

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ РАЗМЕРОВ ПЛИТНЫХ СТОЛБЧАТЫХ ФУНДАМЕНТОВ НА ВЕЛИЧИНУ ОСАДКИ ПРИ УЧЁТЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТА И НА РАСЧЕТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Каретникова А. А., Завадская У.А. ★

(научный руководитель – Бойко И.Л.)

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация: в грунтовом массиве возникает напряженное состояние, которое влияет на деформации оснований, а также на прочность и устойчивость грунтовой толщи. Рассмотрим, как размеры подошвы фундамента влияют на величину осадки и на расчетное сопротивление песчаных грунтов, проведем технико-экономический анализ.

Ключевые слова: осадка грунта, размер подошвы фундамента, глубина заложения фундамента, расчетное сопротивление грунта, технико-экономический анализ.

Annotation: a stressed state arises in the soil mass, which affects the deformation of the foundations, as well as the strength and stability of the soil thickness. Let's consider how the dimensions of the foundation base affect the amount of settlement and the design resistance of sandy soils, and conduct a technical and economic analysis.

Key words: soil settlement, size of the foundation base, foundation depth, design soil resistance, technical and economic analysis.

Нагрузка от сооружения передается на основание через подошву фундамента. В грунтовом массиве, лежащем ниже подошвы фундамента, возникает напряженное состояние, которое влияет на деформации оснований (осадки, горизонтальные смещения, крены и т.д.), а также на прочность и устойчивость грунтовой толщи.

С некоторыми допущениями это напряженное состояние определяется по формулам теории линейно-деформируемых тел.

Осадку грунтов основания в большинстве случаев определяют только от вертикальных нормальных напряжений, значения которых в любой точке основания находят по соответствующим формулам.

Полная конечная осадка фундамента зависит от целого ряда факторов, основными из которых являются: величина напряжений в основании, вызванная передаваемой нагрузкой и загрузением прилегающих площадей; размеры, форма, жесткость и глубина заложения фундамента; величина пластических зон под краями фундамента; мощность сжимаемой толщи; свойства слоев грунта, слагающих основание (характеристика деформируемости, уплотненность и т. д.) и его распределительная способность; степень нарушения естественных условий залегания грунтов при производстве работ.

Из всего многообразия факторов, влияющих на осадку фундамента, рассмотрим основные, обычно учитываемые при проектировании фундамента, но не всегда в полной мере

оцененные. К таким факторам можно отнести форму фундамента, его размеры, глубину заложения и грунтовые условия. Мы рассмотрим 3 случая размеров фундамента:

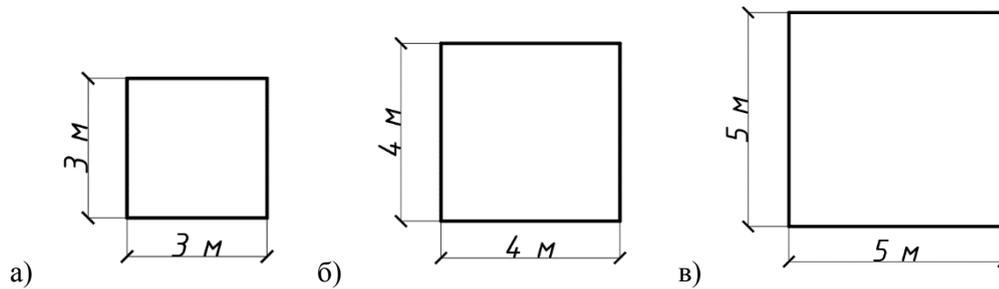


Рисунок 1. – Размеры подошвы фундамента: а) 3 м x 3 м, б) 4 м x 4 м, в) 5 м x 5 м

