

УДК 624.131

В.А. Королев¹

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА В ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТАХ

Рассмотрена теоретическая оценка проявления масштабного эффекта в дисперсных грунтах при инженерно-геологическом изучении различных физических и физико-механических свойств, зависящих от структурной неоднородности грунта. Предложены понятия и новые количественные показатели для оценки проявления масштабного эффекта в дисперсных грунтах по отношению к физическим и физико-механическим свойствам. Разработана классификация структурных неоднородностей в дисперсных грунтах, влияющих на проявление в них масштабного эффекта. Охарактеризован метод анализа масштабного эффекта в дисперсных грунтах на основе принципа суперпозиции. Обоснована теоретическая модель учета масштабного эффекта в дисперсных грунтах при инженерно-геологической оценке различных физических и физико-механических свойств.

Ключевые слова: масштабный эффект, структурная неоднородность, дисперсный грунт, классификация неоднородностей, теоретическая модель масштабного эффекта, принцип суперпозиции, массив грунта.

A theoretical evaluation of the scale effect in dispersed soils is considered in the engineering-geological study of various physical and physical-mechanical properties that depend on the structural inhomogeneity of the soil. Concepts and new quantitative indicators are proposed to evaluate the manifestation of the scale effect in disperse soils in relation to physical and physical-mechanical properties. A classification of structural heterogeneities in disperse soils that affect the scale effect in them has been developed. The method for analyzing the scale effect in dispersed soils is described on the basis of the superposition principle. The theoretical model of registration of the scale effect in disperse soils is substantiated at an engineering-geological evaluation of various physical and physical-mechanical properties.

Key words: scale effect, structural heterogeneity, dispersed soil, classification of heterogeneities, theoretical model of scale effect, superposition principle, soil massif.

Введение. Масштабный эффект (МЭ) в любых грунтах обусловлен наличием в них неоднородностей разного порядка и природы и проявляется при оценке любых свойств, зависящих от этих неоднородностей. Чаще всего при оценке МЭ рассматривают влияние структурных неоднородностей, забывая о том, что МЭ в общем случае совсем не обязательно зависит только от строения грунта.

Изучению МЭ уделяется большое внимание в инженерной геологии, механике грунтов, гидрогеологии, горном деле и многих других научных дисциплинах, тем не менее количественный учет этого эффекта еще не достаточно разработан. Кроме того, подавляющее большинство работ по оценке МЭ выполнено применительно к скальным грунтам [Ильницкая, 1972; Койфман, 1962, 1963; Литвинский, 2009, 2012; Фролова и др., 2012; Чирков, 1965; Шашенко и др., 2004], тогда как работ, в которых этот эффект анализируется в дисперсных грунтах, много меньше [Дашко, 2000; Жукова, 2012; Широков и др., 2014]. Между тем в дисперсных грунтах проявление этого эффекта имеет специфические особенности, отсутствующие

для скальных грунтов и часто остающиеся без внимания исследователей и изыскателей.

Учет МЭ необходим при переходе от испытания грунтов в образце к массиву, что делает его важным элементом методики инженерно-геологических изысканий, о чем не раз писали многие ученые [Бондарик, 1971; Боровко, 1971; Рац, 1968, 1973]. Однако эта методика еще далека от завершения. Анализ этих вопросов в дисперсных грунтах и посвящена статья.

Понятие «масштабный эффект» и его показатели. Первоначально и чаще всего масштабным эффектом называли изменение среднего значения прочности тела в зависимости от размера испытываемых образцов. Это понятие вошло в геологию из работ по статистической теории хрупкого разрушения материалов. Поэтому не удивительно, что первоначально этот эффект широко изучался лишь в скальных горных породах, в том числе в углях, для которых характерно упруго-хрупкое разрушение.

Так, например, изучением МЭ в скальных горных породах занимались З.А. Ацагорцян, Л.И. Барон, Я.А. Бич, Ф.П. Бублик, Н.П. Гришкова,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, профессор; e-mail: va-korolev@bk.ru

Е.И. Ильницкая [Ильницкая, 1972], М.И. Койфман [Койфман, 1962, 1963], С.В. Кужель, Г.Н. Кузнецов, В.М. Курбатов, Г.Г. Литвинский [Литвинский, 2009, 2012], Б.В. Матвеев, И.Г. Меликидзе, М.М. Протодяконов, М.В. Рац [Рац, 1968, 1973], Е.А. Сдвижкова, Г.Л. Фисенко, Ю.В. Фролова [Фролова и др., 2012], С.Е. Чирков [Чирков, 1965], Н.А. Шапошников, А.Н. Шашенко [Шашенко и др., 2004], Л.В. Шаумян, Я.И. Шпигельбурд и многие другие.

Одними из первых проявление МЭ на образцах диабазов разного размера в 1928 г. исследовали Н.А. Шапошников и Б.В. Залесский. Обобщение работ по изучению этого эффекта выполнил в 1962–1963 гг. М.И. Койфман [Койфман, 1962, 1963], а затем А.Н. Шашенко [Шашенко и др., 2004]. К настоящему времени установлено, что в скальных грунтах существует МЭ по крайней мере двух типов — *объемного* и *поверхностного*, проявляющихся одновременно [Фролова и др., 2012]. Первый эффект обусловлен наличием структурных дефектов в объеме грунта, и если вероятность их нахождения возрастает с увеличением анализируемого объема грунта, то прочность грунта будет снижаться вследствие этого объемного эффекта. Второй эффект обусловлен наличием дефектов на поверхности образцов, возникающих при их обработке (выбурировании керна и т.п.), поэтому с увеличением размеров образцов доля поверхностных дефектов будет снижаться, вследствие чего прочность испытываемых образцов будет расти. Таким образом, поверхностный МЭ носит методический характер, и при полевых испытаниях больших объемов грунтов его можно не учитывать, тогда как объемный МЭ необходимо учитывать во всех случаях, когда размеры зоны влияния сооружения превышают размеры образца. Соотношение этих двух эффектов надо учитывать и при лабораторных испытаниях образцов разных размера и формы. При сравнении лабораторных и полевых испытаний и переходе от образца к массиву необходимо учитывать объемный МЭ.

