

стояния жилищного фонда при минимальных затратах, учитывая острую нехватку средств на капитальный ремонт в бюджетах, только такая реконструкция может быть альтернати-

вой бездействию; инвесторы, в свою очередь, получают прибыль от осуществления проекта строительства и реализации жилого комплекса в центре города.

УДК 624.131.23:539.3

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТРАЕКТОРИИ НАГРУЖЕНИЯ НА ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ГРУНТОВ

Л.В. Халтурина

Представлены результаты экспериментальных исследований по выявлению влияния траектории нагружения на деформируемость твердых суглинков и плотных песков. Дана оценка влияния траектории на расчеты грунтовых оснований различными методами.

Ключевые слова: траектории нагружения, деформируемость грунтов, обобщенные напряжения, обобщенные деформации.

ВВЕДЕНИЕ

В современной механике грунтов поиск надежных расчетных методов, сближающих результаты расчета с реальными данными, развивается двумя путями: совершенствуются традиционные и разрабатываются новые более совершенные методы расчета. Традиционные методы, базирующиеся на применении к грунтам теории линейно-деформируемой среды и теории предельного равновесия, корректируются на основании обобщения большого объема экспериментальных исследований. Значительные успехи достигнуты в разработке методов расчета, использующих нелинейные модели, приближенные к реальной работе грунта. Многие нелинейные модели, в отличие от традиционных, требуют определения более сложного набора параметров, как правило, при испытании образцов грунта в стабиллометрах, которыми оснащены далеко не все лаборатории. Нелинейные модели реализуются в программных комплексах конечно-элементного анализа, использование которых, по крайней мере, в нашей стране весьма ограничено. В последнее время «многие исследователи, имея накопленный экспериментальный и теоретический материал, склоняются к тому, что следует полнее использовать возможности, заключенные в традиционных методах расчета, использующих модели линейно-деформируемой среды и теории предельного равновесия» [1]. Недостатки самих моделей, приводящие к расхождению расчетных и фактических данных, кроются в их предпо-

сылках и допущениях. Оценить влияние всех допущений принятых в той или иной модели на конечные результаты расчета, возможно главным образом экспериментальным путем, всесторонне исследуя разнообразные грунты и грунтовые основания. Такие исследования дают возможность определить области применения всех теоретических моделей и при необходимости вносить коррективы в существующие методы расчета.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментально установлено, что физические зависимости, связывающие напряжения и деформации, в грунтах обычно неодинаковы при различных траекториях возрастания напряжений, и чем больше характер нагружения отличается от простого, тем значительнее влияние траектории на значения измеренных деформаций. Для оценки степени влияния траектории нагружения на деформируемость твердых суглинков и плотных песков были проведены специальные опыты по реализации заданных траекторий нагружения в приборе трехосного сжатия с независимым регулированием главных напряжений. Во всех опытах создавались условия плоской деформации грунта. Характеристики исследуемых грунтов определены по стандартным методикам. Суглинок имел плотность $\rho=1,95 \text{ т/м}^3$; коэффициент пористости $e=0,60$; влажность $W=0,15\pm 0,02$; число пластичности $I_p=0,12$; показатель текучести $I_L=-0,3$; модуль деформации E – около 8 МПа; угол внутрен-

него трения $\varphi=26^\circ$; сцепление $c=0,04$ МПа. Исследуемый песок имел плотность $\rho=1,8$ т/м³; коэффициент пористости $e=0,50$; модуль деформации и угол внутреннего трения в зависимости от диапазона действующих давлений составили соответственно $E=5,9-29,5$ МПа и $\varphi=33-41^\circ$.

В образце грунта создавали напряжения, соответствующие траекториям, приведенным на рисунке 1.

Траектории задавали, используя инвариантные характеристики напряженного состояния для условий плоской деформации [2]:

$\tau_{i\text{пл}}=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ – интенсивность касательных напряжений;

$\sigma_{\text{ср.пл}}=(\sigma_1+\sigma_3)/2$ – средние напряжения,

где σ_1, σ_3 – главные напряжения;

$\varepsilon_3, \varepsilon_1$ – главные деформации.

При реализации заданных траекторий нагружения проведено по три серии опытов с суглинком и с песком. Каждая серия состояла из шести опытов-близнецов, всего проведено 36 опытов.

