

- строительства и эксплуатации сооружений: сборник научных трудов; под ред. Д.Н. Лазовского. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – С. 247-251
3. Bartoletti J. Stacy, Jirsa O. James. Effect of Epoxy Coating on Anchorage and Development of Welded Wire Fabric. ACI Structural Journal, V92, November-December 1995, pp. 757-764.
  4. Esfahani M. Reza, Rangan B. Vijaya. Local Bond Strength Bars in Normal Strength and High-Strength Concrete (HSC). ACI Structural Journal, V95, May-June 1998, pp. 272-279.
  5. Esfahani M. Reza, Rangan B. Vijaya. Local Bond Strength Bars in Normal Strength and High-Strength Concrete (HSC). ACI Structural Journal, V95, March-April 1998, pp. 96-106.
  6. Mason A. P. and Nawy E. G. Discussion of the paper by Edward G. Nawy. Flexural cracking in two-way concrete slabs reinforced with high strength welded wire fabric, ACI Structures, 1965, V62, pp. 193-195.
  7. Nawy E. G. Flexural cracking in two-way concrete slabs reinforced with high strength welded wire fabric, ACI Structures, 1964, V61, pp. 997-1007.

УДК 624.016.5

Лушка Л.К., Черкасов Д.В.

## РОЛЬ СДВИГА БЕТОНА В СОПРОТИВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАЗРУШЕНИЮ

Бетон, как определяющий компонент сечений железобетонных элементов в процессе их нагружения, а иногда и производства (для преднапряженных конструкций), подвергается действию многоосных напряжений. Учитывая то, что бетон весьма чувствителен к воздействию шарового тензора напряжений, влияние сложного напряженного состояния на прочность бетона весьма существенно. Оно, в зависимости от направления действия напряжений, может быть как положительным (повышать прочность бетона), так и отрицательным - ее снижать.

Как известно, прочность материала в точке для произвольных однородных напряженных состояний определяется функцией предельных напряжений (т. н. критерий прочности), которая в пространстве главных напряжений представляется некоторой предельной поверхностью. Для плотных тяжелых бетонов эта предельная поверхность может быть представлена двумя сопряженными неротационными гиперболоидами [1].

Из теории напряжений известно, что сдвиг относится к плоскому напряженному состоянию, когда на элементарный объем материала действуют два равные по величине и противоположные по знаку главные напряжения, приложенные к главным площадкам. По площадке чистого сдвига при этом действуют только касательные напряжения, равные по модулю главным напряжениям. В этом случае имеем напряженное состояние чистого сдвига.

Прочность бетона при чистом сдвиге в соответствии с гиперболическим критерием прочности [1] представляется зависимостью

$$R_{sh} = (5,42 R_t + 0,12 R_b) / 3 \sqrt{6} \quad (1)$$

где:  $R_t$  и  $R_b$  – пределы прочности бетона при одноосном растяжении и сжатии.

Численные значения прочности на сдвиг согласно (1) весьма близки к таковым, вычисленным по известной формуле Мора

полученной для линейной огибающей кругов напряжений. Например, для средних классов бетона (при  $R_b / R_t = 10$ ) из формулы (1) получаем:  $R_{sh} = 0,90R_t$ , а из формулы (2):  $R_{sh} = 0,91R_t$ , откуда видно, что обе формулы дают очень близкие результаты.

Сопоставление расчетных значений по формуле (1) с результатами некоторых известных экспериментальных исследований помещено в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что отклонения расчета от опыта в основном не превышают 10%. По формуле (2) эти отклонения были бы несколько большими. Следует отметить, что в реальных железобетонных конструкциях чистый сдвиг встречается сравнительно редко. Его можно наблюдать, например, при свободном кручении круглых бетонных или железобетонных стержней.

Гораздо чаще железобетонные конструкции подвергаются сдвигу со сжатием. Такое напряженное состояние возникает например в изгибаемых и сжато-изгибаемых железобетонных элементах.

Таблица 1.

