

УДК 502/504:624.01:627/626

В. П. Шарков, канд. техн. наук, доцент
 Контактная информация: тел. 8 (495) 976-24-60

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

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ КАСАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И УСЛОВИЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ И ДРУГИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ЯЧЕЙСТЫХ КОНСТРУКЦИЯ

Рассмотрены причины повышения горизонтального давления в ячеистых и других конструкциях, возникающих при осадке заполнителя. Одной из главных причин такого явления, как считает автор, является развитие у стен касательных напряжений до своих экстремальных значений. Приведены формулы для определения горизонтального давления на стены в условиях вертикальных подвижек заполнителя, полученные с учетом экстремальных касательных напряжений.

There are considered causes of the horizontal pressure increase in cellular and other construction cellular structures which arise at the filler settling. One of the main reasons of such phenomena as the author thinks is development of tangential stresses at walls up to their extreme values. The formulas are given for determination of the horizontal pressure on the walls under the conditions of the filler vertical movement which are obtained taking into consideration extreme tangential stresses.

Рассмотрим ячеистую конструкцию, заполненную грунтом. На некоторой глубине в рассматриваемой точке грунтового массива среди напряжений имеются главные нормальные напряжения — максимальное σ_1 и минимальное σ_3 . Как известно, на площадках этих напряжений действуют только нормальные напряжения, а касательные напряжения отсутствуют. При этом площадки главных нормальных напряжений взаимно перпендикулярны.

В отличие от площадок главных нормальных напряжений, на площадках главных касательных напряжений в общем случае действуют также и нормальные напряжения [1]. Эти главные

касательные напряжения из-за их максимальной величины ($\tau_0 = \tau_{\max}$) также называют экстремальными.

Площадка действия главного касательного напряжения наклонена к площадкам главных нормальных под углом 45° (рис. 1).

Для дополнительной иллюстрации также приведем диаграмму Мора (рис. 2).

Как видно из диаграммы, величина экстремального касательного напряжения τ_0 равна радиусу круга и для условий плоской задачи может определяться по формуле

$$\tau_0 = \pm 0,5 (\sigma_1 - \sigma_3), \quad (1)$$

где σ_1, σ_3 — соответственно максимальное и минимальное главные нормальные напряжения.

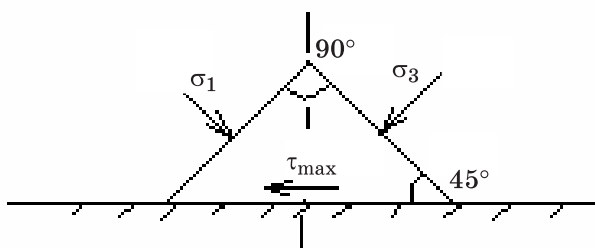


Рис. 1. Ориентация площадки экстремального касательного напряжения τ_{\max}

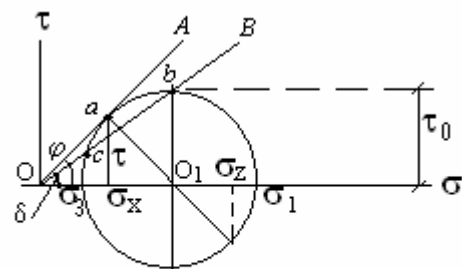


Рис. 2. Главные касательные напряжения ($\tau_0 = \tau_{\max}$) на круге Мора

Напряжение на круге Мора соответствует точке *b* и составляет с осью нормальных напряжений (горизонтальной осью на рис. 2) угол 45° (во избежание перегрузки чертежа прямая *b* — σ_1 не показана), что подтверждает рис. 1.

Вернемся к ячейке с грунтом. Для простоты рассуждений рассмотрим осесимметрическую задачу — с цилиндрической ячейкой и шероховатыми внутренними стенками. При заполнении ячейки в пристенном слое грунт может находиться в допредельном состоянии. Рассмотрим участок круга *c* — *a*, где угол трения $\alpha < \varphi$ (φ — угол внутреннего трения грунта). Для этого участка характерно активное непредельное напряженное состояние с горизонтальным напряжением $\alpha_x < \alpha_z$ (α_z — вертикальное напряжение). Такому состоянию на диаграмме Мора соответствует точка *c*. При повышении угла трения грунта у стен α до величины угла внутреннего трения φ грунт может перейти в предельное состояние. Предельному состоянию на рис. 2 соответствует точка *a*, и здесь величина касательного напряжения достигает своего предельного значения:

$$\tau = \sigma_x \operatorname{tg} \varphi,$$

где σ_x — горизонтальное напряжение.

Рост угла α на участке круга *c* — *a*, как видно из рис. 2, сопровождается ростом касательного напряжения и увеличением горизонтального напряжения. При этом вертикальное напряжение, наоборот, уменьшается.

