

УДК 624.154

С.Й. Цимбал, канд. техн. наук
О.В. Малишев**ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ УЩІЛЬНЕНИХ ЗОН ҐРУНТУ
НАВКОЛО БІЧНОЇ ПОВЕРХНІ ВДАВЛЮВАНИХ ПАЛЬ**

Проведено порівняння аналітичних методів розрахунку радіуса зони ущільнення ґрунту навколо бічної поверхні вдавлюваних палей з практичними результатами. Запропоновано методику побудови ущільненої зони навколо бічної поверхні квадратної та таврової палі.

З досвіду будівництва відомо, що влаштування фундаментів без виймання ґрунту супроводжується утворенням ущільнених зон, в межах яких відбувається зміна природних фізико-механічних характеристик ґрунту. Утворення таких зон дозволяє покращити основу фундаментів, підвищити їх несучу здатність та збільшити ефективність.

При польових дослідженнях несучої здатності палей таврового та квадратного поперечного перерізу вдалося визначити та зафіксувати зони переміщення та ущільнення ґрунту навколо їх бічної поверхні, що необхідно враховувати при розробці аналітичних методів визначення несучої здатності палей таврового поперечного перерізу. Тому дуже важливим етапом дослідження є побудова ущільненої зони аналітичним методом та її порівняння з практичними результатами.

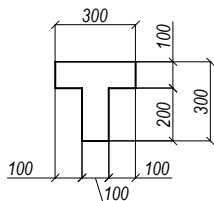


Рис. 1. Форма та розміри поперечного перерізу таврової палі

Експериментальні дослідження проводились з використанням палей квадратного (30x30 см) та таврового (рис. 1) поперечного перерізу, занурених на глибину 4 м в піски дрібної середньої щільності, малого ступеню водонасичення з наступними характеристиками: $\rho=16.28 \text{ кН/м}^3$, $\rho_d=15.6 \text{ кН/м}^3$, $\rho_s=26.1 \text{ кН/м}^3$, $e=0.671$, $W=0.043$, $\rho_w=1 \text{ т/м}^3$. Зони ущільнення і переміщення у бічній поверхні палей визначались за допомогою динамічного зондування,

відбором проб ґрунту у різке кільце, методом пенетрації та візуально при відкопуванні. Це дозволило побудувати зони переміщення та ущільнення ґрунту навколо стовбура таврової та квадратної палі (рис. 2).

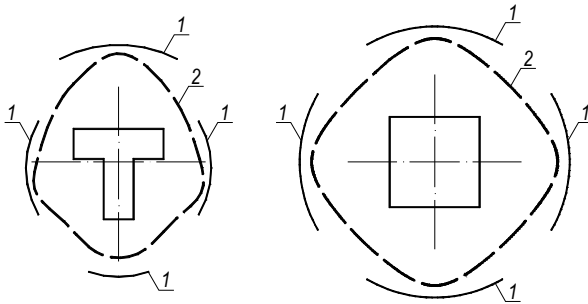


Рис.2. Зони ущільнення (1) та переміщення (2) ґрунту навколо дослідних паль, визначені в польових умовах

Для порівняння експериментальних даних з теоретичними, використовуються формули для визначення радіуса ущільненої зони, що наведені в роботах [1–3]

$$R_1 = \frac{r}{2} + \frac{r}{2} \sqrt{\frac{3(4+3e)}{e}}, \quad (1)$$

$$R_2 = r \left(\sqrt{4 + 6 \frac{m}{n} - 1} \right), \quad (2)$$

$$R_3 = \sqrt{\frac{2\pi r^2 \left(\frac{w\rho_d}{\rho_w} + \frac{\rho_d}{\rho_s} + V_{c.a} \right)}{1 - \left(\frac{w\rho_d}{\rho_w} + \frac{\rho_d}{\rho_s} + V_{c.a} \right)}} \cdot \frac{1}{\pi} + r^2, \quad (3)$$

де $V_{c.a}$ – об'єм затисненого повітря між агрегатами твердих частинок та водою, приймаємо $V_{c.a} \approx 0$; r – приведений радіус палі; e – коефіцієнт пористості ґрунту; m – відносний вміст твердих часток; n – пористість ґрунту.

Дані формули дають можливість визначити радіус ущільнення навколо зануреного у ґрунт циліндра. Форма поперечного перерізу дослідних паль не є круглою, і тому просте застосування даних формул не є коректним. З метою досягнення результатів, подібних до експериментальних, запропоновано дві методики побудови ущільненої зони навколо паль квадратного та таврового поперечного перерізу.

