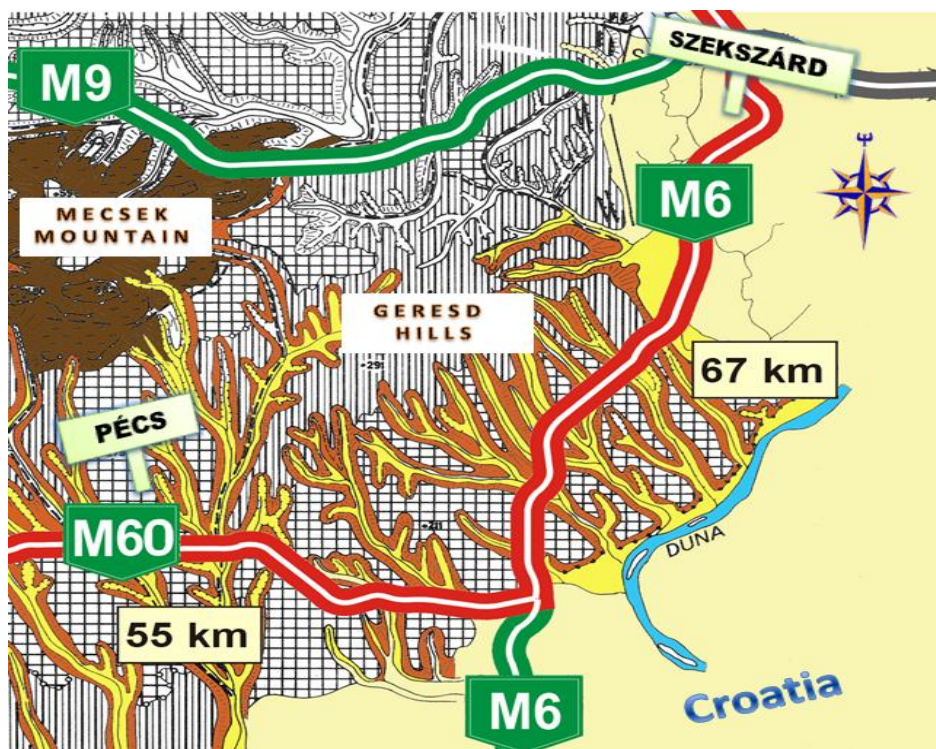


AZ M6 AUTÓPÁLYA ALAGÚTJAINAK GEOLÓGIA ÉS GEOTECHNIKAI ADOTTSÁGAI

Szilvágyi László

Magyarország állami beruházásai között az infrastruktúra fejlesztés jelentős szerepet játszott az elmúlt években. A közúthálózat fejlesztés jelentős, dél felé vezető eleme az M6 autópálya (E73), melynek tervezése 1998 – 2007 között zajlott, építése 2010-ben fejeződött be. Az autópálya Budapest és Országhatár közötti szakaszának déli része a Geresdi dombságon halad keresztül. A domborzati adottságok az autópálya tervezőjének komoly kihívást jelentettek, egyúttal a hazai gyakorlatban még nem alkalmazott műszaki megoldások merültek fel.

A Bátaszéktől délnyugatra kezdődő Geresdi-dombságot a dombhátak közötti ÉNy – DK irányú völgyek teszik változatosabbá. A vizsgált ÉK - DNy főirányú nyomvonal a dombhátakat és völgyeket sorozatosan keresztezve szeli át. Ezen domborzati adottságok és az autópálya szigorú vonalvezetési szabályai eredményeként az átlagosnál nagyobb hidak, nagyobb bevágások tervezése vált szükségessé. Az előkészítés kezdetén, a környezetvédelmi munkarészhez készített részletes földtömegszámítások alapján az első hossz-szelvény változatban kb. 7 millió m³ föld felesleg mutatkozott. A nyomvonal 30 – 50 m mély bevágásokkal és több száz méteres völgyhidakkal haladt.



