

МЕТОДИ ТА ПРАКТИЧНІ ЗАХОДИ З ОСЛАБЛЕННЯ НАРОСТАЮЧОГО РУЙНУВАННЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Загальноприйнятним визначенням такого важливого поняття, як наростаюче (прогресуюче, лавиноподібне) руйнування є процес перерозподілення початкового локального руйнування від елемента до елемента, що в кінцевому підсумку призводить до руйнування всієї споруди або непропорційно великої її частини. І саме з цього випливає необхідність проектувати будівлі у такий спосіб, щоб вони були здатні протидіяти місцевим пошкодженням конструктивної системи і у цілому залишалися стабільними, не отримуючи пошкоджень, непропорційних по відношенню до первинного місцевого пошкодження. На жаль, за винятком спеціально запроєктованих захисних систем, зазвичай у будівельній практиці конструкція не розраховується на протидію загальному руйнуванню, викликаному інтенсивними наднормативними навантаженнями, які діють безпосередньо на її більшу частину. Проте, конструкції не лише можуть, а й мусять розраховуватися так, щоб не тільки обмежити наслідки місцевих руйнувань, а й запобігти або мінімізувати наростаюче руйнування. І тому вимоги до вжиття розумних запобіжних заходів у будівельному проектуванні розробляються з огляду на такий специфічний випадок, коли не визначені джерела, які можуть спричинити початкові локальні пошкодження, величини яких також невідомі.

Наростаюче руйнування як таке в будівельній практиці зустрічається досить рідко, адже спричинити його можуть наднормативні навантаження, які ініціюють виникнення локальних пошкоджень, і наявність конструкції, в якій відсутня необхідна цілісність, пластичність і стійкість для протидії поширенню руйнувань. Ці наднормативні навантаження можуть виникати як внаслідок помилок і проблем на стадії будівництва, так і викидів енергії в будь-який час протягом періоду експлуатації конструкції або ж через навмисні напади терористів або інших агресорів.

1. Вимоги до споруди за екстремальних умов. На початку зазначимо, що звичайно до споруди не ставляться спеціальні вимоги в частині збільшення її ваги з метою запобігання руйнуванню будь-якого конкретного елемента,



О.В. Шимановський
генеральний директор
ТОВ «Укрінсталькон
ім. В.М. Шимановського»,
член-кореспондент НАН України,
заслужений діяч науки і техніки
України, д.т.н., професор

якщо він буде зазнавати навантаження від вибуху або удару, а також щодо обмеження її реакції на серйозні пошкодження або руйнування місцевого характеру в результаті прямого нападу. Однак якщо наявна інформація про конкретну загрозу є аргументом для збільшення ваги окремих конструктивних елементів на випадок вибуху або удару, то проектування на протистояння наростаючому руйнуванню відбувається «незалежно від загрози» в тому сенсі, що запас міцності заздалегідь «вбудовується» задля протидії цим локалізованим руйнуванням. Тому значні пошкодження або руйнування елемента в точці місцевого пошкодження не мають розвиватися далі й викликати реакцію всієї конструкції більш інтенсивну, ніж та, яка була викликана первинним нападом. Через це бажані експлуатаційні якості конструкції включають активізацію резерву пластичності й жорсткості у разі локалізованого пошкодження. З цього зокрема випливає, що найбільш життєздатною і практично виправданою альтернативою контролю й обмеженню поширення локалізованих пошкоджень є можливе забезпечення структурної цілісності всієї конструкції. При цьому мається на увазі, що у разі локалізованих пошкоджень, оточуючі конструктивні елементи мають використовувати свій резерв можливостей задля перекриття або «встановлення перемички» над пошкодженим вузловим з'єднанням чи ділянкою.

З іншого боку, в практиці будівництва досить часто використовуються концепції конструктивного поділу споруди на окремі блоки з метою замкнути пошкодження, завдане конструкції, у межах її невеликої частини. Хоча ця концепція може бути цілком доцільною, такий поділ на блоки зазвичай вимагає застосування невеликих прогонів і просторів із незалежними

конструктивними системами. Проте, останнє рішення є значно менш ефективним з точки зору зручності спорудження і використання простору та зазвичай обмежується особливими випадками застосування, в першу чергу – деякими масивними об'єктами військового призначення. Тому метод забезпечення цілісності й нерозривності конструкції рекомендується застосовувати у формі двох конструктивних різновидів – обв'язки і перекриття, які небезпідставно вважаються найбільш ефективними й економічними рішеннями для створення умов посилення опору наростаючому руйнуванню.

2. Методи непрямого і прямого розрахунку запасу міцності конструкції. Наразі існують два альтернативних методи розрахунку запасу міцності конструкції: непрямий і прямий. У непрямому методі розрахунок опору наростаючому руйнуванню виконується завдяки забезпеченню мінімальних рівнів міцності, цілісності й пластичності. При цьому використовуються загальні пропозиції щодо поліпшення цілісності конструкції, які включають: якісне планування; інтегровану систему в'язей; замикання стін; зміну напрямку прогонів плит перекриттів; несні внутрішні перегородки; реалізацію можливості ланцюгової роботи плит перекриття та роботи стін за балковою схемою; конструктивні системи із запасом міцності; деталізацію пластичності; додаткову арматуру на випадок зміни напрямку руху вибухових впливів і на-

вантажень на зворотний; поділ конструкції на відсіки.

Методи непрямого та прямого проектування можуть поєднуватися у разі проходження структурними елементами і в'язями через два спільні механізми трансформації та створення в результаті «мостового перекриття» над зруйнованим елементом. Тоді, по-перше, існуючий потенціал згинального моменту і непружного обертального опору доповнюється параметрами гнучкості при деформації елемента й вузлового з'єднання. І, по-друге, осьовий потенціал елемента і вузлового з'єднання «активізується» у процесі досягнення системою стану рівноваги під час формування схеми її ланцюгової роботи.

Сутністю методів прямого розрахунку є докладний розгляд спротиву конструкції наростаючим руйнуванням під час проектування. До цих методів належать: метод можливого шляху, який вимагає щоб конструкція була спроможною перекрити відсутній конструктивний елемент при локалізації наявного обсягу пошкоджень, і метод питомого опору, згідно з яким будівля або її частини мають зберігати достатню міцність на опір питомим навантаженням або їх загрози.

Розглянемо більш докладно алгоритм методу можливого шляху. У цьому методі ключові конструктивні елементи (зазвичай одна колона, яка вважається «втраченою» від дії вибуху або удару) видаляються, і конструкція в подальшо-

