

Семенюк С.Д.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ЦЕНТРАЛЬНОМ СЖАТИИ

Общеизвестно, что зависимость напряжение - деформация $(\sigma - \varepsilon)$ при кратковременном центральном сжатии бетонных призм с постоянной скоростью нагружения является нелинейной с самого начала нагружения; при этом, с уменьшением скорости нагружения и ростом уровня напряжений искривление диаграммы сжатия увеличивается.

Секущий модуль упруго - пластичности бетона зависит от величины напряжений σ , скорости нагружения V_σ и равен тангенсу угла наклона секущей кривой $(\sigma - \varepsilon)$ к оси ε

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

Касательный модуль деформаций E равен тангенсу угла наклона касательной кривой $(\sigma - \varepsilon)$ в рассматриваемой точке

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (2)$$

Модуль упругости бетона E_0 равен тангенсу угла наклона касательной к кривой $(\sigma - \varepsilon)$ в начале координат, являющийся предельным положением секущей при $\sigma = 0, \varepsilon = 0$

$$E_0 = \operatorname{tg} \alpha_0 = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\sigma}{\varepsilon} = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \operatorname{tg} \alpha' = \lim_{\sigma \rightarrow 0} E' \quad (3)$$

Установить величину модуля упругости бетона E_0 , а также аналитическое выражение зависимости $E' - \sigma$ по опытным точкам кривой $\sigma - \varepsilon$ без знания ее аналитического выражения практически невозможно. Применяемые в настоящее время способы как можно большего исключения пластических деформаций бетона в кривой $(\sigma - \varepsilon)$ не приводят к выявлению линейной зависимости между напряжениями и деформациями и, следовательно, к установлению истинной величины модуля упругости бетона E_0 .

Нормы [1] рекомендуют за величину E_0 принимать величину секущего модуля деформаций $E'_{0,3}$ по нагрузочной ветви кривой $(\sigma - \varepsilon)$ при $\sigma = 0,3R_b$. Однако такое определение модуля упругости бетона является приближенным. Поскольку оно не лишено погрешностей, вызываемых быстронатекающими деформациями ползучести, а также погрешностей, допускаемых при измерении малых деформаций.

Исследования, проведенные проф. Макаренко Л.П. и его учениками [2], [3], проф. Бабицем Е.М. и его учениками, опыты автора, а также статистическая обработка опубликованных

Сопоставление опытных и теоретических (опытно - корреляционных) значений продольных деформаций ε , секущего модуля деформаций E' , касательного модуля деформаций E и коэффициента упругости бетона ν

Таблица 1

Опытные величины (по показаниям приборов)						Теоретические величины (корреляционные)				Отклон. теор. знач. от опыта		
σ МПа	$\frac{\sigma}{R_b}$	$\varepsilon_p \cdot 10^{-5}$	$E' \cdot 10^{-4}$, МПа	$E' \cdot 10^{-4}$, МПа	ν	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	$E' \cdot 10^{-4}$, МПа	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	ν	$\Delta\varepsilon$, %	$\Delta E'$, %	ΔE ,
0	0	0	-	4.7347	1.0000	0	4.7347	4.7347	1.0000	0	0	0
2	0.062	4	5.0000	5.2802	1.0560	4.36	4.5901	4.4499	0.9695	+9.0	-8.2	-15.7
4	0.125	9	4.4444	4.1720	0.9387	9.00	4.4455	4.1740	0.9389	0	0	0
6	0.187	14	4.2857	3.8793	0.9052	13.95	4.3010	3.9070	0.9084	-0.4	+0.4	+0.7
8	0.250	20	4.0000	3.3793	0.8448	19.25	4.1564	3.6487	0.8779	-3.75	+3.9	+8.0
10	0.313	26	3.8462	3.1244	0.8123	24.93	4.0118	3.3993	0.8473	-4.1	+4.3	+8.8
12	0.375	32	3.7500	2.9701	0.7920	31.03	3.8672	3.1586	0.8168	-3.0	+3.1	+6.3
14	0.438	38	3.6842	2.8668	0.7781	37.61	3.7226	2.9268	0.7862	-1.0	+1.0	+2.1
16	0.500	46	3.4783	2.5553	0.7346	44.72	3.5781	2.7040	0.7557	-2.8	+2.9	+5.8
18	0.562	53	3.3962	2.4361	0.7173	52.42	3.4335	2.4899	0.7252	-1.1	+0.9	+2.2
20	0.625	61	3.2787	2.2704	0.6925	60.81	3.2889	2.2846	0.6946	-0.3	+0.3	+1.6
22	0.687	70	3.1429	2.0863	0.6638	69.97	3.1443	2.0881	0.6641	-0.04	0	+0.1
24	0.750	79	3.0380	1.9493	0.6416	80.01	2.9997	1.9005	0.6336	+1.3	-1.2	-2.5
26	0.812	90	2.8889	1.7627	0.6102	91.06	2.8552	1.7218	0.6030	+1.2	-1.2	-2.3
28	0.875	101	2.7722	1.6231	0.5855	103.30	2.7106	1.5518	0.5725	+2.3	-2.2	-4.4
30	0.937	113	2.5664	1.3911	0.5420	116.91	2.5660	1.3907	0.5420	+3.5	0	0
32	1.000	127	2.5197	1.3409	0.5322	132.15	2.4214	1.2383	0.5114	+4.1	-3.9	-7.7

