

М. О. Березань, к. т. н.; Ю. С. Бабак

ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИЙ АНАЛІЗ НЕСНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ПРОТИКАРСТОВОГО ЗАЛІЗОБЕТОННОГО БАЛОЧНОГО ФУНДАМЕНТУ

У статті проілюстровано результати інженерних розрахунків та чисельного імітаційного моделювання роботи системи «основа – фундамент – будівля» для дослідження ефективності використання фундаментної балки в якості конструктивних заходів проти карстового захисту.

Ключові слова: протикарстовий фундамент, математичне моделювання, пружно-пластичний аналіз.

Вступ

Тенденція до збільшення обсягів сучасного будівництва висунула перед проєктувальниками низку вимог щодо раціонального використання територій, зокрема використання карстових ґрунтів для зведення будівель. Адже традиційні інженерні протикарстові конструкції не дозволяють урахувати всі особливості геологічних умов, що виникають під час утворення провалу. Основним призначенням нового конструктивного протикарстового захисту каркасної промислової будівлі є забезпечення її нормальної експлуатації під час ураження основи карстовим провалом [2].

Карстові процеси істотно ускладнюють будівництво та експлуатацію будівель і споруд. Українська та зарубіжна практика інженерно-будівельного освоєння закарстованих територій показує, що безпека і економічність інженерних розв'язків залежать, насамперед, від адекватного врахування особливостей інженерно-геологічних (серед них і техногенні) умов розвитку карстового процесу та його проявів в основі споруд.

Математичне моделювання роботи фундаментної конструкції

Під час розробки фундаментів споруди постає необхідність експериментального обґрунтування проєктного варіанта фундаменту, що значно збільшує його вартість. Саме за таких умов раціонально використовувати математичне моделювання процесу роботи фундаментної конструкції під навантаженням. У роботі проведено моделювання процесу осідання фундаментної балки одноповерхової каркасної споруди під дією карсту.

У ході розрахунків з імітаційного моделювання процесу функціонування системи «основа – фундамент – будівля» враховано напружено-деформований стан ґрунтів у їх природному стані (без прояву карстових процесів) і виконано розрахунки з імітаційного моделювання появи карстово-суфозійних процесів в основі будівлі. Для цього змодельовано появу провалів діаметром 9 м під центральною колоною другого ряду каркасу.

Найпростішими методами моделювання карстового провалу під подошвою фундаменту є використання пружно-пластичної моделі чи моделі змінного коефіцієнта постелі, що дозволяє врахувати неоднорідність основи і його реальну розподільчу здатність. У роботі використано науково-методичний аналіз методу моделювання ґрунтових масивів за допомогою пружно-пластичної моделі, який застосовують під час проведення досліджень напружено-деформованого стану неоднорідних та анізотропних матеріальних середовищ для забезпечення їхньої міцності та стійкості. Для визначення НДС елементів системи «основа – фундамент – будівля» виконано розрахунки з використанням ПК «ЛІРА», що реалізує метод скінченних елементів (СЕ). Загальний вигляд комп'ютерної моделі каркасу приведено на рис. 1, 2.

