

РАСЧЕТ ОСАДКИ НАСЫПНЫХ СООРУЖЕНИЙ, ПОСТРОЕННЫХ НА БИОГЕННЫХ ГРУНТАХ

Н. В. ВАСИЛЬЕВА

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 05.04.2021)

Биогенные грунты, как основания обладают значительной деформируемостью, в процессе которой они сильно уплотняются. В результате значительных осадок на биогенных грунтах возможно возводить лишь такие сооружения, конструкция которых позволяет компенсировать неравномерную деформируемость основания, а окончательное её оформление допустимо после практически полного завершения деформаций основания. Основным видом сооружений, конструкция которых обладает такими свойствами, являются насыпные сооружения. Грунтовые плотины и обваловывающие дамбы на мелиоративных объектах возводятся на биогенных грунтах с прослойками и линзами сапропеля озерного или старинного происхождения, или мергеля. Эти прослойки и линзы могут иметь различные размеры и ориентацию, что вызывает необходимость оценки напряжений, возникающих в любой точке основания. В естественном залегании биогенные грунты отличаются высокой влажностью весьма низкой несущей способностью и сильной сжимаемостью. Осадка насыпи и других сооружений зависит от нагрузки, передаваемой на основания так и от мощности и физико-механических свойств биогенных грунтов, слагающих основание. Так как ширина насыпи сопоставима с мощностью биогенных грунтов в основании то осадку можно определять не только как сумму деформаций уплотнения отдельных слоев, слагающих основания, но с учетом распределения вертикальных сжимающих напряжений от насыпи по глубине.

Ключевые слова: биогенный грунт, напряженное состояние, деформации, осадка, коэффициент пористости.

Biogenic soils, as bases, have significant deformability, during which they are strongly compacted. As a result of significant compaction on biogenic soils, it is possible to erect only such structures, the design of which makes it possible to compensate for the uneven deformability of the base, and its final design is permissible after almost full completion of the base deformations. The main type of structures, the design of which has such properties, are embankments. Soil dams and embankment dams at reclamation facilities are built on biogenic soils with interlayers and lenses of sapropel of lacustrine or ancient origin, or marl. These interlayers and lenses can be of different sizes and orientations, which makes it necessary to evaluate the stresses that occur at any point in the base. In natural bedding, biogenic soils are distinguished by high moisture content, very low bearing capacity and strong compressibility. The settlement of the embankment and other structures depends on the load transmitted to the foundation and on the power and physical and mechanical properties of biogenic soils that make up the foundation. Since the width of the embankment is comparable to the thickness of biogenic soils at the base, the settlement can be determined not only as the sum of compaction deformations of individual layers composing the base, but also taking into account the distribution of vertical compressive stresses from the embankment along the depth.

Key words: biogenic soil, stress state, deformation, settlement, porosity coefficient.

Введение

Биогенные грунты резко отличаются от минеральных очень рыхлым сложением и большей деформируемостью под нагрузкой. Несмотря на чрезвычайно рыхлое сложение и высокую влажность биогенным грунтам (торф, сапропель) свойственна некоторая структурная прочность, обусловленная связностью водно-коллоидной природы и жестким структурным сцеплением с характером необратимых связей [1]. Поэтому даже очень рыхлые водонасыщенные биогенные грунты без нарушения структуры не текут, хотя их влажность, как правило, превышает предел текучести.

Это объясняет наличие растительных остатков, связывающих отдельные агрегаты и обеспечивающих известную структурную прочность биогенного грунта в целом.

Надежная работа мелиоративных сооружений на биогенных грунтах (торф, сапропель) зависит от того, насколько правильно расчетные формулы учитывают особенности поведения грунтов при загрузке. Поэтому устойчивость основания на любой стадии возведения насыпи, в том числе при завершении строительства, производится путем сопоставления максимальных касательных напряжений, возникающих в любой точке основания под влиянием нагрузки от сооружения с прочностью грунта в данной точке [6].

Под напряжением оценивается устойчивость основания, а осадка определяет требуемые объемы работ по отсыпке насыпей. Для расчета напряжений в биогенных грунтах используются решения теории упругости. Применимость таких решений к расчету оснований, сложенных биогенными грунтами, доказана в диапазоне реально встречающихся в практике нагрузок и подтверждается опытом проектирования и строительства.

