

ЭФФЕКТИВНО И ПРОЧНО

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ УСИЛИЙ В НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЯХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО КРИТЕРИЮ ПРЕДЕЛЬНЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В БЕТОНЕ И АРМАТУРЕ ПРИ РАСЧЕТАХ ПО ПРОЧНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Представлен способ определения предельно допустимых усилий (изгибающего момента и продольной силы) в нормальных сечениях железобетонных элементов по критерию предельных относительных деформаций в бетоне и арматуре при расчетах по прочности. Рассмотрение ограничено случаями плоского прямого изгиба и плоского прямого внецентренного растяжения-сжатия. Полученные результаты возможно использовать при проектировании мостовых сооружений для более эффективного выполнения расчетов по прочности железобетонных элементов по нормальным сечениям в сравнении с существующими подходами. Это может достигаться за счет анализа инженером-проектировщиком целостной картины запасов прочности железобетонных элементов с использованием границ областей допустимых усилий вместо анализа результатов многочисленных проверок для каждой отдельно взятой комбинации усилий.

ВВЕДЕНИЕ

Работа является первой в цикле статей, посвященных методам расчета предельно допустимых усилий в железобетонных элементах по различным критериям. В данной статье рассматривается расчет по прочности. Общим для всех предлагаемых методов расчета является то, что критерии наступления предельного состояния формулируются в относительных деформациях в бетоне и арматуре, что, в свою очередь, позволяет существенно упростить расчет предельно допустимых усилий. В следующих публикациях цикла планируется обсудить: вариант применения предлагаемого подхода к расчетам по трещиностойкости, способ построения границ допустимых усилий по прочности и трещиностойкости, варианты коэффициентов использования несущей способности сечения.

При проектировании мостовых сооружений во многих расчетных ситуациях известными являются

действующие усилия в нормальных сечениях железобетонных элементов и требуется сравнить данные усилия с предельно допустимыми усилиями по условию прочности. Это требует постановки и решения задачи об определении предельно допустимых усилий при расчете по прочности. В ряде расчетных ситуаций, напротив, известными являются величины, однозначно характеризующие эпюру относительных деформаций в бетоне и арматуре в нормальном сечении. Это характерно, например, при кинематических воздействиях на железобетонные элементы. В этих случаях расчет по прочности железобетонного элемента по нормальным сечениям может быть выполнен непосредственно по описанным ниже критериям, определять предельно допустимые усилия нет необходимости.

В данной статье рассматриваются случаи плоского прямого изгиба и плоского прямого внецентренного растяжения-сжатия железобетонного элемента. Плоскость изгиба и силовая плоскость должны совпадать с одной из главных плоскостей инерции рассматриваемых сечений. Последнее выполняется, например, для сечений с одной осью симметрии, при условии, что она располагается в силовой плоскости. В остальном же форма бетонной части сечения и расположение арматуры в сечении могут быть произвольными.

Прочность бетона и арматуры считается обеспеченной, если относительные деформации в них не превосходят своих предельных значений [1, 2]. Работа бетона растянутой зоны в расчете не учитывается [1].

В расчете по прочности железобетонного элемента по нормальным сечениям возможна реализация следующих условий достижения предельного состояния:

- значение относительной деформации в бетоне равно предельной относительной деформации в бетоне ε_{b2} , определяемой по п. 7.32 [1] с учетом указаний п. 6.1.20 [2];
- значение относительной деформации в арматуре равно предельной относительной деформации в арматуре ε_{s2} , определяемой по п. 7.47 [1].

В данной работе положительные значения относительных деформаций соответствуют относительному удлинению волокон, отрицательные значения – относительному укорочению волокон.

Предельное состояние железобетонного элемента по нормальному сечению считается достигнутым, если выполняется любое из приведенных условий. Одновременное выполнение условий соответствует наиболее полному использованию несущей способности бетона и арматуры. Все иные состояния соответствуют исчерпанию несущей способности либо только бетона, либо только арматуры. Каждому предельному состоянию соответствуют вполне определенные эпюры относительных деформаций и нормальных напряжений в бетоне и арматуре, а также значения усилий (продольной силы и изгибающего момента) в нормальном сечении.