Вводимо умовні позначення: $R_{i,j}$ – радіуси ущільненої зони, напрямки яких відповідають формі ущільненої зони, отриманої експериментально (рис. 2), визначені по приведеному радіусу $r_i (i = I, II, III, \dots, n)$, за формулою $j (j = 1, 2, 3)$.

Для побудови ущільнених зон навколо стовбуру дослідних паль використовується наступний алгоритм.

1. В поперечному перерізі кожної палі виділяються окремі розрахункові елементи.

2. Для кожного елемента визначається приведений радіус r_i .

2.1. За першою методикою радіус r_i знаходиться як середнє арифметичне між описаним та вписаним радіусом кола окремого розрахункового елемента.

2.2. За другою методикою, прирівнявши площу кола до площі поперечного перерізу кожного окремого елемента (A_i), приведений радіус r_i знаходиться за формулою:

$$r_i = \sqrt{\frac{A_i}{\pi}}, \quad (4)$$

3. По приведеному радіусу r_i за формулами (1), (2), (3) визначаються радіуси ущільнення $R_{i,j}$.

4. Відкладаються значення $R_{i,j}$.

4.1. За першою методикою - з центра ваги кожного елемента.

4.2. За другою методикою - з центра ваги поперечного перерізу палі.

5. Вершини радіусів $R_{i,j}$ з'єднуються. В результаті цих дій отримується зона ущільненого ґрунту навколо стовбура паль.

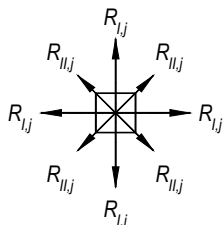


Рис. 3. Напрямки радіусів зони ущільнення навколо палі квадратного перерізу

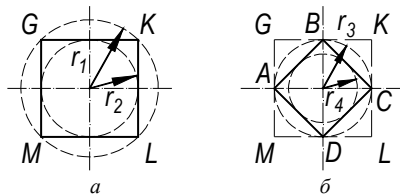


Рис. 4. Розрахункові елементи для визначення приведенного радіуса $r_1(a)$ та $r_1(b)$

Використовуючи даний алгоритм, виконаємо побудову ущільненої зони навколо дослідних паль за першою методикою. Визначаються радіуси ущільненої зони навколо квадратної палі по напрямкам, показаним на рис. 3. В поперечному перерізі палі виділяються два розрахункові елементи. Перший являє собою квадрат $GKLM$ (рис. 4.а) зі стороною 30см. Другий – квадрат $ABCD$ (рис. 4.б), вершини якого співпадають з центрами кожної сторони квадрата $GKLM$. Для першого елемента визначається приведений радіус r_1 , як середнє арифметичне значення між описаним та вписаним радіусом кола (r_1 , r_2) навколо квадрата $GKLM$ (рис.4.а):

$$r_1 = \frac{r_1 + r_2}{2} = \frac{(21,2 + 15,0)}{2} = 18,1 \text{ см}$$

За формулами (1), (2), (3) обчислюються величини радіусів ущільненої зони:

$$R_{I,1} = \frac{18,1}{2} + \frac{18,1}{2} \sqrt{\frac{3(4 + 3 \cdot 0,671)}{0,671}} = 56 \text{ см}; \quad R_{I,2} = 18,1 \left(\sqrt{4 + 6 \frac{0,6}{0,4}} - 1 \right) = 47 \text{ см};$$

$$R_{I,3} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 18,1^2 \cdot \left(\frac{0,043 \cdot 15,6}{10} + \frac{15,6}{26,1} \right)}{1 - \left(\frac{0,043 \cdot 15,6}{10} + \frac{15,6}{26,1} \right)}} \cdot \frac{1}{\pi} + 18,1^2 = 40,4 \text{ см}.$$

Так само визначається приведений радіус r_{II} , як середнє арифметичне між описаним та вписаним радіусом кола (r_3 , r_4) елемента ABCD, приведенного на рис. 4.б:

$$r_{II} = \frac{r_3 + r_4}{2} = \frac{(15,0 + 10,6)}{2} = 12,8 \text{ м}.$$

Радіуси зон ущільнення за формулами (1), (2), (3) складають: $R_{II,1} = 39,6 \text{ см}$, $R_{II,2} = 33,3 \text{ см}$, $R_{II,3} = 28,6 \text{ см}$. Отримані дані зводимо до табл. 1.

