

УДК 539.43

DOI: 10.17223/00213411/64/2/121

FAHONG WU¹, WEI SHI², PING ZHU¹, WEIBING JI³

ПРОЧНОСТЬ БОЛТОВОГО ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

Болтовое фланцевое соединение является одним из наиболее широко используемых видов соединения стальных конструкций. Его прочность при землетрясении обеспечивает сейсмостойкость стального каркаса. Предложены метод расчета прочности болтового фланцевого соединения стальных конструкций и конечно-элементная модель для расчета прочности фланцевого соединения стальной конструкции при землетрясении. При приложении односторонней статической и динамической нагрузки моделируется и рассчитывается прочность болтового фланцевого соединения. Результаты расчета показывают, что под действием землетрясения толщина фланца незначительно влияет на площадь контакта, но оказывает большое влияние на напряжение в зоне контакта. Под действием землетрясения, когда стенка колонны и балка деформируются одновременно, деформации изгиба являются самыми полными, коэффициент рассеивания энергии и параметры сейсмических воздействий оказываются наибольшими. Аналитические результаты использованных методов хорошо согласуются с реальными значениями, а коэффициент совпадения превышает значение 0.9900.

Ключевые слова: землетрясение, стальная конструкция, болт, торцевая пластина, соединение, прочность.

Введение

В последние годы надежность в строительстве и экологической архитектуре широко пропагандируется [1]. На этом фоне стальные конструкции с такими преимуществами, как малый собственный вес, низкие базовые требования к обработке, короткий срок монтажа на месте и малое загрязнение окружающей среды, постепенно становятся основным направлением развития и все чаще используются [2].

С конца XX в. продолжается эпоха развития стальных конструкций. Показательны высотные здания, выполненные из стальных конструкций в зарубежных странах, такие, как Эмпайр-Стейт-Билдинг, Сирс-Тауэр и другие. Имеются высотные стальные конструкции в Китае, например, Шанхайская башня Цзиньмао, мостовая стальная конструкция с мостом через реку Цзяньинь Янцзы и гонконгский мост Цин Ма.

В настоящее время исследования по испытанию и численному моделированию фланцевых соединений на высокопрочных болтах достигли определенного прогресса [3]. Тем не менее по-прежнему существуют некоторые проблемы, такие, как моделирование фланцевых соединений на высокопрочных болтах, соединение торцевых пластин высокопрочными болтами, влияние на работу фланцевого соединения высокопрочных болтов, а также расчет узлов на действующую сейсмическую циклическую нагрузку [4].

Даути и Макгуайр испытали 27 T -образных соединений «тройников» и 27 фланцевых соединений. Они изучали силы, действующие на болт, создаваемые при натяжении фланца в этих двух типах, и предложили математическую модель сил. Было установлено, что фактическое распределение сил во фланцах похоже на используемое в расчетных моделях [5]. Однако масштабы проведенных исследований недостаточны для того, чтобы установить достоверные расчетные зависимости. В предлагаемой авторами [5] обобщенной модели усилие на болт рассматривается в рамках модели линейной деформации жесткой пластины, которая не учитывает влияние силы на болт.

Таким образом, большое значение имеет численное моделирование совместной работы фланцев и высокопрочных болтов при статическом и динамическом нагружениях. Оно поможет определить параметры и условия экспериментальных исследований и другие факторы, влияющие на напряженное состояние фланцевого соединения [6]. В рамках данной темы исследования предложен метод анализа прочности фланцевого соединения стальной конструкции на высокопрочных болтах при землетрясении. С помощью численного анализа при приложении односторонней статической и динамической нагрузки детально изучены силовые характеристики фланцевого узла сопряжения на высокопрочных болтах [7].

