АНАЛИЗ СРАВНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПО СНИП 2.03.01-1984, СП 63.133330.2012, ЕВРОКОД 2

ANALYSIS OF COMPARISON OF CALCULATION RESULTS ACCORDING TO SNIP 2.03.01-1984, SP 63.133330.2012, EUROCODE 2

УДК 624

Баскаков Кирилл Олегович, *1-СУЗС-5.* Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 5ый курс, Санкт-Петербург

Kirill Baskakov, baskakov_kirill@mail.ru

Аннотация

В практике проектирования встречаются различные задачи, в том числе связанные с адаптацией зарубежных проектов, под нормативную базу иной страны. Кроме того, нормативная база в стране пребывания может изменяться. Например, некоторые страны СНГ перешли от СНиПов к Еврокодам. Поэтому современному проектировщику необходимо уметь проводить расчеты независимо от того, каким нормативным документам они должны они соответствовать.

Annotation

In design practice, various tasks are encountered, including those related to the adaptation of foreign projects to the regulatory framework of another country. In addition, the regulatory framework in the host country is subject to change. For example, some CIS countries have switched from SNiPs to Eurocodes. Therefore, a modern designer must be able to carry out calculations regardless of what regulatory documents they must comply with.

Ключевые слова: расчет на продавливание, СНИП 2.03.01-1984, СП 63.133330.2012, ЕВРОКОД 2, конструкция.

Key words: bursting calculation, SNIP 2.03.01-1984, SP 63.133330.2012, EUROCOD 2, construction.

Расчет на продавливание, что это?

Любую плитную конструкцию (плиту перекрытия, фундаментную плиту или плитный ростверк) при наличии сосредоточенной силы необходимо проверять на продавливание. Причем, сосредоточенной силой может выступать и наличие опоры (колонны или сваи), т.к. в данном месте нагрузка в плите концентрируется и стремится «продавить» плиту.

Обратите внимание, на продавливание проверяют только плитные конструкции. Балки (в том числе балочные ростверки) на продавливание считать не нужно.

В чем суть продавливания? Чем оно опасно?

Если на плиту давить сосредоточенная нагрузка, она пытается выдавить под собой участок плиты. Если прочностных характеристик бетона и толщины плиты достаточно, чтобы выдержать продавливающую силу, то конструкция выстоит. Иногда случается, что продавливающая сила превышает несущую способность плиты, тогда в работу включается поперечная арматура. Если и этого недостаточно, приходится увеличивать (иногда локально – в виде капителей под перекрытиями или банкеток над фундаментными плитами) толщину плиты.

Таким образом расчет на продавливание достаточно распространенный и встречается при проектировании почти любых зданий и сооружений и железобетонными несущими конструкциями.

Принцип сравнительного расчета.

В рамках данной работы постараемся провести сравнение расчетов и результатов расчетов на продавливание по трем различным методам. Описанным в: СП 63.133330.2012 (8.1.48), СНИП 2.03.01-1984 (3.42), Еврокод 2. Часть 1-1 (6.4.3).

(Для удобства далее в тексте СП, СНиП, Еврокод)

Следует отметить, что приведенные ниже расчеты, производятся не целью конструирования, а с целью максимально корректного сравнения результатов расчетов, произведенных по различным методикам. За результат расчета принимается коэффициент запаса прочности на продавливание.

Проверки по разным нормативам будем производить для одной и той же конструкции. Так как рекомендации к конструированию и расположению арматуры различаются в разных нормативах, примем конструкцию плиты согласно действующему СП 63.133330.2012.

