



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Geotechnikai Tanszék**

**Bán Zoltán (M.Sc.), Forgács Tamás (B.Sc.)**  
Építőmérnök hallgatók

**Kritikus hézagtenyező meghatározása  
homoktalajok megfolyósodás vizsgálatához**

**TDK dolgozat**



**Konzulens:  
Dr. Nagy László egyetemi docens**



## TARTALOMJEGYZÉK

<b>Összefoglaló.....</b>	<b>2</b>
<b>1. Bevezetés .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Esettanulmányok .....</b>	<b>4</b>
2.1 Niigata, Japán 1964 .....	4
2.2 Imperiál-völgy, Kalifornia 1987 .....	6
<b>3. Laboratóriumi vizsgálatok .....</b>	<b>8</b>
3.1 Talajfolyósodás mechanizmusának megismerése .....	10
<b>4. Talajfolyósodási veszély értékelése .....</b>	<b>19</b>
4.1 A talaj folyósodási hajlama .....	19
4.2 Folyósodás bekövetkezése.....	22
4.2.1 Ciklikus feszültség alapú megközelítés .....	22
4.2.2 Ciklikus alakváltozás alapú megközelítés .....	29
4.2.3 Energia alapú megközelítés .....	29
4.3 A jelenség távolsága az epicentrumtól .....	31
<b>5. Talajfolyósodás következményei.....</b>	<b>32</b>
5.1 Változások a felszín mozgásában .....	32
5.2 Süllyedések .....	32
5.3 Oldalirányú elmozdulások .....	33
5.4 Homokkilövellések, iszapvulkánok .....	34
5.5 Szilárdságvesztés .....	35
<b>6. Az Eurocode 8 vonatkozó előírásai.....</b>	<b>36</b>
<b>7. Módszerek a megfolyósodással szembeni ellenállás növelésére .....</b>	<b>39</b>
7.1 Tömörítés .....	39
7.2 Jethabarcosítás és kémiai talajstabilizáció .....	40
7.3 Többletteher alkalmazása .....	40
7.4 Drénezés .....	40
<b>8. Kritikus hézag tényező megállapítása kísérlettel .....</b>	<b>42</b>
<b>9. Összefoglalás .....</b>	<b>46</b>
<b>Függelék .....</b>	<b>47</b>
<b>Jelölésrendszer.....</b>	<b>50</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>51</b>



## **Kritikus hézagtenyező meghatározása homokok megfolyósodás vizsgálatához**

### **ÖSSZEFOGLALÓ**

Az Eurocode 8 életbelépésével tervezés során ki kell mutatni a szerkezetek földrengéssel szembeni biztonságát. Dolgozatunkban bemutatjuk, hogy miként viselkednek a vízzel telített, laza, szemcsés talajok a földrengés során keletkező, erős mozgások folyamán. Ezen anyagok rázkódás hatására tömörödnek, bennük a pórusvíznyomás megemelkedik. A hatékony nyomás csökkenése együtt jár a talaj nyírószilárdságának csökkenésével. A hatékony nyomás akár zérussá is válhat, ilyenkor a talaj viszkózus folyadékként viselkedik és korlátlanul deformálódhat. Ez az állapot a talajfolyósodás. A jelenség elsősorban egyszemcsés finom homokokra jellemző. A megfolyósodási hajlam többek között a hézagtenyező értékétől, a pórusokat kitöltő finom szemcsék mennyiségétől és a vízáteresztő-képességtől függ. A dolgozatban ismertetjük a talaj megfolyósodási hajlamának megállapításához szükséges talajmechanikai jellemzőket és ezen jellemzők meghatározásához szükséges módszereket.

Laboratóriumi körülmények között végzett méréseinkkel egy homoktalaj kritikus hézagtenyezőjét vizsgáltuk különböző víztartalmak mellett. Nyírás folyamán szemcsés talajokban térfogatváltozás játszódik le: a kritikus hézagtenyezőnél tömörebb talajok fellazulnak, míg a lazább, nagyobb hézagtenyezőjű anyagok összetömörödnek. E talajfizikai paraméter ismerete azért fontos talajfolyósodási vizsgálat esetén, mert csak azok a talajok hajlamosak a folyósodásra, amelyek hézagtenyezője (azaz hézagterfogata) nagyobb a kritikus értéknél.

Kulcsszavak: kritikus hézagtenyező, talajfolyósodás, földrengés, CPT, SPT szondázás



## 1. BEVEZETÉS

Az építmények földrengéssel szembeni ellenálló képességét jelentősen befolyásolja az őket megtámasztó talaj teherbírása. A talajfolyósodás jelenségének fontosságára az 1964-es Niigata-i (Japán) és alaszka-i földrengések hívták fel elsőként a figyelmet. A földrengések során megsérült számos épület és híd károsodása írható a talajfolyósodás számlájára. Az elmúlt közel 50 évben széleskörűen tanulmányozták a jelenséget, melynek következtében értékes eredmények születtek a jelenség kialakulásának és hatásainak megértésében. Ezek az eredmények mérnöki eljárások sorához vezettek, amelyek a bekövetkezés valószínűségét és a keletkező károkat próbálják megjósolni.

Dolgozatunk célja, hogy bemutassa a megfolyósodás jelenségét, összefoglalja kiváló kutatók témával kapcsolatos eredményeit, ismertesse azokat a gyakorlatban használt módszereket, amelyek a talajok folyósodási hajlamának megállapításához, és a talajfolyósodással szembeni biztonság becsléséhez szükségesek. Ezen kívül a dolgozatban ismertetjük a kritikus hézagtenyező megállapítására végzett laboratóriumi kísérleteinket.

A dolgozatot 9 fejezetre osztottuk. A bevezetés után esettanulmányok segítségével ismertetjük a megfolyósodás jelenségét. A harmadik fejezetben a folyósodás vizsgálatához használt laboratóriumi vizsgálatokat, és az azokon elért eredményeket ismertetjük. A negyedik fejezetben a talajfolyósodási hajlam megállapítására, és a talajfolyósodási veszély értékelésére mutatunk gyakorlatban alkalmazott eljárásokat. Ezután következő fejezetben a talajfolyósodás hatásait mutatjuk be. Ismertetjük a hazánkban érvényes Eurocode-8 vonatkozó részeinek előírásait, az ezután következő fejezetben pedig a talajjavítás módszereit. A kilencedik fejezetben a kritikus hézagtenyező megállapítására vonatkozó kísérletünket és annak eredményeit ismertetjük. Végül, dolgozatunk zárásaként, levonjuk a konklúziókat, ismertetjük későbbi terveinket.

A talajfolyósodás komplex jelenségét számos kutató különböző szempontból vizsgálta. A mérnökök ma már olyan szinten állnak a talajfolyósodás ismeretében, hogy viszonylag megbízható eljárások alapján képesek megbecsülni a folyósodás veszélyét. A kidolgozott eljárások, annak ellenére, hogy empirikusak, kellő segítséget adnak a folyósodásra hajlamos területek értékeléséhez. Természetesen előfordul, hogy a jelenség ott jelenik meg, ahol nem számítunk rá, de jellemzőbb az, hogy a folyósodásra hajlamosnak vélt helyen nem következik be a jelenség. A helyzet visszatükrözi mind a geotechnikai eljárások konzervatizmusát, mind a jelenlegi, empirikus eljárásokban rejlő bizonytalanságokat.

Ma, az eljárások többsége arra koncentrál a folyósodás veszélyének értékelésekor, hogy mekkora a folyósodás bekövetkezésének esélye, azaz a jelenség egy jövőbeli földrengés során bekövetkezik-e, vagy sem, illetve ha bekövetkezik, milyen károkat fog okozni.

A folyósodás veszélyének megállapítására született eljárások eredményességét sokszor viták övezték, melyek legtöbbször a különböző nézőpontból, az eltérő fogalomhasználatból adódtak. Egyes esetekben egy kifejezést (pl. folyósodás) több, különböző jelenségre is



használták. Máskor pedig ugyanazt a jelenséget írták le különböző terminológiával. Sok vitát elkerülhetünk azzal, hogy a különböző terminológiákból fakadó félreértéseket elkerüljük. Ezért a témakörhöz kapcsolódó, alapvetően szükséges fogalmakat a dolgozat végén található függelékben definiáltuk.

## **2. ESETTANULMÁNYOK**

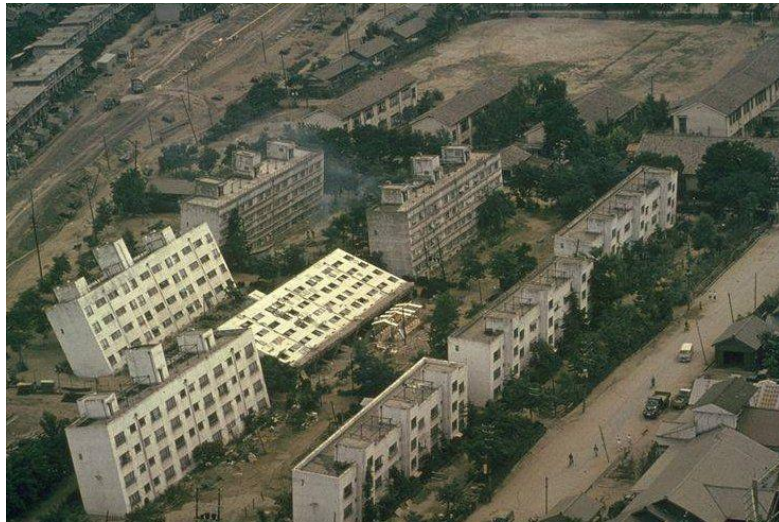
Talajfolyósodást sok földrengés során megfigyeltek világszerte, de Magyarországon is jegyezték fel ilyen jelenséget (Komárom 1763, Mór 1810, Érmellék 1834, Kecskemét 1911, Dunaharaszti 1956) [24]. A következőkben a dokumentált jelenségek közül mutatunk be szemléletes példákat:

A legtanulságosabb példa talán az 1964-ben bekövetkezett Niigata-i földrengés (Japán). E földrengés folyamán számos talajfolyósodással összefüggő jelenséget figyeltek meg Niigata alacsonyán fekvő részein, különösen a Shinano folyó partja mellett. Az itteni és az ugyanebben az évben, Alaszkába megfigyelt talajfolyósodás vezették rá a mérnököket a talajfolyósodás jelentőségére. Ezen esetek alapos vizsgálata elősegítette azon feltételek leírását, melyek mellett a folyósodás bekövetkezhet.

Annak ellenére, hogy sok földrengés esetében tudták vizsgálni a folyósodás jelenségét, a mérnököknek kevés esetben volt lehetőségük a teljes körű analízishez szükséges információk begyűjtéséhez. A következőkben bemutatunk a legfontosabb talajfolyósodással járó esetek közül párat. Ezek az események adták az alapot azokhoz a korabeli empirikus eljárásokhoz, mely alapján a folyósodási veszélyét a mérnökök becsülték.

### **2.1. Niigata, Japán 1964**

Niigata a Shinano és Agano folyó tölcserkolatában fekszik. A város mélyebben fekvő részein lazán ülepedett homoktalaj található, viszonylag magas talajvízszinttel. A felszín szinte teljesen sík. A folyópartot támfal övezi. A 7,5-ös magnitúdójú földrengés során a város alacsonyán fekvő részein kiterjedt talajfolyósodási jelenségeket figyeltek meg. A talaj megfolyósodásával épületek, hidak, támfalszerkezetek és csővezetékek sérültek meg, mentek tönkre. Későbbi légi felvételek óvatos becslése alapján, egyes helyeken 8 méteres oldalirányú elmozdulás is bekövetkezhetett. A talajfolyósodás rovására írt károk jelentősek voltak, melyek közül a legismertebb a Kawagishi-Cho lakóépületek károsodása (1. ábra). Ezek az épületek gerendarács-alapokon álltak. Mikor a folyósodás bekövetkezett, a talaj szilárdsága lecsökkent, és így a talaj nem volt képes elviselni az épület terheit. Fontos megjegyezni, hogy az épület szerkezetében csekély károk keletkeztek, a tömb merev testként dőlt el. A legjobban sérült épületek esetében is a szerkezeti károk olyan kicsinyek voltak (az ablakok, ajtók nyithatóak maradtak), hogy a lakókat visszaengedték ingóságai mentésére. Később pár épületet vissza is emeltek függőleges állapotába, természetesen az alapozás megerősítésével. Ez a példa jól mutatja, hogy egy épület földrengéssel szembeni ellenálló képessége nemcsak a szerkezeti tényezőktől, hanem a geotechnikai tényezőktől is nagymértékben is függ.



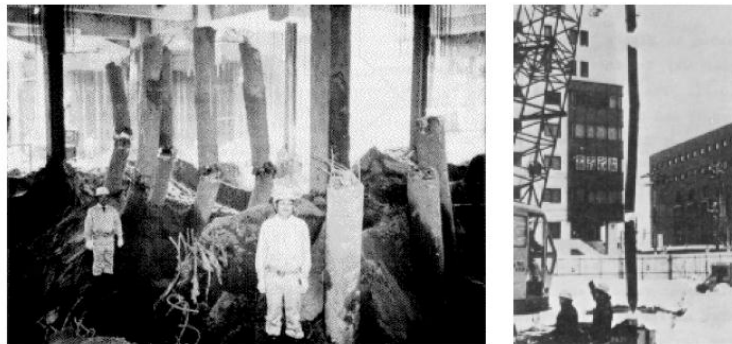
**1. ábra:** Az eldőlő Kawagashi-Cho lakóépületek, Niigata 1964 [1]

A Shinano folyó partján sok építmény cölöpalapozással készült, mint például a Showa Bridge is. A cölöpök 25 m mélyen (a folyómeder laza homokján átverve) tömör talajon álltak. A cölöpök egy közös fejtömbbel voltak összekötve, mely megtámasztotta a 9 m magas hídpilléreket. A talajfolyósodás a meder homokjának felső 10 méterében következett be, a talaj megcsúszott a meder közepe felé. A mozgó talaj akkora nyomást helyezett a cölöpökre, hogy azok is befordultak a folyó közepe felé. E mozgások elegendően nagyok voltak ahhoz, hogy a híd összedőljön.



