

MÉLYÉPÍTÉSI MÉRNÖKGEOLÓGIAI MODELLALKOTÁSOK ÉS MODELLEZÉSI LEHETŐSÉGEK ÖSSZEFOGLALÁSA

LÉBER TÍMEA* – VÁSÁRHELYI BALÁZS**

*Okl. építőmérnök. Mott MacDonald Magyarország Kft. E-mail: lebertimea@gmail.com

**Okl. építőmérnök, PhD. Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki Kar.
E-mail: vasarhelyib@gmail.com

A cikk célja, hogy a mélyépítési mérnökgeológiában, elsősorban az alagútépítésnél használatos numerikus modellezéseket bemutassa, azok előnyeit és hátrányait elemezze és ismertesse a geotechnikai modellalkotás lépéseit és kapcsolatát a mérnökgeológiai modellel. A cikk kitér a kőzetmechanikai modellezésben kulcsszerepet játszó izotrópia, homogenitás, illetve kontinuitás kérdésére is. Elsősorban kőzetmechanikai szempontból elemzi a numerikus modellalkotások lehetőségeit, de a bemutatott elméletek értelemszerűen kiterjeszhetőek a talajmechanikai viszonyokra is.

Kulcsszavak: kőzetmechanika, geotechnikai modellalkotás, numerikus modellezés, mérnökgeológia

1. BEVEZETÉS

Napjainkra a számítógépes numerikus modellezés elengedhetetlen részévé vált a mérnöki tervezésnek. A számítógépek elterjedése előtt a tervezési eljárások a korábbi tapasztalatok alapján felállított törvényszerűségeken, próbálgatásokon alapuló iterációs folyamatokon és egyéb eljárásokon alapultak. Ezek az eljárások kizárólag a megfigyeltekhez hasonló esetekben voltak alkalmazhatóak, azonban a feladatok bővülésével, az újfajta mélyépítési szerkezetek kialakításának igényei miatt a mérnökök egyre gyakrabban találkoztak olyan tervezési feladattal, amelyre vonatkozóan nem rendelkeztek korábbi tapasztalatokkal, így a némely esetben drasztikus egyszerűsítéseket követelő elméletek alkalmazása gyakran vezetett a szerkezetek túlméretezéséhez. A felszín alatti létesítmények esetében ezért egyre sürgetőbbé vált a tervezési eljárások fejlesztése, amelynek hatására a numerikus modellek igen népszerűvé váltak a mérnöki szaktervezésben.

A jelenleg használatos numerikus modellek némelyike minimális idő- és energiárfordítással is látványos eredményeket produkálhat, azonban nagyon fontos hangsúlyozni, hogy ezek az előre megírt programok felhasználóbarát alkalmazási felületük ellenére is bonyolult matematikai háttérrel rendelkeznek, így ha a tervező nincs tisztában a program egyes lépéseivel, működési elméletével, valamint

„fogyatékoságaival”, akkor ez hibás mérnöki következtetéseket eredményezhet a vizsgált feladatra vonatkozóan.

A geotechnika mint tudományág a kőzetek (értve alatta a talajokat is), illetve az azokban kialakított mérnöki létesítmények viselkedését elemzi. A valós kőzetkörnyezet azonban természetéből adódóan sokkal komplexebb, mint a mérnöki gyakorlatban alkalmazott anyagok általában. Ebből következően a tervezés alatt álló létesítmény és a kőzetkörnyezet valós viselkedésének előrejelzése (modellelés) során számos nehézség merülhet fel.

Általánosságban elmondható, hogy a geotechnikai tervezésben előforduló problémák többsége az alábbi hibaforrásokra vezethető vissza:

- Gyakori a kőzetkörnyezet izotrop anyagi viselkedésének feltételezése, ezzel ellentétben az esetek többségében az anizotrop viselkedés jellemző.
- Míg a felszín közeli talajrétegek sok esetben homogének, így kontinuumként kezelhetők, addig ez a feltételezés nagyobb mélységekben elhelyezkedő kőzetek esetében nem megfelelő, mert tagoltságuk miatt a valóságban diszkontinuumokként viselkednek.
- A kőzetmechanikai tervezések többségében a vizsgált probléma 2D-s megközelítése kifejezetten helytelen, különösen azoknál a szerkezeteknél, amelyek a síkra merőleges irányukban nagy kiterjedésűek (pl. alagutak), illetve ha az in situ főfeszültségek tengelye nem esik egybe az alagút vagy földkiemelés tengelyével. Ebből következik, hogy a tervezett létesítmény biztonságos tervezéséhez általában 3D-s vizsgálat szükséges.
- További hibaforrás lehet a nem megfelelő anyagmodell kiválasztása is.

A továbbiakban bemutatjuk a geotechnikai modellalkotás folyamatát, áttekintjük a lehetséges numerikus modellezési módszereket, ismertetjük a numerikus modellezés alapelveit és a különböző módszerek lényegét, majd tárgyaljuk, hogy milyen esetekben célszerű használatuk.

2. A KŐZETMECHANIKAI MODELL ELEMELI

A kőzetmechanikai modell részletessége a műszaki létesítmény, a földtani felépítés bonyolultságának, valamint az alkalmazás céljának függvénye. A kőzetmechanikai feladatoknál olyan modellt használunk, amelynek térbeli rendszere elsősorban a földtani felépítést követi. A kőzetmechanikai modellt megfigyelések, feltárási és vizsgálati adatok alapján, a műszaki célnak megfelelően a földtani környezet feltételezett törvényszerűségeinek figyelembevételével, mérlegelés alapján kell felállítani. A felbontáshoz szükséges határok meghúzósa általában igen szubjektív, mert a határok felvételét befolyásolja a létesítendő műtárgy mérete, a mű-

2. táblázat. Homogenitás, izotrópia és folytonosság a kőzetmechanikai kőzetmodell rendszerében (Kertész – Vásárhelyi 2006)

HOMOGENITÁS					
Mérlegelési szempont	Földtani formáció	Kőzet-test	Kőzet-tömb	Kristályos kőzetalkotó	Alaktalan kőzetalkotó
Földtani					
Települési		<i>homogén</i>			
Tagoltsági	<i>heterogén</i>				
Kőzettani					
Anyagszerkezeti					
IZOTRÓPIA					
Mérlegelési szempont	Földtani formáció	Kőzet-test	Kőzet-tömb	Kristályos kőzetalkotó	Alaktalan kőzetalkotó
Földtani					
Települési		<i>izotrop</i>			
Tagoltsági					
Kőzettani	<i>anizotrop</i>				
Anyagszerkezeti					
FOLYTONOSSÁG					
Mérlegelési szempont	Földtani formáció	Kőzet-test	Kőzet-tömb	Kristályos kőzetalkotó	Alaktalan kőzetalkotó
Földtani					
Települési		<i>folytonos</i>			
Tagoltsági	<i>nem-folytonos</i>				
Kőzettani					
Anyagszerkezeti					

A kőzetmechanikai modellben az egyes modellelemek megítélését a homogenitás-inhomogenitás, valamint izotrópia-anizotrópia szempontjából a 2. táblázatban szemléltetjük. Az alábbiakban Gálos és Kertész (1981) ajánlásait figyelembe véve mutatjuk be, hogy a kőzetmechanikai modellelemek mikor tekinthetők homogénnek, izotropnak, valamint folytonosnak, melyet később Kertész és Vásárhelyi (2006) fejlesztett tovább.

Elvileg minden kőzetmechanikai modellelem heterogén és anizotrop. A kőzetmodell a feladat rendszerében akkor tekinthetjük homogénnek (kvázi-homogénnek), ha a feladat nagyságrendjében a homogenitást zavaró tényezők elhanyagol-

hatók. Hasonlóan az izotrópia is általában a műszaki sajátosságok szerint értelmezett kvázi-izotrópia. E tényezők különbözően értelmezhetőek földtani, települési, tagoltsági, kőzettani és anyagszerkezeti szempontból.

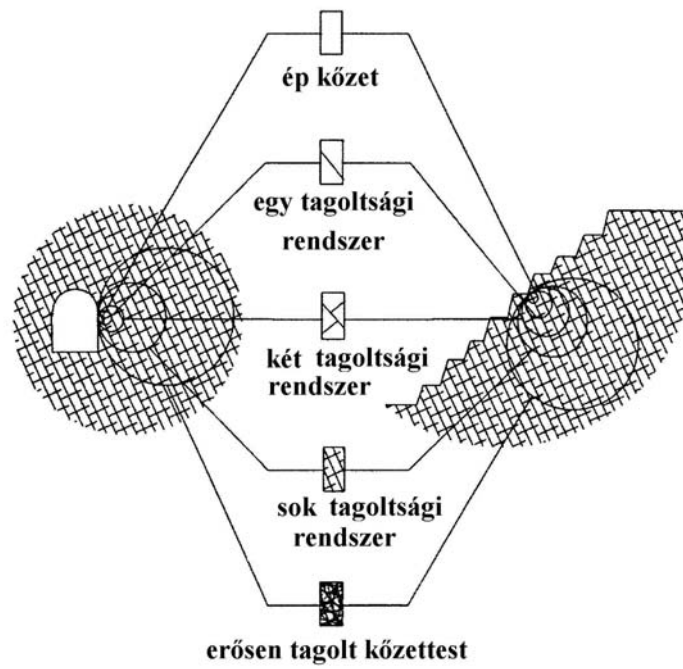
Egy földtani formáción belül földtani szempontból minden modellelem homogén, település szempontból csak a kőzettest és az annál kisebb modellelemek azok. Tagoltsági szempontból a kőzettest lehet homogén (tagolatlan vagy egyenletesen tagolt) vagy heterogén; a kőzettömb és a kisebb modellelemek tagolatlanok, így e szempontból homogének. Kőzettani szempontból a kőzettestek (és a kisebb modellelemek) általában homogének, csak kivételes esetben heterogének. Anyagszerkezeti szempontból homogénnek csak a szabályos elrendezésű atomhalmaz, a kristály tekinthető, az alakatlan kőzetalkotó, valamint az összes többi modellelem e szempontból már heterogén.

