

Єсакова С.В.

Харківський національний університет будівництва та архітектури

Чепурний Д.О.

Харківський національний університет будівництва та архітектури

РОЗРАХУНОК ГОРИЗОНТАЛЬНО НАВАНТАЖЕНИХ ПАЛЬ, ЗАТИСНУТИХ У РОСТВЕРК, З УРАХУВАННЯМ ТРИВАЛОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ

У зв'язку з будівництвом будівель та споруд у стиснених умовах міст, а також складними інженерно-геологічними умовами, відбувається суттєве зростання використання пальових фундаментів та пальових огорожувальних конструкцій котлованів. Крім того, пальові опори є найпоширенішою конструкцією мостів, спортивних, торгових та інших споруд.

Особливість роботи паль у зазначених умовах полягає в тому, що, крім вертикальних навантажень, на палі передаються найчастіше значні поперечні навантаження, що суттєво ускладнюють роботу системи «паль-грунт». Вперше «Посібник із проектування пальових фундаментів» (далі «Керівництво») [6], що містить вказівки з врахуванням горизонтальних та моментних навантажень, з'явився в 1980 році.

Потім було видано СНиП 2.02.03-85 [7], а у 2011 році з'явився ДБН В.2.1.10-2009 Зміна № 1 [3], у яких, як і раніше, рекомендована розрахункова модель основи з жорсткістю, що лінійно зростає за глибиною. Однак, за ці роки накопичилися нові експериментально-теоретичні дослідження, що дозволяють істотно скоригувати положення чинних норм, а крім того, у ряді випадків отримувати економніші або надійніші споруди.

Повзучість Вінклерової основи призводить до нерівномірної зміни контактної напруги фундаментів і горизонтально навантажених паль, а також до нерівномірного зростання деформацій конструкцій у часі. Нормативна методика не враховує впливу тривалості поперечного навантаження паль на зміну їх напружено-деформованого стану в часі.

Ключові слова: горизонтально навантажені палі, деформування, ростверк, горизонтальний тиск, напружено-деформований стан.

Постановка проблеми. В даний час розроблено велику кількість методів, що дозволяють визначати горизонтальні переміщення палі, розподіл згинальних моментів та поперечних сил за її довжиною. Більшість методів ідеалізує ґрунтове середовище у вигляді тієї чи іншої моделі, хоча є й група суто емпіричних методів. Головну роль роботі системи «горизонтально навантажена паль-грунт» у стадії експлуатації грає прийнята модель ґрунтової основи, оскільки жорсткісні характеристики самої палі зазвичай можуть при горизонтальних переміщеннях голови палі, що допускаються, визначатися за законами опору матеріалів.

Необхідно виявити модель ґрунтового середовища, що більш достовірно описує її взаємодію з поперечно навантаженою палею, і розробити методику розрахунку системи «паль-грунт» з врахуванням впливу навантаження у часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільшого поширення набув метод, розроблений

К.С. Заврієвим та Г.С. Шпіро [4], включений до «Керівництва» [6], СНиП 2.02.03-85 [7] і використований рядом авторів. У запропонованому методі розглянуто основу з лінійно зростаючим коефіцієнтом постелі за можливих граничних умов, введено поняття умовної ширини палі, що дозволило врахувати просторову роботу ґрунту; розроблені таблиці значень коефіцієнта пропорційності K в залежності від характеристик ґрунту та виду паль, розроблена методика розрахунку пальових ростверків при впливі горизонтальних та моментних навантажень.

В основу методу покладено рішення тонких підпірних стінок І.В. Урбана [8], який, використовуючи рівняння методу початкових параметрів, отримав формули для визначення переміщень, кутів повороту, згинальних моментів та поперечних сил при трикутній епюрі коефіцієнта постелі.

Для обліку просторової роботи палі у роботі К.С. Заврієва та Г.С. Шпіро [4] введена умовна ширина палі, рівна:

для $d \leq 1$ м

$$b_p = k_{\phi} \cdot (1.5 \cdot d + 0.5);$$

для $d > 1$ м

$$b_p = k \cdot k_{\phi} \cdot (d + 1).$$

де k_{ϕ} – коефіцієнт, що враховує форму поперечного перерізу палі;

k – коефіцієнт, що враховує взаємний вплив паль;

d – ширина поперечного перерізу палі, м.

