

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

В. А. КАРАПЕТЯН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
 НАПРЯЖЕНИЙ В СЖАТОМ БЕТОНЕ БАЛОК  
 ИЗ ЛЕГКОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

1. Экспериментальные данные о действительном распределении напряжений в бетоне сжатой зоны балок необходимы для уточнения расчета изгибаемых железобетонных элементов на жесткость и трещиностойкость, определения величины предельного армирования изгибаемых элементов, установления границы между первым и вторым случаями внецентренного сжатия и уточнения расчета по второму случаю. В данном сообщении приводятся характеристики экспериментальных образцов, методики их испытания, а также результаты исследования распределения напряжений в сжатой зоне железобетонных балок на естественных пористых заполнителях при их статическом нагружении.

Экспериментальные образцы изготавливали из легкого бетона на литондой пемзе Джраберского месторождения Армянской ССР. Составы примененных проектных марок бетона приведены в табл. 1.

Таблица

Состав	Расход на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси в кг				Проектная марка бетона
	волы	цемента	песка	щебня	
I	250	200	550	630	150
II	250	420	545	560	200
III	250	580	550	550	350

2. Экспериментальные исследования выполняли на 15 железобетонных балках прямоугольного сечения 15×24 см, длиной 260 см. Пролет балки принимался равным 240 см. В отдельных образцах варьировался состав бетона, в соответствии с табл. 1 и коэффициент армирования сечения. В качестве рабочей арматуры балок применили горячекатаную сталь периодического профиля. Характеристики арматуры, бетона и экспериментальных балок представлены в табл. 2. Прочностные характеристики арматуры были получены в результате испытания арматурных стержней на разрыв в соответствии с ГОСТ; бетона—в результате испытания соответствующих бетонных кубов и призм на сжатие. В средней трети пролета, где определяли напряжения и деформации в арматуре и бетоне, балки имели одиночное армирование и на этом участке хомуты не были установлены. На опорных участках, с целью предотвращения их

Таблица 2

Шифр балок	Состав бетона марка бетона	Процент армирования сечения	Полезн. высота сечения $h_0$ , см	Характеристики арматуры				Прочностные характеристики бетона $кгс/см^2$			
				$F_a$ , см <sup>2</sup>	$\sigma_s$ , $кгс/см^2$	$\sigma_p$ , $кгс/см^2$	$\delta_{10}$ , %	кубиковая прочность		призмная прочность в день испытания	модуль деформации при $\sigma = 0,2 R_{0p}$
								на 28 день	в день испытания		
ЛБ-I-1	1	1,17	20,5	3,38	4600	7200	22	158	202	180	138000
ЛБ-2	150	4,88	20,5	14,73	4190	6820	23	158	235	192	146000
ЛБ-II-1	111	3,07	20,5	9,41	4350	6750	22	384	392	305	180000
ЛБ-III-2	350	2,29	22,0	7,63	4450	6900	23	384	410	326	181000
ЛБ-IV-3	11	3,30	23,0	11,40	4250	6600	23	309	369	287	161000
ЛБ-IV-4	300	3,24	23,5	11,40	4250	6600	23	309	369	287	161000
ЛБ-III-1	111	2,32	22,0	7,63	4150	6900	23	384	410	326	181000
ЛБ-III-3	350	2,64	22,0	9,43	4200	6600	23	384	410	326	181000
ЛБ-III-4	11	2,62	22,0	9,43	4200	6500	23	384	410	326	181000
ЛБ-IV-1	300	2,63	23,0	9,43	4215	6700	24	309	369	287	161000
ЛБ-IV-2	1	2,67	23,0	9,43	4215	6700	24	309	369	287	161000
ЛБ-V-1	150	2,11	22,5	7,63	4450	6900	23	161	172	135	131500
ЛБ-V-2	11	1,79	22,5	6,03	4875	6605	23	161	172	135	131500
ЛБ-V-3	150	1,81	22,5	6,03	4875	6605	23	161	172	135	131500
ЛБ-V-4	.	2,12	21,0	7,63	4450	6900	23	161	172	135	131500

