

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСАДОК АНИЗОТРОПНЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

Г.И. Швецов, О.А. Коробова

В условиях перехода экономики страны в рамки рыночных отношений, а также когда многие здания и сооружения по тем или иным причинам находятся в аварийном состоянии, требуют ремонта или реконструкции, в том числе и в результате их надстройки, особую актуальность приобретает разработка такой теории расчета грунтовых оснований, которая в достаточно полной мере отражала бы реальные свойства грунтов и явления происходящие в грунтовых основаниях при действии внешних нагрузок. Одной из важнейших задач является более надежное прогнозирование напряженно-деформированного состояния (н.д.с.) грунтовых оснований, позволяющее использовать те возможности, которыми эти основания обладают, т.е. получить наиболее надежные варианты фундаментов и сооружений из грунта при обеспечении достаточной безопасности в процессе эксплуатации. Вопрос об учете деформационной анизотропии грунтов в расчетах оснований имеет большое практическое значение, как свидетельствуют многочисленные исследования у нас в стране и за рубежом, что зачастую связано с трудностями, заключающимися в отсутствии простых и эффективных методов учета деформационной анизотропии, а также способов определения расчетных параметров анизотропного грунта. Учет деформационной анизотропии в расчете осадок фундаментов и сооружений позволит в ряде случаев уменьшить их размеры и получить экономию материалов и средств, в других же случаях - повысить надежность эксплуатации их оснований.

В связи с этим, для оценки степени влияния анизотропии деформационных свойств грунтовых оснований на характер напряженного состояния и развитие деформаций в линейно-деформируемых слоях различной мощности (от 1,3b до 7b) при фиксированной длине слоя $l = 9b$ (b – ширина загруженного участка) была применена модель анизотропного основания в виде трансверсально-изотропного упругого полупространства [1]. Принятая в расчетах трансверсально-изотропная модель

грунтового основания, описывается пятью независимыми параметрами: E_x , E_z , ν_{zx} , ν_{yx} , G_{xz} . Исследование н.д.с. проведено на ЭВМ методом конечных элементов с применением математического планирования эксперимента. Расчеты выполнены для стабилизированного состояния грунтов, находящихся в условиях плоской деформации при горизонтальном положении плоскости изотропии среды.

В расчетах использовано выражение закона Гука в форме:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_z} \left(1 - \frac{E_z}{E_x} \nu_{zx}^2\right) - \frac{\nu_{xz} \sigma_{xz}}{E_x} (1 + \nu_{xy}),$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} (1 - \nu_{zx}^2) - \frac{\nu_{zx} \sigma_z}{E_z} (1 + \nu_{yx}),$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{G_{xz}} \tau_{xz}, \quad (1)$$

где E_x , E_z – модули деформации среды по направлениям, совпадающим с плоскостью изотропии и перпендикулярном к ней соответственно;

ν_{zx} – коэффициент Пуассона (коэффициент бокового расширения грунта), характеризующий линейные деформации в плоскости изотропии при действии направлений оси z;

ν_{xz} – то же, в направлении оси z при действии напряжений в плоскости изотропии;

$\nu_{xz} = \nu_{zx} (E_z, E_x)$;

ν_{yx} – то же, в плоскости изотропии;

G_{xz} – модуль сдвига в вертикальной плоскости xz.

Для теоретических исследований была принята полиномиальная регрессионная модель 2-го порядка и применен план, близкий к Д - оптимальному, составленный на основе полного факторного плана 2^4 [2], а в качестве факторов варьирования – параметры деформационной анизотропии среды: E_x , E_z , ν_{zx} , и ν_{yx} , каждый из которых варьировался на трех уровнях. Уровни и интервал

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСАДОК АНИЗОТРОПНЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

варьирования приведены в табл. 1. Матрица планирования эксперимента в безразмерных и натуральных значениях факторов приведена в табл. 2.