Проявление МЭ трактуется и с позиций математической статистики. Так, например, М.В. Рац [Рац, 1968, 1973] выделил три проявления масштабных эффектов разного рода: МЭ I рода — изменение математического ожидания величины L в зависимости от числа элементов микронеоднородности (n) в пределах определяющей области эксперимента; МЭ II рода — изменение дисперсии L в зависимости от n ; МЭ III рода — изменение асимметрии распределения L в зависимости от n , где L — функция совокупности значений оцениваемого признака на всех n элементах неоднородности. Это основной подход при отборе образцов и обосновании инженерно-геологического опро-

бования грунтов в ходе инженерно-геологических изысканий [Рац, 1973].

Изучению МЭ в дисперсных грунтах посвящено значительно меньше работ [Гольдштейн, 1973; Дашко, 2000; Жукова, 2012; Широков и др., 2014]. Так, Р.Э. Дашко [2000] при исследовании МЭ в нижнекембрийских синих глинах была установлена зависимость прочности на одноосное сжатие глин (R) от площади образца (S) в виде

$$R = R_{\max} \exp[k(S_{\min}/S_{\max}) - 1],$$

где R_{\max} — максимальная прочность образца; S_{\min} и S_{\max} — минимальная и максимальная площадь образцов соответственно; k — эмпирический коэффициент, равный 0,98. В литифицированных глинах, к которым относятся и кембрийские глины, МЭ проявляется аналогично тому, как он проявляется в скальных грунтах, в основном как фактор снижения прочности и увеличения деформируемости за счет повышения плотности дефектов² (типа трещиноватости) в единице объема грунта с увеличением объема испытываемых образцов.

Подавляющее большинство авторов рассматривают объемный МЭ только как причину снижения прочности грунтов при увеличении испытываемого объема. Для скальных грунтов, в которых объемный МЭ обусловлен в основном трещинами и аналогичными дефектами ослабления, это действительно так. Однако для дисперсных грунтов объемный МЭ может проявляться и в противоположном отношении, когда с увеличением объема испытываемого грунта повышается его прочность. Это происходит в таких дисперсных грунтах, которые содержат в основной матрице включения или иные структурные неоднородности, имеющие большие прочность и плотность. Типичный пример этого типа грунтов — ледниковые моренные суглинки с включениями гравия и (или) валунов: чем больше относительный объем этих включений в объеме суглинистой матрицы, тем больше прочность и меньше деформируемость грунта в массиве.

Для количественной характеристики МЭ в грунтах используют различные показатели, в частности *коэффициент структурного ослабления массива* k_c , равный отношению прочности в массиве к прочности в образце [Литвинский, 2009, 2012; Шашенко и др., 2004]. Но с более общих позиций, учитывая, что МЭ проявляется не только в снижении прочности, правильнее ввести *коэффициент структурного изменения массива* k_c , равный отношению какого-либо оцениваемого параметра грунта в массиве (P_M) к этому же параметру в образце (P_0) стандартного размера и зависящий от структурных неоднородностей грунта различного типа:

² Плотность дефектов — k_d — концентрация дефектов (трещин, пустот и т.п.) в единице объема грунта, равная отношению объема дефектов (V_d) к объему грунта (V): $k_d = V_d / V$.

$$k_c = \Pi_M / \Pi_0. \quad (1)$$

При $k_c < 1$ происходит уменьшение оцениваемого параметра или ослабление массива с ростом испытываемого объема, величину k_c в этом случае можно назвать *коэффициентом структурного ослабления массива*, а при $k_c > 1$ — происходит увеличение оцениваемого параметра и нарастание прочности, в этом случае величину k_c следует называть *коэффициентом структурного упрочнения массива*.

Наряду с величиной k_c для оценки МЭ используют также понятие «*масштабный фактор*» ($M_{\phi(св)}$) — параметр, учитывающий влияние изменения объемов испытываемых грунтов на данное свойство ($\Pi_{св}$) и определяемого соотношениями

$$M_{\phi(св)} = d\Pi_{св}/dl \text{ или } M_{\phi(св)}' = d\Pi_{св}/dV, \quad (2)$$

где l — характерный линейный размер испытываемого грунта; V — характерный объем испытываемого грунта.

Так, например, для прочности грунта масштабный фактор находят из соотношения (2) по формуле (рис. 1):

$$M_{\phi(\sigma)} = d\sigma/dl, \quad (3)$$

где σ — любой показатель прочности (или деформируемости) грунта; l — характерный размер испытываемого грунта. При структурном ослаблении (рис. 1, в) прочность образца (σ_0) нелинейно уменьшается до величины прочности в массиве (σ_m) при увеличении размера (l) испытываемого образца от стандартного линейного размера (l_s). При структурном упрочнении (рис. 1, а), напротив, прочность образца (σ_0) нелинейно возрастает до величины прочности в массиве (σ'_m) при увеличении размера (l) испытываемого образца. При отсутствии масштабного фактора прочность образца (σ_0) не зависит от l (рис. 1, б).

В соответствии с этим, например, для прочности на одноосное сжатие R — масштабный фактор, определяемый по формуле (2), следует обозначать как $M_{\phi(R)}$, для угла внутреннего трения — $M_{\phi(\phi)}$, для сцепления — $M_{\phi(c)}$; для модуля деформации — $M_{\phi(E)}$; для относительной просадочности — $M_{\phi(e)}$; для плотности — $M_{\phi(\rho)}$; для пористости — $M_{\phi(n)}$; для коэффициента фильтрации — $M_{\phi(Kф)}$ и т.п.

В общем виде масштабный фактор $M_{\phi(св)}$ при оценке какого-либо свойства характеризуется функцией зависимости показателя этого свойства ($\Pi_{св}$) от характерного линейного размера (l) или объема (V) испытываемого образца:

$$\Pi_{св} = f(l) \text{ или } \Pi_{св} = f'(V). \quad (4)$$

Таким образом, масштабный фактор (M_{ϕ}) — переменная величина, которая зависит от l (или от V); при $M_{\phi} > 1$ наблюдается увеличение оцениваемого показателя грунта с ростом размеров

испытываемых образцов; при $M_{\phi} < 1$ происходит уменьшение оцениваемого показателя грунта с ростом размеров испытываемых образцов; при $M_{\phi} = 1$ масштабный фактор отсутствует.