разрушения, было предусмотрено двойное армирование и поперечное армирование в виде хомутов. Хомуты были выполнены из стали марки ст. 3 диаметром 6 мм и установлены с шагом 18 см при проценте армирования 1,17 с шагом 10 см в остальных случаях. С целью определения диаграммы  $\sigma - \epsilon$  (напряжения—относительные деформации) при центральном сжатии, а также призмной прочности бетона, были испытаны 30 бетонных призм размерами 10×10×10 см. Для определения кубиковой прочности бетона в необходимом количестве были изготовлены контрольные бетонные кубы с размерами ребер 15 см. Образцы бетонировали в летний период на открытом полигоне, в металлических формах. В формы для балок до их бетонирования устанавливали упругие вкладыши, состоящие из пакета односторонних профилей—двутавров, длиной, равной ширине балки (рис. 1). Материал—алюминиевый сплав марки

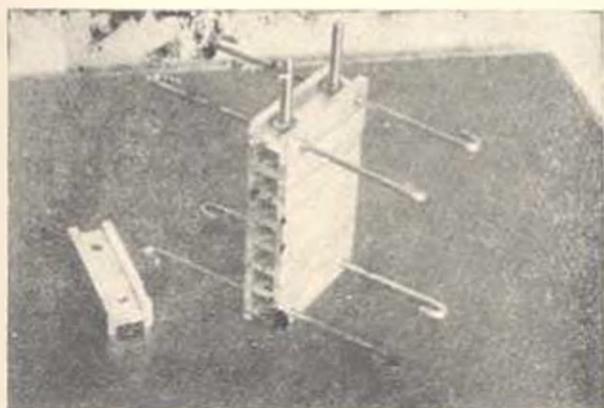


Рис. 1. Дюралевый упругий вкладыш для измерения напряжений в бетоне.

Д—Т16. Между отдельными профилями, с целью уменьшения трения, прокладывали кальку, а для создания надежного сцепления с бетоном в вкладышах на двух уровнях были предусмотрены стальные анкера.

Бетонную смесь уплотняли в формах глубинным вибратором. Распалубку образцов производили через двое суток после изготовления. Затем образцы хранили в мокрых опилках до 28-дневного возраста. Испытание бетонных кубов и призм производили на прецизионном 100 т гидрпрессе «Рейли» с соответствующей настройкой динамометра. Балки испытывали на гидравлическом прессе ГРМ-2, настраиваемого в зависимости от разрушающей нагрузки опытного образца на 10 или 25т. Нагрузку на балку передавали в третьих пролетах через металлический траперс, при этом длина зоны чистого изгиба составляла 80 см.

Эпюры напряжений в сжатой зоне бетона определяли по методу, предложенному О. Я. Бергом [1] с помощью описанных выше упругих вкладышей, смонтированных в балку. Деформации и соответствующие напряжения вкладышей определяли по показаниям датчиков сопротив-

ления с базой 20 мм, наклеенных на торцы двутавров. Имея в виду, что модуль упругости алюминиевого сплава, использованного для вкладышей примерно в четыре раза превышает модуль упругости бетона, отдельным брускам пакета, путем фрезерования была придана форма двутавров, в которых отношение ширины полки к толщине стенки было равно четырем. Для того, чтобы получить связи между напряжениями бетона и соответствующими им деформациями на уровне каждого вкладыша на бетон наклеивали датчики сопротивления с базой 50 мм. Кроме того, эпюры напряжений сжатого бетона балок определяли косвенным методом — путем сопоставления деформаций сжатой зоны бетона железобетонной балки и диаграммы  $\sigma - \epsilon$  соответствующих бетонных призм при центральном сжатии. В этом случае при испытании железобетонных балок по ее высоте с двух противоположных сторон были наклеены датчики сопротивления с базой 50 мм и такие же датчики были наклеены на продольную растянутую арматуру.