Семенюк С.Д., К.т.н. Могилевского государственного технического университета. Беларусь, МГТУ, 212005, г. Могилев, пр. Мира 43.

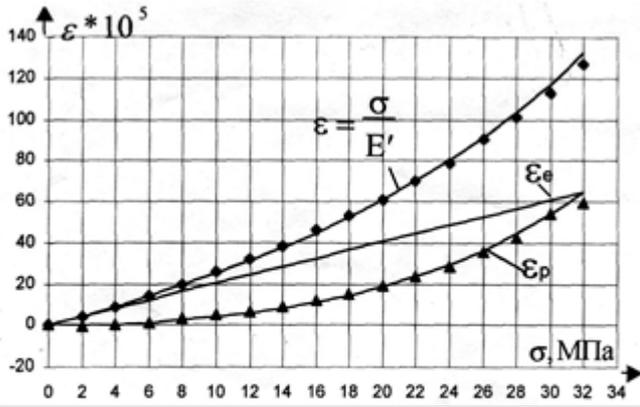


Рисунок 1. Опытные и теоретические зависимости $(\sigma - \varepsilon)$;

$(\sigma - \varepsilon_e)$; $(\sigma - \varepsilon_p)$ согласно данным таблицы 1:

♦ ◀ - опытные точки, усредненные по

результатов испытаний отечественных и зарубежных исследователей показали, что зависимость “напряжение - секущий модуль деформаций” $(\sigma - E')$, загружаемых с постоянной скоростью V_σ , является линейной вплоть до разрушения бетонного образца при нелинейной зависимости $\sigma - \varepsilon$ (рис. 2).

$$E' = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E_0 - \frac{E_0 - E'_{Rb}}{R_b} \cdot \sigma. \quad (4)$$

Из всех режимов загрузки наиболее простым является однократное кратковременное нагружение с произвольной

К вычислению коэффициента корреляции

постоянной скоростью приложения нагрузки, который предлагается для оценки модуля упругости бетона E_0 по графику $E' - \sigma$ согласно рис. 1:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E'} = \frac{\sigma}{E_0 - \frac{E_0 - E'_{Rb}}{R_b} \cdot \sigma} \dots, \quad (5)$$

где $\varepsilon_e, \varepsilon_p, \varepsilon$ - соответственно упругая, пластическая (кратковременная или быстронатекающая ползучесть) и полная продольная деформация бетона при соответствующем напряжении кратковременного центрального сжатия σ .

