

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФОРМИ БОКОВОЇ ПОВЕРХНІ ЕЛЕМЕНТІВ ЗБІРНО-МОНОЛІТНИХ ПАЛЬ

М. М. Попович, І. І. Ваганов

Наведено результати аналітичних та лабораторних досліджень опору занурення елементів збірно-монолітних паль в залежності від форми бокової поверхні елементів. Запропоновано оптимальний кут загострення бокової поверхні елементів.

Приведены результаты аналитических и лабораторных исследований сопротивления погружения элементов сборно-монолитных свай в зависимости от формы боковой поверхности элементов. Предложен оптимальный угол заострения боковой поверхности элементов.

The results of analytical and laboratory researches of resistance of immersion of elements of collapsible-monolithic piles are resulted depending on the form of lateral surface of elements. The optimum corner of sharpening of lateral surface of elements is offered.

У практиці світового фундаментобудування в наш час широке розповсюдження одержали пальові фундаменти, які забезпечують можливість зведення будівель і інженерних споруд на ґрунтах з недостатньою несучою здатністю, в умовах вічномерзлих ґрунтів і т.д. Застосуванню пальових фундаментів сприяє впровадження індустріальних методів будівництва, а також оснащення будівельних організацій мобільними високопродуктивними машинами для виробництва пальових робіт.

За способом виготовлення палі підрозділяють на дві групи: палі забивні (готові) і набивні, які влаштовуються безпосередньо в свердловині, заздалегідь виготовленій в ґрунті.

Одна з основних переваг набивних паль перед забивними - можливість їх виконання з одним або декількома розширеннями стовбура, що значно підвищує несучу здатність палі. Розширення можуть бути виконані в будь-якій частині стовбура - верхньої, нижньої або середньої. Розширення в набивних палях можуть бути одержані за допомогою розширювачів, що ріжуть або ущільнюють ґрунт в зоні розширення, механічним трамбуванням матеріалу стовбура палі або за допомогою камуфлетного вибуху. В більшості випадків пристрій розширення технологічно пов'язаний із влаштуванням палі, тобто пристрій палі і розширення складає єдиний технологічний процес. Найбільшого поширення набули набивні палі з розширенням в основі свердловини, що обумовлено можливостями наявного устаткування.

Одним з шляхів підвищення ефективності набивних паль є влаштування їх з використанням збірних елементів, що розсуваються [1]. При встановленні таких паль в процесі розсунення елементів навколо стовбура палі створюється ущільнена зона, в межах якої підвищується міцність ґрунту і знижується його деформативність. Набивні палі, виготовлені в свердловинах з ущільненими стінками, мають несучу здатність вищу, ніж в свердловинах, утворених звичайними методами буріння з екскавацією ґрунту [2]. Збільшення несучої здатності паль пояснюється поліпшенням будівельних властивостей ґрунту унаслідок ущільнення його в кільцевій зоні навколо свердловини та покращення роботи бокової поверхні палі з ґрунтом.

Взаємодія занурюваної палі з ґрунтом є складним процесом, який до теперішнього часу недостатньо досліджений експериментально і не має строгого математичного опису. Різними дослідниками пропонувалися варіанти різних математичних моделей взаємодії палі з ґрунтом.

О.Стерн [3] намагаючись визначити чинники, що мають вплив на процес занурення палі, запропонував вираз для визначення загального опору $R_{\text{заг}}$ зануренню вістря і бічної поверхні палі

$$R_{\text{заг}} = \frac{1}{K} (R_{\text{вістр}} + \lambda R_{\text{бок}}) \quad (1)$$

де K – коефіцієнт безпеки, залежний від властивостей ґрунту.
 λ – коефіцієнт зменшення опору для частини стовбура палі;

$R_{\text{вістр}}$ – опір загостреної частини палі зануренню.

$$R_{\text{вістр}} = \frac{\varepsilon f \pi d^3}{4 \sin 2\beta} (\sin \beta + \mu \cos \beta), \quad (2)$$

