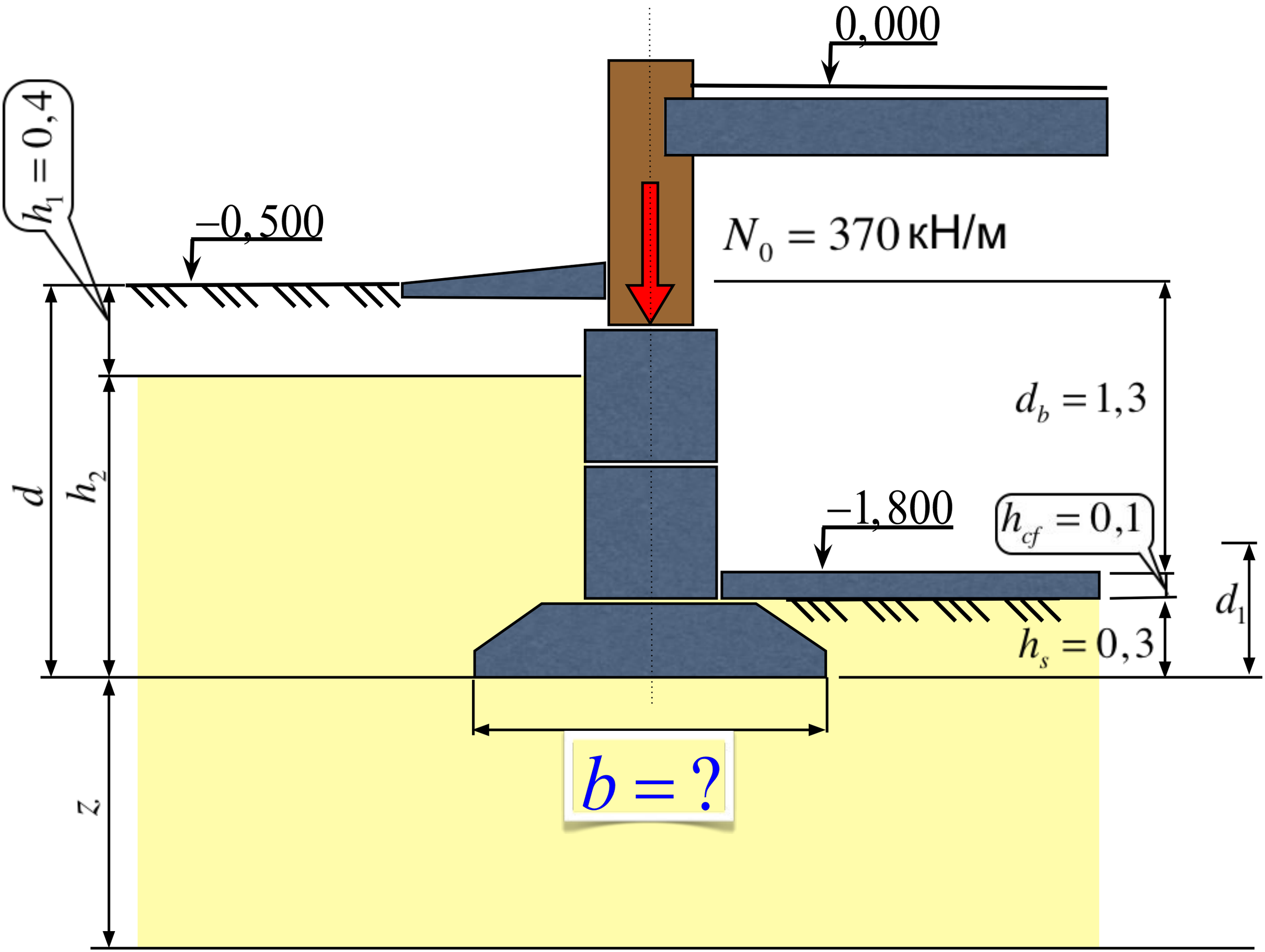
Расчет центрально-нагруженного фундамента (по грунту)

Задача

Рассчитать ленточный сборный ж.б. фундамент жилого дома (9 этажей) с подвалом.
Пол подвала — бетонный толщиной 0,1 метр на 1,3 м ниже уровня планировки DL.
Инженерно-геологические условия (по испытаниям):