Материалы и методы

Конечно-элементный анализ

Из-за ограничений в условиях эксперимента нецелесообразно проводить большое количество испытаний. Более того, в существующих условиях некоторые данные трудно точно измерить экспериментально [8]. Корректная конечно-элементная модель позволяет моделировать напряжение реальной конструкции с высокой точностью, что в некоторой степени компенсирует недостаток экспериментальных исследований. С помощью конечно-элементного моделирования можно точно и всесторонне изучить силовые характеристики фланцевого соединения [9]. В данной работе для решения задачи теоретического анализа методом численного расчета используется конечно-элементное программное обеспечение ANSYS [10]. Для создания корректной конечно-элементной модели, отображающей все свойства реального объекта, а также уменьшения объема программных вычислений конечно-элементная модель упрощается следующим образом:

А. В данной работе в основном изучается механическое поведение внутренних поверхностей фланцевых соединений стальных конструкций при землетрясении. Независимо от деформаций изгиба конструктивных элементов балки и колонны в направлении из своих плоскостей расчетная схема является симметричной относительно оси стенки балки и колонны, поэтому симметричность узла может быть использована для создания только половины модели.

Б. Болт и гайка моделируется одним сплошным телом, поскольку головка болта и гайка находятся в тесном контакте с поверхностью фланца на протяжении всего времени действия землетрясения, контакт между головкой болта, гайкой и фланцем при моделировании не учитывается [11–13].

Все узлы в этой работе используют трехмерный 10-узловой тетраэдрический элемент SOLID92, предварительное натяжение болта с гайкой задается с помощью функции «node bolt pretensioning force» и элемента Prets 179 при использовании PMESH [14]. Контакт между поверхностями фланцев балки и колонны моделируется путем создания трехмерной контактной пары. Поверхность фланца балки определяется как контактная поверхность, а поверхность фланца колонны определяется как целевая (воздействующая) поверхность, которая моделируется трехмерным 8-узловым контактным блоком «поверхность-поверхность» CONTA174 и трехмерным целевым блоком TARGE170 [15]. Коэффициент, имитирующий трение между контактными поверхностями, был принят равным 0.44.

Модель материала

Сечения балки и секции колонны имели геометрические параметры: для балки – $H300 \times 200 \times 8 \times 12$ мм и для колонны – $H300 \times 250 \times 8 \times 12$ мм. Материал, используемый для балки и колонны, – сталь Q345B. Диаграмма «напряжение – деформация» принимается абсолютно упруго-пластической, а модуль упругости по достижению предела текучести равен нулю. Для стальной пластины толщиной более 16 мм предел текучести был принят на уровне 363.3 МПа, а модуль упругости – на уровне 204227 МПа. Для стальных листов толщиной 16 мм и менее предел текучести был установлен на уровне 391.1 МПа, а модуль упругости – на уровне 190707 МПа [16]. Взаимосвязь напряжений и деформаций для высокопрочных болтов (включая головки болтов, стержни болтов и гайки) основана на трилинейной модели. В качестве критерия текучести применен критерий текучести фон Мизеса, а работа материала соответствует теории текучести с критерием последующего упрочнения [17].

Свойства материала высокопрочных болтов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства материала высокопрочных болтов

Напряжение, МПа	Деформация
996	0.00484
1161	0.137
1161	0.16

Граничные условия и процесс расчета

Симметричные граничные условия моделируются относительно центральной плоскости стенки балки и колонны, а в основании колонны применена жесткая заделка. Расчет моделей фланце-

вого соединения выполнялся в два этапа. На первом этапе прикладывалось усилие, создаваемое от предварительного натяжения болтов. На втором этапе смещения, вызванные предварительным натяжением болта, блокируются, и в дальнейшем модель нагружается принудительным смещением. Такая последовательность позволяет смоделировать фактический процесс натурального испытания образцов фланцевого соединения с учетом предварительного натяжения болтов. На первом этапе используется статический анализ малых деформаций, а на втором – статический анализ больших деформаций, т.е. учитываются эффекты второго порядка.