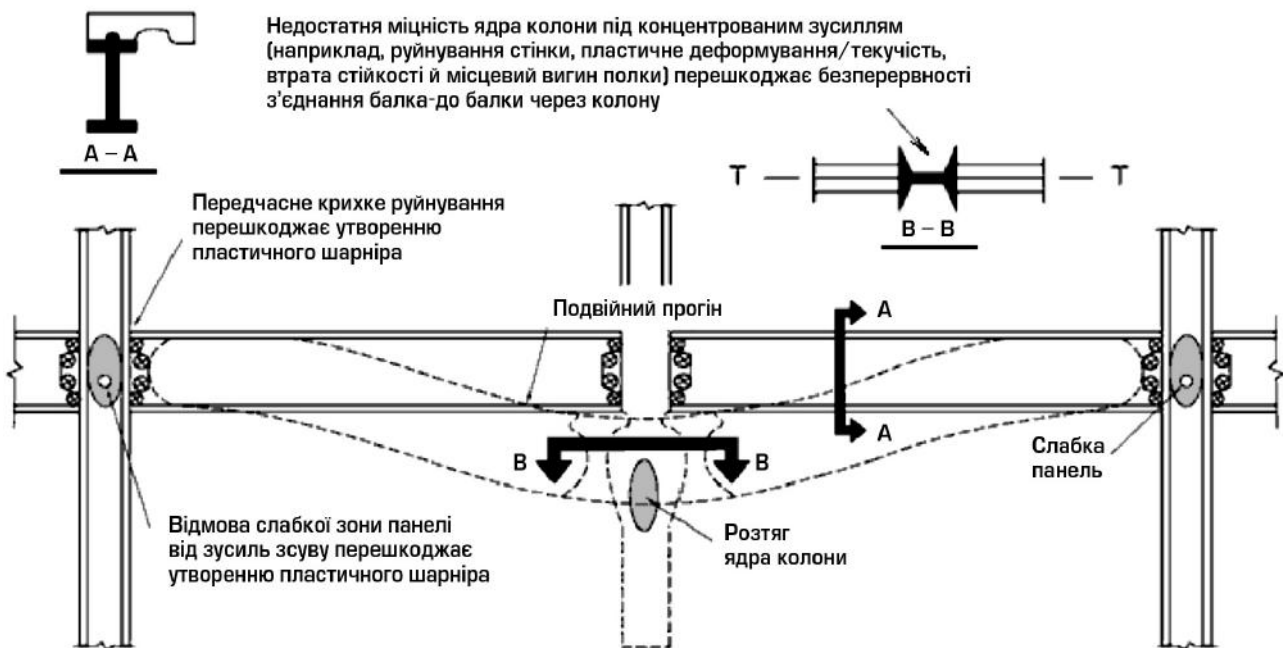


Рис. 1. Принципова схема роботи перекриття над «втраченою» колоною, яка використовує механізм критичного переходу

му аналізується з метою визначення її здатності створити поперечний прогін або «мостове покриття» над цим «відсутнім» елементом. Послідовність трансформації конструкції ілюструє рис. 1, на якому показано, як пошкоджене вузлове з'єднання балки з колоною «перекриває» зруйновану колону, яка зображена на рисунку пунктирною лінією.

Щодо загального аналізу роботи споруди, яка зазнає наростаючого руйнування, то для його проведення прийнято керуватися наступною стратегією. По-перше, зовнішні колони, як мінімум, повинні бути видалені десь посередині короткої та довгої сторін і близько кута будівлі. А, по-друге, колони також належить вилучити у тих місцях, де геометричний план споруди істотно змінюється, як, наприклад, при різкому зменшенні розмірів прогону і найближчих кутів, або у місцях, де прилеглі колони навантажені незначно, прогони мають відмінні поперечні перерізи, а елементи каркаса – різну орієнтацію або позначки та в інших подібних ситуаціях (рис. 2). До того ж важливим тут є те, що розрахунки при використанні методу можливого шляху можуть виконуватися двояко: або лише для першого поверху, або ж для кожного поверху. Зокрема, для багатоповерхової будівлі, якщо обумовлено видалення кутової колони, виконується один розрахунок із видаленням

кутової колони першого поверху, а вже інший – для кутової колони другого поверху і так далі. Якщо ж вдається довести, що прогнозується аналогічна реакція конструкції під час видалення колон на інших поверхах (скажімо з 4-го по 10-й), то розрахунок для цих поверхів можна не проводити, проте, що важливо, підтвердження правильності такого рішення має бути обов'язково задокументоване.

Що ж стосується споруд, які мають підземні паркувальні стоянки або інші неконтрольовані громадські зони на цокольному поверсі, то додатково до розглянутого випадку рекомендується, щоб внутрішні колони були видалені ближче середини короткої та довгої сторін і біля кута неконтрольованого простору. Причому вилучена колона повинна простягатися від поверху парковки або неконтрольованої громадської зони першого поверху до рівня наступного поверху (таким чином, слід знімати висоту в один поверх). Внутрішні колони також необхідно видаляти в інших критичних місцях неконтрольованої громадської зони відповідно до інженерних міркувань. А особлива увага під час проведення всіх цих розрахунків має приділятися тому, щоб при видаленні як зовнішньої, так і внутрішньої колони горизонтальних елементів, які з'єднують кінці цих колон, були нерозривність і цілісність.

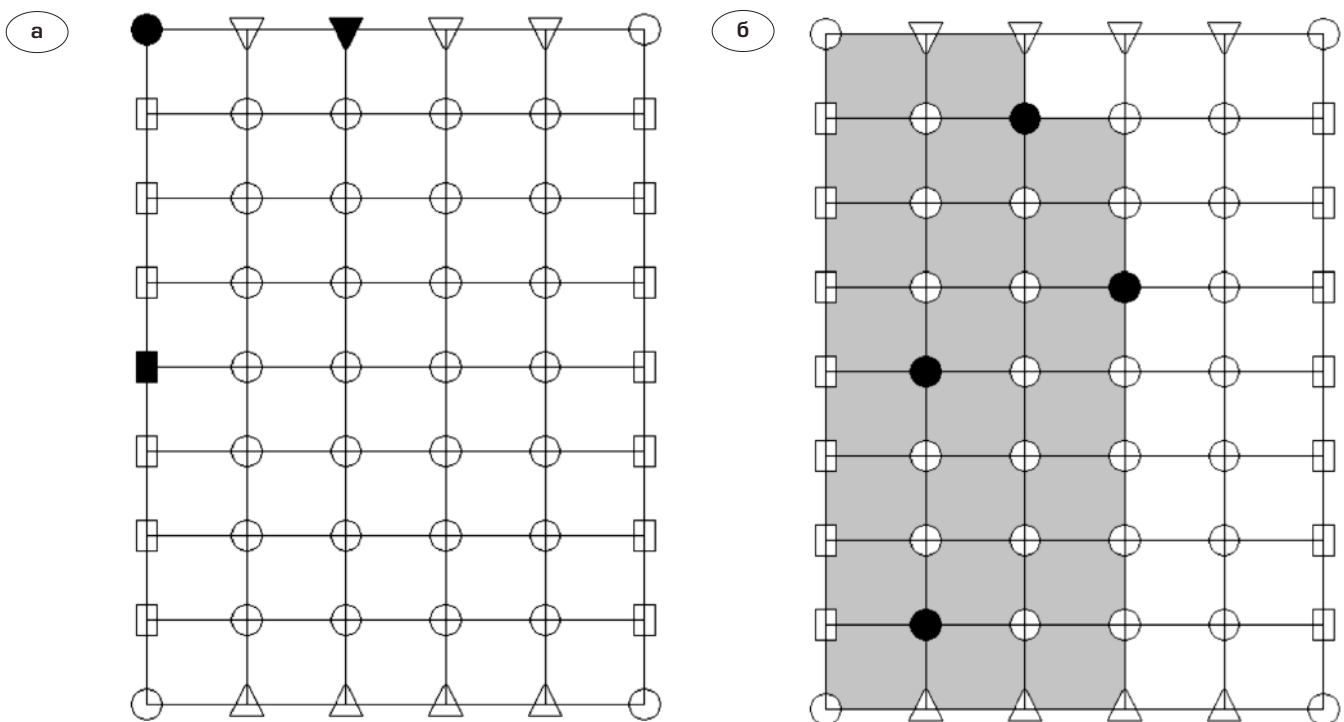


Рис. 2. Принципова схема видалення зовнішніх (а) і внутрішніх (б) колон будівлі (виділені чорним кольором) відповідно до критеріїв наростаючого руйнування

3. Конструктивні рішення і властивості «обв'язки» споруди. Задля гарантування цілісності та надання будівельному каркасу додаткової міцності у практиці будівництва достатньо часто використовуються системи різноманітних в'язей або, іншими словами, системи «обв'язки», схематичне розташування яких зображено на рис. 3. Як вбачається з наведеного рисунка, при встановленні такої обв'язки будівля «конструктивно зв'язується», що не тільки збільшує її цілісність і пластичність, а й створює альтернативні шляхи перерозподілу навантаження. Водночас робота самих в'язей забезпечується існуючими конструктивними елементами і вузловими з'єднаннями, які розраховуються із застосуванням загальноприйнятих проектних рішень з метою сприйняття стандартних навантажень на споруду. Також необхідно звернути увагу на те, що розглянуті в'язі не є подібними в'язям, які містять горизонтальну арматуру у залізобетонних конструкціях.

