

отдельных мероприятий на усиление плотины, в том числе на увеличение консольных сжимающих напряжений, в первую очередь на верховой грани и на контакте «верховая грань – основание».

Выполненные исследования с применением одного из мероприятий, связанного с расширением гребня арочной плотины, показали возможность регулирования напряженно-деформированного состояния и привели к существенному увеличению консольных напряжений на контакте «верховая грань – основание» (на 1,3 МПа) при комплексном усилении гребня со стороны верхнего и нижнего бьефов. Предварительные проработки при других вариантах усиления показали возможность дальнейшего, более значительного, увеличения сжимающих напряжений.

1. Каганов Г. М., Румянцев И. С. Гидротехнические сооружения. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – Кн. 2. – 272 с.

2. Каганов, Г. М., Румянцев И. С. Ги-

дротехнические сооружения. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – Кн. 1. – 304 с.

3. Бетонные плотины (на скальных основаниях): учеб. пособие для вузов / М. М. Гришин [и др.]. – М.: Стройиздат, 1975. – 352 с.

4. Программа Z_Soil.PC 2010. User manual. Benchmarks. – URL: [http://www.zace.com/] / 2010.

5. Программа Z_Soil.PC 2010. User manual. Data preparation. – URL: [http://www.zace.com/] / 2010.

Материал поступил в редакцию 13.09.11.

Каганов Григорий Михайлович, профессор, доктор технических наук

Тел. 8 (499) 153-86-48

E-mail: volkag@yandex.ru

Волков Владимир Иванович, профессор, кандидат технических наук

Тел. 8 (499) 153-86-48

E-mail: volcov_vi45@mail.ru

Учеваткин Александр Алексеевич, инженер

Тел. 8-915-410-21-76

E-mail: a.uchevatkin@ya.ru

УДК 502/504:626/627:624.138:534.1

Б. М. БАХТИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА СДВИГУ

Эффект влияния вибрационных нагрузок на сдвиговые характеристики грунта отмечен многими исследователями, однако данные по количественной оценке этого влияния весьма противоречивы, что затрудняет его учет при проектировании грунтовых сооружений либо негрунтовых конструкций, взаимодействующих с грунтом. Получена зависимость изменения угла внутреннего трения песчаного грунта от соотношения величин статических напряжений в грунте и напряжений от вибрационных нагрузок.

Вибрационные нагрузки, сдвиговые характеристики грунта, проектирование грунтовых сооружений, изменение угла внутреннего трения песчаного грунта.

The influence effect of vibration load on the soil shear characteristics is marked by many researchers, however, the data on the quantitative assessment of this influence are quite contradictory which hampers taking it into account when designing soil structures or non-soil structures interacting with soil. The dependence of the angle change of sand soil inner friction is received from static stresses in soil and stresses vibration load.

Vibration load, soil shear characteristics, designing of soil structures, the angle change of sand soil inner friction.

Методы определения сдвиговых характеристик сыпучих грунтов с достаточной точностью позволяют определить величину сопротивления грунта сдвигающим усилиям при статическом приложении нагрузок. В случае динамической работы грунтовых сооружений или негрунтовых конструкций, взаимодействующих с грунтами, необходимо учитывать влияние вибраций на сопротивление сдвигу как по контактным поверхностям, так и поверхностям, проходящим внутри грунтового массива. Недостаточно корректный учет этого фактора при проектировании может привести к повреждению и даже разрушению объекта. Важно это и при анализе поведения моделей грунтовых сооружений или конструкций из армированного грунта в стадии разрушения, где неточность в оценке влияния вибрации приводит к неверному толкованию полученных результатов. К сожалению, рекомендации по количественной оценке влияния вибрационных нагрузок на сопротивление грунта сдвигающим усилием весьма противоречивы (таблица) [1–7].

