



Проект «Повышение устойчивости к
рискам стихийных бедствий» [ERIK]



Оценка сейсмостойкости, проектирование и расчет школьных зданий с железобетонной каркасной системой с учетом пластического сейсмического поведения согласно СТУ

Светлана Бржев

Профессор Университета Британской Колумбии [UBC], Канада
Президент Сербской Ассоциации по сейсмостойкому строительству [SUZI-SAEЕ]
Почетный профессор МУИТ

Улугбек Бегалиев

Д.т.н., профессор и ректор МУИТ, президент МАЭСС

Айдарбек Стамов

Координатор по инжинирингу МАЭСС

12 - апреля 2024 г.

Темы

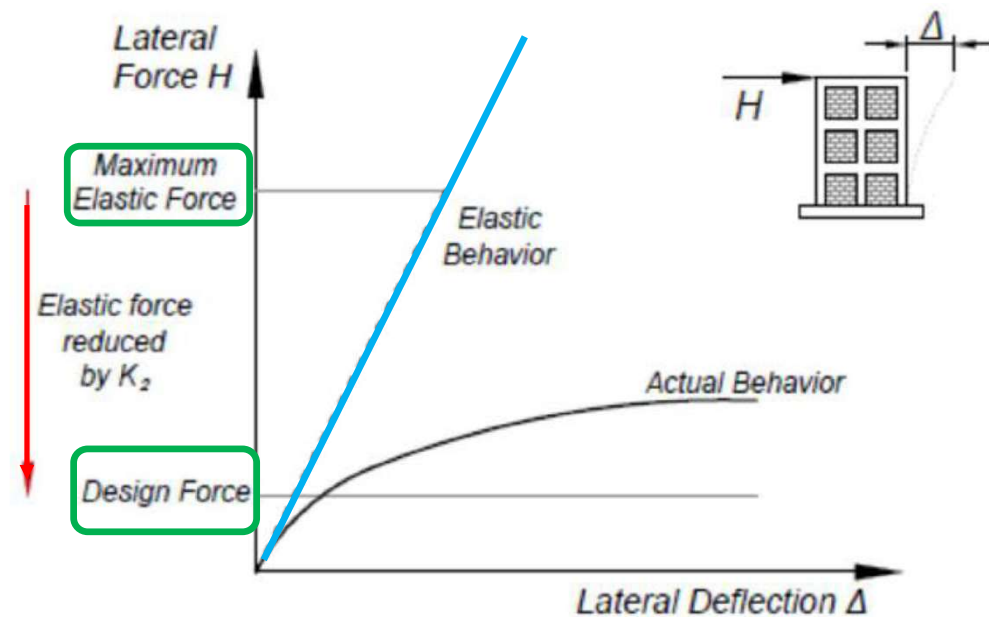
- Расчетные требования для железобетонных каркасных систем с учетом сейсмических воздействий согласно СН КР 20-02:2024
- Сейсмическое поведение железобетонных каркасных систем
- Специальные технические условия [СТУ] для железобетонных каркасных систем – обзор
- Цель 1 СТУ: Условие «прочные колонны – слабые балки» следует достичь
- Цель 2 СТУ: Поведение ЖБ балок следует контролировать прочностью на изгиб
- Цель 3 СТУ: Поведение ЖБ колонн следует контролировать прочностью на изгиб
- Цель 4 СТУ: Механизма слабого [гибкого] этажа следует избежать
- Примеры расчета

Расчет и проектирование железобетонных каркасных зданий в соответствии с нормами проектирования КР

В Кыргызской Республике, расчет и проектирование железобетонных каркасных зданий с учетом сейсмического воздействия выполняется по требованиям СН КР 20-02:2024.

В СН КР 20-02:2024 используется подход, основанный на определении расчетных сейсмических нагрузок спектральным методом – по линейно-упругому расчету. Конструктивные элементы рассчитываются и проектируются достаточно прочными с учетом расчетных сейсмических воздействий.

Ожидаемая пластичность конструктивной системы рассматривается с помощью **коэффициента поведения q** .



Проектирование рамной и рамно-связевой конструктивной системы

- Конструктивные системы каркасных зданий :
 - рамные со всеми жесткими узлами сопряжений ригелей (поперечных и продольных) с колоннами;
 - рамно-связевые; связевые; каркасно-стеновые.
- Каркасы одноэтажных зданий могут проектироваться по следующим конструктивным схемам:
 - комбинированной, в одном направлении рамная схема, а в другом – связевая;
 - в виде стоек, заземленных в фундаментах и шарнирно сопряженных со стропильными конструкциями;
 - в виде пространственных рамных конструкций шарнирно сопряженных с фундаментами.
- При выборе конструктивных схем каркасных зданий предпочтение следует отдавать схемам, в которых зоны пластичности могут возникнуть в первую очередь в горизонтальных элементах каркаса (ригелях, балках).

Проектирование рамной и рамно-связевой конструктивной системы

- В каркасных зданиях диафрагмы жесткости должны быть непрерывными по высоте. Диафрагмы допускается устанавливать с убывающей по высоте здания жесткостью. В каждом направлении здания должно устанавливаться не менее двух диафрагм жесткости, расположенных в разных вертикальных плоскостях. Диафрагмы продольного и поперечного направлений целесообразно объединять в пространственные элементы
- Ядра жесткости в каркасных зданиях рекомендуется располагать симметрично относительно центральных осей здания.
- Для площадок сейсмичностью 9 и более 9 баллов количество ядер жесткости следует принимать не менее двух на каждый отсек здания. Одно ядро жесткости допускается, если его площадь в плане составляет более 25% от площади этажа.

Сейсмическое поведение железобетонных каркасных сооружений

- При правильном проектировании, железобетонные каркасные сооружения могут обеспечить отличное поведение в случае сильных землетрясений.
- К сожалению, во время прошедших землетрясений, железобетонные каркасные сооружения обрушились из-за ошибок на стадии проектирования и строительства.

Поведение железобетонных каркасных сооружений при прошедших землетрясениях



Землетрясение в Черногории, 1979 г.

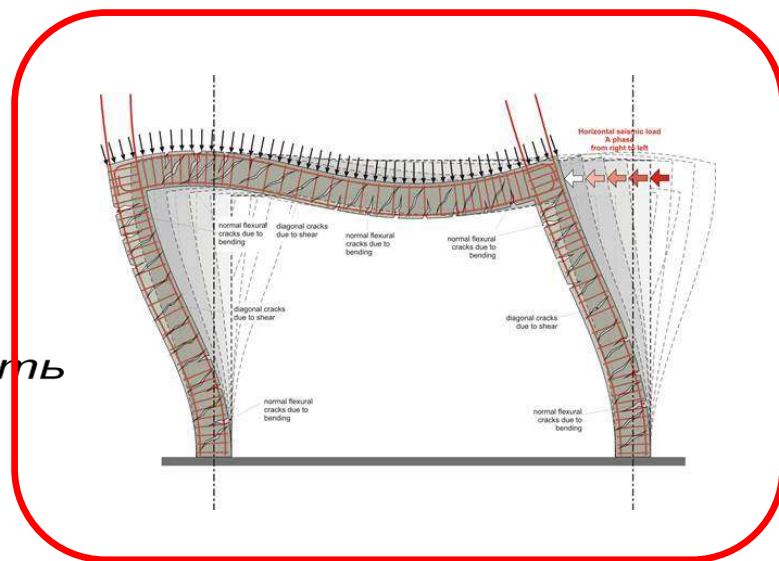
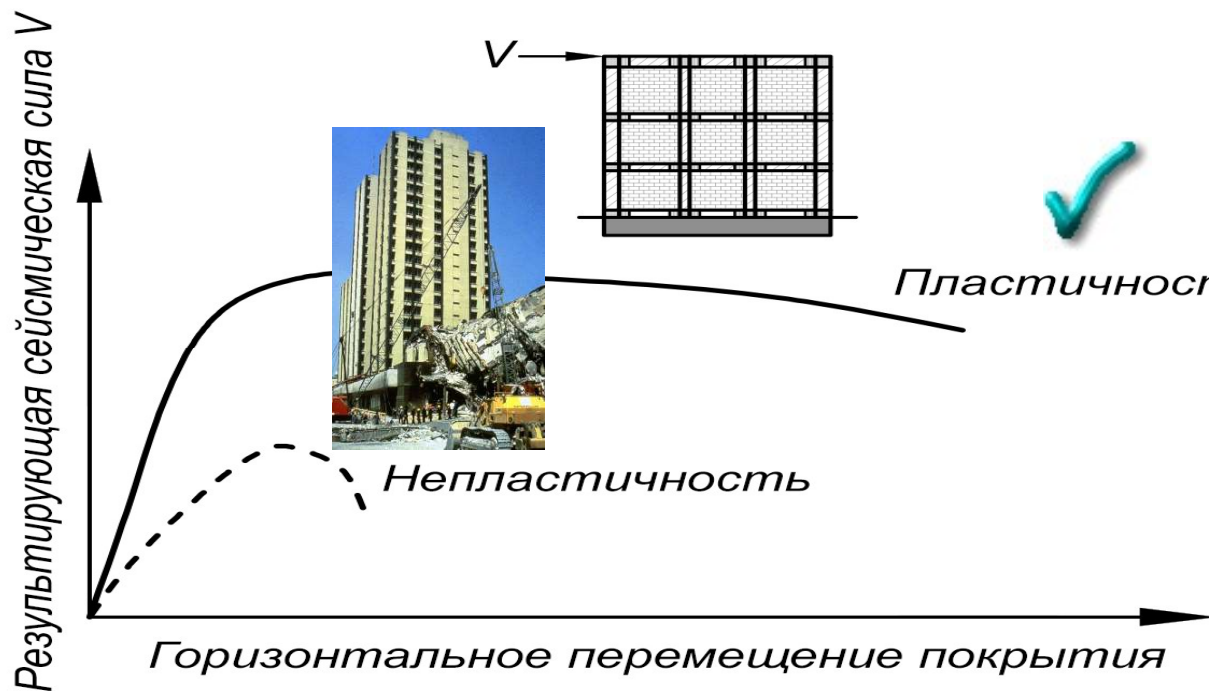
Землетрясение
в г. Бумердесе,
Алжир, 2003 г.



Землетрясение в
Турции, 2023 г.

Пластическое и непластическое (упругое) сейсмическое поведение

Пластическое поведение: повреждения допустимы при сильных землетрясениях, но необходимо избежать обрушения!



Сейсмическое поведение железобетонных каркасных сооружений

Каковы же причины значительных повреждений и разрушений каркасных зданий при землетрясениях?

- 1) Касательно конструктивной системы: отсутствие на стадии проектирования, расчетов и проверок, необходимых для обеспечения пластического поведения всего здания;
- 2) Касательно конструктивных элементов (ригели, колонны): специальные требования к проектированию и детализации армирования;
- 3) Несоответствующее качество строительства.

