

Ռ.Ա. ԱԹԱԲԵԿՅԱՆ

ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՎՐԱ ՍԵՅՍՄԻԿ ԲԵՌՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ
ԺԱՄԱՆԱԿԱԿԻՑ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇ ՀԱՐՅԵՐ

Համառոտ դիտարկվում է շենքերի վրա սեյսմիկ բեռների որոշման սպեկտրալ տեսության զարգացման պատմությունը: Ցույց է տված այդ տեսության պայմանականությունն ու մոտավորությունը՝ պայմանավորված մի շարք ընդունելություններով, և հաշվարկի նոր մեթոդի ստեղծման անհրաժեշտությունը:

Առանցքային բառեր. երկրաշարժ, սեյսմիկ բեռ, հակազդման սպեկտր, դինամիկության գործակից, գրունտների արագացում, սեփական տատանումների պարբերություններ:

R.A. ATABEKYAN

SOME ISSUES ON THE MODERN SPECTRAL THEORY FOR
DETERMINING THE SEISMIC LOADS ON STRUCTURES

The history of the development of the spectral theory for determining the seismic loads on buildings, and its modern state is considered. The conventionality and approximateness of this theory, due to a number of controversial assumptions, as well as the necessity of creating a new design procedure are shown.

Keywords: earthquake, seismic load, response spectrum, dynamic factor, ground acceleration, periods of free oscillations.

УДК 539.376

Տ.Գ. ԵՏԱՅԱՆ, Դ.Գ. ԿԼԵԿՉՅԱՆ

ОСНОВНЫЕ РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА
(Ванадзор)

Модуль деформации E как основная физико-механическая характеристика бетона является функцией как от состава и возраста бетона, так и от действующих напряжений. Связь напряжение–деформация выражается через модуль деформации. Выведена аналитическая функция $E(\sigma)$, позволяющая найти формулу для функции напряжения $f(\sigma)$.

Лабораторными экспериментами определены входящие в формулу $f(\sigma)$ параметры нелинейности. Получена связь между напряжениями и деформациями для бетонов как вязкоупругопластической наследственно стареющей среды.

Ключевые слова: вязкоупругопластическая среда, модуль деформации, функция напряжения, параметр нелинейности, мера ползучести, физико-механические свойства бетона.

Как показывают результаты многочисленных исследований, зависимость между нормальными напряжениями σ и вызванными ими относительными деформациями ε в бетоне, строго говоря, имеет нелинейный характер при любых

значениях напряжений. Это объясняется тем, что связывающий σ и ε физический параметр бетона E как модуль деформации не является независимой от напряженного состояния среды величиной, а представляет собой функцию не только от состава бетона, но и от величин действующих в элементе напряжений σ , т.е. $E = E(\sigma)$. Для представления связи $\varepsilon - \sigma$ необходимо иметь вид аналитической зависимости $E(\sigma)$. На рисунке показан график функции $\varepsilon(\sigma)$.

На этом же рисунке показаны три подхода к определению E , выражающие физико-механическое состояние среды:

а) модуль упругости E_0 , величина которого определяется тангенсом угла α_0 (см. рис.):

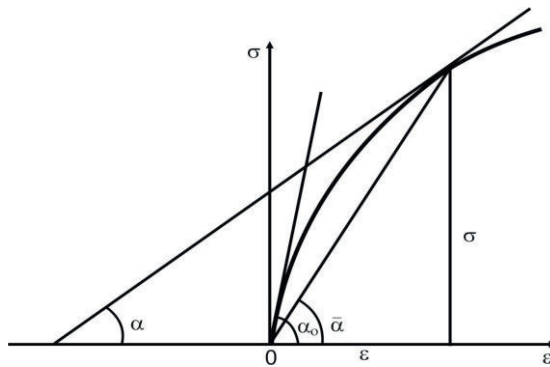


Рис. К определению коэффициентов деформации бетона

$$E_0 = \operatorname{tg} \alpha_0. \quad (1)$$

Величина E_0 обозначает исключительно физико-механическое свойство бетона и не зависит от σ , поскольку она определяется при значении напряжения, близком к нулю;