Изменение сопротивления несвязных грунтов сдвигающим усилиям при воздействии вибрации неоднократно отмечалось исследователями [3, 8, 9]. Эти данные указывают на изменение сопротивления песчаных грунтов сдвигу при

действии вибрации, хотя не дают четкой количественной оценки явления, объяснением которому могут быть знакопеременные изменения напряженного состояния грунта от пульсирующих нагрузок, облегчающие взаимные смещения частиц [8]. Это никак не влияет на свойства грунта. Его сопротивление сдвигу восстанавливается сразу после снятия вибрационных воздействий. При более интенсивных вибрационных нагрузках возможно разрушение структуры грунта с изменением формы частиц и изменением характера их взаимодействия, приводящим к уменьшению сдвиговых характеристик (угла внутреннего трения) и после снятия вибрации. Результатом влияния вибрационных нагрузок является снижение сопротивления грунта сдвигу в процессе их действия. Это снижение можно учесть введением условного угла внутреннего $\Phi_{гр}^c$ (или контактного Φ_k^c) трения, в той или иной мере зависящего от интенсивности вибрации. Так, по предложению Р. Сано при расчете устойчивости земляных откосов влияние вибрационного характера сейсмического воздействия на величину условного угла внутреннего трения $\Phi_{гр}^c$ следует принимать согласно выражению [9]:

$$\Phi_{гр}^c = \Phi_{гр} - \arctg(A / \sqrt{2}), \quad (1)$$

где A – сейсмический коэффициент, соответствующий землетрясению расчетной балльности.

Влияние вибрации на коэффициент сопротивления песка сдвигу

Сведения по данным	$f_{гр}/f_{гр}^c$	Ускорение вибрации	Влияние частоты вибрации: + есть влияние; – нет влияния	Влияние нормального давления: + есть влияние; – нет влияния
Т. Могами, К. Кубо	3,9	1,0g	–	
	1,04	0,4g	23...43 Гц	
Е. М. Перлея	2,5...3,5	0,4g		–
Н. А. Преображенской	1,75...2,8	1,0g		
Д. Д. Баркана	1,3	0,2g		
Ш. Г. Напетваридзе	1,1			+
	(но не более 1,3...1,55)	0,1g		
В. М. Гольдштейна, А. В. Ермолинского			+ (при частоте более 10...15 Гц)	
Х. Сида			–	+
П. Л. Иванова			–	+
М. Н. Голубцовой			–	+
Б. М. Бахтина			– (при частоте 50...200 Гц)	

Примечания: $f_{гр} = \text{tg } \Phi_{гр}$ – коэффициент сопротивления грунта сдвигу в статике; $f_{гр}^c$ – то же при вибрации.

Использовать эту рекомендацию следует с определенной осторожностью. Действительно, если положить сейсмическое ускорение равным $0,4g$, то, согласно (1), тангенс условного угла внутреннего трения $\varphi_{гр}^c$ песка с углом $\varphi_{гр} = 35^\circ$ уменьшается вдвое, а при ускорении $1g$ он становится равным нулю, а грунт теряет всякую способность сопротивления нагрузкам. Однако в ходе экспериментов модели из такого грунта часто подвергаются и большим ускорениям, не приводящим к их полному разрушению. Значительные ускорения наблюдаются и при сильных землетрясениях, но и они не вызывают глобальных разрушений неровностей рельефа, как это следует ожидать согласно (1). Можно полагать, что эта зависимость, аппроксимируя в определенных, ограниченных пределах ускорений результаты испытаний сыпучих грунтов при стационарных вибрационных воздействиях, требует проверки для других видов динамического (сейсмического) воздействия в широком диапазоне ускорений.

Результаты экспериментальных исследований влияния параметров вибрационных нагрузок на сопротивление песчаных грунтов сдвигу также достаточно противоречивы. Так, по данным Т. Могами, К. Кубо, сопротивление сухого песка сдвигу, прогрессивно уменьшаясь при росте ускорения вибрации грунта от $0,2$ до $1,0g$, практически не зависит от ее частоты, по крайней мере, в диапазоне $23...48$ Гц (рис. 1) [6]. Малое влияние частот вибрации на изменение этой величины отмечается в работе П. Л. Иванова (рис. 2) и в работах Б. М. Бахтина и Х. Сиды [1, 7, 8]. Однако В. М. Гольдштейн и А. В. Ермолинский указывают, что сопротивление сдвигу снижается при одной и той же интенсивности воздействия, когда частота вибрации превышает $10...15$ Гц [2].

