

Mérési tapasztalatok a Budapest 4. metró Bocskai úti állomás szellőző alagút építésénél

Kálmán Eszter

BME Geotechnikai Tanszék
Témavezető: Dr. Farkas József

Összefoglalás: A Bocskai úti állomás szellőzőalagútjának építése közben helyszíni méréseket végeztem. A helyszíni mérések során mértem az épülő alagút elmozdulásait és az alagútfalazat és a kőzet között kialakuló közetnyomást. A mérések az építés alatt és után a kívánt biztonsági szint eléréseéi folytak, folynak. A mérési tapasztalatok feldolgozása alapján következtetéseket vontam le a Kiscelli agyagban épített alagutak kivitelezés közben bekövetkező, várható mozgásokra és közetnyomásokra vonatkozólag.

Kulcsszavak: metróállomás, Kiscelli agyag, helyszíni mérések, elmozdulásmérés, közetnyomásmérés.

1. Bevezetés – Általános adatok

1.1. Általános információk

A budapesti metró Bocskai úti állomása szellőző alagútjának hossza 76,85 m; jellemző kitörési szelvénye 9,1 m széles és 7,62 m magas, békaszáj alakú, keresztmetszete 55,25 m². A primer biztosítása (1. héjazat) kettős vasalással ellátott, 250 mm vastagságú lőtt beton alkotta.

A bányászati módszerrel fejtett és lőtt betonon héjazattal biztosított alagút generál kivitelezője a Swietelsky Építő Kft volt; tervező a Főmterv Zrt. alvállalkozójaként a MottMacdonald Magyarország Kft., míg a Magyar Alagútépítő és Bányászati Kft. alvállalkozóként építette meg az alagutat. A geotechnikai szakértés vezetői feladatait a Geovil Kft. látta el, s egyik feladata volt az elmozdulások mérési adatainak feldolgozása, kiértékelése. Különleges és kísérleti feladatot jelentett a közetnyomás mérő cellák beépítése, a radiális és tangenciális feszültségek mérése és azok kiértékelése.

1.2. Geológiai, geotechnikai információk

Az alagút geotechnikai és hidrogeológiai környezetét a GeoPannon Kft. szakvéleménye adta meg, amely szerint a felszíntől 4-5 m mélységig laza, pleisztocén rétegek találhatók, amelyek fekvésében a harmadidőszaki geotechnikai alapkőzet a középső oligocén korú kiscelli agyag, agyagmárga van. Az agyag felszíne alatt 1,4-2,8 m vastag erősen mállott, töredezett, expandált, majd ez alatt mintegy 4-5 m vastagságú expandált repedezett zóna helyezkedik el. A repedezettség és az expanziós hatás csökkenésével és a mélység növekedésével kevésbé repedezett, alagútépítés szempontjából igen kedvező és a mélyépítésben jól ismert szálban álló kiscelli agyag települ.

Az alagút építése során folyamatos talaj/közetszelvényezés készült, amely alapján megállapítható, hogy az alagút nem érintette a mállott, töredezett, expandált zónát, a felső

kalott az expandált, repedezett zónában, míg az alagút alsó része a szálban álló kiscelli agyagban épült meg.

1.3. Építési technológia

Az építési technológia röviden az alábbiakban foglalható össze: A bocskai úti szellőző alagút egy bányászati módszerrel épített alagút.

A fejtést 5 ütemben történt.

- Az első fejtési ütem a kalottnyitás volt 1 méteres hosszban, majd a kalottot megtámasztó lövelltbetonos biztosítás került beépítésre.
- A második ütemben a két oldalt fejtették ki és készítették el a felső ív talpaként szolgáló szakaszt.
- A harmadik fejtési ütem a kalottnyitás volt a második 1 méteres hosszban, majd a kalottot megtámasztó lövelltbetonos biztosítás került beépítésre.
- A negyedik ütemben a két oldalt fejtették ki és készítették el a felső ív talpaként szolgáló szakaszt.
- Az ötödik befejező ütemben az ellenívet fejtették ki, majd a szerkezeti gyűrűt bezárták.