де ε – коефіцієнта витіснення ґрунту;
 f – коефіцієнт пасивної здатності ґрунту до стиснення;
 d – діаметр палі;
 β – половина кута загострення;
 μ – коефіцієнт тертя палі об ґрунт;
 $R_{\text{бок}}$ – опір бічної (циліндрової) поверхні палі

$$R_{\text{бок}} = \mu f \varepsilon \pi \left(\frac{d}{4} \right)^2 (2 + \varepsilon) [4\ell - dtg \beta (1 + \varepsilon)] \quad (3)$$

Формули (1...3) не враховують умови утворення і розподілу ущільненої зони під вістрям і навколо палі, у зв'язку з чим розрахункові значення не збігаються з експериментальними. Тому наведені методи розрахунку подальшого застосування не одержали. Стерн намагався визначити оптимальний кут загострення палі. Він висловив припущення, що тупа паля долає опір тиску, а гостра – опір витісненню, що згодом не підтвердилося.

Залежність лобового опору від кутів конусності наконечників з прямолінійною і ламаною твірною розглянута в роботі Д. А. Котюкова [4]. На підставі проведених досліджень ним зроблені такі висновки:

- зусилля проколу залежить від кута загострення конічного наконечника. Мінімальний опір втискуванню випробовують наконечники з кутом загострення, близьким до кута початку утворення ущільненого ґрунтового ядра $2\beta(40...50^\circ)$;
- зменшення кута загострення до $2\beta = 20^\circ$ веде до зростання зусилля проколу на 38 % за рахунок збільшення поверхні тертя.

Найбільш простою, і в той же час враховуючою нерівномірність ґрунтових умов в умовах яких можливе влаштування збірно-монолітної палі з розсуваючих елементів є модель опору ґрунту зминанню, яку приймають згідно з гіпотезою Бернштейна-Летошнева [5]. Опір ґрунту зі зростанням деформацій визначається з залежності:

$$\sigma = c_1 x^\mu, \quad (4)$$

де σ – напруження на контактній поверхні штапу;
 c_1 – коефіцієнт загальної деформації ґрунту;
 x – деформація ґрунту по радіусу свердловини;
 μ – показник степені, який характеризує процес деформації.

Дослідженнями В. Б. Швеця [6] встановлено, що влаштування набивних паль в виштапованому ложі найбільш ефективно в глинистих ґрунтах від напівтвердої до м'якопластичної консистенції, для яких $\mu = 1$. Тому закон деформації ґрунту матиме вигляд:

$$\sigma = c_1 x. \quad (5)$$

Як приклад розглянемо процес взаємодії з ґрунтом елемента збірно-монолітної палі з конічною формою (рис. 1).

При зануренні конічного елемента в ґрунт формується зона ущільненого ґрунту і робоче навантаження передається бічною поверхнею елемента палі на ущільнений ґрунт.

Опір впровадженню конічного елемента залежить від об'єму ущільненого навколо нього ґрунту, який визначається формою і конструктивними параметрами елемента. Таким чином, форма елемента і його конструктивні параметри: радіус R , кут загострення 2β і висота H мають значний вплив на величину опору при зануренні елемента. В процесі занурення елемента палі в

ґрунт виникають сили лобового опору, що діють на бічні поверхні конічної частини елемента, обумовлені нормальним тиском поновлюючих сил пружності, що виникають при ущільненні скелета ґрунту. Розрахункова схема до визначення сил опору може бути подана таким чином (рис. 2).