В работах П. Л. Иванова, Ш. Г. Напетваридзе, Х. Сиды показано, что сопротивление грунта сдвигу при вибрации в большой мере определяется величиной нормального давления от статических нагрузок (обжатием грунта) [3, 7, 8]. Напротив, Е. М. Перлей утверждает, что это сопротивление мало зависит от интенсивности нормального давления, поскольку в опытах для одного и того же песка при разных нормальных давлениях были

получены примерно одинаковые коэффициенты внутреннего трения $f_{гр}^c = \text{tg } \varphi_{гр}^c$, меньшие статического коэффициента [4]. Разнятся и количественные значения величин, характеризующих снижение сопротивления сдвигающим усилиям. Так, по данным Н. А. Преображенской, сопротивление стального шпунта выдергиванию из песчаного грунта при вибрации интенсивностью $1g$ снизилось в $1,75-2,8$ раза по сравнению со случаем выдергивания без вибрации [5]. Однако, согласно исследованиям Е. М. Перлея, снижение коэффициента контактного трения при протягивании гладкой стальной полосы через массив крупнозернистого песка достигало 5 раз при значительно меньшем (не более $0,4 g$) ускорении вибрации.

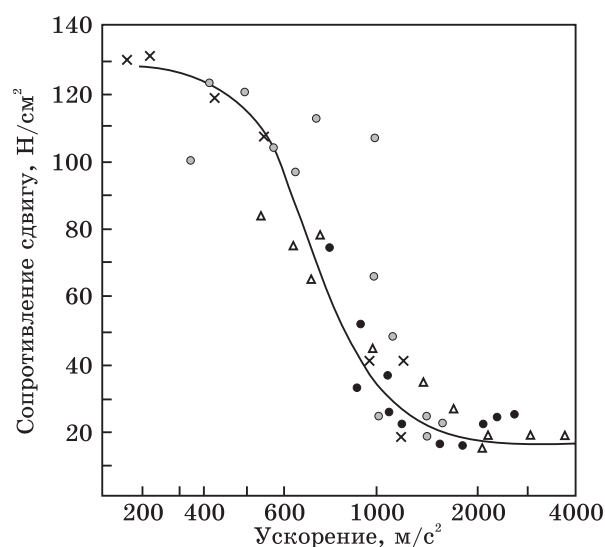


Рис. 1. Зависимость сопротивления песка сдвигающим усилиям от ускорения и частоты вибрационной нагрузки (по данным [6])

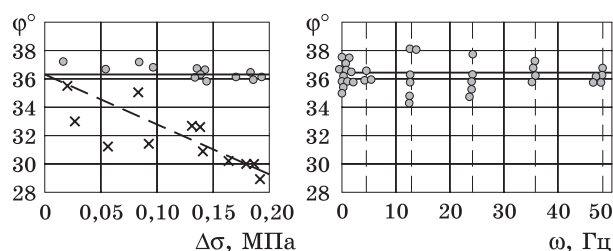


Рис. 2. Зависимость угла внутреннего трения песка от интенсивности вибрационной нагрузки $\Delta\sigma_1$ и частоты вибрации ω (по данным [8])

Данные по снижению условного коэффициента внутреннего трения $f_{гр}^c$ песчаных грунтов также свидетельствуют о значительном расхождении в оценках этого явления разными авторами. Так, по Е. М. Перлею, при

ускорении до 0,4g отношение коэффициентов, полученных при статическом нагружении $f_{гр}$ и нагружении с вибрацией $f_{гр}^c$, равно 2,5–3,5; у Т. Могамы при ускорении 1g это снижение достигает 3,9 раза [4, 6]. Приведенные данные о снижении сопротивления выдергиванию шпунтов с вибрированием в 1,75–2,5 раза характеризуют скорее изменение сопротивления сдвигу самого грунта, чем сопротивление на контакте «металл – грунт» [5]. Эти опыты были проведены в котловане одного из волжских гидроузлов при выдергивании шпунтов, находившихся длительное время в водонасыщенном грунте и подвергавшихся коррозии. Можно полагать, что контактная поверхность не была достаточно гладкой, чтобы обеспечить скольжение частиц песка вдоль нее без вовлечения в работу прилегающих масс грунта. По данным автора статьи, даже при относительно гладкой поверхности металлической трубчатой сваи диаметром 0,114 м угол контактного трения оказывается равным углу внутреннего трения вмещающего ее песка [10].