Аналогічним чином визначаються радіуси ущільненої зони навколо таврової палі за напрямками, зображеними на рис. 5.

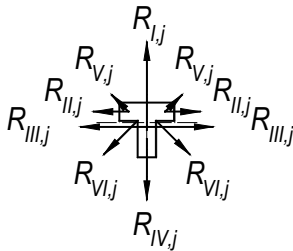


Рис. 5. Напрямки радіусів зони ущільнення навколо таврової палі за першою методикою

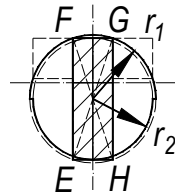


Рис. 6. Розрахунковий елемент для визначення приведенного радіусу r_I

Виділяються п'ять розрахункових елементів в поперечному перерізі таврової палі (рис. 6,7,8). Знаходиться приведений радіус r_I елемента EFGH (рис.6), як середнє значення між описаним та вписаним радіусом кола r_1 та r_2 .

$$r_1 = \frac{r_1 + r_2}{2} = \frac{15,8 + 15}{2} = 15,4 \text{ м}.$$

Радіуси ущільнення складають: $R_{I,1} = 47,6 \text{ см}$, $R_{I,2} = 40,0 \text{ см}$, $R_{I,3} = 34,4 \text{ см}$. За цією методикою визначаються приведені радіуси r_{II} , r_{IV} , r_V , r_{VI} , для

елементів, що зображені на рис. 7, та відповідні їм значення радіусів ущільнення: а) $R_{II,j}$, $R_{V,j}$; б) $R_{IV,j}$; в) $R_{VI,j}$ (див. табл. 1).

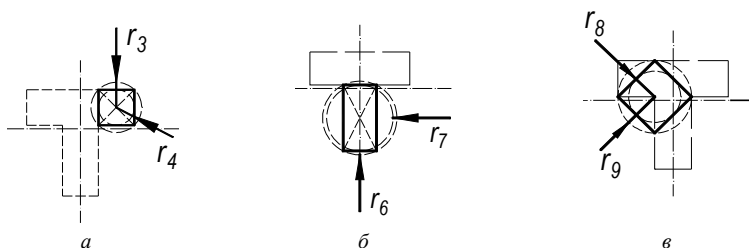


Рис.7. Розрахункові елементи для визначення приведеного радіуса: а - r_{II} , r_V ; б - r_{IV} ; в - r_{VI} .

$$r_{II} = r_V = \frac{r_3 + r_4}{2} = \frac{5 + 7}{2} = 6 \text{ см}; \quad r_{IV} = \frac{r_6 + r_7}{2} = \frac{10 + 11,2}{2} = 10,6 \text{ м};$$

$$r_{VI} = \frac{r_8 + r_9}{2} = \frac{7 + 10}{2} = 8,5 \text{ см}.$$

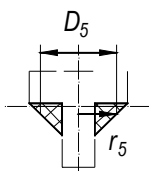


Рис.8. Розрахунковий елемент для визначення приведеного радіуса r_{III}

Встановлено, що навколо бічної поверхні таврової палі при її заглибленні утворюється «приєднана маса ґрунту» у вигляді трикутників, що приймає участь у її роботі. Тому приведений радіус r_{III} дорівнює половині відрізка D_5 , що проходить через центр ваги цих трикутників до перетину з їх гіпотенузами (рис.8):

$$r_{III} = r_5 = \frac{D_5}{2} = \frac{23,3}{2} = 11,7 \text{ м}.$$

Визначається радіус ущільнення $R_{III,j}$, а всі результати зводяться до табл.1. За даними табл.1 виконується побудова ущільненої зони ґрунту навколо паль квадратного та таврового поперечного перерізу (рис.9), визначеної за першою методикою.

Виконаємо побудову зони ущільнення за другою методикою.

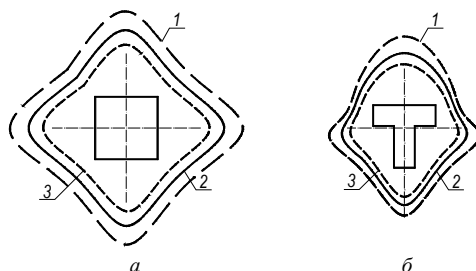


Рис. 9. Зони ущільнення ґрунту навколо паль квадратного (а) та таврового (б) перерізу, побудовані за першою методикою: 1 – за формулою (1); 2 – за формулою (2); 3 – за формулою (3)

