

Zvláštnosti chemického injekčného spevnenia zemín malej priepustnosti

TATJANA GEORGIJEVNA ŠIMKO

Moskovská štátna univerzita, Geologická fakulta, Problémové laboratórium ochrany geologického prostredia, 119 899 Moskva, Leninské hory

(Doručené 14. 8. 1989)

Peculiarities in chemical cementation of low-permeability soils

Main problems of cementation by chemical injection applied for soils of low permeability are analyzed. Reasons of permeability decrease after injection are indicated and a new method of injection using consolidation by the means of hydrofracturing, namely that of oriented hydraulic fracturing elaborated at Moscow State University, is described.

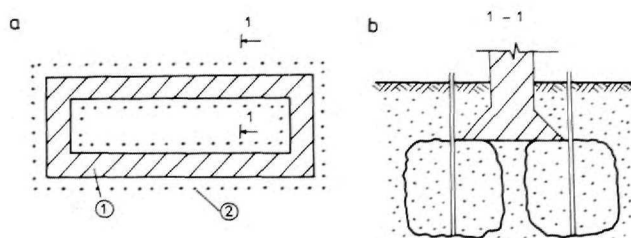
Úvod

Injekčné metódy na spevnenie zemín sú bežné vo viacerých krajinách. Používajú sa v etape prípravy základov pred výstavbou, ale aj – a to je zvlášť cenné – v prípade, ak treba zvýšiť únosnosť základov už vybudovaných objektov deformujúcich sa v dôsledku sadania základovej pôdy.

Podstatou metód injekčného spevnenia je vtlačenie spojivového materiálu do pórov alebo puklín horniny. Takýmito materiálmi sú rôzne cementové, ílocementové a chemické látky. Typ injekčnej zmesi sa určuje na základe priepustnosti horniny a požiadaviek na pevnosť injektovaného základu. V horninách s nízkou priepustnosťou sa používajú chemické injekčné zmesi na báze silikátov, rôzne polyméry (napr. močovinoformaldehydové živice) a pod. Spevnenie horniny sa robí z injekčných vrtov v hĺbkových úsekoch zvyčajne 0,33 m (ale aj 1 až 2 m). Efekt spevnenia je založený na radiálnom nasýtení horniny v okolí vrtu. Takouto technológiou vznikajú spevnené masívy vo forme „valcov“. V praxi sa zvyčajne dosahujú maximálne polomery spevnenia (t. j. vzdialenosti prieniku injekčnej látky od vrtu do horniny) okolo 0,8 až 1,0 m. Preto, že je limitovaný polomer spevnenia, treba zhustiť injekčné vrstvy, a ak treba spevniť horniny pod vybudovaným objektom, je nevyhnutné injektovať z vonkajšej i vnútornej strany budovy. Zjednodušená schéma rozmiestnenia vrtov pre takýto prípad je znázornená na obr. 1. Ilustruje skutočnosť, že polomer spevnenia predstavuje najdôležitejší faktor ovplyvňujúci efektívnosť spevnenia. Požadovaná veľkosť polomeru spevnenia totiž podmieňuje vzdialenosť medzi injekčnými vrtami, spotrebu zmesi a v súvislosti s tým časovú a finančnú náročnosť prác.

Okolnosti limitujúce polomer spevnenia

Vzdialenosť prieniku injekčnej zmesi do horniny podmieňujú dva parametre: priepustnosť horniny pre daný typ zmesi a injekčný tlak.

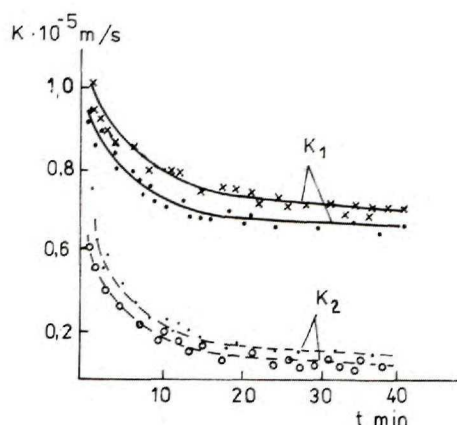


Obr. 1. Schéma rozmiestnenia vrtov na spevnenie zeminy pod základmi budov pri použití metódy radiálneho nasýtenia. a – pôdorys, b – rez. 1 – základ, 2 – vrt.

Fig. 1. Scheme of drilling locations for chemical cementation beneath building foundation by the method of radial saturation. a – ground plan, b – section, 1 – foundation, 2 – boreholes.