В случае оценки прочности, когда $\Pi_{св} = \sigma$, при $l \rightarrow l_s$ и $l \rightarrow \infty$ имеем (рис. 1):

$$\begin{aligned} \lim_{l \rightarrow l_s} f(l) &= \sigma_0, \\ \lim_{l \rightarrow \infty} f(l) &= \sigma_m, \end{aligned} \quad (5)$$

где σ_m и σ_0 — любой показатель прочности грунта в массиве и стандартном образце соответственно; l_s — характерный размер стандартного образца.

Следовательно, установив вид функции для масштабного фактора прочности $\sigma = f(l)$, можно найти коэффициент структурного изменения грунтового массива k_c :

$$k_c = \sigma_m / \sigma_0. \quad (6)$$

Поскольку МЭ проявляется не только для прочности, но и для всех других физико-механических (деформационных, реологических, динамических), а также для всех физических свойств грунта (плотностных, теплофизических, фильтрационных, электрических и т.п.), то в каждом конкретном случае необходимо оговаривать, какой при этом определяется коэффициент структурного изменения, а также масштабный фактор. С практической точки зрения оценка величины k_c полезнее, чем M_{ϕ} , так как позволяет перейти от испытаний стандартного образца к массиву.

В дисперсных грунтах МЭ может быть обусловлен не только структурными неоднородностями, которые характеризуются наличием определенной масштабной иерархии (см. ниже), но и иными неоднородностями (которые можно

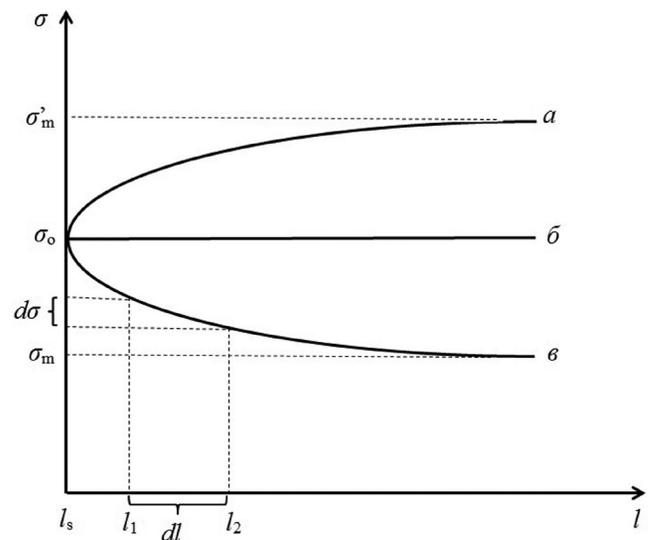


Рис. 1. Схема оценки масштабного фактора в грунтах с упрочнением (а), его отсутствием (б) и ослаблением (в) при увеличении размера (l) испытываемого образца начиная от стандартного (l_s)

назвать *вещественными* и *энергетическими*), также влияющими на оценку показателей физических и физико-механических свойств грунтов.

К вещественным неоднородностям, например, можно отнести неоднородности плотности–пористости грунта, влажности, неоднородности содержания газообразных и биотических компонентов и т.п.; к энергетическим — неоднородности гидрофизических, тепловых, электромагнитных и иных полей, включая энергетическую неоднородность различных видов воды в дисперсных грунтах. Иллюстрацией проявления МЭ за счет неоднородности плотности служат данные С.П. Абрамова и М.В. Раца [Рац, 1973] для глинистых грунтов. Проявление МЭ при фильтрации в грунтах рассматривали Е.С. Дзекцер, Э.Л. Лейбин, М.В. Рац [Рац, 1968, 1973], Е.И. Сёмин, С.Н. Чернышев, Л.С. Язвин и др.

Эти факторы не характерны для скальных грунтов, но в дисперсных грунтах могут действовать одновременно и сложным образом влиять на проявление МЭ в конкретном грунтовом массиве. Часть факторов может усиливать проявление МЭ, а часть, напротив, его ослаблять. Из этого следует, что *масштабный эффект является фундаментальным свойством любых грунтов, отражающим и обусловленным их пространственной неоднородностью, как структурной, так и вещественно-энергетической.*

Это утверждение следует из закона пространственной неоднородности грунтов, согласно которому «грунты на разных масштабных (иерархических) уровнях от минералов до грунтовых массивов характеризуются случайной или закономерной пространственной неоднородностью их состава, структуры и свойств, что обусловлено случайными или закономерными изменениями пространственных условий их формирования» [Королев, Трофимов, 2016, с. 185].

Таким образом, все виды неоднородностей, и структурные, и вещественно-энергетические, одновременно проявляющиеся на разных масштабных уровнях от образца до грунтового массива, будут в

той или иной степени обуславливать проявление МЭ. Этот факт — существенная отличительная особенность проявления МЭ в дисперсных грунтах по сравнению со скальными грунтами. Ниже рассмотрим модели и теоретическую оценку МЭ в дисперсных грунтах лишь с учетом структурной неоднородности применительно к определению параметров физико-механических свойств грунтовых массивов. Для этого сначала рассмотрим структурные неоднородности.

Типы структурных неоднородностей в дисперсных грунтах как основа проявления масштабного эффекта. Дисперсные грунты, в отличие от скальных, необходимо рассматривать с позиций теории дискретной среды, учитывающей взаимодействия между отдельными структурными элементами, их распределение по размеру, форме и иным параметрам. Типы структурно-вещественных неоднородностей в дисперсных грунтах, обуславливающие в них МЭ, не менее, а возможно, намного более многочисленны, чем в скальных грунтах. При этом структурные неоднородности, как правило, взаимосвязаны с вещественными или химико-минеральными неоднородностями в силу определенной морфологической обусловленности частиц минералов и обломков дисперсных пород, как было показано в работах М.С. Швецова, Н.М. Страхова [Страхов, 1960] и многих других литологов. Структурные неоднородности в дисперсных грунтах, согласно М.В. Рацу [Рац, 1973], могут быть обусловлены: 1) пространственной изменчивостью пород (модель тренда); 2) процессами осадконакопления (модель флиша); 3) уплотнением пород с глубиной; 4) «возмущением», вызванным геологическими (тектоника, гипергенез и т.п.) и иными процессами (техногенез).

