

УДК 624.154

**ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ПОХИЛИХ
БУРОІН'ЄКЦІЙНИХ ПАЛЬ В ПРОСІДАЮЧИХ ҐРУНТАХ**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
НАКЛОННЫХ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ В ПРОСАДОЧНЫХ
ГРУНТАХ**

**TEORETICAL REASEACH OF STABILITY OBLIQUELY BORED PIELS
IN SABSIDENCE SOILS**

**Фурсович М.О., к.т.н., доц., Жеребятъев О.В., к.т.н., доц., Федорчук Г.Ф.,
доц.** (Національний університет водного господарства та
природокористування, м.Рівне)

**Фурсович М.А., к.т.н., доц., Жеребятъев А.В., к.т.н., доц., Федорчук Г.Ф.,
доц.** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования,
г.Ровно)

Fursovich M.O., phd, Zherebiatiev O.V., phd, Fedorchook G.F., (National
university of water management and nature resorsces use, Rivne)

**Розглянуто теоретичні питання розрахунку стійкості похилих
буроін'єкційних паль при підсиленні фундаментів мілко́го закладання
явності та відсутності просідаючих ґрунтів.**

**Рассмотрены теоретические вопросы расчета устойчивости наклонных
буроинъекционных свай при усилении фундаментов мелкого заложения
при личии и отсутствии просадочных грунтов.**

**The theoretical calculation of the stability issues inclined root piles at
strengthening the availability of a shallow foundation and the lack of soil
subsidence.**

Ключові слова:

буроін'єкційна паля, просідаючий ґрунт, стійкість
буроін'єкційна паля, просадочный ґрунт, устойчивость
bored piels, subsidence soil, stability

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

грунти) 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 (а 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. В окремих випадках підсилення фундаментів проводиться похилими буроін'єкційними палями.

Фундамент мілкого закладання після підсилення його похилими буро

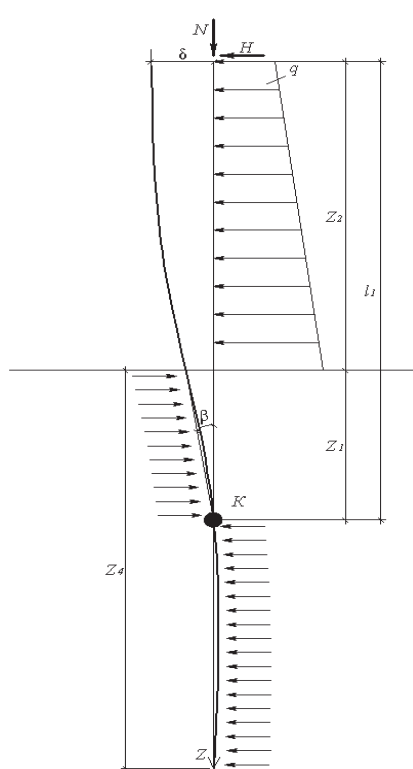


Рис.1. Розрахункова схема палі

ін'єкційними палями є залізобетонна рама, закріплена в ґрунтовому середовищі, де ригелем є ростверк (існуючий фундамент), а стояками - палі. На раму діють навантаження від надземної частини будівлі, а, в окремому випадку, і маси просідаючого ґрунту при замочуванні останнього. За таких умов роботи палі виникають певні ускладнення під час визначення її несучої здатності за властивостями ґрунту основи. Крім того, враховуючи значну гнучкість буроін'єкційної палі, в цьому випадку постає й питання розрахунку її на стійкості.

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

Припустимо, що паля під дією докладених до неї сил деформується згідно схеми 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. скільки деформування наді нижче ТНІ, незначне (гнучка паля), будемо рахувати в цій точні умовний шарнір [1]. Отже, спочатку потрібно знайти Т.Н.П., після чого можна визначати несучу здатність палі і проводити її розрахунок на стійкість. В цій статті розглянуто лише питання які стосуються знаходження Т.Н.П. і гранично допустимого стискующего навантаження на палю.

Знаходження Т.Н.П. Розглянемо стрижень постійного поперечного перерізу за дії на нього вертикального і горизонтального навантажень від маси будівлі та просідаючого ґрунту. Частина стержня довжиною Z_4 розміщена в пружно-деформованому середовищі.