Пусть в результате испытаний бетонной призмы на центральное сжатие с постоянной скоростью приложения нагрузки (2,0 МПа/мин) мы получили опытную зависимость $(\sigma - \varepsilon)$, представленную в таблице 1 и на рисунке 1. Необходимо выявить существует ли линейная корреляционная

связь между $E' = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ и σ . При наличии этой связи - оце-

нить ее количественно линейным корреляционным уравнением с допустимой при этом погрешностью, а также выявить упругопластические характеристики бетона (модуль упругости, коэффициент пластичности, характеристику и удельную деформацию быстронатекающей ползучести, удельную упругую и полную силовые деформации) и аналитическое выражение зависимости $(\sigma - \varepsilon)$, $(\sigma - \varepsilon)$. Корреляционная связь может быть прямолинейной и криволинейной [4]. Самым простым способом первичного определения связи между двумя свойствами является способ графического изображения результатов вычислений. Откладывая по оси абсцисс, данные одного свойства (напряжения), а по оси ординат соответству-

Таблица 2

$V_x = (\sigma)$ МПа	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	$V_y = (E = \sigma/\varepsilon) \cdot 10^4$ МПа	$X_c = M_x - V_x$	X_c^2	$Y_c = M_y - V_y$	Y_c^2	$Z_c = X_c + Y_c$	Z_c^2
0								
2	4	5.0000	+15	225	-1.4943	2.23293	+13.5057	182.4039
4	9	4.4444	+13	169	-0.9387	0.88116	+12.0613	145.4750
6	14	4.2857	+11	121	-0.7800	0.60840	+10.2200	104.4484
8	20	4.0000	+9	81	-0.4943	0.24433	+8.5057	72.3469
10	26	3.8462	+7	49	-0.3405	0.11594	+6.6595	44.3489
12	32	3.7500	+5	25	-0.2443	0.05968	+4.7557	22.6167
14	38	3.6842	+3	9	-0.1785	0.03186	+2.8215	7.9609
16	46	3.4783	+1	1	+0.0274	0.00075	+1.0274	1.0556
18	53	3.3962	-1	1	+0.1095	0.01199	-0.8905	0.7930
20	61	3.2787	-3	9	+0.2270	0.05153	-2.7730	7.6895
22	70	3.1429	-5	25	+0.3628	0.13162	-4.6372	21.5036
24	79	3.0380	-7	49	+0.4677	0.21874	-6.5323	42.6709
26	90	2.8889	-9	81	+0.6188	0.38291	-8.3812	70.2445
28	101	2.7722	-11	121	+0.7375	0.54391	-10.2625	105.3189
30	113	2.5664	-13	169	+0.9393	0.88228	-12.0607	145.4605
32	127	2.5197	-15	225	+0.9860	0.97220	-14.0140	196.3922
$\Sigma=272;$ $M_x=17$		$\Sigma=56.0918$ $M_y=3,5057$	$\Sigma=0;$	$\Sigma=1360$	$\Sigma=-0.0004;$	$\Sigma=7.37023$	$\Sigma=0.0054;$	$\Sigma=1170.7294$

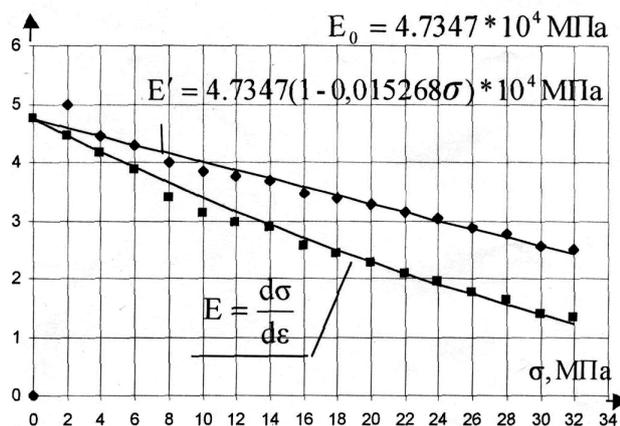


Рисунок 2. Опытные и теоретические зависимости $(\sigma - E')$, $(\sigma - E)$

и значения другого свойства (относительные деформации ϵ или E'), получают группу точек (смотри рис. 1 и рис. 2). Если эксперимент проведен корректно, то в расположении опытных точек намечается определенная закономерность. На рисунке 2 видна прямолинейная зависимость $(E_0 - \sigma)$. Корреляция устанавливает только величину связи между двумя свойствами, причинную же связь между ними нужно искать в самой сущности явления. Например, искривление диаграммы $(\sigma - \epsilon)$ объясняется быстронатекающими деформациями ползучести цементного камня, почему - нелинейными деформациями.

