

Síkcúsúzólap talajtörés egy spanyol zagygát alatt

Nagy László

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnikai Tanszék, lacinagy@mail.bme.hu

Huszák Tamás

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnikai Tanszék, huszak@mail.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: Bányászat tekintetében Magyarország nem minősül nagyhatalomnak, két évvel ezelőtt azonban egy a bauxtfeldolgozáshoz tartozó zagytározó okozata az elmúlt évtizedek egyik legnagyobb katasztrófáját. Ez a sajnálatos esemény azonban világviszonylatban nem különlegesség, többszáz zagygát tönkremeneteléről tudunk csak a múlt század második feléből. Egy a magyarországi katasztrófaéhoz kísértetiesen hasonló, dél-spanyolországi zagygát agyag talajban síkcúsúzólapos talajtöréssel ment tönkre.

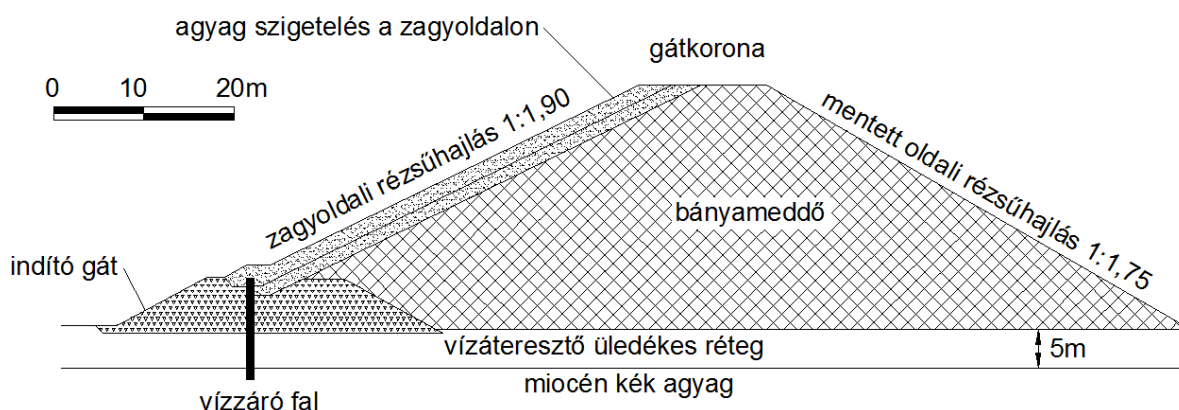
Kulcsszavak: gátszakadás, Aznalcóllar, síkcúsúzólap, altalajtörés,

1 BEVEZETÉS

A közelmúltban Ajka és Kolontár környezetében súlyos környezeti katasztrófa történt, amely hatalmas környezeti károkat és 10 emberéletet is követelt. Sajnos nem ritkaság az ilyen esemény előfordulása a világban, a II. világháború óta kétszázhusznál is több hasonló eset fordult elő. Korai még a dunántúli baleset okainak részletes ismertetése, azonban 1998. áprilisában geotechnikai szempontból sok tekintetben hasonló gátszakadás következett be Spanyolország déli részén, Sevilla tartományban.

Az Ibériai pirit övben található bányák már az ókorban is közismertek voltak. A bányászathoz nagy-méretű zagytározók szükségesek. Aznalcóllarban a Los Frailes ólom-cink bánya zagytározó medencéjét a Boliden svéd-kanadai vállalkozás üzemeltette. A kb. 2×1 km alapterületű (200 ha felületű) tározót alvízi irányba bővítették, a felvízen agyagréteggel szigetelték a gátestet. A teljes tározót kb. 1/3-2/3 arányban kettéosztotta egy kelet-nyugat irányú belső (kazetta) töltés, amely az északi piroklaszt medencét választotta el a déli pirit (4,8 g/cm³ anyagsűrűség) medencétől.