Domborzati kép a nyomvonallal

Az engedélyezési terv részeként, feltárásaink eredményeinek felhasználásával a hosszszelvény optimalizálására került sor. A nyomvonal vízszintes vonalvezetésén nem lehetett érdemben javítani, a földfölösleg csupán 20 %-kal csökkent, mivel a dombhátak és völgyek elkerülése nem lehetséges. Ezt követően a magassági vonalvezetés optimalizálása mind a magasabb, mind a mélyebb változatokat értékelte. Ennek során az esztétikailag, de műszaki és tájvédelmi szempontból is kedvezőbb, a bevágásokat alagutakkal helyettesítő megoldás merült fel. Ezzel a megoldással már kb. 70 %-kal csökkenthető volt a földfelesleg, egyúttal a völgyhidak is jelentősen kisebbek lettek.

Földtanilag a terület a Mórággyi rög DK-i előtere. Mérnökgeológiai szempontból alapkőzetnek a felsőpannóniai agyagösszlet (Somlói Formáció) tekinthető. Az agyag, agyagmárgás aleurit jól kötött, finoman rétegzett, helyenként vékony homokrétegek települnek közbe. Az autópálya nyomvonalán telepített fúrások a dombvonulatokon 40 – 50 m, a völgyekben 10 – 15 m mélységben érték el.

A pannóniai rétegek felszínére néhány méter vastagságú, hosszú idejű szárazföldi mállási folyamat eredményeként kialakult, helyben maradt, vagy rövid szállítás útján áthalmozott vörösayag (Tengelici Vörösayag Formáció) települ. Anyaga vörös, tarka szürke színű szívós agyag, áthalmozott agyagos aleurit. Montmorillonit tartalma miatt kövér és duzzadó. A réteg mészfelhalmozódási szintként szerepel, gyakran vékony mészpad, mészkőtörmelékes vékony lösz réteg fedi.



Tengelici vörös agyag formáció

A vizsgált dombvidék területét több tíz méter vastagságban pleisztocén lösz és annak mállott, áttelepült változatai (Paksi Lösz Formáció) borítják. A típusos lösz anyaga szél által szállított világossárga színű, egynemű, jól osztályozott kőzetliszt, amelyből diagenézissel keletkezik. A típusos löszrétegek mellett az áthalmozott, infúziós, vagy szerkezetében átalakult változatokat is a lösz összetbe sorolják. A típusos lösz agyagtartalma csekély, így plasztikus indexe alacsony. Mésztartalma elérheti a 10 – 30 %-ot, amely finom hártvaként veszi körül a szemcséket, gyakran mészerekkel megbontott kifejlődésű, elszórtan mészkonkréciót tartalmaz. Laza szerkezete ellenére több tíz m magas, meredek falakban megáll. Függetlenül jó vízvezető, a beszivárgó víz kioldja a mésztartalmat.

Lejtős térszínen a gravitáció, esővíz, olvadékvíz, eróziós tevékenységeként áthalmozódhat. Az áthalmozódás, mállás következtében a lösz nagyobb agyagtartalmú, kötöttebb lesz. Feltűnő, hogy a vizsgált dombháton a lösz összetlet idősebb szintjein belül meghatározó az agyag – sovány, közepes- és kövér – rétegek kifejlődése (45 – 67%).

A lösz szelvényben több szintben – vörösbarna, barna színű vályogzóna, paleotalajsint települt. Ez a lösz egykori felszíni részének kémiai mállása során keletkezett, amelynek agyagtartalma elérheti a 40%-ot is. A morzsalékos szerkezetű agyagtalaj vastagsága 0,5 m-től több métert is elérhet.

A fenti keletkezési módokból, a környezeti viszonyokból – térszín, klímaingadozás, növényborítottság – adódóan az egyes kőzetkifejlődések vertikálisan és horizontálisan is szeszélyesen változhatnak. A vörösesbarna szín az idősebb lösz fedő paleotalajra jellemző.

A dombtetőkön mélyített fúrásokban a lösz összlet vastagsága eléri a 40 – 45 m-t.