Для каждого вида грунта задавали по три траектории следующим образом: сначала при $\tau_{i\text{пл}}=0$ напряжения $\sigma_{\text{ср.пл}}$ увеличиваются до фиксированных значений; затем напряжения $\sigma_{\text{ср.пл}}$ и $\tau_{i\text{пл}}$ растут одновременно и пропорционально до их значений в точке пересечения (точки М). На траекториях I, II, III выбирались точки, для которых вычислялись главные напряжения σ_1, σ_3 и $\sigma_2=\nu(\sigma_1+\sigma_3)$, последние из условия невозможности развития линейных деформаций в направлении действия этого напряжения. В образце грунта, уложенного в камеру прибора, создавали напряжения, соответствующие выбранным точкам. На каждой ступени нагружения устанавливались значения относительных деформаций образца грунта $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ ($\varepsilon_2, \varepsilon_2$ (ε_3)=0).

Результаты проведенных опытов позволили полностью описать напряженное и деформированное состояние твердого суглинка и плотного песка на разных ступенях нагружения и при различных траекториях нарастания напряжений. Результаты исследований представлены в наиболее наглядном виде с использованием обобщенных характеристик напряженного и деформированного состояний, учитывающих также влияние главного напряжения σ_2 , действующего по неподвижной грани образца [2]:

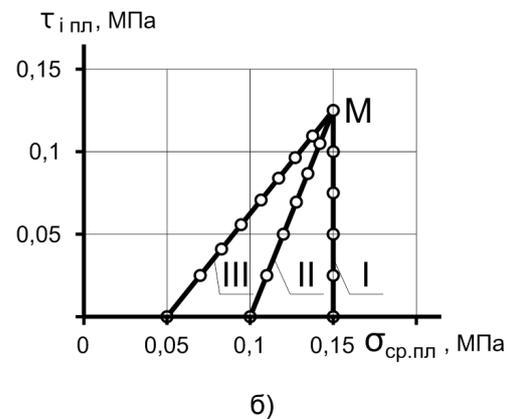
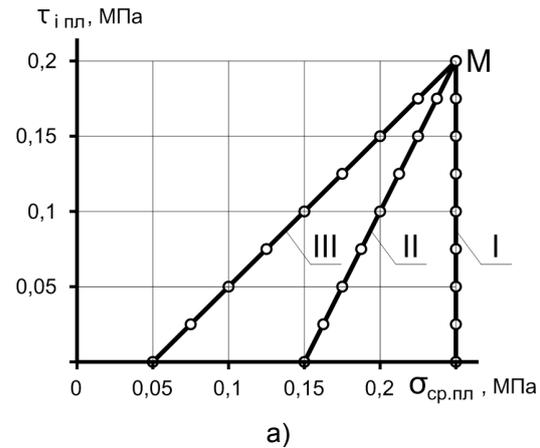


Рисунок 1 – Траектории нарастания напряжений: а) суглинок; б) песок

$\sigma_m=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$ – средние нормальные напряжения, вызывающие изменение объема;

$\tau_i=[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]/6$ – интенсивность касательных напряжений, вызывающих изменение формы;

$\varepsilon_m=(\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3)/3$ – средние линейные деформации, характеризующие изменение объема;

$\gamma_i=2/3[(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2]$ – интенсивность деформаций сдвига;

$\mu_\sigma=(2\sigma_2-\sigma_1-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$ – параметр Лоде вида напряженного состояния;

$\mu_\varepsilon=(2\varepsilon_2-\varepsilon_1-\varepsilon_3)/(\varepsilon_1-\varepsilon_3)$ – параметр Лоде вида деформированного состояния.

При вычислении μ_σ и μ_ε соблюдались условия $\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3$ и $\varepsilon_1>\varepsilon_2>\varepsilon_3$.