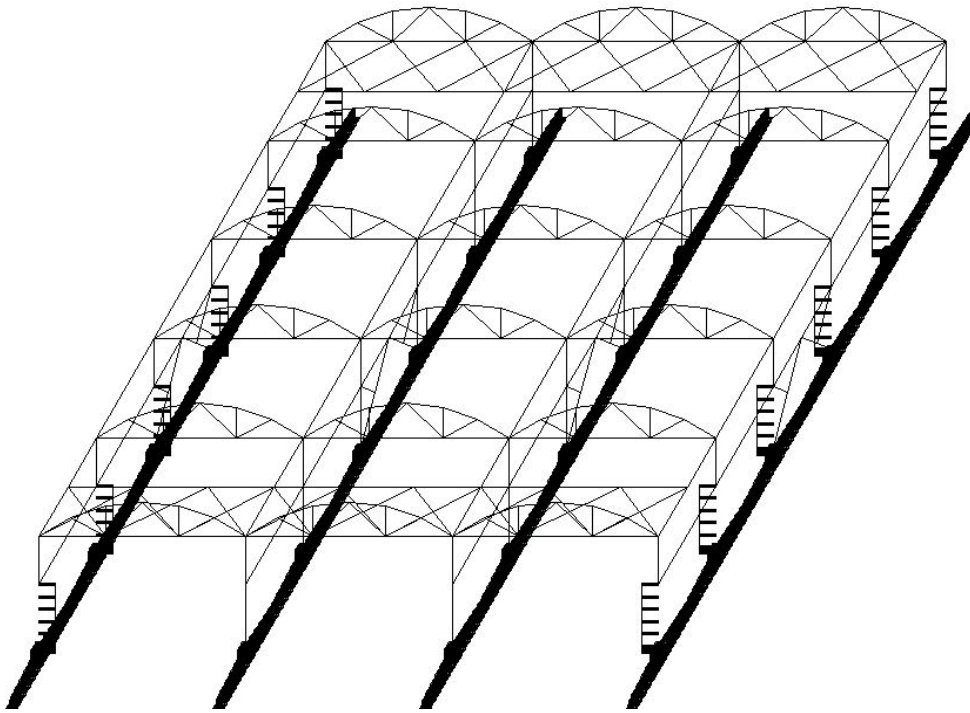


Рис. 1. Загальний вигляд комп'ютерної моделі каркасу будівлі

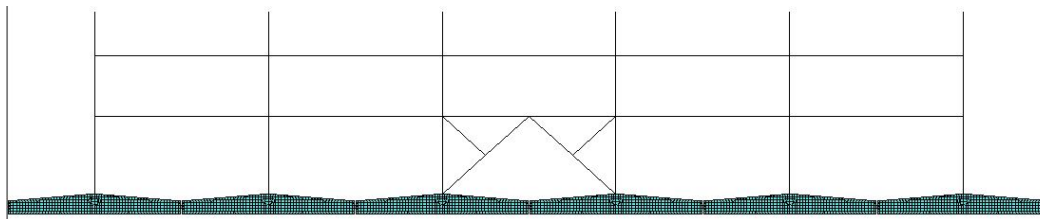


Рис. 2. Загальний вигляд комп'ютерної моделі каркасу будівлі в розрізі вздовж цифрових осей

Під час формування розрахункової схеми використовували такі СЕ:

- плоскі (оболонка з 6 ступенями свободи у вузлі) з коефіцієнтами жорсткості у вертикальному напрямку – для моделювання фундаментних подушок та основи;
- стрижневі (стрижень із 6 ступенями свободи у вузлі) – для моделювання конструктивних елементів каркасу;
- об'ємні СЕ для моделювання фундаментних балок;

Тривимірна комп'ютерна модель відображає конструктивне рішення об'єкта та містить плоскі, стрижневі та об'ємні елементи, основні геометричні та фізико-механічні характеристики яких приведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Жорсткості елементів у розрахунковій схемі

№ п.п.	Назва елемента	Фізико-механічні та геометричні параметри*	Положення (призначення) в конструктивній схемі
1	Пластина	$E=2.3e+006$, $V=0.2$, $H=20$, $Ro=2.4$	Фундаментні подушки
2	Пластина	$E=2.0 e+007$, $V=0.35$, $H=10$, $Ro=7.8$	Пластини з'єднання балок
3	Труба-квадрат	Профіль «Молодечно» 80×80×3	Горизонтальні та вертикальні в'язі
4	Брус	$E=2.3e+006$, $Ro=2.5$, $B=50$, $H=80$	Колони

5	Брус	$E=2.3e+006, Ro=2.5, B=15, H=15$	Розкоси ферм
6	Брус	$E=2.3e+006, Ro=2.5, B=25, H=30$	Пояси ферм
7	Двугавр	$E=2.3e+006, Ro=2.5, H=140$	Підкранова балка
8	Об'ємні СЕ	$E=2.3e+006, V=0.2, Ro=2.5$	Фундаментна балка

Розрахункова модель основи – лінійно-деформований напівпростір. У ПК «ЛІРА» розрахункова модель основи представлено коефіцієнтами жорсткості основи по пласким КЕ (конструктивним елементам), розміщеним у площині ХОУ, якими змодельовано фундаментні подушки.

Розрахункові параметри ґрунтів основи фундаментів прийнято відповідно до інженерно-геологічних умов реальної ділянки будівництва, розташованої в м. Кузнецовську Рівненської області.

Розрахункова схема основи представлена системою взаємовпливаючих розрахункових ділянок фундаментів, що дозволяє виконати розрахунки основи за двома групами граничних станів. Коефіцієнти жорсткості основи в розрахункових схемах визначено з розв'язку контактної задачі. Розрахунок виконано ітераційним способом. У нульовій ітерації визначали напружено-деформований стан споруди на однакових коефіцієнтах жорсткості основ для всіх розрахункових ділянок фундаментів. Далі виконували розрахунок осідань і коефіцієнтів жорсткості основи. У першій і подальших ітераціях послідовно виконували розрахунки споруди з урахуванням згаданих коефіцієнтів жорсткості основ і визначення коефіцієнтів для наступної ітерації.

Отриману в результаті розв'язання контактної задачі розрахункову схему використано для моделювання появи карстових провалів. Відмову основи в області воронки змодельовано шляхом виключення з розрахункової моделі елементів фундаментних подушок, які потрапляють у межі воронки розрахункового діаметра.

Розрахунки з визначення коефіцієнтів жорсткості основи виконано для основного сполучення та сполучення навантажень під час утворення карстового провалу. Під час моделювання карстового провалу під колоною виконували додаткові ітерації до досягнення врівноваженого стану системи «основа-фундамент» на ділянках фундаментів поблизу провалу. Розрахункові значення коефіцієнтів жорсткості основи фундаментів в межах: від 2450 до 4400 т/м³ за умови відсутності провалів (рис. 3); від 2300 до 4400 т/м³ за умови моделювання провалу діаметром 9 м (рис. 4).

