

# Пример:

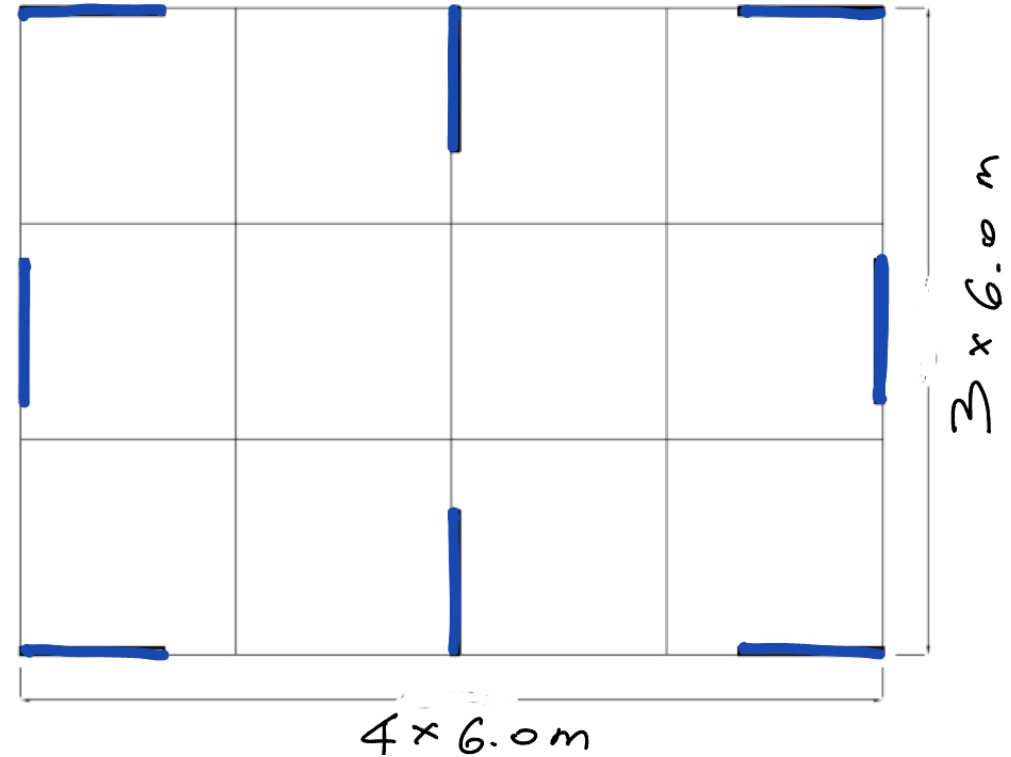
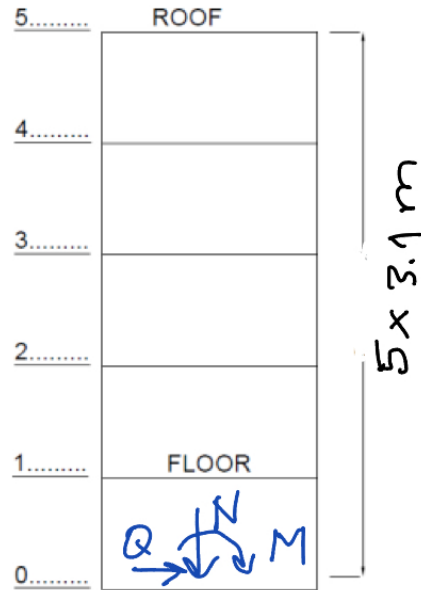
## Расчет ж/б диафрагмы жесткости 5-ти этажного здания

План типового этажа и расчетные нагрузки на диафрагму жесткости.

Коэффициенты сочетаний нагрузок приняты с учетом сочетания вертикальных и сейсмических нагрузок согласно СН КР 20-02:2024.

