

Традиционные принципы проектирования рамных стальных сейсмостойких конструкций

А.А. Бунов, Д.С. Сидоров

Национальный исследовательский московский государственный строительный университет

Аннотация: Описаны основные средства сейсмозащиты для повышения сейсмостойкости зданий и сооружений. Указаны основные проблемы связанные с проектированием специальных средств сейсмозащиты. Проанализированы основные требования к проектированию и расчету стальных рамных каркасов на сейсмическое воздействие по действующим нормам проектирования на территории Российской Федерации. Отмечено недостаточное описание требований, указанных в нормах, для выполнения расчетов и проектирования конструкций и их узлов сопряжения. Даны рекомендации и указания по учету требований норм для проектирования стальных рамных каркасов. Приведены принципиальные схемы специальных узлов сопряжения колонн с ригелями, необходимые для проектирования в сейсмически опасных районах. Сформулированы выводы.

Ключевые слова: Специальные узлы, колонны, ригели, сейсмическое воздействие, сейсмозащита, стальные рамные каркасы, пластические шарниры, коэффициент избытка прочности, усилия, пластический момент, проектирование.

Основным документом по проектированию рамных стальных зданий и сооружений на территории Российской Федерации является СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». Согласно данному документу для строительных конструкций, расположенных в зонах повышенной сейсмической активности, должны быть предусмотрены мероприятия по обеспечению их сейсмозащиты. В практике проектирования принято разделять сейсмозащиту на традиционную и специальную:

1) Традиционная – за счет запасов прочности самой конструкции (размеры сечений, более прочные материалы), ее упруго-пластических свойств материала [1, 2] и решений узлов сопряжения элементов конструкции между собой [3-5].

2) Специальная – с помощью применения дополнительных конструктивных элементов (маятниковые, резинометаллические и кинематические опоры, демпферы и т.д.) [6, 7].

Примеры специальной сейсмозащиты представлены на рис. 1.

