

# Раскосно-связевые модели для расчета железобетонных конструкций

## Введение

В российских нормах проектирования для всех изгибаемых железобетонных элементов применяется традиционная методика расчета нормальных сечений изгибаемых элементов, основанная на гипотезе плоских сечений и равномерном распределении деформаций по сечению элемента. Эта теория представляет любой изгибаемый элемент, не зависимо от его геометрических параметров, как линейный стержневой элемент - балку с заданными условиями закрепления.

Для большинства конструкций указанная методика хорошо работает и может применяться. Однако существуют конструкции в которых наблюдается иное распределение деформаций по сечению элемента, и для них "балочная" теория оказывается неприменима. К таким конструкциям относятся высокие балки, участки вблизи изменения сечения элементов, вблизи точек приложения нагрузок и другие конструкции и участки конструкций.

Для таких элементов в 1982 году [6] профессором Шляйхом из университета Штутгарта была предложена раскосно-связевая модель расчета железобетонных конструкций, согласно которой рассчитываемая конструкция мысленно заменяется фермой, состоящей из раскосов и связей. Несмотря на то, что методика является относительно новой [4, 5], на данный момент она входит в нормативные документы многих зарубежных стран (США, Евросоюза) и успешно применяется.

В данной статье далее приводится перевод раздела норм США по расчету и проектированию железобетонных конструкций ACI 318-14 [1], касающегося раскосно-связевой модели. В тексте добавлены комментарии от автора перевода.

## Перевод раздела норм проектирования США: ACI 318-14. Chapter 23. Strut-and-Tie Models

### 23.1. Применение

**23.1.1.** Это раздел следует использовать для расчета железобетонных элементов, или участков элементов, для которых нагрузки или нарушение непрерывности (*англ. discontinuities*)<sup>1</sup> приводят к нелинейному распределению продольных напряжений по поперечному сечению.

**23.1.2.** Любой железобетонный элемент, или участок с нарушением непрерывности, разрешается проектировать с использованием идеализированной модели фермы, в соответствии с данным разделом.

**R23.1.2.** Неравномерность распределения деформаций происходит в случае изменения в геометрии конструктивного элемента или при действии сосредоточенной силы или реакции. Принцип Сен-Венана утверждает, что напряжения от сосредоточенной силы или момента равномерно распределяются на расстоянии, приблизительно равном высоте сечения элемента  $h$  от точки приложения. Исходя из этого, участки нарушения непрерывности распространяются на расстояние  $h$  от сечения, где приложена нагрузка или имеется изменение в геометрии.

Залитые области на рис. R23.1(a) и (b) показывают типичные D-области (Schlaich et al. 1987) (*англ. D-regions - Discontinuity regions*). Гипотеза плоских сечений не применима для таких участков. В целом, любые участки элемента вне D-области есть B-области (*англ. B-regions - Beam regions*), где применима гипотеза плоских сечений теории изгибаемого элемента. Метод раскосно-связевой модели, описанный в данном разделе, базируется на предположении, что D-области могут быть рассчитаны и спроектированы с использованием гипотетических шарнирно-соединенных ферм, состоящих из раскосов и поясов, соединенных в узлах.

1 Здесь и далее в скобках и с выделением курсивом добавлены комментарии автора перевода

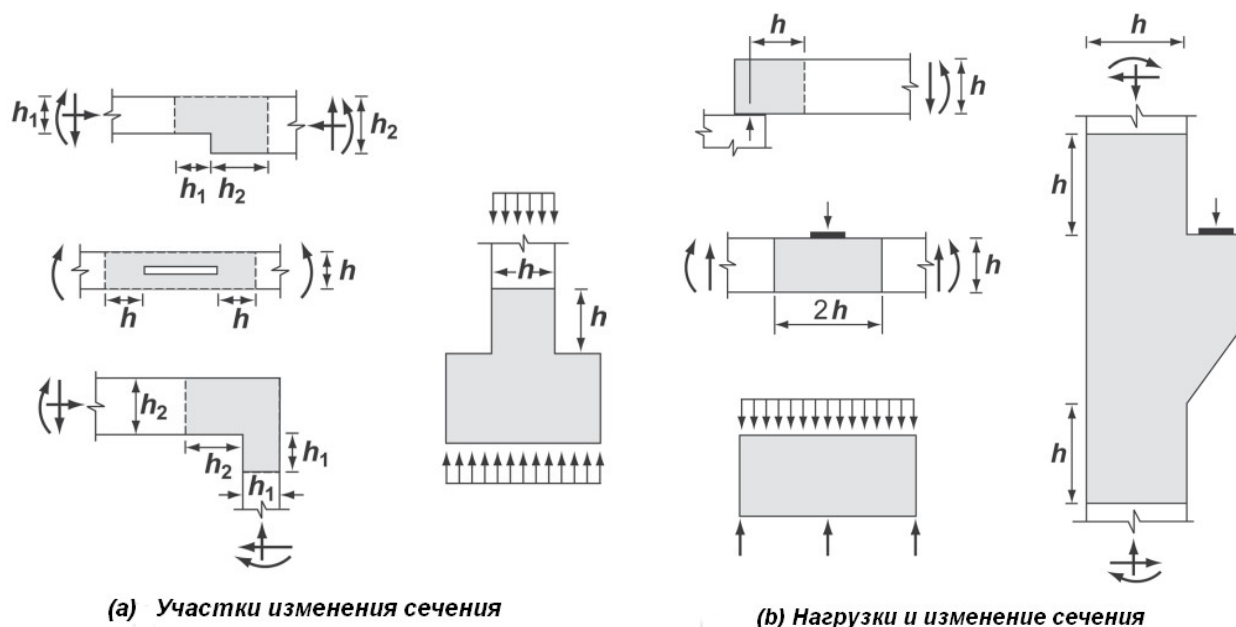


Рисунок R23.1. D-области и участки нарушения непрерывности

## 23.2. Общие указания

**23.2.1.** Раскосно-связевые модели состоят из раскосов и связей, соединенных в узлах, формируя идеализированную ферму.

**R23.2.1.** Для идеализированной фермы, раскосы - это сжатые элементы, связи - растянутые элементы, а узлы - это соединения между ними. Подробно использование раскосно-связевых моделей описано в Schlaich et al. (1987), Collins and Mitchell (1991), MacGregor (1997), FIP (1999), Menn (1986), Muttoni et al. (1997) и ACI 445R. Примеры расчетов для раскосно-связевого метода даны в ACISP-208 (Reineck 2002) и ACISP-273 (Reineck and Novak 2010). Процесс расчета с использованием раскосов и связей на действие сил, приложенных на D-область и внутри нее называется раскосно-связевым методом и включает следующие четыре шага:

- (1) Выделение каждой D-области.
- (2) Вычисление равнодействующих усилий, действующих на каждую D-область.
- (3) Выбор модели<sup>2</sup> и вычисление усилий в раскосах и связях, передающих равнодействующие силы через D-область. Оси раскосов и связей выбираются ориентировочно по направлению напряжений сжатия и растяжения соответственно.
- (4) Проектирование раскосов, связей и узловых зон так, чтобы они имели достаточную прочность. Ширина раскосов и узловых зон определяется с учетом эффективной прочности бетона, установленной в п.23.4.3 и п.23.9.2. Для связей предусматривается армирование с учетом прочности арматурной стали, установленной в п.23.7.2. Армирование должно быть заанкерено внутри узловых зон или за их пределами.

