Lámer Géza–Pethő Csaba–dr. Rózsa László

METRÓ-ALAGÚTFALAZATOK TERVEZÉSE SZÁMÍTÓGÉPPEL

A metrószerkezetek tervezése hosszú múltra tekint vissza. Az újabb fejlődés a korábbi évtizedekben kidolgozott eljárásokra épül. Az alagútszerkezetek méretezési módjait – a szerkezet és az azt körülvevő kőzet kölcsönhatása mértékének a figyelembevétele alapján – három csoportra osztjuk: a *szabadon deformálódó*, a *gátolt deformációjú* és a *rugalmas közegbe ágyazott* rugalmas szerkezetek méretezési módjai.

Az első csoportba azok a méretezési módok tartoznak, amelyeknél meghatározzuk a szerkezetre ható aktív terheket (hatásokat) – függőleges, vízszintes kőzetnyomás, víznyomás stb. – és ezekre a terhekre méretezzük a szerkezetet.

A második csoportba sorolható módszerekben az aktív terheléseken kívül – a deformáció hatására fellépő – önkényesen vagy tapasztalati alapon felvett kőzetellenállást is külső teherként működtettük. Így közelítő módon vesszük figyelembe a szerkezet deformációját gátló kőzetellenállást a falazat méretezésekor.

A harmadik csoportba tartozó eljárások a kőzet és a falazat kölcsönhatása alapján méretezik az alagútszerkezetet.

Az első két csoportba sorolható eljárások durva, illetve kevésbé durva közelítések, míg a harmadik csoportba sorolható eljárások jól megközelítik a tényleges erőjátékot. Ez utóbbi módszerek általában jelentős számítási munkával járnak, elterjedésüket és fokozott alkalmazásukat a számítógépek fejlődése segítette elő.

A gépi számításra alkalmas mechanikai modellek

Az alagútfalazatok jó közelítéssel sík alakváltozási állapotban vannak. Ezért a gépi számításra használt alagútfalazat-méretezési eljárásokat két csoportra oszthatjuk:

a) Az alagútfalazatot rúdszerkezettel modellezzük.

b) Az alagútfalazatot kontinuumban – félsíkban, síkban, féltérben, térben – fekvő szerkezetként vesszük figyelembe.

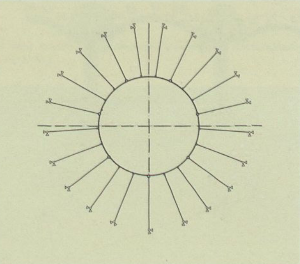
Az a) esetben az alagútfalazatot modellező síkbeli rúdszerkezetet úgy vesszük fel, hogy a szerkezet tengelyét, amely általában íves kialakítású, poligon vonallal helyettesítjük. A talaj megtámasztó hatását, amely a szerkezet talaj felé elmozduló szakaszán folyamatos jellegű, a poligon töréspontjainál felvett megtámasztó rudakkal – koncentrált megtámasztásokkal – helyettesítjük. A rúdszerkezeti megközelítés lehetővé teszi, hogy mind az egyes falazati szakaszok eltérő merevségét, mind az ágyazásnál jelentkező eltéréseket figyelembe vehessük, ezáltal a talajrétegződést viszonylag pontosan nyomon követhessük a modell kialakításánál. Az alagútfalazat és a kőzet között fellépő súrlódást a megtámasztó rudak megfelelő elforgatásával vehetjük figyelembe. A talaj megtámasztó hatásának határpontjait a számítás során megkereshetjük: először a teljes kerület mentén megtámasztó rudakat veszünk fel, ekkor azok egy része húzott rúd lesz. Ezeket iterációs eljárással kiküszöbölhetjük, és így a megtámasztott kerületrész nagyságát a szerkezet deformálódásának megfelelően határozzuk meg. Ez a művelet a programba is beépíthető.

A b) esetben a szerkezetet a fenti módon, míg a környezetet kontinuum-mechanikai modellel írjuk le. Az ilyen módszer szerint méretező számítógépes programok a kifalazott üreggel, illetve az üreggel megszakított súlyos félsík igénybevételeit és elmozdulásait határozzák meg. Így ezek a programok alkalmasak arra, hogy mind az alagútfalazat, mind a kőzet igénybevételeit, alakváltozásait, valamint a felszín süllyedéseit meghatározzuk. Ezekben a programokban a kontinuum mechanikai állapotának meghatározására a végeselem-analízist alkalmazzuk.

