

УДК 624.131:(477)

Агрегатное строение как фактор относительной просадочности лессовидных просадочных грунтов

Т. П. Мокрицкая, К. А. Самойлич

Днепропетровский национальный Университет имени Олеся Гончара, Днепр, Украина, mokritska@i.ua

Доказано влияние агрегатного строения просадочных лессовидных суглинков на значения относительной просадочности и ее деградацию. По результатам стохастического и индуктивного моделирования результатов определения показателей свойств грунтов, отобранных в различных инженерно-геологических обстановках, установлен состав факторов деградации просадочности. Изучены выборки малого и среднего объема. Рассмотрены различные варианты задания независимых переменных. Выполнен анализ показателей содержания различных фаз грунта как факторов относительной просадочности. Доказана зависимость относительной просадочности в момент потери структурной прочности от агрегатного строения, что позволяет получить новое представление о процессах просадки и деградации просадочности. В момент потери структурной прочности происходит разрушение агрегатов, сложенных тонкоглинистыми частицами. На последующих ступенях давления происходит уплотнение «новой» структуры. Во всех случаях гранулометрический состав оказывает влияние на значения относительной просадочности на выборочных ступенях давления. Наибольшее количество моделей при всех способах задания переменных получено для ступени 0,15 МПа. Для большинства просадочных лессовидных суглинков структура грунта на этой ступени давления разрушается. Факторами просадочности также являются содержание частиц размером менее 0,001 мм, суммарное содержание агрегатов, коэффициент свободы частиц размером 0,05 – 0,01 мм.

Ключевые слова: агрегатный состав, относительная просадочность, фактор

Aggregation structure as a factor of relative subsidence loess soil subsidence.

T.P. Mokritskaya, K.A. Samoilych

Dnepropetrovsk National University Oles Gonchar, Dnepropetrovsk, Ukraine, mokritska@i.ua

The development of complex shape and volume of deformation at the time of loss of structural strength, fracture structural relationships may be associated with the destruction of aggregates of fine particles. It proved the effect of the aggregate structure of the collapsible loess loam on the values of relative subsidence and its degradation. According to the results of the stochastic modeling results and the inductive definition of indicators of soil properties selected in a variety of engineering-geological conditions, set the composition of factors subsidence degradation. Studied a sample of small and medium volume. Different variants of the task of the independent variables. The analysis of indicators of the content of the various phases of the soil as a factor relative subsidence. It proved the dependence of relative subsidence at the time of the loss of structural strength of the aggregate structure to provide new insight into the processes of subsidence and subsidence degradation. At the time of the loss of structural strength is the destruction of aggregates composed of particles thin clays. At subsequent stages of pressure occurs seal a “new” structure. In all cases the size distribution affects the relative collapsibility values at selected pressure levels. The greatest number of models for all methods of setting the variables obtained for the level of 0.15 MPa. For most subsiding loess loam soil structure of this pressure stage is destroyed. Factors subsidence are also content of particles smaller than 0.001 mm, the total content of aggregates, freedom factor 0.05 – 0.01 mm size particles.

Keywords: aggregate composition, relative subsidence, factor

Введение. Просадочность – особое свойство просадочных лессовых и лессовидных отложений (Laryonov, A. K., Pryklonskyu, V. A., Anan'ev, V. P., 1959). Развитие сложных деформаций формы и объема в момент потери структурной прочности, разрушения структурных связей может быть связано с разрушением агрегатов тонкодисперсных

частиц. Современные методы физического моделирования процесса уплотнения просадочного грунта в компрессионном приборе не позволяют наблюдать непосредственно поведение грунта в момент потери структурной прочности. Исследованиями (Осурова, М.А., 2007) установлено, что предел структурной прочности не превышает 0,15

МПа. Методы стохастического и индуктивного моделирования (Mokritskaya, T., Korjaschkina, L., 2013) результатов стандартных экспериментов позволили получить модели зависимости относительной просадочности на разных ступенях давления от показателей физического состояния. Анализ полученных результатов подтверждает влияние агрегатного строения грунта на величину просадки в момент потери структурной прочности.

