

И. В. МАШИНЕВ, проф., докт. техн. наук, Ленинградско-
строительный институт, Москва, СССР,

А. А. ДАМЕНТИ, инж., Ленинградско-строительный инсти-
тут, Лодзав, СССР.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДУШНОГО ПОГРУЖЕНИЯ

Были проведены лабораторные эксперименты по воздушному конусу с углом при вершине 30° и диаметром основания 40 мм в песок с различной, но постоянной в пределах каждого опыта скоростью погружения, менявшейся от 1,86 до 48,6 см/мин, то-есть более, чем в 26 раз.

Для этого была сконструирована специальная установка /Довгани, 1973/ с ходом погружающего устройства до 50 см. Конус крепился к штанге диаметром 16 мм. Таким образом, отношение диаметра конуса к диаметру штанги равно 2,5 при минимально рекомендуемом отношении 1,6. Опыты проводились в достаточно жестком металлическом лотке размерами 56,6x56,4x56 см с передней стальной стенкой. Конус погружался в воздушно-сухой кварцевый песок /содержание SiO_2 до 96,7%, удельный вес $2,65 \text{ г/см}^3$ /, который в каждом опыте имел постоянную пористость, менявшуюся от опыта к опыту в пределах от $e = 0,89 / \gamma = 1,42 \text{ г/см}^3$ / до $e = 0,56 / \gamma = 1,72 \text{ г/см}^3$ /. По принятой классификации песок считался крупнозернистым и однородным. Он имел следующий гранулометрический состав: фракций диаметром более 0,5 мм - 60%, 0,5-0,25 мм - 11%, менее 0,25 мм - 1%. Угол внутреннего трения для этого песка был определен на трёхосном приборе. Результаты определения аппроксимировались зависимостью

$$\varphi' = 67,084 \gamma - 67,917 = 67,917 \frac{1,647 - e}{1 + e}$$

/1/

при коэффициенте пористости $0,98 / \gamma, \text{ г/см}^3$ /. Эти результаты были получены при испытаниях, проводившихся с двумя скоростями $8,9$ и $21,7 \text{ см/мин}$ и показали идентичные результаты. При этом было выявлено "закрепление" в песке - начальный участок, полученный в результате линейной аппроксимации кривой, характеризовавшийся зависимостью

$c' = 0,01(\gamma - 1)$, где γ имеет размерность г/см³, c' - кг/см². Это "зацепление" оказалось зависящим от скорости погружения конуса, однако, ввиду относительно малого интервала изучаемых скоростей и малости самой величины c' влиянием скорости на c' мы пренебрегли.

Основными задачами исследования являлись: 1/определению величины усилия зондирования P , как функции скорости погружения конуса v , глубины погружения H и объёмного веса грунта γ и 2/установление характера перемещения частиц песка около вдавливаемого конуса методом фотофиксации /для этого использовался презентископ, перемещавшийся вдоль стеклянной стенки лотка/.

Для решения первой задачи зондирование в лотке выполнялось на глубину до 45 см, то-есть до 6 высот конуса. при следующих скоростях погружения 1,66; 4,2; 10,7 и 48,6 см/мин и объёмном весе песка в испытаниях 1,42; 1,50; 1,60 и 1,685 г/см³. Опыт показал, что зависимость между усилием зондирования P и скоростью погружения v носит параболический характер и имеет минимум при скорости $v = 25,6$ см/мин, причём скорость, соответствующая минимуму усилия, не зависела от плотности грунта. Поскольку влияние скорости погружения конуса на усилие зондирования изучено недостаточно, то принято, что $P(v) = k(v) P_0$, где P_0 - усилие зондирования при $v \rightarrow 0$. По данным опытов установлена величина безразмерного коэффициента

$$k = 1 - 0,0275 v + 0,00033 v^2$$

где v в см/мин. Опытные результаты можно представить Таблицей I.

В опытах отмечено наличие критической глубины погружения конуса H_k , которая соответствовала достижению максимума усилия зондирования P . Дальнейшее продвижение конуса проводило либо при постоянном усилии, либо даже приближалось некоторое падение его

Эти случаи в таблице отмечены знаком + /-. Это обстоятельство отмечено, главным образом, в постке плотного сложения. Усилия зондирования P_0 , соответствующее весьма малым скоростям зондирования $\dot{\sigma} \rightarrow 0$, связано с углом внутреннего трения φ' . Ключевой задачей является установление величины угла внутреннего трения по φ' по измерениям с помощью зондирования. Такая связь может быть найдена либо эмпирическим путём, либо теоретически, с использованием равновесия теории предельного равновесия сыпучей среды.

