

УДК 502/504:624.042:626/627

Б. М. БАХТИН, В. П. ШАРКОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

РОЛЬ ГРУНТА-ЗАПОЛНИТЕЛЯ КАК ФУНКЦИИ ПРИСОЕДИНЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ ПРИ РАБОТЕ БЕТОННЫХ ЯЧЕЙСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрены особенности совместной работы жесткой одиночной ячейки и грунта-заполнителя при действии на сооружение изгибающих моментов. Для выяснения роли грунта была проведена серия опытов на физической модели одиночной ячейки в условиях жесткого (скального) основания с последующим расчетным анализом полученных результатов. Опыты показали, что грунт-заполнитель при работе модели, нагруженной горизонтальной сосредоточенной нагрузкой, активно участвует в сопротивлении изгибу, увеличивая жесткость исследуемой конструкции и позволяя заметно уменьшить толщину ее стенок. Можно ожидать, что учет сопротивления грунта-заполнителя, как присоединенной жесткости, при проектировании таких сооружений позволит уменьшить затраты бетона. Для количественной оценки влияния этого фактора необходимо продолжить исследования при различной жесткости стенок ячейки и различных свойствах грунта-заполнителя.

Ячейка, грунт-заполнитель, присоединенная жесткость, модель, изгиб, прогиб.

There are considered features of the joint work of a hard single cell and prime-filler under the action of bending moments on the structure. To clarify the role of the soil, a series of experiments was carried out on a physical model of a single cell followed by the calculation analysis of the obtained results. The experiments showed that the prime-filler when the model loaded with a horizontal concentrated loading actively participates in the bending resistance increasing the rigidity of the investigated structure and allowing significantly reduce the thickness of its walls. We can expect the taking into account the resistance of the primer filler as an added rigidity to reduce concrete consumption when designing such constructions. For the quantitative assessment of the influence of this factor it is necessary to continue investigations under different rigidity of the cells walls and various properties of the prime-filler.

Cell, primer filler, added rigidity, model, bend, deflection.

Изучению особенностей взаимодействия грунта с ячейстыми конструкциями, как в условиях статической работы, так и при динамических воздействиях, посвящено большое количество исследований. Они показали весьма важную, а иногда и доминирующую его роль в обеспечении устойчивости и прочности сооружения. Так, в работе [1] приведены результаты экспериментального (на физической модели) и расчетного определения частоты основного тона собственных колебаний модели грунтовой плотины, низовой клин которой представляет ячейстую конструкцию. По данным расчета с учетом жесткости каркаса частота основного тона колебаний составила 360 герц, без ее учета – от 162 до 179 герц. Частота, определенная на модели, составила 176 герц. Из этих данных видно, что главную

роль в процессе колебаний конструкции играет именно грунтовой массив ее тела, включающий и грунт засыпки ячеек.

Другим, весьма интересным, аспектом изучения работы ячейстых сооружений является сила трения, возникающая между каркасом и заполняющим его грунтом, и обуславливающая передачу части веса грунта на стенки ячейки («степень зависания»). Последнее особенно важно для обеспечения устойчивости сооружений на скальном основании против сдвига. Здесь наибольший интерес представляет динамика изменения степени зависания во времени. Видимо, сразу после засыпки грунта в ячейку должно происходить, по мере его осадки, возрастание силы трения до максимального значения, способы определения которого приводятся в технической литературе. Последующая

динамика представляет наибольший интерес: будет ли степень зависания падать с уменьшением взаимных смещений между грунтом и стенками ячеек (что представляется логичным) или останется постоянной.

И, наконец, роль грунта в обеспечении прочности ячеистых конструкций. Как известно, одним из основных требований, предъявляемых к любому сооружению, является обеспечение его прочности. Это условие предполагает ограничение напряжений, сжимающих или растягивающих, возникающих в рассматриваемой конструкции, допустимыми их значениями. При невыполнении этого условия в конструкциях из бетона повышают его марку или поперечные размеры, что приводит к удорожанию сооружения.