№ пп	Наименование слоя					
1	Почвенно-растительный слой	17,0	-	-	-	0,4
2	Песок средней крупности, средней плотности	19,1	30	2	25,0	2,5
3	Песок пылеватый, средней плотности, влажный	18,4	24	4	14,5	2,6
4	Супесь твердая	21,0	25	14	22,0	4,8
5	Глина полутвердая	20,0	20	65	28,2	1,8


0,000
$h_1 = 0,4$
–0,500
$N_0 = 370$ кН/м
$d_b = 1,3$
d
h_2
–1,800
$h_{cf} = 0,1$
d_1
$h_s = 0,3$
z
$b = ?$

Решение

1. Определяем глубину заложения фундамента.

<u>конструктивные требования:</u> ф-т должен быть заложен на 0,2...0,5 м ниже пола подвала.

При толщине фундаментной подушки 0,3 м, толщине пола повала 0,1 м и глубине подвала 1,3 м

$$\boxed{d = 1{,}3 + 0{,}1 + 0{,}3 = 1{,}7}\ \text{м}$$

Рабочим слоем будет II слой - песок средней крупности, но с менее прочным подстилающим слоем (пылеватый песок). Давление на подстилающий слой необходимо проверить.

Глубина промерзания для песков средней крупности не учитывается (непучинистый грунт).

Ширину подошвы фундамента определяем графически.

Для несущего слоя (песка) по СП 22.13330.2011:

$$R = \frac{\gamma_{c_1}\gamma_{c_2}}{k}\left[M_\gamma k_z b \gamma_{II} + M_q d_1 \gamma'_{II} + \left(M_q - 1\right) d_b \gamma'_{II} + M_c c_{II}\right]$$

Таблица 5.5

Угол внутреннего трения φ_{II}, град.	Коэффициенты			Угол внутреннего трения φ_{II}, град.	Коэффициенты		
	M_γ	M_q	M_c		M_γ	M_q	M_c
0	0	1,00	3,14	23	0,66	3,65	6,24
1	0,01	1,06	3,23	24	0,72	3,87	6,45
2	0,03	1,12	3,32	25	0,78	4,11	6,67
3	0,04	1,18	3,41	26	0,84	4,37	6,90
4	0,06	1,25	3,51	27	0,91	4,64	7,14
5	0,08	1,32	3,61	28	0,98	4,93	7,40
6	0,10	1,39	3,71	29	1,06	5,25	7,67
7	0,12	1,47	3,82	30	1,15	5,59	7,95
8	0,14	1,55	3,93	31	1,24	5,95	8,24
9	0,16	1,64	4,05	32	1,34	6,34	8,55

Коэффициенты γ_{c_1}, γ_{c_2}

Таблица 5.4

Грунты	Коэффициент γ_{c1}	Коэффициент γ_{c2} для сооружений с жесткой конструктивной схемой при отношении длины сооружения или его отсека к высоте *L/H*, равном	
		4 и более	1,5 и менее
Крупнообломочные с песчаным заполнителем и пески, кроме мелких и пылеватых	1,4	1,2	1,4
Пески мелкие	1,3	1,1	1,3
Пески пылеватые: маловлажные и влажные насыщенные водой	1,25 1,1	1,0 1,0	1,2 1,2

Коэффициент $\boxed{k = 1}$, т.к. характеристики грунтов получены по результатам испытаний.

Вычислим значения:

$$\boxed{h_2 = d - h_1 = 1{,}7 - 0{,}4 = 1{,}3} \text{ м}$$

$$\boxed{z = (2{,}5 + 0{,}4) - 1{,}7 = 1{,}2} \text{ м}$$

Среднее значение удельного веса грунтов <u>выше</u> подошвы фундамента:

$$\boxed{\gamma'_{II} = \frac{(0{,}4 \cdot 17 + 1{,}3 \cdot 19{,}1)}{(0{,}4 + 1{,}3)} = 18{,}6} \text{ кН/м}^3$$

Приведенную глубину заложения фундамента от уровня пола подвала находим по формуле (5.8) СП:

$$\boxed{d_1 = h_s + h_{cf}\gamma_{cf} / \gamma'_{II}}$$

$\gamma_{cf} = 22$ кН/м^3 – удельный вес материала пола подвала.

