

УДК 624.154

ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПОХИЛОЇ БУРОІН'ЄКЦІЙНОЇ ПАЛІ

FOR DETERMINATION OF BEARING CAPACITY OF INCLINED BURO- INJECTION PILE

Фурсович М.О., к.т.н., доцент, ORCID 0000-0003-4519-9589, **Супрунюк В.В.**, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0001-9534-4460, **Зятюк Ю.Ю.**, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0003-3831-6599 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Fursovyh M.A. PhD, senior teacher, ORCID 0000-0003-4519-9589, **Suprunyuk V.V.** PhD, senior teacher, ORCID 0000-0001-9534-4460, **Ziatiuk Y.Y.**, PhD, senior teacher (National University of Water and Environmental Engineering)

Розрахунок палей на сумісну дію вертикального і горизонтального навантажень є відносно складним завданням, яке зумовлене значною кількістю параметрів. Запропонована аналітична залежність з розрахунку несучої здатності, за властивостями ґрунту, похилої буроін'єкційної палі, яка дозволяє врахувати особливості її роботи при підсиленні фундаментів існуючих будівель та споруд.

Calculating piles for the combined action of vertical and horizontal loads is a relatively difficult task, which is due to a large number of parameters that affect the operation of piles, including the angle of the pile to the vertical and the conditions of its clamping in the grid (rigid clamping or free support). Theoretical questions of determination of bearing capacity of inclined borehole injection piles at strengthening of the bases of shallow laying are considered. The analytical dependence on calculation of bearing capacity, on soil properties, an inclined borehole injection pile which allows to consider features of its work at strengthening of the bases of existing buildings and constructions is offered.

Ключові слова: похила буроін'єкційна паля, підсилення фундаментів, несуча здатність палі.

Inclined borehole injection pile, reinforcement of foundations, pile bearing capacity.

Вступ. Складні ґрунтові умови для будівництва майже на всій території України (просідаючі та набухаючі ґрунти, заторфовані, підроблювані, підлеглі зсувним процесам території, пливуні та інші структурно нестійкі і

слабкі ґрунти) створюють труднощі та ускладнення як під час проектування та зведення будівель і споруд, так і в процесі їх експлуатації.

Технічне переобладнання виробництва і реконструкція старих капітальних будівель є одним з основних завдань сучасної економіки. Реконструкції і модернізації підлягають не тільки старі промислові споруди. Поряд з розвитком нового житлового будівництва, значних робіт з реконструкції і модернізації (в тому числі з надбудовою) потребують старі капітальні житлові і громадські будівлі.

Найбільші труднощі виникають під час підсилення і реконструкції фундаментів, особливо в складних інженерно-геологічних умовах. На даний час існує багато ефективних способів підсилення фундаментів будівель, одним яких є передача навантаженням від споруди на більш міцні ґрунти, наприклад, за допомогою паль, зокрема буроін'єкційних. З вітчизняного та зарубіжного досвіду використання буроін'єкційних паль відомо, що цей спосіб дозволяє одержати гарантований результат в умовах максимальної

механізації робіт та при порівняно низькій їх вартості. В окремих випадках підсилення фундаментів проводиться похилими буроін'єкційними палями.

Враховуючи те, що вертикальне навантаження, які передається на похилу палу, можна розкласти на поздовжню і поперечну складову постає питання визначення несучої здатності палі за таких умов її роботи. Як відомо, згідно з ДБН В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти споруд» [1] при проектуванні палових фундаментів за наявності вертикальної і горизонтальної складової навантаження визначення несучої здатності палі за властивостями ґрунту основи у вертикальному напрямку проводиться без врахування дії горизонтального навантаження. Отже, в аналітичних залежностях, рекомендованих ДБН, не враховується взаємний вплив вказаних навантажень. Хоча під час проведення експериментальних досліджень паль на вертикальне навантаження при прикладанні додаткового горизонтального навантаженням [2, 3, 4] спостерігається ріст вертикальних деформацій палі та відрив задньої бічної поверхні палі від ґрунту. Саме відрив задньої бічної поверхні палі від ґрунту і викликає неточності між фактичною роботою палі (рис. 1.) і її розрахунковою схемою, рекомендованою в [1], оскільки при фактичній

