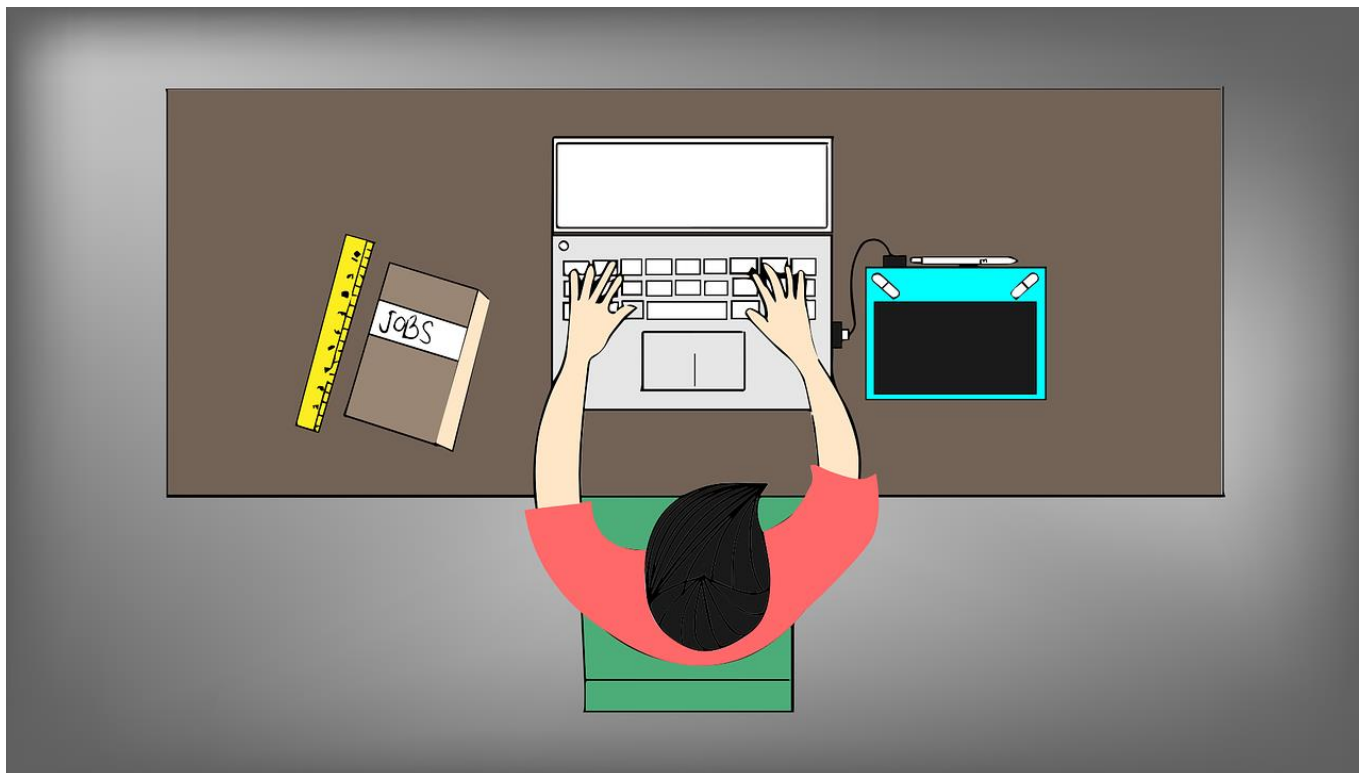


Модуль деформации или индекс компрессии?



В современных условиях, когда большая часть геотехнических расчетов выполняется с использованием программных комплексов, реализующих нелинейные модели механики грунтов (в т.ч. с использованием давления переуплотнения), наряду с параметром модуля деформации в отечественных нормативных документах просто обязательно должен присутствовать параметр индекса/коэффициента компрессии, а также четко определено понятие линии нормального уплотнения. Также обязательно должны присутствовать требования по оценке параметров нарушения природной структуры лабораторных образцов и необходимость выполнения корректировочных процедур (в зависимости от классификации образца по степени нарушения природной структуры). В настоящей статье приводятся достаточно веские аргументы в пользу этого. Также в статье приведены существенные преимущества применения параметров индекса/коэффициента компрессии.

Васенин Владислав Анатольевич

Главный специалист по геотехнике ООО «ПИ Геореконструкция», к.т.н., член Российского общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению, член Международной ассоциации геотехников ISSMGE

Применяемые в инженерной практике параметры сжимаемости грунтовых сред очень тесно связаны с методами расчетов осадок. В нашей стране уже традиционно для оценки параметров сжимаемости применяется величина модуля деформации. Использование такой константы имеет важное преимущество – простота определения и возможность применения к различным грунтовым средам.