При испытании бетонных призм на все четыре грани по середине их высоты наклеивали датчики сопротивления, подключенные к усилителю по параллельно-последовательной схеме, в связи с чем на выходе к осциллографу получали усредненные показатели деформаций. Нагрузку на призму передавали через тарированный динамометр, датчики от которого подключали через усилитель к осциллографу И-150. Силы и соответствующие деформации вплоть до разрушения призмы осциллограф фиксировал одновременно. В связи с этим при испытании была получена как восходящая, так и нисходящая части диаграммы  $\sigma - \epsilon$  бетона при сжатии. С целью установления масштаба деформаций измерения проводили также прибором АИ-1, подключенным к дублирующим датчикам.

3. Результаты испытания балок представлены в табл. 3. В шести случаях из 15 исчерпание несущей способности балок наступало в связи с достижением арматурой предела текучести. В остальных случаях (перearмированное сечение) исчерпание несущей способности балок произошло или в результате дробления сжатой зоны бетона, или одновременного достижения напряжения в арматуре в бетоне своих предельных значений.

В качестве иллюстрации на рис. 2 и рис. 3 представлены эпюры напряжений сжатого бетона двух балок, полученных по методу О. Я. Берга. Там же представлены эпюры относительных деформаций в бетоне. Эпюра напряжений на рис. 2 соответствует бетону марки 350, а на рис. 3 легкому бетону марки 150. Нетрудно заметить, что эпюры напряжений в бетоне сжатой зоны балок при изгибе меняют свое очертание по мере увеличения нагрузки. При этом в высокопрочном бетоне (марка 350) максимальная ордината эпюры сохраняется на уровне сжатой грани балки, а в бетоне средней прочности (марка 150) максимальная ордината эпюры напряжений постепенно перемещается от сжатой грани балки в сторону нейтрального слоя. Это явление является, по-видимому, следствием микроразрушений сжатой зоны бетона и перераспределения

Таблица 3

Шифр балок	Разрушающий изгибающий момент, тм	Кубиковая прочность, кг/см <sup>2</sup>	Призмен. прочность, кг/см <sup>2</sup>	Величина $R_u$ (кг/см <sup>2</sup> )		$R_{u1}/R_{np}$	$R_{u2}/R_{np}$	Характер разрушения балок
				$R_{u1}$ по методу О. Я. Берга	$R_{u2}$ косвенным методом			
ЛБ-I-1	3,60	202	180	192	—	1,07	—	по арматуре
ЛБ-2	4,80	235	192	195	—	1,01	—	по бетону
ЛБ-II-1	7,67	392	305	311	—	1,02	—	одновременно по арматуре и бетону
ЛБ-III-2	6,40	410	326	352	350	1,08	1,07	то же
ЛБ-IV-3	7,20	369	287	340	316	1,18	1,10	по бетону
ЛБ-IV-4	7,10	369	287	331	340	1,15	1,18	то же
ЛБ-III-1	5,40	410	326	—	360	—	1,10	одновременно по арматуре и бетону
ЛБ-III-3	6,24	410	326	—	370	—	1,13	по арматуре
ЛБ-III-4	5,20	410	326	—	300	—	0,93	по арматуре
ЛБ-IV-1	5,12	369	287	—	310	—	1,08	по арматуре
ЛБ-IV-2	5,12	369	287	—	300	—	1,04	по арматуре
ЛБ-V-1	4,56	172	135	—	135	—	1,00	по бетону
ЛБ-V-2	3,91	172	135	—	135	—	1,00	по арматуре
ЛБ-V-3	4,10	172	135	—	135	—	1,00	одновременно по арматуре и бетону
ЛБ-V-4	4,32	172	135	—	135	—	1,00	по бетону

внутренних усилий между бетоном и арматурой. В качестве примера здесь приводятся эпюры напряжений сжатой зоны бетона, полученные прямым (рис. 4б) и косвенным путем (рис. 4в). Полученные результаты показывают, что между ними расхождение невелико.