В гидротехнических и других сооружениях ячеистой конструкции, состоящих из бетонных или железобетонных коробок, засыпанных грунтом и воспринимающих горизонтальные нагрузки, например, подпорных сооружениях, в самой конструкции имеется резерв прочности. Он обусловлен тем, что грунтовая засыпка здесь является конструктивным элементом, обладающим жесткостью и способным воспринимать часть действующей нагрузки.

Проиллюстрировать это можно на примере взаимодействия чулка и сухого мелкого песка. Ясно, что чулок, не обладающий собственной жесткостью, не способен сопротивляться нагрузкам, действующим как вдоль его оси (но не растягивающим), так и поперек нее. То же самое можно сказать и о песке, который даже придаваемую ему форму держать не способен, не говоря о дополнительной нагрузке. Но, насыпав песка в чулок и уплотнив его, получим цилиндр, который можно поставить и даже загрузить горизонтальной, пусть даже небольшой нагрузкой. Таким образом, обеспечив сохранение приданной песку формы, удастся придать ему свойства жесткого тела, способного воспринимать действующие нагрузки, тем большие, чем выше жесткость оболочки. Это обстоятельство, в известной мере, учитывается в работе [2], посвященной ячеистым конструкциям из металлического шпунта, где шпунтовая оболочка обладает малой поперечной жесткостью.

При расчете напряжений в жест-

ком ячеистом каркасе обычно учитывают сопротивление только самой бетонной конструкции, не принимая во внимание влияние грунта – заполнителя, который при изгибных деформациях, например, под действием внешней горизонтальной силы P (рис. 1), должен быть включен в работу, приводя к уменьшению напряжений в каркасе.



Рис. 1. Схема плотины ячеистой конструкции: P – нагрузка от гидростатического давления

Настоящая работа посвящена изучению влияния сопротивления грунта-заполнителя на изгибные деформации ячеистой конструкции и его оценке применительно к фрагменту сооружения – одиночной ячейке, заполненной песчаным грунтом (рис. 2)

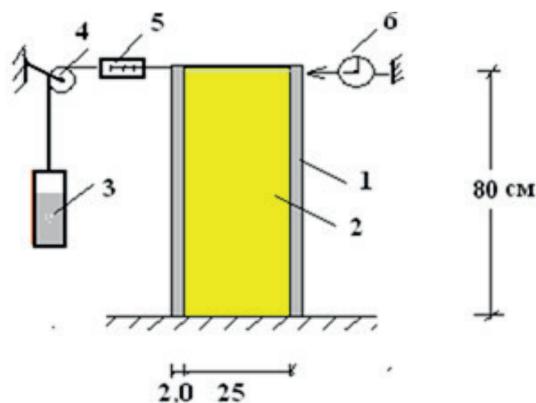


Рис. 2. Схема опытной установки: 1 – ячеистый каркас; 2 – песчаный заполнитель; 3 – контейнер; 4 – блок; 5 – динамометр; 6 – датчик перемещений

Напряжения, возникающие в стенках каркаса под действием внешних нагрузок, определим методом сопротивления материалов по формуле внецентренного сжатия. Рассмотрим работу одиночной ячейки на жестком основании, заполненной грунтом под действием го-

ризонтовой силы (рис. 2) .

Краевые напряжения, возникающие в горизонтальном сечении конструкции можно определить по формуле:

$$\sigma = N/F \pm (M/J)y, \quad (1)$$

где N – сумма вертикальных сил, действующих выше расчетного сечения, F – площадь поперечного сечения каркаса ячейки, M – сумма моментов сил относительно центра тяжести рассматриваемого сечения, J – момент инерции расчетного сечения в плоскости действия силы, y – ордината расчетной точки (в горизонтальном сечении).

