

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Джабраилова Гульнара Ханлар- т.е.п., доцент, кафедра Эксплуатации и реконструкции зданий и сооружений, АЗАСУ, gulnara.djebrailova@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается определение сейсмической нагрузки на основании нелинейной деформационной модели изгибаемых железобетонных элементов. Цель работы заключается в том, что в практических расчетах при определении жесткостей изгибаемых и других элементов железобетонных сооружений ввести реальные характеристики бетона и арматуры и исследовать влияние этих деформационных характеристик на сейсмостойкость железобетонных элементов. В зависимости от жесткости элементов сооружений использован динамический метод сейсмостойкости конструкций. Новизна работы заключается в том, что при определении жесткости изгибаемых железобетонных элементов используется нелинейная деформационная модель механики твердых тел. Приводятся численные примеры. На основании результатов численных примеров сделан вывод об значительном увеличении сейсмической нагрузки при учете ползучести и длительной прочности бетона.

Ключевые слова: Жесткость, железобетонный элемент, нелинейная деформационная модель, сейсмостойкость, сейсмический импульс, динамический метод

THEORETICAL FOUNDATIONS FOR THE STUDY OF SEISMIC RESISTANCE OF BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Jabrayilova Gulnara Khanlar-PhD in tech.sc., ass.prof., department of Operation and reconstruction of buildings and facilities, AZUAC, gulnara.djebrailova@gmail.com

Abstract. This paper will focus on finding the seismic load based on a nonlinear deformation model of the bent reinforced concrete elements. The aim of this paper is to introduce the real characteristics of concrete and armature in practical calculations of finding the rigidity of bending elements and other elements of reinforced concrete structures and to study the effect of these deformational characteristics on the seismic resistance of reinforced concrete elements. The method of seismic resistance of the construction is chosen based on the rigidity of the elements of the construction. The novelty of this research work lies in the fact that a nonlinear deformational model of solid mechanics is used in order to find the rigidity of bent reinforced concrete elements. This paper provides numerical examples. The conclusion about a significant increase in seismic load was made based on the results of numerical examples, that are considering creep of concrete and long-term strength of concrete.

Keywords: Rigidity, reinforced concrete element, nonlinear deformational model, seismic resistance, seismic impulse, dynamic method

Во время землетрясений происходят беспорядочные смещения и колебания поверхности земной коры, которые в общем случае можно разложить на горизонтальные и вертикальные. Эти смещения и колебания передаются непосредственно фундаменту сооружения, а через него и самому сооружению, вызывая в нем добавочные нагрузки инерционные силы, которые необходимо учитывать при расчетах элементов сооружений.

Инерционные силы сооружения зависят как от смещений и колебаний фундамента, так и от смещений сооружения и его элементов и жесткости этих элементов.

Надо отметить, что при определении жесткости железобетонных элементов до сих пор не учитывались деформационные характеристики бетона и арматуры.

Цель настоящей работы заключается в том, что в практических расчетах при определении жесткостей изгибаемых и других элементов ввести реальные характеристики бетона и арматуры и исследовать влияние этих реальных деформационных характеристик на сейсмостойкость железобетонных элементов. В зависимости от жесткостей элементов сооружения имеется два метода расчета- статический и динамический.

Новизна работы заключается в том, что при определении изгибных жесткостей железобетонных элементов используется нелинейная деформационная модель механики твердых деформируемых тел, что приводит к применению динамического метода сейсмостойкости.

Как известно, при длительном действии нагрузки в бетоне происходит ползучесть и в результате уменьшение прочности бетона. В результате неупругих деформаций и уменьшение прочности бетона, а также упрочнение прочности арматуры после предела текучести значительно влияют на сейсмостойкость железобетонных элементов. Учет этих характеристик, а также исследование влияния реальных деформационных параметров на сейсмостойкость сооружений имеет важное практическое значение.

В литературе может быть имеются немногочисленные работы, которые были посвящены этой проблеме. Поэтому, на наш взгляд эта проблема решается впервые.

Ввиду того, что в работе расчет сооружений ведется в основном при кинематических возмущениях их фундаментов.

В упрощенной постановке задача сводится к расчету изгибаемой балки с распределенной массой.

Перемещение массы складывается из перемещения от смещения фундамента и перемещения вследствие изгиба балки.

$$W = w + w_B$$

Сейсмическая реакция – силы инерции определяется следующим образом:

$$I = -M(\ddot{w} + \ddot{w}_B) - \beta M(\dot{w}_B + \dot{w})$$

Сейсмическая нагрузка действующая на железобетонный изгибающийся элемент определяется по формуле:

$$S(x, t) = -M \ddot{w} - \beta M \dot{w}_B = -\frac{q}{g}(\ddot{w}_B + \beta \dot{w})$$

Поскольку инерционная сила $-M \ddot{w}$ – по существу величина заданная, то она может быть переведена в категорию известных действующих сил. Это обстоятельство позволяет расчет на вынужденные смещения заменить расчетом на заданные силы $(-M \ddot{w}_B)$ при начальных условиях движения распределенной массы.

