

DOI: 10.32347/2786-7269.2023.6.183-191

УДК 692

Гусейнов Е.Г.,

thestreakisdead@gmail.com, ORCID: 0009-0007-0360-3615,
Київський національний університет будівництва та архітектури

АНАЛІЗ РАЦІОНАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВИСОТНОЇ БУДІВЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ АУТРИГЕРІВ ТА ЯДРА ПРИ СЕЙСМІЧНИХ ТА ВІТРОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

У сучасному світі висотні будівлі стають не лише символами архітектурного прогресу, але й складними інженерними спорудами, що вимагають досконалої конструктивної організації. Одним із ключових аспектів при проектуванні таких споруд є раціональна конструкція, яка враховує не тільки естетичні аспекти, але й високу стійкість до сейсмічних та вітрових навантажень.

У даній статті зосереджено увагу на аналізі раціональної конструкції висотних будівель з використанням системи аутригерів та ядра. Використання цих конструктивних елементів є важливим стратегічним вибором при забезпеченні оптимальної взаємодії між структурними компонентами та навантаженнями.

Ключові слова: висотні будівлі; ядро жорсткості; вітрове навантаження; сейсмічна навантаження; перекидальний момент; периметральні колони; оперізуюча ферма; вертикальний зв'язок; аутригерна система; демпфери; суцільний аутригер; рамний аутригер; фермовий аутригер.

Введення. У містах, таких як Гонконг і Нью-Йорк, 20-поверхова будівля не вважається висотною, але у містах, де мало будівель такої висоти, її вважають висотною. Однак з точки зору проектування конструкцій, висотну будівлю можна визначити як будівлю, конструктивна система якої має бути змінена, щоб зробити її достатньо економічною для витримання бічних навантажень [1]. Здатність висотних будівель витримувати бічні навантаження є причиною їх існування. У висотних будівлях бічне навантаження, створене вітром і землетрусами, стає значнішим. Це пов'язано зі збільшенням дії, що перекидає, навантажень, гнучкості, бічних і міжповерхових переміщень. Ці переміщення можуть загрожувати загальній структурній стабільності та становити загрозу мешканцям.

Системи аутригерів - це системи, які допомагають зменшити бічні навантаження та зміцнити висотні будівлі. У цих системах зовнішні та

внутрішні конструкції поєднуються, щоб витримувати бічні навантаження. Виносні ферми працюють як жорсткі важелі, що з'єднують ядро будівлі з зовнішніми колонами [2].

При дії бічних навантажень на будівлю ядро намагається повернутись, що призводить до появи сил на фермах аутригерів. Ці ферми створюють розтяг у навітряних колонах та стиснення у підвітряних колонах, які стабілізують будівлю (див. Рис. 1.1). Цей процес генерує відновлювальний момент, який працює на ядро на рівні аутригерів, що збільшує глибину конструкції та підвищує ефективність опори моменту згину.

Діафрагми над та під стрічковою фермою будуть намагатися рухатися вліво і вправо через обертання сердечника та момент, що виникає. Ремінна ферма, з'єднана з поверхами, буде рухатися у відповідь і однією стороною буде підніматися, а іншою - опускатися. Зовнішні колони стримуватимуть цей рух, створюючи протидіючі сили [4].