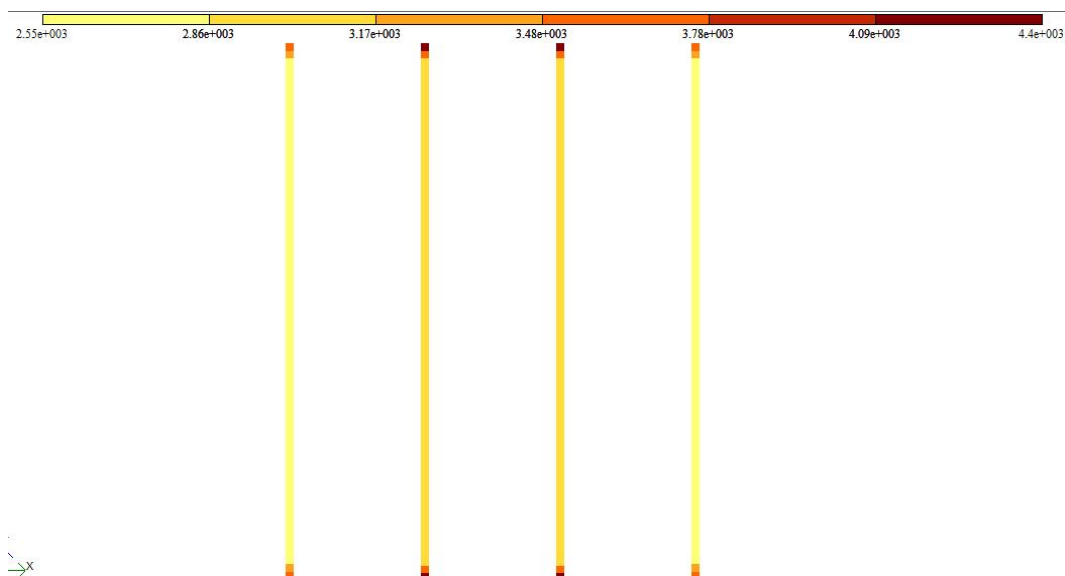


Рис. 3. Мозаїка розподілу розрахункових значень коефіцієнтів жорсткості основи за нормальних умов її експлуатації, т/м³

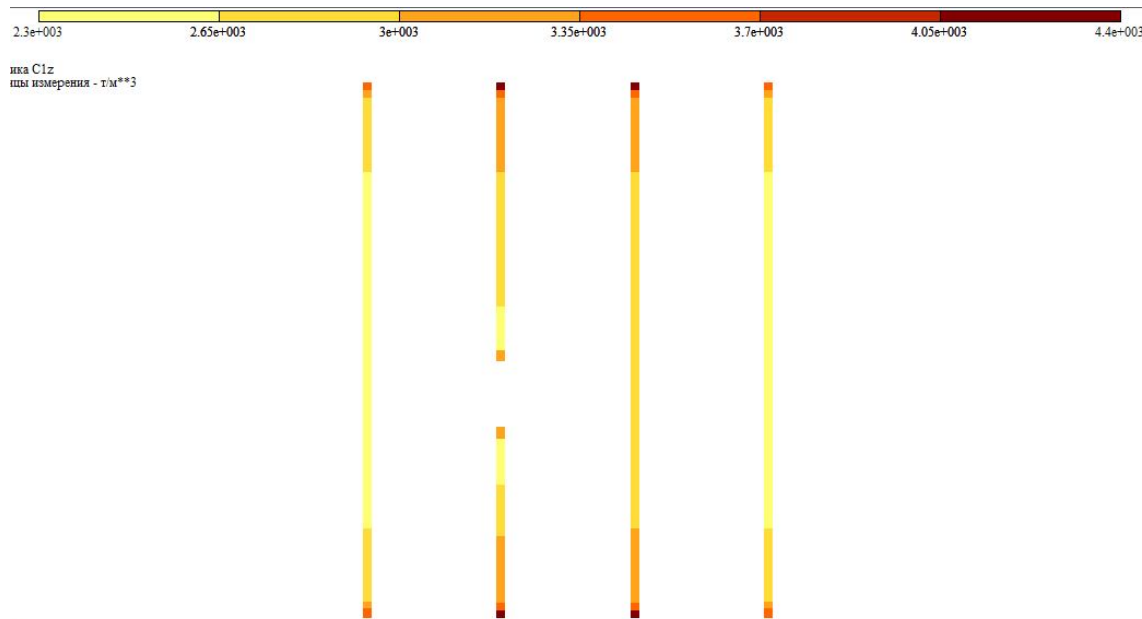


Рис. 4. Мозаїка розподілу розрахункових значень коефіцієнтів жорсткості основи під час моделювання провалу діаметром 9 м, т/м³

Розрахунковий опір ґрунту основи в природному стані становить 24,5 т/м². Максимальне значення тиску по підшві фундаментів за нормальних умов експлуатації основи досягає 18,3 т/м², що не перевищує розрахункового опору ґрунту основи. Згідно з проведеними розрахунками максимальні значення осідань досягають 6,4 мм. Максимальна відносна різниця осідань фундаментів становить 0,0003, що не перевищує $(\Delta s / L)u = 0.002$.