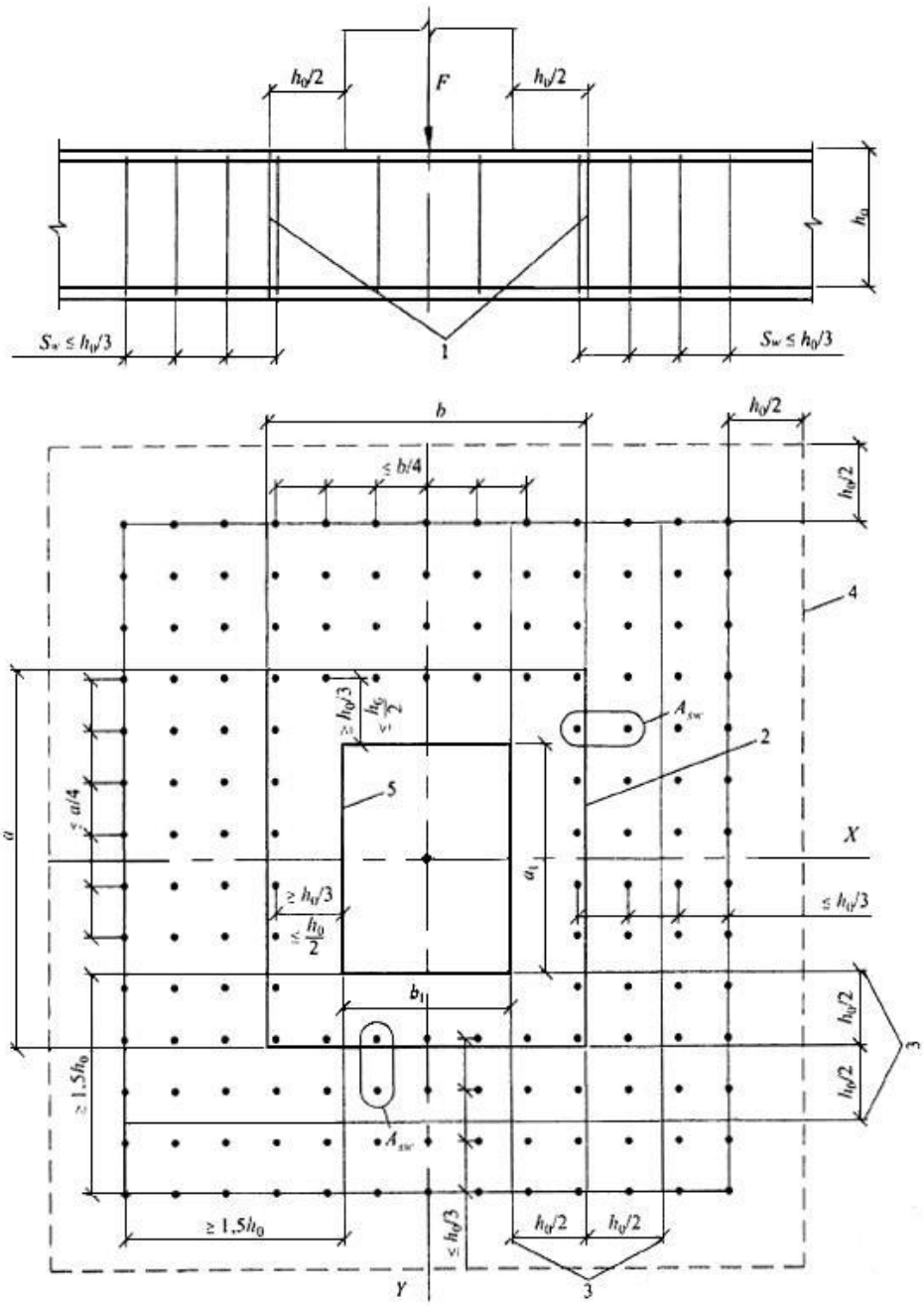

Рис. 1. Схема для расчета железобетонных плит с вертикальной равномерно распределенной поперечной арматурой на продавливание.

Где:

1 - расчетное поперечное сечение; 2 - контур расчетного поперечного сечения; 3 - границы зоны, в пределах которых в расчете учитывается поперечная арматура; 4 - контур расчетного поперечного сечения без учета в расчете поперечной арматуры; 5 - контур площадки приложения нагрузки.

Следует отметить, что во всех нормативах похожий учет различий пирамиды продавливания для средних, крайних и угловых колонн. Также похожий учет располагающихся в теле плиты отверстий, пересекающих пирамиду продавливания.

Кроме сопротивления железобетона продавливанию, в рамках данной работы, попытаемся проанализировать разницу в подходах учета поперечной арматуры в теле плиты. Расчет будем производить для плиты, без капителей, опертой на среднюю колонну, с учетом поперечной арматуры.

Для дальнейшего расчета принимаем следующую конструкцию: железобетонная плита с рабочей высотой сечения 200 мм (равна в обоих направлениях), с поперечной арматурой в виде хомутов диаметром 6 мм, установленных с шагом 110 мм. На плиту воздействует распределенная нагрузка от колонны квадратного сечения со стороной 0,5 м. К колонне приложена внешняя сила в 100 кН. Расчетная схема представлена на рис. 2.