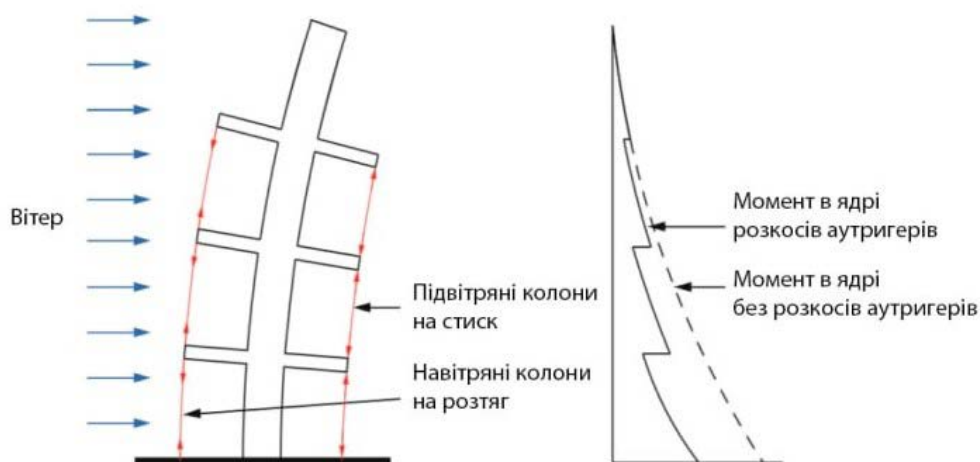


Рис. 1.1: Взаємодія аутригерів та ядра.

Один з прикладів використання системи аутригерів - це будівля Тур де ла Бурс у Монреалі, Канада, яка була побудована в 1960-х роках [3]. Ця будівля була першою, де була застосована система аутригерів, з меншою кількістю, але більшими колонами, що концентрують статичне навантаження. Більші колони розташовані на кожному куті будівлі з Х-подібними опорними фермами на чотирьох рівнях, які з'єднують ядро будівлі з цими колонами.

Переваги використання системи аутригерів у висотних будівлях:

1. Система аутригерів може бути виготовлена з будь-якого матеріалу, включаючи бетон, сталь або композит.
2. Сили підйому та розтягування можуть бути значно зменшені у всіх колонах та фундаментах.

3. Відстань між зовнішніми колонами може бути визначена архітектурними та функціональними міркуваннями, а не тільки структурними.

4. Використання простої балки та колони для зовнішнього каркасу забезпечує економічні переваги порівняно зі з'єднаннями типу жорсткої рами.

Типи систем аутригерів поділяються на два види в залежності від того, як вони з'єднані з ядром будівлі. Перший тип, відомий як пряма або звичайна система аутригерів, має безпосереднє з'єднання з розкисним ядром або стінками жорсткості та зовнішніми колонами. Другий тип, віртуальні або непрямі системи аутригерів та стрічкових ферм не мають прямих з'єднань стін ядра будівлі в вертикальних площинах [4].

Мета статті - аналіз та вивчення раціональної конструкції висотних будівель, зокрема використання систем аутригерів та ядра, з огляду на їх ефективність у умовах сейсмічних та вітрових навантажень. Основний акцент робиться на розумінні та вдосконаленні інженерних рішень для забезпечення максимальної стійкості та безпеки [5] високих будівель у різних сейсмічних та вітрових умовах.

Основні внески цієї статті:

1. Представлено чітку ілюстрацію параметрів, які впливають на продуктивність системи.

2. Оптимальне розташування першої опори було у верхній частині будівлі, а для другої опори – на середньому рівні будівлі.

3. У порівнянні з аутригерами на верхньому поверсі як головною фермою з стрічковою фермою та без неї, не було значного зменшення дрейфу з стрічковою фермою.

4. Трубна конструкція та конструктивна система зсувних стін не такі ефективні, як система виносних опор для будівель висотою понад 50 поверхів.

5. Жорсткість будівлі підвищується, якщо виносні опори розташовані впритул один до одного.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Кала Акаш та співавт. (2017) досліджували оптимальне розташування аутригерів у висотній залізобетонній будівлі під горизонтальним навантаженням. Вони вивчали 60-поверхову будівлю залізобетонної конструкції, щоб визначити оптимальне розміщення аутригерів з метою мінімізації вітрових навантажень за допомогою програмного забезпечення ETABS. В результаті дослідження визначили, що оптимальне розташування виносних опор - на третині висоти будівлі, тобто на 20-му поверсі, що дозволяє зменшити максимальне зміщення до 385 мм.

Абхїджит В. Чаван та професор Вайбхав В. Шелар (2017 р.) провели початковий аналіз тривимірних моделей залізобетонних будівель з балками та плитами, використовуючи програму ETABS. Для аналізу було створено п'ять

моделей з виносними опорами та без них, щоб порівняти максимальне зміщення на кожному рівні. В результаті дослідження було виявлено, що моделі з системою аутригерів, серцевиною та заповненою стіною зменшили максимальне відхилення від 40% до 65%. Рекомендується використовувати системи аутригерів та основну стіну для ефективного контролю бічного зміщення, оскільки це є більш економічним варіантом, ніж периферійні стіни зсуву.