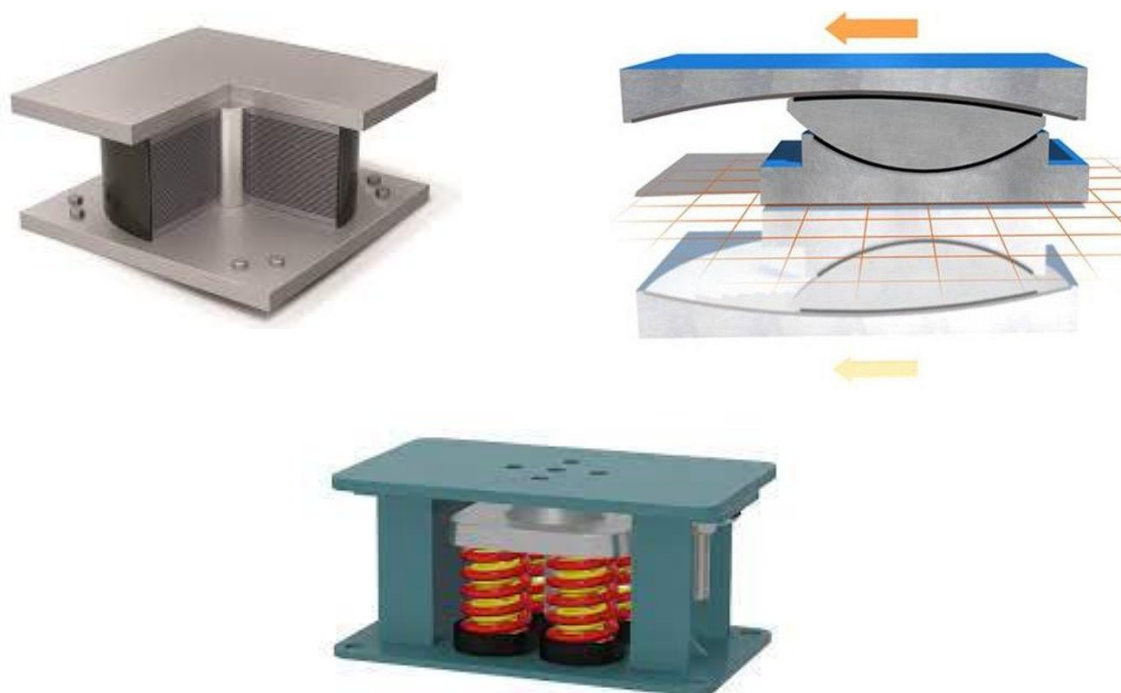


Рис. 1. – Примеры исполнения специальной сейсмозащиты

Специальные способы зачастую требуют от проектировщика высоких навыков проектирования и расчета строительных конструкций, а также научно технического сопровождения сторонних организаций, имеющих опыт применения и расчета данных систем. Все это приводит к тому, что преобладающим способом сейсмозащиты, в настоящее время, является традиционный.

Вследствие отсутствия четких требований нормативной базы (СП 14.13330.2018) в части проектирования рамных стальных конструкций большинство проектных организаций в рамках применения даже традиционного способа пользуются только одной из всех его вариаций – повышение запасов прочности конструкции и узлов сопряжения элементов. Стоит отметить, что повышение происходит для всех элементов и их узлов одновременно, а не в отдельности. В этом случае значительно повышается расход материала, но проектирование является наиболее простым и понятным.

Проанализируем СП 14.13330.2018 на предмет дополнительных требований при проектировании зданий в рамном стальном каркасе, а также рассмотрим механизмы позволяющие выполнить положения норм и обеспечить необходимую сейсмозащиту.

Список требований согласно представлен в таблице 1.

Таблица № 1

Требования к проектированию рамных стальных каркасов

Колонны	Ригели	Общие требования
- следует проектировать замкнутого (коробчатого или круглого) сечения, равноустойчивого относительно главных осей инерций; - стыки колонн следует, как правило, относить от узлов и устраивать в зоне действия наименьших изгибающих моментов; - на уровне ригелей должны быть установлены поперечные ребра жесткости.	- следует проектировать из прокатных или сварных двутавров, в том числе с гофрированной стенкой; - при применении для ригелей рам сварных двутавров с плоской стенкой ее гибкость $h_w/t_w \leq 50$; - свес поясов сечений ригелей не должен превышать значения $0,25t_f\sqrt{E/R}$.	- для элементов, работающих в упругопластической стадии, следует применять малоуглеродистые и низколегированные стали с относительным удлинением не менее 20 %. - зоны развития пластических деформаций в элементах стальных конструкций должны быть вынесены за пределы сварных и болтовых соединений.

Некоторые из представленных требований дают общее понимание, но не описывают механизмы позволяющие их выполнить.

Отсутствуют указания в какой из групп элементов необходимо допускать развитие пластических деформаций и образование пластического шарнира [8-10]. При одновременной реализации пластических шарниров в колоннах и ригелях в расчетах мы получаем геометрически изменяемую конструкцию (рис. 2).

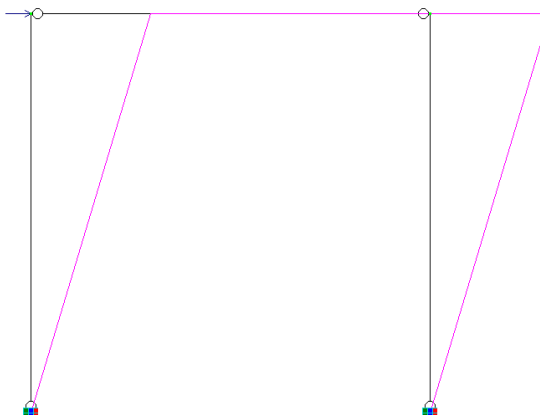


Рис. 2. – Схема работы с учетом пластических шарниров в колоннах и ригеле

Отсутствуют положения о том, как запроектировать элементы, чтобы они одновременно не переходили в упруго-пластическую стадию работы и каким образом организовать развитие зон пластических деформаций (пластических шарниров) за пределами соединений.

Разберем возможные варианты выполнения описанных выше требований применительно к рассматриваемому типу зданий.

