

Международная научно-практическая конференция
*«ВИМ-проектирование и МКЭ-анализ при проектировании
и эксплуатации зданий и сооружений»*

(г. Минск, БНТУ – 02 ноября 2018)

УДК 624.072.31

Особенности определения грузоподъемности одностолбчатых опор

Гусев Д.Е.

ООО «Экомост»,

г. Минск, Республика Беларусь

Опора путепровода на автодороге М10 у г.Лунинец



Опора путепровода на автодороге М10 у г.Лунинец



Опора путепровода на автодороге М10 у г.Калинковичи



Опора моста через р.Россь на автодороге Р78



При определении грузоподъемности мостов часто игнорируется работа опор, а грузоподъемность рассчитывается только для пролетных строений. Часто такой подход оправдан, так как грузоподъемность большинства типов опор оказывается выше грузоподъемности пролетного строения, а определение грузоподъемности опор связано с некоторыми трудностями.

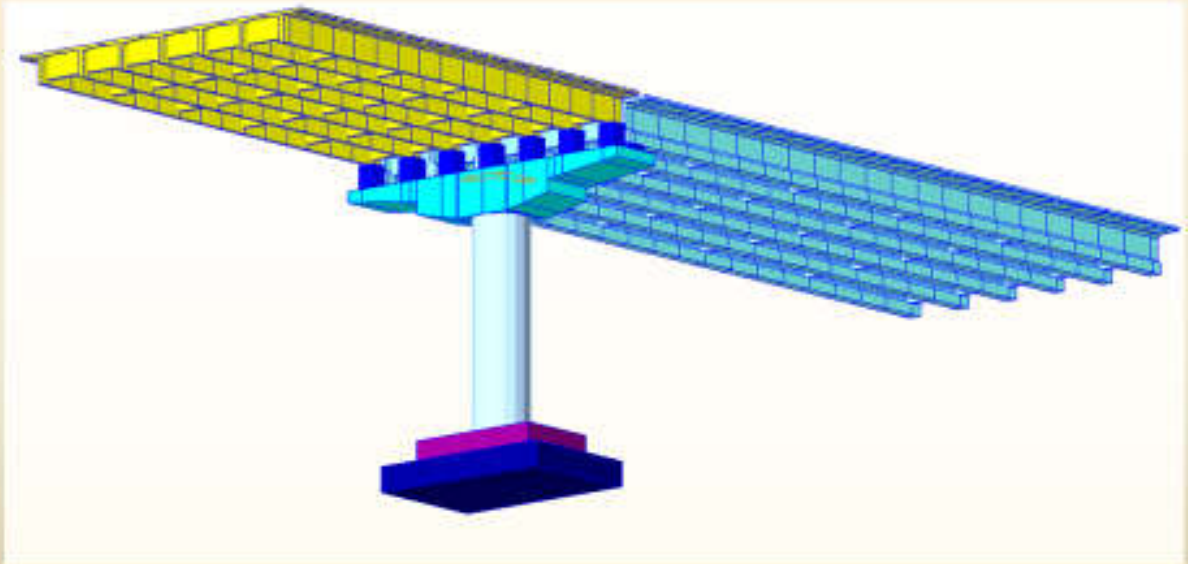
Грузоподъемность некоторых элементов опор практически невозможно определить с использованием методики, заложенной в ТКП 479 из-за того, что на них действуют не только вертикальная подвижная нагрузка, но прочие временные нагрузки (тормозная, поперечный удар, ледовая и пр.).

Однако, участвовавшие случаи отказов одностолбчатых опор обуславливают необходимость определения их грузоподъемности.