Силы сопротивления зависят от многих факторов и определения их в аналитической форме связаны с трудностями.

$$P(x, t) = -M\beta M \dot{w}_t$$

здесь β - коэффициент внутреннего трения, $\frac{1}{сек}$

Таким образом, во время землетрясения на железобетонный элемент действуют следующие силы:

-Заданная активная нагрузка q_x ;

- Силы инерции $-M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$;

-Сила сопротивления движения балки

$$P(x, t) = -M\beta \frac{\partial \dot{w}}{\partial t}$$

Внешняя нагрузка будет равна:

$$S(x, t) = q_x - M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \beta M \frac{\partial \dot{w}}{\partial t}$$

В каркасных зданиях схемах опирания изгибаемых железобетонных элементов разнообразна. Дифференциальное уравнение изгибаемых железобетонных элементов имеет следующий вид:

$$Dw^{IV} = -S(x, t) \text{ или же } Dw^{IV} + M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + P(x, t) = -q(x, t)$$

Здесь D – жесткость изгибаемых железобетонных элементов и определяется на основании нелинейной деформационной модели механики твердых деформируемых тел.

Надо отметить, что до сих пор при исследовании задача сейсмостойкости изгибаемых железобетонных элементов решалась в упругой стадии работы бетона и не учитывалась работа бетона при длительном действии нагрузки, когда происходит ползучесть и длительная прочность бетона. Задача свободных колебаний изгибаемых железобетонных элементов сводится к решению следующего дифференциального уравнения.

$$D \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

Решение этого уравнения имеется в многочисленных работах по теории колебаний изгибаемых элементов без учета ползучести бетона.

Принимались решения уравнения свободных колебаний балок в виде:

$$y(x, t) = \sin \omega t \sum_m C_m X_m(x)$$

Здесь ω - частота свободных колебаний балок:

$X_m(x)$ - форма свободных колебаний, удовлетворяет условия на краях закрепления балки

и приняты в следующем виде:

$$X_m(x) = B_m [\sin \lambda_m x - sh \lambda_m x - \lambda_m (\cos \lambda_m x - ch \lambda_m x)]$$

Здесь

$$\lambda_m = \frac{2m-1}{2H} ; \quad \lambda_m = \frac{\sin \lambda_m H + sh \lambda_m H}{\cos \lambda_m H + ch \lambda_m H}$$

Частоты свободных колебаний изгибаемых железобетонных элементов определяются следующей формулой:

$$\omega_m^2 = \frac{DH}{M} \frac{1}{\int X_m^2(x) dx} \left[\lambda_m^4 \int X_m^2(x) dx \right]$$

Фундаментальные функции балок даны в [3] и определяется в виде:

$$X_m^{IV}(x) = \lambda_m^4 X_m(x); \quad \int X_m^2(x) dx = \frac{H}{4}$$

Таким образом, частота свободных колебаний определяется по формуле:

$$\Omega_m^2 = D \lambda_m^4$$

Ввиду того, принимается $\Omega_m^2 = M \omega_m^2$, тогда

$$\omega_m^2 = \frac{D}{M} \lambda_m^4 = \frac{\pi^4 (2m-1)^4 D}{16 H^4 M}$$

В данной работе учитывается диаграмма состояния бетона, имеющая двухлинейную форму, приведена в виде:

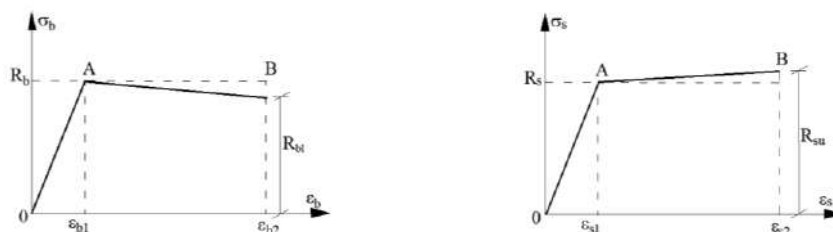


Рис 1. Диаграммы состояния бетона и арматуры

После изучения свободных колебаний балок, рассматривается сейсмостойкость железобетонных элементов. Сейсмическая нагрузка определяется в виде:

$$S(x, t) = My_0''(t)$$

Здесь $y_0(t)$ – сейсмический импульс.

