

Клебанюк Д.Н.; Дроневиц А.Ю.;
Шведовский П.В., канд. техн. наук, проф.;
Пойта П.С., докт. техн. наук, проф.
(БрГТУ, г. Брест)

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УПЛОТНЕНИИ НЕОДНОРОДНЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ ТЯЖЁЛЫМИ ТРАМБОВКАМИ

В соответствии с [1] расчёты напряжённо-деформированного состояния (НДС) грунтов оснований при уплотнении их тяжёлыми трамбовками рекомендуется производить по этапам итерационным методом, используя механическую модель линейно-деформируемого и однородного грунтового основания. Неоднородность грунтов в зоне уплотнения учитывается посредством средних значений для каждого слоя толщиной $0,2d_{тр}$, с последующим определением модуля общей деформации каждого слоя по результатам компрессионных испытаний.

Однако решение задачи о распределении напряжений в неоднородных грунтовых средах можно базироваться и на других принципах.

Наиболее простым является приведение неоднородного массива к эквивалентному слою через коэффициенты распределительной способности ν [2]

$$h_s = h_1 \cdot \sqrt{\frac{\nu_1}{\nu_2}} + h_2 \cdot \sqrt{\frac{\nu_2}{\nu_n}} + \dots + h_{n-1} \cdot \sqrt{\frac{\nu_{n-1}}{\nu_n}}, \quad (1)$$

где h_1, h_2, \dots, h_n — толщины неоднородных слоёв; $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$ — коэффициенты распределительной способности для 1, 2, ..., n слоёв грунтового массива.

Более сложным является принцип задания определённых условий на границах неоднородных слоёв, обеспечивающих равновесие по доминирующему направлению, что позволяет описать распределение напряжений одной функцией с различными параметрами структуры [2]:

$$S_{ст} = S_{ст1} \cdot \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \cdot \sqrt{\frac{\nu_1}{\nu_2}}\right) + S_{ст2} \cdot \left(1 - \frac{E_2}{E_3} \cdot \sqrt{\frac{\nu_2}{\nu_3}}\right) + \dots + S_{стn-1} \cdot \left(1 - \frac{E_{n-1}}{E_n} \cdot \sqrt{\frac{\nu_{n-1}}{\nu_n}}\right) + S_{стn}, \quad (2)$$

где E_i — модули деформации слоёв грунта.

Однако эти принципы применимы при уплотнении слоистых грунтовых оснований и не учитывают локальную неоднородность (прослойки, линзы, включения и др.).

Исследованиями [3; 4] и в ряде других отмечено, что как грунты, так и грунтовые массивы и уплотнение основания являются классическими об-

разцами стохастических природных фрактальных объектов, у которых формирование структуры, а соответственно и плотности, в основном определяется степенью сохранения постоянного объёма и контакта между структурными элементами (частицами).

Процесс уплотнения грунтов как зернистой среды можно описать тремя стадиями с различными механизмами консолидации. Для первой стадии характерна роль упругой разгрузки, при этом вероятность сохранения контактов меньше вероятности их образования, т.е.

$$\alpha = \theta^2 \cdot (\Delta\theta/p_0),$$

где α – контактное сечение и $\alpha = E/E_k$; E – модуль упругости грунта, отнесённый к номинальной площади поперечного сечения; E_k – модуль упругости, отнесённый к критическому сечению α_k ; $\Delta\theta = \theta - \theta_0$; θ – относительная конечная плотность сухого грунта; θ_0 – относительная начальная плотность сухого грунта; v – показатель степени потерь контактов $v > 1$.

Для второй стадии вероятность образования, сохранения и потери контактов равновероятны ($v=1$), а для третьей $\Delta\theta/p_0 \rightarrow 1$, а $v \rightarrow 0$, т.е. вероятность сохранения контактов приближается к единице.

Описать весь этот процесс уплотнения неоднородных дисперсных систем наиболее достоверно можно одним параметром структуры – фрактальной размерностью [3]. Приняв за основу соответствующие структуры – для песков (зернистая с кубической упаковкой сферических частиц по системе 20×80), супесей (сложная по системе 40×80), суглинков (сотообразная по системе 80×80), глины (хлопьевидная по системе 100×100), – определена зависимость фрактальной размерности $D = f(\theta)$ от относительной начальной плотности грунтов (рис. 1).