Для описания параметров сжимаемости используются линейные, а также нелинейные модели. Основной целью использования нелинейных моделей оценки компрессионной сжимаемости по существу является необходимость аппроксимаций в более широких интервалах напряжений. Здесь традиционно для оценок сжимаемости используются модели, описывающие изменение коэффициента пористости в зависимости от логарифма напряжения $e - \log(\sigma')$, а также использующие степенной закон – зависимость от степени напряжения $e - \sigma'^\beta$.

Можно отметить, что в различных странах инженеры используют, как правило, несколько констант для описания параметров сжимаемости (в зависимости от выбранной математической модели грунта).

Обычно для метода расчета осадок используется метод, предложенный К. Terzaghi [16], который использует полулогарифмический закон. В качестве константы сжимаемости используется **индекс компрессии** (обозначают как $C_{c,e}$):

$$C_{c,e} = \frac{de}{d\log(\sigma')} = \frac{\Delta e}{\Delta\log(\sigma')} \quad (1)$$

В уравнении (1) Δe – изменение коэффициента пористости при приращении логарифма вертикального эффективного напряжения $\Delta\log(\sigma')$ на линии нормального уплотнения.

Другим распространенным параметром для оценки положения линии нормального уплотнения является **коэффициент компрессии** $C_{c,\varepsilon}$. Этот параметр определяет положение линии нормального уплотнения в координатах $\varepsilon - \log(\sigma')$:

$$C_{c,\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{d\log(\sigma')} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\log(\sigma')} \quad (2)$$

Помимо традиционного метода расчета осадок, предложенного К. Terzaghi, в скандинавских странах достаточно широко распространен метод расчета осадок, предложенный N. Janbu и J. Ohde в 1967, 1969 гг. [6-10]. Метод основан на использовании аппроксимации результатов компрессионных испытаний с помощью касательного модуля, выражаемого уравнением:

$$M = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} = m\sigma'_r \left[\frac{\sigma'}{\sigma'_r} \right]^{1-\beta} \quad (3)$$

здесь M – тангенциальный/касательный модуль, σ' – вертикальная компонента эффективных напряжений, σ'_r – референсное значение эффективных напряжений, m – число модуля, β – параметр степенной аппроксимации. Вычисление осадки предполагается интегрированием по глубине сжимаемой толщи вертикальных компонент деформации:

$$\varepsilon = \frac{1}{m\beta} \left[\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_r} \right)^\beta - \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma'_r} \right)^\beta \right], \beta \neq 0 \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \ln \left[\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right) \right], \beta = 0 \quad (5)$$

здесь σ'_0 – начальное напряжение. При этом случай $\beta < 0$ будет оценивать деформации для нормально уплотненных разностей, $\beta > 0$ – случай переуплотненных грунтов, $\beta = 0$ – в случае илистых грунтов.

Использование метода Janbu-Ohde для северных слабых глинистых грунтов позволяет более точно оценивать деформируемость в более широком интервале напряжений.

Принято считать, что методы, типа Janbu-Ohde более точно описывают деформации в зависимости от уровня напряжений. Между тем в последние 30 лет появилось много модификаций полулогарифмического метода для достаточно широких интервалов напряжений [3,5]. Это позволяет использовать константы, определяемые уравнениями (1) и (2) для слабых грунтов с учетом больших интервалов напряжений.

В настоящее время по всему миру на площадках с различными инженерно-геологическими условиями накоплен значительный объем исследований и разработано большое количество корреляционных зависимостей индекса и коэффициентов компрессии от физических свойств грунтов. При чем как относительно простых, так и сложных кросскорреляционных зависимостей, использующих целый ряд параметров.

Как уже указывалось, к сожалению, в отечественных стандартах нет понятия индекса компрессии, и соответственно, понятия линии нормального уплотнения. Хотя это не совсем так, поскольку при определении давления переуплотнения методом А. Casagrande фактически определяется положение линии нормального уплотнения и затем давление переуплотнения [4]. Таким образом, *остается не ясным, почему в российских стандартах при наличии метода определения давления переуплотнения А. Casagrande фактически отсутствует понятие индекса/коэффициента компрессии?*

Помимо накопленного значительного опыта исследований параметра индекса компрессии для различных инженерно-геологических условий, что позволяет выполнить сравнение и оценить основные закономерности параметров сжимаемости грунтовых сред, имеется еще **ряд существенных преимуществ** применения параметров индекса/коэффициента компрессии.

1. Среди несомненных преимуществ использования указанных констант является **возможность выполнения их корректировки с учетом нарушения природной структуры лабораторного образца** [см. [здесь](#)]. Общую коррекцию компрессионной кривой можно выполнить с помощью упрощенной процедуры J.N. Schmertmann [14].