Захід Манзур та співавт. (2019) досліджував поведінку 38-поверхової будівлі загальною висотою 133 метри за допомогою програмного забезпечення ETABS з використанням аналізу спектру відгуку та статичного вітру. В результаті цього дослідження встановлено, що модель з виносною опорою на висоті $h/4$ від вершини демонструє мінімальне знесення поверху при сейсмічному навантаженні. У той же час, модель з двома виносними опорами - одна на висоті $h/3$, а інша на висоті $2h/3$ - демонструє мінімальне знесення при вітровому навантаженні.

Розрахунок. У статті виконано розрахунок висотної структури з використанням програмного комплексу ЛІРА САПР 2022 та методу кінцевих елементів (МКЕ). Конструктивна схема будівлі представлена монолітним "ядром" та каркасом, який складається з монолітних колон. Взято до уваги розміри колон - 300x300 мм, товщина монолітних стін "ядра" - 250 мм, товщина монолітних перекриттів - 200 мм, висота кожного поверху - 3,0 м. План будівлі має розміри 30x30 м, а загальна висота становить 150 м.

Розрахункова будівля має два аутригерних поверхів (див. Рис. 3.1) на всій висоті будівлі. В якості аутригерної системи використовуються сталеві балки типу С345-1.

Відповідно до ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи. Норми проектування», прийняте допустиме значення граничного переміщення будівлі або окремих елементів згідно з формулою 1 становить 0,3 м:

$$f_u < \frac{h}{500}$$

На підставі досліджень на вибір раціональної конструкції аутригера, була складена Таблиця 1 – вплив форми плану вертикальних зв'язків аутригера на податливість конструкції 60-поверхової висотної будівлі [5]

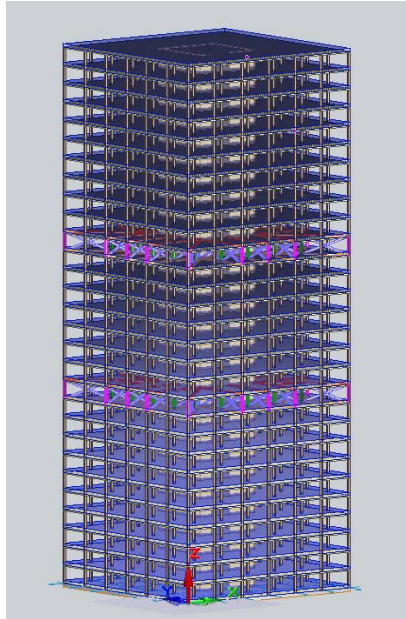
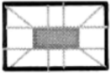
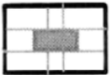



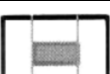

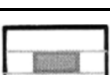
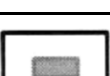



Рис. 3.1. Конструктивна модель будівлі

Таблиця 1.

Вплив варіантів планування вертикальних зв'язків аутригера на податливість конструкції 50-поверхової висотної будівлі

Варіант	Форма в плані	Розрахункові критерії будівлі			
		Горизонтальне переміщення верху будівлі (f), мм	Відносне переміщення верху будівлі (f/H)		Максимальне прискорення (a_{vib}), мм/с ²
			Значення, $\times 10^3$	Зменшення переміщення щодо будівлі без аутригера на %	
1	2	3	4	5	6
А	Без аутригера	226	0,95	0	27,64
Б		171	0,76	24	25,32
В		181	0,77	22	25,43
Г		185	0,72	18	25,04
Ґ		190	0,80	17	26,11

1	2	3	4	5	6
Д		187	0,82	21	26,40
Е		188	0,74	15	24,87
Є		181	0,69	17	25,56
Ж		191	0,81	15	25,41
З		190	0,77	16	25,37
И		182	0,76	21	25,74
І		197	0,83	16	25,36
Ї		207	0,86	11	25,44
Й		211	0,87	8	25,72
К		199	0,81	12	25,61