Під час моделювання карстового провалу під колоною змінюється розподіл тисків по підшві фундаментних подушок на відстані близько 12 – 13 м від краю провалу. Тиск по підшві крайніх подушок фундаментної балки, під якою змодельовано провал, збільшується на 80% і складає в середньому 25 т/м², що перевищує розрахунковий опір основи. Схему розподілу значень тисків по фундаментним подушкам до та після прояву карстового провалу зображено на рис. 5.

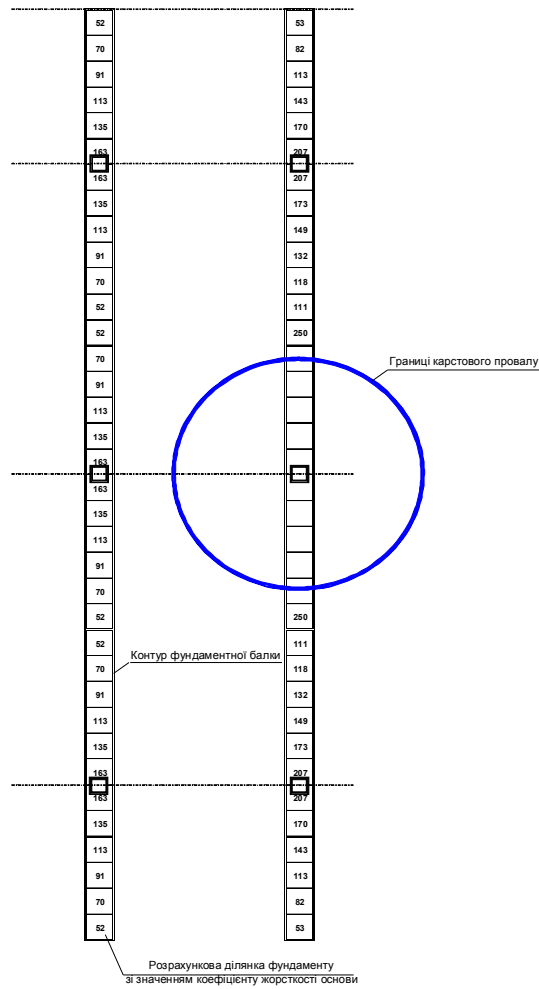


Рис. 5. Схема розподілу значень тиску по підшві фундаментів під час нормативних навантажень для ділянок фундаментів без провалу (зліва) та під час моделювання провалу (справа), т/м³

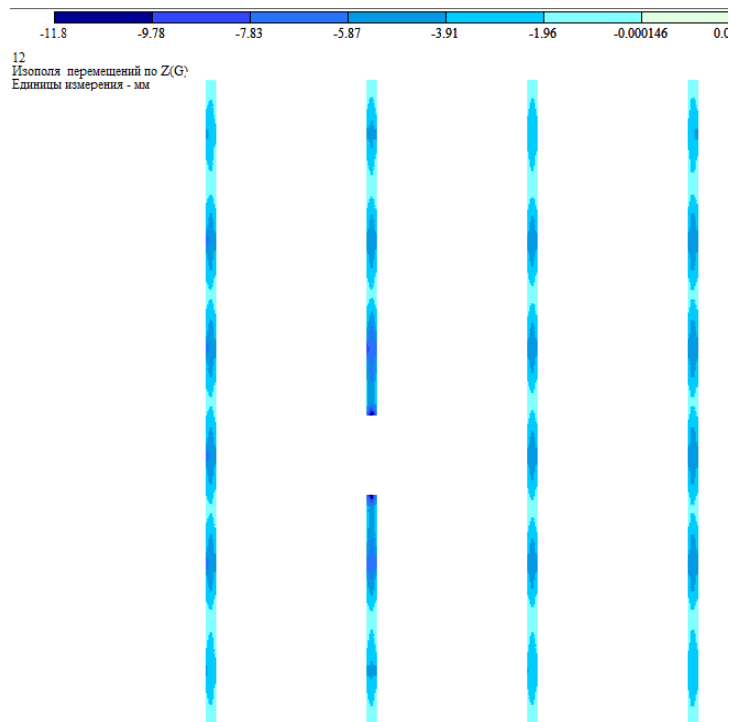


Рис. 6. Ізополя розподілу значень осідань основи під час нормативних навантажень за появи карстового провалу (розрахунок за 2-ю ГГС)

Висновки

Максимальне значення тиску по підшві фундаментів виникає на ділянці, де закінчується карстовий провал, і досягає $33,2 \text{ т/м}^2$ (середнє значення по розрахунковій ділянці фундаменту – 25 т/м^2), що перевищує розрахунковий опір ґрунту основи.