Рассмотрим систематизацию структурных неоднородностей в дисперсных грунтах, построенную с учетом основных морфологических признаков (рис. 2). Структурные неоднородности необходимо подразделять по иерархическому уровню, или характерному размеру (по М.С. Швецову, Е.М. Сергееву и многим другим), на три класса:

Иерархический уровень	Схема Характерный размер, см	Структурная неоднородность, обусловленная						
		слоистостью			включениями		пустотностью	
		прямой	косой	сложной	меньшей плотности	большей плотности	поровой	трещинной
	1	2	3	4	5	6	7	
I. Микроуровень	<0,1	прямая микрослоистая I-1	косая микрослоистая I-2	сложная микрослоистая I-3	микро-разуплотняющая I-4	микро-уплотняющая I-5	микро-поровая I-6	микро-трещинная I-7
II. Мезоуровень	0,1–10	прямая мезослоистая II-1	косая мезослоистая II-2	сложная мезослоистая II-3	мезо-разуплотняющая II-4	мезо-уплотняющая II-5	мезо-поровая II-6	мезо-трещинная II-7
III. Макроуровень	>10	прямая макрослоистая III-1	косая макрослоистая III-2	сложная макрослоистая III-3	макро-разуплотняющая III-4	макро-уплотняющая III-5	макро-поровая III-6	макро-трещинная III-7

Рис. 2. Классификация структурных неоднородностей в дисперсных грунтах

микро-, мезо- и макронеоднородности. Их характерные размеры отличаются у разных авторов. Согласно работе [Рац, 1973], выделяется 5 уровней или порядков неоднородностей от IV уровня (кристалла) до нулевого (региональная изменчивость). В известной диаграмме неоднородностей горных пород в массиве М.В. Рац [Рац, 1973] рассматривает 4 уровня неоднородностей (от IV до I): IV — ультранеоднородность (кристалла) размером 10^{-6} – 10^{-3} см; III — микронеоднородность (образца) размером 10^{-3} – 10^0 см; II — макронеоднородность (с учетом прослоев и т.п.) размером 10^0 – 10^3 см; I — макронеоднородность (массива) размером $>10^3$ см. Он также рассматривал четыре признака (или критерия) выделения неоднородностей: 1) по размеру элементов (порядки IV–I); 2) по отношению размера элемента неоднородности к размеру определяющей области эксперимента (макро-, микро- и ультранеоднородность); 3) по отношению размера элемента макронеоднородности к величине шага опробования; 4) по относительному размеру элементов макронеоднородности.

Автор статьи предлагает выделять нижеследующие структурные неоднородности трех уровней, различающихся по иерархии и характерному размеру (рис. 2).

I. *Микроуровень*. Микронеоднородности (размер $<0,1$ см), проявляющиеся в малых образцах грунта размером <1 см и анализируемые при специальных (главным образом микроструктурных) исследованиях. При необходимости в специальных исследованиях могут выделяться и более детальные ультранеоднородности (размер $<1 \cdot 10^{-3}$ см).

II. *Мезоуровень*. Мезонеоднородности (размер $0,1$ – 10 см), видимые невооруженным глазом и проявляющиеся в образцах грунта размером 10 – 20 см (монолиты и образцы из них).

III. *Макроуровень*. Макронеоднородности (размер >10 см), проявляющиеся в грунтовом массиве с характерным размером $>0,2$ м.

На каждом уровне (рис. 2) структурные неоднородности затем подразделяются по морфологическим признакам. Так, например, выделяются структурные неоднородности, обусловленные: 1) слоистостью разной морфологии (модель «флиша» по М.В. Рацу [Рац, 1973]); 2) включениями и линзами различной морфологии, размера, состава, физических и физико-механических свойств; 3) пустотностью разного вида — поровой или трещинной (рис. 2). Все указанные типы структурных неоднородностей будут искажать и изменять в ту или иную сторону как физические, так и физико-механические свойства грунта.

Структурная неоднородность, обусловленная слоистостью, в дисперсных грунтах выражается чередованием горизонтальных (или субгоризонтальных) прямых (тип 1), косых (тип 2) или волнистых (сложной формы) (тип 3) слоев, отличающихся составом и (или) свойствами — прежде всего плот-

ностью и прочностью. Она может проявляться на разных иерархических уровнях — от I до III. В зависимости от состава и строения чередующихся слоев, а также их мощности прочность грунта в целом будет либо возрастать (при наличии более прочных слоев), либо уменьшаться (при наличии менее прочных слоев) по сравнению с прочностью грунта основной матрицы

Структурная неоднородность в дисперсных грунтах, обусловленная включениями или линзами, выражается в наличии в основной грунтовой матрице включений, линз и т.п. образований, плотность (и прочность) которых может быть как меньше (тип 4), так и больше (тип 5), чем у основной матрицы. В дисперсных грунтах неоднородности типа (4) часто обусловлены включениями и (или) линзами, выполненными дисперсными грунтами меньшей плотности или меньшей прочности. Их наличие будет понижать прочность грунта в целом и увеличивать его деформируемость. Наличие же в песчано-глинистых грунтах включений крупных обломков скальных пород, напротив, будет повышать прочность и снижать деформируемость грунта в целом.

Структурная неоднородность в дисперсных грунтах, обусловленная пустотностью, выражается в наличии пористости (тип 6) или трещиноватости (тип 7). Неоднородность пористости может быть обусловлена присутствием в грунте пор разных размеров и морфологии, как, например, в лёссовых грунтах, для которых одновременно характерна микро- и макропористость. Их сочетание в разных лёссах может отличаться и количественно описывается функцией распределения пор по классам и размерам. Неоднородность трещиноватости обусловлена присутствием в грунте трещин разного размера, ориентировки и морфологии. Она будет снижать прочностные и увеличивать деформационные характеристики грунта. Наличие же неоднородности за счет залеченных трещин, напротив, будет повышать прочностные и снижать деформационные характеристики и зависеть от свойств заполнителя.

