ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА

Міністерство освіти і науки України
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

78-Ї НАУКОВОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ПРОФЕСОРІВ, ВИКЛАДАЧІВ, НАУКОВИХ ПРАЦІВНИКІВ, АСПІРАНТІВ ТА СТУДЕНТІВ УНІВЕРСИТЕТУ

І ТОМ



15 – 22 травня 2026 року
Полтава

УДК 624.012.2

М.В. Пенц, аспірантка
О.О. Довженко, к.т.н., професор
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Ю.В. Пашко, директор
ТОВ «БКП»

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КАМ'ЯНОЇ КЛАДКИ ПРИ МІСЦЕВОМУ СТИСНЕННІ

У сучасній обчислювальній механіці конструкцій виокремлюють три основні рівні моделювання цегляної кладки [1, 2]: мікро-; мезо- та макромоделювання. Кожен із підходів відрізняється ступенем деталізації геометрії та матеріальної моделі, а відтак – обчислювальними витратами й областю раціонального застосування.

Авторами для числового моделювання цегляної кладки при місцевому стиску (зминанні) прийнятий підхід макромоделювання з моделлю матеріалу Concrete Damaged Plasticity (CDP), реалізованою в програмному комплексі Abaqus/Standard. Вибір обумовлений такими чинниками: при місцевому стиску в стіні одночасно виникають зони двовісного стиску безпосередньо під штампом і одновісного розтягу по боках від зони розсіювання зусиль (модель CDP здатна коректно відтворювати обидва типи напруженого стану, що є принциповою перевагою порівняно з пружно-крихкими або суто пластичними моделями); експериментальні дослідження кладки при місцевому стиску свідчать про розвиток вертикальних тріщин розколювання, які є наслідком перевищення границі міцності на розтяг, а також роздроблення кладки під штампом при досягненні межі на стиск (CDP описує обидва механізми через окремі функції пошкодження при стиску та розтягу, що дозволяє візуалізувати і кількісно оцінити зони руйнування); на відміну від ідеальної пластичності, CDP передбачає спадну гілку діаграми σ–ε як при стиску, так і при розтягу, що відповідає реальній поведінці цегляної кладки після досягнення пікового навантаження (це є необхідною умовою для коректного відтворення повної кривої «навантаження–переміщення» (P–δ), включаючи посткритичну стадію); для розглядуваної задачі розміри розрахункової моделі є достатньо великими, щоб унеможливити застосування мікромоделювання без надмірних обчислювальних витрат (макромодель з елементами типу C3D8R дозволяє досягти необхідної точності результатів при раціональній густині сітки); розрахунок виконується у постановці статичного нелінійного аналізу з контролем переміщень (displacement control), що забезпечує стійку збіжність ітераційного процесу на спадній гілці та дозволяє отримати повну діаграму P–δ до повного вичерпання несучої здатності.

Граничні умови розрахункової моделі призначені відповідно до умов випробування та фактичної схеми роботи конструктивного елемента. Рівномірне навантаження прикладається вертикально вниз. Контроль переміщень забезпечує стійкість розрахунку на спадній гілці кривої $P–\delta$ і дозволяє зафіксувати пікове навантаження та посткритичну поведінку.

Пружні характеристики кладки прийняті відповідно до [1, 2]: $E_m = 1000f_k$, де f_k = 3 МПа – міцність кладки на стиск; значення коефіцієнта Пуассона ν = 0,18.

Параметри пластичності моделі CDP: кут дилатансії ψ= 12° прийнятий меншим, ніж для бетону (28–36°), що відображає слабший дилатансний ефект у кладці через наявність розчинних швів, які деформуються переважно зсувно; ексцентриситет дорівнює 0,10; відношення міцності при двовісному й одновісному стиску 1,12 характеризує незначне зміцнення матеріалу при двовісному стиску порівняно з одновісним, що типово для кладки; коефіцієнт форми девіаторного перерізу Kc=0,667; в'язкісний параметр μ = 0,0001 забезпечує збіжність ітераційного процесу на спадній гілці діаграми $\sigma–\varepsilon$ без суттєвого впливу на результати при квазістатичному навантаженні [3].

Числовий розрахунок виконується з використанням кроку типу Static, General – стандартного нелінійного аналізу. Крива залежності величини навантаження від переміщення є одним із основних результатів розрахунку. Повне переміщення δmax = 3,0 мм забезпечує проходження через пік несучої здатності з фіксацію залишкової несучої здатності на спадній гілці.

Крива $P–\delta$ (діаграма навантаження–переміщення) наведена на рис. 1 є характерною для подібних задач, у яких враховується нелінійна поведінка матеріалу зі спадною віткою діаграми стиску.