Модель напряженно-деформированного состояния болтовых фланцевых соединений для стальных конструкций в условиях землетрясения

Модифицированная модель расчета Кулака. Далее с целью разграничения понятий будем называть: для фланцевого соединения колонны с балкой соединительную пластину колонны – фланцем, а соединительную пластину балки – торцевой пластиной. В общем смысле термины «фланец» и «торцевая пластина» – это одно и то же. Фланцевые соединения по форме очень похожи на T -образные соединения, а разница между ними заключается в том, что торцевая пластина балки больше зафиксирована, что вызывает эффект усиления стенки балки. Если для описания этого эффекта можно выбрать подходящее выражение параметра, то расчетную зависимость Кулака можно просто использовать для расчета прочности торцевой пластины. Целью модифицированной расчетной модели Кулака является более точное определение растягивающей силы, соответствующей появлению текучести в торцевой пластине, т.е. растягивающей силы в области I , когда торцевая пластина на конце балки изгибается (рис. 1). На рис. 1 для удобства описания представлено поперечное сечение двутавровой балки, разделенное на три области. Растянутая область торцевой пластины – зона I , стенка балки – зона 2 и сжатая область торцевой пластины – зона 3 . Ключом к модифицированному методу Кулака является выбор подходящего параметра, который должен быть способен более точно описать зависимость между прочностью T -образного соединения и прочностью фланца, как показано в уравнении:

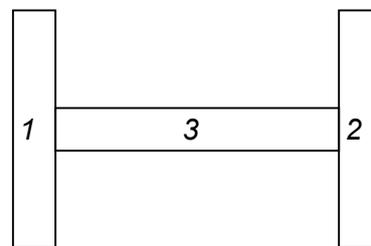


Рис. 1. Схема сечения балки

$$T_{\text{true}} = C \circ T_{\text{Кулак}}, \quad (1)$$

где T_{true} – фактическое растягивающее усилие на площади I под действием землетрясения; $T_{\text{Кулак}}$ – значение растягивающего усилия T -образного соединения аналогичного размера, рассчитанное по методу Кулака.

При сейсмическом воздействии прочность фланцевого соединения будет определяться относительной жесткостью элементов узла. Поэтому можно предположить, что параметр C является функцией толщины стенки t_{bw} и толщины фланца t_{ep} и должен иметь следующие характеристики: когда $t_{bw} \rightarrow 0$, $C = 1$; когда $t_{bw} \rightarrow \infty$, C должен приближаться к фиксированному значению P ; параметр C является возрастающей функцией переменной t_{bw} ; когда $t_{ep} \rightarrow 0$, C должен приближаться к фиксированному значению P ; когда $t_{ep} \rightarrow \infty$, $C = 1$; параметр C является убывающей функцией переменной t_{ep} .

Для этого мы представили выражение параметра в виде

$$C = 1 + 1 \left[a_1 + a_2 \left(\frac{t_{ep}}{t_{bw}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

a_1 и a_2 являются определяемыми параметрами, которые могут быть найдены путем решения двух уравнений по формуле (1). Нетрудно заметить, что параметры, заданные уравнением (2), обладают шестью свойствами, описанными выше. Модифицированный метод Кулака имеет следующее выражение:

$$T = C * \frac{1 + \delta}{4b'} p F_y t_f^2; \quad (3)$$

$$T = \frac{B_n a'}{a' + b'} + C * \frac{pF_y t_f^2}{4(a' + b')}; \quad (4)$$

$$T = B_n, \quad (5)$$

где $pF_y t_f^2$ – приложенная растягивающая сила, B_n – предельная растягивающая сила, до достижения которой сохраняется несущая способность болта под действием землетрясения. Под T следует понимать толщину.

