

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЙ КОЛЬЦЕВЫХ ФУНДАМЕНТОВ

А. М. КАРАУЛОВ – канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск.

Приводятся результаты решения задачи о предельном давлении кольцевого фундамента на грунтовое основание. Даются формула и подробные таблицы для выполнения практических расчетов. Приводятся опытные данные по определению предельного давления кольцевого штампа на песчаное основание. Показано, что значения предельной нагрузки, получаемые по предложенной методике, не превышают полученных в процессе экспериментов.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Теоретической основой расчетов несущей способности оснований является теория предельного равновесия грунтов [1]. Для условий осевой симметрии эта теория получила свое развитие в трудах В. Г. Березанцева [2]. Как правило, решения осесимметричных задач выполняются с использованием гипотезы полной пластичности. Некоторые же задачи в рамках этой гипотезы решения не имеют [3].

В работе [4] приведено решение задачи о предельном давлении кольцевого штампа на грунтовое основание. Решение выполнено статическим методом теории предельного равновесия грунтов для условий осевой симметрии. При этом использовалась каноническая система уравнений в цилиндрической системе координат $Oz\theta$ (Oz – ось симметрии, рис. 1) в виде

$$\begin{aligned} dr &= dz \operatorname{tg}(\alpha \pm \mu); \quad d\sigma \pm 2\sigma \operatorname{tg}\varphi \, d\alpha = \\ &= \sigma \operatorname{tg}\varphi [(m-1)(dr \cos\varphi \pm dz \sin\varphi) + dz] / r + \\ &\quad + \gamma (dz \pm dr \operatorname{tg}\varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

где α – угол наклона первого главного напряжения σ_1 к оси Oz ; $\sigma = (\sigma_z + \sigma_r) / 2 + c \operatorname{ctg} \varphi$ – среднее приведенное напряжение; γ – удельный вес грунта; c, φ – удельное сцепление и

© А. М. Караулов, 2004

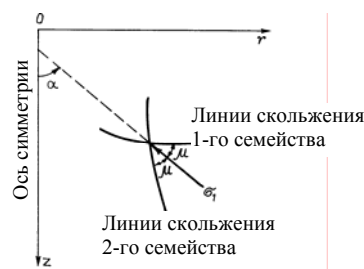


Рис. 1. Линии скольжения

угол внутреннего трения грунта; $m = 2(\sigma_\theta - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ – параметр, определяющий соотношение между главными напряжениями.

Верхние знаки в уравнениях (1) отвечают линиям скольжения 1-го семейства, нижние – 2-го. На рис. 2 приведен пример сетки линий скольжения в основании кольцевого штампа ($\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$, $\varphi = 15^\circ$, $c = 10 \text{ кПа}$). Решение достигается интегрированием системы (1) в области предельного равновесия в рамках соответствующих краевых задач статики сыпучей среды [4]. Здесь используется условие неполной пластичности при изменении параметра m в соответствии с условиями:

$$\begin{aligned} m &= m_0 \text{ при } \alpha \geq \pi / 2; \\ m &= 2 \alpha m_0 / \pi \text{ при } 0 \leq \alpha \leq \pi / 2; \\ m &= -4\alpha / \pi \text{ при } -\pi / 2 \leq \alpha \leq 0; \\ m &= 2 \text{ при } \alpha \leq -\pi / 2, \end{aligned} \quad (2)$$

где m_0 – максимальное значение m , обеспечивающее существование решения.

Internet: www.georec.spb.ru

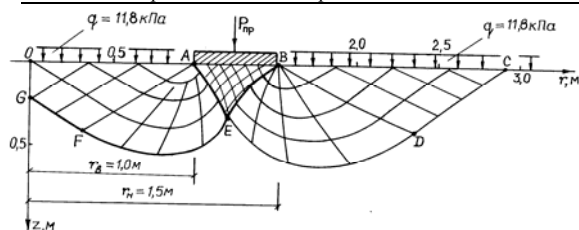


Рис. 2. Сетка линий скольжения в основании кольцевого штампа

Рассмотрим величину среднего предельного давления на кольцевой фундамент $p_{пр}$:

$$p_{пр} = P_{пр} / [\pi (r_n^2 - r_b^2)], \quad (3)$$

где $P_{пр}$ – сила предельного давления на кольцевой фундамент; r_n и r_b – наружный и внутренний радиус кольца.

