

Výpočet filtračného prúdenia podzemnej vody

KAROL HARTEL — IVO KAZDA*

Решение некоторых задач фильтрационного тока подземных вод с помощью вычислительной техники

В статье рассматриваются возможности решения некоторых плоскостных задач установившегося и неустановившегося течения подземных вод с применением системы программ ФЭФИ при помощи ЭЦВМ. Система программ была разработана в рамках исследовательской задачи 'Применение вычислительной техники при проектировании сооружений'. Для решения такого типа задач применяется метод конечных элементов позволяющий внести в расчеты более сложную форму области фильтрации, неоднородный и анизотропный состав поровой среды и сложные краевые условия.

Solution of some ground water filtration flow problems by computer

The paper informs on the possibilities of solving planar problems of ground water steady and unsteady flow by using the FEFI computer system of programs. The system of programs was developed within the frame of the research task „Use of computer in the design of constructions“. The solution of such problems uses the method of final elements, enabling introduction into the calculation a more complicated geometrical form of seepage area, non homogeneous and anisotropic composition of porous environment and complicated marginal conditions.

Na výpočet prúdenia podzemnej vody sa používajú najmä diferenčné metódy a najnovšie metóda konečných prvkov (МКР), ktorá umožňuje ľahšie zaviesť do výpočtu zložitejší geometrický tvar oblasti, nehomogénne a anizotropné zloženie pórovitého prostredia a zložité okrajové podmienky.

Výsledkom bádania filtračného prúdenia podzemnej vody je systém programov FEFI, ktorý vznikol syntézou programov určených na výpočet ustáleného tlakového filtračného prúdenia, ustáleného prúdenia s voľnou hladinou a neustáleného filtračného prúdenia.

Metóda konečných prvkov sa najskôr uplatnila pri riešení problémov mechaniky kontinua. Vo svojich počiatkoch nadväzovala na tradičné inžinierske disciplíny, najmä na stavebnú mechaniku, pružnosť a pevnosť. Neskôr sa uplatnila aj v geotechnike, a to vďaka všeobecnejšiemu vyjadrovaniu základných vzá-

* RNDr. Ing. Karol H a r t e l, Slovenské výskumné a vývojové centrum urbanizmu a architektúry, Drieňova, 829 00 Bratislava

Doc. Ing. Ivo K a z d a, CSc., Katedra hydrotechniky ČVUT, Praha.

hov. Ako najvhodnejšia sa ukázala variačná formulácia okrajových úloh. Najznámejšou rovnicou, pomocou ktorej možno riešiť aj celý rad úloh prúdenia podzemnej vody, je Leplacova rovnica. Tým sa pole možností aplikovať MKP podstatne rozšírilo a metóda sa značne zovšeobecnila.

1. Tlakové filtračné prúdenie

Vypočítat ustálené filtračné prúdenie v nestlačiteľnom nehomogénnom a anizotropnom prostredí (subrutina FEFI) je jednou z troch možností, ktoré poskytuje systém programov FEFI. Možno ho použiť predovšetkým pri stanovení vztlatku, ktorým prúdiaca podzemná voda pôsobí na základovú škáru hydrotechnických stavieb, ako sú priehrady, vodné elektrárne, hate a pod. Vzhľadom na svoju všeobecnosť MKP umožňuje riešiť aj také úlohy, ktoré nemožno splniť analytickými a klasickými numerickými metódami a ktoré spôsobujú veľké ťažkosti i pri použití analógových metód.

Zadaním zodpovedajúcich Dirichletových okrajových podmienok možno matematicky modelovať účinok vonkajších aj vnútorných potrubných drénov, pričom možno ľahko zaviesť aj čiastočné zlyhanie ich funkcie. Rovnako možno ľahko modelovať aj účinok trhlín v tesnení kanálov, injekčnej clone alebo v podzemnej stene, ktorými preniká voda pod plným alebo čiastočne zníženým hydrostatickým tlakom.

