

Фролов К.А.,
*магистрант кафедры строительного производства Липецкий
государственный технический университет Липецк, Россия*

СЕЙСМОУСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОЭТАЖНЫХ ПОЛУЖЕСТКИХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

***Аннотация:** Настоящий вклад сосредоточен на статических и кинематических компонентах сейсмического отклика многоэтажных стальных конструкций с полужесткими балочно-колонными соединениями. Динамическая модель этих структур представляет собой систему с конечными степенями свободы и сосредоточенными массами на каждом уровне. Степени свободы выражаются боковыми смещениями уровня. Полужесткое поведение соединения балка-колонна считается циклическим и связано с аналитической моделью с четырьмя параметрами. Сооружение подвергается сейсмическому воздействию Вранча 1977 года. Представленные результаты относятся к боковому смещению уровня и силе сдвига сейсмического основания. Основная цель данной работы – сравнение статических и кинематических параметров.*

***Ключевые слова:** Стальные конструкции, сейсмический отклик, полужесткие соединения, аналитические модели, механические модели, многоэтажные конструкции.*

***Abstract:** The present contribution is focused on statical and kinematic components of seismic response of multi-storey steel structures with semi-rigid beam-column connections. The dynamic model of these structures is a system with finite degrees of freedom and concentrated masses at each level. The degrees of freedom are expressed by the lateral level displacements. The semi-rigid behaviour of the beam-column connection is considered cyclic and is associated to an analytic model with four parameters. The structure is subjected to seismic action Vrancea 1977. The presented*

results refers to lateral level displacement and seismic base shear force. The principal aim of this work is comparing the different parameters static and kinematic.

Keywords: *Steel structures, seismic response, semirigid connections, analytical models, mechanical models, multi-storey structures.*

1. Введение

В наши дни, принимая во внимание гибкость соединения между *балкой и колонной*, это концепция, разработанная с аналитической точки зрения на основе большого набора экспериментальных результатов и в то же время широко принятая профессиональным сообществом. Состояние полужесткого соединения определяется проектными нормами, и не вызывает сомнений в отношении его точности моделирования стальных многоэтажных конструкций. Основой полужесткого поведения конструкции является аналитическая модель относительного вращения изгибающего момента $M-\Theta$. В вычислительной практике полужестких конструкций было применено несколько аналитических моделей, а также механические модели связи между колоннами балок^{1, 2, 3}. Актуальные тенденции в анализе этих типов структур сосредоточены на трех направлениях: уточненное моделирование зоны полужесткой связи, аналитическое моделирование периодического поведения полужесткой связи⁴, изучение поглотительной способности сейсмически индуцирующей энергии в структуре, обусловленной псевдо-пластичным поведением полужесткой связи.

¹ Pora, Anca, Mathe, Aliz, Анализ характеристик стальных конструкций с полужесткими соединениями на основе характеристик. 34-й симпозиум IABSE «Крупные структуры и инфраструктуры для экологически ограниченных и урбанизированных территорий», Венеция, 2010 г., стр. 356-364.

² Кэтэриг А., Алекса, П., Копенец, Л., Мате, Ализ, Лэдар, Иоана, Проблемы геометрически нелинейного анализа полужестких стальных конструкций. Международный семинар IASS Польское отделение, XV Юбилейный LSCE 2009, Варшава, 2009, с.29-32.

³ Alexa, P., Cătărig, A., Mathe, Aliz, Lădar, Ioana, Prodan, O. Анализ на основе характеристик полужестких стальных рам. Международный семинар IASS Польское отделение, XV Юбилейный LSCE 2009, Варшава, 2009, с. 14-19.

⁴ Stamatopoulos, G.N. Сейсмический отклик стальных каркасов с учетом гистерезисного поведения полужестких опор. Международный журнал стальных конструкций сентябрь 2014, том 14, № 3, Афины, стр. 609-618.

Этот вклад подходит в направлении моделирования и периодического поведения многоэтажных стальных конструкций.

Целью данной работы является сравнительный анализ двух компонентов, связанных с сейсмическим откликом полужестких конструкций: боковых смещений уровня и, соответственно, сейсмического базового сдвигающего усилия. Поперечное смещение уровня является классическим компонентом сейсмического отклика и в то же время представляет собой наиболее используемый инструмент выражения эффектов жесткости. Повышенная боковая жесткость неявно означает небольшие боковые смещения. Усилие сдвига сейсмического основания является выразительной составляющей состояния жесткости; условие высокой поперечной жесткости вызывает большую базовую сдвиговую силу, равно как и эквивалентные статические силы уровня и поперечные смещения.

