

ЗМІНА НАПРЯМУ РУХУ ПІДЗЕМНИХ ВОД ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД КАРСТОУТВОРЕННЯ В МАСИВІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

А. М. Самедов, докт. техн. наук, В. Г. Кравець, докт. техн. наук, В. В. Бойко, докт. техн. наук, А. Л. Ган, магістр, А. В. Францішко, асп. (ІЕЕ НТУУ «КПІ»)

Рассмотрено образование карстовых полостей под влиянием процессов растворения при изменении скорости и направления движения подземных вод в связи с геологическими нарушениями различного типа. В качестве предупредительной меры предложено формировать водоотводящую зону в виде системы зернистых фильтров, приведены соответствующие расчеты.

Ключевые слова: вода, горная порода, защита, карст, фильтр.

Розглянуто утворення карстових порожнин під впливом розчинних процесів при зміні швидкості та напрямку руху підземних вод у зв'язку з геологічними порушеннями різного типу. Як попереджувальний захід запропоновано формувати водовідвідну зону у вигляді системи зернистих фільтрів, наведено відповідні розрахунки.

Ключові слова: вода, гірська порода, захист, карст, фільтр.

Karst caverns formation under the influence of solution processes when changing velocity and direction of groundwater due to geological disturbances of various types is presented. As a precautionary measure the formation of drainage area in the form of granular filters and corresponding calculations are suggested.

Key words: water, rock, protection, karst, filter.

Вступ. При веденні гірничих робіт відкритим способом в породах, схильних до карстоутворення, забезпечення безаварійної експлуатації будівель, споруд та їх комплексів, що прилягають до гірничого підприємства, залежить не лише від організації буропідричних робіт, засобів та способів їх реалізації, а й від впливу підприємства на гідрогеологічну ситуацію прилеглих ділянок гірського масиву [1, 2].

Карстові деформації при їх утворенні та розвитку під впливом різних факторів (зміні рівня ґрунтових вод, динамічних навантажень від рухомого складу, сейсмічних впливах та ін.) в основах будівель, можуть по-різному впливати на стійкість будинків або споруд. Карстові деформації за характером їх впливу на споруди в процесі їх експлуатації класифікують за видами втрати стійкості, які дозволяють оцінити види ушкоджень будинків або споруд у випадку карстових деформацій і вжити заходів щодо капітального ремонту аварійних об'єктів.

Обвальні провали в породах, що містять карсти, виникають під дією гравітаційних сил і гідродинамічних сил підземних вод. При провалах обвального типу підвищення рівня підземних вод веде до збільшення тиску на покрівлю карстової порожнини та різкого зниження міцності карстоутворюючих гірських порід. При провалах карстово-суфозійного типу зміна напрямку руху підземних вод може також призвести до активізації карстових провалів [3–5].

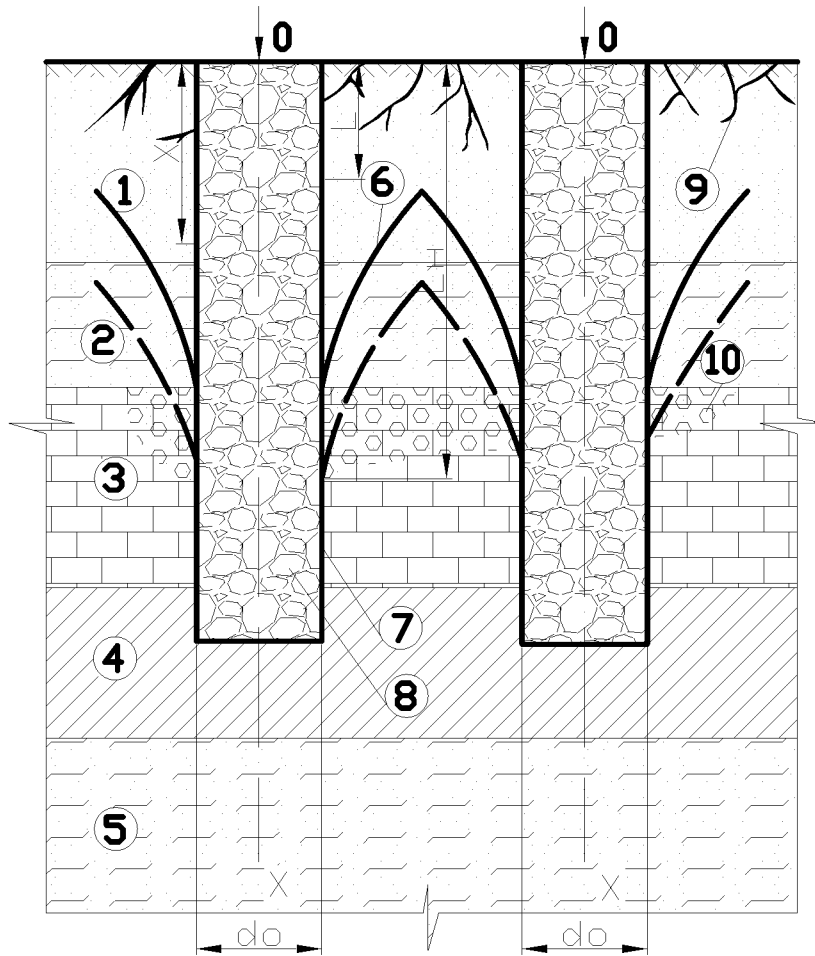
Збільшення швидкості руху підземних вод у карстових породах може викликати певну інтенсифікацію росту карстових порожнин внаслідок розчинення їх стінок та ерозії заповнювача. Оскільки швидкість розчинення карбонатних порід підземними водами вкрай мала, то провідним процесом у збільшенні порожнин є ерозія – розмивання і винесення з них заповнювача. У сульфатних породах необхідно враховувати обидва процеси, однак основним є ерозія. В соляних породах на перший план може вийти процес розчинення.