$$\boxed{d_1 = 0{,}3 + \frac{0{,}1 \cdot 22}{18{,}6} = 0{,}42} \text{ м}$$

Формула расчетного сопротивления:

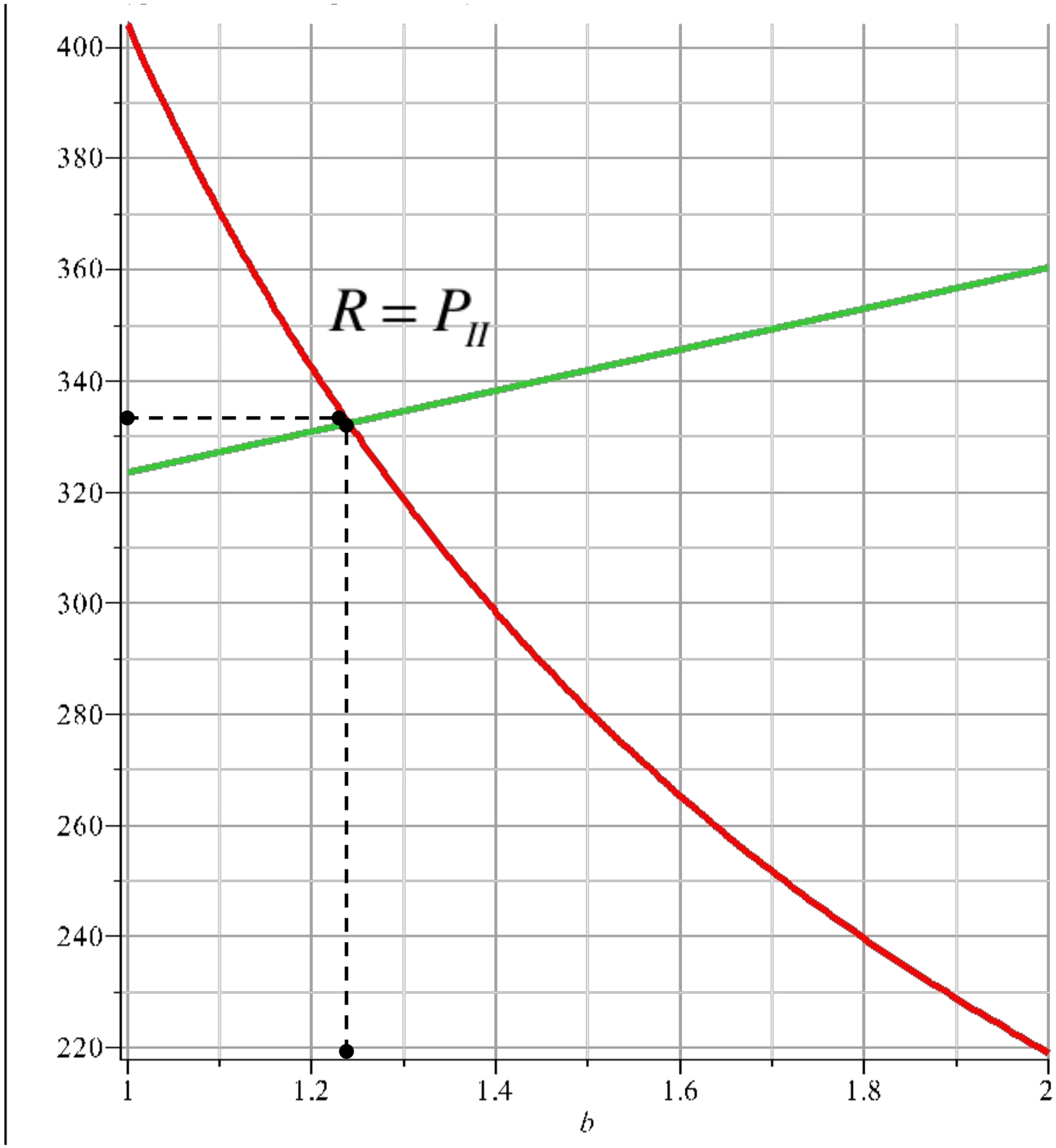
$$R = \frac{\gamma_{c_1}\gamma_{c_2}}{k}\left[M_\gamma k_z b \gamma_{II} + M_q d_1 \gamma'_{II} + \left(M_q - 1\right) d_b \gamma'_{II} + M_c c_{II}\right]$$

$$R(b) = \frac{1{,}4 \cdot 1{,}2}{1}\left\{1{,}15 \cdot b \cdot 19{,}1 + 5{,}59 \cdot 0{,}42 \cdot 18{,}6 + \right.$$

$$\left. + \left(5{,}59 - 1\right) \cdot 1{,}3 \cdot 18{,}6 + 7{,}95 \cdot 2\right\}$$

