

УДК 64.04

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ УРАХУВАННЯМ ФІЗИЧНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ

М.О. Вабіщевич¹,

д-р техн. наук

Н.В. Нестор²,

д-р юрид. наук

І.К. Фесун¹,

аспірант

М.М. Бурківський¹,

аспірант

¹Київський національний університет будівництва і архітектури

²Київський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства юстиції України

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.81-88

Сучасний етап досліджень забезпечення стійкості будівельних конструкцій проти прогресуючого обвалення орієнтований на пошук так званих «прихованих резервів» несучої здатності будівель та споруд. Одним із шляхів вирішення цієї задачі є врахування фактичної роботи матеріалів, зокрема для сталевих каркасів це зумовлює використання нелінійної моделі поведінки конструкцій, збільшення допустимої межі деформування та допустимість утворення пластичних шарнірів. Метод альтернативного шляху, як один із прямих методів забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель і споруд, передбачає спроможність конструкції або системи в цілому перерозподіляти навантаження при відмові окремого елемента. Реалізація моделювання раптового видалення конструкції можлива квазістатичним та динамічним методами.

Ключові слова: фізична нелінійність, розрахунок, прогресуюче обвалення, раптове видалення, квазістатичний метод, динамічний метод, моделювання, аварійні навантаження.

Вступ. За історичними відомостями перші дослідження явища прогресуючого обвалення та методів запобігання його виникненню датуються 60-ми роками минулого століття. Однак значне поживлення інтересу до цієї теми розпочалося з початку нового тисячоліття і триває до сьогодні. Це зумовлено низкою таких чинників:

- виникнення всесвітньо відомих випадків прогресуючого обвалення (вежі ВТЦ, Murrah Office Building, Skyline Plaza) [1];
- появою технологічних можливостей виконання просторових розрахунків;
- введенням в окремі нормативні документи вимог про забезпечення стійкості проти прогресуючого обвалення [2];
- величезною кількістю зруйнованих будівель і споруд внаслідок повномасштабного вторгнення рф в Україну [3];
- істотною кількістю будівель і споруд, які за очевидними ознаками мали бути повністю зруйнованими внаслідок руйнування окремих ключових несучих конструкцій, а залишилися частково пошкодженими (внаслідок повномасштабного вторгнення рф в Україну);
- відсутністю єдиних методик розрахунку, якими необхідно керуватись під час розрахунків на прогресуюче обвалення [2];
- малозабезпечений стан нормативної бази щодо стійкості за прогресуючого обвалення будівель та споруд [2].

Сучасний етап досліджень забезпечення стійкості будівельних конструкцій проти прогресуючого обвалення орієнтований на пошук так званих «прихованих резервів» несучої здатності будівель та споруд.

Орієнтовний перелік факторів, врахування яких на етапі чисельного моделювання аварійної ситуації прогресуючого обвалення, зможе підвищити стійкість та запас несучої здатності конструкцій, наступний:

- 1) застосування понижених коефіцієнтів надійності за відповідальністю, за надійністю та за умовами роботи матеріалів;
- 2) складання особливих сполучень навантажень, що враховують найімовірніші фактичні навантаження;
- 3) врахування самонесучих конструкцій в роботі каркасу під дією навантажень – вимога норм п.6.4.2 та п.6.4.4[4];
- 4) використання фактичних діаграм поведінки матеріалів (врахування фізичної нелінійності) – вимога норм п.6.4.4 [4];
- 5) врахування деформованого стану конструкцій (геометрична нелінійність)– вимога норм п.6.4.4 [4];
- 6) розрахунок лише головних несучих конструкцій категорії А1 за граничними станами першої групи – вимога норм п.6.4.1 [4];
- 7) вибір методу моделювання раптового видалення конструкції.

Збір навантажень. Процес збору навантажень під час розгляду аварійної ситуації прогресуючого обвалення регламентується, перш за все, положеннями норм [4] та [11], а вже згодом уточнюється додатковими нормативними документами.