б) модуль деформации E , который определяется тангенсом угла α и является угловым коэффициентом кривой $\varepsilon(\sigma)$:

$$E = \operatorname{tg} \alpha = 1 / \varepsilon'(\sigma); \quad (2)$$

в) приведенный модуль деформации $\bar{E}$, который определяется тангенсом угла $\bar{\alpha}$ ($\bar{\alpha}$ образуется секущей кривой $\varepsilon(\sigma)$ и осью ε):

$$\bar{E} = \operatorname{tg} \bar{\alpha}. \quad (3)$$

Очевидно, что все три модуля обусловлены зависимостью функции $\varepsilon(\sigma)$. Однако будет более правильным обратное утверждение: вид функции $\varepsilon(\sigma)$ зависит от модуля, являющегося физико-механической характеристикой материала. В частности, если известна аналитическая зависимость $\bar{E}(\sigma)$, то связь $\varepsilon - \sigma$ выразится формулой

$$\varepsilon = \sigma / \bar{E}(\sigma). \quad (4)$$

Формула (4) показывает, что для представления связи $\varepsilon - \sigma$ необходимо иметь вид аналитической зависимости $\bar{E}(\sigma)$. Для решения этой проблемы нами было проведено масштабное экспериментальное исследование различных бетонов, полученных по трем разным технологиям: традиционным способом вибрирования, методом нагнетания раствора, методом термopаровой обработки. Были использованы следующие виды бетонов: тяжелый бетон на базальтовом щебне и песке, бетон из базальтового щебня и песка литоидной пемзы, литоидный пемзобетон, вулканический шлакобетон, туфобетон. Обработка результатов этих экспериментов позволила представить $\bar{E}(\sigma)$ по эмпирической формуле

$$\bar{E}(\sigma) = E_0 [1 + \beta(\sigma^n - 1)]^{-1}, \quad (5)$$

где β и n являются параметрами нелинейности, величина которых зависит от вида бетона. Для испытанных нами бетонов значение n можно принять равным $n = 2$. Эмпирическая формула для β предлагается в виде

$$\beta = \frac{660 - R}{(R - 60)R^2}, \quad (6)$$

где в качестве меры измерения предела прочности бетона R принимается кг.сила/см^2 . Кроме того, необходимо иметь в виду, что формула (6) приемлема для бетонов с пределом прочности

$$R = 100 \dots 600 \text{ кг.сила/см}^2.$$

Ниже приведены некоторые результаты лабораторных исследований, на основе которых получена формула (6).

1. *Тяжелый бетон на базальтовом щебне и песке.* Относительный состав бетона 1:1,63:2,34 (в/ц=0,487), что количественно соответствует: портландцемент М400 – 410 кг, песок – 670 кг, базальтовый щебень – 960 кг, вода – 200 л.

Приведем усредненные результаты испытаний трех призматических образцов, полученных методом нагнетания раствора под давлением. Размер образ-

цов: $100 \times 100 \times 400$ мм. Распалубка призм происходила в возрасте бетона 7 дней. Испытания проводились в возрасте $\tau_0 = 28$ дней. Деформации измерялись индикаторами механического действия, обеспечивающими точность порядка 0,001 мм. Индикаторы монтировались на двух противоположных гранях призм на базе 300 мм. Деформации фиксировались при напряжениях $\sigma = 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300$ кг.сила/см². Предел призмной прочности в среднем равнялся: $R(28) = 304$ кг.сила/см². Среднее значение модуля упругости: $E_0(28) = 2,9 \cdot 10^5$ кг.сила/см². Численное значение величины β будет

$$\beta = \frac{660 - 304}{(304 - 60)304^2} = 1,6 \cdot 10^{-5}. \quad (7)$$

Средние экспериментальные значения $\beta_i(\sigma_i)$ и процентное отклонение от $\beta = 1,6 \cdot 10^{-5}$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

$\beta_i(\sigma_i)$ для тяжелого бетона

σ	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
$\varepsilon \cdot 10^5$	10,5	21,9	35,1	50,9	70,3	94,2	123,5	159,0	201,7	252,4
$\beta_i \cdot 10^5$	1,63	1,58	1,56	1,62	1,73	1,64	1,57	1,56	1,61	1,61
Разн. %	1,9	1,3	2,5	1,3	8,1	2,5	1,9	2,5	0,6	0,6

