

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ГРУНТОБЕТОНА**

**EXPERIMENTAL DETERMINATION
OF CREEP DEFORMATION OF SOIL-CONCRETE**

В.И. ТРАВУШ, О.А. МАКОВЕЦКИЙ
V.I. TRAVUSH, O.A. MAKOVETSKIY

(Институт ГОРПРОЕКТ,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет)
(Institute GORPROJECT,
Perm National Research Polytechnical University)
E-mail: oleg-mak@inbox.ru

В статье описан опыт проведения экспериментальных лабораторных исследований по моделированию процесса ползучести грунтобетона. Испытания проведены на выбуренных образцах грунтобетона в возрасте твердения 180 и 60 суток. Приведены экспериментальные графики развития деформации ползучести во времени, удельной относительной деформации ползучести (меры ползучести). Обработка экспериментальных данных выполнена на основании наследственной теории старения. Получены корреляционные зависимости деформации ползучести во времени для грунтобетона на различных этапах набора прочности.

The article describes the experience of conducting experimental laboratory research on the modelling of the creep process of soil-concrete. The tests conducted on drill cuttings samples soil-concrete age hardening 180 and 60 days. Experimental graphs of the creep strain in time, the relative specific creep strain (creep). The experimental data is made on the basis of the hereditary theory of aging. Correlation dependencies of creep strain in time for soil-concrete at various stages of age.

Ключевые слова: грунтобетон, ползучесть.

Keywords: soil-concrete, creep.

Реконструкция и техническое перевооружение предприятий текстильной промышленности предъявляют особые требования к ограничению абсолютных и относительных деформаций грунтовых оснований фундаментов технологического оборудования. Особой задачей является стабилизация развития осадок основания во времени. В настоящее время для устройства искусственных оснований с проектируемыми физико-механическими характеристиками используется технология струйной цементации грунта (Jet-grouting), позволяющая получать из природного грунта но-

вый конструкционный материал – грунтобетон. Грунтобетон занимает промежуточное положение между грунтом и традиционным конструкционным бетоном. Прочностные и деформационные характеристики грунтобетона в 10 раз превышают аналогичные характеристики грунта, но при этом они в 10 раз ниже характеристик тяжелого бетона.

В связи с тем что достаточно часто грунтобетонные конструкции используются в геотехнических ситуациях, предусматривающих развитие деформаций ползучести, впервые были проведены лабораторные

эксперименты по определению параметров ползучести грунтобетона.

Построение определяющего соотношения для грунтобетона.

Грунтобетону как композитному материалу, состоящему из грунта и бетона, присущи упругие и вязкие деформации, поэтому вязкоупругие свойства грунтобетона могут быть описаны системами, состоящими из различных комбинаций моделей упругого и вязкого элементов [1]. Наиболее простой моделью, отвечающей этому требованию, является модель Максвелла, в которой последовательно соединены упругий и вязкий элементы (рис. 1-а). При использовании этой модели деформация конструкции состоит из суммы деформаций упругого и вязкого элементов. Недостатком модели является невозможность учесть сдвиговые деформации. В этой модели также нельзя учесть возникающее запаздывание деформаций в грунтобетоне. Независимо Кельвином и Фойгтом для вязкоупругих тел была предложена модель с параллельным соединением упругой пружины и вязкого элемента – поршня (модель Кельвина-Фойгта), которая позволяет учесть запаздывание упругих деформаций (рис. 1-б). Однако эта модель не описывает релаксацию напряжений.

На рис. 1 представлены идеализированные вязкоупругие модели.

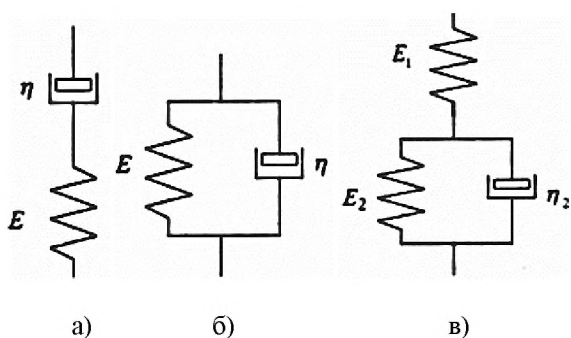


Рис. 1

Для описания грунтобетона наиболее приемлема трехпараметрическая модель Зинера (рис. 1-в), состоящая из последовательно соединенных упругого элемента и модели Фойгта.