Algoritmus výpočtu tlakového filtračného prúdenia, pomocou ktorého bol zostavený program, resp. subrutina FEFI 0 (I. K a z d a 1975), je celkom analogický s algoritmom riešenia lineárnych úloh mechaniky kontinua metódou konečných prvkov, súčasne tvorí jadro zložitejších algoritmov určených na výpočet ustáleného a neustáleného filtračného prúdenia s voľnou hladinou.

2. Ustálené filtračné prúdenie s voľnou hladinou

Pri takomto prúdení sa v praxi vyskytuje len Dirichletova (stabilná) okrajová podmienka a Neumanova (nestabilná) okrajová podmienka. Filtračné prúdenie s voľnou hladinou (subrutina FEFI 1) sa rieši pomerne zložito, pretože poloha voľnej hladiny nie je vopred známa. Preto sa niektorí autori pokúsili nájsť metódu spočívajúcu v dvojstupňovom iteračnom procese, pričom sa na nájdenie správnej polohy depresnej krivky musia splniť dve okrajové podmienky.

Program FEFI 1 vychádza z trojuholníkových konečných prvkov s lineárnym polynómom ako náhradnej funkcie. Oblasť môže mať všeobecný tvar s hranicou tvorenou stranami trojuholníkov.

Vo vrcholoch, ktoré ležia na hranici oblasti, možno zadať hodnotu piezometrickej výšky (Dirichletova okrajová podmienka). Hranica oblasti, kde nie je Dirichletova okrajová podmienka daná, sa automaticky interpretuje ako nepriepustné ohraničenie (špeciálny typ Neumanovej okrajovej podmienky).

Program (subrutina) FEFI 1 umožňuje riešiť priesak s voľnou hladinou ľubovoľnými zemnými telesami (svahy stavebných jám, telesá sypaných priehrad, cestné násypy a pod.). Umožňuje nielen výpočet celkového priesakového množstva, ale aj piezometrickú výšku v každom vrchole a zložky filtračných rýchlostí v každom prvku.

3. Neustálené filtračné prúdenie s voľnou hladinou

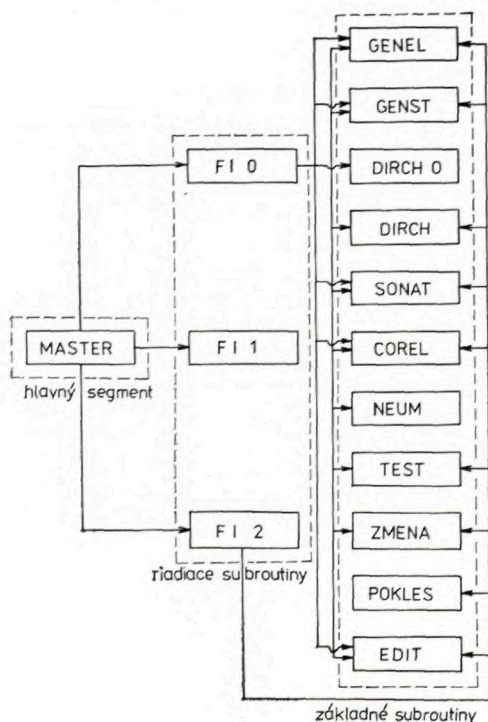
Neustálené filtračné prúdenie s voľnou hladinou (subrutina — program FEFI 2) predstavuje pomerne ťažký problém najmä vtedy, ak má skúmaná oblasť všeobecnejší tvar a priepustné prostredie je nehomogénne a anizotropné. V takom prípade sa najčastejšie používajú experimentálne metódy. Numerické riešenie sa v podstate obmedzuje na MKP, ktorá ako jediná vyhovuje pre inžiniersku prax.

Preto pri tomto probléme a zostavení algoritmu programu (subrutiny) FEFI 2 bolo výhodné nahradiť počiatočnú úlohu variačným problémom (I. K a z d a 1973, 1975).

