

УДК 624.131.37

А. С. САЕНКОВ, инж., С. А. ЕЛИЗАРОВ, инж. (Балаковский филиал СПИ);
М. В. МАЛЫШЕВ, д-р техн. наук, проф. (МИСИ)

Развитие областей предельного состояния грунта в основании квадратного штампа

При проектировании оснований следует полнее учитывать главные доминирующие факторы, в том числе недопустимость превышения предельных деформаций, назначаемых по условиям нормальной эксплуатации. Достижение предельного состояния грунта, т. е. когда возникает локальное его разрушение в некоторой точке или небольшой области основания, означает, что здесь грунт имеет пониженное сопротивление сдвигу, но сооружение в целом еще не находится в опасном положении. Однако полное разрушение основания может произойти в процессе накопления пластических деформаций и распространения предельного состояния на значительную область основания.

Изучению вопроса развития областей предельного состояния грунта и их влияния на работу основания штампов был посвящен ряд экспериментальных работ, результаты которых приводятся ниже.

Данная работа основана на испытаниях основания, сложенного песком средней крупности плотностью $\rho = 1,78 \text{ г/см}^3$, проводимых в лотке диаметром 1200 мм и высотой 800 мм. Основание нагружалось центрально через жесткий металлический шероховатый штамп площадью 400 см^2 путем увеличения осадка штампа с одновременным измерением реакции основания динамометром.

По результатам этих экспериментов был построен график зависимости осадка — нагрузка, показывающий, что до некоторого значения нагрузки эта зависимость практически прямолинейна, а затем с её ростом происходит все большее отклонение от прямой, т. е. график становится явно нелинейным (рис. 1). Возникновение нелинейности отражает качественные изменения работы основания. Чтобы точно определить нагрузку, при которой происходит переход основания в новое качественное состояние, воспользуемся зависимостью $K_s = f(P)$, где K_s — «скорость» деформирования, $K_s = \Delta S / \Delta P$. На рис. 1 график зависимости $S - P$ совмещен с графиком зависимости $K_s - P$. Анализируя последний, видим, что он имеет три явно выраженных участка, каждый из которых практически линеен. Последнее показывает, что изменение интенсивности деформирования в ходе нагружения основания непостоянно и может характеризовать качественные изменения работы основания. Характерно, что точка первого перелома графика $K_s - P$ совпадает с переходом линейного участка графика $S - P$ в нелинейный. Поэтому можно считать, что нагрузка, соответствующая этому переходу, является критической. Логично предположить, что и второй излом графика $K_s - P$ соответствует переходу в новое качественное состояние. Тогда значение нагрузки, соответствующее второму излому, назовем

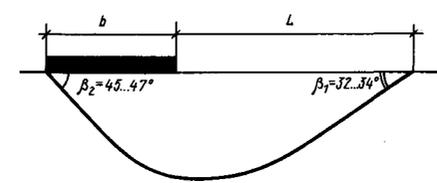
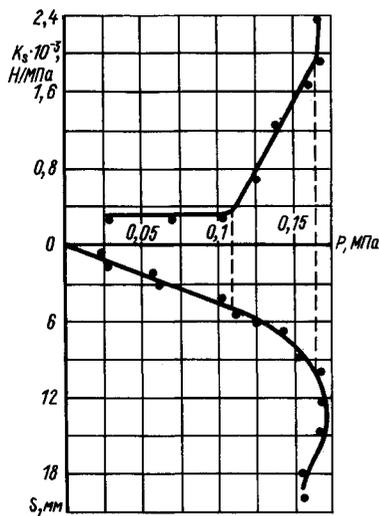


Рис. 2. Поверхность разрушения в основании квадратного штампа

Рис. 1. Графики зависимостей K_s — P и S — P

предельным. Из графиков видно, что $P_{кр} = (0,72...0,73) P_{макс}$, а $P_{пр} = (0,90...0,93) P_{макс}$.

Полученные в ходе опытов границы зон выпора подтверждают данные работ [1, 2], свидетельствующие, что на поверхности основания границы имеют четырехлепестковое очертание, причем «лепестки» расположены вдоль осей симметрии, проходящих через середины сторон штампа. В направлении же диагональных осей симметрии разрушений не наблюдается.