Продольная сила N и изгибающий момент M в нормальном сечении определяются как равнодействующая внутренних сил σdA , действующих на элементарных площадках dA перпендикулярно им, и момент равнодействующей этих сил относительно произвольно выбранной точки в нормальном сечении на плоскости изгиба и принимаемой за начало отсчета ординат z :

$$N = \int \sigma dA \quad (1),$$

$$M = \int \sigma z dA \quad (2),$$

где σ — нормальное напряжение, действующее на площадке dA , положительное при растяжении; z — ордината, отсчитываемая от точки приведения O вниз (см. рисунок 1).

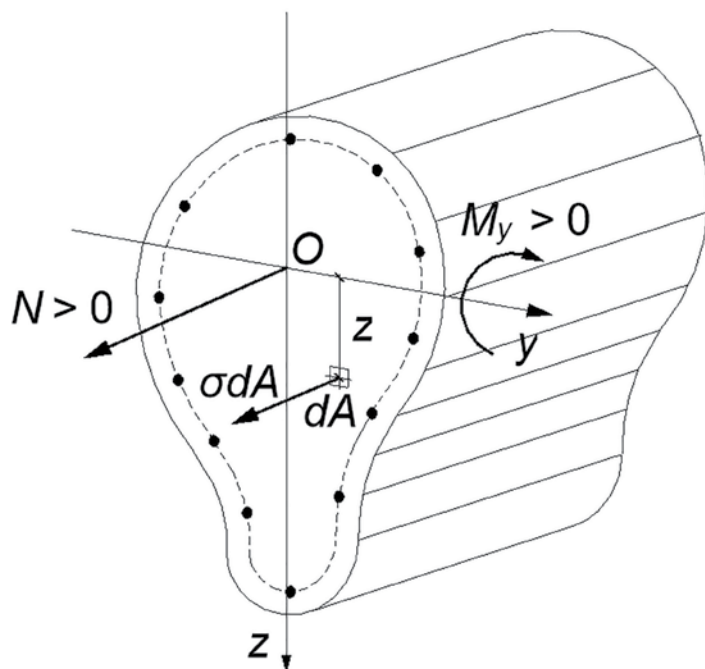


Рис. 1. Положительные направления усилий в сечении

Определение предельно допустимых усилий в нормальном сечении железобетонного элемента требует знания эпюры нормальных напряжений в бетоне и арматуре в предельном состоянии. Задача определения нормальных напряжений в бетоне и арматуре является сложной. Для ее успешного решения прежде всего необходимо знать, какими механическими свойствами обладают данные материалы, и иметь подходящие математические модели для описания этих свойств.

При проектировании мостовых сооружений некоторого упрощения решения задачи по определению напряжений добиваются при использовании нелинейной деформационной модели [1, 2] для описания механического поведения бетона и арматуры под нагрузкой. Нелинейная деформационная модель основывается на применении аналитически либо численно заданных диаграмм деформирования бетона и арматуры. Данная модель материала относится к деформационной теории пластичности, в рамках которой тело идеализируется как нелинейно упругое. В частности, для заданного деформированного состояния напряженное состояние не зависит от конкретного пути нагружения в пространстве относительных деформаций. Это, в свою очередь, позволяет однозначно определять нормальные напряжения по значениям относительных деформаций. Вопрос допустимости применения подобной модели для широкого класса путей нагружения (деформирования) стержневых железобетонных элементов, применяемых в мостостроении, остается за рамками рассмотрения данной статьи. Тем не менее, основываясь на СП [2], можно предполагать, что нелинейная деформационная модель подходит для решения задачи об определении предельно допустимых усилий в нормальных сечениях железобетонных элементов по критерию предельных относительных деформаций в бетоне и арматуре при расчете по прочности с приемлемой для практических целей точностью.

Эпюра нормальных напряжений в бетоне и арматуре в предельном состоянии при выбранной выше модели их механического поведения полностью определяется эпюрой относительных деформаций в них в этом состоянии.