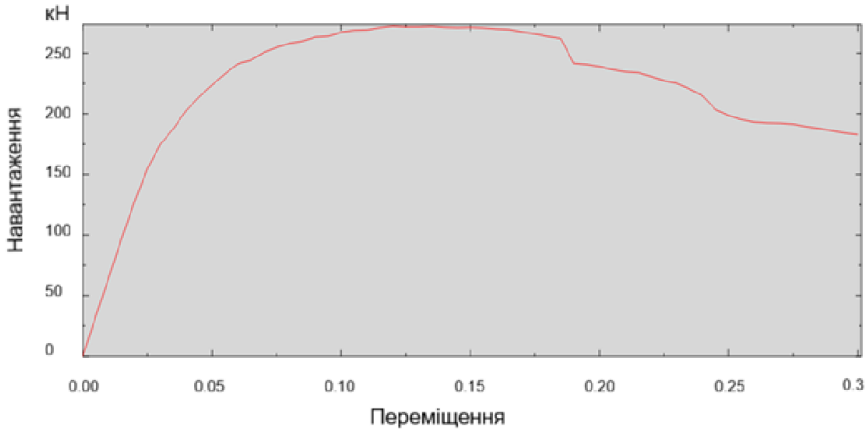

Рис. 1 – Крива $P–\delta$ при місцевому стиску

На кривій $P–\delta$ виокремлюються такі характерні стадії деформування: пружно-пластична (від початку до піку): нелінійне зростання зусилля зі збільшенням переміщення. На цій стадії розвивається зона пластичних деформацій під штампом і виникають перші тріщини; пік несучої

здатності, при якому досягається максимальне зусилля; softening – зусилля спадає зі збільшенням переміщення.

Картина руйнування визначається за полями змінних пошкоджень DAMAGET (розтягуюче тріщиноутворення) і DAMAGEC (стискаюче руйнування). Результати наведено на рис. 2.

Поле DAMAGET демонструє розвиток зон розтягуючого тріщиноутворення, Тріщини орієнтовані переважно вертикально, що є характерним механізмом руйнування кладки при місцевому стиску.

Поле DAMAGEC фіксує зону роздроблення кладки безпосередньо під штампом. Це відповідає експериментальним спостереженням, де роздроблення фіксується у зоні безпосереднього контакту опорної плити зі стіною.

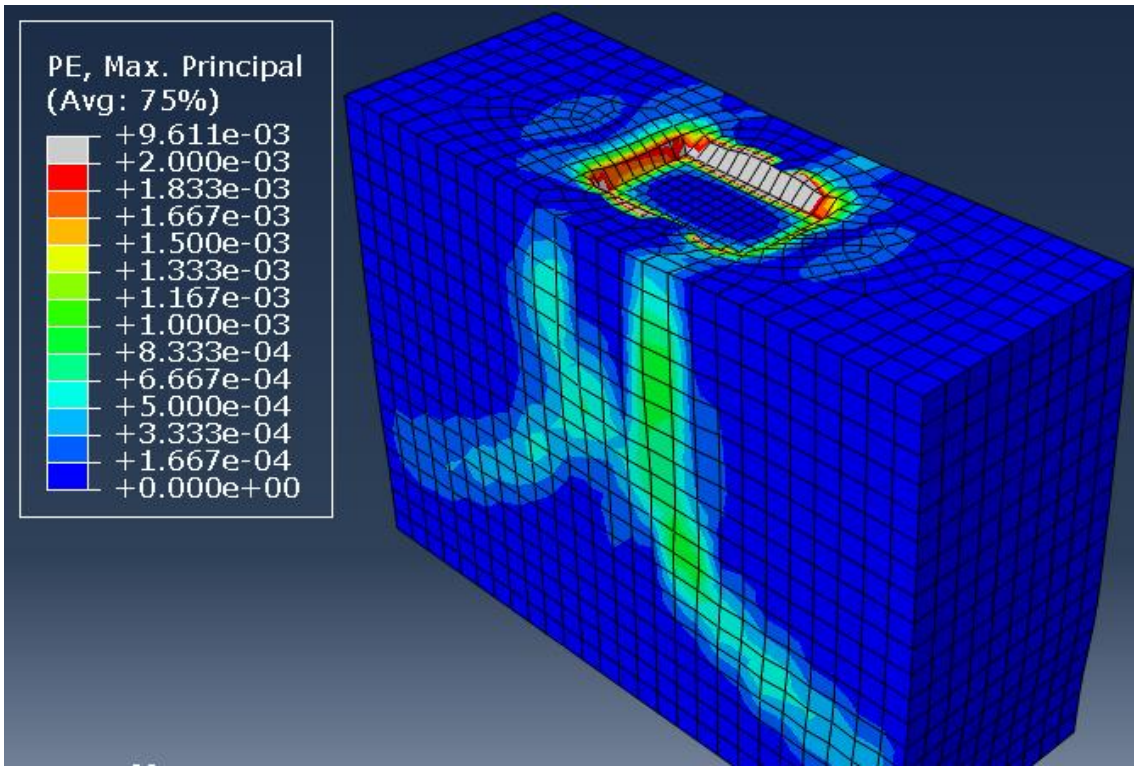

Рис. 2 – Поле пластичних деформацій

Література:

1. Abdulla K. F., Cunningham L. S., Gillie M. Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. Engineering Structures. 2017. Vol. 151. P. 349–365. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.021.

2. Milani G., Lourenço P. B., Tralli A. Homogenised limit analysis of masonry walls, Part I: Failure surfaces. Computers & Structures. 2006. Vol. 84. No. 3–4. P. 166–180. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.09.005.

3. Al-Rawi O., Al-Mahaidi R., Kalfat R. Numerical solution for masonry wall using general static step with ABAQUS/Standard. Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2023. Vol. 10. No. 6. P. 2142–2148. DOI: 10.18280/mmep.100626.