатора тензора деформацій визначимо з розгляду приведенного до головних осей тензора деформації при циліндричній симетрії, обумовленій плоским рухом ґрунту. Він складає:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{U_0}{r_0} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (13)$$

де U_0 – відносне (у радіусах палі) переміщення маркера з початковою координатою r_0 (у циліндричній системі координат) при деформуванні, обумовленому забиванням палі.

Відповідно до цього співвідношення другий інваріант девіатора тензора деформацій буде в нашому випадку дорівнювати:

$$\varepsilon_2 = U_0 / r_0 \quad (14)$$

Для визначення U_0 визначимо масу недеформованого ґрунту, який знаходиться між утворюючими елементарного циліндру висотою (Δh) та радіусами (r_0) і ($r_0 + U_0$). Вона дорівнює:

$$\Delta m_u = [(r_0 + U_0)^2 - r_0^2] \pi r_{cs}^2 \Delta h \lambda_0 \quad (15)$$

Після перетворень і розв'язання відносно U_0 , одержимо:

$$U_0 = \frac{r_0 \left\{ [1 + r_0^{-\nu} (1 + r_0^{2-\nu} \Theta^*)]^{1/2} - 1 \right\}}{(1 + r_0^{2-\nu} \Theta^*)}. \quad (16)$$

Початкове (відносне в радіусах палі) переміщення маркерів від границі палі U^* (рівне U_0 при $r_0 = 1$) у цьому випадку буде дорівнювати:

$$U^* = [(2 + \Theta^*)^{1/2} - 1] / (1 + \Theta^*) \quad (17)$$

Підставивши значення $\sigma_{(2)}$, $\varepsilon_{(2)}$ і U_0 у (11) будемо мати:

$$dA_{\phi} = E (1 + 2\mu) \Theta^* r_0^{-\nu} \left\{ [1 + r_0^{-\nu} (1 - \Theta^*)]^{1/2} - 1 \right\} dV / 3 \quad (18)$$

Загальну роботу деформування опише інтеграл:

$$A_{\phi} = 2 / 3 \pi r_{cs}^2 \Delta h E (1 + 2\mu) \Theta^* \int_0^{\infty} r_0^{2-\nu} dr_0 \left\{ [1 + r_0^{-\nu} (1 - \Theta^*)]^{1/2} - 1 \right\} / (1 + r_0^{2-\nu} \Theta^*) \quad (19)$$

Однак його інтегрування можливе лише в чисельному вигляді. Для одержання інженерної формули для ґрунтів невисокої щільності, відповідно до умови (4), апроксимуємо зміни U_0 у межах від $r_0=1$ до $r_0=\infty$ більш простим, чим (3.53) виразом. Найбільше підходить вираз:

$$U_0 = r_0^{-\nu/2} U^* (1 + \Theta^*) \quad \text{при} \quad r_0 > 1 \quad (20)$$

Наскільки прийнята апроксимація близька до (16) можна судити з наведених нижче розрахункових значень U_0 по обох формулах при $\nu=2,24$, табл. 1.

Таблиця 1

Розрахунок відносного переміщення маркера

r_0	2	3	4	5	6	10	20
Розрахунок U_0 за (3.53)	0,211	0,132	0,088	0,068	0,057	0,029	0,012
Те ж по (3.57)	0,209	0,131	0,091	0,070	0,058	0,031	0,0015

Замінюючи в (19) значення U_0 з (16) на (20) і зробивши спрощення одержимо:

$$A_\phi = 4 / 3\pi r_{ce}^2 \Delta h E (1 + 2\mu) \Theta * U * \nu^{-1} \int_1^\infty r_0^{2-2\nu-\nu/2} dr_0. \quad (21)$$

Після інтегрування (20) у зазначених межах і відповідних перетворень одержимо розрахункову формулу для визначення третьої складової роботи із забивання палі:

$$\Sigma A_\phi = 8\pi r_{ce}^2 \Delta h E (1 + 2\mu) \Theta * U * / 3\nu(5\nu - 6). \quad (22)$$

Для зручності аналізу зведемо воедино формули (3), (10) і (20). Загальна робота із забивання палі складе:

$$\Sigma A = \pi r_{ce} \Delta h \mu h^2 tg \phi + \pi r_{ce}^2 \Delta h E (1 + 2\mu) \Theta * \times \{ \Theta * / (2\nu - 3) + \Theta * * / (\nu - 2) + [8U * / 3\nu(5\nu - 6)] \}. \quad (23)$$