A zagytározót 1977-ben kezdték építeni. Elsőként egy kis töltés épült vízzáró függönyfallyal, a töltés alatti szivárgás meggátlására. Az eredetileg mindösszesen 6-8 m magasságú gát 21 év alatt, 1998-ra elérte a 25-28 m-es magasságot, átlagosan évi 1,5 méteres magasítással. A tervek 1:1,90-es zagydoldali és 1:1,75-ös mentett oldali rézsút (1. ábra) tartalmaztak. A zagytároló gátja több szempontból is tervezési hiányosságokat mutatott. A tervezetthez képest a megvalósult gátest kissé módosult, ugyan továbbra is alvízi irányba épült tovább, de a szimmetriája tovább romlott. A mentett oldali rézsűjének meredeksége 30°-ról 39°-ra nőtt, valamint a koronát is fokozatosan szélesítették.



1. ábra Aznalcóllar gát tervezett szelvénye

2 A TÖNKREMETEL

1998. április 25-én 1 óra előtt egy elektromos vezeték elszakadása volt az első jel, ami a gátszakadásra utalhatott volna. Az ügymenetnek megfelelően ki is küldtek egy elektromos karbantartót. Három óra körül az elektromos felülvizsgálat repedéseket jelentett a gátkoronán és egy kis tavat a töltéslábnál a piroklaszt részen, jelezve, hogy a zagy átfolyása 3 óra előtt elkezdődött. A közeli folyó vízmércéjén 3 óra 30 perckor egy hirtelen árhullám-csúcsot észleltek. A zagy kifolyása a tározóból este 8 órára befejeződött. A gátszakadás a tározó keleti oldalán következett be, a piroklaszt medence délkeleti sarkánál. Ez indította el a pirit medence gátjának tönkremenetelét 700 méter hosszon. A gát 67 métert mozdult el kelet felé a miocén márgán. A mozgás során a korona maximális süllyedése 2,4 méter volt.

A tározóból 1,5 millió m³ szilárd anyag és 4,0 millió m³ savas víz (pH=2-4) ömlött ki. Közel 0,3 millió m³ szilárd anyag a gát közelében leülepedett, a maradék 63 km hosszon szennyezte be a területet víztelenítő Agrio és a Guadiamar folyókat. A savas vizes zagy elöntött mezőket, elpusztította a vízi életet és nehézfémeket rakott le összesen 4600 futballpályányi területen. Az iszaplavina pont azelőtt állt meg, hogy elérte volna a világörökség részét képező Donana Nemzeti Parkot, hála a gyors beavatkozásnak, amellyel egy rögtönzött gátat emeltek. A Donana Nemzeti Park Európa egyik legnagyobb vadrezervátuma, amely 75 ezer hektáron nyújt átmeneti pihenőhelyet a költöző madarak millióinak a tengerparton.

3 A GÁTSZAKADÁS KÖRÜLMÉNYEI

A tározó az Agrio folyó üledékére épült, ami a területre jellemző túlkonzolidált agyagot (un. Guadalquivir-i kék agyag) fedi. Az agyag alatt, kb. 60m mélységben, vízáteresztő réteg helyezkedik el, amelyben a piezometrikus szint a felszínnel van egy magasságban, így az agyagréteg felszíne és alja között minimális a piezometrikus nyomáskülönbség. Az agyagot több függőleges törésrendszer tagolja, melyek közül a jelentősebbek északkelet-délnyugat irányítottaságúak. Az agyag enyhe (~2°) dél-délkeleti dőléssel települt.

A szemtanúk elmondása és a helyszíni bejárás tapasztalati alapján a következők fogalmazódtak meg a gátszakadással kapcsolatban:

- A gát az alatta levő több méter vastag talajlemezrel együtt csúszott a Rio Agrio felé. A csúszás szélessége kb. 20 méter volt a két medence találkozásánál.
- A gát hirtelen repedt meg és tört össze, a fal leomlott és elmosódott a két zagy tározó között.
- A megnyíláson keresztül mintegy 5,5 millió köbméter zagy és víz folyt ki.
- Az Agrio folyó medre mintegy három métert emelkedett, megváltoztatva a folyását.

Az üzemeltető szerint nem volt előrelátható a károsodás és az építési vállalkozót hibáztatta a terület geotechnikai tulajdonságainak hiányos bemutatásáért. A Boliden szakértője, a Geocisa 1996-ban -két évvel a tragédia bekövetkezése előtt- jelentésében leírta a gát gyenge pontját: csúszólap alakulhat ki a márgában az alapozási sík alatt, ami nem mutatkozik addig, amíg a töltés meg nem mozdul a mentett oldalon. A jelentéssel összhangban telepített négy inklinométer deformációját már 1997-ben észlelték, azonban a négy inklinométer közül egy nem működött 1997 májusa óta, a másik három is már rossz állapotban volt a gátszakadásakor.

