

УДК 539.3

В.А. Баженов¹, д-р техн. наук,
П.П. Лізунов¹, д-р техн. наук
І.І. Солодей¹, д-р техн. наук

¹*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680*

РОЗРАХУНОК ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ ЕВОЛЮЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ

При дослідженні корпусу ядерного реактора вивчено підкріплюючий вплив металоконструкцій на напружений стан бетонного масиву, розраховано рівень граничного тиску, досліджено схему втрати несучої здатності конструкції.

Ключові слова: залізобетонні просторові конструкції, нелінійне деформування, зони руйнування, метод скінченних елементів, кришка корпусу реактора.

Вступ

Об'єктом дослідження є процеси нелінійного деформування, поява та еволюція розповсюдження зон прогресуючого руйнування масивних будівельних конструкцій під дією статичного і динамічного навантаження. Предмет дослідження – параметри напружено-деформованого стану, нелінійні деформації, зони руйнування, що викликані дією як постійних так і змінних у часі силових навантажень.

В рамках цієї роботи залізобетон моделюється як макрооднорідний двокомпонентний континуум, анізотропія якого зумовлена просторовим армуванням та утворенням тріщин [3]. Передбачається, що деформація матриці і армування відбувається спільно, а опір суцільного середовища дорівнює сумі напружень у бетоні та арматурі. Нелінійна деформація металу описується на базі теорії пластичної течії, а бетону – відповідно до деформаційної теорії. За критерій міцності використовується: для металу критерій Мізеса, для бетону - критерій Карпенко.

Для дискретизації об'єктів розрахунку використовуються просторові кільцеві напіваналітичні скінченні елементи, особливістю яких є урахування просторового армування і тріщин [1]. В межах скінченного елемента допускається виникнення взаємно перпендикулярних тріщин, після чого матеріал не чинить опір зовнішнім навантаженням. Площина тріщини орієнтується таким чином, що дотичне і нормальне напруження в площині тріщини дорівнює нулю. Це досягається шляхом корекції констант тензора деформацій.

Алгоритм розрахунку базується на методі Ньютона-Канторовича [4].

Проведені чисельні експерименти засвідчили високу ефективність запропонованого підходу та достовірність отриманих рішень у порівнянні із експериментальними даними.

Дослідження особливостей напруженого стану перекриття корпусу ядерного реактора та схеми втрати несучої здатності конструкції

Розроблена методика моделювання прогресуючого тріщиноутворення масивних залізобетонних конструкцій у тривимірній постановці та програмних засобів, що її реалізують, була випробувана при розв'язанні задачі по визначенню несучої здатності моделі кришки корпусу реактора. Отримані результати порівнювалися з даними натурних випробувань [5], а також з результатами чисельного експерименту [6]. Вибір даної задачі обумовлений складним характером руйнування перекриття внаслідок утворення тріщин відриву і зсуву, що досить повно і достовірно описує механізм тріщиноутворення реальних об'єктів.

Для розрахунків була обрана плита SLAB-IV товщиною 6 in (рис. 1,а). Радіальне попереднє напруження в чотирьох напрямках здійснювалося натягом арматурних канатів з високоміцного дроту в незамонолічених горизонтальних каналах діаметром 0.5 in, вертикальне попереднє напруження розтяганням 16 високоміцних болтів діаметром 1.5 in, якими залізобетонна плита кріпилася до товстої сталевій плиті основи. Тиск від болтів передавався на плиту через сталеве опорне кільце товщиною 1 in. Плита навантажувалася нагнітанням масла під тиском у гумову камеру, розміщену між внутрішньою поверхнею плити і плитою основи.

Для чисельного моделювання експерименту пружні характеристики бетону, а також межі міцності на розтяг і стискання прийняті згідно [5] з урахуванням варіації міцності бетону: $E_b = 4.2 \times 10^6 \text{ psi}$, $R_b = 8100 \text{ psi}$, $R_{bt} = 560 \text{ psi}$.

При побудові скінченноелементної моделі, враховувалося ослаблення масиву бетону горизонтальними каналами у відповідності зі схемою, зазначеною в роботі [6]. Коефіцієнт ослаблення матеріалу центральної частини плити був прийнятий рівним 18.75% і моделювався відповідними коефіцієнтами армування. Через відсутність пружних характеристик болтів вертикальне обтиснення визначалося з умови рівноваги конструкції.

Як показали чисельні експерименти, істотний вплив на розвиток процесу тріщиноутворення виявляє моделювання відриву і ковзання залізобетонного масиву по сталевій плиті основи, що більше відповідає реальному умовам контакту цих різномірних матеріалів. Тому, на відміну від [6], при побудові скінченноелементної моделі (рис. 1,б) контакт масиву бетону і сталевій плити моделювався одnobічними в'язями, які не перешкоджають ковзанню бетону по плиті і дозволяють йому відриватися

від основи. Такі умови деформування забезпечувалися використанням спеціальних контактних скінченних елементів (СКСЕ) для моделювання контактної взаємодії системи просторових тіл при дії змінних у часі зовнішніх силових навантажень [2].

