

# Исследование механизма продавливания железобетонных конструкций

Докладчик: Пекин Д.А., главный конструктор, к.т.н.

www: <http://inv-stroy.ru>

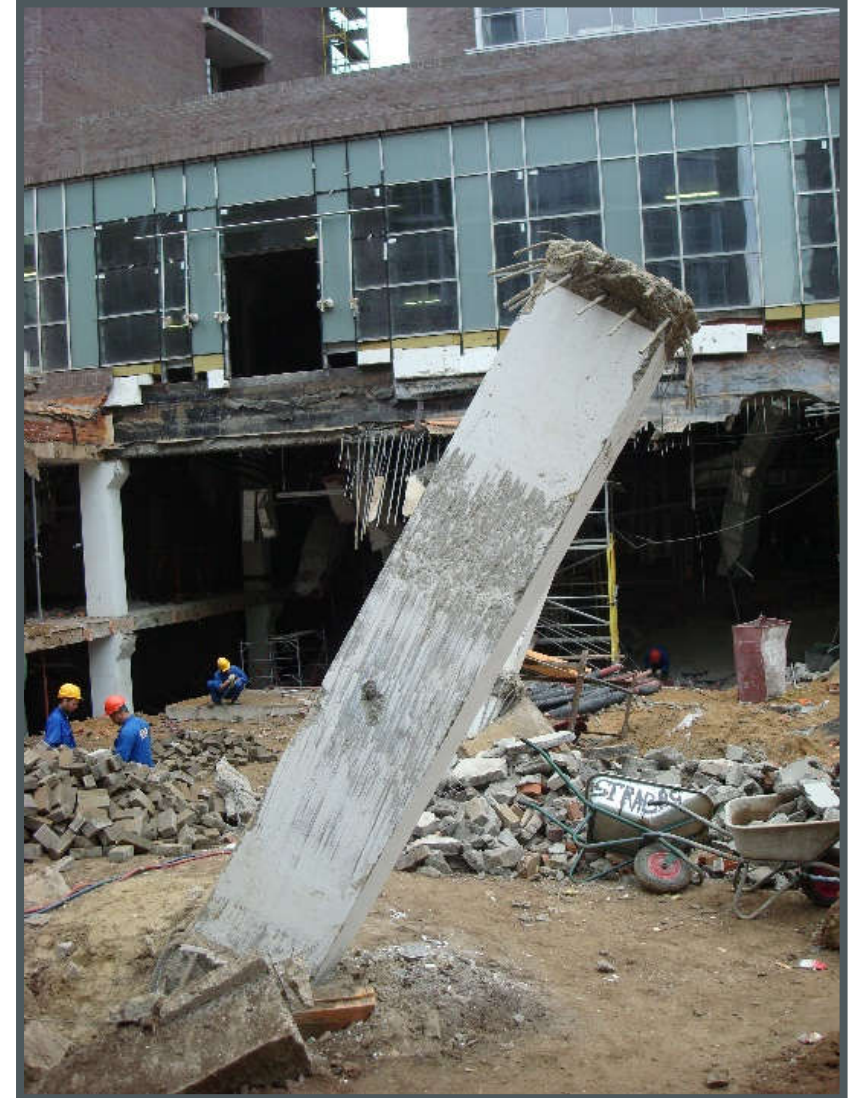
e-mail: [inv@inv-stroy.ru](mailto:inv@inv-stroy.ru)