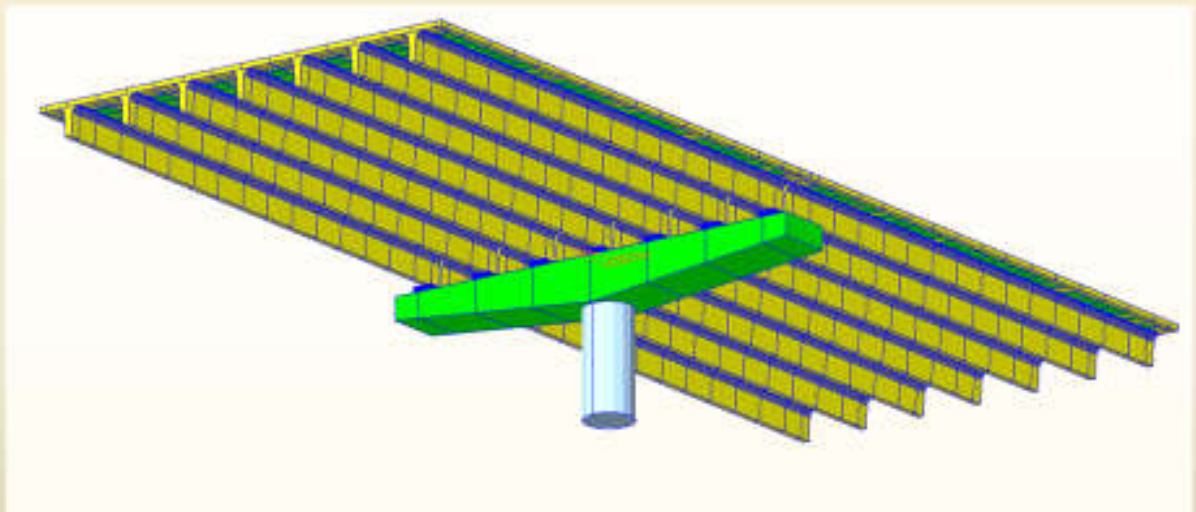
Одностолбчатые опоры являются конструкциями с пониженной живучестью. В составе опоры имеется один элемент – стойка, при выходе из строя которой выходит из строя вся опора и оба опирающиеся на нее пролетные строения.

При расчете такой опоры в расчетную схему целесообразно вводить не только саму опору, но и пролетные строения.

Расчетная схема промежуточной опоры путепроводов на 189 и 190км
автодороги М10



Расчетная схема промежуточной опоры моста через р.Рось на 53км
автодороги Р78



Определение усилий на опору от постоянных и временных нагрузок не представляет особого труда, особенно с использованием современных программных комплексов, в частности MIDAS CIVIL 2018. Усилия от временных вертикальных нагрузок могут быть определены автоматически с использованием возможностей ПК. Сбор прочих временных нагрузок производится вручную и прикладывается к элементам опор в местах, регламентируемых нормами.

Определить грузоподъемность ригеля промежуточной опоры существенного труда не представляет, так как на его работу в основном оказывают влияние постоянные и временные вертикальные нагрузки. При определении грузоподъемности ригеля при отсутствии существенных дефектов в нем может быть использована методика ТКП 479-2011, а предельные усилия могут быть определены по ТКП 45 3.03-232-2011.

Армирование и усилия по длине ригеля изменяются, поэтому определение грузоподъемности для него необходимо произвести для каждого сечения, где происходит изменение армирования.

При наличии силовых вертикальных трещин в ригеле предельные усилия могут быть скорректированы по ширине раскрытия и шагу трещин.

ТКП 479-2013

В соответствии с этим формулы для определения классов грузоподъемности имеют следующий вид:

1) автомобильная нагрузка в составе колонн:
 – первая группа предельных состояний (прочность, устойчивость) без заезда нагрузки на полосы безопасности и с учетом толпы на тротуарах

$$K_{k1} = \frac{[S]_{k1}}{Z_{k1}}; \quad (1)$$

– то же (выносливость)

$$K_{k1} = \frac{[S]_{k1}}{Z_{k1}}; \quad (2)$$

– первая группа предельных состояний (прочность, устойчивость) с возможностью заезда нагрузки на полосы безопасности и без учета толпы на тротуарах

$$K_{k2} = \frac{[S]_{k2}}{Z_{k2}}; \quad (3)$$

– вторая группа предельных состояний (деформации, трещиностойкость)

$$K_k = \frac{[S]_k}{Z_k}; \quad (4)$$

2) одиночная тяжеловесная нагрузка:
 – первая группа предельных состояний (прочность, устойчивость)