На розвиток карстових явищ суттєво впливає відкачування та циркуляція підземних вод [4, 6]. У районах інтенсивних карстових осідань тиск ґрунту на фундаменти будинків у 10...20 разів більший від активного тиску ґрунту на фундамент у звичайних умовах. Крім того, вертикальні зсуви основ внаслідок осідань у спорудах з непіддатливою конструктивною схемою викликають втрату контакту фундаменту з основою [7, 8].

З наведених прикладів випливає, що на основі аналізу механізму формування карстових провалів і порожнин можна в конкретній інженерно-геологічній ситуації якісно або кількісно оцінити тенденцію активізації карстових провалів і порожнин та прийняти відповідні інженерні рішення.

Метою роботи є захист масиву гірських порід від карстоутворення за рахунок зміни напрямку руху підземних вод.

Заходи з попередження карстоутворення шляхом зміни напрямку руху підземних вод. При розв'язанні інженерно-геологічних задач для промислового, цивільного та транспортного будівництва дуже важко визначити швидкість розчинення карстових порід, оскільки процес розчинення впродовж строку служби споруд у переважній більшості випадків не є визначальним для оцінки карстової небезпеки. Однак у деформованих породах розвиток карстоутворення може відбуватись дуже швидко, тому необхідно застосовувати заходи щодо зменшення можливості розчинення карстоутворюючих порід. У зв'язку з цим ефективним заходом є зміна напрямку руху підземних вод за допомогою відповідно влаштованої вертикальної площини розриву у вигляді плоскої системи зернистих фільтрів, що виконуються шляхом буріння в тріщинуватих і деформованих карстових породах ряду свердловин діаметром 300...400 мм із застосуванням глинистого розчину з бентонітової глини до водонепрохідного шару (рисунок). Наступними операціями є вибух в цих свердловинах подовжених зарядів, параметри яких відповідають вимогам контурного підривання, та заповнення утворених порожнин зернистим матеріалом [9, 10].



Розрахункова схема влаштування системи зернистих фільтрів у карстоутворюючих породах для зміни напрямку руху підземних вод: 1 – поверхневі тріщинуваті породи; 2 – водоносний піщаний шар; 3 – карстові породи; 4 – водонепрохідний шар; 5 – піщаний водоносний шар; 6 – депресійні криві; 7 – стінки свердловини; 8 – зернистий фільтр із щебеню фракції 40–70 мм; 9 – поверхневі тріщини; 10 – деформовані карстові породи

Глинистий розчин, проникаючи при вибуху в утворювану систему тріщин, забезпечує не лише стійкість стінок порожнини, а й створює водозахисний екран на межі з деформованими тріщинуватими карстовими породами і відповідно попереджує карстоутворення [9, 11, 12]. Вода від водоносного тріщинуватого породного масиву з депресійними кривими в зернистому фільтрі переміщується в напрямку падіння рівня ґрунтових вод згідно з формою депресійної кривої.

