

**ОБ АНАЛИТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ДЕФОРМАЦИЙ
ПОЛЗУЧЕСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЦЕМЕНТОГРУНТНОГО
КОМПОЗИТА С УЧЕТОМ УРОВНЯ СЖИМАЮЩИХ
НАПРЯЖЕНИЙ**

Карапетян К.А., Айроян С.Г., Манукян Е.С.

Ключевые слова: белозем карбонатного состава, цементогрунт, опытный образец, сжимающее напряжение, сопротивление разрушению, деформации ползучести, напряженно- деформированное состояние.

Karapetyan K.A., Hayroyan S.G., Manukyan E.S.

**About analytical description of the creeping deformations development
for elements from soil cement composite taking into account compressive
stresses level**

Keywords: belozem carbonate mixture, soil cement, testing piece, compressive stress, fracture strength, creep strain, mode of deformation

The results of creepage research of cylindrical elements from soil cement subjected to constant compressive stress of different values are discussed.

The Portland cement of the type 40 MPa, belozem as a pulverescent clay sand (belozem carbonate mixture) and ordinary pipeline water are used for the soil cement mixture.

It's shown that analytical dependence between creepage stresses and creepage strains for soil cement elements can be done successfully taking into account known dependences applicable for cement concrete elements.

Utter an opinion that during the practical calculation of the deformation mode for special elements and different parts of soil cement constructions taking into account the material creepage, the above-mentioned analytical dependences can be applicable.

Կարապետյան Կ.Ա., Հայրոյան Ս.Գ., Մանուկյան Ե.Ս

**Սեղմող լարումների մակարդակի հաշվառմամբ ցեմենտագրունտային կոմպոզիտի
վարրերի սողքի դեֆորմացիաների անալիտիկորեն նկարագրման մասին**

Նիմնաբառեր. կարբոնատային կազմի սպիտակահող, ցեմենտագրունտ, փորձանմուշ, սեղմող լարում, դիմադրությունը ըայքայվելուն, լարվածադեֆորմացիոն վիճակ:

Քննարկվում են վարրեր մեծության սեղմող լարումների ազդեցության պայմաններում գրնվող ցեմենտագրունտի գլանական վարրերի սողքի դեֆորմացիաների ուսումնասիրման արդյունքները:

Ցեմենտագրունտային խառնուրդը պարրասպելու համար օգտագործվել են 40 ՄՊա մարկայի պորփրանոցեմենտ, փոշենման սուպեսներով ներկայացված սպիտակահող(կարբոնատային կազմի սպիտակահող) և խողովակաշարի սովորական խմելու ջուր:

Ցույց է փրված, որ ցեմենտագրունտն փարրերի սողքի դեֆորմացիաների և լարումների միջև եղած կապը, ինչպես նաև դրանց սողքի դեֆորմացիաների ժամանակի ընթացքում աճման պրոցեսը անալիտիկորեն նկարագրելու համար կարելի է հիմք ընդունել այն հայտնի առընչությունները, որոնք, սովորաբար օգտագործվում են ցեմենտային բեկոնների մոտ ի հայտ եկող նման երևույթները նկարագրելիս:

Կարծիք է հայտնվում, որ ցեմենտագրունտն կառույցների առանձին փեղամասերի կամ դրանց կրող փարրերի լարվածադեֆորմացիոն վիճակի սողքի հաշվառմամբ պրակտիկ հաշվարկներ իրականացնելիս կարելի է օգտվել վերը նշած անալիտիկ արտահայտություններից:

Обсуждаются результаты исследований ползучести цилиндрических элементов из цементно-песчаного композита, находящихся под воздействием постоянных сжимающих напряжений различных уровней.

Для приготовления цементно-песчаной смеси использовались портландцемент марки 40 МПа, белозем, представленный пилеватыми супесями (белозем карбонатного состава) и обычная трубопроводная вода.

