

Talajok és kőzetek in situ jellemzése szeizmikus sebességeik alapján

Törös Endre

Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, toros@elgi.hu

Prónay Zsolt

Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, pronay@elgi.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A szeizmikus hullámterjedési sebességek a sűrűséggel együtt csak tökéletesen rugalmas közegben jellemzik egyértelműen az anyagok viselkedését. Az előadásban szerzők, összehasonlítva egyéb feltárási és anyagvizsgálati módszerekkel bemutatják, hogy bizonyos korlátok mellett reális közegek jellemzésére is jól használhatók a szeizmikus hullámterjedési sebességek. Az elméletet gyakorlati feladatok megoldásának bemutatásával igazolják.

Kulcsszavak: szeizmikus hullámterjedési sebességek, alakváltozási jellemzők, Q index, N érték

1 BEVEZETÉS

Bár a sekélygeofizikai módszerek az utóbbi időben nagymérvű fejlődésen mentek keresztül, alkalmazásuk köre többnyire leszűkül a környezetétől eltérő viselkedésű térrészek, anomálikus viselkedésű helyek kimutatására, lehetőséget nyújtva a további geotechnikai feltárások optimális tervezéséhez. A geotechnikai feltárások kritikus pontjainak megtalálása a szeizmikus módszer esetében egyfajta anyagvizsgálatot is jelent, mert az eljárás során meghatározott szeizmikus sebességek, révén rugalmas közegben anyagjellemzők, a reális közeg mechanikai állapotát is jól jellemzik. Mindemellett a szeizmika szolgáltatja rövid ideig tartó, kis feszültség-alakváltozási állapot mellett nyert anyagjellemzők ismerete a mérnöki igényeket általában nem elégíti ki, mert a geotechnikai feladatok döntő többségében statikus problémákat kell megoldani, amelyek az anyagok törés közeli feszültségállapotára jellemző alakváltozási ismereteket igénylik.

Közelebbről megvizsgálva a kérdést, a statikus állapotot viszonylag jól modellező terepi kísérletek és laboratóriumi vizsgálatok is egymástól eltérő jellemzését adják a vizsgált anyagnak, amelyek eredményei általában a módszerre jellemző értéként foghatók fel és kevésbé, a tervezés közvetlen bemenő adataiként.

Mi hát a megoldás? Elméletben persze a teljes alakváltozási tartományban lenne jó ismerni az anyagok jellemzőit, de ennek egyelőre számtalan akadályja van. Így marad az, hogy a különböző feladattípusokhoz lehetőleg az optimális vizsgálati módszert, vagy módszeregyüttest alkalmazzuk, illetve, hogy a rokon vizsgálati módszerek eredményeit az alkalmazás céljának megfelelően konvertálni tudjuk a tervezés, vagy az alkalmazás céljának megfelelően.

2 A SZEIZMIKUS MÉRÉSEK HELYE A GEOTECHNIKÁBAN

2.1 A szeizmikus sebességek és alakváltozási jellemzők rugalmas anyagokban

A szeizmikus hullám a rugalmas közeg deformációja révén terjedő energia megnyilvánulási formája. A hullámterjedést közvetítő közeget rugalmasnak tekintjük, ha érvényes a Hooke törvény, azaz a részecskék elmozdulása arányos az elmozdulást okozó belső feszültség nagyságával. Az arányossági tényező anyagállandó, jellemző az energiát közvetítő közegre. A feszültség megszűnése után minden elmozdult részecske az elmozdulás előtti, eredeti helyére tér vissza, energia a közeg maradandó alakváltozására nem fordítódik. Ez a megállapítás érvényes a szeizmikus hullámokra, mert terjedésükkor csak kis feszültségváltozások lépnek fel a rugalmas tartományon belül. A Hooke közeg feltételeinek megfelelő anyagokban a hullámterjedést leíró 3 dimenziós mozgásegyenletre kétféle megoldás létezik az energiaterjedés sebességére, amely két eltérő, ún. testhullámtípust jelöl:

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1).$$

Ahol a V_P az ún. longitudinális hullámban, míg a V_S az ún. transzverzális hullámban a rugalmas energia terjedési sebességét jelenti, valamint ρ a közeg sűrűségét, a λ és μ az ún. *Lamé állandókat*. A longitudinális hullám egyéb elnevezése a *primer* hullám, vagy *P*-hullám, a transzverzális hullámé a *secunder* hullám, vagy *S*-hullám.