Фактический материал. Исследованы образцы природного состояния, отобранные в окрестностях г. Днепра. Изучены образцы причерномоского, дофиновского, бугского, кайдакского, тясминского, днепровского и завадовского горизонтов, отобранных из обнажений в стенке карьера, на склонах эрозионных систем и непосредственно из зоны влияния жилого многоэтажного дома. Выполнен полный комплекс определений физических и механических свойств, который включал определения гранулометрического состава с тремя разными способами подготовки образцов по методике (Ryashchenko, T. N., Akulova, V. V., 1998) определения просадочных свойств. Общее количество образцов, характеризующих ненарушенные условия и изученных в данной работе, составило 30.

Основные результаты и их обсуждение. При стандартных определениях гранулометрического состава содержание пылеватых и грубоглинистых частиц часто представляется в результатах анализа как их сумма. Выполнение гранулометрического анализа по методике (Ryashchenko, T. N., Akulova, V. V., 1998) позволяет установить содержание агрегатов в грунте и размер слагающих их частиц. Между размерами частиц и их минералогическим и петрографическим составом существует определенная связь. В процессе деградации просадочных свойств, вызванной распадом микроагрегатов в техногенных условиях за счет изменения состава порового раствора, динамических воздействий вероятен избирательный распад агрегатов, что приведет к изменению проницаемости и гидрофильности грунта, его состоянию и способности к резким деформациям.

Выборочные результаты экспериментального определения свойств просадочных лессовидных суглинков различного генезиса были сведены в единую базу данных. Статистический анализ заключался в выполнении описательного статистического анализа, проверке соответствия закона распределения нормальному, оценке симметрич-

ности и однородности данных. Затем выполнялся множественный корреляционный и регрессионный анализ. В работе применен алгоритм обработки данных, описанный ранее (Mokrytskaya, T.P., 2013).

В качестве переменных были выбраны показатели, которые потенциально могут быть факторами потенциальной способности грунта к просадочным деформациям. Выбраны: содержание частиц размером менее 0,002 мм, содержание частиц размерами 0,05 – 0,002 мм, содержание частиц по другим фракциям, суммарное количество агрегатов, коэффициенты свободы фракций F , д. ед.. Коэффициент свободы F , д. ед. показывает соотношение между частицами, не связанными в агрегаты и общим содержанием частиц данной фракции), природная влажность, плотность грунта, пределы пластичности, максимальная молекулярная влагоемкость. Для характеристики физико-механических свойств была определена относительная просадочность с шагом 0,05 МПа в интервале от 0,05 до 0,3 МПа и с шагом 0,1 МПа в интервале 0,1 – 0,6 МПа.

На первом этапе проверялась возможность нахождения моделей связи между значениями относительной просадочности на соответствующей ступени давления (зависимая переменная) и независимыми переменными: содержанием частиц размером менее 0,002 мм ($M 9$) и размером 0,05 – 0,002 мм ($M 11$), суммарным содержанием агрегатов A , значениями природной влажности грунта ω , д. ед.; пределов пластичности ω_L, ω_P , д. ед.; максимальной молекулярной влагоемкости $\omega_{\text{мме}}$, д. ед.; плотности грунта природной влажности ρ , г/см³.

Первичный статистический анализ показал, что выборочные данные симметричны по таким показателям как количество агрегатов A (рис. 1), содержание частиц размером 0,05 – 0,002 мм $M 11$, но неоднородны по значениям коэффициента вариации распределений суммы агрегатов A , природной влажности ω , д. ед.; максимальной молекулярной влагоемкости $\omega_{\text{мме}}$, д. ед. и относительной просадочности на ступенях давления 0,05 и 0,3 МПа. Одномодальным является распределение суммарного содержания агрегатов, поэтому агрегированность, определенная по результатам стандартных определений, – объективный показатель в объеме формации.

