

О распределении предварительных напряжений и оптимальной форме анкерного соединения для армированного бетона*

А. И. Надарейшвили, В. А. Петушков, С. Л. Ситников, К. В. Фролов

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

С помощью методов математического моделирования и оптимизации определена оптимальная геометрия анкера с учетом его воздействия на армированный бетон.

Ключевые слова: методы оптимизации и математического моделирования, анкер, армированный бетон.

Введение. Повышение прочности и несущей способности конструкций из армированного бетона является актуальной задачей промышленного и гражданского строительства, особенно для высотных и многопролетных сооружений, испытывающих в процессе эксплуатации разнообразные статические (весовые) и динамические (сейсмические, ветровые, ударные или взрывные) нагрузки.

Решение данной задачи заключается прежде всего в совершенствовании нормативной базы в строительстве, а также в разработке и применении новейших технологий армирования и предварительного напряжения бетона. Это должно основываться на тщательном изучении объемных напряженных состояний, процессов деформирования и разрушения армированного бетона с учетом локальных эффектов, вносимых закладными деталями и конструктивной неоднородностью.

В качестве примера реализации такого подхода ниже рассматриваются технология и оборудование для предварительного напряжения бетона, позволяющие применять их непосредственно на строительных объектах при сооружении монолитных конструкций.

Суть технологии состоит в том, что между верхней и нижней арматурными сетками в перекрытии прокладываются стальные канаты в индивидуальной оболочке для исключения сцепления с бетоном. После достижения бетоном 75...80% проектной прочности производится натяжение канатов на торец железобетонной конструкции гидравлическими домкратами (рис. 1). В результате исключается появление в сечениях конструкции растягивающих напряжений, значительно повышается несущая способность, выносливость и трещиностойкость.

Как показал опыт, применение такой технологии позволяет в отдельных случаях сократить расход арматуры и бетона до 50%, а следовательно, в два-три раза снизить нагрузки на фундамент.

Одним из наиболее ответственных элементов, используемых в технологии преднапряжения, является анкерное соединение (рис. 1,а). Его качество определяется не только прочностью и технологичностью, но и характером взаимодействия с бетоном.

* По материалам доклада на международной научно-технической конференции "Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций" (1-4 ноября 2005 г., Киев, Украина).

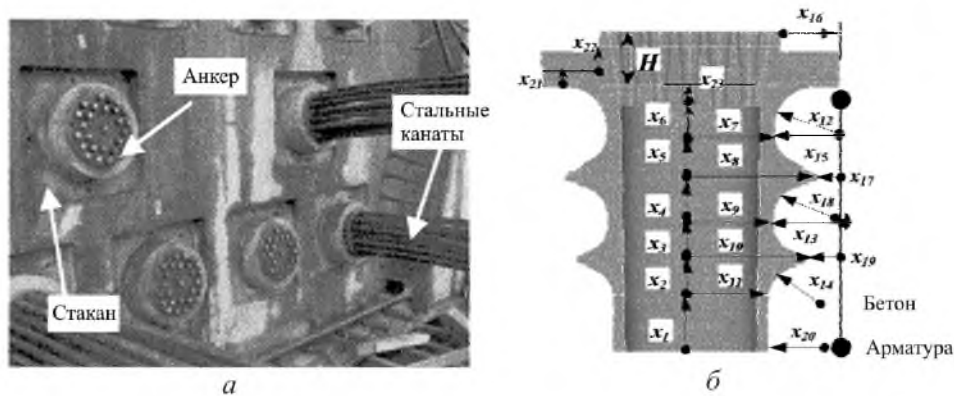


Рис. 1. Анкер-стакан, используемый при натяжении каната (а) и расчетная схема для задачи оптимизации (б).

Ниже на основе метода математического моделирования в механике деформируемых сред решаются задачи определения объемных напряженных состояний и оптимизации анкерного соединения с учетом его взаимодействия с армированным бетоном в зоне контакта. При этом особое внимание уделяется влиянию армирования на распределения напряжений и разрушение бетона.