Сравнение расчетных значений согласно формуле (1) с опытными данными

Автор опытов	$R_b$ , МПа	$R_t$ , МПа	$R_{sh}^{exp}$ , МПа	$R_{sh}^{cal}$	$R_{sh}^{cal} / R_{sh}^{exp}$
Skudra	12,53	1,25	1,126	1,13	1,00
Bresler	21,00	2,10	1,590	1,89	1,19
	29,40	2,56	2,150	2,37	1,10
	40,90	2,97	2,680	2,86	1,06
Yamada	36,10	3,00	2,630	2,80	1,06
Mc-Henry	38,00	2,66	2,410	2,58	1,07
Carino	26,51	2,92	2,430	2,58	1,06

Сочетание чистого сдвига с напряженными состояниями одноосного или двухосного сжатия приводит к качественно новому напряженному состоянию - плоскому сдвигу. Когда на напряженное состояние чистого сдвига накладывается трехосное сжатие, то получаем объемный сдвиг. Таким образом, в общем случае необходимо различать по крайней мере три вида сдвига бетона в сечениях элементов железобетонных конструкций: чистый, плоский и объемный сдвиги [2]. Прочность бетона для указанных напряженных состояний оказывается существенно различной.

Рассмотрим пример объемного сдвига бетона. Такое напряженное состояние возникает в ядре трубобетонных элементов, подверженных одновременному кручению (чистый сдвиг) и осевому сжатию (трехосное цилиндрическое сжатие). Пусть имеем трубобетонные элементы круглого сечения со сплошным и полым бетонными ядрами.

Предельное состояние сплошного бетонного ядра центрально сжатого трубобетонного элемента можно оценить с помощью линеаризованной функции [3]:

$$\sigma_1 = R_b + K \sigma_3, \quad (3)$$

где:  $\sigma_1$  - максимальное (осевое) предельное напряжение;

$\sigma_3$  - минимальное (боковое) предельное напряжение;

$K$  - коэффициент эффективности влияния минимального напряжения на максимальное напряжение. Он может быть определен с помощью зависимости [4]:

...  $K = 10 - 100 \sigma_3 / (R_b + 15\sigma_3)$  ... (4)

Переходя от главных напряжений к нормальным и касательным напряжениям, с помощью известных формул ...

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (5)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (6)$$

(здесь, как и выше сжатие считаем положительным) из (3) получаем зависимость для расчёта прочности бетона при объёмном сдвиге:

$$R_{3sh} = \frac{\sqrt{R_b^2 + R_b(K-1)(\sigma_x + \sigma_y) + (K^2 + 1)\sigma_x\sigma_y - K(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}}{1 + K} \quad (7)$$

Прочность бетона при плоском сдвиге определяется зависимостью (7) при  $\sigma_y = 0$ :

$$R_{2sh} = \frac{\sqrt{R_b^2 + R_b(K-1)\sigma_x - K\sigma_x^2}}{1 + K} \quad (8)$$

При стремлении значения нормального напряжения к нулю, из (8) получаем формулу для определения прочности бетона при чистом сдвиге:

$$R_{sh} = R_b / (1 + K) \quad (9)$$

Нетрудно видеть, что зависимость (9) приводит к тем же результатам, что и формулы (1) и (2).

Рассмотрим зависимость (8). Геометрически она представляется эллипсом. Исследуя экстремум функции (8) из условия  $dR_{2sh}/d\sigma_x = 0$ , находим, что максимальное значение прочности бетона при плоском сдвиге достигается при  $\sigma_x = 0,45R_b$ . Оно численно составляет  $R_{2sh} = 1,58R_b$ . Это согласуется с другой известной формулой Мора

$$R_{sh} = 0,5 \sqrt{R_b R_t} \quad (10)$$

Таким образом, настоящим определяются области применения формул (2) и (10), что ранее не было известно.

Достоверность зависимости (7) рассмотрим в системе предельного состояния трубобетонного элемента, нагруженного крутящим моментом и продольной сжимающей силой. С этой целью решим уравнение (7) относительно осевого сжимающего напряжения, поменяв индексы:

$$\sigma_{bz} = \frac{R_b(K-1) + (K^2+1)\sigma_0 + \sqrt{R_b^2(K+1)^2 + 2R_b\sigma_0(K^3+K^2-K-1) + \sigma_0^2(K^2-1) - 4K(K+1)^2\tau_b^2}}{2K} \quad (11)$$

где:  $\sigma_0$  — боковое давление стальной трубы в предельном состоянии, возникающее вследствие дилатации бетона перед разрушением;  $\tau_b$  — касательное напряжение в бетоне от части крутящего момента, действующего на бетонное ядро

$$\tau_b = 16 M_{bt} / \pi d^3 \quad (12)$$

Анализ формулы (11) показывает, что она удовлетворяет граничным условиям: при  $\sigma_0 = \tau_b = 0$  (одноосное сжатие) имеем  $\sigma_{bz} = R_b$ . Во-вторых, из (11) видим, что напряжение чистого сдвига  $\tau_b > 0$  снижает прочность как одноосно (плоский сдвиг), так и трёхосно-сжатого бетона (объёмный сдвиг). В-третьих, относительное снижение прочности бетона за счет действия касательных напряжений при объёмном сдвиге значительно ниже, чем при плоском сдвиге вследствие наличия двух положительных

слагаемых под радикалом формулы (11), содержащих в качестве сомножителя боковое давление.

