

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

А. В. БЕЛУБЕКЯН, И. А. БЕЛУБЕКЯН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ
СБОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ
ТОННЕЛЬНОЙ ОБДЕЛКИ

Традиционный способ получения высокопрочного бетона заключается в применении высокоактивного цемента при максимально возможном уменьшении водоцементного отношения. Однако при сравнительно небольшом водоцементном отношении (до 0,3) получаются малоподвижные бетонные смеси. Этот недостаток можно устранить введением в бетонную смесь пластифицирующих добавок. Наибольший технико-экономический эффект достигается при использовании суперпластификаторов, которые позволяют повысить подвижность смесей, увеличить прочность бетона и его водонепроницаемость.

Экспериментальными исследованиями установлено, что применение суперпластификаторов С-3 увеличивает прочность бетона, в среднем, на 20—25% или же при сохранении прочности и исходной подвижности уменьшается расход цемента на 50—100 кг на 1 м³, а также позволяет получать бетоны с высокой степенью водонепроницаемости, что особенно важно при возведении железобетонных обделок в обводненных и мало обводненных грунтах. При этом оптимальный расход суперпластификатора С-3 составляет 0,7—0,8% от массы цемента [1].

Испытывались элементы — блоки круглой сборной железобетонной обделки внутренним диаметром 5,5 м — криволинейные, толщиной 16 см, шириной 100 см, длиной по направляющей на уровне срединной поверхности 219,3 см, армированные стальным каркасом. Рабочая арматура каркаса — стержневая диаметром 10 мм класса А-III, двухрядная, выгнутая по дуге окружности. В поперечном сечении элемента, в каждом ряду содержится по 4 стержня диаметром по 10 мм. Поперечная арматура принята из стержней класса А-I диаметром 6 мм. Было изготовлено шесть образцов из тяжелого бетона. Состав бетона для всех образцов принят одинаковый: щебень базальтовый фракции 5—25 мм — 1120 кг; песок кварцевый — 500 кг; цемент Араратского завода активностью 450—600 кг. Первые два образца (ФТО-1, ФТО-2) были изготовлены без добавки суперпластификатора С-3, остальные четыре с добавкой С-3 в количестве 0,8% от массы цемента. Водоцементное отношение для первых двух образцов составило 0,38, а для остальных че-

тырех — 0,25. Одновременно были изготовлены и испытаны бетонные кубы и призмы. Результаты испытания кубов (R_k) и призм ($R_{пр}$) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний контрольных бетонных
призм и кубов

№ элемента	R_k , МПа	$R_{пр}$, МПа	R_p , МПа	$R_{пр}/R_k$
ФТО-1	40,9	33,8	2,55	0,83
ФТО-2	50,4	42	2,9	0,83
ФТО-3	64	51	3,6	0,8
ФТО-4	57,7	47	3	0,81
ФТО-5	63	50	3,7	0,79
ФТО-6	60,8	50,5	3,3	0,83

Элементы тоннельной обделки испытывали на специально сконструированном стенде по схеме, показанной на рис., имитирующей работу элемента в условиях, идентичных с его работой в сборной железобетонной обделке.

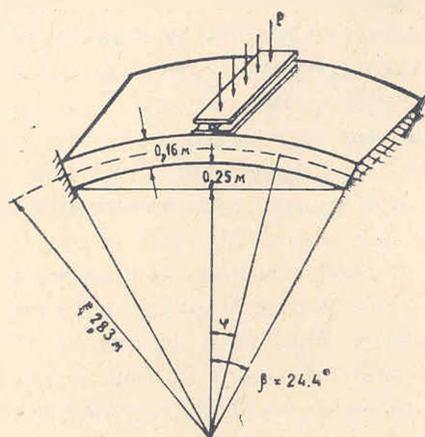


Рис. Схема загрузки элемента сборной тоннельной обделки.