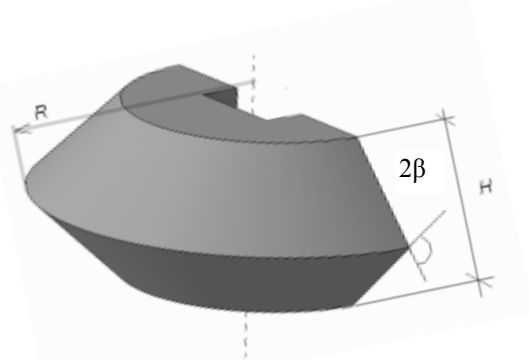


Рис. 1. Варіанти елементів збірно-монолітної палі

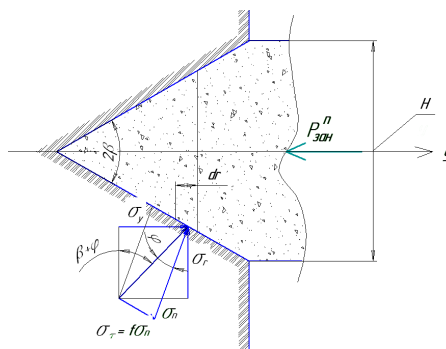


Рис. 2. Розрахункова схема до визначення напруг

При зануренні елемента в ґрунт (рис. 2), в результаті витіснення частинок ґрунту в сторони відносно осі впровадження на поверхні контакту виникають нормальні контактні напруги σ_n . Дотичні напруги σ_τ на поверхні контакту бокової поверхні елемента з ґрунтом пропорційні нормальним напругам, тобто

$$\sigma_\tau = f\sigma_n, \quad (6)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання бокової поверхні елемента по ґрунту.

У роботах [6, 7], встановлено, що при русі штампу в ґрунті навколо його бічних стінок утворюється тонкий шар ґрунту, який рухається разом зі штампом, тому коефіцієнт тертя елемента по ґрунту можна замінити коефіцієнтом тертя ґрунту по ґрунту, тобто

$$f = \operatorname{tg} \varphi,$$

де φ – кут внутрішнього тертя ґрунту.

Тоді результуюча напруга $\sigma_k = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_\tau^2}$ відхилена від нормалі на кут внутрішнього тертя ґрунту. Вона розкладається на напруги, що становлять: радіальні σ_r , перпендикулярні осі впровадження елемента, і осьові σ_y паралельні осі. Оскільки в трикутниках напруг вектор результуючої напруги є загальною стороною, то:

$$\sigma_n = \sigma_r \frac{\cos \varphi}{\cos (\varphi + \beta)}. \quad (7)$$

Замінивши σ_r виразом 5 одержимо:

$$\sigma_n = \frac{c_1 x \cos \varphi}{\cos(\varphi + \beta)} \quad (8)$$

При зануренні в ґрунт елемента палі, який має конічну форму (рис. 3) силі занурення $P_{зан}^n$ протидіє реакція ущільненого ґрунту N , нормальна до бокової поверхні конуса та сила тертя T , викликана наявністю сил N в процесі руху елемента:

$$T = N \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (9)$$

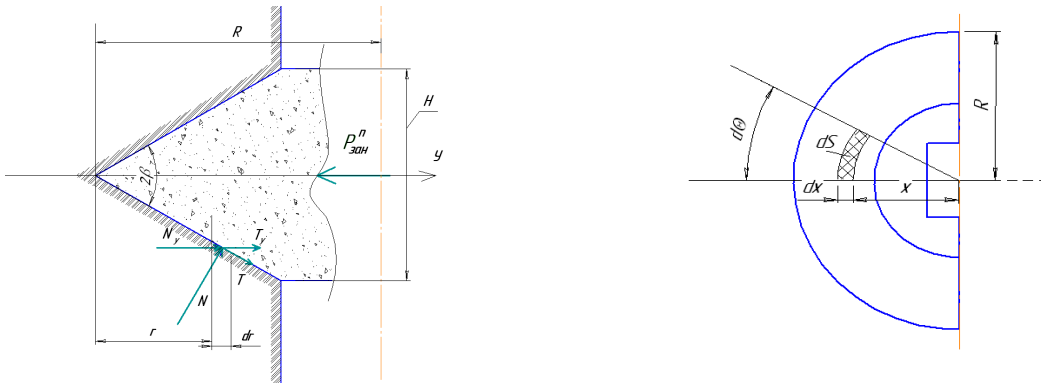


Рис. 3. Розрахункова схема до визначення сил опору

Для визначення реакції ущільненого ґрунту N виділимо на поверхні елемента палі елементарну площадку шириною dr , довжиною dS (рис. 3) та обмежену кутом $d\theta$ на відстані X від центра. На цю площадку діє реакція ґрунту dN , що дорівнює:

$$dN = \sigma_n \cdot dF, \quad (10)$$

де dF – площа контакту з ґрунтом елемента поверхні;

σ_n – нормальний контактний тиск на боковій поверхні, згідно з формулою (9).