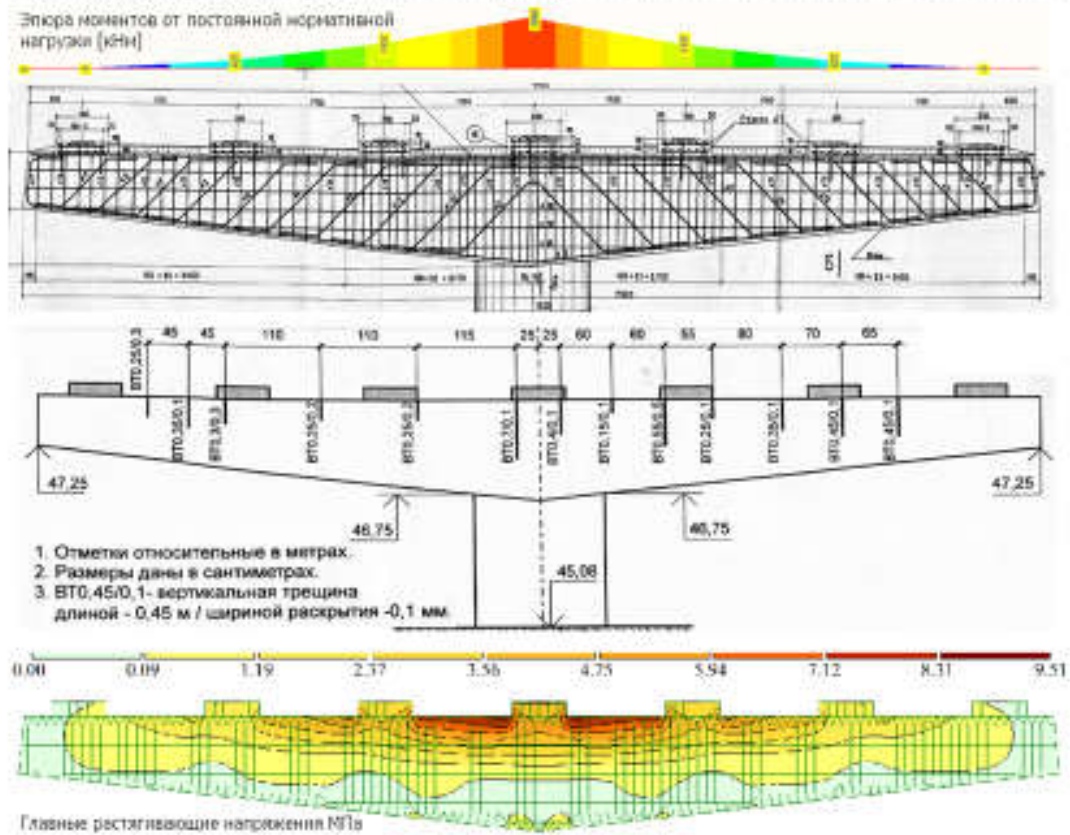
$$K_{-1} = \frac{[S_{-1}]}{Z_{-1}}; \quad (5)$$

– вторая группа предельных состояний (деформации, трещиностойкость)

$$K_{-k} = \frac{[S_{-k}]}{Z_{-k}}; \quad (6)$$

Порядок определения грузоподъемности по ТКП 479

Конструкция ригеля промежуточной опоры и картина трещинообразования в нем



Определение предельных усилий по ТКП 45-3.03-232-2011

Расчет вертикального сечения по прочности на действии наибольшего момента и изгибающей около по ТКП 45-3.03-232-2011

Расчет сечения 1-1а по оси

Высота блока, h 134 м
 Высота ядра h_0 134 м
 Расчетная ширина ядра b_0 130 м
 Ширина ребра, b 130 м
 Расчетное сопротивление бетона, R_b 110 МПа

Параметры арматуры	Ребра					
	1	2	3	4	5	6
Расчетная арматура						
Диаметр, м	0,03	0,032				
Количество в ряду	13	11				
От чего ряда до расчетной грани, м	0,047	0,081				
Расчетное сопротивление, МПа	270	270				
Сетка арматуры						
Диаметр, м	0,03					
Кол-во стержней	13					
От чего ряда до расчетной грани, м	0,044					
Расчетное сопротивление, МПа	270					

Параметры расчетной арматуры	Ребра					
	1	2	3	4	5	6
Коэффициент условий работы, $\gamma_{\text{д}}$	1,00	1,00				