Величиной, выражающей прямолинейную зависимость между двумя свойствами, является коэффициент корреляции, обозначаемый буквой r и колеблющейся в пределах

$-1 \leq r \leq +1$. Знак "+" указывает на положительную связь, а знак "-" на отрицательную. При $r = 1$ имеем функциональную зависимость между исследуемыми свойствами. При $r = 0$ связь или отсутствует или имеет криволинейный характер. Таким образом, чем ближе коэффициент корреляции к единице, тем больше связь между изучаемыми свойствами.

Коэффициент корреляции r вычисляют по формуле: [4]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot Y_c)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n Y_c^2}}, \tag{6}$$

где $\sum_{i=1}^n (X_c \cdot Y_c)$ - сумма произведений отклонений отдельных вариантов V_x, V_y того (X) и другого (Y) свойств от соответствующих им средних арифметических M_x и M_y ;

и формулы:

$$\sum_{i=1}^n (X_c \cdot Y_c) = \sum_{i=1}^n [(V_x - M_x) \cdot (V_y - M_y)]; \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^n X_c^2 = \sum_{i=1}^n (V_x - M_x)^2; \sum_{i=1}^n Y_c^2 = \sum_{i=1}^n (V_y - M_y)^2; \tag{8}$$

$$M_x = \frac{\sum_{i=1}^n V_x}{n}; M_y = \frac{\sum_{i=1}^n V_y}{n}, \tag{9}$$

n - число наблюдений (вариант каждого ряда).

Средняя ошибка коэффициента корреляции m_r :

Сопоставление опытных и теоретических (опытно - корреляционных) значений относительных деформаций быстронатекающей (кратковременной) ползучести ϵ_p , коэффициент пластичности λ , характеристики ϕ и удельной с быстронатекающей (кратковременной) ползучести бетона

Таблица 3

Опытные величины (по показаниям приборов)						Теоретические величины (корреляционные)				Отклон. теорет. знач. от опыта	
σ МПа	$\frac{\sigma}{R_b}$	$\epsilon_p \cdot 10^{-5}$	λ	ϕ	$C \cdot 10^{-5}$ 1/МПа	$\epsilon_p \cdot 10^{-5}$	λ	ϕ	$C \cdot 10^{-5}$ 1/МПа	$\Delta \epsilon_p,$ $\Delta \phi,$ $\Delta C, \%$	$\Delta \lambda, \%$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.062	-0.22	-0.0560	-0.0531	-0.1122	0.13	0.0305	0.0315	0.0670	-40.70	-45.5
4	0.125	0.55	0.0613	0.0653	0.1379	0.55	0.0611	0.0651	0.1375	-0.30	-0.3
6	0.187	1.33	0.0938	0.1048	0.2213	1.28	0.0916	0.1008	0.2129	-3.80	-3.4
8	0.250	3.10	0.1552	0.1837	0.3880	2.35	0.1221	0.1391	0.2938	-24.30	-21.3
10	0.313	4.88	0.1877	0.2310	0.4879	3.81	0.1527	0.1802	0.3806	-22.00	-18.6
12	0.375	6.66	0.2080	0.2626	0.5546	5.68	0.1832	0.2243	0.4737	-14.60	-11.9
14	0.438	8.43	0.2219	0.2851	0.6022	8.04	0.2138	0.2719	0.5743	-4.60	-3.7
16	0.500	12.21	0.2654	0.3612	0.7629	10.92	0.2443	0.3232	0.6826	-10.50	-8.0
18	0.562	14.98	0.2827	0.3941	0.8324	14.41	0.2748	0.3790	0.8005	-3.80	-2.8
20	0.625	18.76	0.3075	0.4441	0.9380	18.57	0.3054	0.4396	0.9285	-1.00	-0.1
22	0.687	23.54	0.3362	0.5065	1.0698	23.50	0.3359	0.5058	1.0683	-0.10	0.0
24	0.750	28.31	0.3584	0.5585	1.1796	29.32	0.3664	0.5784	1.2216	3.60	2.2
26	0.812	35.08	0.3898	0.6389	1.3494	36.15	0.3970	0.6583	1.3904	3.00	1.8
28	0.875	41.86	0.4145	0.7079	1.4951	44.16	0.4275	0.7467	1.5771	5.50	3.1
30	0.937	53.54	0.4580	0.8449	1.7845	53.55	0.4580	0.8452	1.7851	0.00	0.0
32	1.000	59.41	0.4678	0.8791	1.8567	64.57	0.4886	0.9554	2.0179	8.70	4.4