**2. ábra:** Az összedőlő Showa Bridge, Niigata 1964 [1]

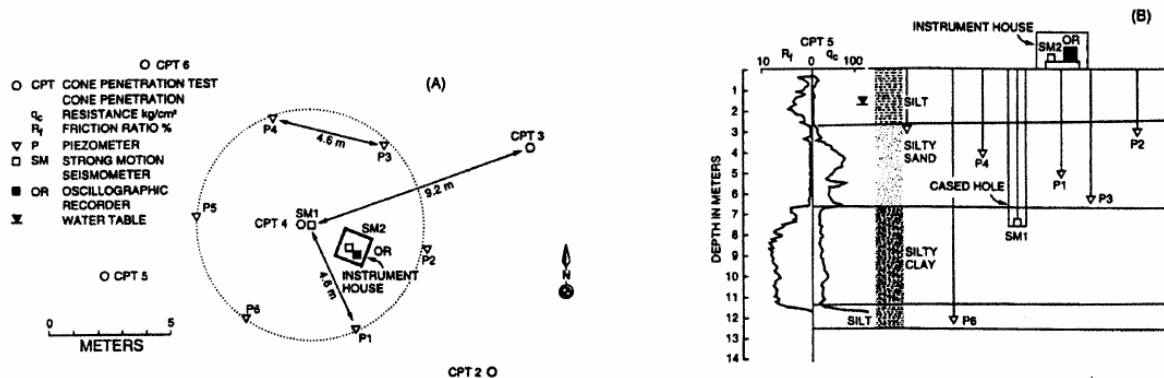
Niigata-i földrengés során a talaj megfolyósodott egy négyemeletes vasbeton épület alatt is. Az épület 11 m mélységig levert cölöpökön állt, melyek fejtömbbel voltak összekötve 2 méter mélyen. Az épület laza iszapos homokon állt, amely 10 méter mélységig tartott, majd ez alatt tömörebb rétegek helyezkedtek el. A talajvízszint kb. a felszíntől 5 méterre feküdt. A földrengés során, az épület környékén a talaj oldalirányban 1-2 m-t elmozdult. Az épület jelentősebb károk nélkül túlélte a földrengést, így azt továbbra is használták. 20 évvel a földrengés után, az építmény magasításához az alapokat szerették volna megerősíteni. Ekkor derült fény arra, hogy az 1964-es földrengés során a cölöpök nagymértékben sérültek.



3. ábra: Az oldalirányú elmozdulások következtében tönkrement cölöpök az NHK épület esetében. Niigata, Japán [2]

## 2.2. Imperiál-völgy, Kalifornia 1987

Az Amerikai Geológiai Kutatóintézet a telített homoktalajok folyósodás vizsgálatának céljából kiválasztott egy dél-kaliforniai területet, amelynek talaja folyósodásra kellően hajlamosnak tűnt. A helyszínen mérőberendezéseket állítottak fel, hogy egy későbbi földrengés során mérési adatokat nyerhessenek. A talajrétegződés a következőképpen alakult: a felszíntől mérve 2,7m mélységig iszapréteg, majd 3,3m vastagságú rétegben folyásra hajlamos homok, ami alatt homokos iszap 5m rétegvastagságban. A helyszínen két gyorsulásmérőt telepítettek, egyet a felszínen, míg egyet 7,5m mélységben. Különböző mélységekben 6 piezométert is elhelyeztek, mellyel a pórusvíznyomást tudták mérni.

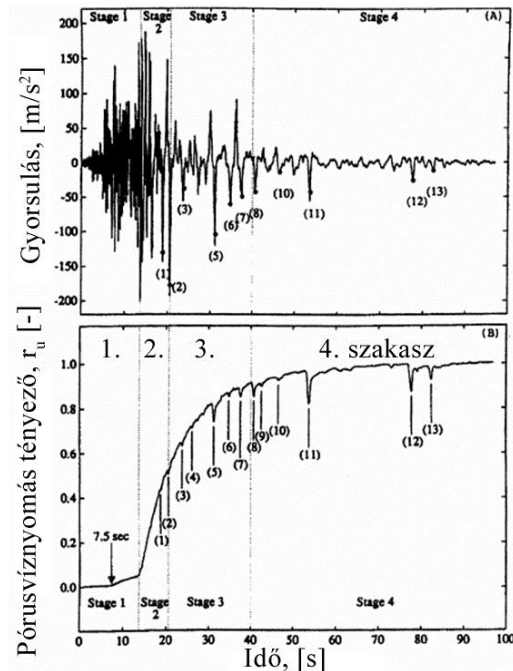


4. ábra: A mérőberendezések elhelyezése, ill. a talajrétegződés, Imperiál-völgy [3]

A berendezett helyszínt 1987. november 23-24.-én két földrengés is érte. Az első (Elmore Ranch) magnitúdója 6,2-es volt, a felszínen 0,13g, míg 7,5m mélységben 0,07g maximális vízszintes gyorsulást okozva. Ekkor a pórusvíznyomás nem emelkedett meg. 12 órával később újabb, 6,6-os magnitúdójú földrengés következett (Superstition Hills). A maximális felszíni vízszintes gyorsulás 0,21g, míg 7,5m mélységben 0,17g volt. Ekkor a pórusvíznyomás nagymértékű emelkedését mérték. Későbbi vizsgálatok során, talajfolyósodásra utaló homok kilövelléseket is találtak. A műszerek és a megfigyelések egyértelműen mutatták, hogy talaj megfolyósodott a második esemény során, míg ez nem következett be az első rengés esetében.



A Imperiál-völgyi-i adatokat későbbiekben számos kutató dolgozta fel. Zeghal és Elgamal [4] négy részre osztotta a gyorsulásmérő által mért adatokat.



**5. ábra:** Akcelerogram és a pórusvíznyomás emelkedésének kapcsolata. [4]

Az első szakaszban a gyorsulások relatív alacsonyok voltak, a pórusvíznyomás nagyon lassan emelkedett. A második szakaszban, amikor a legnagyobb gyorsulású hullámok érkeztek meg, a pórusvíznyomás is hirtelen emelkedni kezdett. Kismértékű, pillanatnyi visszaesések a pórusvíznyomásban ott tapasztalhatóak, ahol a gyorsulás negatív szélsőértéket vesz fel. A harmadik szakaszban kisebb amplitúdóval, kisebb frekvenciával zajlott a rengés, itt a pórusvíznyomás tovább emelkedett, noha a növekedés üteme lelassult. A végső szakaszban, a rengés elcsitulásával, a pórusvíznyomás keltette semleges feszültség szinte teljesen a hatékony feszültségek helyébe lépett. Érdekes megfigyelni, hogy a rengés legerősebb szakaszában a pórusvíznyomás aránya még csak 50%, és ez tovább emelkedik a későbbi, kisebb rengések hatására is. Ezt sok mérnök anomáliának, ellentmondásosnak tartja; a pórusvíznyomás-mérő berendezés megbízhatóságát vitatják, különösen amiatt, hogy a berendezés jelátalakítója telített volt-e, avagy sem. Későbbi vizsgálatok azonban cáfolták ezt a feltételezést.





### 3. LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATOK

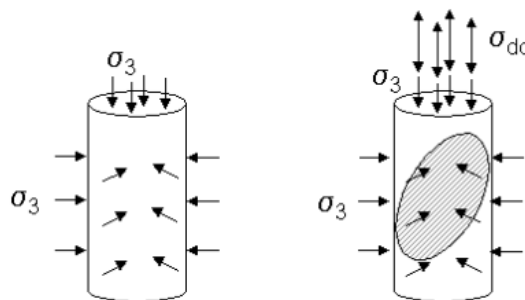
A talajfolyósodás laboratóriumi vizsgálatához leggyakrabban (dinamikus) triaxiális vizsgálatot, illetve (dinamikus) közvetlen nyírókísérletet alkalmaznak, de például Ishihara dinamikus torziós nyírókísérlettel végzett méréseket [5]. A vizsgálatok során a valóságban is előálló, feszültség - alakváltozás állapotokat kívánják modellezni, amelyek alapján a talajok alapvető viselkedése tanulmányozható.

A talajfolyósodással kapcsolatos vizsgálatok kezdetén a kutatók egyedül a laboratóriumi tesztekre hagyatkozhattak a talajfolyósodási hajlam értékelésénél. A laboratóriumi vizsgálatok jelentősége az utóbbi évtizedekben lecsökkent, mivel folyósodásra hajlamos talajból zavartalan mintához jutni nagyon nehéz, illetve azokat a komplex kémiai és mechanikai viszonyokat, amik terepen fennállnak, laboratóriumi körülmények között szinte lehetetlen előállítani. Emellett sokat fejlődtek azok a (kevésbé költséges) módszerek, melyeknél az in situ vizsgálatok eredményeiből következtethetünk a folyósodási hajlamra.

A talajfolyósodás vizsgálatára leggyakrabban alkalmazott eszközöket az alábbiakban tömören ismertetjük.

#### *Dinamikus triaxiális vizsgálat (cyclic triaxle test)*

A dinamikus triaxiális vizsgálatához a hagyományos triaxiális berendezést úgy módosítják, hogy ciklikusan alkalmazható legyen deviátor feszültség ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ). Ezt a dinamikus deviátor feszültséget harmonikusan alkalmazzák, periódus ideje általában 1-60s. A talajmintát először izotrop kompressziós feszültségállapot alá helyezik, majd ráhelyezik a ciklikusan ismétlődő, harmonikusan változó tengelyirányú terhelést. A vizsgálat során a deviátor feszültséget, tengelyirányú alakváltozást ( $\varepsilon$ ) és pórusvíznyomást ( $u$ ) lehet mérni. Az eredményeket leggyakrabban feszültség – alakváltozás grafikonon, esetleg feszültségtérben ábrázoljuk.

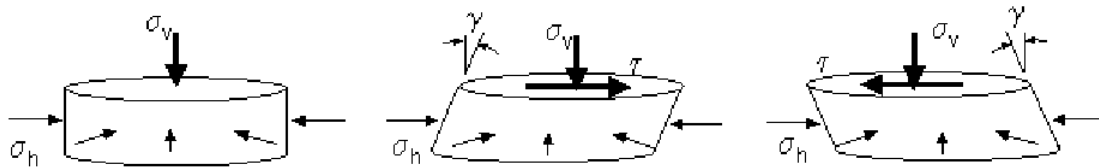


**6. ábra:** Feszültségállapotok a ciklikus triaxiális vizsgálat során.

A sraffozott síkon alakul ki a törés.

A dinamikus triaxiális vizsgálat során a mintát viszonylag egyenletes feszültség, alakváltozási állapotban vizsgáljuk (legalábbis kis alakváltozások tartományában). Ez a vizsgálat az egyik legelterjedtebb a talaj folyósodás vizsgálatára használt laboratóriumi eljárások közül. Azonban a vizsgálat során a valóságot nem tudjuk tökéletesen modellezni, emiatt számos hátránnyal rendelkezik:





**8. ábra:** Feszültség és alakváltozási állapotok dinamikus közvetlen nyírókísérlet során

A dinamikus közvetlen nyírókísérletnek több előnye is van a dinamikus triaxiális vizsgálattal szemben, mivel itt a nyírófeszültség a vízszintes síkon jelenik meg, illetve a főfeszültségek is folyamatosan változhatnak, így a valóságot jobban modellezzük. A talajfolyósodás vizsgálatának azonban ez esetben is vannak hátulütői:

- A mintában ismeretlen a feszültség állapot. A nyíródoboz oldalán a talajminta elmozdulása zérus, itt a feszültségeloszlás nem ismert. A feszültségállapot nem tiszta nyírás, erős torzulások lépnek fel.
- Kis alakváltozás tartományában a talaj viselkedése nem mérhető pontosan. Az eszközben ébredő súrlódás miatt a kis nyírófeszültségek nem adhatók át a talajmintára.
- A terhelés iránya kötött. A hagyományos közvetlen nyírókísérlet során a terhelést csak az előre meghatározott irányban tudjuk alkalmazni a talajmintára. Ezzel szemben a triaxiális vizsgálat során a nyírás végtelen sok irányban jelentkezhet. A valóságban földrengés során háromdimenziós talajmozgások következtében a tér minden irányában keletkeznek nyírófeszültségek.
- A feszültségkoncentrációk és a minta sarkainál létrejövő átboltozódások korlátozzák az egyenletes alakváltozások kialakulását. Egyes esetekben a minta reziduális szilárdsága nem érhető el.

#### *Torziós nyírókísérlet*

A hazai gyakorlatban nagyon ritkán alkalmazzák ezt a vizsgálatot. A hengeres mintát először anizotróp kompressziós feszültségállapotba helyezik, majd a törést a kísérleti eszközzel meghatározott síkon torziós nyomaték alkalmazásával állandó függőleges feszültség mentén hajtják végre. A nyírási felület így a közvetlen nyírókísérlettel szemben konstans marad, de nem lesz állandó a gyűrűirányú elmozdulás.

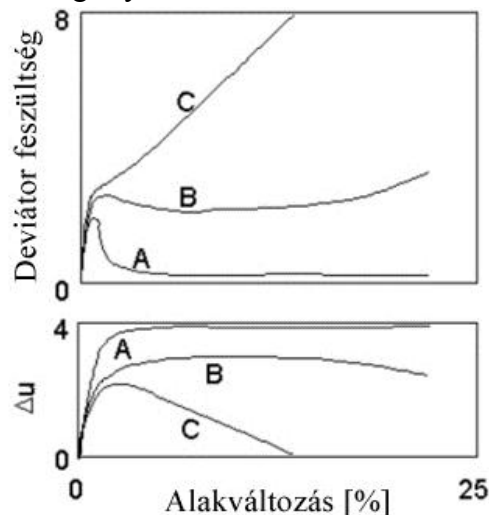
### **3.1. Talajfolyósodás mechanizmusának megismerése**

Annak ellenére, hogy ma már ritkábban használják talajok folyósodással szembeni ellenállásának vizsgálatához a laboratóriumi tesztek, fontos szerepet játszottak a jelenlegi eljárások fejlődésében. A folyósodás mechanizmusának megértése csaknem kizárólag a nagyszámú, laboratóriumi vizsgálatok eredményéből származik.

A legkorábbi vizsgálatok 1960-as évek végéről származnak, melyek célja a talajok folyósodással szembeni ellenállásának meghatározása volt.