Построенные по результатам опытов графики изменения обобщенных напряжений и обобщенных деформаций ($\tau_i, \sigma_m, \varepsilon_m, \gamma_i$), представлены на рисунках 2 и 3. Все заданные траектории нарастания напряжений сложные.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТРАЕКТОРИИ НАГРУЖЕНИЯ НА ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ГРУНТОВ

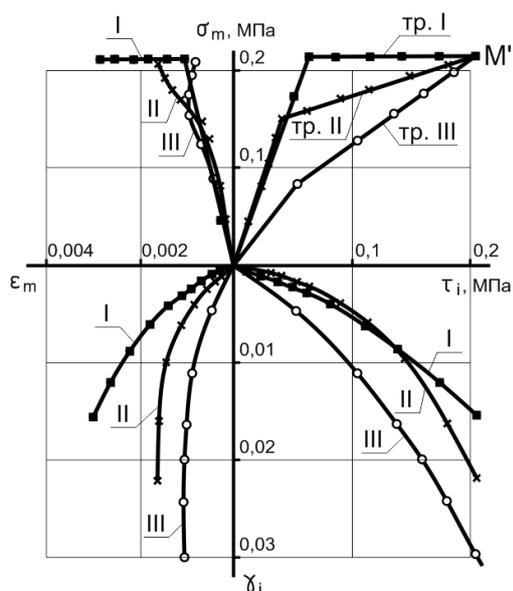


Рисунок 2 – Графики изменения обобщенных деформаций при различных траекториях изменения обобщенных напряжений. Опыты с песком

Песок. В опытах по выявлению влияния траектории нагружения на деформируемость песчаного грунта, нагружение образцов производилось до нагрузок, близких к предельным. Из рисунка 2 видно, что различным траекториям нагружения соответствуют неодинаковые закономерности нарастания как объемных ε_m , так и сдвиговых γ_i деформаций и неодинаковые конечные значения ε_m и γ_i при напряжениях, соответствующих точке пересечения траекторий. Наибольшие сдвиговые и наименьшие объемные деформации, соответствующие напряжениям в точке М, получены при реализации траектории III. Здесь, при напряжениях, близких к своим конечным значениям, объемные деформации даже несколько уменьшаются, что свидетельствует о начале процесса разрыхления грунта. Аналогично деформируется образец грунта при реализации траектории II. Значения деформаций ε_m и γ_i для этой траектории при конечных напряжениях σ_m и τ_i , отличаются от значений ε_m и γ_i для траектории III примерно в 1,8 и в 1,3 раза, соответственно. Наибольшие отличия в значениях ε_m и γ_i при конечных напряжениях σ_m и τ_i зафиксированы для траекторий I и III; в этом случае соответствующие значения деформаций γ_i отличаются в 2,1 раза, а значения ε_m – в 3 раза. Таким образом, для плотного песчаного грунта влияние траектории нагружения велико и на сдвиговые и на объемные деформации.

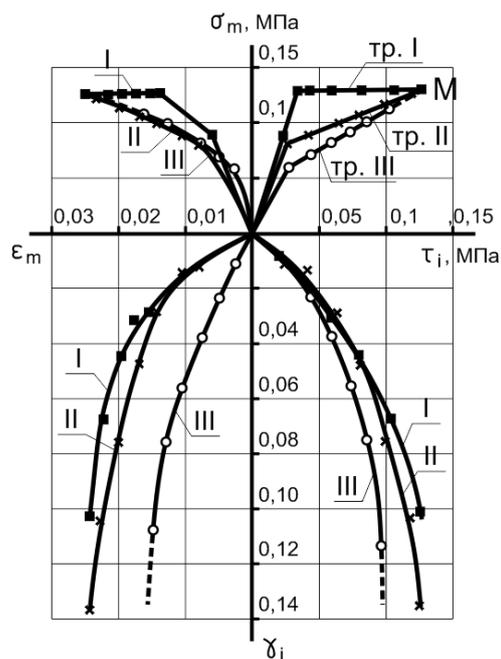


Рисунок 3 – Графики изменения обобщенных деформаций при различных траекториях изменения обобщенных напряжений. Опыты с суглинком

Экспериментально доказано, что деформационные характеристики (модули деформации E_1 , E_3 и коэффициент бокового расширения $\nu = \sigma_2 / (\sigma_1 + \sigma_3)$) величины непостоянные и зависящие от уровня действующих напряжений. Опыты с твердыми суглинками и плотными песками позволили оценить изменчивость этих характеристик в процессе возрастания нагрузки по различным траекториям. Получено, что коэффициент бокового расширения ν изменяется и при конечных значениях напряжений для траектории I, II, III имеет значения 0,31; 0,35; 0,37 соответственно. Модули деформации в процессе роста нагрузки уменьшаются примерно в 1,7-2,0 раза и на последней ступени нагружения (точка М) по траекториям I, II, III модуль деформации E_1 имеет значения 29,5; 24,3; 21,3 МПа соответственно.

