МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОНА

[1] *доцент,* ***Миралимов Мирзахид Хамидович***
[2] *инженер,* ***Султанов Отабек Раджапобич***
[1]*Ташкентский государственный транспортный университет*
[2]*МОСТООТРЯД №67 - г. ТАШКЕНТ*

Аннотация. В статье методика соединения железобетонных конструкций с учетом упругопластических свойств бетона.

Ключевые слова: деформация, закон пластического течения, закона нормальности.

METHODOLOGY FOR CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT THE ELASTIC-PLASTIC PROPERTIES OF CONCRETE

Abstract. In the article, the method of joining reinforced concrete structures, taking into account the elastic-plastic properties of concrete.

Keywords: deformation, plastic flow law, normality law.

В настоящее время имея недостатки и ограничения, линейно-упругие модели редко стали применяться в проектировании [1]. Более совершенными по сравнению с упругими являются пластические модели бетона. Идеально упругопластические модели рассмотрены в работах [2], а упругопластические с упрочнением в работах [3]. Даже при проведении простого одноосного испытания можно легко убедиться в том, что бетон работает неупруго, поскольку при разгрузке восстанавливается лишь некоторая часть полной величины вызванных деформаций. Естественно поэтому, модели на основе теории пластичности получили широкое применение при моделировании бетона. Различают два типа моделей: идеально упругопластические и с упрочнением. Построение определенных соотношений между напряжениями и деформациями при пластическом течении, характерном для идеально упругопластических моделей основывается на трех фундаментальных предпосылках: существование «поверхности текучести»; существование «закона текучести» (пластического течения); предположение, что после начало текучести полное приращение деформации $d\varepsilon$ можно разложить на упругую $d\vec{\varepsilon}_e$ и пластическую $d\vec{\varepsilon}_p$ составляющие :

$$d\vec{\varepsilon} = d\vec{\varepsilon}_e + d\vec{\varepsilon}_p \qquad (1)$$

Первая предпосылка означает, что существует некоторая функция действующих напряжений F «поверхность текучести», которая определяет границы области упругой работы материала и начала пластической работы.

При достижении этой поверхности может наблюдаться неограниченное пластическое течение при постоянном напряжении. Согласно второй предпосылке между приращением пластической деформации и некоторой функцией напряженного состояния существует отношение

$$d\varepsilon_P = d\lambda(\partial G / \partial\sigma) \qquad (2)$$

где, $d\lambda > 0$ - скалярный коэффициент пропорциональности, а $\partial G / \partial\sigma$ - градиент функции G , определяющий направление приращения пластической деформации. В частном случае

$$d\varepsilon_P = d\lambda(\partial F / \partial\sigma) \qquad (3)$$

Поскольку направляющие косинусы вектора, нормального к поверхности F, пропорциональны к поверхности $\partial F / \partial\sigma$, это соотношение означает, что пластическое течение развивается в направлении нормали к поверхности текучести F, поэтому выражение (3) получило название «закона нормальности» или «закон пластического течения» [4, 5]. Из необратимости пластических деформаций следует, что приращение пластической работы $\Delta W_P = \frac{1}{2} d\sigma d\varepsilon_P \geq 0$

Замечая выражение $d\vec{\varepsilon}_p$ в соответствии с (3), получим

$$\Delta W_P = \frac{1}{2} d\lambda d\sigma(\partial F / \partial\sigma) \geq 0 \qquad (4)$$

В соответствии с третьей предпосылкой полное приращение деформации может быть представлено суммой упругой и пластической составляющих в виде (1). Тогда приращения напряжений $d\vec{\sigma}$ связана с соответствующими приращениями деформаций через матрицу предельного состояния выражением [6]:

$$d\vec{\sigma} = D_{ep} d\vec{\varepsilon} \qquad (5)$$

где, для не упрочняющегося материала

$$D_{ep} = \left[D - \frac{[D\vec{a}][D\vec{a}]^T}{\vec{a}^T D\vec{a}} \right] \qquad (6)$$

где a- вектор пластического состояния, а **D** - для случая плоской деформации имеет следующий вид:

$$D^{-1}=\frac{1}{E}\begin{bmatrix}1 & -\nu & 0 & -\nu\\ -\nu & 1 & 0 & -\nu\\ 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0\\ -\nu & -\nu & 0 & 1\end{bmatrix} \qquad (7)$$

