

УДК 622.833.52

С.О.Марков

К ВОПРОСУ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ НАГРУЗКИ В НЕСВЯЗНОЙ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЕ

При исследовании характера распределения средних значений усилий, возникающих в несвязных грунтах, реальный зернистый грунт может быть заменен зернистой средой, состоящей из частиц среднего (эффективного) размера. Принцип осреднения может быть использован, в данном случае, и в отношении условий передачи усилий от частицы к частице. Так, для эквивалентной зернистой среды из частиц среднего размера передача усилий от каждой частицы осуществляется

максимального диаметра частиц к минимальному $d_{max}/d_{min} \approx 1,01$) [4–6].

Предлагаемая схема для расчета распределения усилий в зернистой среде (в плоском случае) предполагает значительную неравномерность гранулометрического состава среды (отношение максимального диаметра частиц к минимальному $d_{max}/d_{min} = 20$).

Исходными данными для расчета усилий являются результаты структурного моделирования зернистой среды – мат-

следующим образом. Выбирается произвольная точка $M(x_M, z_M)$, лежащая на линии действия результирующей G'_0 и в той же полуплоскости. Поскольку известны координаты частицы $O(x_o, z_o)$ и контактирующих с ней частиц, то

$$\Theta_i = \arccos \left(-\frac{(\overline{Mi})^2 - (\overline{Oi})^2 - (\overline{OM})^2}{2 \cdot (\overline{Oi})^2 \cdot (\overline{OM})^2} \right) \quad (1)$$

где $\overline{Mi}, \overline{Oi}, \overline{OM}$ – расстояния между соответствующими точками (рис. 1).

Рассчитав таким образом углы для всех контактирующих с O частиц, занеся их (а также номера соответствующих им частиц) в массив $\{\Theta_n, n_n\}$ (причем $\Theta_n \leq \pi/2$) и отсортировав его по возрастанию Θ (т.е. $\Theta_n > \Theta_{n-1}$), находим наименьший угол Θ_i и номер соответствующей частицы i .

$$\begin{cases} (x_i - x_M)(z_0 - z_M) - \\ -(x_0 - x_M)(z_i - z_M) < 0 \quad (> 0); \\ (x_i - x_M)(z_j - z_M) - \\ -(x_j - x_M)(z_i - z_M) > 0 \quad (< 0). \end{cases} \quad (2)$$

Исходя из того, что система неравенств (2) описывает нахождение точки j между отрезками Oi и OM [2], то, последовательно сортируя массив $\{\Theta_n, n_n\}$, находим угол Θ_j и соответствующую частицу $j(x_j, z_j)$, координаты которой не удовлетворяют системе (2). Таким образом, найденная частица j относительно частицы i лежит по другую сторону отрезка OM .

На найденные частицы i и j и будет распределяться нагрузка со стороны частицы O , вызывая силы реакции N_i и N_j

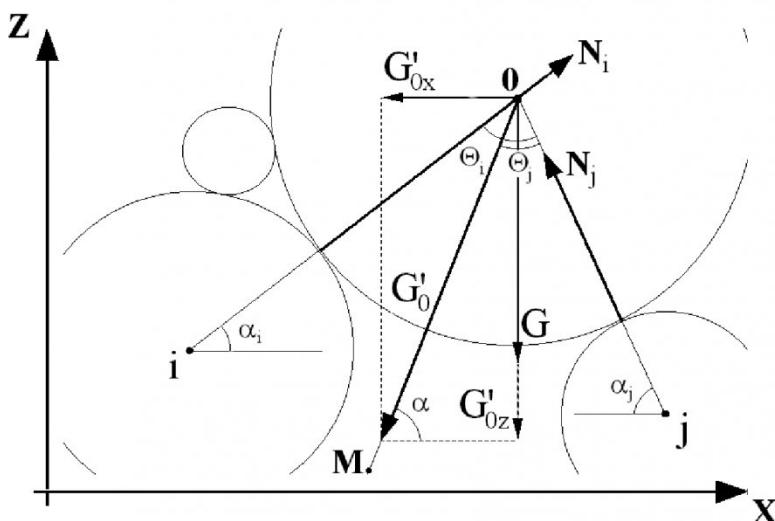


Рис. 1. Схема расчета распределения усилий: G , G' , G'_{0x} , G'_{0z} – соответственно вес частицы O , результирующая, горизонтальная и вертикальная составляющие действующих на частицу O сил; N_i , N_j – соответственно нормальные усилия со стороны i -ой и j -ой частиц