Определение осадки прямоугольного фундамента методом послойного суммирования

$d=2,00\text{ м}$	$\gamma'_{II}=20,7\text{ кН/м}^3$	$\sigma_{zg} = \gamma' \cdot d_n + \sum_{i=1}^n (\gamma'_{m_i} \cdot h_i)$	$\sigma_{zg} = \gamma' \cdot d_n$	$\sigma_{zg} = \sigma_{zg0} \cdot \alpha_i$	$\sigma_{zp_i} = \alpha_i \cdot P_0$								
$l=3,0\text{ м}$	$P=400,0\text{ кПа}$	$\sigma_{zg_i} = \gamma' \cdot d_n + \sum_{i=1}^n (\gamma'_{m_i} \cdot h_i)$	$\sigma_{zg0} = \gamma' \cdot d_n$	$\sigma_{zg} = \sigma_{zg0} \cdot \alpha_i$	$\sigma_{zp_i} = \alpha_i \cdot P_0$								
$b=3,0\text{ м}$	$l/b=1,0$	$s = \beta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp_i} - \sigma_{zg_i}) \cdot h_i}{E_i} + \beta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp_i} \cdot h_i}{E_i}$			$\sigma_{zp,sp_i} = \frac{\sigma_{zp_i} + \sigma_{zp_{i-1}}}{2}$								
	$\sigma_{zg0}=41,4\text{ кПа}$					$\Sigma S=37\text{ мм}$							
Слой	№ точки	$h_i, \text{ м}$	$z_i, \text{ м}$	$\sigma_{zg} = \frac{2z}{b}$	α_i	$\gamma'_{m_i}, \text{ кН/м}^3$	$\sigma_{zg_i}, \text{ кПа}$	$\sigma_{zg_i, \text{ кПа}}$	$\sigma_{zp_i}, \text{ кПа}$	$\sigma_{zp(sp)}, \text{ кПа}$	$0,2\sigma_{zg}, \text{ кПа}$	$E_i, \text{ кПа}$	$S_i, \text{ м}$
Песок	0	0,6	0,6	0,400	0,960	18	52,2	39,744	384,00	352,0	10,4	11470	0,0147
	1	0,6	1,2	0,800	0,800	18	63	33,12	320,00	281,2	12,6	11470	0,0074
	2	0,6	1,8	1,200	0,61	18	73,8	25,0884	242,40	211,0	14,8	16870	0,0038
	3	0,6	2,4	1,600	0,449	18	84,6	18,5886	179,60	157,0	16,9	21500	0,0022
	4	0,6	3	2,000	0,336	18	95,4	13,9104	134,40	118,6	19,1	21500	0,0017
	5	0,6	3,6	2,400	0,257	18	106,2	10,6398	102,80	91,6	21,2	21500	0,0013
	6	0,6	4,2	2,800	0,201	18	117	8,3214	80,40	72,2	23,4	22060	0,0010
	7	0,6	4,8	3,200	0,160	18	127,8	6,624	64,00	58,2	25,6	22060	0,0008
	8	0,6	5,4	3,600	0,131	18	138,6	5,4234	52,40	47,8	27,7	22060	0,0006
Песок	9	0,6	6	4,000	0,108	18	149,4	4,4712	43,20	39,8	29,9	22060	0,0005
	10	0,6	6,6	4,400	0,091	18	160,2	3,7674	36,40	33,6	32,0	22060	0,0004
	11	0,6	7,2	4,800	0,077	18	171	3,1878	30,80	28,8	34,2	22060	0,0004
	12	0,6	7,8	5,200	0,067	18	181,8	2,7738	26,80	25,0	36,4	22060	0,0003
	13	0,6	8,4	5,600	0,058	18	192,6	2,4012	23,20	21,8	38,5	22060	0,0003
	14	0,6	9	6,000	0,051	18	203,4	2,1114	20,40	19,2	40,7	22060	0,0002
	15	0,6	9,6	6,400	0,045	18	214,2	1,863	18,00	17,0	42,8	22060	0,0002
	16	0,6	10,2	6,800	0,040	18	225	1,656	16,00	15,2	45,0	22060	0,0002
	17	0,6	10,8	7,200	0,036	18	235,8	1,4904	14,40	13,6	47,2	22060	0,0002
	18	0,6	11,4	7,600	0,032	18	246,6	1,3248	12,80	12,2	49,3	22060	0,0003
	19	0,6	12	8,000	0,029	18	257,4	1,2006	11,60		51,5	22060	
	20												0,0364

Рисунок 2. – полученный результат осадки от подошвы размером 3 м x 3 м

Осадка подошвы фундамента размером 3 м x 3 м вышла 37 мм.