Alagútfalazatok számítása rúdszerkezeti program felhasználásával

A szerkezetet rudakkal helyettesítjük. A talaj rugalmas megtámasztását Winkler-típusú ágyazással írjuk le. Ezért tekintsük a rugalmas félsíkban az r sugarú kör sugarának

1. ábra. Csuklós vasbetonblokkos alagútfalazat statikai váza



a kör alakú kivágás felületén ható p nagyságú, egyenletes belső nyomás hatására létrejövő megnyúlását:

$$u = \frac{pr}{E}(1+\mu).$$

Ebből az összefüggésből az ágyazási együttható értéke:

$$k = \frac{E}{r(1+\mu)}.$$

Az ágyazást koncentrált, mindkét végén csuklósan befogott rugalmas rudakkal (ingaoszlopokkal) helyettesítjük. Ehhez a rúd rugalmassági tényezőjét, hosszát és területét úgy választjuk meg, hogy a rúd megrövidülése a p nyomás hatására azonos legyen a fent említett rugalmas félsík kör alakú kivágása sugarának megnyúlásával.

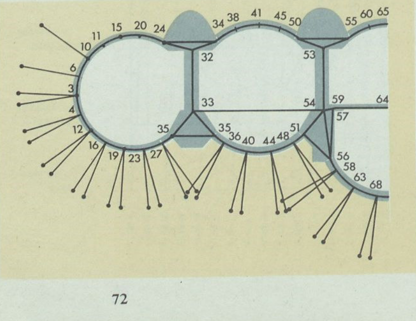
A rúdszerkezettel leírt rugalmasan megtámasztott alagútfalazat mechanikai állapotának a meghatározását a gépi számításnak jól megfelelő elmozdulásmódszerrel végezzük el.

A módszerben a szerkezetet csomópontokban kapcsolódó rudak összességének tekintjük. A rudakra ható terheléseket csomóponti terhelésekre redukálva, a hatásukra létrejövő csomóponti mozgásokat tekintjük ismeretleneknek. Ez csomópontonként három ismeretlent jelent. A feladatot az alábbi mátrixegyenlet írja le:

$$\begin{bmatrix} & \mathbf{G}^* \\ \mathbf{G} & \mathbf{F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{t} \end{bmatrix} = \mathbf{0}.$$

A **G** hipermátrix a szerkezet geometriáját, az **F** pedig a hajlékonyságát jellemzi; **G*** a **G** transzponáltja. Az **u** hipervektor a csomópontokban értelmezett csomóponti elmozdulásvektorokat, az **S** a rudakban ébredő belső erők csomóponti értékeit tartalmazza. A q a csomóponti erő jellegű, míg a **t** a kinematikai jellegű terhek csomóponti vektorainak hipervektorai. Az általános egyenlethez természetesen csatolni kell a peremfeltételek, vagyis a megtámasztások és az egyes rudakra ható terhelések konkrét alakját is.

2. ábra. Ötalagutas metróállomás keresztmetszetének statikai váza



Előállítva a szerkezet merevségi mátrixát, vagyis a

$$\mathbf{K} = \mathbf{G}^* \mathbf{F}^{-1} \mathbf{G}$$

mátrixot, a feladat megoldását a

$$\mathbf{KU} + \mathbf{Q} = \mathbf{0}$$

egyenlet megoldása adja.

A szerkezeti váz felvételénél a várhatóan húzott megtámasztó rudakat már a kiindulásnál elhagyhatjuk *(1. ábra)*. A megtámasztó rudakban húzófeszültségek nem ébredhetnek, mivel a talaj húzófeszültség felvételére nem alkalmas. Így egy-egy számítás után ellenőrizni kell, vajon a felvett megtámasztás, és a számított elmozdulások összhangban vannak-e. Minden egyes korrigálás a megtámasztási mód új elkészítését és új futtatást igényel. Ez a feladat a számítógép alkalmazásával egyszerűen megoldható. A kerületen, minden csomópontban felveszünk ingaoszlopot. A számítás során az ingaoszlopokban ébredő igénybevétel korlátozásával elérjük, hogy a húzott talajrudakat a program automatikusan – a többlet-igénybevételnek a szerkezetre való visszaterhelésével – meghatározza, és az erőjátékból a húzott megtámasztó rudakat kiiktassa. Így az elválási zónát a program automatikusan számítja.