С помощью этой процедуры можно корректировать, соответственно, значение индекса компрессии и величину давления переуплотнения (коэффициент переуплотнения).

Как правило, геотехниками применяется наиболее простой вариант процедуры корректировки, которая состоит из нескольких шагов (рис. 1):

- Из точки с начальным коэффициентом пористости e_0 проводится горизонтальная линия в точку с абсциссой σ'_{v0} .
- Из этой точки можно провести линию с наклоном равном разгрузочному индексу при компрессии C_r . Линия с траекторией разгрузки проводится до точки с известным давлением переуплотнения (оценивается по методу Casagrande).
- Из точки $0,42e_0$ на оси ординат проводится горизонтальная линия до пересечения с компрессионной кривой.
- Соединяя полученные точки, получаем корректированную компрессионную кривую.

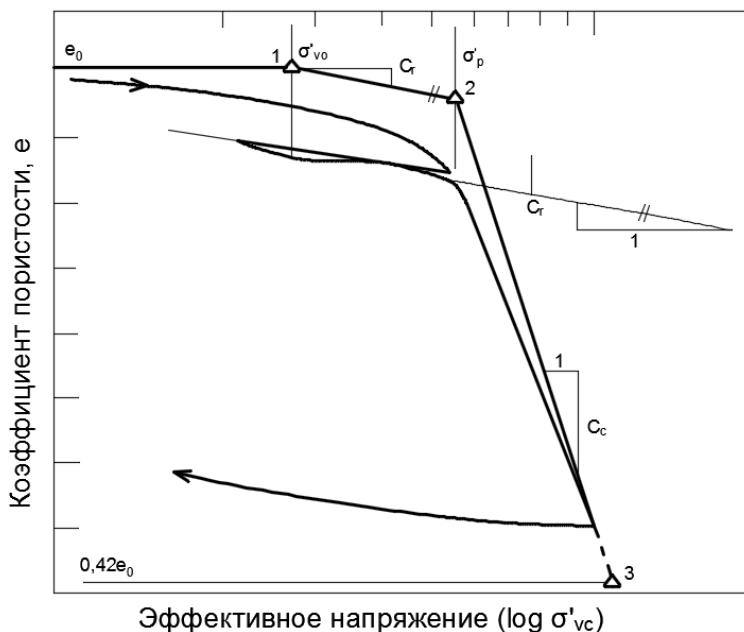


Рис. 1. Процедура коррекции компрессионной кривой J.N. Schmertmann [19]

Коррекция компрессионной кривой позволяет более точно выполнить расчеты осадок с учетом применения метода К. Терцаги.

2. Рассматриваемый параметр применяется в большинстве современных классических моделей грунтовых сред типа Cam-Clay, modified Cam-Clay, которые стали фактически базовыми для выполнения численных геотехнических расчетов и реализованы в различных программных комплексах. Действительно, сейчас невозможно себе представить выполнение численных длительных расчетов осадок зданий и сооружений на слабых основаниях без применения моделей типа Soft soil, Soft soil creep [15,17]. А ведь основным параметрами этих моделей является именно индекс/коэффициент компрессии.

3. Для выполнения геотехнических расчетов необходима подготовка исходных данных и их верификация. Одними из самых простых методов верификации являются оценка различных соотношений индекса компрессии. Так, например, хорошо известны инженерные оценки основных соотношений:

- индекса компрессии и рекомпрессии (Cc/Cr);
- индекса компрессии и вторичной консолидации (Ca/Cc – табл.1.);
- степени скорости деформации для реологических изотаксовых моделей ($(Cc-Cr)/Ca$ [14,16]);
- индекса компрессии и фильтрации (Cc/Ck);
- степени изменения коэффициента фильтрации в зависимости от коэффициента переуплотнения ($(Cc-Cr)/Ck$);

Таблица. Реологические параметры грунтов (G. Mesri, S. Leroueil [2,14])

Материал	Соотношение $\alpha = \frac{C_{ae}}{C_{ce}}$ $= \frac{\Delta \log(\sigma'_p)}{\Delta \log(\dot{\epsilon})}$	Соотношение $\frac{\Delta \sigma'}{\sigma'} / \Delta \log(\dot{\epsilon})$
Сыпучие грунты	0,02±0,01	2,3-7,2
Аргиллиты и сланцы	0,03±0,01	4,7-9,6
Глины и илы	0,04±0,01	7,2-12,2
Органоминеральные грунты	0,05±0,01	9,6-14,8
Торф и жидкий торфяной грунт	0,06±0,01	12,2-17,5

4. Возможность использования при разработке геотехнических решений процедуры SHANSEP (stress history and normalizing engineering soil properties). На основе оценок параметра нормализованной недренированной прочности было предложено соотношение [11]:

$$\left[\frac{c_u}{\dot{\sigma}_v} \right]_{oc} = \left[\frac{c_u}{\dot{\sigma}_v} \right]_{nc} OCR^m = S OCR^m \quad (6)$$

c_u – недренированная сдвиговая прочность; $\dot{\sigma}_v$ – эффективное значение вертикальных напряжений; S – нормализованный параметр недренированной сдвиговой прочности в условиях нормально уплотненного состояния.