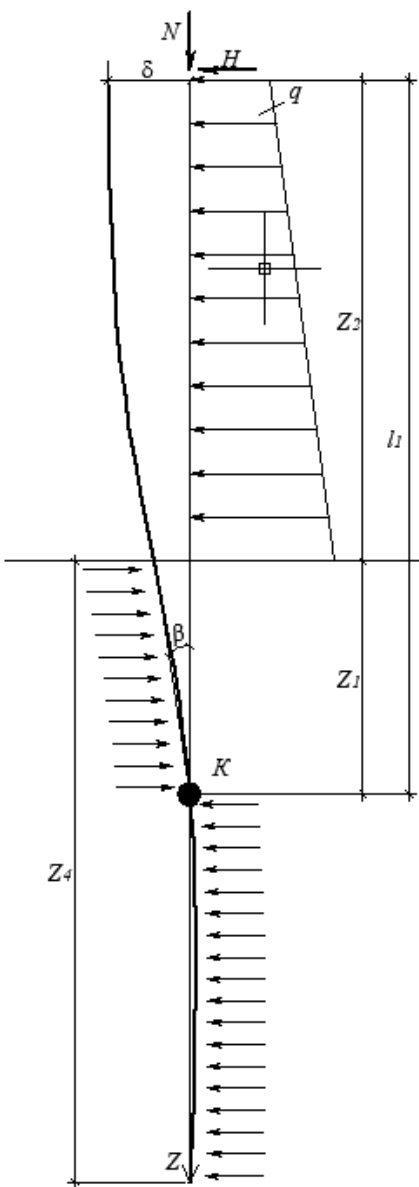


Рис. 1. Розрахункова схема палі

роботі полі за такої дії навантажень виключається з роботи певна частина її бічної поверхні, проте додатково збільшується опір палі на передній бічній поверхні за рахунок її обтиснення горизонтальним навантаженням.

Аналіз останніх досліджень. Значний вклад в розвиток теорії і практики використання буроін'єкційних паль внесли такі вчені, як М.М.Баранов, І.П.Бойко, Г.О.Дегіль, Джантіміров, Л.І.Дмитрієв, А.І.Єгоров, І.М.Клейнер, Л.І.Малишев, М.С.Мірочник, В.А.Мішаков, М.І.Орленко, В.Ф.Раюк, та ін.

Експериментальні і теоретичні дослідження, проведені вищезгаданими авторами, дозволили встановити певні закономірності роботи буроін'єкційних паль, а саме: розподілу радіальних і тангенційних напружень, які виникають після опресування свердловини додатковим тиском (В.А.Мішаков, В.Ф.Раюк [5]); зміни коефіцієнта пористості в ущільненій зоні (Г.О.Дегіль, [6]); впливу режиму опресування на несучу здатність буроін'єкційних паль (М.М.Баранов, І.М.Клейнер [7], І.П.Бойко, П.І.Орленко [8]) та ін.

Значним кроком вперед у розробці теоретичних питань визначення несучої здатності буроін'єкційних паль, за властивостями ґрунту, є робота Д.Є.Соболевського [9]. В ній, зокрема, висвітлюється певний спектр фізичних явищ, які відбуваються в ґрунті під час улаштування буроін'єкційних паль і дається теоретичне їх обґрунтування. В дослідженнях значну увагу приділено явищу ділатансії зернового середовища, як одному з найважливіших факторів для усунення існуючих протиріч у визначенні несучої здатності буроін'єкційних паль.

У деякій мірі умови робота похилої буроін'єкційних палі у підсиленому фундаменті подібна до роботи козових паль, об'єднаних жорстким ростверком після їх заглиблення. Графіки переміщень голів паль та епюри розподілу нормальних і дотичних напружень, наведені в [10, 11, 12] за результатами випробувань козових паль, дозволяють встановити якісну картину роботи окремої палі в ґрунті. У результаті експерименту виявлено появу зазору між задньою боковою гранню палі та ґрунтом і його зростання із збільшенням вертикального навантаження. Проте у цьому випадку експерименти проводились з жорсткими палями та без використання тензометрії, що, знову ж таки, не дозволило у повній мірі дослідити характер роботи паль.