2. Бетон на базальтовом щебне и песке литоидной пемзы. Состав бетона: 350 кг, цемент М-400, вода 231 л, песок – 563 кг, щебень 1126 кг. Деформации фиксировались при напряжениях $\sigma = 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200$ кг.сила/см². Предел призмной прочности в среднем равнялся: $R(28) = 208$ кг.сила/см². Среднее значение модуля упругости: $E_0(28) = 2,49 \cdot 10^5$ кг.сила/см². Значение β :

$$\beta = \frac{660 - 208}{(208 - 60)208^2} = 7,06 \times 10^{-5}. \quad (8)$$

Средние экспериментальные значения $\beta_i(\sigma_i)$ и процентное отклонение от $\beta = 7,06 \cdot 10^{-5}$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

$\beta_i(\sigma_i)$ для бетона на базальтовом щебне и песке литоидной пемзы

σ	25	50	75	100	125	150	175	200
$\varepsilon \cdot 10^5$	10,7	24,2	43,1	70,2	108,2	159,8	227,7	314,7
$\beta_i \cdot 10^5$	7,13	7,08	7,26	6,92	6,83	7,38	7,37	7,54
Разн. %	1,0	0,3	2,8	2,8	2,0	4,5	4,4	6,8

3. Бетон на щебне и песке из литоидной пемзы. Состав бетона: 350 кг, цемент М-400, вода 227 л, песок – 510 кг, щебень 860 кг. Деформации фиксировались при напряжениях $\sigma = 21,25; 42,50; 63,75; 85,00; 106,25; 127,50; 148,70; 170,00$ кг.сила/см². Предел призмной прочности в среднем равнялся: $R(28)=170$ кг.сила/см². Среднее значение модуля упругости: $E_0(28)=1,353 \cdot 10^5$ кг.сила/см². Значение β :

$$\beta = \frac{660 - 170}{(170 - 60)170^2} = 1,54 \cdot 10^{-4}. \quad (9)$$

Средние экспериментальные значения $\beta_i(\sigma_i)$ и процентное отклонение от $\beta = 1,54 \cdot 10^{-4}$ приведены в табл. 3.

Таблица 3

$\beta_i(\sigma_i)$ для бетона на щебне и песке из литоидной пемзы

σ	21,25	42,50	63,75	85,00	106,25	127,50	148,75	170,00
$\varepsilon \cdot 10^5$	22,2	40,1	76,6	132,7	215,0	330,1	484,6	926,6
$\beta_i \cdot 10^4$	1,43	1,48	1,46	1,72	1,63	1,68	1,67	1,69
Разн. %	8,3	5,1	6,4	10,3	4,5	7,7	7,1	9,7

4. Бетон на щебне и песке из вулканического шлака. Состав бетона: 350 кг, цемент М-400, вода 220 л, песок – 560 кг, щебень 603 кг. Деформации фиксировались при напряжениях $\sigma = 22, 44, 66, 88, 110, 130$ кг.сила/см². Предел призмной прочности в среднем равнялся: $R(28)=132$ кг.сила/см². Среднее значение модуля упругости: $E_0(28)=1,125 \cdot 10^5$ кг.сила/см². Значение β :

$$\beta = \frac{660 - 132}{(132 - 60)132^2} = 4,21 \cdot 10^{-4}. \quad (10)$$

Средние экспериментальные значения $\beta_i(\sigma_i)$ и процентное отклонение от $\beta = 4,21 \cdot 10^{-4}$ приведены в табл. 4.

