

## ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРЕДЕЛАХ ПОДОШВЫ СТОЛБЧАТОГО ФУНДАМЕНТА МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ С ГЛУБИНОЙ. МЕТОД УГЛОВЫХ ТОЧЕК

Мелянюк М. А.

(научный руководитель – Бойко И. Л.)

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

### Аннотация.

В данной статье рассмотрено, каким образом распределяются вертикальные напряжения в основании по глубине под центром столбчатого фундамента и под его угловыми точками. Отдельное внимание уделено методу угловых точек, позволяющему определить напряжения под любой точкой фундамента.

### Введение.

От любого сооружения нагрузка передаётся на основание через подошву фундамента. В грунтовом массиве, лежащем ниже подошвы фундамента, возникает напряжённое состояние, влияющее на деформацию основания, на прочность и устойчивость грунтовой толщи. Это напряжённое состояние мы можем определить по формулам теории линейно-деформируемых тел, приняв некоторые допущения.

Напряжения в основании в пределах подошвы столбчатого фундамента неодинаковы. Существует метод расчёта напряжений в основании по оси, проходящей через центр подошвы фундамента. Для определения напряжений под углами фундамента используется метод угловых точек. Метод является универсальным: с помощью него можно определить напряжения под любой, отличной от вышеперечисленных, точкой под подошвой фундамента.

### Основная часть.

Осадку грунтов основания обычно определяют только от вертикальных нормальных напряжений  $\sigma_{zp}$ , значения которых под разными точками подошвы фундамента будут отличны

$\xi = 2z/b$	Прямоугольные фундамента с соотношением сторон $\eta = l/b$						Ленточные фундаменты при $\eta \geq 10$
	1,0	1,4	1,8	2,4	3,2	5,0	
1	2	3	4	5	6	7	8
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,960	0,972	0,975	0,976	0,977	0,977	0,977
0,8	0,800	0,848	0,866	0,876	0,879	0,881	0,881
1,2	0,606	0,682	0,717	0,739	0,749	0,754	0,755
1,6	0,449	0,532	0,578	0,612	0,629	0,639	0,642
2,0	0,336	0,414	0,463	0,505	0,530	0,545	0,550
2,4	0,257	0,325	0,374	0,419	0,449	0,470	0,477
2,8	0,201	0,260	0,304	0,349	0,383	0,410	0,420
3,2	0,160	0,210	0,251	0,294	0,329	0,360	0,374

**Рисунок SEQ Рисунок \\* ARABIC 1.**  
**Значения коэффициента  $\alpha$**

друг от друга. Так, для точек, расположенных на вертикали, проходящей через центр фундамента, сжимающее напряжение определяется по формуле:

$$\sigma_{zp} = \alpha * p_0,$$

где  $\alpha$  – коэффициент рассеивания напряжений; является табличным коэффициентом (рис. 1).

$\alpha$  зависит от формы фундамента, т.е. отношения сторон фундамента, если он прямоугольный, выраженного через  $\eta = l/b$ , где  $l$  и  $b$  – значения его длины и ширины, соответственно, либо принимается по специальным графам для круглых и ленточных фундаментов. Другой величиной, от которой зависит коэффициент, является относительная глубина, равная  $\zeta = 2z/b$ ,

где  $z$  есть расстояние от подошвы фундамента до рассматриваемой точки.

Теперь скажем немного о множителе  $p_0$ . Рассматриваемый компонент является дополнительным вертикальным давлением на основание и вычисляется как разность давления на основание от подошвы фундамента (сумма вертикальной силы, приходящей на фундамент, и собственного веса фундамента, делённая на площадь подошвы фундамента) и вертикальных напряжений от собственного веса грунта на уровне подошвы фундамента (зависят от удельного веса грунта и глубины заложения):

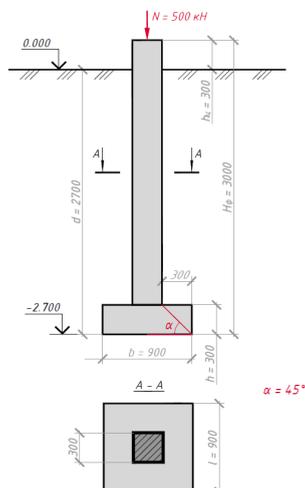
$$p_0 = p - \sigma_{zg,0}$$

Следующим пунктом определим конец ведения расчёта. И здесь, в принципе, всё однозначно: расчёт ведём до нижней границы глубины сжимаемой толщи. Считается, что при достижении такой глубины деформациями грунта при определении осадки основания можно пренебречь. Нам необходимо сравнить две величины: напряжения от дополнительного давления  $\sigma_p$  и напряжения от собственного веса грунта  $\sigma_{zg}$ , домноженного на коэффициент, принимаемый обычно 0,2 (для слабых грунтов – 0,1; для гидротехнических сооружений с большой площадью опирания – 0,5). Данный метод является достаточно условным, однако он заложен в нормах проектирования и является общепринятым.