Таким чином, питання теоретичних і експериментальних досліджень роботи похилих буроін'єкційних паль у підсиленні фундаментів мілкого закладання, є на даний час важливими і актуальними.

В цій статті розглядаються теоретичні дослідження роботи похилих буроін'єкційних паль при підсиленні фундаментів мілкого закладання будівель і споруд.

Фундамент мілкого закладання після підсилення його похилими буроін'єкційними палями є залізобетонна рама, закріплена в ґрунтовому середовищі, де ригелем є ростверк (існуючий фундамент), а стояками - палі.

Припустимо, що паля під дією докладених до неї сил деформується згідно семи на рис. 1. Величина Z_1 , визначає точку K (точку нульових переміщень Т.Н.П.), вище якої реакція ґрунту діє з однієї сторони палі, а нижче - з протилежної.

Згідно розрахунковою схемою (рис. 1) несуча здатність палі за властивостями ґрунту основи за таких умов її роботи складається з:

- несучої здатності палі під нижнім її кінцем;
- несучої здатності палі від нижнього кінця палі до Т.Н.П.;
- несучої здатності палі від Т.Н.П. до голови палі.

Визначення першої та другої складової несучої здатності палі не викликає ускладнень. Для визначення третьої складової необхідно знайти відстань до Т.Н.П., після чого можна визначати несучу здатність палі і проводити її розрахунок на стійкість.

Знаходження Т.Н.П. Якщо враховувати "жорсткість надфундаментної частини будівлі, - прийняти ригель рами абсолютно жорстким, то розрахунок можна спростити, тобто проводити розрахунок окремої палі.

Розглянемо стрижень постійного поперечного перерізу за дії на нього вертикального і горизонтального навантажень від маси будівлі та просідаючого ґрунту. Частина стрижня довжиною Z_4 розміщена в пружно-деформованому середовищі. Оскільки деформування наді нижче Т.Н.П., незначне (гнучка паля), будемо рахувати в цій точці умовний шарнір [13].

Задачу будемо вирішувати виходячи з наступних припущень:

- ґрунт розглядається як пружно-деформоване середовище з лінійно зростаючим з глибиною коефіцієнтом жорсткості [14];
- враховуються сили тертя між стержнем і ґрунтом на робочих ділянках вертикальних граней;
- значення нормального тиску ґрунту на стержень у кожній точці його вертикальної робочої поверхні приймається прямопропорційним глибині розміщення цієї точки від поверхні непросідаючого ґрунту Z .

Для виведення розрахункових формул тиску ґрунту на передні і задні грані будемо враховувати, так звану, "розрахункову ширину стержня" (буроін'єкційної палі), яка визначається за формулою:

$$b_p = k_f b_0 d, \quad (1)$$

де d - діаметр поперечного перерізу палі;

$k_f = 0,9$ - коефіцієнт, який враховує вплив поперечного перерізу палі на опір ґрунту [3];

$b_0 = 1,5 + 0,5/d$ - коефіцієнт, який враховує фактичні умови роботи палі (просторові) в умовах плоскої задачі [3].

Тоді (1) матиме вигляд

$$b_p = k_f (0,5 + 1,5d) \quad (2)$$

Розглянемо випадок, коли паля знаходиться в однорідному середовищі. Під дією поздовжніх і поперечних сил паля деформується, повертаючись

навколо Т.Н.П. на кут β . При цьому на глибині Z' від поверхні непросідаючого ґрунту горизонтальне переміщення палі y' і тиск q_y відповідно дорівнюють

$$y' = (z_1 - z') \operatorname{tg} \beta \quad (3)$$

$$q_y = y' K' = (z_1 - z') \operatorname{tg} \beta K' z' / z_4 \quad (4)$$

де K' і K - коефіцієнти жорсткості основи при боковому тиску відповідно на глибині Z' і Z_4 .