Напрямки радіусів ущільнення квадратної палі зображено на рис. 3. В поперечному перерізі палі виділяються два розрахункові елементи. Перший являє собою квадрат $ABCD$ (рис. 10.а) зі стороною 30см, площа якого дорівнює $A_1=900 \text{ см}^2$. Другий – трикутник ABC (рис. 10.б), з площею $A_2=450 \text{ см}^2$. За формулою (4) визначаються приведені радіуси r_I та r_{II} :

$$r_I = \sqrt{\frac{900}{3,14}} = 16,9 \text{ см}; \quad r_{II} = \sqrt{\frac{450}{3,14}} = 12,0 \text{ см}.$$

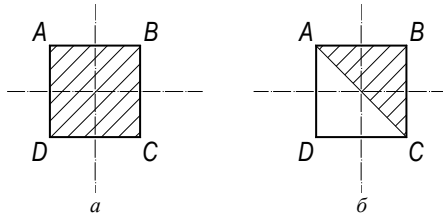


Рис. 10. Розрахункові елементи для визначення приведеного радіуса r_I (а) та r_{II} (б)

За формулами (1), (2), (3) по приведеному радіусу r_I обчислюються величини радіусів ущільненої зони:

$$R_{I,1} = \frac{16,9}{2} + \frac{16,9}{2} \sqrt{\frac{3(4+3 \cdot 0,671)}{0,671}} = 52,3 \text{ см};$$

$$R_{I,2} = 16,9 \left(\sqrt{4+6 \frac{0,6}{0,4}} - 1 \right) = 43,9 \text{ см};$$

$$R_{I,3} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 16,9^2 \cdot \left(\frac{0,043 \cdot 15,6}{10} + \frac{15,6}{26,1} \right)}{1 - \left(\frac{0,043 \cdot 15,6}{10} + \frac{15,6}{26,1} \right)}} \cdot \frac{1}{3,14} + 16,9^2 = 37,8 \text{ см}.$$

Радіуси зон ущільнення при r_{II} становлять: $R_{II,1}=37.1 \text{ см}$, $R_{II,2}=31.2 \text{ см}$, $R_{II,3}=26.8 \text{ см}$. Отримані дані зводимо до табл. 1.

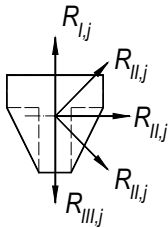


Рис. 11. Напрямки радіусів зони ущільнення навколо таврової палі за другою методикою

Аналогічним чином визначаються радіуси ущільненої зони навколо таврової палі за напрямками, показаними на рис. 11. Поперечний переріз палі приймається у вигляді шестикутника $EFGHJK$ (рис. 12.а), з урахуванням ущільнених зон.

Виділяються три розрахункові елементи (рис. 12): а) $EFGHJK$; б) $EFLM$; в) $EFJK$. Площа окремого елемента та приведені радіуси складають: а) $A_1=700 \text{ см}^2$, $r_I=15.0 \text{ см}$;

б) $A_2=350 \text{ см}^2$, $r_{II}=10.6 \text{ см}$; в) $A_3=400 \text{ см}^2$, $r_{III}=11.3 \text{ см}$. Відповідні радіуси ущільнення $R_{i,j}$ приведені в табл. 1.

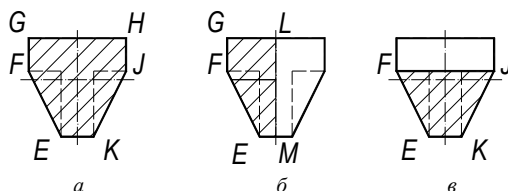


Рис. 12. Розрахункові елементи для визначення: а - A_1 , r_I ; б - A_2 , r_{II} ; в - A_3 , r_{III} .

За даними табл. 1 виконується побудова ущільненої зони ґрунту навколо паль квадратного та таврового поперечного перерізу за другою методикою (рис. 13).

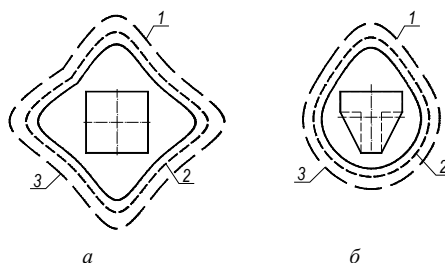


Рис. 13. Зони ущільнення ґрунту навколо паль квадратного (а) та таврового (б) перерізу, побудовані за другою методикою: 1 – за формулою (1); 2 – за формулою (2); 3 – за формулою (3)

Значення радіусів ущільнення та переміщення ґрунту навколо стовбура дослідних паль, що отримані при польових дослідженнях та наведені в табл. 1, представлені для точок, з яких відкладаються відповідні радіуси, визначені аналітично. Відсутність певних даних пояснюється тим, що по цим напрямкам розміри зон не визначалися.

