

УДК 624.078.3

ПРОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ШПОНОЧНЫХ ШВОВ

Ю.В. Краснощеков

ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. В статье приведены результаты исследования надежности межплитных швов сборных железобетонных перекрытий. Автор приходит к выводу, что нормативные ограничения числа рабочих шпонок в швах требуют учитывать зависимость надежности швов от числа отказов отдельных шпонок. Выполнен анализ вероятностных моделей одиночных бетонных шпонок и шпоночных швов. В моделях швов учтено влияние перераспределения усилий в результате отказа отдельных шпонок. Приведен пример расчета надежности швов.

Ключевые слова: сборные железобетонные перекрытия, бетонные шпонки, шпоночные швы, вероятностные модели, прочность, надежность.

Введение

Согласно ГОСТ 9561-91 железобетонные плиты перекрытий изготавливают с углублениями или пазами на боковых гранях для образования после замоноличивания прерывистых или непрерывных шпонок, обеспечивающих совместную работу плит на сдвиг в горизонтальном и вертикальном направлениях [1]. На боковых гранях многопустотных плит серии 1.041.1-3 предусматривают прерывистые углубления чаще всего круглой формы, при заполнении которых бетоном класса не менее В15 образуется шпоночный шов в виде системы взаимосвязанных шпоночных элементов [2].

При шаге шпонок 0,2 м, регламентируемом для многопустотных плит, число шпонок в шве может быть весьма большим. Например, на каждой из боковых граней плит серии 1.041.1-2 длиной 5,65 м предусмотрено 27 круглых шпонок.

Шпоночные соединения широко применяют не только в перекрытиях, но и в других конструктивных системах для обеспечения взаимодействия сборных элементов. Прочность одиночных шпонок сборных железобетонных конструкций, образуемых бетоном или раствором замоноличивания, проверяют из условий работы на действие сдвигающих усилий Q [3]:

$$t_k > Q/R_{b/k} \text{ или } A_{loc} > Q/R_b; \quad (1)$$

$$h_k > Q/2R_{bt/k} \text{ или } A_{sh} > Q/2R_{bt}; \quad (2)$$

где t_k , h_k и l_k – глубина, высота и длина шпонки; A_{loc} и A_{sh} – площади смятия и среза шпонки; R_b и R_{bt} – расчетные сопротивления бетона сжатию и растяжению.

При номинальных размерах шпонок плит серии 1.041.1-3 $t_k = h_k = 12,2$ мм, $d = 120$ мм, $A_{loc} = t_k d$ и $A_{sh} = 0,785 d^2$ расчетная несущая способность одиночной шпонки определяется по формулам (1) и (2) и составляет: на смятие $Q = 12,4$ кН, на срез $Q = 17,0$ кН. Нормами установлено, что число шпонок, вводимых в расчет, должно быть не более трех [1]. При таком ограничении требуется учитывать зависимость надежности швов от числа отказов отдельных шпонок. Проектировщик пока не располагает методикой расчета надежности таких систем.

Надежность одиночных бетонных шпонок

В работе [4] выполнен анализ надежности типовой шпонки по ГОСТ 9561-89. При этом использовали вероятностные модели в виде функций случайных величин:

$$\tilde{Q}_{loc} = \tilde{t} \tilde{d} \tilde{R}_b; \quad (3)$$

$$\tilde{Q}_{sh} = \pi \tilde{d}^2 \tilde{R}_{bt}. \quad (4)$$

Из анализа надежности шпонок сделаны следующие выводы:

1) обеспеченность расчетных значений несущей способности шпонки не превышает 0,99;

2) снижение качества замоноличивания ведет к резкому уменьшению надежности несущей способности на смятие, которое принимают основным при проектировании;

3) при значениях коэффициентов вариации глубины шпонки более 0,1 и диаметра более 0,25 обеспеченность расчетных значений несущей способности не превышает 0,5.

Результаты анализа свидетельствуют о большом значении качества замоноличивания шпоночных швов.