При определении границ сдвигаемых призм внутри массива грунта была применена известная методика, где в качестве фиксирующих элементов используются вертикальные тонкие металлические полосы, располагаемые в зоне разрушения с определенным шагом, когда после разрушения по их изгибам определяют границу сдвигаемой призмы. М. И. Горбунов-Посадов назвал эту методику наиболее надежной [3]. В наших опытах в качестве фиксирующих полос использовались медные отожженные проволоочки диаметром 0,7 мм, устанавливаемые в направлении двух осей симметрии на глубину не менее 250 мм с шагом 50 мм. В результате проведенных измерений получены границы сдвигаемой призмы (рис. 2). Длина зоны выпора составила $L = (1,83...1,89) b$, а угол выхода поверхности разрушения с горизонтом $\beta_1 = 32...34^\circ$. (В работе [2] $L = (1,3...1,6) b$). Одновременно зафиксирован угол наклона поверхности разрушения у подошвы штампа, который для квадратного штампа составил $\beta_2 = 45...47^\circ$. Полученные результаты позволили установить, что высота ядра в основании квадратного штампа составляет $h_{я} = (0,5...0,55) b$.

Физические параметры основания определялись из испытаний песчаного грунта в условиях однородного напряженного состояния в стабилометре, где нагружение образца осуществлялось по схеме раздавливания с постоянной скоростью деформирования. Результаты этих испытаний приведены на рис. 3 в виде графика зависимости $\sin \theta \sim \epsilon_i$, где ϵ_i — интенсивность деформаций сдвига. Из графика видно, что сопротивление грунта деформированию возрастает до пикового значения, соответствующего пиковому углу внутреннего трения $\varphi^0 = 41,5^\circ$, а затем деформирование образца сопровождается уменьшением сопротивления до некоторого остаточного его значения. Пиковой прочностью определяется максимальное сопротивление деформированию грунта или его предельное сопротивление [4].

Основной методикой определения границ зон предельного состояния грунта, которая предложена в работе [5], является предположение, что аналогичная физическая зависимость $\sin \theta \sim \epsilon_i$ в качестве параметра упрочнения модели грунта принята интенсивность деформаций сдвига ϵ_s , которая позволяет однозначно сравнивать деформированное состояние в различных точках среды по величине деформации формы [6]. С помощью параметра $\eta = \epsilon_s^0 / \epsilon_s^i$, где ϵ_s^0 — интенсивность сдвиговых деформаций грунта в основании, а ϵ_s^i — интенсивность деформаций сдвига при пиковой прочности грунта, производится оценка напряженного состояния грунта. В областях основания, где $\eta < 1$, грунт находится в допредельном состоянии, а в зонах $\eta \geq 1$ он переходит в предельное состояние с дальнейшим разупрочнением.

Для определения ϵ_s^0 в ходе исследований применялся известный метод геометрии, когда искомку ϵ_s^0 вычисляют по изменению координат фиксированных точек в ходе деформирования, которые располагаются в определенном порядке. Устройство, позволяющее выполнить такие измерения описано в работе [7].

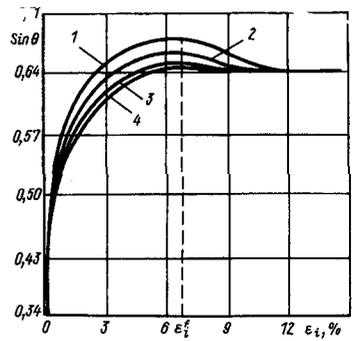


Рис. 3. Графики зависимости сопротивления песка сдвигу. Значения σ (МПа) соответственно: 1 — 0,05; 2 — 0,1; 3 — 0,2; 4 — 0,3

Однако вследствие некоторых его недостатков, авторами было предложено другое измерительное устройство (рис. 4) [8]. Оно содержит экран, состоящий из двух частей 1 и 2. На части 1, выполненной в виде гладкого со стороны грунта 3 заземленного металлического листа, укреплен лист электропроводной бумаги 4, соединенный электрически с металлическим листом 1. На второй части экрана 2, выполненной в виде гладкого листа из диэлектрического материала, установлены подвижные фиксирующие элементы 5 в виде металлических заостренных игл. Последние укреплены на диэлектрических шероховатых со стороны грунта плавающих дисках 6, установленных в отверстиях второй части экрана 2, которые расположены в узлах сетки размером 30×30 мм. Каждая из игл 5 соединена через шаговый искатель 7, являющийся частью электронной схемы, с высоковольтным источником питания 8.

Работа устройства осуществляется в следующем порядке. В лоток вертикально устанавливается экран, включающий части 1 и 2, а затем формируется основание, располагается штамп, имеющий прорезь от края до оси, сквозь которую проходит измерительный экран. После этого производится фиксация начального положения элементов 5, принимаемое за нулевое, для чего на обмотку шагового искателя 7 подается напряжение. При этом подвижный контакт искателя «опрашивает» все неподвижные контакты, каждый из которых соединен с иглой элемента 5. Поскольку подвижный контакт шагового искателя соединен с выводом высоковольтного источника питания, то при каждом включении на одну из игл подается высокое напряжение, достаточное для того, чтобы в межэлектродном пространстве между иглой и листом электропроводной бумаги возник искровой разряд. При этом по оси иглы 6 на листе электропроводной бумаги 4, как результат действия искрового разряда, остается контактная точка. Таким образом, после «опроса» всех контактов шагового искателя на листе электропроводной бумаги окажутся зафиксированными начальные координаты элементов 5. Последовательность операций для фиксации координат промежуточных положений элементов в процессе деформирования основания сохраняется.

