

## К РАСЧЕТУ ОПОРНЫХ УЗЛОВ КОЛОНН ПО КРИТЕРИЮ ОДНОВРЕМЕННОГО ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНОЙ ПЛИТЫ И БЕТОНА ФУНДАМЕНТА

Рассматривается модель совместной работы опорной плиты, деформированной под нагрузкой по цилиндрической поверхности и воздействующей на бетон фундамента подобно цилиндрическому штампу. Предлагается методика расчета опорных узлов колонн и стоек по критерию одновременного достижения предельного состояния деформированной опорной плиты и бетона фундамента как основания под цилиндрическим штампом.

**Ключевые слова.** Опорная плита, бетон фундамента, предельное состояние.

ОпираНИЕ металлических колонн и стоек, в большинстве случаев, осуществляется с применением специальных опорных плит, передающих и распределяющих нагрузку с колонны на поверхность фундамента (рис. 1а).

Усилия, действующие в опорном узле, приводят к появлению в бетоне фундамента реактивных напряжений, распределение которых весьма сложно и поэтому на практике обычно используют упрощенные модели. Наиболее распространен метод расчета, при котором считается, что реактивные напряжения под плитой распределяются линейно (рис. 1, б). Более точной моделью для расчета опорных плит является пластина, опертая на упругое основание в виде модели Винклера или упругое полупространство [1]– [3], но, из-за сложности аналитических решений, в этих работах рассматриваются простые случаи, не отвечающие реальным условиям работы опорных пластин колонн и стоек.

Для тонких опорных плит ситуация осложняется тем, что под нагрузкой плита деформируется и ее краевые участки отрываются от основания (рис. 1, б). При этом плита контактирует с основанием только на части ширины, что приводит к увеличению напряжений в бетоне и может вызвать его разрушение.

Определенных успехов можно добиться, используя иные подходы к расчету опорных пластин. Согласно экспериментальным исследованиям [4] и расчетам по МКЭ, установлено, что передача давления с колонны на бетон происходит через ограниченную зону опорной плиты, повторяющей очертание опорного сечения колонны (рис. 2). Отбрасывая участки опорной плиты (рис. 2, а), не участвующие в передаче давления, приходим к схеме, показанной на рис. 2, б. Как показывают расчеты, зона контакта опорной плиты и бетона фундамента имеет относительно небольшие размеры и, при реальных соотношениях между толщиной и вылетом плиты, занимает приблизительно одинаковые, относительные узкие по ширине области (рис. 2, г).

Таким образом, плита деформируется по криволинейной поверхности, совпадающей по очертанию с деформированной поверхностью бетона в зоне контакта. При этом в плите и бетоне возникают напряжения, величина которых определяется уровнем деформаций этих элементов.

Рассмотрим случай, когда напряжения в опорной плите и бетоне одновременно достигают своих предельных значений. Исходя из этого примем следующие допущения:

1. В соответствии с данными натурных и численных экспериментов, считаем, что передача давления с колонны на фундамент проис-

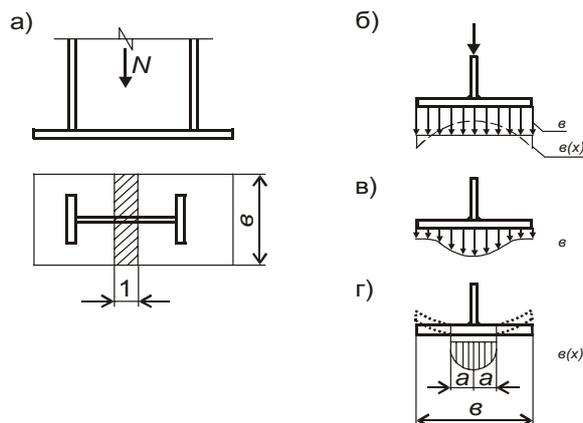


Рисунок 1. К расчету опорных узлов:  
а) схема опорного узла и расчетной единичной  
полоски опорной плиты; б)в)г) различные модели  
распределения реактивных напряжений  
в бетоне фундамента

ходит на участках вдоль полок, стенок и ребер приопорного сечения колонны (см. рис. 2 и 3).

2. Под действием нагрузки плита и бетон деформируются в зоне контакта. Поверхности деформированной плиты и бетона в зоне контакта совпадают.

4. Предполагается, что плита деформируется по круговой цилиндрической поверхности второго порядка.

5. Напряжения в бетоне определяются как под цилиндрическим штампом с радиусом, равным радиусу кривизны поверхности плиты и контактирующим с основанием в зоне шириной  $2a$ .

6. Допустимая нагрузка на выделенную полосу, а также толщина опорной плиты определяются из условий одновременного достижения расчетных сопротивлений  $R_y$  в пластине и  $\phi \cdot R_b$  в бетоне основания.