Обозначим ширину кольцевой подошвы: $b = r_n - r_b$. Очевидно, что при $r_b \rightarrow 0$ предельное давление $p_{пр}$ будет стремиться к величине среднего предельного давления $p_{пр,к}$ на фундамент с круглой подошвой радиусом b . Если же радиус r_b неограниченно возрастает, то величина $p_{пр}$ стремится к среднему предельному давлению $p_{пр,л}$ ленточного фундамента шириной b . Выразим величину $p_{пр}$ формулой

$$p_{пр} = p_{пр,л} + k (p_{пр,к} - p_{пр,л}). \quad (4)$$

Значение $p_{пр,к}$ может быть рассчитано по формуле [4]

$$p_{пр,к} = \gamma b N_\gamma + q N_q + c N_c; \quad (5)$$

$$N_\gamma = 0,5 e^{10,73\varphi - 2,171};$$

$$N_q = e^{6,495\varphi + 0,031};$$

$$N_c = \text{ctg}\varphi (N_q - 1).$$

Очевидно, что коэффициент k будет зависеть от угла внутреннего трения φ , относительной приведенной пригрузки $q' = (q + c \text{ctg}\varphi) / \gamma b$ и отношения $\eta = r_b / b$. В работе [4] даны средние значения этого коэффициента. Здесь в табл. 1–8 приведены подробные данные о величинах k , определенных для значений $\varphi = 5 \dots 40^\circ$, $q' = 2 \dots 10$ и $\eta = 0 \dots 5$. Значения $p_{пр,л}$ устанавливались по формуле СНиП 2.02.01–83 [5].

Таблица 1. Значения коэффициента k ($\varphi = 5^\circ$)

η	Относительная пригрузка q'				
	2	4	6	8	10
0	1	1	1	1	1
0,2					0,738
0,4		0,363	0,406	0,397	0,404
0,6		0,241	0,270	0,264	0,263
0,8		0,204	0,214	0,210	0,210
1		0,184	0,193	0,191	0,193
2		0,125	0,133	0,132	0,135
3		0,096	0,104	0,102	0,105
5		0,064	0,071	0,070	0,073
∞	0	0	0	0	0

Таблица 2. Значения коэффициента k ($\varphi = 10^\circ$)

η	Относительная пригрузка q'				
	2	4	6	8	10
0	1	1	1	1	1
0,2	0,726	0,798	0,826	0,826	0,850
0,4	0,405	0,471	0,503	0,511	0,531
0,6	0,271	0,312	0,330	0,337	0,350
0,8	0,215	0,234	0,242	0,244	0,252
1	0,188	0,204	0,208	0,205	0,209
2	0,122	0,134	0,138	0,138	0,141
3	0,092	0,103	0,106	0,106	0,109
5	0,062	0,070	0,072	0,074	0,076
∞	0	0	0	0	0

Таблица 3. Значения коэффициента k ($\varphi = 15^\circ$)

η	Относительная пригрузка q'				
	2	4	6	8	10
0	1	1	1	1	1
0,2	0,797	0,874	0,894	0,891	0,918
0,4	0,624	0,570	0,588	0,590	0,614
0,6	0,321	0,384	0,402	0,407	0,422
0,8	0,235	0,273	0,284	0,288	0,299
1	0,193	0,219	0,222	0,225	0,233
2	0,123	0,138	0,140	0,140	0,145
3	0,093	0,105	0,108	0,107	0,111
5	0,063	0,072	0,074	0,075	0,077
∞	0	0	0	0	0

Таблица 4. Значения коэффициента k ($\varphi=20^\circ$)

η	Относительная пригрузка q'				
	2	4	6	8	10
0	1	1	1	1	1
0,2	0,910	0,963	0,969	0,993	0,998
0,4	0,619	0,691	0,700	0,730	0,740
0,6	0,424	0,486	0,496	0,522	0,531
0,8	0,305	0,355	0,361	0,381	0,389
1	0,237	0,271	0,277	0,292	0,297
2	0,138	0,150	0,152	0,157	0,159
3	0,103	0,113	0,114	0,118	0,119
5	0,070	0,077	0,078	0,082	0,083
∞	0	0	0	0	0

