

УДК 721.011 (624.046.5)

СУЧАСНІ МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

БІЛИК А.С.^{1*}, *к.т.н., доцент*
КОВАЛЕНКО А.І.^{2*}, *аспірант*

^{1*} Кафедра металевих та дерев'яних конструкцій, Київський Національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект 31, м. Київ, Україна, 03037, e-mail: artem.bilyk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9219-920X

^{2*} Кафедра металевих та дерев'яних конструкцій, Київський Національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський проспект 31, м. Київ, Україна, 03037, e-mail: mail.a.kovalenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5075-720X

Анотація. Ціль. Визначення характеру руйнувань та шляхів їх попередження дуже сильно залежить від прийняття рішення щодо критеріїв відмови елемента та методів розрахунку. Метою статті є висвітлення питань щодо моделювання прогресуючого руйнування сучасними програмними комплексами, оцінка використовуваних в них критеріїв відмови, їх порівняння та визначення особливостей, з огляду на можливість їх застосування при вирішенні різного класу задач. Основними цілями дослідження є вивчення критеріїв відмов елементів в аварійних ситуаціях, що використовуються в різних програмних комплексах; порівняльний розрахунок умовного сталевих каркасу при виключенні з роботи однієї колони; оцінка можливості використання різних підходів та програмних комплексів в аналізі конструктивної безпеки будівель та споруд. **Методика.** Методикою вирішення поставлених задач є числові дослідження роботи умовного сталевих каркасу при виключенні з роботи однієї колони, проведені у програмних комплексах SAP2000 та Extreme Loading For Structures (ELS). **Результати.** Проаналізовано методи врахування нелінійної поведінки елементів та критеріїв їх відмови у аварійних розрахункових ситуаціях при використанні двох різних програмних комплексів. Наведено порівняльний аналіз різних методів моделювання нелінійного розрахунку сценаріїв руйнування умовного сталевих каркасу. Проведені дослідження вказують на збіжність рішень при використанні різних програмних комплексів для визначенні сценаріїв прогресуючого руйнування. **Наукова новизна.** Досліджено програмні комплекси та їх методики розрахунку будівель та споруд в аварійних ситуаціях, обґрунтовано критерії вибору їх застосування при вирішенні різного класу задач, пов'язаних з аналізом конструктивної безпеки об'єктів існуючого та нового будівництва. **Практичне значення.** Висвітлені питання щодо різних методик моделювання прогресуючого руйнування будівель і споруд відкривають шляхи до більш глибокого вивчення проблем забезпечення живучості відповідальних об'єктів та створення раціональних конструктивних рішень захисту будівель від прогресуючого руйнування. Наведені результати дозволяють приймати обґрунтовані рішення щодо вибору застосування того чи іншого програмного комплексу залежно від мети розрахунку.

Ключові слова: прогресуюче руйнування; живучість; сталеві каркаси; конструктивна безпека; програмні комплекси.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

БИЛЫК А.С.^{1*}, *к.т.н., доцент*
КОВАЛЕНКО А.И.^{2*}, *аспирант*

^{1*} Кафедра металлических и деревянных конструкций, Киевский Национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект 31, г. Киев, Украина, 03037, e-mail: artem.bilyk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9219-920X

^{2*} Кафедра металлических и деревянных конструкций, Киевский Национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект 31, г. Киев, Украина, 03037, e-mail: mail.a.kovalenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5075-720X

Аннотация. Цель. Определение характера разрушений и путей их предупреждения очень сильно зависит от принятия решения относительно критериев отказа элементов и методов расчета. Целью статьи является освещение вопросов моделирования прогрессирующего разрушения современными программными комплексами, оценка используемых в них критериев отказа, их сравнение и определение особенностей; учет возможностей их применения при решении различного класса задач. Основными целями исследования является изучение критериев отказов элементов в аварийных ситуациях, используемых в различных программных комплексах; сравнительный расчет условного стального каркаса при исключении из работы одной колонны; оценка возможности использования различных подходов и программных комплексов в анализе конструктивной безопасности зданий и сооружений. **Методика.** Методикой решения поставленных задач являются численные исследования работы условного стального каркаса при исключении из работы колонны, проведенные в программных комплексах SAP2000 и Extreme Loading For Structures (ELS). **Результаты.** Проанализированы методы учета нелинейного поведения элементов и критериев их отказа в аварийных расчетных ситуациях при использовании двух

