

## К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО РЕБРИСТОГО ПЕРЕКРЫТИЯ С БАЛОЧНЫМИ ПЛИТАМИ

И. В. Зинкевич, П. В. Кривицкий, Д. Н. Кузьмич, А. А. Невдах

**Введение.** Впервые в 1892 г. французским инженером Ф. Геннебиком (F. Hennebique) была предложена новая система конструкций – монолитное ребристое перекрытие. В отличие от других систем (Меллера, Кенена, Хербста, Сейгварта, Визинтини) [1] перекрытие Ф. Геннебика представляло собой плиту, жестко связанную с системой перекрестных балок (второстепенных и главных), опирающихся на колонны. Продольное рабочее армирование балок осуществлялось отдельными стержнями круглого профиля с отгибами под  $45^\circ$ , выполненными с приближением от пролета к опорам. В качестве поперечного распределительного армирования использовались хомуты из плоского листа (полосы), охватывавшие один или несколько стержней рабочего армирования. Применение в балках хомутов для восприятия поперечных усилий впервые в практику ввел Ф. Геннебик.

**Основные расчетные положения.** В СССР в конце 1950-х гг. широкое распространение для расчета статически неопределимых изгибаемых элементов (балок и плит) получил метод предельного равновесия. В рамках данного метода учитывается перераспределение внутренних усилий за счет образования в конструкциях пластических шарниров.

Традиционно расчет монолитного ребристого перекрытия с балочными плитами производится путем деления его на отдельные элементы – многопролётные неразрезные балки (балочные плиты, второстепенные и главные балки). Применение метода предельного равновесия для расчета элементов перекрытия регламентируется требованиями его компоновки:

- пролеты балочных плит не должны отличаться друг от друга более чем на 20%;

- пролеты второстепенных и главных балок не должны отличаться друг от друга более чем на 10%;

- к балочным относятся плиты при соотношении длинной стороны к короткой  $l_1/l_2 \geq 2$ .

Распределение внутренних усилий (изгибающих моментов) в конструктивных элементах ребристого перекрытия зависит от расположения пролета по длине конструкции и вида закрепления опор:

- в крайнем пролете и на первой промежуточной опоре (при шарнирном опирании балки на крайнюю опору):

$$M = \pm \frac{q \cdot l_{кр}^2}{11},$$

где  $l_{кр}$  – расчетная длина крайнего пролета;

- в средних промежуточных пролетах и опорах:

$$M = \pm \frac{q \cdot l_{cp}^2}{16},$$

где  $l_{cp}$  – расчетная длина среднего пролета;

При этом для балочных плит, «окамененных» по периметру балками, допускается уменьшать величину изгибающих моментов на 20% (метод предельного равновесия без учета распора) при условии  $h_{пл.}/l_{расч.пл.} \geq 1/30$ .

Следует отметить, что второстепенные балки для балочных плит, а главные балки для второстепенных, в расчетах рассматриваются как несмещаемые опоры, и учет пространственной работы не производится. По мнению исследователей [2], данный факт в полной мере не учитывает совместную работу элементов перекрытия и работу его в целом.

**Расчетные модели перекрытия.** В качестве объекта исследования было рассмотрено монолитное ребристое перекрытие с балочными плитами с размерами в плане 16,2x36 м с сеткой осей 5,4x7,2 м. Плита перекрытия принималась толщиной 70 мм. Второстепенные балки располагались поперек перекрытия с шагом 1,8 м с размерами поперечного сечения 20x40(h) см. Вдоль перекрытия с шагом 5,4 м рассматривались главные балки прямоугольного поперечного сечения 30x70(h) см. По периметру здания опорами перекрытия выступали стены, а качестве промежуточных опор – колонны квадратного сечения с размерами 40x40 см. Расчет перекрытия производился на равномерное загрузение плиты распределённой нагрузкой величиной 10 кПа.

Расчет элементов перекрытия производился при помощи вычислительных комплексов «Sofistik» и «Robot Structural Analysis» («RSA»).

В комплексе Sofistik моделирование второстепенных и главных балок производилось при помощи специальных «T-Beam» элементов, которые, согласно предположению разработчиков комплекса, должны способствовать наиболее адекватному моделированию ребристых железобетонных перекрытий. Плита перекрытия моделировалась конечными элементами типа «оболочка». Разбивка сетки конечных элементов производилась автоматически с наибольшим размером конечных элементов -0.3 м. Стены и промежуточные колонны моделировались в виде жестких опор. Конечно-элементная модель представлена на рисунке 1.

