УДК 614.841

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ПЕРЕКРИТТЯ ПІД ІМПУЛЬСНИМ ВИБУХОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-2

Пурденко Р. Р., ORCID iD 0000-0001-6467-4133
Рашкевич Н. В*., ORCID iD 0000-0001-5124-6068
*E-mail: rashkevych_nina@nuczu.edu.ua

Національний університет цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 12.03.2026
Прийнято: 20.04.2026
Опубліковано: 30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

залізобетонна плита перекриття, вибухове навантаження, імпульсна дія, напружено-деформований стан, скінченно-елементне моделювання, LIRA-FEM.

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено динамічну поведінку залізобетонної плити перекриття під дією імпульсного вибухового навантаження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення надійності та безпеки будівельних конструкцій за умов дії екстремальних навантажень, що можуть виникати внаслідок техногенних аварій або бойових уражень. У таких умовах застосування чисельних методів дозволяє відтворювати напружено-деформований стан конструкцій та прогнозувати їхню поведінку без проведення великої кількості дорогих експериментальних випробувань. Для дослідження використано результати повномасштабних експериментальних випробувань залізобетонних плит, навантажених вибухом заряду тринітротолуолу. На основі експериментальних даних відтворено геометричні параметри плити, схему армування, характеристики бетону та сталевої арматури, а також граничні умови обпирання. Чисельне моделювання виконано у програмному комплексі LIRA-FEM у постановці нестаціонарної динамічної задачі з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності матеріалів. Для бетону застосовано нелінійну діаграму деформування, для арматури – пружно-пластичну модель з урахуванням границі текучості. Початковий напружено-деформований стан конструкції сформовано шляхом попереднього статичного розрахунку. Для визначення динамічних характеристик плити проведено модальний розрахунок, за результатами якого встановлено власні частоти та відповідні форми коливань, а також визначено параметри демпфування. Вибухове навантаження у чисельній моделі задано у вигляді рівномірно розподіленого імпульсного тиску по площі плити, що дозволяє врахувати інтегральний силовий ефект вибухової хвилі. Отримані результати чисельного моделювання порівняно з експериментальними даними. Встановлено, що максимальний прогин плити, визначений у розрахунку, становить 36,7 мм, тоді як експериментальне значення дорівнює 41 мм. Відносне відхилення не перевищує 10,49 %, що свідчить про прийнятний рівень збіжності результатів. Розроблена модель адекватно відтворює характер напружено-деформованого стану та коливальної реакції залізобетонної плити під дією імпульсного вибухового навантаження. Отримані результати можуть бути використані для подальших досліджень впливу параметрів вибуху та конструктивних характеристик на працездатність залізобетонних елементів.

Постановка проблеми. Будівлі та споруди, що можуть зазнавати вибухових впливів, повинні забезпечувати не лише збереження несучої здатності, а й безпеку людей. Під дією вибухової хвилі конструкції сприймають короткочасне, але інтенсивне навантаження, яке може спричиняти деформації, утворення тріщин та пошкодження.

Залізобетонні плити перекриття є важливими елементами будівель, оскільки забезпечують їх просторову жорсткість і сприймають значну частину навантажень. Їх пошкодження при вибуху може призвести до зниження загальної стійкості будівлі та створити загрозу для людей.

Проведення експериментів із вибуховими навантаженнями є складним та затратним, тому для дослідження роботи конструкцій широко застосовують чисельне моделювання. Однак, невирішеною частиною проблеми є забезпечення достатньої достовірності таких моделей для прогнозування напружено-деформованого стану плит перекриття при імпульсному вибуховому навантаженні.

Таким чином, у роботі вирішується задача перевірки можливості використання комп'ютерної скінченно-елементної моделі для достовірного прогнозування поведінки залізобетонної плити перекриття при вибуховому впливі з метою підвищення безпеки людей та надійності будівель.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для дослідження поведінки будівельних конструкцій за вибухових та комбінованих аварійних впливів дослідники широко використовують чисельне моделювання. Такий підхід дає змогу простежити динамічну реакцію елементів, оцінити їх напружено-деформований стан, залишкові деформації та можливі форми руйнування. У роботі [1] розглянуто пошкодження сталевих колон при вибуховому навантаженні; отримані результати підтвердили придатність скінченно-елементного аналізу для прогнозування як локальних, так і загальних деформацій. Дослідження [2] присвячене поведінці сталевої пластини при дії вибуху з використанням LS-DYNA, де показано можливість чисельного відтворення її прогинів і загального характеру динамічної відповіді. У праці [3] досліджено особливості моделювання вибухового навантаження середнього радіуса дії, зокрема обґрунтовано вибір розрахункової схеми, яка забезпечує достатню точність без надмірного збільшення обчислювальних витрат. У [4] подано результати аналізу перфорованих сталевих елементів при вибуховій дії, що дозволило оцінити не лише їх деформування, а й залишкову несучу здатність після навантаження.