Для визначення невідомої величини Z_1 , складемо рівняння рівноваги у вигляді рівності нулю всіх сил, які діють на вертикальну вісь Z і суми моментів всіх сил відносно Т.Н.П.

$$\sum z = 0; \quad -N - T \operatorname{tg} \beta + F_1 + F_2 = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum M(K) = 0; & Ny + T(y - d) / 4 \operatorname{tg} \beta + H(z_2 + z_1) + \\ & + G(z_3 + z_1) \operatorname{tg} \beta - F_1 d / 4 + F_2 d / 4 - \int_0^{z_4} q_y b_y z' dz = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

У виразах (5) і (6):

G - горизонтальне навантаження від просідаючого ґрунту з урахування розрахункової ширини палі;

T - втискує навантаження від просідаючого ґрунту

$$F_1 = \int_{z_4 - z_4}^{z_4} q_y f b_p dz \quad (7)$$

$$F_2 = \int_0^{z_4 - z_1} q_y f b_p dz, \text{ де} \quad (8)$$

f - коефіцієнт тертя ґрунту по бетону.

Підставивши значення q_y , F_1 та F_2 у вирази (5) і (6) після перетворень і інтегрування отримаємо

$$N = T \operatorname{tg} \beta + f \frac{K}{3z_4} b_p \operatorname{tg} \beta (z_4^3 - 5z_4^2 z_1 + 6z_4 z_1^2 - \frac{2}{3} z_1^3) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} N = & \frac{K b_p \operatorname{tg} \beta z_4}{y} \left(\frac{z_1 z_4}{3} + \frac{z_4}{4} + \frac{d z_1}{8} - \frac{d z_4}{12} - \right. \\ & \left. - \frac{h(z_2 + z_1)}{K b_p z_4} - \frac{G(z_3 + z_1)}{K b_p z_4} - \frac{T(y - d / 4)}{K b_p z_4} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Рішення виразів (9) і (10) разом зводиться до однорідного рівняння третього ступеня відносно невідомого z_1

$$A_3 z_1^3 - A_2 z_1^2 + A_1 z_1 - A_0 = 0, \quad (11)$$

$$A_3 = \frac{2fy}{3} \quad (12)$$

$$A_2 = 6fyz_4 \quad (13)$$

$$A_1 = 5fyz_4^2 + z_4^3 + \frac{3dfz_4^2}{4} + \frac{3z_4(H+G)}{Kb_p} \quad (14)$$

$$A_0 = fyz_4^3 + 3\frac{3z_4^4}{4} + \frac{dfz_4^3}{4} + \frac{3z_4(Hz_2 + Gz_3)}{Kb_p} + \frac{3z_4T(2y - d/4)}{Kb_p} \quad (15)$$

Горизонтальне переміщення u на рівні непросідаючих ґрунтів знаходиться за відомим методом [15].

В окремому випадку, за умови відсутності просідаючих ґрунтів, вирази (14) і (15) матимуть вигляд

$$A_1 = 5fyz_4^2 + z_4^3 + \frac{3dfz_4^2}{4} + \frac{3z_4H}{Kb_p} \quad (16)$$

$$A_0 = fyz_4^3 + 3\frac{3z_4^4}{4} + \frac{dfz_4^3}{4} \quad (17)$$

Враховуючи громіздкість отриманих виразів і складність розрахунку за ними доцільніше користуватися більш простими апробованими емпіричними залежностями з визначення відстані до Т.Н.П. [5]

$$z_1 = 12EI\beta\delta/H, \quad (18)$$

де β - емпіричний коефіцієнт, який характеризує взаємодію палі з ґрунтом.

