

Расчет пластической системы «железобетонный фундамент — грунтовое основание» по первому предельному состоянию с учетом продавливания и изгиба

УДК 624.131

Матвиенко Максим Петрович

Старший преподаватель кафедры «Промышленного и гражданского строительства, геотехники и фундаментостроения» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск, Россия); e-mail: maxmatvienko09@mail.ru

Дыба Владимир Петрович

Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Промышленного и гражданского строительства, геотехники и фундаментостроения» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск, Россия); e-mail: dyba1948@mail.ru

Статья получена: 23.04.2018. Рассмотрена: 30.04.2018. Одобрена: 05.05.2018. Опубликована онлайн: 26.06.2018. ©РИОР

Аннотация. В статье предложен метод расчета несущей способности фундамента совместно с грунтовым основанием, где рассчитано армирование плитной части фундамента, при котором разрушение изгибом и продавливанием происходит при одинаковой предельной нагрузке с учетом прочностных характеристик грунтового основания и неравномерности эпюры контактных напряжений. В статье проведен анализ и сравнение результатов расчетов по предложенному и нормативному методу, а также сравнение с экспериментальными данными.

Ключевые слова: система «железобетонный фундамент — грунтовое основание», предельная нагрузка, предельный изгибающий момент, продавливание.

Строительные правила предусматривают расчет несущей способности грунтового основания по формуле (5.32) [1], где не учитываются

прочностные характеристики железобетонного фундамента. Основой для формулы (5.32) послужила формула Терцаги, которая до сих пор применяется в Западной Европе в доработанном виде и продолжает оставаться объектом усовершенствований [2].

$$N_u = b'l'(N_\gamma \xi_\gamma b' \gamma_l + N_q \xi_q \gamma'_l d + N_c \xi_c c_l). \quad (5.32)$$

Железобетонный фундамент рассчитывается на продавливание и предельный изгибающий момент, в результате чего подбирается рабочая высота плитной части фундамента и ее армирование [3]. Следует отметить, что расчет по формуле (5.32) применяется довольно редко, а размеры центрально-нагруженного фундамента в соответствии с действующими нормами определяются в предположении равномерно распределенной эпюры нормальных контактных

CALCULATION OF THE PLASTIC SYSTEM “REINFORCED CONCRETE FOUNDATION – GROUND BASE” ACCORDING TO THE FIRST LIMITING STATE, WITH ALLOWANCE FOR FORCING THROUGH AND BENDING

Maksim Matvienko

Senior Lecturer, Department of Industrial and Civil Engineering, Geotechnical and Foundation Engineering, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (Novocherkassk, Russia); e-mail: maxmatvienko09@mail.ru

Vladimir Dyba

Doctor of Technics, Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, Geotechnical and Foundation Engineering, Platov

South-Russian State Polytechnic University (NPI) (Novocherkassk, Russia); e-mail: dyba1948@mail.ru

Manuscript received: 23.04.2018. **Revised:** 30.04.2018. **Accepted:** 05.05.2018. **Published online:** 26.06.2018. ©РИОР

Abstract. The article describes the method of calculating the reinforcement of the plate part of the foundation, in which the destruction by bending and forcing through occurs at the same limit load, taking into account the strength characteristics of the ground base. The described method is compared with the standard methods of calculating the load-bearing capacity, reinforcing and forcing through the belt foundation.

Keywords: system “reinforced concrete foundation – ground base”, ultimate load, ultimate bending moment, forcing through.

напряжений под подошвой фундамента, интенсивность которых не должна превышать расчетного сопротивления грунтов основания R .

Независимо от грунтового основания железобетонный фундамент рассчитывается по правилам для железобетонных конструкций на продавливание и изгиб [4]. При этом считается, что контактные давления по подошве центрально-нагруженного фундамента распределены равномерно и при расчете несущей способности железобетонного фундамента не учитываются прочностные характеристики грунта.

Предельный изгибающий момент для прямоугольного железобетонного сечения определяется площадью арматуры на погонный метр A_s и расстоянием $h^* = h_0 - x/2$ от нее до центра сжатой зоны бетона x согласно п. 8.1.9 [4] находится по формуле 8.4.