Вот как состояние жесткости приводит к противоположным эффектам (выраженным параметрами сейсмического отклика). Подчеркивая эти противоположные эффекты, цель этой работы. Анализируемые стальные конструкции - каркасы плоскостей - имеют размеры в соответствии с положениями действующих кодов⁵, так как предельная изгибающая способность соединения составляет от 30% до 95% несущей способности изгиба балки в пластической области. Сейсмические воздействия состоят из зарегистрированных землетрясений и масштабируются до пикового значения ускорения грунта $a_g = 0,2g$. Аналитическая модель полужесткой связи балка-колонна, используемая в анализе, основана на монотонной модели с четырьмя параметрами, (1):

$$M = \frac{k_{co}\theta_c}{\left[1 + \left(\frac{\theta_c}{\theta_{\infty}}\right)^n\right]^{1/n}} \quad (1)$$

⁵ Европейская Комиссия-18366, Продвижение пластикового дизайна для стальных и композитных профилей: новые обязательные условия в Еврокодах 3 и 4, практические инструменты для дизайнеров. Серия исследований технической стали, Люксембург, 1998.

Монотонное отношение $M-\Theta g$ развивается и далее в циклической модели, установленной в используемом информативном произведении. Глобальная динамическая модель анализируемых структур основана на формулировке метода конечных элементов и соответствует системам с сосредоточенными массами и конечной степенью свободы.

Дифференциально-матричное уравнение, связанное с динамической моделью:

$$M \cdot \ddot{u}(t) + C \cdot \dot{u}(t) + R \cdot u(t) = -m \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

где:

- M - матрица масс ($n \times n$),
- R - матрица жесткости полужесткой конструкции, связанная с этими n степенями динамической свободы,
- C - матрица демпфирования ($n \times n$),
- m - вектор ($n \times 1$) инерции, определяемый соотношением $m = M \cdot I$, в котором I - единичный вектор ($n \times 1$),
- $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$, $u(t)$ - векторы ($n \times 1$) боковых смещений, скоростей и соответственно боковые ускорения на каждом уровне сосредоточенных масс,
- $\ddot{u}_g(t)$ - зарегистрированная акселерограмма прикладного сейсмического воздействия.

Модель демпфирования представляет собой «пропорциональное демпфирование», в котором:

$$C = \alpha M + \beta R \quad (3)$$

Было рассмотрено внутреннее состояние демпфирующих сердечников, соответствующее критической демпфирующей фракции 5%. Анализ проводится с помощью программного обеспечения Seismostruct. Поведение структуры, в том числе поведение полужесткой связи, соответствует упругой области.

Полученные результаты включают в себя конкретные параметры динамического поведения конструкции (собственные периоды и частоты

колебаний), статические и кинематические параметры, которые характеризуют сейсмический отклик.

Динамическая модель, подвергнутая анализу, представлена на рисунке 1.

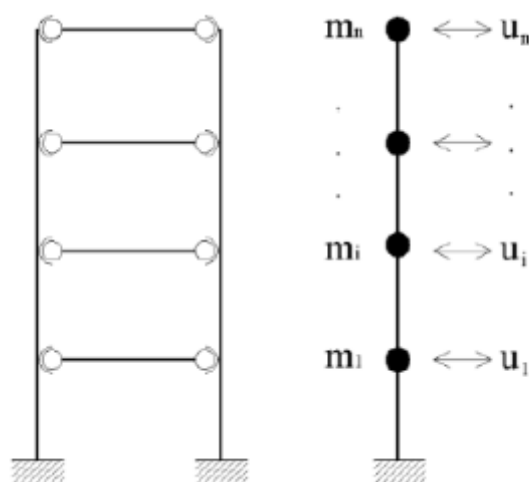


Рисунок 1.- Динамическая модель.

Результаты, связанные с полужесткими структурами, представлены сравнительным образом по сравнению с результатами гомологов, соответствующими эталонной структуре с жесткой связью балка-колонна.

2. Конструкции, полужесткие соединения и сейсмические воздействия

Сейсмический анализ проводится на наборе из 3 многоэтажных структур с плоской рамой, каждая из которых имеет 5 отсеков и 5, 9 и, соответственно, 12 уровней. Материал, используемый для конструкций и полужестких соединений, - сталь С355. Для структуры с 5 уровнями (рисунок 2), двутавровые балки представляют собой профили I 400, соответственно I 500.

