

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.*

В работе [1] изложены основные критерии моделирования при изучении нагрузок от грунта-заполнителя в ячеистой конструкции. В эти критерии заложены следующие условия для модели и природы:

1) условие геометрического подобия ячеистого каркаса –

$$H/R = \text{const}; \quad (1)$$

2) одинаковая степень шероховатости внутренней поверхности стен –

$$\text{tg } \delta = \text{const}; \quad (2)$$

3) равенство углов (коэффициентов) внутреннего трения грунтов –

$$\text{tg } \varphi = \text{const}; \quad (3)$$

4) подобие соотношения модулей деформации (упругости) материала каркаса и заполнителя –

$$E_{\text{гр}} / E_6 = \text{const}. \quad (4)$$

Однако в указанной работе не рассмотрены отдельные вопросы, учитывающие специфику работы ячеек гидротехнических сооружений. В частности, в работе [1] высказано предположение, что распределение вертикальных нагрузок от грунта описывается формулой Янсена, которая, как известно, базируется на постулате, что грунт на контакте со стенками по всей высоте находится в предельном состоянии. Однако для условий жесткого скального и условий податливого оснований здесь имеются участки с допредельным напряженным состоянием. Также в этой работе не рассматривается вопрос о необходимости совместного учета при моделировании деформативности грунта и каркаса, т. е. соотношения  $E_{\text{гр}}$  и  $E_6$ . Не рассматривается и вопрос о критериях моделирования при использовании грунта, который является заполнителем ячеек в натуральных условиях.

Целью настоящей работы является анализ и попытка ответить на поставленные выше вопросы.

#### 1. Рассмотрим подробнее критерий (4).

Горизонтальное давление по исследованиям [2] определяется из решения задачи о совместной деформации (работы) заполнителя и цилиндрического кольца ячейки и имеет вид, аналогичный формуле Янсена:

$$\sigma_R = (\gamma R / k_0) [1 - \exp(-k_0 H/R)], \quad (5)$$

где  $k_0 = \lambda_0 \text{tg } \delta$ ;  $\text{tg } \delta$  – коэффициент трения грунта у стенки;  $\lambda_0$  – коэффициент горизонтального давления с учетом деформативности стен;

$$\lambda_0 = \mu_{\text{гр}} / [1 - \mu_{\text{гр}} + (R/F_6)(E_{\text{гр}}/E_6)], \quad (6)$$

где  $R$  – радиус цилиндрической ячейки;  $\mu_{\text{гр}}$ ,  $\mu_6$  – коэффициенты Пуассона грунта-заполнителя и бетонного каркаса;  $F_6$  – площадь сечения кольца ячейки высотой 1 м.

При  $E_{\text{гр}}/E_6 = 0$  это выражение имеет следующий вид:

$$\lambda_0 = \mu_{\text{гр}} / [1 - \mu_{\text{гр}}],$$

т. е. коэффициент горизонтального давления грунта в состоянии покоя в его массиве.

В натуральных условиях отношение  $E_{\text{гр}}/E_6$  (например, для песчаного грунта-заполнителя) для каркаса из бетона составляет  $320 : 240\,000 = 1:750$  (характеристики взяты из справочника [3]), т. е. практически оно равно нулю.

Пример: определим коэффициент  $\lambda_0$  для некоторых реальных условий. Ячейка радиусом  $R = 2,5$  м, толщина стен  $0,5$  м, коэффициент Пуассона  $\mu_{\text{гр}} = 0,26$ , отношение  $E_{\text{гр}}/E_6 = 1:750$ . Получим:  $\lambda_0 = \mu_{\text{гр}} / [1 - \mu_{\text{гр}} + (R/F_6)(E_{\text{гр}}/E_6)] = 0,26 / [1 - 0,26 + (2,5/0,5)(1/750)] = 0,26 / (1 - 0,26 + 0,0067) = 0,348$ .