Высокие значения эксцесса указывают на закономерные изменения характеристик просадочности и пластичности, содержания пылеватых и глинистых частиц $M 11$, что объясняется неодно-

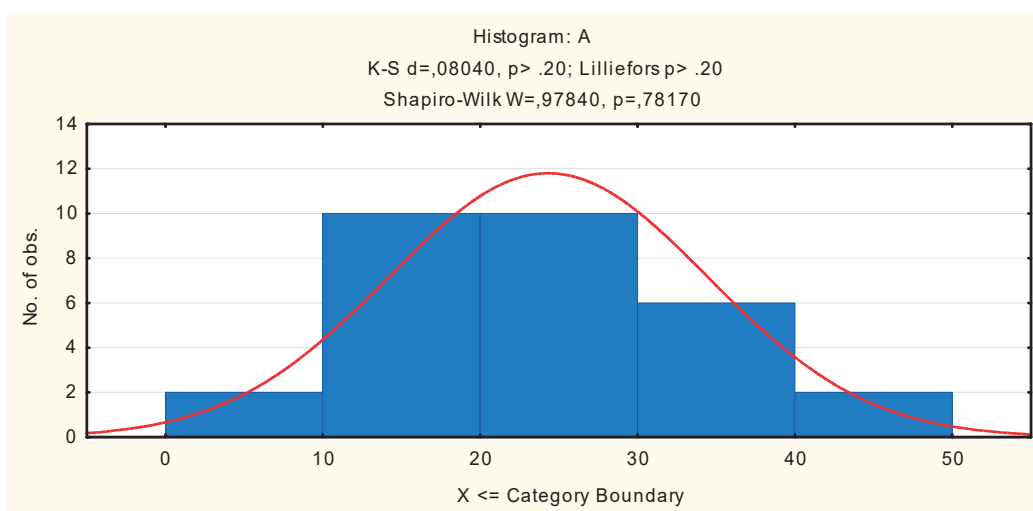


Рис. 1. Гистограмма распределения суммарных содержаний агрегатов в грунтах природного строения

Примечания:

- теоретическая гистограмма;
- экспериментальные частоты.

родностью выборочных данных, так как изучены свойства лессовидных отложений, сформированные в разных палеогеографических обстановках и находящиеся в различных по интенсивности техногенных воздействий обстановках.

Проверка нормального закона распределения выборочных значений дала отрицательный результат, поэтому были рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена (табл. 1). Анализ значений коэффициента корреляции показывает, что физические показатели тесно связаны, что типично для ненарушенных условий (Mokrytska, T. P., 2013).

Таблица 1

Коэффициенты ранговой корреляции показателей физических свойств

	<i>M 9</i>	<i>M 11</i>	<i>A</i>	ω	ω_L	ω_p	$\omega_{\text{ММЕ}}$	ρ
<i>M 9</i>	1,00	-0,69	-0,42	-0,50	-0,57	-0,47	–	–
<i>M 11</i>	-0,69	1,00	0,67	0,73	0,86	0,66	0,43	–
<i>A</i>	-0,42	0,67	1,00	0,78	0,73	–	0,71	0,55
ω	-0,50	0,73	0,78	1,00	0,83	–	0,96	0,68
ω_L	-0,57	0,86	0,73	0,83	1,00	0,53	0,59	–
ω_p	-0,47	0,66	–	–	0,53	1,00	0,50	–
$\omega_{\text{ММЕ}}$	–	0,43	0,71	0,96	0,59	0,50	1,00	0,88
ρ	–	–	0,55	0,68	–	–	0,88	1,00

Примечание к табл. 1-3. 1. В таблице приведены значимые коэффициенты корреляции.

2. Обозначения переменных указаны в тексте.