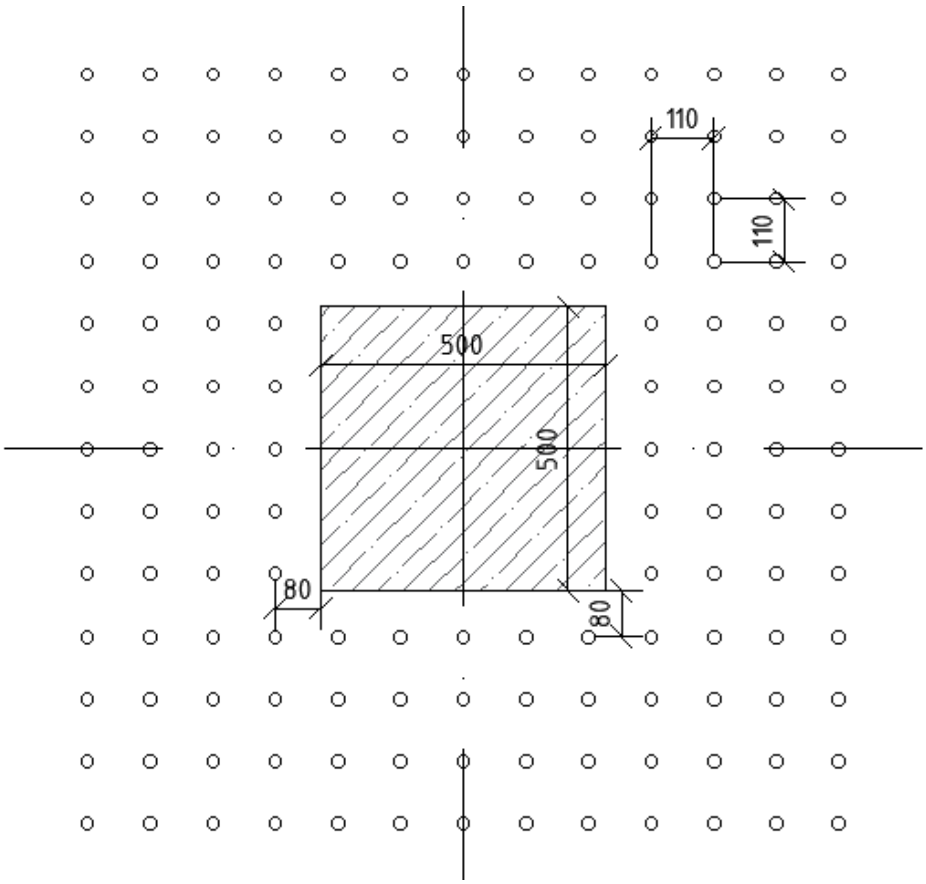

Рис. 2. Расчетная схема. Габариты колонны и расположение поперечной арматуры.

Для упрощения вычислений расчет производится в программном комплексе Mathcad 15.

Прочностные характеристики для бетона и арматуры принимаем единые для проверок по всем нормативам.

Ширина колонны $a := 0.5m$

Полезная толщина плиты $h0 := 0.2m$

Продольная сила на колонну $F := 100kN$

Материалы

Бетон $Rbt := 1.05MPa$

$Rb := 14.5MPa$

Арматура $Rsw := 300MPa$

Диаметр арматуры $dsw := 6mm$

$$As := \pi \left(\frac{dsw}{2} \right)^2 = 2.827 \times 10^{-5} m^2$$

Шаг арматуры $sw := 110mm$

Расчет по СП 63.133330.2012 (8.1.48)

Согласно СП проверку на продавливание производят из условия, что прикладываемая сосредоточенная сила не должна превышать усилие сопротивления из двух составляющих: усилие воспринимаемое железобетоном и усилие воспринимаемое арматурой.

8.1.48 Расчет элементов с поперечной арматурой на продавливание при действии сосредоточенной силы (рисунок 8.13) производят из условия

$$F \le F_{b,ult} + F_{sw,ult}, \quad (8.90)$$

где $F_{sw,ult}$ - предельное усилие, воспринимаемое поперечной арматурой при продавливании;

$F_{b,ult}$ - предельное усилие, воспринимаемое бетоном, определяемое согласно 8.1.47.