Castro [7] 1969-ben különböző tömörségi indexű<sup>2</sup> homokmintákon végzett hagyományos triaxiális vizsgálatot. Castro a homokok viselkedésének három típusát figyelte meg. Nagyon laza minta (9. ábra „A” görbe) esetén kimutatta, hogy kis alakváltozások tartományában jól elkülöníthető egy nyírófeszültségi csúcs, amit jelentős nyírási alakváltozások követnek, miközben a pórusvíznyomás növekszik. Ezek az alakváltozások állandó, alacsony nyírási ellenállás mellett alakultak ki. Castro ezt a folyamatot nevezte megfolyósodásnak. A tömör minta vizsgálata során („C” görbe) kezdetben pórusvíznyomás emelkedés volt mérhető, amit folyamatos fellazulás követett. A talaj nyírási ellenállása folyamatosan nőtt, maximum érték nélkül (kis alakváltozások tartományában). Castro ezt a jelenséget nevezte dilatációnak. A közepes sűrűségű minták („B” görbe) kis alakváltozásoknál kezdetben növekvő pórusvíznyomást, és a nyírási ellenállásban lokális csúcsot mutattak. További alakváltozások során a nyírási ellenállás kismértékben visszaesett, majd enyhe növekedésnek indult, a talaj fellazult. Castro ezt korlátozott megfolyósodásnak nevezte.



9. ábra: Castro triaxiális teszttel végzett vizsgálatának eredményei [7]

Az 1960-as években a talajfolyósodással szembeni ellenállást úgy jellemezték, hogy adott nyírófeszültség mellett hány terhelési ciklust visel el a talaj megfolyósodás bekövetkezése nélkül. A figyelem középpontjában a pórusvíznyomás emelkedése állt, viszonylag kis figyelmet fordítottak megfolyósodás során előálló feszültség-alakváltozás állapotokra, illetve a feszültségpályákra. Illetve a talaj megfolyósodás utáni viselkedést egyáltalán nem is vizsgálták. A tudomány fejlődésével azonban ezek a területek is nagyobb figyelmet kaptak.

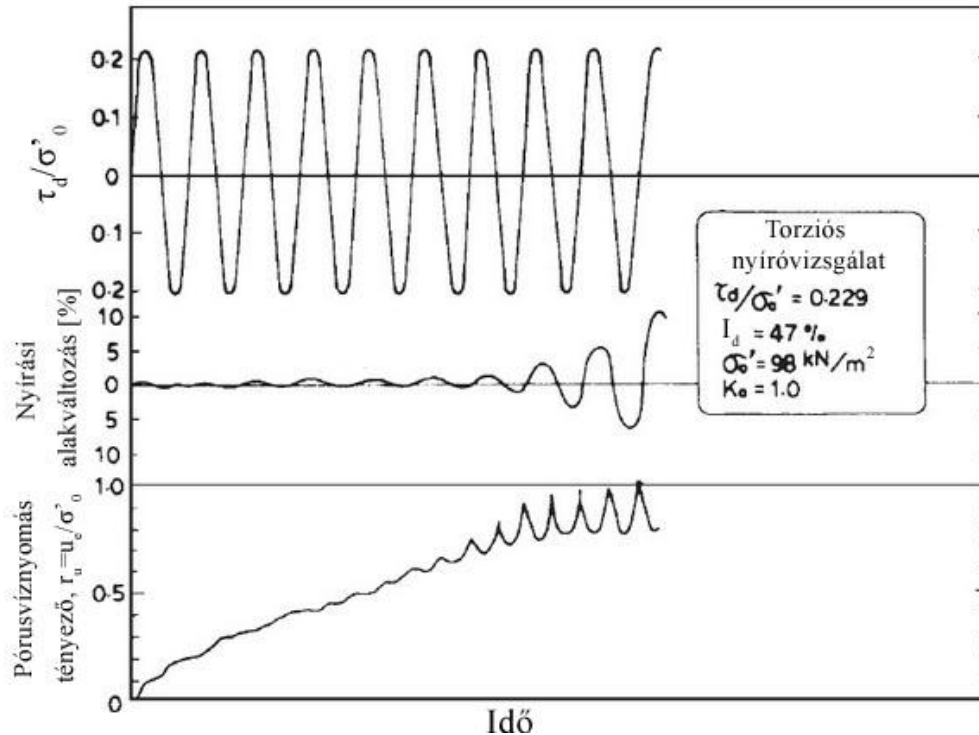
#### *Ishihara ciklikus torziós nyírókísérlete*

Ishihara [5] a Fuji folyó telített homokjából vett mintákat vizsgálta torziós nyírókísérlettel. Ishihara ezen kiváló munkája nagymértékben elősegítette a jelenség hátterének megértését. Mérési eredményeit az alábbiakban bemutatjuk, és levonjuk belőle a következtetéseket. A vizsgálat során két különböző tömörségi indexű mintát használtak: egy lazább mintát,

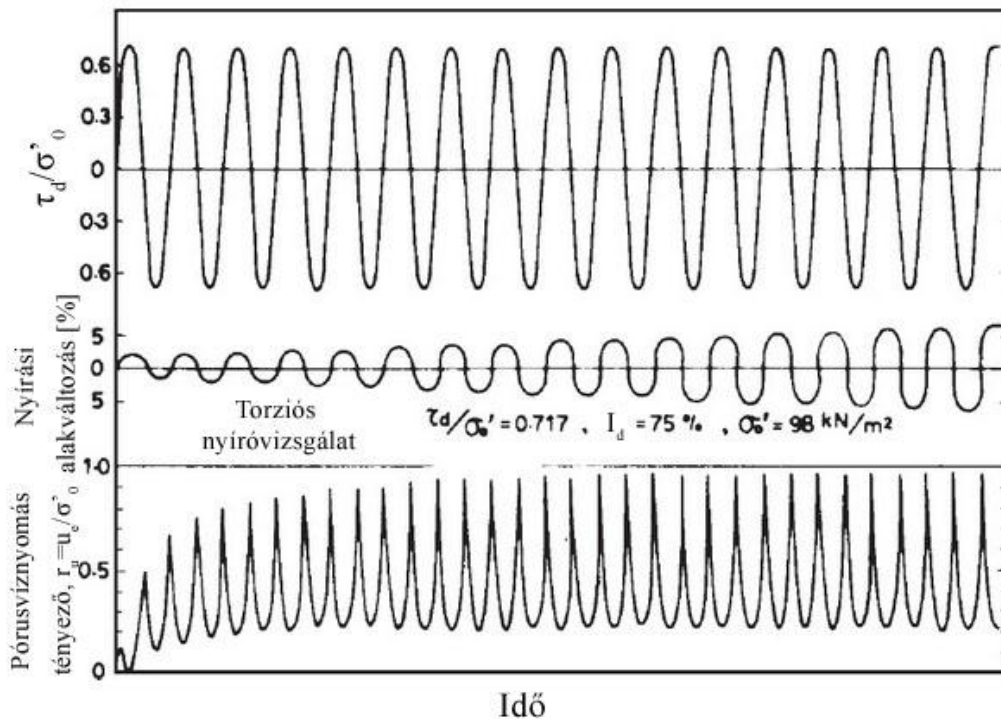
<sup>2</sup> A tömörségi index ( $I_d$ ) az Eurocode bevezetésével váltotta fel a korábban használt relatív tömörséget. Számítása megegyezik a relatív tömörség számításával.



melynek tömörségi indexe  $I_d = 47\%$  és egy tömörebb állapotú mintát, melynek tömörségi indexe  $I_d = 75\%$ . A mintákra azonos hidrosztatikus feszültséget alkalmaztak, és ciklikus nyírőfeszültségekkel terhelték azokat. A telített mintákat drénezetlen körülmények között vizsgálták.



10. ábra: A lazább ( $I_d = 47\%$ ) minta eredményei az idő függvényében [5]



11. ábra: A tömörebb ( $I_d = 75\%$ ) minta eredményei az idő függvényében [5]



A 10-11. ábra legfelső grafikonján az alkalmazott ciklikus nyírófeszültség látható (normalizálva a kezdeti hatékony függőleges feszültséggel). A földrengés tranziens jelenségét egy konstans amplitúdójú, szinusz függvény szerint változó ciklikus nyírófeszültséggel modellezték. Érdekes megfigyelni, hogy a laza állapotú homokra Ishihara körülbelül harmadakkora amplitúdójú nyírófeszültséget alkalmazott, mint a tömör állapotú homokra.

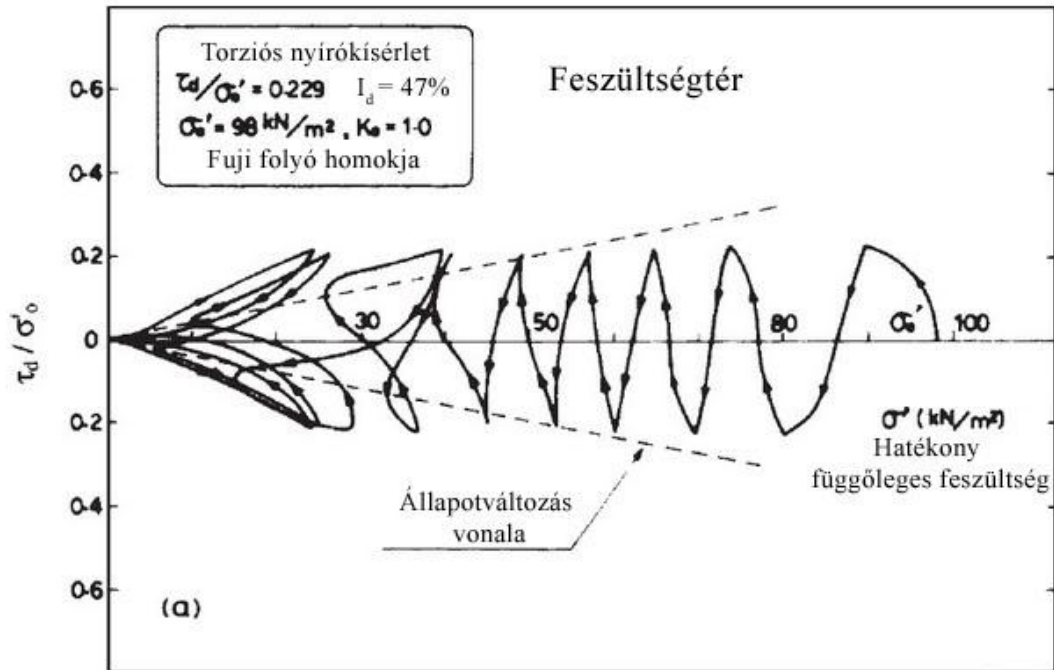
Az ábrák második grafikonjai a nyírási alakváltozásokat ábrázolják az idő függvényében. A lazább állapotú homok bizonyos ideig csak kismértékű alakváltozások keletkeznek, majd hirtelen és nagymértékben megnőnek ezek az alakváltozások. A tömör homoknál ilyen hirtelen változás nem következik be, a nyírási alakváltozás amplitúdója folyamatosan nő a kezdeti állapottól. Ezt a viselkedést a harmadik, pórusvíznyomás emelkedést ábrázoló grafikonnal lehet magyarázni.

A harmadik grafikon tehát a pórusvíznyomás emelkedését ábrázolja, amely normalizálva van a kezdeti hatékony feszültséggel. Ezt a normalizált értéket nevezzük pórusvíz tényezőnek ( $r_u$ ). A vizsgálatot drénezetlen körülmények között végezték, azaz a pórusvíznyomás nem tudott távozni a rendszerből. A ciklikus nyírófeszültségek hatására a pórusvíznyomás képes felépülni. Amennyiben értéke eléri a kezdeti hatékony függőleges feszültséget ( $r_u=1$ ), a hatékony feszültség értéke zérusra csökken. A lazább homok esetén, a hatékony feszültség zérusra csökkenésével, a nyírási alakváltozások hirtelen megnőnek. A talajfolyósodás ekkor kezdődik. Tömör homok esetén szintén zérusra csökkenhet a hatékony feszültség, de ebben az esetben nem nő jelentősen a nyírási alakváltozás. Ennek oka, hogy a ciklikus nyírófeszültség „visszafordulásával” a tömör homok fellazul, a pórusvíznyomás hirtelen leépül, így a hatékony feszültség csak igen rövid ideig volt zérus. Ezt a tömörebb állapotú homokokra jellemző jelenségét Castro és Casagrande ciklikus megfolyósodásnak nevezte.

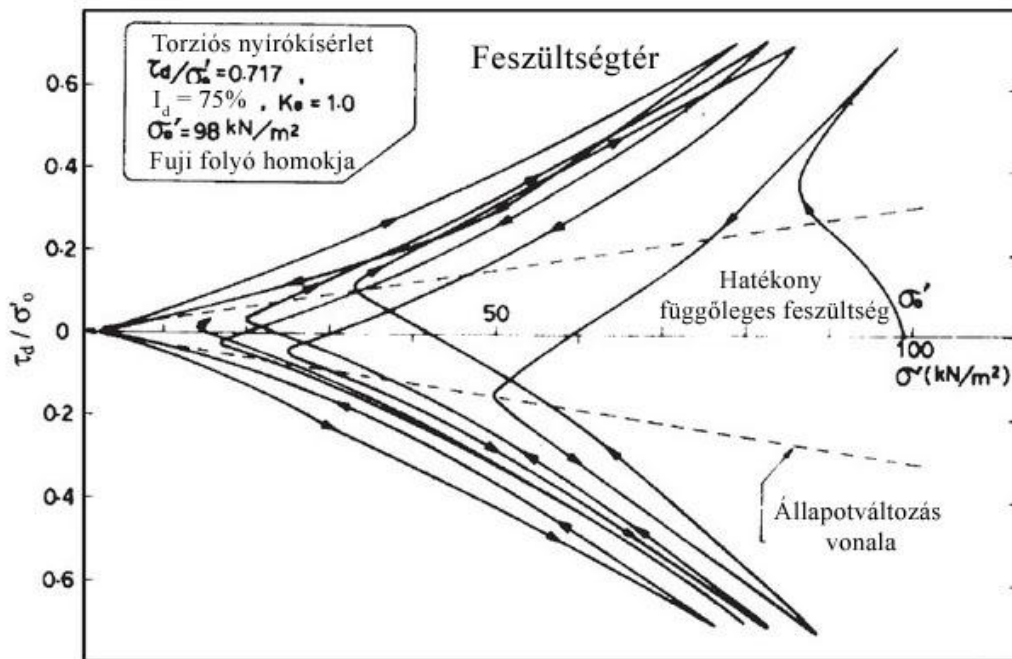
Érdekes megfigyelni, hogy a rendszert olyan nyírófeszültséggel gerjesztették, amely a kezdeti hatékony függőleges feszültség 0,229, és 0,717-ed része, a mintákban felépülő pórusvíznyomás értéke pedig eléri a teljes hatékony feszültségek értékét.