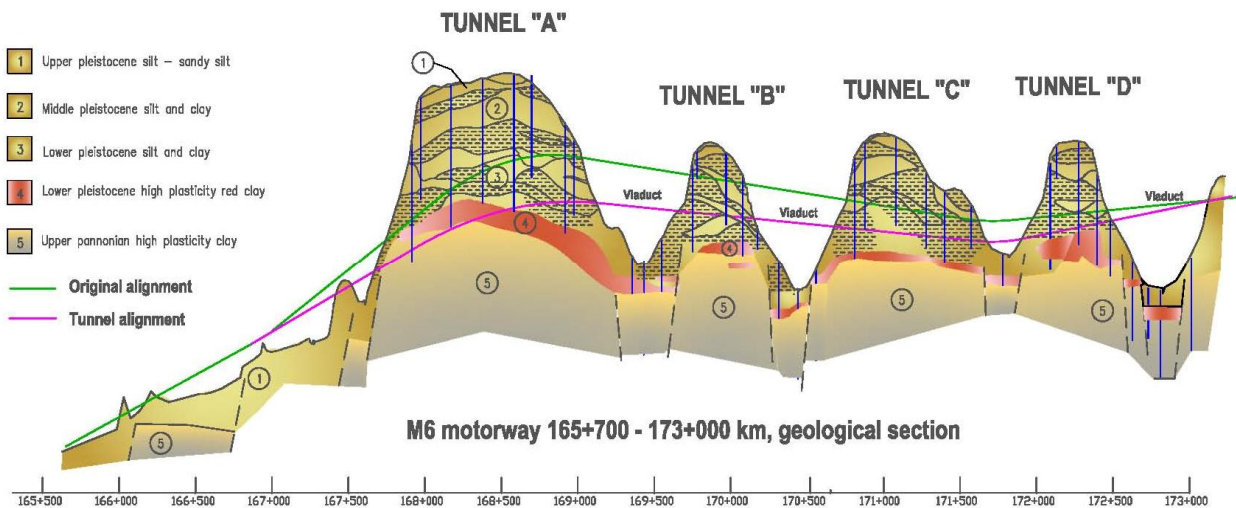
A domborzati adottságokból következően a vizsgált szakaszon több víztípus is megjelent. A dombságon kívül, a Sárréti szakaszon a talajvízszint felszínközeli helyzetű, csapadékos időszakban gyakoriak a belvízzel borított területek. A nyomvonal dombságba eső részén összefüggő talajvízszint csak a völgyekben jellemző, a völgyek gyakran vizenyősek, náddal borítottak. A domboldalakon és dombháton összefüggő talajvízszint nem alakult ki, a dombokon készült fúrások többségében jelentkező vízszint, az un. „sekély rétegvíz” szivárgó jellegű, jelentős utánpótlással nem rendelkezik. A dombháton a pleisztocén - pannon határréteg /vörös agyag/ zónája a jellemző vízmegjelenési szint. Jellemző, hogy a vastag pleisztocén rétegsor magas hézagtényezőjű, $e = 0.5 - 0.7$, telítetlen $S_r = 0.7 - 0.9$.

Az alagutak és bevágások méretezése szempontjából fontos talajmechanikai feladat volt a rétegsor minél jobb mérnökgeológiai jellemzése és a talajfizikai paraméterek pontos meghatározása.

A talajfeltárások a tervezés kezdetétől a kivitelezés időszakáig 3 fő fázisban készültek, kezdetben a még magasabb vonalvezetésű, bevágásokkal készülő nyomvonalra. Az első fázisban mérnökgeofizikai szelvényezés egészítette ki a hagyományos fúrásos feltárásokat. Az engedélyezési tervet követően a tender – kiviteli terv készítés fázisában már a mélyebb nyomvonal alagutas változatához készültek a fúrások. A kivitelezés megkezdésekor az alagutak bejárati szakaszain és a mély szakaszokon kiegészítő fúrásokkal véglegesedett a rétegződés megismerése. Az alagutak mentén az átlagos fúrás távolság 100 -120 m volt, 2 – 4 fúrásból álló keresztjelvény a rövidebb, 400 m-es alagutaknál középen egy helyen, a hosszabb alagutaknál 2 – 3 helyen készült. A fúrások a 25 -45 m jellemző takarású alagutak alá egy átmérővel, kb. 12 m-el mélyebbre készültek. Így a jellemző fúrásmélység 30 – 60 m közötti volt. A fúrások kezdetben hagyományos spirálfúróval, dugattyús mintavevővel készültek, majd kettősfalú magfúrások mélyültek. A fúrástechnológiára igen érzékeny talajrétegekben a hagyományos dugattyús mintavevők igen jó minőségű zavartalan mintákat vettek, a magfúrásos technológia a nyírószilárdság vizsgálatok szempontjából nehezebb kezelést és azonosítást eredményezett.