Функция сейсмического импульса принята в следующих известных формах:

1. $w_B(t) = a_0 \sin \omega t$ (импульс Завриева)
2. $w_B(t) = a_0 e^{-\varepsilon_0 t} \sin \omega t$ (импульс Корчинского)
3. $w_B(t) = a_0 t e^{-\varepsilon_0 t} \sin \omega t$ (импульс Берлаге)
4. $w_B(t) = a_0 Q(t) e^{-\varepsilon_0 t} \sin \omega t$ (обобщенная форма импульса)

Надо отметить первые две формы сейсмических импульсов не удовлетворяют начальным условиям задачи:

$$\dot{w}_0(0) = 0 \quad \text{и} \quad w_B(0) = 0$$

Уравнение сейсмостойкости изгибаемых элементов принимает следующий вид:

$$Dw^{IV} + M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -S(x, t)$$

или же

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^2} + M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = M \ddot{w}_B(t)$$

где

$$M \ddot{w}_B(t) = \frac{Q}{Hg} a_0 \omega^2 e^{-\varepsilon_0 t} [p(t) \sin \omega t + \varphi(t) \cos \omega t]$$

Задача решается в общем виде:

Принимая $w_B(t) = a_0 Q(t) e^{-\varepsilon_0 t} \sin \omega t$

Введя следующие обозначения:

$$K_s = \frac{\omega^2 a_0}{g}; \quad q = \frac{Q}{H}; \quad S(x, t) = K_s q e^{-\varepsilon_0 t} [p(t) \sin \omega t + \varphi(t) \cos \omega t]$$

Здесь полиномы $p(t)$ и $\varphi(t)$ в зависимости от выражения обобщенного сейсмического импульса $w_B(t)$ имеют следующий вид:

$$p(t) = \left(1 - \frac{\varepsilon_0^2}{\omega^2}\right) Q(t) + \frac{2\varepsilon_0}{\omega} \dot{Q}(t) - \frac{\ddot{Q}(t)}{\omega^2}$$

$$\varphi(t) = -\frac{2\varepsilon_0}{\omega} Q(t) - \frac{2}{\omega} \dot{Q}(t)$$

Таким образом, уравнение сейсмостойкости изгибаемых элементов принимает следующий вид:

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = K_s q e^{-\varepsilon_0 t} [p(t) \sin \omega t + \varphi(t) \cos \omega t] \quad (1)$$

Решение уравнения (1) сейсмостойкости изгибаемых элементов принимается в виде рядов, разложенных по собственной форме колебаний в виде:

$$w(x, t) = \sum_m T_m(t) X_m(x) \quad (2)$$

Правую часть уравнения сейсмостойкости (1) тоже разлагается по форме свободных колебаний и учитывая эти решения в уравнении сейсмостойкости изгибаемых элементов, получим:

$$\ddot{T}_m(t) + \omega_m^2 T_m(t) = \frac{1}{M} q_m(t) \quad (3)$$

Решение этого уравнения принимаем в следующем виде:

$$T_m(t) = \frac{1}{M} K_s q \eta_m e^{-\varepsilon_0 t} [p_1(t) \sin \omega t + \varphi_1(t) \cos \omega t]$$

$$\ddot{T}_m(t) = \frac{1}{M} K_s q \eta_m e^{-\varepsilon_0 t} [p_2(t) \sin \omega t + \varphi_2(t) \cos \omega t]$$

Здесь η_m является коэффициентом формы колебания и имеет вид:

$$\eta_m = \frac{\int X_m(x) dx}{\int X_m^2(x) dx}$$

Чтобы $T_m(t)$ было решение (I), получим следующие условия:

$$p_2(t) + \omega_m^2 p_1(t) = p(t) \quad (4)$$

$$\varphi_2(t) + \omega_m^2 \varphi_1(t) = \varphi(t)$$

Здесь полиномы $p_1(t)$ и $\varphi_1(t)$ в зависимости от принятого $Q(t)$ являются известными.

Полиномы $p_2(t)$ и $\varphi_2(t)$ в зависимости от $Q(t)$ определяются из (4) в виде:

$$p_2(t) = (\varepsilon_0^2 - \omega^2)p_1(t) - 2\varepsilon_0\dot{p}_1(t) + \ddot{p}_1(t) + 2\varepsilon_0\omega\varphi_1(t) - 2\omega\dot{\varphi}_1(t)$$

$$\varphi_2(t) = (\varepsilon_0^2 - \omega^2)\varphi_1(t) - 2\varepsilon_0\dot{\varphi}_1(t) + \ddot{\varphi}_1(t) - 2\varepsilon_0\omega p_1(t) + 2\omega\dot{p}_1(t)$$

При решении задачи степени полиномов $p_1(t)$ и $\varphi_1(t)$ принимают равным степени полинома $Q(t)$.

В большинстве случаев степень полинома $Q(t)$ принимается равным двум, поэтому $p_1(t)$ и $\varphi_1(t)$ тоже принимается в виде:

$$p_1(t) = At^2 + Bt + C$$

$$\varphi_1(t) = A_1t^2 + B_1t + C_1$$

Учитывая полиномы $p_1(t)$, $\varphi_1(t)$ и $Q(t)$ для полиномов $p_2(t)$ и $\varphi_2(t)$ получим следующие решения:

$$\begin{aligned} p_2(t) &= [(\varepsilon_0^2 - \omega^2)A + 2\varepsilon_0\omega A_1]t^2 + \left[\begin{array}{l} (\varepsilon_0^2 - \omega^2)B - 4\varepsilon_0A_1 + \\ + 2\varepsilon_0\omega B_1 - 4\omega A \end{array} \right]t + \\ &+ [(\varepsilon_0^2 - \omega^2)C - 2\varepsilon_0B + 2A + 2\varepsilon_0\omega C_1 - 2\omega B_1] \\ \varphi_2(t) &= [(\varepsilon_0^2 - \omega^2)A_1 + 2\varepsilon_0\omega A]t^2 + \left[\begin{array}{l} (\varepsilon_0^2 - \omega^2)B_1 - 4\varepsilon_0A_1 + \\ + 2\varepsilon_0\omega B - 4\omega\varepsilon_0B - 4\omega A \end{array} \right]t + \\ &+ [(\varepsilon_0^2 - \omega^2)C_1 - 2\varepsilon_0B_1 + 2A_1 + 2\varepsilon_0\omega C + 2\omega B] \\ \beta_m(t) &= e^{-\varepsilon_0 t} \left\{ \begin{array}{l} [1 - (\varepsilon_0^2 - \omega^2)A + 2\varepsilon_0\omega A_1]t^2 + \\ + [(\varepsilon_0^2 - \omega^2)C - 2\varepsilon_0B + 2A + 2\varepsilon_0\omega C_1 - \\ - 2\omega A_1] \end{array} \right\} \sin \omega t + \\ &+ e^{-\varepsilon_0 t} \left\{ \begin{array}{l} [1 - (\varepsilon_0^2 - \omega^2)A_1 + 2\varepsilon_0\omega A]t^2 + \\ + [(\varepsilon_0^2 - \omega^2)B_1 - 4\varepsilon_0A - 2\varepsilon_0\omega + 4\omega A]t + \\ + [(\varepsilon_0^2 - \omega^2)C_1 - 2\varepsilon_0B_1 + 2A - 2\varepsilon_0C + 2\omega B] \end{array} \right\} \cos \omega t \end{aligned}$$

Определение коэффициентов A , B и C и A_1 , B_1 , C_1 полиномов $p_1(t)$, $\varphi_1(t)$ сводится к решению следующих последовательных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2)A + 2\varepsilon_0\omega A_1 = 1 - \frac{\varepsilon_0^2}{\omega^2} \\ -2\varepsilon_0\omega A + (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2)A_1 = \frac{2\varepsilon_0}{\omega} \end{cases} \begin{cases} (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2)B + 2\varepsilon_0\omega B_1 = -\frac{4\varepsilon_0}{\omega} + 4\varepsilon_0A + 4\omega A_1 \\ -2\varepsilon_0\omega B + (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2)B_1 = \frac{4}{\omega^2} - 4\varepsilon_0A_1 + \omega A \end{cases} \begin{cases} (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2)C + 2\varepsilon_0\omega C_1 = \frac{2}{\omega^2} + 2\varepsilon_0B - 4\omega B_1 - 2A \\ -2\varepsilon_0\omega C + (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2)C_1 = 2\varepsilon_0B_1 - 2\omega B - 2A_1 \end{cases}$$

Последовательно решив эти алгебраические уравнения, находим:

$$A = \frac{1}{D_{0n}} \left[\left(1 - \frac{\varepsilon_0^2}{\omega^2} \right) (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2) - 4\varepsilon_0^2 \omega^2 \right]$$

$$A_1 = \frac{1}{D_{0n}} \left[\frac{2\varepsilon_0}{\omega} (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2) + 2\varepsilon_0 \omega \left(1 - \frac{\varepsilon_0^2}{\omega^2} \right) \right]$$

$$B = \frac{1}{D_{0n}} \left[\left(\frac{4\varepsilon_0}{\omega} + 4\varepsilon_0 A + 4\omega A_1 \right) (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2) + 4\varepsilon_0 \omega \left(\frac{4}{\omega} - 4\omega A - 4\varepsilon_0 A_1 \right) \right]$$

$$B_1 = \frac{1}{D_{0n}} \left[2\varepsilon_0 \omega \left(\frac{4\varepsilon_0}{\omega} + 4\varepsilon_0 A + 4\omega A_1 \right) - \left(\frac{4}{\omega} + 4\omega A - 4\varepsilon_0 (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2) A_1 \right) \right]$$

$$C = \frac{1}{D_{0n}} [(2\varepsilon_0 B - 2\omega B_1 - 2A) - (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2)]$$

$$C_1 = \frac{1}{D_{0n}} \left[\frac{1}{D_{0n}} \left(\frac{4}{\omega} - 2\varepsilon_0 B + 2\omega B_1 + 2A \right) \right]$$

где

$$D_{0n} = (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2)^2 + 4\varepsilon_0^2 \omega^2$$

Таким образом решение задачи получится в виде:

$$w(x, t) = \frac{K_s q}{M} e^{-\varepsilon_0 t} \sum_m \eta_m [p_1(t) \sin \omega t + \varphi_1(t) \cos \omega t] X_m(x) \quad (5)$$

После нахождения решения $T_m(t)$ можно найти решения уравнения сейсмостойкости разложенные в ряды.