Зависимость для определения бокового давления сплошного бетонного ядра  $\sigma_0$  можно найти, пользуясь методом [3]:

$$\sigma_0 = \frac{\sqrt{\sigma_y^2 - 4\tau_s^2} + \alpha R_b}{\alpha(K - 2\nu_b) - 1} \left[ 1 - \beta_s \frac{\alpha(K - 2\nu_b) - 1}{1 + \nu_s} \right], \quad (13)$$

где:  $\tau_s$  — касательное напряжение за счёт действия части крутящего момента, приложенного к стальной оболочке (трубе).

$$\tau_s = 16M_{st} / [\pi D^3 (1 - d^4 / D^4)], \quad (14)$$

$$M_{st} = \alpha M_{stb} (\beta_s^4 - 1) / [1 + \alpha(\beta_s^4 - 1)], \quad (15)$$

$M_{stb}$  — полный крутящий момент, приложенный к элементу,

$\alpha = E_s / E_b$  — отношение модулей упругости,

$\nu_b, \nu_s$  — коэффициенты Пуассона бетона и стали, принимаемые равными 0,5 в предельном состоянии,

$\beta_s$  — отношение наружного диаметра стальной трубы к внутреннему.

Несущую способность трубобетонного элемента круглого сечения, нагруженного осевой сжимающей силой и крутящим моментом можно вычислить по формуле

$$N_{sb} = A_b \sigma_{bz} + A_s \sigma_{sz}, \quad (16)$$

где  $\sigma_{sz}$  — осевое расчётное сопротивление стальной трубы, нагруженной внутренним давлением бетонного ядра и крутящим моментом

$$\sigma_{sz} = \sqrt{\sigma_y^2 - 4\tau_s^2} - \sigma_0 \beta_s / (\beta_s^4 - 1) \quad (17)$$

Сравнивая представленный метод расчёта с методом [3] легко видеть, что наличие сдвига (кручения) на сжатый трубобетонный элемент снижает его несущую способность на сжатие. Аналогичный результат получаем и для полых сжато-скручиваемых трубобетонных элементов [5]. Однако обратное влияние (осевого сжатия на несущую способность при кручении) получается неоднозначным. Рассмотрим это на основе анализа экспериментальных данных.

Экспериментальные исследования трубобетонных образцов на сжатие с кручением производились на специально разработанном и изготовленном устройстве согласно изобретению [6]. Основные экспериментальные результаты этих исследований показаны на рис.1 в виде опытных точек. Штриховая линия нанесена как осреднённая опытная кривая. Из рис.1 видно, что кручение снижает осевое продольное предельное усилие и, наоборот, небольшая продольная сила повышает предельный крутящий момент. В результате получаем кривую зависимости предельных усилий, напоминающую соответствующую кривую для сжато-изогнутых железобетонных стержней.

Стальная труба и бетонное ядро в трубобетонном элементе работают совместно и являются статически неопределимой системой. Кроме того они находятся в сложном напряжённом состоянии. Поэтому техника эксперимента не позволяет опытным путём измерить величину действующих напряжений в составляющих трубобетонного элемента при его нагружении. Однако разработанная методика расчёта [3, 4, 5] даёт возможность вычислить все компоненты напряжённого состояния бетонного ядра и стальной трубы. Достоверность расчёта при этом проверяется интегральными показателями — сходимостью значений расчётных усилий с опытными. Ниже, в табл. 2, приведены основные механические показатели испытанных полых трубобетонных элементов (опыты к.т.н. Д.В.Черкасова и аспиранта Хассана).

$N_{sb}/N_{sby}$  ...