Az izotrópia vizsgálata során a földtani formációt minden szempontból anizotropnak tekinthetjük, a kőzettest földtani és települési szempontból lehet izotrop is, e szempontból a kisebb modellelemek izotropok. Tagoltsági anizotrópia csak a kőzettestben és a nagyobb modellelemekben; míg kőzettani szempontból anizotrópia (pl. rétegzettség) már a kőzettömb léptékében is értelmezhető.

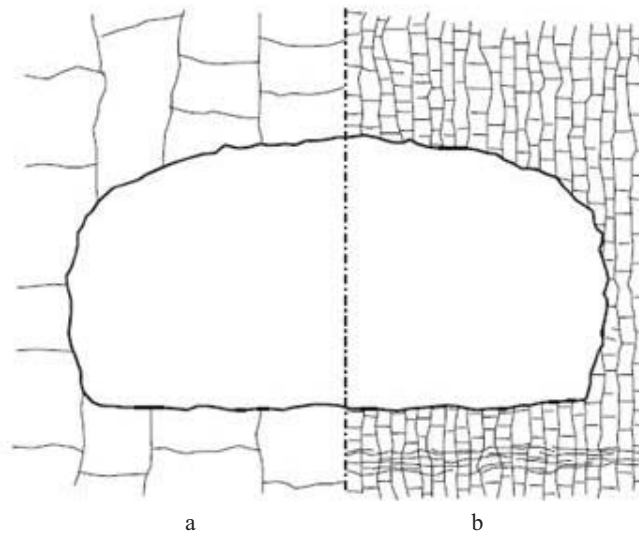
A földkéreg térelemeit általában kontinuumnak tekinthetjük, így a folytonosság érvényesülését csak egyéb szempontból vizsgáljuk, ahol a folytonosság megszakadása alatt a vizsgált szempont szerinti hirtelen változásokat értjük. Így települési szempontból a formáció, tagoltsági szempontból a kőzettest és a formáció már nem tekinthető folytonosnak, kőzettani és anyagszerkezeti szempontból a kőzettömb folytonossága sem mindig áll fenn. Bray (1967) mutatta ki elsőnek, hogy abban az esetben, ha a tagoló-felületek száma meghaladja a 10-et, a kőzettest viselkedése csupán 5%-ban tér el a valódi homogén és izotrop viselkedéstől. Hoek és Brown (1980) bebizonyították, hogy a homogenitás igen erősen függ a próbatest méretétől, azaz a legheterogénebb kőzettestből is kivehető homogén minta. Belátható, hogy a kőzettest csak abban az esetben tekinthető homogénnek, ha kevesebb, mint két tagoltsági rendszert tartalmaz, vagy ha teljesen feltöredezett (azaz több tagoltsági rendszert tartalmaz). E két helyzet között a kőzetmechanikai modellezés igen körülményes annak inhomogén viselkedése miatt. A fentieket mutatja be a 2. ábra.

Abban az esetben, ha a létesítmény kőzetkörnyezete egy vagy két tagoltsági rendszert tartalmaz, akkor mechanikai viselkedését homogén kőzettestként kezelni nem lehet.

A 3. ábra alagút esetében mutatja be a homogenitás kérdését. A blokkos, kőzettömbökből álló kőzettest viselkedése csak egyedi kőzettömbök viselkedésével írható le, míg a feltöredezett, több tagoltsági rendszert tartalmazó kőzettest már homogenizálható. Ez természetesen azt is jelenti, hogy mint ahogy a későbbiekben látni fogjuk, más-más módszerrel kell az alagutat modellezni.

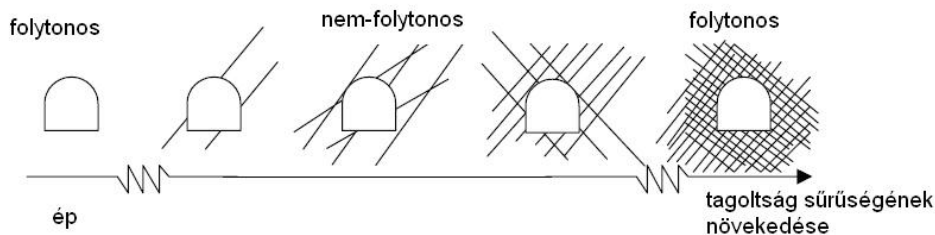


2. ábra. Kőzetkörnyezet osztályozása a tagoltsági rendszerek száma szerint (Hoek 1994)

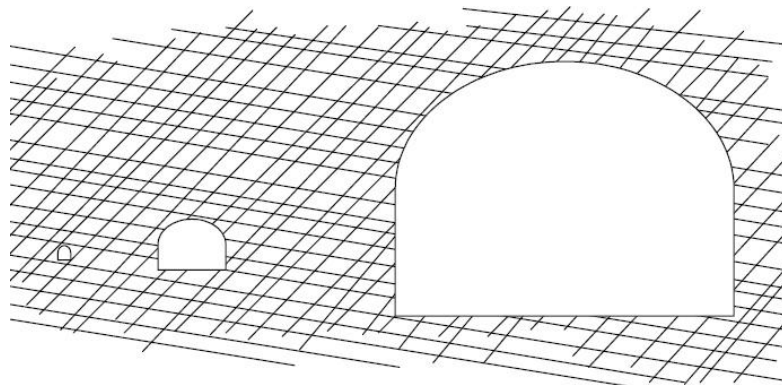


3. ábra. Példa a blokkos (a) és a feltöredezett (b) kőzettetekre az alagút méretének ismeretében (Barton 1990)

A homogenizáció, illetve a folytonos modell alkalmazásának lehetősége egyrészt függ a tagoltságok sűrűségétől (4. ábra), másrészt a tervezett műtárgy geometriájától, amelyre az 5. ábra mutat példát. Itt jól érzékelhető, hogy a tervezett műtárgy méretéből, geometriájából adódóan ugyanazon kőzettest esetén is változhat a probléma folytonos vagy nem folytonos modellel történő megközelítése.



4. ábra. Folytonos és nem-folytonos modellek a kőzetmechanikai modellezésnél (Edelbro 2003)

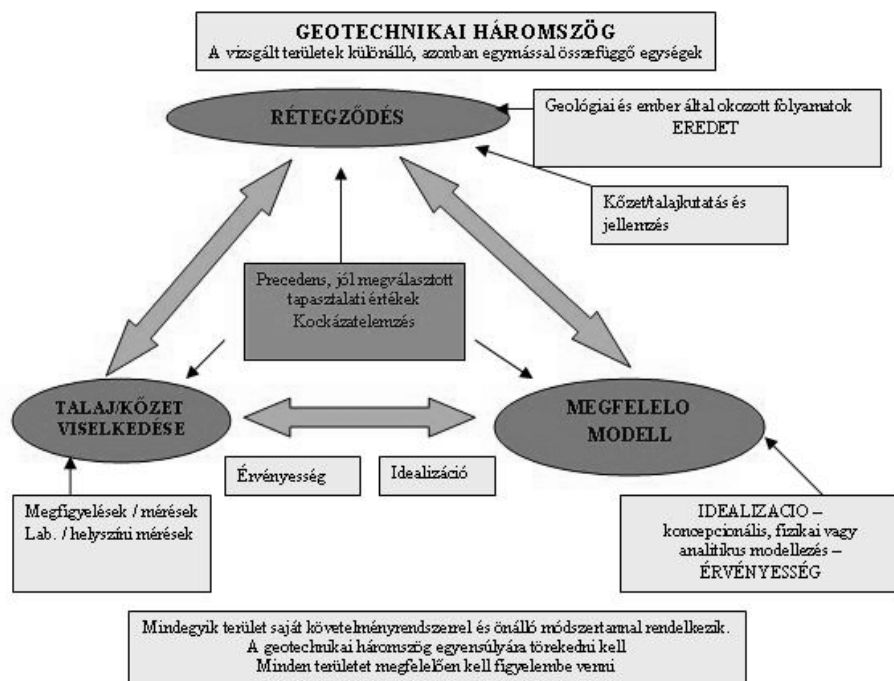


5. ábra. Folytonos, nem-folytonos, illetve folytonos kőzettest ugyanolyan tagoltsági rendszer esetén, különböző vágatgeometriák esetén (Edelbro 2003)

3. A KŐZETMECHANIKAI MODELLALKOTÁS FOLYAMATA

A kőzetösszlet megfelelő modellezése egy olyan idealizációs folyamat, amely a valós világ ismereteit gyűjti össze, egyszerűsíti le, majd rendezi egy olyan modellbe, amely alkalmas a vizsgált probléma elemzésére és lehetőséget ad a kapott eredmények felülvizsgálatára. A modellezési folyamat az eredmények érvényesítésével, ellenőrzésével zárul, amely akár egy iterációs folyamattá is alakulhat.