Таблица 5. Значения коэффициента k ($\varphi=25^\circ$)

η	Относительная пригрузка q'				
	2	4	6	8	10
0	1	1	1	1	1
0,2	0,956	1,025	1,047	1,068	1,069
0,4	0,728	0,782	0,820	0,853	0,869
0,6	0,523	0,580	0,616	0,648	0,654
0,8	0,385	0,433	0,466	0,494	0,499
1	0,297	0,332	0,359	0,381	0,386
2	0,150	0,161	0,170	0,177	0,178
3	0,111	0,118	0,125	0,129	0,131
5	0,075	0,080	0,085	0,087	0,088
∞	0	0	0	0	0

Таблица 6. Значения коэффициента k ($\varphi=30^\circ$)

η	Относительная пригрузка q'				
	2	4	6	8	10
0	1	1	1	1	1
0,2	0,964	1,069	1,168	1,140	1,214
0,4	0,869	1,035	1,051	1,061	1,105
0,6	0,658	0,829	0,852	0,862	0,911
0,8	0,494	0,635	0,659	0,673	0,716
1	0,389	0,513	0,525	0,549	0,581
2	0,171	0,217	0,225	0,232	0,247
3	0,121	0,152	0,155	0,159	0,169
5	0,080	0,100	0,101	0,104	0,111
∞	0	0	0	0	0

Таблица 7. Значения коэффициента k ($\varphi=35^\circ$)

η	Относительная пригрузка q'				
	2	4	6	8	10
0	1	1	1	1	1
0,2					
0,4	1,155	1,279	1,283	1,344	1,339
0,6	0,943	1,091	1,112	1,218	1,221
0,8	0,765	0,915	0,943	1,020	1,029
1	0,606	0,737	0,767	0,836	0,845
2	0,253	0,316	0,337	0,370	0,383
3	0,165	0,199	0,210	0,229	0,232
5	0,105	0,124	0,132	0,141	0,142
∞	0	0	0	0	0

Таблица 8. Значения коэффициента k ($\varphi=40^\circ$)

η	Относительная пригрузка q'				
	2	4	6	8	10
0	1	1	1	1	1
0,2					
0,4	1,433				
0,6	1,290	1,535	1,678	1,672	1,662
0,8	1,095	1,345	1,554	1,562	1,562
1	0,939	1,196	1,361	1,371	1,376
2	0,420	0,573	0,677	0,696	0,710
3	0,241	0,326	0,384	0,394	0,405
5	0,142	0,188	0,217	0,221	0,227
∞	0	0	0	0	0

2. ОПЫТНЫЕ ДАННЫЕ

Поскольку предельное давление кольцевого штампа на грунтовое основание можно определить в зависимости от несущей способности круглого и ленточного штампов, представилось целесообразным выполнить экспериментальную проверку безразмерного коэффициента k , характеризующего постепенность перехода от круглого штампа к ленточному.

С целью экспериментальной оценки теоретических значений коэффициента k были проведены серии опытов с кольцевыми штампами с одинаковой шириной кольца и различными внутренними радиусами. Кольцевые штампы были выполнены из текстолита. Ширина кольца составляла 3 см, внутренние радиусы $r_b = 0$ см (круглый штамп); 0,5 см; 1,0 см; 1,5 см; 2,5 см и 4,5 см. На нижнюю плоскость кольца, обработанную клеем, на-

носился слой песка для создания эффекта шероховатости подошвы.

Опыты проводились на сухих песчаных грунтах двух разновидностей: песок мелкий средней плотности и песок крупный средней плотности. В табл. 9 приведены данные о физико-механических характеристиках песков.

Эксперименты проводились в такой последовательности. Песок укладывался в пространственный лоток слоями толщиной 5 см с уплотнением. С целью определения плотности песка и его прочностных свойств в песчаное основание закладывались кольца для последующего отбора образцов грунта. Прочностные параметры определялись в сдвиговом приборе методом прямого среза.

