РАЗДЕЛ VII. АРХИТЕКТУРА

Алексеев С.И.

К вопросу определения предельного крена внецентренно нагруженного фундамента

*Петербургский государственный университет путей сообщения императора
Александра I
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi:10.18411/sciencepublic-12-05-2020-13

idsp: sciencepublic-12-05-2020-13

Аннотация

Предложенная методика определения предельного крена внецентренно нагруженных отдельно стоящих фундаментов может быть применена как для сооружений ПГС, так и при проектировании опор железнодорожных эстакад различного назначения. Такие фундаменты предварительно рассчитываются как центрально нагруженные с учётом возможной нелинейной работы основания [1], а затем осуществляется проверка их крена. Проектирование внецентренно нагруженных фундаментов, при использовании предлагаемой методики расчёта, предполагает выполнение дополнительной расчётной деформационной проверки фундамента по II предельному состоянию – сравнение фактического крена с предельной величиной крена.

Ключевые слова: фундамент, внецентренная нагрузка, краевые напряжения под подошвой фундамента, крен.

Для внецентренно нагруженного фундамента учёт действия изгибающего момента может быть осуществлён посредством определения крена фундамента. В этом случае, вначале проводится расчёт как для центрально нагруженного фундамента, а затем осуществляется проверка крена (i) из условия:

$$i = k_c \frac{1-v^2}{E'_0} \cdot \frac{M_{II}}{(b/2)^3} \leq i_u, \quad (1)$$

где b – ширина подошвы фундамента, в направлении которой действует момент; M_{II} – нормативный момент относительно центра тяжести подошвы фундамента; K_c – коэффициент, принимаемый в зависимости соотношения сторон прямоугольного фундамента $\eta = l/b$ по таблице 1.

Таблица 1.

Форма фундамента и направление действия момента	Коэффициент K_c при $\eta = l/b$, равно:						
	1	1,2	1,5	2	3	5	10
Прямоугольная, с моментом вдоль большей стороны	0,50	0,57	0,68	0,82	1,17	1,42	2,00
Прямоугольная, с моментом вдоль меньшей стороны	0,50	0,43	0,36	0,28	0,20	0,12	0,07

v – средневзвешенные значения коэффициента Пуассона грунта основания [2]; E'_0 – модуль общей деформации грунта основания, работающего, в том числе, в стадии нелинейного деформирования, определяемый по рекомендациям [2].

Предельная величина крена фундамента (i_u), зависит от конструктивной схемы сооружения (СП 22.13330.2016) [3] и грунтовых условий. Для производственных и гражданских сооружений (ПГС) предельная величина крена фундамента может быть определена, в зависимости от двух факторов:

а) Предельного состояния материала конструкций в узлах сопряжения обреза фундамента и колонны (стены). В этом случае величина i_u будет определяться индивидуально (аналитически) в зависимости от размеров и материала конструкции [4].

Учитывая условия чистого прямого изгиба (кирпичной кладки или ж/б колонны) в данном узле сопряжения, получим предельно допустимое значение крена по условию прочности опираемых конструкций. В таком случае формула (1), относительно предельного крена, с учётом допустимого наибольшего напряжения $\sigma_{\max}$ материала конструкции, примет следующий вид:

$$i_u = \frac{1-\nu^2}{E'_0} \cdot K_c \frac{\sigma_{\max} \cdot W_x}{(b/2)^3}, \quad (2)$$

где W_x – момент сопротивления сечения стены или колонны, м^3 .

б) Предельный крен фундамента также должен быть определён исходя из максимально допустимого момента, воспринимаемого грунтом основания. Для его определения вводится расчётное условие, заключающееся в недопущении возникновения отрыва подошвы фундамента от основания (за исключением фундаментов без крановых зданий с подвесным транспортным оборудованием [3]).

Тогда, из известного уравнения, определяющего минимальное допустимое давление под подошвой внецентренно нагруженного фундамента:

$$P_{\min} = \frac{N_1}{A} - \frac{M_1}{W} \geq 0, \text{ принимая } P_{\min} = 0, \text{ получим:}$$

$$\frac{N_1}{A} = \frac{M_{\min}}{W} \text{ или } M_{\min} = \frac{N_1 \cdot W}{A} = \frac{N_1 \cdot b^2}{6 \cdot b} = \frac{N_1 \cdot b}{6}$$

Подставляя данное значение $M_{\min}$ в формулу крена (1), получим:

$$i_u = k_c \frac{1-\nu^2}{E'_0} b \cdot \frac{M_{\min}}{(b/2)^3} = K_c \frac{1-\nu^2}{E'_0} \cdot \frac{b \cdot 8 \cdot N_1}{6 \cdot b^3} = K_c \frac{1-\nu^2}{E'_0} \cdot \frac{4 \cdot N_1}{3 \cdot b^2}, \quad (3)$$

Расчёт предельного крена по формуле (3) следует в основном использовать при расчёте опор сооружений ВСМ или железнодорожных эстакад различного назначения, практически не имеющих уширение подошв фундаментов.

Для фундаментов сооружений ПГС с развитой шириной подошвы, следует иметь в виду, что если минимальное давление под подошвой внецентренно нагруженного фундамента $P_{\min} < 0$, в этом случае необходимо определить величину $b_1 < b$, то есть ту ширину подошвы условного фундамента, которая будет передавать на основание только сжимающие давления (рис. 1).