Расчетные параметры	Обозначение	Единица	Значение
Средняя расчетная арматура	σ_s	М	0,04
Средняя расчетная арматура	σ'_s	М	0,04
Рабочая высота сечения	$h_{\text{р}}$	М	0,376
Расчетное сопротивление расчетной арматуры	R_s	МПа	270
Предельная площадь расчетной арматуры	$A_{s, \text{л}}$	см ²	176,84
Расчетное сопротивление расчетной арматуры	R'_s	МПа	270
Предельная площадь расчетной арматуры	$A'_{s, \text{л}}$	см ²	11,97
Высота расчетной зоны бетона	x	М	0,123
Предельный момент в сечении	M	кНм	4219

$$M \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_{s, \text{л}} (h_{01} - a'_s)$$

Расчет на трещиностойкость вертикального сечения в среднем пролете

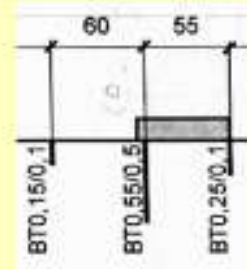
* Обозначения в таблице соответствуют ТКП 45-3.03-232

Расчет сечения 1-1а по оси

Описание параметров	Обозначение по ТКП	Единица измерения	Значение
Площадь зоны взаимодействия	A_w	см ²	4081
Радиус арматуры	r_w	см	77,6
Коэффициент раскрытия трещин	ψ	-	13,13
Макс. усадка арматуры	ϵ	Мкм	210000
Предельная ширина раскрытия трещин	d	см	0,81
Условное напряжение в расчетной арматуре, в пред. состоянии	$\sigma_{s, \text{л}}$	МПа	417
Предельное напряжение в расчетной арматуре II группы пред. состояния	$\sigma_{s, \text{л}}^*$	МПа	300
Минимальное из двух предельных	$\sigma_{s, \text{л}}^*$	МПа	300
Высота сечения	h	см	104
Уменьшенная площадь расчетной арматуры	$A_{s, \text{л}}^*$	см ²	176,84
Площадь изогнутой части сар	A	см	86,5
Высота расчетной зоны бетона	x	см	12,1
Расчетная зона сар в доп. ряд арматуры	a_0	см	47
Расчетная зона сар до 1-го ряда расчетной арматуры	a	см	8,8
Расчетная зона сар до 2-го ряда расчетной зоны бетона	$(h - a_0)$	см	77,2
Расчетная зона сар до 2-го ряда расчетной зоны бетона	$(h - a)$	см	15,3
Предельный изгибающий момент при расчете на трещиностойкость	$M_{\text{т}}$	кНм	4186

$$\sigma_{\text{т}} = \frac{\sigma}{E} \psi \leq \Delta_{\text{т}}$$

Определение предельных моментов с учетом трещинообразования



Ширина раскрытия трещин $a_{cr} = 0,5 \text{ мм} = 0,0005 \text{ м}$

Шаг трещин $S_{cr} = (0,6 + 0,55) / 2 = 0,575 \text{ м}$

Модуль упругости арматуры $E = 196000 \text{ МПа}$

Относительная деформация арматуры на участке с трещиной

$$\varepsilon = a_{cr} / S_{cr} = 0,0005 / 0,575 = 0,00087$$

Напряжение в арматуре от постоянной нагрузки $\sigma = \varepsilon E = 0,00087 \times 196000 = 170 \text{ МПа}$

Изгибающий момент в сечении от постоянной нагрузки – $M = 2235 \text{ кНм}$

Нормативное сопротивление арматуры $A_{II} - 300 \text{ МПа}$

Расчетное сопротивление арматуры $A_{II} - 270 \text{ МПа}$

Предельный изгибающий момент по прочности – $270 / 170 \times 2235 = 3549 \text{ кН м}$

Предельный изгибающий момент по трещиностойкости – $300 / 170 \times 2235 = 3944 \text{ кН м}$

Эти же значения без учета раскрытия трещин – по прочности – 4229 кН м
по трещиностойкости – 4490 кН м

