

# Исследование механизма продавливания железобетонных конструкций

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

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

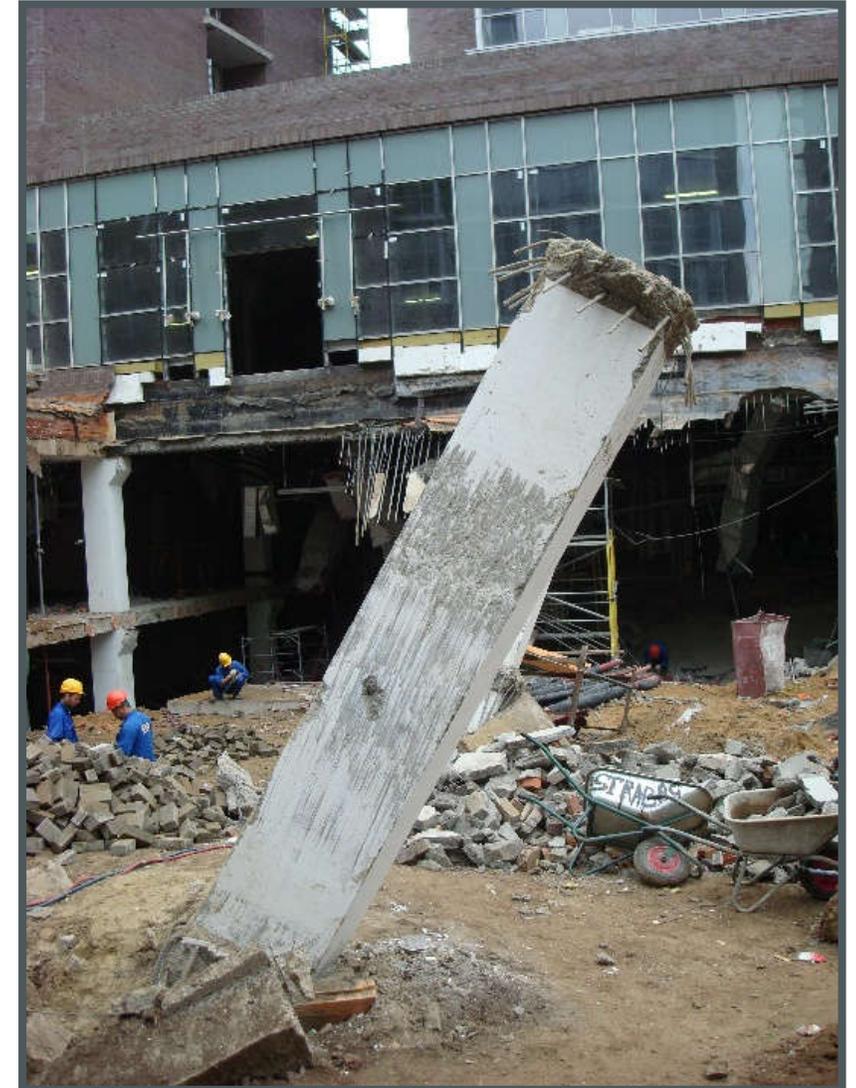
e-mail: [inv@inv-stroy.ru](mailto:inv@inv-stroy.ru)