Зокрема, в останньому абзаці п.4.17 [4] вказано «Вимоги щодо використання аварійних навантажень та впливів приймаються за нормами проектування будівель і споруд певного функціонального призначення»; у п.4.18 [4] не наведено коефіцієнтів сполучення короткочасних навантажень для особливих сполучень, тобто короткочасні навантаження під час розгляду аварійної ситуації не враховуються.

Наприклад, у п.9.4.5 [12] «Постійні та квазіпостійні значення навантажень при перевірці стійкості будівлі прогресуючому обваленню слід приймати згідно з ДБН В.1.2-2[11], ДБН В.1.2-14 [4]. При цьому коефіцієнти надійності за навантаженням приймаються за одиницю».

Таким чином, аварійна розрахункова ситуація прогресуючого обвалення включає постійні та тривалі навантаження з коефіцієнтами надійності рівним одиниці, короткочасні навантаження не враховуються.

Врахування фактичної роботи матеріалів. У випадку сталі це використання нелінійної моделі замість лінійної, збільшення допустимої межі деформування, допустимість утворення пластичних шарнірів.

При цьому відповідно до п.6.4.4. [11] у просторовій моделі врахування фізичної та геометричної нелінійностей під час розрахунку на прогресуюче обвалення обов'язкове.

Відповідно до п.5.3.6 [5] сталеві конструкції поділяються на три класи залежно від виду напружено-деформованого стану (надалі – НДС):

- 1 клас – допускається лише пружна робота перерізу;
- 2 клас – допускається пружно-пластична робота перерізу;
- 3 клас – допускається пластична робота перерізу.

Відповідно до п.9.2.7 [5] розрахунок на міцність нерозрізних балок і защемлених балок допускається виконувати за формулою (1)(формула 9.10 [5]) як розрахунок перерізів 3-го класу (з урахуванням перерозподілу згинальних моментів і утворенням пластичних шарнірів) у розрахункових перерізах, де діє максимальний момент

$$\frac{M_x \gamma_n}{c_x \beta_r W_{x, \min} R_y \gamma_c} \leq 1. \quad (1)$$

Таким чином, згідно (1) фізична нелінійність сталі (розрахунки конструкцій з урахуванням пластичних деформацій) врахована через коефіцієнт c_x , відбувається збільшення розрахункового опору з використанням цього коефіцієнту на 4-60% залежно від схеми перерізу. При цьому відповідно до п.5.3.7 «при спеціальному обґрунтуванні допускається використовувати більш точні розрахункові моделі (наприклад, геометрично чи фізично нелінійні...».

В інженерних розрахунках використовуються різні діаграми «напруження-деформація», здебільшого це спрощені білінійні діаграми, білінійні із зміцненням, трилінійні, їх похідні, криволінійні тощо (рис. 1 [8]).

Однак деякі дослідники стурбовані тим, що недооцінка пластичної поведінки конструкцій може призвести до серйозних похибок, особливо за аварійних ситуацій [7]. Тому пропонується

для розрахунків стійкості проти прогресуючого обвалення використовувати реальну діаграму сталі. Використання фактичної діаграми передбачає використання не лише ділянок пропорційності за ustalеними нормами, а і використанням площадки текучості та, за відповідного обгрунтування, зони зміцнення або і зони руйнування.

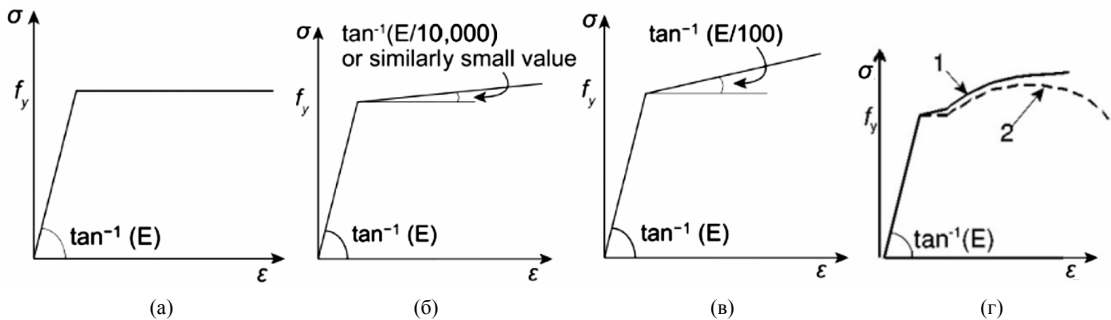


Рис. 1. Моделювання властивостей матеріалу [8]: а) без деформаційного зміцнення; б) з умовним деформаційним зміцненням; в) з лінійним деформаційним зміцненням; г) фактична крива напруження деформації (1 – дійсна крива; 2 – за результатами випробувань)