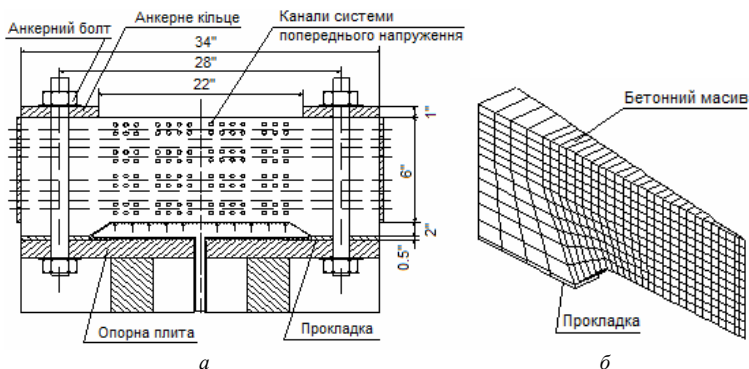


Рис. 1. Модель перекриття корпусу реактора:
а – конструкція, б – розрахункова сітка МСЕ

Моделювання однобічних в'язей у розрахунках здійснювалося введенням тонкого шару СЕ. Механічні характеристики кожного елемента шару змінюються в процесі деформування. В початковий момент часу модуль пружності матеріалу кожного елемента шару приймається на декілька порядків менше модуля пружності матеріалу об'єктів. На участках, товщина яких δ в процесі деформування стає меншою за деяку задану величину δ_0 (параметр так званої штрафної жорсткості), модуль пружності матеріалу елементів, що належать участку контакту, приймається рівним модулю пружності матеріалу одного з об'єктів. Якщо δ стає більшою за δ_0 , модуль СЕ знову зменшується.

При побудові дискретної моделі кришки враховувалася циклічна симетрія об'єкта. Розглядався сектор в 7.5 град , що відповідає одній сорок восьмій частині реальної конструкції.

Для виключення похибок, пов'язаних з недостатнім ступенем дискретизації об'єкта розрахунків, скінченноелементна сітка була прийнята надлишково густою, що відобразилося на параметрах системи розрахункових рівнянь: число невідомих 2448, ширина стрічки 96.

Підвищення тиску до 1000 psi викликало відрив внутрішнього краю бетонного масиву від жорсткої основи без утворення тріщин (рис. 2,а). Подальше підвищення до 1100 psi (рис. 2,б) збільшило зону відриву і призвело до утворення перших кільцевих тріщин в області вхідного кута.

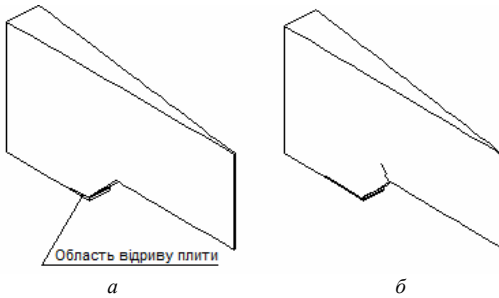


Рис. 2. Початкова стадія розвитку тріщиноутворення при дії внутрішнього тиску

Процес наступного зростання внутрішнього тиску до 1750 psi спричинив активний розвиток меридіональних тріщин на верхній поверхні моделі кришки в напрямку опорного кільця (рис. 3,*a*). Паралельно основному процесу тріщиноутворення область кільцевих тріщин просувалася в напрямку від вхідного кута до краю опорного кільця. Однак ця область тріщин прогресувала менш активно.

Істотні зміни в характер руйнування конструкції внесло утворення нової області кільцевих тріщин верхньої частини моделі кришки при збільшенні внутрішнього тиску до 1800 psi (рис. 3,*б*).

Наступний розвиток цієї області, за формою, що нагадує перевернений купол, паралельно з утворенням в ній системи меридіональних тріщин, призвів до видавлювання цієї частини конструкції з основного масиву бетону при внутрішньому тиску 2000 psi (рис. 4,*a*). Зміна стану тріщин з "відкритої" на "закриту" зупинило процес розвитку системи кільцевих тріщин. Зазначені тріщини утворювалися на ранніх кроках навантаження і розвивалися в напрямку від вершини вхідного кута до краю опорного кільця.