В этой формуле вертикальная сила N складывается из веса части каркаса над расчетным сечением, а также из пригрузки ее грунтом – заполнителем, которая образуется за счет зависания грунта на стенках. Изгибающий момент M определяется произведением горизонтальной силы на ее плечо.

Если эта конструкция заделана в основании, то напряжения, возникающие в ней под действием горизонтальной силы в упругой стадии работы, должны быть пропорциональны ее изгибным деформациям (прогибам), поскольку последние определяются этой же силой (см. ниже формулу 2).

Рассмотрим два случая работы на изгиб этой конструкции: первый – для пустой ячейки без грунта, второй – для ячейки полностью заполненной грунтом. Если принять изложенное выше соображение о работе грунта-заполнителя как присоединенной жесткости, то прогибы ячейки этих случаях должны быть различны. В первом случае – без грунта они должны быть больше, а во втором – меньше по величине. Эта картина будет наблюдаться, если грунт вместе с бетонным каркасом участвует в сопротивлении изгибным деформациям, повышая общую жесткость конструкции.

Для выяснения вклада грунта в общее сопротивление конструкции были проведены специальные опыты. В этих опытах определялись прогибы модели одиночной ячейки для двух случаев – незаполненного ячеистого каркаса и после его заполнения песчаным грунтом (рис. 2). Ячейка была изготовлена из смеси в соотношении гипс : песок : вода = 1 : 0,5 : 1. Высота модели составляла 80 см при ее плановых внутренних размерах 25x25 см и толщине стенок 2 см. В качестве

заполнителя ячейки использовался мелкий песок из люберецких карьеров. Модель была установлена на металлическом основании (стальная пластина) с помощью гипсового раствора, обеспечившего жесткое их соединение.

Горизонтальная нагрузка прикладывалась на уровне свободного конца ячейки. Она создавалась с помощью стального троса толщиной 3 мм, одним концом закрепленного к ячейке, а другим – к контейнеру с грузами (рис. 2), причем для повышения точности трос был строго сцентрирован по оси симметрии ячейки. В опытах нагрузка создавалась грузами, укладываемыми в контейнер ступенями (общим весом до 10 кг), а прикладываемая к модели сила замерялась динамометром с ценой деления 0,01 кг.

На каждой ступени нагрузки индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм регистрировались горизонтальные перемещения верхнего конца ячейки.

Полученные данные позволили построить графики зависимости перемещения (прогиба) верхнего конца ячейки от прилагаемой силы, приведенные на рис. 3 и 4. Опыты показали, что зависимость прогибов от нагрузки в рассмотренном диапазоне оказалась практически линейной, с увеличением прикладываемой силы прогибы модели пропорционально возрастали, что свидетельствует об упругой стадии ее работы. При этом тангенс угла наклона графика (отношение значений прогиба в мкм и соответствующей нагрузки в кг) для незаполненной ячейки составлял 2,75.

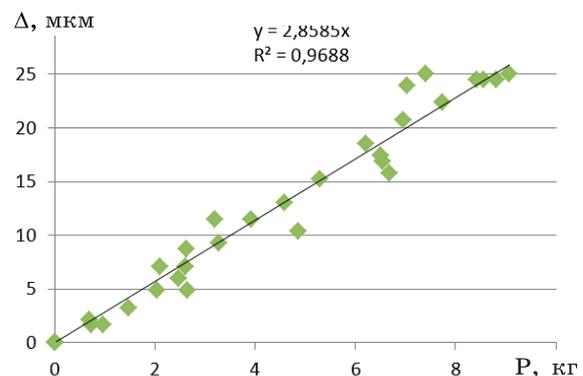


Рис. 3. График зависимости прогиба пустотелой ячеистой конструкции от приложенной силы