Pri numerickom výpočte neustáleného filtračného prúdenia metódou konečných prvkov sa v podstate postupuje tak, že sa časová závislosť aproximuje postupnosťou kvázistacionárnych stavov. V každom uvažovanom stave sa nájde pole filtračných rýchlostí a z neho sa odvodí rýchlosti v uzloch, ktoré ležia na aproximácii voľnej hladiny. Z týchto rýchlostí sa určí nová poloha voľnej hladiny pre nasledujúci stav, ktorý nastane po uplynutí časového intervalu Δt_i .

Program FEFI 2 je určený na numerické riešenie nestacionárneho filtračného prúdenia s voľnou hladinou MKP. Predpokladá sa, že priepustné prostredie je homogénne a anizotropné a pri poklese hladiny podzemnej vody nenastávajú objemové zmeny.

V programe sa používajú trojuholníkové konečné prvky. Vo vrcholoch, ktoré ležia na hranici oblasti, možno zadať hodnotu piezometrickéj výšky.



4. Štruktúra systému programov FEFI

Systém programov FEFI vznikol syntézou postupne vyvíjaných štandardných programov FEFI 0, FEFI 1, FEFI 2. Je určený na výpočet ustáleného tlakového filtračného prúdenia i ustáleného prúdenia s voľnou hladinou a na riešenie neustáleného prúdenia vyvolaného v zemnom telese náhlým poklesom hladiny. Systém FEFI má segmentovú štruktúru umožňujúcu viacnásobne využiť väčšinu subrutín (obr. 1).

Hlavný segment (MASTER) systému FEFI identifikuje makroinštrukciu a typ úlohy. Pri ustálenom tlakomom filtračnom prúdení sa vyvoláva riadiaca sub-

Obr. 1. Hrubá bloková schéma systému programov FEFI

Fig. 1. Gross block scheme of the FEFI system of programs.

rutina FI 0, pri ustálenom prúde s voľnou hladinou riadiaca subrutina FI 1 a pri neustálenom filtračnom prúde s voľnou hladinou FI 2. Každá z uvedených subrutín vyvoláva ďalšie základné subrutiny podľa riešeného problému.

Základných subrutín je v systéme FEFI jedenásť. Napr. pri tlakovom filtračnom prúde sa najskôr čítajú a generujú prvky a uzly subrutinami GENEL a GENST (obr. 1). Potom sa pomocou subrutiny DIRCHO zavedú okrajové

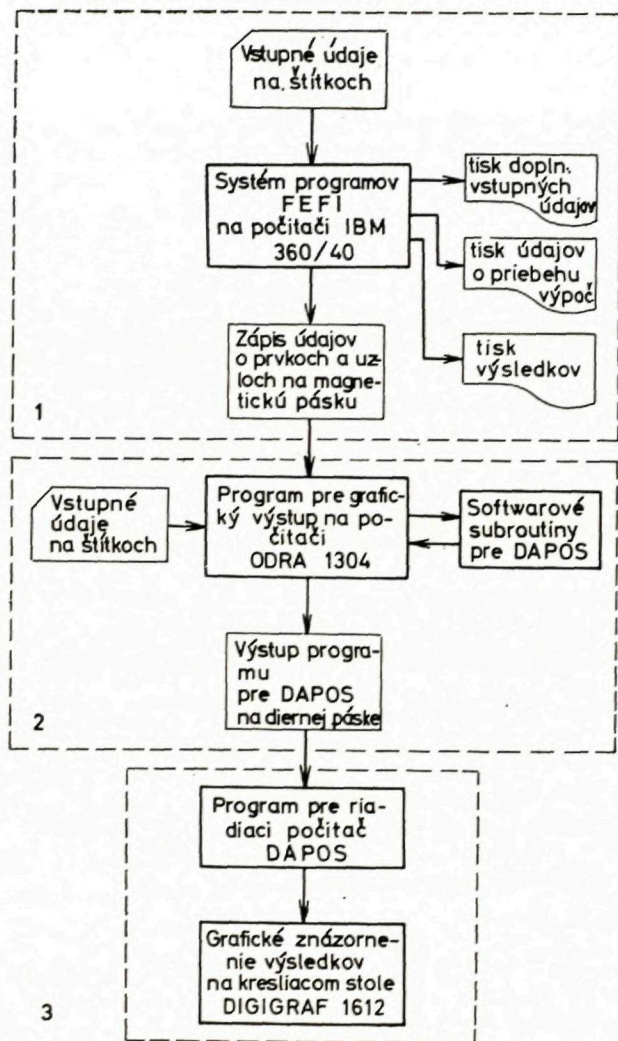
podmienky Dirichletovho typu. Zostaví sa subrutina SOMAT, matica sústavy výsledných rovníc a subrutinou COREL sa táto sústava rieši. Výsledky výpočtu sa vytlačia subrutinou EDIT v prehľadných stránkových tabuľkách. V prípade tlakového prúde je teda algoritmus výpočtu veľmi jednoduchý.