тел.: +7 495 508 23 04

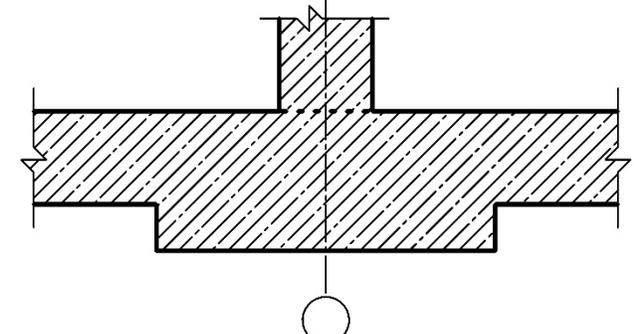
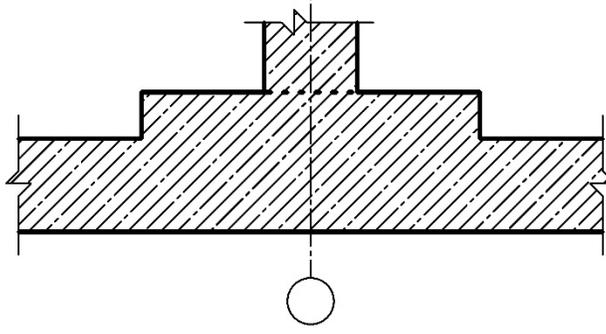
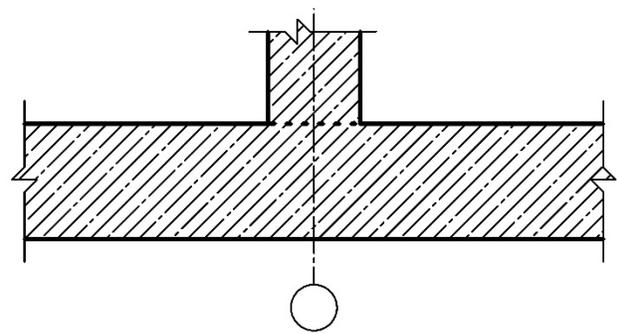
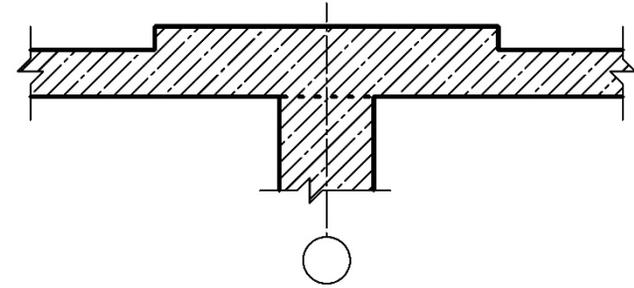
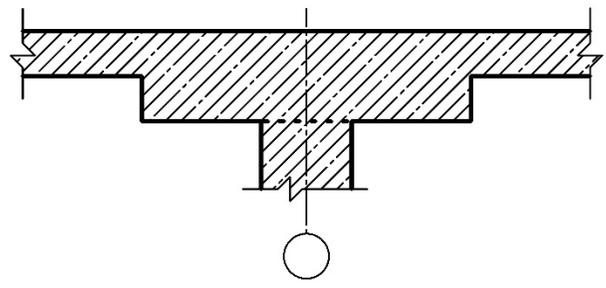
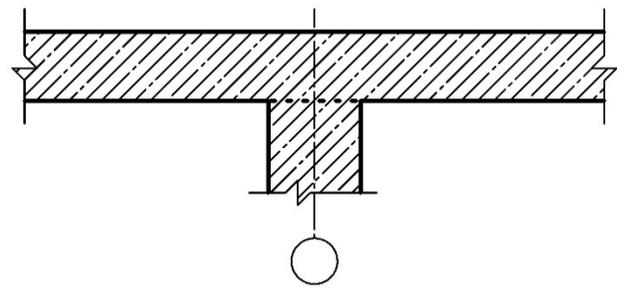
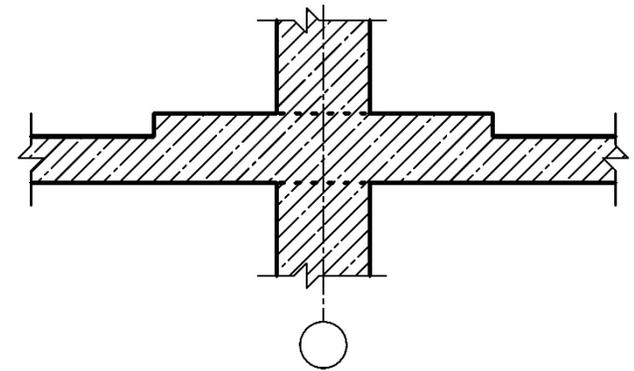
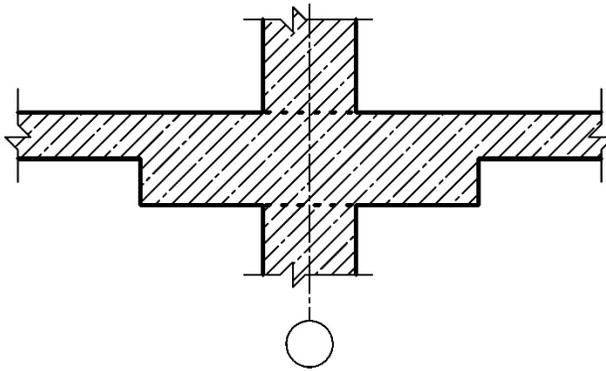
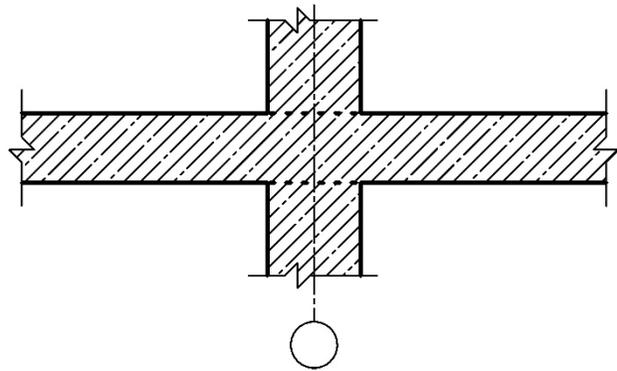