В основу предлагаемого теоретического рассмотрения задачи положено решение, данное В.Г. Березинцевым /1955/ для нескольких случаев осесимметричной задачи теории предельного равновесия сыпучей среды. На основе решения Березинцева предложена приближённая расчётная схема разрушения грунта, составлен алгоритм решения задачи и получено численное решение, результаты которого и представлены в табличной форме. Следует отметить, что в развитии упомянутого решения Березинцева получены решения И.А. Флютиновым /1971/, который учёл силы трения, возникающие по поверхности полуса при его внедрении и установил, что возможно принимать угол трения по поверхности полуса $6-10^\circ$, а также В.В. Барской /1972/, которая учитывала кривизну деформации среды в области малых деформаций, и показала, что учёт этой кривизны существенно влияет на результаты расчёта /при этом, естественно, считалось, что $c' = 0$ /. Используя основные уравнения, выведенные Березинцевым /1955/ и граничное условие на поверхности полуса

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \alpha + \frac{1}{2} \left[\varphi'_0 + \arcsin \frac{\sin \varphi'_0}{\sin \varphi'} \right] \quad / \checkmark$$

где ψ - угол между большим плоским поперечником в рассматриваемой точке и горизонталью и φ'_0 - угол трения полуса по поверхности полуса в радианах. Глубина погружения полуса условно учитывалась погружением, равной γH и действующей по горизонтальной плоскости,

проектирующей через основание конуса. Угол φ' определяется по результатам фотографирования перемещений частиц песка, о чём будет сказано далее. Зависимость между φ' и γ установлена следующей:

$\varphi' = 22,5 \gamma - 2,6$. В результате получена следующая зависимость для P_0 .

$$P_0 = 2\pi \left[1 + \sin \varphi' \sec \alpha \cos \left(\alpha - \varphi' - \arctan \frac{\sin \varphi_0'}{\sin \varphi'} \right) \right] \int_0^a \sigma(r) r dr - \pi a^2 c' \operatorname{ctg} \varphi' \quad /4/$$

где α - угол при основании конуса $\alpha = 30^\circ - 30^\circ / 2 = 75^\circ$, a - радиус его основания, σ - среднее напряжение в точке. Интеграл, входящий в выражение /4/, вычисляется по точкам и приближённо по площади трапеции, ординатами которой служат значения σ у основания и вершины конуса. Упрощённый расчёт по трапеции обосновывается тем, что в предельном состоянии происходит перераспределение напряжений - "насыщение" эпюры напряжений до трапециевидной /Борезанцев, 1968/.

Результаты расчётов показали следующее: 1/ можно считать, что в процессе погружения конуса эюра напряжений σ по поверхности конуса переходит от "интегральной" P_s в трапециевидную P_D с глубиной. Возможно, что критическая глубина погружения конуса характеризуется полным переходом эюры напряжений к трапециевидной; 2/ для более плотного песка "насыщение" эюры напряжений происходит на меньших глубинах, чем для рыхлого. Результаты расчётов и опытные результаты представлены в Таблице 2, где P_c - опытные значения, P_s - расчётные с "интегральной" эюрой, P_D - расчётные с трапециевидной эюрой.

Опыты по фотофиксации /Дит. 1/ показали, что:

1/ Зона деформации при постоянном до опята объёме песка на одной и той же глубине не зависит от скорости погружения конуса, но изменяется углы подхода траекторий перемещений к конусу и высота их в массиве грунта:

2/ С увеличением глубины погружения увеличивается размер зоны радиальной деформации. Для более плотного песка характерно большее развитие зоны деформации в стороны;

3/ Для рыхлого песка траектория имеет больший радиус кривизны;

4/ С увеличением плотности песка при $\sigma = \text{const}$ происходит увеличение зоны деформации и угла подхода траекторий к конусу. Увеличивается и область деформируемого грунта, находящаяся выше основания конуса;

5/ Угол подхода траекторий к конусу во всех случаях уменьшается к вершине.

Линии, которые были зафиксированы фотосашиаратом, трактовались как отклонение траекторий перемещения частиц /Малинов, 1971/.