Железобетонные каркасные здания в Кыргызской Республике

- Существующие здания и сооружения: сборные ж/б рамные системы [серия ИИС-04] постройки до 1990 г.
- **Существующие и новые сооружения:** монолитные железобетонные каркасные

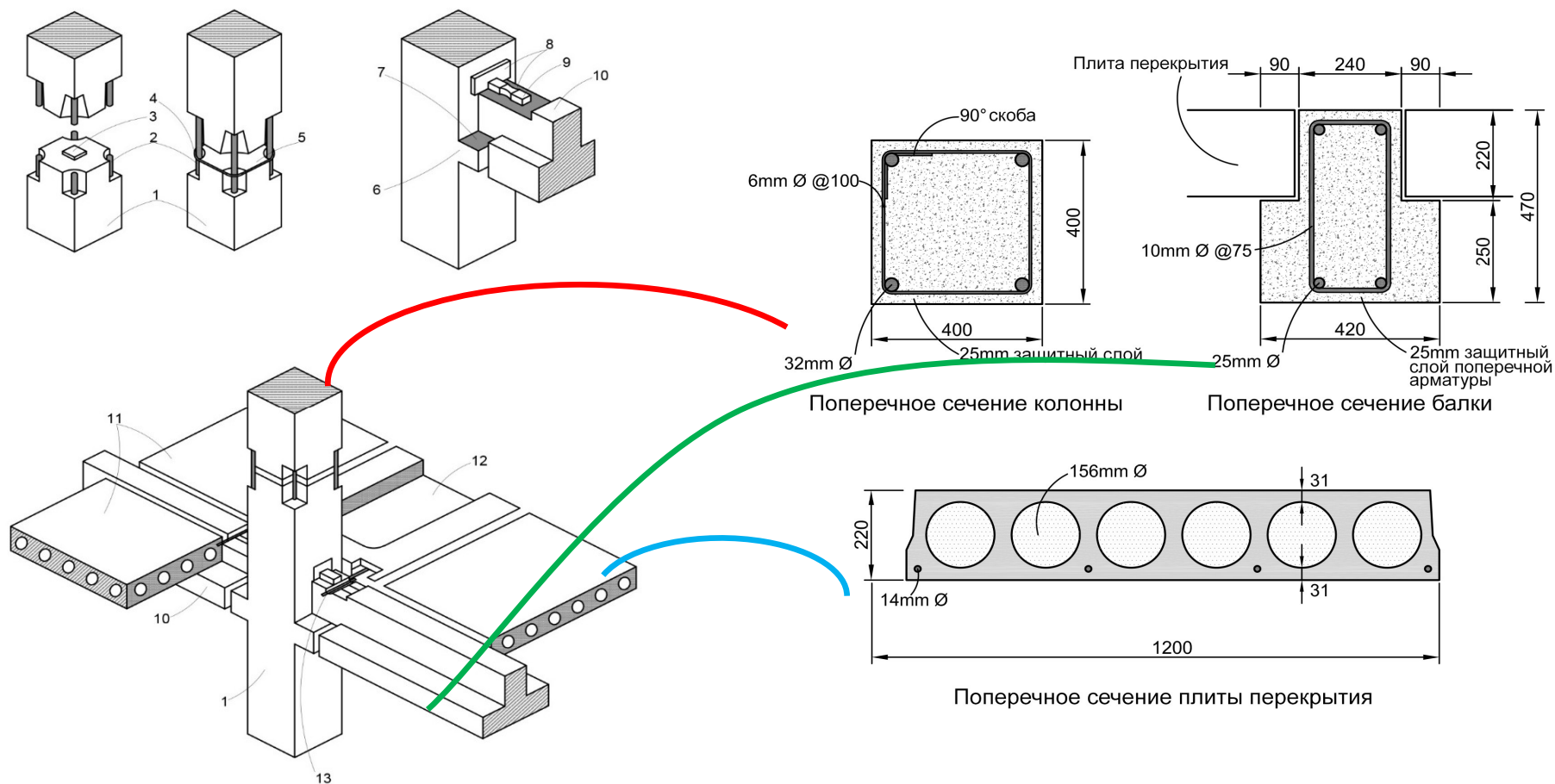
Общие примеры: школы, жилые дома,
административные / общественные здания

Сборный железобетонный каркас с наружными ж/б стеновыми панелями [Серия 111, ИИС-04]

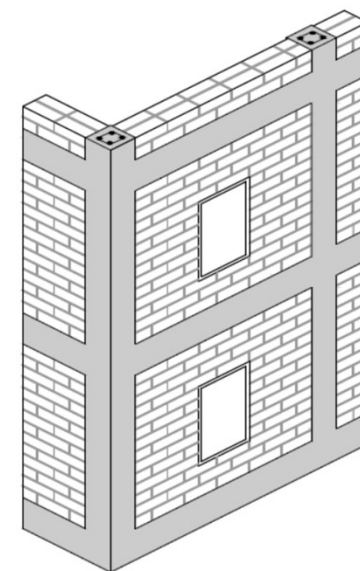


Наружные сборные ж/б стеновые панели: внешний вид школы в г. Бишкек [Фото: С. Бржев]

Сопряжения сборного железобетонного каркаса



Монолитный ЖБ каркас с кирпичным заполнением



Монолитное железобетонное каркасное здание с заполнением каменной (кирпичной) кладкой

Монолитный ЖБ каркас с кирпичным заполнением

a)



b)



c)



Типовое железобетонное каркасное здание школы №21, ж/м Эне-Сай, г. Бишкек, построено в 2006 г.:

a) вид снаружи; b) вид изнутри (холл); и c) типичный коридор [Фотографии: С. Бржев]

Расчет и проектирование железобетонных каркасных зданий в соответствии с международными нормами проектирования по сейсмостойкому строительству

Современные нормы проектирования во многих странах [например, Еврокоды в Европе, нормы в США, Канаде, Новой Зеландии и т.д.] включают дополнительные расчетные требования, которые предназначены для предотвращения обрушения конструкций при сильных землетрясениях с большей силой, чем в действующих нормах проектирования.

Данные нормы включают подход по расчету на сейсмические воздействия с целью прогнозирования механизма разрушения конкретной конструкции, чтобы ключевые элементы сооружения [Н: ригели, колонны] были достаточно прочными, когда подвергаются большим нагрузкам и перемещениям при землетрясении. Данный подход известен как **подход расчета максимальной фактической несущей способности [Capacity Design]** и был разработан в 1960-х годах в США и Новой Зеландии, начиная с 1970-х и 80-х годов, подход включен во многие международные нормы проектирования.

Поскольку **Capacity Design** не включен в действующие нормы проектирования КР по сейсмостойкому строительству, в рамках проекта ERIK были разработаны **Специальные технические условия (СТУ)** для сейсмического усиления школ в КР. СТУ доступны на английском и русском языках.

Подход к анализу уязвимости (3.2.2)

- 1) Наличие слабого этажа согласно требованиям подраздела 3.2.2.1
- 2) Поведение, контролируемое «слабой» колонной / «сильной» балкой согласно подраздела 3.2.2.2
- 3) Поведение колонн, контролируемых срезом согласно подраздела 3.2.2.3
- 4) Поведение узла балки-колонны, контролируемого несущей способностью узла согласно подраздела 3.2.2.4
- 5) Поведение балок, контролируемых срезом согласно подраздела 3.2.2.5.
- 6) Поведение колонн, контролируемых изгибной прочностью согласно подраздела 3.2.2.6
- 7) Поведение балок, контролируемых изгибной прочностью согласно подраздела 3.2.2.7

Наличие слабого этажа (3.2.2.1)

Слабый этаж существует, когда общая горизонтальная прочность первого этажа железобетонного каркаса составляет менее 80% от горизонтальной прочности вышележащего этажа.

При наличии этого условия, элементы каркаса должны оцениваться как контролируемые силами.

Если критерии приемлемости поведения для контролируемых силами элементов не удовлетворяются, то должны быть приняты меры по сейсмоусилению.

Слабый этаж обычно возникает в здании с первым этажом, который выше чем вышележащие этажи, но с теми же размерами элементов каркаса, что и вышележащие этажи.

Поведение, контролируемое «слабой» колонной / «сильной» балкой (3.2.2.2)

«Слабые» колонны / «сильные» балки присутствуют, когда сумма изгибных прочностей колонн, приходящих в узел, меньше чем на 20% превышает сумму изгибных прочностей балок, приходящих в этот узел.

Как в случае существующих, так и новых зданий, это условие не обязательно должно учитываться для одноэтажного здания или верхних этажей многоэтажного здания.

Поведение колонн, контролируемых срезом (3.2.2.3)

Железобетонные колонны считаются контролируруемыми срезом, если нормативная прочность на срез меньше поперечной силы, связанной с ожидаемой изгибной прочностью в верхнем и нижнем сечениях колонны.

Поперечные силы в колонне не должны превышать те, что приняты для расчета исходя из прочности узлов на основе ожидаемой изгибной прочности балок, приходящих в данные узлы.

Колонны в новых зданиях из железобетона не допускаются проектировать с контролируемым срезом, потому что разрушение при сдвиге нежелательно и его следует избегать.

Поведение узла балки-колонны, контролируемого несущей способностью узла (3.2.2.4)

Узлы балок/колонн считаются слабыми, если нормативная прочность узла меньше, чем наименьшая прочность балок или колонн, входящих в узел.

Слабые узлы должны оцениваться как контролируемые силами. Оценка должна включать полный механизм передачи нагрузки в узел, включая закладные детали, сварные соединения, анкеровку арматуры.

Если критерии приемлемости для контролируемых силами элементов не удовлетворяются, то должны быть приняты меры по сейсмоусилению.

Если детали армирования в узлах неизвестны и не могут быть определены путем обследования, то узлы должны рассматриваться как несоответствующие критериям приемлемости, и должны быть приняты меры по сейсмоусилению.

Поведение балок, контролируемых срезом (3.2.2.5)

Балки считаются контролируруемыми срезом, если нормативная прочность на срез меньше поперечной силы, связанной с ожидаемой изгибной прочностью на обоих концах балки.

Если поперечное армирование в балке неизвестно, то несущая способность балки должна основываться только на прочности бетона.

Балки, контролируемые срезом, должны оцениваться как контролируемые силами.

Если критерии приемлемости для контролируемых силами элементов, не удовлетворяются, то должны быть приняты меры по сейсмоусилению.

Поведение колонн, контролируемых изгибной прочностью (3.2.2.6)

Если колонны не являются элементами, контролируемыми срезом, как это определено в разделе 3.2.2.3, то колонны считаются контролируемыми изгибной прочностью.

Поведение балок, контролируемых изгибной прочностью (3.2.2.7)

Если балки не являются элементами, контролируемыми срезом, как определено в разделе 3.2.2.5, то балки считаются контролируемыми изгибной прочностью.