ЭПЮРЫ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В БЕТОНЕ И АРМАТУРЕ В ПРЕДЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

Простая возможность для определения эпюры относительных деформаций в бетоне и арматуре в нормальном сечении железобетонного элемента при плоском прямом изгибе и плоском прямом внецентренном растяжении-сжатии появляется при использовании гипотезы плоских сечений [1, 2], хорошо зарекомендовавшей себя в расчетах стержневых железобетонных элементов. Плоские сечения, нормальные к продольной оси

элемента, после деформации остаются плоскими и перпендикулярными к изогнутой оси. В этом случае эпюра относительных деформаций представляет собой линейную функцию ординаты z . Прямолинейная эпюра относительных деформаций полностью определена, если известны ее значения хотя бы в двух различных точках.

Применение условий достижения предельного состояния для бетона и арматуры, сформулированных в терминах относительных деформаций, в сочетании с гипотезой плоских сечений позволяет определить эпюры относительных деформаций в бетоне и арматуре для любого возможного предельного состояния железобетонного элемента по нормальному сечению. Можно выделить следующие три граничных случая предельных состояний:

- достижение бетоном предельного состояния при сжатии во всех точках нормального сечения, в этом случае относительные деформации в бетоне равны предельной относительной деформации в бетоне ϵ_{b2} (см. рис. 2);

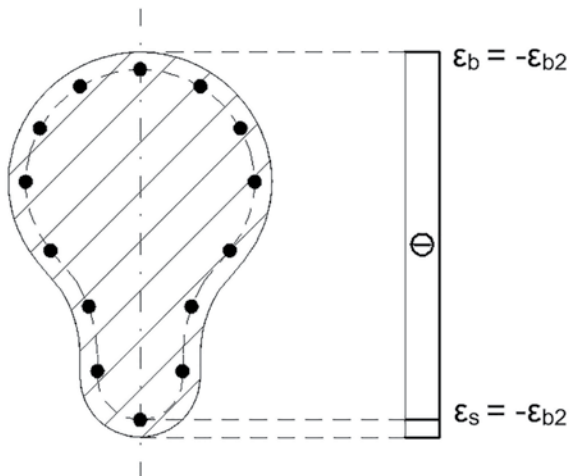


Рис. 2. Достижение бетоном предельного состояния при сжатии во всех точках сечения

- достижение арматурой предельного состояния при растяжении во всех стержнях в нормальном сечении, в этом случае относительные деформации в арматуре равны предельной относительной деформации в арматуре ϵ_{s2} (см. рис. 3);

- достижение бетоном предельного состояния при сжатии хотя бы в одной точке нормального сечения, в этом случае относительная деформация в бетоне в этой точке, равная предельной относительной деформации в бетоне ϵ_{b2} ; и одновременное с этим достижение арматурой предельного состояния при растяжении хотя бы в одном стержне, в этом случае относительная деформация в этом стержне равна предельной относительной деформации в арматуре ϵ_{s2} (см. рис. 4).

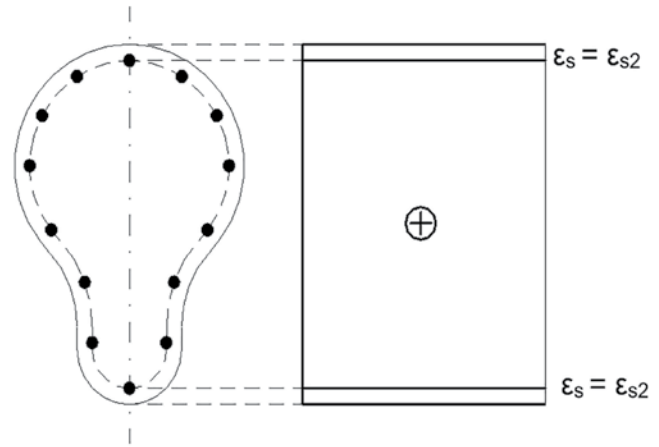


Рис. 3. Достижение арматурой предельного состояния при растяжении во всех стержнях в сечении

Выше предполагается, что предельная относительная деформация в бетоне при ϵ_{b2} не превосходит предельную относительную деформацию в арматуре ϵ_{s2} по абсолютной величине, тем самым означая, что предельное состояние бетона при сжатии наступает раньше предельного состояния арматуры при сжатии.

Все иные предельные состояния железобетонных элементов по нормальным сечениям являются промежуточными по отношению к рассмотренным выше. Предельные состояния железобетонных элементов по нормальным сечениям при сжатии, сжатии с изгибом, чистом изгибе, растяжении с изгибом и растяжении относятся либо к граничным, либо к промежуточным случаям эпюры относительных деформаций в бетоне и арматуре в предельном состоянии.