Розглянемо різновиди й властивості роботи в'язей, які практикуються в проектній діяльності. Існує кілька видів горизонтальних в'язей, які використовуються в залежності від типу споруди: внутрішні, периферичні й ті, що прилягають до торцевих й кутових колон і стін. Стосовно вертикальних в'язей зазначимо, що вони застосовуються у колонах і несних стінах.

Щодо конкретизації дійсної роботи в'язей, то траєкторія зусиль у периферичних в'язях має бути нерозривною за планом конфігурації, а у внутрішніх – її шлях мусить бути безперервним від одного краю до іншого. Причому на шляху конкретних зусиль можуть бути використані різні конструктивні елементи для утримування рівня необхідної міцності в'язі, за умови, що вони пов'язані один із одним належним чином. Зокрема, міцність внутрішньої в'язі може бути забезпечена низкою балок на лінії балок, із урахуванням того, що з'єднання з проміжними елементами (прогони, балки або колони) гарантують необхідну міцність в'язі. Подібним чином вертикальні в'язі повинні бути нерозривними від самого нижнього до самого верхнього рівнів. Горизонтальні в'язі у зоні торцевих колон і стін можуть бути й розрізними, проте вони мають бути закріплені у самій конструкції. А для будівель, які складаються з окремих блоків або містять температурні шви, що створюють конструктивно незалежні секції, вимоги до

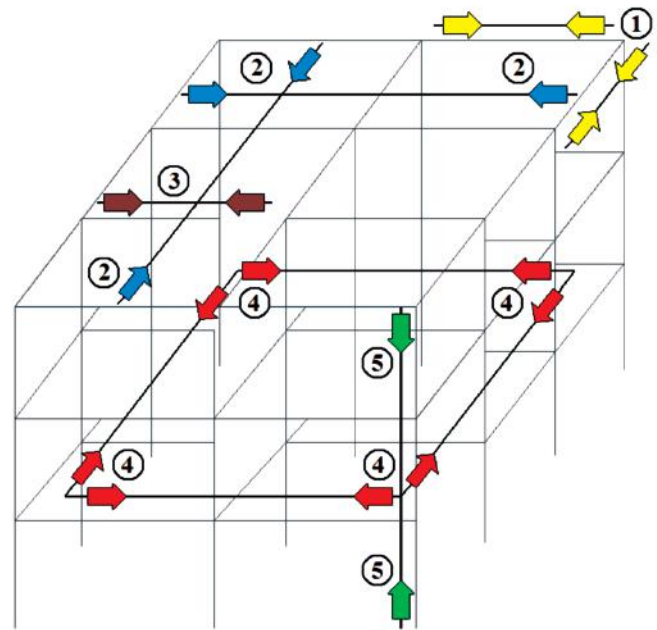


Рис. 3. Схематичне зображення в'язей, необхідних для непрямого розрахунку на протидію наростаючому руйнуванню:

- 1 – кутові в'язі колони; 2 – внутрішні в'язі; 3 – горизонтальна в'язь до зовнішньої колони або стіни; 4 – периферична в'язь; 5 – вертикальна в'язь

зусиль у в'язях стосуються кожної окремої підструктури або незалежної секції, які розглядаються як окремі вузли.

Вузлові з'єднання в'язей, так само, як і будь-які інші конструктивні елементи, мають задовольняти вимоги підвищеної пластичності й жорсткості, необхідних для опору впливу вибуху і зменшення потенціалу наростаючого руйнування. Внаслідок цього їх конструктивні рішення мусять забезпечувати нерозривність приєднання балка-до-балки, мати запас міцності, стійкості, надійну обертальну спроможність непружного з'єднання та відповідний резерв потенціалу осевого розтягу.

У даному контексті під стійкістю з'єднання балка-до-балки мається на увазі чіткий і ясно визначений зв'язок поперек колони, який передає навантаження сили тяжіння від видаленої колони незалежно від стану фактичного або потенційного її пошкодження. До того ж це з'єднання має реалізовувати можливість створення безпосередніх і численних шляхів передачі навантаження і протистояти без розриву впливу деструктивного навантаження, яке супроводжує серйозні пошкодження з'єднувальних елементів від вибуху, включаючи пошкодження або видалення колони. Цілком зрозуміло, що

зазначена здатність має підкріплюватися міцністю з'єднання на крутіння і згин щодо слабкої осі, його жорсткістю і первинним застосуванням із доведеними властивостями пластичності даного будівельного матеріалу. Коли зазначені вимоги дотримані, то з'єднання при дії екстремальних навантажень забезпечують опір значним непружним обертанням. Більш того, у зв'язку з доведеною пластичністю з'єднань типу балка-до-колони у сталевому каркасі, вони створюють необхідний рівень обертального потенціалу з'єднання і саме тому їх можна використовувати у проектуванні нових будівель для ослаблення вибухових впливів і наростаючих руйнувань.

Що ж стосується резерву потенціалу осьового розтягу, зазначимо наступне. Якщо вибуховий або ударний вплив є завеликим для підриву вертикальної колони, передавальної балки або іншого елемента, який зазнає значного навантаження сили тяжіння, то у такому випадку відбувається післявибуховий розвиток великих зусиль розтягу у балках через появу значних зсувів в умовах подвійного прогону. Останнє викликає кардинальну зміну традиційної схеми роботи балки (на згин), по суті перетворюючи її в гнучку нитку, яка сприймає вертикальні навантаження при розтягу. З механічної точки зору ця трансформація проявляється у взаємодії за межею плинності крутного моменту і зусилля розтягу у балках і їх вузлових з'єднаннях типу балка-колонна-балка. А для формування схеми ланцюгової роботи вузловим з'єднанням

належить спочатку пройти через значні непружні повороти у процесі протидії зростаючому осьовому напруженню розтягу. При цьому осьова складова цього напруження від прикладеного навантаження буде зростати, оскільки реакція каркаса поступово проходить стадії від опору прогину до опору комбінації крутного моменту і осьового напруження розтягу та, у остаточному підсумку, опору, головним чином, напруженням розтягу.

4. Експлуатаційні критерії для металоконструкцій, що піддаються вибуховим навантаженням. Критерії реакції металоконструкцій від вибухових навантажень певною мірою залежать від їх складових елементів (балки, колони, стики, плити, вузлові з'єднання тощо) і зазвичай проявляються як «межа реагування» у вигляді обертань елементів. Іншими словами, кращі з існуючих критеріїв відповідних реакцій, які можна застосовувати для динамічного аналізу й проектування, ґрунтуються на властивостях згину в перетинах. Звичайно, можна розглянути й інші форми реакцій і режими можливого руйнування, однак наведені критерії стосуються цих режимів і форм лише на підставі статистичних розрахунків або емпірично виведених критеріїв обертання. Складна реакція сталевих балки, яка безпосередньо зазнає впливу вибуху, проілюстрована на рис. 4.