Результаты статических испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытания элементов тоннельной обделки

№ элемента	$P_{гр}$, кН	P_p^0 , кН	P_p^T , кН	P_p^0/P_p^T
ФТО-1	70	360	357	1,01
ФТО-2	70	410	422	0,97
ФТО-3	100	500	494	1,01
ФТО-4	100	490	463	1,06
ФТО-5	100	510	485	1,05
ФТО-6	100	520	491	1,06

По нижней поверхности элементов отделки, под нагрузкой $P_{\text{тр}} = 0,18-0,2$ от разрушающей, были обнаружены поперечные, горизонтальные волосяные трещины. По мере повышения уровня нагрузки ширина раскрытия этих трещин увеличивалась. Разрушение всех элементов происходило в ключевой зоне элемента и это сопровождалось дроблением бетона на уровне верхней арматуры и существенным раскрытием трещины в бетоне на уровне нижней арматуры.

В табл. 2 величины разрушающих усилий P_p^0 получены из опыта, прямыми измерениями, а соответствующие расчетные величины P_p^r — по приведенной ниже методике, имея в виду, что испытанные элементы отделки представляют собой короткие, пологие, тонкие цилиндрические (круговые) оболочки. Дифференциальные уравнения оболочки, когда функции перемещений v и w зависят только от угла φ , имеют вид [2]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2v}{d\varphi^2} \left(1 + \frac{h^2}{12a^2}\right) - \frac{dw}{d\varphi} + \frac{h^2}{12a^2} \frac{d^3w}{d\varphi^3} &= 0; \\ \frac{1}{a} \frac{dv}{d\varphi} - \frac{w}{a} - \frac{h^2}{12a^3} \frac{d^4w}{d\varphi^4} - \frac{h^2}{12a^3} \frac{d^3v}{d\varphi^3} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Искомые функции перемещений v и w должны удовлетворить условиям симметрии:

$$v = 0; \quad \frac{dw}{d\varphi} = 0; \quad Q_\varphi = -\frac{P}{2} \quad \text{при } \varphi = 0 \quad (2)$$

и граничным условиям:

$$v = 0; \quad w = 0; \quad \frac{dw}{d\varphi} = 0 \quad \text{при } \varphi = \beta, \quad (3)$$

где Q_φ — поперечная сила, определяемая по формуле:

$$Q_\varphi = -\frac{D}{a^3} \left(\frac{d^2v}{d\varphi^2} + \frac{d^2w}{d\varphi^2} \right);$$

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ — цилиндрическая жесткость при изгибе.

Интегрируя первое из уравнений (1) по φ с учетом, что $h^2/12a^2 \ll 1$, получаем:

$$\frac{dv}{d\varphi} = w - \frac{h^2}{12a^2} \frac{d^2w}{d\varphi^2} + B. \quad (4)$$

Подставляем это значение во второе из уравнений (1) и приходим к дифференциальному уравнению относительно функции w

$$\frac{d^4w}{d\varphi^4} + 2 \frac{d^2w}{d\varphi^2} = \frac{12a^2}{h^2} B. \quad (5)$$

Общее решение уравнения (5) будет:

$$w = \frac{3a^2}{h^2} B\varphi^2 - \frac{c_1}{2} \cos\sqrt{2}\varphi - \frac{c_2}{2} \sin\sqrt{2}\varphi + c_3\varphi + c_4. \quad (6)$$

Из (4) с учетом (6) получаем выражения перемещения v :

$$v = \frac{B}{2} \left(\frac{2a^2}{h^2} \varphi^3 + \varphi \right) - \frac{c_1}{2\sqrt{2}} \sin \sqrt{2} \varphi - \frac{c_2}{2\sqrt{2}} \cos \sqrt{2} \varphi + \\ + c_3 \frac{\varphi^2}{2} + c_4 \varphi + D_0 \quad (7)$$