Для зернистого фільтра застосовують щебінь крупністю 40...70 мм. Якщо залишити стінки зернистої фільтруючої зони без протифільтраційної обробки, то під час руху в сторону фільтра ґрунтові води розм'якшують і руйнують карстову породу, перетворюючи її на дрібну зернисту масу і не створюючи умов для карстоутворення.

Товщину шару карстових порід навколо зернистого фільтра, що зазнають дії підземних вод, можна визначити за формулою

$$\Delta l = \frac{1}{\left[\frac{1}{\rho} (c - c_0) \sqrt{\frac{Dv}{\pi x}} \Delta t \right]}, \quad (1)$$

де ρ – щільність карстових порід; $c - c_0$ – дефіцит насичення відповідною швидкокорозивною сіллю підземних вод, що циркулюють на контакті з розчинною гірською породою; c , °С – поточна концентрація солей; c_0 – початкова концентрація солей у ґрунтовій воді; D – коефіцієнт дифузії. Для розрахунків в умовах гіпсових порід D можна приймати при температурі підземних вод: при $t = 70$ °С $D = 3,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с; при $t = 10$ °С $D = 3,8 \cdot 10^{-10}$ м²/с; при $t = 20$ °С $D = 5 \cdot 10^{-10}$ м²/с.

Відповідно кінематична в'язкість розчину становитиме: при $t = 7$ °С $\nu = 1,45 \cdot 10^{-6}$ м²/с; при $t = 10$ °С $\nu = 1,30 \cdot 10^{-6}$ м²/с; при $t = 20$ °С $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6}$ м²/с, де x – відстань від розчинної поверхні до точки, для якої проводиться визначення дефіциту насичення підземних вод.

Товщину зони розчинення тріщинуватих та деформованих карстових порід у стінках свердловини із середнім розкриттям δ_0 і ступенем тріщинуватості або деформованості ϵ_s , що виносяться підземними водами шляхом розчинення за час Δt , орієнтовно можна оцінити як:

$$\Delta l = \nu_1 (\Delta t - \Delta t_1), \quad (2)$$

де ν_1 – середня швидкість зменшення товщини шару за рахунок розчинення стінок свердловини (рисунок) за час Δt_1 .

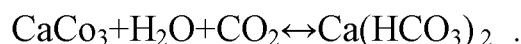
Середня швидкість розвитку шару визначається за формулою

$$\nu_{l=\Delta l} = \frac{l_H K (c_H - c_0) \epsilon_s}{\delta_0 \rho}, \quad (3)$$

де l_H – довжина шляху насичення, обумовлена заданим ступенем водонасичення при ламінарному рухові води через зернистий фільтр, м; K – експериментальний коефіцієнт швидкості розчинення, що залежить від швидкості руху підземних вод; Δt_1 визначається за формулою

$$\Delta t_1 = \frac{\delta_0}{2 \epsilon_s \frac{K}{\rho} (c_H - c_0)}. \quad (4)$$

Значення коефіцієнта швидкості розчинення стінки зернистого фільтра, заповненого щебенем крупністю 40...70 мм, визначається експериментальним шляхом. При цьому може бути використана модель карстоутворюючих порід із використанням каталізаторів, що прискорюють час розчинення, таких як хлористий натрій або CO₂, який викликає хімічну реакцію в карбонатних карстоутворюючих породах з утворенням водорозчинного бікарбонату кальцію:



При моделюванні процесу карстоутворення необхідно застосовувати критерії подібності та теорії розмірностей на основі диференціальних рівнянь руху в'язкої рідини (водного розчину) та конвективної дифузії, які з урахуванням ряду спрощень можна записати в такому вигляді.

$$\left. \begin{aligned} \rho_g \frac{dv_x}{dt} &= \mu_d \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} - \rho_g v_x \frac{\partial v_x}{\partial x}; \\ \frac{\partial c}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v_0 \frac{\delta_0 \partial c \partial c}{K c_a \partial t \partial x}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де ρ_g – щільність рідини підземних вод з концентрацією солі, кН/м^3 ; v_x – проекція швидкості руху води в свердловинах на осі x (вертикальній осі); μ_d – динамічна в'язкість рідкого розчину, $\mu_d = \nu \rho g$; ν – кінематична в'язкість рідини; t – час; D – коефіцієнт дифузії; c – концентрація солі у воді, $c_a = c_h - c_0$.

