

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСОЛЬНО-БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ

УДК 624.072.2(043)

ГОУ ВПО «Уральский
государственный университет
путей сообщения»,
г.Екатеринбург

Х. Ягофаров

*Профессор кафедры «Строительные конструкции
и строительное производство»,
доктор технических наук*

А.Х. Ягофаров

*Доцент кафедры «Строительные конструкции
и строительное производство»,
кандидат технических наук*

А.Б. Разумов

*Аспирант кафедры «Строительные конструкции
и строительное производство», инженер*

Снижение материалоемкости изделий без увеличения трудоемкости изготовления является важной задачей проектирования [1]. Консольно-балочные схемы позволяют решить эту задачу.

Консольные балки неоправданно мало применяются в качестве несущих конструкций промышленных и гражданских сооружений. Возможно, это связано с недостаточной изученностью консольно-балочных систем.

Наиболее ярким примером консольно-балочной системы является железнодорожный мост через залив Фёрт-оф-Форт у восточного берега Шотландии, возведённый в 1882-1890 гг. [2].

Рационально применение консольно-балочных схем в протяженных конструкциях, например, в транспортных галереях [3, 4], а также при реконструкции различных пролетных строений [5].

Консольно-балочным схемам свойственны преимущества как разрезных, так и неразрезных балочных схем: нечувствительность к неравномерным осадкам опор, так как схема статически определима; меньшие расчетные изгибающие моменты; повышенная жесткость; экономичность.

Кроме того, консольно-балочная схема обладает преимуществом, свойственным только ей, – возможностью регулировать усилия за счет изменения вылета консоли [6, 7].

При определенной величине вылета консоли опорный момент становится равным пролетному, в результате чего достигается максимально эффективное использование материала конструкции [8]. Оптимальный вылет консоли зависит от вида консольной схемы, соотношения постоянной и временной нагрузок, количества сосредоточенных сил в пролете.