Критерії зсуву для вибухових навантажень зазвичай ґрунтуються на існуючих розрахунках показників статичного зсуву. Аналогічний підхід застосовується при місцевій нестійкості

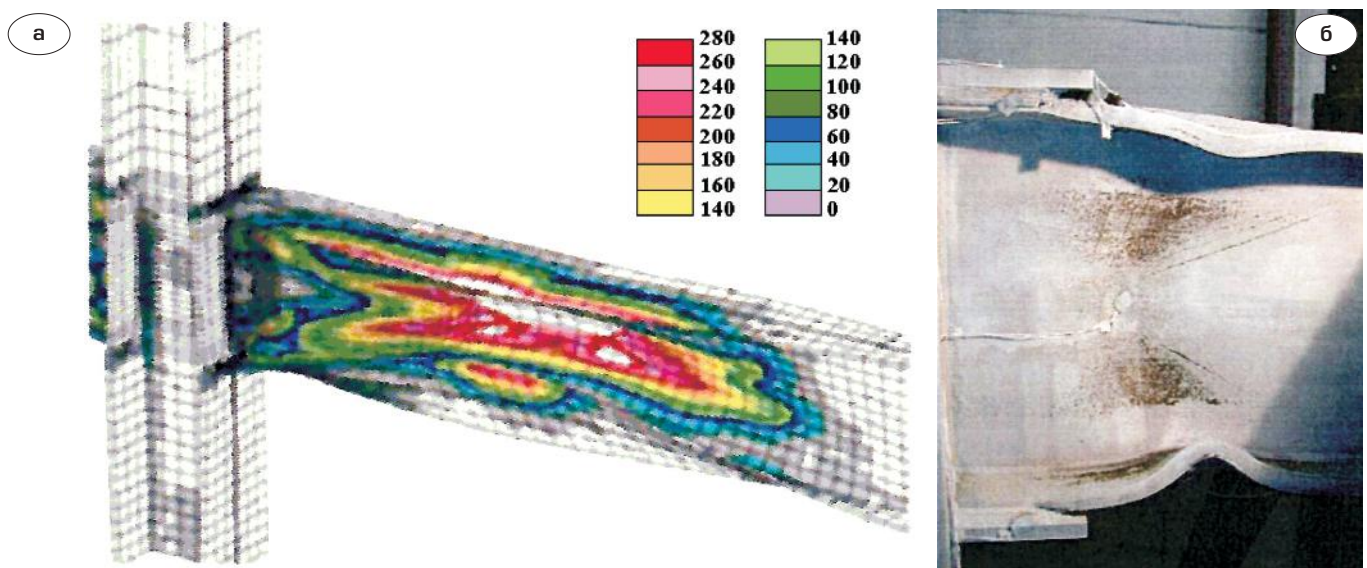


Рис. 4. Розрахунковий (а) і дослідний (б) приклади реакції сталевих балки на локальний вибух (величини напружень вказані в МПа)

(деформація стінки балки) і стійкості елемента (вимоги до в'язей жорсткості). Звичайний підхід у проектуванні полягає в тому, щоб переконатися, що згинальний опір навантаженню, який чиниться елементом, обмежується цими формами руйнувань за незначної пластичності. Якщо задовольняються вимоги щодо зсуву і стійкості, то вважається, що елемент має достатній потенціал для прийняття пластичних поворотів, які допускаються за критерієм реакції.

У свою чергу, стійкість до динамічного зсуву профілів із широкими полицями традиційно вважається цілком прийнятною, за винятком вузлових з'єднань у опорній (фундаментній) плиті, де руйнування від зсуву має бути попереджено за допомогою закладних пластин (бетонні перекриття, плити, які забезпечують стійкість до зсуву) або підсилювальних деталей в опорних плитах. Однак застосування більших і важчих конструктивних будівельних профілів чи конструктивних систем може звести це припущення до мінімуму.

5. Властивості сталі у розрахунку на вибухобезпечність. Пластичність й міра чутливості є ключовими параметрами при розгляді поведінки конструктивної сталі у розрахунках на опір вибуху. Цій сталі властива лінійна залежність напружень розтягу – стиску до межі пропорційності, яка або дуже близька, або ідентич-

на межі плинності. А вже за цією межею конструктивна сталь може сильно розтягуватися внаслідок пластичної деформації без істотного зростання напружень при подовженні у 10–15 разів більше необхідного для досягнення плинності. Цей діапазон має назву плато (полога ділянка) плинності. За цією ділянкою відбувається деформаційне зміцнення (нагартування), тобто додаткове подовження, пов'язане зі зростанням напружень.

Після досягнення максимального номінального напруження, іменованого межею міцності на розрив (тимчасовий опір розриву), відбувається різке скидання напруження при подовженні (або розриві), яке досягає 20–30 % початкової довжини зразка. Таким чином, будівельна сталь має значну пластичність, що дозволяє використовувати її для проектування вибухобезпечних споруд. Графіки залежності «деформація – напруження» для низки звичайних конструктивних сталей зображені на рис. 5.

Показники міцності на розрив будівельної сталі й меншою мірою межа міцності (тимчасовий опір руйнуванню) також залежать від напруження або від швидкості, з якою сталь деформується в осьовому напрямку при згині або зсуві.

6. Методи і етапи розрахунку на вибухові навантаження. Традиційно розрахунок на вибухобезпечність окремих конструктивних елементів або простих вузлів виконується з використанням аналізу на одну ступінь свободи, який являє собою нелінійний динамічний аналіз, зведений до визначення форми одиничної реакції для динамічної системи. Іншими словами, цей аналіз передбачає режим і форму реакції елемента (згинальну реакцію з трьома шарнірними механізмами для закріпленої балки, наприклад).

Останнім часом були вдосконалені інші складні аналітичні методи, які стали більш доступними для роботи на персональних комп'ютерах. Відомі обчислювальні програмні комплекси, як-то вітчизняні SCAD, LIRA і світові ANSYS, ADINA, LS-DYNA та багато інших, дозволяють розробляти й оцінювати формули повних скінченних елементів і конструктивних систем. Цей аналіз на «мікро» рівні дає змогу детально розглядати окремі будівельні елементи і вузлові з'єднання, а також визначаються їх експлуатаційні характеристики (твердість, міцність, форми розривів) або як частину більш

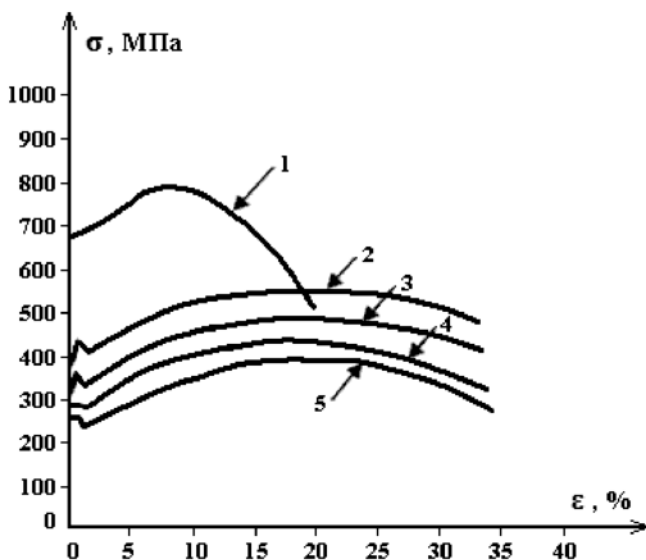


Рис. 5. Графіки залежності «деформація – напруження» для звичайних конструктивних сталей:

- 1 – A514 ($R_e = 690$ МПа); 2 – A572 ($R_e = 414$ МПа);
 3 – A572 ($R_e = 345$ МПа); 4 – A572 ($R_e = 290$ МПа);
 5 – A36 ($R_e = 248$ МПа)

розгорнутої формули скінченного елемента, або у вигляді внеску в «макро» модель конструктивної системи. Зазначені «макро» моделі можуть бути розроблені із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення, в якому характеристики елемента, встановлені за допомогою «мікро» моделей, подаються як вихідні дані, і в якому можуть бути виконані аналіз і проектування будівельної системи.

