

Bevágási rézsű tönkremenetelének vizsgálata töréskép optimalizálással

Borbély Dániel

BME Építőmérnöki Kar, daniborbely@gmail.com

Wolf Ákos

Geoplan Kft., wolf@geoplan.hu

Görög Péter

BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, gorog.peter@mail.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: Ezen cikk célja a töréskép optimalizálás bemutatása egy végbement tönkremenetelen keresztül. A töréskép optimalizálás egy új és igen ígéretes módszer a talajok képlékeny törőterhének meghatározására. A módszer elvi alapját a kinematikai módszer (Upper bound limit theorem) adja, mely alapfeltevése, hogy talajok tönkremenetelekor kialakuló rugalmas alakváltozások elhanyagolhatóan kicsik a képlékeny alakváltozásokhoz képest, így merev tökéletesen képlékeny anyagmodell használható. A töréskép optimalizálás egy matematikai eljárás, mely a kinematikai módszer egyenleteit felírja és igen hatékonyan megoldja. A módszer alkalmazásának néhány sarkalatos kérdésére tér ki ez a cikk, egy bevágási rézsűben történt tönkremenetel modellezése alapján.

Kulcsszavak: töréskép optimalizálás, tönkremeneteli határállapot, rézsűcsúszás

1 BEVEZETÉS

A szerkezettervezésben széleskörűen alkalmazott kinematikai módszer talajok tönkremenetelének vizsgálatára is alkalmas (Chan 1974), azonban a bonyolult alkalmazhatósága miatt sokáig megmaradt a kutatás szintjén. Alapja, hogy a külső és belső erők által az elmozdulás-rendszeren végzett munkák összege zérus. A belső erők nagyságának számítása viszonylag egyszerű, ugyanis a merev-tökéletesen képlékeny anyagmodell alapján a belső erők egyenlők a nyírószilárdsággal. A munkák értékének egyenlőségén alapuló számítás csupán technikai jellegű kérdés. A számított törőteher, azaz a külső erők, a valódi törőteher felső becslése. A számítás technikailag egy kinematikailag lehetséges elmozdulásrendszer felvételével kezdődik, mely alapján meghatározható az elmozdulásrendszer által egyensúlyozott teher nagysága. A módszer alkalmazásának nehézsége, hogy ha a felvett elmozdulásrendszer nem közelíti a valóságban kialakuló, a felülbecslés mértéke jelentős lehet. A törőteher adott geotechnikai modell mellett legkisebb felső korlátjának meghatározása jelentős nehézségekkel jár. Speciális esetre számos megoldást dolgoztak ki, melyek eredményeit jellemzően táblázatos formában vagy grafikonon közölték (Chan 1974, Chan & Liu 1990). Ez esetben a megoldás készítője maga vette fel a lehetséges elmozdulásrendszereket, azaz a kialakuló törésképet. Ez intuíciót, tapasztalatot és előzetes sejtést követel meg a módszert alkalmazó mérnöktől, ami manapság a különböző numerikus eljárások között nem tekinthető versenyképes megoldásnak. Egy széleskörűen alkalmazott módszernek képesnek kell lennie előzetes sejtés nélkül megtalálni a töréskor kialakuló törésképet. Ezt a problémát oldja meg a töréskép optimalizálás, mely egy igen hatékony numerikus módszer a törőteher minimumának meghatározására. A lineáris programozás (továbbiakban LP) segítségével lehetséges az igen nagyméretű keresési téren belül megtalálni a törőteher globális minimumát, amihez természetesen szükséges a feladat diszkrétizálása. A töréskép optimalizálás egyik legjellegzetesebb vonása a diszkrétizálás végrehajtásában van. Az egyenleteket nem merev testekre írják fel, hanem merev testek határoló élekre. Követelmény, hogy teljesüljön az élek egyensúlya, a törési feltétel, illetve a kinematikai határozottság az élek közti csomópontokban. Ily módon az élek által határolt merev testek egyensúlya is teljesül. A módszer alapján a vizsgálati területen először egy pontrácsot kell felvenni, majd a pontokat összekötő élek összessége tekinthető lehetséges csúszólapnak, az élekből összeállítható kinematikailag lehetséges elmozdulások pedig a lehetséges törésképek. Ez a megközelítés figyelemreméltó mértékben megnöveli a keresési teret azokhoz a módszerekhez képest ahol az egyenleteket merev testekre írják fel (Alwis 2000). E miatt van, hogy a töréskép optimalizálás a ponthálózat felvételére csak kis mértékben érzékeny, illetve előzetes ismeretek nélkül meghatározza a minimális terhet egyensúlyozó törésképet (Smith & Gilbert, 2007).

A töréskép optimalizálásról szóló első cikk a kétezres évek második felében jelent meg (Smith & Gilbert, 2007). Ezután a DLO módszer geotechnikai alkalmazása rohamos fejlődésnek indult. Segítségével megoldhatóak több sávalapból álló alapozások, húzási repedés hatásának vizsgálata, mind sík, mind ferde térsíkon (Smith & Gilbert, 2008). E mellett rétegzett talajok vizsgálata, és talajvíz modellezése is megoldható (Smith & Gilbert M., 2007b), és horgonyzott és befogott támfalak állékonyságának számítása is lehetséges, beleértve a támfalra átadódó terhek közelítő számítását is (Clarke et al., 2010). A módszer helytállóságát kísérleti eredmények is bizonyítják (Lee et al., 2008). Alkalmazására a gyakorlatban is jól alkalmazható program jelent meg, a LimitState Geo. A program nyújtotta lehetőségekről az Alkalmazási lehetőségek című fejezet ad rövid áttekintést (Manual)

2 TÖRÉSKÉP OPTIMALIZÁLÁS

A töréskép optimalizálás alkalmazása során a kinematikai módszer (Plastic Limit Analysis, Upper Bound Theorem) alapján sajátos módon felírt egyenletek a lineáris programozás segítségével oldhatóak meg.

2.1 Geotechnikai modell

A számításokban a terheléseket kvázi statikusnak tekintjük, sík feszültségállapotban lévő talajokat vizsgálunk, a folytonos tér olyan lehetséges csúszólapsereggel közelíthető, amelyet az n számú pontra illesztett m számú él alkot (1. ábra).

Az egyes lehetséges csúszólapon végbemenő relatív eltolódások nyíró és normál irányú komponense szerepel ismeretlenként, azaz kinematikailag lehetséges elmozdulásokat keresünk.