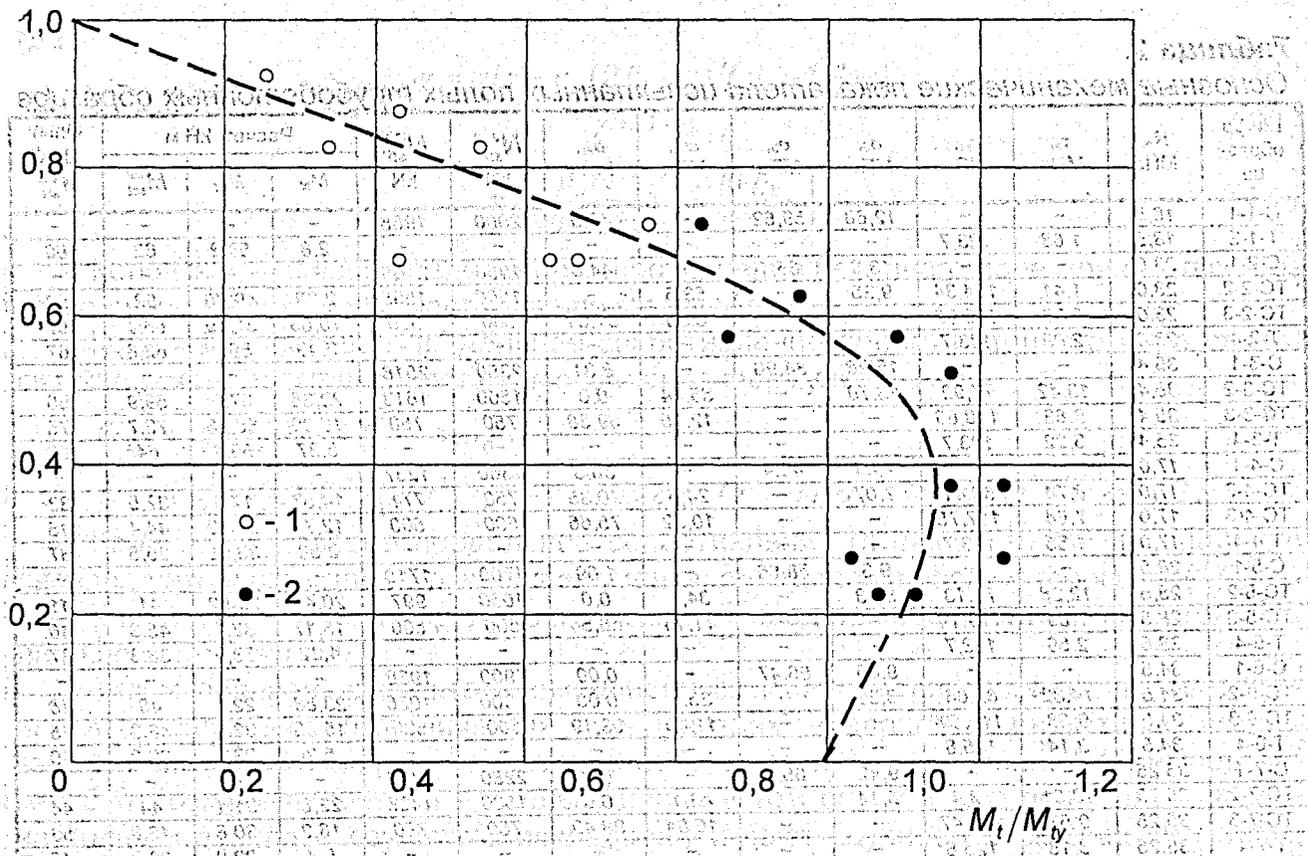


Рис. 1.

Зависимость между опытными относительными предельными усилиями  
 1 – опыты асп. Исмаила, 2 – опыты к. т. н. Черкасова и асп. Хассана

При анализе данных табл. 2 следует иметь в виду, что последние четыре образца, начиная с С-7-1 имели сплошное бетонное ядро.

Анализ табл. 2 показывает, что предельное сопротивление сдвигу (колонка: 3) было существенно разным при чистом кручении (образцы с индексом Т) и при сжатии с кручением (образцы с индексом ТС). В первом случае имеем чистый сдвиг, во втором – объёмный сдвиг. Различие достигает более чем четырёхкратной величины. Это обстоятельство имеет очень большое практическое значение, что видно из практики эксплуатации железобетонных инженерных сооружений.