Осадка насыпей других сооружений зависит как от нагрузки, передаваемых на основание, так от их мощности и физико-механических свойств биогенных грунтов, слагающих основание. Так как ширина грунтовых насыпей по низу, как правило, значительно превышает мощность биогенных грунтов, то под действием нагрузки от массы насыпи эти грунты испытывают только сжатие без бокового расширения. Такого рода деформирование соответствует компрессионному сжатию грунта. Его конечная осадка определяется с использованием параметров, определяемых при компрессионных испытаниях грунтов. Осадку основания насыпи при наличии в основании слоев различных видов

грунтов и грунтов одного вида, но с различными свойствами определяют как сумму деформаций уплотнения отдельных слоев, слагающих основание по формуле [2]:

$$S_p = \sum \left(\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_i}{1 + \varepsilon_0} \cdot h_i \right), \quad (1)$$

где ε_0 – начальный коэффициент пористости отдельного слоя; ε_i – коэффициент пористости слоя, достигнутый в результате уплотнения от удельной нагрузки P_i ; h_i – толщина слоя каждого вида биогенного грунта в основании.

Анализ компрессионных кривых показывает, что принцип линейной деформируемости биогенных грунтов с момента начала испытаний сохраняется в диапазоне нагрузок 0,2–0,5 кг/см², а в остальных видах (торф) до 1,0 кг/см², то есть на любом участке компрессионной кривой можно выбрать тот или иной диапазон нагрузок, где соблюдается принцип линейной деформируемости [2].

Практически насыпи на биогенных грунтах возводятся слоями толщиной не более 0,5–1,0 м, что на каждой ступени увеличивает нагрузку на основание на величину около 0,1–0,2 кг/см². В таких условиях при анализе напряженного состояния и прочности основания на каждой ступени нагрузки вполне применима теория линейно-деформируемых сред [5].

Основная часть

Опытная насыпь расположена на землях совхоза им. Доватора Ушачского района Витебской области. В створе опытной насыпи под слоем торфа мощностью 2,0 м залегает сапропель с чрезвычайно низкой прочностью. По результатам изысканий выделены два слоя сапропеля глубиной 3,0 и 2,5 м.

Так как ширина насыпи сопоставима с мощностью биогенных грунтов в основании, то был выполнен расчет напряженного состояния и осадка определялась с учетом распределения вертикальных сжимающих напряжений от насыпи по глубине, что позволяет более точно определять объемы земляных работ и в конечном счете экономичность принимаемых инженерных решений.

Задачей расчета напряжённого состояния является определение нормальных и касательных напряжений в любой точки основания дамбы по элементарным площадкам различным образом ориентированным в плоскости поперечного сечения. В теории упругости имеются решения для определения напряжений от нагрузки, распределенный по различным законам. Определив напряжения для единичной нагрузки $P_0=1,0$ в относительных координатах рассматриваемой точки z/b , где b – ширина нагруженной полосы. Напряженное состояние в заданной точке полностью определяется величиной главных напряжений и направлением их действия [3]. Напряжения от нагрузки, распределенной по закону равностороннего треугольника, вычисляются по формулам:

$$\sigma_z = \frac{P_0}{\pi\beta} [\beta(\alpha_1 + \alpha_2) + x(\alpha_1 - \alpha_2)], \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{P_0}{\pi\beta} [\beta(\alpha_1 + \alpha_2) + x(\alpha_1 - \alpha_2) - 2Z \ln \frac{R_1 R_2}{R_0^2}], \quad (3)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = -\frac{P_0 Z}{\pi\beta} (\alpha_1 - \alpha_2), \quad (4)$$

где α_1 и α_2 – углы в радианах.

Для упрощения расчетов по указанным формулам построены графики в относительных координатах $v = \frac{z}{b}$ и $d = \frac{x}{b}$ для единичной нагрузки $P_0=1$ [5].

Так как опытная насыпь равнобокая трапеция, то для определения вертикальных напряжений σ_z для нагрузки, распределенной по закону равнобедренной трапеции в точке основания с координатами X и Z используем следующий прием. Трапеция дополняется до равностороннего треугольника, состоящего, в свою очередь, из двух треугольников – большого с нагрузкой $P=0,61$ кг/см² и малого с нагрузкой $P=0,21$ кг/см². Для нагрузки распределенной по треугольнику АДС для $d = \frac{x}{b_1}$ и $v = \frac{z}{b_1}$ находим $\sigma_{zp} = 1$ для единичной нагрузки. Фактическое значение напряжений от нагрузки распределенной по треугольнику АДС будет равно $\sigma_{zp} = 1 \cdot P_{АДС}^0$. Разница между величинами большого и малого треугольников дает фактические вертикальные напряжения G_z в каждом слое основания насыпи.