Висновок. Найбільш жорстка конструкція аутригера (схема Б), в якій вертикальні зв'язки розташовані у кожному кроці периметральних колон, призводить до зниження горизонтального переміщення верху будівлі на 24% порівняно з будівлею без використання поверхневої жорсткості. Однак такий варіант є важким для впровадження на практиці, оскільки в деяких точках конструкції, наприклад, в кутах ядра жорсткості, зустрічається значна кількість елементів із жорсткими вузлами. З реалізованих конструкцій найбільший вигреш у переміщеннях (21%) демонструє варіант Д, де зв'язки розташовані рівномірно по периметру облаштування та забезпечують однаковий перенос горизонтальних впливів [6] на зовнішні колони. Цей варіант розташування зв'язків конструктивно набагато простіший, ніж схема Б, при невеликій (менше 3%) різниці у показниках.

Розташування кутових зв'язків між кутами ядра жорсткості та кутами периметральної облаштування призводить до зменшення горизонтального [7] переміщення на 5% у відсутність вертикальних зв'язків по короткій стороні,

порівняно з схемою без кутових зв'язків. Важливо відзначити, що кутові вертикальні зв'язки не компенсують відсутність зв'язків по довжині (схеми І - переміщення 197 мм, ІІ - 207 мм і ІІІ - 190 мм). Встановлення лише кутових зв'язків зменшує горизонтальне переміщення верху будівлі на 12% (схема К), що є найменшим значенням у порівнянні з іншими варіантами.

Використання конструкції аутригера істотно підвищує жорсткість будівлі [8], що в свою чергу дозволяє знизити вартість будівництва за рахунок зменшення товщини ядра будівлі та площі армування.

Найбільш обґрунтованим розташуванням вертикальних зв'язків аутригера є те, при якому вони рівномірно розташовані за планом будівлі, тобто мають однаковий інтервал по всьому периметру. Не рекомендується використовувати схеми, де вертикальні зв'язки встановлюються лише з довгого боку будівлі [9], а особливо – лише з короткого.

Список джерел

1. Choi H.S., Ho G., Joseph L. *Outrigger Design for High-Rise Buildings*. – UK: Routledge, 2017. – P. 8–10.
2. Bungale S. Taranath. *Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction*. – Florida (USA): CRC Press, 2016. – P. 44–48.
3. Mir, M. A., & Ali, M. M. (2019). *Tall Buildings: Structural Systems and Aerodynamic Form*. Springer.
4. Kim, J. H., Kim, Y. H., & Lee, S. H. (2018). Seismic design of tall buildings with outrigger systems: A state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 158, 260-276.
5. Kim, J. H., Kim, Y. H., & Hong, J. P. (2015). Seismic performance assessment of high-rise buildings with a tuned mass damper and a core shear wall. *Engineering Structures*, 85, 106-116.
6. Zare, M., Khatibinia, M., & Moghadam, A. S. (2017). A comprehensive review on outrigger and belt truss systems: Concepts, modeling methods and applications. *Structural Engineering and Mechanics*, 62(6), 745-761. {in English}
7. Kareem, A., & Kijewski-Correa, T. (2018). Tall buildings and urban habitat: Models and application paradigms for wind engineering. *Journal of Structural Engineering*, 144(4), 04018030.
8. Lopes, R. J., & Warner, T. A. (2011). Behavior of outrigger-braced tall buildings during earthquakes. *Journal of Structural Engineering*, 137(4), 527-537.
9. Fan, L., Wang, J., & Lu, X. (2019). Recent advancements in the design and analysis of high-rise buildings under lateral loads. *Advances in Structural Engineering*, 22(16), 3399-3416.

Elnur Huseinov,
Kyiv National University of Construction and Architecture

ANALYSIS OF THE RATIONAL DESIGN OF A HIGH-RISE BUILDING USING A SYSTEM OF OUTRIGGERS AND A CORE UNDER SEISMIC AND WIND LOADS

The article highlights the analysis of the rational design of high-rise buildings, in particular the use of outrigger and core systems, in order to study their effectiveness under seismic and wind loads.