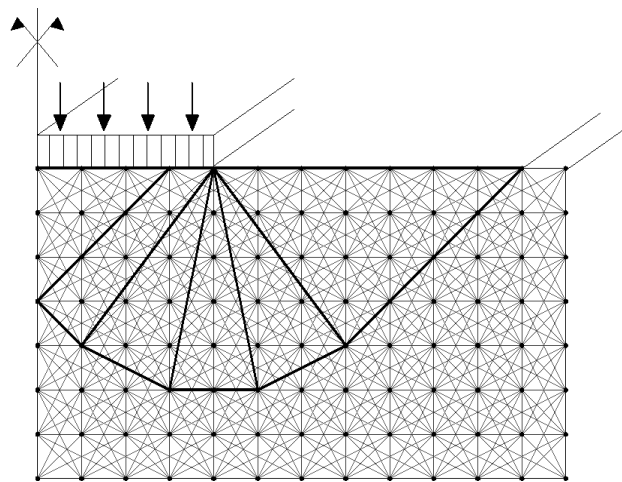
A töréskép optimalizálás a talajok tönkremenetelével foglalkozik, a törés bekövetkezése előtti állapotokban fellépő elmozdulások azonban nem számíthatóak, így a szerkezet megfelelősége használhatósági határállapotban nem igazolható. A tökéletesen képlékeny anyagmodellből következően a törés után az elmozdulások korlátlanul növekedhetnek. A töréskor a modellen látható elmozdulások sem abszolút értékűek, csupán az arányukat jelölik. Ezért nincs lehetőségünk a feszültségek és az elmozdulások között a rugalmas vizsgálatokhoz hasonló egyértelmű megfelelést feltételezni. Ennek ellenére az elmozdulásokról is lehet vonni bizonyos következtetéseket a törés bekövetkeztekor fennálló feszültségállapot alapján. Ezen következtetéseket az asszociatív és a nem asszociatív folyási szabályok jelentik (Chan 1974).

Az asszociatív folyás feltételezése drénezetlen talajok vizsgálatokor jó közelítést ad. Drénezett talajok esetén, különösen, nagy belső súrlódási szögű és kis kohéziójú talajok viselkedését a nem asszociatív folyás írja le (Manzari & Nour, 2000).

A talajmechanikai számítási eljárások nagy részéhez hasonlóan a töréskép optimalizálás is a Mohr-Coulomb törési feltételen alapszik, azonban fontos megjegyezni, hogy általánosított törési feltételek is használhatóak. A számítás megkönnyítése érdekében lineáris törési feltételeket javasolt használni, a nemlineáris törési feltételek a legtöbb esetben linearizálhatóak (Chan, 1974).

2.2 Az alapvető egyenletek

A feladat megoldásakor első lépésben fel kell írni a kinematikailag lehetséges elmozdulás rendszert biztosító egyenleteket, majd a külső és belső munkák értékét. Ezután a terhek által végzett munka minimuma keresendő, ami a lineáris programozás segítségével igen hatékonyan hajtható végre. Változóként a virtuális elmozdulások szerepelnek, az eredmény pedig a töréskép, és az adott talajtömeg teherbírási aránya, azaz az állékonysági biztonság. A számításokban a terhek állandó illetve változó terhekre bonthatóak.



1. ábra: A töréskép optimalizálás során alkalmazott diszkrétizálás és a kapott eredmény

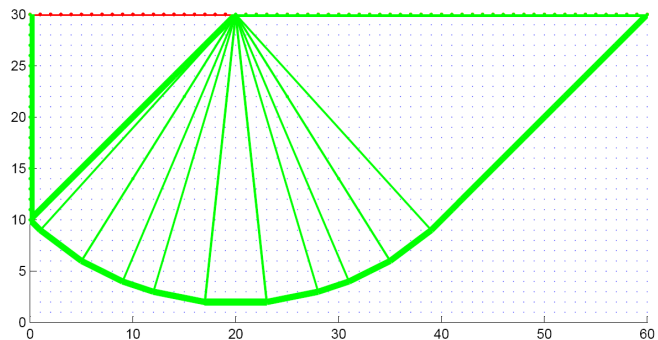
2.3 Alkalmazási lehetőségek

A töréskép optimalizálás segítségével számos a mérnöki alkalmazás szempontjából elengedhetetlen jelenség vizsgálható.

- Inhomogén talajok számíthatók. Nem csupán rétegzett talajok vehetők figyelembe, hanem mélységtől függő inhomogenitás is megadható (Manual; Smith & Gilbert M., 2007b).
- Nemlineáris törési feltételek egyenesekkel közelíthetők, így a Mohr-Coulomb feltételen kívül nemlineáris törési feltétel is alkalmazható például a Hoek-Brown vagy a Barton-Bandis törési feltétel (Manual; Borbély et al., 2011).
- Végtelen nyírószilárdságú elem. Megadható olyan elem ami sokkal merevebb, nagyobb szilárdságú mint a talaj (Manual; Borbély et al., 2011).
- Elfordulni képes elemek segítségével támfalak állékonysága is számítható. A támfalra átadódó erők közelítő számítása is elvégezhető (Clarke et al., 2010, Borbély et al., 2011).
- Talajvíz figyelembevétele is lehetséges. Ehhez természetesen szükséges a talajvíznyomás ismerete, amit bármely jelenleg is alkalmazott módszerrel számíthatunk. A LimitState Geo program a piezometrikus nyomásmagasságokkal számolja a talajvíznyomást (Manual; Smith & Gilbert M., 2007b).
- Egydimenziós elemekkel figyelembe vehetők szádfalak, talajhorgonyok. Az egydimenziós elemek a talajhoz hasonlóan merev képlékeny elemek, így a szádfalakban kialakuló képlékeny csuklók is számításba vehetők (Clarke et al., 2010).
- A gravitáció mellett vízszintes tömegek is felvehetők, melyek segítségével földrengésre való méretezés végezhető el (Manual).

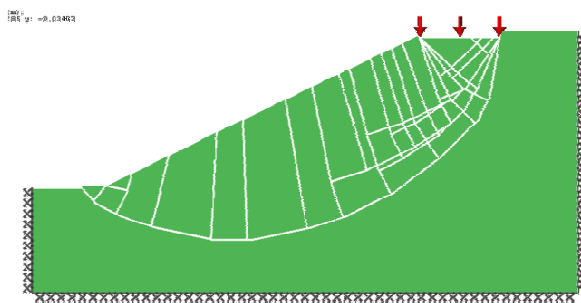
2.4 Biztonság értelmezése

A manapság elterjedt számítási módszerekhez (VEM, lamellás módszerek) képest a legnagyobb különbség a biztonság értelmezésében van. A számított biztonság azt mutatja meg, hogy a változó terhek nagysága hányszorosára növelhető a tönkremeneteli határállapot eléréséig, a talajfizikai jellemzők eközben változatlanok. Ez a megközelítés ugyan eltér a talaj nyírószilárdságán értelmezett (fi-c redukció) biztonság gondolatmenetétől, azonban illeszkedik az Eurocode 7. tervezési módszeréhez, ahol a parciális (biztonsági) tényezőket a hatáshoz és az ellenálláshoz kell rendelni. (Szepesházi, 2008). A 2. tervezési módszer használatos például sávalapok teherbírásának számításakor (2. ábra), melyre több példát mutat Borbély et al. (2011). A hivatkozott TDK dolgozatban egy –a szerzők által készített– töréskép optimalizáláson alapuló programmal készített számítások találhatók, a program megvalósításának egyes kérdéseivel és a módszer elméleti hátterének részletes ismertetésével együtt.