Таблица 4

$\beta_i(\sigma_i)$ для вулканического шлакобетона

σ	25	50	75	100	125	150	175	200
$\varepsilon \cdot 10^5$	10,7	24,2	43,1	70,2	108,2	159,8	227,7	314,7
$\beta_i \cdot 10^4$	4,03	4,08	4,36	4,42	4,33	4,15	4,37	4,43
Разн. %	4,3	3,1	3,6	5,0	2,9	1,4	3,8	5,2

5. *Туфобетон.* Щебень и песок получены из туфа, плотность которого находится в пределах $1600 \dots 1800 \text{ кг/м}^3$, а предел прочности на сжатие: $15 \dots 20 \text{ МПа}$. На 1 м^3 бетона использовались: щебень – 714 кг, песок – 595 кг, цемент М-400 – 410 кг, вода – 281 л. Масса пыльных частиц в 1 м^3 бетона составила 143 кг. Для обеспечения однородности туфобетона входящие в его состав мелкие и крупные заполнители получены из той же руды. Деформации фиксировались при напряжениях $\sigma = 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 \text{ кг.сила/см}^2$. Предел призмной прочности туфобетона в среднем равнялся: $R(28) = 164 \text{ кг.сила/см}^2$. Среднее значение модуля упругости: $E_0(28) = 1,13 \cdot 10^5 \text{ кг.сила/см}^2$. Численное значение β :

$$\beta = \frac{660 - 164}{(164 - 60)164^2} = 1,77 \times 10^{-4}. \quad (11)$$

Средние экспериментальные значения $\beta_i(\sigma_i)$ и процентное отклонение от $\beta = 1,77 \cdot 10^{-4}$ приведены в табл. 5.

Таблица 5

$\beta_i(\sigma_i)$ для туфобетона

σ	20	40	60	80	100	120	140	160
$\varepsilon \cdot 10^5$	19,0	45,4	86,9	151,0	245,1	376,8	553,7	783,0
$\beta_i \cdot 10^4$	1,63	1,68	1,86	1,92	1,93	1,85	1,91	1,92
Разн. %	7,9	5,1	5,1	8,5	9,0	4,5	7,9	8,5

Результаты испытаний бетонов тех же составов, но полученных по остальным двум технологиям: термопропариванием и без термообработки, показали качественно такие же результаты, какие приведены в табл. 1–5. Это позволяет

сделать определенное заключение: эмпирическая формула (6) вполне может быть приемлема при решении нелинейных задач.

Теперь аналитическую функцию напряжения можно получить, раскрывая связь $\varepsilon - \sigma - \bar{E}(\sigma)$ в бетоне в момент загрузки $t = \tau_0$ по (4):

$$\varepsilon(\tau_0) = \frac{\sigma(\tau_0)}{\bar{E}(\sigma)} = \frac{\sigma(\tau_0)}{E_0(\tau_0)[1 + \beta\sigma(\tau_0)^n]^{-1}} = \frac{\sigma(\tau_0)[1 - \beta + \beta\sigma(\tau_0)^n]}{E_0(\tau_0)}, \quad (12)$$

что дает возможность трансформировать связь $\varepsilon - \sigma - \bar{E}(\sigma)$ в связь $\varepsilon - f(\sigma) - E_0$:

$$\varepsilon(\tau_0) = \frac{f[\sigma(\tau_0)]}{E_0(\tau_0)}, \quad (13)$$

где, в отличие от (4) и (12), упругопластические свойства бетона выражаются не через функцию $\bar{E}(\sigma)$, а через функцию напряжения $f(\sigma)$. Очевидно, что по физическим соображениям, даже при феноменологическом подходе более правильно деформационный процесс упругопластической среды представить по формуле, отражающей связь $\varepsilon - \sigma - \bar{E}(\sigma)$, т.е. по (4). Однако трансформация связи $\varepsilon - \sigma - \bar{E}(\sigma)$ в $\varepsilon - f(\sigma) - E_0$ приводит к математическим уравнениям, более удобным при решении практических задач. Формула (12) дает возможность представить аналитическую функцию напряжения $f(\sigma)$ в виде

$$f(\sigma) = \sigma[1 + \beta(\sigma^n - 1)]. \quad (14)$$

Для бетонов с пределом прочности $R = 100...600 \text{ кг.сила/см}^2$, как показали результаты наших экспериментальных исследований, можно принять $n = 2$, а значения β , в зависимости от прочности бетона R , определить по эмпирической формуле (6).