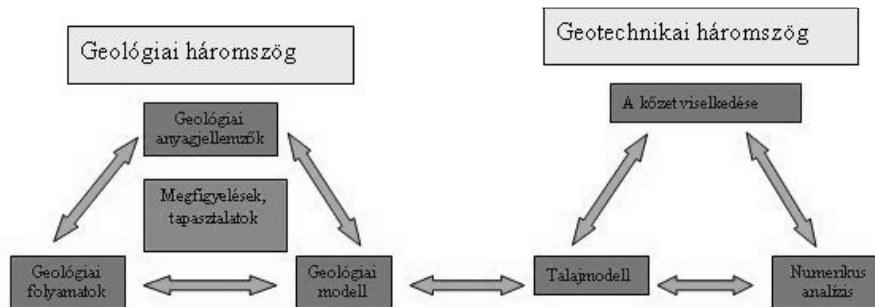
Egy olyan komplex és változó összetételű anyag esetében, mint a kőzet, a tapasztalati értékek és eljárások alkalmazása a tervezésben és kivitelezésben elkerülhetetlen. A modellezéssel kapcsolatosan lényeges hangsúlyoznunk ezen tapasztalati értékek, valamint az egyszerűsítések helyességének fontosságát. A 6. ábrán bemutatott geotechnikai háromszög nagy segítséget nyújthat ebben, ugyanis tiszta képet ad a geotechnikai gyakorlat három alapterületéről és a közöttük lévő kapcsolatról. Az ábra szerkesztésének személye és pontos ideje a nemzetközi szakirodalom alapján nem megadható. (Lásd ebben a témakörben még: Morgenstern 2000, Knill 2003 és Burlan 2007.)



6. ábra. A geotechnikai háromszög és elemei

A diagramban a kőzetkörnyezet rétegződése, a kőzet viselkedése és a megfelelően felépített modell alkotja a háromszög három csúcsát. Mindegyik jelzett terület rendelkezik saját módszertannal, illetve követelményrendszerrel, amelyeknek minden körülmények között teljesülniük kell, valamint törekedni kell ezen egységek egyensúlyára is. A geológiai modell felépítéséhez szükséges adatok gyűjtése, értelmezése és alkalmazása a geológiai-mérnöki funkció séma közepén helyezkedik el. A geotechnikai modellek előkészítésének az eredményesség érdekében követnie kell a geotechnikai háromszög felépítését.

Egy, a geotechnikai háromszöghöz hasonló diagramba rendezhető az anyagjellemzők, a kőzet viselkedése és a modell egysége, amelyek a mérnökgeológiai háromszöget határozzák meg. A háromszög belsejében a helyesen megválasztott megfigyelési, tapasztalati értékek, benyomások helyezkednek el. A mérnökgeológiai háromszög általánosabb területeket fed le, mint a geotechnikai háromszög. A két diagram közti kapcsolatot a 7. ábra mutatja (Knill 2003).

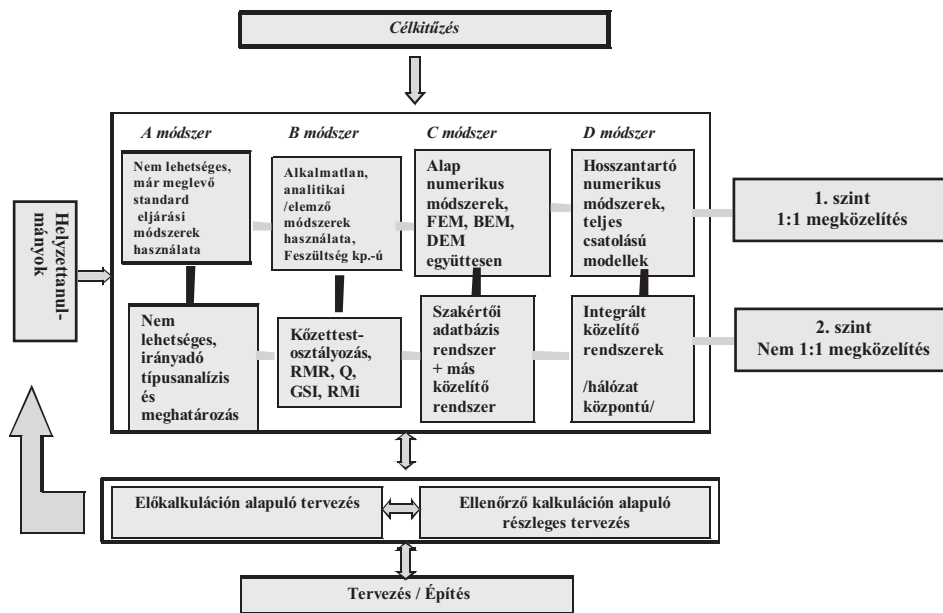


7. ábra. A mérnökgeológiai és geotechnikai háromszög közötti kapcsolat (Knill 2003)

A kőzetmechanikai modell önmagában nem alkalmazható a mérnöki gyakorlatban, mert nem határozza meg egyértelműen a tervezéshez szükséges mérnöki feltételeket. Éppen ezért elengedhetetlenül szükséges, hogy a tervezési paramétereket egy újabb mérnöki elemzés részeként egy kőzetmodellbe építsük be. A kőzetmodellt aztán hozzá kell igazítani a geotechnikai háromszög által meghatározott rendszerhez, amelyet aztán közvetlenül alkalmazhatunk egy matematikai vagy fizikai modell részeként, hogy a folyamat végén a mérnöki következtetéseket levonhassuk. A kőzetmechanikai modelltől a kőzetmodellen át a geotechnikai modellig vezető folyamat során elkerülhetetlen az egyszerűsítések alkalmazása annak érdekében, hogy a kiválasztott matematikai vagy fizikai modell a vizsgált problémát megközelítse. Az egyik modelltől a másikba történő átalakítás során feltétlenül meg kell bizonyosodnunk arról, hogy az aktuális feltételek olyan pontosan lefedik a végső analízist, amennyire csak lehetséges. Nagyon fontos megbizonyosodnunk arról, hogy a különálló egységek követelményrendszere érvényesül, hogy azokat megfelelő egyensúllyal vettük figyelembe és a különböző egységek közötti kapcsolati folyamatok megfelelőek-e.

A geotechnikai modellezéshez kapcsolódóan számos modellezési folyamatára készült (legismertebbek: Hoek és Brown 1980, Pahl és Beitz 1984, Bardy és Brown 1985, Bieniawski 1989 és 1993, Hudson 1993, Li et al. 1998). A 8. ábra Hudson és Feng által 2006-ban megalkotott, kezdeti modellezés közelítő eljárásán alapuló kapcsolati struktúráját mutatja, mely ma a kőzetkörnyezetben történő

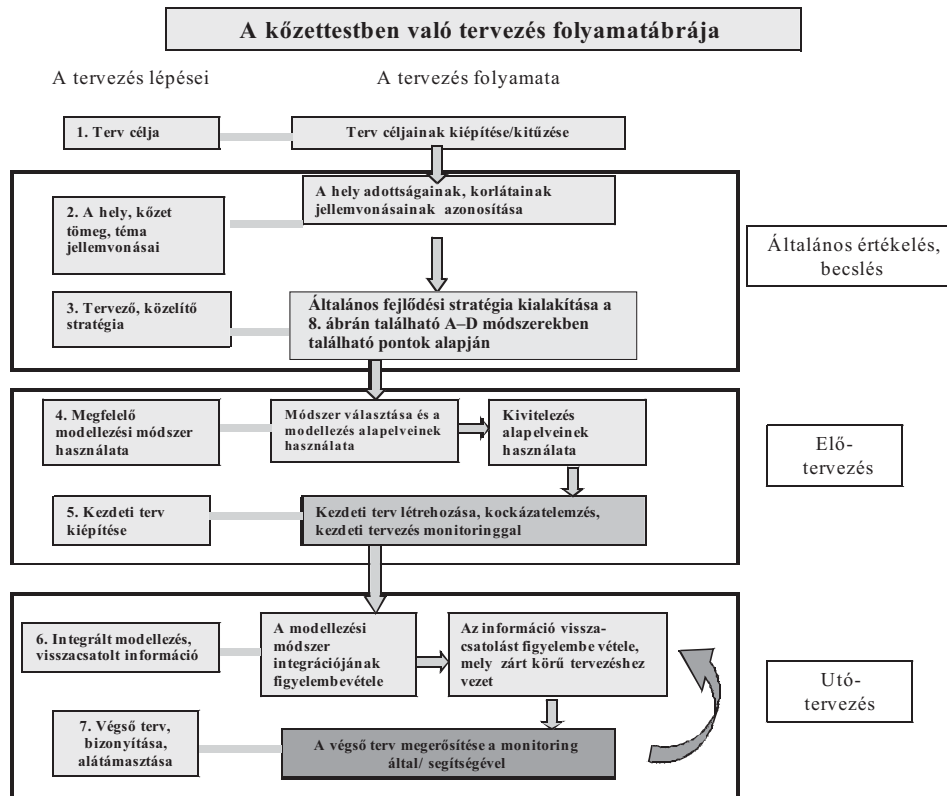
mélyépítési létesítmények tervezésekor az egyik leginkább elfogadott. Ehhez csatlakozik a 9. ábra, mely a tervezés folyamatát ismerteti. Ezen modellezési lehetőséget először Léber et al. (2008) mutatta be Magyarországon. Megjegyezzük továbbá, hogy a bemutatott modellezési eljárást a közelmúltban Feng és Hudson (2010) továbbfejlesztette, lépéseit finomította.