Цели СТУ для новых и существующих ЖБ зданий [согласно раздела 3.2.2]

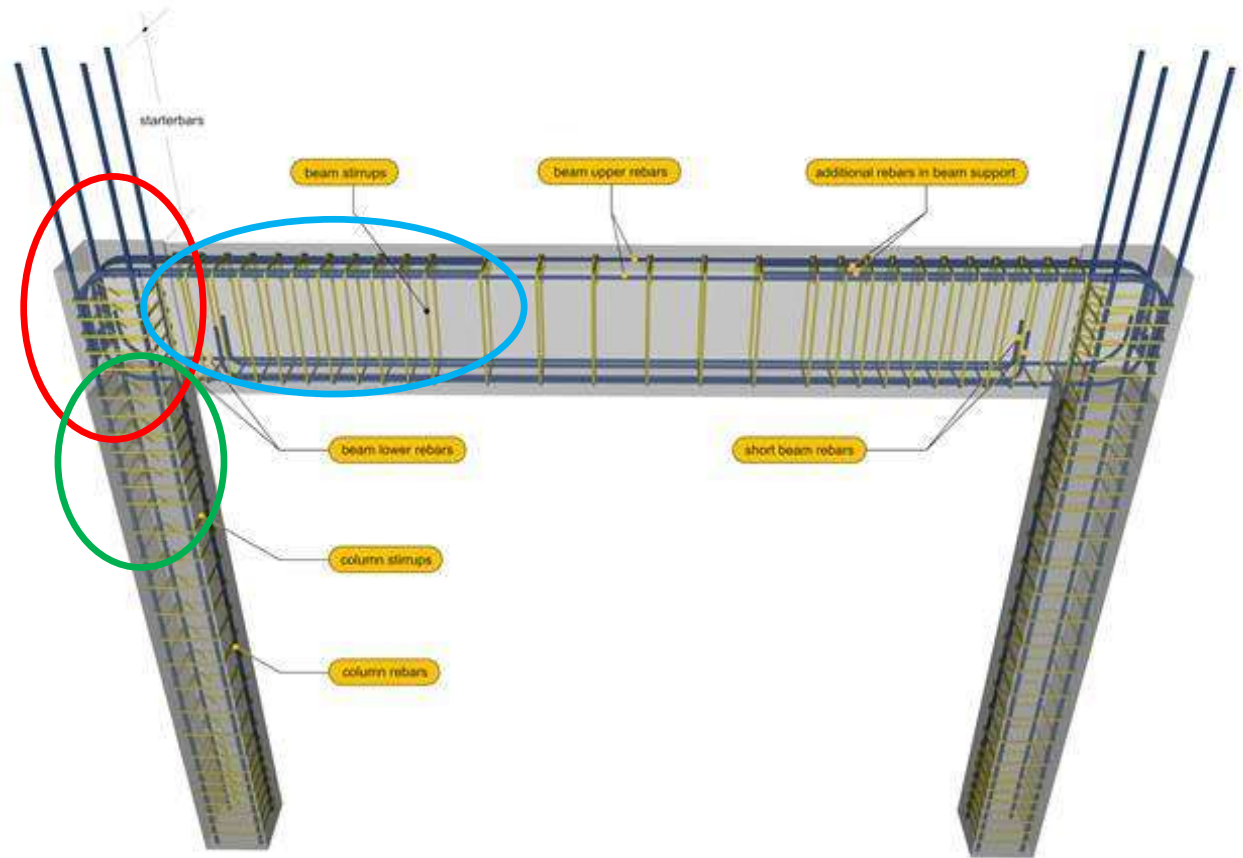
- 1) Условие «прочные колонны – слабые балки» следует достичь [3.2.2.2; 3.2.2.4]
- 2) Поведение ЖБ балок следует контролировать прочностью на изгиб – разрушение при срезе следует избежать [3.2.2.5; 3.2.2.7]
- 3) Поведение ЖБ колонн следует контролировать прочностью на изгиб - разрушение при срезе следует избежать [3.2.2.3; 3.2.2.6]
- 4) Механизма слабого [гибкого] этажа следует избежать [3.2.2.1]

Все вышеупомянутые 7 требований СТУ включены в эти цели.

Как же достичь пластическое и сейсмическое поведение железобетонных каркасных зданий?

1) Расчет и проектирование конструктивных элементов (ригели, колонны, стыки ригеля с колонной): размер (ширина/глубина) и количество арматуры

2) Детализация армирования: расстояние между хомутами в ригелях и колоннах, форма хомутов, крюки...



Метод расчета максимальной фактической несущей способности (Capacity Design) должен применяться!

Метод расчета максимальной фактической несущей способности (Capacity Design): основная цель состоит в том, чтобы рассчитать и спроектировать ж/б каркас таким образом, чтобы обеспечить пластичность, с учетом того, когда землетрясение намного сильнее, чем ожидалось в нормах проектирования по сейсмостойкому строительству.

Принципы относительно Подхода расчета максимальной фактической несущей способности (Capacity Design) для железобетонных каркасных зданий включены в Специальных технических условиях (СТУ) – особенно в разделе 3.2.2.

Метод расчета максимальной фактической несущей способности (Capacity Design): Применение

Метод расчета максимальной фактической несущей способности (Capacity Design) может быть использован для достижения пластического поведения железобетонных каркасных зданий, следуя принципам:

- 1) Избежать разрушения балок при срезе - балки должны развивать поведение при изгибе, характеризующееся текучестью арматуры.
- 2) Колонны должны быть прочнее балок - балки должны быть рассчитаны и спроектированы на образование в их концах пластических шарниров за счет изгиба.
- 3) Следует избежать разрушения при срезе в колоннах.

Цель 1 СТУ: Условие «прочные колонны – слабые балки» следует достичь [3.2.2.2; 3.2.2.4]

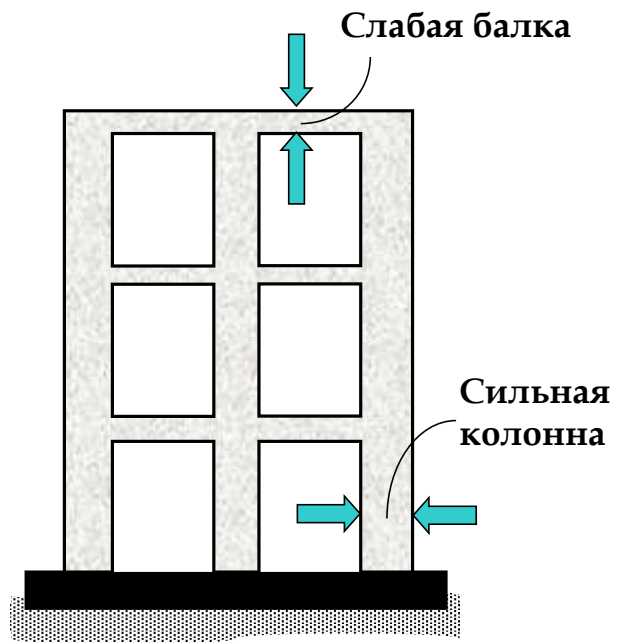
Цель этой проверки — избежать деформации ЖБ колонн в местах соединения балок с колоннами.

Податливость вертикальной арматуры в колоннах может произойти из-за **воздействия совместной продольной силы и изгибающего момента**.

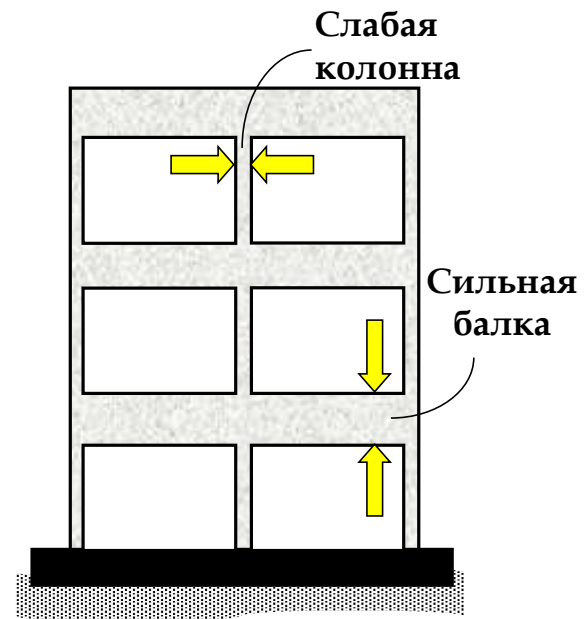
Колонны должны быть прочнее, чем балки, пересекающиеся в одном и том же месте соединения балки с колонной - колонны должны иметь более высокий **момент сопротивления**, чем балки.

При невыполнении требования «прочная колонна – слабая балка», может возникнуть **деформация в обоих концах всех колонн**, расположенных на рассматриваемом этаже, что может привести к нежелательному механизму разрушения, приводящему к обрушению всего этажа здания.

Принципы проектирования сейсмостойких зданий: Механизмы разрушения (1/2)

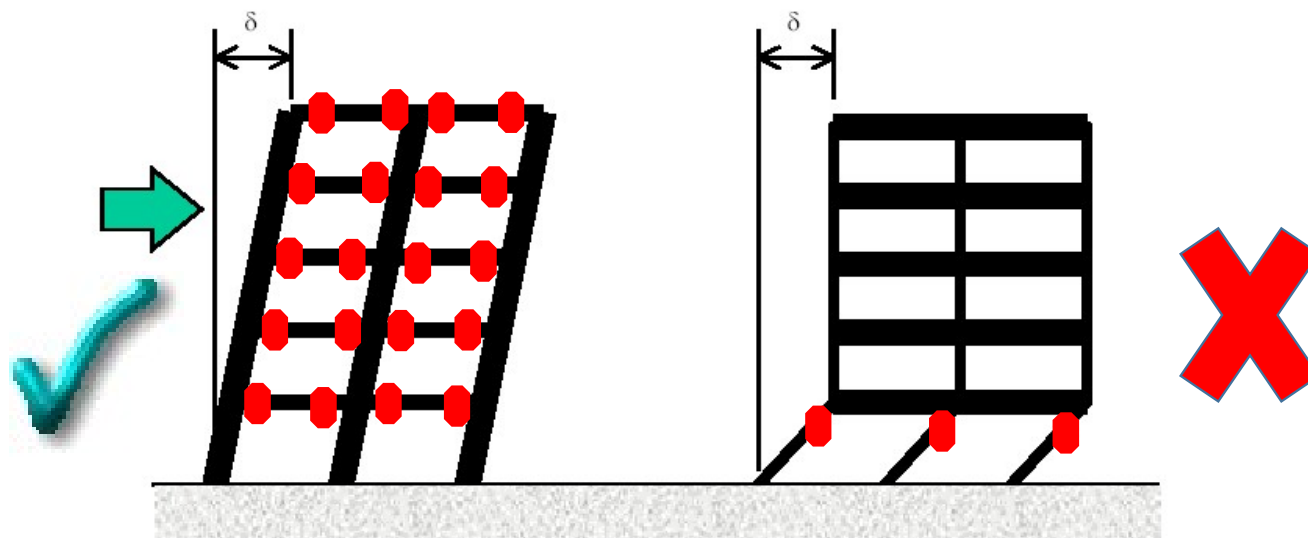


Сильная колонна – слабая балка ✓



Слабая колонна – сильная балка ?