A *Poisson-hányados* (ν) bevezetésével a testhullám sebességek közötti összefüggés az alábbiak szerint is leírható:

$$V_P = V_S \sqrt{\frac{1-\nu}{0.5-\nu}} \quad (2)$$

Ha a végtelen közeg helyett végtelen féltérben vizsgáljuk a hullámtípusokat, akkor a hullámegyenlet egyik megoldása homogén, izotróp féltéren az ún. szabad felszíni hullám (más néven *Rayleigh*-hullám). A *Rayleigh*-hullám terjedési sebessége (V_R) ahogyan maga a hullámmozgás is, összetett, bennük a testhullám sebességek jelennek meg. Leegyszerűsítve a *Rayleigh*-hullám terjedési sebességére az alábbi összefüggés adódik (ACHENBACH 1975):

$$V_R = \frac{0,874 + 1,117\nu}{1 + \nu} V_S. \quad (3)$$

Az alábbi összefüggések kapcsolatot jelentenek a geotechnikai és a szeizmikus módszerek által meghatározott paraméterek között rugalmas anyagokban.

$$M = \rho V_P^2 \quad (4)$$

az egyirányú nyomószilárdsággal arányos mennyiség, (M), definíciószerűen az egytengelyű nyomószilárdsági vizsgálatokban a tengelyirányú feszültség és alakváltozás közötti összefüggés mérőszáma. Angol nyelvű elnevezése a *constrained modulus*, vagy *P-wave modulus*. Pontos magyar megfelelője nincs.

$$G = \rho V_S^2 \quad (5)$$

a *nyírási modulus*, (G), egyben az egyik Lamé állandó, értelmezésben is egyezik az általánosan használt, a talajok nyíróvizsgálatánál használatos kifejezéssel.

$$B = \rho \left(V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right) \quad (6)$$

összenyomhatósági modulus, (B) amelynek K is elfogadott, szokásos jelölése. A triaxiális vizsgálatokhoz kapcsolódó mennyiség.

$$E = \rho V_S^2 \left(\frac{3V_P^2 - 4V_S^2}{V_P^2 - V_S^2} \right) \quad (7)$$

Young modulus, (E), az ismert rugalmassági állandó.

A felsorolt mennyiségek mindegyike erő/felület (Pa) dimenziójú.

2.2 A szeizmikus jellemzők reális anyagokban

Az anyagok, különösen a talajok nem követik a rugalmas anyagmodellt, egyben a reális terhelések tartományában az anyagok viselkedése terhelésfüggő. Talajoknál a rugalmas, vagy rugalmas közeli anyagállapot megváltoztatásához fajlagosan nagyobb erőhatás szükséges, mint az anyagnak a maradandó alakváltozási ponthoz közelebb eső állapotában (1. ábra). Ezekből következik, hogy a nyírófeszültség példáján bemutatva, a szeizmikus módszerrel a fenti (4) - (7) összefüggések alapján számolt anyagjellemzők értékei mindig magasabbak, mint a statikus szilárdsági vizsgálatokkal meghatározható geotechnikai paraméterek értékei, azaz

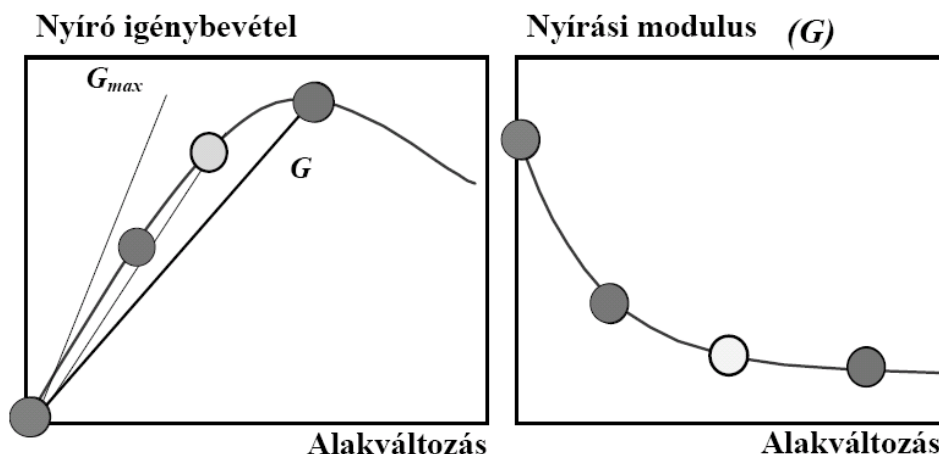
$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (8)$$

$$\text{és } G = R G_{max}, \quad (9)$$

ahol G_{max} : a szeizmikus mérésekkel meghatározott nyírási modulus,

G : a statikus szilárdsági vizsgálattal meghatározott nyírási modulus

és R az ún. redukciós faktor ($0 < R \leq 1$), amely maga is függvénye az alakváltozási feszültségi állapotnak.