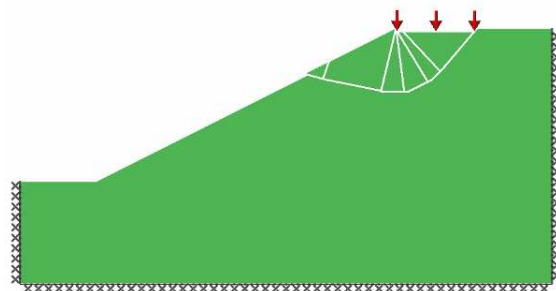


2. ábra: Alapozás teherbírásának számítása

A terheket a módszert használó mérnöknek kell besorolnia állandó és változó terhek közé. Alapvetően változó tehernek kell felvenni a tönkremenetelt segítő erőket, és állandónak a tönkremenetelt akadályozó erőket. Egy alapozás teherbírásának számításakor az alapozási sík fölötti talajtömeget változónak tekintjük 5-10%-kal nagyobb teherbírást kaphatunk. Ilyenkor át kell gondolni, hogy a vizsgált eset reális-e és hogy illeszkedik-e a számítási modell a geotechnikai viszonyokhoz.



4. ábra: Önsúly mint változó teher



3. ábra: Önsúly mint állandó teher

Részűállékonyság számításánál érdemes kitérni a részű koronán elhelyezkedő megoszló terhelésre is. Amennyiben a részű önsúlya változó teher a teljes terhelt részű tönkremeneteléhez tartozó biztonságot kapjuk (4. ábra). Amennyiben az önsúlyt állandó tehernek tekintjük, a ferde térszínen álló sávalap biz-

tonságát kapjuk eredményül (3. ábra). A passzív földnyomás meghatározása esetén akkor kapunk megfelelő eredményt, ha a talaj önsúlyát állandónak tekintjük (Borbély et al., 2011).

A LimitState Geo-val történő modellezés során minden esetben körültekintően kell meghatározni, hogy melyik teher változó és melyik állandó, mivel súlyos elvi hibát véthetünk.

2.5 Számítási hibák

A Bevezetés című fejezetben foglaltaknak megfelelően a töréskép optimalizálás a teherbírás felső becslését adja eredményül. A felülbecslés mértéke feladatonként változik. A hibák forrásuk szerint lehetnek a diszkretizálás hibája, feladat megoldásának hibája illetve a geometriai záródás okozta hiba (Borbély et al., 2011). A diszkretizálás azaz a pontokra és élekre bontás hibája egy átlagosnak mondható hálózat esetén is 1% alatti így nagysága elhanyagolható. A feladat megoldásának hibája, azaz a felírt egyenletek megoldásának pontatlansága ezrelék alatti, szintén elhanyagolható. A töréskép optimalizálás egy sajátos numerikus hiba típusa a geometriai záródás, melyen azt a jelenséget értjük, hogy a számítás rossz értékhez konvergál, a felülbecslés mértéke nő. Ez a hiba tipikusan nagy belső súrlódási szögű talajok esetén fordul elő. Nagysága az 5-10%-ot is megközelítheti, mértéke a diszkretizálás finomításával jelentősen csökken, de meg nem szűnik. A jelenséget a külföldi szakirodalom is csak érintőlegesen tárgyalja, további kutatása szükséges. A gyakorlati alkalmazás szempontjából mindazonáltal érdemes megjegyezni, hogy a nagy belső súrlódási szögű talajok esetén a diszkretizálást érdemes a lehető legsűrűbbre választani, így a hiba nagysága elfogadható szinten (tipikusan 5 % alatt) maradhat (Borbély et al., 2011).

2.6 A feladatok megoldhatóságáról

Előfordulhat olyan eset, hogy a LimitState Geo-val készített modellek helyesek ugyan, a feladat mégsem oldható meg. Ezeket az eseteket három csoportba sorolhatjuk (manual):

- *unstable*: ebben az esetben az elmozdulások korlátozás nélkül növelhetőek, a feladat nem stabil, például egy önsúllyal terhelt rézsű, ahol a kohézió zérus és a rézsűhajlás nagyobb mint a belső súrlódási szög.
- *locked*: a teher értéke korlát nélkül növelhető anélkül, hogy a feszültségek megsértenék a Mohr-Coulomb törési feltételt. Ez az eset például akkor áll fenn, ha egy rézsű hajlásszöge kisebb, mint a belső súrlódási szög.
- *unknown*: Numerikus instabilitás lép fel, azaz a felírt feladat elvileg megoldható ugyan, de a feladatot numerikus problémák miatt nem lehet megoldani. A LimitState Geo által használt Mosek LP megoldó igen robusztus, a felírt problémákat elő-feldolgozza (*pre-solver*). Ennek ellenére előfordulhat, hogy nem oldható meg egy feladat, ilyenkor érdemes olyan változtatásokat eszközölni a modellben, ami a kapott eredményt nem befolyásolja. Olyan helyen módosítani a geometriát, ahol várhatóan nem következik be törés, az összes változó teher értékét szorozni egy adott konstanssal, majd a kapott állékonysági biztonságot visszaosztani vele. Ezek az eredményt nem befolyásoló változtatások általában elegendőek, hogy a program képes legyen elvégezni a számításokat, így a modell megoldhatóvá válik.

3 A VIZSGÁLT RÉZSŰCSÚSZÁS

A vizsgált rézsű egy autópálya bevágási rézsűje, ahol a legnagyobb bevágás mértéke meghaladja a 14 m-t a károsodott szelvény környezetében (5. ábra). A megépült bevágás 1:2 hajlású, a rézsű félmagasságában 3 m széles padkával.

A bevágást két építési fázisban alakították ki: először a jobb pálya, aztán a bal pálya készült el. A két fázis között több év telt el. A tönkrement rézsűt helyreállították, így a vizsgálataink három időszakra vonatkoznak: 1. szakasz a jobb pálya bevágása, 2. szakasz a pálya bővítése során kialakult rézsű melyben a tönkremenetel végbement, illetve a helyreállított rézsű.



5. ábra: A tönkremenetel környezete

3.1 Előzmények, alapadatok

A területen mind az autópálya építést megelőzően, mind bővítéskor számos fúrást mélyítettek. A fúrások egy részét az egykori térszintről, a többi pedig az első bevágás elkészülte után kialakult új terepszintről készítették. A feltárások tapasztalatai szerint jellemzően szemcsés talajok települtek a területen: kavicsos homok, homokos kavics, iszapos homok. A szemcsés rétegek között kis és közepes plaszticitású agygrétegek települtek.