Без учета деформативности стен величина этого коэффициента составляет  $0,351$ , что соответствует пределам точности расчетов (1 %). Из этого следует, что совместный учет деформативности грунта и ячеистого каркаса на величину коэффициента горизонтального давления (а значит, и само давление) влияния не оказывает. Как известно, горизонтальное давление – производное от вертикального давления, поэтому изучаемый параметр не должен влиять и на общее распределение давлений в ячейке, а значит, критерий  $E_{\text{гр}}/E_6$  при моделировании не является строгим или обязательным.

Целесообразно отметить, что модуль упругости стен ячеистого каркаса и момент сопротивления поперечного сечения определяют жесткость ячеистой конструкции и оказывают влияние на величину самого давления грунта. Они же определяют и величины напряжений в самом каркасе, а деформативность самого грунта заметного влияния не оказывает.

2. С точки зрения условия подобия рассмотрим напряженное состояние у дна ячейки и связанное с этим распределение нагрузок в ячейке от грунта в условиях жесткого основания (степень зависания).

Известно, что если в основании ячейки днище жесткое, то оно увеличивает вертикальное давление по сравнению с

давлением Янсена (рис. 1а).

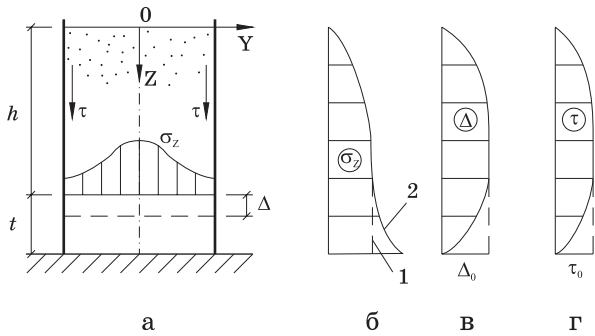


Рис. 1. Напряженное состояние грунта в ячейке: а – ячейка с заполнителем; б, в, г – эпюры вертикального давления  $\sigma_z$ , смещений  $\Delta$  (осадок грунта), касательных напряжений  $\tau$  у стен соответственно; 1 – вертикальное давление, по Янсену; 2 – вертикальное давление в условиях жесткого дна

Причина этого в соответствии с [4, 5] – малые величины смещений (осадок) частиц относительно стен у дна (см. эпюру смещений – осадок на рис. 1в) по отношению к предельной величине смещения  $\Delta_0$ . В результате этого у стен касательные напряжения  $\tau$  в придонной зоне развиваются не полностью и возникает допредельное напряженное состояние (рис. 1г). Высота этой зоны определяется уровнем, на котором осадки грунта равны или превышают величину предельного состояния  $\Delta_0$ . Эта высота, как показали опыты на моделях, примерно равна плановому размеру ячейки [4].

Взаимосвязь между касательными напряжениями и смещением может иметь вид некоторой прямой (рис. 2) [4, 5].

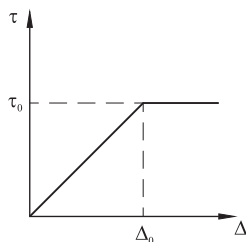


Рис. 2. Зависимость касательных напряжений от величины смещений грунта

Отсюда следует, что идентичность работы модели и натуре необходимо обеспечить подобием напряженно-деформируемого состояния (НДС) засыпки у дна.

Основной фактор, оказывающий влияние на НДС, – касательное напряжение. Судя по графику на рис. 2, это

напряжение может определяться, например, по следующей формуле [4]:

$$\tau = \tau_0 \Delta / \Delta_0, \tag{7}$$

где  $\tau_0$ ,  $\Delta_0$  – предельные величины касательных напряжений и смещений.

Рассмотрим параметры, входящие в формулу.

Первый параметр – величина касательного напряжения  $\tau$  на некоторой глубине заполнителя ячейки  $h$  (по формуле Янсена):

$$\tau_0 = \gamma R [1 - \exp(-kh/R)], \tag{8}$$

где входящие параметры в нее те же, что и в формуле (5).