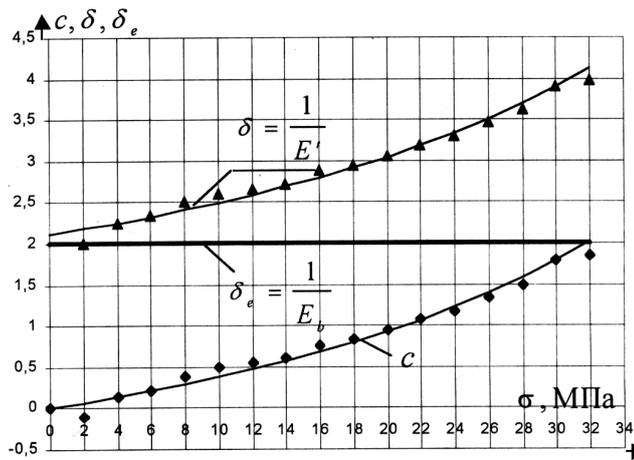
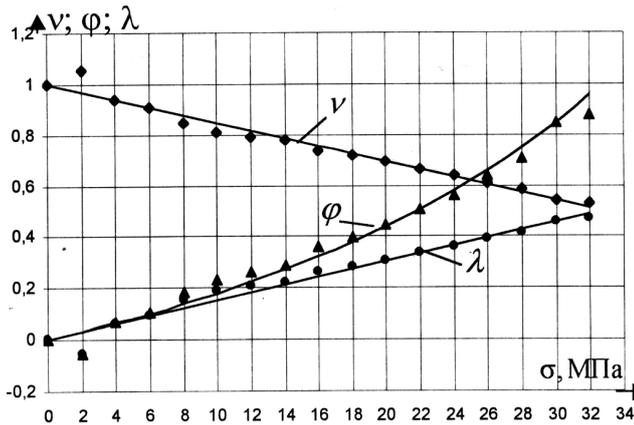


Рисунок 3. Опытные и теоретические (корреляционные) зависимости $(v-\sigma)$; $(\varphi-\sigma)$; $(\lambda-\sigma)$; $(C-\sigma)$; $(\delta-\sigma)$ при опытных и линейно-корреляционных значениях E'

$$m_r = \pm \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Достоверность коэффициента корреляции r (линейного корреляционного уравнения или связи) оценивается его отношением к средней ошибке m_r . Если это отношение равно 4 или больше, то коэффициент корреляции считается достоверным и наличие связи между двумя свойствами является доказанной, в противном случае - нельзя сделать заключение о достоверности связи между изучаемыми свойствами. Итак, линейная корреляционная зависимость достоверна если:

$$\frac{r}{m_r} \geq 4 \quad (11)$$

r и $\frac{r}{m_r}$ указывают на количественную оценку связи между двумя величинами, но не выражают эту связь в виде уравнения.

При экспериментально - статистических исследованиях по выявлению зависимости между двумя величинами X и Y одной из величин (например, напряжению $X = \sigma$) дают различные значения, а значения другой величины (например, секущего модуля деформаций бетона $Y = E'$, являющаяся зависимой переменной, определяется в результате опыта и поэтому она неизбежно будет иметь разные значения (например, в образцах - близнецах). При установлении уравнения

связи в этом случае для величины $Y = E'$ нужно взять ее среднее значение (например в одной призме по показаниям 4-х измерителей деформаций), соответствующее заданным значениям величины $X = \sigma$.