1. ábra. Nyírószilárdság változása talajokon, statikus állapotból kiindulva. G_{max} : a szeizmikus módszerrel, G : az egyéb módszerrel meghatározható nyírási modulus értéke

Nyilvánvaló, hogy a megújuló-, vagy dinamikus rezgésterhelésnek kitett anyagok jellemzői is alakváltozás függőek. Periodikus jelgerjesztésnél a D csillapítási tényező a maradandó alakváltozásra fordított munka és a teljes befektetett munka hányadosa, ami szeizmikus esetben értelemszerűen D_{min} értéket vesz fel, azaz a szeizmikus csillapítási tényező mindig kisebb, mint a nagyobb alakváltozással járó talajmechanikai vizsgálatok esetében. Azonban a szeizmikus gyakorlatban inkább a jósági tényező használatos (Q), amely szintén anyagjellemző és a csillapítási tényezővel az alábbi összefüggésben van:

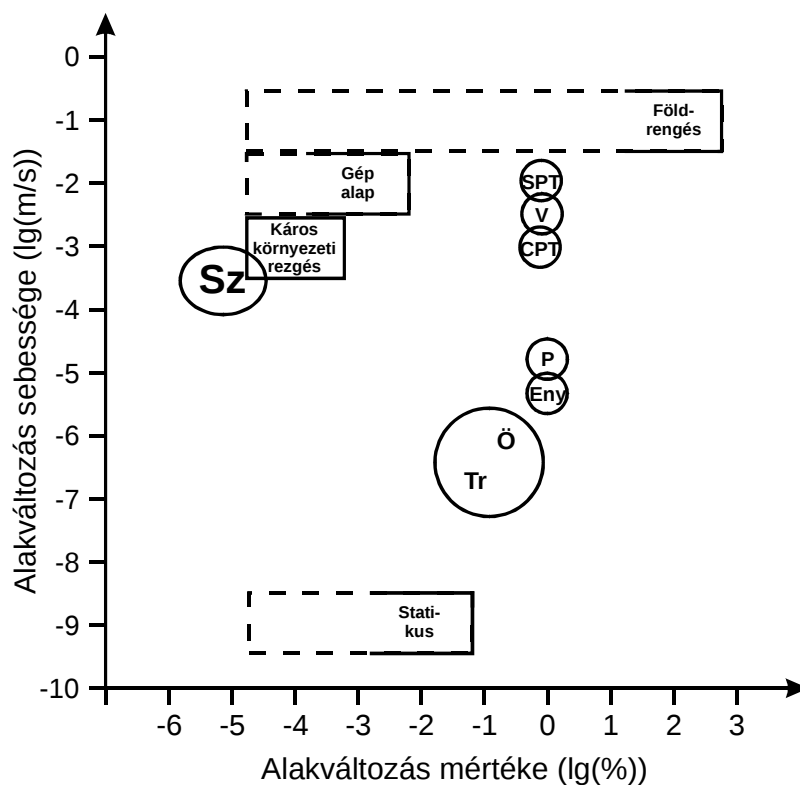
$$\frac{1}{2Q} = D. \quad (10)$$

2.3 A geotechnikai módszerek összehasonlítása

A geotechnikai vizsgálatokat úgy foghatjuk fel, mint a mérnöki alkalmazás céljának megfelelő modellkísérleteket az anyagok viselkedésének tanulmányozására. A szeizmikus módszereknek egyéb talajvizsgálati eljárásokhoz és a geotechnikai feladatokhoz való, az alakváltozás mértéke és az alakváltozás sebessége szerinti viszonyát mutatja be a 2. ábra. Az alakváltozás mértéke

mérőszámának számításánál egy, a módszerre jellemző átlagos elmozdulás értéket viszonyítottunk a teljes alakváltozással érintett talajösszlethez, pl. egy laboratóriumi mintánál a minta rövidülését a terhelt talajminta hosszához, szeizmikus módszereknél a talajrészecske tényleges elmozdulását a terjedési hullámhosszhoz. A %-ban becsült értékek logaritmusa az egyes eljárások nagyságrendi összehasonlítását teszi lehetővé.

Az alakváltozás sebességének számításánál az alakváltozást az egyes eljárásokhoz tartozó átlagos alakváltozási időhöz viszonyítottuk.



Sz: szeizmikus mérések, **SPT:** „dinamikus” szondázás, **V:** Vane test (vagy nyírószondás vizsgálat), **CPT:** „statikus szondázás”, **P:** pressziométer, **Eny:** egyirányú nyomószilárdság, **Ö:** ödométer, **Tr:** triaxiális nyíróvizsgálat

2. ábra. Geotechnikai feltérési módszerek összehasonlítása és viszonyuk az alkalmazás céljához