Взаимное сочетание структурных неоднородностей разного иерархического уровня и выделенных по морфологическим признакам дает множество видов структурных неоднородностей, наименование которых (двойная нумерация) и схема строения указаны на рис. 2. Очевидно, что указанными здесь структурными неоднородностями не ограничивается все возможное их многообразие в дисперсных грунтах. Например, наложение неоднородностей включений (типы 4 и 5) на слоистые типы неоднородностей (типы 1–3) дает еще одно множество неоднородностей и т.д. Однако указанные на рис. 2 основные виды структурных неоднородностей наиболее распространены в дисперсных грунтах, их можно рассматривать как базовые при решении

инженерно-геологических задач моделирования МЭ в таких грунтах.

Количественная оценка структурных неоднородностей в дисперсных грунтах может быть дана с помощью ряда параметров. Основной из них — *поврежденность структуры* (ω) грунтового массива по отношению к структуре исходной вмещающей матрицы грунта.

Понятие «поврежденность структуры грунта» использовали многие инженер-геологи, в том числе С.С. Вялов, Г.К. Бондарик и др., правда, в ином аспекте — при оценке изменения структуры грунта в процессе его деформирования и разрушения. В этом случае поврежденность грунта определялась ими как отношение площади дефектов (S_d), образующихся при деформировании, к площади грунта в определенном анализируемом сечении (S):

$$\omega = S_d/S. \quad (7)$$

Для целей анализа МЭ вместо показателя «поврежденность структуры» правильнее ввести *показатель двумерной структурной неоднородности* грунта (ω_s), который для сечения (плоская задача) рассчитывается по формуле

$$\omega_s = S_n/S, \quad (8)$$

где S_n — площадь сечения, занятая структурными неоднородностями; S — общая площадь сечения.

Обоснованнее использовать *показатель объемной структурной неоднородности* грунта (ω_v), учитывающий неоднородности в трехмерном пространстве, который определяется формулой

$$\omega_v = V_n/V, \quad (9)$$

где V_n — объем структурных неоднородностей в грунте; V — объем грунта. Таким образом, величина ω_v характеризует плотность или концентрирование структурных неоднородностей в единице объема грунта и близка к рассмотренному выше показателю плотности дефектов (k_d). Если дефекты структуры обусловлены структурными неоднородностями, то величины ω_v и k_d совпадают. Из изложенного выше следует, что в общем случае коэффициент структурного изменения массива зависит от структурной неоднородности, т.е. $k_c = f(\omega_v)$.

Наряду с показателями ω_s и ω_v можно использовать и сопряженные с ними параметры — *показатели однородности грунта* (ψ), рассчитываемые для двумерной (ψ_s) и трехмерной (ψ_v) оценки по формулам

$$\psi_s = 1 - \omega_s \text{ и } \psi_v = 1 - \omega_v, \quad (10)$$

где ψ_s , ψ_v — показатели двумерной и объемной структурной однородности грунта соответственно.

Исходя из вышеизложенного с помощью коэффициента структурного изменения (k_c) можно

оценить изменение какого-либо свойства грунта при переходе от образца к массиву. Например, переход от прочности образца дисперсного грунта к прочности массива осуществляется по формулам

$$C_m = C_o \cdot k_{c(C)}, \quad \varphi_m = \varphi_o \cdot k_{c(\varphi)}, \quad (11)$$

где C_m и C_o — удельное сцепление грунта в массиве и в образце соответственно; φ_m и φ_o — угол внутреннего трения грунта в массиве и в образце соответственно; $k_{c(C)}$ и $k_{c(\varphi)}$ — коэффициенты структурного изменения в массиве сцепления и угла внутреннего трения соответственно.

Аналогично при оценке, например, деформационных свойств дисперсного грунта переход от модуля деформации образца (E_o) к модулю деформации массива (E_m) осуществляется по формуле

$$E_m = E_o \cdot k_{c(E)}, \quad (12)$$

где $k_{c(E)}$ — коэффициент структурного изменения в массиве модуля деформации.

Из уравнений (1,11,12) следует, что для учета МЭ необходимо знать коэффициент структурного изменения k_c . Он может быть найден несколькими путями: 1) расчетом по формуле (1) при известных величинах параметров свойств P_m и P_o в массиве и образце; 2) расчетом по уравнениям (5, 6) при известной функции $P_{cb} = f(l)$; 3) расчетом на основе теоретической оценки структурной неоднородности массива, поскольку, как показано выше, $k_c = f(\omega_v)$; 4) определением структурной неоднородности массива независимыми прямыми методами, например геофизическими. Из этих четырех путей первые два опираются на экспериментальные данные, четвертый используется традиционно и тоже экспериментальный. Поэтому представляет интерес третий вариант, основанный на теоретической оценке или обосновании математической модели, который и реализуется ниже.

Исходя из вышеизложенного проблема оценки МЭ в дисперсных грунтах путем теоретического моделирования сводится к решению двух взаимосвязанных задач:

а) оценка структурной неоднородности массива на разных масштабных уровнях с помощью величин ω_s или ω_v и выявление вида функции $k_c = f(\omega_s)$ или $k_c = f(\omega_v)$;

б) нахождение показателей различных физико-механических свойств массива $P_{cb(M)}$ с заданной структурной неоднородностью из соотношения $P_{cb(M)} = P_{cb(O)} \cdot k_{c(cb)}$, где $P_{cb(O)}$ — показатель свойства в образце; $k_{c(cb)}$ — коэффициент структурного изменения в массиве этого свойства.

Описание масштабного эффекта на основе принципа суперпозиции. Дисперсные грунты относятся к системам, в которых соблюдается условие пропорциональности между действующими внешними силами и деформациями, которые они вызывают. Поэтому к ним применим принцип

суперпозиции — принцип независимости действия сил. Согласно этому принципу считается, что внутренние усилия, возникающие в грунте, и соответствующие им деформации не зависят от порядка приложения внешних сил: если к системе приложено несколько сил, то можно определить внутренние усилия от каждой силы в отдельности, а затем результат действия всех сил получить как сумму действия каждой силы. В более общей формулировке принцип суперпозиции — допущение, согласно которому если составляющие сложного процесса воздействия взаимно не влияют друг на друга, то результирующий эффект будет представлять собой сумму эффектов, вызываемых каждым воздействием в отдельности [Литвинский, 2009, 2012].