2 Компоновка раскосно-связевой модели начинается с выбора осей для раскосов и связей. Далее для построения модели необходимо, с учетом имеющихся в схеме ограничений, назначить размеры узловых зон и связанных с ними раскосов и связей. Часто увеличение ширины раскосов и связей ведет к уменьшению высоты идеализированной фермы, в таких случаях необходимо подобрать оптимальные размеры, обеспечивающие наибольшую несущую способность конструкции

Составляющие раскосно-связевой модели однопролетной высокой балки, нагруженной сосредоточенной силой, показаны рис. R23.2.1. Поперечные размеры раскосов и связей проектируются с учетом толщины и ширины, определяемых в направлениях перпендикулярно оси раскоса или связи. Толщина задается перпендикулярно плоскости, а ширина - в плоскости раскосно-связевой модели. Связи состоят из ненапрягаемой и напрягаемой арматуры и участков окружающего бетона, сконцентрированного вокруг осей связей. Окружающий бетон включается в расчет в зонах, где должны быть заанкерены усилия в связях. Бетон в связях не используется для восприятия осевых усилий связей. Хотя это прямо не учитывается в расчетах, окружающий бетон снижает удлинения связи, что может иметь значение для расчетов по второй группе предельных состояний.

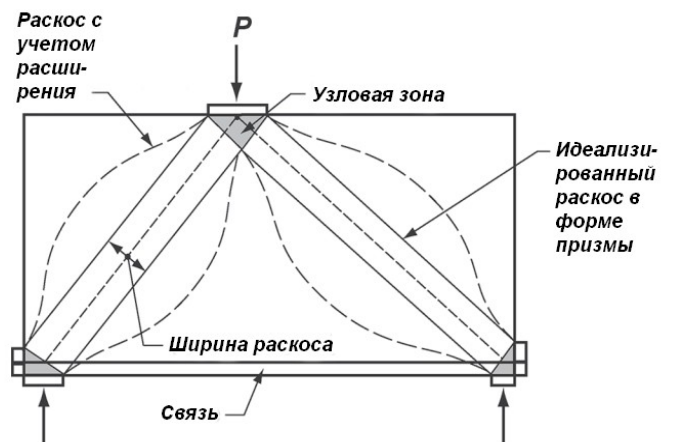


Рисунок R23.2.1. Вид раскосно-связевой модели

**23.2.2.** Геометрические параметры идеализированной фермы должны соответствовать размерам раскосов, связей и узловых зон, участков передачи нагрузки и опорных участков.

**R23.2.2.** Раскосы, связи и узловые зоны, составляющие раскосно-связевую модель, имеют конечную ширину, обычно в плоскости модели, и толщину, обычно в направлении из плоскости конструкции, которые должны быть приняты во внимание при выборе размеров фермы. Рис. R23.2.2(a) и (b) показывают узлы и соответствующие узловые зоны. Вертикальные и горизонтальные силы уравновешивают силы в наклонных раскосах.

Если в узловой зоне двумерной раскосно-связевой модели действуют более трех сил, как показано на рис. R23.2.2(a), то предполагается что их можно привести так, чтобы они формировали три силы, сходящиеся в узле. Так, силы в раскосах, действующие на гранях А-Еи С-Е на рис. R23.2.2(a), могут быть заменены одной силой, действующей на грани А-С, как показано на рис. R23.2.2(b). Эта сила проходит через узел в точке D<sup>3</sup>.

С другой стороны, раскосно-связевая модель может рассматриваться, предполагая, что все силы проходят через точку D, как показано на рис. R23.2.2(c). В этом случае силы в двух раскосах справа от точки D, могут быть приведены к одной силе, действующей в точке D, как показано на рис. R23.2.2(d).

Если ширина опоры в направлении, перпендикулярном элементу, меньше чем ширина элемента, может понадобиться поперечная арматура для предотвращения вертикального среза в плоскости узла. Этот расчет может быть смоделирован с использованием поперечной раскосно-связевой модели.

3 Случай, когда все силы проходят через одну точку, является предпочтительным, так как автоматически удовлетворяет условию равновесия моментов в узле

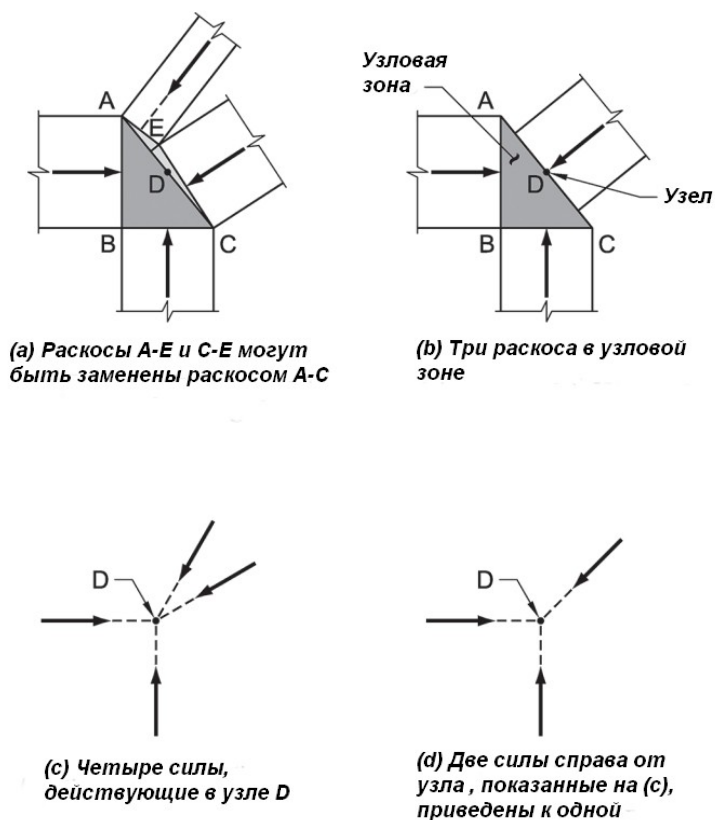


Рисунок R23.2.2. Приведение сил в узловых зонах

**23.2.3.** Раскосно-связевые модели передают все расчетные нагрузки на опоры или смежные В-области.

**R23.2.3.** Раскосно-связевые модели показывают нижнюю границу предельного состояния по прочности (*англ. lower-bound strength limit state*). В данном разделе нормы не регламентируют минимальное количество распределительной арматуры в D-областях, но она требуется для высоких балок по п.9.9.3.1, кронштейнов и коротких консолей по п.16.5.5<sup>4</sup>. Распределительная арматура в этих элементах D-областей улучшает эксплуатационные качества конструкции. Кроме того, ширина раскрытия трещин в связях может быть проверена по п.24.3.2<sup>5</sup>, полагая что связь окружена призмой бетона, в соответствии с площадью связи по п.R23.8.1.