различных программных комплексов. Приведен сравнительный анализ сценария разрушения условного стального каркаса, полученного из нелинейного расчета при использовании различных методов моделирования. Проведенные исследования указывают на сходимость решения при использовании различных программных комплексов для определения сценариев прогрессирующего разрушения. **Научная новизна.** Исследованы программные комплексы и их методики расчета зданий и сооружений в аварийных ситуациях, обоснованы критерии выбора их применения при решении различного класса задач, связанных с анализом конструктивной безопасности объектов существующего и нового строительства. **Практическое значение.** Рассмотренные вопросы по различным методикам моделирования прогрессирующего разрушения зданий и сооружений открывают пути к более глубокому изучению проблем обеспечения живучести ответственных объектов и созданию рациональных конструктивных решений защиты зданий от прогрессирующего разрушения. Приведенные результаты позволяют принимать обоснованное решение о выборе применения того или иного программного комплекса в зависимости от цели расчета.

Ключевые слова: прогрессирующее разрушение; живучесть; стальные каркасы; конструктивная безопасность; программные комплексы.

MODERN METHODS OF PROGRESSIVE COLLAPSE SIMULATION OF BUILDING AND STRUCTURES

BILYK A.S.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor.*
KOVALENKO A.I.^{2*}, *postgraduate student.*

^{1*} Department of metal and wooden structures, Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotskyi Avenue 31, Kyiv, Ukraine, 03037, e-mail: artem.bilyk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9219-920X

^{2*} Department of metal and wooden structures, Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotskyi Avenue 31, Kyiv, Ukraine, 03037, e-mail: mail.a.kovalenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5075-720X

Abstract. Purpose. The progressive collapse estimation and the ways of their prevention are highly depends on the decisions of the failure criteria of elements and based on the calculation methods. The aim of the article is to cover issues of progressive collapse modeling using modern software systems, estimation of their failure criteria, comparison and identification of features taking into account the possibility of their use in solving various tasks classes. The main objectives of the study is to examine the criteria of element failures in emergencies used in a variety of software systems; comparative calculation of the steel frame with single element failure; assessment of the possibility of using different approaches and software systems in the structural safety analysis of buildings and structures. **Methods.** Methodology of the tasks solving is based on the numerical studies of steel frame after one column failure calculated using SAP2000 software systems and Extreme Loading for Structures (ELS). **Results.** The analysis of elements nonlinear behavior and criteria for their failure in emergency situations calculated using two different software systems are showed. This article shows a comparative analysis of the progressive collapse scenarios of the steel frame derived from non-linear analysis using various modeling methods. The studies indicate the convergence of various software systems using for progressive collapse scenarios search. **Scientific novelty.** The different software systems and their methods of calculation buildings and structures in emergency situations were studied. The software selection criteria of the application for solving various tasks classes were obtained. These criteria are associated with the analysis of the structural safety of existing and new buildings. **The practical significance.** Examination of the various progressive collapse modeling methods of buildings and structures opens the way to a better understanding of a ensuring important building objects vitality problems and makes possible to create a rational design solutions to protect buildings against progressive collapse. These results allow us to make an informed decision about application of software complexes depending on the purpose of the calculation.

Keywords: progressive collapse; vitality; steel frames; structural safety; software complexes.