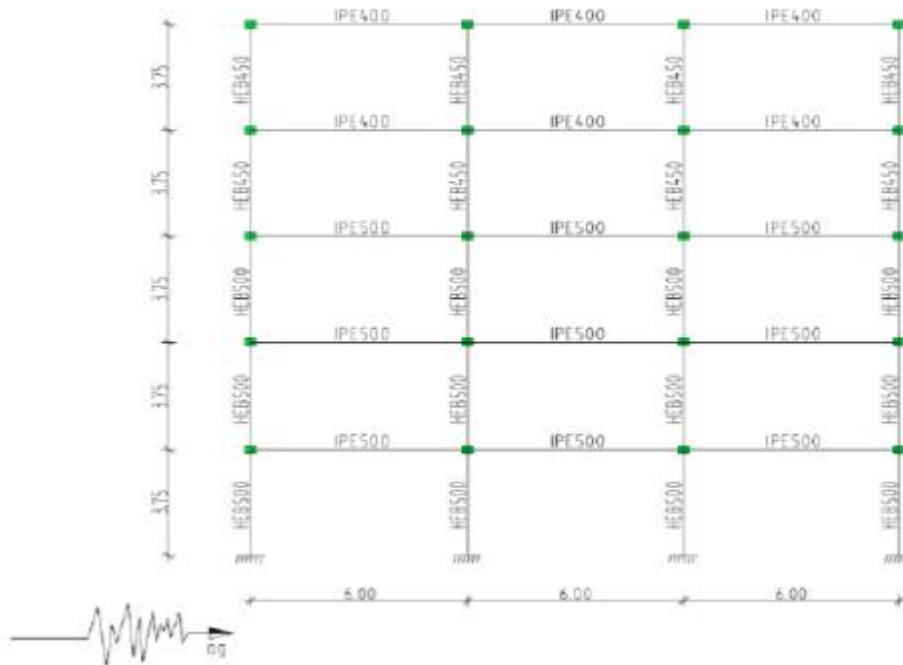


Рисунок 2. - Структура с 5 уровнями

В этой работе соединение полужесткой балки с колонной рассматривается как «нижний угол + верхний угол + угол перегиба». (Рисунок 3).

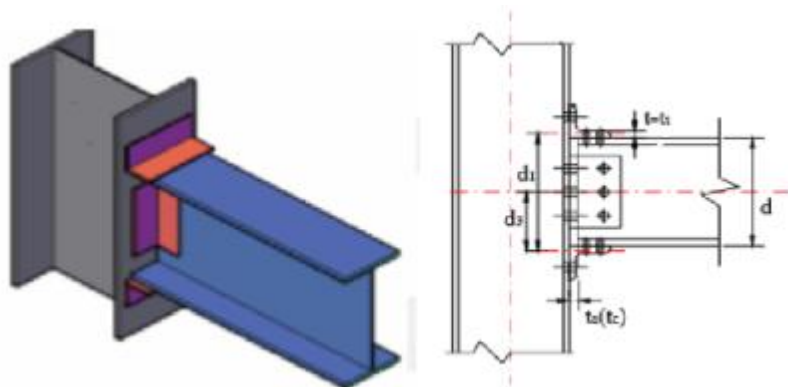


Рисунок 3. - Соединение с нижним углом, верхним углом и углом перегиба

Соединения полужесткой балки и колонны рассматриваются в 6 различных начальных ситуациях жесткости соединения i R . Аналитическая модель Ричарда и Эббота, связанная с монотонным поведением жестких связей, предполагает начальную жесткость i R .

В проведенном анализе начальная жесткость рассматривается в 6 ситуациях, относящихся непрерывно к узлу SR-1 до узла SR-6. Параметры аналитической модели Richard & Abbot, для двутавровой балки I 400, связанного с механической моделью (рисунок 3), представлены в таблице 1.

таблица 1

	Колебание SR-1	Колебание SR-2	Колебание SR-3	Колебание SR-4	Колебание SR-5	Колебание SR-6
R_i (kNm/rad)	40510	80690	121700	163800	208700	243500
M_u (kNm)	142	227	304	351	390	441
n	1,201	1,066	0,994	0,90	0,827	0,827

Обработанными сейсмическими воздействиями являются землетрясения Вранча 77 (Рисунок 4), Нортридж 94 и Кобе 95.

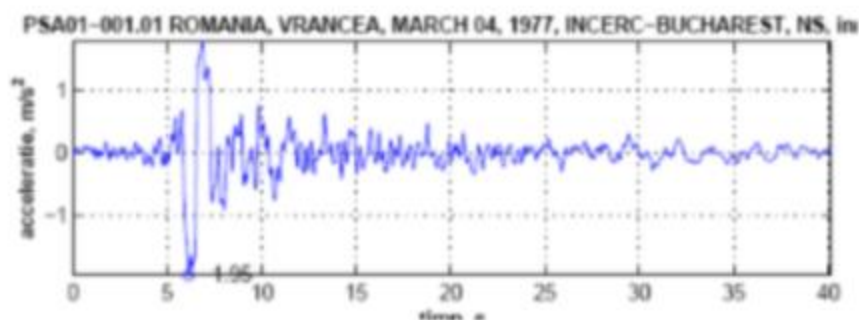


Рисунок 4. - Акселерограмма Вранча

В таблице 2 представлены пиковые значения ускорения грунта и преобладающие периоды этих 3 сейсмических воздействий.