тел.: +7 495 508 23 04

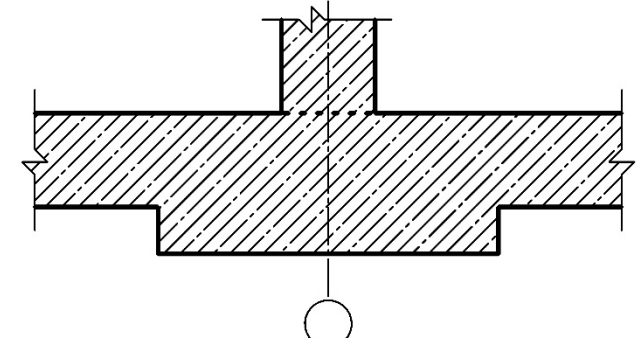
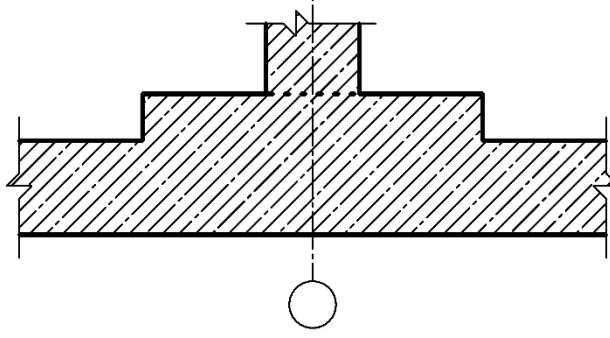
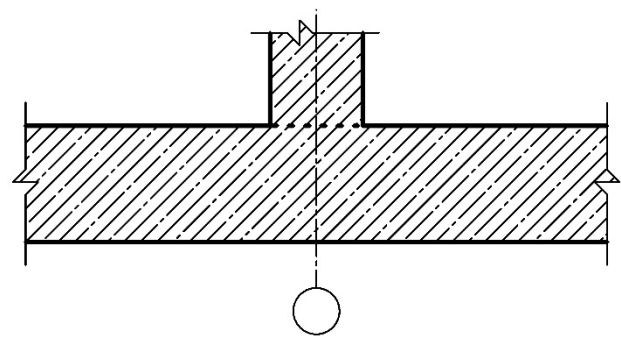
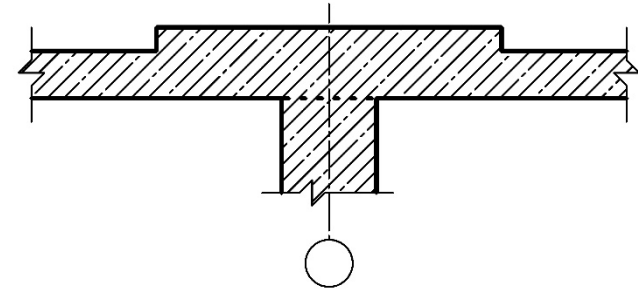
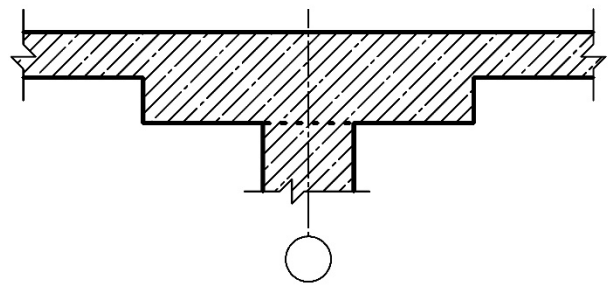
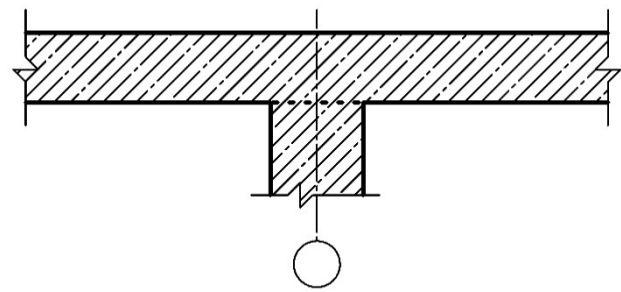
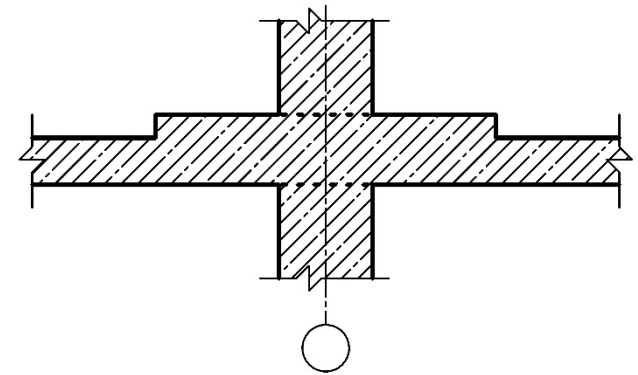
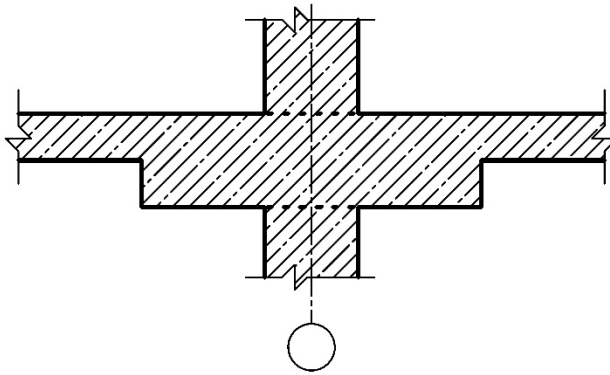
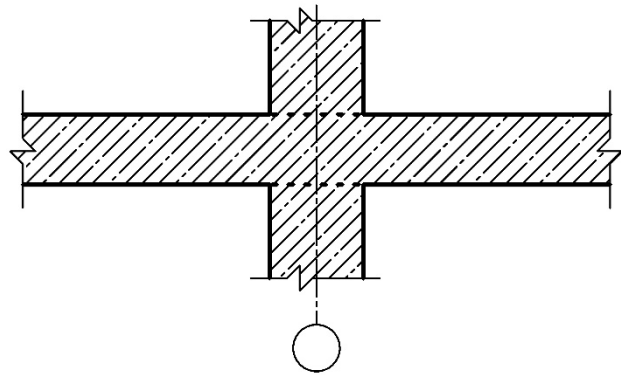


# Разрушение плиты покрытия стилобата:

- При разработке стадии Р было изменено КР плиты покрытия – **отказ** от устройства капителей



# Варианты КР опорных зон плитных ЖБК:



# Недостатки СП 63.13330.2018 (СНиП 2.03.01-84\*):

- **Суммирование** несущей способности бетона срезом (растяжению) на гранях призмы (пирамиды) продавливания на I стадии НДС с несущей способностью поперечной арматуры на III стадии НДС, что не соответствует реализации механизма разрушения
- **Допущение о равномерном распределении** касательных (растягивающих) напряжений в бетоне по всей площади расчетного сечения не подтверждается экспериментально [1]
- По результатам серии экспериментов [2] выявлено, что для бетона классов В40, В45 согласно нормативных методик расчета происходит **заметное увеличение несущей способности** на продавливание по сравнению с опытными данными