Знайшовши відстань до Т.Н.П подальші розрахунки можна проводити згідно з методикою ДБН за запропонованою аналітичною залежністю

$$F_d = \gamma_c \frac{\pi d}{2} \cos \psi \sum_{i=1}^n [p_i(\operatorname{tg} \psi + \operatorname{tg} \varphi_{fi}) + c_{fi}] + \gamma_c \left[\pi d \sum_{i=1}^n f_i h_i \gamma_{cfi} + \gamma_{cR} \frac{\pi d^2}{4} \right], \quad (19)$$

де - $\gamma_c, \gamma_{cR}, \gamma_{cfi}, R, f_i, h_i$ - те ж, що і в формулі (3) [2]; $\varphi_{fi}, c_{fi}, p_i$ - те ж, що і у формулі (1) додатку № 2 [1]; d - діаметр поперечного перерізу палі; ψ - кут нахилу палі до вертикальної осі Z .

Перший член виразу (19) показує несучу здатність палі від Т.Н.П. до

голови палі, другий та третій відповідно несучу здатність палі від її нижнього кінця до Т.Н.П. та несучу здатність палі під нижнім її кінцем.

Висновки. Запропонована аналітична залежність з розрахунку несучої здатності, за властивостями ґрунту, похилої буроін'єкційної палі дозволяє врахувати особливості її роботи при підсиленні фундаментів існуючих будівель та споруд.

1. ДБН В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти споруд».

DBN V.2.1-10-2009 «Osnovy ta fundamenti sporud».

2. Мальцев А.Т., Сажин В.С. Исследование работы коротких свай в просадочных грунтах при воздействии наклонных сил деформации // Основания, фундаменты и механика грунтов. -1978. - № 6. - С. 15-17.

Maltsev A.T., Sazhyn V.S. Yssledovanye raboty korotkykh svai v prosadochnykh hruntakh pry vozdeistvyu naklonnykh syl deformatsyy // Osnovanyia, fundamenti y mekhanika hruntov. -1978. - № 6. - S. 15-17.

3. Карасев О.В., Таланта Г.П., Бенда С.Ф. Исследование работы одиночных буронабивных свай при различном сочетании нагрузок // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1980, - № 3. - С, 11-14.

Karasev O.V., Talanta H.P., Benda S.F, Yssledovanye raboty odynochnykh buronabyvnykh svai pry razlychnom sochetanyu nahruzok // Osnovanyia, fundamenti y mekhanika hruntov. - 1980, - № 3. - S, 11-14.

4. Фурсович М.О. Работа буроин'єкційних палей при підсиленні фундаментів будівель та споруд, - Автореферат дисертації. - 1997.

Fursovych M.O. Robota buroinieksiinykh pal pry pidsylenni fundamentiv budivel ta sporud, - Avtoreferat dysertatsii. - 1997.

5. Мишаков В.А., Раюк В.Ф. Исследование и расчет несущей способности инъекционных грунтовых анкеров. // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1989, №2, с. 6-8.

Myshakov V.A., Raiuk V.F. Yssledovanye y raschet nesushchei sposobnosti up'ektsyonnykh hruntovykh ankerov. // Osnovanyia, fundamenti y mekhanika hruntov. - 1989, №2, s. 6-8.

6. Дегиль Г.О. Определение диаметра корня инъекционного анкера по расходу цементного раствора. Изв. вузов. Стр-во и архит. - 1989, № 7 с. 122-124.

Dehyl H.O. Opredelenye dyametra kornia up'ektsyonnoho ankera po rashodu tsementnoho rastvora. Yzv. vuzov. Str-vo y arkhyt. - 1989, № 7 s. 122-124.

7. Баранов Н.Н., Клейнер И.М., Мирочник Н.С., Четиркин И.С. Влияние режима опресовки на несущую способность буроинъекционных свай. // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1991, № 3, с. 8-11.

Baranov N.N. Kleiner Y.M., Myrochnyk N.S., Chetyrkyn Y.S. Vlyianye rezhyma opresovky na nesushchiyu sposobnost buroup'ektsyonnykh svai. // Osnovanyia, fundamenti y mekhanika hruntov. - 1991, № 3, s. 8-11.