Таблица 1

Факторы варьирования	X_i	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		нижний	нулевой	верхний	
		-1	0	1	
E_z , МПа	X_1	5	22,5	40	17,5
E_x , МПа	X_2	5	22,5	40	17,5
ν_{zx}	X_3	0,25	0,30	0,35	0,05
ν_{yx}	X_4	0,25	0,30	0,35	0,05

Таблица 2. Информационная матрица планирования эксперимента в безразмерных и натуральных значениях факторов

№ опыта	План эксперимента				Натуральные значения факторов			
	X_1	X_2	X_3	X_4	E_z , МПа	E_x , МПа	ν_{zx}	ν_{yx}
1	-1	-1	-1	-1	5,0	5,0	0,25	0,25
2	+1	-1	-1	-1	40,0	5,0	0,25	0,25
3	-1	+1	-1	-1	5,0	40,0	0,25	0,25
4	+1	+1	-1	-1	40,0	40,0	0,25	0,25
5	-1	-1	+1	-1	5,0	5,0	0,35	0,5
6	+1	-1	+1	-1	40,0	5,0	0,35	0,25
7	-1	+1	+1	-1	5,0	40,0	0,35	0,25
8	+1	+1	+1	-1	40,0	40,0	0,35	0,25
9	-1	-1	-1	+1	5,0	5,0	0,25	0,35
10	+1	-1	-1	+1	40,0	5,0	0,25	0,35
11	-1	+1	-1	+1	5,0	40,0	0,25	0,35
12	+1	+1	-1	+1	40,0	40,0	0,25	0,35
13	-1	-1	+1	+1	5,0	5,0	0,35	0,35
14	+1	-1	+1	+1	40,0	5,0	0,35	0,35
15	-1	+1	+1	+1	5,0	40,0	0,35	0,35
16	+1	+1	+1	+1	40,0	40,0	0,35	0,35
17	-1	0	0	0	5,0	22,5	0,30	0,30
18	+1	0	0	0	40,0	22,5	0,30	0,30
19	0	-1	0	0	22,5	5,0	0,30	0,30
20	0	+1	0	0	22,5	40,0	0,30	0,30
21	0	0	-1	0	22,5	22,5	0,25	0,30
22	0	0	+1	0	22,5	22,5	0,35	0,30
23	0	0	0	-1	22,5	22,5	0,30	0,25
24	0	0	0	+1	22,5	22,5	0,30	0,35

Изменение напряженного состояния полуплоскости исследовано в трех ее характерных зонах – в зоне I (будущая зона сдвигов, расположена под кромкой загруженного участка плоскости), в зоне II (потенциальная область уплотненного ядра, расположена под средней частью загруженного участка), в зоне III (область расположена под вершиной потенциального грунтового ядра). Напряженное состояние

каждой из зон оценивалось осредненными значениями компонент σ_z , σ_x , τ_{zx} , вычисленных для (4...7) конечных элементов, составляющих соответствующую зону.

Результаты расчетов представлены в виде графиков поправочных коэффициентов влияния анизотропии $K_\alpha = \sigma_{z\alpha}/\sigma_z$ и $K'_\alpha = \sigma_{x\alpha}/\sigma_x$, показывающих, какую долю от соответствующих напряжений σ_x и

σ_z в рассматриваемых характерных точках изотропной среды составляют напряжения $\sigma_{z\alpha}$ и $\sigma_{x\alpha}$ в соответствующих точках анизотропной среды. Поправочные коэффициенты K_α и K'_α вычислены для точек грунтового массива, расположенных на центральной и угловой вертикалях загруженного участка поверхности анизотропного основания. Значения коэффициентов дают возможность без особых затруднений производить расчет осадок и крена фундаментов, расположенных на анизотропном основании. В случае необходимости можно провести интерполяцию графических значений поправочных коэффициентов K_α и K'_α как по показателю деформационной анизотропии α , так и по глубине расположения точек, в которых вычисляются напряжения $\sigma_{x\alpha}$ и $\sigma_{z\alpha}$.

В качестве примера в табл. 3 приведены значения поправочных коэффициентов K_α для вычисления напряжений σ_z (центральная вертикаль: h/b

= 0,2...4,2; $\alpha = 0,6$ и 1,8) при действии равномерно распределенной нагрузки.

Исследовано также напряженное состояние анизотропной полуплоскости, загруженной на участке ее поверхности вертикальной и горизонтальной нагрузками, изменяющимися по линейному закону (равномерная, треугольная и трапецеидальная нагрузки). Наличие результатов расчетов напряженного состояния для неравномерно распределенной внешней нагрузки позволяет производить соответствующие расчеты осадок оснований различного рода насыпей. При действии различных видов вертикальной нагрузки, а также и горизонтальной, в пределах полуплоскости с показателями $\alpha < 1$ возникают области сжатия и растяжения. Вертикальные растягивающие напряжения возникают на некотором расстоянии от загруженного участка и по мере удаления от него распространяются на все большую глубину, которая зависит от показателя α : при $\alpha = 0,13$ $Z_p = 0,1b$, а при $\alpha = 8$ $Z_p = 0,7b$.

