УДК 624.131.524.2

М.В.Малышев

д-р техн. наук, проф. /МГСУ/

ПРОГНОЗ ВЕЛИЧИН ОСАДОК ФУНДАМЕНТОВ НЕГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОИХ КРИТЕРИЕВ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

По действующим нормам [I] расчёт оснований ведётся исходя из двух предельных состояний. Основной критерий в большинстве случаев принадлежит второму предельному состоянию, когда прогнозируемые величины конечных деформаций не должны превышать их значений, установленных из условия необходимости обеспечения условий нормальной эксплоатации зданий и сооружений. Однако при этом /п. 2.41, [I] / вводится дополнительное ограничение, по которому среднее давление под подошвой фундамента P не должно превышать расчётного сопротивления R. Согласно п. 2.47 [I] разрешается повышать этот предел лишь на 20 %, если предельные расчётные деформации составляют менее 40 % предельных величин. Это обстоятельство поясняется тем, что под краями фундамента возникают области пластической деформации, активно развивающиеся с ростом нагрузки, и поэтому нарушается линейная зависимость между осадкой и нагрузкой, а линейная связь между ними вытекает из условия применения решений теории упругости - теории линейно-деформируемой среды, где напряжения и деформации связаны законом Гука.

К используемым на практике инженерным методам расчёта осадок относится также и метод послойного суммирования, указанный в нормах / [I] , Приложение 2 /, позволяющий учесть неоднородность грунтов по деформируемости в пределах сжимаемой толщи. Модуль деформации E_i при этом считается осреднённым для грунта в пределах величин давления от природного под весом вышележащей толщи до ожидаемого под действием суммарного давления от веса грунта и передаваемой сооружением нагрузки. Приращение осадки при постоянной величине сжимаемой толщи при использовании закона Гука было бы пропорционально растущей нагрузке. Однако сжимаемая толща оказывается увеличивающейся с ростом нагрузки, поэтому формально должна проявиться нелинейная зависимость между осадкой и нагрузкой - осадка будет расти быстрее нагрузки. Развитие областей пластической деформации также увеличивает скорость роста осадки с увеличением нагрузки и при исчерпании несущей способности основания фундамент резко оседает, а дальнейшая эксплоатация сооружения часто становится практически невозможной. Деформации основания происходят в этой стадии /или "фазе" по терминологии Н.М.Герсеванова/ деформирования грунтаза счёт существенно преобладающих над объёмными деформаций сдвига в грунте.

Как показывают многочисленные экспериментальные исследования, связь между деформациями сдвига и сдвигающими напряжениями хорошо описывается дробно-линейной зависимостью. Отсюда и возникла возможность с помощью использования для основания фундамента модели несущего столба [2] аналитически выразить зависимость между осадкой фундамента и нагрузкой на него.

Расчёты показывают, что ограничение давлений величиной расчётного сопротивления R часто приводит к тому, что рассчитанные величины прогнозируемых конечных осадок оказываются существенно меньше, чем их предельные значения и, таким образом, создаётся недоиспользуемый резерв по основному показателю предельного состояния. Повышение давлений за пределы, ограничивающие линейную стадию деформирования, приводит к необходимости либо воспользоваться нелинейной теорией упругости, либо решать смешанную упруго-пластическую задачу. Поскольку в практических целях мы применяем для расчётов инженерные схемы, то целесообразно доработать их и применить к нелинейной стадии. Такая схема использована нами в публикациях [2], [3] и включена также в [4] и [5]. Ниже приводится дальнейшее развитие этого предложения с целью максимально возможного использования резервов по деформациям, разрешаемых нормами [1].

Предложенная ранее формула для осадки S имеет вид /обозначения соответствуют введённым в нормах [1] /

$$S = S_R \left\{ 1 + \frac{(P_u - R)(P - R)}{(R - \sigma_{zg,0})(P_u - P)} \right\} \qquad /1/$$

Производная, характеризующая темп нарастания осадки S имеет следующий вид

$$\frac{dS}{dP} = \frac{S_R (P_u - R)^2}{(R - \sigma_{zg,0})} \cdot \frac{1}{(P_u - P)^2} \qquad /2/$$

Здесь S_R - осадка, подсчитанная методом послойного суммирования для давления под фундаментом $P = R$

P_u - предельное сопротивление грунта основания, определяемое как отношение силы предельного сопротивления основания к приведенной площади подошвы фундамента $P_u = \gamma_c N_u / (\gamma_n \bar{b} \bar{\ell})$ с учётом коэффициента надёжности γ_n и коэффициента условий работы γ_c

$\sigma_{zg,0}$ - вертикальное напряжение от собственного веса грунта на уровне подошвы фундамента.

Формулы /1/,/2/ применяются при условии $P > R$. При давлениях $\sigma_{zg,0} \leq P \leq R$ имеет место линейная зависимость

$$S = S_R \frac{P - \sigma_{zg,0}}{R - \sigma_{zg,0}} = S_R \left\{ 1 + \frac{P - R}{R - \sigma_{zg,0}} \right\} \qquad /3/$$

откуда при $P \leq \sigma_{zg,0}$ получим $S = 0$. Отсюда начальное условие зависимостей /1/,/2/,/3/ в точке $P = R$ следующее

$$\frac{ds}{dp} = \frac{S_R}{R - \sigma_{zg,o}} \qquad /4/$$

В этой точке мы получим плавный переход без излома в зависимости $s(p)$. При $p = P_u$ из /I/,/2/ следует, что $S \to \infty$; $\frac{ds}{dp} \to \infty$. Этим же условиям в крайних точках будет также удовлетворять и более общая зависимость

$$S = S_R \left\{ 1 + \left(\frac{P_u - R}{P_u - P}\right)^n \frac{P - R}{R - \sigma_{zg,o}} \right\} \qquad /5/$$

$$\frac{ds}{dP} = S_R \left\{ \left(\frac{P_u - R}{P_u - P}\right)^{n-1} \frac{[n(P-R) + P_u - P](P_u - R)}{(P_u - P)^2 (R - \sigma_{zg,o})} \right\} \qquad /6/$$