A 12-13. ábra a homokminták feszültségállapotát ábrázolja feszültségtérben<sup>3</sup>. Mindkét esetben kiindulási állapotot jelző pont ordinátája zérus, mivel még nem alkalmazzák a nyírófeszültséget. A pont abszcisszája pedig a kezdeti hatékony feszültséggel egyezik, mely mindkét esetben  $98 \text{ kN/m}^2$ . Laza homok esetén a ciklikus nyírófeszültség minden egyes periódusával csökken a hatékony feszültség (és ezzel együtt a nyírószilárdság), azaz az ábrán a feszültségpálya fokozatosan balra mozdul el. Amennyiben az állapotváltozás vonalán belül halad a görbe az a tömörödést jelzi. Miután a laza homok összetömörödött, egy állandósult állapot alakul ki. Ekkor a minta térfogata nem változik, és a feszültségpálya az állapotváltozás vonala mentén mozog. Tömör homok esetén a feszültségpálya az állapotváltozás vonalán kívül helyezkedik el. Itt is látható az az állapot, mikor a hatékony feszültség zérus, de ezután az ellentétes irányú nyírás hatására a talaj fellazul, a pórusvíznyomás lecsökken, a talaj hatékony feszültsége növekszik.

<sup>3</sup> A feszültségtér alapvető tulajdonságait a Függelék tartalmazza.



12. ábra: Laza homok viselkedése feszültségtérben ábrázolva [5]



13. ábra: Tömör állapotú homok viselkedése feszültségtérben ábrázolva [5]

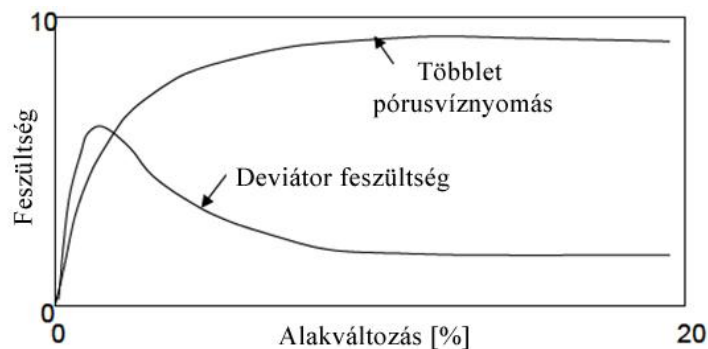
Fontos megjegyezni, hogy a földrengés nem konstans amplitúdójú, periodikus nyírófeszültséget kelt. Ennek ellenére ez a kísérlet sokat segített a megfolyósodás jelenségének megértésében.



### *Korlátlan megfolyósodás*

Korlátlan megfolyósodás akkor következik be, ha a talaj reziduális nyírószilárdságát meghaladják nyírófeszültségek. A valóságban ezek a nyírófeszültségek lennének szükségesek a talaj egyensúlyának fenntartásához. A korlátlan megfolyósodás megfigyelhető terepen, és előállítható laboratóriumban statikus, illetve dinamikus terheléssel is.

A 14. ábra egy izotróp talajminta esetében a monoton terhelés hatására előállítható feszültség – alakváltozás diagramot mutatja. A deviátor feszültség növekedésével, a pórusvíznyomás is emelkedik. Viszonylag kis alakváltozásnál a deviátor feszültség eléri maximumát. Ezen a ponton a pórusvíznyomás aránya a hatékony feszültséghez még alacsony, a pórusvíznyomás tényező 0,5 körüli. Miután a deviátor feszültség elérte maximumát, az alakváltozások és a pórusvíznyomás gyorsan növekedni kezdenek. Azt lehet mondani, hogy a korlátlan megfolyósodás onnantól kezdődik, amikor a deviátor feszültség eléri maximális értékét. Ezen a ponton a szemcseváz összerogy, a talaj ellenállása a maradó, reziduális nyírószilárdsággal jellemezhető. Mivel a deviátor feszültség nagyobb, mint a reziduális nyírószilárdság, a vizsgált minta nem tudja fenntartani statikai egyensúlyát, ezért megfolyósodik.



**14. ábra:** Hagyományos triaxiális vizsgálattal kapott feszültség-alakváltozás ábra

Korlátlan megfolyósodás tipikusan nagyon laza talajokban következhet be, ahol a talajra ható geostatikus nyomás kellően nagy. Ilyen körülmények a valóságban ritkák, így nem is gyakran következik be ez a jelenség.

### *Ciklikus megfolyósodás*

Amennyiben a talaj reziduális nyírószilárdsága nagyobb a talajra ható nyírófeszültségnél, korlátlan megfolyósodás nem következhet be drénezetlen körülmények között. Azonban ciklikusan ismételt nyírófeszültség hatására a pórusvíznyomás megemelkedhet.

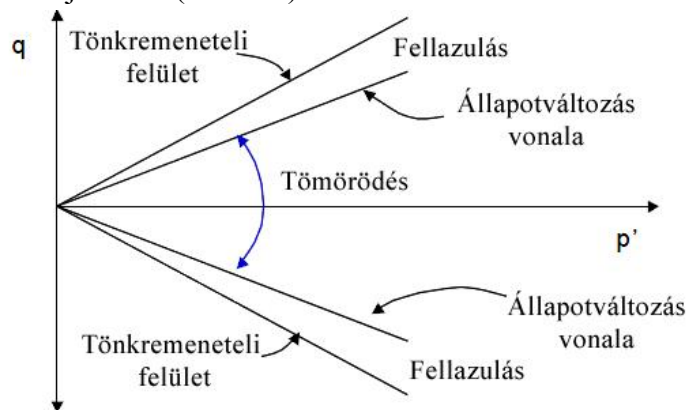
Seed 1979-ben széleskörűen tanulmányozta a ciklikus megfolyósodás jelentőségét [8]. Munkája szerint azok a tiszta homokok, melyeknek tömörségi indexe 45%-nál nagyobb, a ciklikus megfolyósodás jelenségét mutatják. Ezen tömörségi index felett a talaj szemcseváza fellazul a nyírási alakváltozás során, ami a pórusvíznyomás gyors csökkenésével jár. Ekkor a talaj merevségét részben visszanyeri, és ez a további deformációk kialakulásának gátat szab.





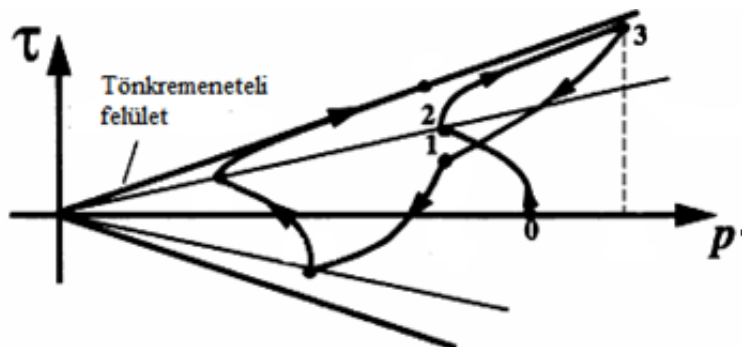
Sok éven keresztül a talajfolyósodással kapcsolatos laboratóriumi vizsgálatok arra fókuszáltak, hogy hogyan épül fel a pórusvíznyomás a igénybevétel megjelenésétől a megfolyósodás kezdetéig. A folyósodás folyamatát, különösen a pórusvíznyomás ingadozását a kezdeti megfolyósodás után nem vizsgálták részleteiben.

Laboratóriumi vizsgálatok azt mutatják, hogy mind a laza, mind a tömör talajok esetében viszonylag alacsony feszültség arányoknál ( $\eta = \frac{q}{p'}$ ) tömörödés következik be. Magasabb feszültség arányoknál azonban a talaj fellazulhat. Ishihara laboratóriumi vizsgálatai [5] azt mutatták, hogy az átmenet a tömörödés és a fellazulás között egy bizonyos feszültség aránynál jelentkezik, melyet konstans térfogathoz tartozó feszültség aránynak nevezett ( $\eta_{cv}$ ). Ha ezt ábrázoljuk feszültségtérben, a határvonalat a tömörödő és a fellazuló viselkedés között az állapotváltozás vonala jelöli ki (15. ábra).



15. ábra: Az állapotváltozás vonala feszültségtérben

Drénezetlen körülmények között, ciklikus terhelést alkalmazva, a telített kohézió nélküli talajok kezdetben tömörödő viselkedést mutatnak, ami a pórusvíznyomás emelkedéséhez, és ezáltal a hatékony feszültség csökkenéséhez vezet (16. ábra 0-1 görbe). Ahogy a nyírási alakváltozások növekednek, a feszültségpálya eléri az állapotváltozás vonalát, és a talaj viselkedése tömörödőről fellazulóvá válik, a hatékony feszültség növekedésnek indul. Ezalatt a fellazulás alatt a feszültségpálya a törési felület mellett halad (2-3 görbe). Fellazulás folyamán a hatékony feszültségek merevséget adnak a talajnak.



16. ábra: Ciklikus megfolyósodás sematikus ábrázolása feszültségtérben [2]

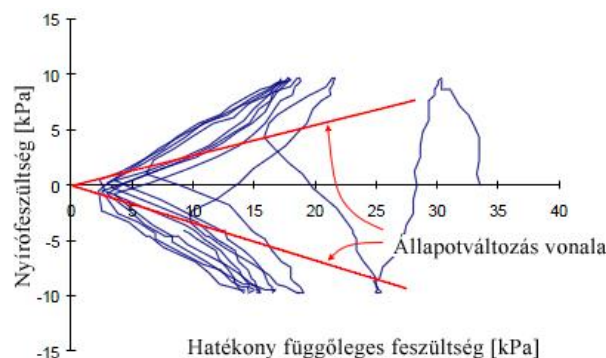


A nyírófeszültség és az átlagos hatékony feszültség ( $p'$ ) fellazulás során jelentős mértékben növekedhet. Ennek a növekedésnek gátat szab:

- A kritikus hézagtenyező: bizonyos nyírási alakváltozás után a talajminta állandó térfogatot vesz fel, azaz elér egy kritikus hézagtenyezőt, minek következtében a további nyírási alakváltozás hatására nem következik be térfogati változás. Ebben az állapotban a hatékony feszültség, és emiatt a nyírási ellenállás konstans értéket vesz fel.
- A víz kavitációja: drénezetlen állapotban a fellazulási hajlam a pórusvíznyomást a minimum szintjére tudja csökkenteni (atmoszferikus nyomás -1-szerese). A kavitáció megátolja a hatékony feszültség további emelkedését.

A ciklikus feszültség ellentétes irányba történő átfordulása után ismét tömörödés figyelhető meg, majd a leírt mechanizmus periodikusan ismétlődik.

Ciklikus megfolyósodás laboratóriumi körülmények között viszonylag könnyen megfigyelhető. Az 17. ábra közepesen tömör, tiszta homokon végzett dinamikus közvetlen nyírókísérlet eredményét mutatja. A ciklikus terhelés szimmetrikus, azaz az átlagos nyírófeszültség zérus. A kezdeti terhelési ciklusok során a pórusvíznyomás emelkedett, a hatékony feszültség csökkent, így a feszültségpálya monoton módon balra haladt. Mivel a ciklikus nyírófeszültség amplitúdója konstans és az átlagos főfeszültség csökken, ezért a feszültségarány emelkedett a folyamat során. Miután a feszültségarány értéke meghaladja a konstans térfogathoz tartozó feszültségarányt, a talajminta fellazuló viselkedést mutat. Fellazulás során a hatékony feszültség növekszik, a pórusvíznyomás csökken. A feszültségpálya jobbra mozdul el. A terhelés irányának fordulásával a minta tömörödni kezd, amíg az állapotváltozás vonalát át nem lépi a feszültségpálya. A terhelési ciklusok ismétlésével a hatékony feszültségpálya egy közel állandó alakhoz konvergál, a tömörödő és fellazuló állapotok sorozatos váltakozása mellett.

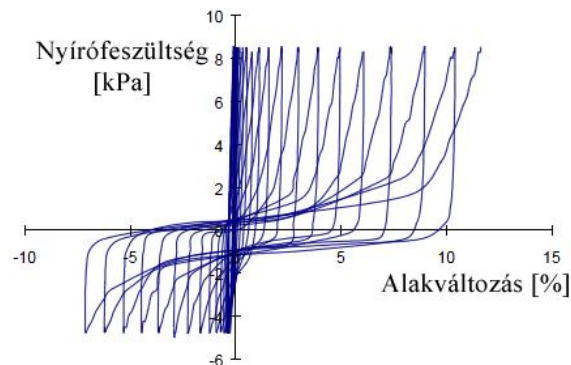


**17. ábra:** Dinamikus közvetlen nyírókísérlettel előállított ciklikus megfolyósodás [2]

Kellően sok terhelési ciklus után, a hatékony feszültség ciklusonként kétszer csökken zérus közeli értékre. Amikor a hatékony feszültség eléri ezt az alacsony értéket, a minta merevsége nagyon alacsony. Ekkor a minta azonnal elkezd fellazulni mindaddig, amíg a feszültség iránya meg nem fordul. A hatékony feszültség növekedésével növekszik a minta merevsége



is. Ez a folyamat feszültség alakváltozás diagramon jellegzetes S alakban jelenik meg (18. ábra).



**18. ábra:** Nyírófeszültség – alakváltozás diagram ciklikus megfolyósodás esetén [2]

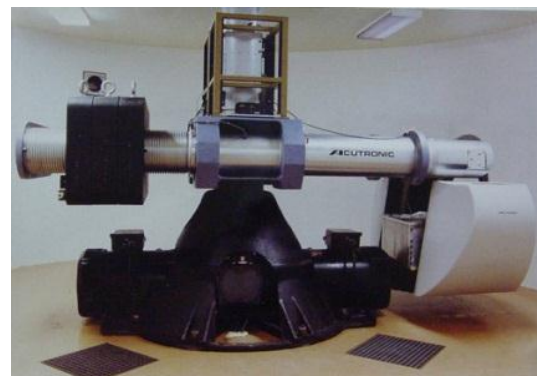
A fellazulás során megnövekedett merevség egyben meghatározza az alakváltozás mértékét is. A talajfolyósodás ezen jelenségének pontos ismerete nagyon fontos, mivel a földrengések során keletkező maradandó deformációk e folyamat során alakulnak ki.