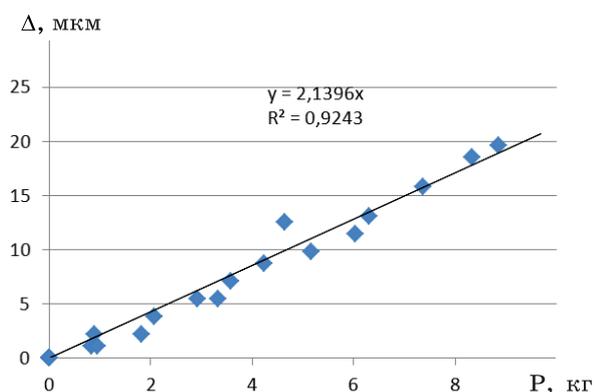


Рис. 4. График зависимости прогиба заполненной ячеистой конструкции от приложенной силы

Во второй серии опытов, с каркасом, заполненным песком, график зависимости прогибов от нагрузки оказался также практически прямолинейным, но тангенс угла наклона графика оказался в 1,33 раза меньше, чем в первом случае. Этот результат свидетельствует о существенном влиянии песчаного заполнителя на сопротивление ячейки изгибающему моменту, уменьшая прогиб от внешней нагрузки.

Таким образом, заполнение каркаса грунтом может уменьшить и напряжения в ячеистой конструкции в упругой стадии ее работы. Используем полученные в опытах результаты для оценки дополнительной («присоединенной») жесткости конструкции, обусловленной сопротивлением грунтовой засыпки.

Как известно, формула для определения прогибов консольной балки, жестко заделанной в основании, имеет вид:

$$\Delta = PLi/3EJ, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала балки; L – длина консоли (высота ячейки); остальные обозначения те же, что в (1).

Момент инерции горизонтального сечения для квадратной ячейки с внутренними размерами $b = 25$ см и внешними – $B = 29$ см относительно оси симметрии: $J_{яч} = B^4/12 - b^4/12 = 58940 - 32552 = 26388 \text{ см}^4$.

Здесь первое слагаемое представляет собой момент инерции сечения сплошной балки, второе – момент инерции внутренней полости ячейки.

Используя данные опытов для незаполненной модели, по зависимости (2)

просто найти значение модуля упругости материала ячейки: $E_{яч} = PLi/3J_{яч} \Delta$. При горизонтальной силе $P = 10$ кг величина прогиба у верха ячейки $\Delta = 0,00286$ см, что соответствует величине модуля упругости $E_{яч} = 22614 \text{ кг/см}^2$, которая вполне согласуется со значением динамического модуля упругости материала, полученного нами ранее в опытах [3].

В опытах с ячейкой, заполненной песком, при такой же нагрузке 10 кг получена величина прогиба, равная 0,00214 см, что в 1,336 раза меньше, чем в первой серии опытов. Отметим, что указанные величины прогибов составляет примерно 1/28000 и 1/38500 по отношению к высоте модели.

По аналогичной методике определим модуль упругости консольной балки сплошного квадратного сечения из некоего условного материала, прогиб которой равен прогибу ячейки с песком $\Delta = \Delta_{усл} = 0,00214$ см, считая, что она имеет поперечное сечение со сторонами $B = 29$ см. Как отмечалось выше, момент инерции сечения такой балки такого 58940 см^4 , тогда

$$E_{усл} = PLi/3J_{усл} \Delta_{усл} = 10 \times 80^3 / (0,00214 \times 3 \times 58940) = 13531 \text{ кг/см}^2,$$

что меньше чем модуль упругости материала каркаса на величину $E_{яч} - E_{усл} = 22614 - 13531 = 9083 \text{ кг/см}^2$.