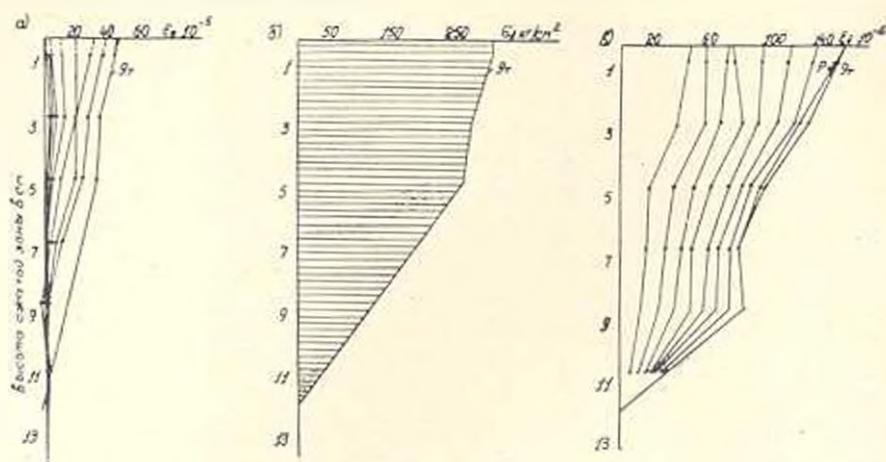


Рис. 2. Эпюры деформаций и напряжений сжатой зоны бетона железобетонной балки ЛБ—11—1 (легкий бетон  $R_k = 392 \text{ кгс/см}^2$ ;  $R_{пр} = 305 \text{ кгс/см}^2$ ), а) эпюра деформации дуралюминиевого вкладыша; б) соответствующая эпюра напряжений в бетоне; в) эпюра деформаций бетона.

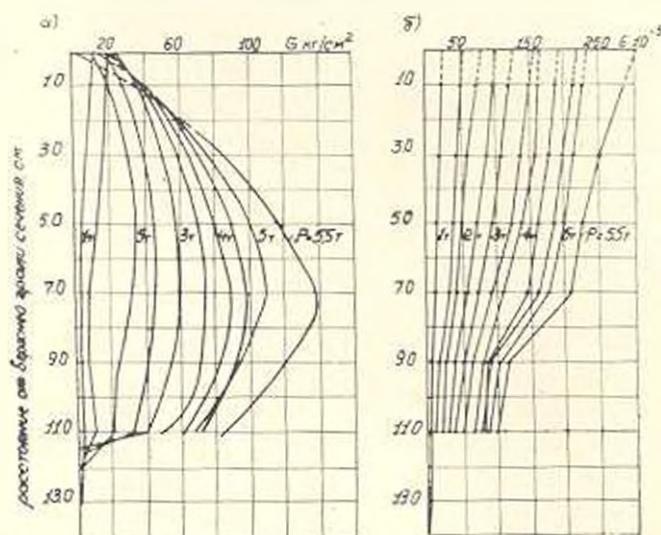


Рис. 3. Изменение эпюр деформаций и напряжений сжатой зоны бетона в железобетонной балке ЛБ—2 при разных ступенях нагрузки ( $R_k = 235 \text{ кгс/см}^2$ ,  $R_{пр} = 192 \text{ кгс/см}^2$ ). а) эпюра напряжений; б) эпюра деформаций.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что для изгибающих элементов из высокопрочного бетона ( $R_k = 369 - 410 \text{ кгс/см}^2$ ) отношение  $R_u/R_{пр}$  колеблется в пределах от 0,95 до 1,18 и в среднем

равно 1,14, а для элементов из бетона средней прочности ( $R_b = 172 - 235 \text{ кгс/см}^2$ ) значение  $R_u/R_{np}$  колеблется от 1,01 до 1,07 и в среднем равно 1,04. Влияние процента армирования на величину  $R_u/R_{np}$ , ввиду ограниченного количества опытов выявить не удалось. Значения  $R_u/R_{np}$  определенные косвенным путем по величине, получились несколько меньше аналогичных значений, полученных прямыми измерениями, так как во втором случае измерение напряжений прекращалось при нагрузке, составляющей примерно 0,95 от разрушающей.