Одночасно існують й інші прості методики, що базуються на використанні згаданих раніше кривих «тиск – імпульс» ($P - i$) та охоплюють показники нелінійності компонента і його динамічної реакції, однак у подальшому мають обмеження (форма постійного навантаження та межі реакції). Проте нещодавно проведені дослідження показали, що ці прості засоби є досить точними в деяких ситуаціях.

Оскільки розрахунок конструктивних елементів на вплив вибуху передбачає комплексний динамічний і статичний (а у низці випадків і геометричний) нелінійний аналіз, то навіть «спрощений» аналітичний метод типу аналізу на одну ступінь свободи є досить складним завданням, про що свідчить наведений нижче приклад, котрий містить послідовні етапи для оцінювання «простого» елемента, багато з яких, до речі, використовуються в автоматизованій загальноприйнятій практиці у відповідних обчислювальних програмних комплексах.

Отже, спрощений аналіз типового конструктивного елемента, приміром балки перекриття, яка несе навантаження сили тяжіння, у системі, що складається зі сталевих балок і плит, виконується поетапно в наступній послідовності:

1. Визначаються навантаження, які діють на балку, шляхом розрахунку вибухових навантажень, прикладених або безпосередньо до системи перекриття, або ж непрямо – внаслідок розповсюдження через зовнішні отвори будівлі (модель множинних відображень), після чого поступово накопичуються навантаження на плиту перекриття, прикладається до балки повна опорна реакція системи плит перекриття, проводиться її розрахунок і визначаються динамічні реакції.

2. Визначаються властивості балки і здійснюються «статичні» перевірки динамічних характеристик матеріалу, включаючи показник «надміцності» (множник для врахування фактичної міцності) і коефіцієнт динамічного

збільшення (для врахування ефектів ступеня напруження); визначається маса реагуючої системи (включаючи доповнюючу систему плит, якщо динамічні реакції або тимчасовий період опору навантаження від системи плит не використовуються); розраховується потенціал балки на обертальний момент – при допущенні наявності повністю пружного перерізу для відповідної пластичності; перевіряються вимоги до товщини полиці й стінки балки на місцеве викривлення та вимоги, що висувуються до бічних в'язей жорсткості; перевіряється потенціал перерізу на зсув – зазвичай передбачається, що його забезпечують широкі полиці й стінки балки, однак більші/важчі перерізи можуть потребувати перевірки впливу зсуву при наявному потенціалі на крутний момент; перевіряється взаємодія осевого навантаження і згину, якщо наявні значні навантаження розтягу.

3. Визначаються функції опору згину і відповідних характеристик перерізу: пружної (пружно-пластичної) жорсткості й деформації при максимальному опорі (межа плинності); нелінійного опору, пов'язаного з граничними умовами балки – сюди можна віднести збільшення жорсткості (зміцнення) та потенціалу розтягу, коефіцієнтів навантаження і маси для аналізу на один ступінь свободи – форма реакції, прийнята у цьому аналізі на підставі граничних умов, визначає множники, які застосовуються для маси, навантаження, жорсткості і опору системи з метою створення «еквівалента» системі.

4. Виконується аналіз на один ступінь свободи й перевіряється максимальна величина обертання/пластичності по відношенню до меж реакції елемента: поворот/прогин посередині прогону не повинен перевищувати максимальної реакції захисного рівня, а оберти/повороти при опорі не мають перевищувати величин, зазначених для з'єднання.

5. Перевіряються реакції (максимальний опір) щодо стійкості з'єднання на зсув.

7. Методи удосконалення робочих характеристик конструктивних елементів і з'єднань. Відомо, що пластичність є такою ж суттєвою фізико-механічною властивістю матеріалу, як жорсткість або міцність, а її врахування так само необхідне при аналізі роботи елементів і вузлових з'єднань, як маса або інерційний опір. Зазначене важливо через те, що ефективні пе-

перези для опору вибуху врівноважують стійкість і пластичність з'єднання з показниками опору і пластичності фасонного прокату. Таким чином, можна сформулювати перелік перевірок і рекомендацій в частині розрахунку на вибухостійкість сталевих елементів і вузлових з'єднань, виконання яких дозволяє підвищити їх надійність, а саме:

- перевірити чи місцеве викривлення балки або розрив від зсуву не відбувається до початку розвинення максимальної величини пластичного моменту;
- забезпечити повне спірання балок за довжиною з бажаним застосуванням кріпильних шпильок із метою запобігання бічній крутній деформації при використанні плити на металевому настилі плит міжповерхового перекриття;
- використовувати за можливості «сейсмічно компактні» перези балки;
- забезпечити розвинення повного пластичного моменту в балках як у позитивному, так і в негативному напрямках (те ж стосується й в'язей);
- використовувати вузли з'єднань типу балка-до-балки;
- перевірити стійкість колони по відношенню до більшої незакріпленої в'язями довжини на випадок руйнування перекриттів, які забезпечували бічне спірання;
- розглянути можливість застосування бетонного заповнювача або труб, або ж замуrowаних у бетон широкополичних елементів як колони з метою пом'якшення проблем місцевого викривлення;
- застосовувати систему потужна колона–слабка балка задля утворення шарнірного вузла типу балка/вузлове з'єднання до початку утворення пружного шарніра в колоні;
- закладати пластини основи колони у плиту фундаменту або іншим способом посилювати з'єднання опорної плити при навантаженнях типу зсув/реакція.

Що ж стосується загальних конструктивних способів, які добре зарекомендували себе у будівельній практиці при підсиленні існуючих сталевих конструктивних систем для протидії вибуху, то вони полягають у наступному:

- захищення ключових елементів шляхом використання архітектурних рішень із метою

збільшення відстаней на випадок застосування «ранцевих» зарядів;

- закладення широкополичних колон у бетон відповідно до положень про сейсміку;
- підсилення системи плит перекриття (додаткова плита з верхнім сталевим покриттям, складними вузлами і т.ін.) для зменшення можливості втрати бічної стійкості;
- доповнення існуючих конструктивних систем додатковими балками між прогонами задля зменшення прогонів перекриття;
- поліпшення роботи вузлових з'єднань (пластичність) за рахунок використання модернізованих вузлових з'єднань типу балка-до-балки.

8. Характеристики конструкцій, які використовуються для ослаблення впливу наростаючого руйнування. Як зазначалося раніше, існує два методи, спрямовані на ослаблення наростаючих руйнувань: альтернативний шлях безпосереднього (прямого) розрахунку, або метод «мостового перекриття» і метод непрямого розрахунку із застосуванням в'язей для нижніх рівнів захисту в поєднанні з методом можливого шляху, на випадок, якщо використання обов'язки неможливо, або для верхніх рівнів захисту.

Методика обов'язки передбачає, що резерв осового потенціалу в елементах і вузлових з'єднаннях є достатнім для того, щоб:

- дати змогу будівельним елементам перекрити «втрачені» вертикальні опори за рахунок ланцюгової роботи, приймаючи величину прогину в 10 % від «подвоєного» прогону;
- забезпечити розподілену і резервну міцність для того, щоб «нести» реакції цих «подвоєних» прогонів;
- підтримувати елементи, первинна розрахункова несна здатність яких була втрачена, завдяки застосуванню додаткових резервів міцності у вигляді нерозрізних в'язей, розташованих перпендикулярно до цих елементів.