8. Бойко И.П., Дельник А.Е., Козак А.Л., Топор А.Г., Семенец И.А. О преимуществах полуаналитического метода конечных элементов при расчете свай. // Респ. межвед. научно-техн. сб. "Основания и фундаменты". Вып. 24, с. 10-12. - К.: "Будівельник", 1991.

Boiko Y.P., Delnyk A.E., Kozak A.L., Topor A.H., Semenets Y.A. O preymushchestvakh poluanalytycheskoho metoda konechnykh elementov pry raschete svai. // Resp. mezhved. nauchno-tekhn. sb. "Osnovanyia y fundamenti". Вып. 24, s. 10-12. - К.:

"Budivelnik", 1991.

9. Соболевский Д.С. Сопротивляемость дилатируемого несвязного грунта контактному сдвигу и внутреннему выпору. //Изв. вузов. Стр-во и архит. - 1978, № 2, с. 28-32.

Sobolevskiy D.Ie. Soprotyvliamost dylatyruemoho nesviaznoho hrunta kontaktnomu sdvyhu y vnutrennemu vyporu. //Yzv. vuzov. Str-vo y arkhyt. - 1978, № 2, s. 28-32.

10. Голубков В.Н., Тугаенко Е.Ф., Демчук С.Е. Полевые исследования развития деформаций в основаниях козловых и пирамидальных свай. // Респ. межвед. научно-техн. сб. "Основания и фундаменты". Вып. 8, с. 44-48. - К.: "Будівельник", 1975.

Holubkov V.N., Tuhaenko E.F., Demchuk S.E. Polevyye yssledovaniya razvytyia deformatsyi v osnovaniyakh kozlovykh y pyramydalnykh svai. // Resp. mezhved. nauchno-tekhn. sb. "Osnovaniya y fundamenty". Выр. 8, s. 44-48. - К.: "Budivelnik", 1975.

11. Зиязов Я.И., Денисов О.Л. Экспериментальные и теоретические исследования козловых свай. // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1981, №1, с. 13-16.

Zyiazov Ya.Y., Denysov O.L. Eksperymentalnye y teoretycheskiye yssledovaniya kozlovykh svai. // Osnovaniya, fundamenty y mekhanyka hruntov. - 1981, №1, s. 13-16.

12. Новский А.В. Экспериментальные исследования козловых и биклинарных свай с снованием. // Респ. межвед. научно-техн. сб. "Основания и фундаменты". Вып. 7, с. 73-76. - К.: "Будівельник", 1974.

Novskiy A.V. Eksperymentalnye yssledovaniya kozlovykh y byklynarnykh svai s sновaniem. // Resp. mezhved. nauchno-tekhn. sb. "Osnovaniya y fundamenty". Выр. 7, s. 73-76. - К.: "Budivelnik", 1974.

13. Огранович А.Б. Учет разрыва сплошности грунта при расчете пирамидальных свай на горизонтальную нагрузку. //Основания. фундаменты и механика грунтов. - 1991. XI 1, с. 22-24.

Ohranovych A.B. Uchet razryva sploshnosti hrunta pry raschete pyramydalnykh svai na horyzontalnuiu nahruzku. //Osnovaniya. fundamenty y mekhanyka hruntov. - 1991. XI 1, s. 22-24.

14. Громов Р.С., Шварцман Д.А., Зеленский В.С. Экспериментальные исследования возможности расчета горизонтально нагруженных свай с использованием коэффициента постели. //Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1986. № 3, Я 11-13

Hromov R.S., Shvartsman D.A., Zelenskiy V.S. Eksperymentalnye yssledovaniya vozmozhnosity rascheta horyzontalno nahruzhennykh svai s yspolzovanyem koэффтыsyenta postely. //Osnovaniya, fundamenty y mekhanyka hruntov. - 1986. № Z, Ya 11-13

15. Завриев К.С., Шпиро Г.С. Расчет фундаментов мостовых опор глубокого заложения. - М: «Транспорт». 1970.

Zavryev K.S., Shpyro H.S. Raschet fundamentov mostovykh opor hlubokoho zalozheniya. - M: «Transport». 1970.