# Недостатки СП 63.13330.2018 (СНиП 2.03.01-84\*):

- Согласно проведенным испытаниям [3] установлено, что при увеличении габаритов грузовой площади, нормативная методика расчета также приводит к **завышению несущей способности** на продавливание
- На основе анализа [4] отмечено, что не учитывается фактическое НДС опорных зон железобетонных конструкций, продольное армирование, несимметричное напряженное состояние на разных гранях колонн, режим нагружения



# Недостатки СП 63.13330.2018:

- Необходимость учета действующих в колоннах изгибающих моментов, особенно для плит перекрытий, противоречит механике железобетона, поскольку вертикальные нормальные напряжения в колоннах не могут действовать за границами их поперечных сечений
- Снижение несущей способности на продавливание в плитах покрытия и фундаментных плитах при внецентренном нагружении происходит за счет уменьшения площади контакта колонны (грузовой площади) и плитной конструкции
- Конструктивное требование в пп. 8.1.46, 10.3.17 по размещению поперечной арматуры в плане на расстоянии не менее  $h_0/3$  от граней колонны (грузовой площади) для плитных ЖБК большой толщины ( $> 1$  м) может приводить к реализации «стесненного» механизма продавливания по аналогии с разрушением свайных ростверков

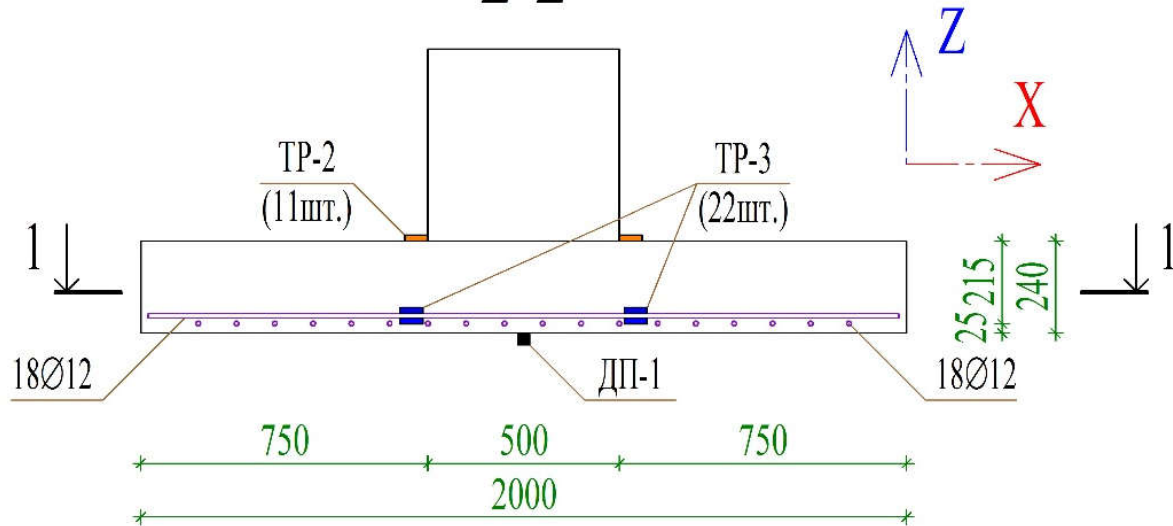
# Недостатки Еврокод 2:

- Полностью эмпирическое определение предельных касательных напряжений в бетоне на основе кубиковой прочности
- Равномерное распределение касательных напряжений по рабочей высоте сечения, особенно на контуре по периметру колонны, а не по высоте сжатой зоны бетона
- Заметный резерв несущей способности по сравнению с проведенным экспериментом [1]
- Учет изгибающих моментов в колоннах при расчете плит на продавливание