Напряжения в зоне контакта определим, используя данные [5]-[6]:

$$\sigma_y = \sigma_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}},$$

где  $\sigma_0 = 2P / \pi a$  – максимальное напряжение под штампом;  $a$  – полуширина зоны контакта, равная

$$a = \sqrt{\frac{2k \cdot P}{A}} = \sqrt{\frac{2k \cdot P \cdot E_1 (1 - \mu_1^2) \cdot t}{R_y}}. \quad (1)$$

при  $k = 2(1 - \mu_1) / \pi E_1 + 2(1 - \mu_2) / \pi E_2$ ; упругие характеристик плиты  $E_1; \mu_1$  и бетона  $E_2; \mu_2$ ;  $A = 1 / 2r_{lim} = R_y / E_1(1 - \nu_1^2)t$ .

Фибровые напряжения  $\sigma_x$  в плите найдем через радиус кривизны ее срединной поверхности при цилиндрическом изгибе  $\rho = r - 0.5t$  (рис. 4.6). В предельном состоянии  $\sigma_x = R_y$  и тогда

$$R_y = E_1(1 - \nu_1^2) \frac{t}{2(r - 0.5t)}. \quad (2)$$

откуда найдем предельный радиус кривизны плиты

$$r_{lim} = t \cdot \frac{E_1(1 - \nu_1^2) + R_y}{2R_y} = r_{lim} \approx t \cdot \frac{E_1(1 - \nu_1^2)}{2R_y}. \quad (3)$$

Приравнивая максимальные напряжения  $\sigma_0$  предельному сопротивлению бетона при локальном действии нагрузки, т. е.  $\sigma_0 = \phi \cdot R_b$ , получим

$$(R_b \cdot \phi)^2 = \frac{16}{\pi^2} \cdot \frac{P \cdot R_y}{k \cdot E_1 \cdot (1 - \nu_1^2) \cdot t}. \quad (5)$$

откуда найдем предельную нагрузки  $P_{lim}$ , при которой в опорной плите единичной ширины и

фундаменте одновременно возникают напряжения, равные расчетным сопротивлениям стали и бетона

$$P_{lim} = K_t \cdot t \frac{R_b^2}{R_y}, \quad (6)$$

где  $K_t = 0.5\pi^2 \cdot \phi^2 \cdot k \cdot t \cdot E_1(1 - \nu^2)$ . Значения  $K_t$  в зависимости от класса бетона при  $E_1 = 2,1 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup>,  $\nu_1 = 0,3$ ;  $\nu_2 = 0,2$ ;  $\phi = 1,5$  представлены в таблице.

Значения параметра  $K_t$

Класс бетона	7,5	10	12,5	15	20
$R_b$ , кг/см <sup>2</sup>	45	60	75	85	115
$E_1$ , кг/см <sup>2</sup>	$1,6 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^5$
$K_t$	86,9	78,1	67,6	62,1	53,8

Из (6) можно найти требуемую толщину опорной плиты, необходимую для восприятия нагрузки  $P$ :

$$t_{ef} = \frac{P \cdot R_y}{K_t \cdot R_b^2}. \quad (5)$$

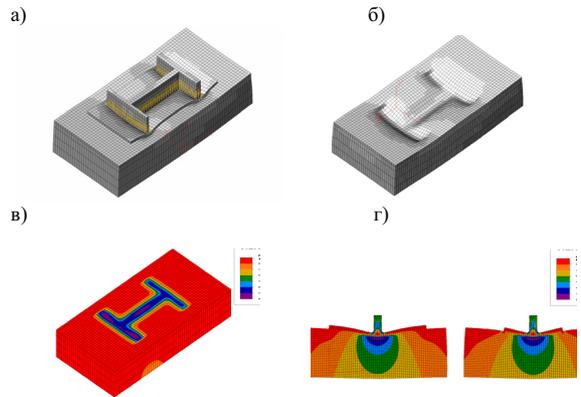


Рисунок 2. Численное моделирование опорного узла: а) общий вид деформированного узла; б) деформированная поверхность бетона; в) распределение реактивных напряжений под опорной плитой; г) деформации и реактивные напряжения под опорной плитой при различных соотношениях ее вылета и толщины