Показано, что аналитическое описание связи между напряжениями и деформациями ползучести, а также процесса развития во времени деформации ползучести элементов из цементно-песчаного композита довольно успешно можно осуществлять принимая за основу известные зависимости, используемые с целью описания таких же явлений, проявляющихся у элементов из цементных бетонов.

Высказывается мнение, что при осуществлении практических расчетов напряженно - деформированного состояния ответственных элементов и отдельных частей цементно-песчаных сооружений с учетом ползучести материала можно пользоваться упомянутыми выше аналитическими зависимостями.

Введение

Тенденция возрастания из года в год объемов применения цементно-песчаного композита с целью строения отдельных ответственных элементов и частей малоэтажных зданий и сооружений [1, 2 и др] на первый план выдвигает задачу оптимального их проектирования. Успешному решению отмеченной задачи в большой мере может способствовать обладание четким представлением о механическом, в том числе и реологическом, поведении материала в условиях, близких к эксплуатационным.

В работе [3] приводятся данные, полученные в результате экспериментального исследования деформаций усадки и ползучести при сжатии опытных цилиндрических образцов, изготовленных из цементно-песчаного композита на основе белозема карбонатного состава. В этих исследованиях величина сжимающего напряжения для нагруженных образцов составляла $0.4R$ (R - предел сопротивления разрушению опытных образцов).

В указанной работе было показано, что цементно-песчаный композит обладает существенно заниженной сопротивляемостью деформированию, как объемному (деформации усадки), так и в направлении действия нагрузки, по сравнению с аналогичными характеристиками, установленными для других строительных материалов на основе цементного вяжущего, а в частности, для бетона на литоидной пемзе.

В настоящей работе приводятся и обсуждаются результаты исследования ползучести элементов из цементно-песчаного композита на основе белоземов карбонатного состава.

ва, находящихся под постоянно действующей сжимающей нагрузкой различного уровня. Сделана попытка аналитического описания процесса развития во времени деформаций ползучести этих элементов.

Методика проведения экспериментов.

Экспериментальная часть исследований была осуществлена с применением изготовленных из цементогрунтного композита цилиндрических элементов опытных образцов, размеры которых соответствуют принятым стандартами величинам (диаметр образцов составляет 5 см, а высота-20 см) [4].

Был использован цементогрунт на основе белоземов, взятых с участков, соседствующих территории Института физики, находящегося в жилом районе Ачалняк г. Еревана. На основе данных проведенных соответствующих анализов (анализы химического и соляного содержания материала, просеянного через сито №2) было установлено, что использованные белоземы представлены пылеватыми супесями (белозем карбонатного состава). В качестве связующего компонента использовался портландцемент марки 40, производимый Араратским цементным заводом (Республика Армения). Для получения мокрой смеси цементогрунта применялась обычная трубопроводная вода. Опытные образцы, полученные способом прямого прессования, освобождались из форм через 14 сут. после изготовления. В дальнейшем, до момента проведения экспериментальных исследований в возрасте (время, отсчитываемое после изготовления) 42 сут., они находились во влажных опилках.



Фиг. 1: Цементогрунтный образец, установленный на испытательной машине

Экспериментальные исследования ползучести цементогрунтных цилиндрических элементов были осуществлены на пружинных силовых установках (фиг.2).



Фиг. 2: Силовая установка для испытания цементогрунтных образцов на длительное сжатие в рабочем состоянии

До проведения длительных экспериментов на испытательной машине был определен предел сопротивления разрушению R опытных образцов на сжатие ($R = 7.5$ МПа) при скорости нагружения 3мм/мин (фиг.1). Опытные образцы нагружались постоянно действующей сжимающей нагрузкой, соответствующей 0.2, 0.4, 0.6, 0.7 и 0.8 σ/R (σ - сжимающее напряжение, R - предел сопротивления разрушению образцов). В каждом из указанных случаев испытанию подвергались по 3 образца близнеца и на таком же количестве образцов близнецов измерялись усадочные деформации. За развитием во времени деформаций нагруженных и ненагруженных образцов следили в течение 158 дней. В этот промежуток времени следили также за изменением влажности W лабораторного помещения, где температура колебалась в пределах 22 ± 50 С. Определение, на основе взятых отсчетов, величин усадочных деформаций осуществлялось по методу, изложенному в [5], а деформации ползучести – согласно соответствующим стандартам [6].