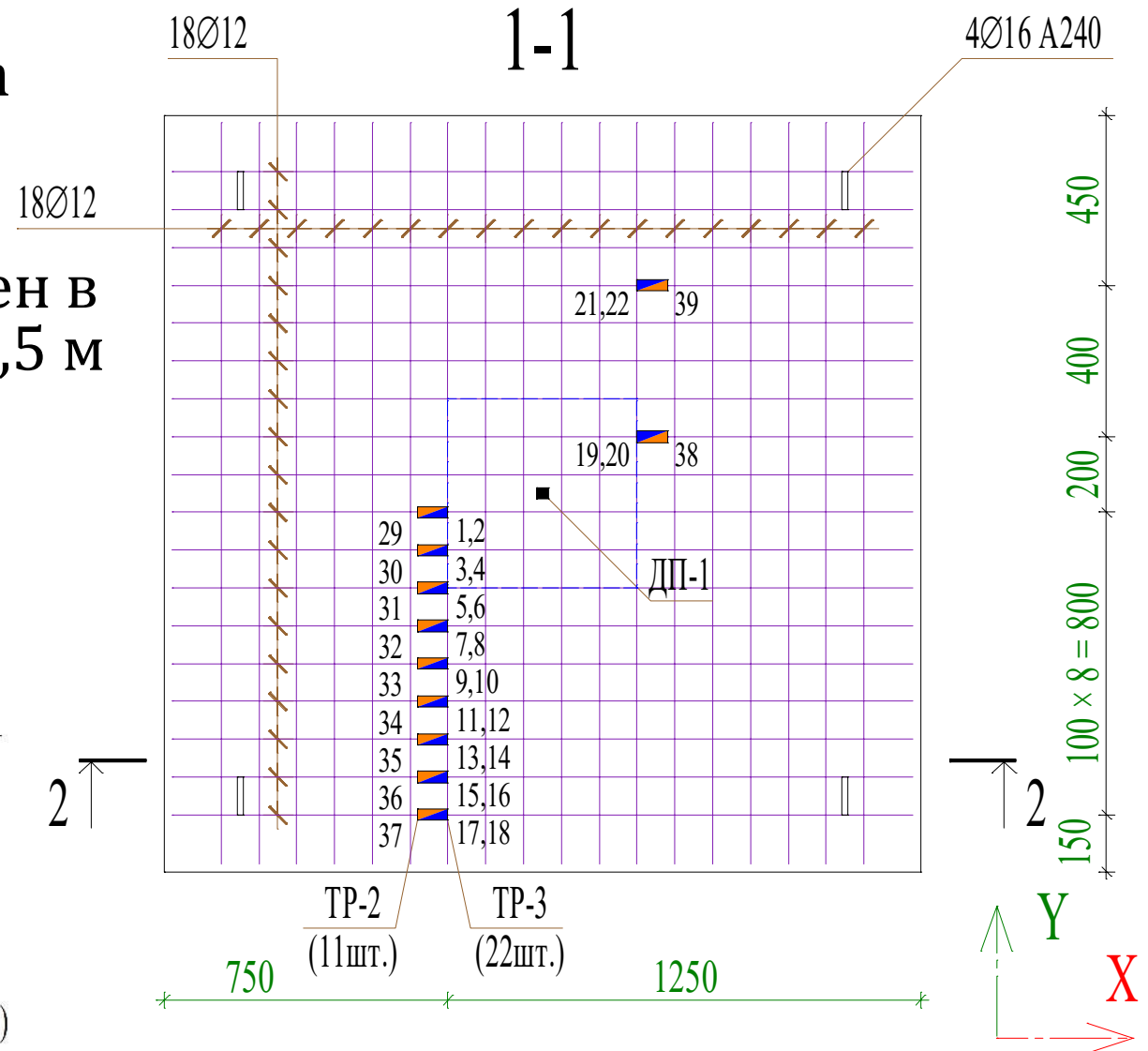
# Испытанный образец:

- Габаритные размеры фрагмента плиты покрытия –  $2,0 \times 2,0 \times 0,24(h)$  м
- Оголовок колонны был выполнен в виде куба с размером стороны 0,5 м

2-2



TP-2 - тензорезистор для бетона (11шт.) TP-3 - тензорезистор для арматуры (22шт.)





# Испытательный стенд:

- Для проведения испытаний был изготовлен опорный контур с габаритами в плане  $2,16 \times 2,16 \times 0,24$  (h) м из спаренного швеллера №24 коробчатого поперечного сечения
- Опорный контур был установлен на 8 стоек высотой 1,2 м, опирающихся на силовой пол. Образец плиты был установлен на ц/п раствор с длиной опирания 100 мм по периметру опорного контура
- Нагружение осуществлялось 4 гидравлическими силовозбудителями от общего коллектора, способными создавать усилие по 1000 кН каждый



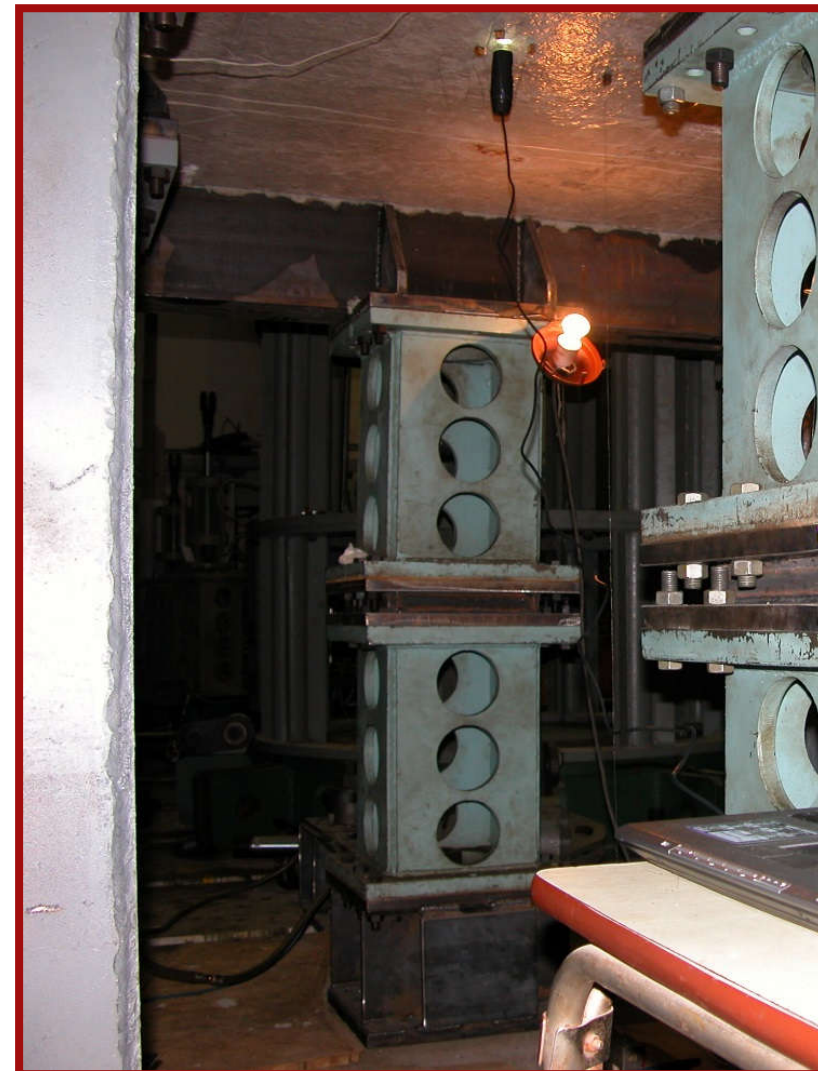
# Тензорезисторы арматуры:

| № датчика | Относительные деформации датчиков арматуры $\epsilon$ , % |        |        |        |        |         |         |
|-----------|---|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
|           | 80 кН   | 280 кН | 480 кН | 680 кН | 880 кН | 1080 кН | 1180 кН |
| ТР-3-1    | -   | 0,047  | 0,134  | 0,209  | 0,254  | 0,338   | -       |
| ТР-3-2    | -   | 0,045  | 0,140  | 0,208  | 0,254  | 0,409   | -       |
| ТР-3-3    | -   | 0,036  | 0,121  | 0,186  | 0,233  | 0,357   | -       |
| ТР-3-4    | -   | 0,041  | 0,126  | 0,190  | 0,234  | -       | -       |
| ТР-3-5    | -   | 0,038  | 0,143  | -      | -      | -       | -       |
| ТР-3-6    | -   | 0,037  | 0,118  | 0,184  | 0,237  | 0,369   | -       |
| ТР-3-7    | -   | -      | -      | -      | -      | -       | -       |
| ТР-3-8    | -   | 0,032  | 0,103  | 0,170  | 0,234  | 0,299   | -       |
| ТР-3-9    | -   | 0,037  | 0,093  | 0,150  | 0,213  | 0,298   | -       |
| ТР-3-10   | -   | 0,079  | 0,162  | 0,354  | 0,443  | 0,570   | -       |
| ТР-3-11   | -   | 0,042  | 0,096  | 0,147  | 0,199  | 0,268   | -       |
| ТР-3-12   | -   | 0,031  | 0,079  | 0,122  | 0,173  | 0,234   | -       |
| ТР-3-13   | -   | 0,037  | 0,086  | 0,120  | 0,148  | 0,226   | -       |
| ТР-3-14   | -   | 0,039  | 0,086  | 0,121  | 0,151  | 0,211   | -       |
| ТР-3-15   | -   | 0,031  | 0,071  | 0,107  | 0,136  | 0,187   | -       |
| ТР-3-16   | -   | 0,023  | 0,056  | 0,083  | 0,110  | 0,164   | -       |
| ТР-3-17   | -   | -0,005 | -0,002 | 0      | 0,010  | 0,040   | -       |
| ТР-3-18   | -   | 0,021  | 0,043  | 0,109  | 0,133  | 0,182   | -       |
| ТР-3-19   | -   | 0,098  | 0,228  | -      | -      | -       | -       |
| ТР-3-20   | -   | 0,034  | 0,115  | 0,187  | 0,243  | 0,337   | -       |
| ТР-3-21   | -   | 0,024  | 0,059  | 0,092  | 0,120  | 0,175   | -       |
| ТР-3-22   | -   | 0,022  | 0,064  | 0,125  | 0,171  | 0,234   | -       |



# Тензорезисторы бетона:

| № датчика | Относительные деформации датчиков бетона $\varepsilon$ , % |        |        |        |        |         |         |
|-----------|--|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
|           | 80 кН  | 280 кН | 480 кН | 680 кН | 880 кН | 1080 кН | 1180 кН |
| ТР-2-29   | -  | 0,024  | 0,019  | 0,018  | 0,026  | 0,049   | -       |
| ТР-2-30   | -  | 0,012  | 0,001  | -0,005 | 0,001  | 0,03    | -       |
| ТР-2-31   | -  | 0,007  | -0,003 | -0,011 | -0,004 | 0,031   | -       |
| ТР-2-32   | -  | 0,015  | 0,006  | 0,001  | -0,007 | -0,019  | -       |
| ТР-2-33   | -  | -0,016 | -0,038 | -0,053 | -0,073 | -0,099  | -       |
| ТР-2-34   | -  | 0,019  | 0,016  | 0,014  | 0,003  | -0,012  | -       |
| ТР-2-35   | -  | -      | -      | -      | -      | -       | -       |
| ТР-2-36   | -  | 0      | -0,007 | -0,015 | -0,021 | -0,025  | -       |
| ТР-2-37   | -  | -      | -      | -      | -      | -       | -       |
| ТР-2-38   | -  | -0,018 | -0,04  | -0,061 | -0,072 | -0,059  | -       |
| ТР-2-39   | -  | -0,028 | -0,052 | -0,083 | -0,101 | -0,124  | -       |





# Вертикальные перемещения и $a_{crc}$ :

| Прибор    | Вертикальные перемещения (ВТ-718-15), мм                    |        |        |        |        |         |         |
|-----------|---|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
|           | Ширина раскрытия нормальных трещин (PCE-MM200 и TP-3-3), мм |        |        |        |        |         |         |
|           | 80 кН   | 280 кН | 480 кН | 680 кН | 880 кН | 1080 кН | 1180 кН |
| ВТ-718-15 | -   | 0,74   | 2,40   | 4,01   | 5,73   | 8,71    | 9,26    |
| PCE-MM200 | -   | 0,288  | 0,352  | 0,520  | 0,624  | 0,736   | -       |
| TP-3-3*   | -   | 0,086  | 0,290  | 0,446  | 0,559  | 0,857   | -       |