Значения коэффициента корреляции между показателями физических свойств изменяются от 0,42 до 0,96. Отрицательные знаки коэффициентов устанавливаются только между значениями содержания тонкодисперсных глинистых частиц и показателями агрегированности, природной влажности, пределов пластичности. Из результатов можно сделать вывод о том, что количество тонкоглинистых частиц размером менее 0,002 мм больше в том случае, если суммарное содержание агрегатов меньше, и предположить, что агрегаты состоят из тонкодисперсного материала. Все остальные коэффициенты корреляции имеют положительные знаки. В целом, корреляционная матрица достаточно полная, что характерно для образцов лессового грунта природного состояния. Представление результатов гранулометрического анализа в виде двух содержания фракций 0,05 – 0,002 мм и размером менее 0,002 мм приводит к тому, что не устанавливается корреляция между гранулометрическим составом, плотностью грунта природной влажности и максимальной молекулярной влагоемкостью. Парная корреляция между величинами относительной просадочности на разных ступенях давления и показателями физических свойств проявляется избирательно. К числу коррелирующих с относительной просадочностью переменных можно отнести содержание агрегатов, природную влажность, максимальную молекулярную влагоемкость, плотность грунта (табл. 2). Просадочность лессовых грунтов в об-

Регрессионные модели связи между показателями физических свойств

Уравнение регрессии	AR ²
$A = 0,414 * M11 - 4,105$	0,380
$M11 = 68,649 - 5,4 * M9 + 0,74A$	0,608
$\omega = -0,394 + 0,001 * M11 + 0,262 * \rho$	0,878

Примечания к табл. 3, 4: 1. AR² – уточненное значение коэффициента детерминации уравнения множественной регрессии.

2. Обозначения переменных приведены в тексте.

ласти бытовых (природных) давлений коррелирует с плотностью грунта, в области больших давлений – с количеством свободной и связанной влаги в порах грунта и суммарного количества агрегатов. Значения коэффициентов корреляции увеличиваются до максимальных значений (давление 0,3 и 0,4 МПа) и затем падают (рис. 2). Общий вид зависимости не противоречит закономерностям, установленным ранее (Mokrytskaya, T. P., 2013).

Таблица 2

Коэффициенты ранговой корреляции относительной просадочности и показателей физических свойств

Давление, МПа	A	ω	$\omega_{\text{ММВ}}$	ρ
0,05	–	–	–	0,66
0,1	–	–	–	- 0,75
0,15	–	- 0,62	- 0,65	- 0,74
0,2	- 0,51	- 0,76	- 0,78	- 0,83
0,3	- 0,59	- 0,87	- 0,87	- 0,96
0,4	- 0,65	- 0,92	- 0,90	- 0,94
0,5	- 0,58	- 0,81	- 0,82	- 0,85
0,6	- 0,58	- 0,79	- 0,82	- 0,78

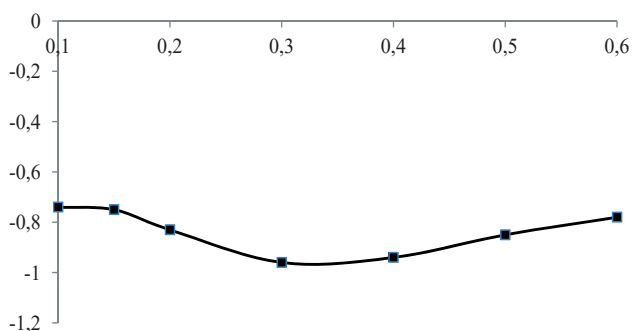


Рис. 2. Коэффициент ранговой корреляции r , д. ед., между относительной просадочностью ϵ_{SL} , д. ед., и плотностью грунта природного сложения в интервале давления 0,1 – 0,6 МПа

Методом пошаговой регрессии были получены уравнения регрессии (табл. 3), связывающие гранулометрический состав и физические свойства лессовидных грунтов, независимые относительно генезиса и степени техногенного воздействия. Уравнения не могут быть использованы для прогноза, так как включены не все переменные, но позволяют сделать вывод о том, что в состав агрегатов входят преимущественно частицы размером 0,05 – 0,002 мм.