Размеры диафрагмы:

- Длина  $l_w = 4 \text{ м}$
- Толщина  $b = 0.2 \text{ м}$
- Высота  $h_w = 15.5 \text{ м}$



Внутренние усилия в диафрагме:

- Продольная сила  $N = 2362 \text{ кН}$
- Поперечная сила  $Q = 510 \text{ кН}$
- Изгибающий момент  $M = 5400 \text{ кНм}$

# Этапы расчета

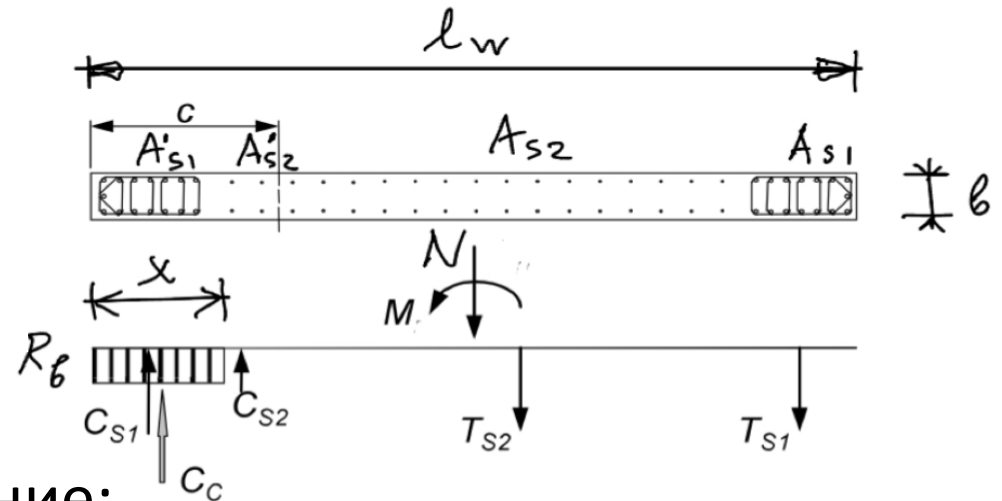
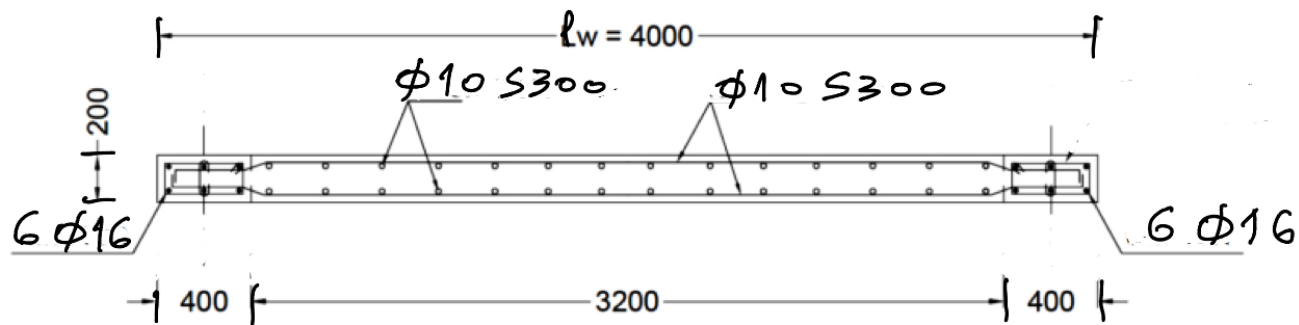
## 1) Расчет на прочность:

- a) Определение предельного изгибающего момента по сочетанию продольной силы и изгиба на основе предполагаемой вертикальной арматуры;
- b) Определение сопротивления поперечной силе [сдвигу] – следует обеспечить горизонтальной арматурой на основе подхода [метода расчета] «Капаситивное проектирование» [Capacity Design];