4. Обработка экспериментальных данных показывает, что коэффициент полноты эюры для бетонов марок 300—350 колеблется в пре-

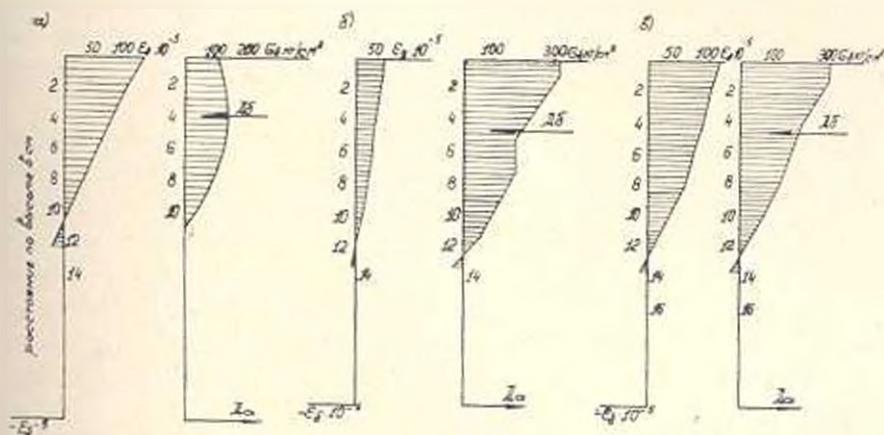


Рис. 4. Эюры деформаций и напряжений в бетоне сжатой зоны железобетонных балок: а) Легкий бетон ( $R_b = 172 \text{ кгс/см}^2$ ,  $R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2$ ), эюра построена с помощью диаграммы  $\sigma - \varepsilon$ , полученной при сжатии бетонной призмы; для балки ЛБ-V-1; б) эюра построена по показаниям дуралюминиевого вкладыша ( $R_b = 410 \text{ кгс/см}^2$ ,  $R_{np} = 326 \text{ кгс/см}^2$ ) для балки ЛБ-III-2; в) эюра построена с помощью диаграммы  $\varepsilon - \sigma$ , полученной при сжатии бетонной призмы ( $R_b = 410 \text{ кгс/см}^2$ ,  $R_{np} = 326 \text{ кгс/см}^2$ ) для ЛБ-III-2.

Эюры  $\varepsilon$  и  $\sigma$  построены для нагрузки 0,95P раз.

делах:  $\eta = 0,55 - 0,75$ , а для бетона марки 150  $\eta = 0,85 - 0,95$ . Расстояние центра тяжести эюры напряжений от сжатой грани балки изменяется соответственно в пределах  $\gamma x = (0,35 - 0,37) x$  и  $\gamma x = (0,42 - 0,48) x$ . Для высокопрочных бетонов значение

$$\gamma x = \frac{(n+1)^2}{2n(n+1)}$$

Для высокопрочных бетонов эюра напряжений сжатой зоны бетона может быть принята в виде квадратной параболы, описываемой уравнением:

$$\sigma_b = k R_{np} \left[ \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right]$$

$\sigma_b$  — напряжение в сжатом бетоне,

$\epsilon_0$  — относительная деформация сжатия, соответствующая максимальному напряжению в бетоне,

$k$  — поправочный коэффициент бетона для марки 300 = 1, а для бетона марки 350, равный 1,14.