**23.2.4.** Внутренние усилия в раскосно-связевых моделях должны быть в равновесии с приложенными внешними нагрузками и опорными реакциями.

**23.2.5.** Связи могут пересекать расколы и другие связи.

**23.2.6.** Расколы могут пересекаться или накладываться друг на друга только в узлах.

**R23.2.6.** Гидростатическими узловыми зонами (*англ. hydrostatic nodal zones*) называются зоны, которые имеют одинаковые напряжения на всех площадках; эти площадки перпендикулярны осям расколов и связей, которые приходят в узел. Этот тип узлов считается гидростатическим,

4 В п.9.9.3.1 приведены требования по минимальному армированию высоких балок (с отношением пролета в свету к высоте сечения не более 4), в п.16.5.5 - кронштейнов и коротких консолей.

5 В п.24.3.2 приведены требования по максимальным расстояниям между стержнями арматуры в растянутой зоне элементов исходя из ограничения трещинообразования в них.

потому что, (по аналогии с законом Паскаля в гидростатике), имеет одинаковые напряжения в плоскости во всех направлениях. Строго говоря, терминология не вполне корректная, потому что напряжения в плоскости двумерной задачи не равны напряжениям из плоскости.

Рис. R23.2.6a(i) показывает узловую зону типа С-С-С. Если напряжения на гранях узловой зоны одинаковые во всех трех раскосах, то соотношение между длинами сторон узловой зоны  $w_{n1}:w_{n2}:w_{n3}$  должно быть в том же соотношении, что и три силы  $C_1:C_2:C_3$ .

Узловая зона С-С-Т может быть представлена как гидростатическая в том случае, если связь проходит насквозь узла и анкеруется плитой с противоположной стороны узла, как показано на рис. R23.2.6a(ii), размер плиты обеспечивает опорные напряжения, равные напряжениям в раскосах. Опорная плита с левой стороны рис. R23.2.6a(ii) использована для обеспечения анкерования связи. Усилие в связи может быть заанкеровано при помощи опорной плиты, заделки прямых стержней (рис. R23.2.6a(iii)), высаженных головок или загиба стержней. Для негидростатических узлов площадка с наибольшими напряжениями будет задавать размеры узла.

Светло залитая зона на рис. R23.2.6a(ii) является расширенной узловой зоной. Расширенная узловая зона - это часть элемента, ограниченная пересечением эффективной ширины раскоса  $w_s$  и эффективной ширины связи  $w_t$ .

Для равновесия, по меньшей мере три силы должны действовать в каждом узле раскосно-связевой модели, как показано на рис. R23.2.6с. Узлы классифицируются в соответствии со знаками этих сил. На узел С-С-С действуют три сжимающих силы, на узел С-С-Т действуют две сжимающие силы и одна растягивающая сила, на узел С-Т-Т действуют одна сжимающая сила и две растягивающие силы (англ. *C* - compression, *T* - tension).

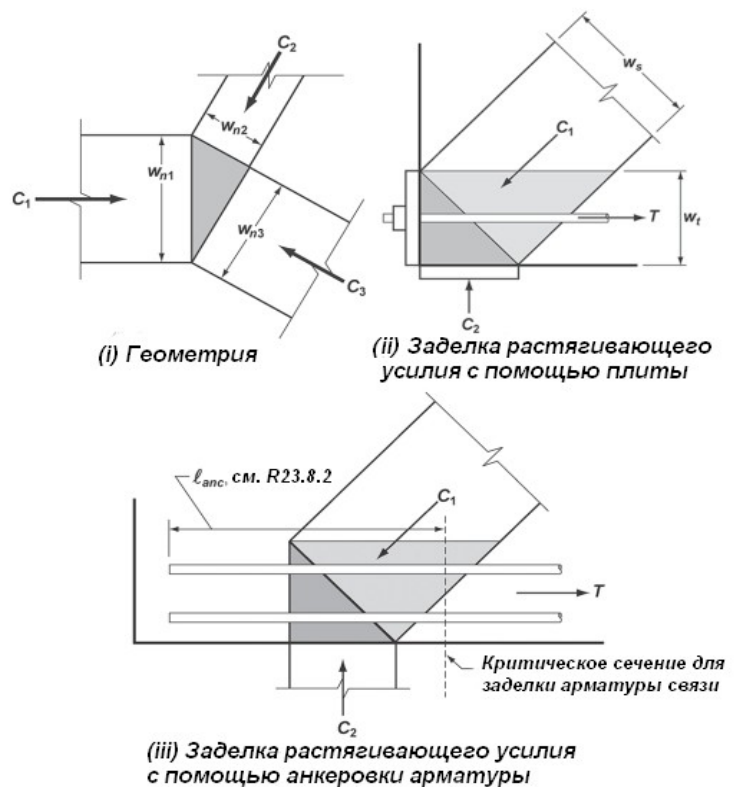
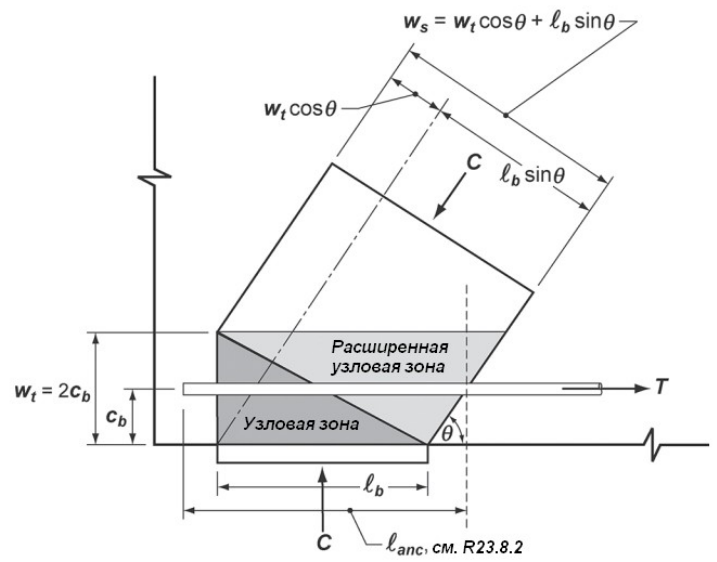
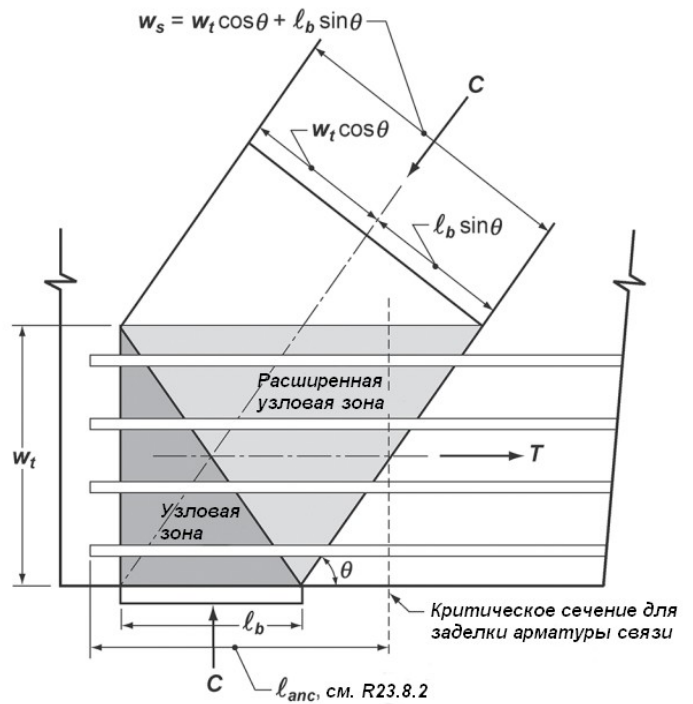