Надежность шпонок зависит от степени их загрузки. Показателем надежности при этом может быть характеристика безопасности β , совпадающая с гауссовским уровнем надежности, определяемым интегралом Лапласа [5]. Коэффициент β определяется из приближенной формулы

$$\beta = (\bar{K} - 1) / \sqrt{\bar{K}^2 v_b^2 + v_f^2}, \quad (5)$$

где $\bar{K}$ - средний коэффициент запаса несущей способности; v_b и v_f - коэффициенты вариации несущей способности и усилия в шпонке.

Особенности статического взаимодействия сборных плит перекрытия

Напряженное состояние шпонок определяется с учетом специфики изгибного деформирования плит, швы между которыми воспринимают усилия взаимодействия F_i (рис. 1). При поперечном изгибе плит распределение усилий в шпонках соответствует параболической или синусоидальной зависимости [6].

Согласно нормам проектирования, среднее значение несущей способности шва равно:

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^3 \bar{Q}_i \quad (6)$$

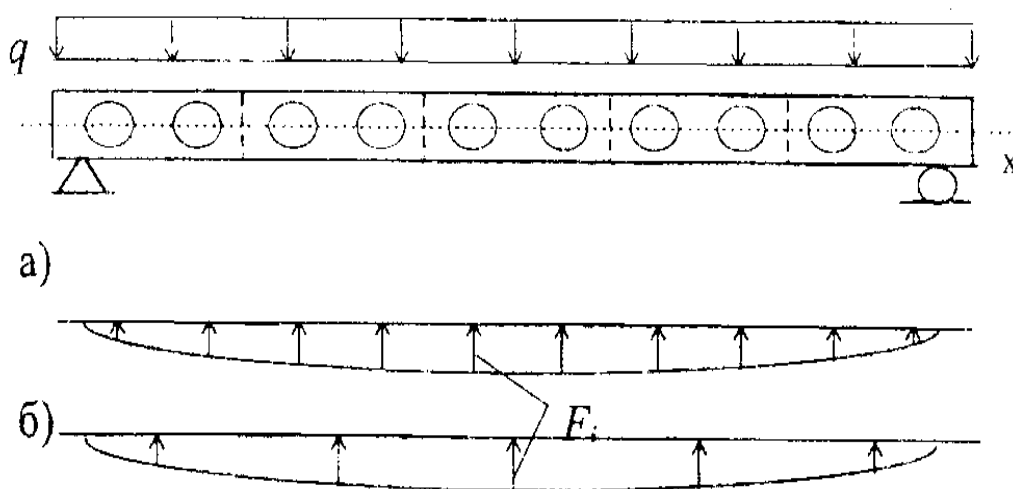


Рис. 1. Схемы усилий в шпоночном шве с элементами-шпонками (а) и подсистемами из двух шпонок (б)

Однако задачи определения прочности и надежности шпоночного шва связаны с действием системного принципа функционирования [4,6]. Согласно этому принципу, прочность шва в общем случае не равна арифметической сумме значений прочности отдельных шпонок и зависит от изменчивости свойств материала и нагрузки. Поэтому для определения расчетного значения прочности следует применять вероятностные модели [7].

Модели надежности шпоночных швов

При известных характеристиках прочности отдельных шпонок и нагрузки можно решать различные практические задачи с применением статических и динамических (с учетом фактора времени) моделей надежности. Исследование надежности систем с помощью статических моделей представляет собой определенную форму предварительного анализа на этапе проектирования. Модели надежности различают по способам соединения элементов в подсистемы и системы. По

внешнему виду системы и характеру ее работы не всегда удастся сразу выбрать приемлемую модель. Наиболее распространена модель с последовательным соединением элементов. Она проста для анализа, но для ее функционирования все элементы (подсистемы) должны работать безотказно. Такая модель не соответствует функциональной схеме шпоночного шва, так как отказ одной из шпонок может привести лишь к перераспределению усилий взаимодействия F_i . Система с параллельным соединением элементов не выходит из строя, пока не отказали все ее элементы. В определенной степени такая модель подходит для системы шпоночного шва. Надежность системы (вероятность безотказной работы) в этом случае определяется по формуле

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i), \quad (7)$$

где P_i - вероятность отказа i -го элемента.