Величина елементарної площадки dF поверхні елемента довжиною dS та шириною dr виражається формулою:

$$dF = dS \cdot dL, \quad (11)$$

де $dL = \frac{dx}{\sin \beta}$, $dS = x \cdot d\theta$ з розрахункової схеми радіальної деформації ґрунту

Отримаємо:

$$dF = \frac{x dx d\theta}{\sin \beta}, \quad (12)$$

де x – радіус конічного елемента в перерізі нормальному до оісі елемента палі;

dL – елемент твірної конуса;

$d\theta$ – елементарний кут.

Підставивши (8) та (12) в (10), отримаємо:

$$dN = \frac{x dx d\theta c_1 x \cos \varphi}{\sin \beta \cos(\varphi + \beta)} \quad (13)$$

Повна нормальна реакція ґрунту N віднесена до конусної поверхні елемента визначається інтегралом вигляду:

$$N = \frac{c_1 \cos \varphi}{\sin \beta \cos (\varphi + \beta)} \int_0^{2\pi} \int_0^R x^2 dx d\theta. \quad (14)$$

Розкриваючи інтеграл та підставивши межі інтегрування, знаходимо:

$$N = \frac{2\pi R^3 \cos \varphi c_1}{3 \sin \beta \cos (\varphi + \beta)}. \quad (15)$$

При зануренні елемента палі в ґрунт виконується робота із розсовування частинок ґрунту в сторони та переборюючи сили тертя по боковій поверхні елемента. Ці процеси протікають паралельно та взаємозв'язані між собою. Тому опір ґрунту зануренню елемента палі є сумою двох складових:

$$P_{зан}^n = N_y + T_y, \quad (16)$$

де $P_{зан}^n$ – сила опору занурення елемента палі;

N_y – проекції нормальних сил опору на вісь руху елемента (опір розсуванню частинок ґрунту в сторони);

T_y – проекції дотичних сил опору на вісь руху (опір тертя між поверхнею елемента та навколишнім ґрунтом).

Проекції цих сил на вісь руху елемента можна виразити формулами:

$$N_y = N \sin \beta, \quad T_y = T \cos \beta = N \operatorname{tg} \varphi \cos \beta$$

Загальний опір зануренню

$$P_{зан}^n = N(\operatorname{tg} \varphi \cos \beta + \sin \beta) = \frac{N \sin (\varphi + \beta)}{\cos \varphi}. \quad (17)$$

Замінивши N (17) виразом (15), отримаємо:

$$P_{зан}^n = \frac{2\pi R^3 c_1}{3 \sin \beta} \operatorname{tg} (\varphi + \beta). \quad (18)$$

В результаті аналітико-експериментальних досліджень процесу влаштування збірно-монолітних паль одержані залежності, що характеризують взаємодію елементів палі з ґрунтовою основою. Дослідження одержаних залежностей проводилося шляхом розв'язування отриманих рівнянь при заданих значеннях параметрів R , 2β , H і φ . Результати досліджень подані в графічних залежностях (рис. 4). Як видно з одержаних залежностей кут наконечника 2β також його розміри R , H роблять за інших рівних умов ($c_1 = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$) значний вплив на величину опорів ґрунту, що виникають при зануренні елемента палі.

Аналіз результатів досліджень щодо оптимізації кутів загострення при зануренні елемента палі показав діапазан найбільш ефективного кута загострення елемента палі.

На рис. 4 подані характерні залежності сил опору впровадженню елемента палі $P_{зан}^n$ в ґрунт основи від його конструктивних параметрів. На графіку явно виражений екстремальний характер залежності $P_{зан}^n = f(2\beta)$. Аналіз графічних залежностей показав, що сила опору впровадженню елемента $P_{зан}^n$ при куті загострення 2β рівному 60° є мінімальною при дослідженні радіуса елемента R . Збільшення R приводить до зростання величини опору.