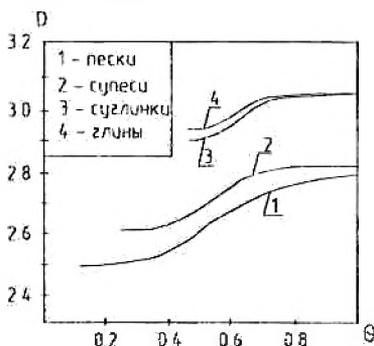


Рис. 1. Зависимость фрактальной размерности от относительной начальной плотности грунтов

Так как однородная структура является предельным состоянием уплотненных грунтов, то описание процесса уплотнения целесообразно базировать не на уровне средних значений структурных характеристик, а на законах их распределения и в первую очередь законах распределения плотности и давлений на грунт в зоне уплотнения.

Выделим на расстоянии h от границы зоны уплотнения один слой частиц, который содержит n частиц и каждая из которых имеет Z_i контактов с соседними частицами.

Характеризуя площадки контактов вектором площади S_{ij} , модуль которого равен площади контактной площадки, а направление совпадает с направлением положительной нормали к её плоскости, величина общей площади проекции всех контактных площадок для удерживающих контактов на плоскость, перпендикулярную к направлению сил давления, может быть определена по зависимости:

$$S(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{Z_i} S_{ij} \cdot \cos \varphi_{ij}, \quad (3)$$

а с учётом того, что φ изменяется от 0 до $\pi/2$, то средняя по ориентациям площадок соответственно получим:

$$S(x) = 2\pi \cdot Z \cdot S/n, \quad (4)$$

где S — средний размер площадки контакта; Z — среднее число опорных контактов одной частицы в расчётном слое.

Число частиц определим, используя интегральный закон распределения относительной плотности во фрактальных кластерах с переходом к конечным разностям:

$$n = S_H (\rho_k \cdot h_k - \rho_{k-1} \cdot h_{k-1}), \quad (5)$$

где S_H — номинальная площадь сечения уплотняемого массива.

В соответствии с теорией численных методов для получения функции ρ_k по h второго порядка точности имеем [3; 4]:

$$n = S_H (\rho_k \cdot h_k - \rho_{k-1} \cdot h_{k-1})/2. \quad (6)$$

Переходя от конечных разностей к непрерывной функции и продифференцировав выражение (5), получим:

$$n = S_H (D + d + 1) \cdot \rho, \quad (7)$$

и соответственно для локальной относительной плотности

$$\theta(h) = (D - d) \cdot \rho, \quad (8)$$

где d – топологическая размерность пространства.

С учётом граничных начальных условий $\theta = \theta_0$, $D = D_0$, $\alpha = \alpha_0 > 0$ для любого момента уплотнения имеем:

$$D = d + 1/[1 + \ln(\theta_0/h_0)/\ln \theta] \quad (9)$$

Неравномерность в распределении упругих свойств при неоднородности структуры можно учесть, используя закон Гука, являющийся по структуре также фракталом, в виде

$$d\sigma = F(h)dh/h_0. \quad (10)$$

Так как критическое контактное давление уплотнения в дифференциальной форме может быть записано в виде:

$$dp_c = (1 - \mu)d\sigma, \quad (11)$$

где μ – коэффициент межчастичного трения, проведя соответствующие подстановки и преобразования, получаем

$$dp_c/p_c = \beta(1 - \mu) \cdot \alpha(x) \cdot E(h) \cdot dh/E_m \cdot h, \quad (12)$$

где β – коэффициент пропорциональности; E_m – модуль упругости грунта при $\theta = 1$.

Интегрируя уравнение (11) с учётом условия $p_c = p/\alpha$ для критических краевых условий при $p = p_k$, $\theta = \alpha_k = 1$, $E = E_m$ имеем:

$$p(h) = p_k \alpha(h) \exp\{\varepsilon_k(1 - \mu)/p_k \cdot h_k [\int \alpha(h) \cdot E(h) \cdot dh - E_m \cdot h]\}, \quad (13)$$

откуда зависимость для определения площадей контактных сечений принимает вид:

$$\alpha(h) = \theta^2(h) \cdot [1 - (d - D) \ln \theta(h)/(d - D_0) \ln \theta_0(h)], \quad (14)$$

где E_m – модуль упругости грунта.