Основний розрахунковий ґрунтовий параметр – коефіцієнт пропорційності K , дорівнює тангенсу кута нахилу епюри коефіцієнта постелі. Тобто коефіцієнт постелі на глибині z дорівнює $C_z = K \cdot z$ і визначається за результатами випробувань натурних паль на горизонтальне навантаження. Методика розрахунку передбачає, що палі та ґрунт ідеально пружні тіла, і тому залежність між навантаженням та переміщеннями виявляється лінійною. При невеликих (до 1 см) переміщення голови палі розрахунки за зазначеною методикою дають хороше наближення до експериментальних даних; проте при переміщеннях, що перевищують 1 см, виходить інша картина, так як теоретична залежність «навантаження – переміщення» лежатиме вище експериментальної.

Н.Х. Арутюнян [1], С.С. В'ялов [2], І.Є. Прокопович [5], розглядаючи вирішення плоскої задачі при дії поверхневих сил, дійшли дуже важливого висновку про те, що вплив фактору часу безпосередньо позначається лише на величині переміщень, що наростають. Напружений стан при $\mu_t = \text{const}$ зберігається відповідним пружно-миттєвим рішенням і змінюється тільки при зміні в часі зовнішнього навантаження.

Масштабні дослідження повзучості ґрунту та циклічного завантаження горизонтально навантажених паль у ґрунтах різного типу. E. Conte, A. Troncone, M. Vena [10], Spyros Giannakos, Nikos Gerolymos, George Gazetas [11], Alam Singh, Shamsher Prakash [9] підтверджують виникнення пластичних деформацій розрахунком у програмах із використанням кінцево-елементної моделі.

Формулювання цілей статті. Для розрахунку конструкцій, що контактують з основою яка має реологічні властивості: повзучість основи призводить до зниження її жорсткості під навантаженням, викликаючи перерозподіл контактних напруг, і, як наслідок, зміну напруженого стану основи в часі.

Існуючі нормативні дані про величини коефіцієнта пропорційності K отримані в основному при дії короткочасного статичного навантаження. Наприклад, у ДБН [3] дано коефіцієнти пропорційності, визначені як січені до кривої «наван-

таження-переміщення» в точці, де переміщення голови палі дорівнює $y_0 = 1$ см.

Нормативна методика не враховує впливу тривалості поперечного навантаження паль на зміну їх напружено-деформованого стану в часі. Це потребує проведення подальших досліджень.

Основний матеріал. Повзучість Вінклерової основи призводить до нерівномірної зміни контактної напруги фундаментів і горизонтально навантажених паль, а також до нерівномірного зростання деформацій конструкцій у часі.

У початковий момент навантаження конструкції зв'язок між контактним тиском і осадкою деякої точки підошви фундаменту V_0 описується елементарною лінійною залежністю типу закону Гука

$$V_0 = \frac{\sigma_0}{C_0},$$

де σ_0 – контактна напруга, тс / м²;

C_0 – коефіцієнт постелі, тс/м³.

При тривалому навантаженні фундаментів (паль) на основі, що має реологічні властивості, зв'язок V_t величин C_t і σ_t істотно ускладнюється та описується інтегральними рівняннями низки теорій пружно-повзучого тіла (старіння, спадковості та ін.), що враховують закони зміни контактних напружень та властивостей матеріалів у часі.

Що стосується загальноприйнятої моделі основи з лінійно зростаючим пружно-миттєвим коефіцієнтом постелі C_0^z , представимо закон деформування ґрунту при тривалому завантаженні, використовуючи передумови теорії «старіння» у вигляді [1]

$$y_t^z = \frac{\sigma_t^z}{C_0^z \cdot b_p} + \frac{(\sigma_0^z + \sigma_t^z)}{2 \cdot C_0^z \cdot b_p} \varphi_t, \quad (1)$$

де

$$C_0^z = K \cdot z; \quad (2)$$

φ_t – характеристика повзучості основи;

b_p – розрахункова ширина палі, м;

K – пружно-миттєвий коефіцієнт пропорційності, тс / м⁴;

σ_0^z , σ_t^z – навантаження від палі на одиницю довжини основи в довільний момент часу $\tau = (\theta, t)$, тс/м².

Представимо вихідне диференціальне рівняння вигину палі при тривалому навантаженні у такому вигляді

$$EI \cdot \frac{\partial^4 y_t^z}{\partial z^4} + \sigma_t^z = 0, \quad (3)$$

потім з (1) знайдемо σ_t^z :

$$\sigma_t^z = \frac{2 \cdot C_0^z \cdot b_p \cdot y_t^z - \sigma_0^z \cdot \varphi_t}{2 + \varphi_t}. \quad (4)$$

Підставивши (4) в (3), отримаємо вихідне рівняння вигину палі

$$\frac{\partial^4 y_t^z}{\partial z^4} + \frac{2 \cdot K \cdot b_p}{(2 + \varphi_t) \cdot EI} \cdot z \cdot y_t^z = \frac{\varphi_t \cdot b_p}{(2 + \varphi_t) \cdot EI} \cdot \sigma_0^z \quad (5)$$