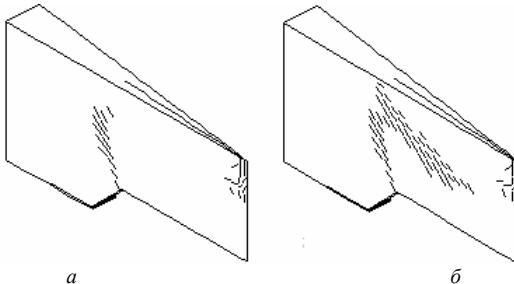


Рис. 3. Розвиток меридіональних кільцевих тріщин

Поділ конструкції на частини супроводжувався збільшенням області

відриву маси бетону від жорсткої основи. Подальше підвищення внутрішнього тиску до 2050 *psi* (рис. 4,б) призвело до активного руйнування звуженої центральної частини перекриття. При постійному значенні внутрішнього тиску відбувалося лавинообразне руйнування бетону і різко збільшувалися (на порядок) абсолютні значення переміщень. У зв'язку із цим величина внутрішнього тиску, що дорівнює 2050 *psi*, прийнята за розрахункову межу несучої здатності.

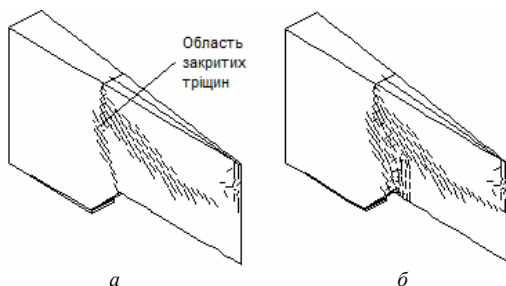


Рис. 4. Розвиток тріщиноутворення на межі несучої здатності перекриття

Таким чином, тиск, при якому відбувається вичерпання несучої здатності моделі кришки реактора, отриманий в результаті розрахунків з використанням запропонованої методики чисельного моделювання прогресуючого тріщиноутворення рівний 2050 *psi*. Це лише на 5.5% нижче значення, що отримане експериментально і дорівнює 2170 *psi* згідно [5].

Порівняння графіків залежності внутрішній тиск-переміщення центральної точки, що отримані за викладеною методикою і експериментально [5], також свідчить про їх добре узгодження (рис. 5).

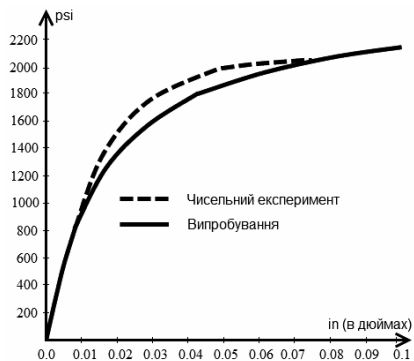


Рис. 5. Графік залежності $P-U$ (внутрішній тиск-переміщення центральної точки)

Автори експерименту [5], на підставі вивчення розпилів випробуваних моделей запропонували схему руйнування (рис. 6): характерне для вигину плит меридіональне тріщиноутворення (рис. 6,а), хоча і починається на ранніх стадіях навантаження, не відіграє ролі в остаточній втраті несучої здатності, яка відбувається в результаті зсувного

руйнування бетону; утворення похилих тріщин зсуву починається у верхніх шарах плити біля внутрішнього краю опорного кільця (рис. 6,б); наступне утворення горизонтальних тріщин відриву призводить до відділення частини конструкції у формі "перевернутого купола" (рис. 6,в); остаточне руйнування відбувається при продавлюванні ослабленої центральної частини кришки.

Схема втрати несучої здатності моделі кришки, отримана в результаті виконання розрахунків, практично повністю збігається зі схемою, що запропонована авторами експерименту [5]. Відмінність полягає в тому, що на ранніх стадіях навантаження з'являється область кільцевих тріщин, які розташувалися від вершини вхідного кута в нижній частині моделі кришки до краю металевого опорного кільця.

В описі результатів випробувань кришки SLAB-IV відсутня інформація про наявність тріщин такого типу, хоча їх можна спостерігати по фотографії кришки SLAB-VII. При виконанні чисельного експерименту [6] вони також мали місце. Очевидно, автори експерименту не акцентували уваги на таких тріщинах у зв'язку з

тим, що процес їх розвитку загасає, і вони не виявляють вирішального впливу на формування граничного стану моделі кришки SLAB-IV.