Определение осадки прямоугольного фундамента методом послойного суммирования

Слой	№ точки	$h_i, \text{ м}$	$z_i, \text{ м}$	$\xi = \frac{2z}{b}$	α_i	$\gamma_m, \text{ кН/м}^3$	$\sigma_{zg,i}, \text{ кПа}$	$\sigma_{z\gamma,i}, \text{ кПа}$	$\sigma_{zp,i}, \text{ кПа}$	$\sigma_{zp(ep)}, \text{ кПа}$	$0,2\sigma_{zg}, \text{ кПа}$	$E, \text{ кПа}$	$S_i, \text{ м}$
Песок	0	0,8	0,8	0,400	0,960	18	55,8	39,744	384,00		11,2	11470	0,0196
	1	0,8	1,6	0,800	0,800	18	70,2	33,12	320,00	352,0	14,0	11470	0,0099
	2	0,8	2,4	1,200	0,61	18	84,6	25,0884	242,40	281,2	16,9	16870	0,0051
	3	0,8	3,2	1,600	0,449	18	99	18,5886	179,60	211,0	19,8	21500	0,0029
	4	0,8	4	2,000	0,336	18	113,4	13,9104	134,40	157,0	22,7	21500	0,0022
	5	0,8	4,8	2,400	0,257	18	127,8	10,6398	102,80	118,6	25,6	21500	0,0017
	6	0,8	5,6	2,800	0,201	18	142,2	8,3214	80,40	91,6	28,4	22060	0,0013
	7	0,8	6,4	3,200	0,160	18	156,6	6,624	64,00	72,2	31,3	22060	0,0010
	8	0,8	7,2	3,600	0,131	18	171	5,4234	52,40	58,2	34,2	22060	0,0008
Песок	9	0,8	8	4,000	0,108	18	185,4	4,4712	43,20	47,8	37,1	22060	0,0007
	10	0,8	8,8	4,400	0,091	18	199,8	3,7674	36,40	39,8	40,0	22060	0,0006
	11	0,8	9,6	4,800	0,077	18	214,2	3,1878	30,80	33,6	42,8	22060	0,0005
	12	0,8	10,4	5,200	0,067	18	228,6	2,7738	26,80	28,8	45,7	22060	0,0004
	13	0,8	11,2	5,600	0,058	18	243	2,4012	23,20	25,0	48,6	22060	0,0004
	14	0,8	12	6,000	0,051	18	257,4	2,1114	20,40	21,8	51,5	22060	0,0003
	15	0,8	12,8	6,400	0,045	18	271,8	1,863	18,00	19,2	54,4	22060	0,0003
	16	0,8	13,6	6,800	0,040	18	286,2	1,656	16,00	17,0	57,2	22060	0,0003
	17	0,8	14,4	7,200	0,036	18	300,6	1,4904	14,40	15,2	60,1	22060	0,0002
	18	0,8	15,2	7,600	0,032	18	315	1,3248	12,80	13,6	63,0	22060	0,0004
	19	0,8	16	8,000	0,029	18	329,4	1,2006	11,60	12,2	65,9	22060	
	20												0,0486

Рисунок 3. – полученный результат осадки от подошвы размером 4 м х 4 м

Осадка подошвы фундамента размером 4 м х 4 м вышла 49 мм.