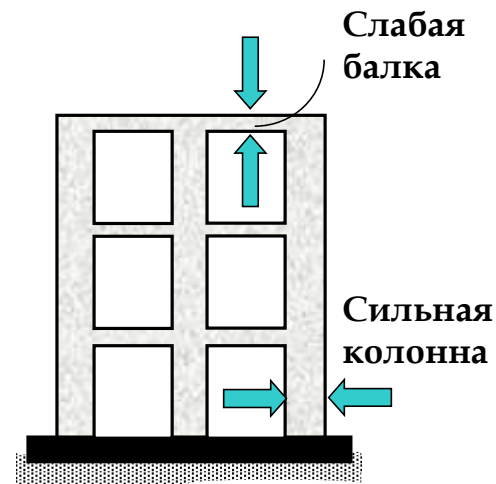
Принципы проектирования сейсмостойких зданий: Механизмы разрушения (2/2)



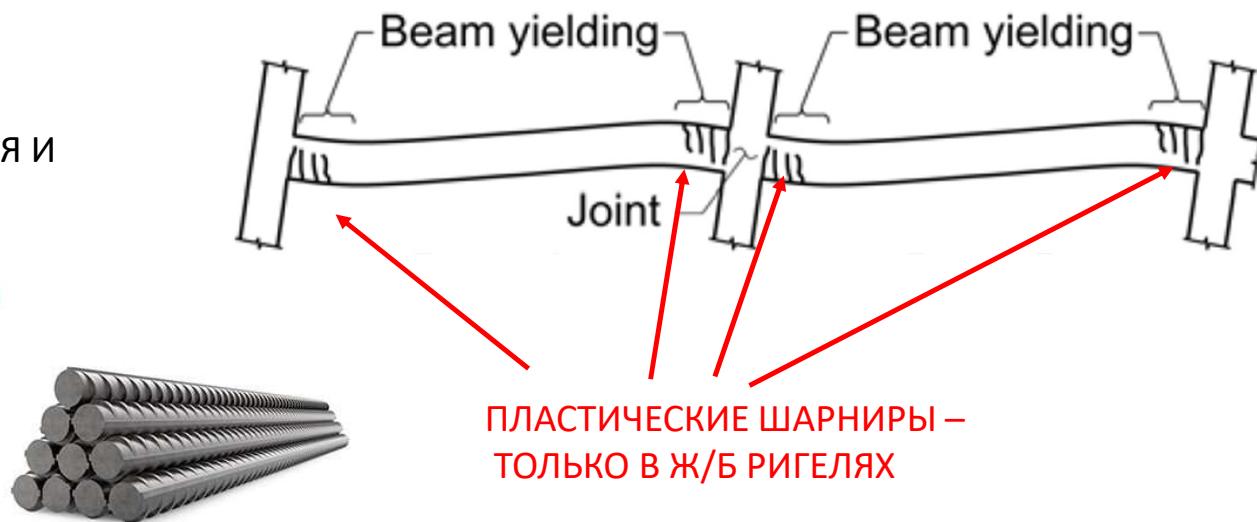
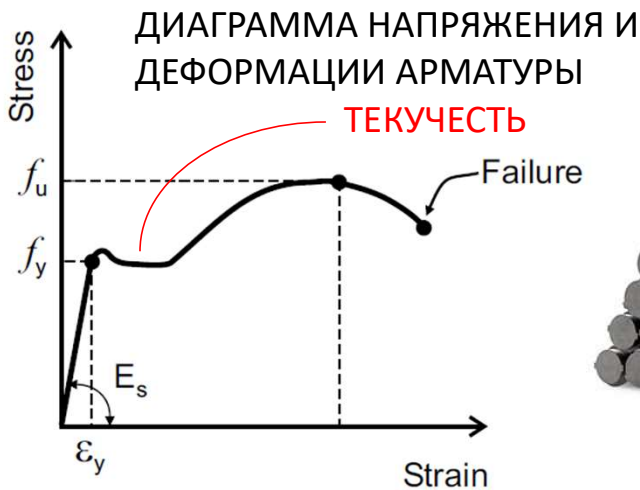
Сильная
колонна –
слабая балка

Слабая колонна
– сильная балка

Как же добиться желаемого механизма «слабая балка – сильная колонна»

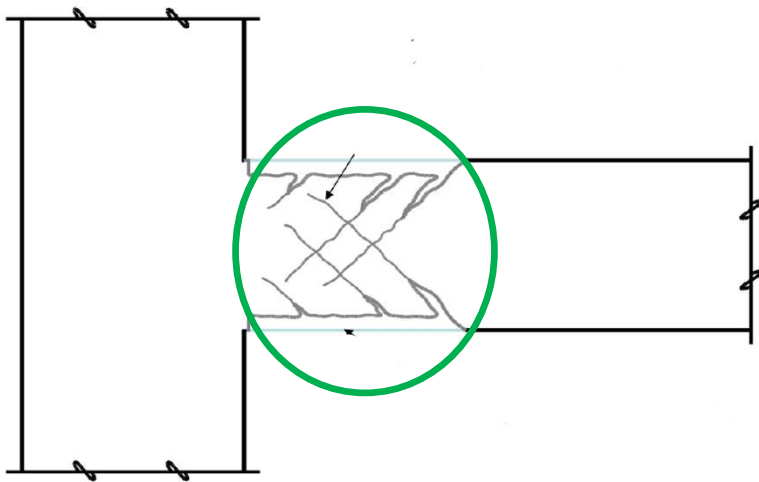


«Слабая балка» означает, что стальная арматура в **ригелях** должна поддаваться деформации и демонстрировать **пластическое (неупругое)** поведение, при этом **колонны** должны оставаться прочными (**упругими**).



Пластическое поведение сосредоточено в пластических шарнирах

Пластический шарнир = место в конструкции, где во время сильного землетрясения могут произойти значительные деформации и повреждения

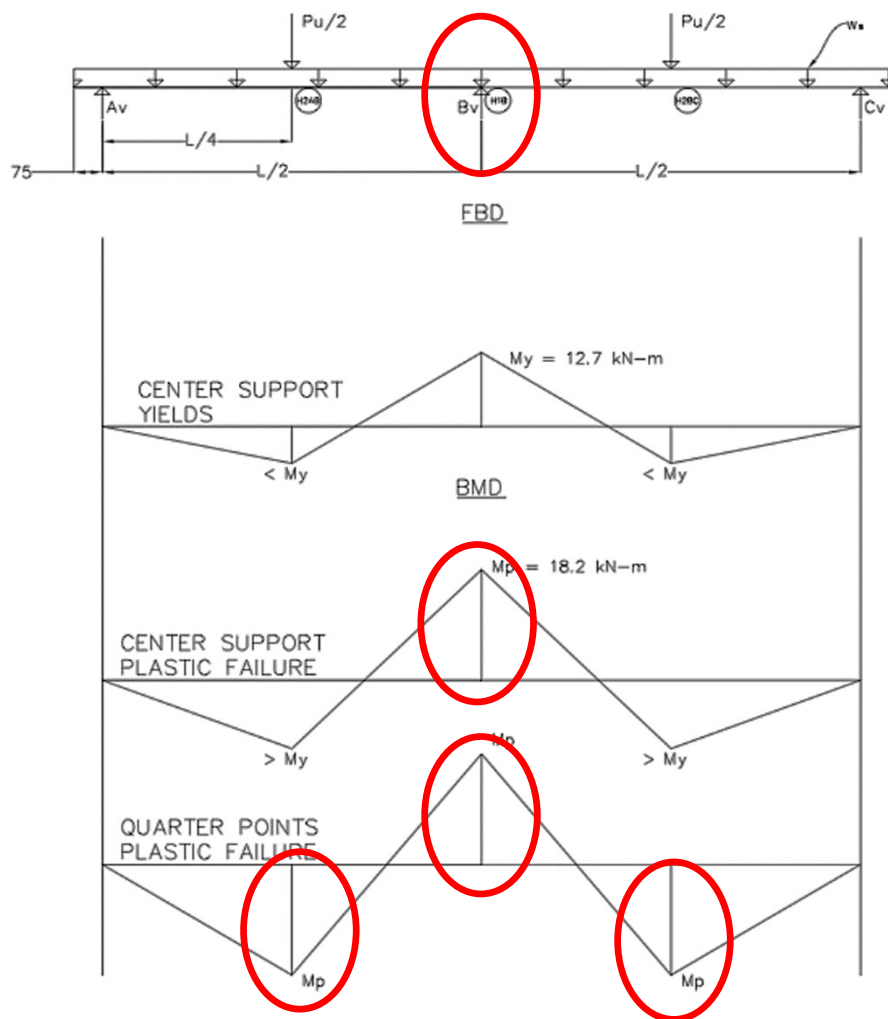


Пластический шарнир
в ж/б ригеле



Пластические шарниры
в ж/б колоннах

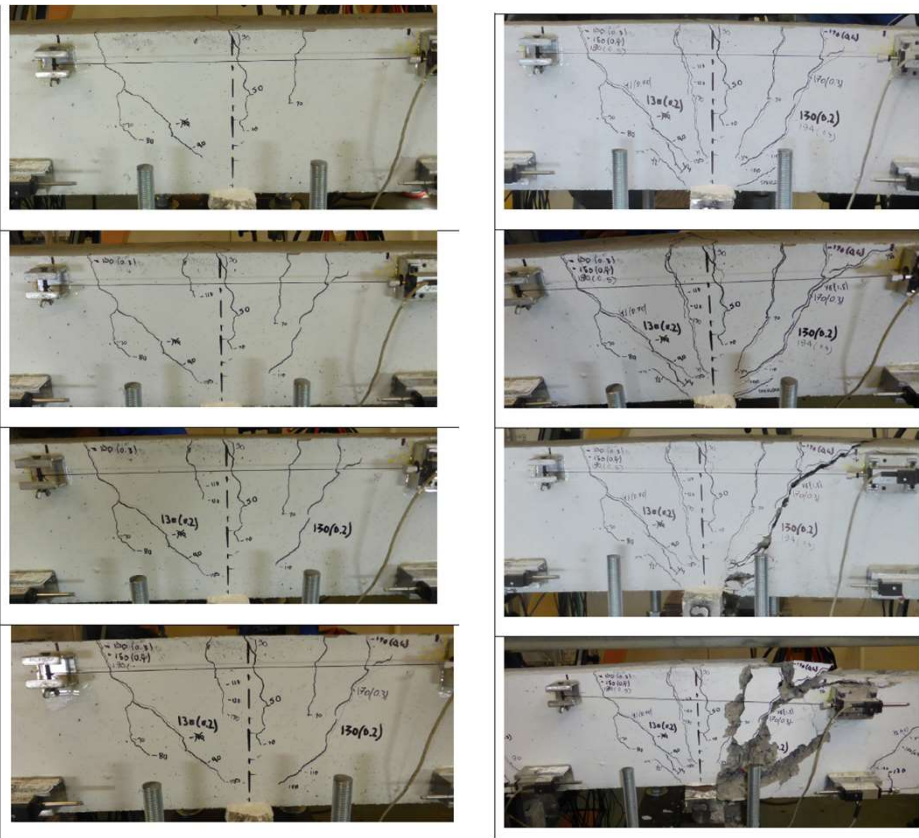
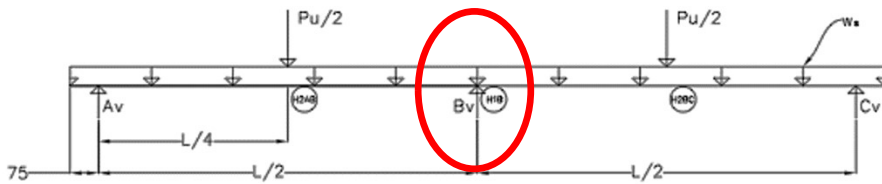
Образование пластического шарнира – Пример (1/2)



Daniel Hurd and Svetlana Brzev, BCIT, Canada (2015)

Дэниел Херд и Светлана Бржев, ВСИТ – Институт
технологии Британской Колумбии, Канада (2015)

Образование пластического шарнира – Пример (2/2)



Daniel Hurd and Svetlana Brzev, BCIT, Canada (2015)
Дэниел Херд и Светлана Бржев, BCIT – Институт
технологии Британской Колумбии, Канада (2015)

Проверка “прочные колонны – слабые балки”:
при каких условиях необходимо применять

Проверка важна для колонн, в которых учтенные **продольные силы** превышают

$$0,1A_g \times R_b,$$

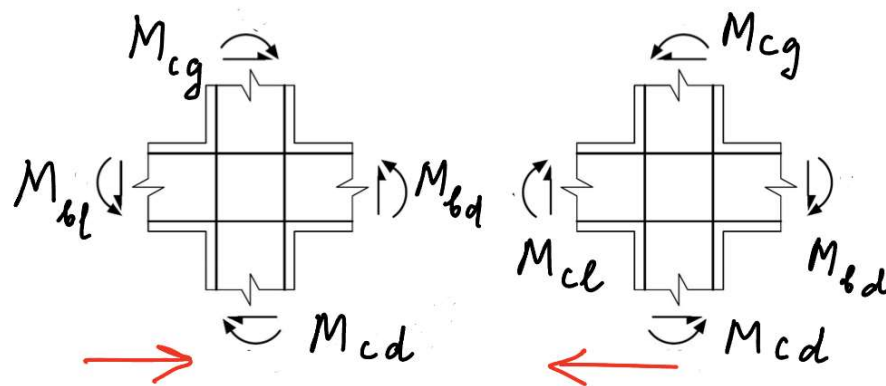
где A_g — площадь поперечного сечения колонны,

Исследования показали, что высокие продольные силы отрицательно влияют на сейсмическое поведение железобетонных колонн [продольные силы меньше чем $0,1A_g \times R_b$ не считаются высокими].