8. ábra. A kőzetmechanikai modellezés folyamatábrája (Hudson – Feng 2006)

A 8. ábrán ismertetett modellezési lépés nyolc kezdeti modellezési kategóriát foglal magába a projekt céljával, a helyszíni vizsgálatokkal együtt. A négy oszlop (A–D) bonyolultsági fok alapján négy különböző szintet határoz meg, balról jobbra haladva az egyszerűbbtől a bonyolult felé. Az első három kategória (A–C) a kőzetben való tervezés során széles körben elterjedt módszert mutatja. A negyedik, D kategória egy olyan kiterjesztett, összehangolt modellezési módszer, amely jelenleg még kidolgozás alatt áll.

A két sorba rendezett nyolc módszer a modellezésben használt két fő irányvonalat képviseli. A felső sorban a teljes méretarányú, első szintű megközelítések a modellezés a geometria és az operációs mechanizmus 1:1 arányú leképzésére törekszik. A második, alsó szint módszerei nem veszik közvetlenül figyelembe a geometriát és a működési mechanizmust, tehát a teljes méretarányú leképzéstől eltérően alkalmaznak. Például egy hálózati rendszer technikában a csomópontok



9. ábra. A kőzettestben való tervezés folyamatábrája (Hudson – Feng 2006)

alkalmazása szükséges, de a végeselemes megközelítéssel ellentétben az adott csomópont nem utal közvetlenül egy helyre vagy fizikai változóra.

A manapság igen elterjedt integrált megközelítés magában foglalja az elemzési módszerek párhuzamos és egymást követő alkalmazását, ezáltal összehangolva a kőzettestben való tervezést a kőzet paramétereinek figyelembevételével. Az integrált modellezés egy olyan folyamatsorból áll, amely alkalmas a megismerés – kalibráció és módosítás – újramegismerés állomásain keresztül a kőzetkörnyezet viselkedésének prognosztizálására. A probléma megoldási folyamata alkalmas arra, hogy alkalmazkodjon a geológiai körülmények, a megközelítési módok, a mechanikai paraméterek és modellek, valamint az analitikai módszerek változásához.

A modellezésben bekövetkező bármilyen változáshoz alkalmazkodó képesség nélkülözhetetlen követelmény annak érdekében, hogy a modellezés, tervezés, kivitelezés és az adatok további vizsgálatának folyamatait visszacsatoláson keresztül véghez tudjuk vinni. A modellezést úgy kell lefolytatni, hogy elősegítse a

vizsgált folyamatok megértését, különös tekintettel a bemenő és kimenő adatok viszonyára, illetve követhető lehessen a változó tényezők hatása.

4. MODELLEZÉSI MÓDSZEREK

A 8. ábrán bemutatott geotechnikai modellezés mátrix elemeit külön-külön röviden ismertetjük és elemezzük.

A: 1-es szint. Már meglévő szabványos/standard eljárások

Már meglévő tervezési eljárások csoportja. Néhány helyszíni vizsgálat újabb táblázatban vagy folyamatábrában végződhet.

B: 1-es szint. Analitikus eljárások

Analitikus számítások csoportja. Általában feszültségekkel vagy elmozdulásokkal kapcsolatos matematikai egyenletek használatát jelenti. Bemenő adat lehet például geometria, in situ feszültség, kőzetegyüttható.

C&D: 1-es szint. Alap és kiterjesztett numerikus eljárások

Numerikus modell használata a kontinuum vagy diszkontinuum megjelenítés alapján, így a kőzetkörnyezet a vizsgált földkiemeléssel explicit módon modellezett. A numerikus modell adatai és a helyszíni vizsgálatokból megállapított tönkremeneteli kritériumok bemenő paraméterként szerepelnek a feszültség-alakváltozás mező, az elmozdulás, valamint a törési/folyási határ meghatározásához. A D modellbeli eljárások tartalmazhatják a termo-hidro-mechanikai kapcsolt eljárásokat.

A: 2-es szint. Precedens típusú analízis (PTA)

Ennek az eljárásnak az alapját egy, a vizsgált feladathoz hasonló korábbi eljárás képezi. Ugyanakkor ez lehet egy kiegészítő eljárás is, amellyel egy másik eljárás eredményei ellenőrizhetőek.

B: 2-es szint. Kőzettest-osztályozás

A projekt és a helyszín bemenő adatait táblázat alapján használjuk, majd a kőzettest minőségére vonatkozóan következtetést vonhatunk le. A biztosító szerkezet tervezése empirikus összefüggéssel megkapható (lásd bővebben: Vásárhelyi 2004; Gálos és Vásárhelyi 2005).

C: 2-es szint. Alaprendszer eljárások

Általános érvényű eljárás, amelynek célja, hogy megkapjuk a rendszer legdominánsabb változóit és paramétereit. A vágatfelület bizonytalanságainak meghatározásában külső rendszer alkalmazása szükséges. A mesterséges intelligencia modellek is (pl. neurális hálózat) ebbe a csoportba sorolhatók.

D: 2-es szint. Integrált rendszereljárások

Ez a modellcsoport jelenleg még fejlesztés alatt áll. Ez egy olyan fejlődőben lévő irányzat, amely egyesíti a magas szintű technikák rendszer információit (pl. térfigyelő rendszerek, internet, a párhuzamos programozás többfunkciós kihasználása).

A modellezési folyamatot nehezíti, hogy minden egyes tervezési feladat egyedi, így felmerül a kérdés, hogy a különböző kőzetmechanikai modellhez és tervezési eljáráshoz szükséges információ mennyisége, minősége, megfelelősége hogyan ellenőrizhető. A kezdeti helyszíni vizsgálatok és az előtervezés során ezek nem mindig azonosíthatók, ezért kiemelkedően fontos az utótervezés.

A tervezés helyszíni feltáráson alapul, amely az előtervezés része, a kivitelezés alatt mért adatok feldolgozása pedig az utótervezés szerves részét képezi.

Különböző tervezési módszerek különböző előtervezést igényelnek, így a szükséges információ eljárásról eljárásra változik, amelyek közül néhány mennyiségi, néhány minőségi természetű. Az analitikus eljárások és a numerikus modellek esetében közvetlen mennyiségi összefüggés van a szükséges információ és a megoldás között, bár ezen információk természete és bonyolultsága különböző.

Az előtervezés a 9. ábrán szereplő 4. és 5. lépést képviseli, míg az utótervezés a 6. és 7. lépés. Az 1. szintű eljárások esetében a már meglévő általános eljárások tervezési lehetőségként jönnek számításba azokban az egyszerűbb esetekben, ahol a körülmények jól ismertek, de továbbra is szükséges a várható körülmények felmérése. Már több információ szükséges alapvető numerikus modellezéshez is, ahol részletesebb adat szükséges a geometriáról és a törések mechanikai tulajdonságairól. Végül pedig a kiterjesztett modellek pl. a termo-hidro-mechanikai kapcsolt modellek a változók közti kapcsolattól függően egészen sok bemenő paramétert követelhetnek.

Az utótervezéshez szükséges információt aszerint kell meghatározni, hogy milyen a modellezési eljárás, az adott kőzetmechanikai projekt természete, a tervezés menete és részletessége, valamint melyek az ehhez kapcsolódó célok.