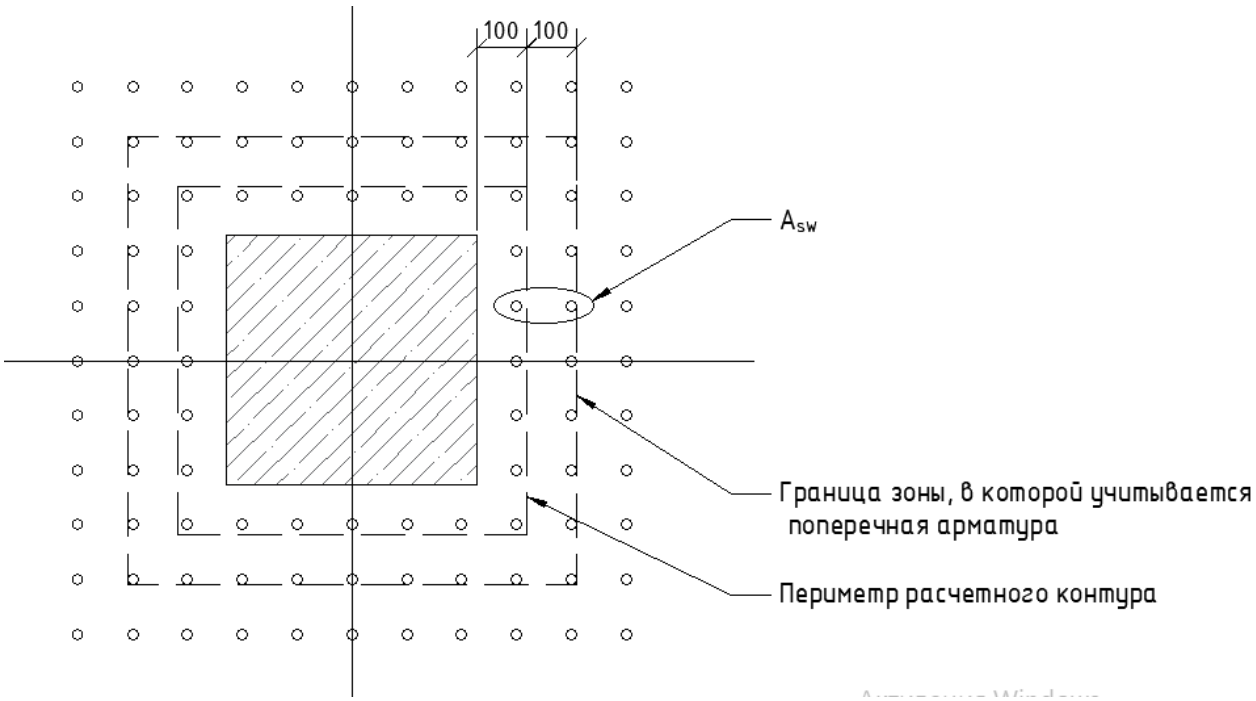

Рис. 3 Расчетная схема для расчета по СП.

Сначала найдем усилие, воспринимаемое бетоном.

Для этого найдем периметр контура расчетного поперечного сечения, который принимается на расстоянии $h_0/2$ от границы площади приложения нагрузки.

$$u := \left(a + \frac{2h0}{2}\right)4 = 2.8\,m$$

Площадь расчетного поперечного сечения:

$$Ab := u \cdot h0 = 0.56\,m^2$$

Усилие, воспринимаемое бетоном:

$$Fbult := Rbt \cdot Ab = 588 \cdot kN$$

Теперь найдем усилие, воспринимаемое поперечной арматурой.

Усилие в поперечной арматуре на единицу длины контура расчетного поперечного сечения.

$$qsw := \frac{Rsw \cdot Asw}{sw} = 154.224 \frac{1}{m} \cdot kN$$

Усилие, воспринимаемое поперечной арматурой:

$$Fswult := 0.8 \cdot qsw \cdot u = 345.461 \cdot kN$$

Усилие воспринимаемое поперечной арматурой должно учитывается, если оно превышает 25% от усилия воспринимаемого бетоном, произведем проверку.

$$\frac{Fswult}{Fbult} = 0.588$$ Если больше 0.25 то учитываем

Проверка пройдена.

Следует отметить, что для дальнейшего анализа различных подходов, будем сравнивать результаты расчета с учетом действия поперечной арматуры, так и без нее. Для этого выведем два коэффициента запаса.

Коэффициент запаса, с учетом поперечной арматуры:

$$\frac{Fbult + Fswult}{F} = 9.335$$

Коэффициент запаса, без учета поперечной арматуры:

$$\frac{Fbult}{F} = 5.88$$

Расчет по СНиП 2.03.01-1984 (3.42)

Логика расчета, почти такая же как и в СП. Прикладываемая сосредоточенная сила не должна превышать сумму усилий, воспринимаемых бетоном и поперечной арматурой, согласно следующему неравенству:

$$F \le F_b + 0{,}8 F_{sw},$$

Но усилия, воспринимаемые двумя материалами, вычисляются иначе.

В СНиП учитывается более приближенный в реальному механизм разрушения при продавливании. Предполагается, что продавливание происходит по боковой поверхности пирамиды, меньшим основанием которой служит площадь действия продавливающей силы, а боковые грани наклонены под углом 45° к горизонтали

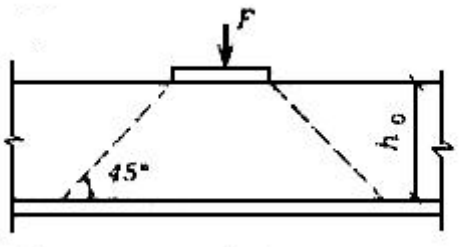

Рис. 4 Схемы для расчета железобетонных элементов на продавливание (СНиП 3.42)

За периметр расчетного контура принимается среднеарифметическое значений периметров верхнего и нижнего оснований пирамиды, образующейся при продавливании в пределах рабочей высоты сечения.