Проверка «прочные колонны – слабые балки»: процедура расчета [1/4]

Проверка считается соответствующей условию, если сумма **нормативных моментов сопротивлений (M_n) колонн** в узле балки с колонной не менее чем в 1,2 раза превышает **сумму нормативных моментов сопротивлений балок** в том же узле.

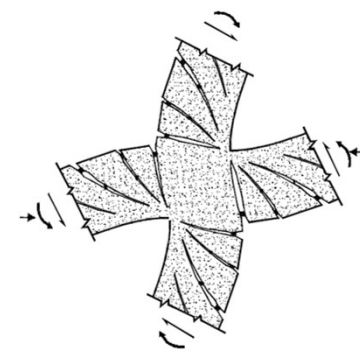
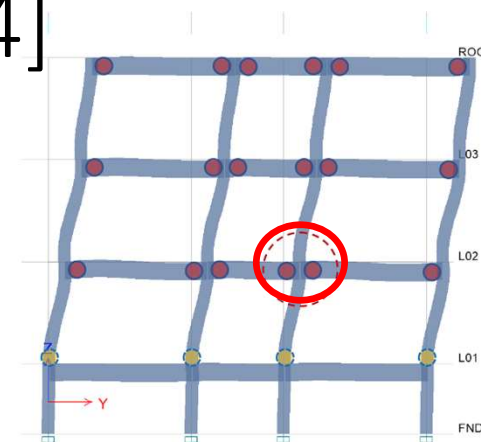
Проверку следует выполнять для обоих горизонтальных направлений здания, а также на сейсмическую силу, действующую слева -> направо и справа -> налево в одном и том же горизонтальном направлении.



Проверка «прочные колонны – слабые балки»: процедура расчета [2/4]

Проверка считается соответствующей условию, если сумма **нормативных моментов сопротивлений (M_n) колонн** в узле балки с колонной не менее чем в 1,2 раза превышает **сумму нормативных моментов сопротивлений балок** в том же узле.

Примечание: направление сейсмической силы показана красным цветом.



Проверка «прочные колонны – слабые балки»: процедура расчета [3/4]

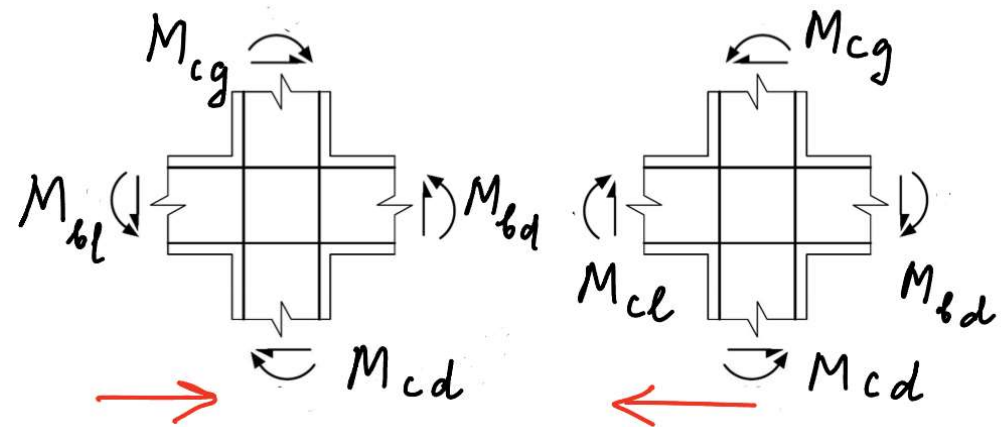
Следует выполнить условие:

$$\sum M_{nc} \geq 1.2 \sum M_{nb}$$

Где

$$\sum M_{nb} = M_{bl} + M_{bd}$$

$$\sum M_{nc} = M_{cg} + M_{cd}$$

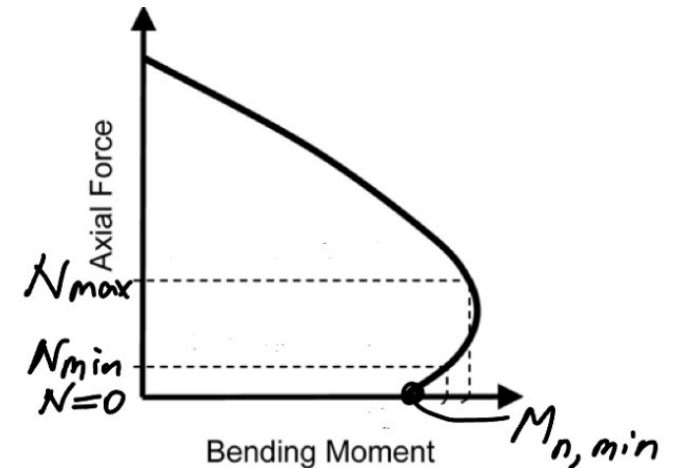


Проверку следует выполнять для обоих горизонтальных направлений здания, а также на сейсмическую силу, действующую слева -> направо и справа -> налево в одном и том же горизонтальном направлении.

Проверка «прочные колонны – слабые балки»: процедура расчета [4/4]

При расчете **нормативного момента сопротивления** для поперечного сечения колонны, следует учитывать **максимальную и минимальную расчетные продольные силу в колонне** (при различных сочетаниях нагрузок), поскольку **момент сопротивления для колонны зависит от продольной силы**.

Определяющим фактором будет **продольная сила N_{min}** , которая приводит к **наименьшему моменту сопротивления колонны**. Можно предположить, что **продольная сила равна нулю ($N=0$)**, поскольку приводит к **минимально возможному моменту сопротивления**.



Цель 2 СТУ: Поведение ЖБ балок следует контролировать прочностью на изгиб [3.2.2.5; 3.2.2.7]

Целью проверки является предотвращение разрушения ЖБ балок при срезе в **податливых каркасных системах**.

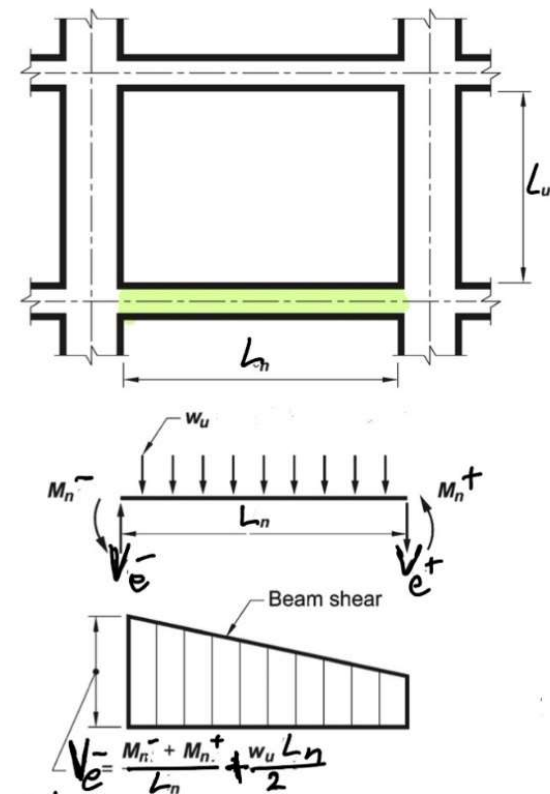
Предполагается, что сейсмическое поведение ЖБ балки определяется изгибом, когда **расчетная поперечная сила** определяется из **диаграммы свободного тела**, полученной путем **разрезания концов балки**. При этом **моменты на концах балки принимаются равными вероятным моментам сопротивления**, действующим при изгибе обратной кривизны, как по часовой, так и против часовой стрелки.

Следует также учитывать **эффекты среза, вызванные вертикальными нагрузками**.

Цель 2 СТУ: Поведение ЖБ балок следует контролировать прочностью на изгиб [3.2.2.5; 3.2.2.7]

Результатом расчета является определение **расчетных поперечных сил** на концах балки (V_e^- и V_e^+), которые основаны на **соответствующих предельных изгибающих моментах** в тех же местах и не зависят от **стандартного расчета на сейсмические воздействия** [например: расчет и анализ в ПК ЛИРА].

Расчетные силы определяются на основе подхода "Capacity Design".



Цель 2 СТУ: Поведение ЖБ балок следует контролировать прочностью на изгиб – процедура расчета

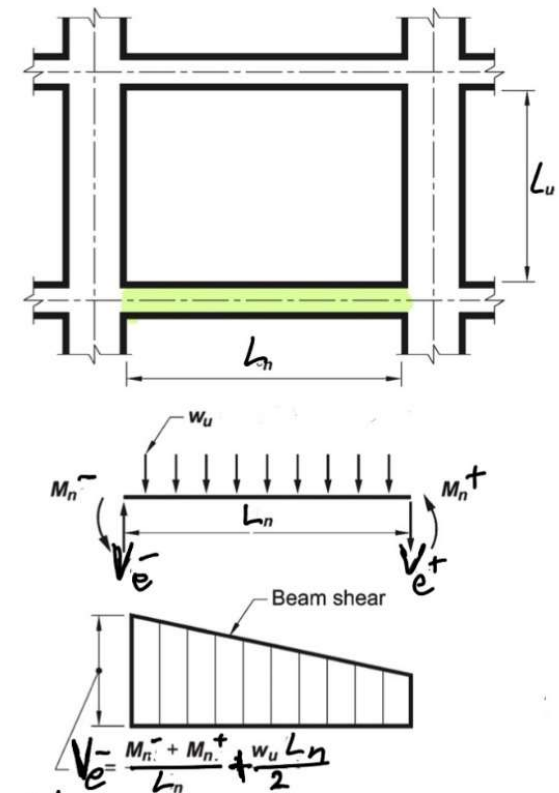
1. Определить момент сопротивления на каждом конце балки

Определить нормативный (n) момент сопротивления:

$$M_n = M_{ult}$$

M_{ult} можно рассчитать согласно СН КР 52-02:2022 или СП 63.13330.2018 [Н.; подраздел 8.1.9], однако $R_b = R_{bn}$ и $R_s = R_{sn}$.