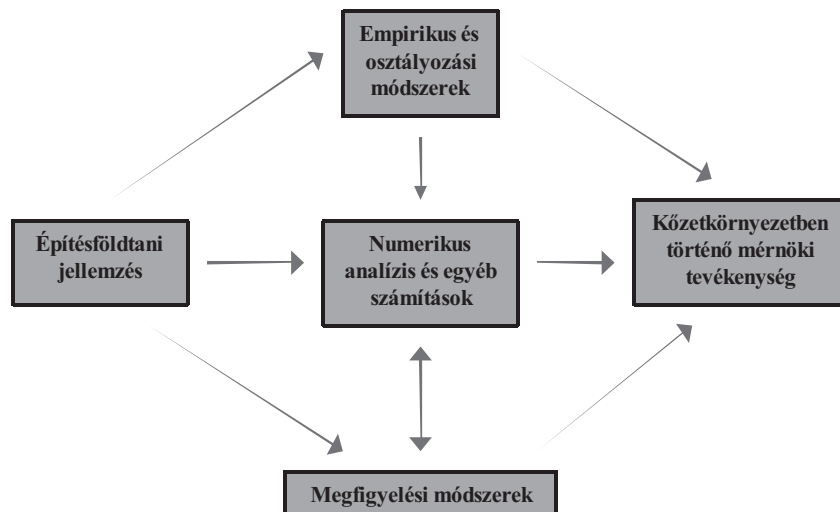
Az utóanalízishez szükséges információ alkalmazásának területei lehetnek például a következők:

- Az alagutaknál regisztrált deformációt fel lehet használni a tervezéshez alkalmazott kőzetmechanikai paraméterek visszaellenőrzéséhez.

- A felszín alatti víz regisztrált eredményei alkalmasak a vízzáró mérések megfelelőségének ellenőrzésére, további mérések szükségességének megállapítására.
- A kivitelezés közben regisztrált elmozdulás- és feszültségértékek vissza tudja igazolni a tervezés és kivitelezés megfelelőségét (pl. talajkiemelés, falazat).

A hatékony kommunikáció elengedhetetlen a kivitelezés, tervezés és helyszíni vizsgálat összes résztvevője között. Mindenkinek tisztában kell lennie a pontos céllal, a megkövetelt információk természetével és mennyiségével. Mindez a projekt céljainak pontos megértését és ismeretét követeli, a befogadó közet előzetes felméréseivel és kőzetmechanikai kondíciókkal együtt, amely aztán a modellezési eljárás kiválasztásához vezet. A kiválasztott eljárás már azonosítja a szükséges információkat. Amint a megfelelő modellezési eljárás kiválasztásra került, a szükséges biztosítási rendszert is meg kell állapítani. Ezután következik az aktuális tervezés és modellezés.

A kőzetkörnyezetben való mérnöki tervezésnél különböző tervezési módszereket együttesen kell alkalmazni. Ezen tervezési módszerek (úm. empirikus és osztályozási módszerek, analitikus módszerek, numerikus modellezés, megfigyelési módszerek) egymáshoz való kapcsolatát a 10. ábra mutatja Stille és Palmström (2003) cikke alapján. Természetesen a különböző projekteknél a különböző problémák miatt más-más súlyal kerülnek felhasználásra.



10. ábra. A kőzetkörnyezetben alkalmazott főbb tervezési lépések (Stille – Palmström 2003)

Különböző építésföldtani viszonyok között a bemutatott folyamatábrán súlyponti eltolódások lehetnek, pl. blokkos kőzetkörnyezetben az empirikus módszer válhat uralkodóvá, míg duzzadó kőzetkörnyezet esetén a megfigyelés jelentősége nőhet meg.

5. A NUMERIKUS MODELLEZÉS MÓDSZEREI

A kőzetkörnyezetben történő tervezés analitikus, számítógéppel segített és numerikus eljárásokkal történhet. Mindegyik módszer esetében szükség van a kiindulási feltételek rögzítésére, a kapott eredmények értékelésére, hiszen a kapott eredményeket különböző mértékű hiba terheli. Jelen fejezetben a különböző numerikus módszerek alkalmazhatóságát elemezzük.

Egy modell akkor jól felépített, ha térbeli kiterjedése (tartománya) megfelelő, illetve ha minden lényeges folyamatot, szerkezeti vagy anyagi mechanizmust, minden tulajdonságot, változást, valamint ideiglenes hatást tartalmaz. Az alkalmazott számítógépes kódoknak a vizsgált problémára vonatkozó alkalmasságát ellenőrizni kell, és a kódnak a modellezett geometriai jellemzőkkel és a vizsgált időintervallummal összefüggésben kell lennie, továbbá nem szabad figyelembe vennie rosszul meghatározott vagy szubjektív tulajdonságokat. A kapott eredményeknek összefüggésben kell lenniük a tervezés céljával. Minden egyes számítógépes program alkalmazásánál meg kell bizonyosodnia a felhasználónak, hogy a program által használt megoldási eljárás alkalmas-e az adott probléma vizsgálatára.

A numerikus tervezés alapelvei a következők:

- A tervezés célját egyértelműen meg kell határozni a várható végeredményekkel együtt.
- Minden releváns eredménynek rendelkezésre kell állnia a modellhez.
- Kizárólag a helyesnek becsült eredményt szabad elfogadni.
- A modell tartományának megfelelő kiterjedésűnek kell lennie ahhoz, hogy közelítően pontos eredményt adjon a vizsgált feladatra vonatkozóan.
- Abban az esetben, ha nem minden tervezési követelmény kielégítő, akkor az alkalmazott becslések és feltételezésekből jelentkező hibák nagyságát és minőségét előre meg kell becsülni.
- Ha a modell megfelel a felállított követelményrendszernek, akkor az eredmények értékelésére egy szűrési-ellenőrzési feltételrendszer felállítása szükséges.
- Szükség esetén egy modellezési ajánlás is bevezethető a különböző számítógépes kódok kiválasztása és alkalmazhatósága alapján.

A numerikus módszerek egy adott probléma tér- és időtartományának diszkrét pontjaira vonatkozó megoldására alkalmasak. A kőzetmechanikai modellezésben leggyakrabban alkalmazott numerikus eljárások az alábbiak szerint csoportosíthatók:

NUMERIKUS MODELLEK

- 1 Kontinuum modellek
 - Véges differencia módszer (Finite Differencial Method – FDM)
 - Véges elem módszer (Finite Element Method – FEM)
 - Peremelem módszer (Boundary Element Method – BEM)
- 2 Diszkrét módszer
 - Diszkrét elemek módszere (Discrete Element Method – DEM)
 - Diszkrét törések hálózatának módszere (Discrete Fracture Network – DFN)
- 3 Hibrid (kontinuum-diszkrét) modellek

A numerikus módszerek jellemzője, hogy a modell részletességét a közelítő megoldás pontossági igénye határozza meg. Ezeknél a modelleknél a vizsgált mennyiségeket tartalmazó parciális differenciálegyenletek megoldásai helyett ezekből levezetett algebrai egyenletrendszert állítunk fel az állapotváltozók diszkrét tér- és időbeli pontokon érvényes értékeire. A megoldandó egyenletek nagy száma miatt a modellezett probléma megoldása minden esetben számítógép alkalmazását igényli.

Az alábbiakban rövid áttekintést adunk a mérnökgeológiai modellezésben használatos numerikus módszerekről, azok kőzetmechanikai szempontú előnyeiről és hátrányairól. Legjelentősebb szakirodalom ebben a tekintetben Jing és Hudson (2002), valamint Jing (2003) ilyen irányú összefoglaló és értékelő művei, melyeket az eljárások ismereteseinél figyelembe vettünk. Az eljárások bemutatásánál a cikknek nem célja azok pontos elméleti hátterének ismertetése, hanem ezen eljárások geotechnikai alkalmazhatóságának, előnyeinek és hátrányainak ismertetése, rövid elemzése. Megjegyezzük, hogy minden egyes eljárás irodalma igen nagy, melynek felsorolása meghaladja ezen cikk korlátait.

5.1. VÉGES DIFFERENCIA MÓDSZER (FINITE DIFFERENCE METHOD – FDM)

A véges differencia módszer a parciális differenciálegyenletek numerikus megoldásának egyik legrégebbi módszere. Lényege, hogy a folytonos teret diszkrét pontok rendezett halmazával modellezi, és a teret a térbeli koordináta-rendszer három tengelyének irányába eső, párhuzamos egyenesekkel osztja fel.

Az egyenletek felállítása és megoldása lokalizált, amely kedvezőbb a számítógép memória-kihasználtsága szempontjából. A módszer hátránya, hogy az egye-

nes vonalak alkalmazása nem teszi lehetővé a bonyolultabb formák peremének követését, valamint egyenlőtlen osztásközű háló alkalmazása esetén az elemek alakja eltérhet az ideálisnak feltételezett izometrikustól. A különböző irányokban eltérő paraméterek kezelése nehéz, ha azok nem esnek egybe a főirányokkal. A véges differenciál módszer továbbá nehezen kezeli az anyagi heterogenitást, az összetett peremfeltételeket és a kőzetkörnyezetbeli töréseket. A megoldást nagy mértékben befolyásolja a diszkretizáció során felvett pontok száma is. Hirtelen hálóméret változás, illetve a torzult alakzatok szintén csökkenthetik a számítás pontosságát.

Ez a módszer elsősorban a strukturált, egységes általában négyszög (2D) háló esetén alkalmazható megfelelő biztonsággal.

A módszer hátrányainak csökkentésére fejlesztések kezdődtek, amelynek eredményeképp kidolgozták az ún. *véges térfogat módszert* (finite volume method – FVM), amelynek lényege, hogy a hálóelemek közepéhez, vagy a háló rácspontjaihoz rendelt változókkal már lehetőség van a különböző cellákhoz tartozó különböző anyagjellemzők definiálására. Ennél a módszernél már kedvezőbb a hálógenerálás folyamata és a tetszőleges alakú háló peremfeltételeinek kezelése is.