У цьому сенсі звернемо увагу на те, що застосування обов'язки – це прийнята методологія, яка використовується для збереження цілісності будівельної системи. Основним положенням, на якому ґрунтується ефективність цього методу, є те, що будівельні елементи та їх з'єднання

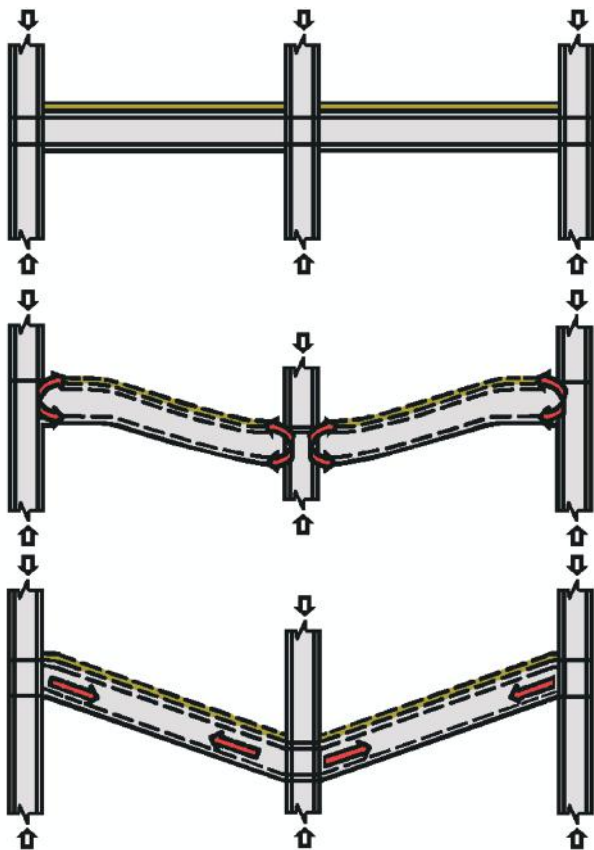


Рис. 6. Принципова схема розвитку деформацій сталевго каркаса від згинальної реакції до ланцюгової роботи на розтяг

мають достатню обертальну пластичність, яка створює умови для розвинення осьового потенціалу у формі ланцюгової роботи при досить великих прогинах «подвійного прогону». Причому значення цих прогинів приймаються при розрахунку «мінімальних» ланцюгових зусиль і є такими, що дорівнюють приблизно 10 % довжини подвійного прогону. Що ж стосується роботи в'язей, то вони працюють завдяки забезпеченню міцності на розтяг елементів і вузлових з'єднань після того, як у конструктивній системі відбувається їхнє згинання та перерозподілення напружень від згину і розтягу (рис. 6).

Нагадаємо, що з практичної точки зору всі будівлі повинні бути надійно і ефективно поєднані одна з одною на кожному основному рівні перекриття. Кожну колону належить ефективно утримувати на місці за допомогою горизонтальних в'язей у двох напрямках, приблизно під прямими кутами на кожному рівні основного перекриття, яке підтримує дана колона.

Аналогічним чином необхідно забезпечувати наявність горизонтальних в'язей на рівні покриття, за винятком випадків, коли металокаркас утримує лише облицювання, яке важить не більше ніж $0,7 \text{ кН/м}^2$ і несе лише навантаження, прикладені до покриття, а також вітрові навантаження.

Для сталевих будівель ряди нерозрізних в'язей слід встановлювати якомога ближче до торців перекриття або покриття, а також до кожного ряду колон. У вхідних кутах елементи в'язей, розміщені найближче до торця, потрібно закріплювати анкерами у сталевому каркасі. Крім того, необхідно мати на увазі, що:

- горизонтальні в'язі мають бути нерозрізними, розташованими у споруді в двох перпендикулярних напрямках на рівні кожного перекриття і складатися зі сталевих елементів, які є частиною будівельного каркаса;
- периферичні в'язі також треба конструювати нерозрізними уздовж периметра будівлі на кожному рівні перекриття;
- горизонтальні в'язі до колон уздовж периметра або стін повинні закріплювати колону, найближчу до торця перекриття або покриття, і розміщуватися перпендикулярно до торця. Крім того, міцність цих в'язей слід забезпечувати на рівні більшого з навантажень, прийнятих для внутрішніх в'язей, або на рівні 1 % від сумарного значення максимальних вертикальних змінного і постійного навантажень на об'язувану колону, з урахуванням усіх комбінацій навантажень, використаних у процесі розрахунку.

Стосовно вертикальних в'язей зауважимо, що вони розміщуються таким чином, щоб усі колони були нерозрізними по кожному з'єднанню балки до колони. Усі стикові з'єднання колон мають мати розрахункову міцність в'язей, яка дорівнює найбільшій реакції від вертикального змінного і постійного навантажень (від усіх комбінацій навантажень, використаних у розрахунку), прикладених до колони на будь-якому рівні одного перекриття. Ілюструє зазначене рис. 7, на якому представлений вид у плані встановлених необхідних в'язей. Однак якщо виконання об'язки практично неможливе або потрібні більш високі рівні захисту споруди, то необхідно виконувати аналіз використовуючи метод можливого шляху.