здесь E, v - соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона. Матрица **D** в формуле (6) получается обращением матрицы (7) и имеет вид:

$$D=\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{bmatrix}1-\nu & \nu & 0 & \nu\\ \nu & 1-\nu & 0 & \nu\\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0\\ \nu & \nu & 0 & 1-\nu\end{bmatrix} \qquad (8)$$

Если, применительно к хрупким материалам (бетонной среде), в качестве функции текучести принять условие Мора-Кулона:

$$F=\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}-\frac{\sigma_1+\sigma_3}{2}\sin\varphi-c\cdot\cos\varphi=0 \qquad (9)$$

то, считается при $dF(\vec{\sigma})=0$ увеличение напряжения сверх предела не существует. При снятии нагрузки т. е $dF(\vec{\sigma})<0$, материал ведет себя упруго:

$$dF(\vec{\sigma})=\frac{\partial F(\vec{\sigma})}{\partial\vec{\sigma}}d\vec{\sigma}=0,\quad \vec{a}^T=\frac{\partial F(\vec{\sigma})}{\partial\vec{\sigma}}-\text{вектор текучести}$$

где c,φ - коэффициент сцепления и угол внутреннего трения материала.

Для разработки методики расчета используем метод конечных элементов [5,7] с четырехугольным изопараметрическим и стержневыми элементами. (рис.1) В соответствии общей концепции метода конечных элементов рассчитываемая конструкция разбивается на дискретные элементы соединенные друг с другом в конечном числе узловых точек. В рассматриваемой задаче зависимости напряжения-деформации нелинейны.

Упругопластическую задачу будем формализовать в приращениях [7]. При этом необходимо давать приращения нагрузке и на каждом i-ом шаге искать решение. К предварительно найденному решению добавляется вновь найденное решение до тех пор, пока нагрузка не достигнет заданного значения. Таким образом:

$$\{P\}_i=\{P\}_{i-1}+\{\Delta P\}_i \qquad \{u\}_i=\{u\}_{i-1}+\{\Delta u\}_i \quad \{\sigma\}_i=\{\sigma\}_{i-1}+\{\Delta\sigma\}_i$$
$$\{\varepsilon\}_i=\{\varepsilon\}_{i-1}+\{\Delta\varepsilon\}_i$$

Распределение смещений в элементах находим из смещения узлов по соотношению:

$$\{\Delta u\} = [N]\{\Delta u\}^e \tag{10}$$

где $[N]$- форм-функция, $\{\Delta u\}^e$ - вектор приращения смещения узлов элемента.

Деформации и напряжения в элементе определяются по смещению узлов соответственно следующим образом:

$$\{\Delta\varepsilon\}^e = [B]\{\Delta u\}^e, \{\Delta\sigma\}^e = [D]\{\Delta\varepsilon\}^e \tag{11}$$

где $[B]$- матрица дифференцирования, $[D]$-матрица упругости материала. Подробно эти матрицы описываются в [7, 10].

$$[k]^e\{\Delta u\}^e = \{\Delta P\}^e \quad \text{где,} \quad [k]^e = \int_{Ve}[B]^{\mathrm{T}}[D][B]dv,$$

$$\{\Delta P\}^e = \int_{Se}[N]^{\mathrm{T}}\{\Delta q\}^e ds \tag{12}$$

Здесь $[B]$ - матрица дифференцирования перемещений, t - толщина элемента, $[N]$ - функции формы, $[D]$ - матрица зависимости между напряжениями и деформациями.

Литература

1. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов, М.: Стройиздат, 1982, 448 с.
2. Байков С.Д. Железобетонные конструкции. М.: Стройиздат, 1989, с.423.
3. Бернштейн М.С. Расчет конструкций с односторонними связями, М.: Стройиздат, 1947, с.92.
4. Особенности технологии возведения дисперсно-армированного пролетного строения в условиях сухого жаркого климата Узбекистана
5. СВ Чижов, ЭТ Яхшиев, ШУ Нормуродов Новые технологии в мостостроении, 147-156
6. Миралимов, М. Х., & Нормуродов, Ш. У. THE ENGINEERING DECISIONS FOR MITIGATION OF DAMAGES IN LANDSLIDE HAZARDOUS REGIONS OF UZBEKISTAN.
7. Miralimov, M., Normurodov, S., Akhmadjonov, M., & Karshiboev, A. (2021). Numerical approach for structural analysis of Metro tunnel station. In E3S Web of Conferences (Vol. 264, p. 02054). EDP Sciences.