Зоны развития пластики в элементах рамных стальных каркасов в практике проектирования обычно организуют по указаниям СП 14.13330.2018 для железобетонных каркасных зданий, а именно - в горизонтальных элементах каркаса – ригелях (балках). Такой вариант проектирования согласуется с общими положениями *ANSI/AISC 358-22*, *ANSI/AISC 341-22* и рекомендациями по расчету металлических рамных каркасов на сейсмические воздействия с учетом образования пластических шарниров. Принципиальная расчетная схема представлена на рис. 3.

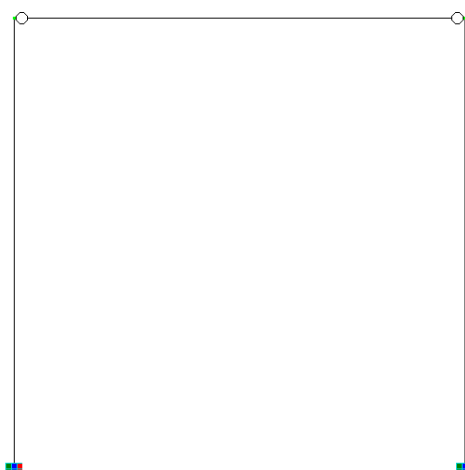


Рис. 3. – Схема работы с учетом пластических шарниров в ригеле

Такой вариант работы не является решением в проблеме связанной с последовательностью образования пластических шарниров.

Анализ отечественных рекомендаций и нормативных документов показал отсутствие разработанных решений. Зарубежные нормы (*ANSI/AISC 358-22*, *ANSI/AISC 341-22*), предлагают разные варианты проектирования рамных стальных каркасов в зависимости от их классификации по *ASCE/SEI 7-22*.

Как пример, рассмотрим обыкновенные рамные каркасы (рис. 4).



Рис. 4. – Здание с обыкновенным рамным стальным каркасом

Расчет колонн, узлов их крепления к фундаменту, узлов наращивания колонн по высоте выполняется на основное и особое сочетание нагрузок, с учетом сейсмического воздействия. Само сейсмическое воздействие принимается с коэффициентом избытка прочности омега $\Omega = 3$ (*ASCE/SEI 7-22*).

Расчет балок и их узлов выполняется на основное и особое сочетание нагрузок, с учетом сейсмического воздействия, при этом сейсмическое воздействие принимается с $\Omega = 1$. Величина усилий M и Q для расчета узлов крепления балки к колоннам вычисляется по формулам:

$$M = \frac{1.1R_y M_p}{\alpha_s}, \quad (1)$$

$$Q = E_{cl} + Q_{осн} = \frac{2 \cdot 1.1R_y M_p}{l_{ef}} + Q_{осн}, \quad (2)$$

где R_y – коэффициент повышения предела текучести стали;

M_p – величина пластического момента;

1,1 – учет зоны самоупрочнения;

$Q_{осн}$ – величина поперечного усилия при основном сочетании нагрузок;

l_{ef} – длина балки в свету;

α_s – поправочный коэффициент уровня силы *LRFD-ASD* (принимается 1).

Для организации развития зон пластических деформаций (пластических шарниров) в ригелях за пределами их соединений с колоннами отечественные и зарубежные исследователи предлагают использовать специальные узлы. В частности в *ANSI/AISC 358-22* представлены различные варианты исполнения узлов и принципы их проектирования.

Наиболее распространенные решения по проектированию узлов представлены на рис. 5.