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} \cdot A'_s (h_0 - a'), \quad (8.4)$$

где $x = \frac{R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b}$. (8.5)

Для ленточного железобетонного фундамента, армированного только в нижней части сечения (рис. 1), формула (8.4) с учетом (8.5) будет выглядеть так (1):

$$M_{ult} = A_s \cdot R_s \cdot \left(h_0 - \frac{A_s \cdot R_s}{2 \cdot R_b} \right). \quad (1)$$

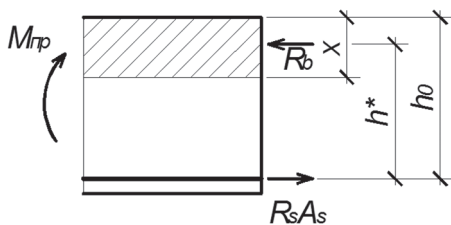


Рис. 1. Схема для определения предельного изгибающего момента плитной части ленточного железобетонного фундамента

Предельное продавливающее усилие от жесткой части фундамента действующая на плитную часть без поперечной арматуры согласно п. 8.1.47 [4] находится по формуле 8.88.

$$F_{b,ult} = R_{bt} \cdot A_b, \quad (8.88)$$

где $A_b = u \cdot h_0$. (8.89)

Для ленточного железобетонного фундамента с плитной частью без поперечного армирования (рис. 2) формула (8.88) с учетом (8.89) будет выглядеть так (2):

$$F_{b,ult} = 2 \cdot R_{bt} \cdot h_0. \quad (2)$$

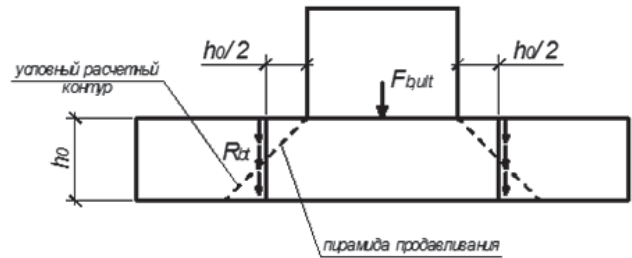


Рис. 2. Схема для определения предельного продавливающего усилия плитной части ленточного железобетонного фундамента

Из вышеприведенных нормативных расчетов предельных изгибающего момента и продавливающего усилия видно, что учтены характеристики бетона и арматуры, а характеристики грунтового основания не учитываются. Понятно, что несущая способность грунтового основания и железобетонного фундамента согласно [1; 4] различны.

Многочисленные лотковые эксперименты [4; 5] показывают, что с ростом нагрузки на фундамент эпюра контактных давлений видоизменяется от вогнутой с наибольшими значениями под краями фундамента, похожей на эпюру упругого решения, до выпуклой с наибольшими значениями по оси нагрузки.

Нет нормативных документов, рассматривающих силовое взаимодействие железобетонного фундамента и грунтового основания. Не используется понятие несущей способности системы «железобетонный фундамент — грунтовое основание» и не учитывается экспериментально полученное распределение контактных напряжений под подошвой фундаментов.

Поиск предельной нагрузки для системы «железобетонный фундамент — грунтовое основание» возможен только в рамках модели теории идеальной пластичности, используемой непосредственно или в виде предельной поверхности текучести в моделях с упрочнением. Согласно предельному анализу пластических систем построение статически допустимых по-

лей напряжений в грунтовом основании и железобетонном фундаменте порождает нижнюю оценку несущей способности системы «грунтовое основание — железобетонный фундамент». Таким образом, были получены оценки предельной нагрузки при разрушении железобетонного фундамента изгибом [6].

В дальнейшем из предположения, что в теле железобетонного фундамента статически допустимое поле напряжений существует, если максимальный изгибающий момент в плитной части фундамента не превышает предельного момента, а сдвигающие и растягивающие силы по поверхности призмы продавливания не превысят потенциальных удерживающих, был доработан метод расчета несущей способности системы «грунтовое основание — железобетонный фундамент» [7].

Тестовые экспериментальные исследования в лотке машины МФ-1 показали [8], что разработанная методика расчета железобетонных фундаментам правильно оценивает экспериментальные значения предельной нагрузки.