Az ütemek 1 méteres fogásokban követték egymást, majd az ötödik ütemben az ellenívet 2 méteres lépésben készítették el.

Az építés során folyamatos méréssel ellenőrizték a szerkezet mozgásait.

2. Elmozdulásmérések

Az építés folyamán naponta két alkalommal történtek a mérések optikai, geodéziai műszerrel az alagút falán elhelyezett mérési pontok segítségével. Mérték a pontok vízszintes és függőleges elmozdulásait. Érdemes megjegyezni, hogy a mai tervezői felfogás szerint az elmozdulásmérés jobban használható az alagút héjazat mozgásának leírásához, a szerkezet ellenőrzéséhez, mint a hagyományos „konvergencia” mérés, mivel az utóbbi csak az egyes pontok egymáshoz viszonyított elmozdulását adja meg a pontokat összekötő egyenes mentén.

Az elmozdulásméréseket az alábbiak szerint készítették el:

- az elmozdulást mérő csapok a lőtt beton elkészülte során kerültek beépítésre
- az első mérést a beton lövést követően 6 órán belül el kellett végezni
- a mérés gyakoriságát az alábbi ábrán adjuk meg:

1. táblázat: A mérések gyakorisága az alagút előrehaladásának függvényében

Az alagút mozgásmérésének gyakorisága	
$0 < d < 30$	Naponta
$30 < d < 72$	Hetente kétszer
$72 < d$	Hetente
d - a megfigyelőrendszer távolsága az alagút elejétől (m)	

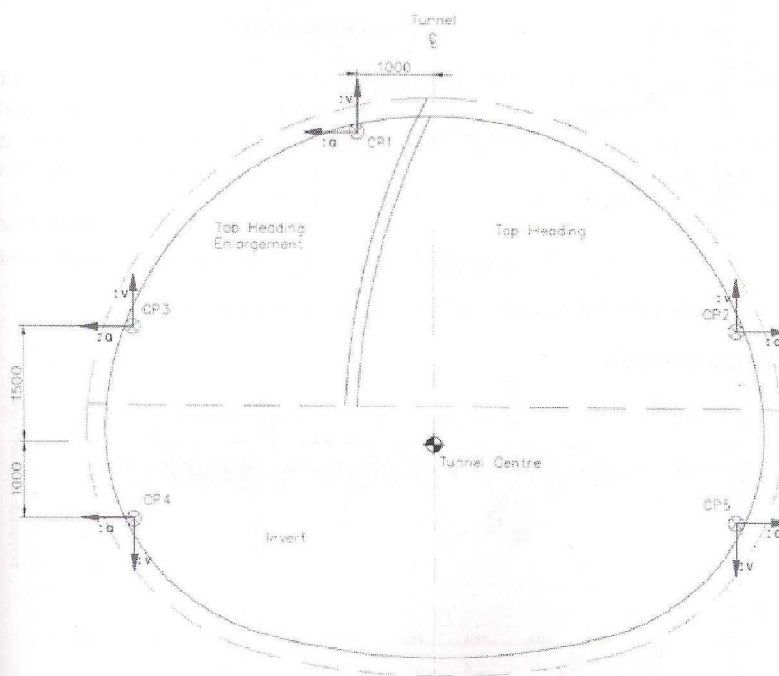
Az elmozdulások határértékeit az alábbiak szerint adta meg a tervező (Mott MacDonald Magyarország Kft.):

2. táblázat: A tervező által előírt riasztási szintek

	dh dv (mm)	Trigger	Action	Danger	Trigger	Action	Danger
CP1	dv	10	20	40	12	25	50
CP2 and 3	dv	10	20	40	12	25	50
	dh	10	20	40	12	25	50
CP4 and 5	dh	10	20	40	12	25	50

Ahol:

- dh: horizontális elmozdulás (mm)
- dv: vertikális elmozdulás (mm)
- trigger: első tájékoztató szint
- action: figyelmeztetési szint
- danger: veszélyes elmozdulás szintje
- CP1, CP2, CP3, CP4, CP5: elmozdulást mérő pontok.