Таблица 3

Мощность слоя h/b	Расчетные значения поправочных коэффициентов											
	0,2b	0,6b	1,0b	1,4b	1,8b	2,3b	2,6b	3,0b	3,4b	3,8b	4,2b	
	$\alpha=0,6$											
1,3	0,97	0,93	0,89	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,5	0,97	0,93	0,89	0,86	0,85	0,84	-	-	-	-	-	-
3,8	0,97	0,93	0,89	0,86	0,85	0,84	0,82	0,82	0,81	-	-	-
4,7	0,97	0,93	0,89	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,82	0,82	0,82	-
7,0	0,97	0,93	0,89	0,87	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,86
	$\alpha=1,8$											
1,3	1,02	1,06	1,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,5	1,02	1,05	1,09	1,11	1,13	1,14	-	-	-	-	-	-
3,8	1,02	1,06	1,09	1,11	1,13	1,14	1,15	1,16	1,16	-	-	-
4,7	1,02	1,05	1,09	1,11	1,13	1,14	1,15	1,16	1,16	1,17	1,17	-
7,0	1,02	1,06	1,09	1,11	1,13	1,14	1,14	1,15	1,15	1,14	1,14	-

Выявлены две области горизонтальных растягивающих напряжений: первая область по положению соответствует области вертикальных растягивающих напряжений, но имеет меньшую глубину простираения Z_p , а вторая начинается с глубины $Z_p = 0,75b$, имеет

наибольшую ширину (более $2b$) и распространяется до глубины $Z_p = 1,0b$.

Исследовано также напряженное состояние анизотропной полуплоскости, загруженной на участке ее поверхности вертикальной и горизонтальной нагрузками, изменяющимися по линейному закону (равномерная, треугольная и

трапецеидальная нагрузки). Наличие результатов расчетов напряженного состояния для неравномерно распределенной внешней нагрузки позволяет производить соответствующие расчеты осадок оснований различного рода насыпей. При действии различных видов вертикальной нагрузки, а также и горизонтальной, в пределах полуплоскости с показателями $\alpha < 1$ возникают области сжатия и растяжения. Вертикальные растягивающие напряжения возникают на некотором расстоянии от загруженного участка и по мере удаления от него распространяются на все большую глубину, которая зависит от показателя α : при $\alpha = 0,13$ $Z_p = 0,1b$, а при $\alpha = 8$ $Z_p = 0,7b$. Выявлены две области горизонтальных растягивающих напряжений: первая область по положению соответствует области вертикальных растягивающих напряжений, но имеет меньшую глубину простираения Z_p , а вторая начинается с глубины $Z_p = 0,75b$, имеет наибольшую ширину (более $2b$) и распространяется до глубины $Z_p = 1,0b$.

Получены результаты расчетно-теоретических исследований влияния деформационной анизотропии на н.д.с. оснований жестких фундаментов – как заглубленных, так и незаглубленных. Исследовано влияние крайних значений изгибной жесткости фундаментов (абсолютно гибкого и абсолютно жесткого) на напряженное состояние анизотропных слоев различной мощности.

Изучено также влияние заглубления фундаментов на напряженное состояние основания в виде слоев различной мощности (при изменении показателя анизотропии α).

В ряде случаев при соответствующем закреплении нижней границы среды установлено появление областей растягивающих напряжений σ_x и σ_z , по соседству с которыми, как правило, появляются зоны повышенных сжимающих напряжений σ_z и, особенно, σ_x вблизи угловой вертикали фундамента. Это явление характерно для основания жесткого штампа, расположенного на слое малой мощности (при $\alpha = 0,13$), оно аналогично «арочному эффекту», когда под сводом «арки» нормальные напряжения уменьшены, а у пяты – существенно увеличиваются. Подобная тенденция прослеживается и при $\alpha = 1$ и $\alpha = 8$, где

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2002

максимум сжимающих напряжений на уровне нижней границы слоя смещен от центральной вертикали в направлении угловой вертикали, а значения σ_z в зоне концентрации существенно больше, чем в контактном слое. С увеличением показателя анизотропии α растягивающие напряжения в нижней части слоя, примыкающей к его границе, уменьшаются, затем становятся сжимающими и далее – возрастают. Область сжимающих напряжений σ_z , начинаясь от подошвы жесткого штампа, «веером» распространяется вниз и в стороны (ширина «веера» зависит от величины α); за боковыми гранями «веера» находятся области растягивающих напряжений (кроме области растяжения вдоль центральной вертикали – при некоторых $\alpha < 1$). Более подробно результаты исследований представлены в [3].