Обсуждение полученных результатов

До перехода к обсуждению поставленных здесь задач отметим, что результаты исследований ползучести цементогрунтных цилиндрических элементов, нагруженных сжимающей нагрузкой, соответствующей $0.4R$, подробно обсуждались в упомянутой выше работе [3].

На фиг.3 метками показаны экспериментальные данные ползучести цементогрунтных элементов, находящихся под воздействием сжимающего напряжения различного уровня (3.а). Приведена также кривая изменения во времени влажности W лабораторного помещения в период проведения экспериментов (3.б).

Из данных фиг.3.а следует, что с момента нахождения под нагрузкой у опытных образцов наблюдается развитие с начальной высокой и дальнейшей колебательно затухающей скоростью деформации ползучести. Указанное деформационное поведение образцов оказывается тем интенсивным, чем больше величина сжимающей нагрузки, под воздействием которой они находятся.

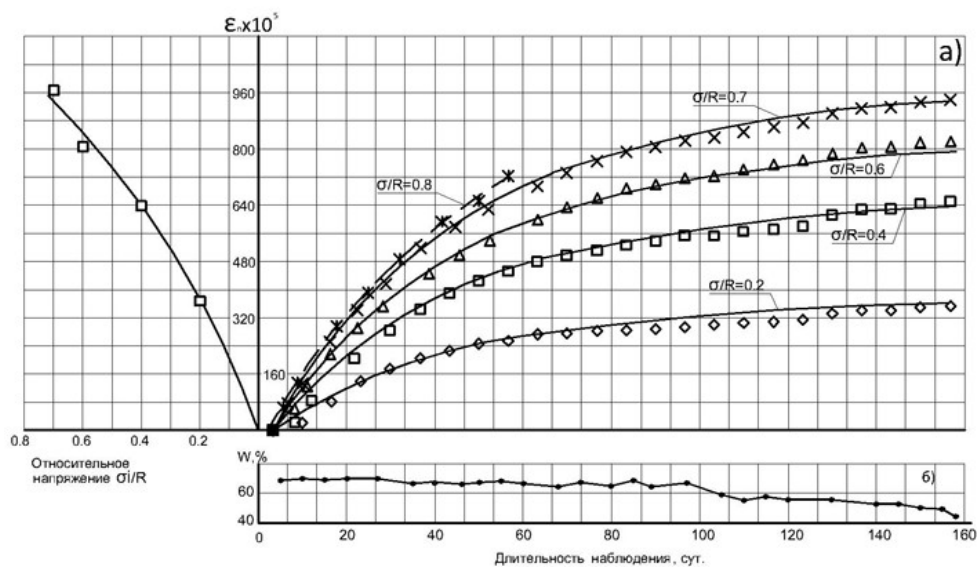
Сравнение данных фиг.3.а показывает, что процесс развития во времени деформации ползучести у цементогрунтных элементов, нагруженных сжимающей нагрузкой, соответствующей $\sigma = 0.2R, 0.4R, 0.6R, 0.7R$, носит практически один и тот же характер, что свидетельствует о существовании некоторого подобия в деформационном поведении этих элементов. Сказанное заключается в том, что отмеченный процесс с момента наблюдений условно можно разделить на 3 этапа, а именно:

I- развитие деформаций ползучести с начальной высокой и постепенно падающей скоростью,

II- развитие этих деформаций с переменной скоростью.

III- практически установившееся состояние с некоторыми колебаниями величины деформаций ползучести.