A madridi lapok néhány névtelenségbe burkolózó geotechnikai szakértőt idéztek, akik szerint a gátszakadás oka kémiai változásokra vezethető vissza, a savas zagyból szivárgó víz megváltoztatta a gát alapja alatti márgát. A mésznek savas közegben megváltozik a mechanikai ellenállása. Az önjelölt szakértők szerint a savas szivárgás és a közeli bánya folyamatos robbantgatásai együtt eredményezték a tönkremenetelt. Más szakértők szerint a gát térfogatváltozó agyagra épült, amelyik száradás és nedvesedés hatására deformálódik. Véleményük szerint az agyag expanzióját és a kontrakcióját figyelembe kellett volna venni a gát tervezésénél. A jelentésük továbbá megjegyzi, hogy az altalaj nem volt megfelelő a zagyanyag tározására. Megint más szakértők pedig azt sugallták, hogy a gát tervezése nem a megfelelő korona szélességgel történt, és a zagy betöltési szintje is magasabb volt a tervezettnél. Egy térképész (!) szakértő állítása szerint, amely az El Mundó május 25-i számában jelent meg, a gát duzzadó agyag tetején épült. Az agyagon belül deformációk történtek, melyek tovább terjedtek a talajban. Az agyagban lévő rétegen keresztüli szivárgás eredményezhette a duzzadását, és az agyag térfogatának növekedését. Ezt a mozgást figyelembe kellett volna venni, különösen az után, hogy az inklinométerek deformálódtak.

Összehasonlítva az eredeti és az elmozdult gáttestet megfigyelhető, hogy

- a mintegy 600 m-es gátszakasz átlagosan 50 m-t mozdult el a gáttengelyre merőlegesen,
- e közben a gát koronája csak 1-2 m-t süllyedt,
- a mentett oldalon a gát lábánál több méter magasságban felgyűrődött a talaj. A terepszint emelkedése helyenként a 7 m-t is meghaladta.

4 GEOTECHNIKAI OKOK

A kemény agyag altalajok (így a helyszínen lévő kék agyag is) komoly kihívást jelentenek a geotechnikus mérnökök számára, átmeneti anyagok, amelyek mind a talajok, mind pedig a kőzetek tulajdonságait magukon hordozzák. Igen nehezen kezelhetőek, mivel folytonossági hibákkal rendelkeznek, a montmorillonit tartalmuk miatt nagyon érzékenyek, kicsi a vízáteresztő-képességük, ami miatt különösen lassú a pórusvíznyomás leépülése, továbbá expanziós tulajdonsággal rendelkeznek.

- Az elmozdulást a zagyoldalán egy, a gát lábánál kialakult közel függőleges fal határozta le, ami arra utalt, hogy a zagy képes függőleges falban megállni. A függőleges elválás az agyagrétegben is folytatódik, ami szerint ott egy lokális törési zóna lehetett.
- A gát tényleges profilja eltért a tervezettől, 30°-os rézsűhajlás helyett közel 39°-ossal épült. Ez a töltés anyagául használt kötőrmelék állékonyságát ugyan nem befolyásolta jelentősen, de a kék agyagban többletfeszültségeket okozott. A feszültségcsúcsok a gát külső lábánál alakultak ki.
- Az eredeti számításnál a tönkremeneteli mód megválasztása során nem vették figyelembe a gát alatt kialakuló pórusvíznyomást, valamint azt sem, hogy a gát és a zagy függőleges nyomása többszörösére növeli az eredeti nyomásértékeket. A tervezésnél továbbá a gáttesten keresztüli permanens áramlást feltételeztek.
- Jelentős eltérés volt az is, hogy nyírószilárdság csúcsertékére, $\varphi' = 25^\circ$ -os drénezett belső súrlódási szöget vettek fel a meghatározott $\varphi' = 18^\circ$ -al szemben, ellenben a kohézió figyelmen kívül hagyása a biztonság javára volt írható. A tervezéskor továbbá nem vették figyelembe, hogy a potenciális csúszólapon, progresszív törési folyamat során a tényleges ellenállás kisebb lehet, mint a csúcserték, akár a reziduális értékre is csökkenhet.
- Jelentős mennyiségű montmorillonitot tartalmazó agyagok esetében a reziduális belső súrlódási szög 10° körüli, ami jelentősen kisebb, mint az átlagos csúcserték. Magyarországon hasonló körülmények között ennél kisebb értékeket is mértek felszínmozgásoknál. A progresszív törési mechanizmusok és minden egyéb nyírási folyamat gyorsan lecsökkenti az előterhelt agyagoknál egyébként meglévő hatékony kohéziót is.