Od priepustnosti závisí nielen veľkosť polomeru spevnenia, ale aj celková možnosť spevňovania danej zeminy. Podľa platných sovietskych noriem sa napríklad metóda silikatizácie používa iba v zeminách s koeficientom filtrácie do 10^{-6} ms^{-1} . Napriek tomu, ako vyplýva zo skúseností, ani pri vysokom koeficiente filtrácie sa niekedy nepodarí vtlačiť do zeminy (pri tlaku nižšom, než je medzný pri porušení – klakáži) také množstvo zmesi, ktoré by zabezpečilo potrebný polomer spevnenia. Z uvedeného vyplýva, že koeficient filtrácie platný pre pohyb vody v zemi neje vždy spoľahlivým údajom na predpoklad o priepustnosti zeminy pre injekčný roztok. V ďalšom sa nebudeme zaoberať injekčnými suspenziami, ktorých viskozita môže byť rádovo vyššia než viskozita vody, ale budeme hľadať príčiny nízkej priepustnosti zemín pre niektoré chemické roztoky, ktorých pôvodná viskozita je blízka viskozite vody (napríklad roztok vodného skla, ktorý je základom viacerých injekčných zmesí).

Pohyb silikátového roztoku v sprašových zeminách rôzneho zloženia a štruktúry študovali pracovníci Geologickej fakulty moskovskej univerzity na vzorkách sprašových zemín z rôznych oblastí ZSSR (Ukrajina, stredná Ázia a severný Kaukaz). Zisťovalo sa granulometrické mikroagregátne zloženie vzoriek, minerálne zloženie ílovitej frakcie, obsah karbonátov, sadrovca a rozpustných



Obr. 2. Zmena koeficienta filtrácie v závislosti od času v sprašových hlinách z Nikolajeva. K_1 – koeficient filtrácie pre vodu, K_2 – koeficient filtrácie pre roztok vodného skla.

Fig. 2. Changes of filtration coefficient values in relation with time in loess foundation soil, Nikolajev locality. K_1 – coefficient of filtration for water, K_2 – coefficient of filtration for water glass.

solí. Štruktúra zemín sa študovala metódou matematickej morfológie, pričom sa používali snímky získané na skenovom elektrónovom mikroskope. Zo snímok sa pomocou analyzátoru textúr „Leitz“ firmy TAS určovalo rozdelenie pórov a agregátov na základe ich rozmerov.

Filtračné vlastnosti zemín pre vodu i vodné sklo sa

študovali na špeciálnom laboratórnom zariadení a určovali sa na vzorkách zeminy s nenarušenou štruktúrou a výškou i priemerom 4 cm, ktoré sa obalili elastickou gumenou membránou a umiestnili v skúšobnej komore z organického skla. Medzi stenami komory a membránou pôsobil vyšší hydrostatický tlak, než bol tlak prúdiacej kvapaliny. Takéto usporiadanie vylučovalo okrajový vplyv filtrácie pri stenách skúšobnej komory. Voda alebo roztok vodného skla sa pretláčali zospodu hore, ob jem prefiltrovanú kvapalinu sa meral v závislosti od času, koeficient filtrácie sa vypočítal podľa Darcyho vzťahu. Filtračné gradienty sa pri všetkých skúškach pohybovali v rozmedzí 14 až 17. Každá skúška trvala 30 až 40 minút, čo približne zodpovedá času injektovania v prevádzkových podmienkach. Na obr. 2 sú znázornené zmeny koeficienta filtrácie sprašovej hliny z Nikolajeva pre vodu (K_1) a pre vodné sklo hustoty $1,13 \text{ g cm}^{-3}$ (K_2). Priepustnosť sa charakterizovala hodnotami K_1 a K_2 odčítanými zo subhorizontálnej časti krivky.

Detailnú analýzu vplyvu zloženia a štruktúry sprašových zemín na ich priepustnosť pre vodu a vodné sklo podáva Sergejev a Šimko (1986). V ďalšom analyzujeme iba hlavné výsledky tejto štúdie.

Z tab. 1, ktorá udáva koeficient filtrácie pre vodu a vodné sklo a ich vzájomný vzťah pre zeminy odobrané z rôznych oblastí ZSSR, vyplýva, že zmenšenie priepustnosti pre silikát v porovnaní s priepustnosťou pre vodu

TAB. 1
Priepustnosť sprašových zemín a pieskov pre vodu a vodné sklo
Permeability of loess soil and sands for water and water glass