A véges differencia alapú módszerek esetében a szomszédos hálópontok közti funkciófolytonosság miatt a törések pontos modellezése nehéz, és a végeselem-módszerrel ellentétben speciális törési algoritmusok definiálása sem lehetséges. A törési mechanizmusok modellezésére is történtek fejlesztések, így ma már lehetőség van az anyagi tönkremenetel terjedésének elemzésére a törési felszín definiálása nélkül.

Általánosságban elmondható, hogy a véges differencia módszer népszerű, széles körben alkalmazott eljárás, mert az összes kőzetmechanikai problémakör megoldására használható.

5.2. VÉGESELEMMÓDSZER (FINITE ELEMENT METHOD – FEM)

A végeselem módszer lényege, hogy a vizsgált szerkezet, illetve anyag alakját jól követő, véges számú elemekre (2D-s feladat esetében háromszögekre vagy négyszögekre, 3D-s esetben tetraéderekre) bontja, amelyek a sarokpontjaikon kapcsolódnak. A közelítő megoldást ez a módszer a vizsgált tartomány elemein folytonos függvények formájában keresi. Minden elemre meghatározott integrálokat kapunk, amelyek algebrai összegzése adja az ismeretlenek meghatározására alkalmas egyenletrendszert. Minél több elemet használunk a modell felosztásához, a megoldás annál pontosabb közelítése lehetséges.

Az elemen belül elsődlegesen meghatározott elmozdulásmezőből számítható az alakváltozás, majd a feszültség-alakváltozás összefüggés segítségével számítható a feszültség.

A módszer előnye, hogy egyszerű alapelvek alkalmazásával összetett problémák elemzésére is alkalmas. Az elemek mérete és alakja változtatható, a véges-elemmódszer a bonyolult forma problematikáját is tudja kezelni, ezért széles körben alkalmazható eljárássá vált. Az eljárás a legszélesebb körben alkalmazott numerikus eljárás a tudományos és mérnöki területen, mert elegendő flexibilitással rendelkezik, amely alkalmas az anyagi heterogenitás, a nem-lineáris deformáció (főként plaszticitás), az összetett peremfeltételek, in situ feszültségek és a gravitáció kezelésére.

A módszer hátránya, hogy a megoldandó egyenletrendszer mátrixa összetettebb, ugyanis nagyobb mennyiségű egyenlet egyidejű megoldása szükséges, mint a véges differencia módszerek esetében, amely így növeli a számítás idejét, illetve a számítógép kapacitásának szükségességét. További hátrányt jelent, hogy a közelítés hibájának nagyságrendje sem becsülhető, valamint a modell felállítása nagy előkészületet igényel. A számítás időigénye növekszik, ha a probléma nem lineáris, amely az esetek nagy részében fennáll.

A globális merevségi mátrix nehezen megoldható a törési nyílások eredményeként bekövetkező anyagfolytonosság megszakadása miatt, így a módszer nehezen alkalmazható a törések és azok terjedésének kezelésére, valamint az elforduló blokkok elemzésére. Speciális algoritmust fejlesztettek ki ennek a hátránynak a kiküszöbölésére. A továbbfejlesztett eljárás csonkított diszkontinuum egyenletek használja a folytonos közzettestek kezelésére és a törések szimulálására. Ez az eljárás a vizsgált geometriától független hálóval is rendelkezhet, ezért a hálógenerálás nagyságrendekkel egyszerűsített és a törési folyamat szimulálása nem igényli a háló frissítését.

Az összetett belső szerkezetű és külső peremek esetében a hálógenerálás egy alapvető feladat a végeselemmódszer alkalmazása esetén. Összetett geometria esetén ez a feladat kritikussá válhat, elsősorban a 3D-s problémák kezelésében. Jelenleg is történnek fejlesztések a „háló nélküli” eljárás kiterjesztésére, amely nagymértékben egyszerűsítheti a hálógenerálási feladatokat.

5.3. PEREMELEM-MÓDSZER (BOUNDARY ELEMENT METHOD – BEM)

A peremelemmódszer annak ellenére egyre népszerűbb, hogy nem rendelkezik a végeselemmódszer rugalmasságával és általános alkalmazhatóságával, és a bonyolultabb matematikai összefüggések alkalmazása miatt nem könnyű az alkalmazás hátterét megérteni.

A peremelemmódszer a végeselemmódszer alapelveit használja, amely kizárólag a vizsgált közeg vagy szerkezet peremén megfelelő sűrűséggel felvett pontok halmazából adódó matematikai egyenletrendszerből nyeri a vizsgált feladat megoldását. A pontokat összekötő háló szabálytalan alakú, a szomszédos elemek élei-

nek és csomópontjainak illeszkedniük kell. A peremelemmódszer olyan közelítő függvényeket használ, amelyek a vizsgált tartományra vonatkozó differenciálegyenleteket kielégítik, a peremfeltételeket viszont nem. (A végeelemmódszernél a tartományon értelmezett közelítő függvények közelítően elégítik ki mind a differenciálegyenletet, mind a peremfeltételeket.) Bár a megoldandó egyenletek száma lényegesen kevesebb, azonban az eljárás trigonometrikus és logaritmikus összefüggéseket tartalmazó egyszerűsítéseket alkalmaz, amelyeknek megoldása lassítja a számítási időt.

A nagyméretű térfogati felosztás miatt a végeelemmódszer nem alkalmas olyan problémákra, ahol perem és a térfogat aránya kicsi, mert sok elem szükséges a felület leképzésére. A peremelemmódszer alkalmazása ezekben az esetekben sokkal célravezetőbb, mert a közelítések kizárólag a peremekre korlátozódnak. Azokban a feladatokban, ahol kizárólag az üreg felszínét kell vizsgálni, a problémát leíró bemenő adatok mennyisége nagymértékben leszűkül és a végtelen kiterjedésű kőzet hatása automatikusan számba vevődik.

A módszer előnye, hogy a bemenő adatok száma sokkal kisebb, mint a végeelemmódszerekénél. További előny, hogy kevesebb paraméter használata is megfelelő pontosságot eredményez, illetve a végtelen kiterjedésű tartományok esetén durva korlátozások nélkül analitikus közelítés lehetséges.

Hátránya, hogy a megoldandó algebrai egyenletrendszer mátrixában nincsenek egyszerűsítések, tehát az egyenletrendszer megoldása nehezebb. A peremelem eljárás nagyon hatékony a homogén, lineárisan rugalmas anyagok modellezésére, különösen 3D-ben, de összetett, nemlineáris anyagtörvények, és több különböző anyagtulajdonság esetében az eljárás előnyei elvesznek.

A modell előkészítése viszonylag egyszerű, ugyanis 2D-s vizsgálat esetében kizárólag a kőzetkörnyezet határát kell diszkrétizálni (részekre osztani), míg 3D-s esetben csak a határoló felületek definiálására van szükség. Az anyagi tulajdonságokban bekövetkező változások esetén a határfelület újraosztása szükséges, ezért több réteg esetében a modell előkészítése bonyolulttá válhat.

A peremelemmódszer előnyeit kihasználva fejlesztették ki az ún. elmozdulás diszkontinuitív módszert (displacement discontinuity method – DDM), amely elsősorban törési mechanizmusok (pl. törések terjedése) elemzésére alkalmas 2D és 3D-ben.

5.4. DISZKRÉT ELJÁRÁSOK

A kontinuum eljárásoktól eltérően, ahol az elemek csomópontjaiban folytonossági követelmények teljesülnek, a diszkrét elemes eljárások esetében egymástól független, önálló elmozdulási szabadságfokokkal rendelkező, önállóan deformálódni is képes elemek alkotják a modellt.

5.5. DISZKRÉT ELEMEL MÓDSZERE (DISCRETE ELEMENT METHOD – DEM)

A diszkrét elemek módszerével vizsgálható a töredezett kőzetkörnyezetbe tervezett építmények mechanikai viselkedése. Az eljárás elméleti alapját a merev vagy deformálódó kőzettestek mozgásának meghatározására implicit (FEM alapú) és explicit (FDM/FVM alapú) egyenletek alkalmazása adja. Az alapvető különbség a diszkrét elemek módszere és a kontinuum alapú eljárások között, hogy a komponensek közötti kapcsolat folyamatosan változik a deformációs folyamat közben, amely azonban rögzített a folyamat végén. A módszer eredménye függ a definiált geometriai jellemzőktől, az elemek és kapcsolatok mechanikai anyagjellemzőitől.

A módszer alkalmazása akkor előnyös, ha a modellezni kívánt anyag jellegzetes belső szerkezettel rendelkezik, amely a mechanikai viselkedést lényegesen befolyásolja és a külső hatásokra maga is változásokkal reagál. A szokásos kontinuum-mechanikai alapú mérnöki számítási eljárások többsége ezeket a jellegzetességeket nem, vagy csak igen nehezen tudja modellezni. További előny ennél a módszernél, hogy nem csak az elemek közötti kapcsolatok megszűnése, hanem a kapcsolatok létrejötte is modellezhető.