Рассмотрим плоский квадратный элемент грунта (двумерная задача) мощностью и шириной (l), характеризующийся структурной неоднородностью типа 1 (рис. 2), в котором в однородной матрице (m) присутствуют горизонтальные прослои (n_i) различной мощности (a_i), выступающие как структурные неоднородности (рис. 3). Расстояние между прослоями (b_i) также разное. Поскольку в данном случае параметры прослоев меняются лишь по глубине, то задача сводится к линейной.

Применим принцип суперпозиции к оценке измененности этого элемента грунта за счет наличия горизонтальных прослоев. Будем считать, что плотность грунтовой матрицы (ρ_m) этого элемента больше плотности прослоев (ρ_n), $\rho_m > \rho_n$, т.е. прослои оказывают разуплотняющее действие. Тогда измененность выделенного элемента грунта за счет этих прослоев, оцениваемая показателем двумерной структурной неоднородности грунта (ω_s) по формуле (8), будет равна

$$\omega_s = \frac{S_H}{S} = \frac{\sum_{n=1}^i a_i}{l}. \quad (13)$$

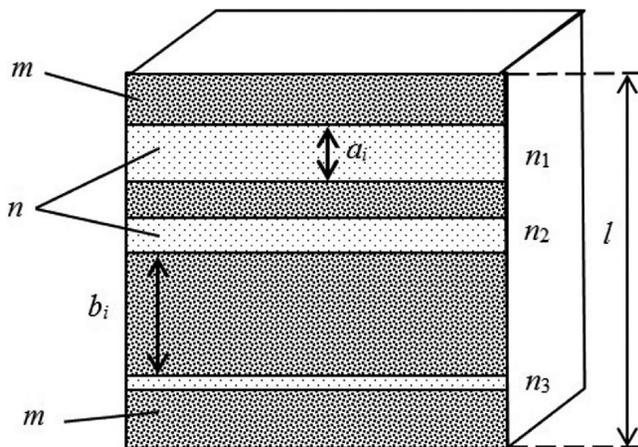


Рис. 3. Схема проявления масштабного эффекта в дисперсном грунте со структурной неоднородностью, обусловленной горизонтальными прослоями: m — матрица, n — прослой

Для этого же элемента найдем коэффициент структурного изменения плотности, определяемый по формуле (1). В нашем случае плотность выделенного элемента с неоднородностями $\Pi_M = \rho_M$ определяется как плотность смеси двух грунтов с плотностью ρ_m и ρ_n и будет равна $\rho_M = \rho_m - (\rho_n \cdot \omega_s)$. Тогда коэффициент структурного изменения плотности $k_{c(p)}$ выделенного элемента грунта будет равен

$$k_{c(p)} = \frac{\Pi_M}{\Pi_0} = \frac{\rho_M}{\rho_m} = \frac{\rho_m - \rho_n \omega_s}{\rho_m} = 1 - \omega_s \left(\frac{\rho_n}{\rho_m} \right). \quad (14)$$

График зависимости $k_{c(p)}$ от показателя структурной неоднородности ω_s грунта при различных значениях отношения плотностей слоистых неоднородностей и грунтовой матрицы (ρ_n/ρ_m) для рассматриваемого элемента будет линейным (рис. 4). Здесь линия 7 отражает крайнее значение коэффициента $k_{c(p)} = 1$ в отсутствии неоднородностей (т.е. когда отношение плотностей ρ_n/ρ_m равно единице и строение элемента однородно). С увеличением структурной неоднородности ω_s коэффициент структурного изменения плотности $k_{c(p)}$ линейно снижается тем в большей степени, чем значительнее уменьшается отношение плотностей ρ_n/ρ_m .

Эта зависимость получена для выделенного элемента одного масштабного уровня грунта, но неоднородность, обусловленная слоистостью и показанная на рис. 4, может иметь место на разных масштабных уровнях согласно рис. 2. Ее описание на каждом масштабном уровне, рассматриваемое ниже, будет аналогично вышеописанному. Важно, однако, учесть все возможные масштабные или иерархические уровни анализируемого грунтового массива. Для этого необходимо ввести параметры,

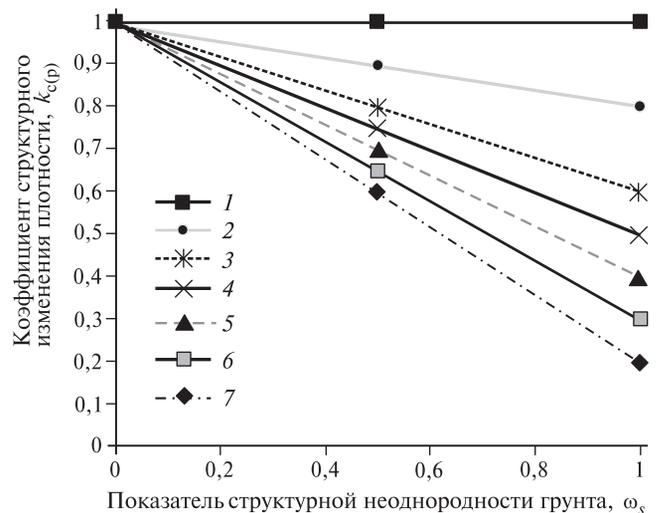


Рис. 4. Зависимость коэффициента структурного изменения плотности $k_{c(p)}$ от показателя структурной неоднородности (ω_s) грунта при различном соотношении значений плотности (ρ_n/ρ_m): 1 — 0,2; 2 — 0,3; 3 — 0,4; 4 — 0,5; 5 — 0,6; 6 — 0,8; 7 — 1,0

оценивающие размеры и неоднородностей, и масса на разных иерархических уровнях.

Теоретическая модель учета масштабного эффекта в массиве. Рассмотренное выше описание структурных неоднородностей с горизонтальными прослоями учитывало неоднородности в пределах элемента одного масштабного уровня (рис. 3). Для этого уровня была получена зависимость коэффициента структурного изменения плотности $k_{c(p)}$ от показателя структурной неоднородности грунта ω_s . Если же в грунтовом массиве проявляется МЭ, то в массиве должны существовать аналогичные структурные неоднородности другого иерархического уровня.