$$\sigma_z^0 = 0,88 \cdot 0,629 = 0,553 \quad (5)$$

Таблица 1. Расчет вертикальных напряжений

X	Z	$v=\frac{z}{b}$	$d=\frac{x}{b}$	$\delta_{zp}=1$	$\delta_{zp}=0,21$	X	Z	$v=\frac{z}{b}$	$d=\frac{x}{b}$	$\delta_{zp}=1$	$\delta_{zp}=0,61$	$\delta_{zp}=0,4$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0	0	0		0,559	0	0	0				0,413
0,5	0	0	0,144	0,90	0,549	0,5	0	0	0,33	0,65	0,136	0,413
1,0	0	0	0,227	0,77	0,469	1,0	0	0	0,67	0,35	0,0735	0,396
1,5	0	0	0,34	0,65	0,396	1,5	0	0	1,0	0,005	0,00105	0,395
2,0	0	0	0,454	0,55	0,335	2,0	0	0	1,33	0,002	0,0004	0,335
2,5	0	0	0,568	0,425	0,259	2,5	0	0	1,67			0,259
3,0	0	0	0,68	0,34	0,207	3,0	0	0	2,0			0,207
3,5	0	0	0,79	0,20	0,122	3,5	0	0	2,33			0,122
4,0	0	0	0,91	0,10	0,061	4,0	0	0	2,67			0,061
4,5	0	0	1,02	0,005	0,003	4,5	0	0	3,0			0,003
5,0	0	0	1,14	0,002	0,0012	5,0	0	0	3,33			0,0012
5,5	0	0	1,25	0,002	0,0012	5,5	0	0	3,67			0,0012
6,0	0	0	1,36	0,002	0,0012	6,0	0	0	4,00			0,0012
7,0	0	0	1,59			7,0	0	0	4,67			
8,0	0	0	1,82			8,0	0	0	5,33			
0	2,0	0,454	0			0	2,0	0,526	0			0,368
0,5	2,0	0,454	0,144	0,71	0,433	0,5	2,0	0,526	0,33	0,37	0,0777	0,355
1,0	2,0	0,454	0,227	0,64	0,390	1,0	2,0	0,526	0,67	0,31	0,0651	0,325
1,5	2,0	0,454	0,34	0,60	0,366	1,5	2,0	0,526	1,0	0,22	0,0462	0,320
2,0	2,0	0,454	0,454	0,525	0,320	2,0	2,0	0,526	1,33	0,150	0,0315	0,289
2,5	2,0	0,454	0,568	0,41	0,250	2,5	2,0	0,526	1,67	0,080	0,0168	0,233
3,0	2,0	0,454	0,68	0,35	0,213	3,0	2,0	0,526	2,0	0,066	0,0138	0,200
3,5	2,0	0,454	0,79	0,25	0,152	3,5	2,0	0,526	2,33	0,039	0,0082	0,144
4,0	2,0	0,454	0,91	0,175	0,106	4,0	2,0	0,526	2,67			0,106
4,5	2,0	0,454	1,02	0,125	0,0762	4,5	2,0	0,526	3,0			0,076
5,0	2,0	0,454	1,14	0,075	0,0457	5,0	2,0	0,526	3,33			0,0457
5,5	2,0	0,454	1,25	0,065	0,0396	5,5	2,0	0,526	3,67			0,0396
6,0	2,0	0,454	1,36	0,038	0,023	6,0	2,0	0,526	4,0			0,023
7,0	2,0	0,454	1,59	0,018	0,0109	7,0	2,0	0,526	4,67			0,0109
8,0	2,0	0,454	1,82	0,008	0,0048	8,0	2,0	0,526	5,33			0,0048
0	5,0	1,14	0			0	5,0	1,32				0,249
0,5	5,0	1,14	0,144	0,46	0,281	0,5	5,0	1,32	0,33	0,33	0,0378	0,243
1,0	5,0	1,14	0,227	0,445	0,271	1,0	5,0	1,32	0,67	0,67	0,0357	0,235
1,5	5,0	1,14	0,34	0,425	0,259	1,5	5,0	1,32	1,0	1,0	0,0336	0,225
2,0	5,0	1,14	0,454	0,400	0,244	2,0	5,0	1,32	1,33	1,33	0,0294	0,215
2,5	5,0	1,14	0,568	0,36	0,220	2,5	5,0	1,32	1,67	1,67	0,0252	0,194
3,0	5,0	1,14	0,68	0,32	0,195	3,0	5,0	1,32	2,0	2,0	0,021	0,174
3,5	5,0	1,14	0,79	0,275	0,168	3,5	5,0	1,32	2,33	2,33	0,0168	0,151

Для фиктивной нагрузки, распределенной по треугольнику ЕДФ по тем же графикам, но уже при

$d = \frac{x}{b_1}$ и $v = \frac{z_1}{b_1}$ находим $\sigma_{zp} = 1$. Фактическое значение напряжений от нагрузки распределенной по треугольнику ЕДФ будет равно $\sigma_{zp}^{\phi} = 1 \cdot P_{ЕДФ}^0$

$$\sigma_z^{\phi} = 0,65 \cdot 0,216 = 0,140. \quad (6)$$

Вертикальные напряжения σ_z в рассматриваемой точке от нагрузки, распределенной по трапеции АЕФС равны:

$$\sigma_z = \sigma_z^0 - \sigma_z^{\phi} = 0,553 - 0,140 = 0,413. \quad (7)$$

Результаты расчета вертикальных напряжений σ_z сведены в табл. 1.