Однако при анализе системы с параллельным соединением элементов подразумевается, что в работе системы участвуют все элементы и отдельные отказы не влияют на надежность элементов, продолжающих работать (принцип независимости отказов). В действительной работе шпоночного шва без снижения нагрузки отказы неизбежно вызывают увеличение усилий F_i в работающих элементах и тем самым влияют на их надежность. Если первый отказ происходит в результате хрупкого разрушения элемента, увеличивается также интенсивность последующих отказов, т.е. модель должна быть динамической с учетом фактора времени. Даже если пренебречь этим фактором, рас-

чет системы с несколькими отказами очень сложен.

Сложность вычислений, проблема которой решается с применением ЭВМ, усугубляется неопределенностью процесса перераспределения усилий взаимодействия при отказе отдельных шпонок. Возможны различные модели перераспределения. Наиболее простые: равномерное перераспределение усилий на все работающие элементы и перераспределение на один или два смежных элемента. Последняя модель близка к действительной и подтверждается статическими расчетами упругих систем настилов на действие поперечной нагрузки; модель с равномерным перераспределением больше подходит для продольного нагружения шва (рис. 2).

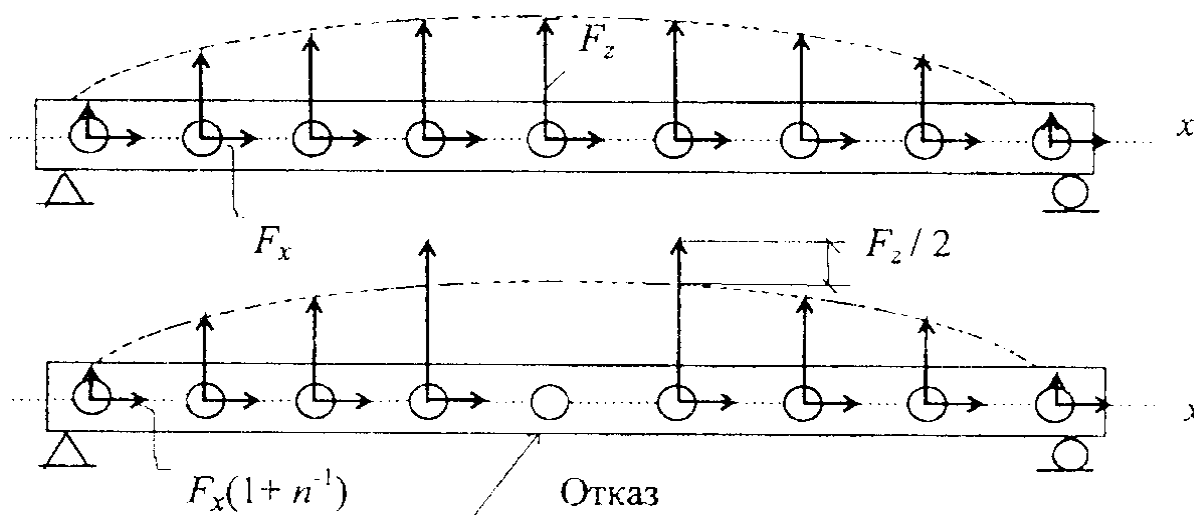


Рис. 2. Модель перераспределения усилий при отказе одного элемента

Надежность шпоночного шва целесообразно определять поэтапно. Вначале оценивается надежность системы до отказа наиболее нагруженной (наименее надежной) шпонки

$$R_{s1} = R_{i,\min} \quad (8)$$

Если система продолжает работать, то надежность увеличивается на величину вероятности отказа k -ых элементов:

$$\Delta R_s = P_i(F_i) \prod_{k=1}^m (1 - P_k(\alpha_k F_i + F_k)), \quad (9)$$

где α_k - коэффициент перераспределения усилия F_i ; $P_k(\beta_k F_i + F_k)$ - вероятность разрушения k -ой шпонки с учетом перераспределения усилий при отказе i -ой шпонки; m - число отказов.

Такой метод соответствует подходу Байеса к оценке надежности, который ввел понятие условной вероятности [8]. При увеличении числа отказов реализация формулы (9) затрудняется, поэтому эффективен прием, основанный на предположении, что два, три или несколько элементов, образующих подсистему, находятся практически в одинаковом напряженном состоянии и нагружены одним усилием. Отказы одного, двух элементов подсистемы не влекут неблагоприятных последствий для системы в целом, а лишь способствуют реализации резервов данной подсистемы. Это, так называемые, системы с загруженным резервом; им соответствуют модели с параллельным соединением элементов.