Már a geotechnikai feltárások is megmutatták, hogy a terület nagyon heterogén, a szemcsés rétegek között is eltérő szemeloszlás jellemző. Az alkalmazott fúrási technológiával nem lehet kimutatni a szemcsés rétegek vélhetően kovás kötését, mely az összetetnek nagy szilárdságot ad. A feltárások, illetve a helyszínen tapasztalt vizesedések alapján a kötött rétegek enyhén lejtenek a pálya felé.

A bevágás durva földmunkáját 2009. szeptemberére fejezték be, és már novemberben rézsűhámlást észleltek. A tél beállta miatt további földmunka végzésére nem volt lehetőség, így az őszi és téli csapadék a rézsűt áztatta, ami átlagos geotechnikai adottságok mellett nem feltétlenül jelentett volna problémát.



6. ábra: Nedvesedési foltok, mozgások

2010-ben Magyarországon az éves átlagos csapadék mennyiség 1,4-1,6-szerese hullott le, különösen május - szeptember hónapok voltak csapadékosak, májusban az összes csapadékmennyiség megközelítette a 200 mm-t, mely az éves átlag (~520 mm) majdnem 40%-a, a májusi átlag majdnem négyszerese. E mellett 2010. szeptember 1-én a vizsgált terület térségében Richter skála szerinti 2,0 magnitúdójú földrengés volt.

A rézsű felszínén akkor is vizesedési foltok voltak láthatóak, amikor az időjárás meleg, száraz volt (6. ábra).

3.2 Rézsűcsúszás bemutatása

Szeptember 15-ére a korábbi mozgások térségében újabb kisebb rézsűhámlás alakult ki, mely környezetében jelentős vizesedés mutatkozott (6. ábra). Az új mozgáskép a 2009. novemberivel közel megegyező vonalban, a padka alatt 1-2 m-rel futott ki a felszínre. A kb. 20 m szélességben megmozdult talajtömeg 1-2 m-t mozdult el. Szemből nézve a csúszástól jobbra nedvesedés volt tapasztalható, melynek legmélyebb pontja a rézsűláb felett ~1m-rel mutatkozott, onnan mindkét irányban a vizesedés emelkedik egészen a padka vonaláig (6. ábra). E vizesedési vonal egy geológiai keletkezésű vápára – réteghatárra utal.



7. ábra: A kialakult rézsűcsúszás

2010. szeptember 16-án a reggeli órákban jelezték, hogy a bekövetkezett mozgás felett a teljes rézsűfelületet érintő repedés látszik, mely azonnali intézkedést tesz szükségessé. Ezt követően a rézsű nagy tömegben megcsúszott (7. ábra). A helyszínen gyűjtött tapasztalatokat az alábbiakban foglaljuk össze:

- A csúszólap a kisajátítási határ előtt húzóódó övások vonalában metszett ki a felszínre. A hátsó függőleges falban álló, látható talajzóna kb. 5 - 6 m mélységű volt.
- A padka kb. 5 - 7 m-rel mozdult el kifelé, és mintegy 1,5 - 2,0 m-rel került lejjebb.
- Az elmozdult padka hátsó felén kialakult repedések elérik a 2 m-es mélységet.
- A kimozdult talajtömeg az eredeti rézsűvel közel azonos hajlású.
- A csúszással érintett területen, az övások mögött található geodéziai alappont 3 cm-rel mozdult el kifelé.
- A padka alatt kb. 2 - 3 m-rel, melynek vonalában a rézsű felületén több helyen vizesedés volt tapasztalható, vékony agyag réteg található.
- A csúszás látható felületén szemcsés anyag (kavics) található, hasonlóan a tömbösen álló, leomlott elemek is szemcsés talajból állnak. A jellemzően vörös színű talaj helyenként barnászürkés szennyeződésű az elválási felületeken, mely a mozgást megelőző repedezettséget jelent, de legalább is a függőleges jobb vízvezető felületeken bejutó víz hatását érzékelteti.

A megcsúszott talaj kiemelésekor több helyen néhány centiméteres vastagságban kötött rétegeket tártak fel. Ezen agyagrétegek fúrás segítségével nem kimutathatóak, mivel a talajmechanikai spirál fúró ledarálja azokat. A szemcsés rétegeken leszivárgó víz ezeken az agyagrétegeken a lejtés irányába szivárognak, és a réteg nyírószilárdságát rontják (8. ábra).



8. ábra: Vékony rétegekben megjelenő szivárgó víz

A tapasztalatok alapján blokkos mozgáskép volt valószínűsíthető, az agyag réteg felszíne a beszivárgó csapadék hatására felázott, felpuhult, nyírószilárdsága csökkent, és e felületen a szemcsés réteg elmozdult.

A padka alatti részen a kimozdult talajtömeg tömörödött, a padka vonala mögött fellazult zónák voltak láthatóak, mely hátrarágódó mozgásképre utal. A hátsó, közel függőleges fal a nagy mozgást követő időszakban kismértékben hátrarágódott, a mozgás elérte a kisajátítási határt és kb. 10 m-en a kerítés is leszakadt. A csúszási karéj jobb oldalán, ahol az első mozgáskor repedések alakultak ki, további mozgások nem jelentek. A káresemény bekövetkezése utáni időszakban jelentős továbbterjedés a nagy magasságú, közel függőleges falak ellenére sem alakult ki.

A helyszíni tapasztalatok és az előzmények ismerete alapján a kár több kedvezőtlen körülmény együttes hatásának eredményeként alakult ki.

- A területre heterogén rétegzettség jellemző, a durva szemcsés rétegek között vékony agyagcsíkok találhatóak, melyek a pálya irányába enyhén lejtének. A spirál talajmechanikai fúróberendezéssel ilyen vékony rétegek kimutatása nem volt lehetséges.
- A növényirtást követően 2009. október hónapban kialakított bevágási rézsű szabadon hagyott felülete a rá hulló csapadék beszivárgását tette lehetővé. A durva szemcsés rétegeken beszivárgó víz az agyag felületén a pálya felé szivárgott, az agyag felületét felpuhította, annak nyírószilárdságát rontotta.
- Az építés időszakában a sokévi átlaghoz képest 50 - 60%-kal több csapadék hullott. Az éves átlag a tönkremenetel környezetében 520 mm körül van, míg a térségében február - szeptember között 750 mm csapadék esett.
- Feltételezhető, hogy a kialakult károsodás előtt kb. 2 héttel bekövetkezett földrengés a kár keletkezésében szerepet játszhatott. Az elázott felületet ért rezgésszerű hatás a nyírési sík kialakulását befolyásolhatta, elősegíthette.



9. ábra: A közel függőleges földfal



10. ábra: Blokkokban álló lecsúszott földtömeg

Megjegyezzük, hogy a károsodás a kisajátítási határig csak kis szakaszon rágódott hátra, a háttérterületet érintő további mozgások a kár kialakulását követő 2 hónapban sem keletkeztek. Ez támasztja alá azt a feltételezést, miszerint a mozgás létrejöttében döntő körülmény, hogy a területre hulló csapadék a megnyitott részűfelületen be tudott szivárogni és az agyag felszínének nyírószilárdságát rontotta. A csatlakozó háttérterületet erdő, sűrű növényzet borítja, mely a csapadék jelentős részét felveszi, így a beszivárgási arány sokkal kisebb, ezáltal ott nem alakult ki hasonló probléma.