1. ábra: Mérés pontok elhelyezése

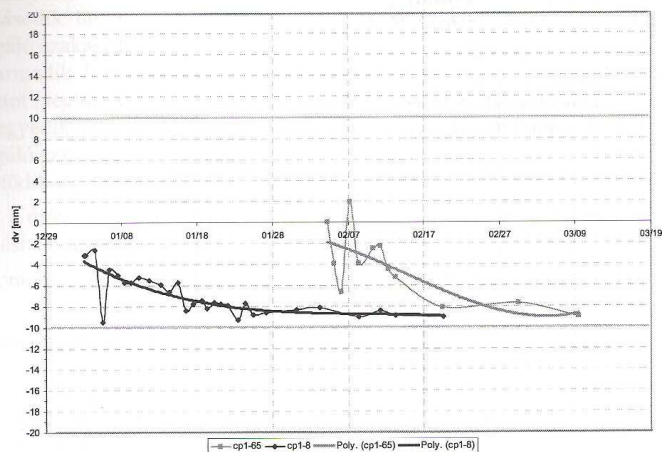
Az elmozdulásmérések általában 5 m-ként lettek előirányozva, azonban a részfálból való kitörés környezetében a szerkezetmozgás tesztelése miatt az első 10 m-en belül a 3-5-8 m-es szelvényben, majd ezt követően minden 5 m-es szelvényben történtek elmozdulás mérések.

Ha ezeket az eredményeket alaposan megvizsgáljuk, kiértékeljük akkor különböző tendenciákat vonhatunk le. A kialakult gyakorlat szerint a keresztaszelvényben 5 különböző helyen célszerű vizsgálni a szerkezet mozgásait. Az alábbiakban bemutatásra kerülnek a CP1

(főtepont), CP2, CP3 (oldalfalban elhelyezett mérési pontok), CP4 és a CP5 (ellenboltozatban elhelyezett pontok) elmozdulásai. A vizsgálatra a 0+08 és a 0+65 keresztmetszeteket választottam, mert a 0+08 keresztmetszet gyűrűzárási ideje (414 óra 10 perc) a leghosszabb, míg a 0+65 keresztmetszetben a legrövidebb a gyűrűzárási idő (42 óra 30perc).

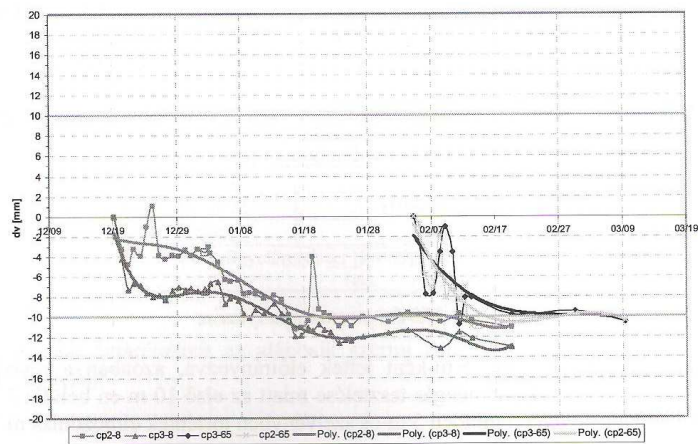
Egymás mellé állítva a két keresztmetszetet, nézzük meg a vizsgált pontok elmozdulásait. A függőleges tengelyen a vertikális elmozdulások értéke van feltüntetve mm-ben, míg a vízszintes tengelyen az idő van ábrázolva 10 napos intervallumokban.