Правая часть уравнения сейсмостойкости имеет вид:

$$q_s(x, t) = -M(\ddot{w} + \ddot{w}_B) - \beta M(\dot{w}_B + \dot{w}) = K_s q \sum_m \eta_m \beta_m(t) X_m(x)$$

Здесь $\beta_m(t)$ -коэффициент динамичности сейсмических сил.

Задача сведена к определению трех коэффициентов задачи сейсмостойкости: K_s , η_m и $\beta_m(t)$.

Коэффициенты K_s и η_m не зависят от времени и определены в соответствии с действующими нормами[2]. Задаваясь уравнением движения грунта в обобщенной форме во время землетрясения:

$$w_B(t) = a_0 Q(t) e^{-\varepsilon_0 t} \sin \omega t$$

Можно найти значения сейсмической нагрузки. Форма сейсмических импульсов принимается в зависимости от $Q(t)$ и она обобщает все указанные выше формы и принимается в виде:

$$Q(t) = t^2$$

Задача решается в следующей последовательности.

При $Q(t) = t^2$ полиномы $p(t)$ и $\varphi(t)$ принимают следующий вид:

$$p(t) = \left(1 - \frac{\varepsilon_0^2}{\omega^2} \right) t^2 + \frac{4\varepsilon_0}{\omega} t - \frac{2}{\omega^2}$$

$$\varphi(t) = \frac{2\varepsilon_0}{\omega} t^2 - \frac{4}{\omega} t$$

В соответствии этим полиномам, полиномы $p_1(t)$ и $\varphi_1(t)$ тоже принимаются в виде полиномов второй степени.

Следовательно, решение задачи полученное выше, упрощается в виде того, что полиномы $p_1(t)$ и $\varphi_1(t)$ принять в виде:

$$p_1(t) = At^2; \quad \varphi_1(t) = A_1 t^2$$

Другие коэффициенты B, B_1 и C, C_1 принимаются равными нулю. $B = B_1 = 0; C = C_1 = 0$

Тогда:

$$p_2(t) = [1 - (\varepsilon_0^2 - \omega^2)A + 2\omega\varepsilon_0 A_1]t^2 - 4(\varepsilon_0 A_1 + \omega A)t + 2A$$

$$\varphi_2(t) = [1 - (\varepsilon_0^2 - \omega^2)A_1 - 2\omega\varepsilon_0 A]t^2 - 4(\varepsilon_0 A_1 + \omega A)t + 2A_1$$

$$\beta_m(t) = e^{-\varepsilon_0 t} \left\{ [1 - (\varepsilon_0^2 - \omega^2)A + 2\omega\varepsilon_0 A_1]t^2 - 4(\varepsilon_0 A_1 + \omega A)t + 2A \right\} \sin \omega t + e^{-\varepsilon_0 t} \left\{ [1 - (\varepsilon_0^2 - \omega^2)A_1 + 2\varepsilon_0 \omega A]t^2 - 4(\varepsilon_0 A_1 + \omega A)t + 2A_1 \right\} \cos \omega t$$

Здесь

$$A = \frac{1}{D_{0n}} \left[\left(1 - \frac{\varepsilon_0^2}{\omega^2} \right) (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2) - 4\varepsilon_0^2 \omega^2 \right]$$

$$A_1 = \frac{1}{D_{0n}} \left[\frac{2\varepsilon_0}{\omega} (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2) + 2\varepsilon_0 \omega \left(1 - \frac{\varepsilon_0^2}{\omega^2} \right) \right]$$

$$D_{0n} = (\varepsilon_0^2 - \omega^2 - \omega_m^2)^2 + 4\varepsilon_0^2 \omega^2$$

Наша цель заключается в том, чтобы изучать влияния ползучести и длительной прочности бетона на величину сейсмической нагрузки.

В выражении $\beta_m(t)$ квадрат частот свободных колебаний изгибаемых элементов зависят от жесткости изгибающих железобетонных элементов.

$$\omega_m^2 = \frac{\pi^4}{H^4} \left(\frac{2m-1}{2} \right)^4 \frac{D}{M}$$

Коэффициенты решения задачи тоже зависят от квадрата частот свободных колебаний изгибаемых элементов, значения которого приведены выше. В общем случае задачи эти исследования связаны с большими вычислительными работами.

Целью настоящей работы является в том, что при определении жесткости изгибаемых элементов на основе нелинейной деформационной модели механики твердых тел, учитывать реальные деформационные и прочностные характеристики бетона. Жесткость железобетонных элементов имеет вид [1]:

$$D = K_0 E_b (K_b I_{x,b} + n K_s I_{x,s})$$

$$K_b = 1,5 \left(1 - \frac{1}{3} K_0^2 \right) - \gamma_{bl} \left(1 + \frac{K_0}{2} \right) (1 - K_0); \quad I_{x,b} = \frac{b y^3}{3}$$

$$I_{x,s} = A_s (h_0 - y)^2 + \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{sl}} \dot{A}_s (y - \dot{a})^2; \quad K_s = \frac{\varepsilon_{sl}}{\varepsilon_s K_0}$$