Определение классов сечений ригеля

Испытание колонны в сечении ригеля промощенной опоры

Валка	Нагрузка	Моменты кНм
опорная	A1.1 (с трещинами)	-124
с=0,5м	A1.1 (с трещинами)	-124
с=0,8м	A1.1 (с трещинами)	-124
с=1,0м	A1.1 (с трещинами)	-162
опорная	A1.2 (с трещинами)	-178
с=0,5м	A1.2 (с трещинами)	-168
с=0,8м	A1.2 (с трещинами)	-175
с=1,0м	A1.2 (с трещинами)	-142
опорная	BE.1 (трещины)	-19,9
с=0,5м	BE.1 (трещины)	-17,9
с=0,8м	BE.1 (трещины)	-16,5
с=1,0м	BE.1 (трещины)	-14,8
опорная	тощая (трещины)	-12,6
с=0,5м	тощая (трещины)	-11,7
с=0,8м	тощая (трещины)	-10,9
с=1,0м	тощая (трещины)	-10,0
опорная	A1.1 (с раскрытиями)	-81
с=0,5м	A1.1 (с раскрытиями)	-81
с=0,8м	A1.1 (с раскрытиями)	-81
с=1,0м	A1.1 (с раскрытиями)	-76
опорная	BE.1 (вертикали)	-17,1
с=0,5м	BE.1 (вертикали)	-16,2
с=0,8м	BE.1 (вертикали)	-15,0
с=1,0м	BE.1 (вертикали)	-13,4
опорная	тощая (вертикали)	-10,1
с=0,5м	тощая (вертикали)	-8,9
с=0,8м	тощая (вертикали)	-9,1
с=1,0м	тощая (вертикали)	-8,7
опорная	Без трещин	-341,7
с=0,5м	Без трещин	-329,9
с=0,8м	Без трещин	-301,1
с=1,0м	Без трещин	-344,0
опорная	Без раскрытия	-372,8
с=0,5м	Без раскрытия	-350,2
с=0,8м	Без раскрытия	-329,8
с=1,0м	Без раскрытия	-389,0

Определение классов прочности без учета трещин

Валка	Назначение параметра	Значение
опорная	Предельный момент по прочности	-180,1
с=0,5м		-270
с=0,8м		-310,1
с=1,0м		-420
опорная	Класс АII по прочности I случай	28
с=0,5м		31
с=0,8м		38
с=1,0м		52
опорная	Класс АII по прочности II случай	32
с=0,5м		32
с=0,8м		33
с=1,0м		36
опорная	Класс BE по прочности	304
с=0,5м		305
с=0,8м		308
с=1,0м		31
опорная	Предельный момент по трещиностойкости	-180,1
с=0,5м		-260
с=0,8м		-320
с=1,0м		-440
опорная	Класс АII по трещиностойкости I случай	41
с=0,5м		38
с=0,8м		33
с=1,0м		31
опорная	Класс BE по трещиностойкости	317
с=0,5м		311
с=0,8м		304
с=1,0м		33

Определение классов прочности с учетом трещин

Валка	Назначение параметра	Значение
опорная	Предельный момент по прочности	-180,1
с=0,5м		-270
с=0,8м		-310,1
с=1,0м		-420
опорная	Класс АII по прочности I случай	28
с=0,5м		31
с=0,8м		38
с=1,0м		52
опорная	Класс АII по прочности II случай	32
с=0,5м		32
с=0,8м		33
с=1,0м		36
опорная	Класс BE по прочности	304
с=0,5м		305
с=0,8м		308
с=1,0м		31
опорная	Предельный момент по трещиностойкости	-180,1
с=0,5м		-260
с=0,8м		-320
с=1,0м		-440
опорная	Класс АII по трещиностойкости I случай	42
с=0,5м		38
с=0,8м		32
с=1,0м		31
опорная	Класс BE по трещиностойкости	317
с=0,5м		311
с=0,8м		304
с=1,0м		33

Сочетания временных и постоянных нагрузок для расчета столба опоры

LIST OF LOAD COMBINATIONS

NO.	NAME	AC1190	TYPE	LOADS(1)(760700) +	LOADS(2)(760700)
1	0 1 гр	Первая группа BC			
2	0+1+1 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(1,000) +	0x0x1 1(1,000)
3	0+0 1 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(1,000)	
4	0+0 0 гр	Первая группа BC		00110 1(1,000)	
5	0+0+0	Первая группа BC			
6	0+0+1 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700) +	015 2x1 1(0,800)
7	0+0+1 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,800) +	015 2x1 1(0,800)
8	0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700) +	015 2x1 1(0,700)
9	0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700) +	015 2x1 1(0,700)
10	0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700)	
11	0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,800)	
12	0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,800)	
13	0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,800)	
14	0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700)	
15	0+1+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700) +	015 2x1 1(0,700)
16	0+1+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700) +	015 2x1 1(0,700)
17	0+0+0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700) +	015 2x1 1(0,700)
18	0+0+0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700) +	015 2x1 1(0,700)
19	0+0+0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700) +	015 2x1 1(0,700)
20	0+0+0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700)	
21	0+0+0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700)	