Nézzük először, hogy hogyan alakul a CP1 pont elmozdulása:



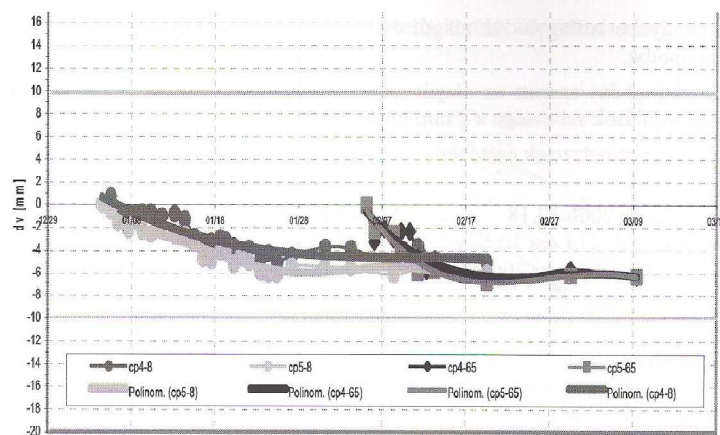
2. ábra: CP1 (főtepont) elmozdulása és a mozgás kiegyenlítése

CP2-CP3 pontok elmozdulásai:



3. ábra: CP2-CP3 pontok elmozdulásai és a kiegyenlítő ábra

Hogyan befolyásolja a gyűrűzáras a pontok elmozdulásait a CP4, CP5 pontokban:

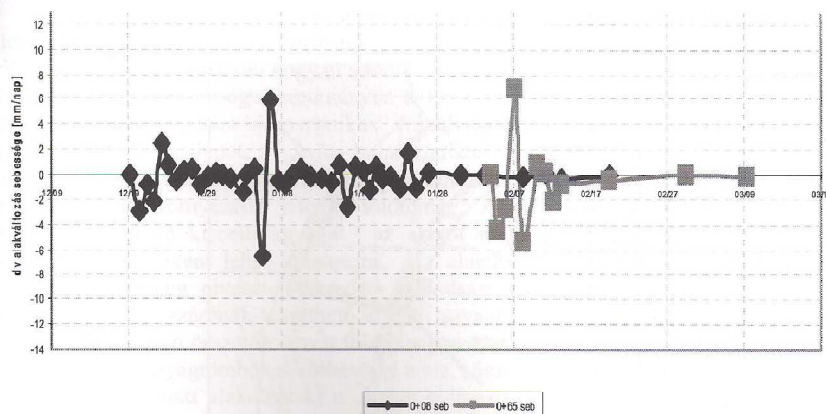


4. ábra: CP4-CP5 pontok elmozdulásai és a kiegyenlítő diagram

Látható, hogy a CP1, CP2, és CP3 pontokban a gyűrűzárás módosítja az elmozdulások értékét, míg az ellenboltozat pontjait nem befolyásolja a gyűrűzárási idő.

A megtámasztó szerkezet mozgásainak veszélyes tendenciáját az elmozdulás sebessége jelzi: ha a sebesség folyamatosan, tendenciózusan növekszik, a szerkezetre egyre nagyobb terhelés jut, a sebesség csökkenése viszont egy aktív, a talaj/közetnyomást viselő, megbízható egyensúly kialakulását jelzi.

Jellemző elmozdulás-sebesség görbéket az alábbiakban mutatunk be:



5. ábra: CP1 pontok elmozdulás-sebesség diagramja

Az előbbieken bemutatott ábrákból megállapítható, hogy a sebességek az alábbiak szerint alakultak:

A pontok mozgása az építést követően viszonylag gyorsnak mondható. Megfigyelhető, hogy a mozgások 1 hónap folyamán lezajlanak. Az első hónapot követően a pontok mozgásának

sebessége már gyakorlatilag 0. Az alagút és kőzetkörnyezete 1 hónap alatt kerül stabil új egyensúlyi állapotba.

A tervezői állásfoglalás szerint az alagút „kvázi nyugalmi” állapota akkor következik be, amikor az elmozdulások sebessége a 2 mm/hónap értéket eléri.