В результате получился метод расчета системы «грунтовое основание — железобетонный фундамент», позволяющий при заданных геометрических размерах плитной и жесткой части прямоугольного фундамента найти довольно точное значение предельной нагрузки при рассчитанных оптимальном армировании и рабочей высоте плитной части.

Находим предельную нагрузку:

$$P = A \cdot e^{\frac{\pi(A-1)}{2\sqrt{A}}} \cdot \left(q + \frac{C}{A-1} \right) - \frac{C}{A-1},$$

где прочностные характеристики грунта определяются в соответствии с условием прочности Кулона — Мора по следующим формулам:

$$A = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}, \quad C = \frac{2 \cdot c \cdot \cos\varphi}{1 - \sin\varphi}.$$

Находим рабочую высоту плитной части:

$$h_0 = -0,25 \cdot (b_g + L_g) + 0,5 \sqrt{\frac{N_p}{R_{bt} + P}}.$$

Найдем предельную силу продавливания N :

$$F = R_{bt} \cdot 2\sqrt{2} \cdot h_0;$$

$$N = F + P \cdot (L + 2h_0).$$

Найдем величину армирования, при которой сила N — предельная на изгиб:

$$L_x = \frac{F + 2 \cdot P \cdot h_0 - 2 \cdot L_1 \cdot q}{2 \cdot (P - q)};$$

$$M_{np} = \frac{1}{2} P \cdot L_x^2 + \frac{1}{2} q \cdot (L_1^2 - L_x^2);$$

$$A_s = \frac{R_s \cdot h_0 - \sqrt{(R_s \cdot h_0)^2 - 2 \cdot M_{np} \cdot \frac{R_s^2}{R_b}}}{\frac{R_s^2}{R_b}}.$$

Находим предельные изгибающие моменты:

$$M_b = 0,9 \cdot A_b \cdot R_s \cdot h_0, \quad M_L = 0,9 \cdot A_L \cdot R_s \cdot h_0.$$

Находим коэффициенты для системы уравнений:

$$\mu_b = \frac{2 \cdot b}{N_\gamma \cdot \gamma_0 \cdot b_g^3 \cdot L_g}; \quad \mu_L = \frac{2 \cdot L}{N_\gamma \cdot \gamma_0 \cdot b_g^2 \cdot L_g^2};$$

$$\alpha = \frac{N_q \cdot \gamma_1 \cdot d}{N_\gamma \cdot \gamma_0 \cdot b_g}; \quad \beta = \frac{N_c \cdot c}{N_\gamma \cdot \gamma_0 \cdot b_g}; \quad \beta = \frac{N_c \cdot c}{N_\gamma \cdot \gamma_0 \cdot b_g};$$

$$\eta = \frac{b_g}{L_g}.$$

Решаем систему уравнений:

$$\mu_b := \xi_b^2 \cdot (1 + 2 \cdot \xi_L) \cdot \left[(1 + 2 \cdot \xi_b) \cdot \left(1 - 0,25 \cdot \eta \cdot \frac{1 + \xi_b}{1 + \xi_L} \right) + \alpha \cdot \left(1 + 1,5 \cdot \eta \cdot \frac{1 + \xi_b}{1 + \xi_L} \right) + \beta \cdot \left(1 + 0,3 \cdot \eta \cdot \frac{1 + \xi_b}{1 + \xi_L} \right) \right];$$

$$\mu_L := \xi_L^2 \cdot (1 + 2 \cdot \xi_b) \cdot \left[(1 + 2 \cdot \xi_b) \cdot \left(1 - 0,25 \cdot \eta \cdot \frac{1 + \xi_b}{1 + \xi_L} \right) + \alpha \cdot \left(1 + 1,5 \cdot \eta \cdot \frac{1 + \xi_b}{1 + \xi_L} \right) + \beta \cdot \left(1 + 0,3 \cdot \eta \cdot \frac{1 + \xi_b}{1 + \xi_L} \right) \right].$$