Праця [5] стосується чисельного аналізу сталевої будівлі при вибуху та відображає загальну реакцію каркасної системи залежно від параметрів вибухового впливу. У роботі [6] запропоновано змішаний елементний підхід для аналізу сталевих рам за послідовної дії вибуху та пожежі. У [7] досліджено поведінку широкополичних сталевих колон при одночасній дії осьового стиску і бокового вибухового навантаження, що дозволило простежити вплив цих чинників на характер деформування. Публікація [8] стосується живучості сталевих каркасів після локального вибухового пошкодження та подальшого пожежного впливу. У праці [9] поєднано чисельний і аналітичний підходи до вивчення поведінки та форм руйнування сталевих колон при вибухових навантаженнях. Робота [10] присвячена легким сталевим колонам за комбінованої дії високої температури та вибуху, тобто розглядає спільний вплив теплових і динамічних чинників. У [11] проаналізовано локальну реакцію W-подібних сталевих колон під дією вибухової хвилі, що дало змогу деталізувати особливості їх місцевого деформування.

Окремий напрям становлять дослідження, присвячені залізобетонним конструкціям. Зокрема, у [12] побудовано скінченно-елементну модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних елементів. У роботі [13] запропоновано математичну й комп'ютерну модель визначення вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних перекриттів із розрахунково-експериментальною перевіркою.

У дослідженні [14] розглянуто моделювання стійкості та надійності системи «ґрунт–фундамент–будівля» при силових і високотемпературних впливах, тобто акцент зроблено на сумісній роботі всієї конструктивної системи.

Найбільш близькою до тематики даної роботи є праця [15], у якій поєднано експериментальне та чисельне дослідження армованих плит з ультрависокоміцного бетону при вибухових навантаженнях, що підтверджує доцільність використання скінченно-елементного моделювання для аналізу плитних конструкцій при дії вибуху.

Разом із тим за результатами розгляду наведених джерел встановлено, що більшість праць присвячена сталевим елементам, каркасам, комбінованим вибухо-пожежним впливам або вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Натомість питання чисельного прогнозування динамічної реакції залізобетонної плити перекриття при імпульсному вибуховому навантаженні досліджено недостатньо. Це зумовлює необхідність розроблення та перевірки достовірності комп’ютерної скінченно-елементної моделі, придатної для прогнозування напружено-деформованого стану залізобетонної плити перекриття за вибухового впливу.

Формулювання цілей дослідження. Мета дослідження полягає у розробленні та перевірці достовірності комп’ютерної скінченно-елементної моделі для прогнозування напружено-деформованого стану залізобетонної плити перекриття при дії імпульсного вибухового навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати результати повномасштабних експериментальних досліджень динамічної реакції залізобетонної плити перекриття при дії вибухового навантаження та визначити вихідні параметри для чисельного моделювання;

– розробити скінченно-елементну модель залізобетонної плити в програмному комплексі LIRA-FEM з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності, фактичної схеми армування, характеристик матеріалів і граничних умов обпирання;

– виконати чисельне моделювання динамічної реакції плити при імпульсному вибуховому навантаженні та оцінити достовірність розробленої моделі шляхом порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними.

Методи дослідження. Для проведення дослідження використано скінченно-елементне моделювання у програмному комплексі LIRA-FEM, що дозволяє враховувати фізичну та геометричну нелінійність бетону та арматури. Початковий напружено-деформований стан формувався за допомогою попереднього статичного розрахунку. Динамічні характеристики плити визначалися методом модального розрахунку з оцінкою власних частот та демпфування за моделлю Релея. Вибухове навантаження у моделі задавалося як рівномірно розподілений по площі плити тиск, а результати чисельного моделювання зіставлялися з даними повномасштабних експериментів для перевірки достовірності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основою для перевірки достовірності розробленої моделі становлять результати повномасштабних експериментальних досліджень [15]. Згідно з описом експерименту, випробувальні плити мали розміри 2000×1000×75 мм та однакову схему розташування сталевої арматури. На рис. 1 наведено геометричні параметри зразків і схему їх армування.

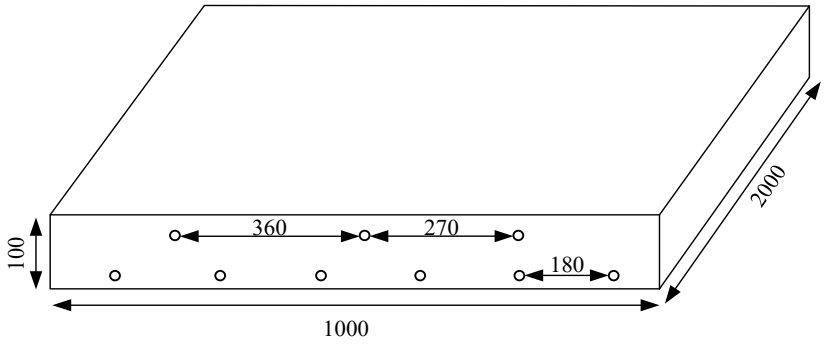

Рисунок 1 – Геометричні розміри зразків, розміщення арматури

Залізобетонні плити були виготовлені з високоміцного бетону та армовані підвищеної міцності сталевою арматурою.

Механічні властивості бетону й сталевої арматури, що використовувалися під час серії вибухових випробувань, наведено в таблицях 1 та 2 відповідно.

Таблиця 1 – Механічні властивості бетону

Модуль Юнга, МПа	Коефіцієнт Пуассона	Границя міцності, МПа	Кінцеве напруження	Густина, кг/м^3
51,503	0,20	128,9	0,0025	2424,9

Таблиця 2 – Механічні властивості сталі

Коефіцієнт армування, %	Тип сталі, мм	Міцність сталі, МПа
1,4	Високоміцна, 15,2	1750

Випробувальні зразки плит розміщували на спеціальному випробувальному стенді та фіксували у заданому положенні, забезпечуючи відтворюваність граничних умов під час випробувань.