Общий анализ параметра C . Вопрос, можно ли получить удовлетворяющий всем требованиям параметр C в виде постоянной, следует обсуждать как проблему, чтобы корректирующая формула стала практичной в применении и обладала достаточной достоверностью. Он может быть представлен выражением (2). Если знаменатель дроби является многочленом от (t_{ep}/t_{bw}) , то легко удовлетворить шести свойствам параметра C , т.е. C имеет следующий вид:

$$C = 1 + \frac{1}{a_1 + a_2 \left(\frac{t_{ep}}{t_{bw}}\right) + a_3 \left(\frac{t_{ep}}{t_{bw}}\right)^3 + a_{n+1} \left(\frac{t_{ep}}{t_{bw}}\right)^n}. \quad (6)$$

Здесь a_1, a_2, \dots, a_n являются неизвестными коэффициентами, которые могут быть найдены путем решения системы соответствующего количества уравнений. Очевидно, что чем больше число неопределенных коэффициентов, тем точнее параметр C .

Распределение напряжений в торцевом сечении балки в месте соединения. Изгибающий момент, соответствующий пределу текучести торцевой пластины, можно рассчитать только по соотношению между величиной деформации растянутой части фланца и изгибающим моментом в сечении под действием нагрузки от землетрясения. Это означает, что как только получено растягивающее усилие на участке в зоне I (рис. 1) примыкающей балки под действием землетрясения, то также получен изгибающий момент в этом сечении. Согласно общепринятой теории, изгибающий момент балки несет фланец, а усилие сдвига воспринимает стенка балки. Результирующая сила растяжения и сжатия, действующая на фланец балки, следует из уравнения

$$F = \frac{M}{D_b - t_{bf}}, \quad (7)$$

где D_b – высота балки; t_{bf} – толщина фланца балки; M – значение силы натяжения. Рис. 2 отражает изменение результирующей силы вдоль оси координат в области I образца в процессе сейсмического нагружения. На рисунке указаны силы в сечении: F_X – поперечная; F_Y – продольная; F_Z – нормальная. Независимо от того, нормальная сила или поперечная (сила сдвига), она практически линейно изменяется с увеличением значения изгибающего момента. Из этого можно сделать вывод, что форма эпюры напряжений в сечении определима, если задана геометрия торцевой пластины. Можно сказать, что форма эпюры напряжений в сечении, в основном, определяется отношением жесткости между различными частями во фланцевом узле.

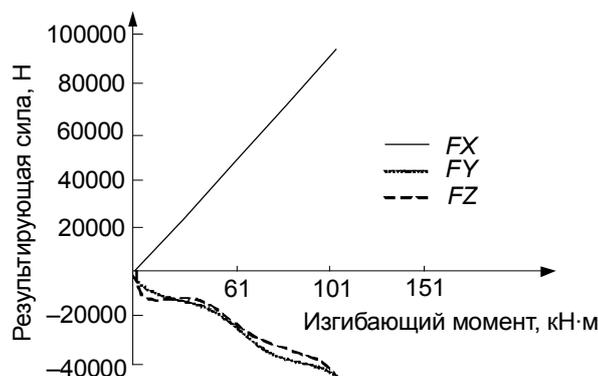


Рис. 2. Значения результирующих сил образца в области I

Поэтому представлена гипотеза о распределении напряжений в торцевом сечении балки, в которой считается, что:

а) При действии землетрясения напряжения на участках 1 и 3 сечения являются равномерными.

б) Равномерное напряжение на площади 1 сечения – это отношение силы к площади.

в) При действии землетрясения уровень напряжений на участке 2 равен величине напряжений на участке 1 со стороны растянутой части фланца, причем напряжения распространяются вниз на некоторое расстояние и достигают значения напряжений на участке 3 (форма напряжений показана на рис. 3).

Взаимосвязь между переменными, обозначенными на рис. 3, может быть выражена следующими уравнениями:

$$a + b + x = D_b - 2t_{bf}; \quad (8)$$

$$\frac{b}{a} = \frac{st}{sb}; \quad (9)$$

$$(st \circ x + 0.5 \circ st \circ a - 0.5 \circ sb \circ b) \times t_{bw} = f_m, \quad (10)$$

где D_b – высота балки; t_{bf} – толщина фланца балки; t_{bw} – толщина стенки балки; f_m – растягивающее усилие в стенке; st – величина напряжений растянутой зоны фланца; sb – величина напряжений сжатой зоны фланца.