Для этой модели напряжения в обеих частях равны, а полная деформация складывается из деформаций составляющих ее частей:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2. \quad (1)$$

Напряжения соответственно будут равны:

$$\sigma = E_1 \varepsilon_1, \quad (2)$$

$$\sigma = 3\eta_2 \dot{\varepsilon}_1 + E_2 \varepsilon_2. \quad (3)$$

Выразим деформацию второй части из (1) и подставим в уравнение (3):

$$\sigma = 3\eta_2(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_1) + E_2(\varepsilon - \varepsilon_1). \quad (4)$$

Из (2) выразим ε_1 и подставим в уравнение (4):

$$\sigma = 3\eta_2\left(\dot{\varepsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{E_1}\right) + E_2\left(\varepsilon - \frac{\sigma}{E_1}\right). \quad (5)$$

После преобразования получаем уравнение:

$$\dot{\sigma} + \lambda\sigma = E(\dot{\varepsilon} + \mu\varepsilon), \quad (6)$$

где $E = E_1$; $\lambda = \frac{E_1 + E_2}{3\eta_2}$; $\mu = \frac{E_2}{3\eta_2}$; E – мгновенный модуль упругости; параметры λ , μ характеризуют время запаздывания системы на изменение нагрузки и деформации.

Соотношение $E^* = E\mu/\lambda$ называется длительным модулем упругости. При длительном нагружении, когда скоростями можно пренебречь, связь между напряжениями и деформациями будет выражаться через длительный модуль упругости.

Процесс ползучести происходит при постоянной величине действующего напряжения σ_0 . В этом случае уравнение (6) имеет вид:

$$\dot{\varepsilon} + \mu\varepsilon = \frac{\lambda}{E}\sigma_0. \quad (7)$$

Решим (7) с учетом того, что в момент времени $t = 0$ начальная деформация составит величину ε_0 :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-\mu t} + \frac{\sigma_0}{E^*} (1 - e^{-\mu t}). \quad (8)$$

С возрастанием времени деформация асимптотически стремится к σ_0/E^* .

Для теоретического описания ползучести грунтобетона используем наследственную теорию старения [1]. Линейный вариант этой теории построен на основе следующих гипотез: рассматривается сплошное однородное и изотропное тело; характеристики деформативности тела (мера ползучести и модуль упругомгновенных деформаций) определяются при стационарных режимах; полные деформации тела складываются из упругомгновенных деформаций, возникающих в момент приложения нагрузки, и деформаций ползучести, развивающихся при длительном воздействии.

Основным достоинством этой теории является возможность использования расчетного аппарата теории сплошной среды для описания процесса деформирования материала и доведения до числового значения задач о напряженно-деформируемом состоянии конструкций.

Для описания зависимостей ползучести стареющего грунтобетона используем функции, предложенные Н.Х. Арутюняном [4]. Определив меру ползучести и функцию напряжения и предполагая наличие подобия между кривыми ползучести, можно получить кривые ползучести для различных значений постоянного напряжения по соотношению:

$$\varepsilon_t(\sigma, t) = C(t)F(\sigma). \quad (9)$$

Под мерой ползучести $C(t)$ понимается деформация ползучести ε_t при единичном напряжении $\sigma = 1$, или $C(t) = \varepsilon_t(\sigma = 1)$, функция напряжений $F(\sigma)$ показывает зависимость "напряжение – асимптотическая деформация ползучести".

Вместе с мерой ползучести используем следующие понятия:

– характеристика ползучести

$$\varphi(t) = E(t)C(t), \quad (10)$$

– характеристика старения

$$K(t, \tau) = \frac{C(t, \tau)}{C(t, 28)}. \quad (11)$$

Экспериментальное определение характеристик модели грунтобетона.

Анализ полученных авторами экспериментальных данных о закономерности твердения и набора прочности грунтобетона во времени и сопоставление их с данными, приведенными в [2], [3], показал, что можно выделить три характерных этапа развития процесса ползучести, связанные с "возрастом (τ)" его нагружения.

1. Интенсивно стареющий грунтобетон: $0 < \tau < 56$ суток; $E = E(\tau)$, $K = K(t, \tau)$ – очертания кривых ползучести зависят от возраста бетона в момент загрузки, $\varphi = \varphi(\tau)$ и обладают максимумом при $\tau > 0$.

2. Стареющий грунтобетон: $56 < \tau < 360$ суток; $E \approx \text{const}$, $K \approx K(\tau)$ – очертания кривых ползучести незначительно зависят от возраста бетона в момент загрузки, $\varphi = \varphi(\tau)$ и монотонно уменьшаются при увеличении τ .

3. Старый грунтобетон: $\tau > 360$ суток; $E \approx \text{const}$, $K \approx \text{const}$, $\varphi = \text{const}$.