Определение осадки прямоугольного фундамента методом послойного суммирования

$d=2,00 \text{ м}$ $l=5,0 \text{ м}$ $b=5,0 \text{ м}$		$\gamma'_{II}=20,7 \text{ кН/м}^3$ $P=400,0 \text{ кПа}$ $l/b=1,0$ $\sigma_{z0}=41,4 \text{ кПа}$		$\sigma_{z\gamma_i} = \gamma' \cdot d_n + \sum_{i=1}^i (\gamma_{m_i} \cdot h_i)$ $\sigma_{z\gamma_0} = \gamma' \cdot d_n$		$\sigma_{z\gamma_i} = \sigma_{z\gamma_0} \cdot \alpha_i$ $\sigma_{zp_i} = \alpha_i \cdot P_0$		$\sigma_{zp_i} = \frac{\sigma_{zp_i} + \sigma_{zp_{i-1}}}{2}$		$s = \beta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp_i} - \sigma_{z\gamma_i}) \cdot h_i}{E_i} + \beta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp_i} \cdot h_i}{E_i}$			$S=61 \text{ мм}$	
Слой	№ точки	$h_i, \text{ м}$	$z_i, \text{ м}$	$\xi = \frac{2z}{b}$	α_i	$\gamma_{m_i}, \text{ кН/м}^3$	$\sigma_{z\gamma_i}, \text{ кПа}$	$\sigma_{z\gamma_i}, \text{ кПа}$	$\sigma_{zp_i}, \text{ кПа}$	$\sigma_{zp(cp)}, \text{ кПа}$	$0,2\sigma_{z\gamma}, \text{ кПа}$	$E, \text{ кПа}$	$S_i, \text{ м}$	
Песок	0	1	1	0,400	0,960	18	59,4	39,744	384,00		11,9	11470	0,0246	
	1	1	2	0,800	0,800	18	77,4	33,12	320,00	352,0	15,5	11470	0,0123	
	2	1	3	1,200	0,61	18	95,4	25,0884	242,40	281,2	19,1	16870	0,0063	
	3	1	4	1,600	0,449	18	113,4	18,5886	179,60	211,0	22,7	21500	0,0037	
	4	1	5	2,000	0,336	18	131,4	13,9104	134,40	157,0	26,3	21500	0,0028	
	5	1	6	2,400	0,257	18	149,4	10,6398	102,80	118,6	29,9	21500	0,0021	
	6	1	7	2,800	0,201	18	167,4	8,3214	80,40	91,6	33,5	22060	0,0016	
	7	1	8	3,200	0,160	18	185,4	6,624	64,00	72,2	37,1	22060	0,0013	
	8	1	9	3,600	0,131	18	203,4	5,4234	52,40	58,2	40,7	22060	0,0010	
Песок	9	1	10	4,000	0,108	18	221,4	4,4712	43,20	47,8	44,3	22060	0,0009	
	10	1	11	4,400	0,091	18	239,4	3,7674	36,40	39,8	47,9	22060	0,0007	
	11	1	12	4,800	0,077	18	257,4	3,1878	30,80	33,6	51,5	22060	0,0006	
	12	1	13	5,200	0,067	18	275,4	2,7738	26,80	28,8	55,1	22060	0,0005	
	13	1	14	5,600	0,058	18	293,4	2,4012	23,20	25,0	58,7	22060	0,0005	
	14	1	15	6,000	0,051	18	311,4	2,1114	20,40	21,8	62,3	22060	0,0004	
	15	1	16	6,400	0,045	18	329,4	1,863	18,00	19,2	65,9	22060	0,0004	
	16	1	17	6,800	0,040	18	347,4	1,656	16,00	17,0	69,5	22060	0,0003	
	17	1	18	7,200	0,036	18	365,4	1,4904	14,40	15,2	73,1	22060	0,0003	
	18	1	19	7,600	0,032	18	383,4	1,3248	12,80	13,6	76,7	22060	0,0004	
	19	1	20	8,000	0,029	18	401,4	1,2006	11,60	12,2	80,3	22060		
	20												0,0607	

Рисунок 4 – полученный результат осадки от подошвы размером 5 м x 5 м

Осадка подошвы фундамента размером 5 м x 5 м вышла 61 мм.

Получаем прямо пропорциональную зависимость: чем больше размеры подошвы фундамента, тем больше осадка грунта.