A mért nyírószilárdsági csúcsertékek mellett a gát alatt soha, egyetlen pontban sem alakulhatott volna ki plasztikus határállapot és nem következhetett volna be tönkremenetel, de Aznalcóllar esetében a kék agyag talajban egyértelműen jelen voltak korábbi mozgások, valamint nyírások jelei több réteg határán. Ez, és a terhelés hatására felnövekvő pórusvíznyomás a nyírási ellenállások lokális csökkentését okozta, amely a progresszív töréshez vezetett.

A 25-28 méter magas gát mintegy 4 méter vastag folyami üledékes rétegen állt, amely alatt 70 méter vastag miocén márgás kék agyag volt, melynek mésztartalma átlagosan 25 %-ban adható meg. A kék agyag felső körülbelül 10 méter vastag rétege túlterhelt volt, az építés okozta pórusvíznyomás lehetővé tette a suvadás lejátszódását közel vízszintes sík csúszólappal. Ez okozta a pirit medencében a zagy megfolyósodását (liquefaction), ami a víznyomás növekedéshez, a teherbírás csökkenéséhez és a szokatlanul nagy vízszintes elmozduláshoz vezetett. Egyéb tényezők, úgymint a földrengés, robbantás, csurgás, altalajszivárgás kizárható volt az okok közül. Aznalcóllar tönkremenetelének fő oka a felkért szakértők szerint egy sík csúszólapon kialakult progresszív tönkremenetel folyamán leépült nyírószilárdság.

5 KÁRELHÁRÍTÁS

Az északi és déli tárolók közötti gát átszakadása összességében mintegy 5 500 000 m³ víz és iszap kiömlését vonta maga után. A Guadiamar folyón, 7 km-re a gátszakadás helyszínétől 3,6 m-es maximális vízszintnövekedést észleltek. Az Agrio és Guadiamar folyók partjain lerakódott iszap 2 600 ha-t terített be 4 m és néhány mm között változó vastagságban. Így a pirittartalmú iszap nagy felületen volt kiteve levegőnek.

Amikor a pirit vizes környezetben levegővel érintkezik, akkor átalakul vassá, szulfáttá és hidrogénné. A hidrogén savas környezetet hoz létre, a szulfát pedig a víz elpárolgása után fehér réteget képez a felszínen. Az élővilágban a kiömlött nagy mennyiségű savas víz a Guadiamar folyóban okozta a legjelentősebb pusztítást, ráadásul a lerakódott iszap nagy mennyiségben tartalmazott különböző fémeket, amelyek közül sok erősen mérgező.

A hatóságok azonnal az iszap összegyűjtése mellett döntöttek, aminek folyamán mintegy tízmillió tonna iszapot és szennyezett talajt szállítottak egy külszíni bányába. Ezt az első tisztítási folyamatot

egy második követte, amelynek már elsődlegesen a fémes szennyeződések csökkentése volt a célja. Ekkor további egymillió tonna szennyezett talajt szállítottak el, valamint számos kutat tisztítottak meg.

A tározót üzemen kívül helyezték és több lépésben biztosították. Lefedték a teljes tározóteret, vízzáró fallal vették körül, a határoló töltéseket 1:3 hajlásúra mérsékeltek, valamint a terület domborzatát is módosították a természetes lefolyás elősegítésére. Ezen túl egy részletes monitoring programot is kialakítottak inklinométerek, piezométerek, felszíni mozgásvizsgálati pontok és figyelőkutak segítségével.