A kialakult részűcsúszás után a szemcsés rétegsor több méter magasságban közel függőleges falban állt (9. ábra), a leszakadt tömbök nem estek szét, a durva szemcsés rétegek - vélhetően kovás - kötással rendelkeznek (10. ábra).

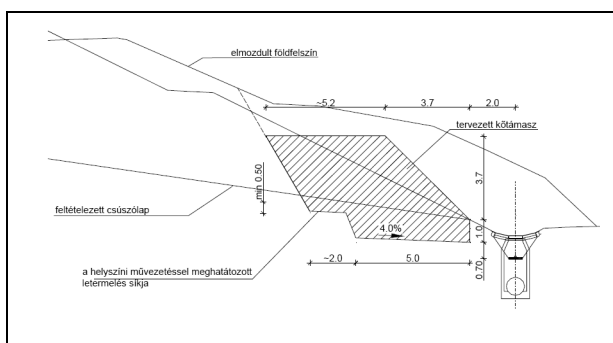
3.3 Helyreállítási munkálatok

A további mozgások megelőzése végett a Tervező kőborda lábmegettámasztást írt elő. A kimozdult tömeg lábának eltávolítása további mozgás, hátrarágódás veszélyével jár, ezért a kőbordák építése két oldalról a meg nem csúszott szakaszokon kezdődött. Az elkészült kőbordák részleges megettámasztása mellett a károsodott zónában lehetővé vált a szakaszos munkavégzés.

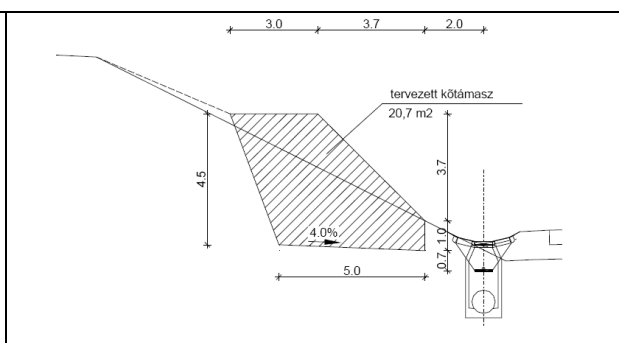
Az alábbi ábrákon látható a kőborda tervezett keresztmetszete: a mozgással nem érintett szakaszon kialakított keresztmetszet (12. ábra) és a csúszási zónába tervezett keresztmetszet (13. ábra). A kőborda a pontenciális csúszólap alá nyúlt legalább 0,5 méterrel.

A kivitelezés folyamatos monitoring mellett és geotechnikai művezetés és irányítás alatt történt. A részű mozgásának ellenőrzésére a padkán és a részű tetején geodéziai mérőpontok kiépítése és ellenőrzése napi rendszerességgel szükséges volt. A mérési eredmények további mozgást nem mutattak.

A folyóka alatt található hossz-szivárgóba keresztshivárgót is bekötöttek, hogy az esetlegesen megjelenő szivárgó vizet elvezesse. A drén geotextíliába tekert kulékavics szivárgó testtel készült el.



11. ábra: Megettámasztó borda a károsodott zónában



12. ábra: Megettámasztó borda a károsodott zónán kívül



13. ábra: Az elkészült kőborda



14. ábra: A hátranyúló kőbordák

A károsodott zónában a tervezetnél nagyobb keresztmetszetű lábmegtámasztást alakítottak ki (13. ábra), illetve négy hátranyúló kőborda készült el (14. ábra), az állékonysági biztonság növelése érdekében.

4 SZÁMÍTÁSOK

A helyszíni bejárások és a kivitelezés tapasztalatai alapján a bekövetkezett rézsúmozgás blokkos mozgásként alakult ki, azaz a felső szemcsés réteg az alatta levő vékony felázott, felpuhult agyagréteg felszínén csúszott le.

A kivitelezéskor a csúszólap helyzete pontosan meghatározható volt. Mivel a tönkremenetel a meghatározott helyzetű agyagréteg mentén ment végbe a modellezésnél azzal a közelítéssel éltünk, hogy a szemcsés rétegsor alatt agyag található. Ez a számítás eredményét nem befolyásolja, mivel a mozgások az agyagréteg fölötti területre korlátozódtak.

A talajrétegek nyírószilárdsági paramétereinek felvételénél egyrészt a helyszínen készült korábbi feltárások, másrészt a vizsgált területhez közel eső bevágáshoz készült új vizsgálatok eredményeit vettük figyelembe. A két talajréteg, illetve a rézsúláb megtámasztásként beépített kőakat jellemzőit az 1. Táblázat foglalja össze.

1. Táblázat: A talajfizikai jellemzők

Talajjellemző		Hom. kavics - kav. homok	Agyag	Kőakat
térfogatsúly	γ [kN/m ³]	21	20	21
belső súrlódási szög	φ [°]	32	22	44
kohézió	c [kPa]	10	30	15
összenyomódási modulus	E_{oed} [MPa]	25	12	50
újratelhelési modulus	E_{ur} [MPa]	75	36	150

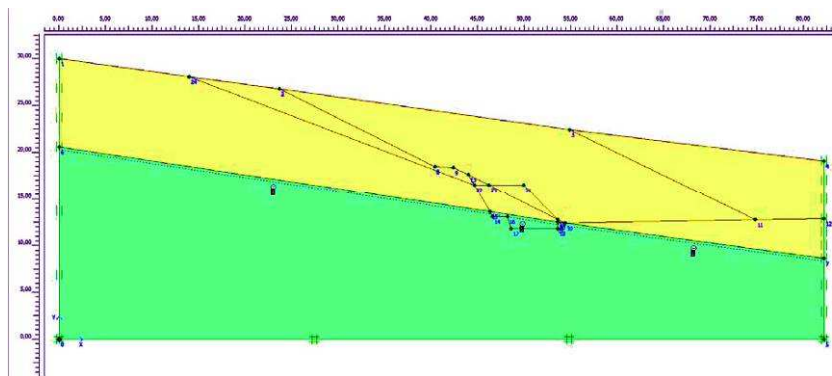
A számításokat elvégeztük a hagyományosnak tekinthető végeselemes módszert használó Plaxis szoftverrel és a töréskép optimalizálást alkalmazó LimitState Geoval.

4.1 Plaxis

A számításokhoz a PLAXIS V8 véges elemes szoftvert használtuk. A felkeményedő talajmodellt alkalmaztuk, és az építési fázisokat külön vizsgáltuk kétdimenziós modellel. Így a rézsú bevágási jellege és a munkafázisok hatása figyelembe vehető.