По значениям вертикальных напряжений σ_z на вертикалях 1–5 (рис.1) производим расчет уплотнения отдельных слоев биогенных грунтов.

Изменение коэффициента пористости для торфов и сапропелей от уплотняющей нагрузки определяем по формуле [4]:

$$\varepsilon_i = 1,383 \cdot \varepsilon_0^{0,845} - 0,147 \cdot (\varepsilon_0^{0,483}) \cdot \varepsilon_0 \cdot \log \frac{P_1}{P_0}. \quad (8)$$

Коэффициент пористости торфа на вертикали 1 по формуле (7) равен $\varepsilon_i = 7,94$.

Расчетная осадка торфа на вертикали 1:

$$S = \frac{12,75 - 7,94}{13,75} \cdot 2,0 = 0,700(\text{м}). \quad (9)$$

Результаты расчета расчетной осадки на других вертикалях приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчет осадки по вертикали

№ вертикали	Вид грунта	Толщина слоя, м	Удельная нагрузка $P = \text{кгс/см}^2$	Коэф. пористости грунта, ε_0	Коэф. порист. достиг. в результате уплот. от расчетной нагрузки	Расчетная осадка, полученная с использованием формулы S_p	Фактическая осадка S_{ϕ}	Отклонение в % S_p от S_{ϕ}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Торф	2,0	0,413	12,75	7,94	0,700		
1	Сапрпель	3,0	0,368	19,78	10,26	1,374		
1	Сапрпель	2,5	0,249	10,67	8,27	0,514		
						$\Sigma 2,588$	$\Sigma 2,500$	+3,5
2	Торф	2,0	0,396	12,75	8,05	0,684		
2	Сапрпель	3,0	0,325	19,78	10,93	1,277		
2	Сапрпель	2,5	0,235	10,67	8,40	0,486		
						$\Sigma 2,447$	$\Sigma 2,400$	+2,0
3	Торф	2,0	0,335	12,75	8,52	0,615		
3	Сапрпель	3,0	0,289	19,78	11,56	1,187		
3	Сапрпель	2,5	0,215	10,67	8,58	0,448		
						$\Sigma 2,25$	$\Sigma 2,200$	+2,3
4	Торф	2,0	0,207	12,75	9,86	0,420		
4	Сапрпель	3,0	0,200	19,78	13,52	0,904		
4	Сапрпель	2,5	0,174	10,67	9,04	0,349		
						$\Sigma 1,673$	$\Sigma 1,800$	-7,0
5	Торф	2,0	0,122	12,75	11,33	0,206		
5	Сапрпель	3,0	0,106	19,78	16,92	0,413		
5	Сапрпель	2,5	0,104	10,67	9,60	0,229		
						$\Sigma 0,848$	$\Sigma 1,00$	-16,2

Заключение

Сравнение результатов расчета осадки как от уплотняющей нагрузки, так и по значениям сжимающих напряжений σ_z на границе отдельных слоев показывает, что наиболее близкими по значению к фактической осадке являются результаты, полученные по сжимающим напряжениям σ_z . При узких насыпях, при ширине их по низу сопоставимой с мощностью

биогенных грунтов в основании, осадку следует рассчитывать по вертикальным сжимающим напряжениям для отдельных слоев грунтов основания.

Это позволяет более точно определять объемы земляных работ при их возведении и в конечном счете определяет экономичность принимаемых инженерных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абелев, М. Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. / М. Ю. Абелев – М.: Госстройиздат, 1962. – 147 с.
2. Амарян, Л. С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов. / Л. С. Амарян. – М.: Недра, 1969. – 19 с.
3. Васильева, Н. В. Расчет осадки сооружений на биогенных грунтах с учетом их фазового состава // Весці Акад. аграр. навук РБ – 2001 - №3 – С. 50–53.
4. Васильева, Н. В., Определение зависимости, характеризующие компрессионные свойства биогенных // Мелиорация и гидротехника в условиях Беларуси: СБ. науч. тр. Белорус. с.-х. акад. – Горки, 1995. – С. 16–19.
5. Дамбы низконапорные на слабых грунтах для водохранилищ и польдерных осушительных систем // Материал для проектирования – Минск: Белгипроводхоз. 1978 – С. 61–66.
6. Лысенко, А. П. Состав и физико-механические свойства грунтов. – 2-ое изд. переработ. доп. / А. П. Лысенко, – М: Недра, 1980. – 272 с.