Заряд тринітротолуолу масою 8 кг підвішували на мотузці, закріпленій на трубчастій рамі, конструкція якої забезпечувала надійне підвішування та можливість плавного регулювання висоти розташування заряду над плитою, а також його стабільне позиціювання відносно центра зразка (рис. 2).



Рисунок 2 – Загальний вигляд випробувальної установки [15]

Основні параметри вибухового навантаження, прийняті під час проведення експериментальних досліджень (рис. 3), а також відповідні зафіксовані характеристики імпульсу, тривалості позитивної фази, відбитого та падаючого тиску, наведено в таблиці 3.

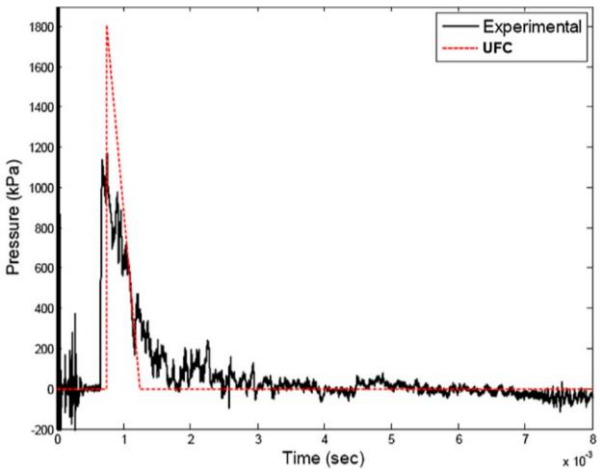

Рисунок 3 – Графік надлишкового тиску вибуху в часі [15]

Таблиця 3 – Параметри вибухового навантаження

Вага заряду в тротиловому еквіваленті, кг	Масштабована відстань, м/кг$^{1/3}$	Тривалість позитивної фази, мс	Відбитий тиск вибуху, кПа	Падаючий тиск вибуху, кПа
8	0,5	4,2	1185	307

Для реєстрації відбитого тиску на дослідних зразках встановлювалися датчики тиску. Вимірювання переміщень випробувальних зразків здійснювали лінійними датчиками переміщень, схему розташування яких наведено на рис. 4.

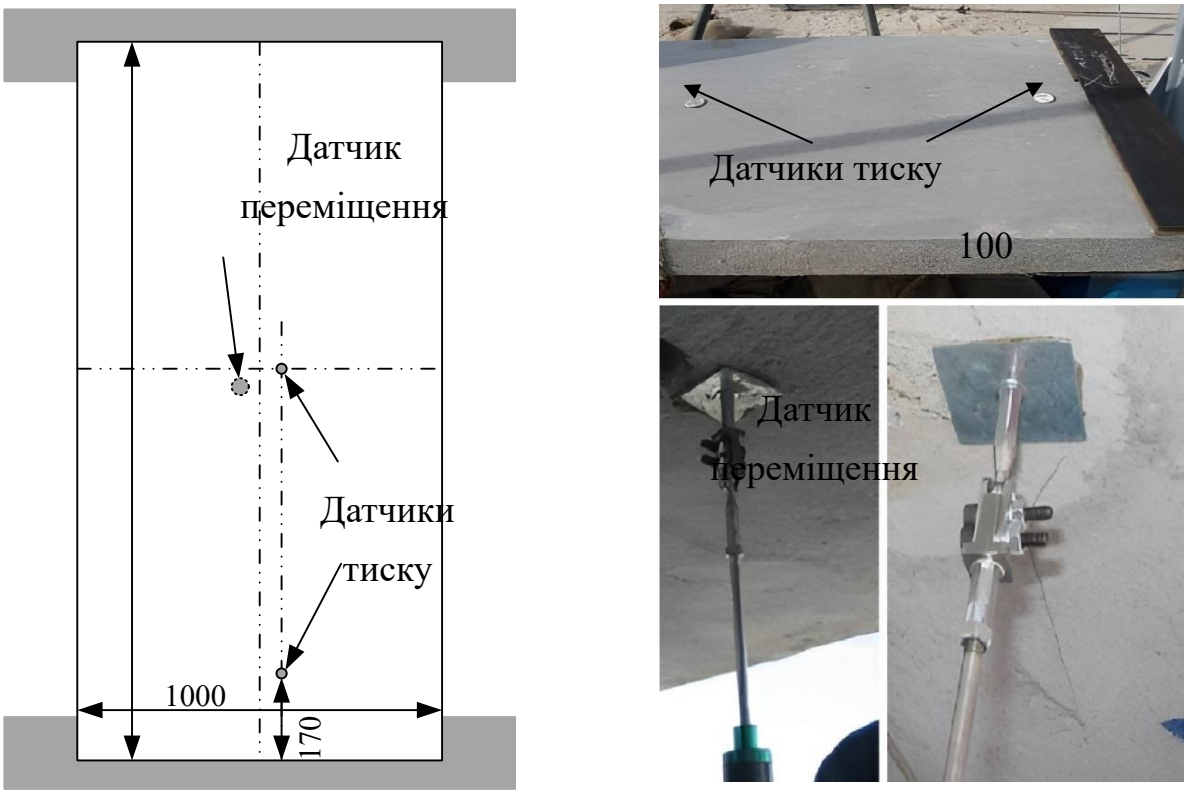

Рисунок 4 – Система збору даних (датчики тиску та переміщення) [15]

За результатами випробувань руйнування залізобетонної плити не зафіксовано. Максимальне вертикальне переміщення плити вниз становило 41 мм, після чого відбулося її часткове відновлення до початкового положення (рис. 5).