Второй параметр в (7) – величина смещения  $\Delta$ , как известно, определяется сжатием слоя расчетной толщины под действием приложенного к нему напряжения (см. рис.1):

$$\Delta = \varepsilon t, \tag{9}$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация в рассматриваемом слое грунта-заполнителя:

$$\varepsilon = \sigma_z / E, \tag{10}$$

$t$  – толщина рассматриваемого слоя;  $\sigma_z$  – вертикальное напряжение;  $E$  – модуль деформации грунта.

Третий параметр формулы (7) –  $\Delta_0$ . Это величина предельного смещения. Ее определяют в опытах. В сдвиговых опытах ее значение получалось примерно в 5–10 раз больше, чем средний диаметр песка [6]. В. В. Алипов получал в опытах значение 0,1...0,3 мм при максимальном диаметре частиц 0,5...1 мм [4]. В опытах, проводимых на кафедре ГТС, для люберецкого песка получены следующие величины предельного смещения: в пределах 1...2 мм – для грубой наждачной бумаги, 3...4 мм – для менее грубой наждачной бумаги, т. е. в 5–20 раз больше, чем средний диаметр. Однозначно то, что эта величина зависит только от крупности частиц грунта, степени шероховатости стен и не зависит от масштаба модели, т. е. для рассматриваемого грунта при обеспечении одинаковой шероховатости стен натуре и модели имеет место условие  $\Delta_0 = \text{const}$ .

Полученные параметры вставим в выражение (7) для касательного напряжения:  $\tau = \tau_0(\Delta / \Delta_0) = \gamma R [1 - \exp(-kh/R)](t\varepsilon/\Delta_0)$ .

По аналогии с этим выражением для коэффициентов подобия можно записать:  $\alpha_\tau = \alpha_\gamma \alpha_R [1 - \exp(\alpha_k \alpha_{h/R})] \alpha(t\varepsilon/\Delta_0)$ .  $\tag{11}$

Отметим, что  $\alpha(t\varepsilon/\Delta_0) = \alpha_t \alpha_\varepsilon / \alpha_{\Delta_0}$ , где  $\alpha_t = \alpha_R$  – коэффициент подобия линейных размеров.

С целью обеспечения идентичности касательных напряжений природы и модели для каркаса и заполнителя требуется геометрическое подобие с обеспечением коэффициентов  $\alpha_R$  и  $\alpha_{h/R}$ , т. е. длин и геометрических форм (9). Очевидно, что второй критерий включает и первый, поэтому он является обобщающим.

Подобие коэффициентов  $\alpha_k$ , как отмечалось в [1], обеспечивается одинаковыми для грунта углами внутреннего и контактного трения (с обеспечением одинаковой степени шероховатости стен). Кроме того, требуется выдержать подобие коэффициентов по плотности грунта  $\alpha_\gamma$ .

Последним критерием является следующий:

$$\alpha_\varepsilon = \text{const},$$

т. е. подобие коэффициентов относительной деформации.

Таким образом, для обеспечения подобия напряженного состояния необходимы следующие шесть условий:

$$\alpha_{h/R} = \text{const};$$

$$\alpha_{\text{тгб}} = \text{const};$$

$$\alpha_{\text{тгф}} = \text{const};$$

$$\alpha_\varepsilon = \text{const};$$

$$\alpha_\gamma = \text{const};$$

$$\alpha_{\Delta\sigma} = \text{const},$$

т. е. для моделирования напряженного состояния грунта, кроме трех известных условий (1), (2) и (3), требуется обеспечение подобия плотности грунта, предельных смещений и относительных деформаций.

Условие относительных деформаций  $\alpha_\varepsilon = \varepsilon_H / \varepsilon_M = \text{const}$  равнозначно подобию отношения коэффициентов вертикальных напряжений и модулей деформации грунта природы и модели:  $\alpha_\varepsilon = \alpha(\sigma_z / E) = \alpha_{\sigma_z} / \alpha_E = \text{const}$ .