### Laboratóriumi modellkísérletek

Modellkísérleteket elterjedten alkalmaznak a talajviselkedés vizsgálatához. Valóságos problémák modellezhetők méretarányos modelleken, az adott talajrétegződéssel, a talajjal kölcsönhatásban lévő épületekkel. Földrengésre történő méretezés esetén ezeket a modelleket rázóasztalon, illetve centrifugában vizsgálják. A rázóasztalok nagyobb modellek vizsgálatát teszik lehetővé, míg a centrifugával jobban modellezhetők a helyszíni feszültségviszonyok. Rázóasztalok méretválasztéka meglehetősen széles. Viszonylag nagy rázóasztalt használtak talajfolyósodás vizsgálatára a kínai Harbin Műszaki Egyetemen, mely  $2\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$ -es befoglaló méretekkkel rendelkezett [9].

Ez idáig korlátlan megfolyósodást nem sikerült a gyakorlatban rázóasztalon előállítani. A rázóasztal korlátozott méretei miatt a hatékony függőleges feszültség nem elegendően magas, a vizsgálat során a homokok fellazulást mutatnak. Mivel a ciklikus megfolyósodás nem igényel túlságosan laza talajviszonyokat, illetve nagy függőleges feszültséget, sokkal könnyebben előállítható modellkísérlettel.

Külföldi egyetemeken egyre gyakoribbak a centrifuga berendezések. Ez esetben a berendezés függőleges tengely körül forog, és a normális irányú gyorsulás hatására előáll a kívánt feszültségállapot. Ilyen berendezést ábrázol az 19. ábra.



**19. ábra:** Centrifuga berendezés  
(Rensselaer Polytechnic Institute)



## 4. TALAJFOLYÓSODÁSI VESZÉLY ÉRTÉKELÉSE

A folyósodási veszély értékelése három fő lépésből áll. Elsőként a talaj folyósodási hajlamát kell vizsgálni. Amennyiben egy talaj nem hajlamos folyósodásra, nincs a folyósodásnak veszélye. Amennyiben a jelenségre hajlamosnak mutatkozik, a második lépés annak a vizsgálata, hogy kialakulhat-e a folyósodás. Ebben a lépésben a földrengésből származó igénybevételeket, hatásokat kell összehasonlítani a talaj folyósodással szembeni ellenállásával. Ha az igénybevételek kisebbek az ellenállásnál, a folyósodás nem fog bekövetkezni, így a veszély értékelésének vége. Abban az esetben, mikor az igénybevételek nagyobbak az ellenállásnál a folyósodás valószínűsíthetően be fog következni. Ekkor, az értékelés harmadik lépéseként, a folyósodás hatásait kell vizsgálni. Amennyiben a következmények kellően súlyosak, a mérnöknek alternatív megoldásokon kell gondolkodnia.

A folyósodási veszély értékelése során a kutatók, mérnökök főként az első két lépésre koncentrálnak. Pedig az építmények teljesítőképessége szempontjából lényeges vizsgálni a talajfolyósodás hatásait is. A jelenség bekövetkezése utáni feszültség-alakváltozás állapotokról azonban sokkal kevesebb információ áll rendelkezésre a szakirodalomban.

### 4.1. A talaj folyósodási hajlama

Talajfolyósodás csak meghatározott talajtípusoknál, bizonyos feltételek mellett következhet be. Ezeket a talajtípusokat és feltételeket kísérletek, és korábbi földrengések során megfigyelt jelenségek alapján határozták meg.

Az alábbi állapotok, jellemzők együttesen szükségesek a talaj megfolyódáshoz:

- A talaj megfolyósodásához a felszínnek rázkódnia kell. A talajfolyósodás bekövetkezésének valószínűsége annál nagyobb, minél nagyobb a földrengés amplitúdója, és időtartama. A kutatások azt mutatják, hogy a talajfolyósodáshoz legalább 5-ös magnitúdójú földrengésre, és 0,1g felszíni gyorsulásra van szükség. A talajfolyósodás vizsgálata nem szükséges, ha a fenti feltételek nem teljesülnek.
- A talajréteg vízzel telített. A talajvízszint feletti, telítetlen talajokra a jelenség nem jellemző. Tehát azon talajrétegek, melyek a talajvízszint felett helyezkednek el, és a talajvízszint magassága előre láthatólag nem fog megváltozni, folyósodásra nem hajlamosak. Azokon a helyeken, ahol a talajvízszint jelentősen ingadozik, célszerű a maximális talajvízszintet figyelembe venni a folyósodási hajlam vizsgálata során. (Érdekességképpen megemlíthető, hogy megfigyeltek olyan jelenséget is, hogy száraz, laza homokok és iszapok megfolyósodtak. Ennek okaként az eltávozni nem tudó póruslevegő nyomását adják meg. Azonban ez a jelenség csak az esetek elenyésző hányadában következik be.)
- Talajfolyósodásra leghajlamosabb talajtípusok a finom és közepes homokok. Azok a homokok, amelyek alacsony finomrész tartalommal rendelkeznek, szintén hajlamosak folyósodásra. Sokáig azt hitték, hogy csak a tiszta homokok tekinthetők folyósodásra hajlamosnak. Ma már tudjuk, hogy ez a jelenség a talajok szélesebb körére jellemző.



Kuwabara és Yoshumi szerint a jelenség kavicsos homokokban is bekövetkezhet. Összességében megállapítható, hogy a talajfolyósodás főképpen kohézió nélküli talajokra jellemző, ezen belül is leginkább tiszta homokokra. Laboratóriumi vizsgálatok, és a helyszíni tapasztalok alapján a talajfolyósodás kohézióval rendelkező talajokra (pl. agyagokra) nem jellemző, bár nyírési alakváltozás hatására a megfolyósodó talajokhoz hasonló lágyuló viselkedést mutatnak, drénezetlen nyírószilárdságuk csökken. Az ún. „Chinese criteria” [2] alapján lehet következtetni agyagos talajok folyósodási hajlamára. Amennyiben az összes alábbi kritérium teljesül, az agyagos talaj folyósodásra hajlamosnak tekinthető:

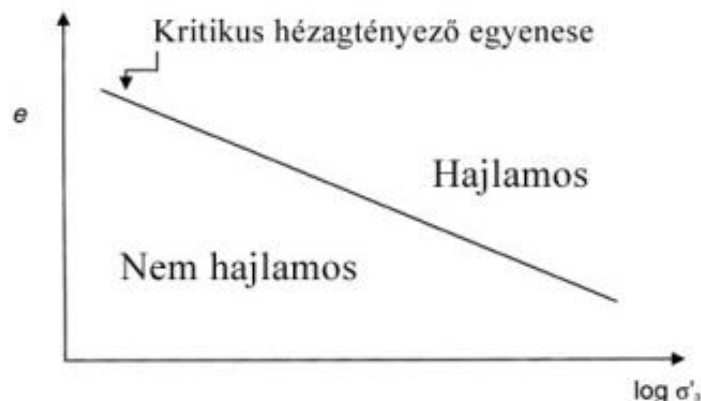
- agyag frakció  $\leq 15 \%$
- $w_L$  folyási határ (liquid limit)  $< 35 \%$
- természetes víztartalom  $\geq 0,9 \times w_L$
- $I_L$  relatív folyási index (liquidity index)  $\leq 0,75$

Néhány homoktalaj tartalmaz agyagos finomrészt. Ishihara és Koseki [10] kimutatta, hogy a plasztikus finomrészek hajlamosak meggátolni a pórusvíznyomás emelkedését. Ezt egy plasztikus indextől függő együtthatóval vették figyelembe:

$$F = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ 1,0 + 0,022(I_p - 10) \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Ezzel a faktorial szorozzák meg a 4.2.1 fejezetben számított biztonságot, így figyelembe véve a finomrészek hatását.

- Homoktalajok nyírásakor megfigyelhető, hogy a különböző kezdeti tömörségű homokok nyírési elmozdulás hatására térfogatukat megváltoztatják, a tömör homokok fellazulnak, a laza homokok pedig ezzel ellentétben tömörödnek. A tömörödés, illetve fellazulás után állandó nyírófeszültség mellett folytonos elmozdulás következik be. Ehhez a törési állapothoz tartozó hézagtenyezőt nevezzük kritikus hézagtenyezőnek ( $e_{krit}$ ). A híres olasz talajmechanikus, Casagrande megállapította, hogy triaxiális vizsgálat esetén ez a kritikus hézagtenyező a hatékony oldalnyomás ( $\sigma'_3$ ) függvénye lesz. Ennek a függvénynek a görbét felrajzolva megkapjuk a kritikus hézagtenyező egyenesét. Ez a görbe jelöli ki a határvonalat a laza és a tömör állapotú homokok között, és egyben a talajfolyósodásra hajlamos illetve nem hajlamos talajok közötti határvonalat is (20. ábra).

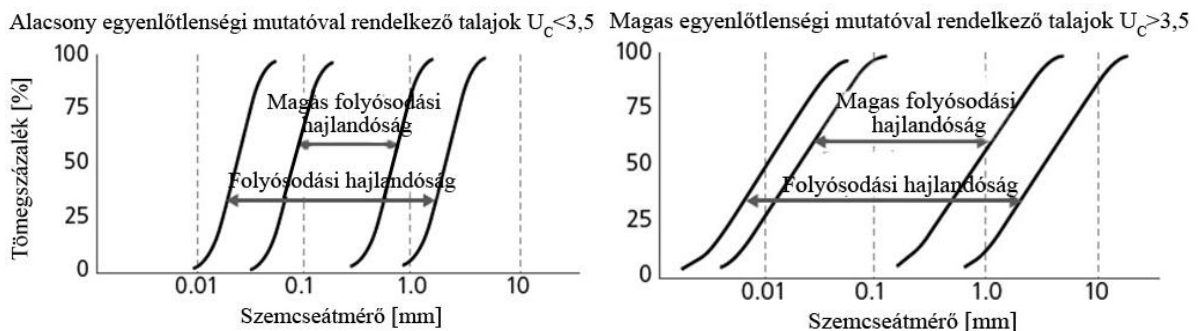


20. ábra: Kritikus hézagtenyező egyenese [2]



Összegzésképpen elmondható, hogy az alacsony tömörségi indexű talajok hajlamosak megfolyósodásra.

- Az egyszemcsés talajok vázszerkezete kevésbé stabil, mint a jól graduált talajoké, ezért hajlamosabbak a folyósodásra. A jól graduált talajok esetén a nagyobb szemcsék közti pórusokat a kisebb szemcsék kitöltik, így nyírasi alakváltozás során ezek a talajok kevésbé tömörödnek, tehát a pórusvíznyomás is kevésbé emelkedhet meg. A helyszíni megfigyelések is azt mutatják, hogy a legtöbb talajfolyósodás során a talaj közel azonos szemcsenagyságú részecskékből állt.
- A szemeloszlási görbe alakja is nagymértékben befolyásolja a jelenségre való hajlamot. A következő ábrán a japán Közlekedési Minisztérium által 1999-ben meghatározott határgörbék látható 3,5-nél nagyobb, illetve 3,5-nél kisebb egyenlőtlenségi mutató esetére (21. ábra).



**21. ábra:** Szemeloszlási határgörbék 3,5-nél nagyobb, illetve kisebb egyenlőtlenségi tényező esetén (Közlekedési Minisztérium, Japán, 1999)

- A kerek szemcsékkel rendelkező talajok jobban képesek tömörödni, mint a szögletes szemcsékkel rendelkezők, ezért ezek a talajok hajlamosabbak a folyósodásra.
- Amennyiben a pórusvíznyomás gyorsan tud távozni, a folyósodási hajlam kisebb. Nagy vízáteresztő-képességű kavicsrétegek gyorsan drénezni tudják a folyósodásra hajlamos rétegben megemelkedő pórusvíznyomást.
- Minél nagyobb a geosztatikus nyomás, annál kisebb a talaj folyósodási hajlama. Talajfolyósodás, a megfigyelések alapján, maximum a felső 15 méteres rétegben következhet be. Ennél mélyebben fekvő rétegek esetén általában nem következik be megfolyósodás.
- A geológiai adottságok jó indikátorai a folyósodási hajlamnak. Földtörténeti szempontból fiatalabb talajokra jellemzőbb a megfolyósodás. Az „idősebb” talajok stabilabb szerkezettel rendelkeznek, emellett a szemcsék többé-kevésbé összecementálódtak.
- Azok a talajok, melyek folyók torkolatánál rakódtak le, illetve tavak, óceánok üledékéből képződtek, hajlamosabbak a folyósodásra. Ez, az ülepedés során képződött laza szerkezettel magyarázható.
- A homoktalajra épített nehéz építmények csökkentik a talaj folyósodással szembeni ellenállását. Az épület terhe nyírófeszültségeket ébreszt a talajban, így földrengés során kisebb többletterheléssel is elegendő a tömörödés, majd a talajfolyósodás előidézéséhez.



## 4.2. Folyósodás bekövetkezése

Talajfolyósodás többféle hatás eredményeképpen következhet be:

- megfelelő erősségű és időtartamú földrengés,
- olyan nem szeizmikus, dinamikus teher, mint a vasúti közlekedés által keltett alacsony amplitúdójú rezgések,
- hirtelen megjelenő statikus terhek.

Az irodalomban sokféle megközelítés található földrengés által indukált talajfolyósodási jelenségek kiértékeléséhez. A következő részben ezeket a lehetőségeket kívánjuk bemutatni.

### 4.2.1. Ciklikus feszültség alapú megközelítés

A legjobban dokumentált és gyakorlatban is használt eljárás a talajfolyósodással szembeni biztonság meghatározására a ciklikus feszültség alapú megközelítés. Ebben a megközelítésben mind a földrengés által okozott igénybevételek, mind a talaj folyósodással szembeni ellenállása a ciklikus feszültség arányban van kifejezve. Mivel mind az igénybevétel, mind az ellenállás azonos fogalom segítségével kerül meghatározásra, ezért a talajfolyósodással szembeni biztonság könnyen meghatározható.

#### Igénybevételek jellemzése

Az igénybevételeket a ciklikus feszültség arány (cyclic stress ratio (CSR)) fogalmával jellemezzük, mely az alábbi módon számítható:

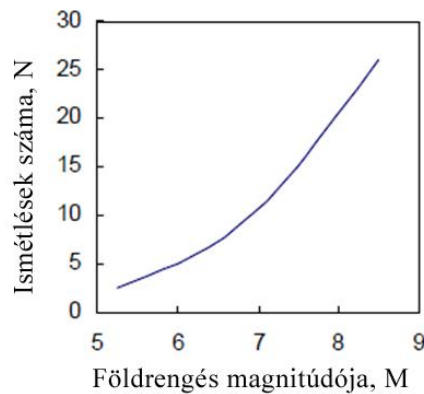
$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_{v0}} \quad (4.2)$$

ahol  $\tau_{cyc}$ : periodikusan ismétlődő, harmonikus nyírófeszültség amplitúdója,  
 $\sigma'_{v0}$ : a talajréteg alján ébredő hatékony függőleges feszültség a folyósodás előtt.