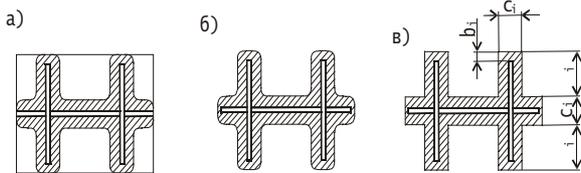


Рисунок 3. К построению модели передачи усилий через опорную плиту

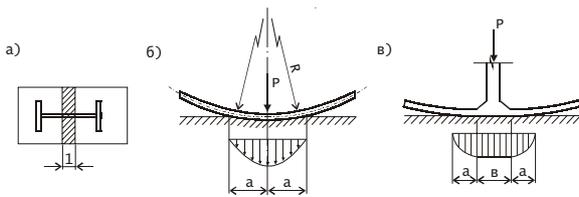


Рисунок 4. Модель совместной работы опорной плиты и бетона

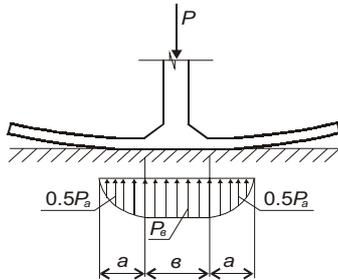


Рисунок 5. Учет включения в работу элементов опорного сечения колонны

Как видно, наибольшее влияние на несущую способность опорной плиты оказывает прочность бетона, что согласуется с ранее указанным предположением. Повышение расчетного сопротивления стали  $R_y$ , наоборот, отрицательно сказывается на толщине опорной плиты. Это вполне объяснимо, так как увеличение  $R_y$  приводит к увеличению допустимой кривизны плиты, а, следовательно, к увеличению контактных напряжений в бетоне.

Ранее предполагалось, что на опорную плиту действует нагрузка, сосредоточенная вдоль линии. Очевидно, что элементы колонны (полки, стенки, ребра и т. д.), а также сварные швы будут препятствовать деформированию опорной плиты в зоне сопряжения с элементами колонны. Таким образом, фрагмент опорной плиты, вдавливаемый в основание, можно представить состоящим из трех участков (рис. 5):

– два крайних участка, изгибаемых по цилиндрической поверхности;

– средний, недеформируемый участок, сопряженный с примыкающей полкой (стенкой) и сварными швами.

Ширина среднего участка принимается равной  $b = t + 2k_f$ , где  $t$  – толщина примыкающей полки, стенки или ребра;  $k_f$  – катет шва.

Суммарная нагрузка, воспринимаемая участками опорной плиты равна

$$P_{\Sigma} = P_a + P_b, \quad (6)$$

Здесь  $P_a = P_{\text{lim}}$  – нагрузка, воспринимаемая крайними участками суммарной шириной  $2a$ , расположенными под деформированной зоной плиты;  $P_b$  – нагрузка, воспринимаемая, средней, недеформируемой частью опорной плиты.

Величину  $P_b$  найдем, считая, что напряжения под средним участком постоянны по его ширине и равны  $\sigma_0 = \phi \cdot R_b$ . Таким образом, окончательная формула для определения несущей способности полоски единичной ширины примет вид

$$P_{\Sigma} = K_t \cdot t \cdot \frac{R_b^2}{R_y} + (t_f + 2k_f) \cdot \phi \cdot R_b. \quad (7)$$

Несущая способность базы центрально-сжатых колонн на основании принятой методики определяется следующим образом:

$$P_{0\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \ell_i, \quad (8)$$

где  $P_i$  – предельная величина погонной нагрузки для каждого  $i$ -го участка опорной части колонны (полок, ребер, стенки и др.).

Предлагаемая методика позволяет увеличить несущую способность опорных баз на 15-20% по сравнению с традиционными способами расчета или, эквивалентно, уменьшить размеры опорных баз без уменьшения их несущей способности, что особенно важно для компактных узлов стоек рам переменного сечения. Надежность предлагаемой методики апробирована при разработке реальных проектов, построенных и эксплуатируемых на протяжении длительного времени.

18.01.2012

#### Список литературы:

1. Корнев Б. Г., Черниговская Е.И. Расчет плит на упругом основании. Справочное пособие – М.: Гостройиздат, 1962. – 252 с.
2. Палатников Е. А. Прямоугольная плита на упругом основании – М.: Стройиздат, 1964. – 234 с.
3. Горбунов-Посадов М. И. и др. Расчет конструкций на упругом основании – М.: Стройиздат, 1984. – 688 с.
4. Орел Д. О. Совершенствование баз металлических центрально-сжатых колонн на основе учета их взаимодействия с фундаментом: автореф. дис. ... канд. техн. наук – Новосибирск: НИСИ им. В. В. Куйбышева, 1992. – 20 с.
5. Галин Л. А. Контактные задачи упругости и вязкоупругости – М.: Наука, 1980. – 304 с.
6. Вайнберг Д. В. Справочник по прочности, устойчивости и колебаниям пластин – Киев: Будивельник, 1973. – 488 с.

**Сведения об авторе:** Катюшин Виктор Васильевич, президент научно-исследовательской и проектно-строительной фирмы УНИКОН, кандидат технических наук  
650000, Кемерово, пер. Мичурина, 5, 130, 83842-584682, e-mail: firm@uniconst.ru