## 2) Расчет и проверка пластичности

# 1а) Расчет ж/б диафрагмы жесткости на сочетание продольной силы и изгиба

- Следуя процедуре, представленной на лекции;
- Предполагается, что вертикальная арматура определена – согласно стандартного [типового] проектирования и расчета;
- Поперечное сечение диафрагмы жесткости:



- Свойства материалов:

- Арматура класса по прочности на растяжение:

A400 [горизонтальная и вертикальная] и A240 [хомуты]

- Бетон класса по прочности на сжатие – B25

# Расчет ж/б диафрагмы жесткости на сочетание продольной силы и изгиба

## Армирование диафрагмы жесткости:

- Сосредоточенная арматура – граничный элемент: 6Ø16

$$A_{s1} = A'_{s1} = 6 \cdot 201 = 1206 \text{ мм}^2$$

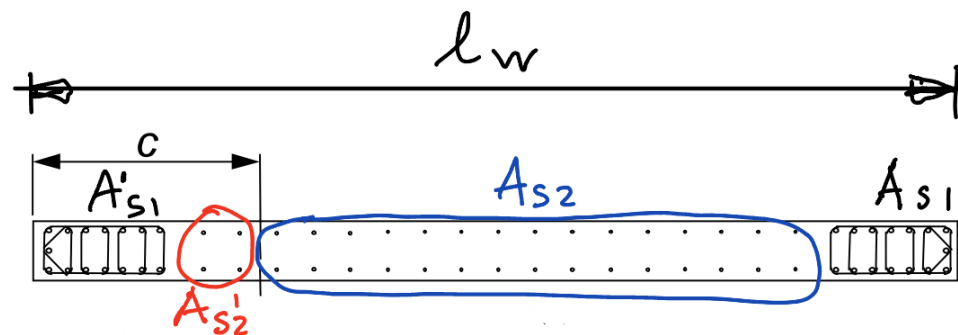
- Распределительная арматура [2 слоя]: 2Ø10 S300

Расчет площади арматуры  $A_d$  [мм<sup>2</sup> на 1 м погонный длины диафрагмы жесткости: мм<sup>2</sup>/м]

$$A_d = (2 \cdot 79 / 300) \cdot 1000 = 526 \text{ мм}^2/\text{м}$$

$A_{s2}$  = часть растягиваемой арматуры

$A'_{s2}$  = часть сжатой арматуры [на расстоянии  $c$  от левого конца]



# Расчет ж/б диафрагмы жесткости на сочетание продольной силы и изгиба

## Свойства материала:

- Нормативные [номинальные] свойства [сопротивления]:

### Арматуры

A400  $R_{s,n} = 400$  МПа

A240  $R_{s,n} = 240$  МПа

### Бетона

B25  $R_{bn} = 18.5$  МПа

- Расчетные свойства [сопротивления]:

### Арматуры

A400  $R_{s,des} = R_{s,n}/1.15 = 347$  МПа

A240  $R_{s,des} = R_{s,n}/1.15 = 208$  МПа

### Бетона

B25  $R_{b,des} = R_{bn}/1.3 = 14.2$  МПа

# Момент сопротивления на сочетание продольной силы и изгиба: Итерационная расчетная процедура

Важно: принимать

Расчет. сопрот. арм-ры:  $R_s = 400/1.15 = 347$  МПа

Расчет. сопрот. бетона:  $R_b = 18.5/1.3 = 14.2$  МПа

1) Предполагается:

$$c = 0.3 \cdot l_w = 0.3 \cdot 4.0 = 1.2 \text{ м} = 1200 \text{ мм}$$

1) Расчет внутренних усилий – применить табличную форму [EXCEL]:

$$C_b = N + T_{S1} + T_{S2} - C_{S1} - C_{S2} = 2654 \text{ кН}$$

3) Расчет  $x$ :

$$x = C_b / (R_b \cdot b) = 934 \text{ мм}$$

4) Расчет  $c$ :