Реализация описанного приема позволяет получить решение надежности системы с лю-

бым числом отказов. Важная особенность приема состоит в том, что при учете перераспределения усилий в подсистемах удается обеспечить независимость отказов подсистем и связать надежность системы с вероятностью отказов любого элемента. Вероятность безотказной работы и отказов рекомендуется определять по табличным значениям функции нормированного нормального распределения.

Пример расчета шпоночного шва на надежность

По следующим данным определить надежность шпоночного шва: длина шва $l = 5,6$ м; число круглых шпонок $n = 27$ при расстоянии между ними $0,2$ м; усилия в дискретно расположенных шпонках распределяются по

зависимости $F_i = F_{\max} \sin(\pi x / l)$, где x – координата i -ой шпонки от левой опоры плиты, среднее значение усилия в наиболее напряженной центральной шпонке $\bar{F}_{14} = \bar{F}_{\max} = 8$ кН; среднее значение несущей способности $\bar{Q} = 18$ кН; коэффициенты вариации прочности $v_b = 0,25$ и нагрузки $v_f = 0,1$.

Результаты вычислений $\bar{F}_i$, коэффициентов запаса $\bar{K}_i = \bar{Q}_i / F_i$, характеристик безопасности β_i по формуле (5), вероятностей безотказной работы шпонок R_i по таблицам нормального распределения [8], вероятностей их отказов $P_i = 1 - R_i$ и приращений надежности ΔR_s при отказах шпонок по формуле (9) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета шпоночного шва на надежность при отказе одной шпонки

i	x_i , м	F_i , кН	$\bar{K}_i$	β_i	R_i	P_i	ΔR_{si}
14	2,8	8,00	2,250	2,188	0,986	0,014	0,011
13, 15	2,6	7,95	2,264	2,199	0,986	0,014	
12, 16	2,4	7,80	2,308	2,234	0,987	0,013	
11, 17	2,2	7,55	2,383	2,289	0,989	0,011	
10, 18	2,0	7,21	2,497	2,368	0,991	0,009	
9, 19	1,8	6,78	2,656	2,466	0,993	0,007	
8, 20	1,6	6,26	2,877	2,585	0,995	0,005	
7, 21	1,4	5,66	3,182	2,721	0,997	0,003	
6, 22	1,2	4,98	3,612	2,875	0,998	0,002	
5, 23	1,0	4,26	4,229	3,040	0,999	0,001	
4, 24	0,8	3,47	5,184	3,219	0,999	0,001	
3, 25	0,6	2,64	6,818	3,407	1,000	0,000	
2, 26	0,4	1,78	10,112	3,602	1,000	0,000	
1, 27	0,2	0,90	20,000	3,799	1,000	0,000	

По формуле (8) определена надежность шва до первого отказа $R_{s1} = 0,986$. Далее усилия с условно разрушающейся шпонки перераспределяли поровну ($\alpha_k = 0,5$) на две смежные и определяли приращения надежности по формуле (9). Например, при отказе наиболее напряженной 14-ой шпонки действующее в ней усилие $\bar{F}_{14} = 8$ кН перераспределяли поровну на смежные шпонки 13, 15 с увеличением усилий в них до $\bar{F}_{13} = \bar{F}_{15} = 0,5 \cdot 8 + 7,95 = 11,95$ кН. Вероятность безотказности шпонок 13, 15 при этом равна 0,903 (при $\bar{K}_{14} = 18/11,95 = 1,506$ и $\beta_{14} = 1,299$) и приращение $\Delta R_{14} = 0,014 \cdot 0,903^2 = 0,011$. Суммируя R_{s1} с приращением ΔR_{14} , получили значение надежности системы шва 0,997 при отказе одной шпонки.