Lokalita	Obsah častíc (%)			Priepustnosť (m.s ⁻¹)		K ₁ /K ₂
	1	2	3	4	5	
Sprašové zeminy*						
Sredná Ázia						
Dušanbe	3,89	95,40	0,71	3,48	1,04	3,3
Dušanbe	7,99	84,05	1,24	2,09	0,41	5,1
Dušanbe	6,60	90,85	2,03	1,28	0,31	4,1
Alma-Ata	27,87	72,10	0,03	3,07	0,70	4,4
Almalyk	8,31	90,21	1,50	8,70	3,48	2,5
Samarkand	23,56	76,38	0,04	1,97	0,58	3,4
Ukrajina						
Zápороžie	29,51	63,88	6,61	12,80	0,64	20,0
Zápороžie	58,75	40,12	0,13	6,03	0,47	12,8
Nikolajev	39,63	60,24	0,13	7,60	1,16	7,0
Poltava	24,06	75,84	0,10	2,03	0,17	11,9
Kirovograd	27,33	72,63	0,14	9,28	1,97	4,7
Odesa	17,19	82,75	0,06	20,90	6,38	3,3
Severný Kaukaz						
Buďonovsk	30,78	65,65	3,60	11,60	2,61	4,4
Georgijevsk	54,47	45,46	0,07	5,00	0,32	15,6
Piesky						
silne humusovité	59,10	31,00	9,23	11,80	0,12	102,0
železité	94,33	3,42	2,25	89,32	8,20	10,9
slabo železité	97,56	2,16	0,28	250,50	80,73	3,1

*Pre sprašové zeminy sú v tab. udané výsledky mikroagregátneho zloženia.

1 – piesok 1,0–0,05 mm, 2 – prach 0,05–0,001 mm, 3 – $\text{íl} < 0,001 \text{ mm}$, 4 – priepustnosť pre vodu ($K_1 \cdot 10^{-6}$), 5 – priepustnosť pre vodné sklo ($\gamma = 1,3 \text{ g cm}^{-3}$, $K_2 \cdot 10^{-6}$).

je rôzne pre jednotlivé zeminy a mení sa 2- až 20-násobne. Príčinou je skutočnosť, že pri pohybe chemicky aktívneho roztoku v pórovom prostredí zeminy obsahujúcej prachovú a ílovú zložku dochádza k vzájomnému pôsobeniu roztoku a aktívnych komponentov zeminy – katiónov výmenného komplexu, t. j. solí. V dôsledku toho sa čiastočne uvoľnia produkty vzájomnej reakcie do pevného skupenstva, napučávajú ílovité minerály, vytvorí sa gélový roztok, zmenší sa existujúci prierez prietočných kanálov a v konečnom dôsledku sa zmenší priepustnosť zeminy. Tieto procesy prebiehajú s rôznou aktivitou v závislosti od zloženia a štruktúry zeminy, preto sa prejavuje rôzne zmenšenie priepustnosti zeminy pri porovnaní filtrácie vody a filtrácie roztoku.

Vo všeobecnosti možno vyčleniť dva základné faktory sprašových zemín, ktoré podmieňujú zmenšenie ich priepustnosti pri filtrácii roztoku vodného skla. Prvým je: zastúpenie pórov väčších než 0,01 mm a chemicko-mineralogické zloženie zeminy, predovšetkým obsah montmorillonitu a solí typu CaSO_4 , MgSO_4 , Na_2SO_4 a MgCl_2 . Póry väčšie než 0,01 mm určujú priepustnosť v prípade, ak je ich zastúpenie väčšie než 7 až 9 %, pri menšom zastúpení je určujúcim parametrom chemicko-mineralogické zloženie.

Vo väčšine študovaných typov sprašových zemín (11 zo 17) vzájomná reakcia s vodným sklom spôsobuje už v úvodnom štádiu injektovania to, že tieto typy nadobúdajú vlastnosti kategórie zemín, pri ktorej sa silikatizácia neodporúča (na základe priepustnosti – podľa platných normových dokumentov).

Analogické procesy prebiehajú i v pieskoch obsahujúcich prachovité a ílovité častice alebo aktívne autigénne povlaky. V tab. 1 sú uvedené i údaje o priepustnosti pre vodu a vodné sklo niektorých typov pieskov.

Možno teda konštatovať, že malá priepustnosť zemín je často príčinou, pre ktorú nemožno chemické injekčné spevnenie realizovať metódou radiálneho priesaku.

Druhým faktorom vplyvujúcim na polomer spevnenia je tlak pri injektovaní. Technológia injektovania predpokladá vtlačanie injekčnej zmesi pri nižšom tlaku, než je medzný, spôsobujúci už porušenie zeminy. Nevyhnutnou podmienkou tejto metódy je teda použitie tlakov neprevyšujúcich medznú hodnotu. V ďalšom sa pokúsime analyzovať rozsah tlakov, ktorými možno dosiahnuť požadované polomery spevnenia.

Vo všeobecnosti možno kritický tlak v mieste injektovania určiť podľa vzťahu.

$$p = \gamma h \cdot \frac{v}{1-v} + N,$$

kde γ je objemová tiaž nadložných zemín, h – hĺbka zóny injektovania, v – Poissonovo číslo, $N = K + C$, kde K je súčiniteľ tlaku v pokoji, C – hodnota podmienená štruktúrnou pevnosťou zeminy.