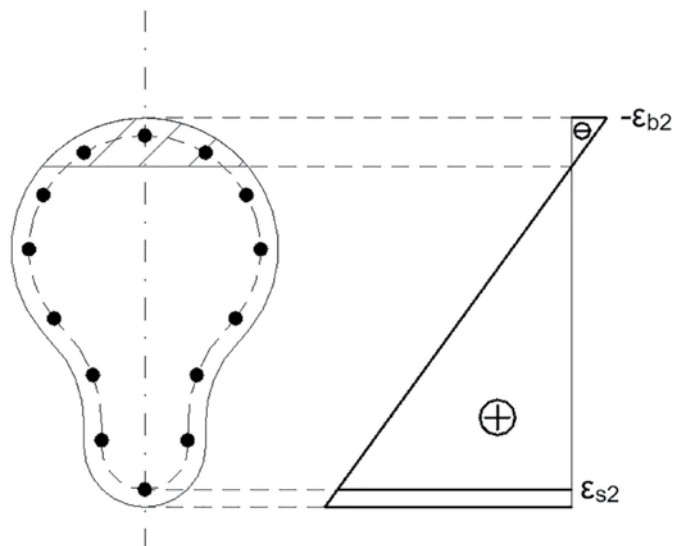


Рис. 4. Достижение бетоном предельного состояния при сжатии хотя бы в одной точке сечения и одновременное с этим достижение арматурой предельного состояния при растяжении хотя бы в одном стержне

С учетом того, что относительные деформации линейно распределены по высоте нормального сечения, экстремальные значения относительных деформаций могут достигаться лишь в крайних по высоте сечения точках, соответствующих экстремальным значениям ординаты z . Это означает, что максимальная относительная деформация бетона может достигаться либо на верхней грани нормального сечения, либо на его нижней грани, в зависимости от направления действия усилий. В свою очередь, максимальная относительная деформация арматуры может достигаться только в стержне, наиболее удаленном от грани с максимальной относительной деформацией бетона.

На рисунках 5 и 6 приведены примеры промежуточных случаев эпюры относительных деформаций в бетоне и арматуре в предельном состоянии.

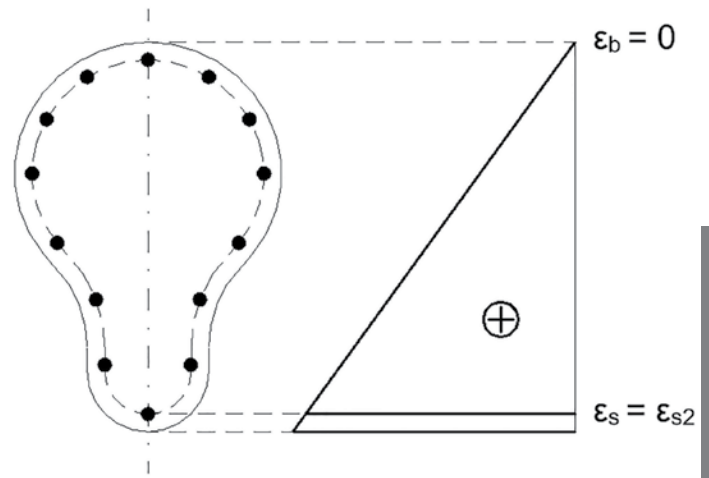


Рис. 6. Случай достижения хотя бы в одном стержне арматуры предельной относительной деформации

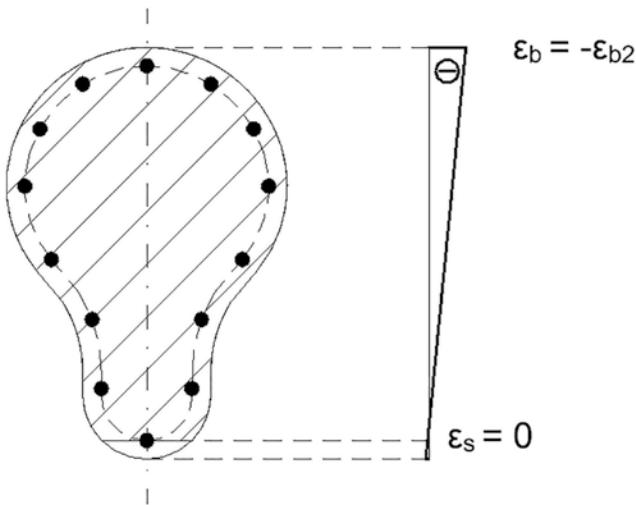


Рис. 5. Случай достижения хотя бы в одной точке в бетоне предельной относительной деформации