Удовлетворяя условиям (2) и (3), находим значения постоянных интегрирования:

$$c_1 = 0,989 \frac{Pa^3}{D}; \quad c_2 = 0,3525 \frac{Pa^3}{D}; \quad c_3 = 0,25 \frac{Pa^3}{D}; \\ c_4 = 0,4845 \frac{Pa^3}{D}; \quad B = -0,0005504 \frac{Pa^3}{D}; \quad D_0 = -0,125 \frac{Pa^3}{D}.$$

Зная выражения перемещений оболочки v и w , можно по следующим формулам вычислить величины изгибающего момента и нормальной силы в любом сечении оболочки:

$$M_\varphi = -\frac{D}{a^2} \left(\frac{dv}{d\varphi} + \frac{d^2w}{d\varphi^2} \right); \quad N_\varphi = -\frac{dQ}{d\varphi}. \quad (8)$$

В силу (6) — (8), между нагрузкой P , действующей на элемент обделки (рис. 1), и внутренними усилиями имеются следующие соотношения: в ключевом сечении элемента ($\varphi = 0$) —

$$M_\varphi = M_0 = 0,0544Pa; \quad N_\varphi = N_0 = 2,02P; \quad (9)$$

в опорном сечении элемента ($\varphi = \beta$) —

$$M_\varphi = M_\beta = 0,0286Pa; \quad N_\varphi = N_\beta = 2,04P.$$

Приведенные выше расчетные данные по характеру разрушения элементов обделки под нагрузкой согласуются с полученными опытными данными. Действительно, по расчетным данным $M_0 > M_\beta$, а $N_0 \approx N_\beta$, т. е. опорные участки элемента обделки — свода оболочки являются менее напряженными, чем ключевой участок и поэтому последний участок являлся наиболее вероятной зоной разрушения при заданной схеме нагружения (рис.).

Расчетную величину продольной силы в ключевом сечении свода оболочки, приложенной согласно (9) с эксцентриситетом $e_0 = M_0/N_0 = 0,00269$ ($a = 283$ см — радиус средней поверхности цилиндрического свода), вычисляли по формулам [3] при $R_b = R_{np}$, принятого по табл. 1: $R_s = 365$ МПа; $A_s = 4\varnothing 10 = 3,14$ см²; $b = 100$ см; $h_0 = 14$ см. По вычисленным для каждого из шести испытанных элементов обделки значениям N_0 , согласно (9), определяли расчетные значения разрушающей нагрузки $P_p^r = \frac{N_0}{2,02}$, представленные в табл. 2.

Данные, приведенные в последней графе этой таблицы, свидетельствуют о совпадении расчетных и экспериментальных данных.

Ա. Վ. ԲԵԼՈՒԲԵԿՅԱՆ, Բ. Ա. ԲԵԼՈՒԲԵԿՅԱՆ

ԵՐԿԱԹՔԵՏՈՆԵ ԹՈՒՆԵԼԱՅԻՆ ԵՐԵՍԱՐԿՄԱՆ ՀԱՎԱՔՈՎԻ ՏԱՐՐԵՐԻ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Ուսումնասիրվում է Ս—3 սուպերպլաստիֆիկատորի օգտագործմամբ բարձր ամրությամբ օժտված ամրանավորված ծանր բետոնից երեսարկման տարրերի ստատիկ ամրությունը: Ցույց է տրված, որ ցեմենտի զանգվածի 0,8% շափով սուպերպլաստիֆիկատորի օգտագործումը միջին հաշվով 25 %-ով մեծացնում է երեսարկման տարրերի ամրությունը: Հայտնաբերված է բավարար համապատասխանություն փորձարարական և հաշվողական արդյունքների միջև:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Белубекян А. В., Вардеванян К. Г., Мкртумян С. С. Экспериментальные исследования сопротивления высокопрочного бетона на основе суперпластификатора.— Промышленность Армении, № 11, 1986, с. 39—41.
2. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки.— М., Физматгиз, 1963.— 635 с.
3. СНиП 2-03-01-84 «Бетонные и железобетонные конструкции».— М.: Стройиздат, 1985.— 79 с.