При упругой работе бетона $K_0 = 1$ и $\gamma_{bl} = 1$ жесткость при изгибе определяется следующей формулой:

$$D_0 = E_b \left[\frac{b y^3}{3} + n A_s (h_0 - y)^2 \right]$$

Высота сжатой зоны бетона определяется из решения следующего квадратного уравнения:

$$\xi^2 + 2n\mu_s \xi - 2n\mu_s = 0$$

где

$$\mu_s = \frac{A_s}{b h_0}; \quad n = \frac{E_s}{E_b}$$

Учитывая реальные характеристики бетона ($K_0 = 0,2$ и $\gamma_{bl} = 0,85$) жесткость изгибаемых железобетонных элементов определяется следующей формулой:

$$D_p = K_0 E_b (K_b I_{x,b} + n K_s I_{x,s})$$

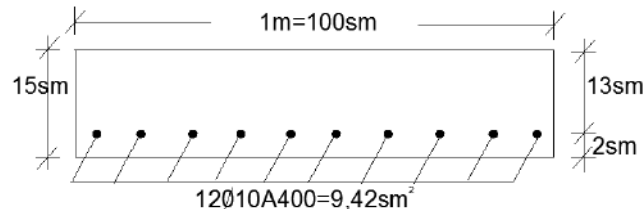
Высоту сжатой зоны бетона при изгибе определяется по формуле [1]:

$$\xi = \frac{n_R \mu_s}{1 - K_0 - 0,5(1 - \gamma_{bl})(1 - K_0)}$$

Здесь

$$n_R = \frac{R_s}{R_b}; K_s = \frac{\varepsilon_{sl}}{\varepsilon_s K_0}; \varepsilon_s = \varepsilon_{b2} \frac{h_0 - y}{y}$$

Для иллюстрации влияния длительного действия сейсмической нагрузки рассматриваются следующие примеры.



Рассмотрим изгиб простого ребристого перекрытия. Армирование сечения полосы приводится ниже.

$$\mu_s = \frac{9,42}{100 \cdot 13} = 0,0072; h_0 = 15 - 2 = 13 \text{ см}$$

Бетон В25 ($R_b = 14,5$ МПа; $E_b = 30 \cdot 10^3$ МПа); Арматура А400 ($R_s = 365$ МПа; $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа)

$$n_s = \frac{E_s}{E_b} = 6,67$$

Положение нейтрального слоя сечения определяется решением следующего квадратного уравнения, при $K_0 = 1$ и $\gamma_{bl} = 1$.

$$\xi^2 + 2 \cdot 6,67 \cdot 0,0072 \cdot \xi - 0,096 = 0$$

В упругой стадии бетона находим жесткость изгибаемой полосы, шириной 1,0м.

С учетом реальных характеристик бетона ($K_0 = 0,2$ и $\gamma_{bl} = 0,85$) жесткость при изгибе железобетонных элементов перекрытия определяется следующей формулой:

$$D_p = K_0 E_b (K_b I_{x,b} + n K_s I_{x,s})$$

Где

$$K_b = 1,5 \left(1 - \frac{1}{3} K_0^2 \right) - (1 - \gamma_{bl})(1 + 0,5 K_0)(1 - K_0) = 1,5 \left(1 - \frac{1}{3} 0,2^2 \right) - 0,85 \cdot 1,1 \cdot 0,8 = 1,35$$

Высота сжатой зоны бетона с учетом длительной прочности и ползучести бетона определяется по формуле [1]:

$$\xi = \frac{n_R \mu_s}{1 - K_0 - 0,5(1 - \gamma_{bl})(1 - K_0)}$$

$$n_R = \frac{R_s}{R_b} = \frac{365}{14,5} = 25,17; K_0 = 0,2; \gamma_{bl} = 0,85$$

$$\xi = \frac{25,17 \cdot 0,0072}{1 - 0,8 - 0,5 \cdot 0,85 \cdot 0,8} = \frac{0,228}{0,74} = 0,31$$

$$y = \xi h_0 = 0,31 \cdot 13 = 4,03 \text{ см}$$

Деформация растянутой арматуры будет равна:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{b2} \frac{h_0 - y}{y} = 0,0035 \frac{13 - 4,03}{4,03} = 0,0078 > \varepsilon_{sl}$$

$$K_s = \frac{\varepsilon_{sl}}{\varepsilon_s K_0} = \frac{0,00175}{0,0078 \cdot 0,2} = 1,12$$

$$D_p = 0,2 \cdot 30 \cdot 10^3 (100) \left[1,35 \frac{100 \cdot 4,03^2}{3} + 1,12 \cdot 6,67 \cdot 9,42 (13 - 4,03)^2 \right]$$

$$= 5164,3 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{cm}^3$$

В результате ползучести бетона жесткость элемента уменьшается.

$$\frac{D_p}{D_0} = \frac{5164,3}{21300} = 0,24 \text{ раза.}$$

Следовательно, квадрат частоты свободных колебаний то же уменьшается:

$$\frac{\omega_{pm}^2}{\omega_{0m}^2} = \frac{5164,3}{21300} = 0,24; \quad \omega_{pm}^2 = 0,24 \omega_{0m}^2$$

Динамический коэффициент β_m определяется в зависимости от формы сейсмического импульса.