Розв'язання системних рівнянь (5) виконується з використанням експериментальних даних і застосуванням теорії подібності. Тоді система (5) буде мати вигляд $V = f(\text{Re}, \text{Pr})$, яку можна представити як статичну залежність

$$M = A \text{Re}^n \text{Pr}^m \quad (6)$$

Тут M – критерій Маргуліса; Re – критерій Рейнольдса; Pr – критерій Прандтля; A , n , m – експериментальні коефіцієнти. Критерії Маргуліса, Рейнольдса та Прандтля визначаються за формулами, наведеними в [8]. Коефіцієнт швидкості розчинення стінки свердловини при фільтрації водного потоку через зернистий фільтр можна прогнозувати за допомогою формули

$$K = \frac{\Delta \delta_0 \rho}{\Delta t (c_H - c_x)} \quad (7)$$

де $\Delta \delta_0$ – товщина розчинного шару породи в стінках свердловини при тиску води за час Δt ; c_x – концентрація водного розчину на відстані x від входу в свердловину, заповнену щебенем. Коефіцієнт швидкості розчинення стінки свердловини також може бути визначений в лабораторних умовах за формулою (7) при дотриманні рівності чисельних значень визначальних критеріїв подібності моделі та натурних матеріалів:

$$M_M = M_N; \text{Re}_M = \text{Re}_N; \text{Pr}_M = \text{Pr}_N.$$

Якщо тип розчинної породи і температура води в експерименті збігаються з типом породи і температурою підземних вод у природних умовах, тобто якщо $\nu = \text{const}$, $D = \text{const}$, $\text{Pr} = \text{const}$, тоді формула (5) спрощується:

$$M = A \text{Re}^n \quad (8)$$

Фільтрація водного розчину через зернистий фільтр. Зернистий фільтр у системі свердловин повинен прорізати водоносний шар від поверхні землі до водонепрохідного шару і змінювати потік підземної води в напрямку падіння поверхні депресійної воронки для відведення води від карстоутворюючих порід. При наявності кількох водоносних шарів з різними коефіцієнтами

фільтрації K_{Φ} (що відрізняються один від одного більш ніж у 10 разів), розташованих над карстоутворюючою товщею, треба розраховувати фільтрацію для дво- або тришарового середовища. Коефіцієнти фільтрації повинні визначатися для кожного шару з урахуванням перетікання води з одного шару в інший.

Живлення водоносних шарів може відбуватись за рахунок припливу з водойми або водотоку, інфільтрації атмосферних опадів, впадіння одного водоносного шару в інший. Приплив води до водоносних шарів схематизується для кожного випадку по-різному, виходячи з реальних умов.

Відповідно до вибраних схем розраховують притік у сталому або несталому режимах фільтрації.

Сталий режим фільтраційного потоку, який характеризується незмінними у часі припливом і депресійною поверхнею, настає тоді, коли ґрунтова вода з одного водоносного шару передається в інший або виконується відкачка води, яка врівноважує живлення шарів. Часто основний час експлуатації зернистих фільтрів (свердловин, засипаних щебенем) відбувається при сталому режимі фільтрації.

Рівняння припливу підземних вод (при сталому режимі фільтрації) в зернистий фільтр у ряді свердловин визначається за лінійним законом ламінарної фільтрації Дарсі за формулою

$$V = k_{\Phi} I . \quad (9)$$

Приплив води до зернистих фільтрів може відбуватись у вигляді плоского і радіального потоків.

а) для плоского потоку витрата води визначається за формулою

$$Q = \frac{mk_{\Phi}(H-y)l}{R-x} ; \quad (10)$$

б) для радіального потоку

$$Q = \frac{2\pi mk_{\Phi}(H-y)}{\ln \frac{R}{x}} , \quad (11)$$

де v – швидкість фільтрації, м/добу; k_{Φ} – коефіцієнт фільтрації, м/добу; I – гідравлічний градієнт; Q – приплив води, м³/добу; m – товщина водоносного шару при напірній фільтрації або середня товщина потоку, що дорівнює $(H-y)/2$ при безнапірній фільтрації, м; H – напір ґрунтових вод, м; y – напір у розрахунковій точці, м; l – довжина розрахункової ділянки лінійної водопонижувальної системи, м; x – відстань від осі лінійної або від центру контурної водопонижувачих систем свердловин із щебенем до розрахункової точки, м; R – радіус депресії (зони впливу), величина якої визначається на основі даних про джерела і умови живлення водоносних шарів. У випадках наявності свердловин із зернистими фільтрами величина R приймається при плоскому потокові такою, що дорівнює відстані до джерела водопритоку (водойми), а при радіальному потокові дорівнює подвоєній відстані від центру свердловини до джерела.