A statikus tervezéshez használatos szilárdsági paraméterek a különféle laboratóriumi (triaxiális, vagy ödométeres) vizsgálatokból, vagy a roncsolásos in situ talajvizsgálatokból (Vane test, pressziométeres vizsgálat) származnak. Ezek mindegyike nagyobb alakváltozással jár, mint ami a műtárgyak statikus terheléséből adódik üzemelésük során. Mivel az egyes módszerek eredményei a tervezés bemenő adatai, az eljárás helyesen igazolja vissza a talajok határállapotára vonatkozó tervezési szemléletet. Látható, hogy a „statikus” célnak tökéletesen megfelelő vizsgálati eljárás nem létezik. A CPT eljáráshoz hasonló, a hazai gyakorlatban statikus szondázásnak hívott módszerrel nyert adatok alig különböznek az SPT, a hazai gyakorlatban dinamikus szondázásnak nevezett eljárás eredményeitől. Jellemző, hogy ezek a vizsgálatok is feladatfüggőek, az általuk nyert talajparaméterek értékei a talajszondázásoktól eltekintve általában nem helyettesíthetők egymással. Gyakorlati tapasztalatok szerint az alakváltozás sebessége inkább a nagyobb elmozdulási sebességeknél és a dinamikus terheléseknél fontos paraméter, egyebekben az alakváltozás mértékétől függő paraméter érték a meghatározóbb.

A szeizmikus mérésekkel a talaj dinamikus paramétereit határozzuk meg. A szeizmikus sebességek alakváltozási tartományához a legközelebb az épületekre, az emberre káros környezeti rezgések feladata áll (pl. közlekedési forgalom keltette rezgések, bányászati robbantások). Ebbe a kategóriába sorolhatók a kisebb alakváltozással járó földrengések, a gépalapok tervezéséhez

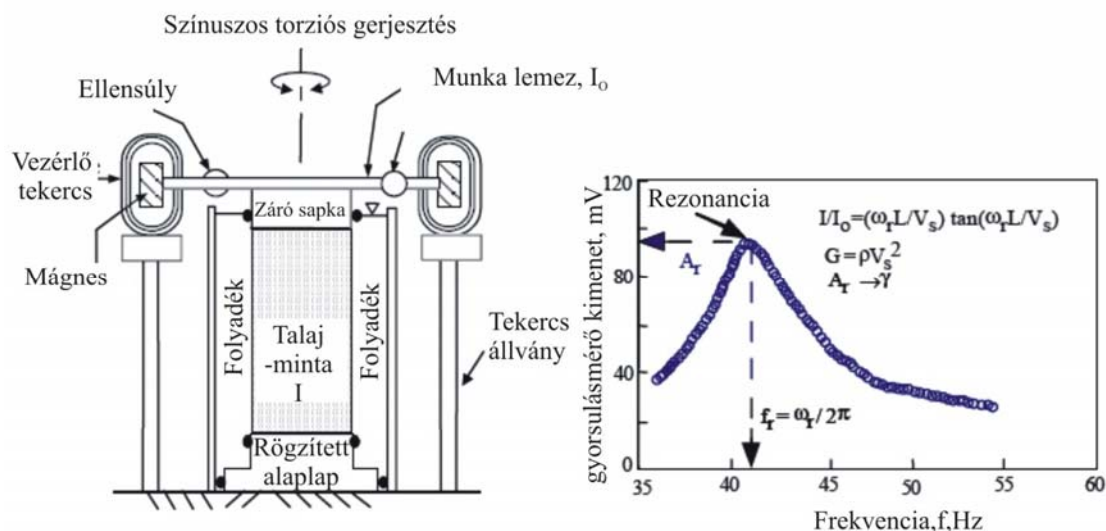
szükséges bemenő adatok szolgáltatása is. A talajok nagy erejű földrengések hatására bekövetkező változásainak elemzéséhez, a statikus tervezéshez a szeizmikus mérésekből számítható paraméterek közvetlenül nem használhatók fel.

3 A SZEIZMIKUS SEBESSÉGEK GYAKORLATI FELHASZNÁLÁSA

3.1 Számított kapcsolatok

Az egyes mérnöki feladatok megoldása szempontjából nincs olyan feltárási módszer, amelyik úgy az alakváltozás sebességét, mint az alakváltozás mértékét illetően bármelyik mérnöki alkalmazáshoz optimálisan illeszkedne, azaz az egyes vizsgálati eljárások nem eléggé pontos modellkísérleti megfelelői az alkalmazás céljainak. Az átszámítás a két különböző deformációs állapot között kapcsolatot teremtő redukciós faktor számításával/laboratóriumi meghatározásával, vagy tapasztalati összefüggések felhasználásával lehetséges. Talajoknál pl. a (9)-es összefüggésre, az itt nem részletezett $R = R(\text{hézagtényező, plasztikus index, víztartalom, szemeloszlás})$ függvény meghatározását jelenti, amelynél a homokos talajoknál a hézagtényezőnek, agyagos talajoknál a plasztikus indexnek van nagyobb szerepe a többi kevésbé lényeges paraméter mellett.