15	0+1+0+0 гр	Первая группа BC	Дополнить	Торсионная 2 гр(0,800) +	015 2x1 1(0,700)
16	0+1+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,800) +	015 2x1 1(0,800)
17	0+0+0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,800) +	015 2x1 1(0,800)
18	0+0+0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,800) +	015 2x1 1(0,800)
19	0+0+0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,800) +	015 2x1 1(0,800)
20	0+0+0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700) +	015 2x1 1(0,700)
21	0+0+0+0+0 гр	Первая группа BC		015 2x1 1(0,700) +	015 2x1 1(0,700)

Задание параметров для расчета столба (колонны) в ПК MIDAS CIVIL 2018

Виде данные параметры для сечения колонны

ID	Имя	Сечение
1	колонна	0
2	00	0

Данные сечения:

Диаметр: 400

Радиус: 200

Толщина: 10

Сек	Имя	Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона	Плотность
1	00	21000	0.2	25000

Выбор материала:

Имя: 001 (ПК)

Модуль Юнга: 21000

Коэффициент Пуассона: 0.2

Плотность: 25000

Расчет столба опоры по прочности и трещиностойкости по ТКП 45-3.03-232-2011

Расчет круглого железобетонного столба по прочности и устойчивости при несимметричном сжатии при стандартном равномерном круглом армировании по ТКП 45-3.03-232-2011

Исходные параметры	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Диаметр столба	D	мм	150
Площадь арматуры по кольцу	A_s	мм ²	8077
Притяжка арматуры	σ_s	мм	0.070
Расчетное сопротивление арматуры	$R_{s,calc}$	МПа	370
Расчетное сопротивление бетона	R_b	МПа	33
Модуль упругости бетона	E_b	МПа	30000
Модуль упругости арматуры	E_s	МПа	200000
Степень армирования	μ	мм	1.8
Нормальная сила от постоянной нагрузки	N_{sp}	кН	391.6
Нормальная сила от подвижной нагрузки	N_{hp}	кН	848.4
Нормальная сила в сечении	N	кН	1240.0
Изгибающий момент от постоянной нагрузки	M_{sp}	кН·м	0
Суммарный изгибающий момент в сечении	M	кН·м	3029
Площадь бетонного сечения	A_{bet}	мм ²	1.708
Момент инерции бетонного сечения	J_{bet}	мм ⁴	8.1481
Площадь арматурного сечения	A_{ar}	мм ²	1.470
Момент инерции арматурного сечения	J_{ar}	мм ⁴	8.1811
Радиус инерции	i	мм	8.109
Момент сопротивления	W_x	мм ³	8.2483
Длина расчетная	l	мм	8.1738
Начальная эксцентриситет	e_0	мм	0.78
Коэффициент	β		1.00
Коэффициент	α		0.68
Кривизна оси в сечении	N_{sp}	кН	0.4898
Коэффициент	σ		1.00
Расчетный эксцентриситет	e_{calc}	мм	0.78
Расстояние от оси до расчетной арматуры	r_s	мм	1.34
Расчетная длина элемента	l_0	мм	1.8
Устойчивость элемента	λ		17
Эквивалентный эксцентриситет	e_{eq}		4.78
Коэффициент	β_0	расчет по формуле	
Коэффициент	β	расчет по формуле	
Коэффициент продольной изгиба	η	расчет по формуле	
Поправка сила на устойчивость	N_{st}	кН	расчет по формуле
Поправка сила на прочность	N_{st}	кН	4296
Устойчивость элемента			Проверка соблюдена

Расчет круглого железобетонного столба по трещиностойкости при несимметричном сжатии при стандартном равномерном круглом армировании по ТКП 45-3.03-232-2011