Рисунок R23.2.6а. Гидростатические узлы



(i) Армирование в один слой



(ii) Распределенное армирование

Рисунок R23.2.6b. Расширенные узловые зоны показывают влияние распределения силы

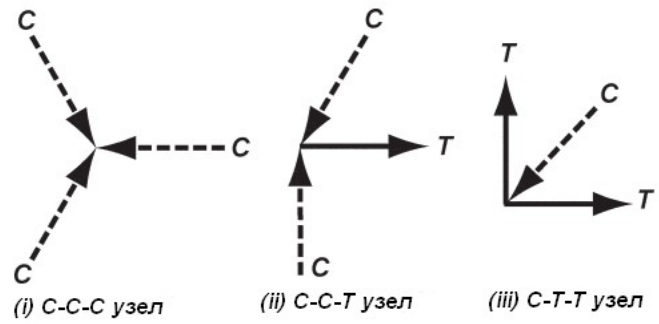


Рисунок R23.2.6с. Классификация узлов

**23.2.7.** Углы между осями каждого раскоса и каждой связи внутри узла должны быть не менее  $25^\circ$ .

**R23.2.7.** Минимальное значение угла между осями раскосов и связей, приходящих в узел, ограничено для того, чтобы уменьшить трещинообразование и предотвратить несоответствия из-за укорочения раскосов и удлинения связей, происходящее в практически одинаковом направлении. Это ограничение не дает моделировать тонкие балки-стенки с использованием раскосов, наклоненных под углом менее  $25^\circ$  к продольному армированию (Muttoni et al. 1997).

**23.2.8.** Высокие балки, проектируемые с учетом раскосно-связевой модели, должны удовлетворять требованиям пп.9.9.2.1, 9.9.3.1 и 9.9.4<sup>6</sup>.

**23.2.9.** Короткие консоли с соотношением пролета к высоте  $a_w/d < 2$ , проектируемые с помощью раскосно-связевой модели, должны удовлетворять требованиям пп.16.5.2, 16.5.6<sup>7</sup> и (23.2.9):

$$A_{sc} \geq 0,04 (f_c' / f_y) \cdot (b_w d) \quad (23.2.9)$$

### 23.3. Расчетная прочность

**23.3.1.** Для каждой возможной комбинации расчетных нагрузок, расчетная прочность каждого раскоса, связи или узловой зоны в раскосно-связевой модели должны удовлетворять требованию  $\varphi S_r \geq U$ , включая неравенства от (а) до (с):

- (а) Раскосы:  $\varphi F_{ns} \geq F_{us}$
- (б) Связи:  $\varphi F_{nt} \geq F_{ut}$
- (с) Узловые зоны:  $\varphi F_{nn} \geq F_{un}$

**R23.3.1.** Должны быть вычислены расчетные нагрузки, прикладываемые к раскосно-связевой модели, а также силы в раскосах, связях и узловых зонах. Если имеется несколько комбинаций нагрузок, каждая из них должна быть рассмотрена независимо. Для рассматриваемого раскоса, связи или узловой зоны,  $F_u$  есть наибольшая сила в этом элементе для всех рассматриваемых комбинаций усилий.

**23.3.2.** Коэффициент  $\varphi$  принимается в соответствии с п.21.2<sup>8</sup>.

<sup>6</sup> В п.9.9.2.1 приведены требования к минимальным размерам сечения, в п.9.9.3.1 - к минимальному армированию, в п.9.9.4 - конструктивные требования к армированию высоких балок.

<sup>7</sup> В п.16.5.2 приведены требования к минимальным размерам сечения, в п.16.5.6 - конструктивные требования к армированию кронштейнов и коротких консолей.

## 23.4. Прочность расколов

**23.4.1.** Номинальная прочность раскола на сжатие  $F_{ns}$  вычисляется по формулам (а) или (б):

(а) Раскол без продольного армирования

$$F_{ns} = f_{ce} A_{cs}$$

(23.4.1a)

(б) Раскол продольным армированием

$$F_{ns} = f_{ce} A_{cs} + A_s' f_s'$$

(23.4.1b)

где:

$F_{ns}$  - принимается меньшим значением, вычисленным с каждого конца раскола,

$A_{cs}$  - поперечное сечение рассматриваемого конца раскола,

$f_{ce}$  - вычисляется по п.23.4.3,

$A_s'$  - площадь сжатой арматуры вдоль длины раскола,

$f_s'$  - напряжения в сжатой арматуре при номинальной осевой прочности раскола.

Разрешается принимать  $f_s'$  равным  $f_y$  для арматуры классов Grade40 или Grade60<sup>9</sup>.

**R23.4.1.** Ширина раскола  $w_s$ , используемая для вычисления  $A_{cs}$ , является размером, перпендикулярным оси на концах раскола. Эта ширина показана на рис. R23.2.6a(i) и рис. R23.2.6b. Если используется двухмерная расколочно-связевая модель, например для высоких балок, толщина раскола может быть принята равной ширине элемента кроме зоны около опорного участка, где толщина раскола должна приниматься наименьшему значению толщины раскола или опорного элемента.

**23.4.2.** Эффективная прочность бетона на сжатие  $f_{ce}$  в расколе вычисляется в соответствии с п.23.4.3 или п.23.4.4.

**R23.4.2.** При проектировании расколы обычно принимаются как призматические сжатые элементы. Если площадь раскола различается с двух концов, либо из-за различной прочности узловых зон, либо из-за различных опорных длин, раскол принимается как равномерно расширяющийся сжатый элемент.