Важно: учитывать положительный **нормативный момент сопротивления** M_n^+ [для нижней растянутой арматуры] и отрицательный **нормативный момент сопротивления** M_n^- [для верхней растянутой арматуры].



Цель 2 СТУ: Поведение ЖБ балок следует контролировать прочностью на изгиб – процедура расчета

Для целей расчета, предполагается, что на каждом конце [балки] действует максимально возможный момент M_{pr} [«пластический момент»], следовательно:

$$M_{pr} = 1.25 \times M_n$$

Момент M_{pr} соответствует **предельному напряжению при растяжении** в стальной арматуре, равному 1.25 x пределу текучести.

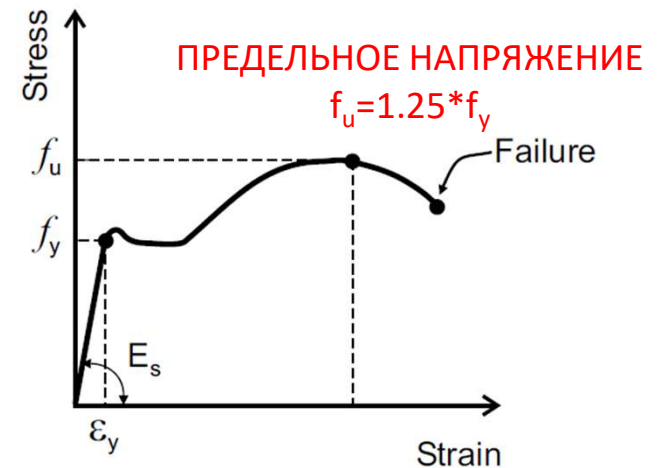


ДИАГРАММА НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ АРМАТУРЫ

Концепция сопротивления изгибающему моменту [за счет пластического шарнира] и подход расчета максимальной фактической несущей способности (Capacity Design) железобетонных колонн

Расчет значения M_{pr} и M_n

M_{pr} = сопротивление **изгибающему моменту** в ж/б колонне [который вызывает образование пластического шарнира]

M_n = сопротивление **предельному изгибающему моменту** в ж/б колонне

$$M_{pr} = 1.25 M_n$$

Расчитать M_n можно согласно СН КР 52-02:2022 или СП 63.13330.2012 (Н: п.п. 8.1.9.)

R_b и R_s необходимо рассчитывать следующим образом

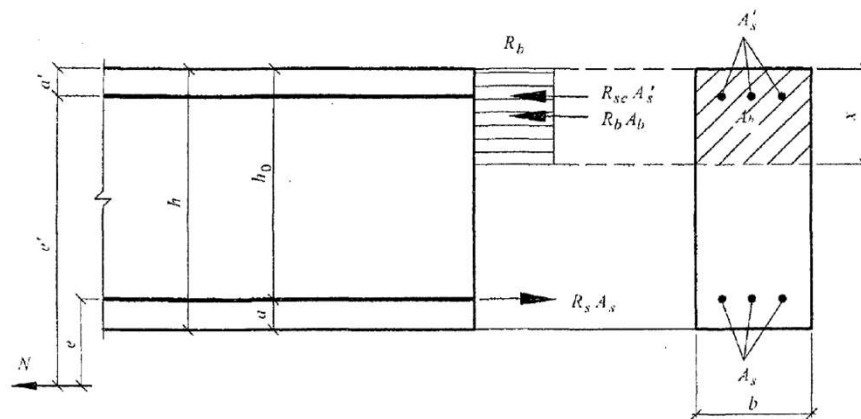
$$R_s = \frac{R_{s,n}}{\gamma_s}, \quad (6.10) \quad \text{но } \gamma_s = 1.0 \Rightarrow R_s = R_{s,n}$$

$$R_b = \frac{R_{b,n}}{\gamma_b}; \quad (6.1) \quad \text{но } \gamma_b = 1.0 \Rightarrow R_b = R_{b,n}$$

б) если продольная сила N приложена за пределами расстояния между равнодействующими усилий в арматуре S и S' (рисунок 8.4, б) - из условия (8.20), определяя предельный момент M_{ult} по формуле

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5x) + R_{sc} \cdot A'_s (h_0 - a'), \quad (8.24)$$

$$M_n = M_{ult}$$



Цель 2 СТУ: Поведение ЖБ балок следует контролировать прочностью на изгиб – процедура расчета

2. Определить **расчетную поперечную силу** V_e соответствующую **пластическому моменту** $M_{pr} = 1.25 \times M_n$ на каждом конце балки:

$$V_e = 1.25(M_n^+ + M_n^-)/L_n \pm w_u \times L_n/2$$

где W_u = учтенная **вертикальная нагрузка** на балку, обусловленная постоянной и **временной / кратковременной нагрузкой** – применяются **коэффициенты нагрузки** в соответствии с местными нормами проектирования [коэффициенты нагрузки в соответствии с СТУ можно не применять]

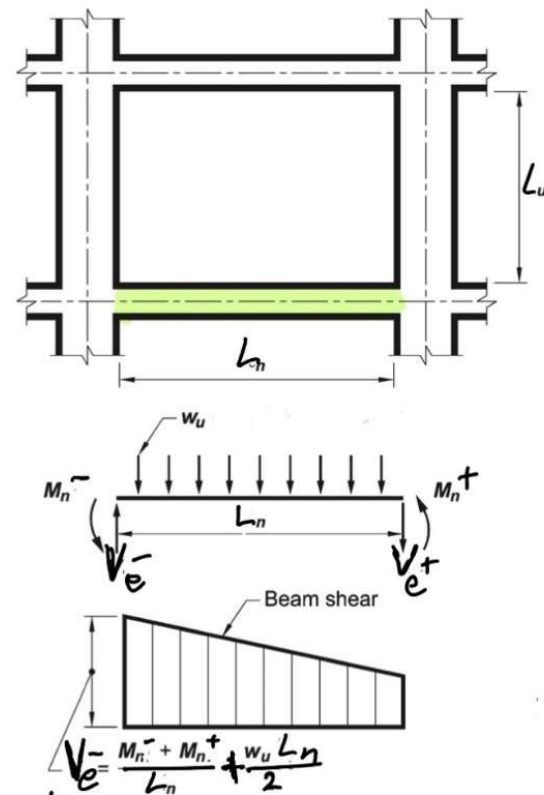
L_n = **размер пролета балки в свету** [между колоннами]

3. **Расчетное поперечное армирование в балке для сопротивления поперечной силе** V_e .

$$\text{Цель: } V_e < Q_{ult} = Q_b + Q_{sw}$$

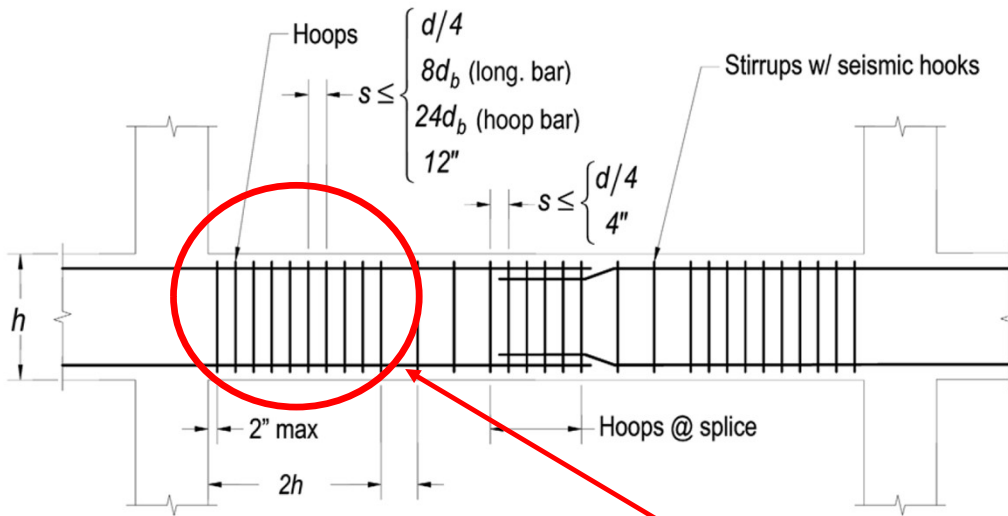
Q_b и Q_{sw} рассчитываются согласно СН КР 52-02:2022 или СП 63.13330.2018 – Н: подраздел 8.1.33.

Q_b можно рассчитать по формуле (8.57) и Q_{sw} по формуле (8.58).

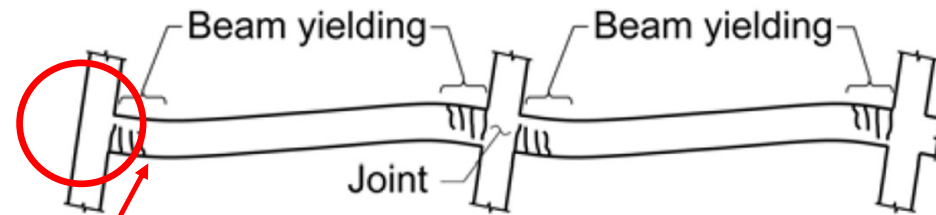
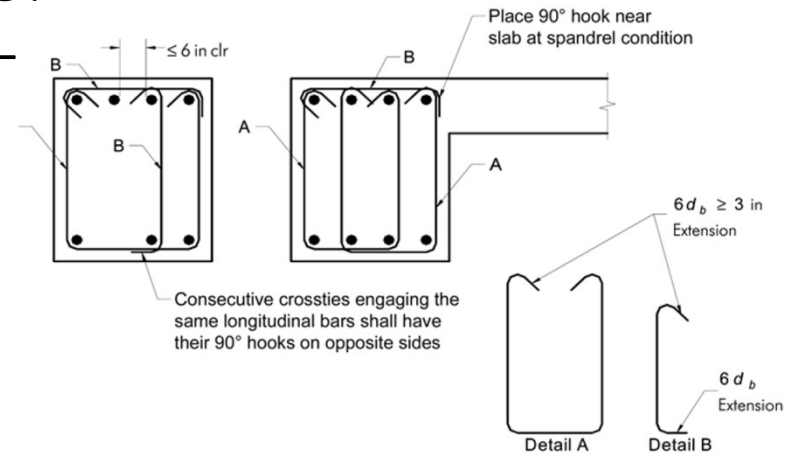


Цель 2 СТУ: Поведение ЖБ балок следует контролировать прочностью на изгиб – поперечное армирование

Очень важно – вид и распределение хомутов в ж/б ригелях!



ПЛАСТИЧЕСКИЙ ШАРНИР



Пример из норм по бетону США ACI 318
Источник: NIST GCR 8-917-1

Цель 3 СТУ: Поведение ЖБ колонн следует контролировать прочностью на изгиб [3.2.2.3; 3.2.2.6]

Целью проверки является **предотвращение разрушения ЖБ колонн в податливых каркасных системах при срезе**. Проверка особенно важна, поскольку колонны являются основными вертикальными элементами **ЖБ каркасной системы** и **сопротивляются воздействиям** как вертикальной, так и горизонтальной нагрузок от сейсмических воздействий.