Здійснивши заміну змінної, після низки перетворень знайдемо

$$\frac{\partial^4 y_t^{\bar{z}}}{\partial \bar{z}^4} + \bar{z}_t \cdot y_t^{\bar{z}} = \frac{\varphi_t \cdot \beta_t}{2 \cdot K \cdot b_p} \cdot \sigma_0^{\bar{z}} \quad (6)$$

де

$$\beta_t = \sqrt[5]{\frac{2 \cdot K \cdot b_p}{(2 + \varphi_t) \cdot EI}}; \bar{z}_t = \beta_t \cdot z.$$

Пружно-миттєве рішення для паль, затиснених у ростверк, відповідно до «Керівництва» [6], може бути отримано із загального випадку завантаження палі на рівні поверхні силою Q_0 і моментом M^0 при рівності нулю кута повороту φ^0 на початку координат.

Однак, в даному випадку, рішення $t=0$ можна спростити.

Використовуючи рішення І.В. Урбана [8], при $\varphi^0=0$ отримуємо в пружній стадії

$$\left. \begin{aligned} y^z &= y^0 \cdot A_1^z + \frac{M^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot C_1^z + \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot D_1^z; \\ -\frac{\varphi^z}{\beta_0} &= y^0 \cdot A_2^z + \frac{M^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot C_2^z + \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot D_2^z; \\ \frac{M^z}{\beta_0^3 \cdot EI} &= y^0 \cdot A_3^z + \frac{M^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot C_3^z + \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot D_3^z; \\ \frac{Q^z}{\beta_0^3 \cdot EI} &= y^0 \cdot A_4^z + \frac{M^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot C_4^z + \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot D_4^z. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Приймаючи для нижнього кінця палі умову $Q^H=0$; $M^H=0$, із двох нижніх рівнянь (7) отримуємо

$$\left. \begin{aligned} M^0 &= -\frac{Q^0}{\beta_0} \cdot V^H; \\ y^0 &= \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot T^H, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де V^H, T^H – нові функції, що залежать від довжини палі H .

$$\left. \begin{aligned} V_0^H &= \frac{A_3^H \cdot D_4^H - A_4^H \cdot D_3^H}{A_3^H \cdot C_4^H - A_4^H \cdot C_3^H}; \\ T_0^H &= \frac{C_3^H \cdot D_4^H - C_4^H \cdot D_3^H}{A_3^H \cdot C_4^H - A_4^H \cdot C_3^H}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Таким чином, з (9) маємо можливість знайти M^{\max^0} і y^{\max^0} , а $\varphi^0=0$ і Q^{\max^0} задані як початкові параметри.

Далі із системи (7) та (8) знайдемо величини деформацій та зусиль у пружній стадії

$$\left. \begin{aligned} y^z &= \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot (A_1^z \cdot T_0^H - C_1^z \cdot V_0^H + D_1^z); \\ -\varphi^z &= \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot (A_2^z \cdot T_0^H - C_2^z \cdot V_0^H + D_2^z); \\ M^z &= \frac{Q^0}{\beta_0} \cdot (A_3^z \cdot T_0^H - C_3^z \cdot V_0^H + D_3^z); \\ Q^z &= Q^0 \cdot (A_4^z \cdot T_0^H - C_4^z \cdot V_0^H + D_4^z). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Тоді розподіл контактних напруг у пружній стадії, відповідно до закономірності (2) та рішення (10), визначається залежністю

$$\sigma_0^z = \beta_0 \cdot \bar{z} \cdot Q^0 \cdot (A_1^z \cdot T^H - C_1^z \cdot V^H + D_1^z), \quad (11)$$

де

$$\beta_0 = \sqrt[5]{\frac{K \cdot b_p}{EI}}, \bar{z} = \beta_0 \cdot z.$$

Відповідно до виразу (11) вихідне диференціальне рівняння (6) отримує такий вигляд

$$\frac{\partial^4 y(\bar{z}, t)}{\partial \bar{z}^4} + \bar{z}_t y_t^x = \frac{\varphi_t}{2K \cdot b_p} \beta_0 \beta_t \cdot \bar{z} \cdot Q_0 (A_1^z \cdot T^H - C_1^z \cdot V^H + D_1^z). \quad (12)$$

Рішенням цього рівняння є сума окремого рішення «и» та загального рішення «с».