Максимальні додаткові значення вертикальних деформацій основи під підшовою фундаментів під час прояву карстового провалу досягають $11,8 \text{ мм}$ на тій же ділянці, де виникає максимальний тиск. Ізополя значень сумарних осідань приведено на рис. 6.

Максимальна відносна різниця осідань фундаментів становить $0,003$, що не перевищує $(\Delta s / L)_u = 0,002$. Жорсткість фундаментної плити достатня для забезпечення нормальної експлуатаційної роботи каркасу будівлі під час дії карстових процесів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи та фундаменти. Основні положення проектування : ДБН В.2.1-10-2009. [Чинні від 2009-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.
2. Патент України 73075 МПК⁷ Е 02 D 27/01. Збірний залізобетонний балочний фундамент з опорними блок-подушками / Березань М. О.; Руденко Ю. С.; заявник та патентовласник Черкаський державний технологічний університет. – № u201202369 ; заявл. 28.02.12, опубл. 10.09.12, Бюл. № 17.
3. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях / НИИОСП Госстроя СССР. М., 1985. – 78 с.
4. Готман Н. З. Расчет карсто защитных фундаментов зданий / Н. З. Готман // Основания и фундаменты. – 2008. – №1. – С. 20 – 24.

Березань Микола Олександрович – к. т. н., доцент кафедри промислового та цивільного будівництва.

Бабак Юлія Сергіївна – аспірант кафедри промислового та цивільного будівництва.
Черкаський державний технологічний університет.

M. O. Berezan, Cand. Sc. (Eng.); Y. S. Babak

ELASTIC-PLASTIC ANALYSIS OF THE BEARING CAPACITY OF ANTI-KARST REINFORCED CONCRETE BEAM FOUNDATION

The paper illustrates the results of engineering calculations and numerical simulation of the “base – foundation – building” system operation for studying the efficiency of the foundation beam application as a constructive measure of anti-karst protection.

Keywords: *anti-karst foundation, mathematical modeling, elastic-plastic analysis.*

Introduction

Current tendency towards increasing the construction volumes has set a number of requirements to designers as to the rational use of territories including the use of karstland for construction of buildings. At the same time traditional engineering anti-karst structures do not make it possible to take into account special geological conditions arising during karst cavity formation. A new constructive anti-karst protection of a framed industrial building is designed to ensure its normal operation when the base is affected by a karst cavity [2].

Karst processes complicate significantly construction and operation of buildings and structures. Ukrainian and foreign practice of engineering-construction exploration of karst-prone territories shows that safety and efficiency of engineering solutions depends primarily on adequate consideration of special engineering geological conditions (including technogenic ones) of the karst process development and its manifestation in the base of structures.

Mathematical modeling of the foundation structure operation

In designing the structure foundations there is a necessity for experimental substantiation of the foundation design variant, which increases significantly its cost. Under such conditions mathematical modeling of the foundation structure operation under load is rational to be used. In the paper the subsidence process of the foundation beam of a one-storied framed structure under the action of karst is simulated.

In the calculations, performed during simulation of the “base – foundation – building” system functioning process, stress-strain state of the soil in its natural condition without karst processes was taken into account. Calculations for simulation of karst-suffossian processes in the base of the building were also performed. For this formation of karst cavities with a 9m diameter under the central column of the second row of the frame has been simulated.

The simplest methods for simulation of a karst cavity under the foundation bottom are those with the application of elastic-plastic model or a model of variable coefficient of the bed, which makes it possible to take into account the base inhomogeneity and its actual distributive ability. The paper uses scientific-methodological analysis of the method for soil array simulation with the application of an elastic-plastic model for studying the stress-strain state (SSS) of inhomogeneous and anisotropic material environments in order to ensure their stability and strength. To determine SSS of the elements of the “base – foundation – building” system, calculations were performed with the application of PC LIRA that realizes the finite element (FE) method. General view of computer model of the frame is presented in Fig. 1, 2.