$$c = x / 0.8 = 1168 \text{ мм}$$

Force	Reinforcement	As (mm <sup>2</sup> )	Asx Rs (N)
Cs1	6-16 mm	1206	-418482
Cs2	2-10mm @ 300	420.8	-146017.6
Ts2	2-10mm @ 300	1262.4	438052.8
Ts1	6-16 mm	1206	418482
N			2362000
Cc			-2654035

x= -934.5194

c= -1168.1493

Поскольку разница между предполагаемым значением  $c$  (1200 мм) и расчетным значением (1168 мм) очень мала (менее 5%) – сохраняем  $c = 1200$  мм.

# Расчет ж/б диафрагмы жесткости на сочетание продольной силы и изгиба

Важно: принимать

Расчет. сопрот. арм-ры:  $R_s = 400/1.15 = 347$  МПа

Расчет. сопрот. бетона:  $R_b = 18.5/1.3 = 14.2$  МПа

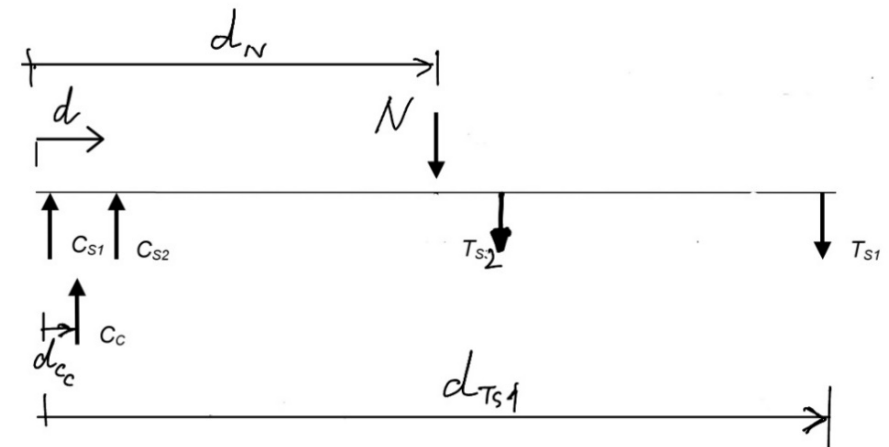
4) Расчет предельного изгибающего момента от сочетания продольной силы  $N = 2362$  кН и изгиба:

$$M_{ult} = N \times d_N + T_{s1} \times d_{ts1} + T_{s2} \times d_{ts2} - C_{s1} \times d_{cs1} - C_{s2} \times d_{cs2} - C_c \times d_{cc}$$

Force	Reinforcement	As (mm <sup>2</sup> )	Asx Rs (N)	d (mm)	AsRxs d (N-mm)
Cs1	6-16 mm	1206	-418482	200	-83696400
Cs2	2-10mm @ 300	420.8	-146017.6	800	-116814080
Ts2	2-10mm @ 300	1262.4	438052.8	2200	963716160
Ts1	6-16 mm	1206	418482	3800	1590231600
N			2362000	2000	4724000000
Cc			-2654035	600	-1592421120
$M_{ult}$	<b>5485 кНм</b>				<b>5485.01616</b>

$$M_{ult} = 5485 \text{ кНм} > M = 5400 \text{ кНм}$$

Предложенная вертикальная арматура приемлема [допустима] согласно расчету по прочности.