Окреме рішення шукаємо у вигляді

$$u = r_1 \cdot A_1^0 + r_2 \cdot C_1^0 + r_3 \cdot D_1^0. \quad (13)$$

Диференціюючи (13), отримуємо

$$\frac{\partial^4 u}{\partial z^4} = r_1 \cdot (A_1^0)^{IV} + r_2 \cdot (C_1^0)^{IV} + r_3 \cdot (D_1^0)^{IV}. \quad (14)$$

Використовуючи функції І.В. Урбана [8], можна показати, що існує співвідношення:

$$\frac{\partial^4 u}{\partial z^4} = -\beta_0 \cdot z \cdot (r_1 \cdot A_1^0 + r_2 \cdot C_1^0 + r_3 \cdot D_1^0), \quad (15)$$

а з використанням окремого рішення (13), рівняння (12) набуває наступної форми

$$\begin{aligned} (\beta_t - \beta_0)(r_1 \cdot A_1^0 + r_2 \cdot C_1^0 + r_3 \cdot D_1^0) &= \\ &= \frac{\varphi_t}{2K \cdot b_p} \beta_0^2 \cdot \beta_t \cdot Q_0 (A_1^0 \cdot T^H - C_1^0 \cdot V^H + D_1^0). \end{aligned} \quad (16)$$

Прирівнюючи коефіцієнти при функціях початкового навантаження A_1^0, C_1^0 і D_1^0 знайдемо значення коефіцієнтів r_i , а потім і окреме рішення

$$u = \frac{\varphi_t}{2 \cdot K \cdot b_p} \cdot \frac{\beta_0^2 \cdot \beta_t}{(\beta_t - \beta_0)} \cdot Q_0 \cdot (A_1^0 \cdot T^H - C_1^0 \cdot V^H + D_1^0). \quad (17)$$

Далі представимо загальне рішення однорідного рівняння (12) (без правої частини) у вигляді

$$s = N_1 \cdot A_1^t + N_2 \cdot C_1^t + N_3 \cdot D_1^t. \quad (18)$$

На підставі (17) та (18) запишемо рівняння (6)

$$y(\bar{z}, t) = N_1 A_1^t + N_2 C_1^t + N_3 D_1^t + \quad (19)$$

$$+ \frac{\varphi_t \beta_0^2 \beta_t}{2K \cdot b_p (\beta_t - \beta_0)} \cdot Q^0 \cdot (A_1^0 T^H - C_1^0 V^H + D_1^0).$$

Довільні постійні отримуємо, використовуючи граничні умови

при $z = 0$: $y'(0, t) = 0; y'''(0, t) = \frac{Q^0}{EI}$;

при $z = H$: $y'(H, t) = 0; y'''(H, t) = 0$.

При цьому врахуємо, що:

$$A_2 = A'_1; A_3 = A'_2; A_4 = A'_3; B_2 = B'_1; \dots; D_4 = D'_3.$$

Відомо, що функції І.В. Урабана при $z = 0$ дорівнюють нулю, крім чотирьох, які дорівнюють одиниці:

$$A_1(0) = B_2(0) = C_3(0) = D_4(0) = 1.$$

Далі, диференціюючи рівняння (19) та використовуючи граничні умови, отримаємо систему рівнянь для визначення N_i .

За відсутності повороту на місці затискання палі в ростверк умова $y'(0, t) = 0$ задовольняється автоматично.

З умови $y'''(0, t) = \frac{Q^0}{EI}$ знаходимо

$$\beta_t^3 \cdot N_3 + \frac{\varphi_t \cdot \beta_0^5 \cdot \beta_t}{2 \cdot K \cdot b_p \cdot (\beta_t - \beta_0)} \cdot Q^0 = \frac{Q^0}{EI},$$

звідси

$$N_3 = \frac{Q^0}{\beta_t^3 \cdot EI} \cdot \left[1 + \frac{\varphi_t \cdot \beta_t}{2 \cdot (\beta_0 - \beta_t)} \right]. \quad (20)$$

Далі, використовуючи умови роботи нижнього кінця палі, отримаємо з (19) систему рівнянь із двома невідомими N_1 та N_2

$$\left. \begin{aligned} N_1 \cdot A_{3t}^H + N_2 \cdot C_{3t}^H &= \frac{\varphi_t}{2 \cdot \beta_0 \cdot \beta_t \cdot (\beta_0 - \beta_t) \cdot EI} \cdot Q^0 \cdot (A_{30}^H \cdot T_0^H - C_{30}^H \cdot V_0^H + D_{30}^H) - N_3 \cdot D_{3t}^H; \\ N_1 \cdot A_{4t}^H + N_2 \cdot C_{4t}^H &= \frac{\varphi_t}{2 \cdot \beta_t^2 \cdot (\beta_0 - \beta_t) \cdot EI} \cdot Q^0 \cdot (A_{40}^H \cdot T_0^H - C_{40}^H \cdot V_0^H + D_{40}^H) - N_3 \cdot D_{4t}^H. \end{aligned} \right\} (21)$$