Постановка проблеми. Під час свого життєвого циклу будівля може опинитися в екстремальних навантажувальних умовах, що перевершують її розрахункову несучу здатність. Серед таких умов є землетруси, вибухи, несподівані ударні сили та пожежі. Як правило, споруди в своїй первинній розрахунковій схемі, закладеній проектувальником, не здатні чинити значний опір таким нетривіальним типам навантажень (рис. 1, 2). Це пов'язано із економічними факторами а також недостатньою нормативною забезпеченістю в сфері проектування будівель з підвищеним опором аварійним ситуаціям.



Рис. 1. Пошкодження житлового будинку «Ronan Point». 16 травня 1968р.

Damage of residential building “Ronan Point”. May 16, 1968.



Рис. 2. Будівля «Alfred P. Murrah Federal Building» після теракту 19 квітня 1995р.

Alfred P. The Murrah Federal Building after the terrorist attack 19 of April, 1995.

Заходи безпеки життєдіяльності передбачають, що у разі виникнення аварійних ситуацій люди мають бути евакуйовані до виникнення масштабного руйнування будівлі, що, в свою чергу, вимагає прогнозу кількості можливих руйнувань та їх характер. Причини загибелі близько 90% людей в останніх наймасштабніших землетрусах та терактах по всьому світу викликані прогресуючим руйнуванням будинків та мостів [8].

Термін прогресуючого руйнування (англ. progressive collapse) виник у другій половині ХХ-го століття. На жаль, до сьогодні відсутня загальновизнана термінологія щодо прогресуючого (лавиноподібного, непропорційного ініціюючим діям та ін.) руйнування або обвалення. Відрізняються не лише визначення прогресуючого руйнування, але й допустимі його розміри [6,9,10,12,15]. Однак, в цілому, всі визначення вказують на поширення руйнування від локального до кінцевого, тобто на зміну стану будівлі в часі, та констатують факт руйнування, яке перевищує початкову величину та обмежують його розміри. Державні будівельні норми визначають прогресуюче руйнування як обвалення будинку внаслідок локального руйнування частини несучих конструкцій на одному чи декількох поверхах та встановлюють узагальнені вимоги щодо живучості конструкцій, визначаючи більш конкретно одиничну живучість тільки для багатопверхових будівель [2, 3]. В сучасних умовах постає питання не тільки щодо методик проведення розрахунків нових будівель на одиничну живучість, а і щодо оцінки сценаріїв руйнувань існуючих відповідальних споруд для визначення доцільності та можливості підвищення їх конструктивної безпеки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Визначення сценаріїв прогресуючого руйнування та оцінка кількості руйнувань є складною задачею, для вирішення якої найчастіше використовують сучасні програмні комплекси. В загальному вигляді випадки прогресуючого руйнування класифіковані в роботі

[13]. Вони класифікуються в залежності від причин, механізму руйнування, та характерних особливостей. Виділено 6 типів, серед яких диско-, блискавко-, доміно-, розділо-, нестабільно- та змішаноподібне руйнування. Ці типи є умовними і в будівлях складної геометрії або зі специфічними навантажувальними ефектами можуть проявитись у вигляді комбінацій декількох типів.

Дослідження процесів руйнування поділяються на ті, що присвячені локальним ефектам в окремих конструктивних елементах та вузлах їх з'єднань (балки, колони, рами), та ті, що аналізують будівлі в цілому. У роботах [14, 11] проведено експериментальні та числові дослідження роботи двотаврових балок та вузлів їх з'єднань з колонами при навантаженнях, що перевищують їх первинну розрахункову схему. В [5] досліджено роботу локально пошкоджених двотаврових колон. Роботи [4, 7] присвячені дослідженню поширення та кількості руйнувань умовних будівель при відмові колон. Узагальнюючи вищенаведені та інші роботи, можна зробити висновок, що будівлі та споруди в своїй первинній схемі зазвичай не здатні протидіяти прогресуючому руйнуванню в аварійних ситуаціях. Визначення характеру руйнувань та шляхів їх попередження дуже сильно залежить від прийняття рішення щодо критеріїв відмови елементу та методів розрахунку.