Ключовим питанням є вибір допустимої межі деформування, яка залежить не лише від вибору моделі матеріалів, а і від класу сталі, умов розрахункових ситуацій. Широка варіативність вхідних умов унеможливує встановлення єдиних граничних меж деформування. Наприклад, рекомендоване обмеження значення основної деформації моделей рис. 2 [8] становить 5%, щоб уникнути неконсервативних результатів [7]. У дослідженні прогресуючого обвалення каркасу, що відбулося внаслідок зіткнення транспортного засобу [9] використана фактична криволінійна модель, гранична деформація прийнята рівним 20%, 18% і 10% для балок, колон і з'єднань відповідно. У дослідженні динамічного видалення колон із сталевго каркасу [10] прийнято спрощену білінійну модель із граничною деформацією 20%.

Вибір методу моделювання раптового видалення конструкції.

Метод альтернативного шляху, як один із прямих методів забезпечення стійкості за прогресуючого обвалення будівель і споруд, передбачає забезпечення спроможності конструкції або системи в цілому перерозподіляти навантаження при відмові окремого елемента. Реалізація моделювання раптового видалення конструкції можлива такими методами [6]:

- квазістатичний (pulldown аналіз; pushdown аналіз);
- динамічний (пряме інтегрування рівнянь руху за часом).

Реалізація квазістатичного методу відбувається за умови прикладання реакції зворотного знаку з коефіцієнтом динамічності K_d [6]. Реалізація динамічного методу відбувається за умови парирования навантаження, що моделюється,