Вычисляем приведенные ширину и длину фундамента:

$$b_1 = b_g \cdot (1 + 2 \cdot \xi_b); L_1 = L_g \cdot (1 + 2 \cdot \xi_L).$$

Вычисляем коэффициенты для формулы предельной нагрузки:

$$\eta_1 = \frac{L_1}{b_1}; \xi_\gamma = 1 - \frac{0,25}{\eta_1}; \xi_q = 1 + \frac{1,5}{\eta_1}; \xi_c = 1 + \frac{0,3}{\eta_1}.$$

Вычисляем предельную нагрузку:

$$P = b_1 \cdot L_1 \cdot (N_\gamma \cdot \xi_\gamma \cdot b_1 \cdot \gamma_0 + N_q \cdot \xi_q \cdot \gamma_1 \cdot d + N_c \cdot \xi_c \cdot c).$$

Проведем анализ результатов расчетов предельной несущей способности прямоугольного железобетонного фундамента нормативным методом и предложенным методом, а также несущей способности основания ограниченной расчетным сопротивлением грунтов основания R . Добавим, что сравнение с несущей способностью основания ограниченной расчетным сопротивлением грунтов основания R не совсем правомерно, так как в нашем случае мы находим

предельную нагрузку, а в случае с расчетным сопротивлением грунтов основания R находим допустимую нагрузку, которые имеют различное смысловое значение. Сравнение выполняется для того, чтобы показать разницу между предельной и допустимой нагрузкой.

Для этого проведем расчет ряда прямоугольных фундаментов на песчаном основании с прочностными характеристиками: $\varphi_f = 30,08^\circ$, $c_f = 27$ кПа и плотностью $1,7$ г/см³. Глубина заложения $d = 1,8$ м и пригрузка фундамента соответственно $q = 30,6$ кПа. Размеры жесткой части фундамента $b_g = 0,9$ м и $L_g = 0,3$ м. Рабочая высота сечения $h_0 = 0,25 - 0,55$ м. Расчетные сопротивления бетона класса В15: сжатию — $R_b = 8500$ кПа, растяжению — $R_{bt} = 750$ кПа. Расчетное сопротивление арматуры класса А400 растяжению $R_s = 360\,000$ кПа. Ширина плитной части изменяется от $1,8$ м до $2,7$ м, длина плитной части $2,1$ м до $3,3$ м.

Результаты расчетов представим в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Сравнение результатов нормативных расчетов несущей способности основания и несущей способности системы «грунтовое основание — ж/б фундамент»

№ n/n	Несущая способность, кН	Новый метод с учетом продавливания и изгиба			Несущая способность по нормативному методу — формула (5.32), кН
		Размеры плитной части, мм	Рабочая высота плиты, мм	Армирование плитной части, см ²	
1	6874	2100 × 1800	258	25,28 (Ø18 — 11 шт.) 22,79 (Ø18 — 10 шт.)	9295
2	7627	2400 × 1800	312	29,32 (Ø18 — 13 шт.) 25,22 (Ø18 — 10 шт.)	10 140
3	9493	2700 × 2100	434	36,17 (Ø20 — 14 шт.) 33,21 (Ø20 — 11 шт.)	13 470
4	11460	3000 × 2400	556	43,87 (Ø20 — 16 шт.) 41,48 (Ø22 — 13 шт.)	17 280
5	13510	3300 × 2700	677	51,90 (Ø20 — 17 шт.) 49,87 (Ø22 — 14 шт.)	21 550

Таблица 2

Результаты расчета допустимой нагрузки на основание ограниченной расчетным сопротивлением грунтов основания R

№ n/n	Произведение расчетного сопротивления грунта и площади подошвы $R \cdot A$		
	Размеры плитной части, мм	Армирование плитной части, см ²	Допустимая нагрузка, кН
1	2100 × 1800 × 300	11,31 (Ø12 — 10 шт.) 12,44 (Ø12 — 11 шт.)	1902,5
2	2400 × 1800 × 300	15,39 (Ø14 — 10 шт.) 20,01 (Ø14 — 13 шт.)	2174,3
3	2700 × 2100 × 600	22,12 (Ø16 — 11 шт.) 28,15 (Ø16 — 14 шт.)	2955,2
4	3000 × 2400 × 600	33,09 (Ø18 — 13 шт.) 40,72 (Ø18 — 16 шт.)	3882,2
5	3300 × 2700 × 600	35,63 (Ø18 — 14 шт.) 43,26 (Ø18 — 17 шт.)	4963,2