на две частицы в плоской задаче [1, 6]. Этот принцип распространяется и на неравномерные по гранулометрическому составу зернистые среды с тем условием, что усилие распределяется на две частицы, лежащие по разные стороны от линии действия активной силы. Это отражено в работах зарубежных авторов, где принимается весьма незначительная неравномерность гранулометрического состава среды (отношение макси-

мального диаметра частиц к минимальному $d_{max}/d_{min} \approx 1,01$) [4–6].

Поскольку угол α (рис. 1) в общем случае может принимать значения от 0 до $\pi/2$, то частицы i и j , на которые распределяется вес частицы O , находятся

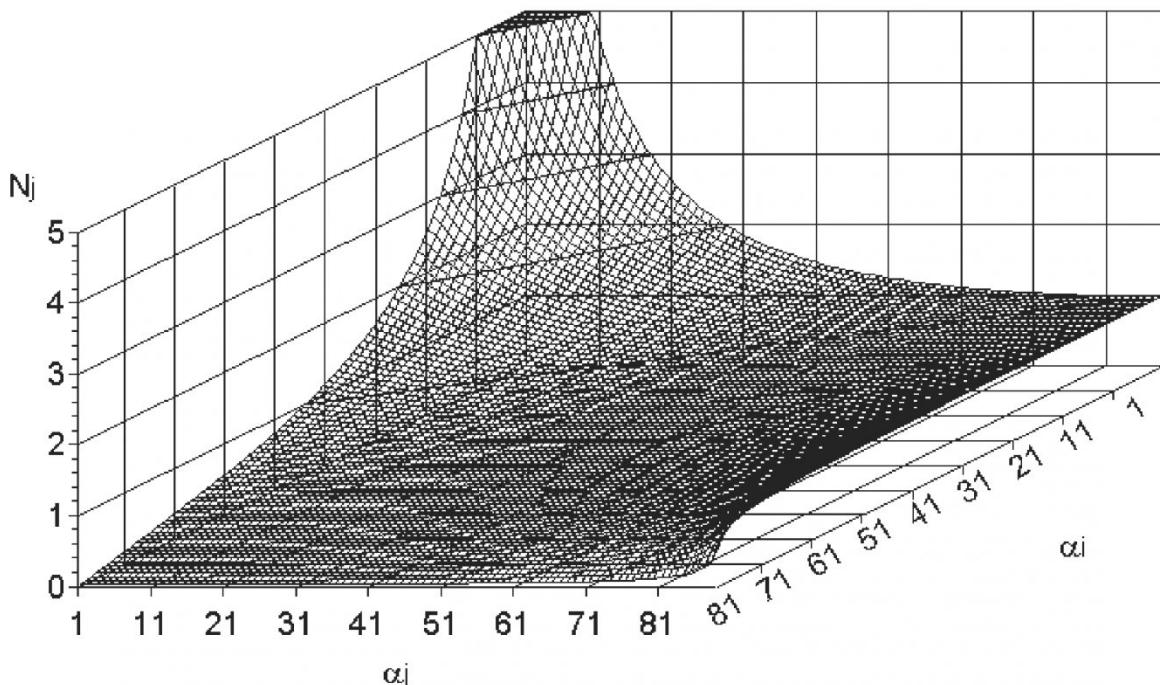


Рис. 2. Изменение нормального усилия в точке контакта с j -ой частицей в зависимости от углов α_i и α_j

$$\begin{cases} N_i = \\ = \frac{\pm G'_Ox \cdot \sin \alpha_j \pm G'_Oz \cdot \cos \alpha_j}{\pm \cos \alpha_i \cdot \sin \alpha_j \pm \cos \alpha_j \cdot \sin \alpha_i}, \\ N_j = \\ = \frac{\pm G'_Oz \cdot \cos \alpha_i \pm G'_Ox \cdot \sin \alpha_i}{\pm \cos \alpha_i \cdot \sin \alpha_j \pm \cos \alpha_j \cdot \sin \alpha_i} \end{cases} \quad (3)$$

Знаки в системе (3) зависят от значений x_i, z_i, x_j, z_j относительно x_0 и z_0 , а также от направления векторов G'_{0x}, G'_{0z} .