Задачу будемо вирішувати виходячи з наступних припущень:

- ґрунт розглядається як пружно-деформоване середовище з лінійно зростаючим з глибиною коефіцієнтом жорсткості [2];
- 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];

$k_0 = 1,5 + 0,5/d$ - 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

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

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

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 і вигляді рівності нулю всіх сил, які діють на вертикальну вісь Z і суми моментів всіх сил відносно Т.Н.П.

$$\sum z = 0; \quad -N - Ttg\beta + F_1 + F_2 = 0 \quad (5)$$

$$\sum M(K) = 0; \quad Ny + T(y-d)/4tg\beta + H(z_2 + z_1) + G(z_3 + z_1)tg\beta - F_1d/4 + F_2d/4 - \int_0^{z_4} q_y b_y z' dz = 0 \quad (6)$$

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

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

$$N = \frac{K b_p tg\beta z_4}{y} \left(\frac{z_1 z_4}{3} + \frac{z_4}{4} + \frac{dfz_1}{8} - \frac{dfz_4}{12} - \frac{h(z_2 + z_1)}{K b_p z_4} - \frac{G(z_3 + z_1)}{K b_p z_4} - \frac{T(y-d/4)}{K b_p z_4} \right) \quad (10)$$

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 y на рівні непросідаючих ґрунтів знаходиться за відомим методом [3].

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

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

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

Розрахунок палі на стійкість. Для визначення критичного значення сти-суючого навантаження скористаємося енергетичним методом [4]. Запишемо загальний вигляд кривої прогинів стержня у вигляді виразу [4]

$$y = \delta(1 - \cos \pi z / 2l) \quad (18)$$

Такий вигляд кривої прогинів має місце за дії одного зосередженого поздовжнього навантаження. За одночасної дії поздовжнього зосередженого навантаження та поперечного і поздовжнього розподіленого навантажень від просідаючого ґрунту дійсна крива прогинів буде більш складною. Проте вираз (18) задовольняє дійсним умовам закріплення кінців стержня і може бути прийнятий для розрахунку [4].

Вертикальне переміщення верхнього кінця стержня буде

$$\lambda = \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dy}{dz}\right)^2 dz = \frac{\delta^2 \pi^2}{16l_1} \quad (19)$$

Робота виконана поздовжнім навантаженням N при згині становить

$$\Delta W_2 = \frac{N\delta^2 \pi^2}{16l_1} \quad (20)$$

Робота виконана поздовжнім розподіленим навантаженням від просідаючого ґрунту:

- постійним

$$\Delta W_2 = \frac{1}{2} f_1 \int_0^{z_2} \left(\frac{dy}{dz}\right)^2 dz = \frac{f_1 \delta^2 \pi^2 z_2}{8l_1^2} - \frac{f_1 \delta^2 \pi}{8l_1} \sin \frac{\pi z_2}{l_1} \quad (21)$$

- змінним

$$\Delta W_3 = \frac{1}{2} f_2 \int_0^{z_2} \frac{z}{z_2} \left(\frac{dy}{dz}\right)^2 dz = \frac{f_2 \delta^2 \pi^2 z_2}{32l_1^2} - \frac{f_2 \delta^2 \pi}{16l_1} \sin \frac{\pi z_2}{l_1} + -\frac{f_2 \delta^2}{4z_2} \sin^2 \frac{\pi z_2}{2l_1} \quad (22)$$

Робота виконана поперечним розподілим навантаженням від просідаючого ґрунту:

- постійним

$$\Delta W_4 = \frac{q_1}{2} \int_0^{z_2} y dz = \frac{q_1 \delta z_2}{4} - \frac{q_1 \delta l_1}{\pi} \sin \frac{\pi z_2}{2l_1} \quad (23)$$

- змінним

$$\Delta W_5 = \frac{q_2}{2} \int_0^{z_2} \frac{z}{z_2} y dz = \frac{q_2 \delta z_2}{4} - \frac{q_2 \delta l_1}{\pi} \sin \frac{\pi z_2}{2l_1} + -\frac{4q_2 \delta l_1}{z_2 \pi^2} \sin^2 \frac{\pi z_2}{4l_1} \quad (24)$$

Енергія деформації згину стержня

$$\Delta V_1 = \frac{EI}{2} \int_0^{l_1} \left(\frac{d^2 y}{dz^2}\right)^2 dz = \frac{EI \delta^2 \pi^2}{64l_1^3} \quad (25)$$