Из уравнений (8), (9) и (10) следует, что для определения характера распределения напряжений необходимо знать две из трех равнодействующих сил в трех областях. Для того чтобы аппроксимировать величину изгибающего момента на границе раздела только величиной растяжения в растянутой зоне фланца, в настоящей работе предлагается дополнительная гипотеза. Предполагается, что результирующая сила в сжатой зоне фланца (участок 3) при землетрясении определяется как

$$f_b = F_t \circ A_b. \quad (11)$$

Здесь f_b – давление, оказываемое сжатой зоной торцевых пластин балки под действием землетрясения; F_t – предел прочности на растяжение торцевых пластин под действием землетрясения; A_b – площадь сжатой зоны торцевой пластины под действием землетрясения.

Результаты исследования

Влияние толщины торцевой пластины на прочность соединения при монотонном нагружении. На рис. 4 показан экспериментальный объект. Предположим, что сила нагружения на этот объект является постоянной силой при действии землетрясения. Предельный угол поворота, предельный изгибающий момент и начальная жесткость стыков, соответствующие упругой стадии работы стальных конструкций, приведены в табл. 2. Предельный угол поворота, предельное смещение конца балки и предельный изгибающий момент, соответствующие пластической стадии работы, приведены в табл. 3.



Рис. 4. Экспериментальный объект

Таблица 2

Предельный угол, изгибающий момент и начальная прочность соединения, соответствующие упругой стадии работы стальных конструкций

Различная толщина торцевой пластины, мм	14.1	18.1	22.1
Упругий предельный угол	0.0033	0.0028	0.0026
Упругий предельный момент	84.9	84.8	85.8
Начальная упругая жесткость соединения	$2.65 \cdot 10^5$	$3.15 \cdot 10^5$	$3.43 \cdot 10^5$

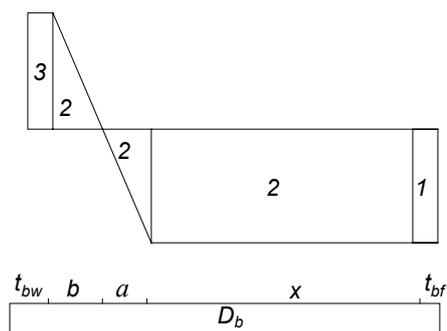


Рис. 3. Предположение о распределении напряжений

Таблица 3

Предельный угол, предельный изгибающий момент и предельное смещение конца балки, соответствующие пластической стадии работы стальных конструкций

Различная толщина торцевой пластины, мм	14.1	18.1	22.1
Пластический предельный угол	0.025	0.017	0.015
Пластический предельный момент	91	101	121
Начальная упругая жесткость соединения	150	153	157

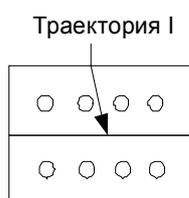


Рис. 5. Принципиальная схема траектории I

Из табл. 2 и 3 видно, что при действии землетрясения влияние толщины торцевой пластины на несущую способность и несущую способность соединения в упругой и пластической стадии неочевидно.

С помощью функции отображения траектории ANSYS можно рассмотреть распределение переменных, таких, как напряжение и смещение вдоль траектории в твердотельной модели. Сначала определяется траектория в торцевой пластине (рис. 5). На рис. 6 показано распределение контактных напряжений торцевых пластин различной толщины при приложении предельной нагрузки соответствующей пластической стадии работы.