# Разрушение плиты покрытия стилобата:

- 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:

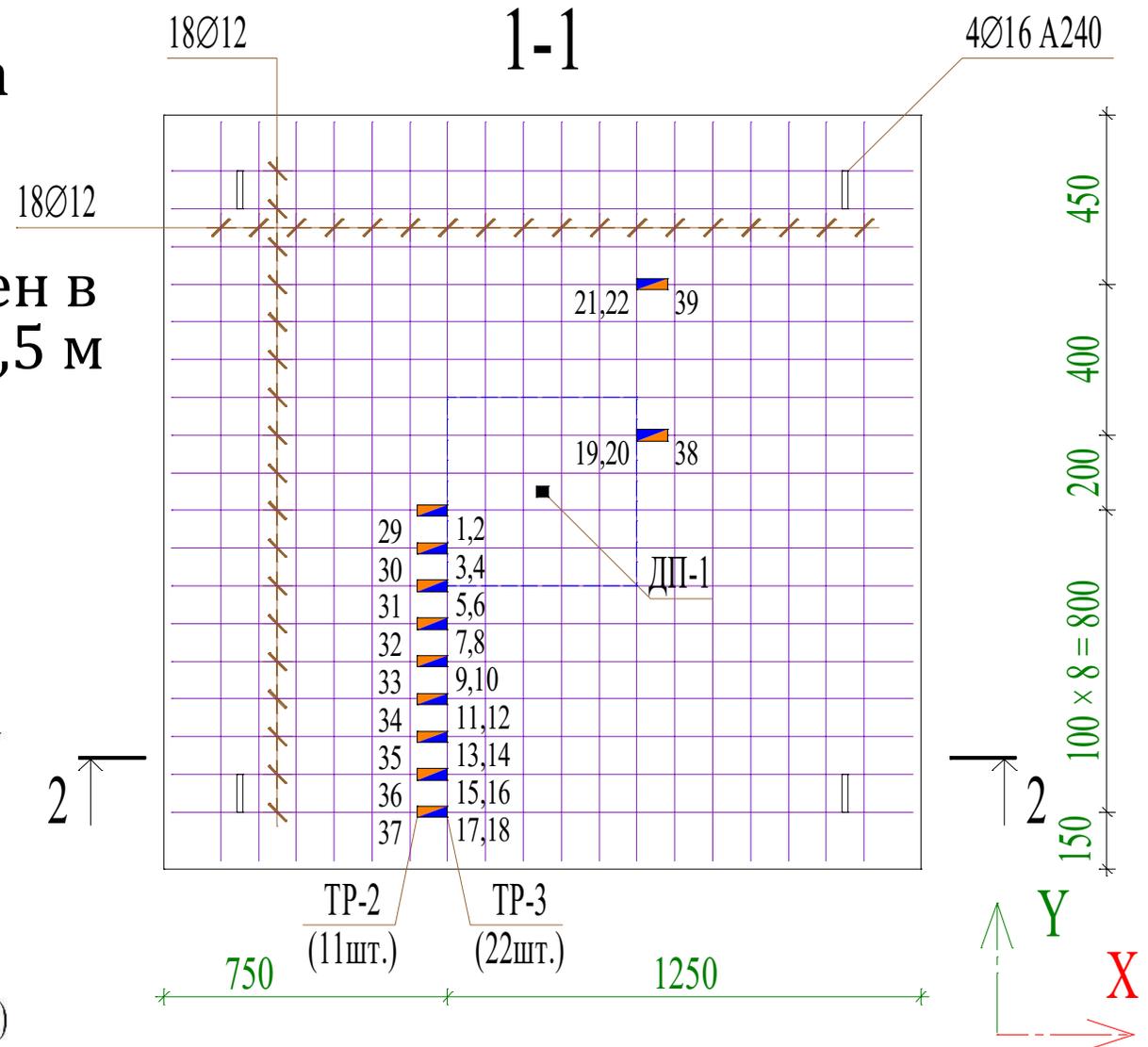
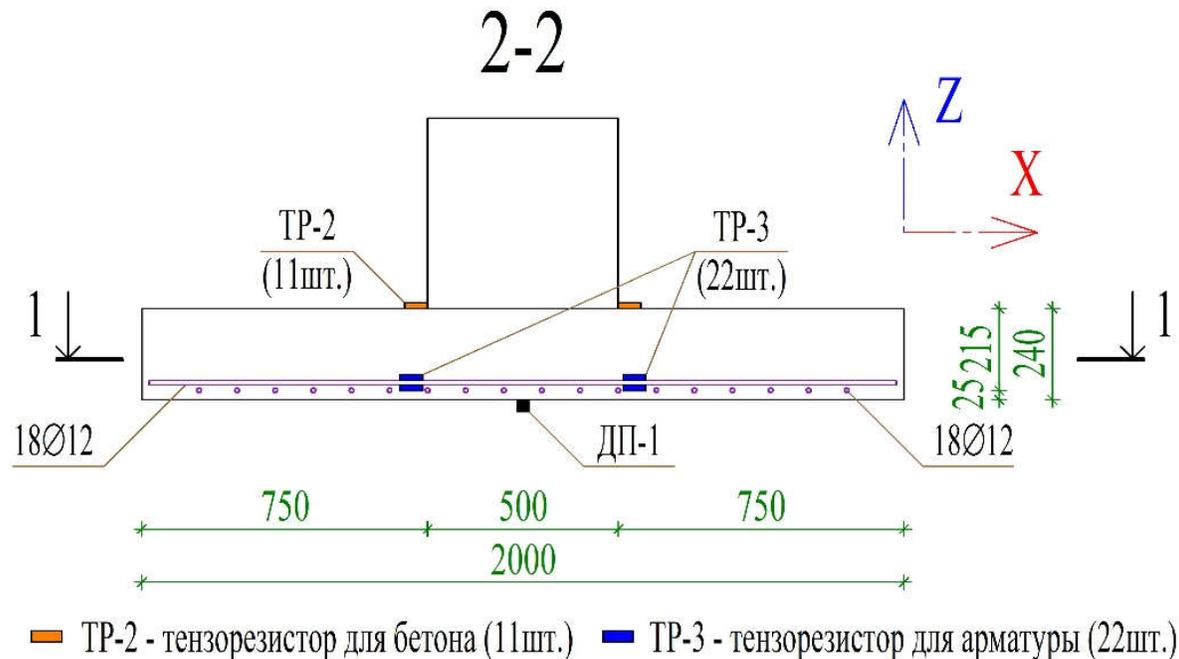
- Необходимость учета действующих в колоннах изгибающих моментов, особенно для плит перекрытий, противоречит механике железобетона, поскольку вертикальные нормальные напряжения в колоннах не могут действовать за границами их поперечных сечений
- Снижение несущей способности на продавливание в плитах 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