**23.4.3.** Эффективная прочность бетона на сжатие  $f_{ce}$  в расколе вычисляется по формуле:

$$f_{ce} = 0,85 \beta_s f_c' \quad (23.4.3)$$

где:

$\beta_s$  - принимается в соответствии с табл.23.4.3, с учетом влияния на прочность бетона на сжатие трещинообразования и поперечной арматуры против трещинообразования<sup>10</sup>.

8 В соответствии с п.21.2, для всех элементов расколочно-связевой модели принимается коэффициент  $\varphi=0,75$ .

9 Согласно стандарту США на арматурную сталь для железобетонных конструкций ASTM A615, арматура классифицируется по минимальному пределу текучести: Grade 40 - 40000psi (280МПа), Grade 60 - 60000psi (420МПа).

10 На практике для расколов с уширением обычно принимаются консервативные значения коэффициента  $\beta_s$  по табл.23.4.3(b) или (c), с учетом имеющегося ортогонального армирования. Если этого оказывается недостаточно для выполнения условий прочности, то используют значение по табл.23.4.3(a), в этом случае продольное и поперечное армирование в расколе должно удовлетворять требованиям,



Таблица 23.4.3 - Коэффициент  $\beta_s$  для раскоса

Геометрия раскоса и его положение	Армирование, пересекающее раскос	$\beta_s$	
Раскосы с однородным поперечным сечением	НД	1,0	(a)
Раскосы, расположенные в зоне элемента, где ширина сжатого бетона в середине раскоса может расширяться в поперечном направлении (раскосы с уширением)	Удовлетворяет 23.5	0,75	(b)
	Не удовлетворяет 23.5	0,60 $\lambda$	(c)
Раскосы, расположенные в растянутых элементах или растянутых зонах элементов	НД	0,40	(d)
Прочие случаи	НД	0,60 $\lambda$	(e)

**R23.4.3.** Коэффициент  $0,85f_c$ 'к прочности в (23.4.3) отражает эффективную прочность бетона при длительном воздействии сжимающих напряжений, по аналогии с используемым в (22.4.2.2) и (22.4.2.3)<sup>11</sup>.

Значение  $\beta_s$  в табл.23.4.3(b) относится к раскосам с уширением, как показано на рис. R23.4.3. Раскос с уширением расположен в части элемента, где ширина сжатого бетона в середине раскоса может расширяться в поперечном направлении (Schlaich et al.; MacGregor 1997). Криволинейные пунктирные контуры раскосов на рис. R23.2.1 и криволинейные сплошные контуры на рис. R23.4.3 примерно соответствуют контурам раскоса с уширением. Для упрощения проектирования, раскосы с уширением принимаются либо призматическими, либо равномерно расширяющимися, и поперечная арматура против трещинообразования из п.23.5.3 обеспечивает восприятие растяжения в поперечном направлении. Площадь поперечного сечения  $A_c$  раскоса с уширением берется как наименьшее значение поперечного сечения на двух концах раскоса, см. рис. R23.4.3(a).

Значение  $\beta_s$  табл.23.4.3(c) применяется к раскосам с уширением без поперечной арматуры. Прочность раскоса без поперечной арматуры снижена за счет поперечного растяжения, ничем не ограниченного, см. рис. R23.4.3(a).

*относящимся к армированию сжатых элементов (колонн).*

11 В (22.4.2.2) и (22.4.2.3) вычисляется прочность условно центрально сжатых элементов, в этих формулах также используется понижающий коэффициент 0,85 к прочности бетона.

Значение  $\beta_s$  табл.23.4.3(d) применяется, например, для сжатых расколов раскосно-связевой модели, используемой для расчета продольной и поперечной арматуры растянутых поясов балок, балок коробчатого сечения и стен. Пониженное значение  $\beta_s$  отражает то, что эти расколы передают сжатие в зонах, где растягивающие напряжения действуют перпендикулярно расколу.

Значение  $\beta_s$  табл.23.4.3(e) применяется во всех прочих случаях. Например, для восходящего расколов диагональном направлении главных сжимающих напряжений в балках.

Значение  $\beta_s$  табл.23.4.3(с) и (е) учитывает возможность продольного раскалывания раскола, включает коэффициент  $\lambda$  для легкого бетона. Легкий бетон имеет пониженную прочность на растяжение и более хрупкий, что может снизить прочность раскола.

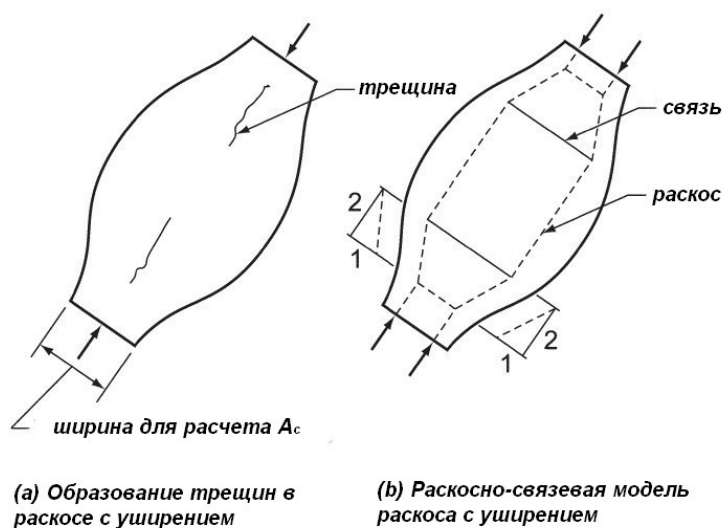


Рисунок R23.4.3. Раскол с уширением

**23.4.4.** Если вдоль длины раскола предусмотрено косвенное армирование и его эффективность подтверждена тестами и расчетами, то разрешается использовать увеличенное значение  $f_{ce}$  для вычисления  $F_{us}$ .

### 23.5. Армирование, пересекающее раскол с уширением

**23.5.1.** Для расколов с уширением, запроектированных с учетом коэффициента  $\beta_s=0,75$ , армирование для восприятия поперечного растяжения из-за распространения продольного усилия в расколе должно пересекать ось раскола. Разрешается определять поперечное растяжения в предположении, что сжимающая сила в расколах с уширением распределяется под углом 2 к 1 к продольной оси раскола.

**R23.5.1.** Армирование, требуемое по п.23.5.1, относится к растягивающей силе, возникающей из-за поперечного расширения раскола. Количество поперечной арматуры может быть вычислено с использованием раскосно-связевой модели, показанной на рис. R23.4.3(b), где раскол отражает распространение сжимающей силы в соотношении 1 к 2 к оси приложенной сжимающей силы. Армирование, размещенное для восприятия раскалывающей силы, сдерживает образование трещин, позволяет воспринять расколу большую сжимающую силу и разрешает некоторое распределение усилий. С другой стороны, для  $f'_c$ , не превышающей

6000psi (42МПа)<sup>12</sup>, (23.5.3) может быть использована для определения площади поперечной арматуры.

**23.5.2.** Арматура, требуемая по п.23.5.1, должна быть заделана за пределы раскоса в соответствии с п.25.4<sup>13</sup>.