На первом этапе проведения экспериментов по определению деформаций ползучести работы проводили со стареющим грунтобетоном в возрасте 180 суток. Образцы-близнецы в количестве 14 штук были подготовлены из кернов, выбуренных из грунтобетонной конструкции, набирающей прочность в естественных грунтовых условиях. Призматические образцы имели высоту 100 мм и сечение 50×50 мм.

Три образца использовали для определения прочности грунтобетона на сжатие, средняя величина которого составила: $R_{сж} = 3,0$ МПа.

Испытания по определению характеристик ползучести грунтобетона проводили на гидравлических нагружающих устройствах конструкции фирмы "Энерпред". Определение вертикальных перемещений выполняли с использованием индикаторов часового типа ИЧ-10.

Три образца были испытаны при давлении 1,5 МПа ($0,5R_{сж}$); три – при давлении 1,95 МПа ($0,657R_{сж}$) и три – при давлении 2,4 МПа ($0,8R_{сж}$). Давление на образец задавалось ступенями по 0,25 МПа в течение 30 мин.

Испытания проходили в течение 32 суток. Снятие отсчетов по приборам проводили, используя базовую схему измерений, в сроки наблюдения t_1 (с момента начального отсчета): 1, 2, 4, 8, 16, 32, сутки, с погрешностью ± 1 ч.

По средним значениям относительных деформаций ползучести построены диаграммы в координатах "относительные деформации ползучести", продолжительность (время) испытаний, сутки, и определены предельные (условно предельные) значения этих деформаций (рис. 2 – экспериментальные графики развития деформаций ползучести при уровне давления $0,5 R_{сж}$; $0,65 R_{сж}$; $0,8 R_{сж}$).

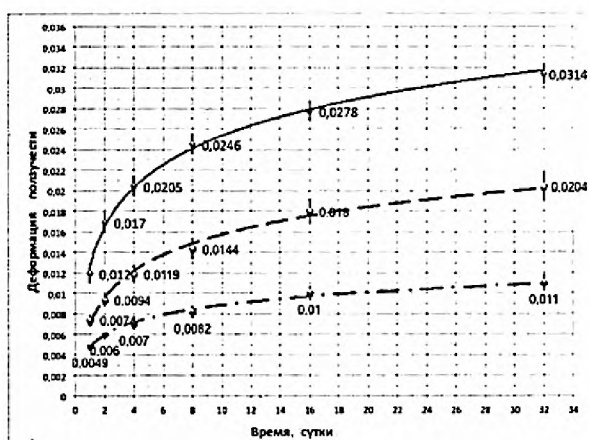


Рис. 2

На втором этапе эксперименты проводили с интенсивно стареющим грунтобетонном в возрасте до 60 суток. Были подготовлены три пары образцов-близнецов с размерами $100 \times 50 \times 50$ мм. Керны для изготовления образцов были отобраны бурением из специально выполненного грунтобетонного элемента в возрасте твердения в грунтовых условиях: 14 суток – прочность на сжатие $R_{сж} = 1,75$ МПа; 28 суток – $R_{сж} = 2,5$ МПа; 56 суток – $R_{сж} = 2,9$ МПа. В каждой паре один из образцов был испытан для определения прочности на сжатие, второй образец загружен давлением $0,65 R_{сж}$ для определения характеристик ползучести, по описанной выше методике. По результатам испытаний образцов были построены статистические графики удельных относительных деформаций ползучести и корреляционный график

предельной меры ползучести от прочности бетона на сжатие (рис. 3).

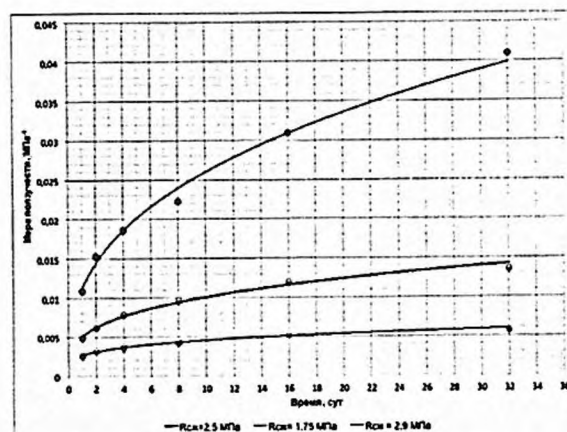


Рис. 3

По экспериментальным значениям предельной деформации ползучести для трех значений действующих сжимающих напряжений был построен и аппроксимирован график функции напряжений.

В программе Excel (MicrosoftOffice) была выполнена аппроксимация изохронной кривой ($\sigma - \epsilon_{сч}$) путем добавления к точечной диаграмме экспериментальных данных линии тренда (рис. 4).