Енергія деформації ґрунтового середовища

$$\Delta V_2 = \frac{K}{2} \int_0^{z_1} \frac{z}{z_1} y^2 dz = \frac{3K \delta^2 l_1^2}{8} + \frac{8K \delta^2 l_1^2}{z_1 \pi^2} \sin^2 \frac{\pi z_1}{4l_1} + \frac{K \delta^2 l_1}{4\pi} \sin \frac{\pi z_1}{l_1} - \frac{2K \delta^2 l_1^2}{\pi} \sin \frac{\pi z_1}{2l_1} - \frac{K \delta^2 l_1^2}{2z_1 \pi^2} \sin^2 \frac{\pi z_1}{2l_1} \quad (26)$$

Критичне значення поздовжнього навантаження, у разі перевищення якого порушується стійкість системи "паля - ґрунт" отримаємо, прирівнявши суму виразів (20)-(24) та (25), (26). Після перетворень отримаємо

$$N_{zp} = \frac{EI \pi^2}{4l_1^2} + \frac{4Kl_1}{\pi^2} A_k - 2(f_1 A_{1f} + f_2 A_{2f}) - \frac{8l_1}{\delta \pi} (q_1 A_{1q} + q_2 A_{2q}) \quad (27)$$

де

$$A_k = 1,5z_1 + \frac{32}{z_1\pi^2} \sin^2 \frac{\pi z_1}{4l_1} + \frac{l_1}{\pi} \sin \frac{\pi z_1}{l_1} - \frac{8l_1}{\pi} \sin \frac{\pi z_1}{2l_1} - \frac{2l_1^2}{z_1\pi^2} \sin^2 \frac{\pi z_1}{2l_1} \quad (28)$$

$$A_{1f} = \frac{z_2}{l_1} + \frac{1}{\pi} \sin \frac{\pi z_2}{l_1} \quad (29)$$

$$A_{2f} = \frac{z_2}{2l_1} - \frac{1}{\pi} \sin \frac{\pi z_2}{l_1} - \frac{l_1}{z_2\pi^2} \sin^2 \frac{\pi z_2}{2l_1} \quad (30)$$

$$A_{1q} = z_2 - \frac{2l_1}{\pi} \sin \frac{\pi z_2}{2l_1} \quad (31)$$

$$A_{2q} = \frac{z_2}{2} - \frac{2l_1}{\pi} \sin \frac{\pi z_2}{2l_1} - \frac{8l_1}{z_2\pi^2} \sin^2 \frac{\pi z_2}{4l_1} \quad (32)$$

У випадку відсутності просідаючих ґрунтів вираз (27) матиме вигляд

$$N_{zp} = \frac{EI\pi^2}{4l_1^2} + \frac{4Kl_1}{\pi^2} \quad (33)$$

Перші члени виразів (27) і (33) показують опір наді поздовжньому навантаженню від маси будівлі (навантаження Ейлера), другі - опір ґрунтового середовища непросідаючої основи. Третій і четвертий члени виразу (27) показують вплив навантаження від просідаючого ґрунту на стійкість палі.

Аналіз виразів (27) і (33) показує, що збільшення коефіцієнта жорсткості основи веде до збільшення гранично допустимого стискуючого навантаження. Поперечні і поздовжні навантаження від просідаючого ґрунту зменшують стійкість палі в ґрунтовому середовищі. Таким чином, визначення гранично допустимого стискуючого навантаження, яке витримує паля, слід проводити з урахуванням додаткових навантажень від просідаючого ґрунту.

1. Огранович А.Б. Учет разрыва сплошности грунта при расчете пирамидальных свай на горизонтальную нагрузку. //Основания, фундаменти и механика грунтов. - 1991. XI 1, с. 22-24. 2. Громов Р.С., Шварцман Д.А., Зеленский В.С. Экспериментальные исследования возможности расчета горизонтально нагруженных свай с использованием коэффициента постели. //Основания, фундаменти и механика грунтов. - 1986. № 3, Я 11-13 3. Завриев К.С., Шпиро Г.С. Расчет фундаментов мостовых опор глубокого заложения. - М: «Транспорт». 1970. 4, Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. - М.: Гостехиздат. 1955.