A kivitelezés során a vizsgálatokat CPT szondázások egészítették ki, a nagy nyomóteljesítményt kifejtő berendezések hazai megjelenése már lehetővé tette a nagy mélység elérését.

A rétegződés változatossága megkövetelte a rétegsor olyan felbontását – szétválasztását, mely az azonos viselkedésű rétegeket egyben kezeli és a méretezéshez meghatározza azok talajfizikai paramétereit.



Geológiai szelvény

A dombhátakon készült fúrások fedőrétegét vékony fiatal, holocén, felső pleisztocén talajok alkotják, többségében átmeneti, finom szemcsés rétegek jellemzőek (iszapos homok, homokos iszap). Ezt jelöltük 1. réteggént.

Alatta 2. réteggént jelölve, 15 – 18 m mélységig a fiatal lözssorozat részét képező pleisztocén átmeneti talajok iszap, homokos iszap jellemzőek, sovány-közepes agyag közbetelepülésekkel, többnyire meszes, mészeses formában.

A 3. réteget annak felső zónájában megjelenő barna, sárgásbarna őshumusz szint indítja, mely alatt nagy vastagságban 36 – 40 m-ig főleg kötött rétegek települtek – túlnyomórészt közepes agyag, de jellemző volt az iszap-sovány agyag határán kismértékben változó plasztikusságú talajok jelenléte is. Ezekben a rétegekben igen gyakoriak a meszes, mészkonkréciós betelepülések.

A 4.-essel jelölt réteg az ún. tengelici vörösayag formáció, mely vékony réteggént, de összefüggően jelenik meg a rétegsorban. Ezen a szinten települ egy törmelékes, erősen meszes, eróziós mállott zóna, mely gyakran egyben vízáadó réteg is.

Végül a vörös agyag alatt 5.-ként jelölt rétegben a felső-pannóniai korú meszes, erősen kötött agyag, ill. mészkonkréciós homoklisztes iszap – sovány agyag talajok települtek. Ezt a réteget a dombhátról készült fúrások nem mindegyike érte el, így az 5. réteg kiértékelésében, analógiák alapján a völgyekben mélyített fúrásokat is felhasználtuk.

Az előbbiekben vázolt 5 réteg mechanikai paraméterek meghatározására a munka első két fázisában rétegenként átlagosan 80, összesen 400 vizsgálatra került sor. Az azonosító jellemzők analízise alapján igyekeztünk kiválasztani a rétegek jellemző mintáit, de vizsgáltunk olyanokat is, melyek valamiért különlegesek voltak. Nem tudtuk viszont vizsgálni a szemmel láthatóan erősen mészkonkréciós zónákat, illetve elég sok esetben a vizsgálat közben-végén, vagy csak a feldolgozáskor derült ki, hogy a mintákon belüli mészdarabkák nagyban befolyásolták a minta viselkedését.