Podobný algoritmus je aj pri ostatných problémoch tak, ako sme to stručne opisali v časti 2 a 3.

5. Automatická kontrola vstupných dát a zhodnocovanie výstupných údajov. Příklad výpočtu

Pri programoch zostavených podľa metódy konečných prvkov je veľmi dôležitá príprava a kontrola vstupných údajov, ktorých je zvyčajne veľa.

Pri použití systému FEFI má programátor znížiť počet vstupných údajov, ak sa mu podarí nájsť vhodný spôsob, ako doplniť chýbajúce údaje výpočtom v rámci programu (generovanie prvkov). Automatické generovanie prvkov (údajov) má veľký význam: urých-



Obr. 2. Hrubá bloková schéma spracovania výsledkov výpočtu a ich grafického zobrazenia vynášačom off-line

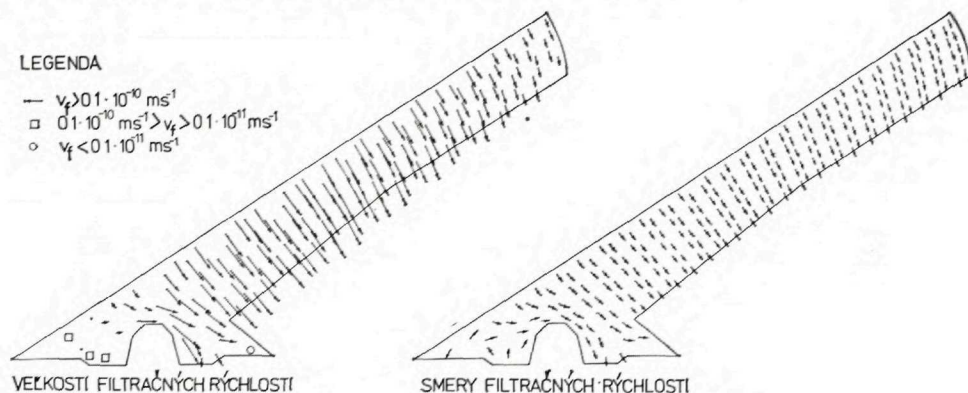
Fig. 2. Gross block scheme of calculation result processing and its graphical presentation by the off-line plotter.

luje prípravu vstupných údajov, znižuje nároky na dierovanie, obmedzuje vznik chýb, šetrí stroječas.

Počas vývoja tohto systému FEFI a jeho praktického využívania sa osvedčilo robiť jednoduchú kontrolu počítačom a zadanú sieť dať vykresliť vynášačom. Kontrolou pomocou grafického zobrazenia možno ľahko a rýchlo zistiť aj inak ťažko zistiteľné chyby.

Za tým účelom bol v rámci spomínanej štátnej úlohy vyvinutý súbor programov GRAF (K. Hartel) určený na kontrolu vstupných údajov a na grafické spracovanie výsledkov výpočtov uskutočnených pomocou systémov FENL a FEFI. Na to však okrem počítača treba mať kresliaci stôl s príslušným malým riadiacim počítačom. (Na CUA je na tento účel k dispozícii počítač TPA 70 a kresliaci stôl DIGIGRAF.) Postup takéhoto výpočtu aj s grafickou kontrolou a hodnotením je schematicky znázornený na obr. 2 (postup off-line).