A kiválasztott keresztmetszetek esetében:

0+08 keresztmetszet:

- építés kezdete: 2006.12.18.
- gyűrűzárási idő: 414 óra 10 perc
- a stabilizálódás dátuma: 2007.01.24.
- eltelt napok száma: 37

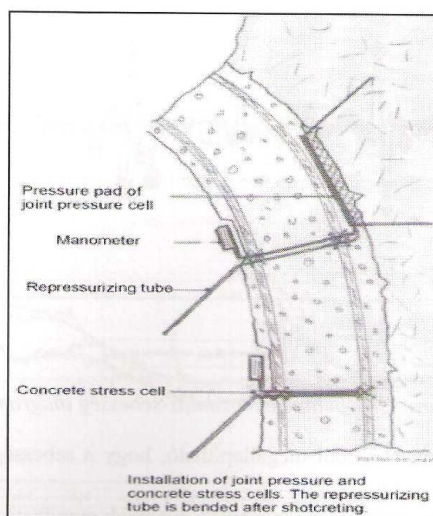
0+65 keresztmetszet:

- építés kezdete: 2007.02.03.
- gyűrűzárási idő: 42óra 30perc
- a stabilizálódás dátuma: 2007.02.13.
- eltelt napok száma: 10

Megfigyelhető ezen a két példán a gyűrűzárási idő és a stabilizálódáshoz szükséges idő közötti összefüggés. Látható, hogy a gyűrűzárási idő csökkenése nagyban hozzájárul a gyors stabil állapot eléréséhez, a szerkezet mozgásainak lecsökkenéséhez.

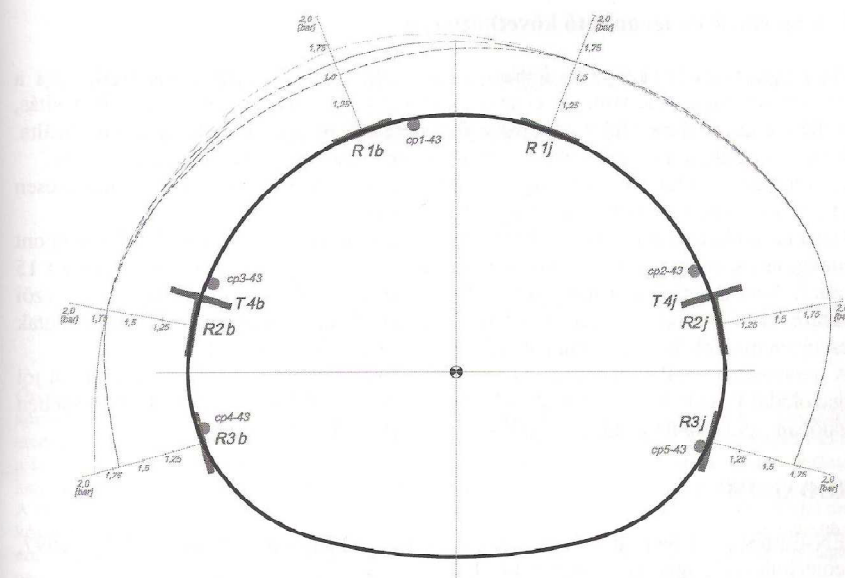
3. Kőzetnyomás-mérő cellák beépítése és mérések

A Glötzl típusú nyomásmérő cellák beépítésére a 0+ 43 alagútszelvényben került sor. A cellák beépítését megelőzően a Glötzl cégnél eltöltött néhány napos tanulmányút segítette. A beépített cellák közül a radiális cella a felületére merőleges irányban méri a kőzet/talaj nyomás változását, míg a tangenciális cella a szerkezetben kialakuló feszültség változását méri. Az egyes cellák beépítési vázlatát a 6. ábrán adjuk meg:



6. ábra: Kőzetnyomás mérő cella beépítési vázlata

A 0+43 szelvényben 6 tangenciális és 2 radiális cella került beépítésre. A cellák beépítésének a helyét a következő ábra mutatja be:



7. ábra: A közetnyomás-mérő cellák kiosztási vázlata és a kvázi hidrosztatikus feszültségállapot