# 1b) Расчет ж/б диафрагмы жесткости на поперечную силу [расчетную]

- Расчет  $M_{ult}$  на основе нормативных свойств [сопротивлений] материалов – применяя ту же процедуру

$$M_{ult} = M_n$$

Арматура А400  $R_{s,n} = 400$  МПа

Бетон В25  $R_{bn} = 18.5$  МПа

$$M_n = 6208 \text{ кНм}$$

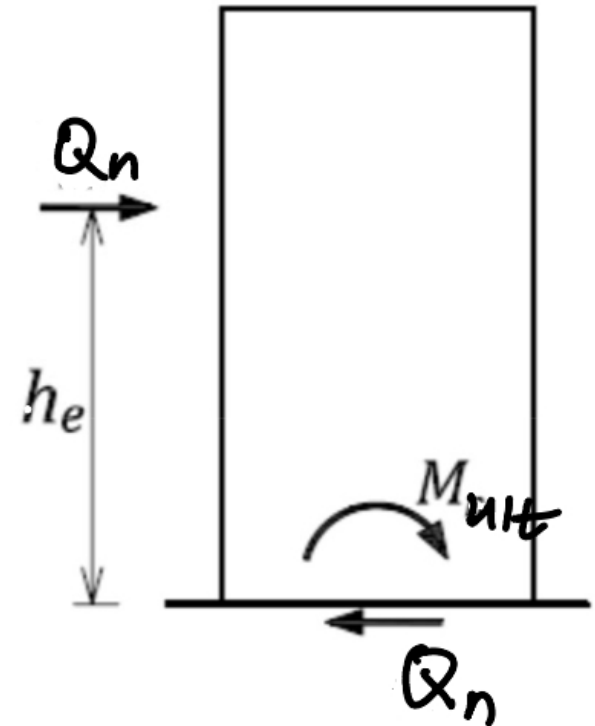
- Расчетная поперечная сила -  $Q_n$  соответствующая номинальному изгибающему моменту -  $M_n$ :

$$Q_n = M_n / h_e$$

и

$$h_e = 2h_w / 3 = 2 \cdot 15.5 / 3 = 10.3 \text{ м}$$

$$Q_n = 6208 / 10.3 = 603 \text{ кН}$$





# Расчет ж/б диафрагмы жесткости на поперечную силу [расчетную]

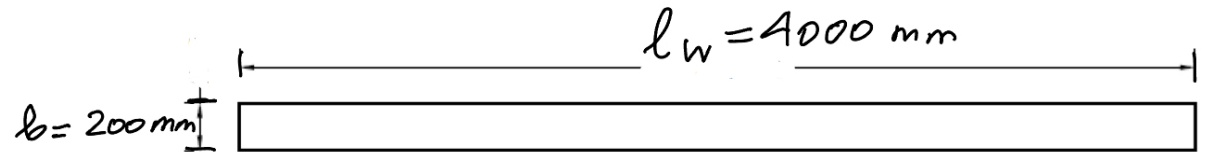
Предельная поперечная сила ( $Q_{ult}$ ) Ж/Б диафрагмы жесткости должна быть больше или равна:

- 1)  $Q = 510$  кН - поперечной силе, полученной в результате расчета на сейсмические воздействия (ПК ЛИРА), и
- 2)  $Q_n = 603$  кН - поперечной силе, соответствующей предельному изгибающему моменту для сечения диафрагмы жесткости, предполагая нормативное [номинальное] сопротивление материала [бетона и стали].

$$Q_{ult} = 603 \text{ кН}$$

# Процедура расчета на поперечную силу ж/б диафрагмы жесткости

- Предельная поперечная сила:



$$Q_{ult} = Q_b + Q_{sw}$$

- Сопротивление поперечной силе - бетоном:

$$Q_b = 0.5 \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0 = 0.5 \cdot 1.05 \cdot 200 \cdot (0.8 \cdot 4000) = 336 \text{ кН}$$

$R_{bt} = 1.05 \text{ МПа}$  – расчетное значение сопротивления бетона осевому растяжению для предельных состояний первой группы при классе бетона по прочности на сжатие В25

$$b = 200 \text{ мм} \quad h_0 = 0.8l_w$$

- Требуемое сопротивление поперечной силе – поперечной арматурой:

$$Q_{sw} = Q_{ult} - Q_b$$

$$Q_{sw} = 603 - 336 = 267 \text{ кН}$$

# Процедура расчета на поперечную силу ж/б диафрагмы жесткости

- Расчет сопротивления поперечной силе - горизонтальной арматурой:

Предполагается горизонтальная арматура [2 слоя]: 2Ø10 S300

$$\varphi_{sw} = 0.75$$

$$C = h_o = 0.8l_w = 3200 \text{ мм}$$

$$R_{sw} = 280 \text{ МПа [арматура А400]}$$

$$\underline{2\text{Ø}10}: A_{sw} = \frac{\pi(10)^2}{4} \cdot 2 = 158 \text{ мм}^2$$

$$q_{sw} = \frac{280 \cdot 158}{300} = 147 \text{ Н/мм}$$

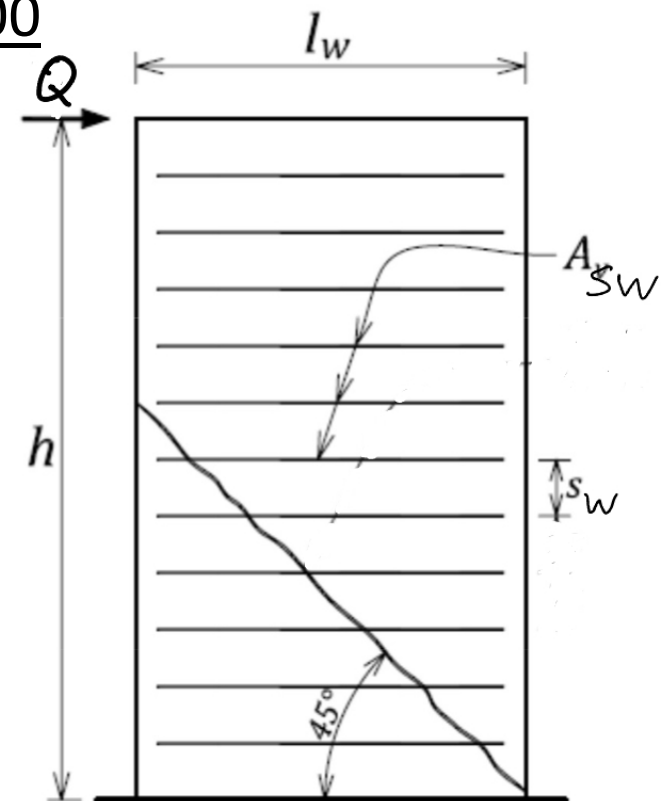
$$Q_{sw} = 0.75 \cdot 147 \cdot 3200 = 353 \text{ кН}$$