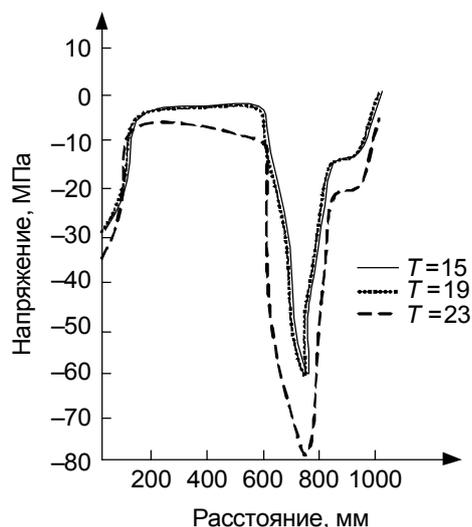


Рис. 6. Распределение контактных напряжений в торцевой пластине 2

Из рис. 6 видно, что с увеличением толщины торцевой пластины контактное напряжение в зоне контакта снижается, также значительно уменьшается усилие на конце торцевой пластины. Это происходит потому, что деформация торцевой пластины увеличивается, а сжатие между фланцами колонны ослабляется, что приводит к уменьшению контактной силы между ними.

Анализ несущей способности соединения при нагружении болтов и пластин. Основным методом исследования сейсмических характеристик узла являются циклическая нагрузка для изучения кривой гистерезиса узла, а также вычисление различных показателей этих характеристик, чтобы судить о прочности соединения при действии сейсмических нагрузок. Поэтому именно этот метод будет использован. Для всестороннего изучения сейсмических характеристик соединения и выявления лучшей формы узлового соединения геометрическая модель стальной конструкции построена в соответствии с характеристиками повреждения соединения (рис. 7).

В процессе сейсмического нагружения используется нагрузка смещения конца балки, а каждая модель имеет семь циклов нагружения. Первый цикл является упругим, он служит, главным образом, для изучения упругих свойств узлов. Затем смещение увеличивается, чтобы заставить компонент в узле сместиться в первый раз, это смещение обозначим Δ_u . При последующем нагружении смещение увеличивается на единицу.

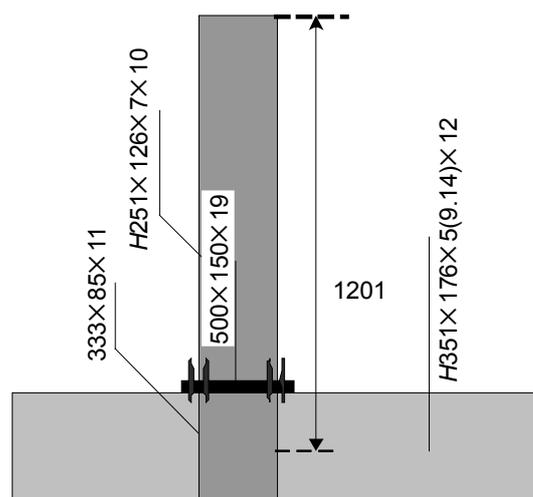


Рис. 7. Геометрическая модель стальной конструкции

Как видно из табл. 4, изгиб модели (2) является наиболее полным, поэтому его площадь самая большая и коэффициент рассеивания энергии также максимальный. Следовательно, его сейсмические характеристики самые лучшие. В результате этого при проектировании такого узла в сейсмической зоне узел должен быть спроектирован аналогично форме модели (2).

Таблица 4

Площадь изгиба и коэффициент рассеивания энергии

Кодирование модели	Площадь накопления гистерезисной кривой	Площадь изгиба гистерезисной кривой	Коэффициент рассеивания энергии
(1)	87.40	30.62	1.239
(2)	107.50	38.64	1.533
(3)	92.78	35.54	1.412

Использование метода данной работы для анализа точности эксперимента. Предположим, что здание из стальных конструкций находится в диапазоне сейсмических проектных значений 9 баллов. Пекинская волна была выбрана в качестве экспериментальной входной сейсмической волны, которая моделировала сейсмическую волну в соответствии с участком класса II, а пик пекинской волны был скорректирован на редкое землетрясение 8 баллов (450 галлонов) в соответствии со стандартными условиями. На рис. 8 представлена унифицированная волновая диаграмма сейсмического ускорения пекинской волны.