Если рассмотреть последствия двух примерно одинаковых по силе землетрясений (в США 1933 г. и в Японии 1995 г.), то можно заметить существенную разницу в разрушениях и причинённом ими материальном и социальном ущербе. В США разрушения были незначительными. Причина этого кроется в том, что американские эксплуатационные службы уже десятки лет занимаются реконструкцией сильно нагруженных зданий и сооружений. Главной целью реконструкции является усиление опор мостов, путепроводов, эстакад и железобетонных колонн нижних этажей высотных зданий. Усиление производится с помощью стальных рубашек, пространство между которыми и телом железобетонной опоры заполняется самоуплотняющимся бетоном. Другими словами железобетонную опору превращают в сталежелезобетонную. В результате при горизонтальных (самых опасных) сейсмических толчках работа бетона из условий плоского сдвига переводится в объёмный сдвиг и сопротивление опор горизонтальным сейсмическим воздействиям существенно повышается.

ется. Японские инженеры этого не сделали, поэтому последствия аналогичного по силе Японского землетрясения были катастрофическими.

Таблица 2.

Основные механические показатели испытанных полых трубобетонных образцов

Шифр образца	$R_b$ , МПа	$\tau_b$ , МПа	$\tau_s$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{bz}$ , МПа	$\sigma_{sz}$ , МПа	$N_{sb}^{exp}$ , кН	$N_{sb}^{cal}$ , кН	Расчет, кН·м			Опыт кН·м $M_{sbt}^{exp}$
										$M_{bt}$	$M_{st}$	$M_{sbt}^{cal}$	
C-1-1	18,5	-	-	12,68	59,62	-	49,0	2000	1966	-	-	-	-
T-1-2	18,5	1,68	123,7	-	-	-	-	-	-	2,8	59,2	62	60
C-2-1	23,0	-	-	13,0	65,1	-	44,0	1950	2105	-	-	-	-
ТС-2-2	23,0	1,41	104,34	9,35	-	53,6	-	1500	1565	2,38	49,66	52	52
ТС-2-3	23,0	6,37	120,99	-	-	8,96	51,51	500	500	10,63	57,39	68,1	67
T-2-4	23,0	2,09	123,7	-	-	-	-	-	-	3,49	59,2	62,6	67
C-3-1	35,4	-	-	15,28	84,96	-	8,31	2350	2516	-	-	-	-
ТС-3-2	35,4	13,42	77,92	13,79	-	55,44	0,0	1500	1613	22,38	37,6	59,9	60
ТС-3-3	35,4	9,83	118,66	-	-	12,75	69,88	750	750	16,39	56,28	72,7	75
T-3-4	35,4	3,22	123,7	-	-	-	-	-	-	5,37	59,1	64	67
C-4-1	17,0	-	-	7,84	42,4	-	38,5	1300	1237	-	-	-	-
ТС-4-2	17,0	8,74	66,41	7,07	-	24,6	20,35	750	771	14,57	17,9	32,5	33
ТС-4-3	17,0	7,64	117,75	-	-	10,32	75,66	500	500	12,74	31,72	44,4	45
T-4-4	17,0	1,55	123,7	-	-	-	-	-	-	2,58	33,95	36,5	37
C-5-1	28,5	-	-	9,3	58,66	-	1,09	1700	1710	-	-	-	-
ТС-5-2	28,5	12,28	76,13	8,13	-	34,1	0,0	1000	997	20,48	20,52	41	41
ТС-5-3	28,5	7,89	119,14	-	-	11,14	66,54	500	500	13,17	32,1	45,3	46
T-5-4	28,5	2,59	123,7	-	-	-	-	-	-	4,32	33,9	38,3	37
C-6-1	34,5	-	-	9,86	66,47	-	0,00	1900	1938	-	-	-	-
ТС-6-2	34,5	14,32	82,06	8,33	-	35,8	0,00	1000	1026	23,88	22,1	46	46
ТС-6-3	34,5	9,58	119,59	-	-	11,45	63,19	500	500	15,98	32,2	48,2	45
T-6-4	34,5	3,14	125,8	-	-	-	-	-	-	5,2	33,9	39,2	40
C-7-1	35,25	-	-	9,42	65,7	-	0,0	2250	2407	-	-	-	-
ТС-7-2	35,25	13,51	78,4	8,14	-	43,1	0,0	1500	1423	22,8	21,1	44	44
ТС-7-3	35,25	9,57	113,47	-	-	16,84	98,49	750	750	16,2	30,6	46,8	53
T-7-4	35,25	3,18	125,8	-	-	-	-	-	-	5,4	33,9	39,3	45

Примечания к табл.2.

Шифр состоит из буквенных обозначений: С – осевое сжатие (compression), Т – кручение (torsion), ТС – кручение со сжатием (torsion+compression), первая цифра – номер серии, вторая цифра – номер образца.