Из системы анкеров в бетонном пролете (рис. 2), обычно используемых в мостостроении, в качестве расчетного выберем анкерное соединение в виде объема, ограниченного плоскостями симметрии $X = \pm L_1/2$ и $Y = \pm L_2/2$ с соответствующими граничными условиями. В направлении Z расчетный объем ограничим плоскостью $Z = L + \Delta$ с граничным условием $U = 0$, где L – длина спирали армирования; Δ – произвольная конечная величина. Расчетный объем включает в себя анкер, бетон и стальную арматуру с граничными условиями для плоскостей A, B, C, D (рис. 2).

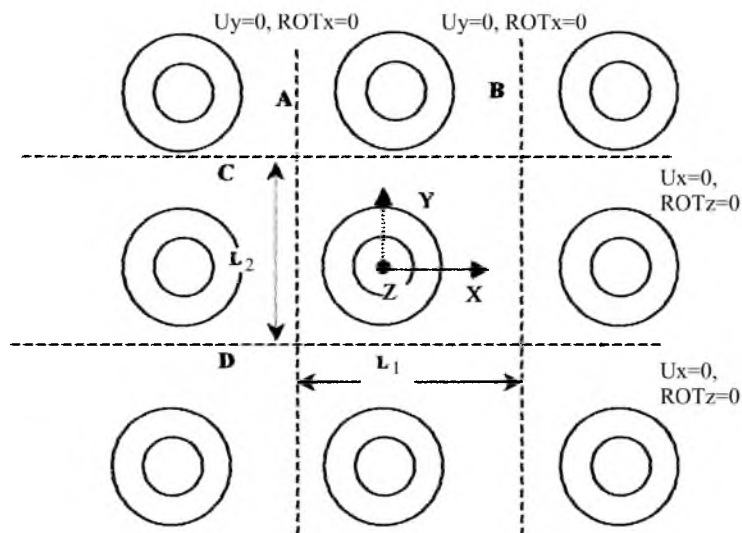


Рис. 2. Фрагмент системы анкеров в натягиваемом пролете моста.

Оптимизация анкерного соединения. Модели. Для определения оптимальной геометрии анкера рассмотрим нелинейно деформируемую среду объема V , занимающую в R^3 произвольную область D , ограниченную поверхностью Ω . Область D (тело, элемент конструкции) может включать в себя разнородные среды $b_i \in R^3: \bigcup_i b_i = D$.

Задача оптимизации заключается в нахождении $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ таких, что масса анкера $M = f(x)$ минимальна при ограничениях:

$$x_{i \min} < x_i < x_{i \max}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

и

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{\sigma_{\text{в}}}{k} < 0, \quad \forall x_i \in b_{\text{анкер}}; \quad (1)$$

$$S - \frac{F}{f_c} \leq 0, \quad \forall x_i \in b_{\text{бетон}}, \quad (2)$$

где (x_1, x_2, \dots, x_n) – множество независимых переменных; M – целевая функция; $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентные напряжения [1] в анкере; $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности материала анкера; k – коэффициент запаса прочности; функция главных напряжений F и поверхность разрушения S выражаются через главные напряжения $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ в бетоне (1, 2, 3 – направления главных осей) [2].

Неравенство (1) есть условие прочности материала [1] анкера, а неравенство (2) согласно [2] – условие неразрушения бетона при объемном напряженном состоянии.

При конечноэлементной аппроксимации целевую функцию можно записать как

$$M = \rho \int_{V_{\text{анкер}}} dV = \rho \sum_i V_i,$$

где V_i – объем i -го конечного элемента.

Для увеличения ресурса работы анкера, т.е. допустимости его работы в пластической зоне, в качестве предела допустимых напряжений используем предел прочности материала (сталь марки 45Л, ГОСТ 977-88, $\sigma_{\text{т}} = 250$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 500$ МПа), коэффициент запаса прочности равен 1,5.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) в бетоне определяли по модели [2], которая отражает линейно-упругое, пластическое поведение бетона и его хрупкое разрушение.

При моделировании физической нелинейности материалов анкера и арматуры, если они работают за пределами упругости, используем теорию пластичности с изотропным упрочнением и билинейной диаграммой деформирования [1].