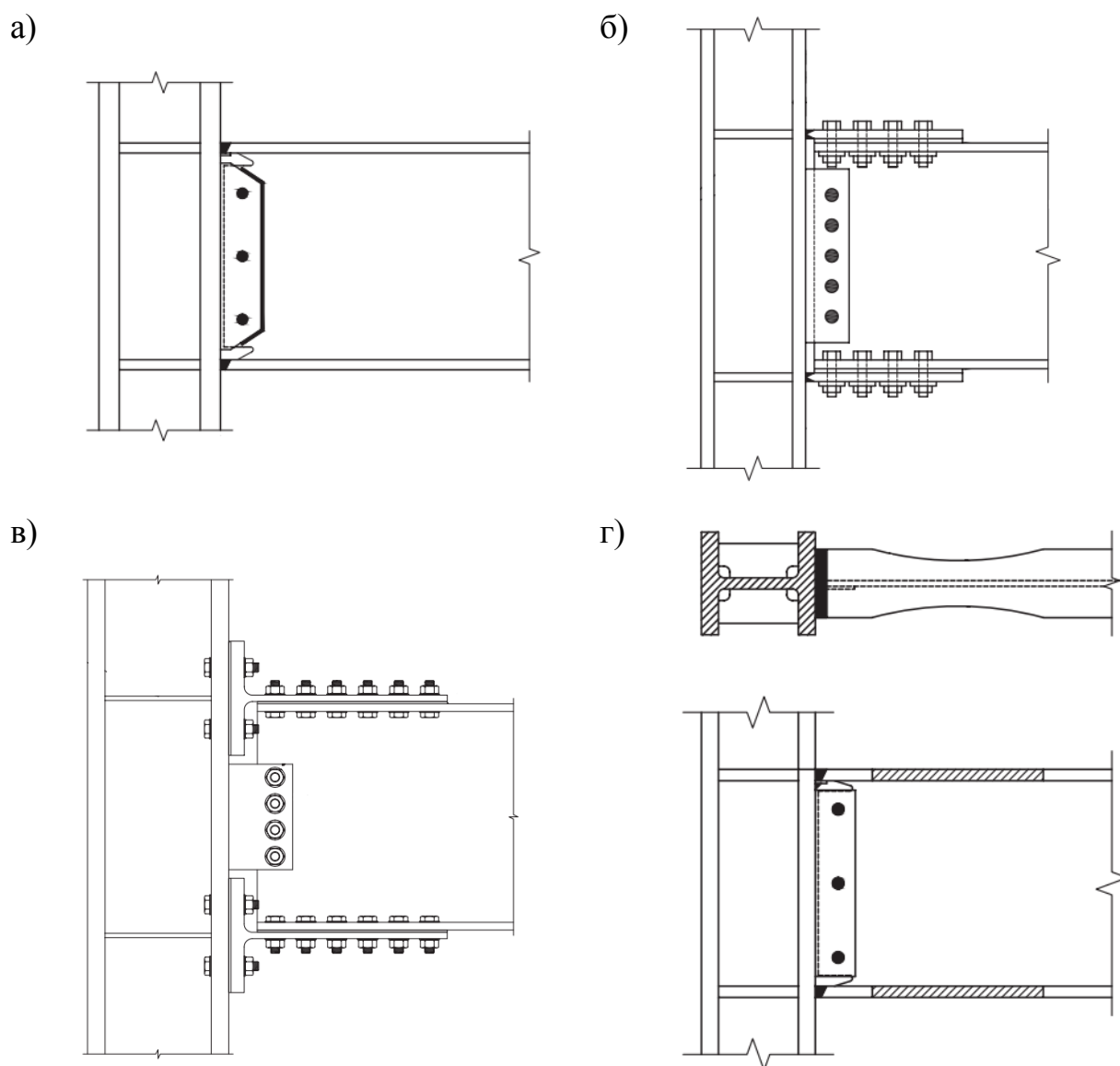


Рис. 5. – Специальные узлы (а-г)

По результатам выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Проектирование по действующим нормативным документам сопряжено с большим количеством сопутствующих вопросов, ответы на которые не всегда представлены в тексте самих норм;
2. При проектировании необходимо всесторонне подходить к вопросу оценки надежности зданий и сооружений при сейсмическом воздействии,

учитывая не только прочность используемых материалов, но и их способность развития пластических деформаций;

3. При отсутствии полного описания требований и рекомендаций, указанных в нормативных документах, рекомендуется использовать материалы из иностранных нормативных документов, при условии, что они не противоречат действующим отечественным.

Литература

1. Vian D. Bruneau M. Tsai K.C. and Lin Y.C. Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams I: Experimental Investigation // Journal of Structural Engineering. 2009, ASCE, Vol. 135, No. 3, pp. 211–220.