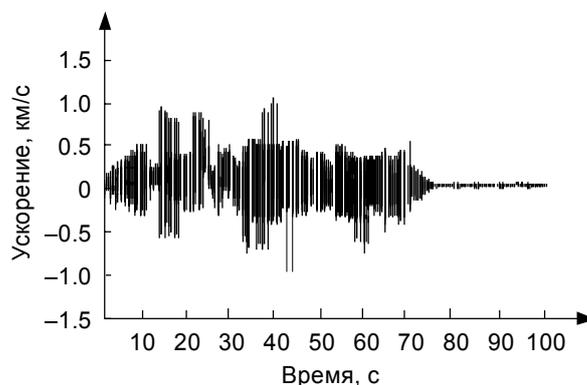


Рис. 8. Временная зависимость ускорения движения грунта

Сравнение несущей способности фланцевых соединений с болтами и фактических результатов анализа сейсмостойкости стальных конструкций по данному методу приведено в табл. 5.

Анализ данных табл. 5 показывает, что аналитические результаты данного метода хорошо согласуются с фактическими значениями. Коэффициент сходимости аналитических результатов предложенного метода всегда превышает 0.9900, что свидетельствует о возможности применения

метода для анализа прочности фланцевых соединений с болтами в стальных конструкциях при землетрясениях.

Таблица 5

Анализ эффективности предложенного метода

Время сейсмической нагрузки, с	Фактическое значение	Расчетное значение предложенного метода	Коэффициент совпадения
20	281.2	281.1	0.9964
40	258.3	257.2	0.9957
60	361.2	361.1	0.9997
80	249.1	248.8	0.9988
100	258.3	258.1	0.9992

Обсуждение

Прочность фланцевого соединения с болтами непосредственно определяет сейсмостойкость стальной конструкции, но сейсмостойкость стальной конструкции также сильно коррелирует с типом болта. С этой целью в настоящей работе рассматриваются высокопрочные и обычные болты в качестве примера для проектирования.

Меры предосторожности для высокопрочных болтов в стальной конструкции. Выбор анкерных болтов основан на HG/T21545-2006. Однако есть несколько важных моментов, которые необходимо иметь в виду. Как правило, материал нижнего болта соответствует Q235A, но иногда необходимо использовать Q345, 16Mn и другие в соответствии с фактической ситуацией. Разница в материале оказывает большое влияние на эксплуатационные характеристики высокопрочного болта. Следует также обратить внимание на точность геометрических характеристик, таких, как положение болта (геометрическое расположение в узле). Материал, монтажное положение и качество монтажа анкерного болта оказывают большое влияние на общее качество стальной конструкции.

Меры предосторожности для обычных болтов в стальной конструкции. В традиционных стальных конструкциях положение обычных болтов не всегда заметно. В практических расчетах они часто не подвергаются строгому силовому анализу. Технические характеристики этих болтов являются индивидуальными, поэтому в процессе проектирования следует учитывать только внешний диаметр, тип, положение и размер отверстий для винтов. Основные преимущества обычных болтов – это точная и удобная конструкция. Если есть возможность широкого применения обычных болтов, то стальная конструкция будет хорошо усовершенствована. В этом случае возникает необходимость выполнения анализа прочности для расчета номинального диаметра резьбы на основе сопротивления сдвигу.

Выводы

Благодаря непрерывным инновациям строительных технологий и постоянно меняющейся архитектурной концепции, здания из стальных конструкций широко используются в XXI в. Конструктивные решения узлов стальных конструкций и свойства узловых соединений являются важными звеньями при проектировании. Болтовое соединение очень распространено при монтаже, а также в узловых соединениях и конструкциях, которые необходимо часто разбирать. Узлы на высокопрочных болтах имеют хорошую плотность соединения, хорошо преднапряжены и малодеформируемы. Это решение широко используется благодаря разборности соединения, простоте монтажа и небольшой деформации по сравнению с обычными болтами. Предложен метод анализа прочности фланцевых соединений на высокопрочных болтах стальной конструкции при воздействии нагрузки от землетрясения, а силовые характеристики фланцевого соединения с высокопрочными болтами глубоко изучены в эксперименте, что обеспечивает теоретическую основу для проектирования и строительства стальных конструкций с такими узлами.