Линейно корреляционное уравнение выражается следующей формулой:

$$Y = M + r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (X - M_x) = M + r \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n Y_c^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_c^2}} \cdot (X - M_x) \quad (12)$$

где σ_x и σ_y - средние квадратические отклонения:

$$\sigma_x = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_c^2}{n-1}}; \quad \sigma_y = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_c^2}{n-1}} \quad (13)$$

Среднее арифметическое M_x ; M_y дает представление о средней величине изучаемого свойства, а среднее квадратическое отклонение σ_x , σ_y характеризует среднюю изменчивость изучаемого свойства и имеет ту же размерность, что и M_x и M_y .

Средняя ошибка линейного корреляционного уравнения (12), определяющая его возможную погрешность, вычисляется по формуле:

$$m_{xy} = \pm \sigma_y \cdot \sqrt{1-r^2} = \pm \sqrt{\frac{(1-r^2)}{(n-1)}} \cdot \sum_{i=1}^n V_c^2 \quad (14)$$

Надежность полученного корреляционного уравнения (12) оценивается статическими величинами σ_y , m_{xy} .

Если необходимо определить "X" по "Y", то нельзя это делать алгебраически из уравнения (12). В этом случае надо составить новое уравнение, приняв "Y" за независимую переменную величину, а "X" за зависимую переменную, т.е.

$$X = M_x + r \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cdot (Y - M_y); \quad \text{и} \quad m_{xy} = \pm \sigma_x \cdot \sqrt{1-r^2}$$

Теперь перейдем непосредственно к установлению и вычислению линейного корреляционного уравнения (12) для E' и σ по опытным их значениям, представленным в таблице 1. Для вычисления коэффициента корреляции составляют таблицу 2. В этой таблице за варианты V_x принято σ , а за варианты $V_y - E'$ (опытные значения). В табл. 2 также показана последовательность вычислений и их результаты. По полученным в таблице 2 результатам находим величину

$$\sum_{i=1}^n (X_c Y_c) = \frac{\sum_{i=1}^n Z_c^2 - \sum_{i=1}^n X_c^2 - \sum_{i=1}^n Y_c^2}{2} = \frac{1170,794 - 1360 - 7,37023}{2} = -98,32042$$

Согласно (6)
$$r = \frac{-98,32042}{\sqrt{1360 \cdot 7,37023}} = -0,98205$$

по (10)
$$m_r = \pm \frac{1 - 0,98205^2}{\sqrt{16}} = \pm 0,00889;$$

по (11)
$$\left| \frac{r}{m_r} \right| = \frac{0,98205}{0,00889} = 110,5 f 4, \text{ т.е. наличие линейной}$$

корреляционной зависимости (12) между $y = E'$ и $x = \sigma$ доказано с большой достоверностью.

Согласно (12) линейное корреляционное уравнение связи $(E' - \sigma)$ будет следующим:

$$E' \cdot 10^{-4} = 3,5057 - 0,98205(\sigma - 17) \sqrt{\frac{7,37023}{1360}} \text{ МПа;}$$

$$E' = \frac{\sigma}{\varepsilon} = 4,7347 - 0,07229\sigma = \text{МПа.}$$

$$= 4,7347(1 - 0,015268\sigma) \cdot 10^4$$

Граничные значения E' при $\sigma = 0 - E' = E_0 = 4,7347 \cdot 10^4$ МПа при

$$\sigma = R_b - E' = E'_{Rb} = 2,4214 \cdot 10^4 \text{ МПа.}$$

Секущий модуль деформаций бетона в зависимости от его граничных значений:

$$E' = \frac{\sigma}{\varepsilon} = 4,7347 \left(1 - 0,48858 \frac{\sigma}{R_b} \right) \cdot 10^4 \text{ МПа.}$$

Средняя ошибка линейного корреляционного уравнения согласно (14):

$$m_{xy} = \pm \sqrt{\frac{1 - 0,98205^2}{16 - 1} \cdot 7,37023} = \pm 0,13222 \text{ МПа.}$$