Лінійний закон фільтрації широко відомий як закон Дарсі. Цей закон добре виконується в зернистих фільтрах і відображає наближену залежність між швидкістю фільтрації v , вираженою у вигляді питомої витрати на одиницю площі суцільного перерізу потоку води і втратою напору ($I = \Delta y / \Delta x$) на одиниці довжини шляху фільтрації.

При відсутності даних про джерела і умови живлення водоносних горизонтів величину радіуса депресії визначають за формулами:

а) при безнапірній фільтрації

$$R = A_p + 25\sqrt{K_\phi H}; \quad (12)$$

б) при напірній фільтрації

$$R = A_p + 10S\sqrt{K_\phi} \quad (13)$$

де A_p – приведений радіус зернистого фільтра (свердловини або порожнини), м, який приймається таким, що дорівнює $0,25l$; S – зниження рівня ґрунтових вод відносно їх початкового рівня перед бурінням свердловин для зернистого фільтра, м.

Потрібно відзначити, що відфільтрована в гірських карстоутворюючих породах підземна вода розчиняє породи і виносить їх із течією. Тому ця рідина є водним розчином або важкою гравітаційною водою, що переміщується в поровому просторі між великими фракціями щебеню під дією сил гравітації.

Висновки

Розвиток карстових деформацій в породах, схильних до карстоутворення, спричиняється не лише динамічними навантаженнями від рухомого складу, сейсмічних впливів, а й спровокованою зміною рівня та напрямку руху ґрунтових вод в основах будівель, що може негативно позначитись на стійкості будинків і споруд і потребує вживання запобіжних заходів.

На основі аналізу механізму формування карстових провалів і порожнин можна в конкретній інженерно-геологічній ситуації оцінити тенденцію до активізації карстових провалів і порожнин та прийняти відповідні інженерні рішення.

Для запобігання розвитку карсту в тріщинуватих породах раціонально застосовувати заходи щодо зменшення часу розчинення карстоутворюючих порід шляхом зміни напрямку руху підземних вод за допомогою відповідно влаштованих зернистих фільтрів. Останні являють собою ряд свердловин діаметром 300...400 мм, пробурених до воднепрхідного шару та заповнених щебенем, або площинну систему вибухових порожнин із зернистим матеріалом, що контактують між собою чи з'єднуються системою тріщин.

Запропонована методика розрахунку фільтраційних параметрів карстоутворюючого масиву в присутності зернистого фільтру дозволяє визначити зміну швидкості і напрямку руху підземних вод з урахуванням розчинення прилеглих до нього деформованих шарів порід.

2. Самедов А. М., Иванова Н. Н. Деформирование малоэтажных зданий от компонентов напряжений высотных домов, находящихся по соседству с ними. – Научно-техн. журнал НДЦБВ. – № 2 (12), 2006. – С. 14–19.
3. Лехов А. В. Моделирование карстового процесса. – Инженерная геология. – 1981. – № 1:1,4. – С. 89–96.
4. Зверев В. П. Роль подземных вод в миграции химических элементов. – М.: Недра, 1982. – 148 с.
5. Хоменко В. П. Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. – М.: Наука, 1986. – 182 с.
6. Печеркин И. А. Вопросы изучения карста в инженерных целях. – Инженерная геология. – 1981. – № 5. – С. 77–80.
7. Самедов А. М., Шелиховская Ю. П., Исмаилов Т. Усиление конструкции подземных сооружений на участках с ожидаемыми карстовыми провалами // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – Вип. 17. – К.: 2008. – С. 74–81.
8. Толмачев В. В., Троицкий Г. М. Определение расчетного размера карстовых провалов при проектировании фундаментов на закарстованных территориях // Основания фундаментов и механика грунтов. – 1983. – № 2. – С. 22–24.
9. Справочник проектировщика. Динамический расчет зданий и сооружений. – М.: Стройиздат. – 1984, 304 с.
10. Ставицкер Р. Л. Деформации оснований сооружений от ударных нагрузок. – М.: Стройиздат, 1969. – 126 с.
11. Вовк А. А. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок. – К.: Наук. думка, 1984. – 288 с.
12. Попов Н. Н., Расторгуев Б. С. Динамический расчет железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1974. – 352 с.