# Образец после разрушения:





# Несущая способность на продавливание:

- Несущая способность на продавливание по методикам СНиП 2.03.01-84\*, СП 52-101-2003 и СП 63.13330.2012 составила 962 кН, коэффициент использования по продавливанию составил  $962/1180=0,82$
- По методике Еврокод 2 несущая способность сопоставляется с предельно допустимыми напряжениями среза бетона на двух разных контурах: по периметру граней колонны и по периметру вокруг колонны на расстоянии  $2h_0$ :
  - по периметру колонны:  $V_{Ed,col}/V_{Rd,max}=2,82/7,2=0,39$   
– несущая способность  $V_{Rd,max}$  существенно завышена
  - на расстоянии  $2h_0$  от граней колонны :  $V_{Ed,u1}/V_{Rd,c}=1,06/0,80=1,33$   
– несущая способность  $V_{Rd,c}$  заметно занижена



# Несущая способность на изгиб:

- Приведенный изгибающий момент в поперечном сечении плиты с габаритами  $2000 \times 240(h)$  мм по грани колонны при нагрузке 1180 кН, полученный на основе усовершенствованной методики [1], составил 206 кН\*м, в то время как предельный изгибающий момент данного сечения для наиболее удаленного от грани ряда продольной арматуры ( $a=25+12=37$  мм), равен 193 кН\*м, коэффициент использования по изгибу составил  $206/193=1,07$
- Очевидно, что в данном случае реализация механизма продавливания могла быть спровоцирована достижением предельной несущей способности плиты при изгибе, и данное обстоятельство является одной из предпосылок для совершенствования методики расчета на продавливание

# По результатам экспериментов:

- Испытанные фрагменты плит покрытий и перекрытий в виде отдельных образцов, свободно опирающихся по контуру, существенно отличаются от многопролетных неразрезных аналогов действующим НДС в опорной зоне
- Угол наклона граней пирамиды продавливания является переменным и зависит от множества факторов
- Высота сжатой зоны бетона в поперечном сечении опорной зоны по грани колонны является переменной величиной и увеличивается по мере удаления от колонны при снижении уровня сжимающих напряжений

# По результатам экспериментов:

- На поверхности бетона вблизи граней колонны возникают растягивающие напряжения, связанные с вдавливанием штампа в тело плиты
- Допущение о равномерном распределении растягивающих напряжений отрыва на поверхности пирамиды продавливания не соответствует действительности
- Спусковым «крючком» реализации механизма продавливания может являться переход ряда растянутых арматурных стержней в пластическую область работы и критическое уменьшение высоты сжатой зоны бетона за счет роста нормальных и наклонных трещин

# Предпосылки для расчета на продавливание:

- Для III стадии НДС несущая способность на продавливание по бетону зависит от сопротивления сжатой зоны бетона срезу с учетом действующих нормальных сжимающих напряжений
- Пирамида продавливания образуется в момент среза сжатой зоны бетона и растягивающие напряжения на гранях пирамиды не учитываются
- Угол наклона граней пирамиды продавливания зависит от многих факторов и находится в диапазоне от  $\sim 20$  до  $\sim 60^\circ$ , подтвержденном испытаниями [1-4]
- Допускается равномерное распределение напряжений в поперечной арматуре

# Методика расчета на продавливание:

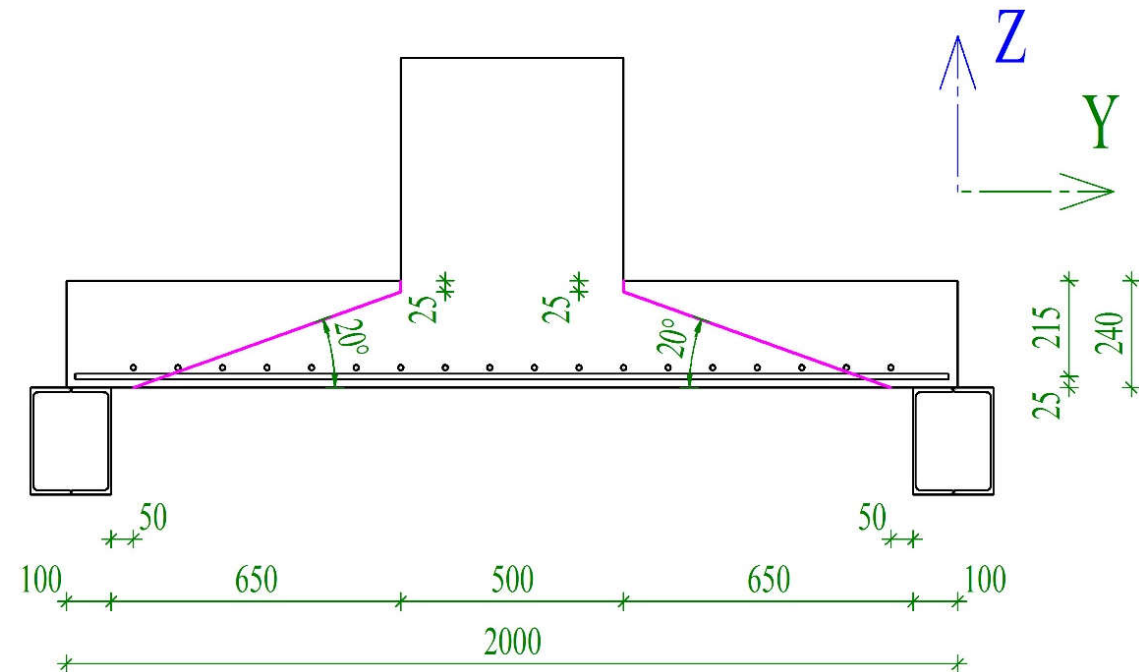
- Несущая способность на продавливание по бетону определяется с учетом:
  - фактической картины НДС опорных зон железобетонных конструкций
  - продольного армирования в растянутой и сжатой зонах
  - особенностей конструктивных решений и материалов
  - режима нагружения
- Несущая способность на продавливание для III стадии НДС складывается из работоспособности сжатой зоны бетона на срез и несущей способности поперечной арматуры, находящейся в габаритах пирамиды продавливания