Prednosti opisovaného systému programov FEFI a GRAF presvedčivo dokumentujú nasledujúce príklady z praxe. Na obr. 3 je príklad použitia uvedených systémov pri riešení filtračného prúdenia tesniaceho jadra zemnej hrádze Žlutice (I. Kazda 1976). Na základe systému GRAF sú pomocou DIGIGRAFU vynesené smery a veľkosti filtračných rýchlostí (obr. 3). V ťažisku každého prvku sa vyniesol vektor, ktorý má smer a vo zvolenej mierke zobrazuje ich veľkosť. Ak je filtračná rýchlosť menšia ako zadaná hranica, prvok sa automaticky vynechá. Takéto spracovanie výsledkov dáva veľmi dobrú predstavu o namáhaní tesniaceho jadra prúdovým tlakom.



Obr. 3. Priesak tesniacim jadrom hrádze vodného diela Želivka
Fig. 3. Seepage through the tightening core of the VD Želivka dam

Problém filtračného prúdenia podzemnej vody sa rieši aj naďalej v rámci štátnej úlohy P04-521-293-08. Je zameraný na praktickú aplikáciu automatizovaného výpočtu priestorových úloh pri zvolených okrajových podmienkach.

Doručené 31. 3. 1977

Odporúčil I. Mucha

LITERATÚRA

Hartel, K. 1975: Podsystem Základové konštrukcie. Záverečná správa čiastkovej úlohy 08 štátnej výskumnej úlohy 08 štátnej výskumnej úlohy P04-521-086 Využitie výpočtovej techniky v projektovaní stavieb.

- Kazda, I. 1973: Nestacionárne prúdenie podzemnej vody v pórovitom prostredí (Systém programov FEFI). Etapa čiastkovej výskumnej úlohy P041521-086-08, pod-systém Základové konštrukcie.
- Kazda, I. 1975: Tlaková filtrácia podzemných vôd. Etapa čiastkovej úlohy P04-521-086, podsystém Základové konštrukcie.
- Kazda, I. 1976: Programy pre grafický výstup MKP. Technická správa etapy čiastkovej úlohy P04-521-086-08, podsystém Základové konštrukcie.

Solution of some ground water filtration flow problems by computer

KAROL HARTEL — IVO KAZDA

The solution of ground water filtration flow in engineering practice has the greatest justification in foundation engineering, slopes and cuts stability assessment, design of fill dam tightening and tightening elements in the dam base. Solution of such problems is often very pretentious and arduous. In many cases traditional analytical and experimental methods are not sufficient. It is why in the recent time, with the development of computer techniques to solve these problems, the numerical methods acquire an always increasing importance, mainly the method of final elements (MFE), enabling to introduce to the calculation a more complicated geometric form of a seepage area, non homogeneous and anisotropic composition of porous environment and complicated marginal conditions.

For this purpose with regard to requirements of design practice, the problem of groundwater filtration flow, as planar task, was solved within the frame of the State research task "Use of computer techniques in design practice — subsystem", "Foundation construction".

The result of these problems solution is the FEFI system of programs which came into being by the synthesis of programs:

FEFI 0 "Solution of pressure steady filtration flow".

FEFI 1 "Solution of filtration flow with unconfined waterlevel".

FEFI 2 "Solution of unsteady filtration flow with unconfined waterlevel".

In setting up individual programs and of the whole system the MFE was successfully applied. The FEFI system has a segment structure, enabling a multifold use of most subroutines (programs). The use of this system enables an automatic generation of individual elements thus quickening substantially the preparation of input data and decreasing the risk of error occurrence, saving the computer time.

For purposes of automatic check and evaluation of results of the FEFI system computation, a GRAF system of programs was also developed which draws graphically the network of ordered elements and course of individual magnitudes in the elected scale (off-line).

For purposes of practical use in solving the groundwater filtration flow, (spaces of the task) henceforth in the said research program (1977—78).

Preložil E. Bleho