2. Pryor S.E. and Murray T.M. Next Generation Partial Strength Steel Moment Frames for Seismic Resistance // Research, Development, and Practice in Structural Engineering and Construction, Proceedings of the First Australia and South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference, Perth, Australia. 2013, pp. 27–32.

3. Toellner B.W., Watkins C.E., Abbas E.K. and Eatherton M.R. Experimental Investigation on the Seismic Behavior of Steel Moment Connections with Decking Attachments // Journal of Constructional Steel Research, Elsevier. 2015, Vol. 105, pp. 174–185.

4. Uang C.M. and Fan C.C. Cyclic Stability Criteria for Steel Moment Connections with Reduced Beam Section // Journal of Structural Engineering. 2001, ASCE, Vol. 127, No. 9, pp. 1021–1027.

5. Prinz G.S. and Richards P.W. Demands on Reduced Beam Section Connections with Out-of-Plane Skew // Journal of Structural Engineering. 2016, ASCE, Vol. 142, No. 1. URL: [doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001360](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001360).

6. Сухарев Ф.И., Иваненко Н.А., Семёнов С.Ю. Реакция здания с кинематической системой сейсмоизоляции на ветровое воздействие и её

анализ средствами Лира-САПР // Инженерный вестник Дона. 2021. №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_16__1_Sukharev_Ivanenko_Semenov.pdf_b414a94e0a.pdf.

7. Чипко С.А., Бурцева О.А. Система компенсации колебаний высотного сооружения в сейсмоактивной зоне // Инженерный вестник Дона. 2021. №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_45_Chipko.pdf_2249.pdf.

8. Richards P.W. and Oh S.S. Cyclic Behavior of Replaceable Shear Fuse Connections for Steel Moment Frames // Journal of Structural Engineering. 2019, ASCE, Vol. 145, No. 12, pp. 1,940–1,951.

9. Wu T.Y., El-Tawil S. and McCormick J. Highly Ductile Limits for Deep Steel Columns // Journal of Structural Engineering. 2018, ASCE, Vol. 144, № 4, pp. 04018016-1–04018016-13.

10. Белов М.В., Раевский А.Н. Скрытые и явные пластические шарниры статически неопределимых стержневых систем в предельном состоянии // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007. №3. URL: cyberleninka.ru/article/n/skrytye-i-yavnye-plasticheskie-sharniry-staticheski-neopredelimiyh-sterzhnevyh-sistem-v-predelnom-sostoyanii.

References

1. Vian D. Bruneau M. Tsai K.C. and Lin Y.C. Journal of Structural Engineering. 2009, ASCE, Vol. 135, No. 3, pp. 211–220.

2. Pryor S.E. and Murray T.M. Research, Development, and Practice in Structural Engineering and Construction, Proceedings of the First Australia and South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference, Perth, Australia. 2013, pp. 27–32.

3. Toellner B.W., Watkins C.E., Abbas E.K. and Eatherton M.R. Journal of Constructional Steel Research, Elsevier. 2015, Vol. 105, pp. 174–185.

4. Uang C.M. and Fan C.C. Journal of Structural Engineering. 2001, ASCE, Vol. 127, № 9, pp. 1021–1027.



5. Prinz G.S. and Richards P.W. Journal of Structural Engineering. 2016, ASCE, Vol. 142, № 1. URL: doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001360.
6. Suxarev F.I., Ivanenko N.A., Semyonov S.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_45_Chipko.pdf_2249.pdf.
7. Chipko S.A., Burceva O.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_45_Chipko.pdf_2249.pdf.
8. Richards P.W. and Oh S.S. Journal of Structural Engineering. 2019, ASCE, Vol. 145, № 12, pp. 1,940–1,951.
9. Wu T.Y., El-Tawil S. and McCormick J. Journal of Structural Engineering. 2018, ASCE, Vol. 144, № 4, pp. 04018016-1–04018016-13.
10. Belov M.V., Raevskij A.N. Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2007. №3. URL: cyberleninka.ru/article/n/skrytye-i-yavnye-plasticheskie-sharniry-staticheski-neopredelimyh-sterzhnevyh-sistem-v-predelnom-sostoyanii.

Дата поступления: 8.03.2024

Дата публикации: 16.04.2024