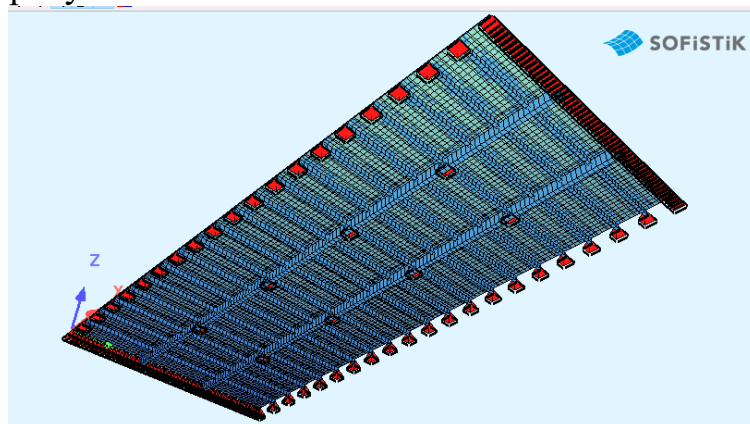


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель перекрытия (БК «Sofistik»)

Распределение изгибающих моментов в плите по результатам статического расчета в ВК «Sofistik» представлено на рисунке 2. Эпюры изгибающих моментов главных и второстепенных балок показаны на рисунке 3.

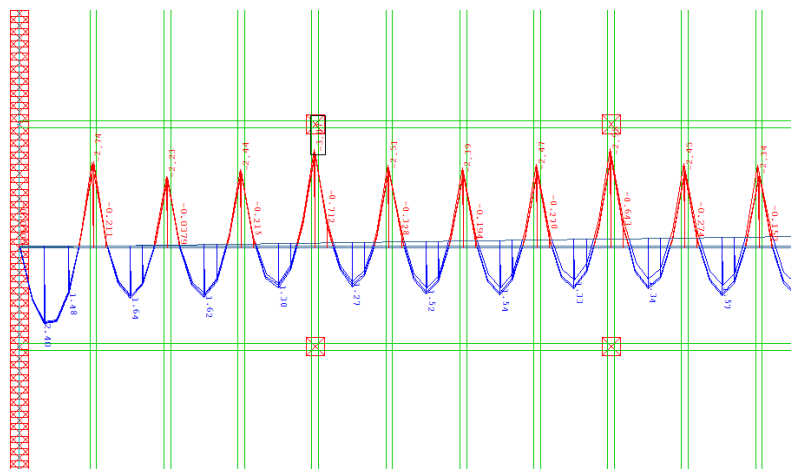


Рисунок 2 – Распределение изгибающих моментов в балочной плите

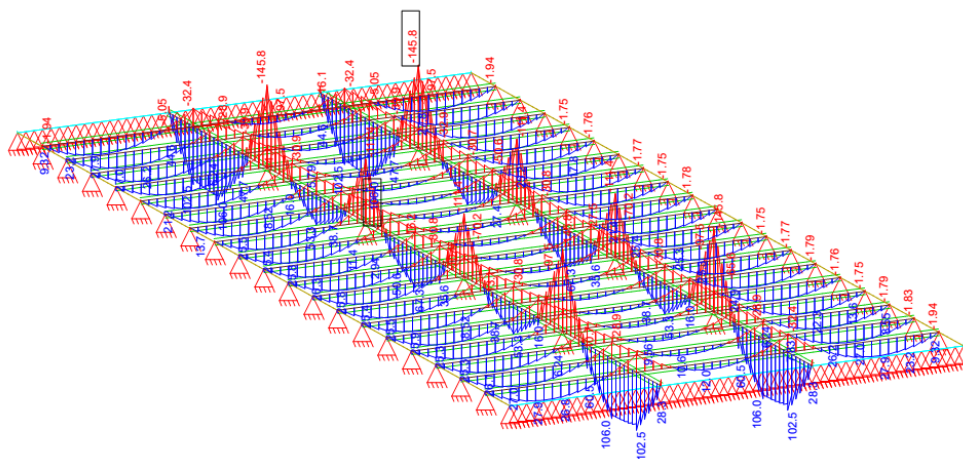


Рисунок 3 – Эпюры изгибающих моментов в балках (ВК «Sofistik»)

Следует отметить, что принятая модель с привязкой центра плиты к центру полки «T-Beam» элементов приводит к появлению в балках продольных сил.