A szeizmikus rezonancia mérésén alapuló laboratóriumi eljárás, az ún. „Resonant Column” (RC) teszttel a legalább a 10^{-6} - 10^{-1} % -os alakváltozási tartományon belüli nyírási modulusok mérhetők meg. A műszer működési elvét a 3. ábra illusztrálja. A mintahengerben ép, zavartalan, L hosszúságú, I súlyú minta van, amelyet az előfeszített (I_0) munkalemez segítségével torziós-periodikus gerjesztéssel hoznak mozgásba. A rezgésszám változtatásával elérik, hogy a talajminta éppen együtt rezegjen a terhelő lappal. A rezonancia frekvenciából (f_r) és a rezonancia frekvencián mért amplitúdóból (A_r) számítható a transzverzális hullámok terjedési sebességének felhasználásával a nyírási modulus és az alakváltozás mértéke. A csillapítási tényezőt a gerjesztés megszüntetése utáni csillapodásból lehet számítani. Nyilvánvaló, hogy csak összeálló, ép mintákkal lehet a mérést végrehajtani, ezért a kísérletek elvégzése gondos, körültekintő munkát igényel.



3. ábra. A rezonancia teszt elvégzéséhez szükséges laboratóriumi műszer működési elve (Drnevich et al. 1978)

3.2 Empirikus kapcsolatok

A szeizmikus paraméterek geotechnikai jellemzővé történő átalakítása csak bizonyos hibahatáron belül lehetséges és bár alapvetően nem helyettesíti, de kiválthatja a nagy mintaszámú geotechnikai vizsgálatok elvégzését. Mindemellett a hosszadalmas laboratóriumi vizsgálatok, vagy kísérletsorozatok elvégzésének költségeit kisebb beruházások képtelenek elviselni, ezért felértékelődnek azok a tapasztalati úton szerzett ismeretek, összefüggések, amelyek alkalmassá teszik a szeizmikus mérések eredményeinek geotechnikai paraméterként való felhasználását (lásd az 1. táblázatot).

1. táblázat. Fontosabb empirikus kapcsolatok a szeizmikus sebességek és a geotechnikai paraméterek között

kőzetek		talajok	
VP	$Q \text{ index, } (Q = 10^{\frac{V_P - 3500}{1000}})$	VS	$SPT (N \text{ érték}),$ (CPT)
	Egyirányú nyomó-szilárdság (RMR)		talajbesorolás EUROCODE 8 alapján
VS	-	VP	$SPT (N \text{ érték})$ (CPT)

A kőzetekre a V_P meghatározása a gyakorlatban a legegyszerűbb, ezért viszonylag régen elterjedtek a kőzetek fejthetőségéhez, az árkolhatósághoz, kapcsolódó, a különböző földmunkagépek gyártóinak a sebességet is tartalmazó minősítései. A Caterpillar cég 1958-ban mutatta be először a csak a V_P meghatározásán alapuló, a kőzetek fejthetőségére kialakított módszerét (Stacey & Noble, 1975, Caterpillar, 1988).

A kőzettest ún. Q indexe alapján történő osztályozása magában foglalja a kőzettest szerkezetét, a kőzettömb nyírószilárdsági, valamint a kőzettestben uralkodó feszültség értékek együttes hatásait, amely egyetlenegy mérőszámban jelenik meg és (Barton, 1974, 2007) munkái révén ez az érték kifejezhető a V_P értékével is.

Kőzeteknél az egyirányú nyomószilárdság a legismertebb és könnyen meghatározható anyagjellemző. Az erre vonatkozó összehasonlító adatok láthatók a 2. táblázatban.

2. táblázat. Kőzetek besorolása a V_P alapján és az egyirányú nyomószilárdság jellemző értékei (Whiteley, 2003)

Egyirányú nyomószilárdság (MPa)	kőzet geotechnikai jellemzője	V_P értéke (m/s)
<10	kis szilárdságú	<2000
10 - 20	közepes szilárdságú	2000 - 2500
20 - 60	nagy szilárdságú	2500 - 3500
>60	nagyon nagy szilárdságú	3500 - 7000

Annak ellenére, hogy a transzverzális hullámterjedési sebesség a kőzetek mechanikai tulajdonságainak változásaira érzékenyebb, a gyakorlatban ritkábban használatos, mivel mérése nehezebb, mint a longitudinális hullámé.

A talajokra vonatkozó empirikus összefüggések. Mivel a műtárgyakat elsősorban a vertikális síkban fellépő erőhatásokra tervezik, ezért a káros környezeti rezgések, nagy amplitúdójú föld-

rengések vízszintes irányú erőhatásaira az épület szerkezeti pontjai nagyon érzékenyen reagálnak. Ez indokolja, hogy a rezgést közvetítő közegekben V_S ismerete fontosabb V_P ismereténél és a rezgés-, vagy földrengéstani vizsgálatokhoz nélkülözhetetlen.