Рассмотрим схему грунтового массива со слоистыми структурными неоднородностями ω (или, соответственно, с однородностями $\psi=1\omega$), проявляющимися на трех иерархических уровнях (I–III). Для этого выделим в объеме массива с координатами x , y и глубиной z кубический элемент со стороной l_1 , в котором имеются слоистые неоднородности n_1, n_2, \dots, n_i , расстояние между которыми равно $b_i < l_1$ (рис. 5). Их описание на этом первом уровне (I) будет аналогично рассмотренному выше (рис. 3, 4). Они проявляются во всем объеме рассматриваемого грунтового массива со сторонами $l_3 > l_1$. Зависимость структурной однородности $\psi_{(i)}$ (для ψ_s или ψ_v) грунта от размера образца (l) для I масштабного уровня показана на рис. 6 (линия $\psi(I)$). Здесь постоянство $\psi(I)$ при $l > l_1$ объясняется проявлением одинакового уровня однородности во всем объеме грунтового массива.

На следующем иерархическом уровне (II) начинают проявляться структурные неоднородности большего порядка, расстояние между которыми лежит в пределах $l_1 < b_i < l_2$. Их описание также может быть дано аналогично рассмотренному выше для I уровня, а график зависимости структурной

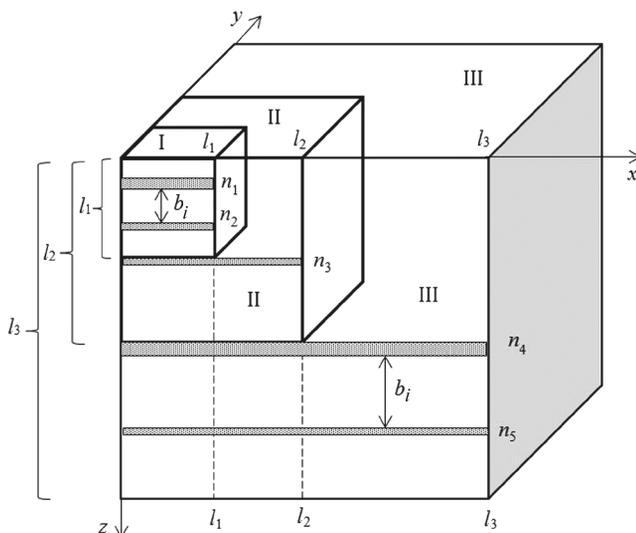


Рис. 5. Схема взаимосвязи иерархических уровней грунтового массива

однородности ψ_{II} грунта на II иерархическом уровне от размера образца (l) показан на рис. 6 (линия $\psi(II)$). Постоянство $\psi(II)$ при $l > l_2$ также объясняется проявлением одинакового уровня однородности во всем объеме рассматриваемого грунтового массива.

Аналогичным образом на следующем III иерархическом уровне начинают проявляться структурные неоднородности еще большего порядка, расстояние между которыми лежит в пределах $l_1 < b_i < l_3$. Их количественное описание также может быть сделано, как было рассмотрено выше для I или II уровней, а график зависимости структурной однородности ψ_{III} грунта на этом III иерархическом уровне от размера выделяемого элемента грунта (l) показан на рис. 6 (линия $\psi(III)$). Постоянство $\psi(III)$ при $l > l_3$ тоже объясняется проявлением одинакового уровня однородности во всем объеме рассматриваемого грунтового массива.

Подобным образом могут быть количественно охарактеризованы структурные неоднородности (или, наоборот, однородности) для всех масштабных иерархических уровней, количество которых в реальных грунтовых массивах, естественно, может быть существенно разным в зависимости от генетических и иных особенностей грунта.

Учитывая принцип суперпозиции, неоднородности на разных масштабных уровнях можно суммировать таким образом, чтобы получить оценку общей (суммарной) однородности $\psi(\Sigma)$ (или, соответственно, суммарной структурной неоднородности $\psi(\Sigma)$) всего объема рассматриваемого грунтового массива. Эта зависимость $\psi(\Sigma)=f(l)$ показана на рис. 6 (линия $\psi(\Sigma)$). Вид этой функции полностью согласуется с экспериментальной зависимостью для проявления МЭ плотности в глинистых грунтах [Рац, 1973]. Затем на основе суммарной зависимости $\psi(\Sigma)=f(l)$ можно определить зависимость коэффициента структурного изменения плотности $k_{c(p)}$ от показателя структурной

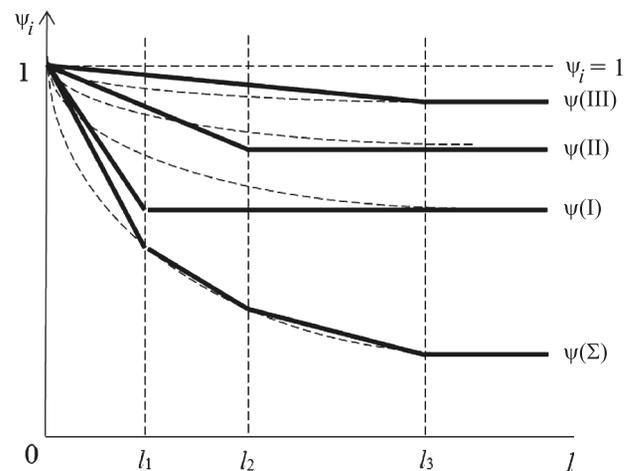


Рис. 6. Зависимость структурной однородности грунта (ψ_i) на разных иерархических уровнях (I–III) и суммарной однородности ψ_Σ от размера элемента грунта (l)

неоднородности ω_i (или от ψ_s) для всего массива так, как описано выше для оценки неоднородности плотности для одного масштабного уровня.