Для того, чтобы произвести расчёт, зададимся параметрами фундамента, характеристиками грунта и нагрузкой:

Фундамент примем столбчатым мелкого заложения ( $H_{\phi} \leq 4 * b$ ); конструкция – жёсткая ( $\alpha \geq 40^\circ$ ), материал – железобетон (рис. 2).

Основание песчаное; объёмный вес грунта  $\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$ ; угол внутреннего трения  $\varphi = 35^\circ$ ; удельное сцепление грунта  $c = 2 \text{ МПа}$ .



Продольная сжимающая сила N = 500 кН.

Теперь мы имеем всё для того, чтобы произвести расчёт и узнать сжимающие напряжения для точек, расположенных на вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента.

Проведём расчёт и получим значения сжимающих напряжений для центральных точек (табл. 1).

*Определение осадки прямоугольного фундамента методом постоянного суммирования*

$d=2,7 \text{ м}$	$\gamma_{II}=18 \text{ кН/м}^3$	$\sigma_{zg} = \gamma \cdot d_n + \sum_{i=1}^n (\gamma_{m_i} \cdot h_i)$	$\sigma_{z\gamma_i} = \sigma_{zg} \cdot \alpha_i$	$\sigma_{zp_i} = \alpha_i \cdot p_0$
$l=0,9 \text{ м}$	$P=688,0 \text{ кПа}$	$s = \beta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\alpha_{zp_i} - \alpha_{z\gamma_i}) \cdot h_i}{E_i} + \beta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp_i} \cdot h_i}{E_i}$	$\alpha_{zp} = \frac{\alpha_{zp_i} + \alpha_{z\gamma_i}}{2}$	$\Sigma S = 12 \text{ мм}$
$b=0,9 \text{ м}$	$l/b=1,0$			
	$\sigma_{zg0}=48,6 \text{ кПа}$			

Слой	№ точки	$h_i$ , м	$z_{i+1}$ , м	$\xi = z/b$	$\alpha_i$	$\gamma_{m_i}$ , кН/м <sup>3</sup>	$\sigma_{zg_i}$ , кПа	$\sigma_{z\gamma_i}$ , кПа	$\sigma_{zp_i}$ , кПа	$\sigma_{zp_i} - \sigma_{z\gamma_i}$ , кПа	$0,2\sigma_{zp_i}$ , кПа	$E_i$ , кПа	$S_i$ , м
Песок	0	0,00	0,000	1,000	18	48,6	48,6	639,40	626,6	12,8	9,7	20000	0,0000
	1	0,18	0,180	0,200	18	51,84	46,656	613,82	562,7	51,1	10,4	20000	0,0024
	2	0,18	0,360	0,400	18	55,08	38,88	511,52	449,5	62,0	11,0	20000	0,0020
	3	0,18	0,540	0,606	18	58,32	29,4516	387,48	337,3	50,2	11,7	20000	0,0015
	4	0,18	0,720	0,800	18	61,56	21,8214	287,09	251,0	36,1	12,3	20000	0,0011
	5	0,18	0,900	1,000	18	64,8	16,3296	214,84	189,6	25,2	13,0	20000	0,0008
	6	0,18	1,080	1,200	18	68,04	12,4902	164,33	146,4	17,9	13,6	20000	0,0006
	7	0,18	1,260	1,400	18	71,28	9,7686	128,52	115,4	13,1	14,3	20000	0,0005
	8	0,18	1,440	1,600	18	74,52	7,776	102,30	93,0	9,3	14,9	20000	0,0004
	9	0,18	1,620	1,800	18	77,76	6,3666	83,76	76,4	7,4	15,6	20000	0,0003
Песок	10	0,18	1,800	2,000	18	81	5,2488	69,06	63,6	5,4	16,2	20000	0,0003
	11	0,18	1,980	2,200	18	84,24	4,4226	58,19	53,7	4,5	16,8	20000	0,0002
	12	0,18	2,160	2,400	18	87,48	3,7422	49,23	46,0	3,2	17,5	20000	0,0002
	13	0,18	2,340	2,600	18	90,72	3,2562	42,84	40,0	2,8	18,1	20000	0,0002
	14	0,18	2,520	2,800	18	93,96	2,8188	37,09	34,8	2,3	18,8	20000	0,0001
	15	0,18	2,700	3,000	18	97,2	2,4786	32,61	30,7	1,9	19,4	20000	0,0001
	16	0,18	2,880	3,200	18	100,4	2,187	28,77	27,2	1,6	20,1	20000	0,0001
	17	0,18	3,060	3,400	18	103,7	1,944	25,58	24,3	1,3	20,7	20000	0,0001
	18	0,18	3,240	3,600	18	106,9	1,7496	23,02	21,7	1,3	21,4	20000	0,0002
	19	0,18	3,420	3,800	18	110,2	1,5552	20,46	19,8	0,7	22,0	20000	0,0001