Рисунок 5 – Вигляд залізобетонної плити після випробування [15]

Розробка комп'ютерної моделі залізобетонної плити перекриття виконана в програмному комплексі LIRA-FEM у постановці нестаціонарної динамічної задачі з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності (рис. 6).

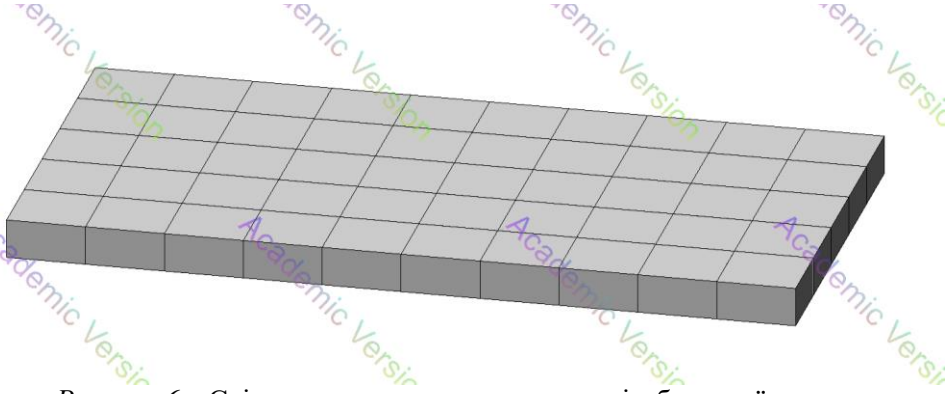

Рисунок 6 – Скінченно-елементна модель залізобетонної плити

У моделі відтворено фактичні геометричні параметри плити, схему армування, товщину захисного шару та граничні умови обпирання відповідно до експериментальної схеми (рис. 1, 5).

Характеристики бетону та арматури задано згідно з прийнятими в експерименті характеристик матеріалів (табл. 1, 2). Для бетону враховано нелінійну діаграму деформування, для арматури пружно-пластичну діаграму з урахуванням границі текучості.

Перед прикладанням імпульсного вибухового навантаження виконано попередній статичний розрахунок для формування початкового напружено-деформованого стану від постійних навантажень. Отриманий напружено-деформований стан прийнято як початковий стан для подальшого динамічного аналізу.

Для визначення динамічних характеристик плити виконано модальний аналіз, за результатами якого встановлено власні частоти та відповідні форми коливань. На основі отриманих частот визначено параметри демпфування за моделлю Релея.

З урахуванням того, що відстань від епіцентру вибуху до конструкції становила 8 м, вибухове навантаження в чисельній моделі задано у спрощеній постановці у вигляді рівномірно розподіленого по площі плити тиску (еквівалентного навантаження). Такий підхід обґрунтовано припущенням про відносно малу нерівномірність просторового розподілу надлишкового тиску в межах габаритів плити на зазначеній відстані, що дає змогу знехтувати локальними градієнтами тиску та врахувати дію вибухової хвилі через інтегральний силовий ефект.

Прийняте спрощення забезпечує відтворення загальної реакції елемента (прогинів та напружено-деформованого стану) за умови збереження сумарної імпульсної дії.

На рис. 7 наведено прикладення навантаження на поверхню плити.

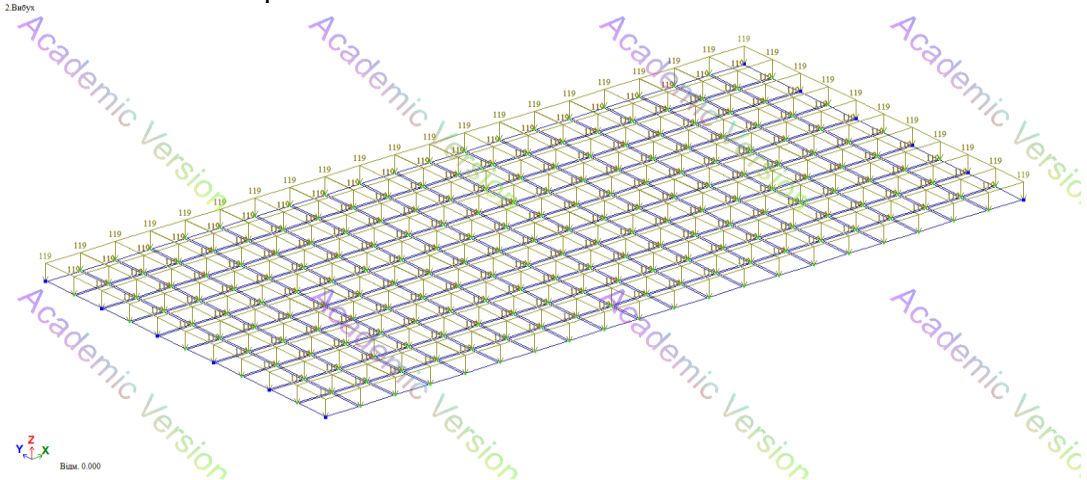

Рисунок 7 – Прикладення навантаження на поверхню плити

Вибухове навантаження задано у вигляді часової залежності тиску, що відповідає параметрам вибухової хвилі, зафіксованим під час експерименту. Розрахунок виконано методом прямого інтегрування рівнянь руху з кроком часу, що забезпечує коректне відтворення короткочасного імпульсного впливу (рис. 8).