Цілі статті. Метою статті є висвітлення питань щодо моделювання прогресуючого руйнування сучасними програмними комплексами, оцінка використовуваних в них критеріїв відмови, їх порівняння та визначення особливостей, з огляду на можливість їх застосування при вирішенні різного класу задач.

Основними цілями дослідження є:

- дослідження критеріїв відмов елементів в аварійних ситуаціях, що використовуються в різних програмних комплексах;
- порівняльний розрахунок умовного сталевих каркасу при виключенні з роботи однієї колони (одинична живучість);
- оцінка можливості використання різних підходів та програмних комплексів в аналізі конструктивної безпеки будівель та споруд.

Основний матеріал. Комп'ютерне моделювання є невід'ємною частиною аналізу поведінки будівлі в різних розрахункових ситуаціях. В більшості випадків для визначення напружено-деформованого стану будівель використовуються програмні комплекси, засновані на методі скінченних елементів. Однак, в основному, такі комплекси не є застосовними для визначення сценаріїв та часу руйнування будівель, хоча деякі із них і мають модулі для подібного аналізу. Програмний комплекс SAP2000 дозволяє моделювати шарніри пластичності, що автоматично утворюються при досяганні критичних значень зусиль у стадії пружної роботи, реалізуючи розрахункову схему, перемінну у часі. Таким чином моделюється перерозподіл зусиль

в елементах будівлі при виникненні аварійної ситуації та візуалізуються стадії їх роботи.

Альтернативою для аналізу поведінки будівель в аварійних ситуаціях є метод прикладних елементів (англ. Applied Element Method – АЕМ). Метод прикладних елементів є вдосконаленою реалізацією методу скінченних елементів, у основі якого – концепція дискретності елементів. Конструкції споруд моделюються як сукупність відносно невеликих елементів, що генеруються шляхом ділення конструктивної одиниці, як вказано на малюнку 3.



Рис. 3. Принцип формування конструкції набором окремих конструктивних елементів.

The principle of forming structures using individual structural elements.

Елементи з'єднані один з одним уздовж їх поверхні за допомогою набору нормальних і зсувних в'язей. За допомогою цих в'язей передаються нормальні та дотичні напруження між елементами. Таким чином, всі елементи поєднуються між собою серією пружинних в'язей, розташованих на гранях, де елементи контактують між собою. За їх допомогою моделюється неперервність конструкції, обчислюються деформації, напруження та визначаються критерії можливого розриву між елементами.

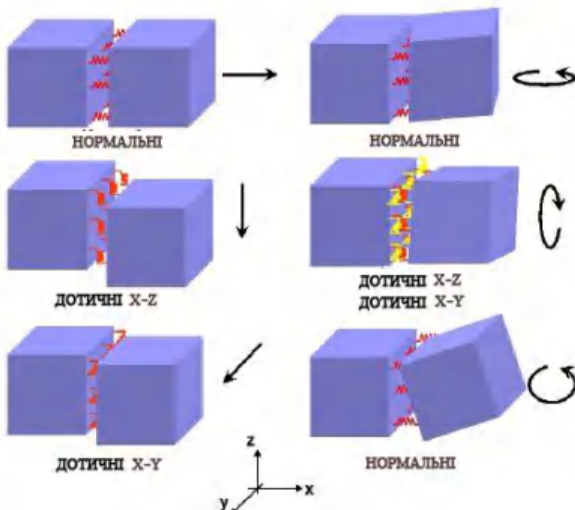


Рис. 4. Контактні в'язі між елементами та напруження, що передаються між ними при різних видах силових дій.

Contact springs between the elements and stresses transmitted between them in various types of actions.

Extreme Loading for Structures (ELS) – програмний комплекс, заснований на методі прикладних елементів, який дозволяє виконувати аналіз та візуалізацію прогресуючого руйнування від аварійних динамічних навантажень та визначати вразливість споруд до прогресуючого руйнування шляхом створення декількох сценаріїв подій, які будуть імітувати відмову різних елементів. Співставлення результатів роботи програмного комплексу з експериментальними даними наведено у [8] та демонструють достатньо добру збіжність.