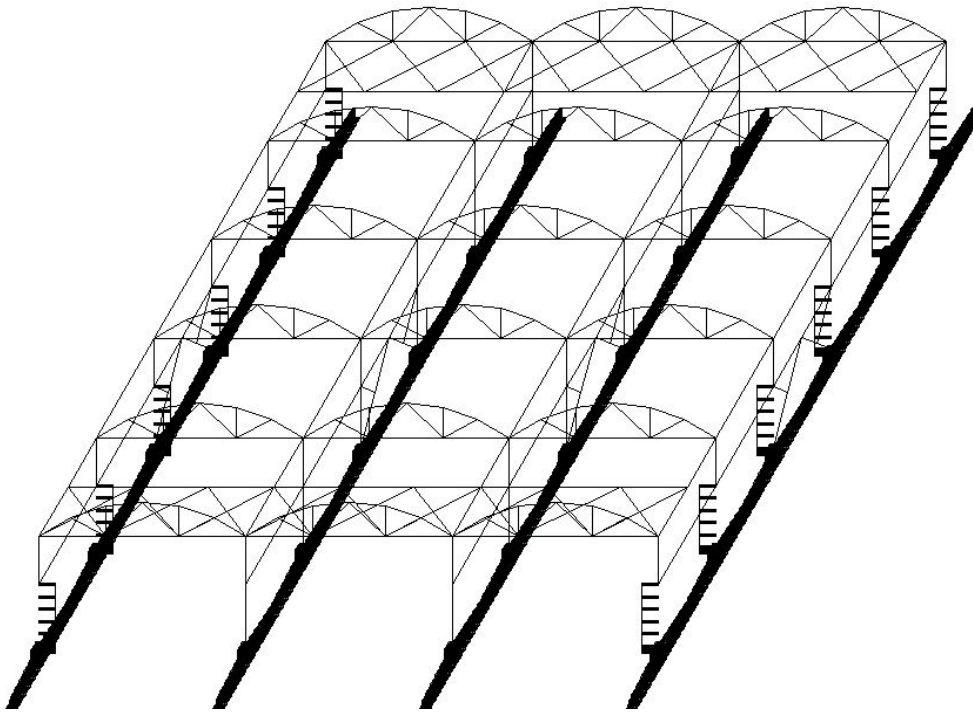


Fig. 1. General view of the computer model of the building frame

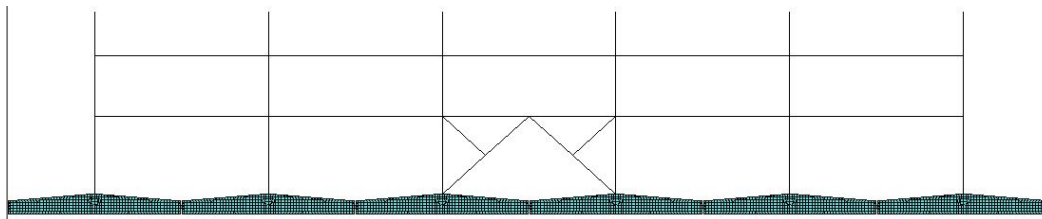


Fig. 2. General sectional view of the computer model of the building frame along digital axes.

For design scheme formation the following FE were used:

- flat FE (a shell with 6 degrees of freedom in the node) with stiffness coefficients in the vertical direction – for simulation of the foundation cushions and the base;
- rod FE (a rod with 6 degrees of freedom in the node) – for simulation of the design elements of the frame;
- 3D FE for simulation of the foundation beams;

Three-dimensional computer model reflects the object design solution and includes plate, rod and 3D elements, basic geometrical and physicomechanical characteristics of which are presented in Table 1.

Table 1.

Stiffness of the elements in the design scheme

№ п.п.	Element	Physical mechanical and geometrical parameters*	Location (purpose) in the design circuit
1	Plate	$E=2.3e+006$, $V=0.2$, $H=20$, $Ro=2.4$	Foundation cushions
2	Plate	$E=2.0 e+007$, $V=0.35$, $H=10$, $Ro=7.8$	Plates of beam joints
3	Square tube	Profile «Molodechno» $80 \times 80 \times 3$	Horizontal and vertical decorations
4	Bar	$E=2.3e+006$, $Ro=2.5$, $B=50$, $H=80$	Columns
5	Bar	$E=2.3e+006$, $Ro=2.5$, $B=15$, $H=15$	Cross-stays of trusses

6	Bar	$E=2.3e+006$, $Ro=2.5$, $B=25$, $H=30$	Chords
7	I- beam	$E=2.3e+006$, $Ro=2.5$, $H=140$	Crane beam
8	3D FE	$E=2.3e+006$, $V=0.2$, $Ro=2.5$	Foundation beam

Design scheme of the base is a linearly deformed half-space. In PC «LIRA» the design model of the base is represented by stiffness coefficients of the base for flat DE (design elements), located on XOY surface, which simulate the foundation cushions.

Calculation parameters of the foundation base soils are adopted in accordance with engineering-geological conditions of the real construction site located in Kuznetsovsk, Rivne region.

Design scheme of the base is represented by a system of mutually influenced calculation areas of the foundations, which makes it possible to perform calculations of the base for two groups of boundary conditions. Stiffness coefficients of the base in the design schemes are determined from the solution of the contact problem. Calculations were performed by iteration method. At the zero iteration stress-strain state of the structure was determined for equal stiffness coefficients of the bases for all calculation areas of the foundations. Then calculations of subsidence and stiffness coefficients of the base were performed. In the first and further iterations calculations of the structure were sequentially performed taking into account the above-mentioned stiffness coefficients of the bases and coefficients for the next iteration were estimated. The design scheme obtained as a result of solving the contact problem was used for simulation of the karst cavity formation. Failure of the base in the karst cavity area is simulated by elimination of the foundation cushion elements, that get into the cavity region of the calculation diameter, from the design model.