Висновки. Добре узгодження результатів розрахунків і даних експерименту дозволяє зробити висновок про можливість застосування запропонованої методики дослідження прогресуючого тріщиноутворення в масивних залізобетонних конструкціях у тривимірній постановці з урахуванням фізичної нелінійності бетону.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Баженов В.А., Гуляр О.І., Солодей І.І.* Напіваналітичний кільцевий скінченний елемент для моделювання просторового напруженого стану армованих тіл з тріщинами // Опір матеріалів і теорія споруд. –К.:КНУБА, Вип.91, 2013.-с.147-156.
2. *Баженов В.А., Гуляр О.І., Сахаров О.С., Солодей І.І.* Напіваналітичний метод скінченних елементів в задачах динаміки просторових тіл. –К., КНУБА, 2012. –248с.
3. *Гуляр О.І., Лізунов П.П., Солодей І.І.* Математичні моделі появи та розповсюдження зон руйнування кругових неоднорідних дисперсно-армованих тіл // Опір матеріалів і теорія споруд. –К.:КНУБА, Вип.90, 2012.-с.94-112.

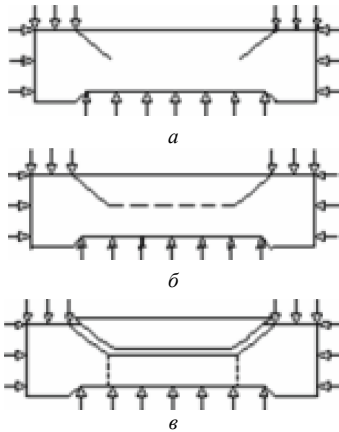


Рис. 6. Схема руйнування перекриття: утворення меридіональних (а), похилих зсувних (б) та горизонтальних (в) тріщин

4. *Лізунов П.П., Гуляр О.І., Солодей І.І.* Універсальний алгоритм чисельного моделювання нелінійних процесів деформування залізобетонних конструкцій // Опір матеріалів і теорія споруд. –К.:КНУБА, Вип.92, 2013.
5. *Campbell-Allen D., Low E.W.* Pressure tests on end slabs for prestressed concrete vessels // Nucl. Eng. And Des. – 1967. – 6 – p.345-359.
6. *Phillips D.V., Zienkiewicz O.C.* Finite element nonlinear analysis of concrete structures // Proc. Insth. Civ. Engr. – 1976, -61. – Part 2. – p.59-88.

REFERENCES

1. *Bazhenov V.A., Gulyar O.I., Solodei I.I.* Napivanalitichnyy kil'tsevyy skinchennyy element dlya modelyuvannya prostorovoho napruzhenoho stanu armovanykh til z trishchynamy (Semi-analytical circular finite element to model 3d stress state of reinforced solids with cracks) // Strength of materials and structural theory. –К.:KNUSA, N 91, 2013. -p.147-156.
2. *Bazhenov V.A., Gulyar O.I., Sakharov O.S., Solodei I.I.* Napivanalitichnyy metod skinchennykh elementiv v zadachakh dynamiky prostorovykh til (Semi-analytical finite element method in dynamic problems of the 3D bodies). –К., КНУБА, 2012. –248p.
3. *Gulyar O.I., Lizunov P.P., Solodei I.I.* Matematychni modeli po'yavy ta rozpovsyudzhennya zon ruynuvannya kruhovyykh neodnorodnykh dyspersno-armovanykh til (The numerical models of initiation and development of fracture zones for reinforced heterogeneous solids of revolution) // Strength of materials and structural theory. –К.:KNUSA, N 90, 2012. -p.94-112.
4. *Lizunov P.P., Gulyar O.I., Solodei I.I.* Universal'nyy alhorytm chysel'noho modelyuvannya nelineynykh protsesiv deformuvannya zalizobetonykh konstruktсий (Universal algorithm of nonlinear process numerical modelling of reinforced construction deformation) // Strength of materials and structural theory. – К.:KNUSA, N 92, 2013.
5. *Campbell-Allen D., Low E.W.* Pressure tests on end slabs for prestressed concrete vessels // Nucl. Eng. And Des. – 1967. – 6 – p.345-359.
6. *Phillips D.V., Zienkiewicz O.C.* Finite element nonlinear analysis of concrete structures // Proc. Insth. Civ. Engr. – 1976, -61. – Part 2. – p.59-88.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2014 р.

Баженов В.А., Лізунов П.П., Солодей І.І.

РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

При исследовании корпуса ядерного реактора изучено подкрепляющее влияние металлоконструкций на напряженное состояние бетонного массива, проведен анализ граничного давления, исследована схема потери несущей способности конструкции.

Ключевые слова: железобетонные пространственные конструкции, нелинейное деформирование, зоны разрушения, методконечных элементов, крышка корпуса реактора.

Bazhenov V.A., Lizunov P.P., Solodei I.I.

THE COMPUTATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES ON THE BASIS OF THE EVOLUTION OF REINFORCEMENT INTERACTION WITH CONCRETE

In the process of reactor pressure vessel analysis the metal construction effect on stress state of the concrete panel is investigated, critical pressure analysis is done, the schema of structure destruction is studied.

Key words: reinforced concrete 3D structure, nonlinear deformation, areas of fracture, finite element method, closure headassembly.