Рис. 1. Расчётная схема внецентренно нагруженного фундамента с эпюрами контактных давлений под подошвой при $P_{\min} < 0$. 1-треугольная эпюра отрицательных контактных давлений от действия изгибающего момента; 2-прямоугольная эпюра контактных давлений от веса N_y условной пригрузки (грунт обратной засыпки + часть ступеней фундамента общей условной шириной b_2)

Из геометрических расчётных построений эпюры контактных давлений под подошвой фундамента (рис. 1), можно записать:

$$\frac{P_{max}}{b_1} = \frac{P_{min}}{b - b_1},$$

преобразуя, данное уравнение относительно b_1 , получим:

$$b_1 = \frac{P_{max} \cdot b}{P_{max} + P_{min}}, \quad (4)$$

где, $P_{min} = \frac{N}{b \cdot \ell} \pm \frac{M}{W}$ - краевые контактные давления под подошвой внецентренно нагруженного фундамента; ℓ - ширина подошвы фундамента; N , M - соответственно вертикальная нагрузка и изгибающий момент относительно центра тяжести подошвы фундамента; W - момент сопротивления подошвы фундамента.

Таким образом, если от действия изгибающего момента минимальное давление под подошвой внецентренно нагруженного фундамента $P_{min} < 0$, мы получим треугольную эпюру отрицательных контактных давлений условной шириной b_2 (рис. 1). Противодействовать данному воздействию будет среднее давление (P_{cp}) от (N_y) условной пригрузки (вес $N_{гр(y)}$ грунта обратной засыпки + вес $N_{ф(y)}$ части ступеней фундамента также общей условной шириной b_2).

Тогда можно записать:

$$N_y = N_{гр(y)} + N_{ф(y)} = b_2 \cdot \ell \cdot d \cdot \gamma_{cp}$$

$$P_{cp} = \frac{b_2 \cdot \ell \cdot d \cdot \gamma_{cp}}{b_2 \cdot \ell} = d \cdot \gamma_{cp},$$

где γ_{cp} - средневзвешенное значение удельного веса для пригрузки (N_y), может предварительно задаваться постоянным значением (20 кН/м^3) или определяться более точно при условии использования заданных конструктивных размеров ступеней фундамента.

Для условий рассматриваемой задачи, возникновение возможности частичного (шириной подошвы b_1), опирания фундамента на основание, произойдёт только в том случае, если будет нарушено условие равновесия между эпюрами 1 и 2 (рис. 1):

$$\frac{1}{2} \cdot P_{min} \cdot b_2 \leq d \cdot \gamma_{cp}$$

Преобразуем данное выражение:

$$\frac{1}{2} \cdot P_{min} \cdot (b - b_1) \leq d \cdot \gamma_{cp}$$

Подставим значение b_1 из формулы (4):

$$\frac{1}{2} \cdot P_{min} \cdot \left(b - \frac{P_{max} \cdot b}{P_{max} + P_{min}} \right) \leq d \cdot \gamma_{cp}$$

После алгебраических преобразований, получим:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{P_{min}^2 \cdot b}{P_{max} + P_{min}} \leq d \cdot \gamma_{cp}. \quad (5)$$

Полученное уравнение равновесия (5) соответствует такому условию, при котором эпюра контактных давлений под подошвой внецентренно нагруженного

фундамента будет иметь только положительное значение. Такие условия будут соответствовать минимально допустимому изгибающему моменту или предельно допустимому крену фундамента (за исключением фундаментов без крановых промышленных зданий с подвесным транспортным оборудованием [3]).

Таким образом, проектирование внецентренно нагруженного фундамента, при использовании предлагаемой методики расчёта, предполагает выполнение расчётной деформационной проверки фундамента по II предельному состоянию – сравнение фактического крена (1) с предельной величиной крена (2, 3), а также дополнительной проверки условия (5) по фактическому ограничению действующего изгибающего момента.

Выводы

1. Для внецентренно нагруженного фундамента учёт действия изгибающего момента может быть осуществлён посредством определения крена фундамента, что является дополнительной проверкой расчёта основания по II предельному состоянию. В этом случае, вначале проводится расчёт как для центрально нагруженного фундамента, а затем осуществляется проверка крена (i) из условия (1).

2. При расчёте опор сооружений ВСМ или железнодорожных эстакад различного назначения, практически не имеющих уширение подошв фундаментов, величину предельного крена следует определять по условию (3).

3. Для производственных и гражданских сооружений (ПГС) с развитой шириной подошвы, предельная величина крена фундамента может быть определена расчётными значениями по решениям (2, 3), а также дополнительной проверки условия (5) по фактическому ограничению действующего изгибающего момента.

1. Механика грунтов, основания и фундаменты. Избранные главы. Монография. Издательство Ассоциация строительных вузов (АСВ). Москва, 2019 г., с. 180.
2. Алексеев С.И. Особенности расчёта внецентренно нагруженных отдельно стоящих фундаментов с учётом нелинейной работы основания. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования (ФГБОУ ВО ПГУПС) «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I» СПб., 2020 г. Научный семинар, посвящённый 110-летию со дня рождения Савинова Олега Александровича.
3. Свод правил. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456054206>
4. Алексеев С. И., Кондратьев С. О. Определение предельной величины крена фундамента в результате его взаимодействия с надфундаментной конструкцией // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. Иркутский технический университет. – 2017. – Т. 7. – №1. – С. 53–58.