Правильный выбор размеров подошвы и глубины заложения фундамента позволит избежать значительной осадки грунта в результате воздействия внешней нагрузки от сооружения, а также выбрать наиболее экономично-выгодный вариант, избежав перерасхода материала.

У нас фундамент на естественном основании, для него должны выполняться два условия:

$$\frac{d}{b} > 0,5 \quad (1)$$

$$\frac{d}{b} < 4, \quad (2)$$

где b – ширина подошвы фундамента,

d – глубина заложения фундамента

Формула для определения расчетного сопротивления:

$$R = \frac{\gamma_{c1} \cdot \gamma_{c1}}{k} (M_{\gamma} K_z b \gamma_{II} + M_q d_1 \gamma'_{II} + (M_q - 1) d_b \gamma'_{II} + M_c \tilde{n}_{II}) \quad (3)$$

где γ_{c1} , γ_{c1} – коэффициенты условий работы;

k – коэффициент, принимаемый равным: = 1, если прочностные характеристики грунта (φ и c) определены непосредственными испытаниями и $k = 1,1$, если они приняты по таблицам норм (ТНПА) исходя из физических характеристик;

M_{γ} , M_q , M_c – коэффициенты, принимаемые в зависимости от угла внутреннего трения грунта φ ;

k_z – коэффициент, принимаемый равным:

при $b < 10$ м – $k_z = 1$, при $b \geq 10$ м – $k_z = \frac{z_0}{b} + 0,2$;

b – ширина подошвы фундамента, м;

γ'_{II} – осредненное расчетное значение удельного веса грунтов выше подошвы фундамента (с учетом фактического уплотнения обратной засыпки), а при наличии подземных вод – с учетом ее взвешивающего действия), кН/м³;

γ_{II} – то же для естественных грунтов, залегающих ниже подошвы фундамента до глубины $2b$, кН/м³;

c_{II} – расчетное значение удельного сцепления грунта, залегающего непосредственно под подошвой фундамента, кПа;

d_1 – глубина заложения фундаментов бесподвальных сооружений от уровня планировки или приведенная глубина заложения наружных и внутренних фундаментов от пола подвала, определяемая по формуле:

$$d_1 = h_s + h_{cf} \frac{\gamma_{cf}}{\gamma}, \quad (4)$$

где h_s – толщина слоя грунта выше подошвы фундамента со стороны подвала, м;

h_{cf} – толщина конструкции пола подвала, м;

γ_{cf} – расчетное значение удельного веса конструкции пола подвала, кН/м³;

В настоящее время сложные теоретические расчеты можно выполнить с помощью различных расчетных программ. Программа «ФУНДАМЕНТ 14.0» позволяет выполнять расчеты конструкций, работающих в грунте.