6 A GÁTSZAKADÁS KÖVETKEZMÉNYEI

A bányahulladékok derítőtavas kezelése képezi a legnagyobb környezeti veszélyforrást nem csak Spanyolországban, de világszerte mindenhol. A gátszakadás ökológiai, gazdasági következményei röviden:

- •A folyók magas savkoncentrációja jelentős környezeti kárt okozott, 37 tonna folyami élőlény (halak, rákok, kagylók) pusztult el.
- •A folyópartok vegetációjának kihalása.
- •A szennyezés elérte a táplálékláncot: a gólyák daganatos megbetegedését tapasztalták.
- •A folyóparton 10 ezer hektár termőterület mérgeződött meg.
- •Földművelők ezrei váltak munkanélkülivé.
- •Csak Aznalcóllar lakosai 3500 hektárnyi rizst, gyapotot és citrusféléket vesztek el.
- •Veszteségek a turista iparban.
- •Szakértők szerint 40 év szükséges a termőterületek és a vízi élőhelyek visszaalakulásához. A nehézfémek soha nem bomlanak le természetes úton.

A Doñana Nemzeti Parkot csak egy, az Entremuros település térségében a gátszakadás után gyorsan felépített fal védte meg az ökológiai katasztrófától.

A kormányzati felelősséggel kapcsolatos problémák is napvilágra kerültek:

- Gyenge volt a biztonsági felügyelet a kormányzat, a környezetvédelem és a helyi hatóságok részéről. Vélelmezhető, hogy a gátat nem ellenőrizték 1996 óta. A Bolident -a gát svéd tulajdonosait 1996 óta a spanyol kormányzattól senki sem ellenőrizte.
- Egészen a gátszakadásig a szennyezések büntetései nagyon alacsonyak voltak Spanyolországban, nem jelentettek lényeges megterhelést az üzleti költségekben. Olcsóbb volt kifizetni a büntetést, mint adekvát lépéseket tenni a biztonság irányában.

A gátszakadás következtében felerősödött az állami felügyelet Spanyolországban. A kormány és az Európai Unió 270 millió eurós (75 milliárd forint) tisztítási alapot hozott létre a gátszakadást követően. 2000 elejére a Boliden pánikszzerűen felhagyott a bányászati tevékenységével Spanyolországban anélkül, hogy a bányazárás megfelelő eljárását magára vállalta volna, és elbocsátotta a teljes személyzetet, 425 dolgozót, 2000 októberében pedig bankcsődöt jelentett, hogy elkerülje a spanyol kormány által kirótt 45 millió dolláros (9 milliárd forint) büntetést.

IRODALOMJEGYZÉK

Alonso E.E. et al. 2004. Dynamics of Dam Sliding: Aznalcóllar Dam, Spain. *Geomechanics of Failiures, Advanced Topics*

Bishop, A.W. 1967. Progressive failure-with special reference to the mechanism causing it. *Proceedings of the Geotechnical Conference*. Oslo, Norway

Bishop, A.W. 1971. The influence of progressive failure on the method of stability analysis. *Géotechnique*

Bjerrum, L. 1967. Progressive failure in slopes of over-consolidated plastic clays and clay shales. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*

Farkas J. 1994. Felszínmozgások geotechnikai kérdései. *MTA doktori értekezés*

Gates, R.H. 1973. Progressive failure model for clay shale. *Applications of the Finite Element Method in Geotechnical Engineering*. Vicksburg, USA. Desai

Lo, K.Y.; Lee, C.E. 1973. Stress analysis and slope stability in strain softening materials. *Géotechnique*

Nagy L. 2011. Zagygátak biztonsága, *El ne öntsön a méreg, Mérnökújság*

Pariseau, W.G. 1972. Elastic-plastic analysis of pit slope stability. *Applications of the Finite Element Method in Geotechnical Engineering*. Vicksburg, USA

Skempton, A.W. 1964. Long term stability of clay slopes. *Géotechnique*

Stark, T.D.; Eid, H.T. 1994. Slope stability analyses in stiff fissured clays. *J. Geot. Geoenvironmental Engng*

Terzaghi, K. Peck, R.B. 1967 *Soil Mechanics in Engineering Practice* (második kiadás)