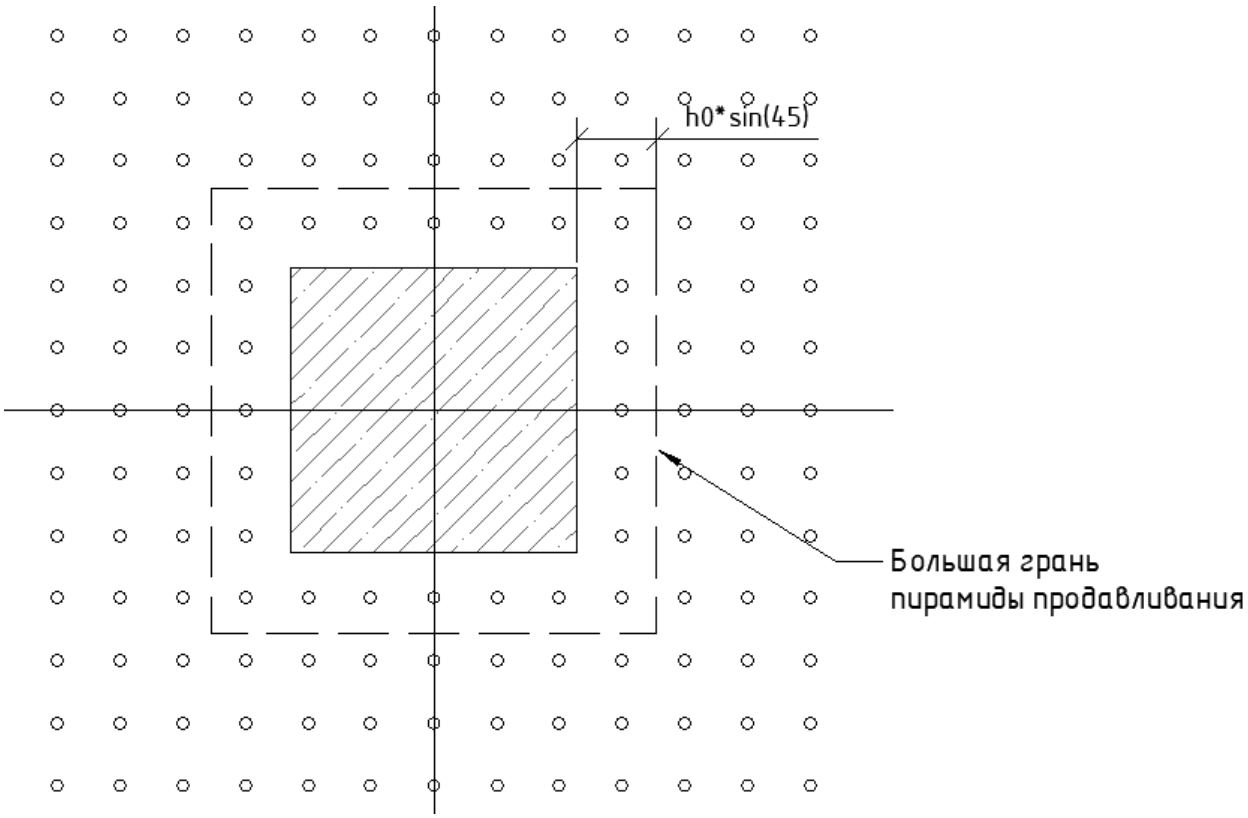

Рис. 5 Расчетная схема к расчету на продавливание по СНиП.

$$um := \frac{(4a) + \left[4\left(a + 2 \cdot h0 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)\right)\right]}{2} = 2.566\,m$$

Также в методике, излагаемой в СНиП, при выражении усилия воспринимаемого бетоном, учитывается структура бетона, через коэффициент α.

α - коэффициент, принимаемый равным для бетона:

тяжелого. 1,00

мелкозернистого. 0,85

легкого. 0,80

Усилие, воспринимаемое бетоном:

$$Fb := \alpha \cdot Rbt \cdot um \cdot h0 = 538.794 \cdot kN$$

Усилие, воспринимаемое поперечной арматурой, считается как сумма расчетных сопротивлений всех хомутов, пересекающих пирамиду продавливания.

$$Fsw := 24 \cdot Rsw \cdot As = 2.036 \times 10^5\,N$$

Усилие, воспринимаемое поперечной арматурой, должно учитываться, если оно превышает 50% от усилия, воспринимаемого бетоном.

$$\frac{Fsw}{Fb} = 0.378$$ Если больше 0.5 то учитываем

Проверка не пройдена, согласно СНиП, мы не должны учитывать поперечную арматуру в этом расчете. Но для анализа влияния действия арматуры на общую прочность на продавливание по данной методике и сравнения с другими методами мы учтем F_{sw}.

Коэффициент запаса, с учетом поперечной арматуры:

$$\frac{Fb + 0.8 \cdot Fsw}{F} = 7.017$$

Коэффициент запаса, без учета поперечной арматуры:

$$\frac{Fb}{F} = 5.388$$

Расчет по Еврокод 2. Часть 1-1 (6.4.3)

Методика, излагаемая в Еврокоде 2, совмещает в себе не только проверки, но и рекомендации к конструированию.

Расчет проводится в несколько этапов:

1. Производится проверка по контуру колонны.
2. Производится проверка по расчетному контуру
3. И если первые две проверки не выполняются, необходимо добавлять поперечную арматуру и производить расчет вновь.

(a) Вдоль периметра колонны или периметра площади приложения нагрузки максимальное напряжение от продавливания не должно быть превышено:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,max}.$$

(b) Поперечная арматура из условия продавливания не требуется, если

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,c}.$$

(c) Если значение v_{Ed} превышают $v_{Rd,c}$ для рассматриваемого контрольного сечения, необходимо предусмотреть поперечную арматуру от продавливания согласно 6.4.5.

В данной работе мы проведем все необходимые проверки, для сравнения коэффициентов запаса с другими методами.