Пример 1. Предположим, что сейсмический импульс принят в виде: $w_B(t) = a_0 \sin \omega t$; $\varepsilon_0 = 0$

Тогда β_m определяется по следующей известной формуле $\beta_m < 2,5$.

$$\beta_m = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2}}$$

Чтобы избежать сейсмический резонанс, примем следующие условия:

$$\frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2} < 0,6 \text{ или } \frac{\omega^2}{0,24 \omega_{0m}^2} < 0,6; \quad \frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2} < 0,144$$

$$\text{Принимаем: } \frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2} = 0,13 \text{ и } \frac{\omega^2}{\omega_{pm}^2} = \frac{0,13}{0,24} = 0,54$$

Сейсмический динамический коэффициент при упругой работе бетона будет равен:

$$\beta_{0m} = \frac{1}{1 - 0,13} = \frac{1}{0,87} = 1,15$$

При учете ползучести бетона, т.е. при длительном действии нагрузки.

$$\beta_{pm} = \frac{1}{1 - 0,54} = \frac{1}{0,46} = 2,17$$

Таким образом при длительном действии нагрузки сейсмическая нагрузка увеличивается в $\frac{2,17}{1,15} \approx 1,9$ раз.

Пример 2. Сейсмический импульс заданы с учетом затухания колебаний в грунте.

$$w_B(t) = a_0 e^{-\varepsilon_0 t} \sin \omega t; \quad \varepsilon_0 \neq 0.$$

В этом случае задача решается следующим образом:

Сейсмический коэффициент $\beta_m(t)$ зависит от времени. Поэтому, в данном примере рассматривается случай, когда $\sin \omega t_0 = 1$ и находим $t_0 = \frac{\pi}{2\omega}$. При этом

$$\beta_m(t_0) = e^{\frac{-\pi \varepsilon_0}{2\omega}} [1 - (\varepsilon_0^2 - \omega^2)A + 2\omega \varepsilon_0 A_1]$$

Здесь

$$A = \frac{1}{D_{0n}} \left[\left(1 - \frac{\varepsilon_0^2}{\omega^2} \right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2} + \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_{0m}^2} \right) - 4 \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_{0m}^2} \right]$$

$$A_1 = \frac{1}{D_{0n}} \left[\frac{2\varepsilon_0}{\omega} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2} + \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_{0m}^2} \right) + \frac{2\varepsilon_0}{\omega_{0m}^2} \left(1 - \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_{0m}^2} \right) \right]$$

где

$$D_{0n} = \omega_{0m}^2 \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2} - \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_{0m}^2} \right)^2 + 4 \frac{\varepsilon_0^2 \omega^2}{\omega_{0m}^4} \right]$$

Чтобы избежать сейсмического резонанса принимаются следующие соотношения:

$$\frac{\omega^2}{\omega_{pm}^2} < \frac{\omega^2}{0,24 \omega_{0m}^2} < 0,7 : \quad \frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2} < 0,161$$

Принимаем:

$$\frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2} = 0,1225; \quad \frac{\omega^2}{\omega_{pm}^2} = 0,533; \quad \frac{\varepsilon_0}{\omega_{0m}} = 0,04; \quad \frac{\varepsilon_0}{\omega} = \frac{0,04}{0,35} = 0,144; \quad \frac{\varepsilon^2}{\omega_{0m}^2} = 0,0016$$

$$\frac{\varepsilon_0}{\omega_{pm}} = 0,092; \quad \frac{\varepsilon^2}{\omega_{pm}^2} = 0,0085; \quad \frac{\varepsilon_0^2}{\omega^2} = 0,013$$

В соответствии с принятыми соотношениями вычисляем коэффициент

$$D_{0n} = \omega_{0m}^4 \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2} + \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_{0m}^2} \right)^2 + 4 \frac{\varepsilon_0^2 \omega^2}{\omega_{0m}^4} \right] = \beta_m(t_0).$$

$$= \omega_{0m}^4 [(1 - 0,1225 + 0,0016)^2 + 4 \cdot 0,0016 \cdot 0,1225] = 0,87 \omega_{0m}^4$$

$$A = \frac{\omega_{0m}^2}{D_{0n}} \left[\left(1 - \frac{\varepsilon_0^2}{\omega^2} \right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2} + \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_{0m}^2} \right) - 4 \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_{0m}^2} \right] =$$

$$= \frac{1}{0,87 \omega_{0m}^2} [(1 - 0,013) \cdot 0,879 - 4 \cdot 0,0016] = \frac{0,98}{\omega_{0m}^2}$$

$$A_1 = \frac{\omega_{0m}^2}{D_{0n}} \left[\frac{2\varepsilon_0}{\omega} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2} + \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_{0m}^2} \right) + \frac{2\varepsilon_0}{\omega_{0m}^2} \left(1 - \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_{0m}^2} \right) \right] =$$