Значимые уравнения линейной множественной регрессии между значениями относительной просадочности и показателями физических свойств, содержанием частиц размером 0,05 – 0,002 и менее 0,002 мм получены не были.

Для поиска вида моделей регрессии данные были подразделены на части по принадлежности к обстановкам с различным типом техногенных воздействий: отобранных из склонов и борта карьера (обстановка 1) и из зоны влияния жилого многоэтажного дома (обстановка 2).

Статистика значений свойств лессовидных суглинков показала уменьшение степени неоднородности показателей содержания тонкоглинистых фракций размерами менее 0,001 мм и увеличение неоднородности по показателям относительной просадочности в зоне влияния.

Корреляция между показателями, судя по значениям коэффициента ранговой корреляции, достаточно высокая, но снижается в зоне влияния. Уравнения линейной регрессии относительной просадочности и показателей физических свойств получены выборочно, на ступенях давления, соответствующего дополнительному давлению (табл. 4). В этих уравнениях факторами относительной просадочности выступают плотность грунта, содержание частиц размером менее 0,002 мм. Факторы просадочности на начальных ступенях давления, до структурной прочности, установить по результатам корреляционного и регрессионного анализа не удалось.

Таблица 4

Модели регрессии между относительной просадочностью и показателями физических свойства

Вид модели	AR ²
$W = -0,135 + 1,026 W_{\text{мм}} + 0,06 PL$	0,986
$ESL_{0,3} = 0,328 - 0,212 PL$	0,640
$ESL_{0,4} = 0,336 - 0,006 M8 - 0,249 PL$	0,600
$ESL_{0,5} = 0,394 + 0,007 M8 - 0,237 PL$	0,583

Анализ полученных результатов свидетельствует, что между показателями физических свойств грунта и дисперсностью есть корреляция. В некоторых случаях получены линейные регрессионные модели, связывающие показатели физических свойств, относительную просадочность, дисперсность грунта. Причиной отсутствия точных и адекватных статистических моделей может быть преобладание нелинейных связей между указанными переменными.

Надежным методом описания и прогноза поведения сложных систем является метод группового учета аргументов. В результате индуктивного моделирования возможно построить модели, связывающие относительную просадочность и показатели физических свойств в различных обстановках. Однако ранее данные по грануломе-

трическому анализу не привлекались для решения этой задачи.

Рассматривались различные варианты задания переменных, описывающих состояние кайдакского, причерноморского и дофиновского горизонтов в условиях, близких к природным (обстановка 1). В первом случае в состав независимых переменных были включены традиционно включаемые показатели: содержание частиц размерами менее 0,002 мм; 0,05 – 0,002 мм, суммарное содержание агрегатов, природная влажность, пределы пластичности, плотность грунта, относительная просадочность. Во втором варианте вместо плотности и верхнего предела было включено содержание частиц размером менее 0,001 и частиц размерами 0,002 – 0,001 мм. Состав переменных для третьего и четвертого вариантов указан в таблице 5.

Таблица 5

Коэффициенты при детерминированных членах моделей зависимости относительной просадочности от размера частиц, физических свойств и нормального давления (природные условия)

Вариант набора независимых переменных	Коэффициенты при детерминированных членах индуктивных моделей							
	М 9	М 11	А	ω	ω_L	ω_p	ρ	Р, МПа
1	- 0,001	–	–	0,087	–	0,01	- 0,004	0,05
	- 0,737	0,029	2,36	0,0047	–	–	3,354	0,10
	–	0,005667	0,0274	- 0,1039	–	- 0,066	- 0,023	0,30
2	ω_p	ω	М 8	М 7	А	М11	М9	Р, МПа
	0,234	- 0,002	0,003	- 0,003	0,008	–	–	0,10
	0,074	- 0,065	0,014	0,019	–	–	0,007	0,15
	- 0,329	0,019	–	–	0,001	0,014	–	0,30
3	М 9	А	М 7	М 8	ω	ω_p	ρ	Р, МПа
	–	- 0,001	0,017	–	0,401	2,705	0,175	0,15
	–	- 0,007	0,022	–	0,021	0,063	0,028	0,30
4	А 1	М 2	ω	М 3	ρ	F4	М7	Р, МПа
	–	–	- 0,045	–	–	0,008	–	0,05
	–	–	- 0,041	0,002	0,021	0,003	–	0,10
	- 0,001	0,004	0,058		0,02		0,01	0,15
	–	–	+	+	+	+	+	0,25
	–	+	9,601	- 0,035	- 0,311	0,043	0,022	0,30