Важным отличием методики из Еврокода 2, от методик, описанных в СП и СНиП, является то, что сравниваются не усилия, а касательные напряжения в контрольных сечениях.

Рассчитаем сопротивление продавливанию без учета арматуры:

(1) Сопротивление плиты продавливанию следует определять для основного контрольного сечения согласно 6.4.2. Расчетное значение сопротивления продавливанию, МПа, может определяться следующим образом:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k \cdot (100\rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \geq v_{min} + k_1 \sigma_{cp}, \quad (6.47)$$

где f_{ck} — в МПа;

$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2{,}0$,

здесь d — в мм;

$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz}} \leq 0{,}02$;

здесь ρ_{ly}, ρ_{lz} — коэффициенты армирования растянутой стали, имеющей сцепление с бетоном, в направлении x и y соответственно. Значения ρ_{ly} и ρ_{lz}, как правило, следует рассчитывать как средние значения, принимая в расчет ширину плиты, равную ширине колонны плюс $3d$ в каждую сторону;

Примечание — Значения $C_{Rd,c}$, v_{min} и k_1 могут быть указаны в национальном приложении. Рекомендуемые значения: для $C_{Rd,c}$ — $0{,}18/\gamma_C$, для v_{min} — выражены формулой (6.3N), для k_1 — 0,1.

В вышеописанной формуле σ_{cp} вводится для учета продольных усилий, действующих в плите, считаем, что они равны нулю.

Приступим к расчету:

Так как в Еврокоде принимается цилиндрическая прочность на сжатие, примем корректировку, что цилиндрическая прочность составляет 0,85 от кубиковой прочности.

$$fck := 0.85 \cdot Rb = 12.325 \cdot MPa$$

$$k1 := 0.1$$

Коэффициент запаса по материалу γ_c принимаем по Таблице 2.1N:

$$\gamma c := 1.5$$

$$Crdc := \frac{0.18}{\gamma c} = 0.12$$

Еще важное отличие Еврокода от СП или СНиПа заключается в том, что в Еврокоде учитывается влияние продольной арматуры на прочность на продавливание. Так как оно не учитывалось в предыдущих расчетах, здесь условно принимаем коэффициент армирования 0,02.

$$\rho 1 := 0.02$$

$$d := h0 = 0.2\,m$$

$$k := 1 + \left(\frac{200}{200}\right)^{0.5} = 2$$

Обращаем внимание на то, что в Еврокоде зачастую используются некоторые эмпирические зависимости. Расчеты по таким зависимостям нельзя производить функционально, только численно, используя указанные единицы измерения.

Сопротивление плиты продавливанию без учета поперечной арматуры:

$$VRdc := Crdc \cdot k \cdot \left[(100 \cdot \rho 1 \cdot fck)^{\left(\frac{1}{3}\right)}\right]$$

$$VRdc := 0.12 \cdot 2 \cdot \left[(100 \cdot 0.02 \cdot 12.325)^{\frac{1}{3}}\right] = 0.698$$

$$VRdc := 0.698MPa$$

Игнорируем то, что по расчету не требуется введение поперечной арматуры и продолжаем расчет. Рассчитываем сопротивление продавливанию с учетом поперечной арматуры.

6.4.5 Сопротивление продавливанию плит или фундаментов колонн с поперечной арматурой

(1) Если требуется поперечная арматура, то ее следует рассчитывать по формуле

$$v_{Rd,cs} = 0{,}75 v_{Rd,c} + 1{,}5 \cdot \frac{d}{s_r} A_{sw} f_{ywd,ef} \cdot \frac{1}{u_1 \cdot d} \cdot \sin\alpha, \qquad (6.52)$$

где A_{sw} — площадь сечения поперечной арматуры одного периметра вокруг колонны, мм^2;
s_r — радиальное расстояние между периметрами поперечной арматуры, мм;
$f_{ywd,ef}$ — эффективное расчетное значение сопротивления поперечной арматуры согласно $f_{ywd,ef} = 250 + 0{,}25d \le f_{ywd}$, МПа;
u_1 — в мм;
d — среднее значение полезной (рабочей) высоты в ортогональных направлениях, мм;
α — угол между поперечной арматурой и плоскостью плиты.

При одном единственном ряде выгнутых стержней для отношения d/s_r в формуле (6.52) используется значение 0,67.

Контрольный периметр u1 находим графически, согласно рис. 6.13 (Еврокод).

Обратим внимание, что контрольный периметр имеет закругленные углы, в отличии от пирамиды продавливания, рассматриваемой в СНиП. Такая постановка задачи должна более реалистично демонстрировать протекание касательных напряжений в объеме плиты.