З аналізу графіка виходить важливий для практичних цілей висновок про те, що оптимальним кутом загострення елемента незалежно від його радіуса слід вважати кут рівний 60° .

Зростання сили опору впровадженню елемента із збільшенням кута 2β більше за 60° , на наш погляд, пов'язано з виникненням перед елементом палі максимально ущільненого ґрунтового ядра. При зменшенні кута 2β менше 60° сили опору впровадженню елемента зростає за рахунок збільшення сил тертя по бічній поверхні елемента.

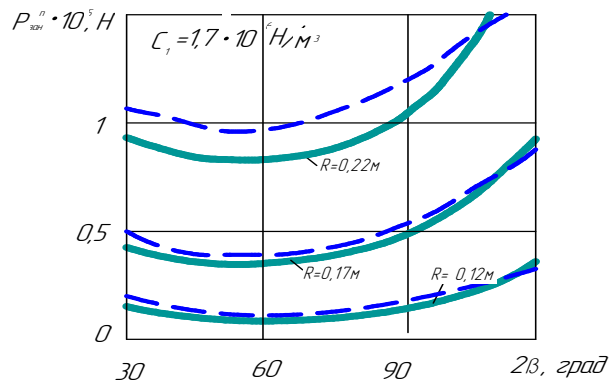


Рис. 4. Аналітична та експериментальна залежність сили опору занурювання елемента палі від кута його загострення при різних радіусах елемента

Висновки

- В результаті аналітичних досліджень розроблена математична модель процесу взаємодії елементів збірно-монолітної палі з ґрунтовою основою. Одержані залежності, що дозволяють визначити сили опору зануренню елементів палі від деформаційно-міцнісних показників ґрунту і конструктивних параметрів елементів палі.
- На основі аналізу одержаних залежностей визначені оптимальні, з умови мінімальної питомої енергоємності процесу влаштування, конструктивні параметри елементів: кут загострення наконечника $2\beta = 60^\circ$. Одержані аналітичні залежності, що дозволяють визначати технологічні параметри розширеної основи при влаштуванні збірно-монолітних набивних палей.

Використана література

1. Пат. 76436 : МПК(2006) E02D 5/34. Паля / Попович М. М.; заявник та власник патенту Він. держ. техн. універ. – № 2003065357; заявл. 10.06.03; опубл. 15.12.04, Бюл. №12. – 3с.
2. Григорян А. А. Набивные сваи с уплотнённым забоем / А. А. Григорян, Ю. А. Чиненков. – Строительные материалы, изделия. Обзорная информация ВНИИС. – Вып. 2. – 1981. – 46 с.
3. Пономаренко Ю. Е. Создание и выбор основных параметров навесного оборудования для пробивки конических скважин под набивные сваи. Автореферат дис. док. техн. наук. / Ю. Е. Пономаренко. – М.: ВНИИСТРОЙДОРМАШ, 1985. – 26 с.
4. Котюков Д. А. Исследование методов бестраншейной раздельной прокладки подземных трубопроводов диаметром до 400 мм. Автореферат дис. канд. техн. наук. – М.: ЦНИИОМТП, 1965. – 20 с.
5. Бабков В. Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов / В. Ф. Бабков, А. В. Гербурт-Гейбович, В. М. Безрук. – М.: 1986. – 239 с.
6. Швец В.Б. Опыт устройства набивных фундаментов в уплотненном ложе / В.Б. Швец, А. И. Алексеев, О. А. Лисовой и др. // Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве. – Киев: Будівельник, 1974. – С. 357-361.
7. Цымбал С. И., Койпиш Ю. Н. Предельное сопротивление грунта короткой пирамидальной свае / С. И. Цымбал, Ю. Н. Койпиш // Республиканский межведомственный научно-технический сборник "Основания и фундаменты" Выпуск II. – Киев: Будівельник, 1978. – 112 с.

Попович Микола Миколайович – к.т.н., доцент кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету.

Ваганов Іван Іванович – к.т.н., доцент кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету.