

Löttbetonos alagútfalazat és kőzet kapcsolatának vizsgálata gránitos kőzetkörnyezetben

Laboratory analysis of the shear strength between rock and the shotcrete tunnel lining in granitic rock mass

Gál Emese

BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, some.gal.emese@gmail.com

Görög Péter

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

ÖSSZEFOGLALÁS: A számítógépes modellezés eredményesen használható alagútépítés tervezésénél, azonban csak akkor tudunk valósághű modellt felépíteni, ha megfelelő pontosságú bemenő paraméterek állnak rendelkezésre. A kutatás célja a löttbeton alagútfalazat és a kőzet kapcsolatának szilárdsági vizsgálata laboratóriumi módszerekkel, hogy a végelelemes programok által használt határfelületi elemek paramétereinek meghatározása ezáltal pontosabb lehessen. A vizsgálatok két különböző típusú gránit kőzet felhasználásával történtek. Az egyes kőzet-típusok közetmechanikai paramétereit roncsolásmentes és roncsolásos nyomószilárdság vizsgálattal határoztuk meg. Az alkalmazott beton szilárdsági jellemzéséhez, a nyomószilárdság és a rugalmassági modulus értékét mértük. A kőzettömbök betonhoz csatlakozó mesterségesen érdesített felületeinek érdességét három különböző módszerrel számszerűsítettük. A beton és a gránit határfelületi szilárdságának mérése három különböző laboratóriumi nyírásvizsgálati módszerrel történt: gerendák hajlítás-vizsgálatával, ahol számíthatók voltak a határfelületen fellépő nyírófeszültségek, nyíródobozos vizsgálattal, ahol meghatározhatók voltak a maximális és a reziduális súrlódási szögek, és a minták kohéziója, valamint a gerendavégek normál erő nélküli nyírásával.

Kulcsszavak: löttbeton, alagútfalazat, nyírásvizsgálat

ABSTRACT: The computer modeling is a very useful tool in tunnel design, but it is necessary to have exact input parameters to create a realistic model. For this reason the goal of this study is to determine the shear strength parameters of the surfaces between rock and concrete with laboratory investigations. Two different granite types were investigated, which rock mechanical parameters were tested with non-destructive methods and uniaxial compressive strength tests. The strength parameters of the concrete were also examined by compressive strength tests and Youngs modulus tests. The surface roughness of the specimens was created artificially and two different roughness patterns were used. The roughness of the surface influences the shear strength, therefore three methods were applied to determine the roughness of the surface. The shear strength of granite and concrete interface was examined with three laboratory methods: bending test of composite beams where the shear stress on the interface was calculated, direct shear test, the results of it were the maximum shear strengths, the maximum and residual friction angles and the apparent cohesion of samples, and in the end shear strength tests without normal load were also performed on the remaining parts of the beams.

keywords: shotcrete, tunnel lining, shear strength

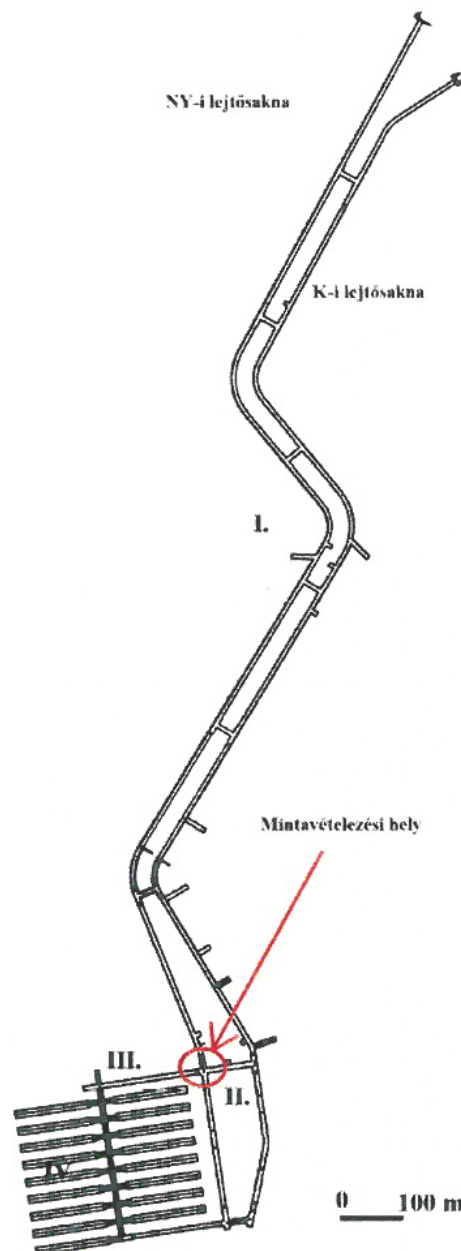
1 BEVEZETÉS

Napjainkban, mint az építőmérnöki gyakorlatban általánosan, az alagutak tervezésénél is előtérbe kerültek a számítógépes tervezési módszerek többek között végelelemes és diszkrét elemes modellezés alkalmazása. Az ilyen modellek pontossága legnagyobb részt a bemenő adatok megfelelőségétől függ. A határfelületi elemek tulajdonságainak ismerete lényeges része a modellalkotás folyamatának. Jelen munka a gránit és a beton határfelületén fellépő nyírószilárdságot vizsgálja laboratóriumi módszerekkel. A vizsgálat apropóját a Bataapátiban készülő kis- és közepes aktivitású nukleáris hulladéklerakó gránit kőzetkörnyezetben kihajtott löttbeton falazattal biztosított alagútjai adták.

Így a vizsgált közettömbök a jelenleg is építés alatt álló Bábaapáti Nemzeti Radioaktív Hulladéktároló befogadó közetkörnyezetéből származnak. A vizsgálatokhoz exkavátorok használatával vöröses-rózsaszín, valamint szürke gránit közettömböket fejtettek ki az ún. „Nagyhurokból”. A létesítmény helyszínrajzán az 1. ábra mutatja a mintavételezés pontos helyét.

A rózsaszín változat, jóval mállottabb, repedezettebb volt a szürkéhez képest, bár a szürke változatban is előfordultak helyenként rózsaszín gránitos részek. Így már a szemrevételezést követően nyilvánvalóvá vált, hogy két különböző minőségű gránittal kell számolni a vizsgálatok elvégzésekor.

A telephely és környezete földrajzilag a Geresdi –dombsághoz, földtanilag a Mórággyi-röghöz tartozik, ÉNy-on a Keleti-Mecsekre terjed át. A hulladéktároló ennek középső részén található. A telephelyen és annak környezetében a földtani felépítésben meghatározó jelentőségű magmás kőzeteket, valamint az azokat átszelő gránitporfir-, mikrogránit- és alpitteléreket Mórággyi Gránit Formáció néven különítjük el. Belsejében metamorf homokkő és metamorf aleurolit is előfordul. A Mórággyi Formációt ÉNy-ról a Mecsek-alja-öv határolja, majd tovább ÉNy-ra a Mecsek alsó-triász-liász üledékei következnek. A peremeken alsó-miocén, illetve pannon üledékes képződmények is előfordulnak, de a telephelyen és környezetében a gránitos alaphegységet csak pleisztocén-holocén üledékek takarják. A magmás test fő tömegét monzogranitos kőzetek adják, amelyekben kisebb-nagyobb zárt testek formájában monzonitos kőzetek (legalább részben zárványok) vannak jelen (Buocz et al. 2012).



1. ábra. Mintavételezés helye Buocz et al. (2012) (Location of the sampling)

2 VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

2.1 Tapadási felületek közötti kapcsolat

Két sima felületű próbatest nyírási vizsgálatakor, amikor a felületek között kapcsolat (adhézió) van, a nyírási szilárdság meghatározásánál a normál erőt állandó értéken tartva a nyíróerő fokozatosan növekszik, elér egy csúcserőértéket, majd a kísérletet folytatva egy maradó (reziduális) feszültséggel lehet a köztük fellépő feszültséget jellemezni. Különböző nagyságú normál feszültségekkel a kísérletet megismételve a nyírófeszültség (τ) és a normál feszültség (σ_n) között lineáris kapcsolatot lehet meghatározni, ahol az egyenesek meredeksége az anyag belső súrlódási szöge, azaz Mohr-Coulomb egyenlet alapján (Gálos & Vásárhelyi 2006):

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varnothing \quad (5)$$

ahol:

- τ – nyírófeszültség,
- σ_n – normálfeszültség,
- c – kohézió,
- $\varnothing$ – belső súrlódási szög.

2.2 Érdes felületek nyírási szilárdsága, érdesség vizsgálata

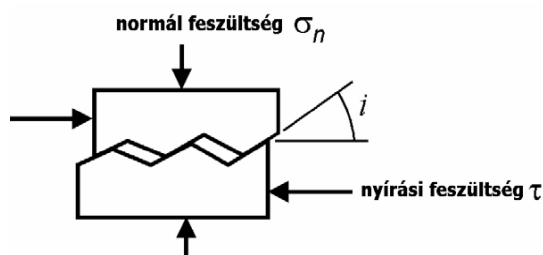
A természetben előforduló kőzettömbök közötti tagolófelületek a legkritikább esetben simák – annak nyírási viselkedését jelentősen befolyásolja a felület érdessége, keménysége, esetleges mállottsága. Általánosságban elmondható, hogy a felület érdessége növeli a nyírószilárdságot, és ez a szilárdság elsődlegesen fontos tényező a kőzettömbök stabilitásának számításánál.

kőzettömbök közötti tagoló felületek érdességének ismeretében meghatározható nyírási szilárdság számításához egyik leghatékonyabb módszer a Barton modell. Barton & Choubey (1977) a modell megalkotásakor Patton (fogazott próbatesteken végzett vizsgálatok alapján felírt) egyenletéből indult ki (2. ábra).

$$\text{Patton egyenlet: } \tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\varnothing_b + i) \quad (6)$$

$$\text{Barton-Choubey egyenlet: } \tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\varnothing_b + \text{JRC} \log_{10}(\text{JCS} / \sigma_n)), \quad (7)$$

ahol: JRC (Joint Roughness Coefficient) a tagoltság érdességének mérőszáma,
JCS (Joint Compressive Strength) a tagoltság anyagának nyomószilárdsága



2. ábra. Fogazott próbatest nyírásvizsgálata Gálos & Vásárhelyi (2006) (*Shear strength test of saw teeth surfaced specimen*)

Az egyenlet abban az esetben nem alkalmazható, ha nincs normál feszültség (azaz $\sigma_n = 0$), míg felső határa $\sigma_n = \text{JCS}$ -nél van. Az összefüggés a maradó (reziduális) nyírófeszültség számítására is alkalmas.

A kőzetek felületi tulajdonságainak vizsgálatok alapfeltétele a felületi érdesség meghatározása, ami a Barton módszer mellett az útburkolati betonok esetében alkalmazott módszer a homokfolt módszer alkalmazásával is megtörtént.

Barton módszer

A felületi érdesség számszerűsítésére Barton és Choubey 1977-ben publikált egy a mai napig használatban lévő 10 különböző felületi profilt bemutató skálát, amelyek érdessége fokozatosan nő. Ezt a skálát 10 különböző kőzet (pala, aplit, gneisz, gránit, szaruszirt, zsírkő) jellemző felületéről mintázta meg. Mindegyik profilhoz hozzárendelt egy tagoltság érdességi tényezőt (Joint Roughness Coefficient a későbbiekben JRC). Az érdességi profilt Barton-fésű segítségével lehet megmérni. A kapott profil és a Barton által előre meghatározott profilok vizuális összehasonlításával határozható meg a JRC érték (Buocz et al. 2012).

Homokfolt módszer

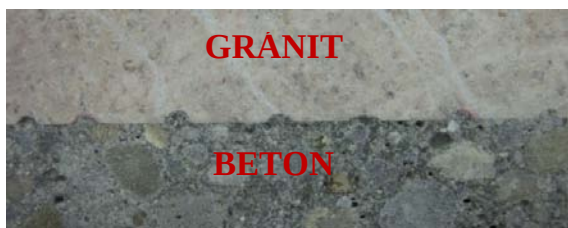
A homokfolt-módszerrel történő vizsgálat a Simon (2005) által alkalmazott módszerből indult ki, amely az „Útburkolatok érdességének mérése kézi eszközökkel” c. előírás (MSZ-07 3301-77) alapján. A kőzetminták felületére 4 g száraz, 0,1-1 mm szemcseátmérőjű homokot kellett kúp alakban szórni, amelyet a vonalzó élének segítségével a kúp csúcsában forgatva körkörösén a felület egyenletlenségeibe bedolgoztam. A felületből legjobban kiálló pont határozza meg az így bedolgozott (elterített) homok csonka kúp felső átmérőjének méretét. A vizsgálat eredményét az átmérőt 4, egymással 45°-os szöget bezáró irányban mm pontos méretének átlaga adja ez az SCD (Sand Circle Diameter) érték.

2.3 Próbatestek előkészítése

A rózsaszín gránitból 9 db 13x15x7,5 cm-es próbatestet és 3 db 15x60x7,5 cm-es, míg a szürke gránitból 6 db szintén 15x60x7,5 cm-es próbatest készült, amelyekre a mesterséges érdesítés után 7,5 cm betonréteg került.

A vágógéppel előállított sima felületeket érdesíteni kellett. Az 1. típusú érdesítés egymásra merőleges raszterben készült, a próbatest oldaléleivel párhuzamosan, a vágókorongot a felületre merőlegesen vezetve. A 3. ábra és a 6. ábra az 1. típusú érdesítés felülnézetét és a betonozást követően a metszetét mutatja. A 2. típusú érdesítés esetében a próbatest oldaléleivel kb. 30-60°-ot bezáró mélyedések készültek a vágókorongot kb. 45°-os hajlásszögben vezetve a felületen. A 4. ábra és az 5. ábra a 2. típusú

érdesítés felülnézetét és a betonozást követően a metszetét mutatja. A 3. vizsgált típus a sima, vágott felület volt, hogy összehasonlíthatóvá váljanak a különböző felületi érdességek.



3. ábra. 1. típusú érdesítés metszete (Section of the surface type 1)



4. ábra. 2. típusú érdesítés metszete (Section of the surface type 2)



6. ábra. 1. típusú érdesítés felülnézete (Plan view of the surface type 1)



5. ábra. 2. típusú érdesítés felülnézete (Plan view of the surface type 2)

2.4 Kőzetanyag tulajdonságai

A közetmechanika metodikájához tartozó egyirányú nyomószilárdság vizsgálatot a Nemzetközi Közetmechanikai Társaság (továbbiakban ISRM) ajánlása írja le (ISRM (1979), amelyben szerepel az alakváltozás mérése is, azaz a rugalmassági modulus meghatározása. A gyakorlatban az 50 mm átmérőjű, 2:1 magasság-átmérő arányú próbatesteken vizsgálják a nyomószilárdságot. A vizsgálatok során csak ennél kisebb próbatest méretet volt lehetőség kialakítani a kevés rendelkezésre álló kőzetanyag miatt. A próbatest mérete és alakja befolyásolja a nyomószilárdság értékét, így az eredmények összehasonlíthatósága érdekében az egyirányú nyomószilárdság alak- és mérethatást figyelembe vevő összefüggésével korrigáltuk a mért eredményeket. Az összefüggés Gálos és Vásárhelyi (2006) alapján:

$$\sigma_c := \frac{\sigma_c \cdot d^{0.18}}{1.78 + 0.485 \cdot \left(\frac{d}{h}\right)} \quad (9)$$

ahol:

- σ_c – egyirányú nyomószilárdság, MPa
- d – próbatest átmérője, mm
- h – próbatest magassága, mm.

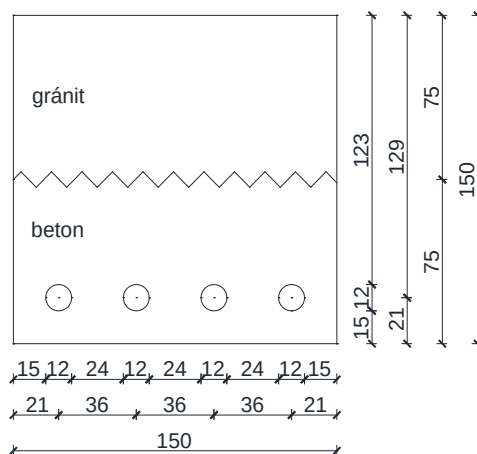
2.5 Az alkalmazott beton tulajdonságai

A laboratóriumban előállított betonkeverékek nyomószilárdságának és rugalmassági modulusának vizsgálata 7 és 28 napos korban történt. A mérések 3-3 db, 150x150x150 mm névleges méretű próbatesten történtek. A rugalmassági modulus mérése az MSZ ISO 6784 szabvány szerinti elrendezéssel 120x120x360 mm méretű hasábokon készült. A beton rugalmassági modulusának számítása (E_c , N/mm²) a harmadik terhelési ciklus mérési vonala alapján történt.

2.6 Gránit és beton gerendák hajlítás vizsgálata

A 150 mm széles, 150 mm magas és 600 mm hosszú gerenda sablonok felében átlagosan 73,04 mm magas gránit kőzettömbök kerültek, amelyekre került a közel ugyan ilyen vastagságú betonréteg. An-

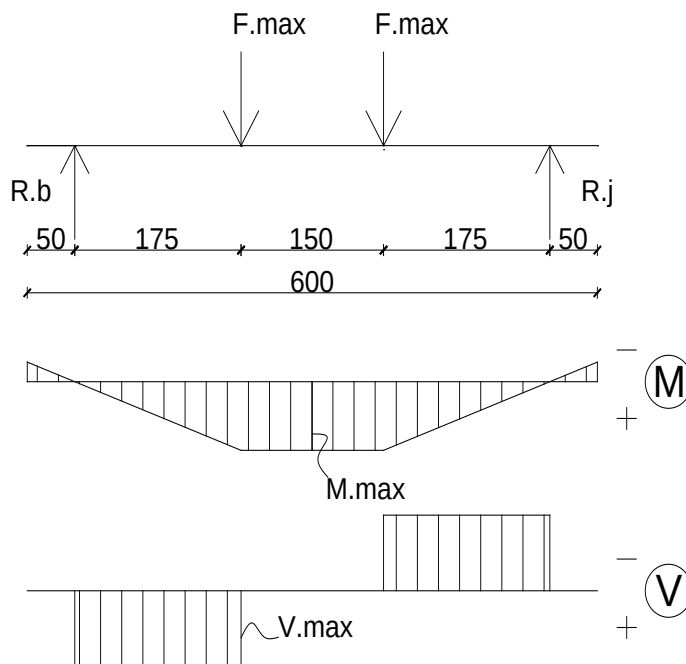
nak érdekében, hogy a hajlítás során a semleges tengely a beton és gránit határfelületéhez közelítsen a betonba 4 db Ø12-es betonacél került 15 mm-es betonfedéssel, amelyek 2 db Ø8-as betonacéllal lettek összefogva. A keresztmetszet ábrázolását a 7. ábra, hajlított gerendák igénybevételeit a 8. ábra mutatja. A vizsgálat lényege, hogy a hajlítás során a beton és a gránit határfelülete mentén mennyen tönk्रे a próbatest és így a hajlítóerőből a csúsztató feszültség számítható.



7. ábra. A 150x150x600 mm-es gerendák keresztmetszete mezőközépen (Section of the beams with dimensions of 150x150x600 mm)

A próbatestek tárolása egészen a vizsgálat időpontjáig víz alatt történt. A mérések során a különböző módon érdesített próbatestekből 3-3 db készült, 1 db gerenda rózsaszín gránitból, és 2 db szürke gránitból.

A gerendák méreteit, valamint a gránit és a beton határfelületének helyzetét tolómérővel mértük, majd kiszámítottuk a repedésmentes keresztmetszet ideális területét (A_I , mm²), a keresztmetszet statikai nyomatékát a felső szélső szátra vonatkoztatva (S_{xI} , mm³), a semleges tengely helyét (x_I , mm), és a keresztmetszet inercianyomatékát (I_{xI} , mm⁴). A számítás elvégzéséhez szükség volt a különböző anyagok rugalmassági modulusainak arányára, így lehetett a keresztmetszet vizsgálatát a homogén beton keresztmetszet vizsgálatára visszavezetni.



8. ábra. A hajlított gerendák igénybevételei (Stress of bent beams)

2.7 Gránit és beton próbatestek nyírásvizsgálata – nyíródobozos vizsgálat

A közzettestek viselkedését elsősorban a tagoltsági jellemzők (felületi érdesség, kitöltöttség, mállottság) határozzák meg. A gránit és a beton határfelületét is lehet tagoló felületként kezelni, amelynek a

nyírószilárdságát a Nemzetközi Kőzetmechanikai Társaság által javasolt közvetlen nyírószilárdság vizsgálattal meghatározni (ISRM 1974). A minta előkészítés során a mintákat betonba ágyazva készültek, hogy a nyíródoboz geometriájának megfeleljenek. A próbatestek készítésekor fontos, hogy a próbatestek határfelülete párhuzamos legyen a nyírási síkkal, és a normálerő, valamint a nyíróerő hatásvonala is központosan terhelje a mintát. A használt nyíróberendezést a 9. ábra mutatja.



9. ábra. Nyíróberendezés (Shear box)

A vizsgálat konstans normálerő alkalmazásával indult a nyírási teherbírás kimerüléséig, majd a normálerőt lépcsősen emeltem, és a nyíróerőt minden lépcsőnél növeltem. A különböző érdesítésű próbatestekből 12-12 db állt rendelkezésre, azaz összességében 36 db próbatestet vizsgálta készült el, ezáltal lehetőség volt különböző nagyságú normálerőket is alkalmazni. A kezdeti normálerők 5-13 kN közé estek. A teherbírás kimerülése után a normálerő lépcsős emelésénél a terhelési lépcsők száma változó volt. Az 1. és 2. típusú érdesességű minták esetében több lépcsőt, amíg a sima felületű próbatestek esetében általában kevesebb lépcsőt alkalmaztunk, ugyanis a sima felületű próbatesteknél nem voltak olyan fogak, amelyek le tudtak volna nyíródni, így csak a súrlódási feszültség kimerülésének határát lehetett mérni.

3 VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

3.1 Az érdeség mérési módszerek eredményeinek összehasonlítása

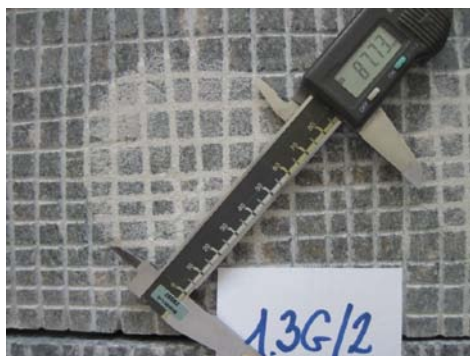
A Barton módszer segítségével meghatározott JRC értékek, mutatták, hogy a 2 típusú érdesítésű próbatestek értékei nagyobbak:

Próbatest típusa	Próbatest száma	JRC	Próbatest típusa	Próbatest száma	JRC
Az 1. típusú érdesítés	1.1 „kocka”	3	A 2. típusú érdesítés	2.1 „kocka”	17
	1.2 „kocka”	7		2.2 „kocka”	17
	1.3 „kocka”	8		2.3 „kocka”	18
	1.1 gerenda	9		2.1 gerenda	19
	1.2 gerenda	8		2.2 gerenda	17
	1.3 gerenda	9		2.3 gerenda	17

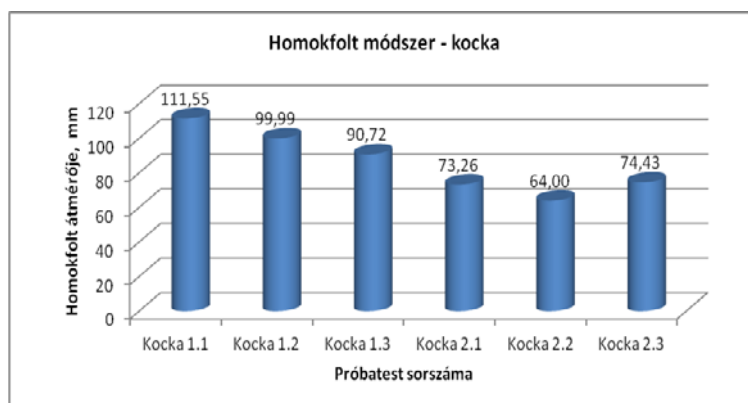
A sima felületű próbatestek esetében a JRC értékei értelemszerűen 0 –k voltak.

A homokfolt módszer (10. ábra) alkalmazásakor az első típusú érdesítés esetében kevésbé érdes felületeket kaptam, mint a második típusnál, mind a kockák, mind a gerendák esetében.

A kocka próbatesteknél, az 1. típusú érdesítés esetében mindkét módszer azt mutatta, hogy az 1.1 jelű minta felülete kevésbé érdes. Az 1.2 és 1.3 jelű minták JRC, SCD értékei közepesen érdes felületet mutatnak, amíg a 2. típusú felületmegmunkálás sikerült a legérdeesebbre a vizsgálatok szerint (11. ábra).

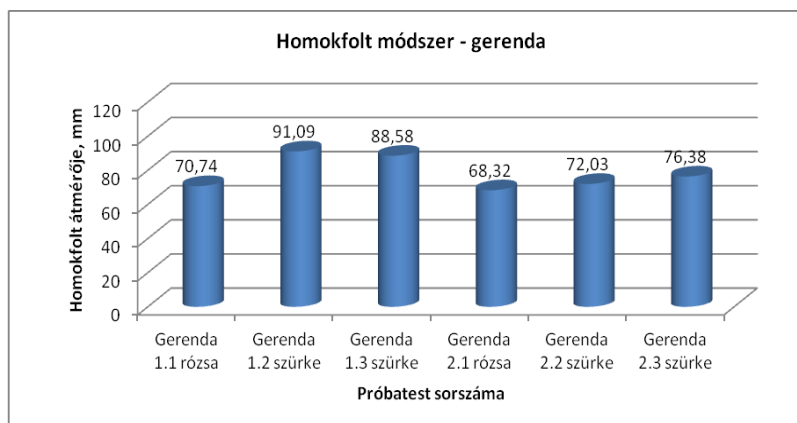


100. ábra. Homokfolt módszer (SCD method)



11. ábra. Homokfolt módszer vizsgálati eredményei a 13x15x7,5 cm-es próbatesteken (Results of SCD method on specimens with dimensions of 13x15x7,5 cm)

A gerendák esetén JRC értékek a két különböző érdesítésnél típusonként hasonló értékeket mutattak (1. típus átlagos JRC száma: 8,67, 2. típus átlagos JRC száma 17,67). Azonban a homokfolt módszer szerint az 1.1 jelű gerenda érdessége a 2. típusú érdesítés mintáival mutat egyezőséget (12. ábra)!



12. ábra. Homokfolt módszer vizsgálati eredményei a 15x60x7,5 cm-es próbatesteken (*Results of SCD method on specimens with dimensions of 13x15x7,5 cm*)

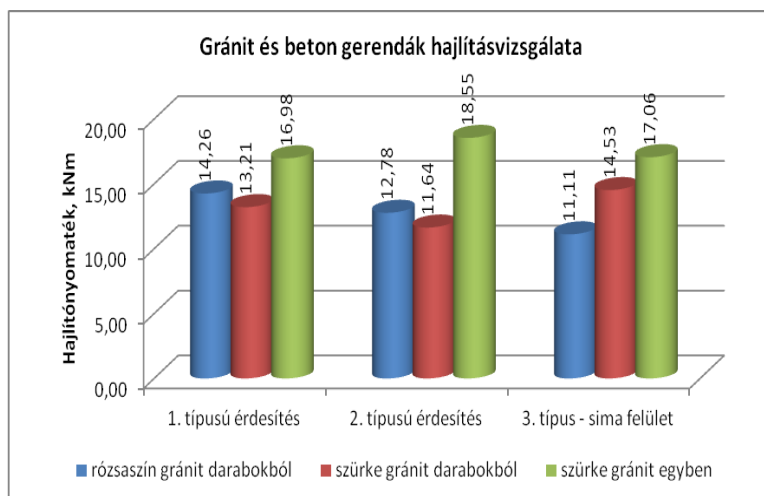
A homokfolt módszerrel jól lehet követni a felületek érdességének akár apróbb változásait is. Gyakorlati szempontból a Barton módszer egyszerűen kivitelezhető, a felületek érdességének változásának tendenciáját jól mutatja, viszont meglehetősen szubjektív.

3.2 A kőzet és a beton tulajdonságainak összehasonlítása

A rózsaszín gránit átlagos egyirányú nyomószilárdsága 50 MPa, a szürke változaté 68 MPa, a beton nyomószilárdsága ezt az értéket már 7 napos korban elérte, átlagos nyomószilárdsága 58 MPa volt. A gránitból és betontól összeépített próbatestek hajlításvizsgálata a beton 14 napos korában készült, amikor a nyomószilárdsága 65 MPa volt. A szürke gránit próbatestek esetében a két különböző anyag nyomószilárdsága megegyezett, míg a rózsaszín gránitból készült mintáknál 15 MPa-lal nagyobb volt a beton nyomószilárdsága.

A beton rugalmassági modulusa 36800 MPa, míg a rózsaszín gránité ennek a felénél is kisebb, 17350 MPa. A szürke gránit esetében ez az arány kisebb, ugyanis a szürke gránit 20600 MPa átlagos rugalmassági modulusával rendelkezik. Ezek alapján, az alkalmazott beton merevebb, kisebb alakváltozásokra képes.

3.3 A gránit és beton gerendák hajlítás vizsgálatának kiértékelése



13. ábra. Gránit és beton gerendák hajlító nyomatékai (*Bending moments of the composite granite-concrete beams*)

szültség 3,14 – 3,83 N/mm² között változott. A kapcsolat nyírószilárdsága ezt az értéket meghaladta.

Mindegyik érdességi határfelület esetében az egy darabból készült szürke gránitos próbatestek maximális hajlító nyomatéka volt a legnagyobb. A két érdes felület esetében a rózsaszín gránitból készült próbatestek hajlító nyomatéka magasabb a szürke gránithoz képest, míg a sima felületnél a szürke gránittal készült próbatest nagyobb nyomatéknál ment tönkre. A hajlító nyomatékok egyedi értékeit a 13. ábra mutatja.

A határfelületen ébredő nyírófeszültséget minden próbatest esetében számítottuk. Azon mintáknál, ahol a határfelületen nem történt elválás, mind a beton, mind a gránit nyírási tönkremenetelt szenvedett. Itt a határfelületen ébredő nyírófeszültség



14. ábra. Határfelület mentén elnyíródott gerenda
(*Beam sheared on the rock-concrete surface*)

Erre példa minden rózsaszín gránittal készült próbatest és az 1.2 jelű, szürke gránitból készült minta. A többi szürke gránitból készített gerendánál a közet hajlításra ment tönkre, függőleges repedés jelent meg a maximális törőerő alatt, majd a határfelület mentén elnyíródott, és a beton nyírási tönkremenetelt szenvedett. A határfelületen ébredő nyírófeszültség $4,25 - 4,87 \text{ N/mm}^2$ között változott, kivéve az 2.2 jelű gerendát, ahol $3,28 \text{ N/mm}^2$ volt. Látható, hogy a határfelületen való tönkremenetelhez nagyobb nyírófeszültség tartozik, tehát a vizsgálat során meg lehetett határozni azt a nyírófeszültséget, amely a határfelületen történő elnyíródást eredményezi a hajlított-nyírt gerendában (14. ábra).

3.4 Nyíródobozos vizsgálat eredményei

Azokat a próbatesteket, amelyek részben a határfelület mentén nyíródtak el, részben a kapcsolatot alkotó anyagok szenvedtek nyírási tönkremenetelt, figyelembe vettem a kohézió és a súrlódási szögek számításában. A teljesen határfelület mentén elnyíródott próbatestek (15. ábra). eredményeit természetesen szintén felhasználtam.



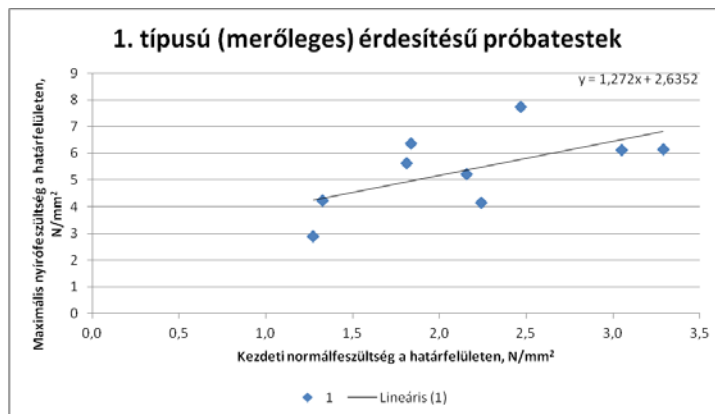
15. ábra. A határfelületen elnyíródott próbatest (*Specimen sheared on the rock-concrete surface into the shear box*)

Az első típusú érdesítés esetében a kezdeti normálfeszültség $1,2 - 3,3 \text{ N/mm}^2$ között, a maximális nyírófeszültség $2,9 - 7,7 \text{ N/mm}^2$ között alakult. A 16. ábra egy teljesen a határfelület mentén elnyíródott próbatestet mutat. A betonról azok a fogak nyíródtak le, amelyek a nyíróerő irányára merőlegesek. Ezáltal a hézagban maradó törmelék a gránit felületét összekarcolta.



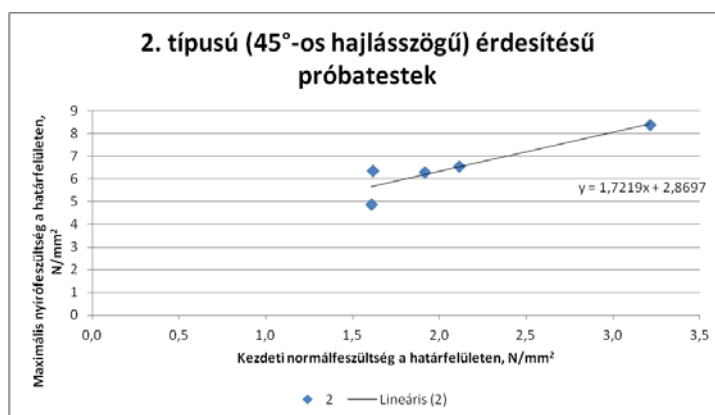
16. ábra. A határfelületen elnyíródott próbatest a vizsgálat után (*Sheared specimen after the shear box test*)

A maximális súrlódási szög számításához felhasznált próbatestek felületére vonatkoztatva a kezdeti normálfeszültség, valamint a maximális nyírófeszültség értékpárokat diagramon ábrázolva mutatja a 17. ábra, a 18. ábra és a 19. ábra. Erre a pontfelhőre egyenest illesztve számítható a súrlódási szög és a látszólagos kohézió. A határfelületen fellépő kezdeti normálfeszültség növekedésével a nyírófeszültség is növekszik. Ez a tendencia minden típusú érdesítésnél megfigyelhető, így a maximális súrlódási szöget az egyenes meredeksége mutatja meg. Az 1. típusú érdesítésű határfelületek esetében a maximális súrlódási szög: $\varnothing_{\max} = 52^\circ$ és a látszólagos kohézió: $c = 2,6 \text{ MPa}$.



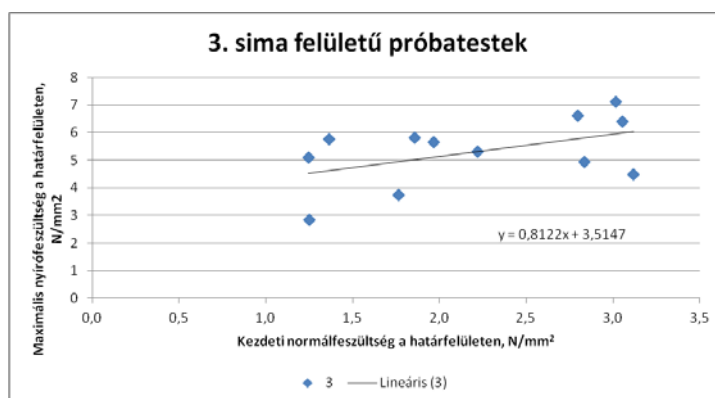
17. ábra. Maximális súrlódási szög és kohézió az 1. típusú érdesítésű próbatestek esetében (*Maximal angle of friction and cohesion of the type 1 surface*)

A második típusú érdesítés esetében a kezdeti normál-feszültség $1,6 - 3,2 \text{ N/mm}^2$ között, míg a maximális nyírófeszültség $4,9 \text{ N/mm}^2 - 8,4 \text{ N/mm}^2$ között változott. A 2. típusú érdesítés esetében a maximális súrlódási szög $\varnothing_{\max} = 60^\circ$ és a látszólagos kohézió: $c = 2,9 \text{ MPa}$.



18. ábra. Maximális súrlódási szög és kohézió a 2. típusú érdesítésű próbatestek esetében (*Maximal angle of friction and cohesion of the type 2 surface*)

A sima felületű próbatestek esetében kezdeti normál-feszültség $1,2 - 3,1 \text{ N/mm}^2$ között, a maximális nyírófeszültség $2,8 - 7,1 \text{ N/mm}^2$ között változott. A kiszámított maximális belső súrlódási szög $\varnothing_{\max} = 39^\circ$ és a látszólagos kohézió $c = 3,51 \text{ MPa}$.



19. ábra. Maximális súrlódási szög és kohézió a 3. típusú, sima határfelületű próbatestek esetében (*Maximal angle of friction and cohesion of the type 3 surface*)

A három különböző felületi érdességek között 10° különbség van. A kohézió az 1. típusú érdesítések esetében volt a legkisebb, amelyet a 2. típusú érdesség követett, majd a legnagyobb értéket a sima felületű próbatestek adták. Minden próbatest esetében a törés után egy magasabb szintre emeltem a normál-erőt, általában $2-2,5 \text{ kN}$ -al a kezdeti normál-erőhöz képest, ami átlagosan $0,5-0,6 \text{ N/mm}^2$ normál-feszültség növekedést jelent. A sima felületű próbatestek reziduális súrlódási szöge 29° , az 1. típusú érdesítésé 32° , a 2. típusú érdesítésé 35° . Tehát, a maradó súrlódási szögek között kisebb különbségek (csupán néhány fok) vannak, mint a maximális súrlódási szögek között.

3.5 Az érdesítés és a nyomatéki teherbírás összefüggése

A felületi érdesség mértéke a hajlításvizsgálat szempontjából kisebb jelentőségű. A sima felületek esetében, ahol a JRC érték a legalacsonyabb (0), és a homokfolt módszer szerint az SCD szám a legnagyobb (123,8 mm), a hajlító nyomaték a legkisebb értéket vette fel (14,23 kNm). Az 1. típusú érdesítésű próbatestek adták a legnagyobb hajlító nyomatékot (14,82 kNm), ahol a JRC érték közepes értéket vett fel (átlagosan 8,67), a homokfolt módszer szerint az SCD szám szintén közepes értéket vett fel (83,47 mm). A 2. típusú érdesítésnél a hajlító nyomaték 14,32 N/mm²-t vett fel, ahol a JRC érték a legmagasabb értékeket veszi fel (átlagosan 18), és a homokfolt módszer szerint az SCD szám a legalacsonyabb (átlagosan 72,24 mm).

A nyírófeszültség (a 2.2 jelű gerendát kivéve) 4,25-4,87 N/mm² között változik. Azoknál a próbatesteknél, ahol felületi elválás történt a nyírófeszültség növekvő tendenciát mutatott, tehát az érdesített felületeken nagyobb ellenállást kell legyőzni, hogy a határfelületen elnyíródjon a próbatest. A sima felületeknél átlagosan 4,56 N/mm², az első típusú érdesítésnél 4,64 N/mm², a második típusú érdesítésnél a számított nyírófeszültség 4,77 N/mm².

3.6 A beépített anyagok tulajdonságainak és a nyomatéki teherbírás összefüggései

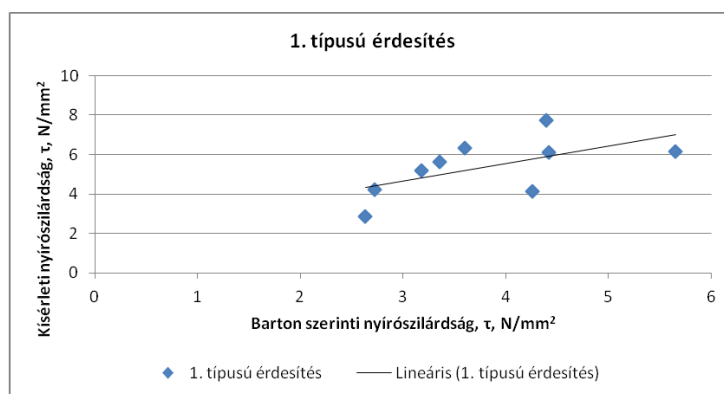
A próbatestek készítésének időpontjában a beton nyomószilárdsága a szürke gránitával közel azonos, viszont a rózsaszín gránit kb. 20 MPa-lal a beton nyomószilárdsága alatt marad. Tehát, a szürke gránittal készült minták keresztmetszete nyomószilárdság szempontjából homogénebb. A rózsaszín gránit mállottabb közettömb volt, számos mikrorepedés volt a közetben.

Mivel a rózsaszín gránit rugalmassági modulusa kisebb, mint a szürke gránité, az előbbi nagyobb alakváltozásokat tudott végezni a hajlítás során. A szürke gránit ridegebb, mint a rózsaszín, a rugalmassági modulusának kísérleti eredményei közelebb vannak a beton rugalmassági modulusához, ezért a hajlítás során a közet kisebb alakváltozásokat tudott végezni.

3.7 A Barton módszer és a nyíródobozos vizsgálat eredményeinek összefüggése

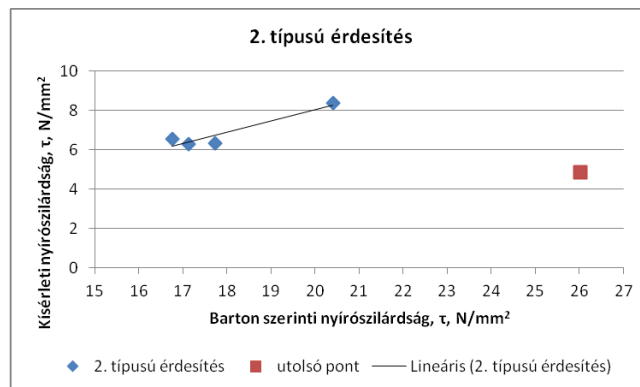
A Barton és Choubey 1973-ban publikálta a nyírószilárdság számítására levezetett összefüggését (Barton és Choubey, 1977), amellyel kiszámítottuk az egyes próbatestek esetében a nyírószilárdságot. Ezeket az értékeket növekvő sorrendbe állítva és az adott próbatest kísérleti nyírószilárdságát hozzárendelve keletkezett a 20-22. ábrák.

Az 1. típusú érdesítésnél egymáshoz közeli eredményeket adott a vizsgálat és az empirikus képlet alkalmazása. Az értékekre egy növekvő lineáris egyenes illeszthető (20. ábra).



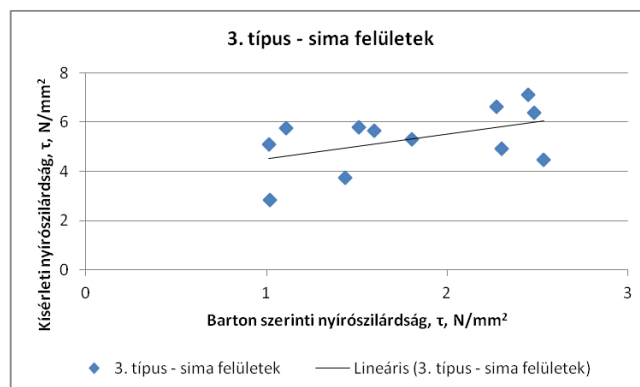
20. ábra. Empirikus és laboratóriumi nyírószilárdság összehasonlítása 1. típusú érdesítés esetén (Comparison of empirical and laboratory results of the shear strength, type 1 surface)

A 2. típusú érdesítésű határfelületeknél az empirikus összefüggés átlagosan 13 N/mm²-rel nagyobb nyírószilárdsági eredményeket adott, ami túlbecsüli a kapcsolat nyírószilárdsági teljesítőképességét. Az eredményeket a JRC érték megválasztása növelte meg. Az utolsó értékpár (26, 4,8) N/mm² esetében a próbatest részben határfelületen nyíródott, részben tört. A kis mért nyírószilárdságot az okozza, hogy a gránit és a beton is először eltört a széleken, és csak ezután nyíródott el a határfelületen. Amennyiben a legutolsó eredményt figyelmen kívül hagyom, szintén lineáris összefüggést kapok, amelyet a 21. ábra mutat.



21. ábra. Empirikus és laboratóriumi nyírószilárdság összehasonlítása 2. típusú érdesítés esetén
(Comparison of empirical and laboratory results of the shear strength, type 2 surface)

A sima határfelületű próbatestek esetében a JRC értéket 0, ezért a diagram jellege megegyezik a normálfeszültség – nyírófeszültség diagramával. Az empirikus összefüggés ebben az esetben alábecsüli a kapcsolat nyírószilárdságát (22. ábra). Átlagosan $3,52 N/mm^2$ -rel kisebb nyírószilárdsági értékeket lehet számítani.



22. ábra. Empirikus és laboratóriumi nyírószilárdság összehasonlítása a sima határfelületű próbatestek esetében
(Comparison of empirical and laboratory results of the shear strength, type 3 surface)

3.8 A nyíródobozos vizsgálat és a nyomatéki teherbírás eredményeinek összehasonlítása

Az 1. típusú érdesítésű próbatestek esetében a hajlításvizsgálat során csak egy gerenda szenvedett határfelületi tönkremenetelt $4,64 N/mm^2$ nyírószilárdsággal. A nyíródobozos kísérlet esetében $2,89 - 7,73 N/mm^2$ között változott a nyírófeszültség értéke, átlagosan $5,38 N/mm^2$ volt. Tehát látható, hogy a nyíródobozos vizsgálat átlagfeszültsége közel hasonló értéket mutat a hajlítás vizsgálat csúsztató feszültségével.

A 2. típusú érdesítésű próbatestek esetében a hajlítás vizsgálat során átlagosan $4,03 N/mm^2$ nyírófeszültség esetén történt határfelületi elválás. A nyírófeszültség $3,28 - 4,77 N/mm^2$ között változott. A nyíródobozos kísérlet esetében $4,85 - 8,38 N/mm^2$ között változott a nyírófeszültség értéke, és átlagosan $6,48 N/mm^2$ volt. A hajlítás vizsgálat esetén fellépő nyírófeszültség maximuma is a nyíródobozos vizsgálat eredményei alatt marad.

A sima határfelületű próbatestek esetében a hajlításvizsgálat során átlagosan $4,56 N/mm^2$ nyírófeszültség esetén történt határfelületi elválás. A nyírófeszültség $4,25 - 4,87 N/mm^2$ volt. A nyíródobozos kísérlet esetében $2,83 - 7,11 N/mm^2$ között változott a nyírófeszültség értéke, és átlagosan $5,31 N/mm^2$ volt. Ebben az esetben is látható, hogy a nyíródobozos kísérlet nagyobb nyírófeszültségeket adott eredményül, mint a hajlításvizsgálat.

4 ÖSSZEFOGLALÁS

A számítógépes modellezés esetén elengedhetetlen a modellezett közetkörnyezet, tulajdonságainak ismerete azaz laboratóriumi és helyszíni vizsgálata. Jelen cikkben ismertetett laboratóriumi nyírószilárdság vizsgálatsorozat eredményei a határfelületi elemek tulajdonságainak felvételét könnyítik meg.

A határfelületi elemek normálmerevségének felvétele a csatlakozó kőzet és beton rugalmassági modulusának egymáshoz viszonyított arányától függ. A hajlítás vizsgálatok rámutattak arra, hogy minél közelebbi értékeket vesz fel a beton és a kőzet rugalmassági modulusa, annál valószínűbb, hogy a két anyag határfelületén elnyíródás következik be. A rózsaszín gránit rugalmassági modulusa 47%-a, a szürke gránit rugalmassági modulusa 52%-a a beton rugalmassági modulusának. Az előbbi esetben a próbatestek nyírási tönkremenetelt szenvedtek, az utóbbi esetben a próbatestek határfelületi nyírószilárdsága merült ki. A határfelületi elemek nyírási merevségének felvételéhez használható nyírási rugalmassági modulusok témaköréről a jelenlegi vizsgálatok nem adtak áttekintést. A nyírási rugalmassági modulus számításához szükség van a próbatestek Poisson-tényezőjére. A gránit minták esetében ilyen vizsgálatokat is készültek, azonban a beton esetében nem, így a két anyagjellemző összehasonlítását nem tartalmazza a cikk. A jövőben ezen paraméterek hatását is érdemes vizsgálni.

A határfelületi elemek felvételénél fontos tényező az adhézió, amelynek számításához a két felület mentén fellépő kohéziót használjuk, valamint a másik fontos tényező a súrlódási szög. A nyíródobozos vizsgálat megfelelő az említett paraméterek meghatározására. A vizsgálat kimutatta, hogy a beton és a kőzet határfelületi érdessége nagy jelentőségű a kohézió és a súrlódási szög értékének meghatározásában. A homokfolt módszer esetében az 1. típusú érdesítésű próbatesteket vizsgálva 19% érdesség növekedés 1% nyírószilárdság növekedést eredményezett, amíg a 2. típusú érdesítésű próbatesteket vizsgálva 43% érdesség növekedés 22% nyírószilárdság növekedést eredményezett (mindkét esetben a vágott határfelületű próbatestekhez viszonyítva). A Barton módszer esetében 1. típusú érdesítésű próbatesteket vizsgálva 30% érdesség növekedés okozott 1% nyírószilárdság növekedést, amíg a 2. típusú érdesítésű próbatesteket vizsgálva 87% érdesség növekedés 22% nyírószilárdság növekedést eredményezett (mindkét esetben a vágott határfelületű próbatestekhez viszonyítva). Látható, hogy a két különböző érdesség vizsgálati módszer eltérő érdesség növekedési tendenciát mutat, valamint a nyírószilárdság növekedése kisebb mértékű a felületi érdesség növekedéséhez képest.

Tehát, a vizsgálati eredmények gránitos kőzetkörnyezetben épülő alagutak esetében segítséget nyújtanak a számítógépes modellezés során a határfelületi elemek tulajdonságainak megválasztásához. Természetesen minden esetben az adott kőzetkörnyezet és az alkalmazandó beton tulajdonságainak laboratóriumi vizsgálatait érdemes elvégezni, hogy pontos információkat kapjunk arról, milyen merevséggel, alakváltozási képességgel, felületi érdességgel rendelkeznek az anyagok. A kőzetek tulajdonságai rendkívül változatosak a világ összes pontján. Az ásványtani összetételtől, a kőzet felszíni, vagy felszín alatti elhelyezkedésétől, a kialakulásának módjától, a mállottságának mértékétől, valamint számos egyéb tényezőtől függnék. A beton szerkezetben való viselkedése (valamint a kőzettel való együttműködés) az alkalmazott adalékanyagok és a cement minőségétől, a víz-cement tényezőtől, valamint az egyéb alkalmazott anyagoktól (vasalás, műanyag szálerősítés) függ nagymértékben.

A vizsgálat sorozat következő állomása, hogy a Bátaapáti Nemzeti Radioaktív Hulladéktároló alagút falazatából kifűrt magmintákon végezzük el a kőzet és a beton közötti felület menti nyírószilárdság meghatározását. Ezen vizsgálatok előkészítése folyamatban van.

5 IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- Barton, N., Choubey, V., 1977. *The shear strength of rock joints in theory and practice*, Rock Mech., 10, 1-54.
- Buocz I., Görög P., Rozgonyi-Boissinot N., Török Á. 2012. Kőzettestek közvetlen nyírószilárdsági vizsgálata a Bátaapáti Nemzeti Radioaktív hulladék tároló kőzeteinek példáján bemutatva. In: Török Á., Görög P. ed. *Kőzetmechanika és kőzetkörnyezet szerepe a radioaktív hulladéklakók kialakításánál*, Terc Kiadó, Budapest, 123-138.
- Gálos M., Vásárhelyi B., 2006. *Kőzettestek osztályozása az építőmérnöki gyakorlatban*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1-144.
- ISRM 1974 *Suggested Methods for Determining Shear Strength*, International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, 131-140.
- ISRM 1979. *Suggestive Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*, Int. J Rock Mech. Min. Sci. és Geomech. Abst., 16, 135-140.
- MSZ ISO 6784 Beton. A statikus rugalmassági modulus meghatározása nyomásra.
- MSZ-07 3301-77 Útburkolatok érdességének mérése kézi eszközökkel
- Simon T., 2005 *Beton munkahézag nyírási teherbírása a fogadó beton felületi durvaságának függvényében*, Kézirat, 1-75.