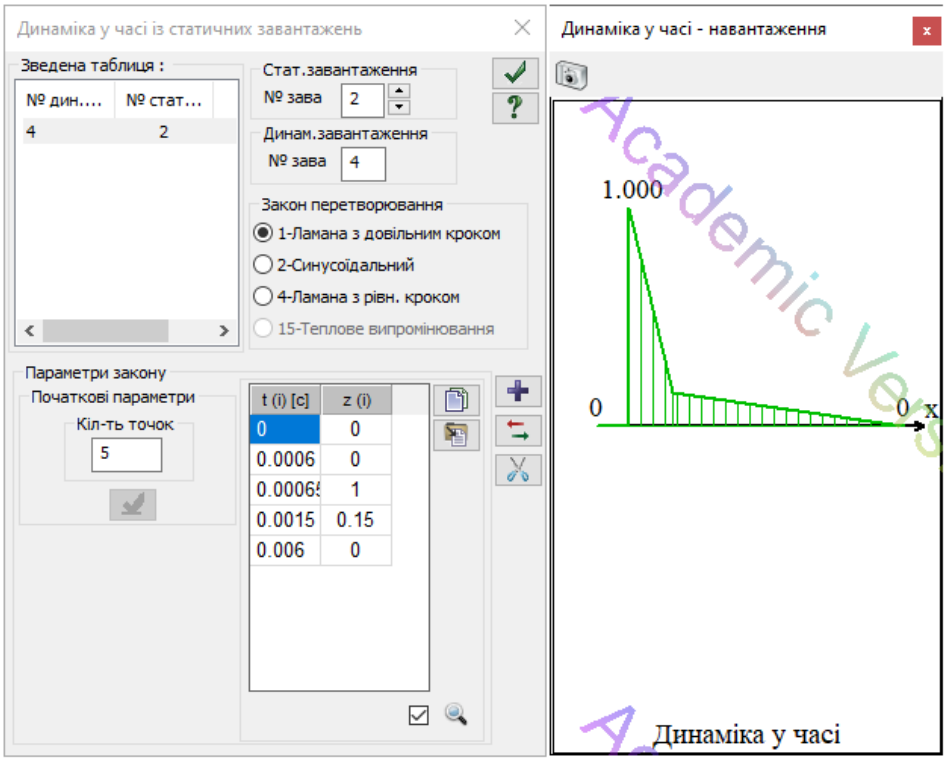

Рисунок 8 – Перетворення навантаження від вибуху в динаміку

За результатами розрахунку напружено-деформованого стану визначено максимальний прогин плити у напряму дії вибухового навантаження, який становив 36,7 мм (рис. 9). Максимальні зворотні переміщення плити вгору склали 25,3 мм (рис. 10).

На рис. 11 наведено період коливань залізобетонної плити під дією вибухового навантаження.

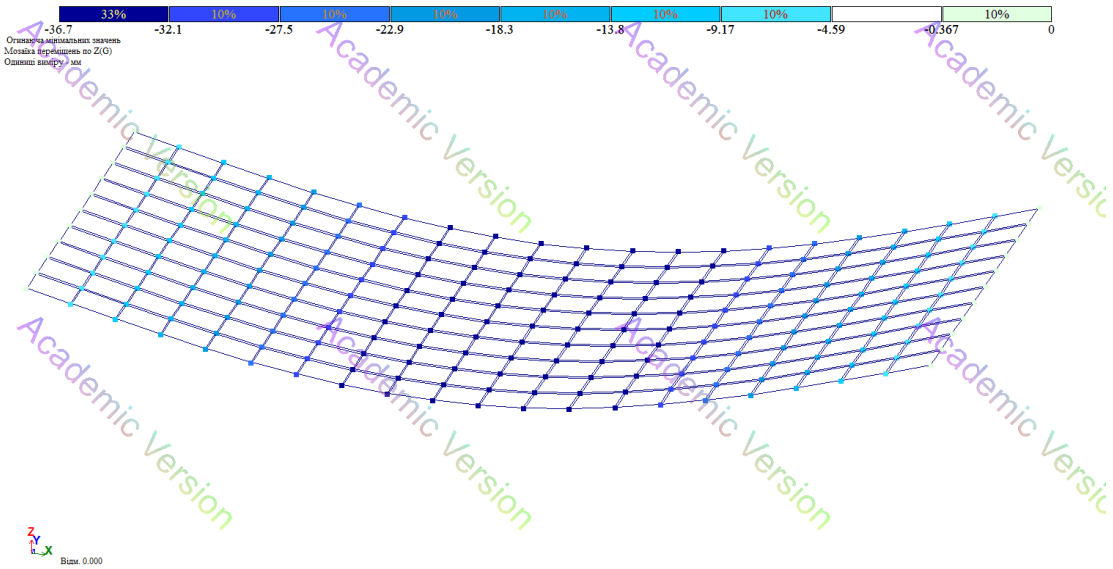

Рисунок 9 – Мозаїка максимальних переміщень плити до низу (36,7 мм)