Соблюдение последнего условия возможно при подобию индикаторных диаграмм – зависимости  $\sigma_z = f(\varepsilon)$  материалов природы и модели [7].

3. Рассмотрим частный случай заполнения модели и натурального объекта одним и тем же материалом. Задача моделирования – создать одинаковое напряженное состояние в грунте и обеспечить на контакте с жестким основанием идентичную эпюру и величину напряжений. Например, если в модели и натуре в качестве заполнителя используется песок, то встает вопрос: можно ли упростить эти условия подобия? Очевидно, что критерий геометрического подобия  $\alpha_{h/R} = \text{const}$

сохраняет силу. Критерий по равенству углов (коэффициентов) внутреннего трения  $\alpha_{\text{тгф}} = \text{const}$  выполняется автоматически. Для обеспечения критерия  $\alpha_{\text{тгб}} = \text{const}$  достаточно обеспечить одинаковую шероховатость стен ячейки, что в модельных условиях реализовать несложно, используя различные покрытия (от гладких стен до наклейки песка или наждачной бумаги). Критерии  $\alpha_\gamma = \text{const}$  и  $\alpha_{\Delta\sigma} = \text{const}$  по плотности грунта и по предельной величине смещения также выполняются автоматически, т. е. для простого подобия с одним и тем же грунтом-заполнителем для модели и природы имеем:

$$\alpha_{\text{тгб}} = \alpha_{\text{тгф}} = \alpha_\gamma = \alpha_{\Delta\sigma} = 1,0. \quad (12)$$

Проанализируем условие подобия  $\alpha_\varepsilon = \text{const}$ . Для иллюстрации рассмотрим численный пример. Как следует из формулы, давление на некоторой глубине заполнителя напрямую зависит от геометрических параметров ячейки. Например, для квадратной ячейки со стороной 4 м при высоте заполнителя  $H = 20$  м по этой формуле получим вертикальное давление (при  $k = 0,2$  и  $\gamma = 1,8$  т/м<sup>3</sup>)  $\sigma_{zH} = (\gamma R / k)[1 - \exp(-kH/R)] = 9,0$  т/м<sup>2</sup> (без учета сомножителя в квадратных скобках) (рис. 3).

На модели (при масштабе моделирования  $\alpha_L = 20$ ) с размерами 25 x 25 см в плане получим давление  $\sigma_{zM} = 0,045$  т/м<sup>2</sup>, меньше в 20 раз.

К жесткому основанию в обеих ячейках вертикальные напряжения резко увеличиваются (см. рис. 16).

Согласно графику зависимости относительных деформаций рассматриваемого грунта-заполнителя от приложенной нагрузки (напряжений), для величин давлений в натуре  $\sigma_{zH}$  и модели  $\sigma_{zM}$  получим относительные деформации соответственно  $\varepsilon_H$  и  $\varepsilon_M$ . Они будут отличаться между собой, т. е.  $\varepsilon_H \neq \varepsilon_M$  ( $\alpha_\varepsilon \neq 1,0$ ) (рис. 3).

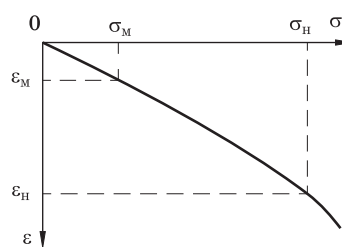


Рис. 3. Взаимосвязь относительных деформаций и вертикальных давлений при испытаниях грунта на сжатие

Разделив напряжения на относительные деформации, получим искомые



для модели и природы величины модулей деформации грунта. При этом для модели расчетный модуль меньше, чем в натуре. Однако не в 20 раз. Этот вывод очевиден, поскольку график связи напряжений и относительных деформаций не является прямой линией.

Это значит, что при использовании одного грунта критерий подобия по его деформативности может не выполняться:  $\alpha_n \neq \alpha_m = 20$ .