A Plaxis szoftver az állékonyság vizsgálatát az úgynevezett φ - c redukcióval végzi, ami azt jelenti, hogy a talajok kohézióját (c) és belső súrlódási szögének tangensét ($\tan \varphi$) addig csökkenti, amíg tönkremenetel be nem következik. A programban lehetőség van határfelületi elem (interface) megadására, melyhez megadható a nyírószilárdság mobilizálódási aránya (R_{inter}). Az R_{inter} értéke maximum 1,0 lehet és azt mutatja, hogy a talaj nyírószilárdságának mekkora részével számoljon a határfelületen a program. A határfelületi elem lehetőséget nyújt arra is, hogy annak segítségével a rézsúban konkrét csúszólapot jelöljünk ki.

A számításhoz felvett geometriai modellt a 15. ábra mutatja. Az ábrán világos szín jelöli a szemcsés rétegeket, sötét pedig az agyagot.



15. ábra: A Plaxis modell

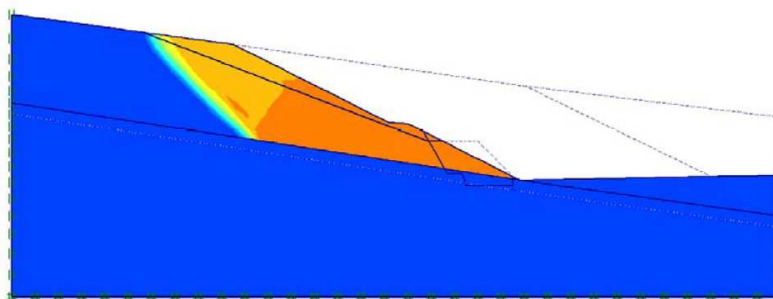
Láthatóak a különböző építési fázisok geometriái (15. ábra). Az ismert csúszási síkon felvett határfelületi elemhez az R_{inter} értékét úgy vettük fel, hogy a biztonság 1,0 körüli érték legyen.

Az 2. fázis kiemelése után $R_{inter}=0,35$ esetén a biztonság $n = 1,06$ -ra adódott a kialakult elmozdulás mezőket az 16. ábra érzékelteti.

A szoftverrel állékonysági

biztonságot határoztunk meg és ilyenkor az elmozdulások csak a tönkremenetelt szemléltetik értékük nem valós, ezért az elmozdulások léptékét nem tüntettük fel az ábrákon. A valóságban jelen számítás eredményével megegyező csúszási kép alakult ki, a mozgás a koronaél mögött néhány méterrel futott ki a felszínre.

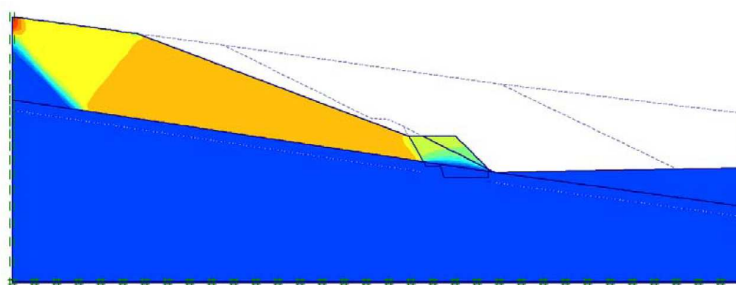
A Helyreállítási munkálatok részben bemutatottaknak megfelelően helyreállított részű állékonyságát is igazolni kellett (17. ábra). A számításunkban a biztonság javára való közelítésként a károsodott szakaszon a tervezett kőmeztámasztást vettük figyelembe, míg a valóságban nagyobb kiemelést, így nagyobb meztámasztó testet készítettek, valamint négy helyen átvágva a csúszólapot hátranyúló kőbordát is kialakítottak.



16. ábra: Részű tönkremenetele a 2. építési fázisban

A számításban elhanyagoltuk a konszolidáció hatására feljavuló nyírószilárdságot, mely szintén a biztonság javára való közelítést eredményezett. A felület történő letakarását követően a beszivárgás mértéke jelentősen csökkenni fog, így az agyag réteg felszínének felázása, puhulása is kevésbé fordulhat elő.

A helyreállítás során beépített kőprizma és az 1:2,6 meredekségű részű kialakításával a biztonság $n = 1,35$ -re adódott (17. ábra). Az EuroCode 7 (MSZ EN 1997-1) az általános állékonysággal szemben $\gamma = 1,35$ biztonságot követel meg, ami szerint a részű állékonysága a biztonság javára tett közelítésekkel együtt is megfelelő.



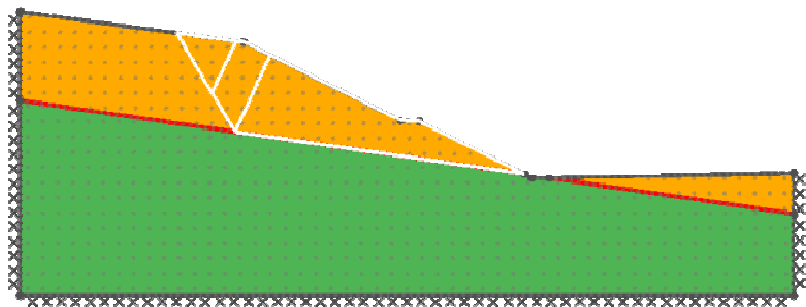
17. ábra: Helyreállított részű tönkremenetele

4.2 LimitState Geo

A LimitState Geo-val történő számítások jelentősen különböznek a végeselemes számításoktól. A több fázisban történő építés és a részű bevágási jellegének érdembeli figyelembevételére nincs lehetőség. Mivel ez a szoftver képlékeny teherbírást számol így a rugalmas alakváltozásokat elhanyagolja azaz merev tökéletesen képlékeny anyagmodellt vesz figyelembe. A biztonság értéke a terhek és a teherbírás arányát adja meg, és nem ϕ -c redukciót végez a program. A töréskép optimalizálásnál a talajfizikai paraméterek nem változnak, a szoftver a terheket növeli a számításban és az eredményül kapott biztonsági tényezővel azt mutatja, hogy a terhek hányszorosát képes elviselni a szerkezet. Részűállékonyság számításánál a önsúly terheket növeli és ezáltal számítja a biztonságot.

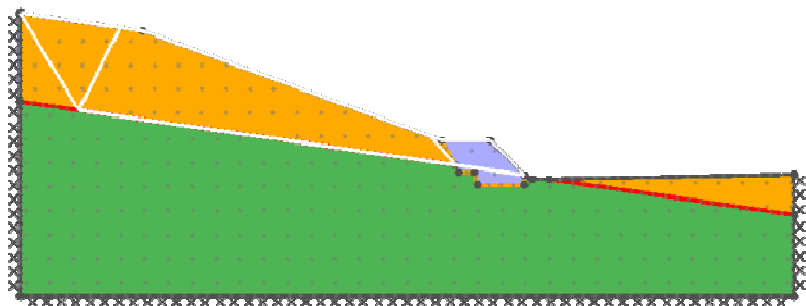
A talajfizikai jellemzők és a geometria azonosak a véges elemes programban felvett értékekkel (18. ábra). Állandó tehernek az agyag és az útpálya alatti homokos rétegek súlyát tekintettük, változó teher volt a rézsút alkotó homokos réteg. E mellett a megtámasztó bordát is állandó teherként vettük figyelembe, mivel önsúlya a tönkremenetelt akadályozó teher.