A földrengés során keletkező, tranziens nyírófeszültség az alábbi módon számítható át ciklikus nyírófeszültségre:

$$\tau_{cyc} = 0,65 \cdot \tau_{max} \quad (4.3)$$

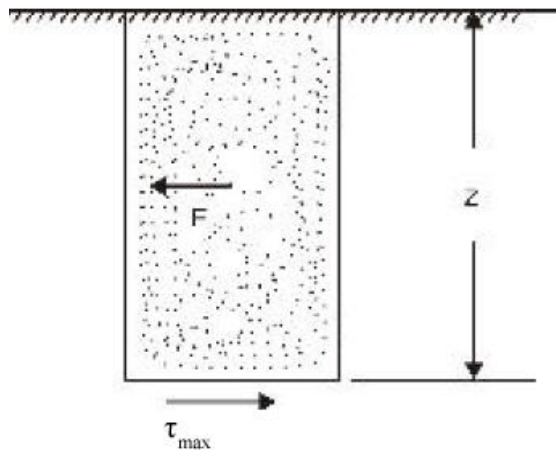
Az átszámítás módja Seed és társai [11] munkájából származik, amelyben összehasonlították a tranziens földrengésből származó nyírófeszültségek okozta, és a periodikus, szinuszos nyírófeszültségek keltette pórúsvíznyomás emelkedést. Munkájuk célja az volt, hogy össze lehessen hasonlítani az M magnitúdójú földrengésből származó tranziens nyírófeszültségek hatását az N-szer ismétlődő,  $0,65 \cdot \tau_{max}$  amplitúdójú, harmonikus nyírófeszültségek hatásával. Amennyiben N értéke az alábbi grafikonnál kerül leolvasásra, akkor a pórúsvíznyomás növekedése közel azonos a tranziens földrengésből és a harmonikus terhelésből számítva.



**22. ábra:** Az ekvivalens ciklusok száma a földrengés magnitúdójának függvényében [2]

*A ciklikus ellenállási arány meghatározása Seed és Idriss egyszerűsített eljárásával:*

A CSR meghatározásához vegyünk egy egységnyi szélességű,  $z$  mélységű, vízszintes felszínű talajtömböt. Tételezzük fel, hogy ez a talajtömb a földrengés okozta maximális felszíni talajgyorsulás hatására merev testként mozdul el vízszintesen.



**23. ábra:** Egységnyi szélességű és hosszúságú talajtömb

Az 23. ábrán látható, talajtömbre ható vízszintes  $F$  erő az alábbi módon számítható:

$$F = m \cdot a = \frac{G}{g} \cdot a = \frac{\gamma \cdot z}{g} \cdot a_{\max} = \sigma_{v0} \cdot \frac{a_{\max}}{g} \quad (4.4)$$

ahol  $m$ : talajtömb tömege,

$G$ : talajtömb súlya,

$\gamma$ : a talaj térfogatsúlya,

$z$ : felszín alatti mélység,

$a_{\max}$ : maximális vízszintes felszíni gyorsulás a földrengésből, amely várható lenne a földrengés során a talajfolyósodás hiányában. A képletben szereplő  $a_{\max}$  eltérhet attól a gyorsulástértéktől, mely a megfolyósodott talaj felszínén mérhető a földrengés során.

$\sigma_{v0}$ : a talajtömb alján ébredő teljes függőleges feszültség





Ez az erő egységnyi szélességű és hosszúságú talajtömbre hat. Ez éppen megegyezik az egységnyi felületre ható nyíróerővel:

$$\tau_{\max} = \sigma_{v0} \cdot \frac{a_{\max}}{g} \quad (4.5)$$

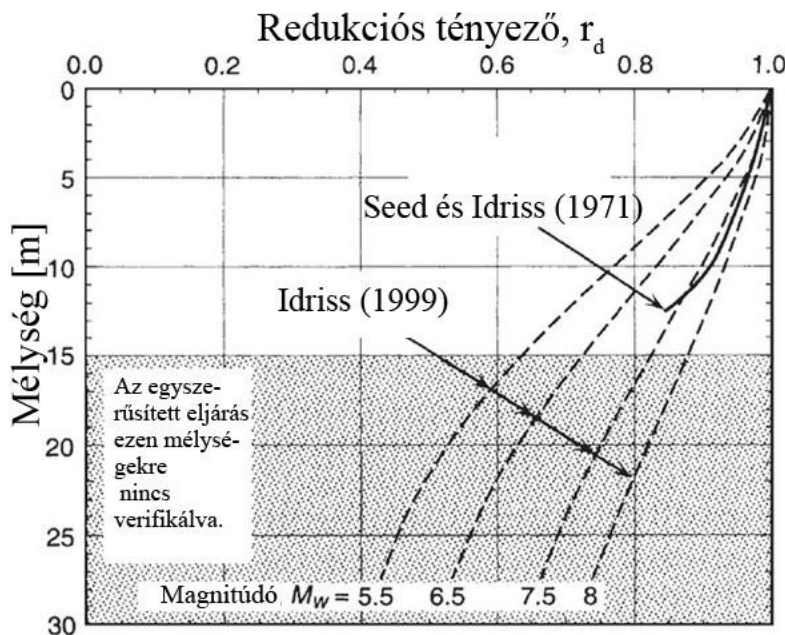
Mindkét oldalt elosztva a függőleges hatékony feszültséggel:

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma'_{v0}} = \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot \frac{a_{\max}}{g} \quad (4.6)$$

Megjegyzendő, hogy a valóságban azonban a talajtömb nem viselkedik merev testként. Ezen kívül az egyenlet jobb oldalát módosítani kell egy mélységtől függő csökkentő tényezővel ( $r_d$ ) is, amely megmutatja, hogy a mélység növekedésével hogyan csökken a maximális nyírófeszültség:

$$\text{CSR} = 0,65 \cdot r_d \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot \frac{a_{\max}}{g} \quad \left( = \frac{\tau_{\text{cyc}}}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (4.7)$$

A redukáló tényező értéke az 24. ábráról olvasható le a megfelelő magnitúdójú földrengéshez, illetve lineáris közelítés is alkalmazható:  $r_d = 1 - 0,012 \cdot z$  alakban, ahol  $z$  a felszíntől mért távolság.



24. ábra: A mélységtől függő redukációs tényező értéke különböző szerzők szerint [12]

### Ellenállások jellemzése

A folyósodással szembeni ellenállást a ciklikus ellenállási aránnyal (cyclic resistance ratio (CRR)) fejezik ki. A ciklikus ellenállási arányt úgy definiálják, hogy az azzal a ciklikus feszültség aránnyal egyezik meg, amely hatására a talajfolyósodás éppen bekövetkezik.

A ciklikus ellenállási arány meghatározása többféle módszerrel történhet. Mivel a laboratóriumi mérések költségesek, és az eredményt sok tényező befolyásolja, ezért a helyszíni mérések feldolgozása vált általánossá a talajfolyósodás vizsgálatoknál. A helyszíni



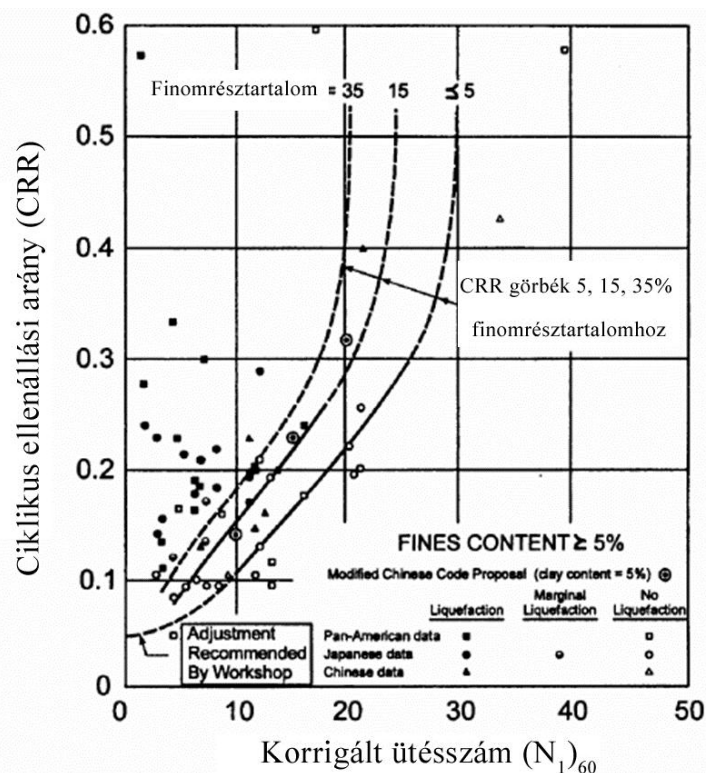
vizsgálatok közül a szabványos behatolási vizsgálat (SPT, Standard Penetration Test), statikus nyomószondázás (CPT, Cone Penetration Test), nyíróhullám sebességmérés ( $v_s$ ), illetve a Becker penetrációs teszt alkalmazható a ciklikus ellenállási arány meghatározására. Ezek közül a gyakorlatban legjobban elterjedt módszerek a CPT és SPT eredményein alapuló eljárások.

A ciklikus ellenállási arány meghatározásához empirikus diagramokat használnak. A diagramok vízszintes tengelyén a helyszíni vizsgálat eredményéből számítható érték (pl. korrigált ütésszám, korrigált csúcshellenállás) áll, míg a függőleges tengelyen a ciklikus ellenállási arány található. A diagramon feltüntetik azokat a földrengéseket, ahol kiszámították a ciklikus feszültség arányt, és végeztek helyszíni vizsgálatot. Ezek alapján behúzható egy olyan görbe, ami elhatárolja egymástól azokat a földrengéseket, ahol történt talajfolyósodás, illetve ahol nem.

#### *Ciklikus ellenállási arány meghatározása SPT mérések alapján*

A legtöbb statisztikai adat az SPT mérések eredményéből gyűlt össze. Szabványos behatolási vizsgálat esetén a ciklikus ellenállási arány két paraméter függvénye: az SPT vizsgálat eredményéből számított korrigált ütésszám  $(N_1)_{60}$  (aminek számítása a 6. fejezetben található), illetve a földrengés magnitúdója.

Youd és Idriss [12] grafikusán is megjelenítették a CRR és az  $(N_1)_{60}$  közti kapcsolatot.



**25. ábra:** Diagram a ciklikus ellenállási arány meghatározásához SPT vizsgálat esetén [13]



A 25. ábráról megállapítható, hogy azok a talajok hajlamosak megfolyósodásra, amelyeknek korrigált ütésszámuk 0 és 20 közé esik. Amennyiben  $(N_1)_{60}$  értéke 30-nál nagyobb, nincsenek talajfolyósodás okozta károk. Az ábra három görbéje három különböző talajhoz tartozik. Finomrész alatt itt  $5\mu\text{m}$ -nél kisebb szemcséket értünk. Látható, hogy a magasabb finomrésztartalmú talajoknak nagyobb a talajfolyósodással szembeni ellenállása. A grafikon használatához elsőként SPT vizsgálat eredményéből ki kell számítani a korrigált ütésszámot, azaz  $(N_1)_{60}$  értékét. Majd a minta finomrésztartalmát kell meghatározni laboratóriumi vizsgálattal. A korrigált ütésszám és a finomrésztartalom ismeretében a ciklikus ellenállási arány meghatározható.

A 25. ábra közelítőleg 7,5-ös magnitúdójú földrengés esetére érvényes. A földrengés amplitúdójának emelkedésével a rengés időtartama, és a rengések erőssége is nő, emiatt csökken a talaj folyósodással szembeni ellenállása. 7,5-östől eltérő magnitúdójú földrengés esetén a 25. ábrából nyert ciklikus ellenállási arányt meg kell szorozni a magnitúdó skálatényezővel (Magnitude Scaling Factor, MSF), melynek értéke néhány magnitúdóra az 1. táblázatban található.

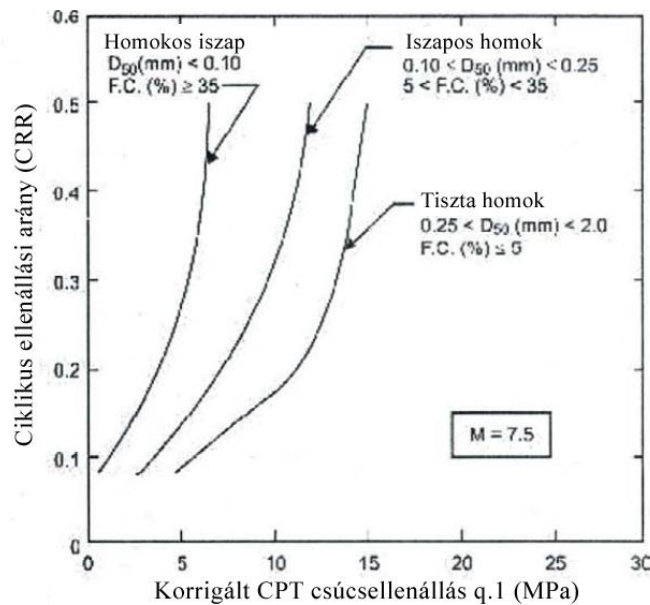
<b>Földrengés magnitúdója</b>	<b>MSF Seed és Idriss szerint</b>	<b>MSF EC8 szerint</b>
8,0	0,89	0,67
7,5	1,00	1,00
7,0	1,13	1,30
6,5	1,32	1,69
5,5	1,50	2,86

**1. táblázat:** Magnitúdó skálatényező értékei

#### *Ciklikus ellenállási arány meghatározása CPT mérések alapján*

A ciklikus ellenállási arány meghatározható CPT vizsgálat során mért csúcseellenállási érték felhasználásával is. A CPT méréseken alapuló módszerek kifejlesztése az 1990-es években kezdődött el. A módszer SPT eljárással szembeni egyik előnye, hogy folytonos szelvényt ad.