На рис. 3 в верхней части приведена иллюстрация предельного состояния,

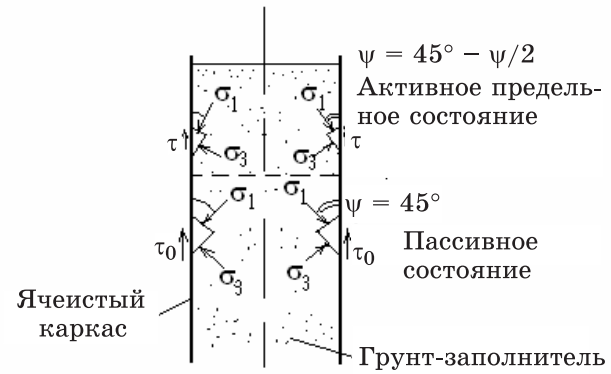


Рис. 3. Ориентация главных нормальных напряжений у стенки ячейистого каркаса: для активного предельного напряженного состояния — вверху (соответствует точке *a* на круге Мора) и пассивного напряженного состояния — внизу (соответствует точке *b* на круге Мора)

соответствующего точке *a* (см. рис. 2). Из диаграммы Мора следует, что угол наклона прямой *a* — σ_1 (на рисунке не показана) к оси абсцисс — главных напряжений — составляет $\psi = 45 - \varphi/2$. Другими словами, максимальное главное нормальное напряжение α_1 наклонено в этом случае к вертикали под этим углом $\psi = 45 - \varphi/2$ (рис. 3). Например, для песчаного грунта с $\varphi = 36^\circ$ угол наклона $\psi = 27^\circ$.

Рассмотрим участок *a* — *b* круга Мора на рис. 2. На этом участке (и далее до точки σ_1) любая прямая из точки *O* (кроме предельной *OA*) имеет две точки пересечения на круге (например, прямая *OB*, которая, имея наклон к горизонтальной оси по углом δ , пересекает круг дважды, в точке *c* и точке *b*).

Угол δ легко определяется через угол φ при рассмотрении треугольников *OaO₁* и *OвO₁* по формуле $\delta = \operatorname{arctg}(\sin \varphi)$.

Для иллюстрации изменения этого угла приведена таблица.

Величина угла δ

φ	25°	30°	35°	40°	45°
$\delta = \operatorname{arctg}(\sin \varphi)$	23°	$26,5^\circ$	30°	$32,8^\circ$	$35,3^\circ$

Как видно из таблицы, угол δ всегда меньше угла φ , и разница между ними нарастает от 2° до $8...9^\circ$ с увеличением угла внутреннего трения грунта.

Как отмечалось, точка *b* интересна тем, что она соответствует экстремальному напряжению τ_0 для рассмат-

риваемой точки грунта (на некоторой глубине ячейки). Она образует с осью абсцисс (что означает угол наклона главного нормального напряжения к вертикали) угол $\psi = 45^\circ$, что показано на рис. 3 (в нижней части ячейки). При известном значении предельного

касательного напряжения величина τ_0 может быть определена по формуле [2]

$$\tau_0 = \tau / \cos \varphi. \quad (2)$$

Как видно из рис. 2, точке b характерно равенство вертикального напряжения горизонтальному. Причем в сравнении с предельной точкой c горизонтальное напряжение увеличилось с σ_x до σ_{x0} , а вертикальное уменьшилось с некоторого σ_z до σ_{z0} (индекс 0 означает принадлежность к экстремальному состоянию).

Величину горизонтального давления при этом (при известном α_x для предельного состояния) можно определить по формуле [2]

$$\sigma_{x0} = \sigma_x / \cos^2 \varphi. \quad (3)$$

Из этой формулы следует, что для грунта с углом внутреннего трения $\varphi = 36^\circ$ боковое давление на стенку должно увеличиться в 1,53 раза, что подтвердили опыты с ячеистой конструкцией [2]. Практически совпали расчетные данные с опытными для модели силоса диаметром 0,6 м [3].

Коэффициент горизонтального (бокового) давления для точки b на рис. 2 при этом стал равен $\lambda = \sigma_{x0} / \sigma_{z0} = 1,0$ (гидростатическому). Заметим, что здесь и вертикальное давление определяется по формуле (3).

Из литературы известно [1], что напряженное состояние, при котором вертикальное напряжение меньше горизонтального, называется пассивным. Именно точка b на рис. 2 является границей окончательного перехода грунта из активного в пассивное (реактивное) состояние.

Рассмотрим условия возникновения пассивного состояния в точке на некоторой глубине массива. Применительно к подпорной стенке пассивное состояние может возникать, как известно, при навале ее на грунтовую засыпку, т. е. при повышении горизонтального давления (вертикальное давление — постоянное). Этот случай не рассматриваем.