Рис. 4

Кривая аппроксимирована полиномом второй степени ($R^2 = 1$) в виде:

$$F(\sigma_i) = \epsilon_{сч} = 0,004\sigma^2 + 0,0073\sigma - 0,0088. \quad (12)$$

Экспериментальная кривая ползучести при постоянном напряжении $\sigma = 2,4$ МПа аппроксимирована логарифмической функцией ($R^2 = 0,9956$) (рис. 4):

$$\epsilon_{сч}(\sigma_i = \text{const}) = 0,0055 \ln t + 0,0127. \quad (13)$$

Мера ползучести определяется выражением:

$$C(t) = \frac{\varepsilon_{ct}(\sigma_i = \text{const})}{F(\sigma_i)} = 0,1732 \ln t + 0,3998. \quad (14)$$

$$\varepsilon_{ct}(\sigma, t) = C(t)F(\sigma_i) = (0,1732 \ln t + 0,3998)(0,004\sigma^2 + 0,0073\sigma - 0,0088). \quad (15)$$

Анализ экспериментальных данных показывает, что наибольшее влияние на деформацию ползучести оказывает прочность на сжатие. Для описания процесса ползучести интенсивно стареющего грунтобетона в возрасте до 60 суток применен метод нормирования и прогнозирования предельной меры ползучести С.В. Александровского [5].

Корреляционная зависимость предельной меры ползучести от прочности грунтобетона на сжатие аппроксимирована экспоненциальной зависимостью:

$$C(\infty) = 0,7938e^{-1,671R_{сж}}. \quad (16)$$

Функция подобия кривых ползучести с учетом прочности грунтобетона на сжатие имеет вид:

$$K(t - \tau) = \frac{C(t,56)}{C(\infty)} = 0,0034 + \frac{t^{0,234}}{e^{-1,671R_{сж}}}. \quad (17)$$

Общее уравнение деформаций ползучести грунтобетона в этом случае принимает следующий вид:

$$\varepsilon_{ct}(\sigma, t, \tau) = \varepsilon_{ct}(\sigma, t) \left(0,0034 + \frac{t^{0,234}}{e^{-1,671R_{сж}}} \right). \quad (18)$$

ВЫВОДЫ

1. В работе впервые в практике геотехники рассмотрена актуальная в наше время задача экспериментального определения параметров ползучести грунтобетона. Проведены теоретический и экспериментальный анализы существующих реологических моделей вязкоупругого тела и выбрана та модель, которая хорошо согласуется с экспериментальными результатами и имеет достаточно небольшое число параметров (модель Зинера).

Уравнение деформации ползучести при постоянных напряжениях на основании соотношения меры ползучести и функции напряжений принимает вид:

2. Экспериментальные данные позволяют детально изучить процесс развития деформаций ползучести в интенсивно стареющем (возраст 60 суток) и стареющем (возраст 189 суток) грунтобетоне. Полученные корреляционные зависимости величины деформаций ползучести от времени, уровня действующих напряжений и возраста нагружения материала позволяют более точно оценить работу грунтобетонных конструкций на начальных этапах их нагружения и оценить запас их надежности при усилении грунтовых оснований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прокопович И.Е., Зедгендзе В.А. Прикладная теория ползучести. – М.: Стройиздат, 1980.
2. Черняков А.В. Совершенствование теоретических основ и практических методов применения струйной цементации грунтов в конструктивных решениях транспортных сооружений: Дис.... докт. техн. наук. – М., 2011.
3. Засорин М.С. Обоснование технологических параметров струйной цементации глинистых грунтов в подземном строительстве: Дис.... канд. техн. наук. – М., 2011.
4. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. – Л.: Гостехиздат, 1952. С.323.
5. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. – М.: Стройиздат, 1973. С.432.

REFERENCES

1. Prokopovich I.E., Zedgenidze V.A. Prikladnaja teorija polzuchesti. – M.: Strojizdat, 1980.
2. Chernjakov A.V. Sovershenstvovanie teoreticheskikh osnov i prakticheskikh metodov primeneniya strujnoj cementacii gruntov v konstruktivnyh reshenijah transportnyh sooruzhenij: Dis.... dokt. tehn. nauk. – M., 2011.
3. Zasorin M.S. Obosnovanie tehnologicheskikh parametrov strujnoj cementacii glinistyh gruntov v podzemnom stroitel'stve: Dis....kand. tehn. nauk. – M., 2011.

4. Arutjunjan N.H. Nekotorye voprosy teorii polzuchesti. – L.: Gostehizdat, 1952. S.323.

5. Aleksandrovskij S.V. Raschet betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij na izmenenie temperatury i vlazhnosti s uchetom polzuchesti. – M.: Strojizdat, 1973. S.432.

Рекомендована кафедрой строительного производства и геотехники ПНИПУ. Поступила 06.06.17.