Если прочность колонны РС на срез меньше, чем прочность колонны на изгиб, может произойти хрупкое разрушение на срез, и колонна может разрушиться при землетрясении.

Разрушение ЖБ колонн при срезе часто встречается в **ЖБ каркасных** старых зданиях [постройках], которые не были спроектированы в соответствии с современными **нормами проектирования по сейсмостойкому строительству**.

Цель 3 СТУ: Поведение ЖБ колонн следует контролировать прочностью на изгиб [3.2.2.3; 3.2.2.6]



Разрушение **ЖБ** колонны каркасного здания **из-за среза** в результате землетрясения в Горкхе, Непал, в 2015 году.



Обрушение **ЖБ** каркасного здания с недостаточным поперечным армированием колонн (землетрясение в Непале в 2015 г.)

Цель 3 СТУ: Поведение ЖБ колонн следует контролировать прочностью на изгиб [3.2.2.3; 3.2.2.6]

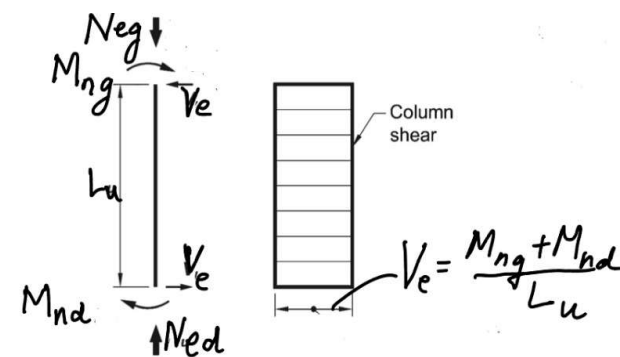
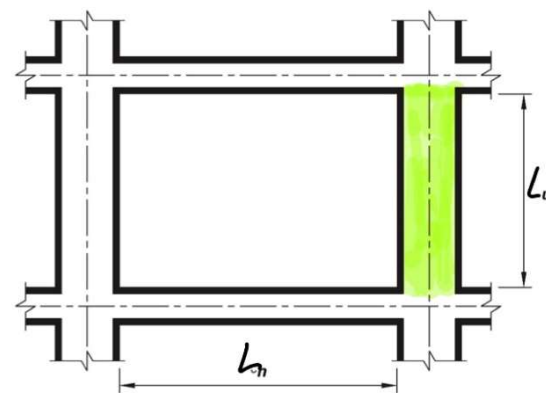
Хрупкое разрушение ЖБ колонн при срезе можно предотвратить, если соблюдать следующие требования:

- 1) Колонны способны сопротивляться внутренним усилиям [поперечной и продольной силе, изгибающему моменту], возникающим из-за сейсмической нагрузки;
- 2) Колонны обладают достаточным сопротивлением срезу, которое превышает поперечную силу, связанную с сопротивлением изгибу на концах колонны [*подход Capacity Design*].
- 3) Колонны должны иметь возможность образовывать пластические шарниры на концах. Пластические шарниры подвергаются сильным деформациям (кручениям) и повреждениям [трещинообразованию бетона и деформации арматуры].
- 4) Конструирование арматуры в ЖБ колоннах очень важна. Для обеспечения достаточного сопротивления срезу, необходимо достаточное количество и шаг между хомутами. Хомуты должны иметь сгибы под углом 135 градусов в местах, где предполагается наличие пластических шарниров.

Цель 3 СТУ: Поведение ЖБ колонн следует контролировать прочностью на изгиб [3.2.2.3; 3.2.2.6]

Ожидается, что сейсмическое поведение ЖБ колонны будет определяться изгибом, когда **расчетная поперечная сила** (V_e) определяется из диаграммы свободного тела, полученной путем разрезания концов колонны, при этом моменты на концах предполагается принимать равными пластическим моментам сопротивления, действующим при изгибе обратной кривизны, как по часовой стрелке, так и против часовой стрелки.

Расчетная поперечная сила определяется на основе подхода «Capacity Design», не зависит от **стандартного расчета на сейсмические воздействия** [например: расчет и анализ в ПК ЛИРА].



Цель 3 СТУ: Поведение ЖБ колонн следует контролировать прочностью на изгиб – процедура расчета

1. Определить **нормативный изгибающий момент на каждом конце колонны** – для конкретного этажа

Определить нормативный (n) момента

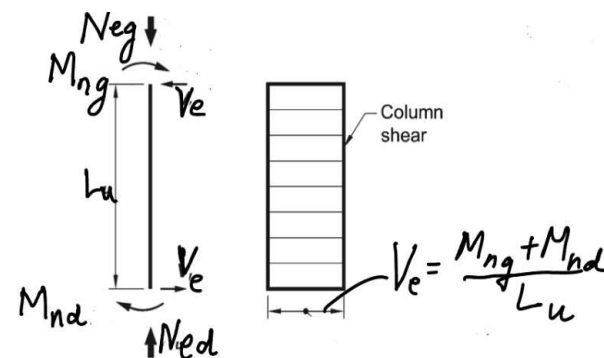
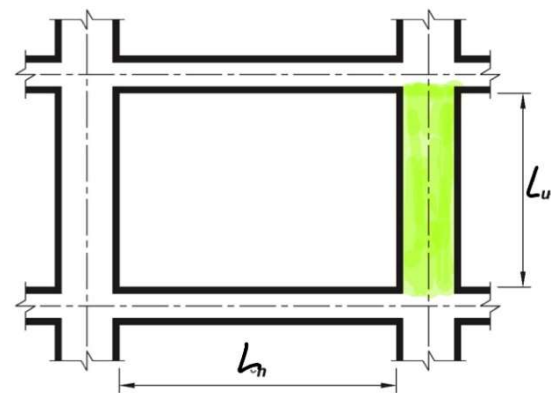
$$M_n = M_{ult}$$

Важно:

Предельный изгибающий момент M_{ult} рассчитывается согласно СН КР 52-02:2022 или СП 63.13330.2018, при этом

$$R_b = R_{bn} \text{ и } R_s = R_{sn}$$

Учитывается – нормативный момент в верхней колонне M_{ng} и нормативный момент в нижней колонне M_{nd}



Цель 3 СТУ: Поведение ЖБ колонн следует контролировать прочностью на изгиб – процедура расчета

- Важно отметить, что **нормативные [изгибающие] моменты** (M_{ng} или M_{nd}) соответствуют **расчетным продольным силам** (N_{eg} или N_{ed}), которые получены из **стандартного расчета** (н.: ПК ЛИРА).

Значения **продольных сил** N_{eg} и N_{ed} подобраны соответствующими **наибольшему нормативному [изгибающему] моменту** в колонне.

Для целей расчета, предполагается, что на каждом конце колонны, действует **максимально возможный момент** M_{pr} [«пластический момент»], следовательно:

$$M_{pr} = 1.25 \times M_n$$

Момент M_{pr} соответствует **предельному напряжению при растяжении** в стальной арматуре, равному 1.25 x пределу текучести.

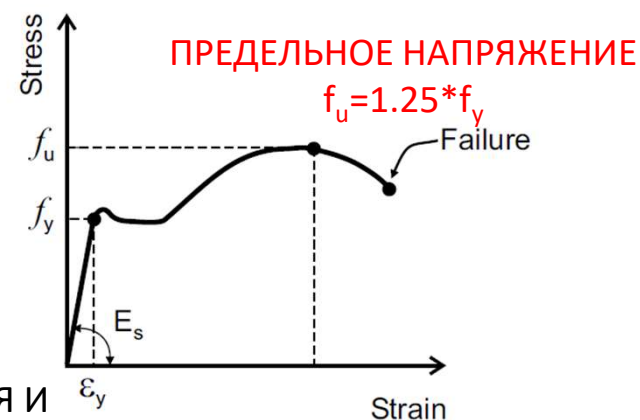
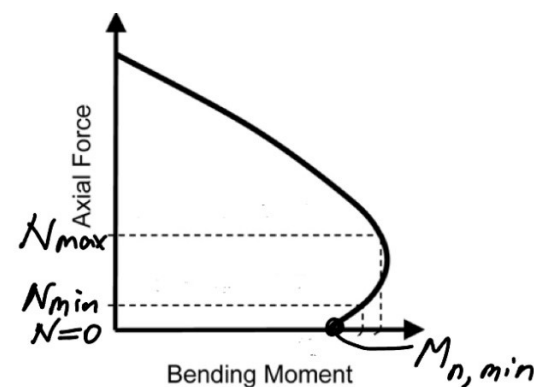


ДИАГРАММА НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ АРМАТУРЫ

Цель 3 СТУ: Поведение ЖБ колонн следует контролировать прочностью на изгиб – процедура расчета

2. Определить **расчетную поперечную силу** V_e соответствующую **пластическому моменту** $M_{pr}=1.25 \times M_n$ на каждом конце **колонны**:

$$V_e = 1.25(M_{ng} + M_{nd})/L_u$$

где

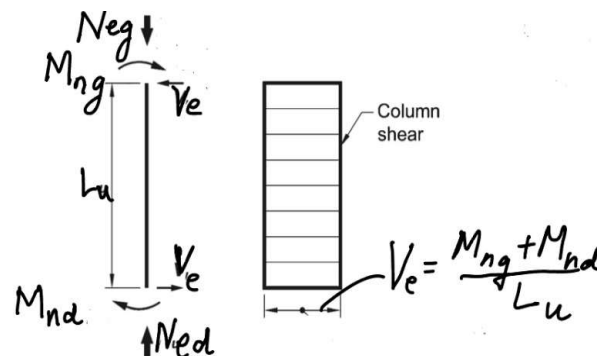
L_u = **размер пролета колонны в свету** [расстояние между соседними этажами]

3. **Расчетное поперечное армирование в колонне для сопротивления поперечной силе** V_e .

Цель: $V_e < Q_{ult} = Q_b + Q_{sw}$

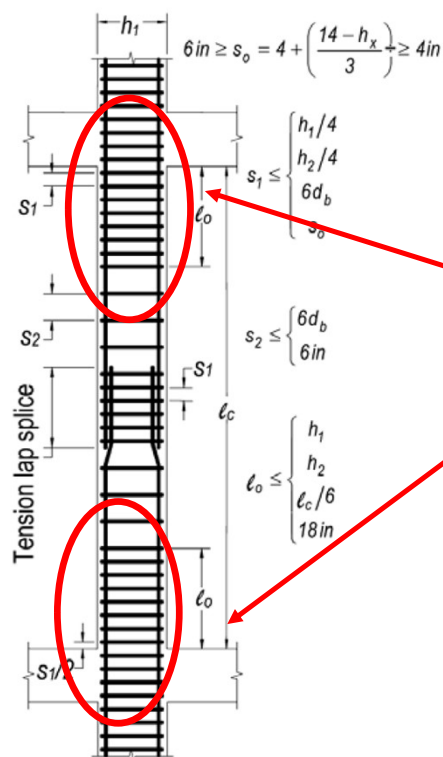
Q_b and Q_{sw} рассчитываются согласно СП 63.13330.2018 – н.: подраздел 8.1.33.

Q_b можно рассчитать по формуле (8.57) и Q_{sw} по формуле (8.58).