Другой случай возникновения пассивного давления — это уменьшение

вертикального давления (горизонтальное давление — постоянное) при образовании пустот в нижней части засыпки подпорной стенки (например, в результате вымывания грунта фильтрующим потоком).

Похожий пример возникновения пассивного давления возможен в массиве грунта с днищем (полосой) у основания при опускании последнего. В исследованиях Терцаги [4] отмечалось, что при этом над полосой в грунте возникало напряженное состояние с уменьшением вертикального давления грунта до значений горизонтального с коэффициентом $\lambda = 1,0$ (и даже больше), что, очевидно, и означает развитие касательных напряжений до экстремальных.

Пассивное напряженное состояние может, по мнению автора, возникнуть также при уплотнении грунта-заполнителя в ячеистых гидротехнических сооружениях глубинными вибраторами. Аналогичная картина наблюдалась в экспериментах с ячеистой конструкцией после сейсмического воздействия. В обоих случаях грунт-заполнитель имел крупные подвижки (осадки) относительно стен с максимальным развитием касательных напряжений в пристенном слое, признаком чего являлось установленное в опытах максимально возможное «зависание» на стенках песчаного грунта.

Другой пример возникновения пассивного состояния — случай выгрузки силосов и бункеров, когда заполнитель в нижней части ячейки при открытии затвора выгрузного отверстия «вынужден» развить максимально возможные резервы сопротивления для противодействия опорожнению.

Анализ опытных данных показал, что для возникновения экстремальных касательных напряжений при контакте грунта с ограждением (стенкой, ячеистой конструкцией) необходимы относительно крупные подвижки (осадки) грунта. Именно в этом случае имеется возможность развития по всей высоте массива максимально допустимых касательных напряжений и перехода час-

ти слоя грунта в пассивное состояние. Эту гипотезу о подвижках подтверждают натурные исследования Платонова и Ковтуна [5]. Они считают очень существенным наличие так называемых «предварительных смещений» заполнителя.

Выводы

Экстремальные касательные напряжения при известных главных нормальных напряжениях определяются по формуле

$$\tau_0 = \pm 0,5(\sigma_1 - \sigma_3),$$

а при известном предельном касательном напряжении τ — по формуле

$$\tau_0 = \tau / \cos \varphi.$$

Угол трения, соответствующий возникновению экстремального касательного напряжения, в среднем на $4...6^\circ$ ниже угла внутреннего трения; определяется по формуле $\delta = \arctg(\sin \varphi)$.

Условием возникновения экстремального касательного напряжения у стен является появление гидростатического напряженного состояния в грунте, при котором вертикальные напряжения равны горизонтальным. В ячеистых конструкциях и подпорных стенках это возможно в процессе появления условий для разгрузки (понижения) вертикальных напряжений, например, тогда, когда образуются пустоты в нижней части заполнителя, происходящие при вибрационным уплотнении грунта или сейсмическом воздействии, а также при выгрузке силосов.

Развитие экстремальных касательных напряжений у стен происходит в условиях повышенного (по отношению

к предельному состоянию) горизонтального давления грунта, определяемого по формуле

$$\sigma_{хо} = \sigma_x / \cos^2 \varphi,$$

где σ_x — горизонтальное давление в предельном состоянии.

Это следует учитывать при расчете прочности стен конструкций.

Ключевые слова: строительство, ячеистые конструкции, грунт, давление, формула, касательные напряжения, экстремум.

Список литературы

1. **Гольштейн, М. И.** Механические свойства грунтов [Текст] / М. И. Гольштейн. — М. : Гос. Изд-во литературы по строительству, 1971. — 367 с.
2. **Шарков, В. П.** Горизонтальное давление грунта-заполнителя в ячейках ГТС при его вертикальных подвижках от динамических воздействий / В. П. Шарков [Текст] // Проблемы экологии и безопасности жизнедеятельности в XXI веке : материалы Международной научно-техн. конфер. ; под ред. В. Н. Прякина. — М. : Норма, 2004. — Вып. 5. — С. 278–283.
3. **Пипер, К.** Исследование силосных нагрузок на моделях [Текст] / К. Пипер // Конструирование и технология машиностроения : труды Американского общества инженеров-механиков. — 1969. — № 2. — С. 80-85.
4. **Терцаги, К.** Теория механики грунтов [Текст] / К. Терцаги. — М. : Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строит. материалам, 1961. — 507 с.
5. **Ковтун, А. П.** Давление зерна на стенки силосов [Текст] / А. П. Ковтун, П. Н. Платонов // Мукомольно-элеваторная промышленность. — № 12. — 1959. — С. 22–24.