Звернемо увагу на те, що відповідно до рішення (10), при $z = H$ функції, що стоять у дужках системи рівнянь (21), звертаються в нуль, а система спрощується до вигляду

$$\left. \begin{aligned} N_1 \cdot A_{3t}^H + N_2 \cdot C_{3t}^H &= -N_3 \cdot D_{3t}^H; \\ N_1 \cdot A_{4t}^H + N_2 \cdot C_{4t}^H &= -N_3 \cdot D_{4t}^H. \end{aligned} \right\} (22)$$

Це дозволяє, з урахуванням (20), знайти довільні постійні N_1 та N_2

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{(D_{4t}^H \cdot C_{3t}^H - D_{3t}^H \cdot C_{4t}^H)}{(A_{3t}^H \cdot C_{4t}^H - A_{4t}^H \cdot C_{3t}^H)} \cdot \frac{Q^0}{\beta_t^3 \cdot EI} \cdot \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right]; \\ N_2 &= \frac{(D_{3t}^H \cdot A_{4t}^H - D_{4t}^H \cdot A_{3t}^H)}{(A_{3t}^H \cdot C_{4t}^H - A_{4t}^H \cdot C_{3t}^H)} \cdot \frac{Q^0}{\beta_t^3 \cdot EI} \cdot \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right], \end{aligned} \right\} (23)$$

де

$$\lambda = \frac{\beta_0}{\beta_t} = \sqrt[5]{1 + \frac{\varphi_t}{2}}.$$

Відповідно до отриманого вище рішення (9), (10), вирази для довільних постійних (20) спростяться і будуть мати такий вигляд

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{Q^0}{\beta_t^3 \cdot EI} \cdot T_t^H \cdot \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right]; \\ N_2 &= -\frac{Q^0}{\beta_t^3 \cdot EI} \cdot V_t^H \cdot \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right], \end{aligned} \right\} (24)$$

де функції T_t^H та V_t^H визначаються за формулою (9) при $\beta = \beta_t$;

Використовуючи отримані перетворення, запишемо рішення рівняння (19) у вигляді:

$$y(z, t) = \frac{Q^0}{\beta_t^3 \cdot EI} \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\varphi_t \cdot \beta_t}{2 \cdot (\beta_0 - \beta_t)} \right] \cdot (A_{1t}^z \cdot T_t^H - C_{1t}^z \cdot V_t^H + D_{1t}^z) \cdot \lambda^3 - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot (A_{10}^z \cdot T_0^H - C_{10}^z \cdot V_0^H + D_{10}^z) \right\}. \quad (25)$$

З (25) можна отримати максимальні переміщення за $z = 0$.

$$y(0, t) = \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right] \cdot \lambda^3 \cdot T_t^H - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot T_0^H \right\}. \quad (26)$$

Враховуючи, що значення функцій T_0^H і T_t^H відрізняються незначною мірою, можемо наближено записати через $T_{cp} = \frac{T_0^H + T_t^H}{2}$:

$$y(0, t) \approx \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot T_{cp}^H \cdot \left[\lambda^3 + \frac{\varphi_t}{2} \cdot (\lambda^2 + \lambda + 1) \right], \quad (27)$$

тобто, рішення з урахуванням лінійної повзучості основи виходить шляхом множення результату пружно-миттєвого рішення на коефіцієнт, що враховує реологічні властивості основи.

Взявши послідовно похідні вирази (25), неважко отримати значення неважко отримати значення $\varphi(z, t)$ і $M(z, t), Q(z, t)$.

$$\left. \begin{aligned} -\varphi(z, t) &= \frac{Q^0}{\beta_0^2 \cdot EI} \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right] \cdot (A_{2t}^z \cdot T_t^H - C_{2t}^z \cdot V_t^H + D_{2t}^z) \cdot \lambda^2 - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot (A_{20}^z \cdot T_0^H - C_{20}^z \cdot V_0^H + D_{20}^z) \right\}; \\ M(z, t) &= \frac{Q^0}{\beta_0} \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right] \cdot (A_{3t}^z \cdot T_t^H - C_{3t}^z \cdot V_t^H + D_{3t}^z) \cdot \lambda - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot (A_{30}^z \cdot T_0^H - C_{30}^z \cdot V_0^H + D_{30}^z) \right\}; \\ Q(z, t) &= \frac{Q^0}{\beta_0} \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right] \cdot (A_{4t}^z \cdot T_t^H - C_{4t}^z \cdot V_t^H + D_{4t}^z) - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot (A_{40}^z \cdot T_0^H - C_{40}^z \cdot V_0^H + D_{40}^z) \right\}. \end{aligned} \right\} (28)$$