Сценарій руйнування елементів в ELS.

Руйнування елементів в ELS моделюється розривом контактних в'язей при досяганні граничного значення напружень. Для цього задаються межа текучості сталі, відношення тимчасового опору до межі текучості, та відповідні значення відносних деформацій для цих точок. Таким чином моделюється нелінійна робота матеріалу. ELS виконує симуляція фізичного розриву елементів та їх руху після цього, враховуючі інерційні сили, прискорення та ін. Результатом розрахунку є візуалізація руйнувань та внутрішні зусилля в елементах в часі.

Моделювання відмови елементів в SAP2000.

Критерій відмови у SAP2000 для балок при згині базується на нормуванні граничного кута повороту або деформацій. При цьому враховується утворення шарнірів пластичності та деформаційне зміцнення матеріалу. До моменту утворення шарнірів пластичності матеріал вважається пружним, а малі значення пластичної деформації на цьому етапі нехтуються. Після досягнення граничного моменту дозволяється пластичний кут повороту внаслідок утворення шарніра пластичності, визначений залежно від виду елемента, його перерізу та геометрії. Таким чином, умову міцності вузла при згині можна представити у вигляді:

$$\Psi_i \leq \Psi_{pl,i}; \quad (1)$$

де Ψ_i - фактичний пластичний кут повороту в i -ому пластичному шарнірі, отриманий із нелінійного динамічного розрахунку;

$\Psi_{pl,i}$ - відповідний граничний пластичний кут повороту, при якому відбувається відмова вузла.

Виникаючий кут повороту дозволяє перерозподіл зусиль в елементах каркасу, що дає більш точний результат при аналізі напружено-деформованого стану будівель та споруд. Контролювання значення кута пластичного повороту дає можливість відстежити зміни в роботі окремих елементів у часі і визначити приблизний сценарій можливого руйнування.

Було проаналізовано умовний сталевий каркас у двох програмних комплексах (SAP2000 та ELS) при раптовій відмові колони в центрі однієї зі сторін споруди. У якості тестової моделі було використано 6-ти поверхову двохпролітну сталеву раму із жорсткими вузлами в усіх напрямках (крок колон 6м, рис. 5). Розміри споруди в плані 6x12м, висота

поверху 4.2м, загальна висота 25.2м. В якості несучих елементів використано двотаври перерізом W12x106 для колон, та S12x35 для балок за стандартом ASTM A6, США (застосування стандарту обумовлено його реалізацією в обох програмних комплексах). Сталь – С245, характеристичне загальне вертикальне навантаження на всі балки перекриття 4т/м.п. Час виключення колони із роботи прийнято 0.01с. Нелінійні динамічні розрахунки у SAP2000 проведено за методикою [1].

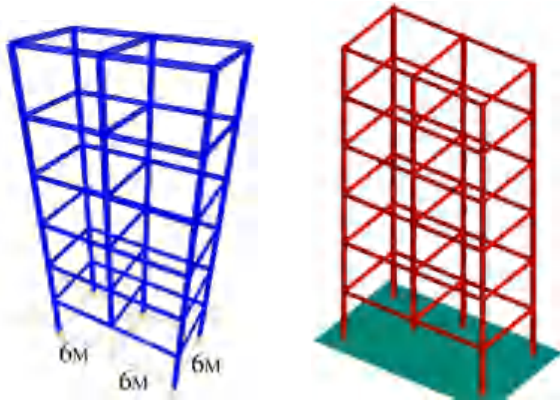


Рис. 5. Загальний вигляд розрахункових моделей: SAP2000 (зліва) та ELS (справа).

Imitation models in a SAP2000 (left) and ELS (right) complexes.