### Выводы

1. Результаты прямого измерения напряжений сжатого бетона балок при статическом изгибе с помощью упругих вкладышей, по методу предложенному О. Я. Бергом, оказываются близкими с результатами, полученными косвенным методом — путем сопоставления деформаций сжатой зоны бетона железобетонной балки и диаграммы  $\epsilon - \sigma$  бетонных призм при сжатии.

2. Форма эпюры напряжений сжатого бетона, полученная прямым и косвенным путем для балок из высокопрочного легкого бетона (марка 300 и выше) на литонидной пемзе удовлетворительно описывается квадратной параболой. Для балок из легких бетонов средней прочности (марки-150) эпюра напряжений также имеет криволинейное очертание, но с большим развитием пластических деформаций и в этом случае максимальная ордината эпюры напряжений расположена на расстоянии  $\gamma x = (0,42 - 0,48) x$  от сжатой грани сечения ( $x$  — высота сжатой зоны бетона).

3. По экспериментальным данным средние значения отношения  $R_{\epsilon} R_{\sigma}$  получаются равными 1,04 и 1,14 соответственно для балок из легких бетонов средней и высокой прочности.

Автор выражает благодарность научному руководителю проф. В. В. Пинадзяну.

АНСМ

Поступило 15.IV.1969.

Վ. Ա. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

ԹԻՒԹԻՎ ԵՐԿԱՐԹԵՏՈՆԸ ՀԵՏԱՆՆԵՐԻ ՍԵՂՈՎԱՆ ԲԵՏՈՆՈՒՄ ԸՐՐՈՒՄՆԵՐԻ ԲԱՇԽՄԱՆ ԷՔՍՊԵՐԻՄԵՆՏԱԼ ԱՆՈՒՄՆԱԽԱՐԻՔՅՈՒՆ

### Ա ճ փ ո փ ո լ ը

Առաստաղաբերված է շարումների բաշխման օրենքը լիթոիդային պեմիային հիման վրա պատրաստված երկաթ-բետոնե ծոփոջ էլեմենտների սեղմված բետոնում:

Նշվում է, որ էլեմենտների ծոփան ժամանակ սեղմված բետոնում առաջացող շարումների անմիջական շափման արդյունքները, կատարված առաձգական ներդրակների ողնաթլամբ ըստ Օ. Բերգի մեթոդի, մոտիկ են անուղղակի մեթոդով՝ երկաթբետոնե էլեմենտների սեղմված դոստո բետոնի զեֆորմացիաների և բետոնե պրիզմաների սեղմման  $\epsilon - \sigma$  դիագրամի համադրման միջոցով

ստացված արդյունքներին: Քարձրամուր թեթև բետոնների ղեկորում (300 մարկայի ու բարձր) սեղմված բետոնի լարումների էլյուտրի ձևը, ստացված անմիջական ու անուղղակի մեթոդներով, բավարար կերպով նկարագրվում է բուսակուսի պարարտով: Միջին ամրության (150 մարկայի) բետոնից պատրաստված հեծանների համար էլյուտրը նույնպես կորագծային է, սակայն մեծ զարգացում ունեն պրաստիկական դեֆորմացիաները և այդ ղեկորում լարումների էլյուտրի մարսիմալ օրդինատը գտնվում է հատվածքի սեղմված եզրից  $\gamma x = (0,42 \pm 0,48) \cdot x$  հեռավորության վրա ( $x$ -ը բետոնի սեղմված զուտուր բարձրությունն է):

Ըստ էրապերիմենտալ տվյալների միջին և բարձր ամրության թեթև բետոններից պատրաստված հեծանների համար  $R_c/R_{op} \bullet$  հարաբերությունը համապատասխանաբար հավասար է 1,04 և 1,14:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Берг О. Я., Писанко Г. И., Хромец Ю. И. Исследование физического процесса разрушения бетона под действием статической и многократно повторяющейся нагрузки. Труды ВНИИСТ. вып. 60, М., 1966

ՈՈ-11-889.