Таблица 9. Физико–механические характеристики песков

Характеристика	Песок мелкий средней плотности	Песок крупный средней плотности
Плотность грунта, т/м ³	1,58	1,64
Плотность частиц грунта, т/м ³	2,66	2,66
Коэффициент пористости	0,68	0,62
Удельное сцепление, кПа	0	0
Угол внутреннего трения, °	29	37

На подготовленное основание устанавливался кольцевой штамп. Горизонтальность положения подошвы штампа контролировалась уровнем. Нагрузка к штампу прикладывалась ступенями величиной 1/10 от теоретического значения предельной нагрузки через специальное загрузочное устройство. Нагружение осуществлялось до полного разрушения основания. Разрушение песчаного основания имело характер срыва с боковым выпором грунта как с внешней, так и с внутренней стороны кольца.

В результате опыта фиксировалась одна величина – предельная сила давления на кольцевой штамп $p_{пр}^o$. Для каждого кольца проводилось по 3 опыта, в результате устанавливались среднее значение предельной силы давления $p_{пр,ср}^o$ и предельная средняя

нагрузка на кольцевой штамп $p_{пр}^o = \frac{1}{A} P_{пр,ср}^o$,

где A – площадь кольца.

Коэффициент k рассчитывался по формуле

$$k = \frac{(p_{i0}^i / p_{\epsilon}^i) - (p_{\epsilon} / p_{\epsilon}^i)}{1 - (p_{\epsilon} / p_{\epsilon}^i)}, \quad (6)$$

где p_k^o – опытное значение предельной нагрузки на круглый штамп.

Теоретическое значение отношения $p_{\epsilon} / p_{\epsilon}^i$ для углов внутреннего трения $\varphi=29^\circ$ и 37° составляет $p_{\epsilon} / p_{\epsilon}^i \cong 0,35$. Выражение для k принималось в виде

$$k = \frac{(p_{i0}^i / p_{\epsilon}^i) - 0,35}{0,65}. \quad (7)$$

В табл. 10 приведены результаты опытов для песка мелкого, в табл. 11 – для песка крупного. В этих же таблицах даны теоретические значения коэффициента $k_{теор}$.

Таблица 10. Результаты опытов по вдавливанию кольцевых штампов ($\varphi=29^\circ$)

r_b , см	η	$p_{пр}^o$, кПа	k	$k_{теор}$
0	0	14,5	1	1
0,5	0,167	14,6	1,01	0,96
1	0,333	15,9	1,15	1,07
1,5	0,5	12,6	0,80	0,76
2,5	0,833	9,84	0,47	0,46
4,5	1,50	7,1	0,21	0,19

Таблица 11. Результаты опытов по вдавливанию кольцевых штампов ($\varphi=37^\circ$)

r_b , см	η	$p_{пр}^o$, кПа	k	$k_{теор}$
0	0	61,7	1	1
0,5	0,167	76,7	1,37	1,12
1	0,333	84,1	1,56	1,21
1,5	0,5	78,2	1,41	1,17
2,5	0,833	64,1	1,06	0,89
4,5	1,50	53,1	0,78	0,55

Сопоставление приведенных данных показывает, что теоретические значения коэффициента k меньше опытных данных, и расхождение в данном случае достигает 30 %.

ВЫВОДЫ

1. Решение задачи о предельном давлении кольцевого фундамента на основание может быть получено с использованием условия неполной пластичности вида (2).

2. Теоретические значения предельной нагрузки, полученные по предлагаемой методике, не превышают опытных значений несущей способности основания.

Список литературы

1. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.: Физматгиз, 1960. 240 с.

2. Березанцев В. Г. Расчет прочности оснований сооружений. Л.; М.: Госстройиздат, 1960. 138 с.

3. Калаев А. И. Несущая способность оснований сооружений. Л.: Стройиздат, 1990. 184 с.

4. Караулов А. М. Несущая способность оснований осесимметричных фундаментов. Новосибирск.: Изд-во СГУПС, 2002. 104 с.

5. СНиП 2.02.01–83. Основания зданий и сооружений. М., 1985.