Рисунок 5 иллюстрирует случай, когда хотя бы в одной точке нормального сечения бетон достигает предельного состояния при сжатии, относительная деформация в этой точке равна предельной относительной деформации в бетоне ϵ_{b2} , при этом относительная деформация в стержне арматуры, наиболее удаленном от крайнего сжатого волокна бетона, принята равной нулю.

Рисунок 6 иллюстрирует случай, когда хотя бы в одном стержне арматура достигает предельного состояния при растяжении, относительная деформация удлинения в этом стержне равна предельной относительной деформации в арматуре ϵ_{s2} , при этом относительная деформация в волокне бетона, наиболее удаленном от этого стержня, принята равной нулю.

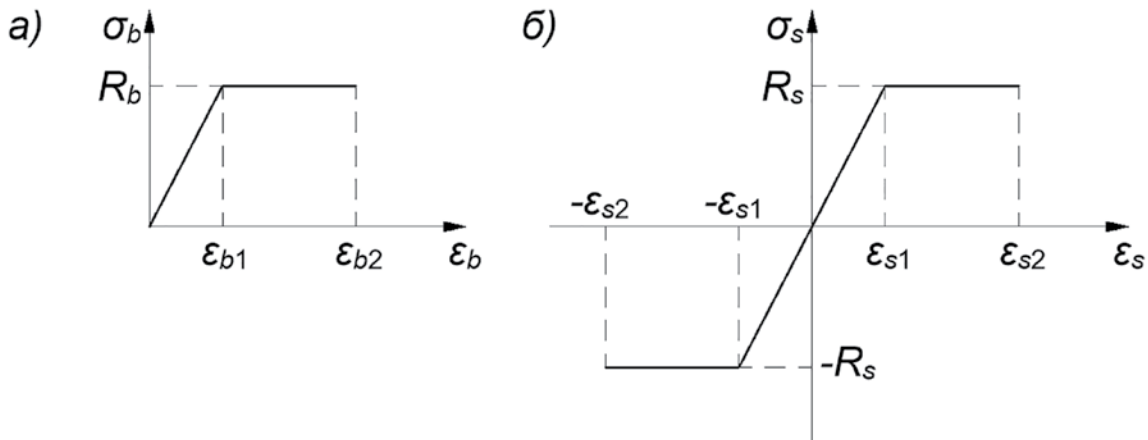


Рис. 7. Двухлинейные диаграммы деформирования: а) бетона; б) арматуры

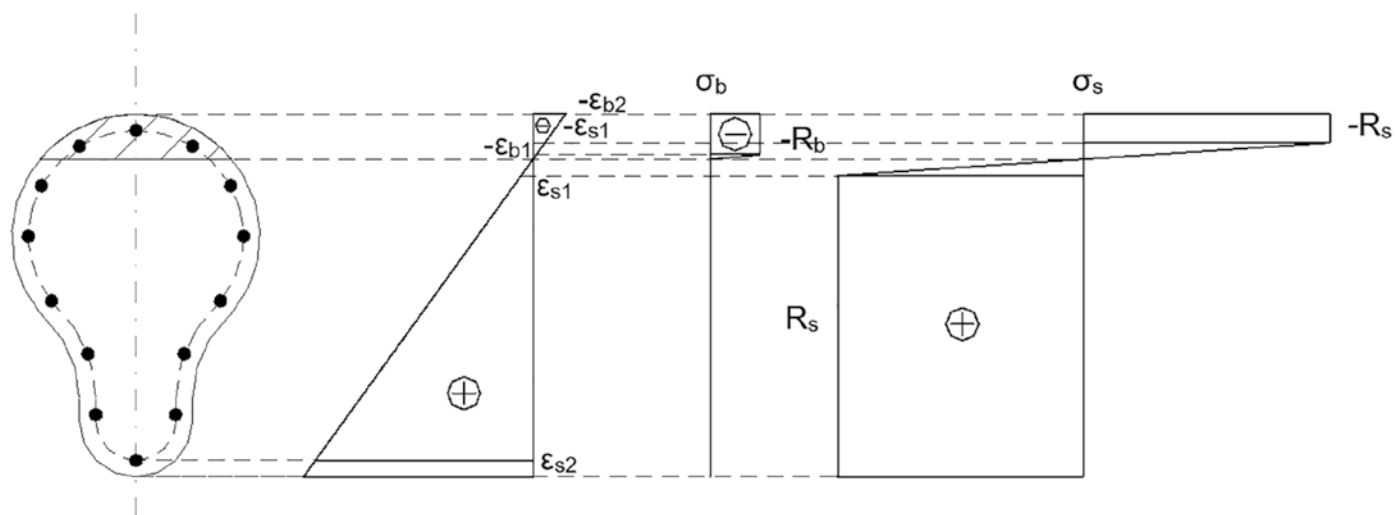


Рис. 8. Пример определения эпюр напряжений в бетоне и арматуре по двухлинейным диаграммам деформирования

НОРМАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В БЕТОНЕ И АРМАТУРЕ В ПРЕДЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

Построив эпюры относительных деформаций в бетоне и арматуре, можно переходить к вычислению нормальных напряжений в них. Согласно [1, 2] нормальные напряжения в бетоне и арматуре в предельном состоянии в рамках нелинейной деформационной модели вычисляются по двухлинейным диаграммам деформирования сжатого бетона и растянутой арматуры (рис. 7).

Нормальные напряжения в бетоне и арматуре на участках упругих деформаций изменяются по закону Гука пропорционально относительным деформациям для бетона и арматуры соответственно, а на участках пластических деформаций остаются постоянными. Границы участков определяют следующие значения относительных деформаций: относительные деформации бетона и арматуры на границе упругости ($\varepsilon_{b1}, \varepsilon_{s1}$); предельные относительные деформации ($\varepsilon_{b2}, \varepsilon_{s2}$). Относительные деформации бетона и арматуры на границе упругости определяются по формулам [1]:

$$\varepsilon_{b1} = \frac{R_b}{E_b}, \quad \varepsilon_{s1} = \frac{R_s}{E_s}$$