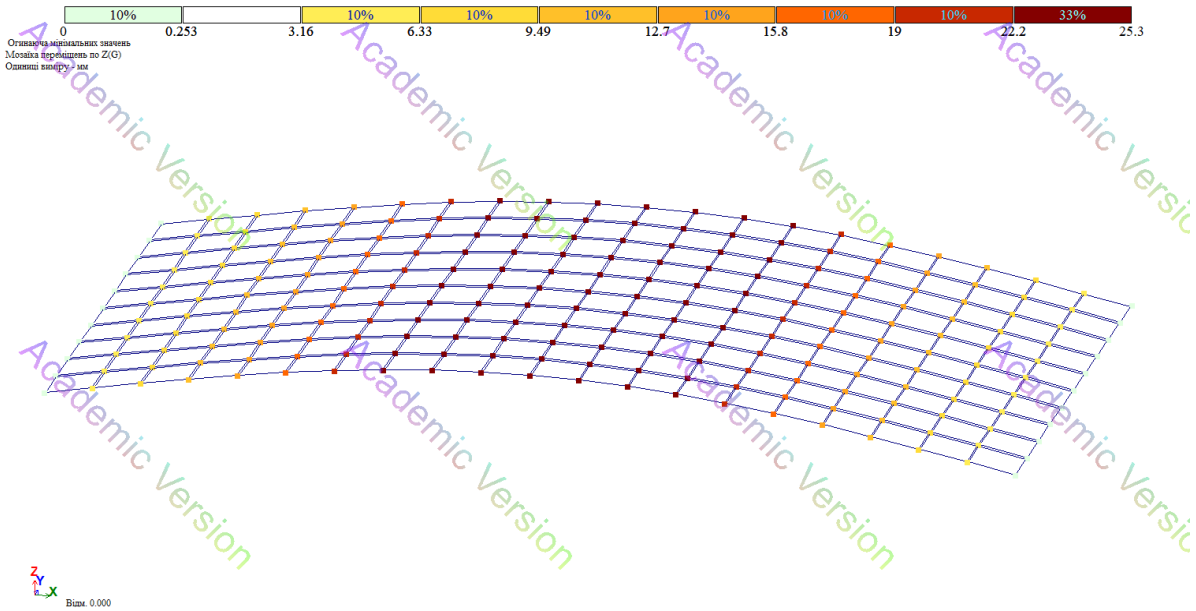

Рисунок 10 – Мозаїка зворотніх максимальних переміщень плити вгору (25,3 мм)

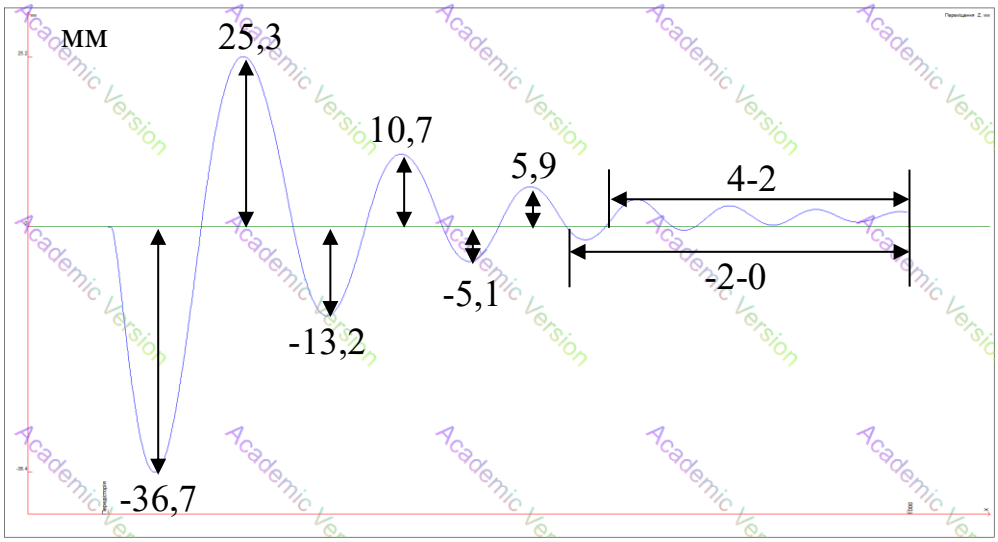

Рисунок 11 – Період коливань залізобетонної плити під дією вибухового навантаження

В таблиці 4 наведено порівняння максимальних переміщень за експериментом і чисельним моделюванням.

Таблиця 4 – Порівняння максимальних переміщень за експериментом і чисельним моделюванням

Будівельна конструкція	Відбитий тиск вибуху, кПа	Переміщення сталевого двотавра від вибуху, мм		Відносна похибка, %
		Експеримент	Моделювання	
Плита перекриття, 2000x100x100	1185	41	36,7	10,49

З урахуванням прийнятих припущень щодо спрощеного задання вибухового навантаження у вигляді рівномірно розподіленого тиску та використання нелінійних моделей матеріалів, рівень збіжності моделі з експериментом є прийнятним для задач нелінійної вибухової динаміки залізобетонних конструкцій.

Отримані результати моделювання підтвердили здатність побудованої скінченно-елементної моделі відтворювати основні параметри роботи плити при імпульсному вибуховому навантаженні. Зокрема, чисельно визначене максимальне переміщення плити вниз становило 36,7 мм, що узгоджується з експериментальним значенням 41 мм (відносна похибка 10,49 %). Модель

коректно відтворює характер напружено-деформованого стану та коливальний відгук плити після проходження позитивної фази імпульсу.