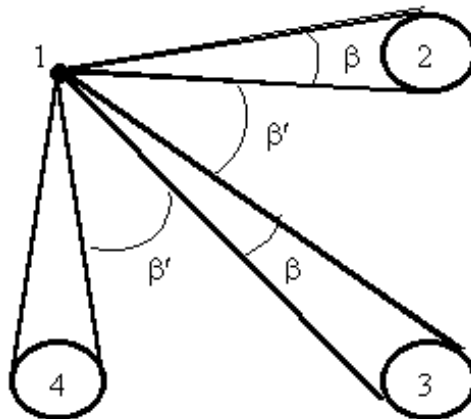


Рис. 2. Схема до розрахунку ущільнення при дії сусідніх паль

Поряд з очевидними факторами, що визначають об'єм роботи із забивання палі (її радіус і довжина) отримана формула дозволяє розрахувати зростання об'єму роботи зі збільшенням модуля деформації ґрунту E , коефіцієнта бічного тиску μ і величини граничного ущільнення Θ^* . Однак при цьому варто звернути увагу ще на один важливий фактор, який не враховується таким розрахунком. При наявності ущільненої зони поблизу палі, що забивається, збільшується лобовий опір ґрунту, який виштовхується в бік цієї зони, а при значному ущільненні рух ґрунту в цьому напрямку взагалі не відбувається [3]. Тому зростають загальні витрати на роботу ущільнення, що відбувається не в чотирьох напрямках, а при наявності однієї сусідньої палі – у трьох, при наявності двох – у двох напрямках і, при забиванні в проміжок між палями, коли крім того забита і третя сусідня палля – усього в одному напрямку. Цим і пояснюються труднощі забивання останніх паль групи.

На рис. 2 схематично показані сектори, обмежені кутом β , рівним:

$$\beta = \arctg(2r_y / d) \quad (24)$$

де r_y – радіус зони граничного ущільнення.
 d - відстань між палями.

При забиванні палі у відмітці 1 ґрунт не може переміщуватися по цих секторах у напрямку раніше забитих паль 2, 3 і 4.

Точний розрахунок за цими факторами очевидно зробити важко, але можна оцінити їхній вплив, використовуючи підвищувальний коефіцієнт K_y , що вводиться в розрахункові значення роботи ущільнення ΣA_y і деформації формозміни ΣA_ϕ . Оцінку його величини зробимо з геометричних побудов. Він складе:

$$K_\phi = 1 + \sum_1^{i=n} (\beta_i + 0,3\beta_i') / 2\pi \quad (25)$$

Цей коефіцієнт вводиться у вихідні дані при розрахунку за викладеною вище методикою сумарного об'єму роботи із забивання паль в складі групи, разом з даними змін щільності, модуля деформації і показників міцності ґрунту.

Висновки

- Проведено аналіз та визначено, що робота з забивання палі на одиницю глибини у загальному випадку складається з трьох складових.
- Отримана формула (23) поряд з очевидними факторами, що визначають об'єм роботи із забивання палі (її радіус і довжина), дозволяє розрахувати зростання об'єму роботи зі збільшенням модуля деформації ґрунту, коефіцієнта бічного тиску і величини граничного ущільнення.
- Запропоновано використання підвищувального коефіцієнта, який вводиться в розрахункові значення роботи ущільнення і деформації формозміни і дозволяє врахувати вплив ущільнених зон ґрунту від забитих раніше інших паль групи на палю, що забивається наступною.
- Отримані результати дозволяють оцінити додаткові витрати, які обумовлені забиванням взаємозалежних паль в складі групи, а також визначити деформаційні характеристики ґрунту, що дає можливість більш якісно оцінити напружено-деформований стан ґрунту в навколоручному просторі при влаштуванні фундаментів з групи взаємозалежних паль.

Використана література

1. Лалетин Н. В. Расчет свайного куста на вертикальные нагрузки по деформациям грунтов основания / Н.В. Лалетин // Теория сооружений и конструкций – ВИСИ: сб. трудов № 13 – 1967–вып. 1. – с. 57 – 160 с.
2. Алейников С. М. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния системы «призматическая свая–основание» / С. М. Алейников, М. Д. Гончаров. – Одесса, 1997. – 320 с.
3. Вовк А. А. Действие взрыва в грунтах / А. А. Вовк, Г. И. Черный, В. Г. Кравец – К: Наукова думка, 1974.– 207 с.
4. Чеботарев Г. П. Механика грунтов, основания и земляные сооружения / Г. П. Чеботарев –М: Стройиздат, 1968.– 280с.
5. Черный Г. И. Изменение физико-механических свойств грунтов при динамических нагружениях / Г. И. Черный – К: Наукова думка, 1979.– 130 с.
6. Титко О. В. Оцінка ефективності фундаментів з групи взаємозалежних паль: монографія / О. В. Титко – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 114 с.

Титко Олег Васильович – к.т.н., доцент кафедри теплогазопостачання Вінницького національного технічного університету.

Титко Олег Васильевич – к.т.н., доцент кафедри теплогазоснабження Вінницького національного технічного університету.

Titko Oleg – Ph.D., docent of department of Gas Supply Vinnytsia National Technical University.