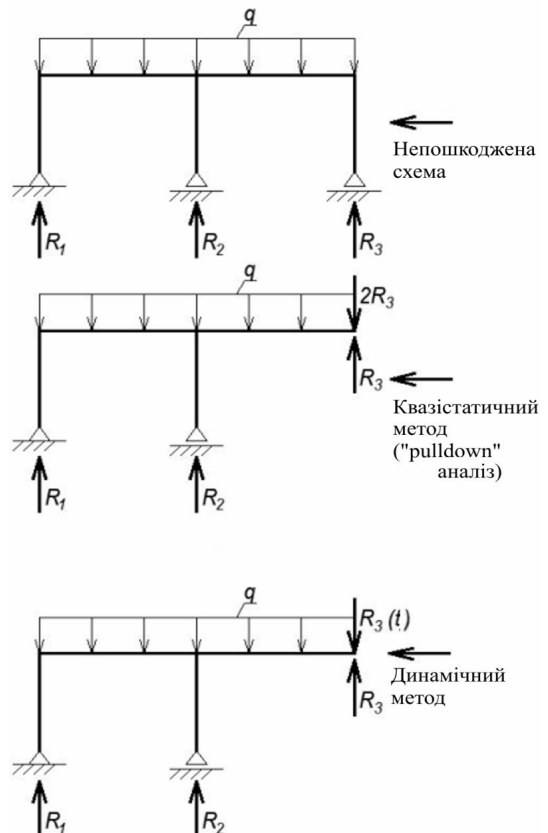


Рис. 2. Методи моделювання раптового видалення конструкції

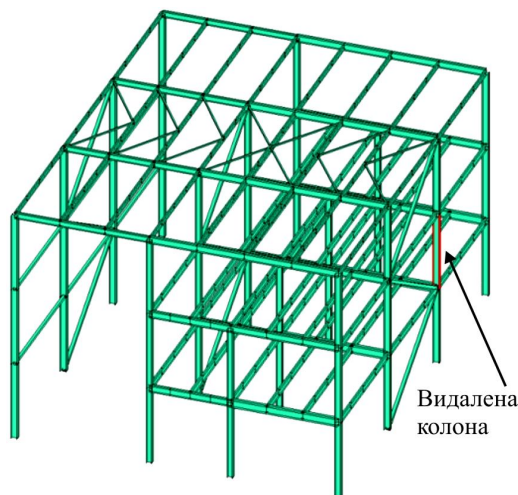


Рис. 3. Скінченно-елементна модель триповерхового сталевого каркасу

Прикладне дослідження. Для дослідження прогресуючого обвалення виконаний скінченно-елементний розрахунок триповерхового сталевого каркасу з урахуванням раптового руйнування середньої колони крайнього ряду (виділено на рис. 3).

Перерізи колон, ригелів та балок – прокатні двотаври, елементів в'язей – холодногнуті зварні труби квадратного перерізу.

Матеріал усіх конструктивних елементів – сталь С255. При урахуванні особливого сполучення зусиль характеристики розрахункового опору сталі прийнято нормативними. Моделювання фізично нелінійної деформації сталі прийнято на основі білінійної діаграми із зміцненням до величини тимчасового опору (межа текучості 245 МПа, межа тимчасового опору 370 МПа). Межа деформативності відповідає точці тимчасового опору на графіку «напруження-деформація», в дослідженні прийнята рівним 16,84%.

Під час моделювання раптового обвалення квазістатичним методом коефіцієнт динамічності Кд прийнято рівним двом (за рекомендацією [13] та [14]).

Моделювання раптового обвалення динамічним методом здійснено за сценарієм згідно рекомендацій [14]:

1) поступове навантаження системи – 5 с (напружено-деформований стан системи із видаленою колоною відтворений за рахунок прикладання відповідних реакцій у вузлі видаленої колони);

2) витримка системи – 3 с;

3) парировання навантаження – прикладання навантаження від'ємного знаку, що змінює своє значення від нуля до одиниці – 0.0284646 с (прийнято як 1/10 періоду власних коливань непошкодженої схеми);

4) прикладання навантаження від видаленої колони на конструкції перекриття нижнього поверху – 0.0284646 с (прийнято аналогічно до попереднього пункту);

5) час спостереження – 12 с (тривалість не менше ніж до досягнення максимального переміщення або до одного циклу вертикального руху).

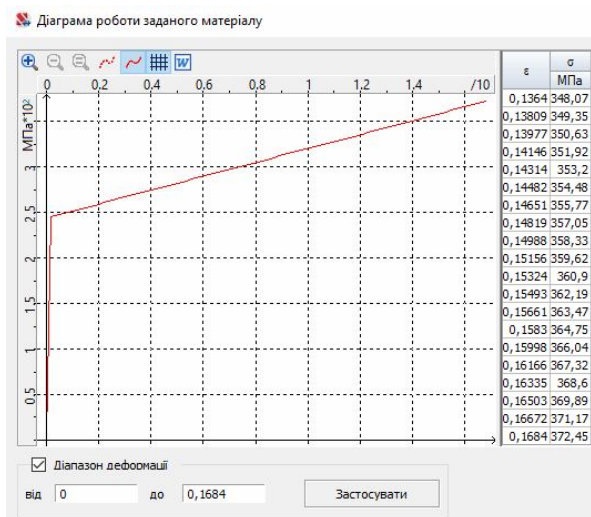


Рис. 4. Прийнята діаграма роботи сталі

Результати дослідження

Для аналізу відмінностей напружено-деформованих станів при використанні означених підходів до моделювання явища раптового обвалення досліджено переміщення вузла над видаленою колоною, внутрішні зусилля в скінченних елементах ригеля та колони рами просторового сталевого каркасу (рис. 5). Повні результати дослідження наведені в табл. 1.

Зміна значень вертикальних переміщень досліджуваного вузла для квазістатичного, пружно-динамічного, та нелінійно динамічних варіантів розрахунків наведено на рис. 6.