Методы решения. Для уменьшения числа параметров, задающих геометрию тела, рассмотрим анкер-стакан (рис. 1,а). На основе выбранных независимых переменных $x_i, i = 1, \dots, 23$ ($H = \text{const}$), построим геометрию

расчетного объема (рис. 1,б). Для решения задачи оптимизации используем метод первого порядка [3]. В каждом j -м шаге оптимизации вычисляется вектор определения направления поиска d^j [4]. Переход к шагу $j+1$ выполняется по формуле

$$x^{j+1} = x^j + s_j d^j,$$

где s_j – параметр линейного поиска [4].

Внутри цикла оптимизации методом конечных элементов решается матричное уравнение [5]:

$$[K]\{u\} = \{F^a\}, \quad (3)$$

где $[K]$ – матрица жесткости, которая в нелинейном случае является функцией от $\{u\}$; $\{u\}$ – вектор перемещений; $\{F^a\}$ – вектор приложенных нагрузок.

В качестве конечных элементов (КЭ) используем трехмерные и восьми-узловые элементы [6, 7] для пространственной дискретизации бетона и анкера, а также трехмерные балочные и двухузловые элементы [8] для арматуры, включая спираль.

Для численного решения нелинейных КЭ уравнения (3) используем метод Ньютона–Рафсона [9].

Результаты расчетов. Результаты оптимизации дают новую форму анкера (рис. 3). При деформировании расчетного объема разрушение отсутствует. Повреждения бетона в виде микротрещин, определяемые в точках интегрирования в пределах КЭ, распространяются только до второго витка спирали (рис. 3).

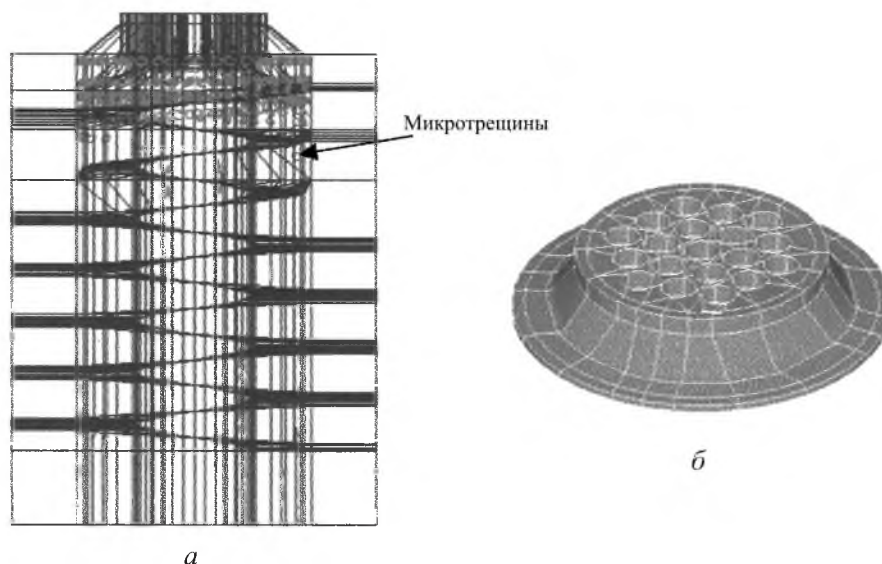


Рис. 3. Повреждение бетона в виде локальных микротрещин (разрушение отсутствует) – а и оптимизированная форма анкера – б.

Численное моделирование показало, что наличие радиальных связей ($u_x + u_y = 0$) на цилиндрической поверхности бетона в направлении сжатия увеличивает его прочность, не позволяя разрушаться. Конструктивно наличие радиальных связей на боковой поверхности цилиндра можно обеспечить путем введения арматурной спирали.

Согласно результатам расчета, в нашем случае материал арматуры работает в пределах упругости, а в анкере возникают допустимые локальные пластические напряжения.

Для сравнения НДС в бетоне от действия двух разных анкеров рассмотрим задачу сжатия бетона анкер-стаканом, используемым на практике (рис. 1,а). Картина повреждения армированного бетона в этом случае показана на рис. 4.