Висновки та напрями подальших досліджень. 1. На основі результатів повномасштабних експериментальних досліджень проаналізовано динамічну реакцію залізобетонної плити перекриття розмірами 2000×1000×75 мм при дії вибухового навантаження. Встановлено, що за вибуху заряду тринітротолуолу масою 8 кг, масштабованій відстані 0,5 м/кг$^{1/3}$ та тривалості позитивної фази 4,2 мс відбитий тиск вибухової хвилі становив 1185 кПа, а падаючий – 307 кПа. За результатами експерименту руйнування плити не зафіксовано, а максимальне вертикальне переміщення вниз становило 41 мм.

2. Розроблено скінченно-елементну модель плити в LIRA-FEM з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності, фактичної схеми армування (1,4 %) та характеристик матеріалів: бетон – модуль пружності 51 503 МПа**,** коефіцієнт Пуассона 0,20**,** міцність 128,9 МПа**,** густина 2424,9 кг/м³; арматура – сталь Ø15,2 мм з міцністю 1750 МПа. Виконано модальний аналіз, що дало змогу врахувати коливальний характер роботи плити при дії вибухового навантаження.

3. За результатами чисельного моделювання встановлено, що максимальний прогин плити в напрямку дії вибухового навантаження становив 36,7 мм, а максимальне зворотне переміщення вгору – 25,3 мм. Відхилення між чисельними та експериментальними даними за величиною максимального прогину не перевищує 10,49 %, що підтверджує достатню точність розробленої моделі та її придатність для відтворення динамічної реакції залізобетонної плити при імпульсному вибуховому навантаженні.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення впливу маси вибухової речовини, тривалості імпульсу, умов обпирання та армування на напружено-деформований стан і переміщення залізобетонних плит перекриття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Momeni, M., Hadianfard, M. A., Bedon, C., & Baghlani, A. (2019, August). Numerical damage evaluation assessment of blast loaded steel columns with similar section properties. In Structures (Vol. 20, pp. 189–203). *Elsevier*. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.04.002.
2. Minh Thanh, V., Santosa, S. P., Widagdo, D., & Putra, I. S. (2016). Steel plate behavior under blast loading-numerical approach using LS-Dyna. *Applied Mechanics and Materials*, 842, 200–207. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.842.200.
3. Han, Y., & Liu, H. (2015). Finite element simulation of medium-range blast loading using LS-DYNA. Shock and Vibration, 2015(1), 631493. https://doi.org/10.1155/2015/631493.
4. Nawar, M. T., El-Zohairy, A., & Arafa, I. T. (2023). Finite Element Modeling and Analysis of Perforated Steel Members under Blast Loading. Modelling, 4(4), 628–649. https://doi.org/10.3390/modelling4040036.
5. Abdallah, M. M., & Osman, B. H. (2014). Numerical analysis of steel building under blast loading. International journal of Engineering Research and Technology, 3(11), 1629–1634. DOI: 10.17577/IJERTV3IS110846.
6. Chen, H. & Liew, J. Y. (2005). Explosion and fire analysis of steel frames using a mixed element approach. *Journal of Engineering Mechanics,* 131, 6, 606–616. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2005)131:6(606).
7. Shope, R. L. (2006). Response of wide flange steel columns subjected to constant axial load and lateral blast load. The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA, USA. https://www.researchgate.net/publication/277745578_Response_of_Wide_Flange_Steel_Columns_Subjected_to_Constant_Axial_Load_and_Lateral_Blast_Load.
8. Liew, J. Y. R. (2008). Survivability of steel frame structures subject to blast and fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 64, 7-8, 854–866. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.12.013.
9. Al-Thairy, H. (2018). Behaviour and failure of steel columns subjected to blast loads: Numerical study and analytical approach. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 1591384. https://doi.org/10.1155/2018/1591384.
10. Yan, S., Qi, B. X., Yan, H., & Yang, L. (2012). Numerical simulation on failure modes of light steel columns under high temperature and explosion. *Applied Mechanics and Materials*, 204, 3351-3356. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3351.
11. Lee, K., Kim, T., & Kim, J. (2009). Local response of W-shaped steel columns under blast loading. *Structural Engineering and Mechanics*, 31, 1, 25–38. https://doi.org/10.12989/sem.2009.31.1.025, 2-s2.0-58149197919.
12. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., & Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 5, 1(119), 53–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266219.
13. Отрош Ю. А., Ковальов А. І., Пурденко Р. Р., Рашкевич Н. В., Майборода Р. І. Вогнестійкість вогнезахищених залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки. *Проблеми надзвичайних ситуацій.* 2022. № 36. С. 102–122. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17038.

14. Пурденко Р. Р., Отрош Ю. А., Рашкевич Н. В., Сур'янінов В. М. Моделювання стійкості та надійності системи грунт-фундамент-будівля при дії силових та високотемпературних впливів. *Механіка та математичні методи.* 2024. VI/1/2024. С. 36–48. https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-1-36-48.
15. Li, J., Wu, C., & Hao, H. (2015). An experimental and numerical study of reinforced ultra-high performance concrete slabs under blast loads. *Materials and Design*, 82, 64-76. URL: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.045.