Аналіз результатів розрахунку. Як видно з рис.6, при використанні ELS, критичні значення внутрішніх зусиль досягаються вже к моменту часу 0.08с. Згинальний момент для балок складає 20 тм., що відповідає напруженням 320 МПа. Після цього починається руйнування елементів. Перші розриви конструктивних елементів (балок) відбуваються в площині більшої згинальної жорсткості, після чого руйнування розповсюджуються в іншому напрямку. Особливістю даної моделі є те, що навантаження прикладені безпосередньо до головних балок, тому, після руйнування основної частини, прилеглої до видаленої колони (рис. 6, $t=0.3$ с), руйнування продовжується для інших елементів, внаслідок прикладених до них навантажень та втрати багатозв'язності конструкції. При використанні більш

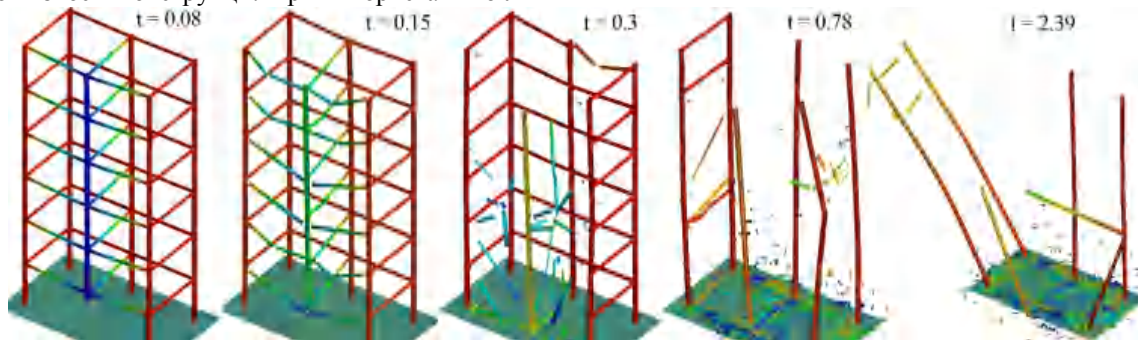


Рис. 6. Прогресуюче руйнування споруди при використанні ELS.

Structure progressive collapse visualization obtained using ELS complex.

точної моделі, із передачею навантажень через другорядні балки, руйнування за межею часу 0.3с можуть не відбутися. Загалом, повне руйнування конструкції відбувається приблизно за 8с.

Сценарій відмови елементів при використанні програмного комплексу SAP2000 в цілому такий же, але із іншими часовими параметрами. Перші шарніри пластичності утворюються в момент часу 0.08с (рис. 7), що свідчить про досягнення в елементах максимальних напружень в межах пружної роботи, а для моделі в ELS, ця часова відмітка відповідає вже повному вичерпанню несучої здатності.

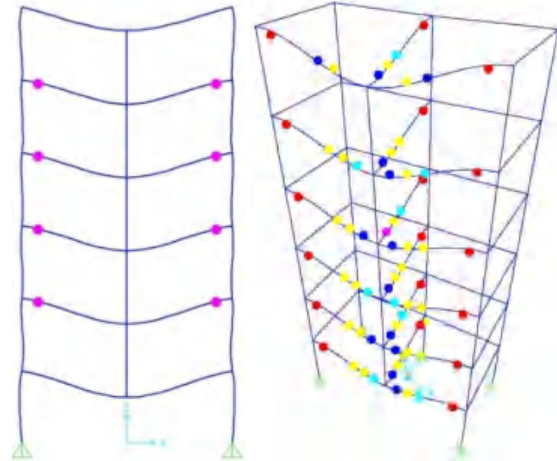


Рис. 7. Утворення перших шарнірів пластичності (зліва), та руйнування прольоту (справа).

First plastic hinges formation (left) and collapse of the structure (right).

Відмова першого вузла відбувається у момент часу 0.88с, при значенні згинального моменту 22.1 тм. Метод скінченних елементів не дозволяє автоматично виконувати розриви в конструктивних елементах, тому умовно можна вважати, що руйнування всіх примикаючих до видаленої колони конструкцій, відбувається при досягненні в них граничних значень кутів пластичного повороту. Такий стан досягається в момент часу 0.97с, проти 0.3с в результаті використання ELS.