Из данных фиг.3.а также замечаем, что промежутки времени, соответствующие упомянутым выше этапам, во многом зависят от уровня сжимающего напряжения, действующего на цементогрунтный элемент. Сказанное особенно относится к первому этапу процесса развития деформаций ползучести во времени, начиная с момента начала проведения наблюдений.



Фиг. 3: Экспериментальные данные и теоретически построенные кривые ползучести цементогрунтных элементов (а).

Кривая изменения во времени влажности лабораторного помещения (б)

Что же касается деформации ползучести цементогрунтных элементов, находящихся под сжимающим напряжением величиной $0.8R$, то, как следует из данных фиг.3.а, они сразу после нагружения развиваются с существенно возрастающей и практически незатухающей скоростью. В результате было зафиксировано разрушение этих элементов, происходящее примерно через 60 сут. после нахождения их под нагрузкой.

Проведенные измерения и расчеты показали, что изменение величины потери влаги цементогрунтными элементами после завершения длительных экспериментов в зависимости от уровня действующего на них сжимающего напряжения не подчиняется какой-либо закономерности. Значение этой характеристики колеблется в пределах 12.1 – 14.8%. Значение аналогичной характеристики, определенное для ненагруженных элементов-близнецов колеблется в пределах 12.3 – 14.1%. Сказанное указывает на то, что в условиях с невысокой влажностью среды ($W \leq 75\%$, [7]) наличие длительно действующей сжимающей нагрузки практически не влияет на режим высыхания элементов из цементогрунтного композита на основе белоземов карбонатного состава.

В работе [3] отмечается, что, поскольку в составах цементогрунта в качестве связующего компонента обычно используется цемент, в результате схватывания и твердения которого образуются композиты на его основе, то при комментировании данных о ползучести цементогрунта можно считать допустимым принятие за основу существующих представлений о явлении ползучести, наблюдаемом у отмеченных композитов – например, бетонов.

Исходя из сказанного, ниже рассматривается вопрос аналитического описания процесса развития во времени деформаций ползучести цементогрунтных элементов, находящихся под воздействием постоянной сжимающей нагрузки, соответствующей уровню $0.2R$, $0.4R$, $0.6R$ и $0.7R$.

Известно, что для аналитического описания развития во времени t деформации ползучести $\varepsilon_{\text{П}}$ бетонов при различных уровнях сжимающего напряжения σ используется следующая зависимость [8]:

$$\varepsilon_{\text{П}}(t, \sigma) = \varphi(\sigma)F(t), \quad (1)$$

где $\varphi(\sigma)$ - функция напряжения, $F(t)$ - аналитическое выражение кривой ползучести при единичном значении напряжения. Относительно указанной последней функции отметим, что в разных теориях ползучести материалов для функции $F(t)$, фигурирующей в (1), принимаются и другие обозначения. Например, в общеизвестной теории ползучести [9], широко применяемой в практике проведения экспериментальных исследований ползучести стареющих материалов, обладающих ярко выраженными упругоползучими свойствами, функция $F(t)$ обозначается через $C(t, \tau)$, где τ возраст материала к моменту проведения исследований.

В упомянутой выше работе [8] показано, что для сжимающих напряжений, не превышающих $0.8 - 0.85 R$, кривые ползучести бетонов при одном и том же возрасте материала не являются афинно подобными, однако, они имеют весь массходный характер. Поэтому, по мнению автора этой работы, при аналитическом описании экспериментальных данных замена предпосылки подобия кривых ползучести другой, более точной, но более сложной, вряд ли целесообразна. Одновременно им отмечается, что в этом случае следует с максимально возможной

точностью подобрать функцию $\varphi(\sigma)$ [8].

Известно, что аналитическое выражение функции $C(t, \tau)$, фигурирующей в указанной выше теории ползучести [9], имеет следующий вид:

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau)f(t - \tau), \quad (2)$$

где τ -возраст материала к моменту нагружения, $t - \tau$ - длительность нахождения материала под нагрузкой, $\varphi(\tau)$ - функция старения, $f(t - \tau)$ - функция длительности нахождения материала под нагрузкой.