Примечание: 1. Модель зависимости относительной просадочности от размера частиц, физических свойств и нормального давления (вариант 1) получена для грунтов одного генезиса.

2. Обозначения переменных указаны в прим. 2. табл. 1.

Модель зависимости значений относительной просадочности от набора переменных (вариант 1) на ступени давления 0,05 МПа является наиболее простой (форм. 1). Все остальные модели громоздки и не приводятся. Результаты моделирования описаны в таблице 5, в которой указаны значения

коэффициентов при линейных членах модели, поддающиеся интерпретации.

Так, количество свободной и гигроскопической влаги, плотность грунта оказываются более важным фактором, чем содержание частиц (форм. 1).

$$\begin{aligned} \varepsilon_{SL_{0,05}} = & -0,004 * \rho + 0,087 * \omega + \\ & + 0,01 \omega_p - 0,003 * MII * \omega - 0,001 * M9 - \\ & - 0,0028 * M9 * \omega + 0,0015 * * M9 * \omega_p \quad (1) \end{aligned}$$

Выводы. По результатам индуктивного моделирования можно сделать выводы о факторах относительной просадочности в диапазонах нагрузок, меньших и больших структурной прочности, при бытовых и дополнительных давлениях.

- Во всех моделях гранулометрический состав оказывает влияние на значения относительной просадочности.

- Наибольшее количество моделей при всех способах задания переменных получено для ступени 0,15 МПа. Для большинства просадочных лессовидных суглинков структура грунта на этой ступени давления разрушается.

- Факторами просадочности также являются содержание частиц размером менее 0,001 мм, суммарное содержание агрегатов, коэффициент свободы частиц размером 0,05 – 0,01 мм.

Библиографические ссылки

Laryonov, A. K., Pryklonsky, V. A., Anan'ev, V. P., 1959. Lessovyye porodi SSSR i ih stroitel'nie

svoystva [Loess USSR and their construction properties] Part 1, L. (*in Russian*).

Mokritskaya, T., Korjaschkina, L., 2013. Degradation in loesses factors and models. Scientific Bulletin of National Mining University. Is. № 4, 5 – 12.

Mokrytskaya, T.P., 2013. Zakonomernosty dehradat-syy svoystv lessovoho massyva v uslovyakh tekhnogeneza [Patterns of degradation properties of loess array technogenesis] Geological Journal. Is. № 1, 73 – 79. (*in Russian*)

Osyova, M.A., 2007. Kompleksnie yssledovaniya strukturnoy prochnosti lessovikh porod Pryobskoho plato: avtoref. na soysk. nauchn. step. kand. heol.-myn. n.: spets:25.00.08 «Ynzhenernaya heolohyya, merzlotovedenye, hruntovedenye» [Integrated studies of the structural strength of loess rocks Ob plateau: Abstract. on soisk. Scien. step. cand. geol.-min. n. : spec: 25.00.08 “Engineering geology, frozen, soil] Barnaul ASTU them. II Polzunova (*in Russian*)

Ryashchenko, T. H., Akulova, V. V., 1998. Hrunti yuha Vostochnoy Sybyry y Monholyy: monografyya [The soils of the south of Eastern Siberia and Mongolia: monograph] Novosibirsk: SB RAS. (*in Russian*)

Поступила в редколлегию 20.10.2016