Висновки. Проведені дослідження вказують на збіжність використання різних програмних комплексів при визначенні сценаріїв прогресуючого руйнування. Результат, отриманий з використанням програмного комплексу SAP2000 більш точний з точки зору роботи матеріалу та перерозподілу зусиль в елементах каркасу, однак не дає можливості точно оцінити кількість можливих руйнувань, що ускладнює його використання при оцінці можливих ризиків при руйнуванні існуючих будівель внаслідок нетривіальних навантажень (економічні збитки, зони ураження уламками, тощо). Тому, можливості цього програмного комплексу більш доцільніше використовувати при проектуванні нових будівель та розробці конструктивних рішень із забезпечення живучості різноманітних відповідальних об'єктів. З іншого боку, використання ELS дозволяє оцінити кількість руйнувань при різних заданих сценаріях,

таких як виключення конкретних елементів вручну, або автоматично внаслідок вибухових хвиль, землетрусів, та інших динамічних дій, що відкриває широкі можливості при оцінці конструктивної безпеки існуючих будівель.

Існуючі норми щодо забезпечення надійності будівель і споруд повинні бути суттєво доповнені в частині правил щодо живучості і розрахунків сценаріїв руйнування конструкцій. Враховуючи підвищені ризики виникнення аварійних ситуацій і вчинення терактів, які наявні в Україні сьогодні, виправданим видається встановлення вимог одинокій живучості для всіх об'єктів класу наслідків ССЗ та розроблення спеціальних норм щодо її забезпечення для різних типів таких будівель. Це відповідатиме провідному іноземному досвіду та підвищить національну безпеку нашої держави.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білик А.С., Коваленко А.І. Порівняння методів розрахунку металевих каркасів висотних будівель на одиничну живучість // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – Випуск 16. – Київ, Видавництво «Сталь», 2015. – С. 30-40.
2. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : ДБН В.1.2-14:2009. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 43 с. – (Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Державні будівельні норми України).
3. Проектування висотних житлових і громадських будинків : ДБН В.2.2-24:2009 - Офіц. вид. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. - 155с. – (Будинки і споруди. Державні будівельні норми України).
4. Assessment of progressive collapse capacity of steel moment frames / Jinkoo Kim, Taewan Kim. // Journal of Constructional Steel Research. – 2009. – №65. – С. 169–179.
5. Collapse resistance of locally damaged steel columns / J. Fogarty, N.M. Yossel, S. El-Tawil. // Journal of Constructional Steel Research. – 2013. – №82. – С. 195–202.
6. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse: UFC 4-023-03 / USA, Department of Defense, 2009. – 245с. – (USA Standard).
7. Effect of retrofit strategies on mitigating progressive collapse of steel frame structures / Khaled Galal, Tamer El-Sawy. // Journal of Constructional Steel Research. – 2010. – №66. – С. 520–531.
8. High Fidelity Modeling of Building Collapse with Realistic Visualization of Resulting Damage and Debris Using the Applied Element Method / Hatem Tagel-Din., 2009. – 135 с. – (Applied Science International).
9. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures / American Society of Civil Engineers. – Reston, USA, 2010. – 658 с. – (American Society of Civil Engineers). – (ISBN; № 2147483647)
10. National Building Code of Canada / National Research Council of Canada - Ottawa, Canada, 2010. – 1222 с. – (Canada Standard).
11. Preventing progressive collapse through strengthening beam-to-column connection / J.L. Liu. // Journal of Constructional Steel Research. – 2010. – №66. – С. 229–237.
12. Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects / U.S. General Services Administration, 2003. – 119p. – (USA Standard).
13. Progressive collapse of structures / Starossek Uwe., 2009. – 168 с. – (Thomas Telford Publishing). – (ISBN; № 2147483647).
14. Simplified nonlinear progressive collapse analysis of welded steel moment frames / Cheol-Ho Lee, Soenwoong Kim, Kyu-Hong Han, Kyungkoo Lee. // – Journal of Constructional Steel Research. – 2009. – №65. – С. 1130–1137.
15. Structural Use of Steelwork in Building, Part 1: Code of Practice for Design - Rolled and Welded Sections. BS 5950-1:2010 / British Standards Institute, 2010. — 224 с. – (British Standard).