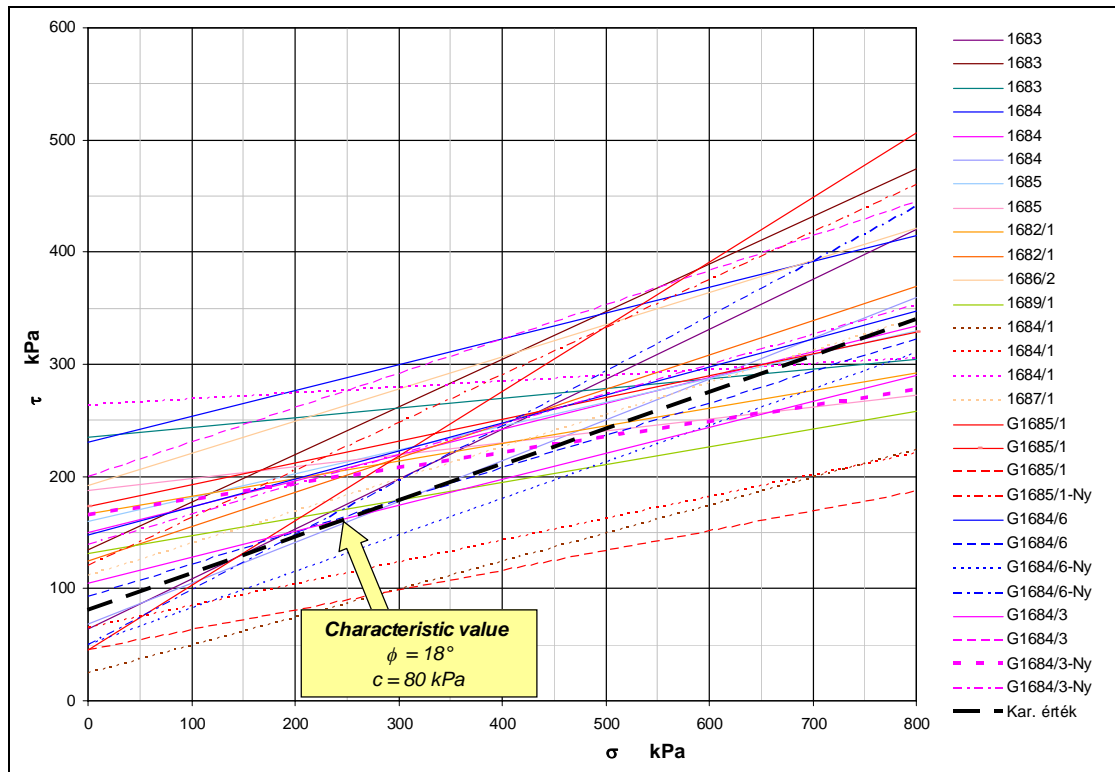
A geotechnikai előkészítés első fázisában az alsóbb zónákból még kevesebb vizsgálatot végezhattünk, mivel az akkori feltárások egy része még nem az alagutas változathoz készült. A kivitelezés megkezdése előtti kiegészítő vizsgálatok ezért főként arra irányultak, hogy az alagutak közvetlen környezetének (főte- váll, talp) mechanikai jellemzőit pontosítsuk. Ezekre, beleértve a vizsgálat módját is tételes programot adtunk, melyet a fővállalkozó a tervezővel egyeztetve elfogadott. A harmadik fázisban, a beomlás után a vizsgálatok célja elsősorban az volt, hogy megállapíthassuk a beomlott talajzónák jellemzőit, azok esetleges változását.

Végül összesen 23 fm-ként készült nyírószilárdsági, továbbá 11 fm-ként ödométeres vizsgálat, s ezeket a győri Széchenyi István Egyetem végezte.

A triaxiális vizsgálat során a mintákat a mélységhez igazodóan megállapított cellanyomások alatt 24 órán át konszolidáltuk, úgy hogy a középső minta cellanyomása gyakorlatilag a fekvésbeli függőleges hatékony feszültséggel volt azonos, s ehhez képest csökkentettük, illetve növeltük a másik két mintáét. Ezután viszonylag gyors sebességű terheléssel törtük el a mintákat, így a terhelés drénezetlennek számított, mert a kötött talajokban az ilyen terhelési sebesség mellett alig van mód a konszolidációra. A vizsgálat tehát konszolidált drénezetlen, ún. CU-vizsgálatnak minősül. A vizsgálatokat a teljes feszültségek alapján értékeltük, mivel a minták kevés kivétellel telítetlenek voltak. Készült még néhány dobozos nyíróvizsgálat is.