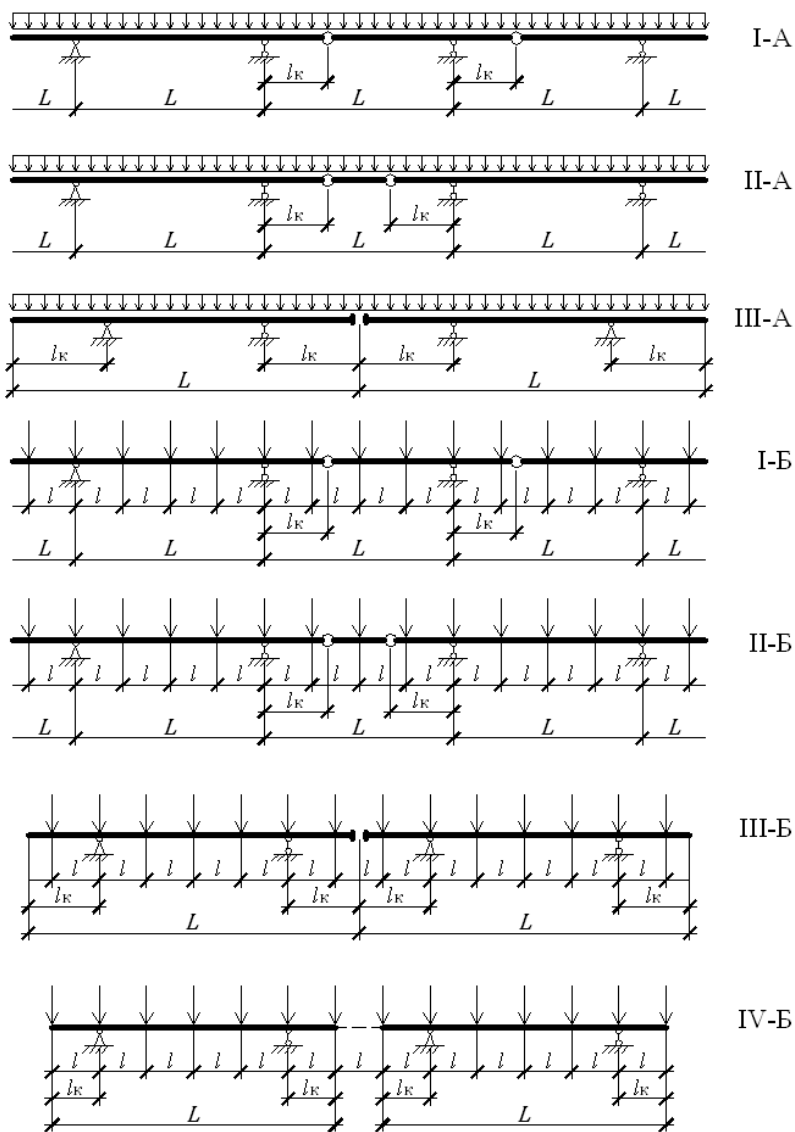


Рис. 1. Рассмотренные схемы консольных балок:
 I, II, III, IV – номера схем; А – загрузка распределенной нагрузкой;
 Б – загрузка сосредоточенными силами

Однако на сегодня отсутствует методика оптимизации консольно-балочных схем.

В работе выполнен расчет оптимального вылета консоли (шарнира) для четырех консольно-балочных схем при различном соотношении постоянной и временной нагрузок и различном количестве сосредоточенных сил (рис. 1).

За критерий оптимальности принято равенство опорного и пролетного изгибающих моментов огибающих эпюр, то есть с учетом невыгодного нагружения пролетов временной нагрузкой. Кроме того, в работе, выведены формулы расчетных моментов [9], определена эффективность консольно-балочных схем по сравнению с разрезной балкой, составлены таблицы для практического использования при проектировании консольно-балочных конструкций.

Рассматривались реально возможные загрузки балок равномерно распределенной нагрузкой и сосредоточенными силами. Для каждой схемы балки найдено максимальное число сосредоточенных сил в пролете, при котором результат получается почти такой же (с разницей не более 5%), как при эквивалентной равномерно распределенной нагрузке. То есть при числе сосредоточенных сил в пролете, равном или более этого максимального числа, сосредоточенные силы можно представить в виде равномерно распределенной нагрузки.

Результаты расчетов в виде готовых формул для определения оптимального вылета консолей и расчетных изгибающих моментов при нагружении равномерно распределенной нагрузкой сведены в таблицу 1, сосредоточенными силами – в табл.2 и 3.

Обозначения величин в табл.1-3:

$M_{np.}$ – пролетный изгибающий момент;

$M_{on.}$ – опорный изгибающий момент;

M_B – изгибающий момент в разрезной балке;

$n = \frac{p}{q}$ где p – временная равномерно распределенная нагрузка;
 q – постоянная равномерно распределенная нагрузка;

$m = \frac{P}{G}$ где P – временная сосредоточенная нагрузка;
 G – постоянная сосредоточенная нагрузка.

Примечание: выражения вылета консолей (l_K) получены из условия равенства пролетного и опорного изгибающего моментов огибающих эпюр ($M_{np.} = M_{on.}$).

Таблица 1

Параметры консольных балок, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой

Параметр	Схемы по рис. 1		
	I-A	II-A	III-A
$l_{K,онм.}$	$\frac{L}{8}[4+3n-\sqrt{8+16n+9n^2}]$	$\frac{L}{2}\left[1-\sqrt{\frac{1}{n+2}}\right]$	$\frac{L}{2}[\sqrt{(n+1)(n+2)}-(n+1)]$
$M_{нр.}$	$\frac{q}{8}(L-2l_K)\times[L(1+n)-2l_K]$	$\frac{q}{2}\left[\frac{L^2}{4}(1+n)-l_K\times(L-l_K)\right]$	$\frac{q}{8}[(L^2-4Ll_K)(1+n)+4nl_K^2]$
$M_{он.}$	$\frac{ql_K}{2}[L(1+n)-l_K]$	$\frac{ql_K}{2}(L-l_K)(1+n)$	$\frac{ql_K^2}{2}(1+n)$
M_B	$\frac{q}{8}(1+n)L^2$		$\frac{q}{8}(L-2l_K)^2(1+n)$

Таблица 2

Параметры консольных балок, нагруженных сосредоточенными силами с постоянным шагом