A biztonság értéke $R_{inter} = 0,30$ estén $n=1,034$ -re adódott. Ez 14%-kal alacsonyabb R_{inter} értéket feltételez, a végeselemes számításokkal felvett R_{inter} értéknél. A kialakult töréskép azonos. A két számítás eredménye közötti különbség elfogadhatónak tekinthető. A különbség oka az lehet, hogy a ϕ -c redukcióval számolt biztonsági tényező kisebb értéket ad, mint az egyesületi módszerrel meghatározott, igaz ez a különbség az 1,0 biztonság értékéhez közeledve csökken. Az eredeti keresztmetszet vizsgálata és az eredmények összehasonlítása a modell kalibrálását is szolgálja.



18. ábra: Rézsút tönkremenetele a 2. építési fázisban LimitState Geoval

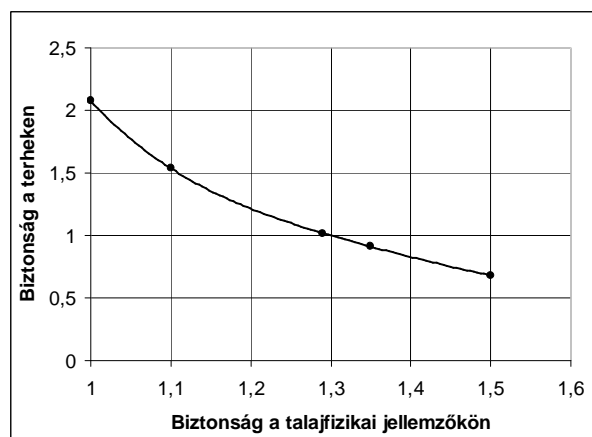
A helyreállított rézsút vizsgálatkor a körakat és a talajok közti kohézió és súrlódás értéke a homokos kavicséval azonos. A végeselemes számításához hasonlóan itt is ugyanúgy lehetett felvenni a határfelületi elemet (19. ábra).



19. ábra: A helyreállított rézsút tönkremenetele LimitState Geo

A biztonság a 2. fázisban töréskép optimalizálással $n=2,085$ -re adódott, a töréskép közel azonosnak tekinthető a végeselemes számításokból kapottal. A kétféle módszerrel számított biztonságok között 54% a különbség ami igen jelentős. A különbség oka a biztonsági értelmezésében van, amennyiben a LimitState Geo-val is elvégezzük a ϕ -c redukciót a biztonság 1,30-re adódik ami 3,7%-os eltérés a Plaxissal végzett számításokhoz képest.

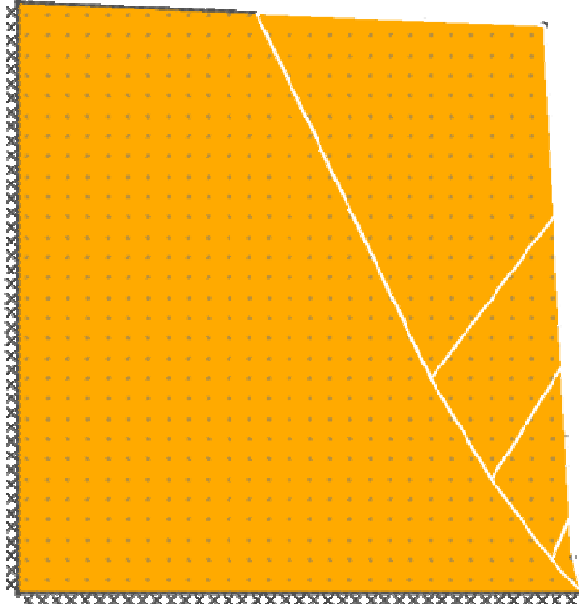
Az 1. Grafikon mutatja a terhekre vonatkozó biztonság és a talajfizikai jellemzőkre vonatkozó biztonság közti összefüggést. Amennyiben a talajfizikai jellemzők biztonsági tényezője 1,00, a terheken 2,085 a biztonság. Többféle talajfizikai jellemzőn történő futtatás eredményére polinomot illesztettünk. Ahol a polinom metszi az 1,00-es biztonsághoz tartozó vízszintes egyenest, a vízszintes tengelyre vetítve megkapjuk azt, hogy mekkora biztonsága van a talajfizikai jellemzőnek amennyiben a terhek biztonsági tényezője 1,00. Látható, hogy a biztonság nem lineárisan változik a talajfizikai jellemzők módosításával, és ez okozza a kétféle biztonság közötti eltérést.



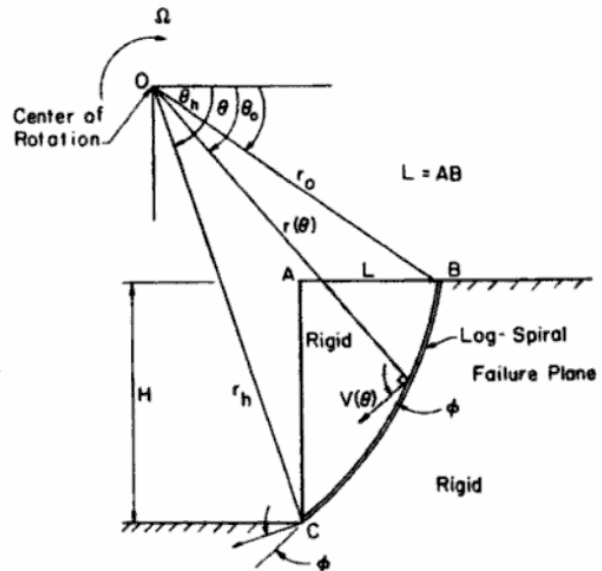
1. Grafikon: ϕ -c redukció LimitState Geoval

A rézsúmozgást követően kismértékű hátrarágódás után a szemcsés rétegek közel függőlegesen több hónapig állékonyak maradtak. A természetes növénytakaró csökkentette a vízbeszivárgást, így az agyag réteg nyírószilárdsága kevésbé romlott le. Ez okozta azt, hogy hátrarágódás a kisajátítási terület határán megállt. A növényzettel takart szemcsés rétegsor talajfizikai jellemzőinek becsléshez vizsgáltuk a közel függőlegesen falban álló talajtömeg állékonyosságát. Ekkor a szemcsés rétegsor kohézióját addig növeltük ($\phi=32^\circ$ -os belső súrlódási szög mellett), míg a biztonság el nem érte a közel 1,0 szintet. Mivel a csúszás egészéről, beleértve a függőleges földfalat is felmérés készült a geometriai ismert volt.