**23.5.3.** Распределительная арматура, вычисленная в соответствии с (23.5.3) и пересекающая ось раскоса, должна быть предусмотрена для удовлетворения п.23.5.1, если  $f_c' \leq 6000\text{psi}$  (42МПа)<sup>14</sup>:

$$\Sigma \frac{A_{si}}{b_s s_i} \sin \alpha_i \geq 0,003$$

(23.5.3)

где:

$A_{si}$  – общая площадь распределительной арматуры, установленной с шагом  $s_i$  в направлении  $i$ , пересекающем раскос под углом  $\alpha_i$  к оси раскоса,

$b_s$  – ширина раскоса.

**R23.5.3.** Рис. R23.5.3 показывает два слоя арматуры пересекающей раскос. Армирование помогает ограничить трещинообразование в раскосе с уширением (см. рис. R23.4.3) и в результате получить большую несущую способность, чем если бы распределительная арматура не была установлена. Индекс  $i$  в (23.5.3) равен 1 для вертикальных и 2 для горизонтальных стержней. Неравенство (23.5.3) написано для процента армирования, а не для напряжений, для упрощения расчетов.

Часто такую распределительную арматуру сложно расположить в конструкциях, например свайных ростверках. Если армирование не предусмотрено, то должно быть использовано значение  $\beta$ , в пункте (с) табл.23.4.3.

---

12 Здесь и далее в оригинале указаны величины в имперской системе измерений, именно они должны применяться в формулах; величины в единицах СИ, указанные в скобках, приведены только для информации

13 В п.25.4 приведены указания по вычислению длины заделки арматуры

14 Цилиндрическая прочность бетона на сжатие  $f_c' = 6000\text{psi}$  (42МПа) приблизительно соответствует классу бетона по прочности на сжатие B50 (кубиковая прочность)

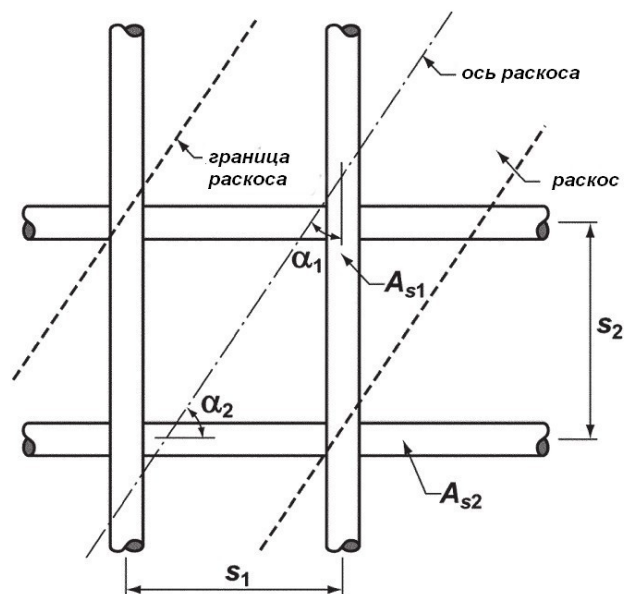


Рисунок R23.5.3. Армирование, пересекающее раскос

**23.5.3.1.** Распределительная арматура, требуемая по п.23.5.3, должна быть установлена ортогонально под углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  к оси раскоса, или в одном направлении под углом  $\alpha_1$  к оси раскоса. Там, где армирование установлено только в одном направлении, угол  $\alpha_1$  должен быть не менее  $40^\circ$ .

**R23.5.3.1.** Важный пример использования п.23.5.3.1 - это короткая консоль с отношением пролета к высоте менее 1,0. Для нее распределительная арматура, требуемая для удовлетворения п.23.5.1, обычно устанавливается в виде горизонтальных хомутов, пересекающих наклонный сжатый раскос, как показано на рис. R16.5.1b<sup>15</sup>.

## 23.6. Конструирование раскосов

**23.6.1.** Сжатая арматура раскоса должна быть параллельна оси раскоса; вдоль оси раскоса должна быть установлена поперечная арматура (хомуты и шпильки), охватывающая сжатую арматуру, в соответствии с п.23.6.3 или спиральная арматура в соответствии с п.23.6.4.

**R23.6.1.** См. п. R23.4.1.

**23.6.2.** Сжатая арматура в раскосах должна быть заделана на восприятие напряжений  $f_s'$  относительно грани узловой зоны, где  $f_s'$  вычисляется в соответствии с п.23.4.1.

**23.6.3.** Поперечная арматура, охватывающая сжатую арматуру в раскосах, должна удовлетворять п.25.7.2<sup>16</sup> и данной секции.

**23.6.3.1.** Шаг поперечной арматуры вдоль длины раскоса  $s$  не должен превышать наименьшего значения, указанным в требованиях от (а) до (с):

- (а) Наименьший размер сечения раскоса
- (б)  $48d_b$ , относительно диаметра  $d_b$  стержневой или проволочной арматуры хомутов
- (с)  $16d_b$ , относительно диаметра  $d_b$  сжатой арматуры

<sup>15</sup> Рис.16.5.1b показывает стандартное армирование короткой консоли, включающее горизонтальные хомуты, расположенные под опорной площадкой

<sup>16</sup> В п.25.7.2 приведены конструктивные требования к размещению поперечной арматуры в сжатых элементах (колоннах)

**23.6.3.2.** Первый хомут должен быть расположен не далее расстояния **0,5s** от грани узловой зоны с каждого конца раскоса.

**23.6.3.3.** Хомуты должны быть установлены так, чтобы каждый угловой и как минимум каждый второй продольный стержень были охвачены шпилькой или перегибом хомута с внутренним углом не более 135°. Расстояние в свету между каждым стержнем, охваченным поперечной арматурой, и соседним, не охваченным, стержнем, измеренное вдоль грани элемента, должно быть не более  $6\alpha$  (152мм).

**R23.6.3.3.** См. п. R25.7.2.3<sup>17</sup>.

**23.6.3.4.** Спиральная арматура, охватывающая сжатую арматуру в раскосах, должна удовлетворять п.25.7.3<sup>18</sup>.

## 23.7. Конструирование связей

**23.7.1.** Армирование связей может быть обычное и преднапряженное.

**23.7.2.** Номинальная прочность связи на растяжение  $F_{nt}$  вычисляется по формуле:

$$F_{nt} = A_{ts} f_y + A_{tp} (f_{se} + \Delta f_p)$$

(23.7.2)

где:

$(f_{se} + \Delta f_p)$  - не должно превышать  $f_{py}$ ,

$A_{tp} = 0$  для элементов без преднапряжения.

**23.7.3.** В (23.7.2) разрешается брать  $\Delta f_p$  равным 60000psi (420МПа) для преднапряженной арматуры со сцеплением и 10000psi (70МПа) - без сцепления. Повышенные значения  $\Delta f_p$  допускаются если они будут подтверждены расчетами.