Данная расчетная схема применяется поочередно ко всем частицам массива несвязной зернистой среды, начиная с частицы, имеющей максимальную координату z . Этот подход позволяет рассчитывать распределение внешней нагрузки в теле техногенных породных массивов (отвалов, насыпей и т.п.), что, в свою очередь, позволит оценить их устойчивость как под воздействием внешней нагрузки, так и без нее.

Приведенный алгоритм расчета распределения нагрузки в несвязной зернистой среде реализован в компьютерной программе структурного моделирования зернистых сред (или техногенных породных масси-

бов) [7, 8].

Из графика на рис. 2 видно, что при уменьшении углов α_i и α_j значение N_j (равно как и значение N_i) возрастает, причем их значения могут в десятки раз превосходить результирующую активных сил G'_0 (в нашем случае $G'_0 = 1$ Н), действующих на частицу и стремящихся сдвинуть ее. Простым примером, объясняющим физический смысл этой зависимости, является клин: чем меньше угол его заточки (соответственно, углы α_i и α_j), тем меньшее усилие G'_0 (согласно рис. 1) необходимо для его внедрения в материал.

Для оценки устойчивости такой системы частиц, достаточно рассчитать силы трения, возникающие в точках контак-

тов частиц, и сравнить их с силами, стремящимися сдвинуть поддерживаемую частицу относительно поддерживающих. Сдвигающая сила рассчитывается как проекция G'_0 на касательную в точке контакта, а сила трения – как произведение нормальной силы на коэффициент трения между частицами.

В результате проведенных исследований были получены коэффициенты трения между неровными шероховатыми поверхностями образцов углевмещающих пород Кузбасса. Данные представлены в табл. 1.

В расчетах значение коэффициента трения выбиралось из диапазона его значений в водонасыщенном состоянии, т.е. от 0.33 (аргиллит по аргиллиту) до 0.45 (песчаник по песчанику). Поскольку сочетание кусков указанных пород в отвальном

Таблица
Средние значения коэффициентов трения по неровной шероховатой поверхности кусков для воздушно-сухого (водонасыщенного) состояния пород

	песчаник	аргиллит	алевролит
песчаник	0.9 (0.45)	0.6 (0.38)	0.78 (0.4)
аргиллит		0.46 (0.33)	0.38 (0.35)
алевролит			0.49 (0.43)

массиве равновероятно, то значение коэффициента трения из указанного диапазона для каждого контакта выбиралось с помощью генератора псевдослучайных чисел с равномерным распределением значений внутри указанного диапазона.

Для оценки устойчивости отвального массива, состоящего из коренных пород вскрыши, нами была смоделирована его структура с учетом гранулометрического состава пород в отвалах и технологии возведения отвала.

Моделировался отвал, возведенный по бульдозерной периферийной технологии отва-

лообразования [9]. Это видно из рис. 3, где можно наблюдать четко выраженную сегрегацию гранулометрического состава по высоте отвала. Такая структура характерна и при отвалообразовании драглайнами и мехлопатами при использовании железнодорожного транспорта.

Применяя расчетную схему, представленную на рис. 1, поочередно ко всем частицам смоделированного отвального массива, были рассчитаны сдвигающие и удерживающие силы, возникающие в каждом контакте. Затем массив был разбит на условные блоки шириной и высотой 1 м, внутри которых были

подсчитаны суммы сил удерживающих и сдвигающих. Результаты работы этого алгоритма можно представить в виде сеточной модели, где светлые блоки показывают преобладание удерживающих сил, а затеменные блоки – сил сдвигающих.

Из рис. 4 видно, что силы сдвигающие и удерживающие достаточно равномерно распределены по всему массиву, причем блоков с удерживающими силами несколько больше, чем блоков с силами сдвигающими, что говорит о равновесном состоянии массива.