Следует отметить, что упругопластические свойства бетонов нами представляются нелинейной аналитической функцией $\varepsilon(\sigma)$. Физически это обосновано, поскольку, по существу, ε зависит от σ , а не наоборот.

Отметим также, что формула связи $\sigma - \varepsilon$ по (13) может быть приемлема для загрузки элемента в момент $t = \tau_0$. В дальнейшем, если напряжения остаются постоянными: $\sigma = \sigma(\tau_0) = \text{Const}$, деформации монотонно меняются, поскольку из-за взросления бетона его модуль упругости E_0 монотонно растет: $E_0 = E_0(t)$, что необходимо учитывать в формуле связи $\sigma - \varepsilon$:

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{f[\sigma(\tau_0)]}{E_0(t)}. \quad (15)$$

Формула (16) приводит к тому, что для расчетов конструкций из бетонов необходимо иметь аналитическую функцию зависимости $E_0(t)$. Для $E_0(t)$ предлагается формула

$$E_0(t, \tau_0) = E(\tau_0) [c + (1 - c)e^{-s(t - \tau_0)}]. \quad (16)$$

При выводе связи между напряжением и деформацией бетон рассматривался как упругопластическая стареющая со временем среда [1]. Для учета вязкостных свойств бетона в формулу (15) необходимо добавить также и значения деформации, вызванные ползучестью. В условиях $\sigma = \sigma(\tau_0) = \text{Const}$ в (15) добавится деформация ползучести:

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \varepsilon(t) = f[\sigma(\tau_0)] \left[\frac{1}{E_0(t)} + C(t, \tau_0) \right], \quad (17)$$

где $C(t, \tau)$ – мера ползучести бетона.

Если напряжения со временем по какой-то закономерности $\sigma(t)$ меняются, то пользуясь методом линейной суперпозиции, получим интегральное уравнение нелинейной связи $\sigma(t) - \varepsilon(t)$:

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \varepsilon(t) = \frac{f[\sigma(t)]}{E_0(t)} - \int_{\tau_0}^t f[\sigma(\tau)] \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau. \quad (18)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г., Есаян С.Г. Механика ползучести бетона. – М.: МГСУ, 2012. – 490 с.

Ս.Գ. ԵՍԱՅԱՆ, Դ.Հ. ԿԼԵԿՉՅԱՆ

ԲԵՏՈՆԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ՌԵՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Բետոնի հիմնական ֆիզիկամեխանիկական բնութագիր հանդիսացող դեֆորմացիայի մոդուլ E -ն կախված է ինչպես բետոնի կազմից և տարիքից, այնպես էլ գործող լարումներից: $E(\sigma)$ կախվածության անալիտիկ ֆունկցիայի ստացումը հնարավորություն է տվել գտնել $f(\sigma)$ լարումների ֆունկցիայի բանաձևը: $f(\sigma)$ -ի բանաձևում ընդգրկված պարամետրերի ոչ գծայնությունը որոշվել է լաբորատոր փորձերով: Ստացված է բետոններում լարումների և դեֆորմացիաների կապը՝ որպես առաձգա-պլաստիկ-մածուցիկ ժառանգաբար ծերացող միջավայր:

Առանցքային բառեր. առաձգա-պլաստիկ-մածուցիկ միջավայր, դեֆորմացիայի մոդուլ, լարումների ֆունկցիա, ոչ գծայնության պարամետր, սողքի չափ, բետոնի ֆիզիկամեխանիկական հատկություններ:

S.G. YESAYAN, D.G. KLEKCHYAN

BASIC REOLOGICAL PROPERTIES OF CONCRETE

The deformation module E , as the main physicomachanical characteristic of concrete, depends on both the age and composition of the concrete as well as the existing tensions. The tension and deformation relation is expressed by the deformation module. The $E(\sigma)$ dependence of the analytical function enables to find the $f(\sigma)$ voltage function formula. The non-linearity parameters included in the formula $f(\sigma)$ are determined by laboratory experiments. The relation between the strains and stresses for concretes as viscous elastic-plastic ageing environment is obtained.

Keywords: viscous-elastic-plastic environment, deformation module, voltage function, non-linear parameter, creeping size, physicomachanical properties of concrete.