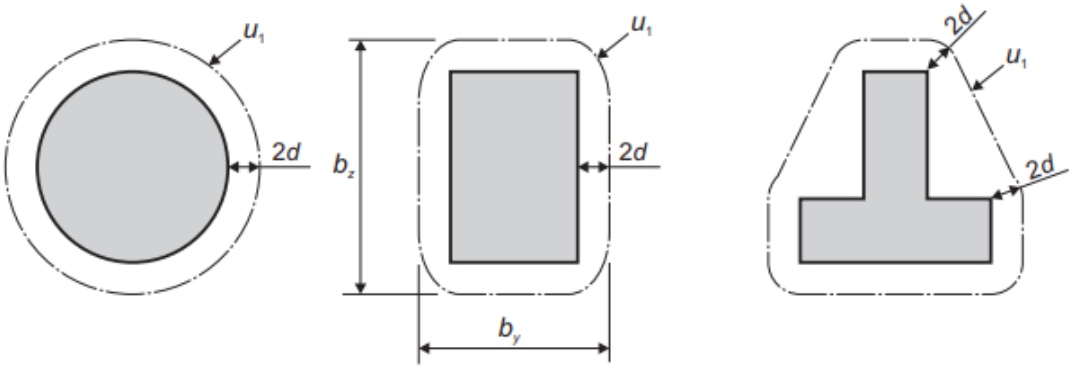

Рисунок 6.13 — Типичные основные контрольные периметры вокруг площадей приложения нагрузки

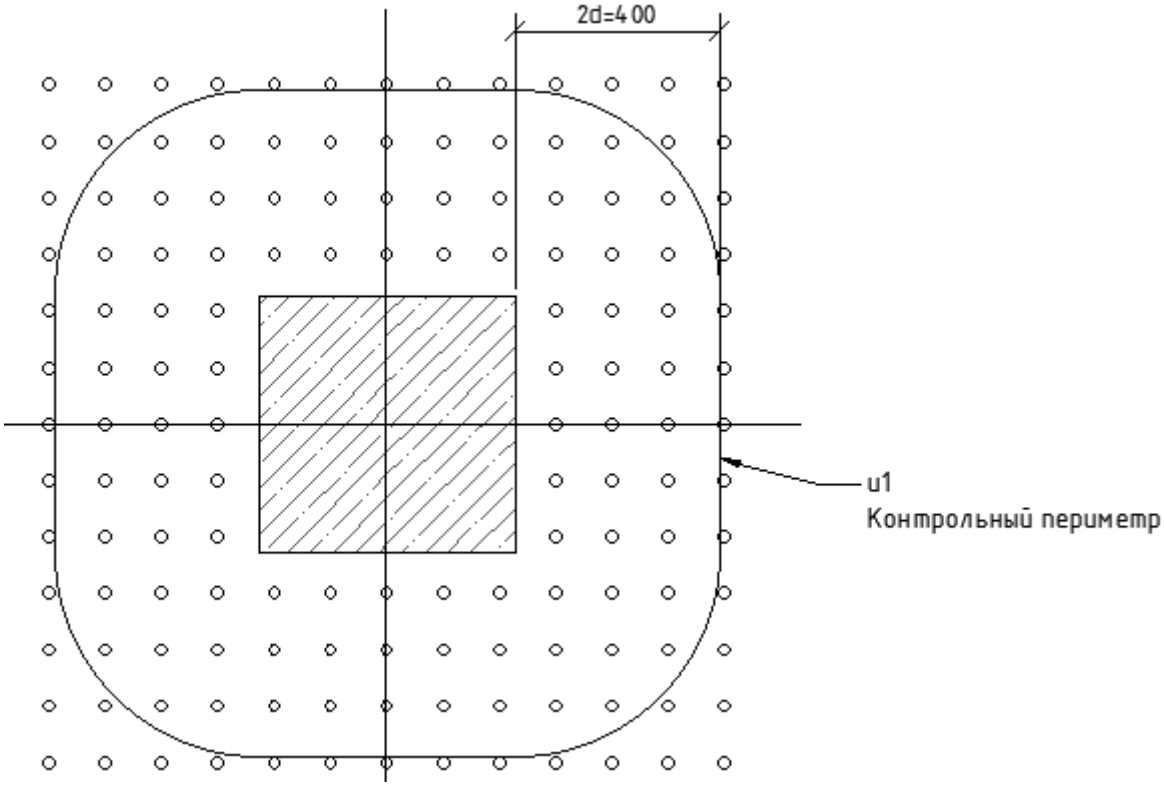

Рис. 6. Расчетная схема для расчета на продавливание по Еврокоду.

$$Asw := 24 \cdot As = 6.786 \times 10^{-4} \cdot m^2$$

$$sr := 110mm$$

$$fywd := Rsw = 300 \cdot MPa$$

$$u1 := 4.513m$$

$$\alpha := \frac{\pi}{2}$$

Сопротивление продавливанию плит или фундаментов колонн с поперечной арматурой:

$$VRdcs := 0.75 \cdot VRdc + 1.5 \cdot \frac{d \cdot Asw \cdot fywd \cdot \sin(\alpha)}{sr \cdot u1 \cdot d} = 1.139 \cdot MPa$$

Дополнительно проведем проверку по контуру колонны:

(3) Сопротивление продавливанию по грани колонны ограничено максимальным значением:

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_0 d} \le v_{Rd,max}, \qquad (6.53)$$

где u_0:

— для внутренней опоры — u_0 равно длине периметра колонны, мм;

— для краевой опоры — $u_0 = c_2 + 3d \le c_2 + 2c_1$, мм;

— для угловой опоры — $u_0 = 3d \le c_1 + c_2$, мм;

c_1, c_2 — размеры колонны, как показано на рисунке 6.20;

ν — см. формулу (6.6);

β — см. 6.4.3 (3), (4) и (5).