A leolvasások naponta kétszer történtek. A folyamatos leolvasásokból teljes képet kapunk arról, hogy az építés folyamán hogyan adódik rá a terhelés a megtámasztó szerkezetre és ez a terhelés mekkora feszültséget eredményez a lövelt vasbeton falazatban. Látható, hogy a szerkezet körül egy „kvázi hidrosztatikus” feszültségállapot alakul ki, melynek létrejöttével szépen beáll a stabil állapot. A „kvázi hidrosztatikus” feszültségállapot esetében a nyugalmi állapotból, mely az alagút megépítése előtt jellemezte a talajt, egy aktív törési határállapotba került az alagút környezetét jelentő földtömeg. A nyugalmi állapotban vízzárónak és száraznak mondható kiscelli agyagot az alagút megépítését követően egy átvizesedett, összetöredezett talajként lehet jellemezni. Az alagútfejtés következtében az alagút föléje felett lévő földtömeg elvesztette eredeti szilárdsági jellemzőit és összetöredezett, ennek hatására az eddig vízzárónak tekinthető kiscelli agyagban kialakuló repedéseken át a talajvíz az alagutat körbevevő összetöredezett földtömegbe áramlott. A talajvízáramlás következtében az agyagrögöket, agyagtömböket körbeveszi a víz, „úszik” a leáramló talajvízben. A víz és a lebegtetett agyag miatt alakulhat ki a „kvázi hidrosztatikus” feszültségállapot. Ez a „kvázi hidrosztatikus” állapot annak a következménye, hogy a kiscelli agyag elveszíti eredeti talajfizikai állapotát a víz és az összetöredezés hatására. A vizes, töredezett agyagnak előzetes ismereteinkből, tapasztalatokból adódóan a belső súrlódási szöge $\phi = 5-10^\circ$ közé vehető fel, melyet számítási és laboratóriumi eredmények is igazolnak. Következtetni lehet arra, hogy a $K_a \sim 1$, aktív földnyomás szorzó, azaz a függőleges és a vízszintes földnyomás „kvázi” megegyezik. Ebben az esetben alakul ki a „kvázi hidrosztatikus” feszültségállapot. A szerkezetre ható terhelés a víznyomásból és az agyag térfogatsúlyának a felhajtóerővel

csökkentett értékéből adódik, ebből a hatékony függőleges feszültség meghatározható, majd kiszámítható a vízszintes földnyomás értéke is.

4. A mérésekből levonható következtetések

- Az alagútépítés tervezéséhez felhasznált geotechnikai paraméterek meghatározása a tervezéshez megfelelő volt, mivel az elmozdulásokat és ennek megfelelően a biztosítás, a héjszerkezet elmozdulását a tervező megfelelő értékeken belül prognosztizálta. Megjegyezzük, hogy a geotechnikai körülmények egyszerűek és jól ismertek voltak.
- A kivitelező megfelelő gondossággal építette meg az alagutat, amelyben természetesen jelentős szerepe volt a kivitelezők gyakorlatának is.
- Hasonló földtani, geotechnikai környezetben, hasonló építési technológiával a főtepont mozgása a szelvény kinyitását követő 1 hónapban lezajlik, értéke nem haladja meg a 15 mm-t. Sebessége folyamatos csökkenést mutat, majd 1 hónap elteltével a tervezői határérték alá csökken. Ezek az adatok a budai oldalon megépítésre kerülő alagutak esetében megfelelő irányszámokat adnak a tervező, kivitelező részére.
- A nyomásmérő cellák beépítése és működése sikeresnek mondható. A mérésekből jól igazolódni látszik, hogy a tervező feltételezésnek megfelelően az alagút környezetében valóban „kvázi hidrosztatikus” talaj/ kőzetnyomás alakult ki.

IRODALOM

- [1] CEN-European Committee for Standardization: European Standard ENV 1997, Geotechnical Design Part 1, General Rules
- [2] Dr. Richard H Bassett, MA PhD, MICE, C. Eng., NCE Conference, UK, 2007, Practical Application of settlement monitoring