Эти цифры свидетельствуют об очень большом снижении (в разы!) сопротивления сдвигу песчаных грунтов при вибрационных воздействиях. Но, согласно точке зрения Ш. Г. Напетваридзе, «угол устойчивого откоса насыпи (из сыпучего грунта) уменьшается, однако до определенного предела, при котором угол устойчивого откоса оказывается на 25...35 % меньше угла естественного откоса» [3]. Цифры, близкие к названным, можно получить, используя график зависимости «условного» угла внутреннего трения от интенсивности нормальной составляющей знакопеременной нагрузки $\Delta\sigma$, заимствованный из [8] (см. рис. 2). Такая нагрузка возникает, например, при распространении в массиве грунта продольной сейсмической волны. Амплитудное значение этой нагрузки может быть найдено по известной зависимости:

$$\Delta\sigma = \pm \frac{1}{2\pi} Ag\rho_p v_p T, \quad (2)$$

где Ag – ускорение колебаний грунта; ρ_p – плотность грунта; v_p – скорость распространения продольной волны; T – период колебаний (при $Ag=9,81$ м/с², $\rho_p = 1700$ кг/м³, $v_p = 300$ м/с, $T = 0,1$ с получим $\Delta\sigma = 0,08$ МПа).

Согласно графику на рис. 2, этому значению $\Delta\sigma$ соответствует условный угол внутреннего трения грунта $\phi_{гр}^c = 33,5^\circ$ при статическом значении $\phi_{гр} = 37^\circ$. Таким образом, снижение условного коэффициента внутреннего трения при ускорении 1g составляет: $\text{tg } 37^\circ / \text{tg } 33,5^\circ = 1,14$. Если величина периода $T = 0,25$ с, то снижение условного коэффициента внутреннего трения составит 1,33. Это значительно меньше приведенных ранее величин. Заметим, что данные П. Л. Иванова и Ш. Г. Напетваридзе получены при испытаниях грунтовых насыпей на виброплатформе либо образцов грунта в динамическом стабилометре [3, 8]. Большие значения снижения сопротивления были зафиксированы при сдвиге металлического штампа по поверхности грунта, протягивании металлической полосы сквозь массив грунта и выдергивании металлических шпунтов, когда колебания грунта возбуждались с передачей энергии через волновод – вибрирующий металлический объект [4, 6]. Не исключено, что именно такой характер взаимодействия вызвал столь большое снижение сопротивления контакта сдвигу. Принято считать, что наиболее достоверными являются результаты стабилометрических испытаний, поскольку именно этот метод наиболее полно отражает реальные условия работы грунта в сооружении. Приведенные М. Н. Голубцовой данные по изучению свойств песчаного грунта в динамическом стабилометре при ускорениях вибрации 1,17g и 2,21g позволили оценить влияние вибрационной составляющей давления на сопротивление грунта сдвигу (рис. 3) [11].

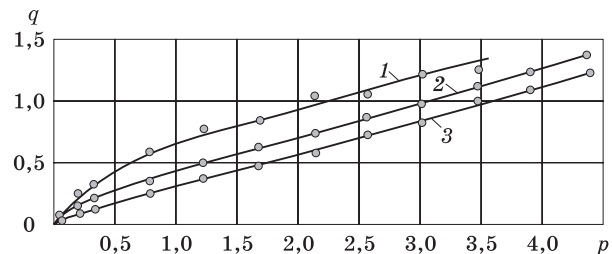


Рис. 3. Зависимость бокового давления q от вертикальной статической нагрузки p (по данным [11]): 1, 2 – при вибрации с ускорением 2,21 и 1,17g, $(q_{ст} + q_{вибр}) = f(p)$; 3 – без вибрационного воздействия, $q_{ст} = f(p)$; p – вертикальная статическая нагрузка на образец; $q_{ст}$ – боковое давление в условиях статических испытаний; $q_{вибр}$ – боковое давление, вызванное вибрацией грунта