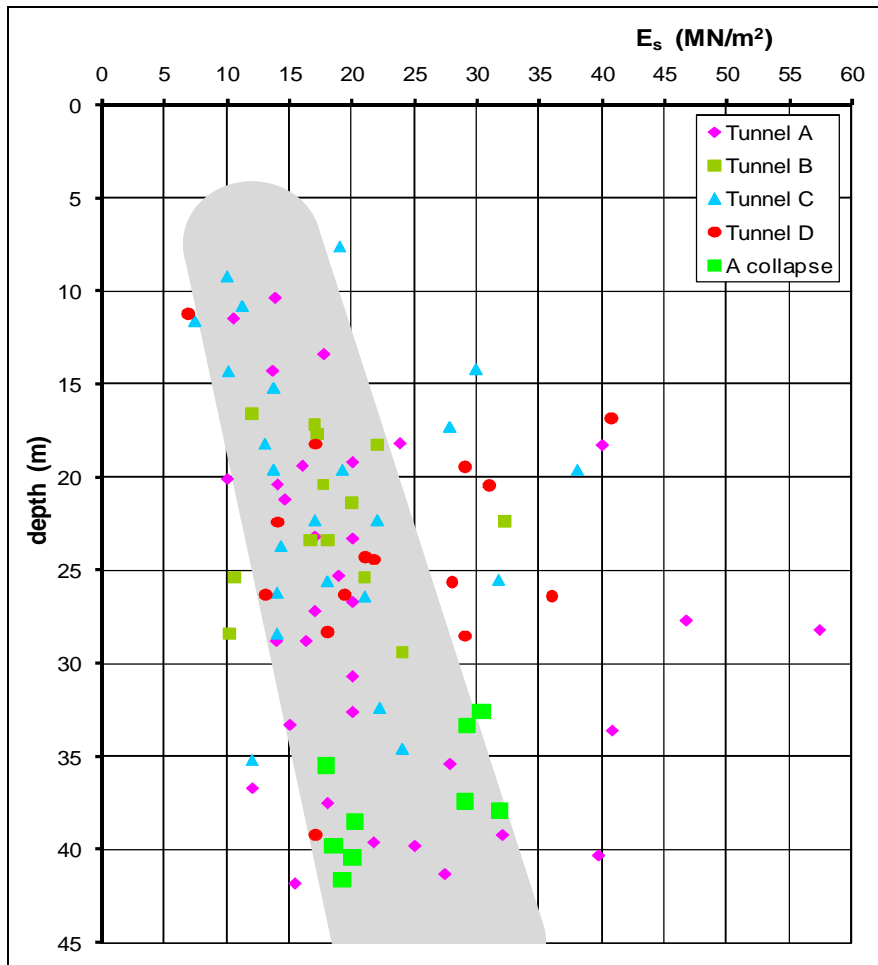
Minden vizsgálat teljes vizsgálati jegyzőkönyvét (beleértve a terhelés-alakváltozás görbéket is) csatoltuk a geotechnikai szakvéleményekhez. A vizsgálati eredményeket rétegcsopontonként értékeltük, „összerajzolva” az egyes rétegekre végzett vizsgálatok

Coulomb-egyeneseit. Ezek elemzése alapján egy-egy rétegre megadtuk a kohézió és a belső súrlódási szög átlagos, karakterisztikus és minimális értékét továbbá felhívtuk a figyelmet az esetlegesen előforduló anomáliákra, a különösen gyenge szilárdságokra, melyek lokális terhelések esetén kritikusak lehetnek.



Mohr – Coulomb egyenesek értékelése

Az alakváltozási jellemzőket ödométeres vizsgálatokkal állapítottuk meg. A maximális terhelést a mélységből adódó magas önsúlyfeszültséget figyelembe véve határoztuk meg. A vizsgálatokat tehermentesítési lépcsővel zártuk. Megadtuk a vizsgálatok valamennyi eredményét, a konszolidációs görbét, valamint a feszültség-alakváltozás kapcsolatát mutató görbét is, s meghatároztuk az általunk relevánsnak ítélt összenyomódási modulusokat mind az első terhelésre, mind a tehermentesítési és újrateherelési ágra is. Ezeket rétegenként statisztikai megfontolásokkal értékeltük, s adtunk javaslatot a számításba vehető karakterisztikus értékekre, illetve megadtuk a modulusok mélység szerinti változását