Исходные параметры	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Диаметр столба	D	мм	150
Площадь арматуры по кольцу	A_s	мм ²	8077
Притяжка арматуры	σ_s	мм	0.070
Расчетное сопротивление бетона	$R_{s,calc}$	МПа	370
Модуль упругости бетона	E_b	МПа	30000
Модуль упругости арматуры	E_s	МПа	200000
Нормальная сила по Sp, St	N	кН	1240
Суммарный изгибающий момент по Sp, St	M	кН·м	3029
Площадь бетонного сечения	A_{bet}	мм ²	1.708
Момент инерции бетонного сечения	J_{bet}	мм ⁴	8.1481
Площадь арматурного сечения	A_{ar}	мм ²	1.470
Момент инерции арматурного сечения	J_{ar}	мм ⁴	8.1811
Момент сопротивления сечения	W_x	мм ³	8.2483
Момент сопротивления при радиусе инерции	W_x	мм ³	8.2712
Радиус инерции	i	мм	8.109
Вектор оси инерции	i_x	мм	0.000
Площадь зоны инерции	A_i	мм ²	0.9490
Вектор сжатия в зоне инерции	σ		1
Диаметр стержней	d	мм	8.00
Коэффициент	β		1.00
Расчетный эксцентриситет	e_{calc}	мм	0.4033
Коэффициент радиальной трещины	α		1.218
Расчетное напряжение в арматуре	σ_s	МПа	не определено
Предельная ширина раскрытия трещины	s_{lim}	мм	0.301
Фактическая ширина раскрытия трещины	s_{act}	мм	не определено (сравнение)
Фактическая ширина раскрытия трещины	s_{act}	мм	не определено (сравнение)
Расчетная ширина раскрытия трещины при расчете по формуле			проверка соблюдена
Максимальное значение раскрытия трещины в бетоне	σ_b	МПа	5.2
Расчетная ширина раскрытия трещины при расчете по формуле			проверка соблюдена

Назначение режимов движения по сооружению с одностолбчатыми опорами при ограниченной грузоподъемности.

Неконтролируемый режим движения в случае недостаточной грузоподъемности может быть назначен по двум вариантам.

Вариант 1- ограничение общей массы транспортного средства при сохранении двухполосного движения на мосту, которая вычисляется по п.5.9 ТКП 479-2011.

$$M = 33 \times [K]/K. \text{ Для нашего примера } [K] = 6. M = 33 \times 6 / 11 = 18 \text{ т.}$$

Данный режим, хотя и сохраняет возможность двухполосного движения по сооружению, но ограничивает общую массу транспортного средства и не всегда устраивает эксплуатирующие организации. Может быть применен на местных дорогах, где интенсивность движения невысокая, а обращающийся транспорт не превышает установленную массу.

Вариант 2- организация на мосту одностороннего движения по полосе в середине проезжей части без ограничения грузоподъемности знаками.

Данный режим более предпочтителен для дорог общего пользования республиканского значения и магистралей. При невысокой интенсивности и небольшой длине моста может быть организован установкой пары знаков 2.6.1 «Преимущество встречного движения» и 2.7 «Преимущество перед встречным движением» по СТБ 1140-99. При высокой интенсивности движения может быть применено светофорное регулирование. Возможность пропуска нагрузки по второму варианту должна быть проверена дополнительным расчетом. Если грузоподъемность при одностороннем движении по оси моста по прочности окажется не ниже А11, то пропуск нагрузок в неконтролируемом режиме может быть осуществлен без ограничения веса транспортного средства знаками.

Выводы.

Грузоподъемность мостовых сооружений с одностолбчатыми опорами должна определяться не только для пролетных строений, но и для элементов этих опор (столба и ригеля), так как в некоторых случаях определяющим будет являться класс грузоподъемности элементов опор.

В случае наличия силовых трещин в ригелях грузоподъемность должна быть определена с учетом этих трещин.

Несущая способность столбов должна быть проверена на нагрузки А14 и НК112 в сочетании с прочими временными нагрузками (торможение, поперечный удар, ледовая нагрузка). Для проверки могут быть использованы программные комплексы, в которых такая проверка заложена, либо ручной расчет по ТКП 45-3.03-232-2011. В случае недостаточной несущей способности столбов при всех допускаемых ТКП 45-3.03-232-2011 сочетаниях, производится расчет на более низкий класс нагрузок. Классом нагрузки для столба будет являться наибольший класс принятой в сочетаниях временной нагрузки АК или НК, при котором обеспечивается несущая способность столбов по всем проверкам.