REFERENCES

1. Bilyk A.S., Kovalenko A.I. *Porivnannja metodiv rozrakhunku metalovykh karkasiv vysotnykh budivelj na odynichnu zhyvuchistj* [Comparison of calculations of high-rise metal frame buildings with single vitality]. *Zbirnyk naukovykh pracj Ukrainjskogo instytutu stalevykh konstrukcij imeni V.M. Shymanovskogho - Kiev* [Collected Works of the Institute of Ukrainian steel structures of V.M. Shymanovski - Kiev]. 2015 – no. 16, –pp. 73-78 (in Ukrainian).
2. Minregion Ukrainy. *Zagaljni pryncypy zabezpechennja nadijnosti ta konstruktyvnoji bezpeky budivelj, sporud, budivelnykh konstrukcij ta osnov : DBN V.1.2-14:2009* [State standard of Ukraine V.1.2-14:2009. General principles of reliability and structural safety of buildings, structures and foundations]. Kyiv, 2009, 43 p. (in Ukrainian).
3. Minregion Ukrainy. *Proektuvannja vysotnykh zhytlovykh i gromadsjkykh budynkiv : DBN V.2.2-24:2009* [State standard of Ukraine V.2.2-24:2009. Design of high-rise residential and public buildings]. Kyiv, 2009, 155 p. (in Ukrainian).

4. Jinkoo Kim, Taewan Kim. *Assessment of progressive collapse capacity of steel moment frames*. Journal of Constructional Steel Research, 2009, №65, pp. 169–179.
5. J. Fogarty, N.M. Yossel, S. El-Tawil. *Collapse resistance of locally damaged steel columns*. Journal of Constructional Steel Research, 2013, №82, pp. 195–202.
6. USA, Department of Defense. *Design of Buildings to Resist Progressive Collapse: UFC 4-023-03*, 2009, 245 p. – (USA Standard).
7. Khaled Galal, Tamer El-Sawy. *Effect of retrofit strategies on mitigating progressive collapse of steel frame structures*. Journal of Constructional Steel Research, 2010, №66, pp. 520–531.
8. Hatem Tagel-Din. *High Fidelity Modeling of Building Collapse with Realistic Visualization of Resulting Damage and Debris Using the Applied Element Method*, 2009, 135 p. – (Applied Science International).
9. American Society of Civil Engineers. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston, USA, 2010, 658 p. – (American Society of Civil Engineers). – (ISBN; № 2147483647)
10. National Research Council of Canada. *National Building Code of Canada*. Ottawa, Canada, 2010, 1222 p. – (Canada Standard).
11. J.L. Liu. *Preventing progressive collapse through strengthening beam-to-column connection*. Journal of Constructional Steel Research, 2010, №66, pp. 229–237.
12. *Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects / U.S. General Services Administration*, 2003, 119p. – (USA Standard).
13. Starossek Uwe. *Progressive collapse of structures*. Thomas Telford Publishing, 2009, 168 p.
14. Cheol-Ho Lee, Soenwoong Kim, Kyu-Hong Han, Kyungkoo Lee. *Simplified nonlinear progressive collapse analysis of welded steel moment frames*. Journal of Constructional Steel Research, 2009, №65, pp. 1130–1137.
15. British Standards Institute. *Structural Use of Steelwork in Building, Part 1: Code of Practice for Design - Rolled and Welded Sections. BS 5950-1:2010*, 2010, 224 p. – (British Standard).

Статья рекомендована к публикации д.т.н, проф. Г.М. Тонкачевым (Украина), д.т.н., проф. С.И.Бильком (Украина)

Поступила в редколлегию: 21.04.2016