Индексы OC, NC в уравнении разделяют переуплотненное и нормально уплотненное состояния. Уравнение (6) устанавливает четкое соотношение нормализованного параметра недренированной сдвиговой прочности между нормально уплотненным и переуплотненным состояниями. Степенной параметр m (выражающий коэффициент пластических деформаций):

$$m \approx \Lambda = \frac{c_c - c_s}{c_c} \quad (7)$$

На основе метода SHANSEP возможна как оценка недренированной прочности (в т.ч. моделирование природного напряженного состояния), так и оценка коэффициента переуплотнения по результатам лабораторных или полевых испытаний.

Очевидно, что в современных условиях, когда большая часть геотехнических расчетов выполняется с использованием программных комплексов, реализующих нелинейные модели механики грунтов (в т.ч. с использованием давления переуплотнения), наряду с параметром модуля деформации в отечественных нормативных документах просто обязательно должен присутствовать параметр индекса/коэффициента компрессии, а также четко определено понятие линии нормального уплотнения. Также обязательно должны присутствовать требования по оценке параметров нарушения природной структуры лабораторных образцов и необходимость выполнения корректировочных процедур (в зависимости от классификации образца по степени нарушения природной структуры). В настоящей статье приводятся достаточно веские аргументы в пользу этого. Поскольку

отсутствие одного из основных параметров сжимаемости в отечественных ГОСТ значительно сужает возможности и точность геотехнических расчетов.

Список литературы

1. Васенин В.А., 2018. Статистическая оценка параметров нарушения природной структуры лабораторных образцов глинистых отложений при инженерно-геологических изысканиях на территории Санкт-Петербурга и окрестностей. Инженерная геология, Том XIII, № 6, с. 48-65, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-6-48-65>.
2. С.Леруэй. 2007. Метод изотак в геотехнике. Реконструкция городов и геотехническое строительство. №11. с.53-88.
3. Burland, J. B. (1990). "On the compressibility and shear strength of natural clays." *Geotechnique*, 40(3), 329–378.
4. Casagrande A., 1936. Determination of the preconsolidation load and its practical significance. *Proceedings of the 1st International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, 1936, Vol. 3, pp. 60–64.
5. Chong, Song-Hun & Santamarina, J. (2016). Soil Compressibility Models for a Wide Stress Range. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 142. 06016003. 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001482.
6. Janbu N., 1963. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *Europäische Baugrundtagung, Wiesbaden. Bull. 1, Geotechnical Division, Norwegian Institute of Technology*, pp. 19-25.
7. Janbu N., 1967. Settlement calculations based on the tangent modulus concept. *Lectures given at the Moscow State University. Three lectures, NTH Publication, Trondheim: NTNU, Bull. 2.*
8. Janbu N., 1985. Soil models in offshore engineering. The 25th Rankine lecture. *Géotechnique*, Vol. 35, No. 3, pp. 241-281.
9. Janbu N., 1998. *Sediment deformations. Norwegian University of Science and Technology, Department of Geotechnical Engineering, Trondheim, Bul. 35.*
10. Ohde J., 1969. Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund. *Bauingenieur*. Vol. 14(1939), No. 33/34, pp. 451-468.
11. Ladd C.C., Foot R., 1974. New design procedure for stability of soft clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 4, pp. 540-615.
12. Mesri, G. Godlewski P.M., 1977. Time and stress-compressibility interrelationship, *J. Geotech. Eng., ASCE*, 103(5), pp. 417–430.
13. Mesri, G., Shahien, M., and Feng, T. W., 1995. Compressibility parameters during primary consolidation. *Proc., Int. Symp. on Compression and Consolidation of Clayey Soils, Vol. 2, Balkema, Rotterdam, Netherlands. pp. 1021–1037.*
14. Schmertmann J.N., 1955. The undisturbed consolidation behavior of clay. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol.120. pp. 1201-1233.
15. Stolle D.F.E., Vermeer P.A., Bonnier P.G., 1999. Consolidation model for a creeping clay. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, No. 4, pp. 754-759.
16. Terzaghi K., Peck R.B. Mesri G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons, New York.
17. Vermeer P.A., Neher H.P., 1999. A soft soil model that accounts for creep. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Proceedings PLAXIS Symposium, Amsterdam, Netherlands, 1999, pp. 249-262.*