REFERENCE

1. Momeni, M., Hadianfard, M. A., Bedon, C., & Baghlani, A. (2019, August). Numerical damage evaluation assessment of blast loaded steel columns with similar section properties. In Structures (Vol. 20, pp. 189–203). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.04.002.
2. Minh Thanh, V., Santosa, S. P., Widagdo, D., & Putra, I. S. (2016). Steel plate behavior under blast loading-numerical approach using LS-Dyna. Applied Mechanics and Materials, 842, 200–207. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.842.200.
3. Han, Y., & Liu, H. (2015). Finite element simulation of medium-range blast loading using LS-DYNA. Shock and Vibration, 2015(1), 631493. https://doi.org/10.1155/2015/631493.
4. Nawar, M. T., El-Zohairy, A., & Arafa, I. T. (2023). Finite Element Modeling and Analysis of Perforated Steel Members under Blast Loading. Modelling, 4(4), 628–649. https://doi.org/10.3390/modelling4040036.
5. Abdallah, M. M., & Osman, B. H. (2014). Numerical analysis of steel building under blast loading. International journal of Engineering Research and Technology, 3(11), 1629–1634. DOI: 10.17577/IJERTV3IS110846.
6. Chen, H. & Liew, J. Y. (2005). Explosion and fire analysis of steel frames using a mixed element approach. Journal of Engineering Mechanics, 131, 6, 606–616. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2005)131:6(606).
7. Shope, R. L. (2006). Response of wide flange steel columns subjected to constant axial load and lateral blast load. The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA, USA. https://www.researchgate.net/publication/277745578_Response_of_Wide_Flange_Steel_Columns_Subjected_to_Constant_Axial_Load_and_Lateral_Blast_Load.
8. Liew, J. Y. R. (2008). Survivability of steel frame structures subject to blast and fire. Journal of Constructional Steel Research, 64, 7-8, 854–866. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.12.013.
9. Al-Thairy, H. (2018). Behaviour and failure of steel columns subjected to blast loads: Numerical study and analytical approach. Advances in Materials Science and Engineering, 1, 1591384. https://doi.org/10.1155/2018/1591384.
10. Yan, S., Qi, B. X., Yan, H., & Yang, L. (2012). Numerical simulation on failure modes of light steel columns under high temperature and explosion. Applied Mechanics and Materials, 204, 3351-3356. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3351.
11. Lee, K., Kim, T., & Kim, J. (2009). Local response of W-shaped steel columns under blast loading. Structural Engineering and Mechanics, 31, 1, 25–38. https://doi.org/10.12989/sem.2009.31.1.025, 2-s2.0-58149197919.
12. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., & Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5, 1(119), 53–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266219.
13. Otrosh, Yu. A., Koval′ov, A. I., Purdenko, R. R., Rashkevich, N. V., & Mayboroda, R. I. (2022). Vohnestiykist′ vohnezakhyshchenykh zalizobetonnykh konstruktsiy dlya pidvyshchennya rivnya pozhezhnoyi bezpeky. Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy, 36, 102–122. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17038.
14. Purdenko, R. R., Otrosh, Yu. A., Rashkevich, N. V., & Sur'yaninov, V. M. (2024). Modelyuvannya stiykosti ta nadiynosti systemy hrunt-fundament-budivlya pry diyi sylovykh ta vysokotemperaturnykh vplyviv. Mekhanika ta matematychni metody, VI/1/2024, 36–48. https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-1-36-48.
15. Li, J., Wu, C., & Hao, H. (2015). An experimental and numerical study of reinforced ultra-high performance concrete slabs under blast loads. Materials and Design, 82, 64-76. URL: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.045.

MODELING THE DYNAMIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE FLOOR SLABS UNDER IMPULSIVE BLAST LOADING

N. Rashkevich, R. Purdenko

National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS

reinforced concrete floor slab, blast loading, impulsive action, stress–strain state, finite element modeling, LIRA-FEM.

ABSTRACT

The study investigates the dynamic behavior of a reinforced concrete floor slab under impulsive blast loading. The relevance of the research is determined by the need to enhance the reliability and safety of building structures under extreme loads that may result from technogenic accidents or military impacts. Under such conditions, the use of numerical methods allows reproducing the stress–strain state of structures and predicting their behavior without conducting a large number of costly experimental tests. The study uses the results of full-scale experimental tests of reinforced concrete slabs subjected to the explosion of a trinitrotoluene charge. Based on the experimental data, the geometric parameters of the slab, reinforcement layout, properties of concrete and reinforcing steel, as well as the support boundary conditions were reproduced. Numerical modeling was performed in the LIRA-FEM software package within the framework of a non-stationary dynamic analysis considering both physical and geometric nonlinearities of materials. A nonlinear stress–strain diagram was adopted for concrete, while an elastic–plastic model with the yield strength consideration was used for reinforcing steel. The initial stress–strain state of the structure was formed through a preliminary static analysis. To determine the dynamic characteristics of the slab, a modal analysis was performed, which made it possible to identify the natural frequencies and corresponding vibration modes, as well as to determine the damping parameters. In the numerical model, the blast load was applied as a uniformly distributed impulsive pressure over the slab surface, which allows accounting for the integral force effect of the blast wave.The obtained numerical simulation results were compared with the experimental data. It was found that the maximum slab deflection obtained in the numerical analysis is 36.7 mm, while the experimental value is 41 mm. The relative deviation does not exceed 10.49 %, indicating an acceptable level of agreement between the results. The developed model adequately reproduces the stress–strain state and the vibration response of the reinforced concrete slab under impulsive blast loading. The obtained results can be used for further studies on the influence of blast parameters and structural characteristics on the performance of reinforced concrete elements