Число сил в пролете	Параметр	Схемы по рис. 2.1			
		I-B	II-B	III-B	IV-B
2	l_K	$0,25L$	$\frac{1+m}{2(2+m)}L$	$\frac{1+m}{2(3+2m)}L$	$\frac{1+m}{2(5+3m)}L$
	$M_{нр.}$	$\frac{1}{4}G(L-2l_K)\left(1+\frac{ml}{L-l_K}\right)$	$\frac{1}{4}G[L(1+m)-2l_K]$	$\frac{1}{4}G[L(1+m)-2l_K(2+m)]$	$\frac{1}{4}G[L(1+m)-2l_K(3+m)]$
	$M_{он.}$	$\frac{1}{4}Gl_K\left(1+\frac{mL}{L-l_K}\right)$	$\frac{1}{2}Gl_K(1+m)$		$Gl_K(1+m)$
	M_B	$0,25GL(1+m)$		$0,25G(L-2l_K)(1+m)$	

Окончание табл. 2

Число сил в пролёте	Параметр	Схемы по рис. 2.1			
		I-Б	II-Б	III-Б	IV-Б
3	l_K	$\frac{1}{12}L(7+5m-\sqrt{25+46m+25m^2})$	$\frac{1+m}{3(2+m)}L$	$\frac{2(1+m)}{3(4+3m)}L$	$\frac{1+m}{3(3+2m)}L$
	$M_{np.}$	$\frac{1}{3}G[L(1+m)-l_K(3+\frac{mL}{L-l_K})]$	$\frac{1}{3}G[L(1+m)]$	$\frac{1}{3}G[l_K[L(1+m)-3l_K(1,5+m)]]$	$\frac{1}{3}G[L(1+m)-3l_K(2+m)]$
	$M_{on.}$	$G l_K \left(1 + \frac{mL}{L-l_K}\right)$	$G l_K (1+m)$	$\frac{1}{2} G l_K (1+m)$	$G l_K (1+m)$
	M_B	$\frac{1}{3} G l (1+m)$		$\frac{1}{3} G (L-3l_K)(1+m)$	
4	l_K	$\frac{1}{24}L(4+11m-\sqrt{100+212m+121m^2})$	По табл. 3	$\frac{1+m}{5+4m}L$	$\frac{1+m}{7+5m}L$
	$M_{np.}$	$\frac{1}{2}G[L(1+m)-1,5l_K(2+\frac{mL}{L-l_K})]$		$\frac{1}{2}G[L(1+m)-2l_K(2+1,5m)]$	$\frac{1}{2}G[L(1+m)-2l_K(2,5+1,5m)]$
	$M_{on.}$	$1,5G l_K \left(1 + \frac{mL}{L-l_K}\right)$		$\frac{1}{2} G l_K (1+m)$	$G l_K (1+m)$
	M_B	$0,5GL(1+m)$		$0,5G(L-3l_K)(1+m)$	
5	l_K	$\frac{1}{40}L(33+17m-\sqrt{289+542m+289m^2})$	По табл. 3	$\frac{2(4+3m)}{5(8+5m)}L$	$\frac{3(1+m)}{5(4+3m)}L$
	$M_{np.}$	$\frac{1}{5}G[3L(1+m)-2l_K(5+\frac{mL}{L-l_K})]$		$\frac{1}{5}G[L(3+2m)-5l_K(2,5+m)]$	$\frac{1}{5}G[3L(1+m)-5l_K(3+2m)]$
	$M_{on.}$	$2G l_K \left(1 + \frac{mL}{L-l_K}\right)$		$\frac{1}{10}G(15l_K-2L) \times (1+m)$	$G l_K (1+m)$
	M_B	$0,6GL(1+m)$		$\frac{1}{5}G(2L-5l_K) \times (1+m)$	$\frac{1}{5}G(3L-10l_K) \times (1+m)$

Таблица 3

Параметры консольной балки по схеме П-Б для числа сил в пролетах 4 и 5 (дополнение к табл.2)

Число сил в пролете	m	$\frac{l_k}{L}$	$M_{np.}$	$M_{on.}$
4	≤ 2	$\frac{1+m}{3(2+m)}$	$\frac{1}{2}G[L(1+m)-3l_k]$	$\frac{3}{2}Gl_k(1+m)$
	≥ 2	$\frac{m}{2(2+m)}$	$\frac{1}{4}G[L(1+2m)-2l_k]$	$\frac{1}{4}G(L+2l_k)(1+m)$
5	≤ 1	$\frac{3(1+m)}{10(2+m)}$	$\frac{1}{5}G[3L(1+m)-10l_k]$	$2Gl_k(1+m)$
	≥ 1	$\frac{1+2m}{5(2+m)}$	$\frac{1}{5}G[L(2+3m)-5l_k]$	$\frac{1}{5}G(L+5l_k)(1+m)$

Эффективность применения консольных балок по сравнению с разрезными эквивалентными балками иллюстрируется графиком (рис. 2).