A 3. táblázatban a földrengések helyi hatásainak (site effect) számításához fontos talaj kategóriák vannak feltüntetve. A táblázatban N az SPT (Standard Penetration Test) szondázás értékeit jelenti, a szabványos mintavevő szonda előrehaladásához szükséges ütések számát, adott tömegű, adott magasságból történő sorozatos súlyejtés mellett. Japán kutatók (OHTA és GOTO 1978) szerint egy SPT szondázás tengelyében felvett szeizmikus nyíróhullám profil és a szondázás N értéke szoros kapcsolatban vannak egymással és a közöttük lévő összefüggés az alábbiak szerint írható le.

$$V_S = a N^b \quad (11)$$

ahol a és b területtől függő konstansok, de fontos, hogy b értéke $\sim 0,35$ és kevésbé változik regionálisan. Az (5) felhasználásával:

$$G = \rho a^2 N^{2b} \quad (12)$$

ami mutatja, hogy a nyírási modulus és az SPT szondázás értékei is jól korrelálnak egymással. A dinamikus szondázás és a szeizmikus módszerek „rokonságának” oka lehet az alakváltozás sebességének az egyezősége is (2. ábra.) Területenként és talajtípusonként elegendően nagyszámú minta V_S és N értékeinek elemzésével a fenti összefüggés paraméterei kellő pontossággal meghatározhatók és a későbbiekben egymást jól kiváltó módszerek lehetnek, megadva a gazdaságosabb módszer választásának lehetőségét a kutatás során.

3. táblázat. Talajok besorolása földrengéstani szempontok alapján az EUROCODE 8-ban

A	Olyan kőzet, vagy egyéb képződmény, amelynek V_S értéke legalább 800 m/s és maximum 5 m vastagságú lazább fedője van.
B	Olyan nagy tömörségű homokból, kavicsból vagy erősen konszolidált agyagból álló szilárd üledék, amely néhányszor 10 m vastag, a mélységgel fokozatosan egyre kedvezőbb mechanikai paraméterekkel jellemezhető, a V_S értéke 360-800 m/s között van, $N > 50$.
C	Vastag, tömör, közepesen tömör homokból, kavicsból, vagy közepesen szilárd agyagból álló üledék, amelynek vastagsága néhányszor 10 m-től több száz méterig terjedhet, nyíróhullám sebessége 160-360 m/s közötti az N 15 és 50 között van.
D	Közepes és laza állapotú kohéziómentes anyagból álló (esetleg néhány gyengén kohéziós réteget tartalmazó) üledék, vagy döntően lágy-közepesen szilárd kohéziós talajokból álló, 180 m/s-nál kisebb V_S sebességgel jellemezhető, $N < 15$ üledékek.
E	Olyan rétegsor, amely 5-20 m közötti vastagságú C vagy D típusba tartozóhoz hasonló V_S sebességgel jellemezhető fedőből nagy, 800 m/s-nál nagyobb sebességű feküből áll.
S1	Nagy plaszticitású ($PI > 40$), legalább 10 m vastag réteget tartalmazó, vagy teljesen abból álló nagy víztartalmú üledék, amelynek V_S sebessége kisebb mint 100 m/s.
S2	Folyásra hajlamos talajok, agyagok, és bármely a fentiekbe nem sorolható rétegsor.

A tapasztalatok szerint a kapcsolat kevésbé szoros, de az N értékei a V_P értékeivel is korrelálnak és a (4. táblázat) a gyakorlat számára jól használható összefüggést ad.

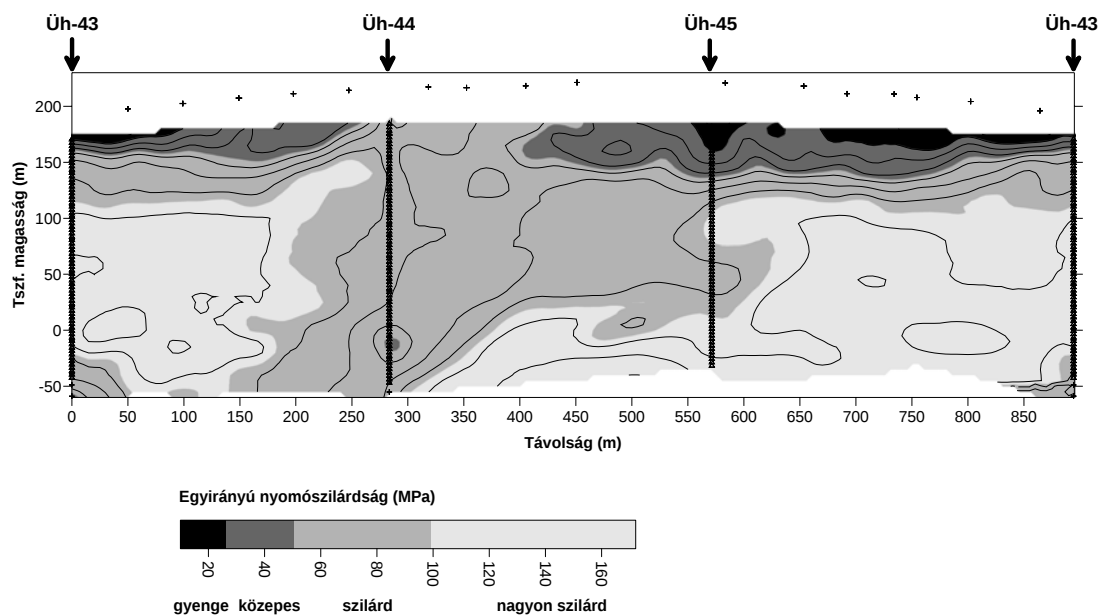
4. táblázat. Telítetlen homokos talajok besorolása a V_p alapján és az SPT szondázás jellemző értékei (Whiteley, 2003)