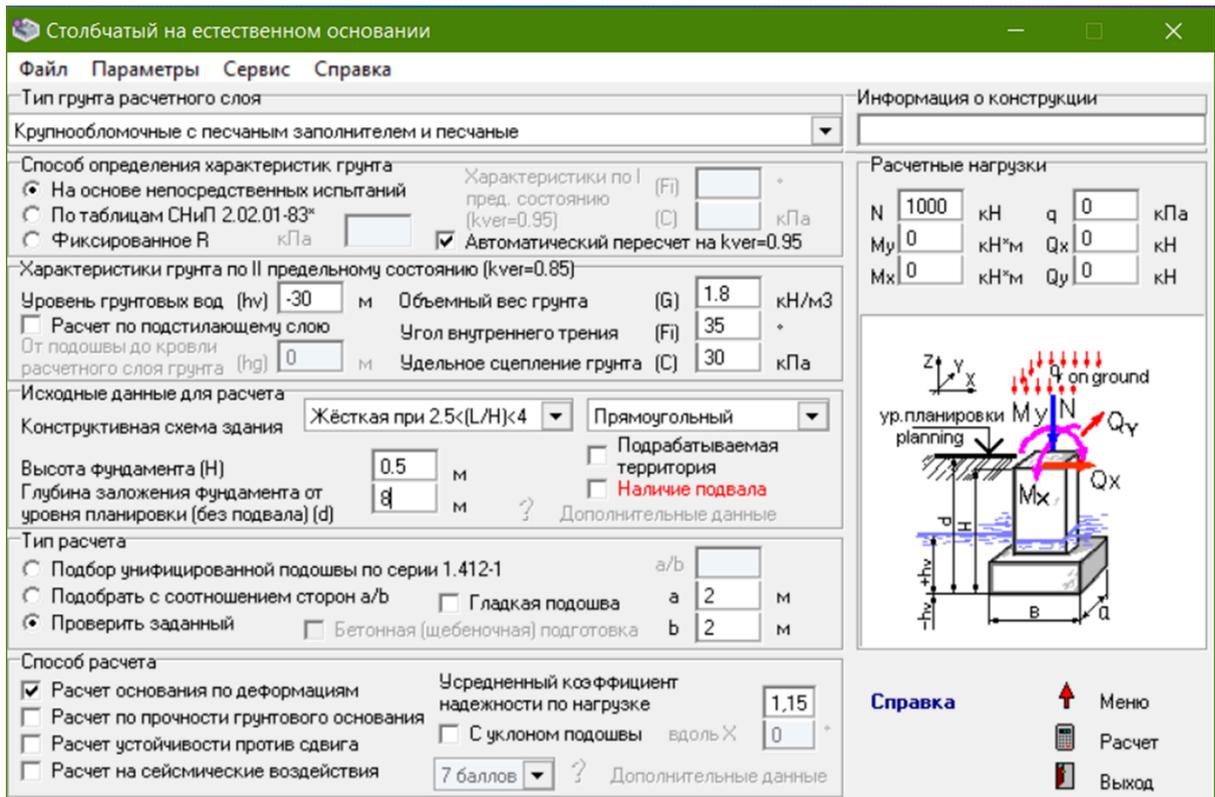


Рисунок 5 – Расчет в программе «ФУНДАМЕНТ 14.0»