## 23.8. Конструирование связей

**23.8.1.** Центр тяжести армирования связи должен совпадать с осью связи, принятой в расчете раскосно-связевой модели.

**R23.8.1.** Эффективная ширина связи, принятая в расчете  $w_e$ , может быть в следующем диапазоне, в зависимости от распределения арматуры связи:

- (a) Если стержни в связи установлены в один слой, эффективная ширина связи может быть принята равной диаметру стержней связи плюс удвоенное значение защитного слоя бетона до поверхности элемента, как показано на рис. R23.2.6b(i).
- (b) Максимальное значение ширины связи на практике ограничивается шириной, соответствующей ширине гидростатической узловой зоны, вычисленной по формуле  $w_{tmax} = F_{nt} / (f_{ce} b_s)$ , где  $f_{ce}$  вычислено для узловой зоны в соответствии с п.23.9.2.

Если ширина связи превышает значение (a), то арматура связи должна быть распределена равномерно по ширине и толщине связи, как показано на рис. R23.2.6b(ii).

17 В п. R25.7.2.3 приведены разъяснения по требованиям к устройству хомутов и шпилек в колоннах

18 В п.25.7.3 приведены конструктивные требования к установке спиральной арматуры в колоннах

**23.8.2.** Арматура связи должна быть заанкерована при помощи механических изделий, анкерных изделий для преднапряженной арматуры, стандартным гнутьем стержней или заделкой прямых стержней в соответствии с п.23.8.3.

**R23.8.2.** Анкеровка стержней часто требует специального внимания в узловых зонах коротких консолей или в узловых зонах примыкающих к крайним опорам высоких балок. Армирование связи должно быть заанкеровано в пределах расширенной узловой зоны, начиная от точки пересечения линии центра тяжести стержней связи с продолжением контуров раскоса или опорного участка. Эта длина показана на рис. R23.2.6б для случая, когда граница расширенной узловой зоны пересекается с центром тяжести стержней связи. В некоторых случаях анкеровка может быть достигнута при помощи прохождения арматуры через узловую зону, как показано на рис. R23.2.6а(iii) и рис. R23.2.6б, и заделкой ее вне узловой зоны. Если связь заанкерована с использованием загиба стержней на  $90^\circ$ , то эти загибы должны быть охвачены арматурой для предотвращения образования трещин в бетоне в зоне заделки.

В высоких балках горизонтальные шпильки совместно с вертикальными шпильками могут быть использованы для улучшения условий анкеровки усилий в связях на крайних опорах, если ширина балки достаточна для размещения этих стержней.

Рис. R23.8.2 показывает анкеровку двух связей в узловой зоне. Заделка требуется от точки пересечения оси связи с внешними границами расширенной узловой зоны.

Длина заделки арматуры может быть снижена при помощи загиба стержней, высаженных головок, механических изделий, косвенного армирования или использования большего количества стержней меньшего диаметра.

**23.8.3.** Армирование должно быть заделано в соответствии с (а) и (б):

- (а) Усилие в арматуре связи, численно равное разнице в усилиях с одной и другой стороны узла, должно быть заанкеровано в узловой зоне.
- (б) В узловых зонах, анкерующих одну или более связей, усилие связи в каждом направлении должно быть заделано от точки, где центр тяжести армирования связи пересекает границу расширенной узловой зоны.

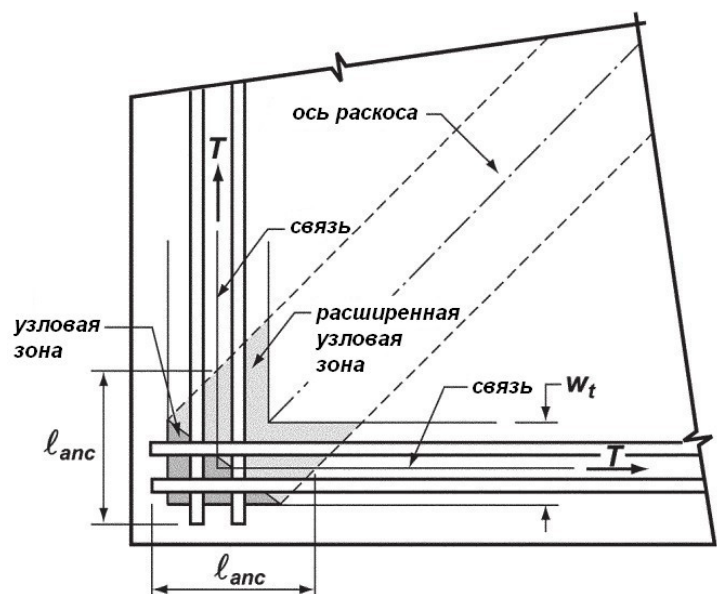


Рисунок R23.8.2. Расширенная узловая зона, анкерующая две связи

## 23.9. Прочность узловых зон

**23.9.1.** Номинальная прочность на сжатие узловой зоны  $F_{nn}$  вычисляется по формуле:

$$F_{nn} = f_{ce} A_{nz} \quad (23.9.1)$$

где  $f_{ce}$  - определяется по п.23.9.2 или п.23.9.3, а  $A_{nz}$  - по п.23.9.4 или п.23.9.5.

**23.9.2.** Эффективная прочность бетона на сжатие на грани узловой зоны  $f_{ce}$  определяется по формуле:

$$f_{ce} = 0,85 \beta_n f_c \quad (23.9.2)$$

где  $\beta_n$  - принимается в соответствии с табл.23.9.2.

Таблица 23.9.2 - Коэффициент  $\beta_n$  для узловых зон

Конфигурация узловой зоны	$\beta_n$	
Узловая зона, ограниченная раскосами или опорными участками	1,0	(a)
Узловая зона, анкерующая одну связь	0,80	(b)
Узловая зона, анкерующая две и более связи	0,60	(c)

**R23.9.2.** Узлы в двумерных моделях могут классифицироваться как показано на рис. 23.2.6с. Эффективная прочность на сжатие узловой зоны приведена в (23.9.2), где значение  $\beta_n$  принимается по табл.23.9.2.

Нижнее значение  $\beta_n$  отражает повышенную опасность разрушения узловых зон из-за разного направления растягивающих напряжений в связях и сжимающих напряжений в раскосах<sup>19</sup>. Напряжения на каждой грани узловой зоны и в каждом сечении узловой зоны не должно превышать значений, приведенных в (23.9.2).

**23.9.3.** Если внутри узловой зоны установлена косвенная арматура и ее эффективность подтверждена тестами и расчетами, разрешается использовать повышенное значение  $f_{ce}$  для вычисления  $F_{nn}$ .

**23.9.4.** Площадь каждой грани узловой зоны  $A_{nz}$  должна приниматься как наименьшее из (a) и (b):

- (a) Площадь грани узловой зоны, перпендикулярная линии действия  $F_{us}$
- (b) Площадь сечения, проведенного через узловую зону перпендикулярно линии действия равнодействующей силе в этом сечении

**R23.9.4.** Если напряжения во всех раскосах, приходящих в узел, равны между собой, то это гидростатический узел. Грани такой узловой зоны перпендикулярны осям раскосов, а длины граней узловой зоны пропорциональны силам в раскосах.