Согласно работе [9], для функции $f(t - \tau)$ можно принять следующую зависимость:

$$f(t - \tau) = 1 - e^{-\gamma(t-\tau)}, \quad (3)$$

где γ -параметр, определяемый на основе опытных данных.

Следует отметить, что выражение (3) достаточно успешно используется в практике проведения экспериментальных исследований ползучести стареющих материалов, в том числе и цементных бетонов. Одновременно автор работы [9] высказывает мнение, что для более корректного аналитического описания опытных данных ползучести может оказаться необходимым использовать иное представление функции $f(t - \tau)$.

В результате проведенных широкомасштабных исследований в работе [10] была показана целесообразность представления выражения (3) в виде

$$f(t - \tau) = 1 - 0.5[e^{-\gamma_1(t-\tau)} + e^{-\gamma_2(t-\tau)}]. \quad (4)$$

Преимущество такого представления функции $f(t - \tau)$ заключается в том, что она оказывается более гибкой при описании данных ползучести материала, особенно в начальный период экспериментов.

Как известно, у цементных бетонов величина относительного напряжения σ/R , при котором связь между напряжениями и деформациями ползучести близка к линейной, существенным образом зависит от возраста материала τ к моменту нагружения [8,11,12]. Экспериментальное установление пределов существования указанной связи весьма важно. Оно необходимо для реальной оценки напряженно-деформированного состояния конструкций как в этапе проектирования, так и в период их эксплуатации. На основе анализа данных, полученных в результате проведенных широкомасштабных исследований, в работе [11] показано, что для цементных бетонов указанная выше связь вплоть до уровня напряжения $\sigma/R = 0.95$, в целом, строго нелинейна, которая, однако, может быть разделена на два линейных участка. При этом величина относительного напряжения σ/R , при котором имеет место переход от первого линейного участка ко второму, существенным образом зависит от возраста материала τ к моменту нагружения. А именно, при $\tau \leq 7$ дней указанная величина $\sigma/R = 0.75$, а в остальных случаях - 0.6.

В работе [13] показано, что значение σ/R , при котором связь между напряжениями и деформациями ползучести можно принять линейной, в случае старого бетона на природных пористых заполнителях ($\tau = 18$ лет) следует принять равным 0.45 - 0.5.

На основе представленных на левом поле фиг.3.а. результатов проведенных

прямых измерений можно заключить, что значение относительного напряжения σ/R , при котором имеет место линейная связь между напряжениями и деформациями ползучести элементов из цементогрунтового композита на основе белоземов карбонатного состава, следует принять равным 0.4. Как известно, для аналитического описания экспериментальных зависимостей $\varepsilon_{\text{П}} = f(\sigma)$, начальные участки которых можно считать близкими к прямолинейным, часто применяют функцию вида

$$\varepsilon_{\text{П}} = \alpha\sigma + \beta\sigma^n, \quad (5)$$

где α, β, n - параметры, определяемые из экспериментов.

Следует отметить, что в практике проведения исследований ползучести бетонов, иногда, вместо абсолютного значения напряжения σ , фигурирующего в (5), используется его относительное значение σ/R , что целесообразно для устранения противоречий, возникающих в размерностях опытных параметров α и β . В этом случае формула (5) заменяется следующей зависимостью [13].

$$\varepsilon_{\text{П}} = \alpha \frac{\sigma}{R} + \beta \left(\frac{\sigma}{R} \right)^n, \quad (6)$$

Используя формулу (1) и учитывая изложенное выше для аналитического описания развития во времени деформаций ползучести элементов из цементогрунтового композита нами была принята следующая зависимость:

$$\varepsilon_{\text{П}}(t, \tau) = \left[\alpha \frac{\sigma}{R} + \beta \left(\frac{\sigma}{R} \right)^n \right] \left[1 - 0.5 \left(e^{-\gamma_1(t-\tau)} + e^{-\gamma_2(t-\tau)} \right) \right] \quad (7)$$

На левом поле фиг.3.а сплошной линией показана кривая зависимости $\varepsilon_{\text{П}}$ от σ/R , построенная согласно (6), а на правом поле этой фигуры - кривые ползучести цементогрунтных элементов, построенные согласно (7) при $\tau = 42$. Для опытных параметров аппроксимации в (6) и (7) были приняты следующие значения: $\alpha \approx 1320$, $\beta = 140$, $n = 5$, $\gamma_1 = 0.025(1/\text{сут})$, $\gamma_2 = 0.04(1/\text{сут})$.