Встановимо зміни в часі згинального моменту в місці затиснення палі в ростверк. Якщо врахувати, що величини V_0^H і V_t^H практично рівні, то взявши їхнє середнє значення V_{cp}^H , нескладно отримати (29)

$$-M(0, t) \approx \frac{Q^0}{\beta_0} \cdot V_{cp}^H \cdot \left(\lambda + \frac{\varphi_t}{2} \right). \quad (29)$$

Більш точно отримаємо з (29)

$$-M(0, t) = \frac{Q^0}{\beta_0} \cdot \left[\left(1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right) \cdot \lambda \cdot V_t^H - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot V_0^H \right] \quad (30)$$

Що ж до величин $\varphi(0, t)$ і $Q(0, t)$, то неважко з рішення (28) зауважити, що вони не схильні до впливу повзучості підстави, тобто

$$\left. \begin{aligned} \varphi(0, t) &= 0; \\ Q(0, t) &= Q^0. \end{aligned} \right\}$$

Крім того, якщо використовувати одержане вище спрощення при $T^H = V^H = S^H$, то суттєво спроститься і рішення з урахуванням повзучості основи

$$\left. \begin{aligned} y(z,t) &= \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right] \cdot (R_{1t}^z \cdot S^H + D_{1t}^z) \cdot \lambda^3 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot (R_{1t}^z \cdot S^H + D_{1t}^z) \right\}; \\ -\varphi(z,t) &= \frac{Q^0}{\beta_0^2 \cdot EI} \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right] \cdot (R_{2t}^z \cdot S^H + D_{2t}^z) \cdot \lambda^2 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot (R_{2t}^z \cdot S^H + D_{2t}^z) \right\}; \\ M(z,t) &= \frac{Q^0}{\beta_0 \cdot EI} \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right] \cdot (R_{3t}^z \cdot S^H + D_{3t}^z) \cdot \lambda - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot (R_{3t}^z \cdot S^H + D_{3t}^z) \right\}; \\ Q(z,t) &= Q^0 \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \right] \cdot (R_{4t}^z \cdot S^H + D_{4t}^z) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot (R_{4t}^z \cdot S^H + D_{4t}^z) \right\}. \end{aligned} \right\} (31)$$

Приклад розрахунку.

Оцінимо вплив повзучості основи на величини згинальних моментів, поперечних сил, горизон-

тальних переміщень та кутів повороту в перерізах палі, защемленої в ростверк, завантаженої горизонтальною силою у поверхні ґрунту $Q^0 = 10$, за наступних умов:

$EI = 6.2 \cdot 10^3$ тс \cdot м²; $b = 0.4$ м; $H = 6$ м; розрахункова ширина палі $b_p = 1.1$ м. Ґрунт характеризується коефіцієнтом пропорційності: $K = 700$ тс/м⁴.

Розглянемо рішення за кількох значеннях показники повзучості: $\phi_t = 0 \div 3$.

1. Обчислюємо коефіцієнти деформації пружно-миттєвого та тривалого завантаження

$$\beta_0 = \sqrt[5]{\frac{K \cdot b_p}{EI}} = \sqrt[5]{\frac{700 \cdot 1.1}{6.2 \cdot 10^3}} = \sqrt[5]{0.1242} = 0.6589 \text{ м}^{-1}.$$