Зміна в часі величин згинальних моментів для ригеля перекриття (див. рис. 5) при вищезазначених варіантах розрахунку наведено на рис. 7.

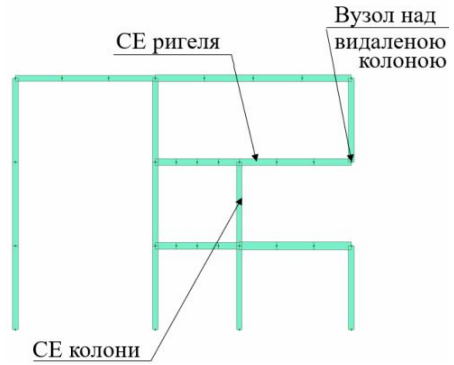


Рис. 5. Рама у складі просторового каркасу

Таблиця 1

Зведені результати дослідження раптового обвалення різними методами

№	Метод	Задача	Переміщення вузла над видаленою колоною, мм	Колона	Ригель
				max момент, тсм	max момент, тсм
1	квазістатичний	лінійна	-140,74	18,13	-49,38
2	квазістатичний	фіз. нелінійна	-98,43	24,94	-35,18
3	динамічний	лінійна	-130,93	17,89	-46,04
4	динамічний	фіз. нелінійна	-82,03	24,07	-34,29
5	динамічний	фіз. нелінійна + геом. нелінійна	-82,71	23,91	-34,27

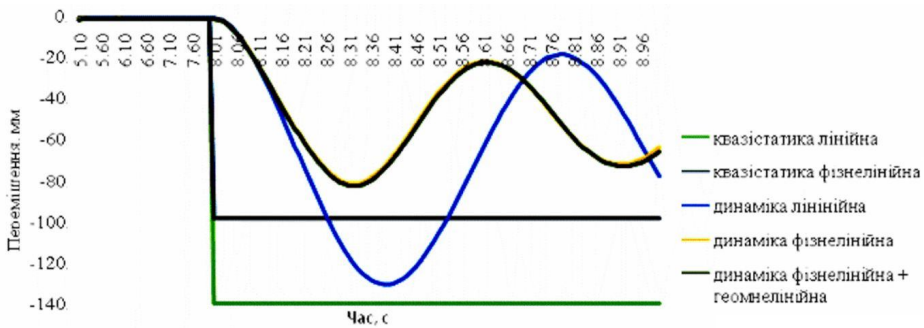


Рис. 6. Переміщення вузла над видаленою колоною

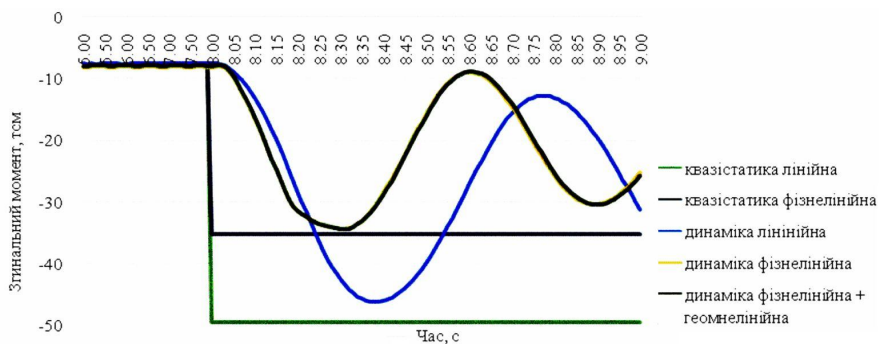


Рис. 7. Згинальний момент ригеля по часу

Висновки

1. Результати дослідження НДС просторового сталевих каркасу з урахуванням фізичної нелінійності матеріалу у порівнянні з пружною постановкою показали, що незалежно від способу моделювання раптового обвалення, різниця отриманих параметрів наступна:

- переміщення вузла над видаленою колоною менші на 40-60%;
- згинальний момент ригеля перекриття менший на 35-40%;
- згинальний момент колони більший на 35-40%.