SPT szondázás értéke (N)	talajmechanikai jellemző	V_p értéke (m/s)	Relatív sebességek
0 - 4	nagyon laza	<350 - 430	nagyon kicsi
4 - 10	laza	430 - 520	kicsi
10 - 30	közepesen tömör	520 - 730	közepes
30 - 50	tömör	730 - 1680	nagy
>50	nagyon tömör	>1680	nagyon nagy

3.3 Egy gránittest jellemzése

Magyarországon a kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladék tároló optimális geológiai hátterű telephelyének kijelöléséhez, a tervezett telephely környezetének megismeréséhez és vízföldtani modelljének kialakításához Bábaapáti (Üveghuta) térségében jelentős mértékű földtani kutatások folytak. E tevékenység részeként került sor a geofizika, ezen belül a szeizmikus módszerek alkalmazására. A szeizmikus módszerek szokványos feladatai a rétegzett közeg tulajdonságainak meghatározásához köthetők, amitől az üveghutai rétegzetlen, tektonizált gránit jelentősen eltér. A felszínen elvégezhető szeizmikus vizsgálatokból adódó hullámterjedési sebességek felbontóképességét javítandó, a fúrólukak közötti tomográf vizsgálatokra is sor került, amellyel, közelebb kerülve a vizsgált összlethez, a módszer felbontóképessége jelentősen javult. A V_p sebességértékek önmagukban is jól jellemezték a gránit anyagi minőségét, elsősorban annak mechanikai állapotát mutatták. Az empirikus összefüggésekkel további geotechnikai paramétereket lehetett kiszámítani.

A 4. ábrán egy háromszög csúcspontjaiba fúrt fúrólukak közti átvilágítás V_p adataiból számított egyirányú nyomószilárdság térképet (E_{NY}) mutat a palástja mentén kiterítve. Mivel a fúrólukakból vett minták alapján a laboratóriumban mért egyirányú nyomószilárdság adatok is rendelkezésre álltak, a területre leginkább jellemző empirikus összefüggéssel számoltunk. A fúrólukbeli adatokra felvettük a 2. táblázat adataira is jellemző $E_{NY} = \log V_p + a$ alakú, a laboratóriumi adatokra legjobban illeszkedő görbét, amelynek segítségével a fúrasközi sebességtér adatait is egyirányú nyomószilárdság adatokká alakítottuk át.



4. ábra. A gránittest minősítése egyirányú nyomószilárdság alapján

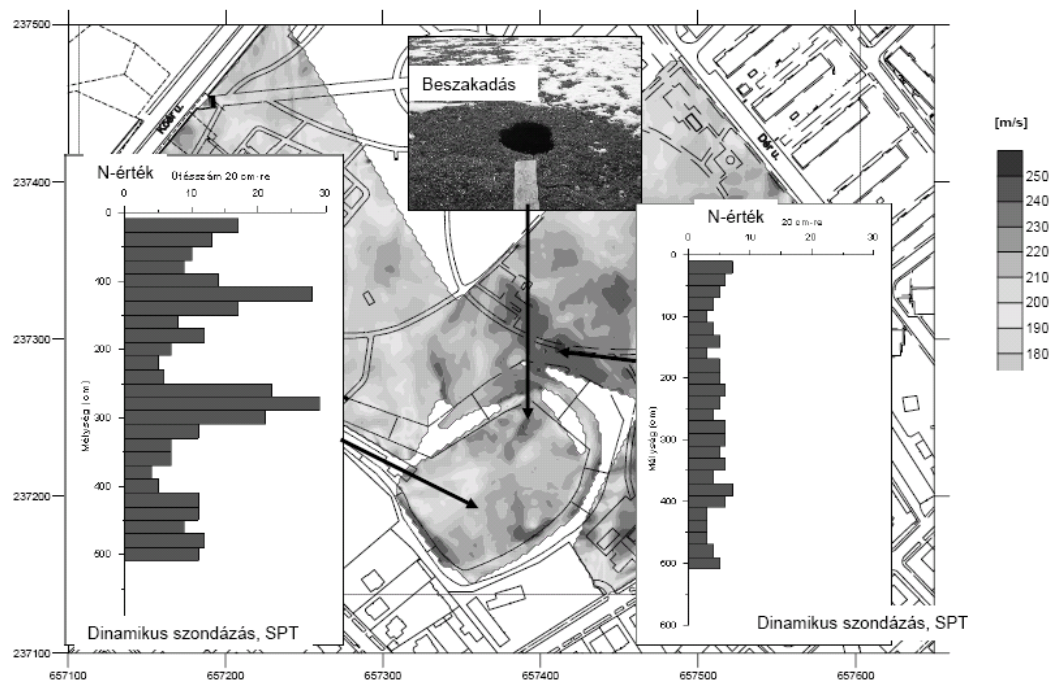
Vágathajtási célzatú felhasználáshoz még egyszerűbben szerkeszthető meg a Q index térkép, amely a fenti térképpel hasonló szerkezetet mutat.