При использовании принципа расчленения системы шва на подсистемы из трех

шпонок получено: действующее усилие в них $F_{13-15} = 23,9$ кН, усилия в смежных подсистемах $F_{10-12} = F_{16-18} = 22,56$ кН; вероятность безотказности смежных подсистем 0,919 (при $\bar{K} = 1,565$ и $\beta = 1,399$) и $\Delta R_{13-15} = 0,014 \cdot 0,919^2 = 0,012$. Надежность шва при отказе трех наиболее напряженных шпонок равна 0,998.

Заключение

Результаты исследования подтверждают влияние на надежность межплитных швов перекрытий числа шпонок, работающих до отказа. Значимость шпонок зависит от их напряженного состояния (положения в шве). Шпонки, расположенные на расстоянии до 1 м от опор, практически не влияют на надежность швов. Расчет на надежность можно учесть любое количество отказов шпонок.

Библиографический список

1. ГОСТ 9561-91. Плиты перекрытий железобетонные многпустотные для зданий и сооружений. Технические условия. – М.: 1992. – 12 с.
2. Серия 1.041.1-3. Сборные железобетонные многпустотные плиты перекрытий многоэтажных общественных зданий, производственных и вспомогательных промышленных предприятий / ЦНИИПромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990.
3. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52.01.2003. – М.: 2013. – 156 с.
4. Краснощеков, Ю.В. Научные основы исследований взаимодействия элементов железобетонных конструкций: Монография / Ю.В. Краснощеков. – Омск: СибАДИ, 1997. – 276 с.
5. Ржаницын, А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
6. Краснощеков, Ю.В. Исследование конструктивных систем. Системный подход. Palmarium Academic Publishing, 2014. – 164 с.
7. Краснощеков, Ю.В. Вероятностные основы расчета конструкций. Надежность строительных конструкций. Palmarium academic publishing, 2014. – 234 с.
8. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.

STRENGTH AND RELIABILITY OF SPLINED JOINTS

Y. V. Krasnoshchekov

Abstract. The article presents the results of studying reliability of precast concrete floors' interplate joints. The author concludes that the normative limits of the number of working splines in the joints require considering the dependence on the reliability of the joints from the number of failures of individual splines. There is implemented an analysis of probabilistic models of single concrete splines and splined joints. The models take into account the influence of efforts' redistribution in the result of refusal of the individual splines. There is an example of calculating the reliability of joints.

Keywords: precast concrete floors; concrete splines; splined joints; probabilistic models; strength; reliability.

References

1. State standard 9561-91. *Plity perekrytij zhelezo-betonnye mnogopustotnye dlja zdaniy i sooruzhe-nij. Tehnicheskie uslovija* [GOST 9561-91. Reinforced concrete hollow-core floor slabs for buildings. Technical conditions]. Moscow, 1992. 12 p.
2. Series 1.041.1-3. Precast concrete hollow-core slabs multistory obshchest-governmental buildings, industrial and ancillary industrial / TsNIIPromzdany USSR State Construction Committee, the USSR State Construction Committee NIIZhB. Moscow, TSITP USSR State Committee for 1990.
3. SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. The updated edition of SNIP 52.01.2003. Moscow, 2013. 156 p.
4. Krasnoshchekov Y. Nauchnye osnovy issledovaniy vzaimodejstvija jelementov zhelezobetonnyh konstrukcij [Scientific basics for studying interaction of reinforced concrete structures' elements]. Omsk: SibADI, 1997. 276 p.
5. Rzhantsyn A.R. *Teorija rascheta stroitel'nyh konstrukcij na nadezhnost'* [Theory of engineering structures for reliability]. Moscow, Stroyizdat, 1978. 239 p.
6. Krasnoshchekov Y. *Investigation of structural systems. Systematic approach*. Palmarium Academic Publishing, 2014, 164 p.
7. Krasnoshchekov Y. *Probabilistic structural bases of calculation*. Reliability of building structures. Palmarium academic publishing, 2014. 234 p.
8. Wentzel E.S. *Teorija veroyatnostej* [Probability theory]. Moscow, Vyssh. shk., 1999. 576 p.

Краснощеков Юрий Васильевич (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции», ФГБОУ ВПО «СибАДИ». (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: uv1942@mail.ru).

Krasnoshchekov Yuriy Vasilievich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department "Building constructios", The Siberian State Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: uv1942@mail.ru).