**Таблица SEQ Таблица 1\* ARABIC 1.**  
**Расчёт напряжений в основании по оси, проходящей через центр фундамента**

Далее поговорим о методе угловых точек. Большой интерес к методу вызывает факт того, что он позволяет вычислить напряжения в любой точке грунтового основания в области подошвы фундамента и за её пределами. Принципиальных отличий при подготовке данных для расчёта нет. Следует учесть, что относительная глубина будет вычисляться по формуле  $\xi = z/b$ , коэффициент рассеивающих напряжений  $\alpha$ , зависящий от значения  $\xi$ , будем принимать по специальной таблице для точек на угловых вертикалях. Проведём расчёт для крайних угловых точек (табл. 2).

Также отметим: для нахождения вертикальных напряжений под любой точкой фундамента методом угловых точек площадь подошвы разбивается на такие прямоугольники, в которых рассматриваемая точка оказалась бы угловой (рис. 3). Напряжение в точке будет

$d=2,7 \text{ м}$	$\gamma_{II}=18 \text{ кН/м}^3$	$\sigma_{zg} = \gamma \cdot d_n + \sum_{i=1}^n (\gamma_{m_i} \cdot h_i)$	$\sigma_{z\gamma_i} = \sigma_{zg} \cdot \alpha_i$	$\sigma_{zp_i} = \alpha_i \cdot p_0$
$l=0,9 \text{ м}$	$P=688,0 \text{ кПа}$	$s = \beta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\alpha_{zp_i} - \alpha_{z\gamma_i}) \cdot h_i}{E_i} + \beta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp_i} \cdot h_i}{E_i}$	$\alpha_{zp} = \frac{\alpha_{zp_i} + \alpha_{z\gamma_i}}{2}$	$\Sigma S = 6 \text{ мм}$
$b=0,9 \text{ м}$	$l/b=1,0$			
	$\sigma_{zg0}=48,6 \text{ кПа}$			

Слой	№ точки	$h_i$ , м	$z_{i+1}$ , м	$\xi = z/b$	$\alpha_i$	$\gamma_{m_i}$ , кН/м <sup>3</sup>	$\sigma_{zg_i}$ , кПа	$\sigma_{z\gamma_i}$ , кПа	$\sigma_{zp_i}$ , кПа	$\sigma_{zp_i} - \sigma_{z\gamma_i}$ , кПа	$0,2\sigma_{zp_i}$ , кПа	$E_i$ , кПа	$S_i$ , м	
Песок	0	0,00	0,000	0,500	18	48,6	24,3	319,70	291,4	28,3	9,7	20000	0,0000	
	1	0,2	0,180	0,200	18	51,84	19,99404	263,05	237,3	25,7	10,4	20000	0,0010	
	2	0,2	0,360	0,400	18	55,08	16,0866	211,64	189,9	21,7	11,0	20000	0,0008	
	3	0,2	0,540	0,600	18	58,32	12,7818	168,16	150,9	17,3	11,7	20000	0,0007	
	4	0,2	0,720	0,800	18	61,56	10,1574	133,63	120,2	13,4	12,3	20000	0,0005	
	5	0,2	0,900	1,000	18	64,8	8,1162	106,78	96,2	10,6	13,0	20000	0,0004	
	6	0,2	1,080	1,200	18	68,04	6,5124	85,68	77,7	8,0	13,6	20000	0,0003	
	7	0,2	1,260	1,400	18	71,28	5,2974	69,69	63,9	6,8	14,3	20000	0,0003	
	8	0,2	1,440	1,600	18	74,52	4,4226	58,19	53,4	4,8	14,9	20000	0,0002	
	9	0,2	1,620	1,800	18	77,76	3,6936	48,59	44,8	3,8	15,6	20000	0,0002	
Песок	10	0,2	1,800	2,000	18	81	3,1104	40,92	38,4	2,5	16,2	20000	0,0002	
	11	0,2	1,980	2,200	18	84,24	2,7216	35,81	33,2	2,6	16,8	20000	0,0001	
	12	0,2	2,160	2,400	18	87,48	2,3328	30,69	28,6	2,1	17,5	20000	0,0001	
	13	0,2	2,340	2,600	18	90,72	2,02176	26,60	25,1	1,5	18,1	20000	0,0001	
	14	0,2	2,520	2,800	18	93,96	1,78848	23,53	22,0	1,5	18,8	20000	0,0001	
	15	0,2	2,700	3,000	18	97,2	1,55034	20,40	19,8	0,6	19,4	20000	0,0001	
	16	0,2	2,880	3,200	18	100,4	1,458	19,18	19,8	0,4	20,1	20000	0,0001	
	17													