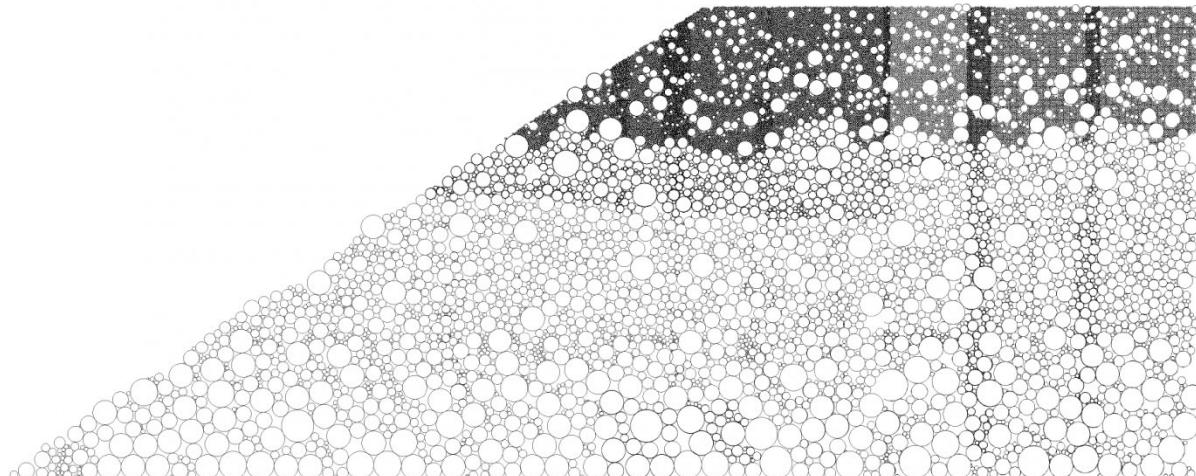


Рис. 3. Фрагмент структуры отвального массива

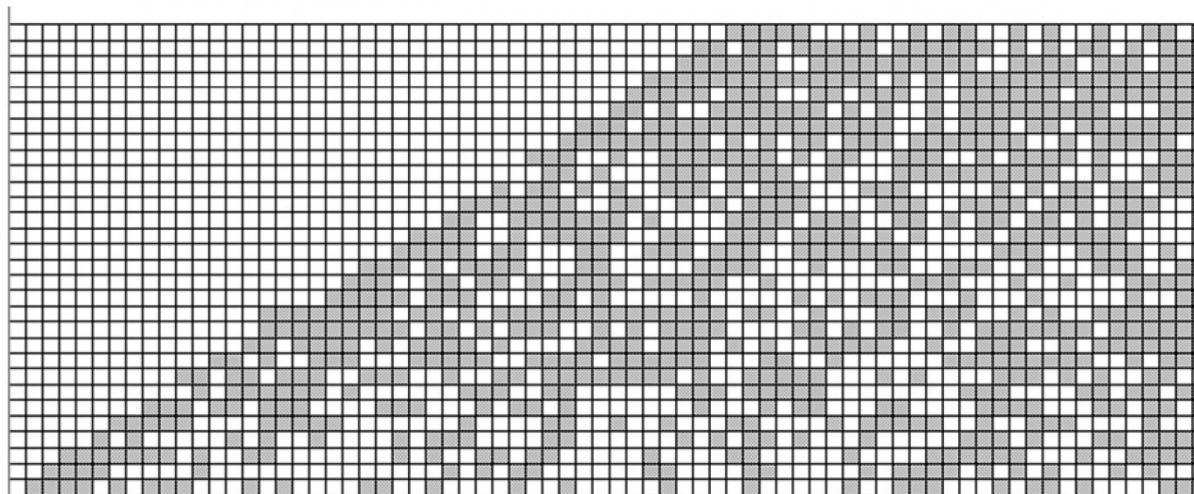


Рис. 4. Сеточная модель распределения сдвигающих и удерживающих сил в ненагруженном отвальном массиве