Как можно заключить из данных фиг.3.а аппроксимации вида (6) и (7) вполне приемлемы для аналитического описания экспериментальной зависимости $\varepsilon_{\text{П}} - \sigma/R$ и данных развития во времени ползучести элементов из цементогрунтового композита на основе белоземов карбонатного состава, находящихся под воздействием сжимающих напряжений различных уровней.

Изложенное выше указывает на то, что при проведении практических расчетов напряженно-деформированного состояния ответственных элементов и частей цементогрунтных сооружений с учетом ползучести материала можно пользоваться зависимостями типа (6) и (7).

Литература

- [1] Promis G., Ferrier E., Hamelin P. Effect of external FAR retrofitting on reinforced concrete columns for seismic strengthening// Composite structures. 2009. V.88, №3. Pp.367-379

- [2] Рамзанов А.А., Бадаев А.Д., Манин Е.Б., Алнашин Т.А. Грунтобетон в закладке фундаментов. Строительство уникальных зданий и сооружений. 3(30). 2015. С.111-128.
- [3] K.A Karapetyan, S.H. Hayroyan, E.S. Manukyan. Deformability during short-term loading, shrinkage and creep of a cementitious soil composite on the basis of belozems of carbonate. Journal of Physics: Conf. Series 1474(2020)012019
- [4] ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. М.: Стандартинформ. 2019.15.с
- [5] Лещинский М.Ю. Испытание бетона, Справочное пособие.-М.:Стройиздат. 1980. 360с.
- [6] Бетоны. Методы испытаний. ГОСТ 24452-80. ГОСТ 24544-81.-М.:Гос.Комитет СССР по делам строительства.1981.54с.
- [7] СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции /Госстрой России.-М.:ГУП.2002-76с.
- [8] Васильев П.И. Связь между напряжениями и деформациями в бетоне при сжатии с учетом времени. //Изв.ВНИИГ.1951.Т.45.С.78-92.
- [9] Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.-Л.:ГИЗ технико-теоретической литературы.1952.с.323.
- [10] Карапетян К.С. Влияние масштабного фактора на ползучесть бетона при сжатии и растяжении. Докл.АН Арм. ССР.1964.Т.38.№3.С.135-142.
- [11] Карапетян К.С. Влияние старения бетона на зависимость между напряжениями и деформациями ползучести. //Изв.АН Арм. ССР. Серия физ.-мат. наук. 1959. Т.12. №4. С.13-20
- [12] Улицкий Н.Н. Ползучесть бетона. Киев-Львов:Гостехиздат Украины. 1948.136с.
- [13] Карапетян К.А. Ползучесть весьма старого бетона при постоянных и ступенчатовозрастающих нагрузках. //Изв.НАН Армении. Механика. 1999. Т.52. №4. С.68-74.

Сведения об авторе

Карапетян К. А. - д.т.н., зав. лаб. экспериментальных исследований Института механики НАН Армении, **Тел.:** (+374 10) 524852 , **Email:** koryan@mechins.sci.am

Айроян С.Г. - ЕГУ, д.г.н., профессор,
Тел.: (+374 93) 226210 , **Email:** koryan@mechins.sci.am

Манукян Е.С. - Н.с. Института механики НАН Армении,
Тел.: (+374 99) 500755 , **Email:** exushe.manukyan@gmail.com

Поступила в редакцию 16.04.2021