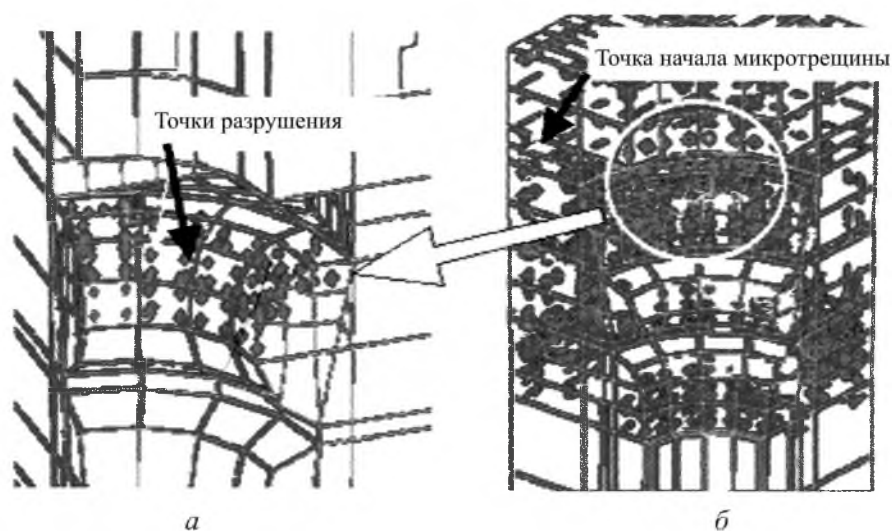


Рис. 4. Разрушение на поверхности первого витка контактной зоны (а) и область повреждения бетона с микротрещинами вокруг анкер-стакана (б).

Сравнение рис. 3 и 4 свидетельствует о том, что в последнем случае поврежденная зона в окрестности анкер-стакана является большей. Здесь имеют место как микротрещины, так и частичное разрушение бетона. Однако характер разрушения локальный. На первой ступени контактной зоны в бетоне напряжения релаксируют вследствие местного разрушения, а основные сдерживающие анкер-стакан напряжения распределены на второй и третьей ступенях контактной зоны.

Заключение. Приведены результаты изучения НДС и разрушения обычно применяемых и оптимизированных конструкций анкеров и анкерных соединений, используемых в технологии предварительного напряжения армированного бетона.

Выполненные исследования позволили обосновать выбор основных параметров технологии и получить существенное снижение металлоемкости анкеров (до 60%) и повышение их технологичности при более благоприятном (менее повреждаемом) воздействии на армированный бетон в анкерном узле.

Резюме

За допомогою методів математичного моделювання і оптимізації визначено оптимальну геометрію анкера з урахуванням його впливу на армований бетон.

1. *Малинин Н. Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиноведение, 1975. – 323 с.
2. *Willam K. J. and Warnke E. D.* Constitutive model for the triaxial behavior of concrete // Proc. Int. Association for Bridge and Structural Engineering (Bergamo, Italy). – 1975. – **19**. – P. 174 – 179.
3. *Cohoin J. L.* Multi Objective Programming and Planning. – New York: Academic Press, 1978. – 175 p.
4. *Fletcher R. and Reeves C.* Function minimization by conjugate gradients // The Computer J. – 1964. – **7**. – P. 149 – 154.
5. *Стренг Г., Фикс Дж.* Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 232 с.
6. *Wilson E. L., Taylor R. L., Doherty W. P., and Ghaboussi J.* Incompatible displacement models // Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics / Ed. S. J. Fenves. – New York: Academic Press, 1973. – P. 43 – 57.
7. *Taylor R. L., Beresford P. J., and Wilson E. L.* A non-conforming element for stress analysis // Int. J. Num. Meth. Eng. – 1976. – **10**. – P. 1211 – 1219.
8. *Przemieniecki J. S.* Theory of Matrix Structural Analysis. – New York: McGraw-Hill, 1968. – 175 p.
9. *Bathe K. J.* Finite Element Procedures. – Prentice-Hall, 1996. – 183 p.

Поступила 04. 11. 2005