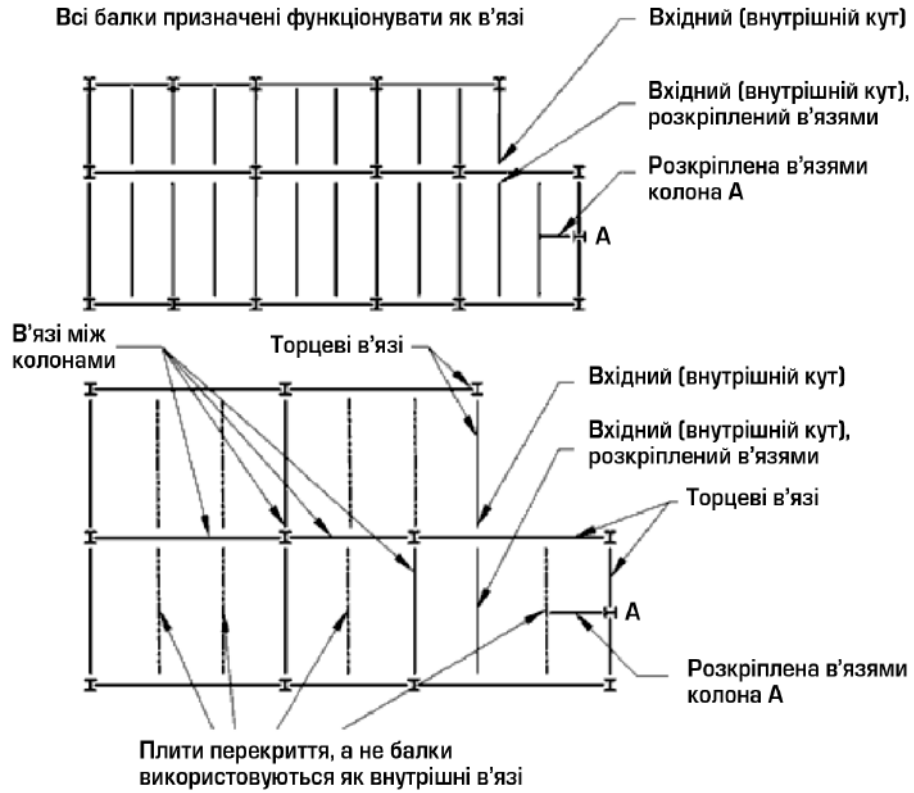


Рис. 7. Принципова схема розміщення в'язей

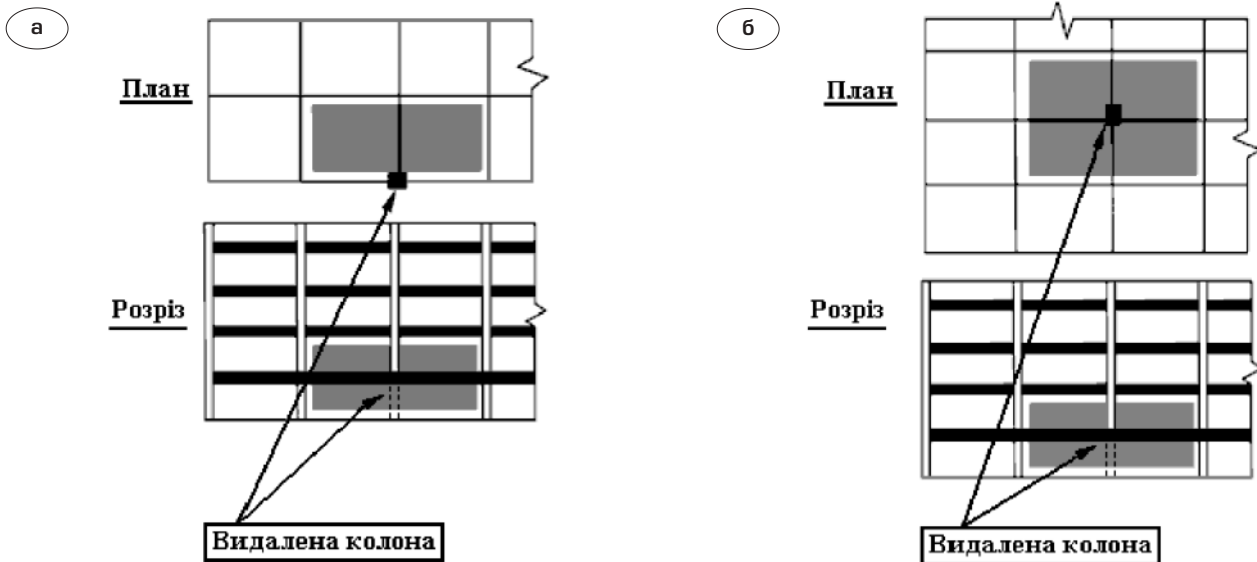


Рис. 8. Максимально допустима площа пошкоджень і руйнувань згідно з методами зовнішнього (а) і внутрішнього (б) можливого шляху в разі видалення колони

У цьому випадку необхідно прийняти такі максимально допустимі значення пошкоджень і руйнувань:

1. При видаленні стіни або колони на зовнішній поверхні будівлі на висоту більше трьох поверхів площа зруйнованої ділянки перекриття безпосередньо над видаленим елементом повинна бути меншою ніж менша з величин у 70 м^2 , або 15 % від загальної площі цього поверху (така ж вимога висувається до міжповерхового перекриття безпосередньо під видаленим елементом). А для триповерхових будівель руйнування можуть бути за усіма трьома поверхами, якщо тільки власником не встановлені більш суворі вимоги. Крім того, будь-який вид руйнування не повинен поширюватися за межі прибудов до будівлі до зруйнованого елемента.

2. При видаленні внутрішньої стіни або колони в будівлі заввишки більше трьох поверхів по висоті для пошкоджень вимагається, щоб зруйнована ділянка перекриття безпосередньо над видаленим елементом була меншою ніж менша з величин у 140 м^2 або 30 % від загальної площі цього поверху (така ж вимога висувається до міжповерхового перекриття безпосередньо під видаленим елементом). А для триповерхових будівель руйнування можуть бути за усіма трьома поверхами, якщо тільки власником не встановлені більш суворі вимоги. Крім того, будь-яке руйнування не має поширюватися далі прогонів, які безпосередньо прилягають до видаленого елемента.

Наведені вище міркування візуалізовані на рис. 8, де затемненням виділена рекомендована максимально допустима площа пошкоджень і руйнувань навколо видаленої колони, які відповідають методу зовнішнього (а) і внутрішнього (б) можливого шляху в разі видалення колони.

Критерії допустимості за методом можливого шляху полягають у вимогах дотримання меж деформацій. А прогини і повороти, які розраховуються за методом можливого шляху, потрібно зіставляти з величинами деформацій, які мають специфічний характер для кожного типу елемента. У разі коли який-небудь конструктивний елемент не задовольняє допустимі критерії (міцності або деформації), то в таку модель необхідно вносити зміни перед повторним аналізом. Критерії допустимості згинальних навантажень ґрунтуються на міцності на згин

конструктивного елемента, включаючи коефіцієнт зменшення міцності, а також коефіцієнт перевантаження до властивостей матеріалу, які використовуються у відповідних випадках.

Якщо згинальний момент, який визначається за методом можливого шляху, перевищує розрахункову міцність на згин, то елемент підлягає або видаленню, або модифікації. Для лінійних статичних моделей конструктивні елементи, які в змозі зберігати постійний момент, піддаючись тривалим деформаціям, мають бути модифіковані з використанням ефективно працюючого пластичного шарніра. При цьому потрібно визначити місце знаходження цього шарніра шляхом інженерного аналізу й прийняття відповідного технічного рішення або використовуючи вимоги інструкції по конкретних типах конструктивних елементів. При застосуванні ж нелінійних статичних і динамічних моделей програмне забезпечення повинно мати змогу адекватно представити нелінійну згинальну реакцію після того, як згинальний момент досягне показника розрахункової міцності елемента на згин.

Критерії допустимості для колон, які зазнають комбінації осьових і згинальних навантажень, базуються на критерії міцності. Якщо показник міцності у розрахунку на зсув перевищено, то елемент має бути вилучено, а навантаження з нього перерозподілені. Крім того, якщо розрахункова міцність для будь-якого режиму розриву вузлового з'єднання перевищена, або перевищена величина допустимого пластичного повороту для цього вузлового з'єднання, то таке з'єднання також підлягає видаленню. При виході з ладу вузлових з'єднань на обох кінцях елемента навантаження від такого пошкодженого елемента мають бути перерозподілені. При цьому рекомендується, щоб при виконанні нелінійного динамічного аналізу:

- подвоювалися навантаження від зруйнованого елемента для урахування ударного впливу і миттєвого прикладення їх до перерізу споруди безпосередньо нижче зруйнованого елемента;
- додавалися навантаження від ділянки, яка підтримується зруйнованим елементом, на площу, що дорівнює або менша ніж площа ділянки, від якого вони походять.

А у разі використання лінійного або нелінійного статичного аналізу необхідно:

- навантаження від зруйнованого елемента прикладати до ділянки споруди безпосередньо під зруйнованим елементом;
- якщо навантаження на зруйнований елемент не подвоєні, то їх потрібно подвоїти і прикласти до ділянки споруди безпосередньо під зруйнованим елементом;
- прикласти навантаження від ділянки, яка підтримується зруйнованим елементом, на площу, рівну або меншу, ніж площа ділянки, від якої вони походять.