3.4 Talajok jellemzése

A szeizmikus módszerek többféle sebesség meghatározó eljárást jelentenek a mérési geometriától függően. Előnyük, hogy a közvetlen feltárási módszerrel meg nem közelíthető térrészek is térképezhetők vele és a különböző hullámtípusokon alapuló mérések, a különböző sebesség térképek hullámtípusnak megfelelően az anyagok eltérő tulajdonságait képezik le.

A Rayleigh-hullámsebesség térképezése technikailag az egyszerűbbek közé tartozik, eredménye a (3) összefüggés alapján a nyíróhulláméhoz közeli értéket mutat. V_R növekedése az anyag nyírással szembeni ellenállásának növekedését is jelenti. A Rayleigh-hullámok, vagy inkább az ehhez hasonló terjedési elven működő, összefoglaló nevükön felszíni hullámok a felszínhez kötötten terjednek úgy, hogy amplitúdójuk a mélységgel csökken, leképezve ezzel a felszíntől számított néhány m-es összlet mechanikai állapotát. Az ilyen hullámra alapozott felszíni térképezéssel egy felhagyott bányaterületen a térképezéssel elkülöníthetők a laza, kis sebességű, konszolidálatlan visszatöltések, vagy éppen a felszínt majdnem elérő felszakadások helyei.

Az 5. ábrán a Kőbánya Óhegy Park területén végzett felszíni hullámos térképezést mutatjuk be. A sebességek a felszíntől számított kb. 0-5 m-es intervallumon értelmezhető átlag értékeket jelentenek. A kis sebességű helyek egyikén a térképezést követően szakadt be a felszín, az ellenőrző jelleggel telepített SPT szondázásokkal a kis sebességű helyeket 5-10 alatti N értékek, míg az átlagos helyeket ettől nagyobb N értékek jellemezték. A dinamikus szondázás természetesen vertikálisan jobban tagolja az összletet, de pontszerű eredményt ad. Ezért a két módszer egymásnak jó kiegészítője az ilyen jellegű kutatási feladatokban.



5. ábra. Talaj minősítése a felületi hullám terjedési sebessége és a dinamikus szondázások „N” értéke alapján

Mivel a talajokon elvégezhető laboratóriumi vizsgálatok a mintavétel nehézségei miatt korlátozottak, valamint, hogy a szeizmikus sebességek a földrengés veszélyeztettségi eljárásokban a tervezés bemenő paraméterei, ezért talajokon a dinamikus paraméterek meghatározása gyakori geofizikai feladat. A szeizmikus transzverzális hullámsebességnek a felszíntől a 30 m-es mélységig mért átlagos értéke, az ún. $V_{S,30}$, amely a felszíni hullám sebességéből is meghatározható. Megbízhatóbb adatokat kapunk mindkét szeizmikus hullámterjedési sebességre és a hullám csillapítására is (10), ha egymáshoz közel fűrt fűrőlyukakat használunk és az ún. crosshole mérést végezzük el bennük. Az USA-ban az eljárást szabványosították.

IRODALOM

- Achenbach, J. D. 1975. Wave Propagation in Elastic Solids *North Holland* p. 425
- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. 1974 Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 189-236.
- Barton, N. 2007 Linking Seismic Velocity to Rock Quality Q and to Seismic Quality Q in the Near-Surface. 69th EAGE Conference and Technical Exhibition, London, UK
- Caterpillar Tractor Company 1988. Handbook of Ripping 8th edition, *Caterpillar Inc, Peoria, Illinois* pp. 33.
- Drnevich, V.P., Hardin, B.O., Shippy, D.J. 1978. Modulus and damping of soils by the resonant column method *Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, American Society of Testing and Materials* pp. 91-125
- Ohta, Y., Goto, N. 1978. Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes *Earthq. Engg. Struct. Dyns., Vol 6* pp. 167-187
- Stacey, T.R., Noble G.W. 1975. Seismic evaluation of soil trenchability *Proceedings, 6th Regional Conference on African Soil Mechanics and Foundation Engineering 2* pp 185-186
- Whiteley, B. 2003. Case Studies of Borehole Seismic Tomographic Imaging for Tunnels and Pipelines *ISSMGE TC10 Meeting presentation, Prague*