Ebben az esetben a korrigált csúcseellenállás - ciklikus feszültség arány koordináta rendszerben vannak elhelyezve azok a pontok, ahol végeztek CPT vizsgálatot, és kiszámították a ciklikus feszültség arányt. A megfolyósodással járó, illetve nem járó eseteket elválasztó görbék hasonlítanak az SPT vizsgálat során kapott görbékhez. Ezeket a görbéket ábrázolja a 26. ábra, mely szintén 7,5-es magnitúdójú földrengéshez készült, más magnitúdójú földrengésekhez a ciklikus ellenállási arányt az 1. táblázatban lévő magnitúdó skálatényezővel kell szorozni. Az ábrán látható görbék különböző finomrésztartalmú homokhoz tartoznak.



**26. ábra:** Diagram a ciklikus feszültség arány meghatározásához CPT vizsgálat esetén [14]

A 26. ábrán látható, hogy azonos csúcseleállási érték mellett a nagyobb finomrésztartalmú talajoknak nagyobb a ciklikus ellenállási aránya.

### A folyósodással szembeni biztonság

Az, hogy várhatóan bekövetkezik-e a talajfolyósodás egy adott földrengés során, a folyósodással szembeni biztonsággal mérhető. A biztonságot az alábbiak szerint definiálhatjuk:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \cdot MSF \quad (4.8)$$

Amennyiben a hányados értéke kisebb, mint 1, a talajfolyósodás bekövetkezése valószínű. (A Magyarországon hatályos Eurocode szabvány a szokásos szerkezetek esetén legalább  $FS=1,25$ -öt ír elő, lásd 6. fejezet) Megjegyzendő, hogy az így számított biztonság nem tesz különbséget laza homokoknál bekövetkező folyósodás és ciklikus megfolyósodás között, illetve a megfolyósodás bekövetkezése utáni viselkedésről sem nyújt információt.

### Bekövetkezési valószínűséget számszerűsítő eljárások

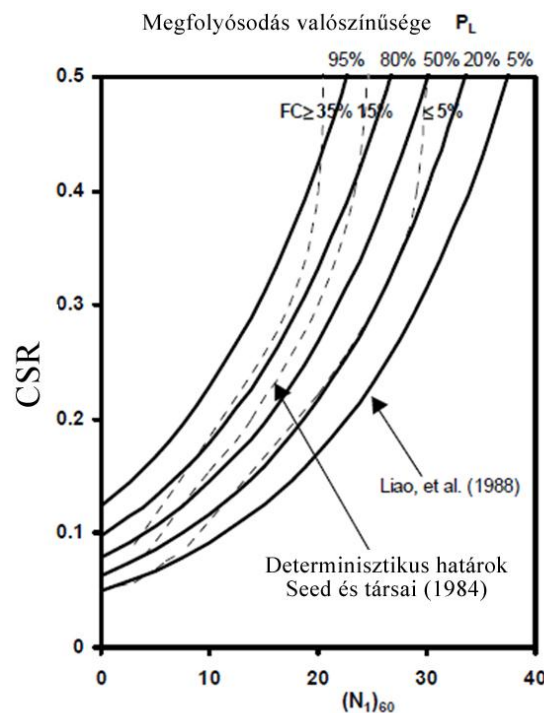
Mivel mind az igénybevételi oldal, mind az ellenállási oldal tartalmaz bizonytalanságokat, megjelentek olyan eljárások, melyek valószínűségi alapon próbálják megállapítani a talajfolyósodás bekövetkezésének lehetőségét. Ezek az eljárások abban különböznek egymástól, hogy milyen korábbi adatokból készítették a képleteket, melyiket változót tekintették determinisztikusnak és melyiket valószínűségi változónak, illetve abban is, hogy az eljárás analízis, vagy regresszió.



Liao és társai [15] bináris logisztikus regressziót alkalmaztak egy 278 megfolyósodással kapcsolatos esetet tartalmazó adatbázisra, hogy kifejezhessék a talajfolyósodás valószínűségét. Az adatbázis tiszta homokra, és iszapos homokra vonatkozó jelenségeket tartalmazott. A magnitúdó skálatényezőt és a mélységtől függő reduktív tényezőt konstansként kezelték. Tiszta homokra, melynek finomrésztartalma 12%-nál kisebb, a folyósodás bekövetkezésének valószínűségét az alábbi képlettel kaphatjuk:

$$p_L = \frac{1}{1 + e^{-16,447 - 6,46031 \cdot \ln(\text{CSR}) + 0,3976(N_1)_{60}}} \quad (4.9)$$

A 27. ábra folytonos vonallal rajzolt görbéi azt mutatják meg, hogy tiszta homok esetén, adott ciklikus feszültség arány és SPT korrigált beütés szám  $((N_1)_{60})$  ismeretében mekkora valószínűséggel következik be talajfolyósodás.



**27. ábra** A talaj megfolyósodásának valószínűsége tiszta homok esetén [15]

A megfolyósodás bekövetkezési valószínűségét számító eljárások empirikus megfigyeléseken alapszanak; az igénybevételt a ciklikus nyírófeszültségből számítják, a felszíni talajgyorsulás és a felszín alatti mélység figyelembevételével. A megfigyelések során nagyon ritkán állt rendelkezésre gyorsulásmérő, amiből a maximális felszíni talajgyorsulás pontosan meghatározható lett volna, így jelentős bizonytalanságok vannak az eljárásban. Az ellenállásoldal SPT, CPT vizsgálatok eredményeiből korrelációval került meghatározásra. Amennyiben a helyszínen végeztek is ilyen vizsgálatokat, az azokban rejlő bizonytalanságok



nagymértékűek, az eredmények erősen függenek a fúrás helyszínétől és az alkalmazott eljárástól.

#### **4.2.2. Ciklikus alakváltozás alapú megközelítés**

A talajfolyósodás bekövetkezésének valószínűségét nagymértékben befolyásolja a talajban létrejövő elmozdulások mértéke, mivel ezen elmozdulások során a részecskék tömörebb állapotba rendeződnek, és ennek következtében nő meg a pórusvíznyomás.

Mikor ciklikus nyírófeszültséget alkalmaznak a talajmintára, akkor az ciklikus nyírási alakváltozást szenved. Amennyiben a feszültségek nagyon alacsonyak, akkor az alakváltozás a szemcseváz rugalmas alakváltozásából jön létre (azaz a talajrészecskék nem gördülnek el egymáson). Ilyen körülmények között a talaj nem változtatja térfogatát, és nem emelkedik meg a pórusvíznyomás. Tehát létezik a nyírási alakváltozásnak egy határértéke, mely alatt nem épül fel a pórusvíznyomás. Viszonylag kis mélységben, folyásra hajlamos talajok esetén ez a nyírási alakváltozás kb. 0,01%.

A ciklikus alakváltozás alapú megközelítés során mind az igénybevételeket, mind az ellenállást a ciklikus nyírási alakváltozás segítségével írjuk le. A földrengésteher hatására bekövetkező ciklikus alakváltozást földrengések gyorsulás-idő függvényéből lehet becsülni. Ez egyben a megközelítés gyenge pontja, mivel a ciklikus alakváltozást jóval nehezebb megbecsülni, mint a ciklikus feszültséget.

Léteznek eljárások, melyek a tranziens nyírási alakváltozást alakítják át N-szer ismétlődő, periodikus, harmonikus nyírási alakváltozássá (Dobry és társai [16]). A talajfolyósodással szembeni ellenállás a ciklikus alakváltozás amplitúdójában van kifejezve. Ezt az alakváltozást annyiszor kell ismételni, hogy az ekvivalens legyen a földrengés magnitúdójával. Összehasonlítva a „földrengés által okozott” ciklikus alakváltozás amplitúdóját a talajfolyósodáshoz szükséges ciklikus alakváltozás amplitúdójával a talajfolyósodással szembeni biztonság meghatározható.

Ennek a megközelítésnek az előnye a ciklikus feszültség alapú megközelítéssel szemben, hogy a pórusvíznyomás emelkedése sokkal inkább kapcsolódik az alakváltozáshoz, mint a feszültséghez. Azonban a ciklikus alakváltozás amplitúdója sokkal nehezebben számítható, mint a ciklikus feszültség amplitúdója. Ráadásul az alakváltozás méréséhez jóval kevesebb mérőberendezés áll rendelkezésre, mind a feszültség mérésére. Ezen okok miatt a mérnöki gyakorlatban sokkal gyakoribb a ciklikus feszültség alapú megközelítés.

#### **4.2.3. Energia alapú megközelítések**

Elsőként Nemat-Nasser és Shokooh [17] készített egy viszonylag egyszerű elméletet a pórusvíznyomás emelkedés és a közben elnyelt energia kapcsolatáról. Azóta számos kutató próbálja számszerűsíteni a pórusvíznyomás és a földrengés energiája közti kapcsolatot.

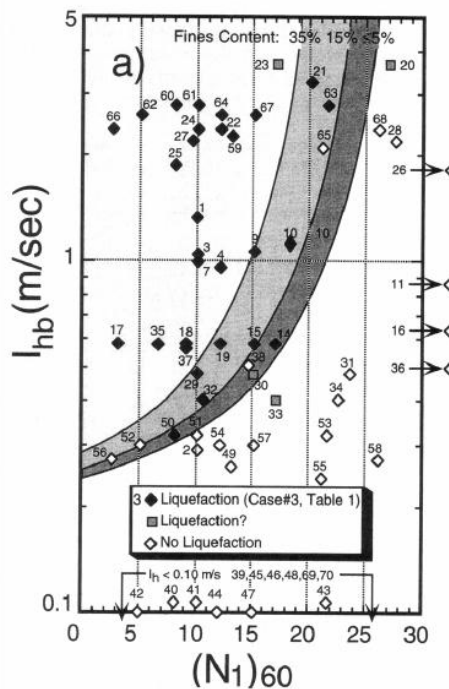


Kayen és Mitchell [18] az Arias intenzitás ( $I_h$ ) felhasználásával állapította meg a talajfolyósodással szembeni biztonságot. Az Arias intenzitás két merőleges gyorsulásmérőből az alábbi módon számítható:

$$I_h = \frac{\pi}{2g} \left[ \int_0^{t_0} a_x^2(t) dt + \int_0^{t_0} a_y^2(t) dt \right] \quad (4.10)$$

ahol  $t_0$  a rengés időtartama,  
 $g$  a nehézségi gyorsulás,  
 $a_x$  és  $a_y$  két egymásra merőleges, vízszintes gyorsuláskomponens

A talajfolyósodással szembeni ellenállás értékére korrelációval következtetnek a helyszíni vizsgálatok (CPT, SPT) eredményeiből. A 28. ábra alapján az SPT vizsgálat eredményeiből kaphatjuk meg a bizonyos finomrésztartalommal rendelkező talajok folyósodással szembeni ellenállását. Kayen és Mitchell kimutatta, hogy ezzel az eljárással jobban szét lehet választani a megfolyósodással járó, illetve nem járó eseteket, mint a ciklikus feszültség alapú megközelítést használva.



**28. ábra:** Kapcsolat a korrigált SPT ütésszám és a megfolyósodáshoz szükséges Arias intenzitás között (Kayen és Mitchell [18])

A talajfolyósodással szembeni biztonságot úgy definiáljuk, mint a talajfolyósodáshoz szükséges Arias intenzitás és a földrengés okozta Arias intenzitás hányadosát.

$$FS = \frac{I_{hb}}{I_h} \quad (4.11)$$



Az Arias intenzitás felhasználása a talajfolyósodással szembeni biztonság értékeléséhez sok előnnyel bír a ciklikus feszültség és a ciklikus alakváltozás alapú megközelítésekkel szemben, mivel az Arias intenzitás figyelembe veszi a földrengés amplitúdóját, frekvenciáját, időtartamát.

Az energia alapú megközelítések családjába az Arias intenzitást felhasználó eljárásen kívül több módszer is tartozik. E módszerek esetén a folyósodással szembeni biztonság függvénye valamely helyszíni vizsgálat eredményének, a földrengés magnitúdójának, a hipocentrumtól való távolságnak, illetve kezdeti hatékony feszültségnek.

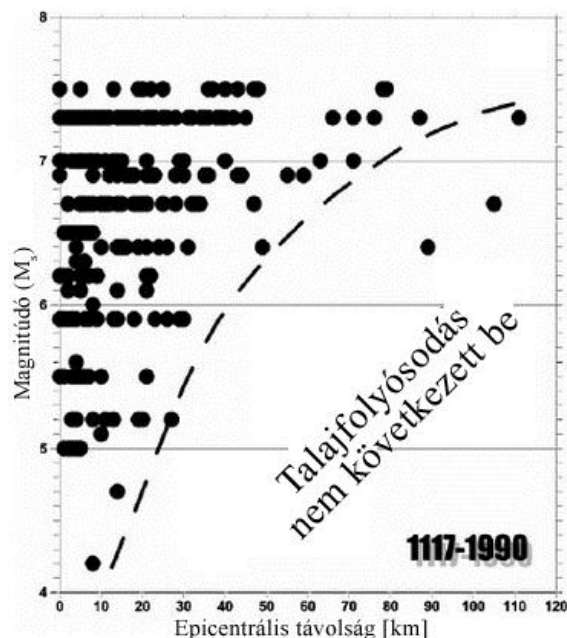
### 4.3. A jelenség távolsága az epicentrumtól

Erős szeizmicitású területeken a történelmi és jelenkori földrengések során észlelt talajkárosodási jelenségek feldolgozásával különböző szerzők vizsgálták, hogy adott magnitúdójú rengések mekkora távolságban okozhatnak megfolyósodást.

Galli [19] 1117-től 1990-ig kipattant 61 különböző olaszországi rengés 317 talajfolyósodással kapcsolatos jelenségét dolgozta fel a 4,2-7,5 magnitúdó tartományban. A felületi hullám magnitúdóra<sup>4</sup> ( $M_s$ ) meghatározott határegyenlete:

$$R_e = 10^{\frac{M_s - 1}{3}} \quad (4.12)$$

ahol  $M_s$  a felületi hullám magnitúdója,  $R_e$  az epicentrumtól mért távolság km-ben.



**29. ábra:** Földrengés okozta talajfolyósodással járó események eloszlása a felületi hullám magnitúdó és az epicentrumtól való távolság függvényében [19]

<sup>4</sup> Magnitúdók különböző típusait a Függelékben ismertetjük.