Значения коэффициента сопротивления $f_{гр}^c$ вычисляли так:

$$f_{гр}^c = \operatorname{tg} \varphi_{гр}^c.$$

Величины последнего определяли по известной зависимости:

$$\sin \varphi_{гр}^c = \frac{p - (q_{ст} + q_{вибр})}{p + (q_{ст} + q_{вибр})}. \quad (3)$$

Для каждой из опытных точек на рис. 3 были вычислены значения $q_{вибр}/q_{ст}$ и $f_{гр}/f_{гр}^c$ с учетом того, что $f_{гр} = f_{гр}^c$ при $q_{вибр} = 0$. Поле точек с указанными координатами показано на рис. 4.

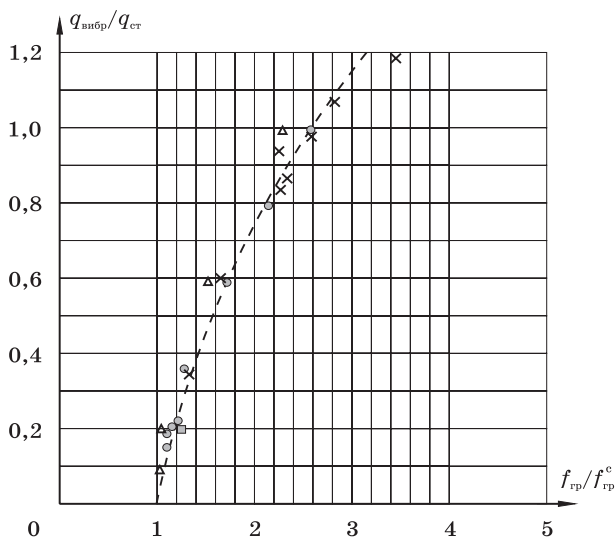


Рис. 4. Влияние вибрационной нагрузки $q_{вибр}$ на изменение сопротивления песка сдвигу: \circ – по данным [11] при ускорении вибрации 1,17g; \times – при ускорении вибрации 2,21g; Δ и \square – по данным соответственно [8] и [1]

Из рис. 4 видно, что влияние ускорения вибрации на снижение сопротивления грунта сдвигу не является существенным: точки, соответствующие разным ускорениям, весьма близки друг другу, а зависимость $f_{гр}/f_{гр}^c = \psi(q_{вибр}/q_{ст})$ при $q_{вибр}/q_{ст} \leq 0,7$ близка к линейной. Лишь при отношении $q_{вибр}/q_{ст} > 0,7$ наблюдается прогрессирующее снижение прочности грунта. На этот график наложены также точки, координаты которых вычислены по данным П. Л. Иванова с учетом того, что вибрационная составляющая давления $q_{вибр}$ в опытах изменялась от нуля до значения $0,4p$ (для значений $q_{вибр}/q_{ст} > 0,4$ – с экстраполяцией, приведенной на рис. 2 зависимости $\varphi_{гр}^c$ от $\Delta\sigma = q_{вибр}$). Легко видеть, что и они подтверждают сказанное. Эти результаты позволяют полагать, что для песков плотных и средней плотности снижение сопротивления сдвигу зависит

в основном от соотношения величин вибрационной и статической составляющих давления.

Учет изменения сопротивления грунта сдвигу при сейсмических воздействиях важен как для оценки результатов модельных исследований при переносе их в натуре, так и при теоретическом анализе работы сооружений на основе какой-либо расчетной схемы. Для сооружений грунтовых это обычно схема расчета устойчивости по той или иной поверхности скольжения. Неправильная оценка изменения коэффициента сопротивления сдвигу может привести к ошибочному прогнозу несущей способности конструкции. Учесть это обстоятельство можно, используя данные, которые могут быть с достаточной надежностью аппроксимированы следующей зависимостью (см. рис. 4, штриховая линия):