Эти формулы обобщают формулы /I/-/4/, так как из них при $n = 0$ получим линейные зависимости /3/,/4/, а при $n = I$ имеем соответственно /I/,/2/, то есть дробно-линейные функции. Коэффициент $n > I$ следует, очевидно, подбирать исходя из сопоставления с экспериментальными данными. Зависимости /5/,/6/ удовлетворяют упомянутым краевым условиям при $P = R$ и $P \to \infty$ при любом n. Далее для случая $n = I$ введём величину $\Delta R = P - R$, на которую возможно увеличить давление, чтобы иметь осадку S, равную предельной, то есть считать $S = S_u$. Полагая $S = S_u$ из /I/, получим

$$\Delta R = \frac{\left(\frac{S_u}{S_R} - 1\right)(P_u - R)(R - \sigma_{zg,o})}{(P_u - R) + \left(\frac{S_u}{S_R} - 1\right)(R - \sigma_{zg,o})} \qquad /7/$$

и из /2/ следует, что

$$\left(\frac{ds}{dp}\right)_{R+\Delta R} = \frac{S_R (P_u - R)^2}{(R - \sigma_{zg,o})} \cdot \frac{1}{(P_u - R - \Delta R)^2} \qquad /8/$$

В нормах [I] указано, что если при давлении под фундаментом $P = R$ и расчётная деформация $S \leq 0{,}4\ S_u$, то давление P может быть повышено до $I{,}2\ R$, но при этом должно быть выполнено условие $S \leq 0,5\ S_u$. Таким образом, должно быть

$$S_R \leq \frac{S_u}{2\left(1 + \frac{0,2R}{R - \sigma_{zg,0}}\right)} \qquad /9/$$

Это условие значительно более жёсткое и связанное с тем, что увеличение давления под фундаментом сверх величины возможно лишь при выполнении неравенства /9/.

Таким образом, если не ограничивать давление P увеличением расчётного сопротивления лишь на 20 %, а ориентироваться только на величину предельной деформации S_u, тем более, что в [I] разрешается во многих случаях и увеличивать осадку по сравнению с предельными величинами S_u, названными в приложении 4, то согласно формуле /7/ можно вычислить $\Delta R > 0,2\ R$. При $n \neq 1$ разрешить в явном виде зависимость /5/ относительно S удастся лишь если ввести в неё не только S, но и одновременно $\frac{dS}{dp}$. Идя по этому пути, мы сможем воспользоваться значительными резервами оснований и иметь более экономичные фундаменты.

Рассмотрим пример расчёта. Ленточный фундамент закладывается на глубине 1,6 м от поверхности на плотном песке средней крупности. Ширина подошвы фундамента определена равной 1,0 м. Песок имеет угол внутреннего трения $\varphi = 31^o$ и $C = 2$ кПа. Подсчитанные для этих значений φ и C расчётное сопротивление $R = 349$ кПа /1,2 $R = 419$ кПа/, а $P_u = 536$ кПа с учётом коэффициента надёжности 1,2; далее $\sigma_{zg,0} = 27$ кПа; $S_u = 12$ см /с учётом увеличения на 20 %/; $S_R = 1,73$ см / $S_p = 1,6$ см при $P = 325$ кПа. Результаты сведём в таблицу. Подсчитав ΔR по /7/, получим $\Delta R = 287$ кПа, принимая $S_u = 10$ см без увеличения на 20 %. Таким образом, S_u будет достигнуто при $p = 1,82\ R$. Если же принять условие достижения величиной осадки $0,5\ S_u$, то получим $\Delta R = 143$ кПа или это составит 1,41 R. Таким образом, половина предельной осадки будет при превышении R на

Выводы: 1. Предел по давлению введённый в действующие нормы [I] прямо не связан с критериями, используемыми для расчётов по первому предельному состоянию, в то время как число случаев, для которых требуются расчёты оснований по первому предельному состоянию достаточно ограничено.

2. Если не производить ограничения давления под фундаментом и использовать для расчётов только обязательный критерий второго предельного состояния, то возможно в ряде случаев уменьшить объёмы материалов, используемых для фундаментов.

Таблица

P, кПа	325	349	375	400	425	450	475	500
S по /3/, см	1,60	1,73	1,87	2,00	2,14	2,27	2,41	2,54
S по /1/, см		1,73	1,89	2,11	2,42	2,91	3,80	5,93
$\frac{ds}{dp} \times 10^{8} \left(\frac{Н}{м^{3}}\right)^{-1}$ по /2/		5,38	7,24	10,2	13,7	125,3	60,3	144

Литература

1. СНиП 2.02.01 - 83 Основания зданий и сооружений
2. Малышев М.В., Никитина Н.С. Расчёт осадок фундаментов при нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями в грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1982, № 2 - С. 21-25.
3. Малышев М.В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. - М. Стройиздат, 1994. С. 95-98.
4. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений /к СНиП 2.02.01 -83/ // НИИОСП им. Герсеванова Госстроя СССР - М. Стройиздат, 1986. С. 138-140.
5. Ухов С.Б. и др. Механика грунтов, основания и фундаменты. - М. : Изд. АСВ, 1994. С. 206-207.