Среднее давление по подошве фундамента:

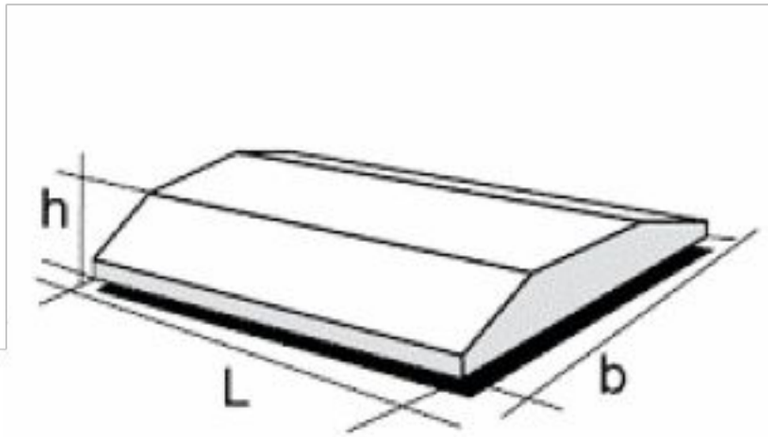
$$p_{II}(b) = \frac{N_{0II}}{A} + \gamma_{mt} d = \frac{370}{b \cdot 1} + 20 \cdot 1.7$$



$$\boxed{b \geq 1{,}240}$$

Принимаем ширину фундамента 1,4 метра, что соответствует размеру фундаментной подушке ФЛ14.24

№	Марка	Размеры, мм			Объем бетона, м3	Масса изделия, т	Класс бетона (марка) по прочности
		b	l	h			
1	ФЛ 6.24-4	600	2380	300	0,37	0,93	В10
2	ФЛ 6.12-4				0,18	0,45	
3	ФЛ 8.24-2	800			0,46	1,15	В12.5
4	ФЛ 8.24-3						
5	ФЛ 8.24-4						
6	ФЛ 8.12-2		1180		0,22	0,55	
7	ФЛ 8.12-3						
25	ФЛ 12.8-3						В12.5
26	ФЛ 12.8-4						
27	ФЛ 14.24-2	1400	2380		0,76	1,9	
28	ФЛ 14.24-3						В15
29	ФЛ 14.24-4						
30	ФЛ 14.12-3		1180		0,36	0,91	
31	ФЛ 16.24-2	1600	2380		0,86	2,15	В12.5
32	ФЛ 16.24-3						В15
33	ФЛ 16.24-4						В25



Расчетное сопротивление для принятой подушки:

$$R(b)=\frac{1,4\cdot 1,2}{1}\{1,15\cdot 1,4\cdot 19,1+5,59\cdot 0,42\cdot 18,6+$$

$$+(5,59-1)\cdot 1,3\cdot 18,6+7,95\cdot 2\}=338 \text{ кПа}$$

<u>Проверяем давление p_{II} :</u>

$$\boxed{p_{II}=\frac{N_0}{b\cdot 1}+\gamma_{mt}d=\frac{370}{1.4\cdot 1}+20\cdot 1.7=298.3} \text{ кПа}$$