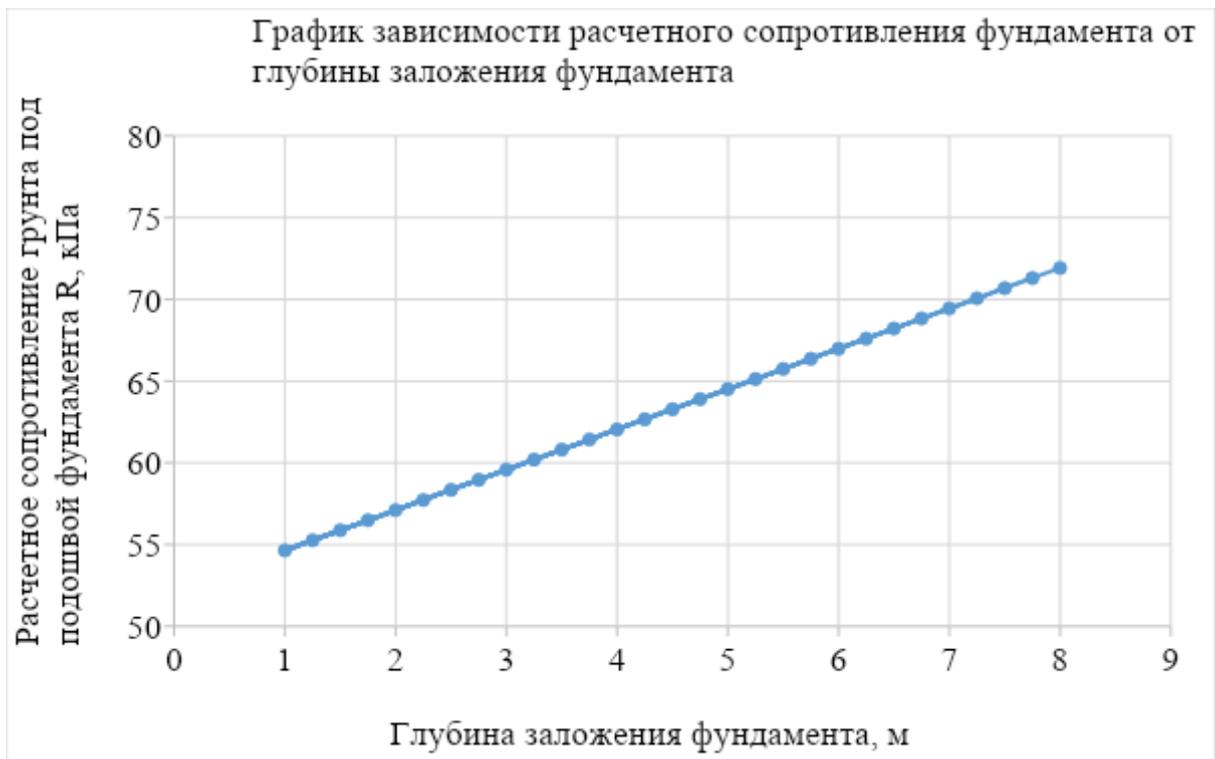


Таблица 1 - График зависимости расчетного сопротивления фундамента от глубины заложения фундамента



Таблица 2 - График зависимости сопротивления фундамента от размеров подошвы

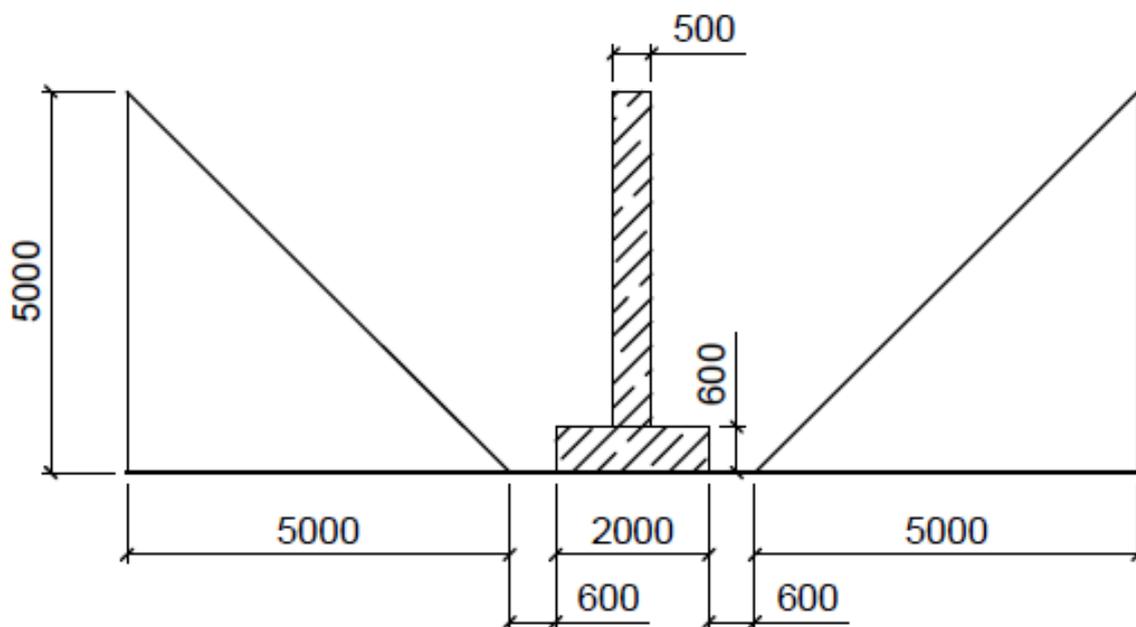


Рисунок 6 – Столбчатый фундамент с шириной подошвы 2 м и с глубиной заложения 5 м

Разработка грунта одноковшовым экскаватором: 440 р.

Установка щитов опалубки: 110 р.

Расходы на материалы для железобетона: 2901,3 р.