На рисунке 8 представлен пример построения эпюр напряжений в бетоне σ_b и арматуре σ_s в предельном состоянии для случая, когда в верхней фибре бетона и в нижнем стержне арматуры достигнуты соответствующие предельные относительные деформации. Значение предельной пластической деформаций арматуры в момент разрушения 0,025 на порядок больше ее деформации в упругой зоне. Это формирует возможность наличия практически во всей растянутой зоне арматуры с предельным уровнем напряжений. Этим определяется предельная несущая способность сечения по двухлинейной диаграмме.

ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ УСИЛИЯ В НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЯХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Решив задачу определения нормальных напряжений в бетоне и арматуре во всех предельных состояниях, далее не составляет сложности определить искомые предельно допустимые усилия (продольную силу и изгибающий момент) в нормальном сечении интегрированием по формулам (1) и (2):

$$N = \int \sigma_b dA + \int \sigma_s dA, \quad M = \int \sigma_b z dA + \int \sigma_s z dA.$$

Представленный способ расчета предельно допустимых усилий (изгибающего момента и продольной силы) в нормальных сечениях железобетонных элементов при плоском прямом изгибе и плоском прямом внецентренном растяжении-сжатии по критерию предельных относительных деформаций в бетоне и арматуре позволяет определить предельно допустимые усилия в любом из рассмотренных вариантов предельных состояний.

Определение предельно допустимых усилий во всех возможных предельных состояниях позволяет существенным образом упростить расчет по прочности железобетонных элементов по нормальным сечениям при проектировании мостовых сооружений. Повышается эффективность труда инженеров-проектировщиков за счет возможности анализа ими целостной картины запасов прочности железобетонных элементов с использованием границ областей допустимых усилий вместо анализа результатов многочисленных проверок для каждой отдельно взятой комбинации усилий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*»
2. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»
3. Методические рекомендации по применению СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84* «Мосты и трубы» .