Результаты опытов [9] доказали отсутствие качественных изменений в работе оснований при использовании в качестве измерительных устройств экранов, а данные наших опытов показали, что влияние экрана на несущую способность оснований незначительно. Результаты определения деформаций корректировались с учетом коэффициента трения грунта об измерительный экран.

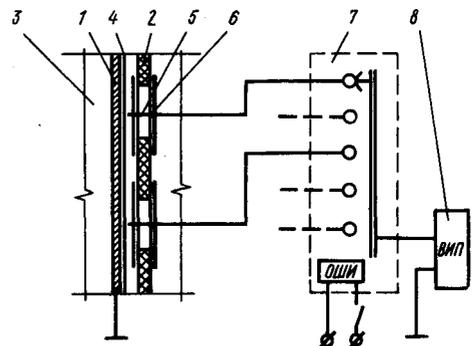


Рис. 4. Принципиальная схема измерительного экрана

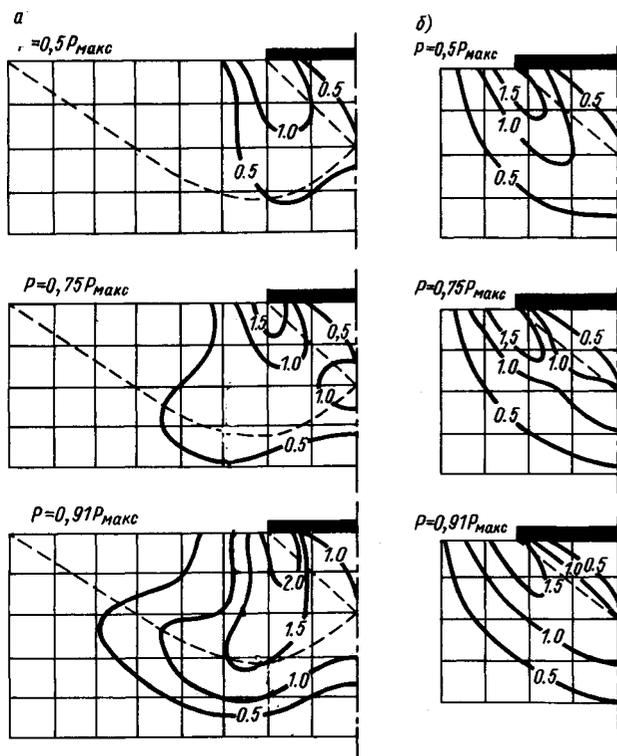


Рис. 5. Изолинии параметра η в основании квадратного штампа
 а — для плоскости симметрии, проходящей через середины противоположных сторон; б — в диагональной плоскости симметрии

Оценка деформированного состояния основания производилась для тех этапов нагружения, которые позволяют не только проследить развитие деформации, но и в зависимости от степени нагружения предельного состояния, характеризующие качественные изменения в работе основания. Поэтому здесь приводятся результаты, соответствующие $P=0,5P_{\max}$ (фаза уплотнения), $P=0,75P_{\max}$ (начало фазы локальных сдвигов) и $P=0,91P_{\max}$ (предельная нагрузка) для двух плоскостей симметрии квадратного штампа.

На рис. 5, а представлены изолинии параметра η основания квадратного штампа для плоскости симметрии, проходящей через середины противоположных сторон штампа. Очевидно, что зона предельного состояния грунта зарождается под краем штампа и к моменту нагружения $P=0,5P_{\max}$ граница этой области достигает глубины около $0,4b$, отклоняясь от вертикали к оси штампа. При дальнейшем нагружении образовавшаяся область практически не изменяет своих размеров, но на глубине $0,5b$ на оси штампа образуется вторая замкнутая область предельного состояния грунта, которая к моменту $P=0,75P_{\max}$ имеет размеры $0,3b \times 0,3b$. Далее эти области смыкаются и образуют единую область, которая, увеличиваясь в размерах, развивается в сторону от оси штампа с тенденцией выхода на поверхность. К моменту нагружения $P=0,91P_{\max}$, т. е. при достижении предельного значения нагрузки, фронт области предельного состояния грунта находится на максимальной глубине, составляющей $0,75b$ на расстоянии $(0,6...0,7)b$ от края штампа.