В силу природного разнообразия массивов дисперсных грунтов степень их структурной неоднородности на разных масштабных уровнях может быть весьма различной. На некоторых уровнях выделяемые элементы грунта могут быть однородны (изотропные грунты), а на других, как правило, более высоких, неоднородны. Это обуславливает необходимость учитывать иерархические уровни при инженерно-геологическом опробовании массивов дисперсных грунтов, отборе образцов, а также для учета соотношения области воздействия (l_a) и характерных размеров выделяемых элементов грунта (l). При этом под областью воздействия понимают характерный объем массива грунта, в котором проявляется воздействие внешних факторов от инженерного сооружения (давления, температуры и т.п.). Параметры этой области чаще всего характеризуют линейным размером (l_a). В известной диаграмме Раца [Рац, 1973] отношение l_a/l равно 10. Таким образом, проявление масштабного эффекта при испытаниях грунтов разного размера (от образца до массива) будет зависеть от соотношения l_a/l . Из этого вытекает правило, сформулированное М.Н. Гольдштейном: любой неоднородности отвечает некоторая область максимального влияния (разброса), и когда область воздействия фактора совпадает с областью максимального влияния или близка к ней, то величина случайных отклонений в отклике системы также максимальна [Гольдштейн, 1973].

Полученная нами теоретически зависимость $\psi_\Sigma = f(l)$, рассмотренная выше на примере структурной неоднородности плотности на выделенных масштабных уровнях, создает основу для оценки проявления МЭ в дисперсных грунтах для разных свойств и методов испытаний. В частности, ее можно применять для оценки деформационных свойств грунтов при испытаниях на образцах разного размера или при испытаниях в массиве штампами разной площади. В этом случае оценка

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бондарик Г.К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород. М.: Недра, 1971. 272 с.

Боровко Н.Н. Статистический анализ пространственных геологических закономерностей. Л.: Недра, 1971. 174 с.

Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов (основные компоненты грунта и их взаимодействие). М.: Стройиздат, 1973. 375 с.

Дашко Р.Э. Геотехническая диагностика коренных глин Санкт-Петербургского региона (на примере нижнекембрийской глинистой толщи) // Реконструкция городов и геотехническое строительство, 2000. № 2: Интернет-журнал: URL: <http://georec.narod.ru/mag/2000n2/index.htm> (дата обращения: 15.12.2016).

МЭ должна проводиться с учетом соотношения размеров характерной неоднородности и размеров образца (a_i/l_i) или диаметров штампа (a_i/d_i).

Кроме того, рассмотренный нами пример приведен для слоистой неоднородности (тип 1 на рис. 2), однако аналогичным образом можно охарактеризовать учет структурных неоднородностей и других типов (2–7 на рис. 2). При этом основные формулы для оцениваемых параметров (6–10, 13) останутся теми же. Так, например, для неоднородностей типа включений (4, 5, рис. 2) в формуле (13) вместо мощности прослоев (a_i) будет использоваться средний диаметр включений (d) или максимальные и минимальные размеры линз (d_{\min} и d_{\max}). Порядок остальных расчетов для оценки МЭ того или иного свойства и нахождения вида зависимостей $k_{c(св)}=f(\omega)$, $k_{c(св)}=f(\psi)$ или $\psi_\Sigma=f(l)$ будет такой же.

Выводы. 1. Масштабный эффект — фундаментальное свойство любых, в том числе дисперсных, грунтовых массивов, отражающий и обусловленный их пространственной неоднородностью, как структурной, так и вещественно-энергетической.

2. Предложены понятия и новые количественные показатели для оценки проявления масштабного эффекта в дисперсных грунтах по отношению к различным физическим и физико-механическим свойствам, зависящим от строения грунта в массиве.

3. Разработана классификация структурных неоднородностей в массивах дисперсных грунтов, влияющих на проявление в них масштабного эффекта.

4. Охарактеризован метод анализа масштабного эффекта в массивах дисперсных грунтов на основе принципа суперпозиции.

5. Обоснована теоретическая модель учета масштабного эффекта в массивах дисперсных грунтов при оценке различных физических и физико-механических свойств.

Благодарности. Автор благодарит профессоров В.Т. Трофимова и Э.В. Калинина за прочтение рукописи статьи и ценные замечания и предложения, позволившие улучшить работу.

Жукова А.М. Инженерно-геологическое обеспечение расчетов устойчивости зданий и сооружений, возводимых на верхнекотлинских глинах верхнего венда (Санкт-Петербург) // Зап. Горного ин-та. 2012. Т. 195. С. 41–44.

Ильницкая Е.И. Влияние масштабного фактора на прочностные свойства горных пород // Физико-механические свойства, давление и разрушение горных пород. М.: Изд-во АН СССР, 1972. С. 17–24.

Койфман М.И. Главный масштабный эффект в горных породах и углях // Проблемы механизации горных работ. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 39–56.

Койфман М.И. О влиянии размеров на прочность горных пород // Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управ-

ления горным давлением. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 6–14.

Королев В.А., Трофимов В.Т. Инженерная геология: история, методология и номологические основы. М.: КДУ, 2016. 292 с.

Литвинский Г.Г. Уточнение теории масштабного эффекта структурно неоднородных горных массивов // Проблемы гірського тиску. 2009. № 17. С. 1–21.

Литвинский Г.Г. Основы горной геомеханики. Т. 1. Механические свойства горных пород и массивов: Учебник. Алчевск: ДонГТУ, 2012. 312 с.

Рац М.В. Неоднородность горных пород и их физические свойства. М.: Недра, 1968. 107 с.

Рац М.В. Структурные модели в инженерной геологии. М.: Недра, 1973. 216 с.

Страхов Н.М. Основы теории литогенеза: В 3 т. Т. 1. Типы литогенеза и их размещение на поверхности земли. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 212 с.

Фролова Ю.В., Аракчеева Я.А. Влияние условий испытаний на прочность образцов известняка при одноосном сжатии // Инженерная геология. 2012. № 1. С. 56–67.

Чирков С.Е. Исследование влияния масштабного эффекта на прочность углей в условиях различных напряженных состояний: Автореф. канд. дисс. М., 1965. 24 с.

Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Кужель С.В. Масштабный эффект в горных породах. Донецк: АРТ-Пресс, 2004. 132 с.

Широков В.Н., Куринов М.Б., Голубь М.П. К вопросу об испытании грунтов штампами различного диаметра // Инженерные изыскания в строительстве: Мат-лы 10-й Общеросс. конф. изыскательских организаций. М.: Академическая наука, ООО «Геомаркетинг», 2014. С. 49–52.

Поступила в редакцию
01.03.2017