Az ödométeres modulus mélység szerinti változása

Érdeemes kitérnünk arra, hogy alagutjaink talajkörnyezete meglehetősen sajátos, ami a nyírószilárdság értelmezésében nehézségeket okozott. Az előbbiekből kitűnhetett, hogy az alagutak alapvetően pleisztocén, szélhordta ülededékben (1-3. réteg), reziduális talajban (4. réteg) épülnek. A felső lösz- és agyagrétegek felülről nem telítődhetnek, hiszen ez 1,5-2 millió év alatt sem történt meg. Az alsó agyagok már közel telítettek, de teljes telítődésük mégis lehetetlen, azt a laboratóriumban sem lehetett kifogástalanul és bizonyítottan elérni. Tehát még a tengeri üledékként képződött pannon összlet (5. réteg) is ilyen, mivel száraz környezetben vált előterheltté. Látható volt az is, hogy összefüggő talajvíz sehol sem jelentkezett, csak a 4. réteg határain vagy abban észleltünk szivárgásokat. Mindezekből az következett, hogy a tervezés során csak a teljes feszültségek analízisével lehetett dolgozni, s az ehhez tartozó φ_u és c_u nyírószilárdsági paramétereket kellett megadni. Ismert tény e megközelítés bizonytalansága, ám a hatékony feszültségek analízise ilyen talajkörnyezet esetén lehetetlen. Amennyiben az ehhez tartozó φ' és c' nyírószilárdsági paramétereket kívántuk volna megállapítani, akkor ahhoz a mintákat telíteni kellett volna, amivel az

agyagos-lössös minták állapotát irreális mértékben lerontottuk volna, másként fogalmazva negligáltuk volna az ezen rétegek szilárdságában meghatározó szerepet játszó kapilláris hatásokat és a szivást, ami elfogadhatatlanul gazdaságtalan megoldásokhoz vezetett volna.

A vizsgálati eredményeket rétegsoportonként kiértékeljük, megadtuk az általunk megállapított karakterisztikus értékeket, továbbá felhívtuk a figyelmet az esetlegesen előforduló anomáliákra.

A laboratóriumi vizsgálati eredményekből az alagút tervezője készített egy tanulmányt, melyben véges elemes módszerrel modellezte a triaxiális és ödométeres vizsgálatokat és inverz számításokkal visszaszámolt talajparamétereket állapított meg. A kapott talaj paraméterekkel a felkeményedő talajmodell felhasználásával az alagút talajtakarásának függvényében fejtési osztályokat állapított meg a rugalmassági modulus és a kohézió értékeinek változtatásával. A különböző takarásokhoz és fejtési osztályokhoz megadta a főte deformáció értékét. (A fejtési osztályok ismertetése a szerkezet tervezési részben található.)