$$\boxed{p_{II}=298.3<R=338} \text{ кПа}$$

Проверка давления на слабый подстилающий слой (III) – песок пылеватый

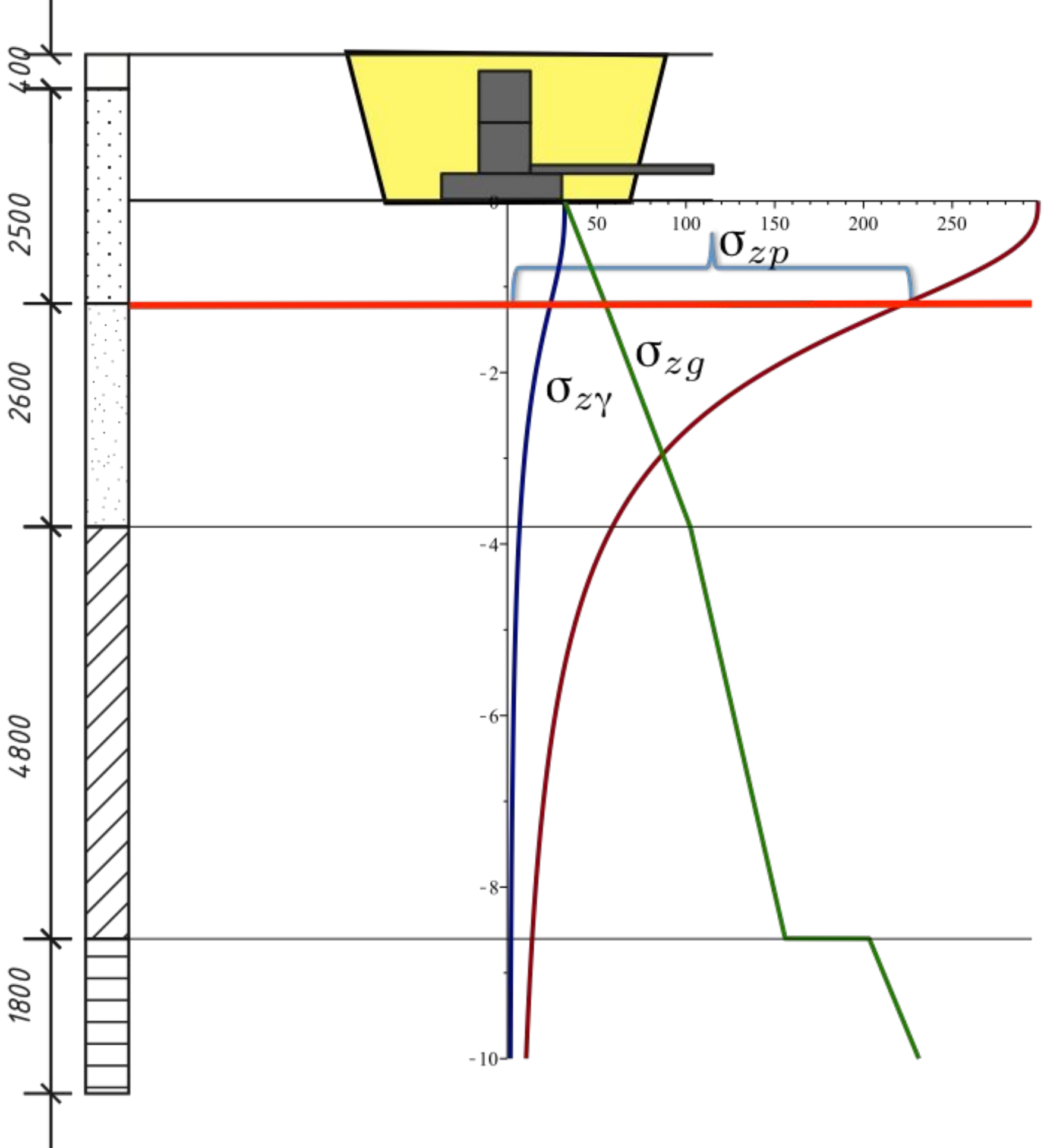
Проверка заключается в выполнении условия п. 5.6.25 СП 22.13330.2011 формула (5.9):

$$\boxed{\sigma_z = (\sigma_{zp} - \sigma_{z\gamma}) + \sigma_{zg} \leqslant R}$$

σ_{zp} вертикальные напряжения под центром тяжести подошвы фундамента на кровле слабого грунта от нагрузки (т.е. на глубине Z=1.2 метра)

$\sigma_{z\gamma}$ σ_{zg} то же и там же, только от ослабления напряжений из-за веса вынутого грунта под котлован и от собственного веса грунта

$$\boxed{\sigma_{zp} = \alpha P_{\mathrm{II}}} \qquad \boxed{\sigma_{z\gamma} = \alpha \sigma_{zg,0}}$$