Az $n=1,00$ biztonság esetén a kohézió értéke 21 kPa-ra adódott. A kialakult törésképen (20. ábra) megfigyelhető hogy a függőleges földfal nem sík csúszólap mentén megy tönkre. A megtámasztás nélküli függőleges földfalak állékonyosságának meghatározására a Rankine-féle képlet az általánosan elfoga-



20. ábra: Függőleges földfal LimitSate Geo



21. ábra: Logaritmikus spirál csúszólap Fellenius szerint

dott, mely sík mentén történő tönkremenetelen alapszik. E mellett Fellenius logaritmikus spirális csúszólapra vezetett le egy formulát, mely mind alakjában (21. ábra) mind a biztonság értékében közelebb áll a LimitState Geoval kapott eredményekhez, és a biztonság kisebb felső korlátjának tekinthető mint a Rankine féle megoldás (Borbély et al., 2011).

5 AZ EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A részű a számítottnál nagyobb biztonsággal rendelkezik, hiszen a modellezés során jelentős egyszerűsítéseket, közelítéseket alkalmaztunk a biztonság javára. Így a helyreállított részű állékonysága megfelelőnek tekinthető.

A Plaxissal és a LimitState Geoval kapott eredmények mutattak eltéréseket ugyan de közel azonosnak tekinthetőek. Annak ellenére, hogy a töréskép optimalizálás jóval egyszerűbb eljárás a végeelemes számításoknál jelen feladat megoldására megfelelőnek bizonyult. Mindenképpen fontos kiemelni, hogy a terhek változó illetve állandó csoportba történő besorolása jelentős elvi hibához vezethet, így a terhek besorolását körültekintően kell elvégezni.

Jelentős eltéréseket okozhat a biztonság értelmezése is. Az EuroCode előírásai alapján háromféle tervezési módszert különböztetünk meg, melyek közül a 2. és 3. használatos (Szepesházi, 2008). A módszerek a parciális tényezők értékében és a biztonság értelmezésében térnek el. A 2. tervezési módszer alkalmazandó síkalapok, cölöpök, támszerkezetek, talajhorgonyok és minden más geotechnikai szerkezet tervezéséhez. Ekkor a parciális tényezők a hatáshoz és az ellenálláshoz rendelő, melyből meghatározható eredő biztonság megfelel a töréskép optimalizálás által adott biztonságnak. A 3. tervezési módszerrel részűk és bármely más geotechnikai szerkezet általános állékonysága ellenőrizhető. Ekkor a parciális tényezőket a talajfizikai paraméterekhez kell rendelni, azaz az állékonyság biztonsága a talajfizikai jellemzőkön értendő, mely a ϕ -c redukciós számítási eljárás által adott biztonság értékének felel meg. A biztonság értelmezésének különbsége jellemzően a nagy belső súrlódási szögű talajok esetén okoz eltérést. Az eredeti keresztmetszet vizsgálatokor, ahol a legnagyobb belső súrlódási szög $\phi = 32^\circ$, az eltérés 14%. A helyreállított részű esetén, ahol a legnagyobb $\phi = 44^\circ$ a különbség 54 %-ra adódott. A különbség kötött talajok esetén már nem tekinthető jelentősnek (Borbély, 2011). Mindazonáltal fontosnak tartjuk kiemelni azt, hogy amennyiben szemcsés talajok érintettek a modellezésben és a 3. tervezési módszert használunk, szükséges lehet a ϕ -c redukciós számítás elvégzése a töréskép optimalizálást alkalmazó (pl. LimitState Geo) programmal is.

A függőleges földfal vizsgálata alapján feltételezhető, hogy a kisebb nedvességtartalmú növénytakaróval fedett szemcsés rétegek kohéziója nagyobb a helyreállított keresztmetszet állékonyságának igazolására használt modellben feltételezetténél. A kohézió értéke a számítások alapján 21 kPa. Ez 31 %-al nagyobb mint a részűkre vonatkozó modellekben feltételezett 16 kPa-os kohézió.

6 ÖSSZEGRZÉS

A tönkremeneteli határállapot számítására jelenleg két fő módszer áll a mérnökök rendelkezésére: a végeleemes modellezés és a különböző lamellás eljárások. A lamellás eljárások (Bishop, Janbu, Morgenstern and Price, stb.) nagy hátránya, hogy csak részsük vizsgálatára képesek, a törésképp optimalizálás nagy előnye, hogy jóval szélesebb körű számítások végezhetőek el vele. A végeleemes modellezés hatékonysága vitán felül áll, ellenben a tönkremeneteli határállapot számításakor alkalmazott iterációs eljárás sok időt emészt fel. Sok esetben szükségtelen a végeleemes számítások végrehajtása, ezt mi sem bizonyít jobban, mint az, hogy a legtöbb geotechnikai tervezőiroda rendelkezik egyszerűbb eljárásokat használó programokkal.

A törésképp optimalizálás közelítő eljárás, nagy mennyiségű számítás szükségessége esetén jó alternatíva lehet a végeleemes számítások mellett, illetve a lamellás módszerek helyett.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- Alwis W.A.M. 2000. Discrete element slip model of plasticity. *Engineering Structures* 23, 1494–1504.
- Borbély D., Borbély G., Koppányi Z. 2011. Törésképp optimalizálás Elmélet megvalósítás, alkalmazás, *TDK dolgozat Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.*
- Chen W.F. 1975 *Limit Analysis and Soil Plasticity, Developments in Geotechnical Engineering* 7. Elsevier. 1-605.
- Chen W.F., Liu X.L. 1990. *Limit Analysis in Soil Mechanics, Developments in Geotechnical Engineering* 52. Elsevier. 111-437.
- Clarke SD, Smith CC, Gilbert M 2010. Analysis of the stability of sheet pile walls using discontinuity layout optimization. *7th European Conference in Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Trondheim, June*, 163-168.
- LimitState Geo Manual, url.: http://www.limitstate.com/files/pdf/geo/GEO_Manual.pdf (Megtekintés dátuma: 2011. 05. 10.)
- Lee Y., Smith C., Cheuk C. Y. 2008. Bearing capacity of embedded foundations, *2nd International Conference on Foundations, ICOF 2008, Dundee*, 961–972.
- Manzari M. T., Nour M. A. 2000. Significance of soil dilatancy in slope stability analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126(1), 75–80.
- Smith C.C., Gilbert M. 2007. Application of discontinuity layout optimization to plane plasticity problems. *Proc. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463 (2086), 2461 – 2484.
- Smith C. C., Gilbert M. 2007b New upper bound solutions for layered soil bearing capacity problems using discontinuity layout optimization, *10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Brisbane*, 250–255.
- Smith C., Gilbert M. 2008. Limit analysis of the stability of foundations on inclined ground, *2nd International Conference on Foundations, ICOF 2008, Dundee*, 1683–1692.
- Szepesházi R. 2008. *Geotechnikai tervezés*, Business Media Magyarország Kft. 16-36.