Fejlesztések történtek arra vonatkozóan, hogy a diszkrét elemek módszerén alapuló programokban bármilyen alak modellezhető legyen, így ebből a szempontból alkalmazási területe szélesedett.

Az eljárás hátránya, hogy az anyagi viselkedést leíró, bemenő paraméterek gondos kiválasztására, meghatározására van szükség és a számítási idő még egyszerű problémák esetében is jelentős lehet. Jelenleg az eljárás nagyon hatékony a kőzetkörnyezetben várható törési deformációk vizsgálatában.

Az implicit egyenleteket és vége-selemes hálót alkalmazó diszkrét elemes módszer egy fejlesztése a *diszkontinuum deformációs analízis* (discontinuous deformation analysis – DDA), amely a feszültség-alakváltozás vizsgálatok és a csatolt feszültség-áramlási problémák kezelésében hatékony. Egy másik eljárás a kombinált véges-diszkrét elemes eljárás, amely nem csak a blokk (kőzettömb) deformációját veszi figyelembe, hanem a kőzettest töredezettségét is.

A diszkontinuum deformációs analízis nagy előnye az explicit diszkrét elemek módszerével szemben, hogy nagyobb időlépéseket használ és zárt formájú integrálásokat alkalmaz a merevségi mátrix elemeire. Bármely vége-selemes kód könnyen átalakítható diszkontinuum deformációs analízis kóddá, megtartva a vége-selemes módszer előnyös tulajdonságait.

A DDA eljárás egy kedvező megoldási módszere a geomechanikai problémáknak, mert előnyeit nem lehet kiváltani kontinuum alapú eljárásokkal vagy explicit DEM formulákkal. Az eljárás kiválóan alkalmazható az alagutak, felszín alatti kamrák, geológiai és szerkezeti anyagok törési és töredezettségi folyamatainak és a földrengési hatások vizsgálatára.

A DEM eljárás alapján egy olyan módszer is kifejlesztésre került a kőzetbeli szerkezet stabilitásának vizsgálatára, amely nem alkalmas a feszültség-alakváltozás elemzésére, de azonosítja a metsző törések által kijelölt fő kőzetblokkokat és a lehetséges elmozdulások és elfordulások irányát.

5.6. DISZKRÉT TÖRÉSEK HÁLÓZATÁNAK MÓDSZERE (DISCRETE FRACTURE NETWORK – DFN)

A diszkrét törések hálózatának módszere egy speciális diszkrét modell, amely a folyadék áramlását vizsgálja a töredezett kőzetkörnyezetben egymáshoz kapcsolódó törési rendszeren keresztül. A töredezett rendszer sztochasztikus modellezése az eljárás geometriai alapja és alapvető szerepe van a vizsgált kőzetkörnyezet töredezettségének bemutatásában.

A DFN eljárás alkalmas többek között többfázisú folyadék áramlásának, a töredezett kőzet vízáteresztő képességének karakterizálására, a felszín alatti üregek és kőzetlejtők vízvezető hatásainak elemzésére.

A diszkrét eljárások esetében a töredezett kőzet geometriájának pontos ismeretének hiánya korlátozza az általános alkalmazást. Általánosságban a törésrendszer pontos geometriája nem felmérhető, kizárólag becsülhető. Hasonló probléma azonosítható a kontinuum alapú modelleknél is, azonban a diszkrét eljárások esetében a törési rendszer paraméterei bemenő adatként ezt a hátrányt fokozzák, éppen ezért a modell bizonytalanságának megértése és mennyiségi meghatározása sokkal hangsúlyosabb a diszkrét modellekben.

5.7. HIBRID (KONTINUUM-DISZKRÉT) MODELLEK

A hibrid modellek gyakran használatosak a kőzetmechanikában, elsősorban a töredezett kőzetbeli áramlási és feszültség-alakváltozás problémák elemzésére. A hibrid modellek fő típusai a hibrid FEM – BEM, DEM – FEM és DEM – BEM modellek.

A peremelemmódszer (BEM) széles körben alkalmazható a homogén, rugalmas mechanikai viselkedésű, végtelen kőzet modellezésére, ugyanakkor a FEM és DEM a nemlineáris vagy töredezett, lehatárolt kőzetkörnyezet elemzésére alkalmas. A vizsgált feladat természetétől függően kombinálhatók a különböző eljárások előnyei. A hibrid diszkrét-kontinuum modell alkalmazása töredezett kőzetben csatolt hidromechanikai elemzésre alkalmazható DEM, DFN és BEM eljárás kombinációjának használatával.

A kapcsolt FEM – BEM eljárásban egy bizonyos részen végeeselemes felosztás szükséges, míg a többi részen elegendő a BEM alkalmazása. A hibrid FEM – BEM

eljárás elsősorban felszín alatti üregek mechanikai viselkedésének vizsgálatára alkalmas. Ezeknek az eljárásoknak a kombinálásával a 3D-s modellek használata könnyebb lehet, kevésbé időigényes a bemenő adatok felépítése, megadása és nagyobb rugalmasság érhető el az összetett vizsgálatok eredményeinek feldolgozásában.

A hibrid DEM – FEM modellben, a DEM eljárás a merev blokkok viselkedését elemzi, a FEM eljárás pedig a nem lineáris anyag viselkedését modellezi.

A hibrid DEM – BEM modell kizárólag explicit diszkrét elemek eljárására feszültség-alakváltozás vizsgálatának céljából került kifejlesztésre a UDEC és 3DEC kódcsoporthoz.

A hibrid modelleknek számos hátrányuk van, de kiemelt figyelmet érdemel a folytonossági feltételek biztosítása a különböző modellek kapcsolódási pontjain vagy felületein, különösen abban az esetben, ha eltérő anyagi paraméterek kerülnek definiálásra.

5.8. KAPCSOLT TERMO-HIDRO-MECHANIKAI MODELLEK (THM)

Azoknál a mérnöki feladatoknál, amelyekben a hó és a víz fontos szerepet játszik (pl. felszín alatti radioaktív hulladéktárolók vizsgálata, gáz/olaj kitermelés, szennyezett anyag szállítása, környezeti hatások értékelése) kiemelt jelentőségűvé vált a töredezett kőzetben végbemenő hőátadási, folyadékáramlási és feszültség-alakváltozási folyamatok vizsgálata.

Az eljárás nevében a „kapcsolt” kifejezés arra utal, hogy összetettebb mérnöki feladatok esetében a kőzettest várható viselkedését a folyamatok egymásra hatása miatt az összes folyamat külön-külön történő vizsgálatával nem lehet biztonságosan megjósolni.

A THM kapcsolt modellek a hő- és többfázisú folyadékáramláson alapulnak a deformálódó és töredezett kőzetben, amelyben a szilárd részek elemzése a Hooke rugalmassági törvénye alapján, a pórusos közegben áramló folyadék vizsgálata Darcy törvénye alapján, és Fourier hővezetési törvénye alapján felírt törvényszerűségeken alapulnak.

A kapcsolt folyamatok és modellek a kémiai, biokémiai, elektronikai, akusztikus és mágneses folyamatok egyidejű figyelembevételével hatalmas előrehaladást jelentenek a kőzetmechanikában történő tervezésben.

5.9. INVERZ MÓDSZEREK

A kőzetmechanikai és mérnöki gyakorlatban a numerikus modellek jelentős részét az inverz megoldási technikák teszik ki. Az inverz megoldási eljárásoknak lényege, hogy néhány alapvető fontosságú változó limitált számú labor vagy helyszínen mért értéke alapján ismeretlen anyagjellemzőket, perem vagy belső feltételeket származtasson minimális hibahatárú matematikai programozó technika alkalmazásával. Kőzetmechanikai problémák esetében a leggyakrabban alkalmazott inverz megoldási technika az utóanalízis a mért elmozdulások alapján, valamint a kőzet vízáteresztő képességének megadása nyomásadatok alapján.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikk célja a kőzetmechanikában használatos modellezéslépések, valamint ehhez kapcsolódó numerikus modellek ismertetése, amelyet részben alkalmaztak a Bábaapáti radioaktív hulladéktároló koncepciótervének készítésénél (Fábián et al. 2006). A mórági gránitögben (Bábaapátiban) való tervezésnél a kőzetkörnyezet homogenitásának, izotrópiájának, illetve kontinuitásának megfelelő mértékű figyelembevétele a tervezés folyamán elengedhetetlen.




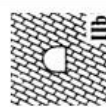


A 11. ábra különböző állapotú kőzetkörnyezetben alkalmazható numerikus módszereket ismerteti a kőzettestek tönkremeneteli állapota alapján Tzamos és Sofianos (2007) publikációját figyelembe véve. Ezen ábra segítséget nyújt a megfelelő numerikus eljárás kiválasztásához a kőzetkörnyezet ismeretében.

A kontinuum és diszkrét modellek közti választás számos problémáspecifikus tényezőn múlik, elsősorban a probléma/feladat nagyságán és a töredezettségi rendszer geometriáján.