# Несущая способность по бетону:

- В общем случае для математического описания механизма реализации продавливания в предельной стадии можно воспользоваться модификацией закона Кулона:

$$F_{b,ult} = \nu_1 \cdot \nu_2 \cdot \nu_3 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot b_i \cdot (\sigma_{bi} \cdot \varphi_p + R_{bt})$$

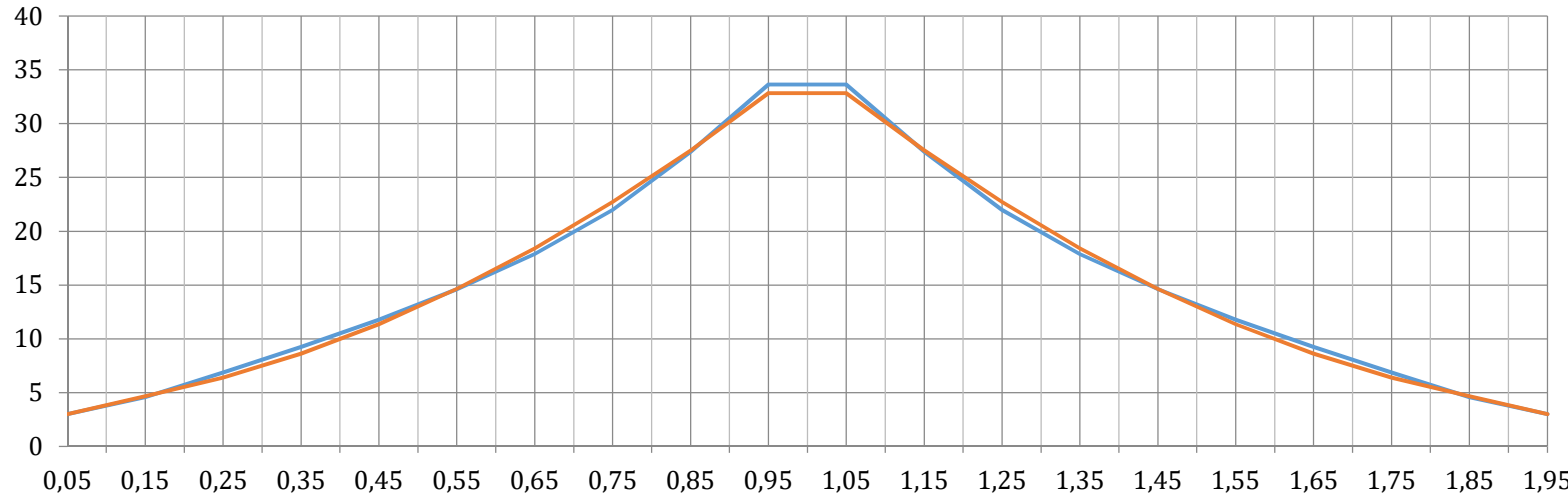
- где  $x_i$  – высота сжатой зоны бетона у  $i$ -й грани колонны
- $b_i$  – ширина  $i$ -й грани колонны
- $\varphi_p$  – коэффициент среза бетона
- $R_{bt}$  – сопротивление бетона растяжению;
- $\sigma_{bi}$  – горизонтальные нормальные напряжения в бетоне у  $i$ -й грани колонны
- $\nu_1$  – коэффициент НДС: для III стадии – 1, для I стадии –  $1/\cos 45^\circ = 1,4$
- $\nu_2$  – коэффициент режима нагружения: при статической нагрузке – 1
- $\nu_3$  – коэффициент, учитывающий особенности конструктивного решения: при отсутствии поперечной арматуры – 1