Calculation of the base stiffness coefficients have been performed for main combination of the loads and for combination of the loads when a karst cavity is formed. For simulation of the karst cavity under the column additional iterations were performed until balanced state of the “base – foundation” system was achieved on the foundation areas near the karst cavity. Calculated values of the foundation base stiffness coefficients are in the range from 2450 to 4400 t/m³, provided that there are no karst cavities (Fig. 3), and in the range of 2300 – 4400 t/m³ if a cavity with a 9 m diameter is simulated (Fig. 4).



Fig. 3. Mosaics of distribution of the calculated base stiffness coefficient values under normal operating conditions

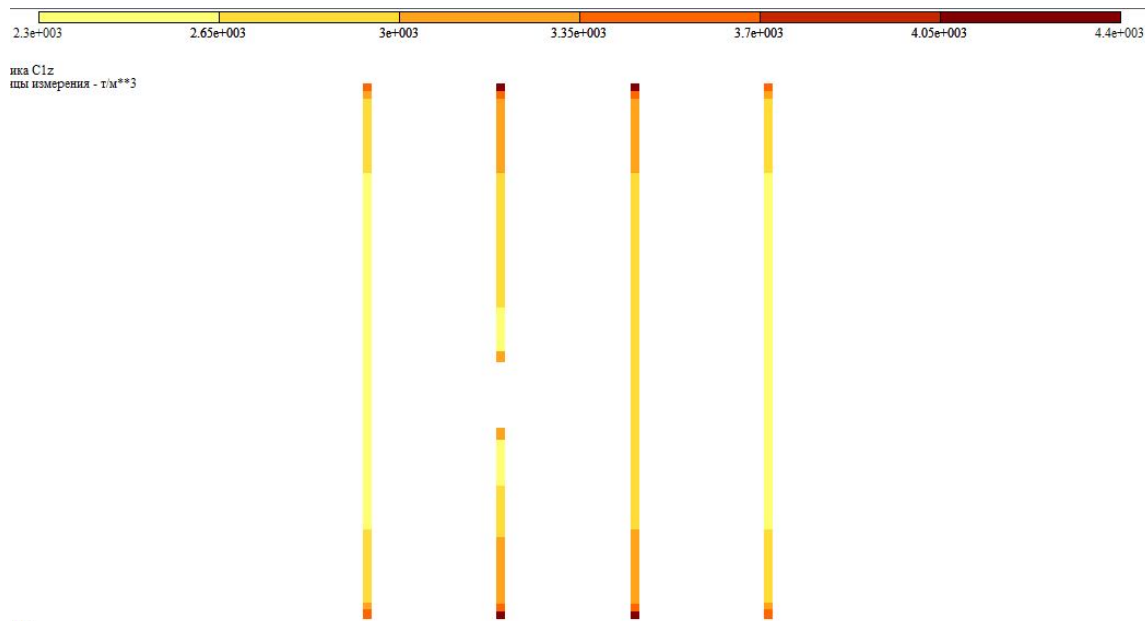


Fig. 4. Mosaics of distribution of the calculated base stiffness coefficients values when a karst cavity with 9m diameter is simulated, t / m^3

The calculated resistance of the base soil in natural conditions is $24.5 t / m^2$. Maximal value of pressure along the bottom under normal operating conditions of the base reaches $18.3 t / m^2$, which does not exceed the calculated resistance of the base soil. In accordance with the performed calculations maximal values of subsidence reach 6.4 mm. Maximal relative difference between the values of subsidence of foundations is 0.0003, which does not exceed $(\Delta s / L)u = 0.002$.

When a karst cavity under the column is simulated, distribution of pressures along the bottom of foundation cushions changes at the distance of about 12 – 13m from the cavity edge. Pressure along the bottom of end cushions of the foundation beam, under which a karst cavity is simulated, increases by 80% and reaches $25 t / m^2$ on the average, which exceeds the calculated resistance of the base. The scheme of the pressure value distribution over the foundation cushions before and after the karst cavity formation is presented in Fig. 5.

Conclusions

Maximal value of pressure along the foundation bottom is observed in the end area of a karst cavity and reaches $33.2 t / m^2$ (average value along the calculation area of the foundation is $25 t / m^2$), which exceeds the calculated resistance of the foundation soil).

Maximal additional values of vertical deformations of the base under the foundation bottom when a karst cavity is formed reach 11.8 mm in the same area where the maximal pressure is observed. Isofields of the total subsidence values are presented in Fig. 6.

Maximal relative difference between the foundation subsidence values is 0.003, which does not exceed $(\Delta s / L)u = 0.002$. Stiffness of the foundation plate is sufficient for ensuring normal operation of the building frame under the influence of karst processes.