$$= \frac{1}{0,87 \omega_{0m}^2} [(0,228 \cdot 0,879 + 2 \cdot 0,4 \cdot 0,35 \cdot 0,987)] =$$

$$= \frac{1,147}{\omega_{0m}^2} [(0,2004 + 0,0276)] = \frac{0,261}{\omega_{0m}^2}$$

$$\beta_{0m} = e^{-0,17} \left(1 + 0,98 \frac{\omega^2}{\omega_{0m}^2} - 0,98 \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_{0m}^2} + \frac{2\varepsilon_0 \omega}{\omega_{0m}^2} \cdot 0,261 \right) =$$

$$= 0,885(1 + 0,121 - 0,0018 + 2 \cdot 0,04 \cdot 0,35 \cdot 0,261) = 1,1$$

С учетом деформации ползучести:

$$D_{0n} = \omega_{pm}^4 \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{pm}^2} + \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_{0m}^2} \right)^2 + 4 \frac{\varepsilon_0^2 \omega^2}{\omega_{pm}^4} \right] =$$

$$= \omega_{pm}^4 [(1 - 0,532 + 0,0085)^2 + 4 \cdot 0,0085 \cdot 0,532] = 0,24 \omega_{pm}^4$$

$$A = \frac{\omega_{pm}^2}{0,245 \omega_{pm}^4} [(1 - 0,013) \cdot 0,468 - 0,018] = \frac{4,08}{\omega_{pm}^2} \cdot 0,444 = \frac{1,81}{\omega_{pm}^2}$$

$$A_1 = \frac{\omega_{pm}^2}{0,245 \omega_{pm}^4} [2 \cdot 0,114 \cdot 0,468 + 2 \cdot 0,092 \cdot 0,73] = \frac{4,08}{\omega_{pm}^2} (0,1067 + 0,1343) = \frac{0,98}{\omega_{pm}^2}$$

$$\beta_{pm} = e^{-0,17} (1 + 0,533 \cdot 1,8 + 1,81 \cdot 0,0085 + 0,0692) = 0,885 \cdot 2,048 = 1,81$$

Динамический коэффициент с учетом ε_0 и ползучести бетона увеличивается в $\frac{1,81}{1,1} = 1,65$ раза.

Из полученных результатов видно, что учет ε_0 приводит к уточнению коэффициента динамичности.

Таким образом, на основании результатов численных примеров сделаны следующие выводы.

1. На основании динамического метода сейсмостойкости обобщено форма сейсмических импульсов, которая позволяет уточнить значения сейсмической силы.
2. Впервые получена новая формула для определения жесткости изгибаемых железобетонных элементов, путем приложения нелинейной деформационной модели механики твердых тел. Как показывают результаты численных примеров, учет реальных деформационных характеристик бетона динамические характеристики при изгибе, т.е. частоты свободных колебаний уменьшаются.

3. На основании численных примеров, установлены значительные повышения значений сейсмической нагрузки, учет которых необходимо при проектировании железобетонных элементов.

Литература

1. Сейфуллаев Х.К. Разработка методики расчета железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели механики деформируемых твердых тел. "Строительная механика и расчет сооружений" №5, 64-73s, 2021
2. AzDTN 2.3-1. Строительство в сейсмических районах, Баку, 45с. 2009
3. Гонткевич В.С. Собственные колебания пластин и оболочек, Киев, Наука думка, 288с. 1964
4. Seyfullayev X.Q., Qarayev A.N. Dəmir-beton elementlərin hesablanması üçün yeni nəzəri əsasları, 422s. Bakı, 2021

References

1. Seifullaev H.K. Razrabotka metodiki rascheta zhelezobetonnyh elementov na osnove nelinejnoj deformacionnoj modeli mekhaniki deformiruemyh tverdyh tel. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij" №5, 64-73s, 2021
2. AzDTN 2.3-1. Stroitel'stvo v sejsmicheskix rajonah, Baku, 45s. 2009
3. Gontkevich V.S. Sobstvennye kolebaniya plastin i obolochek, Kiev, Nauka dumka, 288s. 1964
4. Seyfullayev X.Q., Qarayev A.N. Demir-beton elementlerin hesablanmasinin yeni nezeri esaslari, 422s. Baki, 2021

Məqaləyə istinad: Джабраилова Г.Х. Теоретические основы исследования сейсмостойкости изгибаемых железобетонных элементов. Elmi Əsərlər jurnalı / Scientific works. AzMIU, s. 212-222, N2, 2023

For citation: Jabrayilova G.K. Theoretical foundations for the study of seismic resistance of bent reinforced concrete elements. Elmi Əsərlər jurnalı/ Scientific works. AzUAC, p. 212-222, N2, 2023

Məqalə INTERNATIONAL CONGRESS ON ADVANCED EARTHQUAKE RESISTANT STRUCTURES (AERS2023) adlı konfrans materialıdır.