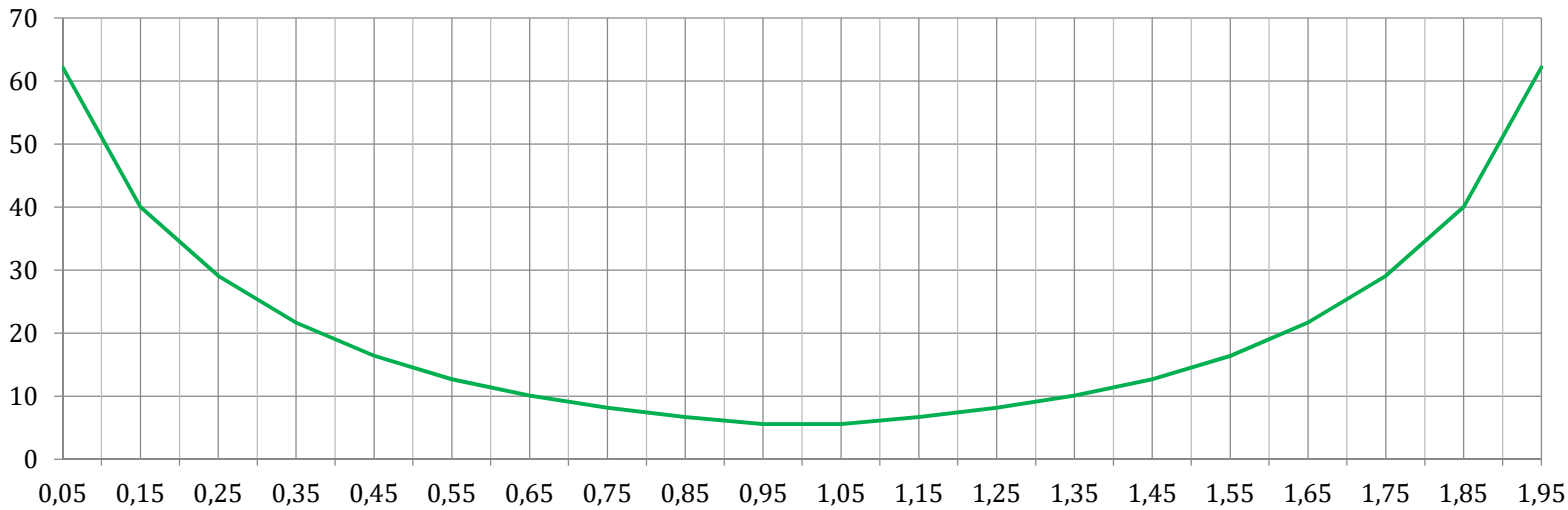
# Допущение по высоте сжатой зоны бетона:

$M$  (изгибающий момент),  $10^{-1}$ , кН\*м



– огибающая изгибающего момента в поперечном сечении испытанного образца

$x$  (высота сжатой зоны бетона), мм



– изменение высоты сжатой зоны бетона в поперечном сечении испытанного образца

# Высота сжатой зоны бетона:

- Для вычисления высоты сжатой зоны бетона  $x_i$  у  $i$ -й грани колонны на III стадии НДС предлагается использовать следующее допущение – изменение высоты сжатой зоны бетона в поперечном сечении обратно пропорционально изменению изгибающего момента:

$$\mu(b) = 1 / M(b)$$

- где  $\mu(b)$  – коэффициент обратного преобразования (max значения изгибающего момента к соответствующей min высоте сжатой зоны бетона и наоборот)
- $M(b) = A_0 + A_1 \cdot b + A_2 \cdot b^2$  – закон изменения огибающей изгибающего момента в сечении

$$x_{col} = k_x \cdot \mu_{col} = \frac{x_{red}}{\mu_{red}} \cdot \sum_{i=1}^{n_c} \frac{\mu(b)_{ci}}{n_c} = \frac{R_s \cdot A_s \cdot \sum_{i=1}^{n_c} \frac{1}{M(b)_{ci} \cdot n_c}}{R_b \cdot b \cdot \sum_{i=1}^{n_b} \frac{1}{M(b)_i \cdot n_b}}$$

# Основные выводы по работе:

- Принятые допущения и отдельные положения по конструированию железобетонных конструкций на продавливание требуют корректировки
- Экспериментально подтверждено, что механизм разрушения при продавливании зависит от ряда дополнительных факторов, которые не учитываются в нормативных методиках расчета
- Угол наклона граней пирамиды продавливания может находиться в широком диапазоне от  $\sim 20$  до  $\sim 60^\circ$ , зависит от множества параметров и не оказывает заметного влияния на несущую способность по бетону на продавливание
- Выполненные экспериментальные исследования показали, что механизм разрушения при продавливании существенно зависит от изгибных составляющих внутренних усилий, высоты сжатой зоны бетона вокруг колонны и достижения продольной растянутой арматурой предела текучести

# Ссылочная литература:

1. Пекин Д.А. Влияние изгиба на механизм продавливания опорной зоны железобетонной плиты. – Промышленное и гражданское строительство, №10, 2019. – С.20-28.
2. Клевцов В.А., Болгов А.Н. Действительная работа узлов плоской безбалочной безкапитальной плиты перекрытия с колоннами при продавливании. – Бетон и железобетон, №3, 2005. – С.17-19.
3. Краснощёков Ю.В., Комлев А.А. Прочность плиты безбалочного перекрытия на участках соединения с колоннами. – Бетон и железобетон, №1, 2011. – С.25-27.
4. Силантьев А.С. Проблемы учета действительной работы узлов сопряжения плоских безбалочных плит железобетонных перекрытий с колоннами. Перспективы развития фундаментальных наук. Труды VI Международной конференции студентов и молодых ученых. – Издательство Томского политехнического университета, 2009. – С. 726-729.
5. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. Практическая методика расчета железобетонных плит на продавливание по различным схемам. – Бетон и железобетон, №5, 2012. – С.10-16.
6. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Никитин И.К. Проектирование участков сборных перекрытий под повышенные нагрузки. – Промышленное и гражданское строительство, №2, 2011. – С.24-26.

# Спасибо за внимание!

Докладчик: Пекин Д.А., главный конструктор, к.т.н.

www: <http://inv-stroy.ru>

e-mail: [inv@inv-stroy.ru](mailto:inv@inv-stroy.ru)

тел.: +7 495 508 23 04