Устройство фундамента: 26,68 р.

Обратная засыпка грунта бульдозером: 66,75 р.

Общие затраты: 3535,73 р.

$$V_{\text{работ}}^{\text{земляных}} = 3,2 \cdot 3,2 \cdot 5 + 4 (0,5 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 3,2) = 211,2 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{ж/б}} = 2 \cdot 2 \cdot 0,6 + 4,4 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 3,5 \text{ м}^3$$

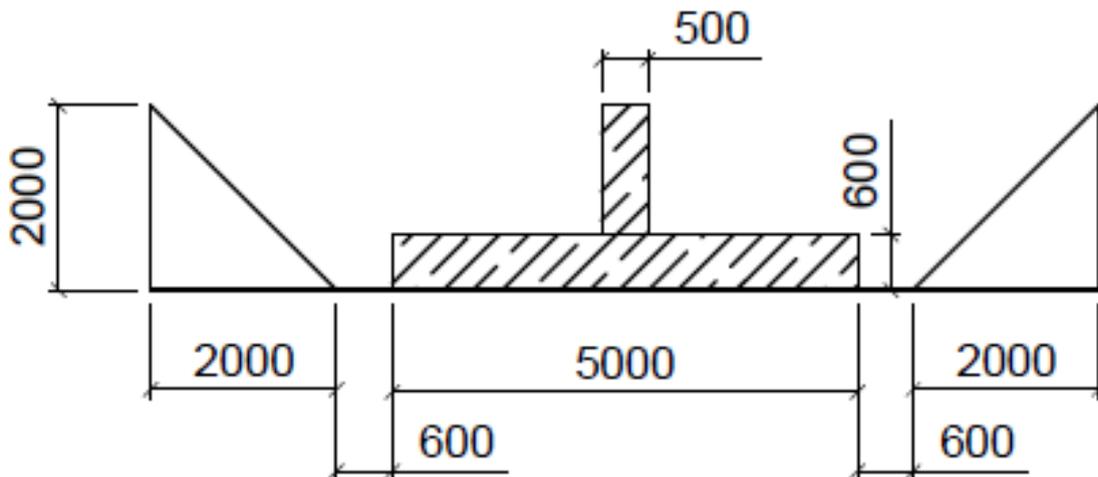


Рисунок 7 – Столбчатый фундамент с шириной подошвы 5 м и с глубиной заложения 2 м

Разработка грунта одноковшовым экскаватором: 270 р.

Установка щитов опалубки: 250,83 р.

Расходы на материалы для железобетона: 4618,51 р.

Устройство фундамента: 88,57 р.

Обратная засыпка грунта бульдозером: 36 р.

Общие затраты: 5254,91 р.

$$V_{\text{работ}}^{\text{земляных}} = 6,2 \cdot 6,2 \cdot 2 + 4 (0,5 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 6,2) = 126,5 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{ж/б}} = 5 \cdot 5 \cdot 0,6 + 1,4 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 15,35 \text{ м}^3$$

Расчетное сопротивление грунта под подошвой фундамента определяет допустимую величину нагрузки на фундамент. По результатам технико-экономического сравнения и анализа графиков зависимости изменения расчетного сопротивления грунта при изменении размеров подошвы и глубины заложения можно сделать вывод о том, что для увеличения расчетного сопротивления грунта под подошвой целесообразнее увеличивать глубину заложения фундамента, чем размеры его подошвы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. М.И. Никитенко, С.Н. Банников, В.А. Сернов, И.Л. Бойко, В.Н. Кравцов Механика грунтов, основания и фундаменты, 2011, с. 24-28.
2. С. В. Игнатов; В. Н. Кравцов; В. А. Сернов; Ю. В. Анисимов; И. Л. Бойко; кандидат технических наук, С. Н. Банников; М. Сани Бабак Механика грунтов, основания и фундаменты, 2014, с. 63-63.
3. В.В. Бозылев, В.В. Шевко Технология строительного производства – земляные работы, 2020, с. 88-89.