Проанализируем выражение (11). При использовании одного и того же грунта в натуре и в модели (при одинаковой шероховатости стен), исключая выражение в скобках, которое определено одинаково в этом случае, выражение (11) приобретает следующий вид:

$$\alpha_t = \alpha_\gamma \alpha_R [1 - \exp(\alpha_k \alpha_{h/R})] \alpha_t \alpha_\varepsilon / \alpha_{\Delta 0} = \alpha_R \alpha_R \alpha_\varepsilon = \alpha_R^2 \alpha_\varepsilon.$$

С учетом того, что  $\alpha_\varepsilon = \alpha(\sigma_z/E) = \alpha_{\sigma z} / \alpha_E$ , это означает, что при обеспечении подобия коэффициентов подобия по напряжениям необходимо выполнить подобие и по модулям деформации грунта, т. е. на модели следует использовать материал, у которого  $E_m = E_n / \alpha_E$ , а коэффициент  $\alpha_\varepsilon = \alpha_{\sigma z} = \alpha_\gamma \alpha_R / \alpha_k = \alpha_R$  (поскольку  $\alpha_\gamma = \alpha_k = 1,0$ ).

Итак, коэффициент подобия для модуля деформации равен коэффициенту геометрического подобия. Этот материал при принятом выше масштабе ( $\alpha_L = 20$ ) должен иметь величину модуля деформации  $320 : 20 = 16 \text{ т/м}^2$ . Таким материалом может являться, видимо, этот же грунт, но с добавкой резиновой крошки и свинцового порошка. Целесообразно напомнить, что у этого материала углы трения, как внутреннего, так и у стен, а также плотность и величины предельных смещений должны быть такими же, как и у натурального грунта.

В экспериментах можно пойти другим путем и выполнить модель в масштабе с коэффициентом  $\alpha_R = \alpha_E$ . При этом модель будет крупномасштабной, но подобие напряженного состояния грунта в ней будет обеспечено.

#### Выводы

Влияние деформативных свойств каркаса на распределение нагрузок оказывается незначительным. Анализ расчетных зависимостей показывает, что это влияние находится в пределах точности расчетов.

Для моделирования напряженного состояния грунта в ячеистой конструкции на жестком основании необходимо выполнение шесть условий подобия, в том числе подобия коэффициентов относительных деформаций и коэффициентов предельных смещений грунта.

При использовании в качестве заполнителя модели натурального грунта необходимо обеспечить следующее условие:  $E_m = E_n / \alpha_E$ , где  $\alpha_E = \alpha_R$ .

1. Шарков В. П., Метельский П. З. Об учете влияния масштабных коэффициентов при изучении передачи нагрузок в ячейке от веса грунта-заполнителя стенкам и основанию: Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения: материалы Международной научно-практической конференции МГУП. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2011. – Ч. 3. Безопасность ГТС. – С. 246–252.

2. Давление сыпучих материалов в силосах и бункерах: сер. Элеваторная мукомольно-крупяная и комбикормовая промышленность. – М.: ЦИНТИ и ТЭИ Госкомзага, 1969. – С. 28–31.

3. Гидротехнические сооружения: справочник проектировщика / Под ред. В. П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.

4. Алипов В. В. Исследование давления грунтового заполнителя в железобетонных гидротехнических сооружениях ячеистой конструкции: Труды ВНИИ ВОДГЕО. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1965. – Вып. 12. – С. 89–103.

5. Курочкин А. М. Напряжения сыпучих материалов в силосах: Исследования, относящиеся к расчетам силосов железобетонного зернового элеватора: сборник научных статей. – Саратов: Саратовский политехнический институт, 1966. – С. 111–204.

6. Шарков В. П. Некоторые вопросы сейсмостойкости ячеистых гидротехнических сооружений на скальном основании: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГМИ, 1982.

7. Гидротехнические сооружения / Под ред. Н. П. Розанова. – М.: Агропромиздат, 198. – 432 с.

Материал поступил в редакцию 16.05.11.

**Шарков Вячеслав Петрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидротехнические сооружения»

Тел. 8-926-538-40-83

E-mail: V.P.Sharkov@mail.ru