Kým v pieskoch možno štruktúrnú pevnosť považovať za nulovú, v zeminách so štruktúrnymi väzbami sa musí zohľadňovať. Z jednoduchých výpočtov vyplýva, že

v hĺbke do 20 m, v ktorej sa najčastejšie robí spevňovanie, medzné tlaky v pieskoch i sprašových zeminách neprevyšujú hodnoty 0,15–0,2 MPa. Ide teda o nevelké tlaky, ktoré by sa nemali prekročiť pri injektovaní metódou radiálneho priesaku. Táto skutočnosť však zabraňuje získať veľké polomery spevnenia zeminy.

V tab. 2 je uvedený čas nevyhnutný na spevnenie zeminy rôznej priepustnosti v rozsahu danom polomerom spevnenia 0,4, 0,6 a 0,8 m. V zemine s priepustnosťou 10^{-6} ms^{-1} možno za 40 minút získať polomer priesaku roztoku iba do 0,4 m. Pri menších hodnotách priepustnosti hornín potrebný čas injektovania prevyšuje časy používané v injekčnej praxi. Tým sa dajú vysvetliť ohraňovania podmienené priepustnosťou pri silikatizácii zemín.

TAB. 2
Vypočítaný čas injektovania sprašovej zeminy
Calculated time of cementation of loess soil

Priepustnosť pre roztok (ms^{-1})	Tlak injektovania (MPa)	Čas injektovania (hod.) pre polomery spevnenia		
		0,4 m	0,6 m	0,8 m
$11,6 \cdot 10^{-6}$	0,2	0,7	1,5	3,4
$3,5 \cdot 10^{-6}$	0,2	2,4	5,7	13,5
$1,16 \cdot 10^{-6}$	0,2	6,7	14,8	33,6

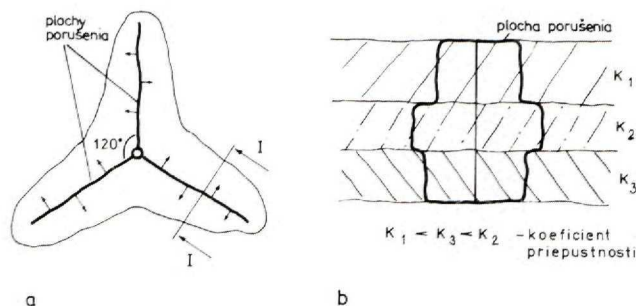
Možno teda konštatovať, že štandardná technológia „nasýtenia“ zeminy je neefektívna a často nepoužiteľná v zeminách s malou priepustnosťou. Nevelký polomer spevnenia zeminy si vyžaduje husto situovať vrty zvonku i zvnútra budovy, čo je v niektorých prípadoch nevyhnutné, ba často i nerealizovateľné.

Na Geologickej fakulte MGU navrhli a v praxi overili spôsob injektovania využívajúci hydraulické porušenie zemín, ktorý umožňuje vylúčiť alebo výrazne obmedziť práce z vnútorných priestorov postihnutých objektov a rozšíriť hranice použiteľnosti injekčného spevňovania i pre typy ílovitých zemín s nízkou priepustnosťou.

Teoretické základy novej metódy

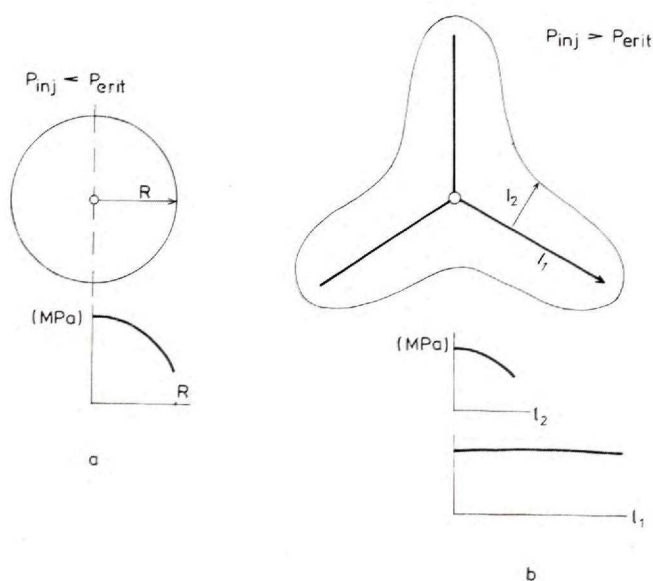
Nová technológia injektovania sa rozpracovala na základe výskumu šírenia injekčného roztoku pri tlakoch prevyšujúcich medzné.