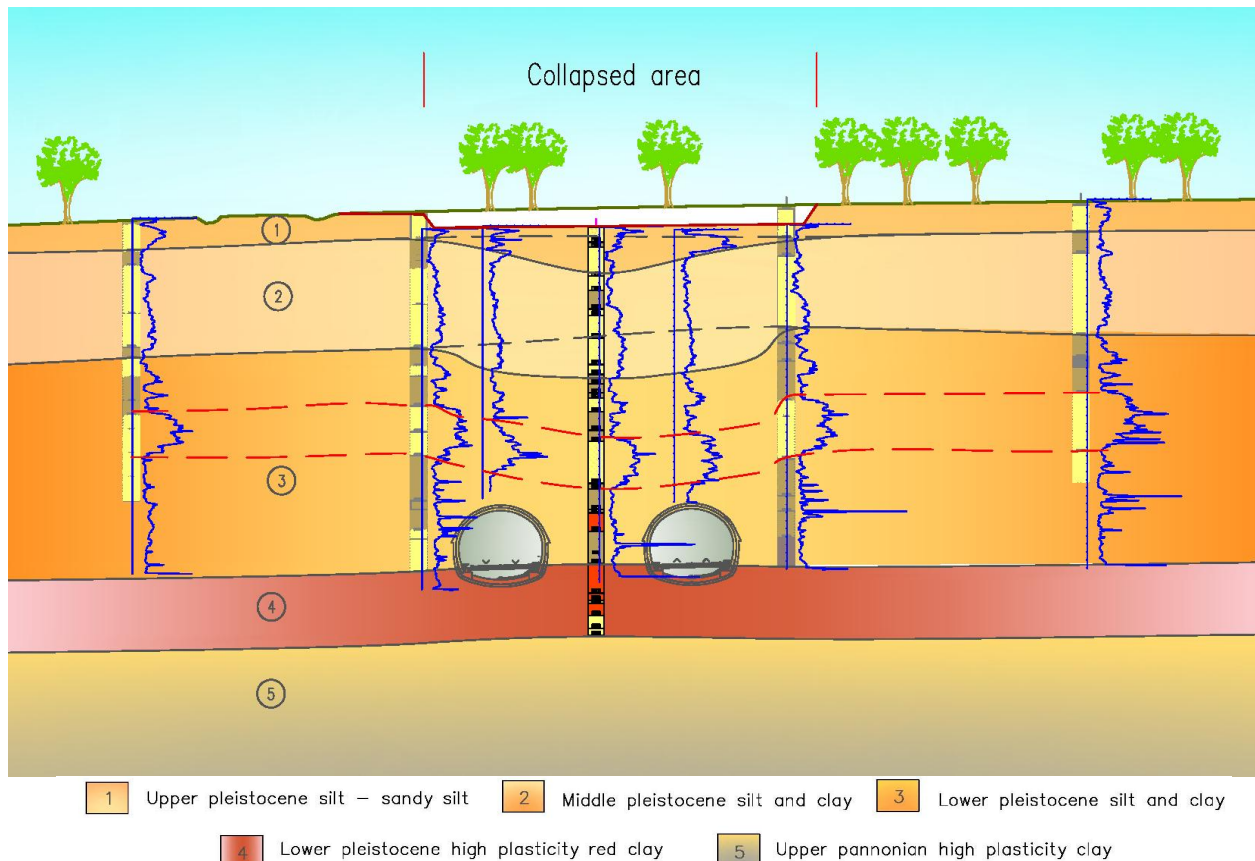
Ehhez igazodóan a kivitelezés során a fejtés monitoring a kézi penetrométerrel megállapított egyirányú nyomószilárdság elemzésével valamint deformációmérésekkel ellenőrizte a kívánt biztonsági szint betartását és a szükséges technológiai intézkedések megválasztását. Ezek mellett természetesen folyamatosan ellenőrizték a fejtési homlokon megjelenő talajokat, rétegződést.

Valamennyi mért adat igazolta az előzetes feltárásokkal meghatározott rétegződést és a számított talajfizikai értékeket. Három alagút megépült probléma mentesen, de az „A” alagút beomlott. A rendelkezésre álló adatok azt bizonyították, hogy az omlást nem előkészítési, vagy tervezési hiba okozta.



Légifotó az omlás területéről

Az omlást követően új fúrások és nagy mélységű CPT szondázások készültek a megváltozott talajkörnyezet vizsgálatára. A beomlott talajzóna talajfizikai paraméterei rendre megegyeztek az omlást megelőző vizsgálati eredményekkel, kivéve az alagút közvetlen környezetében vizsgált értékeket. A törési felületet és a reziduális nyírószilárdság értékét nem lehetett vizsgálattal pontosan meghatározni. A helyreállítás tervezéséhez ezért igen óvatos értékeket vettek számításba. A több méteres elmozdulást elszenvedett rétegsor helyzetét legjobban a CPT szondázások eredményei mutatták be.



CPT sonda és fúrás alapján szerkesztett szelvény az omlásról

Napjainkban több kisebb – nagyobb omlás fordult elő a hagyományos, löttbeton ideiglenes megtámasztású alagútépítési technológiával épített alagutaknál. Valamennyi ezen a szakterületen dolgozó szakértő számára fontos lenne az okok és tapasztalatok nyílt feltárása. Sajnos ez fontossága ellenére nagyon ritkán fordul elő. Az omlások elemzéséből származó pontos értékelés adja meg a lehetőségét az optimális technológia és monitoring tervezésére. Reméljük, hogy egyszer ennek az esetnek a tapasztalatai is feltártak és precízen értékeltek lesznek, bárki számára hozzáférhetően.