2. Результати дослідження при моделюванні раптового обвалення динамічним методом у порівнянні із квазістатичним показали, що:

- переміщення вузла над видаленою колоною менші на 7-20%;
- згинальний момент ригеля перекриття менший на 3-7%;
- згинальний момент колони менший на 1-4%.

3. Врахування геометричної нелінійності при фізично нелінійному деформуванні каркасу не призвело до помітних змін результатів розрахунку. Це ймовірно пояснюється незначними за величиною прольотами горизонтальних елементів каркасу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. R. Shankar Nair. Progressive Collapse Basics // Modern Steel Construction. – 2004.
2. Вабіщевич М.О., Фесун І.К. Підходи щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель та споруд. Сучасний стан та перспективи// Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 110. – С. 256-263.
3. Вабіщевич М.О., Фесун І.К. Про обстеження індивідуальних житлових будинків, що були пошкоджені та зруйновані внаслідок бойових дій. Управління розвитком складних систем. Київ, 2023. № 53. С. 127 – 134, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.127-134.
4. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Із Зміною №1 – К.: Мінрегіонбуд України, 2018. – 36 с. – Чинний від 01.01.2019.
5. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. Із Зміною №1 – К.: Мінрегіон України, 2014. – 206 с. – Чинний від 01.01.2015.
6. Барабаш М.С. Питання опору прогресуючому руйнуванню несучих систем у ПК Ліра-САПР // Сталій розвиток авіаційної інфраструктури України: колективна монографія. — Львів - Торунь :Liha-Pres, 2023. — С. 301-316.
7. Zhang, Z.-J.; Chen, B.-S.; Bai, R.; Liu, Y. -P. Non-Linear Behavior and Design of Steel Structures: Review and Outlook. Buildings 2023, 13, 2111. <https://doi.org/10.3390/buildings13082111>
8. EN1993-1-5; Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-5: Plated Structural Elements. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2006.
9. Kang, H.; Kim, J. Progressive collapse of steel moment frames subjected to vehicle impact. J. Perform. Constr. Facil. 2015, 29, 04014172.
10. Janfada Iman S, Sheidaii Mohammad Reza, Kiakojouri Foad. Comparative analysis of code-based dynamic column removal and impact-induced progressive collapse in steel moment-resisting frames. Int J Steel Struct 2023; 23:1576–86. <http://dx.doi.org/10.1007/s13296-023-00788-2>.
11. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування із змінами №1 та №2. К.: Мінбуд України, 2007.
12. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд України, 2019. – 50 с. – Чинний від 01.01.2020.
13. SCADOffice. Версія 23. Вычислительный комплекс SCAD++ / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Малайренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер, С.Ю. Фиалко. — Издательство «СКАД СОФТ», 2024.— 992 стр.
14. General Services Administration (GSA), (2013), Alternate path analysis and design guide lines for progressive collapse analysis, General Services Administration, Washington, DC.

REFERENCES

1. R. Shankar Nair. Progressive Collapse Basics // Modern Steel Construction. - 2004.
2. Vabishchevych M.O., Fesun I.K. Pidkhody shchodo zabezpechennia stiiikosti do prohresuiiuchoho obvalennia budivel ta sporud. Suchasnyi stan ta perspektyvy (Approaches to ensuring resistance to the progressive collapse of buildings and structures. Current state and prospects)// Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekh. zbirnyk. – K.: KNUBA, 2023. – Vyp. 110. – S. 256-263.
3. Vabishchevych M.O., Fesun I.K. Pro obstezhennia indyvidualnykh zhytlovykh budynkiv, shcho buly poshkodzheni ta zruinovani vnaslidok boiovykh dii. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. Kyiv, 2023. № 53. S. 127 – 134, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.127-134.
4. DBN V.1.2-14:2018. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh obiektiv. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud. Iz zminoiu No. 1 (The system for ensuring the reliability and safety of construction objects. General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures. With Amendment No. 1). – K.: MinrehionbudUkrainy, 2018. – 36 s. – Chynnyi vid 01.01.2019.
5. DBN V.2.6-198:2014 Stalevi konstruktzii. Normy proektuvannia. Iz Zminoiu №1 (Steel structures. Design standards. With Amendment No. 1) – K.: MinrehionUkrainy, 2014. – 206 s. – Chynnyi vid 01.01.2015.