Малинов

УСЛОВИЯ ВОЗДУХОПОДАВАНИЯ

Таблица 1

H см	$\sigma_{\text{MM}} \text{ см/мин} \text{ сев}$							
	0,31	0,75	1,18	3,10	0,31	0,75	1,18	3,10
	1,86	4,2	10,7	48,6	1,86	4,2	10,7	48,6
	$\gamma = 1,42 \text{ г/см}^3$ 14,2				$\gamma = 1,50 \text{ г/см}^3$ 15,0			
5	-	-	-	-	3,66	3,66	3,66	3,66
10	3,99	-	3,40	3,86	6,60	6,43	4,68	6,24
15	6,04	5,65	5,61	6,02	12,23	11,82	9,17	11,82
20	8,74	8,17	7,85	8,77	17,84	17,67	13,92	16,52
25	10,86	10,06	9,62	10,86	23,33	21,91	17,63	20,52
30	11,60	11,77	11,17	12,27	28,12	25,12	21,12	23,12
35	14,22	13,05	11,63	14,30	32,37	27,82	22,52	24,54
40	15,62	14,02	13,75	+	36,65	29,30	25,50	+
	$\gamma = 1,60 \text{ г/см}^3$ 16,0				$\gamma = 1,69 \text{ г/см}^3$ 16,9			
5	4,25	4,10	4,22	4,48	5,15	4,89	3,68	4,55
10	11,06	10,32	10,80	12,59	18,22	15,54	11,53	13,02
15	26,25	25,29	22,04	30,42	43,22	35,12	36,42	41,14
20	48,42	46,42	36,27	56,33	80,62	68,33	43,62	57,72
25	65,52	61,65	61,62	75,62	124,7	86,53	121,1	145,1
30	88,33	80,37	70,52	93,45	162,5	104,8	174,1	197,1
35	94,72	89,25	76,17	100,4	+	117,6	+	+
40	+	+	+	+	+	+	+	+

Условие
2.10.1952

УСЛОВИЯ ВОЗДУХОПОДАВАНИЯ

Таблица 2

γ г/см ³	P	H, см MM						
		50	100	150	200	250	300	350
1,42	P _ε	-	4,0	6,5	9,4	11,6	13,1	15,5
	P _γ	1,0	3,2	4,6	6,4	7,6	9,2	10,7
	P _Δ	1,1	4,6	6,0	7,3	12,6	14,2	15,9
1,50	P _ε	4,2	6,8	12,6	18,6	23,6	27,5	30,2
	P _γ	1,8	6,2	9,3	12,3	15,0	18,0	21,0
	P _Δ	2,2	8,4	11,2	14,1	22,7	27,0	30,5
1,60	P _ε	4,8	12,5	23,6	32,6	74,3	92,3	101,7
	P _γ	4,4	15,6	23,1	30,9	35,7	46,4	54,2
	P _Δ	7,6	37,4	51,6	61,5	71,5	82,0	93,4
1,69	P _ε	5,2	16,8	42,8	53,3	134,1	166,6	-
	P _γ	9,4	33,6	51,0	68,4	85,3	100,0	126,4
	P _Δ	11,5	68,9	91,3	113,2	135,1	166,5	187,4

к.м.
143

Условие
2.10.1952

Литература

Белозинцев В.И. /1955/ Предельное равновесие сплошной среды под сферическими и коническими штампами. Журнал "Известия АН СССР", ОТИ, №7

Белозинцев В.И. /1971/, Сидоров Н.И., Валенькая В.В., Мителюнок И.И. Особенности последования прочности грунтов с помощью пневмации. Труды в Воссозданного совещания по фундаментостроению, Киев.

Беленькая В.В. /1974/. Экспериментальная проверка калибровой теории прочности для песчаного основания под круглым штампом. Журнал "Основания, фундаменты и механика грунтов" № 1.

Давыдов С.А. /1973/. Характер деформации песчаного основания в зависимости от его плотности и скорости построения конуса. Журнал "Известия вузов" СИА, № 3, Новосибирск.

Белозинцев В.И. /1958/, Прохорова В.А., Прохорович А.Г., Гизординов И.С., Сидоров Н.И. Исследование прочности песчаных оснований. Труды ЦНИИ, вып. 8, Транскелдортрант, Москва.

Мельников М.В. /1971/. О линиях скольжения и траекторных перемещениях частиц в сплошной среде. Журнал "Основания, фундаменты и механика грунтов" № 3.