Упруго-пластические характеристики бетона при текущем напряжении кратковременного сжатия $0 \leq \sigma \leq R_b$ (коэффициент упругости ν , коэффициент пластичности λ , характеристика φ и удельная деформация C быстронатекающей ползучести, удельные упругие δ_e и полные δ силовые деформации), выраженные через секущий модуль деформаций E' по (4) и их взаимосвязь представлены ниже:

$$\nu = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon} = 1 - \lambda = \frac{1}{1 + \varphi} = \frac{1}{1 + E_0 \cdot C} = \frac{E'}{E_0} \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon} = 1 - \nu = \frac{\varphi}{1 + \varphi} = 1 - \frac{E'}{E_0} \quad (16)$$

$$\varphi = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_e} = \frac{\lambda}{\nu} = E_0 \cdot C = \frac{E_0}{E'} - 1 \quad (17)$$

$$C = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon} = \delta - \delta_e = \frac{\varphi}{E_0} = \frac{1}{E'} - \frac{1}{E_0} \quad (18)$$

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{1}{E'}; \quad \delta_e = \frac{\varepsilon_e}{\sigma} = \frac{1}{E_0} \quad (19)$$

Быстронатекающая (кратковременная) деформация ползучести бетона

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e = \varphi \cdot \varepsilon_e = \sigma \cdot c = \sigma \cdot \left(\frac{1}{E'} - \frac{1}{E_0} \right) \quad (20)$$

Для конкретного примера в таблице 1, таблице 3 и на рисунках 1,2,3 показано в численном виде и графически сопоставления теоретических зависимостей $\sigma - \varepsilon$; $E' - \sigma$; $E - \sigma$; $\nu - \sigma$; $C - \sigma$; $\varphi - \sigma$; $\delta - \sigma$; $\varepsilon_p - \sigma$ по вышеприведенным формулам при значении E' из линейного корреляционного уравнения с опытными значениями вышеуказанных величин, полученным по тем же формулам, но при опытных значениях E' .

Из рисунка 2 и рисунка 3 видно, что коэффициенты упругости ν и пластичности λ , также как и E' находятся в линейной зависимости от уровня напряжений $\eta = \frac{\sigma}{R_b}$, а остальные параметры бетона - в нелинейной зависимости.

Фактическое значение модуля упругости бетона, приведенная в примере $E_0 = 4,7347 \cdot 10^4$ МПа. По СНиП 2.03.01-84* начальный модуль упругости бетона $E_0 = E'_{03} = 4,7347 \cdot (1 - 0,48858 \cdot 0,3) \cdot 10^4 = 4,041 \cdot 10^4$ МПа, т.е. на 14,7% меньше фактического.

Таким образом, при помощи линейного корреляционного анализа зависимости $E' - \sigma$ представилась возможность оценить в аналитической форме зависимость $\sigma - \varepsilon$ и другие упруго-пластические характеристики бетона при центральном сжатии.

Из таблиц 1 и 3 видно, что максимальное отклонение теоретических значений искомых величин от опытных соответствует минимальному уровню напряжений $\eta = 0,062$, что обусловлено большой погрешностью при оценки деформаций при малых уровнях напряжений. Деформации сжатия бетона в момент его разрушения зафиксировать очень трудно и не всегда удается. В силу выше сказанного при установлении линейной корреляционной зависимости $E' - \sigma$ отсчеты по первой и последней (в момент разрушения) ступенях рекомендуется не учитывать.

Вычисление коэффициента корреляции r и установление линейной корреляционной зависимости $E' - \sigma$ с оценкой его погрешности m_{xy} может быть также произведено при помощи ЭВМ по специально разработанной программе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции/ М.: Госстрой СССР. - 1989.
2. Макаренко Л.П. Оценка деформаций бетона с учетом нелинейной ползучести/ Бетон и железобетон. №2. - 1985.
3. Макаренко Л.П. Сопротивление бетона сжатию и растяжению после кратковременного и длительного сжатия различной интенсивности/ Изв. вузов, Строительство и архитектура. - №2. - 1985.
4. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика/ М.: "Высшая школа". - 1977.
5. L.G.Tulin, Simplified Description of Creep Surface for a Portland Coment Mortar, Jorm of Amer. Coner. Inst. 6. - 1968.