Поскольку ясно, что грунт также вносит свой вклад в сопротивление при изгибе, то прогиб ячеистой конструкции с грунтом при нагружении должен определяться не только жесткостью каркаса ($E_{яч} J_{яч}$), но и жесткостью грунтовой засыпки ($E_{гр} J_{гр}$), что позволяет записать:

$$\Delta = PL^3/3E_{усл}J_{усл} = PL^3/3(E_{яч}J_{яч} + E_{гр}J_{гр}). \quad (3)$$

Сокращая однородные члены, получим равенство:

$$E_{усл}J_{усл} = E_{яч}J_{яч} + E_{гр}J_{гр}. \quad (4)$$

Здесь $J_{гр}$ – момент инерции грунтовой «балки» квадратного сечения с внутренними размерами полости ячейки 25x25 см. $J_{гр} = 32552 \text{ см}^4$.

Из (4) можно определить величину модуля упругости грунта:

$$J_{гр} = (E_{яч}J_{яч} - E_{усл}J_{усл})/J_{гр} = 6168 \text{ кг/см}^2.$$

Как видим, для условий опыта модуль упругости песчаного грунта составляет $6168 / 22614 = 0,27$ от

модуля упругости материала каркаса.

Полученное значение модуля упругости песчаного материала более, чем на порядок выше, модуля деформации этого грунта. Например, по справочным данным для мелкого песчаного грунта в рыхлом состоянии модуль деформации составляет около 250 кг/см^2 [4]. Такая разница, видимо, может объясняться малыми величинами деформаций грунта на контакте с конструкцией при упругой работе последней на изгиб, и поэтому грунт ведет себя, как упругая среда.

Полученные результаты позволяют утверждать, что грунт засыпки, принимая участие в работе ячеек на изгиб, увеличивает сопротивление конструкции. Эффект учета сопротивления грунтовой засыпки оценим на примере одиночной ячейки с принятыми ранее габаритными размерами и выполненной из того же материала. Если не учитывать сопротивление грунта, прогиб ячейки без засыпки должен приниматься таким же, как прогиб ее ячейки с грунтом. Исходя из этого, определенный по зависимости (2) момент инерции сечения конструкции должен быть равен 35266 см^4 , что соответствует внутренним размерам ячейки $23,78 \text{ см}$ и толщине ее стенок равной $2,6 \text{ см}$. Это равноценно увеличению расхода материала каркаса на 30% .

Легко видеть, что в принятых условиях эксперимента вклад грунта в сопротивление конструкции при изгибе является существенным. Естественно, это повлияет и на ее напряженное состояние. В реальных сооружениях, выполняемых из бетона и заполняемых грунтовыми материалами (песком, гравием и др.) отношение модулей упругости бетона и грунтов засыпки может быть значительно больше, чем в наших опытах, что может дать результаты, отличающиеся от полученных. Это представляет и научный, и практический интерес.

Выводы

На основе проведенных модельных исследований можно сделать следующие выводы:

грунт-заполнитель в ячеистой конструкции при изгибных ее деформациях ведет себя как упругое тело, реализуя свой модуль упругости;

учет в расчетах прогибов сопротивления грунта-заполнителя при изгибных деформациях модели может привести к заметному уменьшению толщины стенок ячеистого каркаса, составившему для условий опытов 30% ;

вопрос о величинах присоединенной жесткости грунта-заполнителя в зависимости от жесткости ячеистого каркаса требует дополнительных, в том числе, и модельных исследований.

1. **Бахтин Б. М.** Динамическое поведение бетонных сооружений, взаимодействующих с грунтом засыпки // Гидротехническое строительство. – № 8. – 1998. – С. 31–35.

2. **Селиверстов В. И.** Методика расчета деформаций цилиндрических стальных ячеек гидротехнических сооружений: дис. ... кандидата техн. наук: 05.23.07. – Владивосток, 1987. – 256 с.

3. **Шарков В. П.** О резерве устойчивости ячеистых сооружений на скальном основании // Гидротехническое строительство. – 2001. – № 2. – С. 20–24.

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

Материал поступил в редакцию 15.09.2015.

Бахтин Бронислав Михайлович, доктор технических наук, профессор

Тел. 8(499)976-24-60

Шарков Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент

Тел. 8(499)976-24-60

E-mail: v.p.sharkov@mail.ru