По полученному алгоритму были рассчитаны теоретические зависимости плотности грунта от величины давления $\theta = f(p/p_{кр})$ и модуля упругости от плотности $E/E_m = f(\theta)$ (рис. 2).

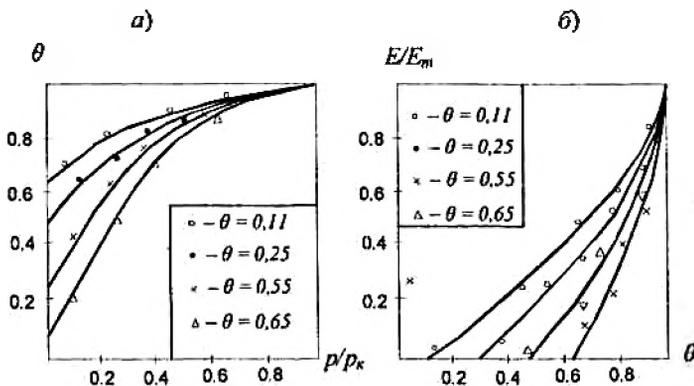


Рис. 2. Графики зависимости плотности грунта от давления (а) и модуля упругости от давления (б)

Учитывая соотношение площадей контактного сечения в предельном и исходном состоянии

$$S_n(h)/S_k = (1 - \varphi_c) \cdot \theta(h) \quad (15)$$

и введя предел прочности уплотнения, при соответствующих условиях создания дополнительного давления, имеем:

$$\sigma(h) = \sigma_k \cdot \alpha(h) \cdot \theta(h), \quad (16)$$

где $\sigma_k = (1 - \mu) \cdot (1 - \varphi_c) \cdot \sigma_n(h)$.

На рисунке 3 приведены теоретические графики зависимости относительной прочности грунта от формируемой плотности и относительно-го давления.

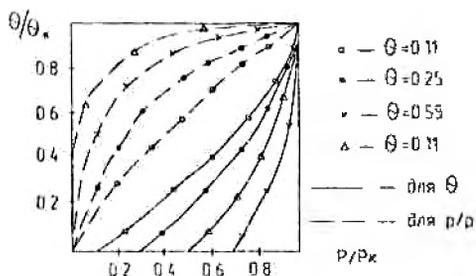


Рис. 3. Графики зависимости относительной прочности грунта от формируемой плотности θ и относительного давления p/p_k

Выводы

На начальных стадиях уплотнения прочность грунта возрастает незначительно, что обусловлено восприятием предельной нагрузки в целом не всей структурой, а только самым ослабленным контактным сечением.

Определяющими факторами процесса уплотнения являются начальная плотность и характер изменения структуры.

Однородность структуры грунта в зоне уплотнения может быть достигнута увеличением начальной (исходной) плотности сухого грунта, при этом оптимальное значение начальной плотности для песчаных грунтов не менее 15 кН/м^3 , а для пылевато-глинистых – $14,5 \text{ кН/м}^3$.

Литература

1. Грунтовые основания, уплотнённые тяжёлыми трамбовками. Правила проектирования и устройства: ТКП 45-5.01-107-2007 (02250). – Введ. 08.09.2008. – Минск: М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2008. – 33 с. Технический кодекс установившейся практики.
2. Кандауров, И.И. Механика зернистых сред и её применение в строительстве / И.И. Кандауров, Л.: Стройиздат, 1998. – 281 с.
3. Кулак, М.И. Фрактальная механика материалов / М.И. Кулак. – Минск, Высш. шк., 2002. – 304 с.
4. Лиштван, И.И. Влияние фрактальной неоднородности структуры на деформационно-прочностные свойства агрегатов торфяных систем / И.И. Лиштван, Б.А. Богатов, М.И. Кулак // Коллоидный журнал. – 1998. – Т 54, № 4. – С.107 – 111.
5. Хорошун, Л.П. К теории изотропного деформирования упругих тел со случайными неоднородностями / Л.П. Хорошун // Прикладная механика, 1967. – Т. 3., вып.9. – С. 14 – 19.
6. Новиков, В.В. К определению эффективных модулей упругости материалов / В.В. Новиков // ПМТФ. – 1985. – № 5 – С. 146 – 153.
7. Бердичевский, В.Л. Вариационные принципы механики сплошной среды / В.Л. Бердичевский. – М.: Наука, 1983. – 250 с.