Z teórie je známe, že k hydraulickému porušeniu horniny (klakáži) dochádza v smere kolmom na minimálne hlavné napätie (Cambefort, 1984). Skúšky in situ vykonané v piesčitých a sprašových zeminách rôzneho zloženia i stavby ukázali, že: 1. k porušeniu, ako sa predpokladalo, dochádza vo vertikálnom smere, 2. vo vrstve, ktorá sa nachádza v prirodzenom stave izotropnej napätosti, vznikajú zvyčajne tri plochy porušení odklonené vzájomne približne o 120° (obr. 3), 3. pri injektovaní úsekoch v smere zdola hore porušenia v každej nasledujúcej etáži kopírujú smer už vzniknutých porúch v nižších etážach. Orientácia plôch porušenia sa zachováva nielen



Obr. 3. Schéma rozšírenia roztoku vo vrstevnatom prostredí. a – pôdorys, b – rez v línii I – I.

Fig. 3. Scheme of solution penetration into a bedded environment. a – ground plan, b – section along I – I line.



Obr. 4. Rozsah spevnenia zeminy pri použití metódy radiálneho nasýtenia (a) a metódy porušenia (b).

Fig. 4. Amounts of soil cementation applying radial saturation (a) and hydrofracturing (b).

v izotropnom prostredí, ale aj vo vrstvách a vložkách zemín rôznej priepustnosti. Orientácia porúch sa nemení pri prechode z menej priepustných do priepustnejších vrstiev a naopak.

Injekčná zmes preniká prúdom v smere väčšieho hlavného napätia a sýti zeminu v kolmom smere; vzdialenosť, do ktorej zmes nasycuje zeminu, závisí od jej priepustnosti (obr. 3b). Zvláštnosťou je skutočnosť, že aj efekt spevnenia sa znižuje v tomto smere (v dôsledku prejavu procesov sorpcie a hydrodisperzie, pozri Sergejev a Šimko, 1979), t. j. kolmo na plochu porušenia, kým pozdĺž nej sa pevnosť prakticky nemení. Na obr. 4 je znázornená zmena hodnoty spevnenia pri metóde radiálneho nasýtenia a pri technológii porušenia. Vo viacerých prípadoch možno spevnenie po použití technológie porušenia považovať za vhodnejšie, najmä pri injektovaní roztokmi, ktoré zabezpečujú vysoké hodnoty

spevnenia, pretože vznikne akoby „armovaná“ zemina pozdĺž plôch porušenia.

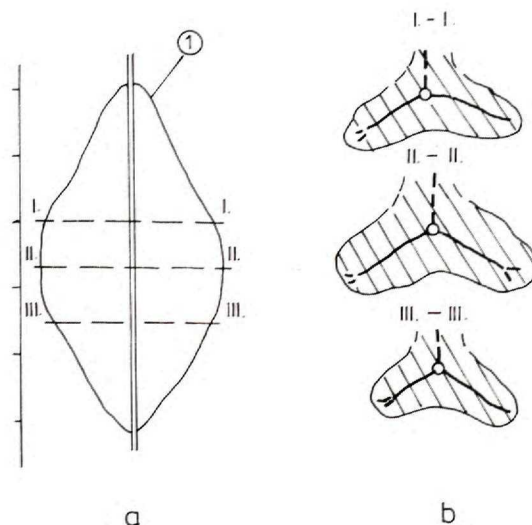
Zákonitosti vzniku porušení sa detailne študovali v sprašových zeminách počas prác zameraných na spevnenie základov viacerých náročných objektov v strednej Ázii.

V Dušanbe sa na niekoľkých pokusných lokalitách injektovalo roztokom vodného skla pri tlakoch prevyšujúcich medzné. Hodnoty týchto tlakov sa určovali predbežne podľa kriviek závislosti spotreby od tlaku. Na obr. 5 je znázornený tvar spevnenej zeminy v okolí jedného z pokusných vrtov. Injektáž sa robila v 2-metrovej zóne v hĺbke 4,7–6,7 m pri tlaku vyššom ako medzný tlak. Spotrebovalo sa 700 l vodného skla. Vytvorili sa tri klakážne trhliny, ktoré mali vertikálny smer, dĺžku 70 cm a v pôdoryse zvierali uhol blízky 120°. Nasýtenie zeminy vo všetkých smeroch od trhlín dosahovalo 20 až 30 cm.

Podobné výsledky prinieslo pokusné spevnenie sprašovej zeminy technológiou porušenia v Zaporoží.

Na základe realizovaných štúdií dochádzame k záveru, že vertikálne klakážne trhliny, vznikajúce pri pôsobení vyšších než medzných tlakov, možno považovať za doplnujúce pracovné plochy injektora. To umožňuje rozšíriť hranice použiteľnosti injekčnej metódy spevnenia zemín a injektovať zeminy s priepustnosťou menšou než 10^{-6} ms^{-1} . Preto sú výhody injekčnej metódy porušenia (klakáž) zrejme predovšetkým pri zlepšovaní základov v málopriepustných zeminách.