Для порівняння аналітичних розрахунків з експериментальними накладаються зони ущільнення, побудовані теоретично (рис. 9, рис. 13), на зони переміщення та ущільнення ґрунту, побудовані за результатами польових досліджень (рис. 2). Результати накладання представлено на рис. 14.

Аналізуючи рис. 14, можливо відзначити, що характер зон ущільнення ґрунту, побудованих за різними методиками, є подібним до характеру зон переміщень, які отримані за натурними даними, а значення, отримані за формулою (2), майже співпадають з експериментальними. Проте реальна величина ущільненої зони (табл. 1) на 5 - 26% менша ніж визначена за формулою (1), на 9 - 24% більша ніж за формулою (3), а

різниця значень, отриманих за формулою (2), становить 2 - 12%. На даному етапі досліджень отримані результати підтверджують можливість використання всіх формул та методик по визначенню ущільненої зони. Однак вони мають бути додатково перевірені та за необхідності уточнені при розрахунку несучої здатності паль.

Таблиця 1

Розміри зон ущільнення ґрунту навколо дослідних паль
за аналітичними та експериментальними даними

Форма поперечного перерізу палі		Тавр						Квадрат	
Значення і		I	II	III	IV	V	VI	I	II
Значення приведених радіусів та радіусів зон ущільнення, визначені за першою методикою									
Приведений радіус r_i , см		15.4	6.0	11.7	10.6	6.0	8.5	18.1	12.8
Радіус зони ущільнення, визначений аналітичним методом	$R_{i,1}$, см	47.6	18.6	36.2	32.8	18.6	26.3	56	39.6
	$R_{i,2}$, см	40.0	15.6	30.4	27.5	15.6	22.1	47	33.3
	$R_{i,3}$, см	34.4	13.4	26.1	23.7	13.4	19	40.4	28.6
Радіуси зон переміщення, визначені в польових умовах, см		4.0	15.5	28.0	23.0	-	-	41.0	-
Радіуси зон ущільнення, визначені в польових умовах R_{pi} , см		43.0	-	30.8	26.0	-	-	48.0	-
Відношення радіуса зони ущільнення, визначеного аналітичним методом до радіуса, визначеного в польових умовах	$R_{i,1}/R_{pi}$	1.11	-	1.18	1.26	-	-	1.17	-
	$R_{i,2}/R_{pi}$	0.93	-	0.99	1.06	-	-	0.98	-
	$R_{i,3}/R_{pi}$	0.80	-	0.85	0.91	-	-	0.84	-
Значення приведених радіусів та радіусів зон ущільнення, визначені за другою методикою									
Приведений радіус r_i , см		15.0	10.6	11.3	-	-	-	16.9	12.0
Радіус зони ущільнення, визначений аналітичним методом	$R_{i,1}$, см	46.4	32.8	35.0	-	-	-	52.3	37.1
	$R_{i,2}$, см	39.0	27.5	29.4	-	-	-	43.9	31.2
	$R_{i,3}$, см	33.5	23.7	25.2	-	-	-	37.8	26.8
Радіуси зон переміщення, визначені в польових умовах, см		37.6	27.7	30.1	-	-	-	41.0	-
Радіуси зон ущільнення, визначені в польових умовах R_{pi} , см		40.5	30.9	33.3	-	-	-	48.0	-
Відношення радіуса зони ущільнення, визначеного аналітичним методом до радіуса, визначеного в польових умовах	$R_{i,1}/R_{pi}$	1,15	1.06	1.05		-	-	1.09	-
	$R_{i,2}/R_{pi}$	0.96	0.89	0.88		-	-	0.91	-
	$R_{i,3}/R_{pi}$	0.83	0.77	0.76		-	-	0.79	-