Методика совместного расчета фундамента и грунтового основания с учетом изгиба и продавливания позволяет более точно определить предельную нагрузку на фундамент, что можно использовать для уменьшения стоимости железобетонных фундаментов за счет экономии арма-

турных стержней, бетона и трудозатрат. Рассмотрев полученные результаты, можно сделать вывод, что предельная нагрузка для прямоугольного фундамента, полученная предложенным методом, более точно отражает нижнюю оценку несущей способности, чем нормативные методы.

Литература

1. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений [Текст]. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. — М.: Минстрой России, 2016.— 220 с.
2. Van Baars S. (2015) The Bearing Capacity of Footings on Cohesionless Soils, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 20.
3. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [Текст]. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. — М., 2012.
4. Мурзенко Ю.Н. Экспериментально-теоретические исследования силового взаимодействия фундаментов и песчаного основания [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ю.Н. Мурзенко. — Новочеркасск, 1972.
5. Мурзенко Ю.Н. Экспериментальные исследования работы краевой зоны сборных фундаментов под отдельную колонну и сетку колонн на песчаном основании: монография [Текст] / Ю.Н. Мурзенко, С.И. Евтушенко. — Ростов н/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион», 2008. — 248 с.
6. Дыба В.П. Оценки несущей способности фундаментов [Текст]: монография / В.П. Дыба. — Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2008. — 202 с.
7. Дыба В.П. К расчету взаимодействия железобетонного фундамента с грунтовым основанием при предельной нагрузке [Текст] / В.П. Дыба, М.П. Матвиенко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2017. — Т. 8. — № 2. — С. 87–95. — DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.08.
8. Матвиенко М.П. Эксперимент по проверке новой методики расчета гибких железобетонных фундаментов по несущей способности [Текст] / М.П. Матвиенко, В.П. Дыба, Аль Екаби Хаки Хади Аббуд // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2015. — № 3. — С. 80–84.

References

1. SP 22.13330.2016. *Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01-83** [SP 22.13330.2016. Bases of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83 *]. Moscow, Minstroy Rossii Publ., 2016. 220 p.
2. Van Baars S. (2015) The Bearing Capacity of Footings on Cohesionless Soils, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, ISSN 1089-3032, Vol. 20.
3. SP 63.13330.2012. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 52-01-2003* [SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003]. Moscow, 2012.
4. Murzenko Yu.N. *Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya silovogo vzaimodeystviya fundamentov i peschanogo osnovaniya. Dokt. Diss.* [Experimental-theoretical studies of the force interaction of foundations and sand base. Doct. Diss.]. Novocherkassk, 1972.
5. Murzenko Yu.N., Evtushenko S.I. *Eksperimental'nye issledovaniya raboty kraevoy zony sbornykh fundamentov pod otdel'nuyu kolonnu i setku kolonn na peschanom osnovanii* [Experimental studies of the work of the edge zone of prefabricated foundations under a separate column and column grid on a sandy base]. Rostov on Don, Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region Publ., 2008. 248 p.
6. Dyba V.P. Otsenki nesushchey sposobnosti fundamentov [Estimates of the bearing capacity of foundations]. *Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet* [South Russian State Technical University]. Novocherkassk: YuRGTU Publ., 2008. 202 p.
7. Dyba V.P., Matvienko M.P. K raschetu vzaimodeystviya zhelezobetonnoyu fundamenta s gruntovym osnovaniem pri predel'noy nagruzke [To the calculation of the interaction of the reinforced concrete foundation with the ground base under the maximum load]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture]. 2017, V. 8, I. 2, pp. 87–95.
8. Matvienko M.P., Dyba V.P., Al' Ekabi Khaki Khadi Abbud. Eksperiment po proverke novoy metodiki rascheta gibkikh zhelezobetonnykh fundamentov po nesushchey sposobnosti [An experiment to test a new technique for calculating flexible reinforced concrete foundations by carrying capacity]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya vuzov. North-Caucasian region. Technical science]. 2015, I. 3, pp. 80–84.