A programmal elvégezhető az állomás szerkezetének a számítása is *(2. ábra)*. Az állomás statikai vázának felvételét megnehezíti, hogy a boltozatok hajlékonyak, és viszonylag merev hosszgerendák adják át a terheiket a pontonként elhelyezkedő alátámasztó oszlopoknak. Az UVATERV által kialakított állomási statikai váz számítógépes programozása kiválónak bizonyult, és a számítás által kapott eredmények jól írják le a szerkezet erőjátékait.

Földalatti-műtárgyak méretezése kontinuum-modell alapján

A kontinuumként modellezett testek (a műtárgy és környezete) állapotát egy eltolódásvektorral, egy alakváltozási és egy feszültségi tenzorral jellemezhetjük. Kis elmozdulások és deformációk létrejöttekor, ami az alagút és környéke vizsgálatakor jó közelítéssel fennáll, lineáris elméletet nyerünk. Az egyes állapotmezők közötti kapcsolatot az ismert Cauchy-összefüggések, az egyensúlyi egyenletek, valamint az általánosított Hooke-törvény adják meg.

A vizsgált test egyensúlyi állapotának pontos meghatározásához szükséges a test felületén az elmozdulásokat vagy a külső megoszló erőket mint peremfeltételeket megadni. Így ez egy lineáris differenciálegyenlet-rendszerre vonatkozó peremérték-feladatra vezethető vissza.

A feladat numerikus megoldásához általában a végeselem-analízist alkalmazzuk. A módszer lényege, hogy a vizsgált tartományt résztartományokra osztjuk *(3. ábra)*, a résztartományokon értelmezünk néhány függvényt, amelyek lineáris kombinációjával közelítjük a feladatban szereplő állapotmezőket. A résztartományra osztás során figyelemmel kell lenni arra, hogy azok diszkjunktak legyenek ($V_i \cap V_j = 0$), és a résztartományok lefedjék a vizsgált tartományt ($\bigcup_{i=1}^{n} V_i = V - \Omega_n$, $\Omega_n \underset{n\to\infty}{\to} 0$). A feladat peremfeltételeit ki kell egészíteni a résztartományok egymást elválasztó felületeire. Ezek a „belső" peremfeltételek biztosítják az állapotmezők folytonosságát a résztartományok határain.

A végeselem-analízisben a feladat differenciálegyenletrendszerét algebrai egyenletrendszerre vezetjük vissza. Ezt az eljárást a sík alakváltozási állapot vizsgálatán keresztül mutatjuk be, az elmozdulásmódszert, és ennek megfelelően a potenciális munka minimumelvét alkalmazva. Az UVATERV programjában végeselemnek a háromszöget tekintjük, az elmozdulásmezőt egy háromszögön belül hat szabad paraméterrel jellemezzük.

A résztartomány lokális koordináta-rendszerében értelmezett

$$\mathbf{u} = \mathbf{n}\,\mathbf{u}_{köz} = [1\ x\ y]\begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

elmozdulásfüggvényt az

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_a & & \\ & \mathbf{n}_b & \\ & & \mathbf{n}_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \mathbf{c}\,\mathbf{u}_{köz}$$

összefüggés segítségével

$$\mathbf{u} = \mathbf{n}\mathbf{c}^{-1}\mathbf{e} = \mathbf{N}\,\mathbf{e}$$

alakú kifejezésre hozzuk, ezzel áttérünk az ismeretleneknek a csomópontok egységnyi elmozdulásvektoraival kifejezett alakjára *(4. ábra)*. Ezután mátrix-alakban írjuk fel az alakváltozási tenzort:

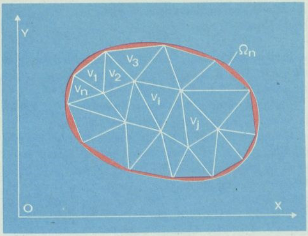
$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \\ & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{2\partial x} & \frac{\partial}{2\partial y} \end{bmatrix} \mathbf{u} = \mathbf{B}\,\mathbf{e}\,,$$

és a Hooke-törvényt

$$\sigma = \mathbf{D}\,\mathbf{E}\,,$$

ahol izotrop és ortotrop anyagokra

$$\mathbf{D}_{izo} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{\nu E}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & 2\mu \end{bmatrix};\ \mathbf{D}_{orto} = \begin{bmatrix} \frac{E_x}{1-\nu_x\nu_y} & \frac{\nu_x E_x}{1-\nu_x\nu_y} & 0 \\ \frac{\nu_y E_y}{1-\nu_x\nu_y} & \frac{E_y}{1-\nu_x\nu_y} & 0 \\ 0 & 0 & 2\mu \end{bmatrix}.$$



3. ábra. A kontinuum lehatárolt területének felosztása résztartományokra (végleges elemekre)

Az elem egyensúlyát a potenciális energia minimumából határozzuk meg. Eközben a

$$\mathbf{K}_i = \int_{V_i} \mathbf{B}^T\,\mathbf{D}\,\mathbf{B}\,dV$$

integrállal az i-edik elem merevségi mátrixát értelmezzük. Az elemre ható kinematikai – $\mathbf{E}_0$ –, mechanikai megoszló – $\mathbf{p}$ – és csomóponti koncentrált – $\mathbf{P}$ – erőket egy, a csomópontokban ható tehervektorba foglaljuk össze:

$$\mathbf{t}_i = \int_{V_i} \mathbf{B}^T\,\mathbf{D}\,\mathbf{E}_0\,dV + \int_{V_i} \mathbf{N}^T\,\mathbf{p}\,dV + \mathbf{P}\,.$$

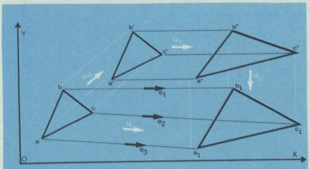
Az elemi merevségi mátrixokat és az elemen ható tehervektorokat csomópontonként összegyűjtve a szerkezet teljes egyensúlyi egyenletét nyerjük:

$$\mathbf{K}\,\mathbf{U} + \mathbf{Q} = \mathbf{0}\,.$$

Az algebrai egyenletrendszer megoldása egyúttal a csomóponti elmozdulások vektorait adja, amiből az egyes elemek, azaz résztartományok, és így az egész vizsgált tartomány mechanikai állapota meghatározható.

A végeselem-analízis a földalatti-műtárgyak számításában mind lineáris, mind nemlineáris összefüggések esetén jól alkalmazható.

4. ábra. Lokális térkoordinátákról a csomóponti elmozdulásokra való áttérés



A rúdszerkezeti program bemenő adatai, eredménytáblái

A bemenő adatoknak jellemezniük kell a szerkezet geometriáját, fizikai tulajdonságait és a szerkezetre ható terhelések értelmét és nagyságát.

Ezeknek megfelelően a bemenő adatokat – 12 különböző jelű és rendeltetésű – adatlapon adjuk meg.

Először a tervező által alkalmazott dimenziókat kell feltüntetni, majd a csomópontok megtámasztási viszonyait és koordinátájukat adjuk meg. Ezután definiáljuk a rudakat (a végpontjaikkal), megadjuk a rudak merevségét és rugalmassági tényezőjét, valamint a rudak csomópontba való csatlakozásának a típusát. Ez utóbbi lehet merev, csuklós vagy rugalmas, amikor is a kapcsolat rugalmasságát is fel kell tüntetni. Megadható a testsűrűség az önsúly számításához. A szerkezet geometriai adatait és a terheléseket egy meghatározott koordináta-rendszerben (általában 1. térnegyedben) szokás megadni. A program koncentrált és lineárisan megoszló erő jellegű, valamint hő hatására és az alátámasztások elmozdulásából létrejövő terhek figyelembevételére alkalmas. Lehetőség van igénybevétel-korlátozásra is. Ekkor meg kell adni a korlát határait, illetve a korlátozandó rudak csoportját.