Напряжения на гранях узловых зон, которые перпендикулярны осям раскосов и связей являются главными напряжениями, для которых используется п.23.9.4а. Если, как показано на рис. R23.2.6b(ii), грань узловой зоны не перпендикулярна оси раскоса, то на этой грани будут как нормальные, так и касательные напряжения. Обычно, эти напряжения заменяются нормальными (главными сжимающими) напряжениями, действующими в поперечном сечении  $A_{nz}$ , перпендикулярном оси раскоса, как указано в п.23.9.4(a).

<sup>19</sup> При классификации узловых зон необходимо также учитывать напряжения, действующие из плоскости двумерной раскосно-связевой модели

**23.9.5.** В трехмерной раскосно-связевой модели площадь каждой грани узловой зоны принимается не менее указанного в п.23.9.4, а форма каждой грани узловой зоны принимается подобной форме проекции конца раскоса на соответствующую грань узловой зоны.

---

### Выбор схемы для раскосно-связевой модели

Самой первой и главной задачей для успешного выполнения расчета по методу раскосно-связевой модели является компоновка геометрии схемы (дальнейшие расчеты - вычисление усилий в элементах и проверка напряжений - относительно простые). Правильно скомпонованная модель дает обоснованные и логичные результаты, соответствующие пониманию о работе конструкции, опытным данным и согласующаяся с результатами расчета по классической "балочной" теории.

Для одной и той же конструкции может быть задано несколько отличающихся друг от друга раскосно-связевых моделей, и по этим моделям будет подобрано разное количество армирования. Каждая модель уникальна и отражает индивидуальный подход инженера к решению задачи. Любая модель, удовлетворяющая требованиям норм, является допустимой, но наилучшей моделью будет схема с наиболее экономичным армированием. Во всех случаях необходимо учитывать также требования по минимальному армированию конструкций.

Для раскосно-связевых моделей главными требованиями являются обеспечение геометрической неизменяемости всей конструкции и прочности ее отдельных элементов. Также при выборе модели руководствуются следующими принципами [6, 7]:

- для некоторых стандартных случаев имеются примеры в специальной литературе [2, 3]
- связи располагаются в тех местах, где предполагается установка продольной арматуры
- для контроля трещинообразования связи располагают так, чтобы они пересекали трещины, полученные из испытаний данного вида конструкций, если такие испытания имеются
- раскосы располагают по направлению главных сжимающих напряжений, полученных из линейного конечно-элементного расчета
- если рассматриваемая D-область примыкает к B-областям, то раскос располагают в центре тяжести сжатой зоны балок, которую можно определить из классического "балочного" расчета
- выбор модели с первых же этапов компоновки должен учитывать конструирование узлов, в том числе обеспечение требований по анкеровке арматуры связей
- в некоторых случаях может рассматриваться пропорциональное разделение нагрузок и дальнейший расчет по нескольким раскосно-связевым моделям, такое разделение должно быть описано в специальной литературе, на основании опытных данных
- целесообразно стремиться к сокращению суммарной длины связей в модели, так как это приведет к более экономичному армированию конструкции
- целесообразно стремиться к таким моделям, разрушение которых происходит от текучести арматуры связей, а не от разрушения раскосов или узлов
- целесообразно стремиться к более простым для анализа моделям

### Заключение

Таким образом, метод раскосно-связевой модели предоставляет инженеру очень мощный инструмент для расчета ряда конструкций или участков конструкций, которые ранее проектировались на основании эмпирических зависимостей или абстрактного опыта инженера, выполняющего расчет. Метод может успешно применяться для расчета таких ответственных конструкций, как балки-стенки, распределительные конструкции, ауриггеры в высотных зданиях, свайные ростверки, перемычки, короткие консоли, балки с подрезками, опорные участки балок и многие другие.



## Пояснения к обозначениям, используемым в ACI 318-14

$f_c'$	- цилиндрическая прочность бетона на сжатие, <i>psi</i>
$f_y$	- прочность ненапрягаемой арматуры на растяжение, соответствующая пределу текучести, <i>psi</i>
$f_s'$	- прочность ненапрягаемой арматуры на сжатие от расчетных нагрузок, <i>psi</i>
$f_{se}$	- эффективные напряжения в преднапряженной арматуре, после всех потерь, <i>psi</i>
$f_{ce}$	- эффективная прочность на сжатие бетона расколов или узловых зон, <i>psi</i>
$\Delta f_p$	- напряжения в преднапряженной арматуре от приложения расчетных нагрузок, <i>psi</i>
$\lambda$	- коэффициент, отражающий снижение механических свойств легкого бетона по отношению к свойствам тяжелого бетона той же самой прочности на сжатие
$\beta_s, \beta_n$	- коэффициенты к прочности расколов и узловых зон соответственно
$F_{nsr}, F_{us}$	- несущая способность раскола и действующие на раскол усилия соответственно, <i>lb</i>
$F_{nt}, F_{ut}$	- несущая способность связи и действующие на связь усилия соответственно, <i>lb</i>
$F_{nv}, F_{un}$	- несущая способность узловой зоны и действующие на узловую зону усилия соответственно, <i>lb</i>
$A_{cs}$	- поперечное сечение на одном конце раскола, <i>in</i> <sup>2</sup>
$A_s'$	- сечение сжатой арматуры, <i>in</i> <sup>2</sup>
$A_{ts}$	- сечение ненапряженной арматуры в связи, <i>in</i> <sup>2</sup>
$A_{tp}$	- сечение преднапряженной арматуры в связи, <i>in</i> <sup>2</sup>
$A_{nz}$	- поперечное сечение грани узловой зоны или сечения по узловой зоне, <i>in</i> <sup>2</sup>
$w_s$	- ширина раскола, <i>in</i>
$w_t$	- ширина связи, <i>in</i>
$b_s$	- ширина раскола, <i>in</i>
$s$	- шаг арматуры в осях, <i>in</i>
$d$	- диаметр арматуры, <i>in</i>

## Список литературы

1. ACI 318-14. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2014.
2. ACI SP-208. Examples for the Design of Reinforced Concrete with Strut-and Tie Models, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2002.
3. ACI SP-273. Further Examples for the Design of Reinforced Concrete with Strut-and Tie Model, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2010.
4. ACI 445R-99. Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete, ACI-ASCE Committee 445, 2000.
5. FIP Recommendations. Practical design of structural concrete, September 1999.
6. Jörg Schlaich, Kurt Schäfer, Mattias Jennewein. Toward a Consistent Design of Structural Concrete. Special report. PCI Journal. May/June 1987.
7. James K. Wight, James G. MacGregor. Reinforced Concrete. Mechanics and design. Sixth Edition. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2012.