400
2500
2600
4800
1800
0
50
100
150
200
250
-2
-4
-6
-8
-10
σzp
σzg
σzγ

Найдем значение напряжения от веса грунта под подошвой фундамента (т.е. Z=0):

$$\sigma_{zg,0} = \gamma_{\text{II}}^{(1)} h^{(1)} + \gamma_{\text{II}}^{(2)} (d - h^{(1)})$$

$$\sigma_{zg,0} = 17 \cdot 0.4 + 19.1 \cdot (1.7 - 0.4) = 31.6 \text{ кПа}$$

Найдем значение напряжения от веса вынутого грунта под подошвой фундамента:

$$\sigma_{z\gamma} = \alpha \sigma_{zg,0} = 1 \cdot 31.6 = 31.6 \text{ кПа}$$

Найдем значение напряжения от внешней нагрузки под подошвой фундамента:

$$\sigma_{zp} = \alpha P_{\text{II}} = 1 \cdot 298.3 = 298.3 \text{ кПа}$$

Найдем значение напряжения от веса грунта на кровле слабого грунта (т.е. Z=1.2):

$$\sigma_{zg,\,1.2} = \gamma_{\mathrm{II}}^{(1)} h^{(1)} + \gamma_{\mathrm{II}}^{(2)} h^{(2)}$$

$$\sigma_{zg,\,1.2} = 17 \cdot 0.4 + 19.1 \cdot 2.5 = 54.6 \text{ кПа}$$

Найдем значение альфа для ленточного фундамента на кровле слабого грунта для глубины

$$\xi = \frac{2z}{b} = \frac{2 \cdot 1.2}{1.4} = 1.7$$

интерполяцией по таблице СП:

Таблица 5.8

ξ	Коэффициент α для фундаментов							
	круглых	прямоугольных с соотношением сторон $\varepsilon = l / b$, равным						ленточных ($\varepsilon \geq 10$)
		1,0	1,4	1,8	2,4	3,2	5	
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,949	0,960	0,972	0,975	0,976	0,977	0,977	0,977
0,8	0,756	0,800	0,848	0,866	0,876	0,879	0,881	0,881
1,2	0,547	0,606	0,682	0,717	0,739	0,749	0,754	0,755
1,6	0,390	0,449	0,532	0,578	0,612	0,629	0,639	0,642
2,0	0,285	0,336	0,414	0,463	0,505	0,530	0,545	0,550

Найдем значение альфа для ленточного фундамента на кровле слабого грунта для глубины

$$\alpha = 0.613$$

$$\sigma_{z\gamma,\,1.2} = 0.613 \cdot 31.6 = 19.4 \text{ кПа}$$

$$\sigma_{zp,\,1.2} = 0.613 \cdot 298.3 = 182.9 \text{ кПа}$$

$$\boxed{\sigma_z = 182.9 + 54.6 - 19.4 = 218.1 \text{ кПа}}$$

Ищем значение R_z для условного фундамента на кровле слабого грунта для ширины b_z условного фундамента:

$$A_z = \frac{N_0}{\sigma_{zp}} = \frac{370}{182.9} = 2.0 \text{ м}^2$$

$$b_z = \frac{A_z}{1 \text{ м}} = 2.0 \text{ м}$$

Для песка пылеватого влажного $\gamma_{c1} = 1.25,\ \gamma_{c2} = 1,\ k = 1$

$$M_\gamma = 0.72,\ M_q = 3.87, M_c = 6.45,\ c_{II} = 4\ \text{кПа}$$

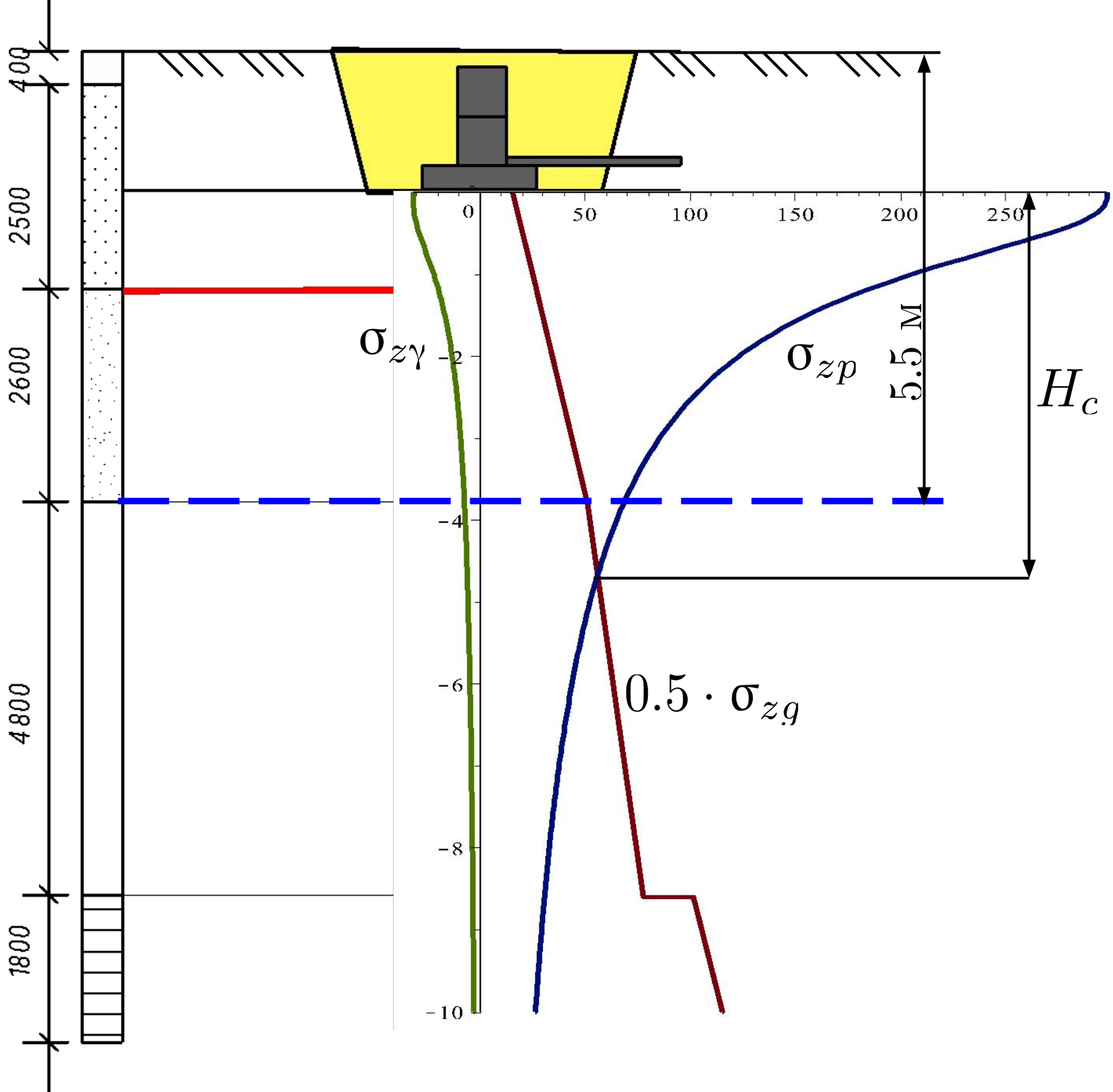
$$\gamma' = \frac{0.4 \cdot 17 + (1.3 + 1.2) \cdot 19.1}{0.4 + 1.3 + 1.2} = 18.8\ \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$$

$$\gamma = 18.4\ \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$$

$$d_1 = (1.2 + 0.3) + \frac{0.1 \cdot 22}{18.8} = 1.6\ \text{м} \qquad d_b = 1.3\ \text{м}$$

$$\boxed{R = \frac{1.25 \cdot 1}{1}\{0.72 \cdot 1 \cdot 2.0 \cdot 18.4 + 3.8 \cdot 1.6 \cdot 18.8 + (3.87 - 1) \cdot 1.3 \cdot 18.8 + 6.45 \cdot 4\} = 296\ \text{кПа}}$$

$$\boxed{\sigma_z = \mathbf{218.1}\ \text{кПа} < \mathbf{R} = \mathbf{296}\ \text{кПа}}$$


400
2500
2600
4800
1800
0
50
100
150
200
250
-2
-4
-6
-8
-10
$\sigma_{z\gamma}$
σ_{zp}
5.5 м
H_c
$0.5 \cdot \sigma_{zg}$