$$Q_{ult} = Q_b + Q_{sw} = 336 + 353 = 690 \text{ кН} > Q = 603 \text{ кН}$$

$$Q_{sw} = \varphi_{sw} \cdot q_{sw} \cdot C$$

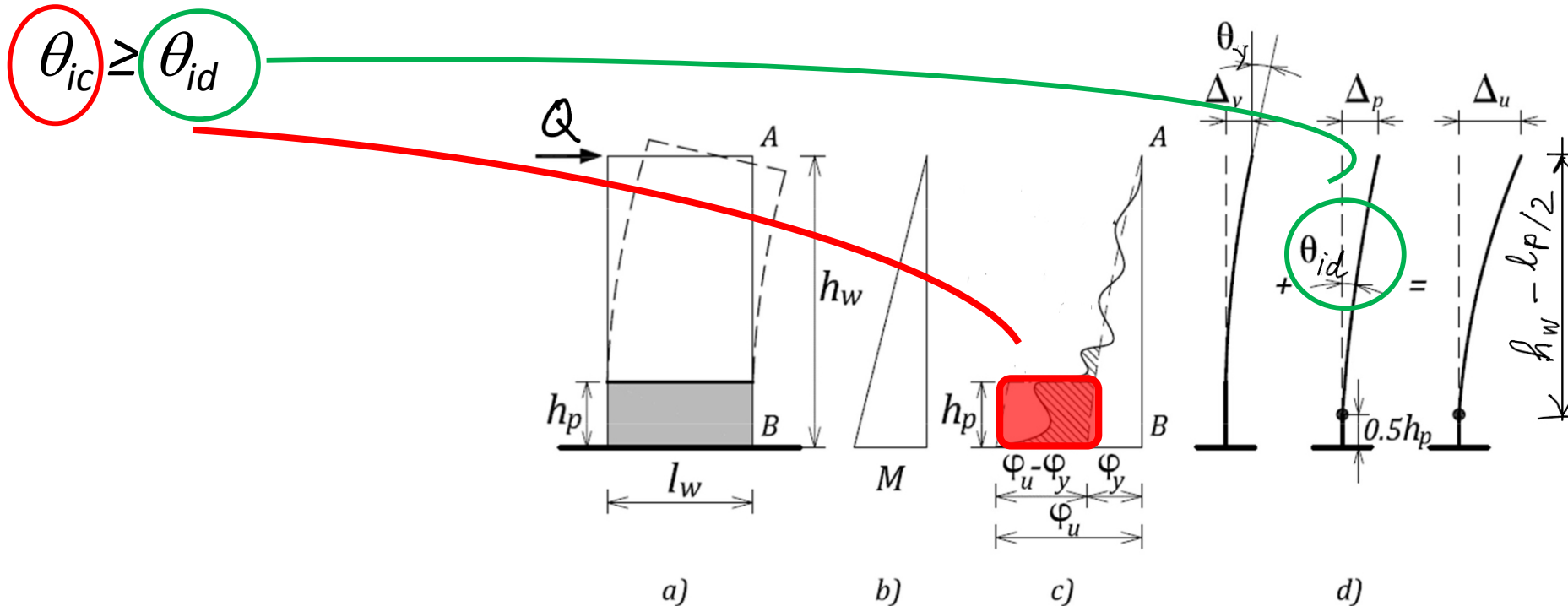
$$q_{sw} = \frac{R_{sw} \cdot A_{sw}}{s_w}$$

$$s_w = 300 \text{ мм}$$



## 2) Проверка пластичности Ж/Б диафрагмы жесткости

- По проверке пластичности следует доказать, что неупругая крутильная способность пластического шарнира больше, чем его неупругое расчетное кручение,  $\theta_{id}$ , то есть



# Проверка пластичности Ж/Б диафрагмы жесткости

1. Основная цель проверки пластичности:

$$\theta_{ic} \geq \theta_{id}$$

т.е., неупругая крутильная способность  $\geq$  неупругое крутильное перемещение

2. Расчет неупругого крутильного перемещения ( $\theta_{id}$ ):

$$\theta_{id} = \frac{\Delta_{id}}{\left(h_w - \frac{l_w}{2}\right)}$$

Где

$$\Delta_{id} = \Delta_d - \Delta_y$$

Расчетное перемещение:

$$\Delta_d = \Delta_e \cdot q$$

$\Delta_e$  - упругое перемещение, соответствующее сейсмической силе Q, которое может быть рассчитано в ПК ЛИРА или [приблизительно] по методам ручных расчетов.

# Проверка пластичности Ж/Б диафрагмы жесткости

Приблизительно  $\Delta_e$  можно рассчитать как

$$\Delta_e = \frac{Q(h_e)^2}{6E_c I} (3h_w - h_e)$$

$$Q = 510 \text{ кН}$$

Момент инерции сечения диафрагмы жесткости

$$I = \frac{200 \cdot 4,000^3}{12} = 1.067 \cdot 10^{12} \text{ мм}^4$$

Предполагаемый модуль упругости бетона:

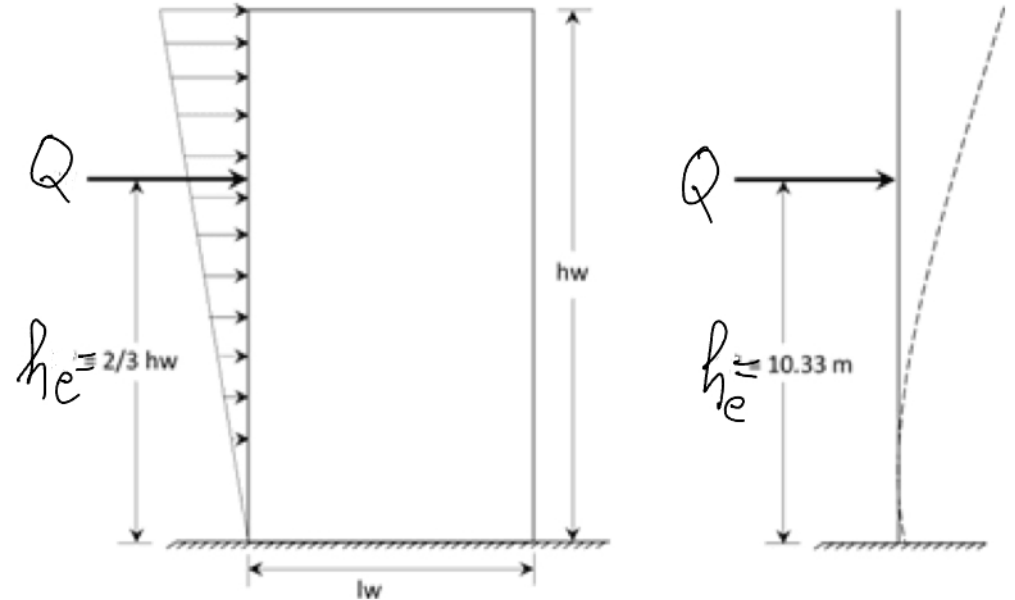
$$E_c = 25,000 \text{ МПа}$$

Эффективная высота:

$$h_e = 2/3 h_w = 10333 \text{ мм}$$

$$\Delta_e = \frac{Q(h_e)^2}{6E_c I} (3h_w - h_e) = \frac{510 \cdot 10^3 (10333)^2}{6 \cdot 25,000 \cdot 1.067 \cdot 10^{12}} \cdot (3 \cdot 15,500 - 10,333)$$

$$\Delta_e = 12.3 \text{ мм}$$



# Проверка пластичности Ж/Б диафрагмы жесткости

Предполагается, что

$$\Delta_y = \Delta_e = 12.3 \text{ мм}$$

$$\Delta_d = \Delta_e \cdot q = 12.3 \cdot 4.0 = 49.2 \text{ мм}$$

Следовательно:

$$\Delta_{id} = \Delta_d - \Delta_y = 49.2 - 12.3 = 37 \text{ мм}$$

$$\theta_{id} = \frac{\Delta_{id}}{\left(h_w - \frac{l_w}{2}\right)} = \frac{37}{\left(15,500 - \frac{4,000}{2}\right)}$$

$$\theta_{id} = 2.74 \cdot 10^{-3}$$

# Проверка пластичности Ж/Б диафрагмы жесткости

3. Расчет неупругой крутильной способности ( $\theta_{ic}$ ):

$$\theta_{ic} = \frac{\varepsilon_{cu} l_w}{2c} - 0.002$$

Где

$c = 1200$  мм - глубина нейтральной оси [рассчитанная ранее по этапу 1а]

$$\theta_{ic} = \frac{0.0035 \cdot 4.000}{2 \cdot 1200} - 0.002$$

$$\theta_{ic} = 3.83 \cdot 10^{-3}$$

4. Проверка требований по пластичности:

$$\theta_{ic} (3.83 \cdot 10^{-3}) > \theta_{id} (2.74 \cdot 10^{-3})$$

Можно сделать вывод, что диафрагма жесткости соответствует требованиям пластичности.