таблица 2

	скорость, a g (m/s ²)	T, преобладающий период (s)
Kobe	1,962	0,16
Northridge	1,961	0,26
Vrancea 77	1,95	1,16

3. Численные результаты

Далее представлены численные результаты, полученные для конструкции с 5 уровнями (рисунок 2), пострадавшей от землетрясения Вранча 1977 года (рисунок 4). На рисунке 5 приведены динамические характеристики конструкции в этих 6 ситуациях начальной жесткости полужестких соединений, как в случае эталонной конструкции (жесткое соединение).

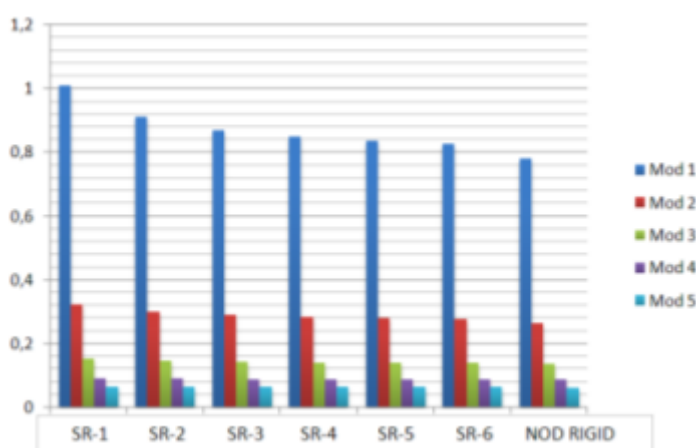


Рисунок 5. - Периоды структуры

Сейсмический отклик представлен боковыми смещениями на последнем уровне и силой сдвига сейсмического основания. Для ясности результаты представлены отдельно для каждой ситуации полужесткости в сравнении с результатами гомологов, полученными для эталонной структуры (рисунок 6).

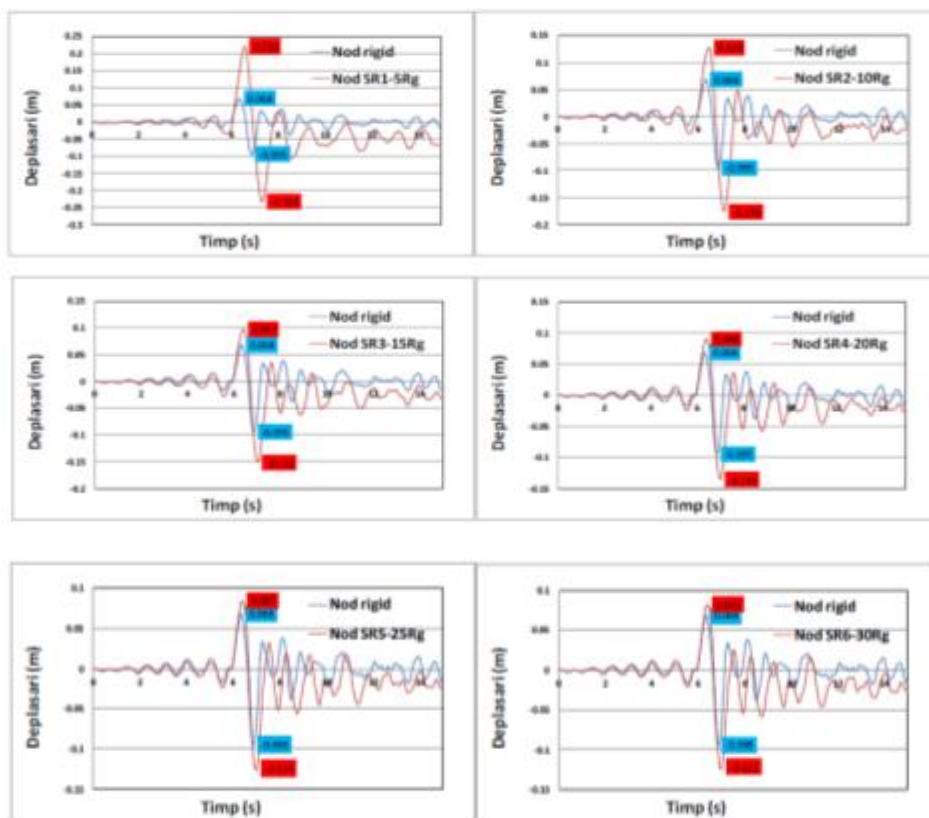


Рисунок 6. - Сравнение смещений в случае акселерограммы Вранча № 77
 Сейсмические базовые поперечные силы представлены парами для каждого случая полужесткости в зависимости от сейсмической базовой поперечной силы, связанной с эталонной структурой (рисунок 7).