Lenže v súvislosti so zvyšovaním únosnosti zemín tvoriacich základ objektov, ktoré sú už v prevádzke, vyvoľáva prítomnosť troch v pôdoryse neorientovaných plôch



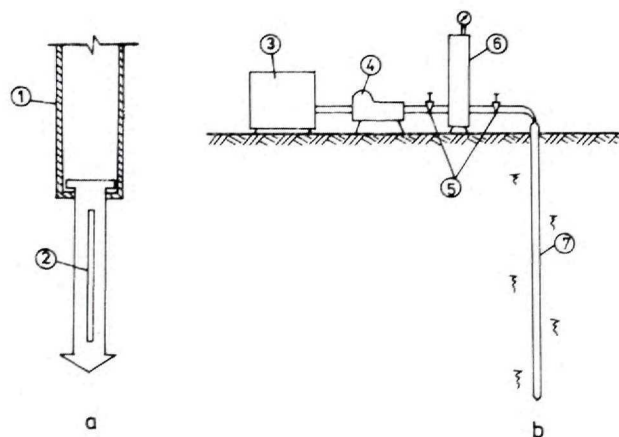
Obr. 5. Charakter rozšírenia roztoku v smere od injekčného vrtu pri injektovaní metódou porušenia (Dušanbe). a – vertikálny rez pozdĺž injektora, b – pôdorysné rezy v troch hĺbkových úrovniach. 1 – ohraničenie plochy porušenia.

Fig. 5. Character of solution penetration in direction from the injection drilling in the case of hydrofracturing (Dushanbe locality). a – vertical section along the injector, b – horizontal sections in three different depth levels. 1 – limits of the fractured area.

porušenia pochybnosti o efektívnosti tejto metódy, pretože nevedno, či jedna alebo dve z nich budú usmernené pod základ objektu. Efektívnosť injektovania porušením výrazne vzrastie, ak sa nájde spôsob orientovania plôch porušenia.

Usmernené hydraulické porušenie zemin

Pri rozpracovaní metodiky injektovania s usmerneným porušením sa vychádzalo z myšlienky primárneho vytvorenia plôch porušenia v určenom smere. Na tento účel sa odskúšalo niekoľko konštrukcií injektorov. V sprašových zeminách sa používal injektor, schéma ktorého je znázornená na obr. 6a. Technologickú schému injektáže zobrazuje obr. 6b.

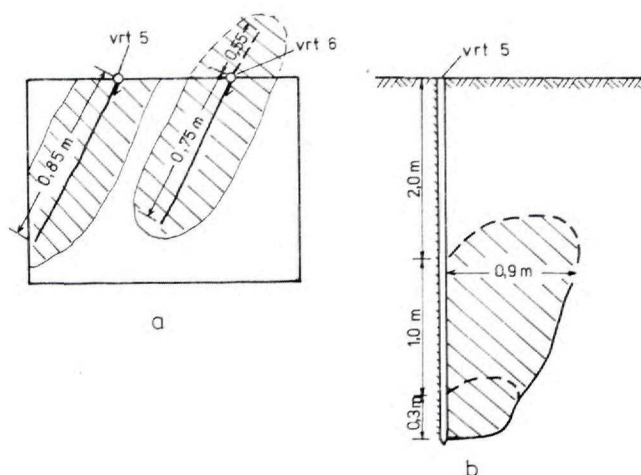


Obr. 6. Schéma injektora pre metódu usmerneného hydraulického porušenia v sprašoidných zeminách (a) a postup injektovania metódou usmerneného porušenia (b). 1 – rúrka, 2 – štrbina, 3 – nádoba s roztokom, 4 – čerpadlo, 5 – kohútiky, 6 – špeciálna nádoba, 7 – vrt.

Fig. 6. Scheme of cementation in the case of oriented hydrofracturing in loess foundation soil (a) and the advance of cementation process using oriented hydrofracturing (b). 1 – tube, 2 – slot, 3 – solution reservoir, 4 – pump, 5 – taps, 6 – special tank, 7 – borehole.

Nevyhnutným prvkom technologickej schémy je doplnková nádoba – vzdušník, v ktorej sa v závislosti od potrebnej dĺžky primárneho porušenia vytvára znížený alebo zvýšený tlak.