Підставляючи

$$\beta_t = \sqrt{\frac{2 \cdot K \cdot b_p}{(2 + \phi_t) \cdot EI}}$$

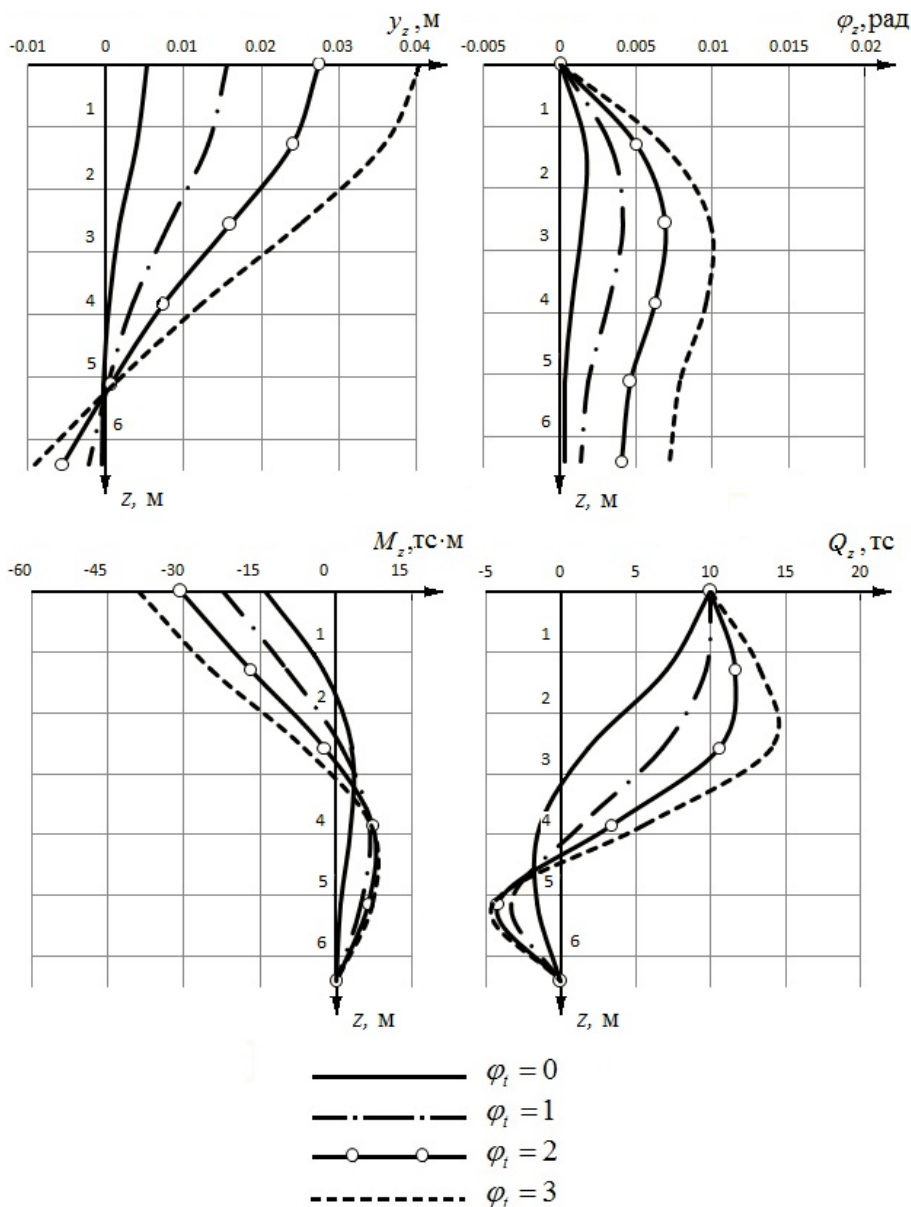


Рис. 1. Епюри y_z, φ_z, M_z і Q_z . Приклад розрахунку

характеристики повзучості $\phi_t = 0; 1; 2; 3$, відповідно визначимо

$$\beta_t = 0.6589; 0.6076; 0.6736; 0.5486;$$

а із співвідношення $\lambda = \frac{\beta_0}{\beta_t}$ відповідно отримаємо: 1; 1.09; 1.15; 1.2.

2. Пружно-миттєве переміщення голови палі.

За (19) та (18) при $H_0 = \beta_0 \cdot H \approx 4$:

$$T_0^H = \frac{C_3^H \cdot D_4^H - C_4^H \cdot D_3^H}{A_3^H \cdot C_4^H - A_4^H \cdot C_3^H} = 0.9396;$$

$$V_0^H = \frac{A_3^H \cdot D_4^H - A_4^H \cdot D_3^H}{A_3^H \cdot C_4^H - A_4^H \cdot C_3^H} = 0.9260;$$

$$y^0 = \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot T^H = \frac{10}{0.6589^3 \cdot 6.2 \cdot 10^3} \cdot 0.9396 = 0.5298 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$M^0 = -\frac{Q^0}{\beta_0} \cdot V^H = -\frac{10}{0.6589} \cdot 0.9260 = -14.053 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

3. Тривале навантаження (докладний розрахунок наведемо лише за характеристичні повзучості $\phi_t = 3$). Цікавить порівняти результати точного і наближеного рішень.