A kontinuum megközelítés kizárólag néhány törés jelenléte esetében alkalmazható, illetve ha a törés nyílása, vagy az ép blokkok elkülönülése nem jelentős. A diszkrét eljárás arra alkalmazható, ha a kőzetkörnyezet közepesen töredezett. Hangsúlyozandó, hogy nincs abszolút előnye egyik eljárásnak a másikkal szemben. Ugyan néhány hátrány beazonosíthatóbb az egyes eljárások alkalmazása során, ez azonban elkerülhető a kontinuum-diszkrét modellek alkalmazásával, azaz a hibrid modellezéssel.

Előfordulnak olyan szituációk, amelynél a 2D-s síkban történő alakváltozás analízis nem érvényes. Ilyen például:

- A kőzetkörnyezet síkjainak anyagi ortográfiája nem esik egybe a 2D-s probléma síkjának analízisével.
- Az in situ főfeszültségek tengelye nem esik egybe a 2D-s probléma síkjával.
- A kőzetrepedések (tagoltságok) szerkezetéből adódóan a repedések síkjának normálisai nem a 2D-s analízis síkjában helyezkednek el.

Közvetkörnyezet leírása (az adott osztályok nem közvetest osztályok)		Tönkrementel	Tervezés	Tagoltsági rendszerek	Közvetestűly a Q értéke alapján	Tagoltságek távolsága	Fesztáv / tagoltságek távolsága
Ép – tömör Különösen tömör közvetkörnyezet, nagy nyomószilárdság, ritkán tagolt, erős kitöltöttség		Ép közet tönkrementel, különmálló blokkok elcsúszása	Véges elemek módszer (FEM), perem- elem módszer (BEM)		100–1000	> 2 m	<<5
Ép – kgolt Tömör, kissé tagolt, közepes kitöltöttség		Néhány blokk elcsúszása	Véges elemek módszer (FEM), perem- elem módszer (BEM)	1–3	10–100	0,5–2 m	5–20
Közepes – erősen tagolt Mállott, szabálytalan töredezettség, közepes kitöltöttség		Több blokk elcsúszása	Diszkrét elemek módszere (DEM)	2–4	1–10	10–50 cm	20–100
Mérsékeltlen töredezett – erősen tagolt Mállott, gyenge közvetkörnyezet, kismértékű kitöltöttség		Elforduló nyírás	Diszkrét elemek módszere (DEM)	>4	0,1–1	5–10 cm	100–500
Erősen (tektónikus) töredezett Nagyon gyenge, töredezett közvetkörnyezet, agyag jelenléte, kitöltöttség nincs (tönkrement zóna)		Gyenge nyírási zónák, agyag jelenléte	Véges elemek módszere (FEM), véges differenciál módszer (FDM)		<0,1	< 5cm	>>500

11. ábra. Numerikus módszerek alkalmazása különböző állapotú közvetkörnyezetben (Tzamos – Sofianos 2007)

Ezekben a helyzetekben teljes 3D-s vizsgálat szükséges. Lehetőség van arra, hogy a vizsgálat egy darabjára szűkítsük a vizsgálatot, ha a 3D-s vizsgálat megfigyelései alapján ismétlődés állapítható meg (kvázi-3D-s analízis: anyagi anizotrópia az in situ feszültségekre és ismétlődő vizsgált „szelet”).

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- Bardy – Brown 1985 Bardy, B. H. G. – Brown, E. T.: *Rock Mechanics for Underground Mining*. George Allen & Unwin, London 1985. 527.
- Barton 1990 Barton, N.: Scale effects or sampling bias? In: Pinto da Cunha (ed.): *Proc. Scale Effect in Rock Masses, 1. Int. Workshop*. Loen 1990. 31–55.
- Bieniawski 1989 Bieniawski, Z. T.: *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*. A. A. Balkema, Rotterdam 1989.
- Bieniawski 1993 Bieniawski, Z. T.: Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. In: Hudson, J. A. (ed.): *Comprehensive Rock Engineering* Vol. 3 (1993) 553–573.
- Bray 1967 Bray, J. W.: A study of jointed and fractured rock. Part 1. *Rock Mech. Engng. Geol.* (1967) Nos. 5–6. 117–136.
- Burland 2007 Burland, J.: Terzaghi: Back to the future. *Bull. Engng. Geol. Env.* Vol. 66 (2007) No. 1. 29–33.
- Edelbro 2003 Edelbro, C.: *Rock Mass Strength – A Review*. LueLa University, Internal Report, 2003. 1–28.
- Fábián és mtsai 2006 Fábián M. – Bakainé Papp K. – Kovács L. – Bogár J. – Bóthi Z. – Brandmüller I. – Buócz Z. – Dankó Gy. – Eördögh Zs. – Keszerice V. – Molnár I. – Molnár P. – Szebényi G. – Viczencz O. – Vásárhelyi B. – Mátrai Cs.: *Bátaapáti hulladékártaloló létesítési engedélyeztetésével kapcsolatos dokumentáció – Felszín alatti tároló műszaki tervdokumentációja*. Koncepcióterv. RHK-K-074/06. 2006 (kézirat).
- Feng – Hudson 2010 Feng, X. T. – Hudson, J. A. 2010: Specifying the information required for rock mechanics modelling and rock engineering design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 47 (2010) 149–194.
- Gálos – Kertész 1981 Gálos M. – Kertész P.: A mérnöki munkák környezetének modellezése – a mérnökgeológiai közetmodell. *Mélyépítéstudományi Szemle* 31. köt. (1981) 12. sz. 540–545.
- Gálos – Kertész 1989 Gálos M. – Kertész P.: *Mérnökgeológia*. Kézirat. Tankönyvkiadó, Budapest 1989.
- Gálos M. – Vásárhelyi 2006 Gálos M. – Vásárhelyi B.: *Köztestestek osztályozása az építőmérnöki gyakorlatban*. Mérnökgeológiai–Közetmechanikai Kiskönyvtár 1. 2006. 7–26.
- Hoek 1994 Hoek, E.: Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal* Vol. 2 (1994) No. 2. 4–16.
- Hoek – Brown 1980 Hoek, E. – Brown, E. T.: *Underground Excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy, Elsevier Applied Science 1980. 527.
- Hudson 1993 Hudson, J. A.: Rock properties, testing methods and site characterization. *Comprehensive Rock Engineering* 1993. Vol. 3. 1–40.

- Hudson – Feng 2006 Hudson, J. A. – Feng, X. T.: Updated flowcharts for rock mechanics modelling and rock engineer design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 47 (2006) 877–886.
- Jing 2003 Jing, L.: A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 40 (2003) 283–353.
- Jing – Hudson 2002 Jing, L. – Hudson, J. A.: Numerical methods in rock mechanics. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 39 (2002) 409–427.
- Kertész – Vásárhelyi 2006 Kertész P. – Vásárhelyi B.: Kontinuitás, homogenitás és az anyagmodell. In: Asszonyi Cs. (szerk.): *Izotrop kontinuumok anyagtörvénye*. Mérnökgeológia–Kőzetmechanika 3. Műegyetemi Kiadó, Budapest 2006. 11–24.
- Knill 2003 Knill J.: Core values: the first Hans-Cloos lecture. *Bull Engng. Geol. Env.* Vol. 62 (2003) No. 1. 1–34.
- Léber és mtsai 2008 Léber T. – Kovács L. – Lázár M. – Vásárhelyi B.: *Gondolatok az alagútépítés koncepciójáról*. Mérnökgeológiai–Kőzetmechanikai Kiskönyvtár 7. 2008. 287–296.
- Li – Wu – Ma 1998 Li, S. – Wu, X. – Ma, F.: Application of Precedent Type Analysis (PTA) in the construction of Ertan Hydro-electric station, China. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 35 (1998) No. 6. 787–795.
- Morgenstern 2000 Morgenstern, N. R.: Common ground. *Proc. Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering, Technomic 1* 2000. 1–30.
- Pahl – Beitz 1984 Pahl, G. – Beitz, W.: *Engineering Design*. Springer, Berlin 1984.
- Stille – Palmström 2003 Stille, H. – Palmström, A.: Classification as a tool in rock engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology* Vol. 18 (2003) 331–345.
- Tzamos – Sofianos 2007 Tzamos, S. – Sofianos, A. I.: A correlation of four rock mass classification systems through their fabric indices. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 44 (2007) No. 4. 477–495.
- Vásárhelyi 2004 Vásárhelyi B.: Kőzettest-osztályozási módszerek összefoglalása. *Földtani Közöny* 134. köt. (2004) 1. sz. 109–129.

SUMMARIZING THE OPPORTUNITIES OF ENGINEERING GEOLOGICAL MODELS AND MODELLING

Summary

The purpose of this paper is to summarize and analyse the widely used models in engineering geology, particularly in tunnelling. The paper shows the main steps of the geotechnical modelling, in connection with the engineering geological model, and describes the question of isotropy, homogeneity and continuity, which have a key role in rock mechanical modelling. The presented numerical models focus on rock mechanical problems, however they can be used for solving soil mechanical problems as well.

Keywords: rock mechanics, geotechnical modelling, numerical modelling, engineering geology