Суглинок. Как следует из очертания графиков ($\tau_i - \gamma_i$) на рисунке 3 общий характер нарастания деформаций сдвига при реализации рассматриваемых траекторий качественно одинаков. На последних ступенях нагружения наблюдается нарастающее количественное расхождение в значениях деформаций γ_i при одинаковых τ_i . В опытах с суглинком при реализации траектории III не удалось достичь напряженного состояния, характеризующегося значениями τ_i и σ_m в точке М. При заданном конечном напряженном состоянии

значения γ_i , для траекторий I, II отличаются примерно в 1,5 раза, что свидетельствует о заметном влиянии траектории нагружения суглинка на деформации сдвига. При этом влияние траектории нагружения на конечную величину деформаций ε_m , характеризующих изменение объема, практически отсутствует, хотя пути нарастания деформаций ε_m весьма различаются.

Установлено, что по мере приближения напряженного состояния к предельному значению μ_σ и μ_ε для рассматриваемых траекторий нагружения сближаются и неподобие напряженного и деформированного состояний грунтовых образцов уменьшается. Напряженное и деформированное состояния отличаются от подобного при достигнутом заданном конечном нагружении не более чем на 10 %.

В процессе возрастания нагрузки по каждой из заданных траекторий коэффициента бокового расширения ν практически не изменяется: при фиксированных конечных значениях напряжений его величина для траекторий I составила 0,30; для траектории II – 0,26. При нагружении образцов грунта по любой из заданных траекторий, модули деформации E_1 и E_3 уменьшаются. При фиксированных конечных значениях напряжений при реализации траектории I модуль $E_1=3,1$ МПа, модуль $E_3=5,4$ МПа, при реализации траектории II – $E_1=2,7$ МПа и $E_3=4,0$ МПа. Как видно, модули деформации глинистого грунта существенно не изменяются.

Степень влияния траектории нагружения на напряженно-деформированное состояние грунта необходимо связывать со свойствами и структурными особенностями этого грунта. В исследуемых грунтовых образцах плотных глинистых грунтов в процессе нагружения не происходит значительных преобразований структуры. Как следствие, при различной последовательности изменения σ_m , γ_i , μ_σ в конечном итоге, при фиксированных значениях σ_m и τ_i получаются лишь немного отличающиеся значения σ_m , γ_i . Деформационные характеристики при различных путях нарастания напряжений в твердых суглинках также отличаются на небольшие величины (в пределах 15-25 %). Необходимо иметь в виду, что грунты разной структуры, плотности, влажности и т.д. могут давать индивидуальные показатели влияния траектории нагруже-

ния на напряженно-деформированное состояние.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыты с использованием различных сложных траекторий нагружения образцов грунта в приборе трехосного сжатия показали, что при одном и том же конечном напряженном состоянии деформированное состояние плотного песка и твердого суглинка в условиях плоской деформации в разной степени зависит от траектории нагружения. Степень влияния траектории нагружения на деформируемость грунтового образца определяется видом грунта, его характеристиками, уровнем действующих напряжений, а также условиями проведения опытов.

Исследуемые глинистые грунты значительно менее чувствительны к траектории нагружения, чем исследуемые песчаные грунты. В твердых суглинках траектории нагружения заметно влияют на конечную величину только сдвиговых деформаций; а в плотных песках – на конечную величину и сдвиговых и объемных деформаций, а также на вид деформированного состояния грунта.

Для грунтовых оснований, сложенных песчаными грунтами, расчеты с использованием моделей, не учитывающих влияния траектории нагружения на величину и характер деформирования грунта, могут приводить к существенным ошибкам.

Использование для расчетов модели линейно-деформируемой среды наиболее оправдано для плотных глинистых грунтов. Этот вывод также сделан в результате комплексных экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния плотного глинистого основания [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криворотов А.П. Оценка взаимодействия фундамента с грунтом и совершенствование методов их проектирования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.П.Криворотов; Новосиб. Гос. Арх.-строит. университет. - Новосибирск, 2002.
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
3. Халтурина Л.В. Напряженно-деформированное состояние глинистого основания жесткого полосового штампа //Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1995. № 1. – С. 15-21.