Примечание — Значение $v_{Rd,max}$ может быть указано в национальном приложении. Рекомендуемое значение — $0{,}5\nu f_{cd}$.

$$u0 := 4a = 2\,m$$

Для средней колонны:

$$\beta := 1.15$$

$$\nu = 0{,}6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \ (f_{ck} \text{ в МПа}). \qquad (6.6N)$$

$$\nu := 0.6\left[1 - \left(\frac{12.325}{250}\right)\right] = 5.704 \times 10^{-7}\,\frac{1}{\text{Pa}}\cdot\text{MPa}$$

$$\text{Vrdmax} := 0.5\cdot\nu\cdot\text{Rb} = 4.136\cdot\text{MPa}$$

$$\text{Ved2} := \beta\cdot\frac{F}{u0\cdot d} = 0.288\cdot\text{MPa}$$

Коэффициент запаса при расчете по контуру плиты:

$$\frac{\text{Vrdmax}}{\text{Ved2}} = 14.385$$

Коэффициент запаса при расчете по контрольному периметру, с учетом поперечной арматуры:

$$\text{Ved} := \frac{\beta\cdot F}{u1\cdot d} = 0.127\cdot\text{MPa}$$

$$\frac{\text{VRdcs}}{\text{Ved}} = 8.937$$

Коэффициент запаса при расчете по контрольному периметру, без учета поперечной арматуры:

$$\frac{\text{VRdc}}{\text{Ved}} = 5.478$$

Сравнительный анализ

Для удобного сравнения результатов расчетов по различным методикам сведем полученные значения в таблицу.

	СП	СНИП	Еврокод
Коэффициент запаса прочности на	5,88	5,388	5,478

продавливания без учета поперечной арматуры			
Коэффициент запаса прочности на продавливания с учетом поперечной арматуры	9,335	7,017	8,937
Влияние поперечной арматуры на общую прочность на продавливание. %	58,75%	30,23%	63,16%

Выводы

Как показывает сравнительный анализ трех различных методик. Точность расчета (минимальность коэффициента запаса) отличается незначительно. Следовательно, бессмысленно использовать различные методики для поиска наименее материалоемкого решения.

Удивительно, что влияние поперечной арматуры на общую прочность на продавливание по методам СНиП и Еврокода отличаются значительно. Несмотря на то, что принципы учета арматуры почти идентичны.

Также следует отметить, логичное заключение: более правильное описание механизма разрушения и трудоемкость расчета прямо пропорциональны. В СП расчетный контур принимается очень условно, в СНиП строится пирамида продавливания, что лучше соответствует течению касательных напряжений, а в Еврокоде расчетные периметр строится скругленным, что более реалистично описывает напряженное состояние материала. Также в Еврокоде в большом количестве используются различные эмпирические зависимости, которые вычислять можно только численно, что затрудняет автоматизацию расчета.

Следует добавить, что на практике проверки на продавливание часто выполняются с большими коэффициентами запаса, а объемы элементов, подвергающихся продавливанию, достаточно невелики. Следовательно, пытаться экономить материал на таких расчетах нерационально.

Единственный отличительная характеристика расчета, на которую рекомендуется обратить внимание, - трудоемкость расчета. В этом ключе наибольшее преимущество имеет метод по СП. В рамках данной работы примем этот метод оптимальным.

Список литературы:

1. СП 63.133330.2012 (8.1.48)
2. СНиП 2.03.01-1984 (3.42)
3. Еврокод 2. Часть 1-1 (6.4.3)
4. Пособие по расчету бетонных и железобетонных конструкций на ЭВМ. (к СП 63.13330.2012). Москва. 2013.
5. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 2: Проектирование железобетонных конструкций. Э.В. Биби, Р.С. Нараянан. МГСУ. Москва. 2013.
6. Железобетонные конструкции (Общий курс) Байков В.Н., Сигалов Э.Е. 1991.

List of references:

1. SP 63.133330.2012 (8.1.48)
2. SNiP 2.03.01-1984 (3.42)
3. Eurocode 2. Part 1-1 (6.4.3)
4. Manual for calculating concrete and reinforced concrete structures on a computer. (to SP 63.13330.2012). Moscow. 2013.
5. Guide for designers to Eurocode 2: Design of reinforced concrete structures. E. V. Bibi, R. S. Narayanan. EASC. Moscow. 2013.
6. Reinforced Concrete structures (General course) Baikov V. N., Sigalov E. E. 1991.