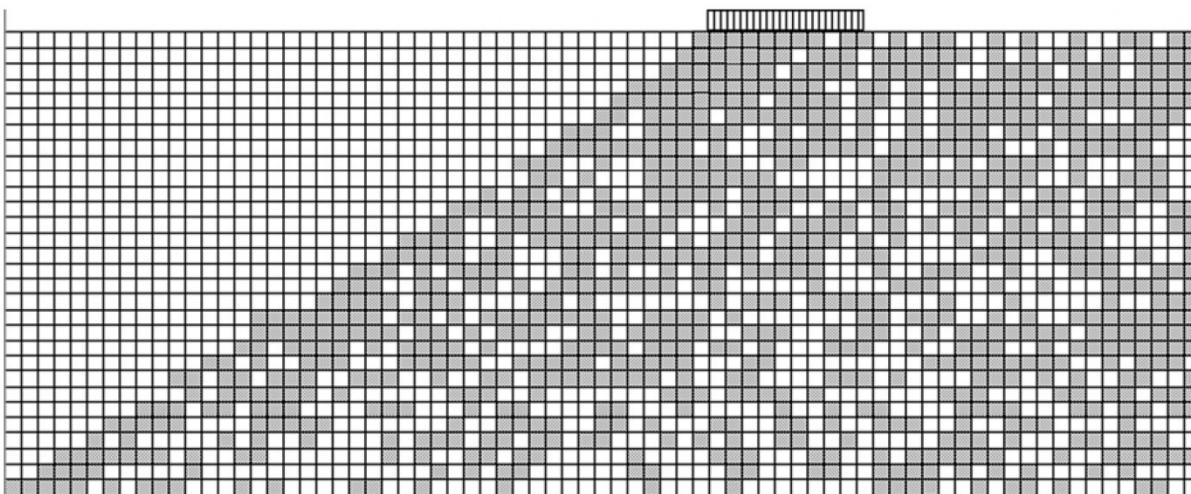


Рис. 5. Сеточная модель распределения сдвигающих и удерживающих сил в нагруженном отвальном массиве

На рис.5 представлена модель отвала, нагруженного распределенной нагрузкой, соответствующей весу экскаватора типа ЭШ 10/70 (диаметр базы 9,5 м, масса 688 т), расположенного непосредственно на верхней бровке отвала. Из рисунка видно, что непосредственно под

базой экскаватора образуется область с преобладанием в точках контактов между частицами сдвигающих усилий. Распределение таким образом приложенной нагрузки может привести к деформации и, в конечном счете, разрушению приоткосной части отвала.

Таким образом, разработанная нами программа позволяет проводить оперативную предварительную оценку устойчивости техногенных породных массивов под действием внешних нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве.– Л.: Стройиздат, 1988.– С. 89.
2. Лесин Ю. В. Очистка воды отзвесей в крупнокусковых породных массивах на шахтах и разрезах: Дис... докт. техн. наук.– Кемерово, 1990.– 175 с.
3. Карпенко Н. В. Математическое моделирование структурных и физико-технических параметров массивов разрушенных горных пород: Дис... канд. техн. наук.– Кемерово, 1993.
4. Mueth D.M. Force Distribution in a Granular Medium / D.M. Mueth, H.M. Jaeger, S.R. Nagel // Phys. Rev. E.– 1998.– Vol. 3164.– № 57.
5. Liffman K. Forces in piles of granular material: an analytic and 3D DEM study / K. Liffman, M. Nguyen, G. Metcalfe, P. Cleary // Granular Matter.– 2001.– №3.– P. 165–176.
6. Oda M. Mechanics of granular materials: An introduction / M. Oda, K. Iwashita. – A. A. Balkema Publishers, 1999. – 400 p.
7. Свидетельство РОСПАТЕНТа № 2003610170 об официальной регистрации программы для ЭВМ “Программа структурного моделирования зернистых сред 1.0 (ПСМЗС 1.0)”/ С.О. Марков, Ю.В. Лесин, В.А. Гоголин, М.А. Тюленев // от 16.01.2003.
8. Свидетельство № 2239 об отраслевой регистрации разработки “Программа структурного моделирования техногенных породных массивов” в Отраслевом фонде алгоритмов и программ Информационно-библиотечного фонда РФ (номер государственной регистрации 50200200670) / С.О. Марков, Ю.В. Лесин, В.А. Гоголин, М.А. Тюленев // от 30.01.2003 г.
9. Лесин Ю.В. Прогноз качества очистки карьерных вод отзвесей фильтрованием через отвальные массивы / Ю.В. Лесин, М.А. Тюленев, С.О. Марков// Материалы IV науч.-практ. конф. – Кемерово, КузГТУ, 21-23 ноября, 2000. – С. 165-166.

□ Автор статьи:

Марков
Сергей Олегович
-аспирант кафедры
геологии