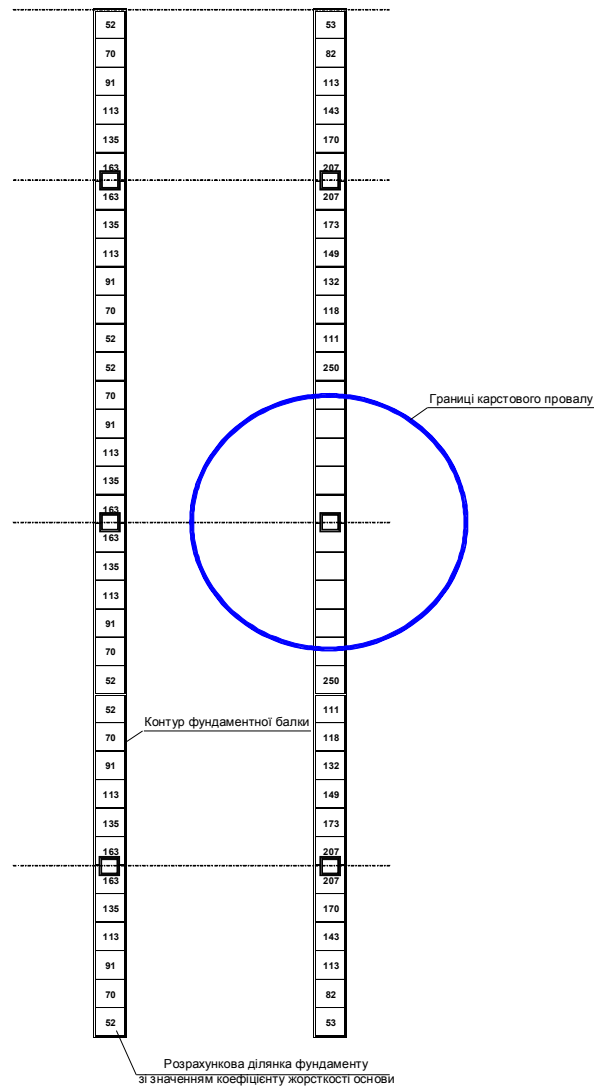


Fig. 5. The scheme of distribution of pressure values over the foundation bottom under normative loads for foundation areas without karst cavities (on the left) and when a karst cavity is simulated (on the right), t / m^3

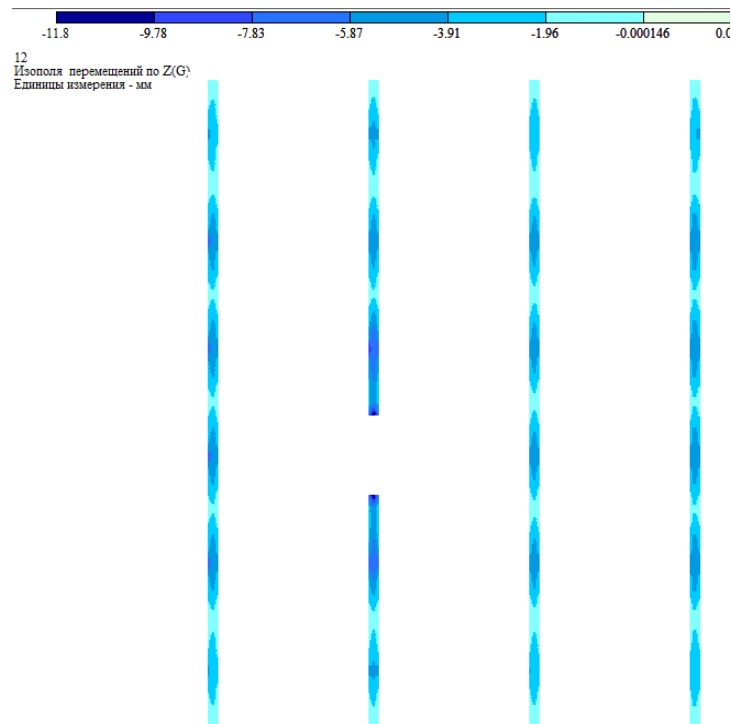


Fig. 6. Isofields of distribution of the base subsidence values under normative loads when a karst cavity is formed (calculation performed in accordance with 2-nd GBS)

REFERENCES

1. Основи та фундаменти. Основні положення проектування : ДБН В.2.1-10-2009. [Чинні від 2009-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.
2. Патент України 73075 МПК⁷ Е 02 D 27/01. Збірний залізобетонний балочний фундамент з опорними блок-подушками / Березань М. О.; Руденко Ю. С.; заявник та патентовласник Черкаський державний технологічний університет. – № u201202369 ; заявл. 28.02.12, опубл. 10.09.12, Бюл. № 17.
3. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях / НИИОСП Госстроя СССР. М., 1985. – 78 с.
4. Готман Н. З. Расчет карсто защитных фундаментов зданий / Н. З. Готман // Основания и фундаменты. – 2008. – №1. – С. 20 – 24.

Berezan Mykola – Cand. Sc. (Eng.), Ass. Prof. with the Department of Industrial and Civil Construction Cherkasy State Technological University

Babak Julia – Postgraduate student with the Department of Industrial and Civil Construction Cherkasy State Technological University.