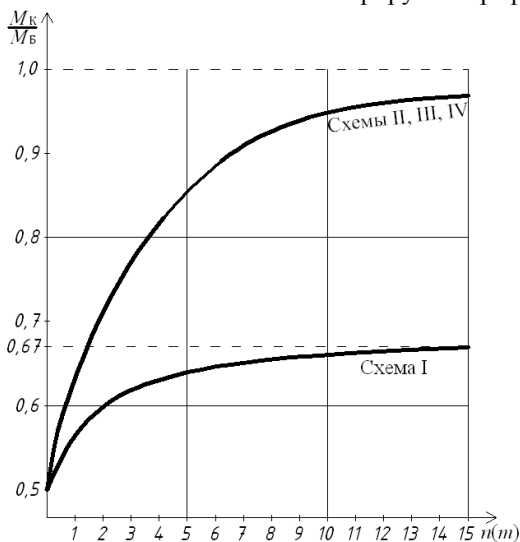


Рис. 2. Отношение минимального расчетного изгибающего момента в консольной балке ($M_K=M_{on}=M_{np.}$) к изгибающему моменту в эквивалентной разрезной балке (M_B)

По графику видно, что наиболее эффективной является схема I с последовательным расположением шарниров, однако применять ее следует обоснованно, так как данная схема склонна к прогрессирующему обрушению и при аварии в первом пролёте разрушается полностью.

С увеличением доли временной нагрузки эффект от применения консольных балок снижается. Так, при отсутствии временной нагрузки, расчетный изгибающий момент в консольной балке составляет 50% от изгибающего момента в разрезной эквивалентной балке, а с появлением и увеличением доли временной нагрузки этот показатель поднимается до 67% для схемы I и до 100% для остальных схем.

Таким образом, исходя из конкретного соотношения временной и постоянной нагрузок можно выбрать наиболее рациональную для каждого конкретного случая консольно-балочную схему. При этом следует отметить ту особенность схемы I, что для обеспечения неизменяемости системы необходим базовый пролет (рис. 3), от прочности которого будет зависеть прочность всей системы в целом.

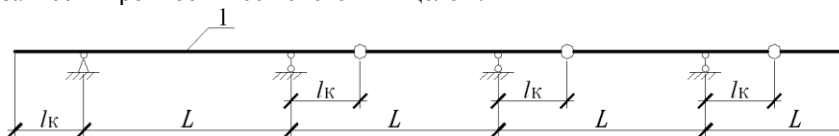


Рис. 3. Консольная балка по схеме I с базовым пролетом I

Библиографический список

1. Архитектура: Учебник / Под ред. Б.Я. Орловского. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1984. – 288 с.
2. Donald Langmead, Christine Garnaut Encyclopedia of architectural and engineering feats. Hardcover, Abc-Clio Inc, ISBN 157607112X (1-57607-112-X), 2001. – 388 с.
3. Ягофаров Х. Пример конструктивного решения транспортной галереи // Промышленное строительство. 1970, №12. – С. 32-34.
4. Ягофаров Х. Пролетное строение галереи из консольных балок // Промышленное строительство и инженерные сооружения. 1971, №4. – С. 16-17.
5. Ягофаров А.Х., Ягофаров Х., Разумов А.Б. Реконструкция пролетного строения моста по консольно-балочной схеме: Сб. научн. тр. «Предотвращение аварий зданий и сооружений» / Под ред. К.И. Ерёмкина; Вып. 9. – М., 2010. – С. 498–503.
6. Рабинович И.М. Курс строительной механики стержневых систем. – М.: Стройиздат, 1968. – 240 с.

7. Саргсян А.Е., Демченко А.Т. Строительная механика. – М.: Высш. школа, 2000. – 287 с.
8. Бычков Д.В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1962. – 216 с.
9. СНиП 2.01.07–85*. Нагрузки и воздействия. Госстрой СССР. – М.: ЦИТП, 2002. – 42 с.
10. Конструкции гражданских зданий / Под ред. М.С. Туполева. – М.: Стройиздат, 1968. – 240 с.