Pri injektáži sa dodržiava nasledujúci postup. Pomocou pneumatického kladiva sa do potrebnej hĺbky zatlačí injektor so štrbinou orientovanou v určenom smere. Potom sa uzatvorí kohútik 4 a nádoba 3 sa zaplňa roztokom (jeho objem dosahuje 20–100 l), pomocou čerpadla sa v nádobe 3 vytvorí tlak 5 až 10-krát prevyšujúci medznú hodnotu. Potom sa vypína čerpadlo 1, uzatvára sa kohútik 2 a otvára sa kohútik 4. Roztok z nádoby – vzdušníka – prechádza do zóny injektovania, kde sa nárazom počiatočného objemu kvapaliny deformujú steny vrtu v určenom smere. Ďalšie injektovanie sa vykonáva pri menšom než medznom tlaku. Nevyhnutnou pod-



Obr. 7. Schéma prieniku roztoku pri usmernenom porušení na skúšobnej lokalite (Dušanbe). a – rez v pôdoryse v hĺbke 2,5 m, b – rez pozdĺž injektora pri vrte č. 5.

Fig. 7. Scheme of solution penetration in the case of oriented fracturing on the Dushanbe test locality. a – horizontal section in 2.5 m depth, b – section along the injector at the borehole No. 5.

TAB. 3

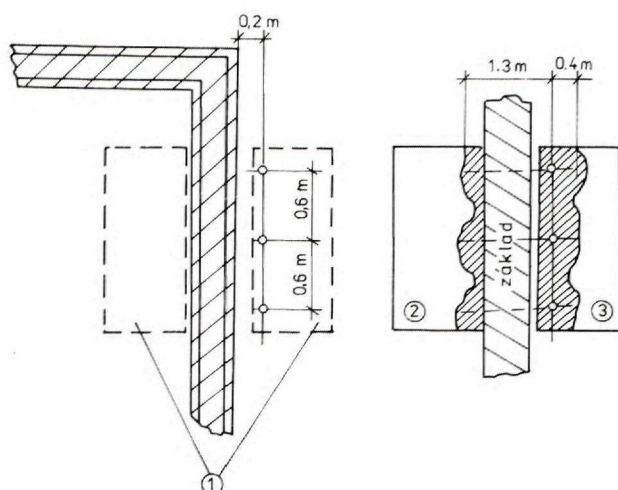
Výsledky pokusnej injektáže v sprašových zeminách v Dušanbe
Results of experimental cementation in loess soil in Dušanbe

1	2	3	4	5	6	7
1	1	2–3	1,5	0,05–0,1	100	0,60
2	1	2–3	1,5	0,05–0,1	100	1,10
3	1	2–3	1,5	0,05–0,1	100	0,95
4	1	2–3	1,0	0,05–0,1	100	0,75
5	2	2–3	1,5	0,05–0,1	100	0,85
		3–3,3	3,0	0,05	100	0,76
6	2	2–3	1,5	0,05–0,1	100	
		3–3,3	3,0	0,05	100	1,20
7	2	2–3	2,0	0,05–0,1	100	
		3–3,3	3,0	0,05	100	

1 – číslo vrtu, 2 – počet injektovaných úsekov, 3 – hĺbka úseku injektovania v m, 4 – tlak (MPa) pri porušení, 5 – tlak (MPa) pri injektovaní, 6 – množstvo vtláčaného roztoku (l), 7 – dĺžka poruchy v hĺbke 2,5 m (v m).

mienkou injektovania je neprítomnosť kvapaliny vo vrte do okamihu hydraulického porušenia.

Vypracovaná metóda injektovania sa overovala na skúšobnej lokalite v Dušanbe. Silikatisovali sa tu sprašové zemin v 7 vrtoch pri tlaku porušenia od 1 až do 3 MPa (tab. 3). Keď došlo k porušeniu, roztok vodného skla sa vtláčať tlakom od 0,5 do 0,1 MPa. Na obr. 7 je schematicky znázornené rozšírenie roztoku v niektorých vrtoch. V troch vrtoch sa injektovanie vykonalo v dvoch hĺbkových úsekoch. Dĺžka prvého úseku zospodu bola 30 cm, druhého 1,0 m. Orientácia plochy porušenia vo vrchnom úseku sa nevykonala. Vo všetkých troch vrtoch sa prejavila výrazná kontinuita orientácie porušenia. Na základe tejto skutočnosti sa sformuloval dôležitý záver,



Obr. 8. Metóda usmerneného porušenia použitá na spevnenie zeminy v podzákladi budovy. a – usporiadanie injekčných vrtov, b – forma objemu spevnenej zeminy. 1 – kopané sondy, 2 – forma objemu spevnenej zeminy v hĺbke 4 m od dna základu, 3 – v hĺbke 1 m.

Fig. 8. Method of oriented fracturing applied for cementation of foundation soil beneath a building. a – arrangement of injection boreholes, b – shape of cemented subsoil. 1 – borrow pit, 2 – shape of cemented soil in 4 m depth, 3 – the same in 1 m depth.

že na usmernené porušenie pozdĺž celého vrtu postačuje orientovať štrbinu iba v spodnej etáži injektovania.