Колонка 2 – призмная прочность, определялась на основе испытания призм и кубов.

Колонка 3 – предельное напряжение бетона на сдвиг при кручении, определялось по формуле

$$\tau_b = 16 M_{bt} / \pi d_{be}^3 (1 - \beta_b^{-4}), \quad (18)$$

где:  $M_{bt}$  – часть опытного крутящего момента, воспринимаемого бетонным ядром.

$$M_{bt} = M_{sbt} (\beta_b^4 - 1) / \varphi, \quad (19)$$

$$\varphi = \beta_b^4 [1 + \alpha (\beta_s^4 - 1)] - 1, \quad (20)$$

здесь  $M_{sbt}$  – опытный предельный момент,  $\beta_b$  – отношение наружного диаметра бетонного ядра к внутреннему,  $d_{be}$  – наружный диаметр бетонного ядра.

Колонка 4 – предельное напряжение сдвигу в стальной трубе, определялось по формуле (14). Колонка 5 – предельное боковое давление (распор) бетонного ядра сжатого или сжато-скручиваемого элемента. Если кручение отсутствует, то распор определяется по методу [3]. При наличии сжатия и кручения распор полого бетонного ядра рассчитывается по формуле:

$$\sigma_0 = (1 - \beta_s^{-\psi/x}) \left( \alpha R_b + \sqrt{\sigma_y^2 - 4\tau_s^2} \right) / \psi, \quad (21)$$

где

$$\psi = \alpha [\gamma - v_b (2\beta_b - 1) / (\beta_b - 1)] - 1, \quad (22)$$

$$\chi = 1 + v_s, \quad (23)$$

$$\gamma = \frac{\beta_b^2 K}{\beta_b^2 - 1} \left( 1 + \frac{2 \ln \beta_b^{-1}}{\beta_b^2 - 1} \right). \quad (24)$$

Колонка 6 – осевое предельное сопротивление бетонного ядра для сжатых (без кручения) элементов. Определяется по методу [3].

Колонка 7 – осевое предельное сопротивление полого бетонного ядра, сжатоскручиваемого элемента, определяющееся по формуле

$$\sigma_{bz} = \sqrt{R_b(\gamma - 1) + (\gamma^2 + 1)\sigma_0^2 + \sqrt{(\gamma + 1)^2 R_b^2 + 2(\gamma^3 + \gamma^2 - \gamma - 1)R_b\sigma_0 + (\gamma^2 - 1)^2\sigma_0^2} - 4\gamma(\gamma + 1)^2\tau_b^2} / 2\gamma. \quad (25)$$

Колонка 8 – осевое предельное сопротивление стальной трубы при наличии распора бетонного ядра и кручения элемента, определяющееся по формуле (17).

Колонка 10 – осевое предельное усилие, определяющееся либо по методу [3], либо по формуле (16).

Таким образом, результаты выполненных исследований находят подтверждение в организационно-технических мероприятиях, внедряемых интуитивно американскими инженерами при эксплуатации ответственных сооружений. Этот вывод может быть сформулирован и несколько иначе в том смысле, что представленные в настоящем докладе результаты исследований дают научное обоснование методам усиления ответственных инженерных сооружений, выполняемых с целью повышения их сейсмостойкости и прочности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лукша Л. К. Гиперболический критерий прочности. – Доклады Академии наук СССР. 1983. – т. XXVI, №6. – сс. 528-531.
2. Luksha L. Concrete Strength in Shear. // Safety of Bridge Structures. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference. - Wroctaw: Wroctawska Drukarnia Naukowa, 1992. – p. 249-254.
3. Лукша Л. К. Прочность трубобетона. – Минск: Вышэйшая школа, 1977.-96 с.
4. Luksha L. K. Composite Structures Strength Calculation Accounting Limited State Criteria. / Proceedings of the Third International Conference on Steel – Concrete Composite Structures. Fukuoka (Japan), 1991. – p. 13-18.
5. Luksha L. K. Cherkasov D. V. Strength Calculation Composite Steel-Concrete Tubular Elements with Hollow Concrete Core under Compression with Torsion. // Steel-Concrete Composite Structures. Proceedings of the Forth International Conference. – Bratislava : Expertcentrum, 1994. – p.p. 143-148.
6. Лукша Л. К. и др. Устройство для испытания элементов конструкций на сжатие с кручением. А. с. 1698685 СССР, SU 901N3/08. Заявлено 1.02.1989; Опубл. 15.12.91, Бюл. №46.