а) Величину прогину отримаємо з (26), при $H_t = \beta_t \cdot H = 3.5$:

$$T_t^H = \frac{62.81396}{64.7687} = 0.97282;$$

$$V_t^H = \frac{60.4747}{64.7687} = 0.9337;$$

$$y(0, t) = \frac{10}{0.6589^3 \cdot 6.2 \cdot 10^3} \cdot \left\{ 1 + \frac{3}{2 \cdot 0.2} \right\}.$$

$$\cdot 1.2^3 \cdot 0.96981 - \frac{\phi_t}{2 \cdot 0.2} \cdot 0.9396 \} = 0.04056 \text{ м}.$$

За наближеною формулою (27) отримаємо близьке значення

$$y(0, t) = \frac{10}{0.6589^3 \cdot 6.2 \cdot 10^3} \cdot 0.9547 \cdot \left[1.2^3 + \frac{3}{2} \cdot (1.2^2 + 1.2 + 1) \right] = 0.0387 \text{ м}.$$

б) Величину згинального моменту отримаємо з (31)

$$-M(0, t) = \frac{10}{0.6589} \cdot \left[\left(1 + \frac{3}{2 \cdot 0.2} \right) \cdot 1.2 \cdot 0.9337 - \frac{3}{2 \cdot 0.2} \cdot 0.926 \right] = 39.0997 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Графіки отриманих значень y_z , ϕ_z , M_z і Q_z залежно від z при $\phi_t = 0 \div 3$ представлені на рис. 1.

Висновки

1. При обліку повзучості ґрунтового масиву переміщення y_0 зростають, при $\phi_t = 3$ в 4 рази;

2. Зі зростанням ϕ_t максимальний згинальний момент в місці затискання палі в ростверк зростає, при $\phi_t = 3$ приблизно в 2.5 рази.

3. Аналізуючи отримані результати рішення з урахуванням повзучості ґрунтів основи можна дійти висновку у тому, що запропонований метод розрахунку дозволяє врахувати і специфічну роботу паль, і оцінити зміну напружено-деформованого стану аналізованої конструкції у часі.

Список літератури:

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.: Гостехиздат, 1952. 324 с.
2. Вялов С. С. Реологические основы механики ґрунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
3. ДБН В.2.1-10-2009. Зміна № 1. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 57 с.
4. Завриев К.С. Расчет фундаментов мостов глубокого заложения М. : Транспорт, 1970. 214 с.
5. Прокопович И.Е. Влияние длительных процессов на напряженное и деформированное состояния сооружения. М.: Госстройиздат, 1963. 260 с.
6. Руководство по проектированию свайных фундаментов. НИИОСП им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР. М. : Стройиздат, 1980. 151 с.
7. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты / НИИОСП, Фундаментпроект, Донецкий и Харьковский ПромстройНИИпроект и др. М. : Госстрой СССР, 1986. 45 с.
8. Урбан И.В. Расчет тонких стенок с учетом упругих свойств ґрунта и стенки. Труды МИИТ. 1939. Вып. 55. С. 17–26.
9. Alam Singh. Model pile group subjected to cyclic lateral load. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Soils and Foundations. June 1971. Vol. 11, No. 2. P. 51 – 60.
10. Conte E. Nonlinear three-dimensional analysis of reinforced piles subjected to horizontal loading. Computers and Geotechnics. 2013. № 49. P. 123–133.
11. Spyros Giannakos. Cyclic lateral response of piles in dry sand: Finite element modeling and validation. Computers and Geotechnics. 2012. № 44. P. 116–131.

Yesakova S.V., Cherpurnyi D.O. CALCULATION OF HORIZONTALLY LOADED PILES PRESSED INTO THE GROUND, TAKING INTO ACCOUNT THE DURATION OF DEFORMATION

In connection with the expanded volume of construction of buildings and structures in the compressed conditions of cities, as well as difficult engineering and geological conditions, there is a significant increase in the use of pile foundations and pile enclosure structures of pits. In addition, pile supports are the most common construction of bridges, sports, shopping and other structures.

The peculiarity of the operation of piles in the specified conditions is that, in addition to vertical loads, significant lateral loads are often transmitted to the piles, which significantly complicate the operation of the “pile-soil” system. For the first time, the “Pile Foundation Design Guide” (hereinafter “Guide”) [6], which contains instructions taking into account horizontal and moment loads, appeared in 1980.

Then SNiP 2.02.03-85 [7] was issued, and in 2011 DBN V.2.1.10-2009 Change No. 1 [3] appeared, which, as before, recommended the calculation model of the foundation with stiffness, which increases linearly with depth. However, over the years, new experimental and theoretical research has been accumulated, which allows to significantly adjust the provisions of the current norms, and in addition, in some cases, to obtain more economical or reliable structures.

The creep of the Winkler foundation leads to an uneven change in the contact stress of the foundations and horizontally loaded piles, as well as to an uneven increase in deformations of structures over time. The normative method does not take into account the influence of the duration of the transverse loading of the piles on the change in their stress-strain state over time.

Key words: *horizontally loaded piles, deformation, grid, horizontal pressure, stress-strain state.*