Skúšobná injektáž ukázala, že pri tlaku okolo 2 MPa a primárnom objeme 30 l možno získať plochy porušenia dĺžky až do 1,2 m. Všesmerné nasýtenie zeminy roztokom je preukázateľné do vzdialenosti 10 až 30 cm od plochy porušenia (pre skúšaný typ zemín).

Po uspokojivých výsledkoch na skúšobnej lokalite sa použilo injektovanie s usmerneným porušením pri spevnení sprašových zemín pod základmi niekoľkých budov v Dušanbe. Pre tieto zeminy je charakteristická nízka priepustnosť roztoku vodného skla (tab. 1), a tak snaha použiť zaužívaný spôsob nasycovania pri tlakoch nižších ako medzný nebola úspešná.

Pod jednou z budov (4-poschodový obytný dom) sa po vykonaní injektáže v prvých troch vrtoch vykopal

sondy z vonkajšej i vnútornej strany budovy. Na obr. 8 je znázornená schéma rozmiestnenia vrtov pri vonkajšej stene a schéma formy spevnenej zeminy v hĺbke 4 m od dna základovej škáry. Injektovanie roztokom vodného skla hustoty $1,13 \text{ g cm}^{-3}$ sa urobilo v úsekoch dĺžky 2 m zospodu hore injektorom usmerneného porušenia. Pred injektovaním sa každý úsek usmernene porušil vtlačení 30 l roztoku s prietokom 360 až 400 l za minútu, pri tlaku 0,8 MPa. Pri spustení sa injektor orientoval tak, aby bolo predpokladané porušenie usmernené pod vnútrojšok domu. Orientácia injektora sa dodržiavala iba pri injektovaní najnižšej etáže. Po hydraulickom porušení sa roztok vtlačal tlakom 0,01 až 0,02 MPa a jeho spotreba predstavovala 500 až 700 l na jeden úsek. Čas injektovania nepresahoval 30 minút.

Vnútri monolitu spevnenej zeminy odkrytého v kopaných sondách, vyhlbených po injektovaní (obr. 8b), sa zistili tri vertikálne paralelné plochy porušenia, prebiehajúce v smere od injekčných vrtov. Celková dĺžka každej poruchy bola 1,7 m (pod domom 1,3 m, v opačnom smere 0,4 m).

Mocnosť spevnenej zeminy dosahovala 30 cm od plôch porušenia vo všetkých smeroch.

Po úspešnom prevádzkovom overení našlo injektovanie s usmerneným porušením široké použitie pri spevňovaní sprašových zemín tvoriacich základy porušených budov v Dušanbe. Použitím tejto metódy sa znížila spotreba drahého chemického roztoku a skrátil sa čas spevňovania, čo sa prejavilo v znížení celkovej ceny prác priemerne o 30 % v porovnaní so štandardnou technológiou. Navrhnutá metóda nevyžaduje spevňovanie z vnútornej časti poškodených budov.

Literatúra

- Cambefort, H. 1964: Injection des soil. Tome 1. *Principes et methods*. Paris, 224 s.
- Sergejev, V. I. a Šimko, T. G. 1986: Vlijanie sostava i struktury ljossovyh gruntov na ich vodopronicajemost i pronicajemost po silikatnomu rastvoru. *Inženernaja geologija*, 2, 58–70.
- Sergejev, V. I. a Šimko, T. G. 1979: Roľ sorbcii pri silikatizácii ljossovyh gruntov. In: *Progressivnyje rešenija v projektirovanii i proizvodstve specialnyh gidrotehničeskich rabot*. *Naučnyje trudy Gidroprojekta, Moskva*, 6–9.

Peculiarities in chemical cementation of low-permeability soils

In cases when improvement of foundation soil properties is needed in the practice, there are frequent cases of soils devoid of appropriate permeability for treatment by chemical cementation (in cases when the filtration coefficient is less than $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Permeability coefficient values of soils composed of loess and some sands for water and water glass solution used frequently as base of various injection solutions are in Tab. 1. It appears that the value of filtration coefficient may decrease in such soils 2 to 20 times in relation with mechanical texture and rock structure in question. In cases of low permeabilities there are methods of radial penetration injection used currently in soils which, however frequently appear useless or even impossible. Therefore hydrofracturing is proposed as a suitable met-

hod for such cases developed at the Moscow State University.

Scheme of solution penetration in the case of radial saturation compared with hydrofracturing is shown on Fig. 3. The obtained differences of solidification grade are in Fig. 4. Also a method of oriented hydrofracturing is available with technological scheme indicated by Fig. 6. The used procedure enables cementation beneath existing building facilities, even in cases when these are in crashed state, because drillings and cementation are applied solely from the external side of foundations (Fig. 8). The method requires lesser amounts of expensive chemical solution (comparing Figs. 1 and 8) and shorter time for cementation what is also expressed by lesser total expenses.