# 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



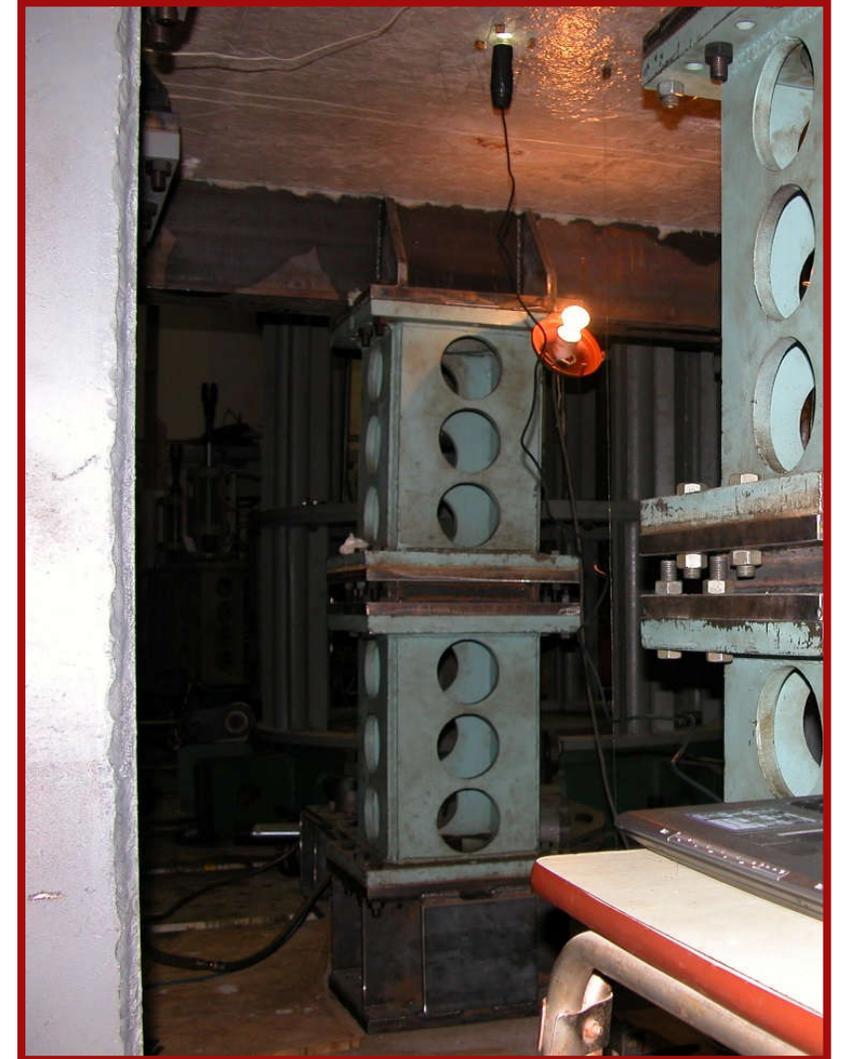
# Тензорезисторы арматуры:

№ 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:

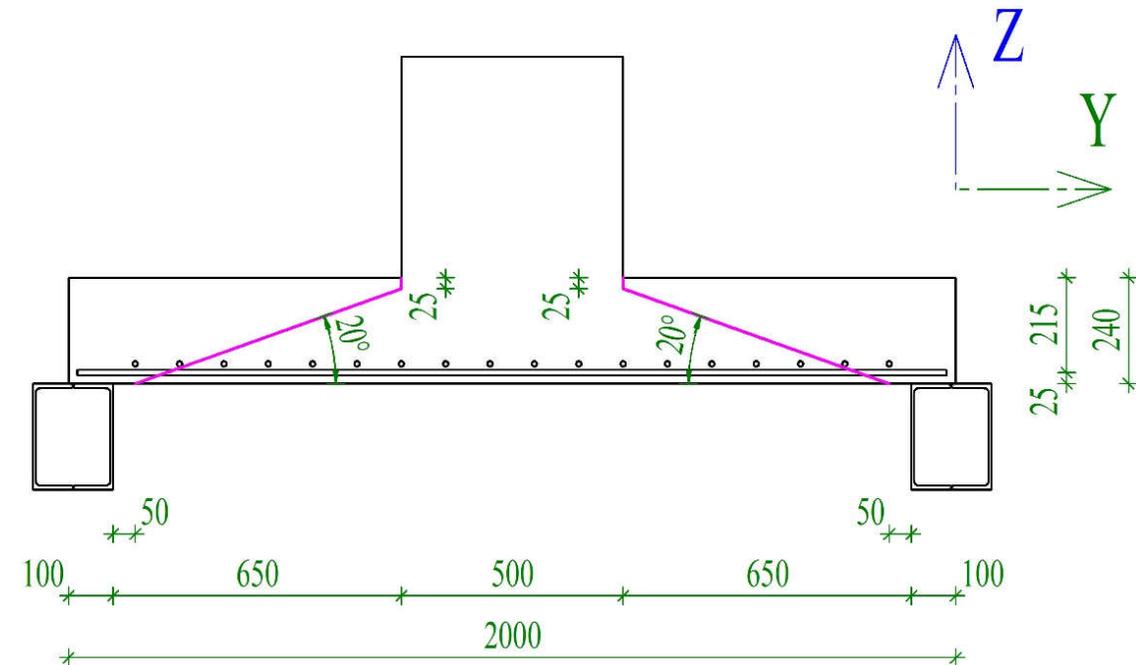
- Несущая способность на продавливание по бетону определяется с учетом:
  - фактической картины НДС опорных зон железобетонных конструкций
  - продольного армирования в растянутой и сжатой зонах
  - особенностей конструктивных решений и материалов
  - режима нагружения
- Несущая способность на продавливание 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:

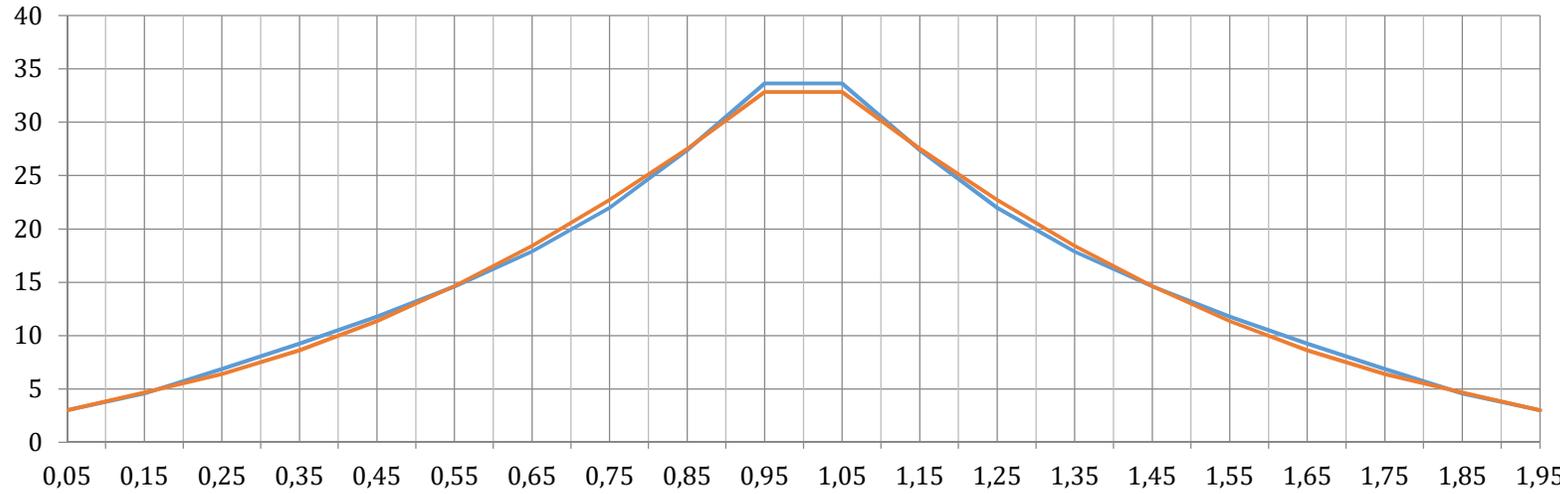
$$F_{b,ult} = \nu_1 \cdot \nu_2 \cdot \nu_3 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot b_i \cdot (\sigma_{bi} \cdot \varphi_p + R_{bt})$$