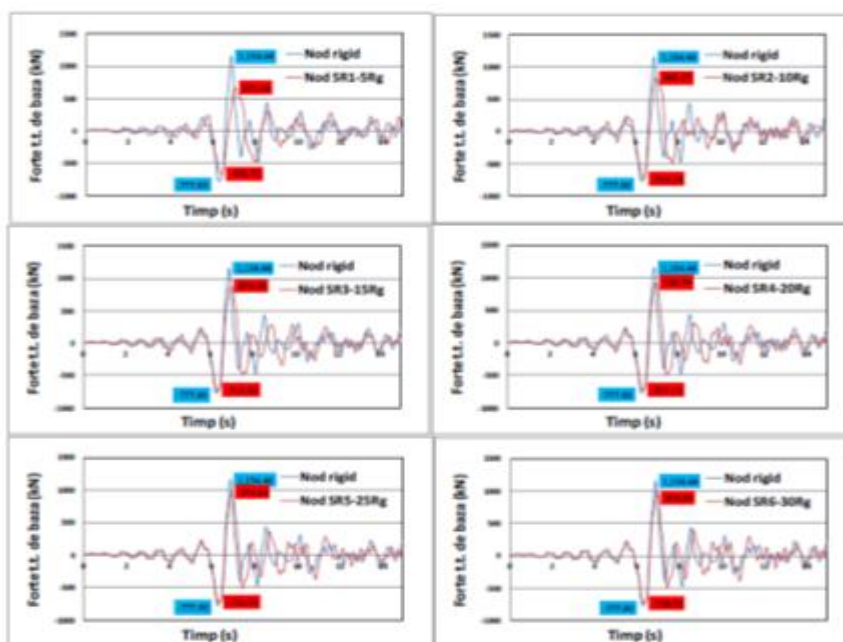


Рисунок 7. - Сравнение общей базовой силы сдвига в случае акселерограммы Вранча №77

4. Вывод

Представленные результаты подтверждают как посредством вычисленных абсолютных значений, так и путем сравнения с гомологическими результатами, связанными со структурами жестких соединений - влияние состояния жесткости на сейсмический отклик. Боковой жесткости присваивается «полужесткость» соединений балки с колонной. Из множества статических и кинематических параметров, через которые выражается сейсмическая реакция, были выбраны два, а именно: боковые смещения уровня и, соответственно, силы сдвига сейсмического основания. Противоречивые результаты вызваны состоянием жесткости, выраженным в зависимости от этих двух параметров, которые графически представлены в сравнительной, простой и прямой форме относительно влияния состояния полужесткости на сейсмическую реакцию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pora, Anca, Mathe, Aliz, Анализ характеристик стальных конструкций с полужесткими соединениями на основе характеристик. 34-й симпозиум IABSE «Крупные структуры и инфраструктуры для экологически ограниченных и урбанизированных территорий», Венеция, 2010 г., стр. 356-364 .
2. Кэтэриг А., Алекса, П., Копенец, Л., Мате, Ализ, Лэдар, Иоана, Проблемы геометрически нелинейного анализа полужестких стальных конструкций. Международный семинар IASS Польское отделение, XV Юбилейный LSCE 2009, Варшава, 2009, с.29-32.
3. Alexa, P., Cătărig, A., Mathe, Aliz, Lădar, Ioana, Prodan, O. Анализ на основе характеристик полужестких стальных рам. Международный семинар IASS Польское отделение, XV Юбилейный LSCE 2009, Варшава, 2009, с. 14-19.
4. Stamatopoulos, G.N. Сейсмический отклик стальных каркасов с учетом гистерезисного поведения полужестких опор. Международный журнал стальных конструкций сентябрь 2014, том 14, № 3, Афины, стр. 609-618.
5. Европейская Комиссия-18366, Продвижение пластикового дизайна для стальных и композитных профилей: новые обязательные условия в Еврокодах 3

и 4, практические инструменты для дизайнеров. Серия исследований технической стали, Люксембург, 1998.