Расчет осадки фундамента

Метод послойного суммирования

Согласно СП 22.13330.2011 осадку основания определяют с использованием схемы линейно деформируемого полупространства по формуле (5.16)

$$S = \beta \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(\sigma_{zp,i} - \sigma_{z\gamma,i}\right) \cdot h_i}{E_i} + \beta \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{\sigma_{z\gamma,i} \cdot h_i}{E_{e,i}}$$

Согласно пункту 5.6.34 второе слагаемое можно не учитывать, если глубина котлована меньше 5 метров. Тогда формула осадки для нашей задачи получит вид:

$$\boxed{S = \beta \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(\sigma_{zp,i} - \sigma_{z\gamma,i}\right) \cdot h_i}{E_i}}$$

Толщина элементарного слоя грунта h_i должна быть не более 0,4b.

Среднее значение вертикального нормального напряжения в i-м слое грунта зависят от размера, формы и глубины заложения фундамента:

$$\boxed{\sigma_{zp} = \alpha P_{II}}$$

α — коэффициент, принимаемый по таблице (5.8):

Таблица 5.8

ξ	Коэффициент α для фундаментов							
	круглых	прямоугольных с соотношением сторон $\varepsilon = l/b$, равным						ленточных ($\varepsilon \geq 10$)
		1,0	1,4	1,8	2,4	3,2	5	
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,949	0,960	0,972	0,975	0,976	0,977	0,977	0,977
0,8	0,756	0,800	0,848	0,866	0,876	0,879	0,881	0,881
1,2	0,547	0,606	0,682	0,717	0,739	0,749	0,754	0,755
1,6	0,390	0,449	0,532	0,578	0,612	0,629	0,639	0,642
2,0	0,285	0,336	0,414	0,463	0,505	0,530	0,545	0,550
2,4	0,214	0,257	0,325	0,374	0,419	0,449	0,470	0,477

Относительная глубина:

$$\xi = 2z/b$$

$$P_{\text{II}} = 298 \text{ кПа}$$

Составим таблицу:

ξ	z	α	$\sigma_{zp,i}$	$\sigma_{zg,i}$	$0{,}5 \cdot \sigma_{zg,i}$	$\sigma_{z\gamma,i}$	E_i	S_i
0,0	0,0	1,000	298,0	31,6	15,8	31,6		
0,4	0,3	0,977	291,1	36,9	18,5	30,9	25000	0,0024
0,8	0,6	0,881	262,5	42,3	21,1	27,8	25000	0,0022
1,2	0,8	0,755	225,0	47,6	23,8	23,9	25000	0,0020
1,6	1,1	0,642	191,3	53,0	26,5	20,3	25000	0,0017
2,0	1,4	0,550	163,9	58,3	29,2	17,4	14500	0,0025
2,4	1,7	0,477	142,1	63,7	31,8	15,1	14500	0,0021
2,8	2,0	0,420	125,2	68,8	34,4	13,3	14500	0,0018
3,2	2,2	0,374	111,5	74,0	37,0	11,8	14500	0,0016
3,6	2,5	0,337	100,4	79,1	39,6	10,6	14500	0,0015
4,0	2,8	0,306	91,2	84,3	42,1	9,7	14500	0,0013
4,4	3,1	0,280	83,4	89,4	44,7	8,8	14500	0,0012
4,8	3,4	0,258	76,9	94,6	47,3	8,2	14500	0,0011
5,2	3,6	0,239	71,2	99,8	49,9	7,6	14500	0,0010
5,6	3,9	0,223	66,5	105,6	52,8	7,0	22000	0,0006
6,0	4,2	0,208	62,0	111,5	55,8	6,6	22000	0,0006
6,4	4,5	0,196	58,4	117,4	58,7	6,2	22000	0,0005
6,8	4,8	0,185	55,1	123,3	61,6	5,8	22000	
7,2	5,0	0,175	52,2	129,2	64,6	5,5	22000	
7,6	5,3	0,166	49,5	135,0	67,5	5,2	22000	
8,0	5,6	0,158	47,1	140,9	70,5	5,0	22000	
8,4	5,9	0,150	44,7	146,8	73,4	4,7	22000	
								0,0241