The most rigid design of the outrigger (diagram B), in which vertical ties are located at each step of the perimeter columns, leads to a decrease in the horizontal movement of the top of the building by 24% compared to the building without the use of surface stiffness. However, this option is difficult to implement in practice, because in some points of the structure, for example, in the corners of the stiffness core, there is a significant number of elements with rigid nodes. Of the implemented structures, the greatest gain in movements (21%) is demonstrated by variant D, where the ties are evenly located along the perimeter of the arrangement and ensure the same transfer of horizontal influences [6] to the external columns. This version of the arrangement of connections is structurally much simpler than scheme B, with a small (less than 3%) difference in indicators.

The location of corner connections between the corners of the rigid core and the corners of the perimeter arrangement leads to a reduction of horizontal [7] movement by 5% in the absence of vertical connections on the short side, compared to the scheme without corner connections. It is important to note that the angular vertical connections do not compensate for the lack of longitudinal connections (schemes I - displacement of 197 mm, Y - 207 mm and Z - 190 mm). Installing only corner connections reduces the horizontal movement of the top of the building by 12% (scheme K), which is the smallest value compared to other options.

The use of the outrigger structure significantly increases the rigidity of the building [8], which in turn allows to reduce the cost of construction due to the reduction of the thickness of the building core and the area of reinforcement.

The most justified location of the vertical connections of the outrigger is the one in which they are evenly located according to the building plan, that is, they have the same interval along the entire perimeter. It is not recommended to use schemes where vertical connections are established only on the long side of the building [9], and especially only on the short side. Therefore, the use of a rigid belt in the building contributes to the reduction of horizontal movements at the entire height, effectively minimizes fluctuations caused by the influence of wind load. The use of an outrigger

structure significantly increases the rigidity of the building, which in turn allows to reduce the cost of construction due to the reduction of the thickness of the building core and the area of reinforcement.

The most justified location of the vertical connections of the outrigger is the one in which they are evenly located according to the building plan, that is, they have the same interval along the entire perimeter. It is not recommended to use schemes where vertical connections are installed only on the long side of the building, and especially only on the short side.

Keywords: high-rise buildings; core of rigidity; wind load; seismic load; tipping moment; perimeter columns; girding truss; vertical connection; outrigger system, dampers; solid outrigger; frame outrigger; truss outrigger.

REFERENCES

1. Choi H.S., Ho G., Joseph L. *Outrigger Design for High-Rise Buildings*. – UK: Routledge, 2017. – P. 8–10. {in English}
2. Bungale S. Taranath. *Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction*. – Florida (USA): CRC Press, 2016. – P. 44–48. {in English}
3. Mir, M. A., & Ali, M. M. (2019). *Tall Buildings: Structural Systems and Aerodynamic Form*. Springer. {in English}
4. Kim, J. H., Kim, Y. H., & Lee, S. H. (2018). Seismic design of tall buildings with outrigger systems: A state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 158, 260-276. {in English}
5. Kim, J. H., Kim, Y. H., & Hong, J. P. (2015). Seismic performance assessment of high-rise buildings with a tuned mass damper and a core shear wall. *Engineering Structures*, 85, 106-116. {in English}
6. Zare, M., Khatibinia, M., & Moghadam, A. S. (2017). A comprehensive review on outrigger and belt truss systems: Concepts, modeling methods and applications. *Structural Engineering and Mechanics*, 62(6), 745-761. {in English}
7. Kareem, A., & Kijewski-Correa, T. (2018). Tall buildings and urban habitat: Models and application paradigms for wind engineering. *Journal of Structural Engineering*, 144(4), 04018030. {in English}
8. Lopes, R. J., & Warner, T. A. (2011). Behavior of outrigger-braced tall buildings during earthquakes. *Journal of Structural Engineering*, 137(4), 527-537. {in English}
9. Fan, L., Wang, J., & Lu, X. (2019). Recent advancements in the design and analysis of high-rise buildings under lateral loads. *Advances in Structural Engineering*, 22(16), 3399-3416. {in English}