A fenti bemenő adatok beolvasása után a gépi számítás a következő eredménytáblázatokat szolgáltatja: a csomópontok elmozdulásai, a rudak rúdvégi normál-, nyíróerő- és nyomatéknagyságai, valamint az alátámasztásokban ébredő befogási erők és nyomatékok értékei.

A kontinuum-mechanikai program bemenő adatai és eredménytáblái

A bemenő adatoknak jellemezniük kell mind a szerkezetet, mind a környezetet geometriailag is, fizikailag is. Ezenkívül a környezet és a szerkezetre ható terhelések irányát és nagyságát is meg kell adni.

Az elvégzendő számítás típusától függően a bemenő adatokat 15–20 különböző jelű és rendeltetésű adatlapon kell megadni.

Először a tervező által alkalmazott dimenziókat kell feltüntetni, majd a szerkezeten és a kontinuumon kijelölt végeselem-hálózat csomópontjainak megtámasztási viszonyait és koordinátáit adjuk meg. Ezután definiáljuk a végeselemeket, megadjuk a rugalmassági tényezőket – anizotrop anyag is alkalmazható –, valamint a testsűrűséget az önsúly számításához. Végül az elemek csomópontba való csatlakozásának a típusát tüntetjük fel. A program koncentrált csomóponti és lineárisan megoszló, valamint hő- és támaszmozgásból létrejövő terheléseket tud figyelembe venni.

A kontinuum-mechanikai elméleten alapuló program figyelembe tudja venni – elváló elem alkalmazásával – a vetők, a szakadások és a réteglapok hatását az elmozdulásmezőre, így ezekről külön bemenő adatokat kell a program számára beolvasni.

A fenti bemenő adatok beolvasása után a gépi számítás a következő eredménytáblázatokat szolgáltatja: a csomópontok elmozdulásai, az egyes végeselemek csomóponti erői és nyomatékai (rúdelem), illetve normál- és nyírófeszültségei (tárcsaelem) és az alátámasztásokban ébredő befogási erők és nyomatékok.

A számítógépes eljárás előnye

A rúdszerkezetek elméletén alapuló számítógépes program használata lehetővé teszi, hogy alagútszerkezetet többféle teherre, gyorsan méretezzünk, és így meghatározzuk a mértékadó igénybevételeket és elmozdulásokat. Ezenkívül lehetőség nyílik arra is, hogy összetett földalatti-szerkezeteket (pl. ikercső-lejtaknát, állomást) méretezzünk segítségükkel.

A kontinuum-elméleten alapuló számítógépes program alkalmazása lehetővé teszi a szerkezet vizsgálatán kívül a körülvevő talaj feszültség- és alakváltozás-állapotának a vizsgálatát, valamint a kőzet felszínsüllyedésének meghatározását is. Ezért a hálóosztás sűrűségét az eredmények elvárt pontosságának megfelelően kell megválasztani; a hatóvonal mentén, továbbá a koncentrált erő támadáspontjában csomópontot kell létesíteni. A módszer lehetőséget ad arra, hogy bonyolult geometriájú és építési technológiájú szerkezetek (pl. ötcsöves állomás) egyes építési elemeinek optimális sorrendjét meghatározzuk, mivel a végeselem-háló minden csomópontjában a program minden egyes építési állapothoz kiszámítja a hozzá tartozó csomóponti erőket és elmozdulásokat.

A számítógépes alagútszerkezet-tervezés a rendkívül bonyolult és időigényes számítási eljárások gyors és egyszerű elvégzését teszi lehetővé, lényegesen segítve ezzel a földalatti-szerkezetek tervezésének a munkáját.

Az elmúlt évek során az UVATERV a mélyépítési szerkezetek tervezési munkáinak elvégzéséhez rendszeresen alkalmazta számítógépes programjait. Így a budapesti és a calcuttai metró vonalalagútjai, állomásai és mozgólépcsői, valamint a belgrádi vasúti alagút és a békásmegyeri vízműalagút szerkezeteinek tervezésénél használták a fent ismertetett számítógépes programokat.