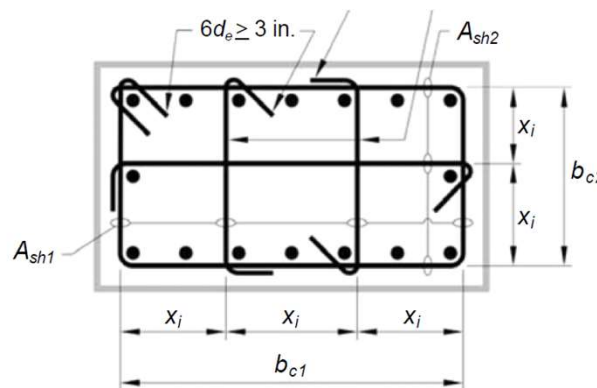


Цель 3 СТУ: Поведение ЖБ колонн следует контролировать прочностью на изгиб - армирование

Очень важно – вид и распределение хомутов в ж/б колоннах!



ПЛАСТИЧЕСКИЙ ШАРНИР



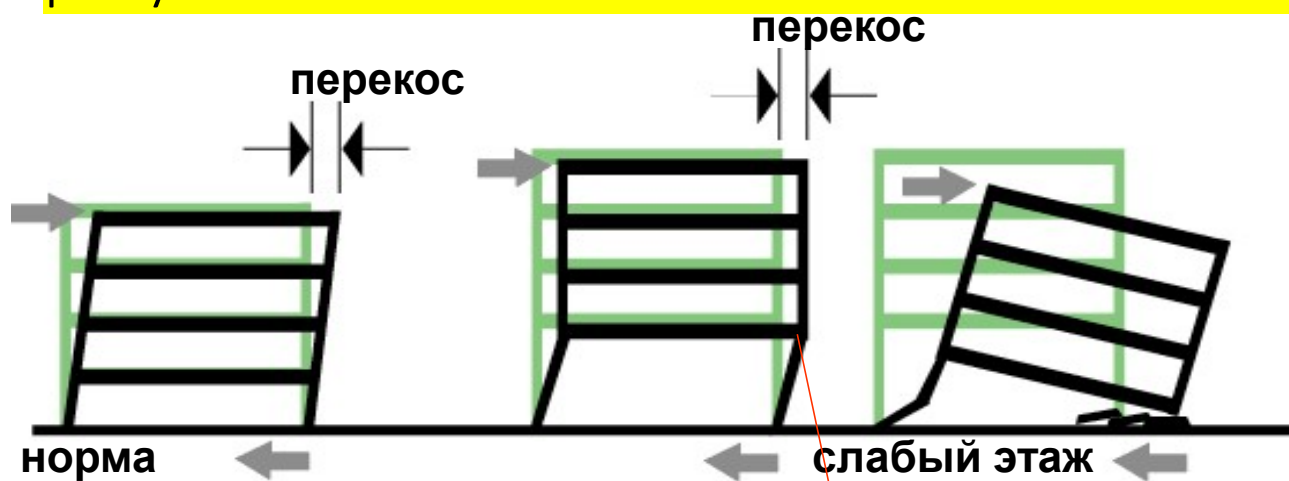
Пример из норм по бетону США ACI 318
Источник: NIST GCR 8-917-1

Цель 4 СТУ: Механизма слабого [гибкого] этажа следует избежать [3.2.2.1]

Согласно СТУ (3.2.2.1), механизм «слабого этажа» может возникнуть, когда **общая прочность на сдвиг** на уровне первого этажа **ЖБ каркасной системы** составляет менее 80% от **общей прочности на сдвиг** этажа непосредственно над уровнем первого этажа.

Чтобы избежать механизма слабого этажа, общая прочность на сдвиг на уровне первого этажа ЖБ каркаса следует обеспечить более 80% от общей прочности на сдвиг этажа выше этого уровня.

Механизм слабого [гибкого] этажа =
результат механизма «сильная балка – слабая колонна»



перенапряжение

- Очевидно, что изгибная прочность колонн меньше изгибной прочности балок?
- Размер сечения колонны меньше высоты сечения балки?
- Если да, то может образоваться “этажный” механизм, требующий значительно меньше энергии для обрушения здания.

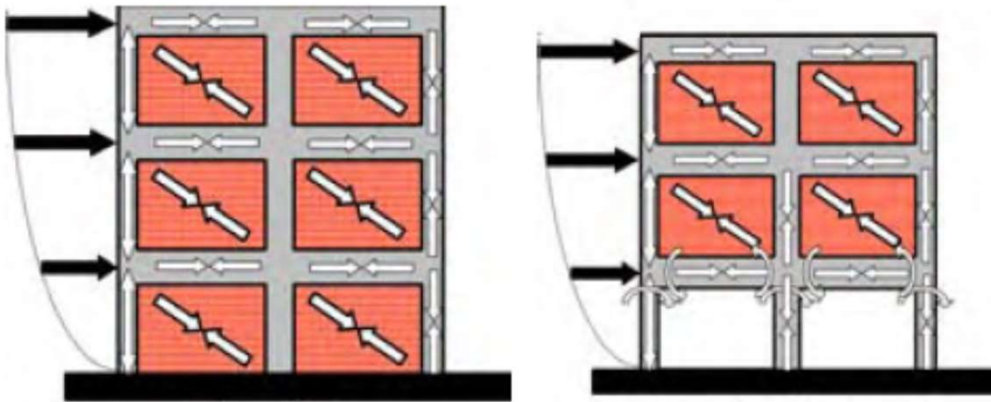
Цель 4 СТУ: Механизма слабого [гибкого] этажа следует избежать [3.2.2.1]

Механизм «слабого этажа» часто встречается в **зданиях с ЖБ каркасной системой**, подвергшихся недавним землетрясениям в мире (Непал, 2015 г., Албания, 2019 г., Турция, 2023 г. и т. д.).



Пример обрушившегося школьного здания в Непале при землетрясении 2015 года [обрушение слабого этажа]

Цель 4 СТУ: Механизма слабого [гибкого] этажа следует избежать [3.2.2.1]



Здания из ЖБ каркасной системы с открытыми пространствами на первом этаже склонны к разрушению «слабого этажа».



До землетрясений в Турции в феврале 2023 г.



После землетрясения

Источник: SUZI-SAEE

Цель 4 СТУ: Механизма слабого [гибкого] этажа следует избежать – процедура расчета

1. Необходимо **рассчитать прочность этажа на сдвиг**, рассчитываемую как **сумму сопротивлений срезу для всех колонн** на уровне первого этажа (ΣQ_{c1}). **Сопротивление срезу** получено в соответствии с процедурой расчета для достижения **поведения ЖБ колонн при изгибе** [по цели 3 СТУ].

Поскольку **сопротивление срезу ЖБ колонн с пластическим поведением** связано с их **предельным изгибающим моментом**, то **общая прочность этажа на сдвиг** может быть определена на основе **предельных изгибающих моментов отдельных колонн**.

Цель 4 СТУ: Механизма слабого [гибкого] этажа следует избежать – процедура расчета

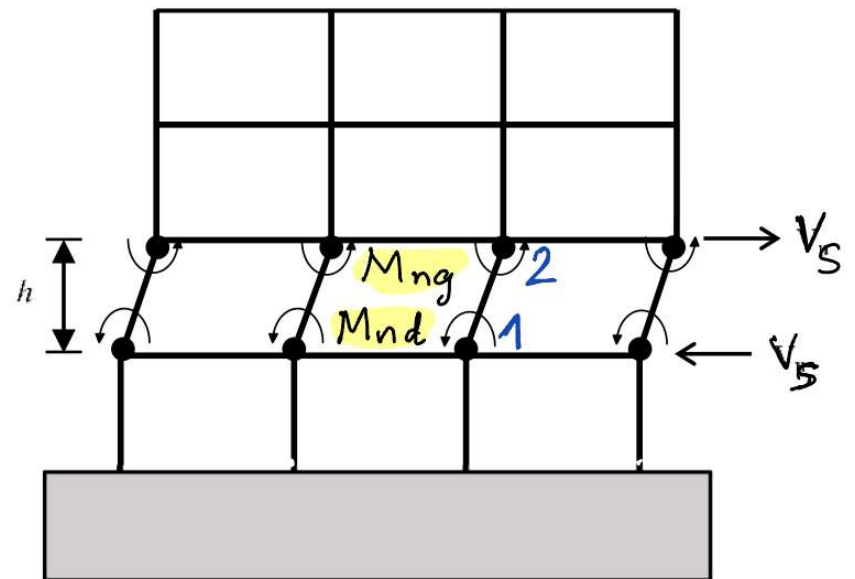
Прочность этажа на сдвиг (V_S) может
быть рассчитана следующим способом:

$$V_S = \frac{2}{h} \sum M_n$$

Где

h = высота этажа

M_n = нормативный [изгибающий] момент
для колонны, определенный на
основании процедуры, показанной для
цели 3 СТУ.



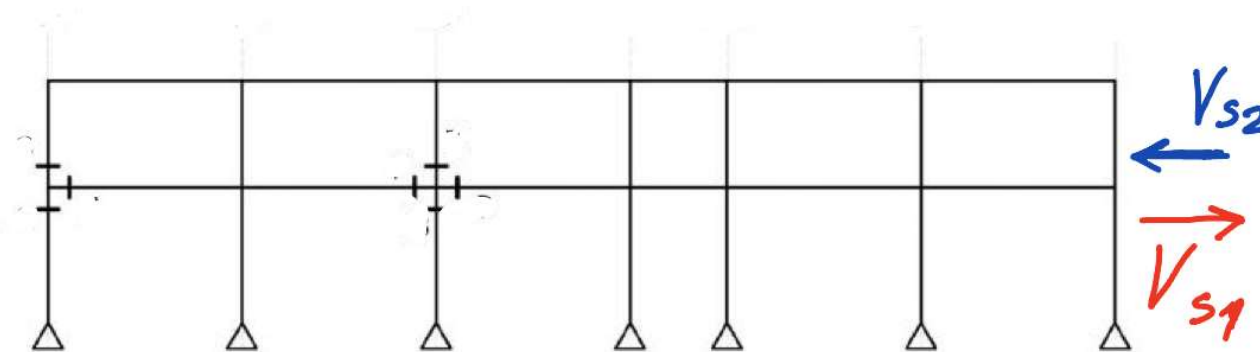
Цель 4 СТУ: Механизма слабого [гибкого] этажа следует избежать – процедура расчета

2. Таким же образом, необходимо рассчитать **сумму сопротивлений срезу для всех колонн** верхнего этажа (V_{S2}).

3. Требуется, чтобы

$$V_{S2} \geq 0.8 * V_{S1}$$

Для того чтобы избежать механизма «слабого этажа».



Полезные ссылки

1. **NIST GCR 8-917-1 (2008)**. Проектирование специальных сейсмостойких жестких железобетонных каркасных зданий: Руководство для практикующих инженеров, Джек Мёле, Джон Хупер и Крис Любке

<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/gcr/2016/NIST.GCR.16-917-40.pdf>

2. Оценка сейсмостойкости железобетонных зданий старой постройки по потенциальному разрушению несущих конструкций, **FEMA P-2018**

https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_seismic-eval-older-concrete-buildings_p-2018.pdf

3. Светлана Бржев и Улугбек Бегалиев (2018). **Практическое пособие** по проектированию и конструированию сейсмоусиления зданий школ в Кыргызской Республике. Всемирный банк, Вашингтон, США.

Спасибо за
ваше внимание!