6. Barabash M. S. Pytannia oporu prohresuiuchomu ruinuvanniu nesuchykh system u PK Lira-SAPR // Stalyi rozvytok aviatsiinoi infrastruktury Ukrainy: kolektyvna monohrafiya. - Lviv - Torun : Liha-Pres, 2023. — S. 301-316.
7. Zhang, Z.-J.; Chen, B.-S.; Bai, R.; Liu, Y.-P. Non-Linear Behavior and Design of Steel Structures: Review and Outlook. Buildings 2023, 13, 2111. <https://doi.org/10.3390/buildings13082111>
8. EN1993-1-5; Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-5: Plated Structural Elements. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2006.
9. Kang, H.; Kim, J. Progressive collapse of steel moment frames subjected to vehicle impact. J. Perform. Construction Facil. 2015, 29, 04014172.
10. Janfada Iman S, Sheidaii Mohammad Reza, Kiakojouri Foad. Comparative analysis of code-based dynamic column removal and impact-induced progressive collapse in steel moment-resisting frames. Int J Steel Struct 2023;23:1576–86.<http://dx.doi.org/10.1007/s13296-023-00788-2>.
11. DBN V.1.2-2:2006. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia iz zminamy №1 ta №2. (System for ensuring the reliability and safety of construction objects. Loads and influences. Design norms with changes No. 1 and No. 2.) K.: MinbudUkrainy, 2007.
12. DBN V.2.2-41:2019. Vysotni budivli. Osnovni polozhennia (High-rise buildings. Substantive provisions). – K.: MinrehionbudUkrainy, 2019. – 50 s. – Chynnyi vid 01.01.2020.
13. SCAD Office. Versiya 23. Vychislitelnyi kompleks SCAD++ / V.S. Karpilovskiy, Э.З. Kryksunov, А.А. Maliarenko, А.В. Perelmuter, М.А. Perelmuter, S.Iu. Fyalko. — Yzdatelstvo «SKADSOFT», 2024.— 992 str.
14. General Services Administration (GSA), (2013), Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse analysis, General Services Administration, Washington, DC.

Стаття надійшла 30.09.2024

Вабищевич М.О., Нестор Н.В., Фесун І.К., Бурківський М.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ УРАХУВАННЯМ ФІЗИЧНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ

У статті комплексно проаналізовано проблематику дослідження явища прогресуючого обвалення, визначено сучасний етап дослідження, визначено ключові питання під час моделювання раптового видалення конструкцій, наведено результати дослідження раптового обвалення сталевих конструкцій без урахування та з урахуванням фізичної нелінійності.

Визначено низку чинників пошкваллення інтересу до теми дослідження прогресуючого обвалення, що розпочалося з початку нового тисячоліття і триває до сьогодні. Сюди відноситься виникнення всесвітньо відомих випадків прогресуючого обвалення, величезною кількістю зруйнованих будівель і споруд внаслідок повномасштабного вторгнення РФ в Україну, істотною кількістю будівель і споруд, які за очевидними ознаками мали бути повністю зруйнованими внаслідок руйнування окремих ключових несучих конструкцій, а залишилися частково пошкодженими, малозабезпечений стан нормативної бази щодо стійкості за прогресуючого обвалення будівель та споруд, появою технологічних можливостей виконання просторових розрахунків тощо.

Визначено орієнтовний перелік факторів, врахування яких на етапі чисельного моделювання аварійної ситуації прогресуючого обвалення, зможе підвищити стійкість та запас несучої здатності конструкцій. Проаналізовано сучасну нормативні вимоги щодо врахування фізичної нелінійності сталевих конструкцій. Додатково піддано оцінці параметрів моделювання фізичної нелінійності, а саме вибір діаграми «напруження-деформація», вибір межі деформування тощо.

До порівняння винесено квазістатичний та динамічний методи моделювання раптового обвалення, коротко проаналізовано алгоритм реалізації обох методів. Описано сценарії за якими відбулось моделювання процесу раптового обвалення.