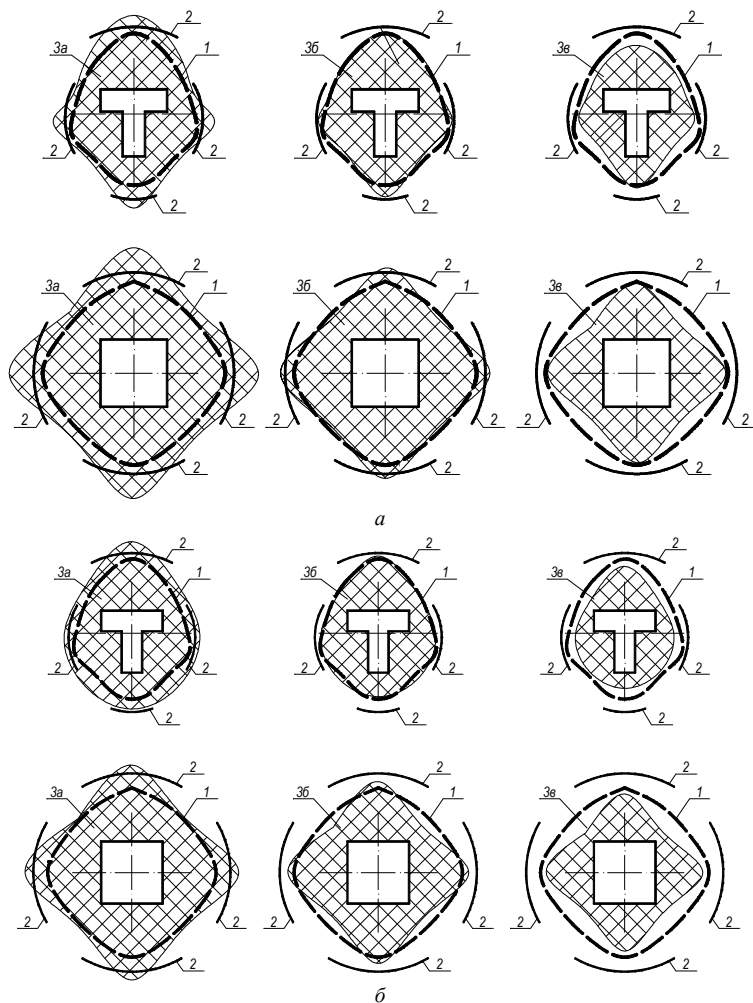


Рис. 14. Порівняння аналітичних розрахунків та експериментальних даних: *a* - за першою методикою; *б* - за другою методикою; 1 - зона переміщення та 2 - зона ущільнення ґрунту, визначені в польових умовах; 3а, 3б, 3в - зони ущільнення ґрунту, побудовані аналітичним методом за формулами (1), (2), (3) відповідно.

Висновки:

1. Розроблені аналітичні підходи до визначення ущільнених зон ґрунту навколо бічної поверхні паль квадратного і таврового поперечного перерізу.

2. Порівняння розрахункових значень радіусів зони ущільнення навколо бічної поверхні паль з практичними результатами вказують на їх задовільну відповідність.

3. Співставлення існуючих аналітичних методів з експериментальними даними вказує на можливість їх застосування для теоретичного визначення ущільненої зони біля бічної поверхні таврових паль, та використання її в розрахунках несучої здатності.

4. Побудова зон ущільнення в ґрунтах з різними коефіцієнтами пористості дозволить більш ефективно розміщувати палі у складі пальового фундаменту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Зоценко М.Л., Коваленко В.І.* Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти. Підручник. Полтава: ПНТУ, 2003 – 446 с.
2. *Цымбал С.Й.* К определению сопротивления грунта по боковой поверхности забивной сваи. Основания и фундаменты. - К.: «Будівельник», 1979, вип.12.
3. *Цымбал С.Й., Куценко Г.В.* Врахування пористості ґрунтів при визначенні розмірів зони їх ущільнення. Основи і фундаменти. - К.: «Будівельник», 2008, вип.31.

Стаття надійшла до редакції 06.07.2011 р.

Цымбал С.И., Малышев О.В.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ УПЛОТНЕННЫХ ЗОН ГРУНТА ВОКРУГ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВДАВЛИВАЕМЫХ СВАЙ

Проведено сравнение аналитических методов расчета радиуса уплотнения грунта вокруг боковой поверхности вдавливаемых свай с практическими результатами. Предложена методика построения уплотненной зоны вокруг боковой поверхности квадратной и тавровой свай.

Tsymbal S.Y., Malyshev O.V.

FEATURES OF FORMATION OF THE CONSOLIDATION ZONES OF AROUND THE LATERAL SURFACE OF DRIVEN PILES

A comparison of analytical methods for the calculation of radius of soil consolidation around lateral surface of driven piles with practical results is spent. A method is proposed for construction of consolidation zone around the side of square and T-cross section piles.