- 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



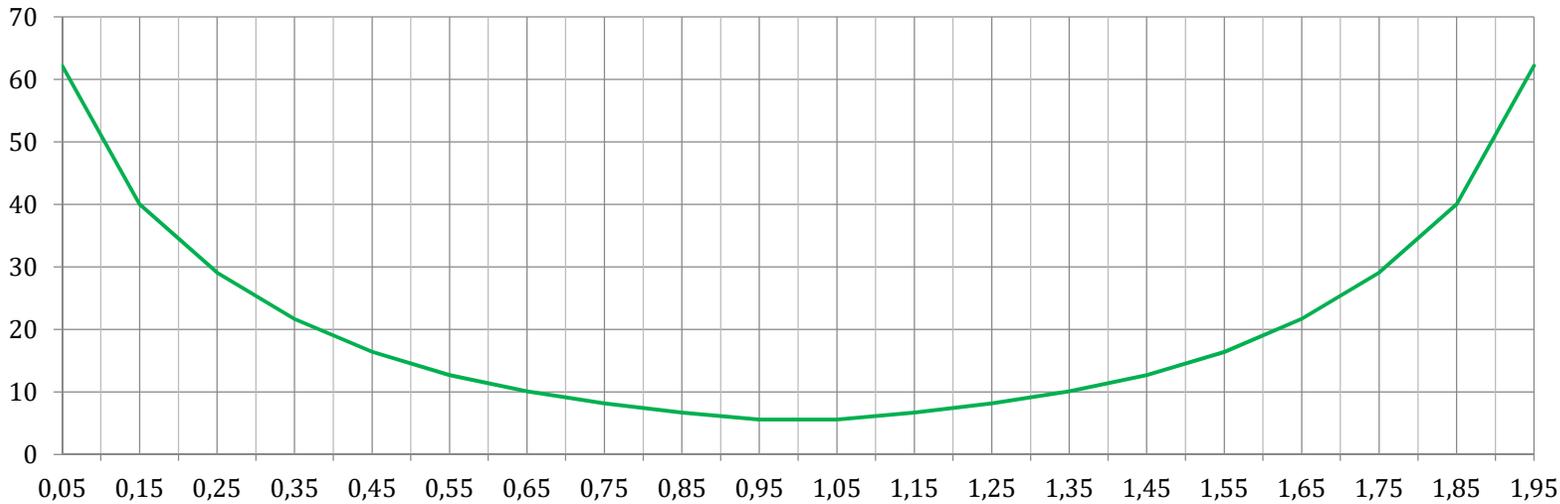
# Допущение по высоте сжатой зоны бетона:

$M$  (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