9. Етапи алгоритму розв'язання задачі на ослаблення наростаючих руйнувань. Якщо аналіз на вибухобезпечність сталевих елементів і конструкцій виконується на основі методики єдиного динамічного нелінійного підходу, то для розрахунку наростаючого руйнування існують три можливості, а саме: статична квазілінійна методика, статичний нелінійний аналіз роботи каркаса або системи і динамічний нелінійний аналіз роботи каркаса. Зазвичай краще застосовувати методику динамічного нелінійного аналізу, оскільки статичний еквівалентний підхід має тенденцію до надмірної компенсації інерційних навантажень. Цей підхід може бути трудомістким, у залежності від наявних обчислювальних програмних комплексів і складності споруди. Використовувати статичний нелінійний аналіз, як правило, не рекомендується, оскільки існуючі критерії меж нелінійних деформацій мають обмежувальний характер порівняно з лінійною методикою. Таким чином, слід використовувати або статичну квазілінійну (більш консервативну, менш ефективну), або динамічну нелінійну (менш консервативну, більш ефективну) методику.

Як правило, виконуються наступні кроки під час здійснення динамічного нелінійного аналізу можливого шляху для розрахунку нового проекту:

- розрахунок і проектування конструктивної системи проводиться відповідно до чинних норм і стандартів;
- за допомогою «мікро» аналізу або ж із використанням даних випробувань, або встановлених критеріїв (допусків повороту елементів та пластичного повороту для з'єднань і т.ін.) готуються вихідні дані для визначення нелінійного шарніра у будівельній моделі (причому шарніри елемента, колони і вузлового з'єднання матимуть різні нелінійні характеристики);
- визначаються і прикладаються навантаження від наростаючого руйнування на будівельну модель;
- відповідно до встановлених критеріїв видаляється вертикальний елемент із моделі при збереженні зусиль у всіх інших її елементах;
- видаляються зусилля з моделі лінійно і в досить короткий проміжок часу для того, щоб таке видалення не вплинуло на розрахункові зміщення (результати досліджень свідчать, що час не більше однієї двадцятої від періоду власних коливань конструктивної системи буде достатнім для більшості споруд);
- оцінюються динамічні деформації конструкції і повороти шарнірів із метою визначення можливого перевищення допустимих деформацій у елементах або вузлових з'єднаннях (рис. 9). У випадку такого перевищення проводиться перерахунок елементів для зменшення поворотів;

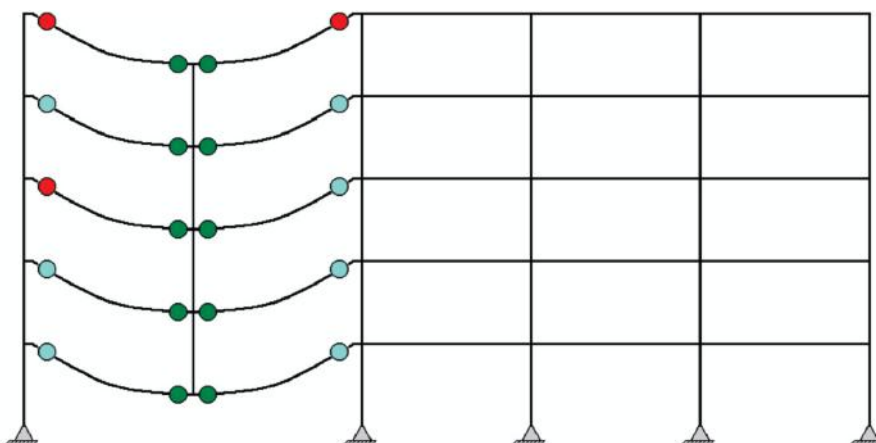


Рис. 9.
Нелінійні шарнірні повороти
у початковому аналізі можливого шляху

- оцінюється механізм контролю зусиль (зсув, взаємодія крутних моментів колони, осьовий потенціал елемента), а також збільшення розмірів елемента у разі перевищення допустимих зусиль;
- конструкція перераховується доти, поки не буде досягнута відповідність допустимих деформацій і зусиль стійкості елементів і вузлових з'єднань.

Проведені дослідження п'ятиповерхового будинку із достатньо простою конструктивною прогоновою схемою 5×4 зі сталевим каркасом, який витримує крутний момент, дають змогу дійти висновку, що методика динамічного аналізу є значно ефективнішою. І тому проектування відповідно до вимог «оптимальної практики» до бічного розпору дозволяє існуючому розрахунку «пройти» через аналіз можливого шляху без суттєвих змін.

10. Методи удосконалення та підсилення конструкцій у разі втрати ключового елемента.

Найкращим методом ослаблення наростаючого руйнування є поєднання непрямих методів забезпечення запасу міцності шляхом створення додаткових потенціалів згинності та пластичності при задоволенні критеріїв аналізу можливого шляху, а також забезпечення додаткової цілісності всієї конструкції при задоволенні вимог щодо зусиль розтягу. При цьому необхідно зазначити, що метод можливого шляху не призначений для повного вирішення конкретної небезпечної ситуації при видаленні однієї колони, а просто вказує на той факт, що вимірювана стійкість до наростаючого руйнування існує.

Додаткові вимоги розпорядчого характеру щодо опірності наростаючим руйнуванням полягають у наступному:

- для усіх рівнів захисту багатоповерхові елементи, які несуть вертикальні навантаження, мають витримувати вертикальне навантаження після втрати бічної опори на рівні будь-якого поверху (тобто, для розрахунку або аналізу має бути використана довжина, яка не має бічної опори, що дорівнює двом поверхам). При цьому навантаження від «видаленого» поверху не потрібно прикладати до стіни або колони;
- у кожному прогоні й на всіх поверхах, а також на покрівлі система плита/перекриття повинна мати здатність утримувати вертикальне навантаження наступної величини: $D + 0,5L$, де D – постійне навантаження лише власної ваги; L – тимчасове навантаження.

Необхідно відзначити, що це навантаження прикладається до кожного прогону послідовно, тобто вертикальні навантаження не прикладаються до усіх прогонів одночасно. Система перекриттів у кожному прогоні та її приєднання до балок, прогонів, колон, капітелей і таке інше повинна бути розрахована на таке навантаження. При цьому шлях навантаження від плити до фундаменту для такого виду вертикального навантаження не вимагає визначення. Бажано також щоб усі колони уздовж периметра були запроектовані з достатнім запасом на зсув, щоб міг розвинутися повний пластичний згинальний момент.

Щодо металевих конструкцій, які, як відомо, мають високий потенціал стосовно наростаючих руйнувань, то вони можуть бути підсилені ефективно і з найменшими витратами. Концепції ефективного підсилення можуть включати глобальне підсилення системи сталевих каркаса шляхом створення багаторівневої ферми Віренделя (безрозкісна ферма, решітчаста балка) і/або місцеве поліпшення сталевих вузлових з'єднань балок до колон з метою збільшення конструктивної цілісності, пластичності й нерозривності від балки до балки.

З іншого боку, якщо існує конкретна інформація про загрозу, прямою розрахунковою альтернативою є «розрахунок ключового елемента» або забезпечення «конкретного місцевого опору». Задля ослаблення наростаючого руйнування це зазвичай зводиться до підсилення колони і збільшення жорсткості передавального елемента. Наприклад, у конструкції, де втрата однієї колони уздовж периметра може не послабити конструктивну систему за умов місцевого руйнування, при втраті двох колон – це може статися. Таким чином, усі колони уздовж периметра можуть бути запроектовані спеціально на опір впливу вибуху великої бомби у транспортному засобі на відстані, що становить половину прогону, це забезпечить достатню стійкість колони для запобігання втрати більш ніж однієї колони при цій конкретній загрозі.

Найкращою ж сучасною методикою підсилення сталевих колон є оббудування її бетоною оболонкою, заміна поперечних перерізів на коробчасті або трубні, заповнення бетоном, а також захист плити основи шляхом закладення опорного листа колони до основи у саму плиту.

Надійшла 08.10.2018 р.