Преимущества таких узлов:

- а) узел занимает меньше места, чем полностью болтовое соединение;
- б) поскольку в условиях строительной площадки предпочтительнее болтовое соединение, постольку скорость строительства и адаптивность к зимнему строительству улучшаются;
- в) разборность узлов металлоконструкций упрощает процесс демонтажа и обеспечивает сохранение целостности каркаса при демонтаже;

г) хотя фланцевое соединение на высокопрочных болтах требует высоких материальных затрат, стоимость монтажа низкая и время монтажа невелико. Кроме того, применение новых высокопрочных болтов также значительно снижает стоимость контроля состояния узлов при эксплуатации;

д) соединение высокопрочных болтов легче диагностировать по сравнению со сваркой, а также соединение лучше адаптировано к возможным отклонениям фланца балки и колонны друг относительно друга, которые могут возникнуть при монтаже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cheng T.L., Pei C.S., and Zhe H.C. // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2019. – V. 99. – P. 1–1.
2. Chen K., Song X., and Liao Z. // J. China Acad. Electron. Info. Technol. – 2019. – V. 2. – P. 129–133.
3. Du Y.F., Han Z., and Chen J.Q. // Sol. Energ. – 2018. – V. 159. – P. 125–133.
4. Han J. and Huang H. // J. Power Supply. – 2018. – V. 16. – P. 71–76.
5. Kononenko V.V. and Konov V.I. // Quantum Electron. – 2018. – V. 48. – P. 40–44.
6. Zhao G., He M., and Tang G. // Chin. J. Pow Sour. – 2018. – V. 11. – P. 1632–1634.
7. Kabir G., Mohd A.T., and Mohd B.H. // Bioresource Technol. – 2017. – V. 249. – P. 42–48.
8. Song L. // Automat. Instrum. – 2018. – V. 1. – P. 37–39.
9. Anja W.D., Tim L.P., and Horst B.R. // J. Mat. Res. – 2017. – V. 32. – P. 1–12.
10. Zhan D., Wang R., and Min W. // J. Jilin Univ. (Sci. Ed.). – 2017. – V. 55. – P. 1614–1620.
11. Sari R. // Appl. Math. Nonlinear Sci. – 2020. – V. 5. – No. 1. – P. 283–291.
12. Selvi M.S.M. and Rajendran L. // Appl. Math. Nonlinear Sci. – 2019. – V. 4. – No. 2. – P. 351–364.
13. Adam C.Z., Christopher A., and Calhoun W.A. // J. Appl. Cryst. – 2018. – V. 51. – P. 720–731.
14. Zhu G., Zhu T., and Hong X. // Comp. Simul. – 2017. – V. 12. – P. 411–414.
15. Lu X.F. and Fang Y.X. // J. Mater. Sci. – 2018. – V. 53. – P. 2928–2941.
16. Mark D., Denavit J.F., and Hajjar T. // Eng. Struct. – 2018. – V. 160. – P. 293–303.
17. Li X., Li L.Y., and Ben Y. // Metals Mat. Int. – 2018. – V. 24. – P. 60–66.

Поступила в редакцию 09.11.2020.

¹ College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, China

² School of Civil Engineering and Architecture,

Anhui University of Science and Technology, Huainan, China

³ Yancheng Architecture Design and Research Institute Co., LTD, Yancheng, China

Fahong Wu, Master, Professor College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, e-mail: wufahong@ycit.cnt.cn;

Wei Shi, Master Degree Candidate School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, e-mail: shiwei199538@163.com;

Ping Zhu, Undergraduate Student College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, e-mail: ycbsz@163.com;

Weibing Ji, Master, Professor-level Senior Engineer Yancheng Architecture Design and Research Institute Co., LTD, e-mail: yc88225007@126.com.