**Таблица SEQ Таблица 1\* ARABIC 2.**  
**Расчёт напряжений в основании по оси, проходящей через угловые точки фундамента**

определяться как сумма напряжений от загрузки этих прямоугольных площадок. Добавим к вышесказанному, что условно можем выделить три случая по условной разбивке подошвы:

- Точка находится на контуре подошвы;
- Точка внутри области под подошвой;
- Точка вне контура подошвы;

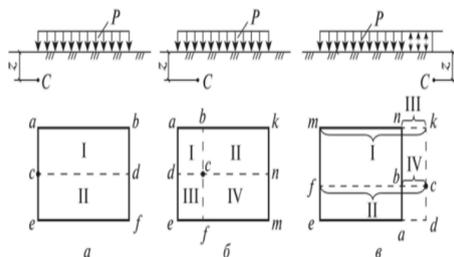


Рисунок SEQ Рисунок 1\* ARABIC  
3. Метод угловых точек

Теперь мы можем сравнить схемы и эпюры (рис. 4). На них представлены результаты напряжений в основании на оси под центральной точкой и напряжения под угловыми точками, рассчитанные методом угловых точек.

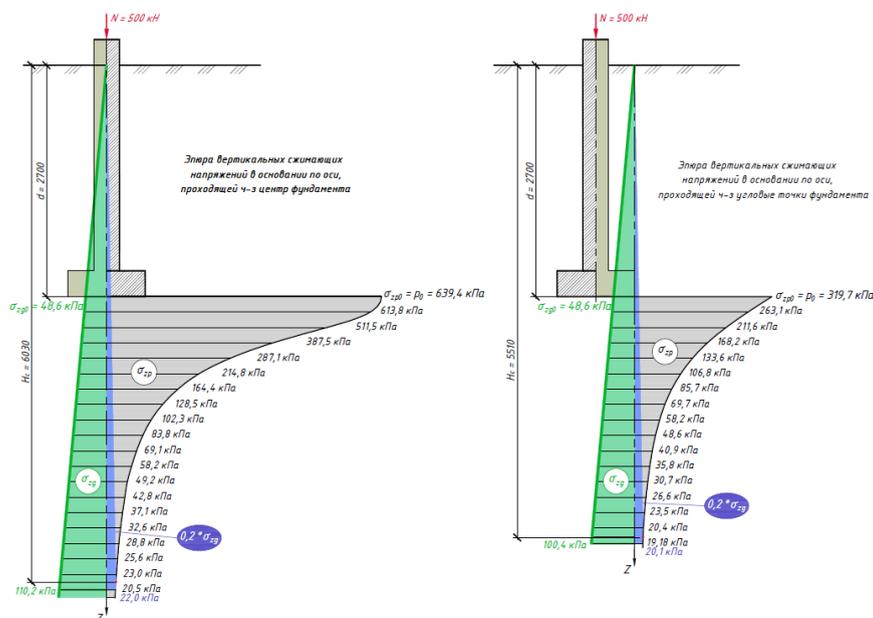


Рисунок 4. Сравнение эпюр напряжений под центральной и под угловой точкой

### Вывод.

В данной статье были рассмотрены методики расчёта напряжений в основании под центральной и под угловой точкой фундамента. По результатам расчёта были построены эпюры напряжений в основании, проведён их анализ. Определено значение метода угловых точек при расчёте вертикальных сжимающих усилий под различными точками фундамента.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сернов В.А. [и др.] Электронный учебно-методический комплекс «Механика грунтов, основания и фундаменты» Ч. 1. – М.; Изд-во АСВ, 2020. – 218с.;
2. Далматов Б.И. [и др.] Механика грунтов. Основы геотехники. Ч. 1. – М.; Изд-во АСВ,

2000. – 201с.;

3. Уласик Т. М., Бойко И. Л., Кравцов В. Н., Кремнёв А. П. ЭУМК по дисциплине «Механика грунтов, основания и фундаменты» Ч. 2.; БНТУ – 170 с.;

4. Никитенко М. И., Бойко И. Л. [и др.] «Методические указания и задания для студентов строительных специальностей»; БНТУ – 81 с.