Учитывая экспериментальные данные о форме эпюры нормальных контактных давлений под жесткими штампами в фазе уплотнения грунтового основания, а также недостаточно высокую степень надежности определения характеристик деформируемости грунта основания, представляется возможным рекомендовать для практического применения результаты решения, полученные для абсолютно гибкого незаглубленного фундамента (т.е. при учете действия равномерно распределенной нагрузки на поверхности основания). Заглубление фундамента можно учесть традиционным способом – введением условий пригрузки, действующей на уровне подошвы фундамента.

Как показали расчетно-теоретические исследования, учет вида внешней нагрузки и деформационной анизотропии грунтового основания заметно влияет на величину расчетного сопротивления грунта основания R и изменяет область применения теории линейной деформируемости грунтов по сравнению с изотропным основанием. Так, на глубине $z = 0,25b$ при изменении показателя α с $0,13$ до 8 угол наибольшего отклонения $\theta_{\max}$ изменяется от 44° до 60° .

Расчетами установлено также, что в тех случаях, когда основание имеет показатель деформационной анизотропии $\alpha < 1$, значения расчетного сопротивления грунта основания R увеличиваются, что приводит к уменьшению размеров подошвы

фундаментов и к получению известного экономического эффекта и наоборот, при $\alpha > 1$ требуется увеличение размеров подошвы по сравнению с установленными по СНиП 2.02.01-83* «Основания зданий и сооружений». Исследования показали, что применение изотропной модели для расчетов грунтовых оснований приводит к искажению действительной картины н.д.с. основания.

Влияние деформационной анизотропии на величину прогнозируемых осадок даже при слабо выраженной анизотропии обычных грунтов оценивается величиной, достигающей 10-40% от расчетной осадки фундамента, расположенного на изотропном основании. Полученные данные можно использовать в расчетах оснований по деформациям при надстройке зданий и сооружений, принимая во внимание, что для анизотропных грунтов с показателем анизотропии $\alpha < 1$ расчет по методике СНиП 2.02.01-83*, не учитывающей анизотропию, приводит к завышенным значениям осадок, а также при таких способах усиления фундаментов, как уширение подошвы фундамента, устройства обойм, рубашек, наращиваний и т.п. Для грунтов, характеризующихся показателями анизотропии $\alpha > 1$, традиционный расчет дает уменьшенные значения осадок и, если учесть что для таких грунтов особенно велико влияние деформационной анизотропии, т.к. это, как правило, грунты, имеющие слоистую и столбчатую текстуру, то пренебрегать этим фактом при реконструкции недопустимо. Деформационную анизотропию необходимо учитывать и при переустройстве фундаментов: столбчатых и ленточные, а так же при пересадке фундаментов на сваи,

т.к. все вышеизложенное справедливо и для расчета свайных фундаментов и их оснований по деформациям. Обязателен учет деформационной анизотропии и при расчете осадки фундаментов при возведении нового здания около существующего, т.к. для слабых грунтов основания увеличение расчетной осадки за счет учета деформационной анизотропии может оказаться недопустимо большим, особенно с точки зрения неравномерности осадок соседних фундаментов.

Вывод. Предлагаемый метод учета деформационной анизотропии грунта может быть рекомендован для внедрения в практику проектирования фундаментов, в том числе и для реконструируемых и восстанавливаемых зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лехницкий С.Г. Теория упругости тела. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
2. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
3. Коробова О.А. Напряженно-деформированное состояние анизотропных слоев различной мощности под жесткими штампами и фундаментами и его особенности //Изв. вузов. Строительство. – Новосибирск, 1995. – № 5-6. – С. 35-40.
4. Коробова О.А. Исследование напряженно-деформированного состояния анизотропного грунтового основания численными методами с применением математического планирования эксперимента // Изв. вузов. Строительство. – Новосибирск, 1995. – № 9. – С. 17-22.