$$\frac{f_{гр}}{f_{гр}^c} = e^{0,95q_{вибр}/q_{ст}}. \quad (4)$$

Расчетные величины сжимающих напряжений от статических нагрузок в теле сооружения $\sigma_{ст}$ соотносят с дополнительными напряжениями от сейсмического воздействия $\sigma_{вибр}$. Последние определяют, например, с использованием зависимости (2), в которой величину преобладающего периода принимают равной периоду основного тона колебаний конструкции. По величине $\sigma_{вибр}/\sigma_{ст} = q_{вибр}/q_{ст}$ просто определить значение $f_{гр}^c$ при известном $f_{гр} = \operatorname{tg} \varphi_{гр}^c$. Так, например, в условиях испытаний модели плотины из армированного песчаного грунта средняя величина вертикальных сжимающих напряжений от сил собственного веса составляла $q_{\epsilon} = 3,2 \text{ Н/см}^2$ [1]. Частота основного тона колебаний модели 130 Гц. Расчет сейсмических напряжений в модели при скорости распространения продольной волны $v_p = 200 \text{ м/с}$, ускорении 1g дает величину $q_{вибр} = 0,39 \text{ Н/см}^2$. Таким образом, отношение $q_{вибр}/q_{ст} = 0,12$, соответствующее ему снижение коэффициента сопротивления грунта составляет 10...12% (см. рис. 4). Эта оценка не вполне корректна: в расчет были приняты вертикальные сжимающие напряжения в грунте, которые, очевидно, превышают значения минимальных главных напряжений. Указанная величина снижения сопротивления

сдвигу является минимально возможной и требует корректировки на основе статических расчетов конструкции.

1. Бахтин Б. М. Особенности динамической работы плотины из армированного грунта при сейсмических воздействиях // Известия вузов: Строительство. – 2001. – № 12. – С. 56–64.

2. Гольдштейн В. М., Ермолинский А. В. Об учете изменения прочностных характеристик грунтов при динамической нагрузке: Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений: материалы 5 Всесоюзной конференции. – Ташкент: НИИ оснований и подземных сооружений, 1981. – С. 224–226.

3. Напетваридзе Ш. Г. Сейсмостойкость гидротехнических сооружений. – М.: Госстройиздат, 1959. – 217 с.

4. Перлей Е. М. Об изменении истинных характеристик внутреннего и внешнего трения движения грунтов под воздействием вибрации: Труды Всесоюзного НИИ городского строительства. – М. – Л.: Стройиздат, 1964. – Вып. 1. – С. 5–8.

5. Преображенская Н. А. Экспериментальные данные о погружении и извлечении шпунта и свай вибрированием в песчаных грунтах: Динамика грунтов (№ 32): Труды НИИ основания и подземных сооружений.

– М.: Гос. издательство по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1968. – С. 66–82.

6. Mogami T., Kubo K. The behavior of soil during vibration. – Proc. Of III- SMFE, 1953. – V. 3. – P. 152–155.

7. Seed H. B., Lee K. L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. – Proc. ASCE, 1966. – V. 92. – P. 105–134.

8. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений: В кн. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1991. – 447 с.

9. Окамото Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений (перевод с англ. яз.) – М.: Стройиздат, 1980. – 342 с.

10. Bakhtin B., Cardoso I. C. Estudios experimentales de los pilotes colgantes aislados de seccion circular en los suelos arenosos: Ingenieria estructural y vial. – Habana: Instituto superior politecnico, 1989. – № 3. – P. 195–214.

11. Голубцова М. Н. Влияние динамической нагрузки на боковое давление и коэффициенты бокового давления песчаного грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1968. – № 4. – С. 4–6.

Материал поступил в редакцию 20.04.11.

*Бахтин Бронислав Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидротехнические сооружения»
Тел. 8 (499) 976-24-60*

УДК 502/504:624.042; 627/626

В. П. ШАРКОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

О КРИТЕРИЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТА-ЗАПОЛНИТЕЛЯ В ЯЧЕЙСТОЙ КОНСТРУКЦИИ НА СКАЛЬНОМ ОСНОВАНИИ

Представлен анализ критериев подобия при моделировании нагрузок от грунта в ячейстых конструкциях, возводимых на скальных основаниях.

Ячейка, грунт-заполнитель, напряжения, смещения, масштаб моделирования, подобие.

There is given an analysis of similarity parameters when simulating soil load in cellular structures built on rocky foundations.

Cell, soil-filler, stresses, shears, scale of simulation, similarity.