В плоскости же симметрии квадратного штампа, проходящей по его диагонали (рис. 5, б), в отличие от рис. 5, а: 1) зоны предельного состояния грунта, зародившись под углом штампа, развиваются под штамп к его оси и даже при достижении предельной нагрузки на основание не выходят из-под него; 2) при $P=0,75P_{\max}$ происходит слияние двух замкнутых зон предельного состояния и образование одной сплошной ограничивает под штампом область, находящуюся в допредельном состоянии; 3) линейные размеры зон предельного состояния грунта в соответствующие моменты нагружения здесь значительно больше.

При достижении предельной нагрузки $P=0,91P_{\max}$ зона допредельного состояния грунта под штампом занимает не всю площадь штампа, имея форму пирамиды с вогнутыми гранями. Высота пирамиды $0,3b$ (на рис. 6 совмещены границы зон предельного состояния грунта для двух плоскостей симметрии квадратного штампа).

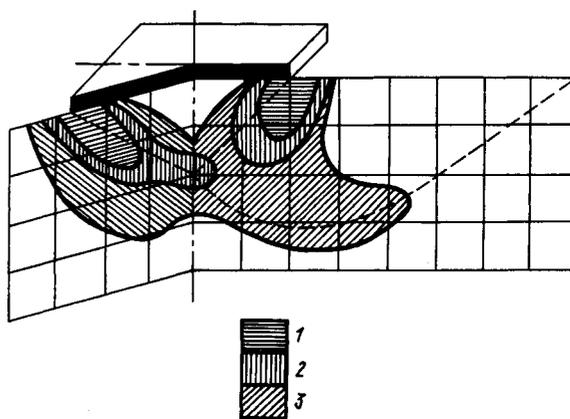


Рис. 6. Изолинии параметра $\eta=1$ в основании квадратного штампа
 1 — $P=0,5P_{\max}$; 2 — $P=0,75P_{\max}$; 3 — $P=0,91P_{\max}$

Полученные результаты показывают, что первоначально зоны предельного состояния грунта зарождаются под углами квадратного штампа и развиваются как вдоль его граней, так и в глубину в направлении вертикальной оси штампа. При некоторой нагрузке на определенной глубине в основании на вертикальной оси штампа образуется вторая замкнутая область предельного состояния грунта, которая способствует увеличению коэффициента сжатия, искривляя график зависимости осадка — нагрузка. К моменту перехода работы основания во вторую фазу деформирования две независимо существующие области предельного состояния сливаются, причем первоначальное слияние происходит на диагональной оси симметрии основания, что способствует ограничению под штампом «упругой» части ядра [3] в виде пирамиды с вогнутыми гранями. В момент перехода основания в третью фазу деформирования область предельного состояния грунта под действием внедряющегося ядра в виде пирамиды развивается в направлении осей симметрии, проходящих через середины противоположных сторон штампа, но на поверхность основания она не выходит, т. е. при действии предельной нагрузки сопротивление грунта сдвигу характеризуется непостоянным значением угла внутреннего трения вдоль поверхности разрушения, что необходимо учитывать в расчетах несущей способности оснований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштейн Л. М. О приближенном решении задачи пространственного предельного равновесия грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов.— 1969.— № 5.— С. 12—15.
2. Домбровский В. Н. К вопросу о разрушении песчаного основания прямоугольными штампами // Тр. НИИОСПа, 1984.— Вып. 74.— С. 9—15.
3. Горбунов-Посадов М. И. Устойчивость фундаментов на песчаном основании.— М.: Госстройиздат, 1962.— С. 96.
4. Зарецкий Ю. К. Лекции по современной механике грунтов.— Изд. Ростовского университета, 1989.— 608 с.
5. Разрушение песчаного грунта в основании при нагружении полосовым штампом / В. С. Копейкин, В. М. Демкин, А. С. Саенков, С. А. Елизаров // Межвуз. сб.— Ново-черкасск, 1986.— С. 121—125.
6. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений.— М.: Высшая школа, 1985.— С. 352.
7. Вялов С. С., Миндич А. Л. Экспериментальные исследования напряжено-деформированного состояния слоя слабого грунта, подстилаемого малосжимаемой толщей // Основания, фундаменты и механика грунтов.— 1977.— № 1.— С. 26—29.
8. А. с. 1432402 СССР, МКІ³ G 01 N 33/24. Устройство для измерения деформаций слоя грунта / А. С. Саенков, В. М. Демкин, В. В. Власов, В. И. Макасов, О. В. Виштак (СССР) // Открытия. Изобретения.— 1988.— № 39.— С. 154.
9. Кашкаров П. Н., Пышкин О. Б. Влияние экранов на несущую способность и деформируемость оснований при проведении сдвиговых опытов // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.— 1986. (Рукопись деп. в Информэнерго № 2094 — эн. Деп. от 31.03.86).— 11 с.