В ВК «Robot Structural Analysis» («RSA») рассматривались две модели. В первой модели плита располагалась по осям балок, во второй – со смещением и выравниванием по верхней грани балок. Балки моделировались стержневыми элементами прямоугольного сечения. Изгибающие моменты в сечениях плиты и в балках представлены на рисунке 4 и 5 соответственно.

Необходимо обратить внимание, что модель 1 более близка к классическому представлению распределения усилий в перекрытии. Продольные силы в балках при этом отсутствуют. В модели № 2 распределение моментов качественно схоже. Однако имеет место уменьшение и моментов в балках и появление в них продольных сил.

Также следует отметить неодинаковые значения моментов в пролетах плиты с увеличением у второстепенных балок, приходящихся на колонны. А также во второстепенных балках с увеличением у балок, приходящихся на колонны.

Рисунок 4 – Изгибающие моменты в плите модель 1 (RSA)

Рисунок 5 – Изгибающие моменты в балках, модель 1 (RSA)

В таблицах 1, 2, 3 приведены результаты сравнительного анализа изгибающих моментов, вычисленных теоретически в упругой стадии и с распределением и при помощи программных комплексов в упругой стадии.

Таблица 1 – Значения изгибающих моментов в плите перекрытия

Значения изгибающих моментов	В крайнем пролете	На крайней опоре	В среднем пролете	На средней опоре
Теоретические в упругой стадии	2.527	-3.402	1.35	-2.7
Теоретические с перераспределением	2.945	-2.945	2.025	-2.025
Sofistik	2.48	-2.74	1.30 (1.62)	-3.01 (-2.39)
Robot	2.81	-1.75	1.96 (1.03)	-2.29 (-3.40)
Robot с выравниванием балок по плите	2.52	-2.64	1.66 (1.47)	-2.29 (-3.24)

Примечание: значения в скобках соответствуют плитам у второстепенных балок, проходящих на колонны

Таблица 2 – Значения изгибающих моментов во второстепенной балке

Значения изгибающих моментов	В крайнем пролете	На первой опоре	В среднем пролете
Теоретические в упругой стадии	41.99	-52.49	13.12
Теоретические с перераспределением	47.72	-47.72	17.9
Sofistik	25.3	-30.8	8.7
Robot	40.11	-49.8	15.21
Robot с выравниванием балок по плите	16.3	-23.6	8.6

Таблица 3 – Значения изгибающих моментов в главной балке

Значения изгибающих моментов	В крайнем пролете	На крайней опоре	В среднем пролете	На средней опоре
Теоретические в упругой стадии	218.35	-293.9	92.37 (128.8)	-221.15
Теоретические с перераспределением	254.2	-254.2	174.9	-174.9
Sofistik	102.5	-145.8	53.3 (67.3)	-111.4
Robot	226.06	-303.5	112.3 (148.7)	-226
Robot с выравниванием балок по плите	105.2	-188.7	68.25 (75.3)	-140.3

*Примечание: значения в скобках приведены для 3 и 4 пролетов главной балки*

### Выводы

1. По результатам сравнительного анализа выявлено значительное расхождение в значениях изгибающих моментов, полученных по вычислительным комплексам и теоретически: в балочных плитах – 8÷94%, во второстепенных балках – 2÷59%, в главных балках – 7÷52%.

2. Модели, наиболее визуально близкие к конструкции перекрытия, могут не всегда адекватно соответствовать действительной работе конструкции.

3. В моделях со смещением плиты с верхней гранью балок и использованием «Т-Beam» элементов наблюдается существенное снижение изгибающих моментов в балках и возникновение в них продольных усилий

4. Вопрос моделирования балочных железобетонных перекрытий требует дальнейшего изучения.

### Список использованных источников

1. Альберт, Ф. Железобетонные сооружения. Краткое общедоступное руководство / Ф. Альберт // Издание Г.В. Гольстена. – СПб, 1910. – С. 128.

2. Карабанов, Б.В. Пространственный расчет монолитных ребристых перекрытий / Б.В. Карабанов // Стройиздат . – 1992. – № 3 : Бетон и железобетон. – С. 25-27.