Ключові слова: фізична нелінійність, розрахунок, прогресуюче обвалення, раптове видалення, квазістатичний метод, динамічний метод, моделювання, аварійні навантаження.

Vabishchevich M.O., Nestor N.V., Fesun I.K., Burkivskiy M.M.

THE INVESTIGATION OF PROGRESSIVE COLLAPSE OF STEEL STRUCTURES CONSIDERING PHYSICAL NONLINEARITY

The article comprehensively analyzes the problems of research into the phenomenon of progressive collapse, defines the current stage of research, identifies key issues during the simulation of sudden removal of structures, gives the results of the study of sudden collapse of steel structures without taking into account and taking into account physical nonlinearity.

A number of factors have been identified for the revival of interest in the topic of progressive collapse research, which began at the beginning of the new millennium and continues to this day. This includes the occurrence of world-famous cases of progressive collapse, a huge number of destroyed buildings and structures as a result of the full-scale invasion of the Russian Federation into Ukraine, a significant number of buildings and structures that, according to obvious signs, should have been completely destroyed due to the destruction of certain key load-bearing structures, but remained partially damaged, a low-income state regulatory framework regarding stability in the event of progressive collapse of buildings and structures, the emergence of technological possibilities for performing spatial calculations, etc.

An approximate list of factors has been defined, the consideration of which at the stage of numerical modeling of the emergency situation of a progressive collapse can increase the stability and reserve of the load-bearing capacity of structures. The current regulatory requirements for taking into account the physical nonlinearity of steel structures are analyzed. In addition, the parameters of physical nonlinearity modeling were evaluated, namely the selection of the "stress-strain" diagram, the selection of the deformation limit, etc.

Quasi-static and dynamic methods of modeling sudden collapse are compared, and the implementation algorithm of both methods is briefly analyzed. The scenarios according to which the simulation of the sudden collapse process took place are described.

Keywords: physical nonlinearity, calculation, progressive collapse, sudden removal, quasi-static method, dynamic method, modeling, emergency loads.

УДК 64.04

Вабіщевич М.О., Нестор Н.В., Фесун І.К., Бурківський М.М. Дослідження прогресуючого обвалення сталевих конструкцій із урахуванням фізичної нелінійності // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 113. – С. 81-88.

У статті наведено результати дослідження раптового обвалення сталевих конструкцій, які будуть корисними для інженерів-проектувальників та студентів будівельних спеціальностей ВНЗ.

Лл. 7. Бібліогр. 14 назв.

UDC 64.04

Vabishchevich M.O., Nestor N.V., Fesun I.K., Burkivskiy M.M. The investigation of progressive collapse of steel structures considering physical nonlinearity // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles. – K.: KNUBA, 2024. – Issue 113. – P. 81-88.

The article presents the results of the study of the sudden collapse of steel structures, which will be useful for design engineers and students of construction specialties of universities.

Fig. 7. Ref. 14.

Автор: доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельної механіки КНУБА ВАБІЩЕВИЧ Максим Олегович

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Робочий тел.: +38 (044) 241-55-55

Мобільний тел.: +38 (050) 928-40-70

Email: vabix@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0755-5186>

Автор: доктор юридичних наук, заступник директора Київського науково-дослідного інституту судових експертиз Міністерства юстиції України НЕСТОР Наталія Володимирівна

Адреса: 03057, Україна, м. Київ, вул. Сім'ї Бродських, 6, Київський науково-дослідний інститут судових експертиз

Робочий тел.: +38 (044) 200-29-24

Email: natalia.nestor@kndise.gov.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3247-9872>

Автор: аспірант кафедри будівельної механіки ФЕСУН Ігор Костянтинівич

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Мобільний тел.: +38 (098) 785-55-49

Email: fesuni99@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6678-9900>

Автор: аспірант кафедри будівельної механіки БУРКІВСЬКИЙ Михайло Миколайович

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Мобільний тел.: +38 (099) 527-63-95

Email: 5276395@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0002-5540-7767>