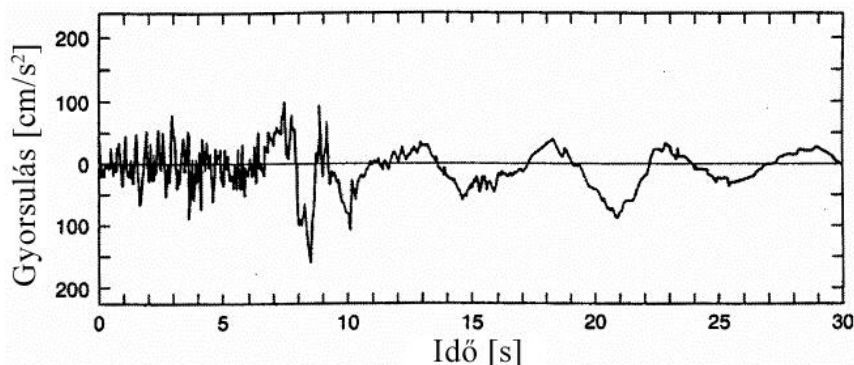


## 5. A TALAJFOLYÓSODÁS KÖVETKEZMÉNYEI

A talajfolyósodás mindaddig nem veszélyes jelenség, amíg a bekövetkező elmozdulások az épített környezetet nem veszélyeztetik. A talajfolyósodás az épületek és hidak földrengéssel szembeni ellenállását számos módon tudja befolyásolni. Ebben a fejezetben a megfolyósodás következményeit kívánjuk bemutatni.

### 5.1. Változások a felszín mozgásában

Földrengés során a felszín mozgásának dinamikáját nagymértékben befolyásolják a helyi talajviszonyok. A felszín alatt lévő, különböző vastagságú, merevségű és csillapító képességű talajrétegek felerősíthetik, illetve kiolthatják az alapkőzet rezgéseit. A merevebb talajrétegek felerősítik az alapkőzet magas frekvenciájú rezgéseit, míg a lágyabb rétegek az alacsony frekvenciájú rezgéseket erősítik. A talaj merevsége hirtelen és drasztikusan megváltozik a megfolyósodás kezdetekor. A pórusvíznyomás emelkedése és a hatékony feszültség csökkenése a talajréteg lágyulásához vezet. Ezért a kezdetben magas frekvenciákat erősítő talajréteg a földrengés előrehaladásával a kisebb frekvenciájú rezgéseket fogja erősíteni.



**30. ábra:** Niigata-i földrengés során készült akcelerogram.  
A talajfolyósodás a 6. másodperctől kezdődött. [2]

A folyósodás bekövetkezésekor a talaj felszínén a magas frekvenciájú rengések helyett alacsony frekvenciájú rengések jelennek meg. Ez összhangban van a talaj lágyulásával, a merevségi és szilárdsági jellemzők csökkenésével.

### 5.2. Süllyedések

A laza talajok megfolyósodásakor és a rengést követő konszolidáció során a talaj térfogata csökken, ami általában a felszín süllyedésében nyilvánul meg. A felszín megfolyósodás utáni süllyedése számos földrengés során volt megfigyelhető. Amennyiben a süllyedések nagy területre terjednek ki, akkor a vízparti, alacsonyan fekvő területek víz alá kerülhetnek.



**31. ábra** Talajfolyósodás következtében megsüllyedt, majd víz alá került terület.  
Gölcük, Törökország (1999)

A süllyedések nagy veszélyt jelenthetnek akkor is, ha relatívan kis területen jelentkeznek. Ennek következtében az építmények egyenlőtlen süllyedést szenvedhetnek, és az építmény igénybevételei nagymértékben megnőhetnek.

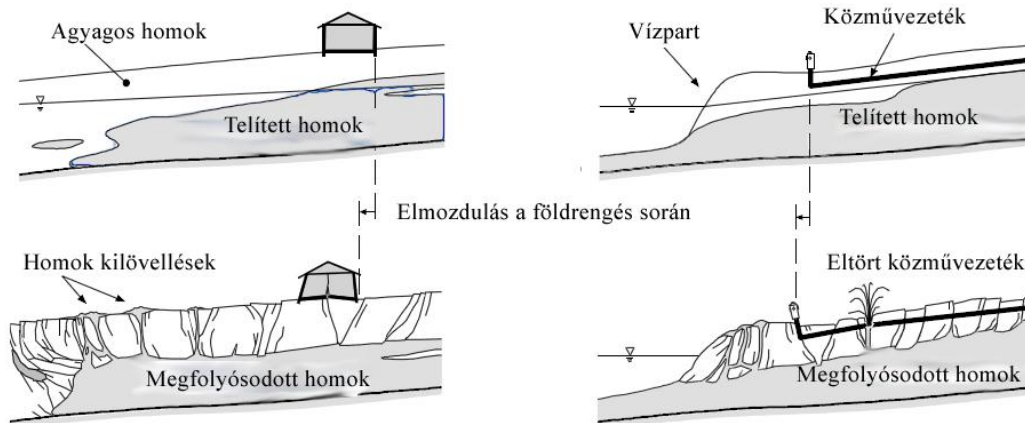


**32. ábra:** Egyenlőtlen süllyedések következtében tönkrement épületrész.  
Taichung kikötő, Tajvan (1999)

A süllyedésekből keletkező károk elkerülhetők mélyalapozás alkalmazásával. A folyósodásra hajlamos rétegen átvert cölöpök a mélyebben fekvő, megfelelően állékony talajrétegen támaszkodnak, így azok az épületet az eredeti szintjén tartják. Mélyalapozással az épületkárok csökkenthetők, de például a közművezetékek károsodása nem kerülhető el.

### 5.3. Oldalirányú elmozdulások

Ha a talajfolyósodás egy felszín alatt mélyebben fekvő rétegben következik be, akkor ennek következtében a felette lévő fedőrétegek oldalirányban szétcsúszhatnak. A gravitációs és a földrengésből eredő tehetetlenségi erők miatt a felszíni tömegek elmozdulhatnak lefelé a lejtőn egy szabad felszín, pl. egy folyómeder vagy tengerpart irányába. Az oldalirányú elmozdulás leggyakrabban enyhe, 0,3 – 5%-os lejtőknél fordul elő, ahol a fedőréteg alatt vízzel telített laza homok helyezkedik el. Ezen a megfolyósodott talajrétegen a felette lévő telítetlen talajréteg tömbökben el tud csúszni, a felszín akár néhány méterre is elmozdulhat.



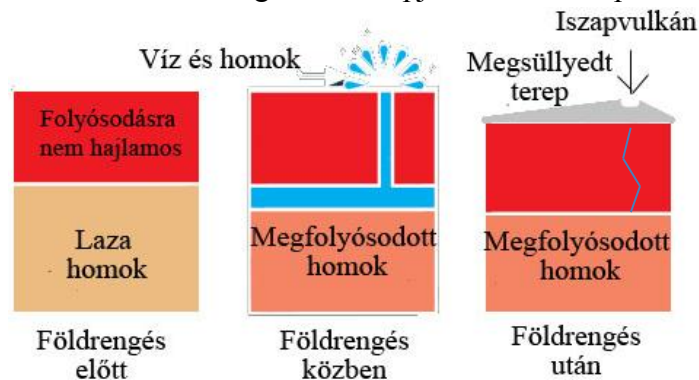
**33. ábra:** Talajfolyósodás hatására bekövetkező oldalirányú elmozdulások által okozott károk. [20]

A jelenség jellemző a földtörténetileg fiatal, folyami és tengeri üledékekre, illetve folyók torkolatánál lazán lerakott, telített homokokra. Talajfolyósodás jó indikátorai a homokkilövellések, iszapvulkánok, melyek a vékonyabb fedőréteg környékén tudnak a felszínre törni. Az oldalirányú elmozdulások nagy károkat tudnak okozni vonalas létesítményekben, mint közművezetékben és infrastruktúrákban.

Szintén a talajfolyósodás következménye az oldalirányú elmozdulásokhoz szorosan kapcsolódó talaj oszcilláció is. Amikor a mélyben megfolyósodás következik be, de a lejtés túl enyhe ahhoz, hogy megengedje az oldalirányú elmozdulást, akkor a talajblokkok, melyek nem folyósodtak el, elválnak egymástól és oszcillálnak az elfolyósodott zónán. Az ilyen módon bekövetkezett talajrezgést hasadékok megnyílása és bezáródása, valamint homok kilövellések és iszapvulkánok kísérhetik.

#### 5.4. Homokkilövellések, iszapvulkánok

A megfolyósodás gyakori velejárója az iszapvulkánok megjelenése. Iszapvulkán akkor keletkezhet a földrengés során, mikor a megfolyósodott réteg felett egy folyósodásra nem hajlamos réteg fekszik. A mélyebben fekvő réteg megfolyósodása során tömörebb állapotba kerül, belőle a pórusvíz kinyomódik, s ez a víz a felszín közelében lévő réteg súlyának hatására felszínre tör. A folyamat befejeztével a felszín megsüllyed, megjelenik az iszapvulkán. Iszapvulkánt ábrázol a dolgozat címlapján található kép is.



**34. ábra:** Iszapvulkán keletkezési folyamata



## 5.5. Szilárdságvesztés

Amennyiben a talaj megfolyósodik és elveszti a szilárdságát, akkor ez az építmény megsüllyedését, vagy akár felborulását is okozhatja. Ez történt az 1964-es Niigata-i földrengés során, ahol egyes épületek 60 fokkal is megdőltek (lásd 2.1 fejezet).

A talajfolyósodás sík-, és mélyalapok károsodását is okozhatja. Talán a leglátványosabb sicalap tönkremeneteli mód, mikor a laza, telített, alacsony reziduális feszültséggel rendelkező talaj elveszti megtámasztó képességét.



**35. ábra:** Talajfolyósodás okozta szilárdságvesztés miatt felborult építmény.  
Adapazari, Törökország (1999)

Talajfolyósodás jelentős hatással lehet a mélyalapozásokra is. Cölöpök sok földrengés során tönkrementek a talaj oldalirányú elmozdulásainak következtében, mint történt az a Niigata-i NHK irodaépület, és a Showa híd esetében is.



**36. ábra:** Az oldalirányú elmozdulások következtében tönkrement cölöpök.  
Kobe, Japán (1995)



## 6. AZ EUROCODE 8 VONATKOZÓ ELŐÍRÁSAI

Az Eurocode 1998-5 [21] alapján a talaj folyósodási hajlandóságát vizsgálni kell, amennyiben a tervezett építmény alatt kiterjedt rétegben, illetve vastag lencsékben iszap-, agyagtartalmú vagy finomrész nélküli laza homok található, és a talajvízszint a felszín közelében helyezkedik el. Ezt a vizsgálatot a beépítetlen helyszínen, az építmény várható élettartama alatt fennálló körülményekre kell elvégezni.

A megfolyósodási veszély értékelése során mindenképpen végezni kell helyszíni (lehetőleg SPT vagy CPT) vizsgálatot, ezen kívül a szemeloszlási görbét is meg kell határozni.

Az SPT vizsgálat esetében a mért szondázási értéket ( $N_{SPT}$ : 30 cm-es behatoláshoz tartozó ütésszám) normalizálni kell egy referenciaértékre az alábbi módon:

$$(N_1)_{60} = N_{SPT} \cdot C_N \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E \quad (6.1)$$

ahol  $C_N$  tényező a teljes függőleges feszültségtől függő tényező:

$$C_N = \sqrt{100 / \sigma'_{v0}}, \text{ de } 0,5 \leq C_N \leq 2.$$

$C_R$  tényező a szondázás mélységétől függő paraméter.

$C_S$  tényező a szondaberendezés típusától függ.

$C_B$  tényező a szondalyuk átmérőjétől függő szorzószám.

$C_E$  tényező pedig a SPT kalapács energiáját ( $ER$ ) veszi figyelembe.

A szabvány alapján a 3 méter mélység feletti SPT értékeket 25%-kal csökkenteni kell.

Síkalapozással rendelkező épületeknél a talajfolyósodási hajlamot nem kell vizsgálni, ha a telített homokréteg a felszín alatt több mint 15 m-re található.

A talajfolyósodás veszélye elhanyagolható, ha  $\alpha \cdot S < 0,15$  és legalább egy teljesül az alábbi követelmények közül:

- a homok legalább 20 % olyan agyagot tartalmaz, melynek plasztikus indexe  $I_p > 10\%$ ,
- a homok iszaptartalma nagyobb, mint 35%, és a normalizált SPT ütésszám  $(N_1)_{60} > 20$
- a homok tiszta, és a normalizált SPT ütésszám  $(N_1)_{60} > 30$ . Megfolyósodás szempontjából tiszta homoknak azokat a homokokat nevezzük, melyeknek finomrésztartalma kisebb, mint 5%.

A fenti feltételben  $\alpha$  az A típusú talajra meghatározott  $a_g$  tervezési csúcsgyorsulásnak és  $g$  gravitációs gyorsulásnak a hányadosa, és  $a_g = a_{g,R} \cdot \gamma_1$ , ahol  $a_{g,R}$  visszatérési referencia csúcsgyorsulás,  $\gamma_1$  fontossági tényező.  $S$  az Eurocode-ban definiált talajfaktor. Mivel a NAD szerint az I-es típusú horizontális gyorsulás-válaszspektrum érvényes Magyarországra, ezért a szabványban definiált talajosztályokhoz az alábbi  $S$  talajtényezők tartoznak a 2. táblázat szerint:



Talajosztály	S
A	1,0
B	1,2
C	1,15
D	1,35
E	1,4

**2. táblázat:** Talajosztályokhoz tartozó talajfaktor EC-8 szerint

Amennyiben a megfolyósodás veszélye nem zárható ki, akkor a fentiekben taglalt módszerek segítségével kell megállapítani a talajfolyósodással szembeni biztonságot.

Talajfolyósodás vizsgálatok a szabvány minimum követelményként Seed és Idriss általunk is bemutatott egyszerűsített, félempirikus eljárásának alkalmazását írja elő. A módszerrel meghatározható a talajfolyósodással szembeni biztonság, amelynek ajánlott minimális értéke a szabvány szerint 1,25.

Tapasztalati megfolyósodási ábrák a szabvány B mellékletében találhatók, ezek különböző finomrésztartalmú homoktalajokra mutatják a ciklikus feszültség arány és a normalizált SPT ütésszám közötti kapcsolatot. E megközelítésben a  $\tau_e$  szeizmikus nyírófeszültség a következő egyszerűsített kifejezéssel becsülhető:

$$\tau_e = 0,65 \cdot \alpha \cdot S \cdot \sigma_{v0} \quad (6.2)$$

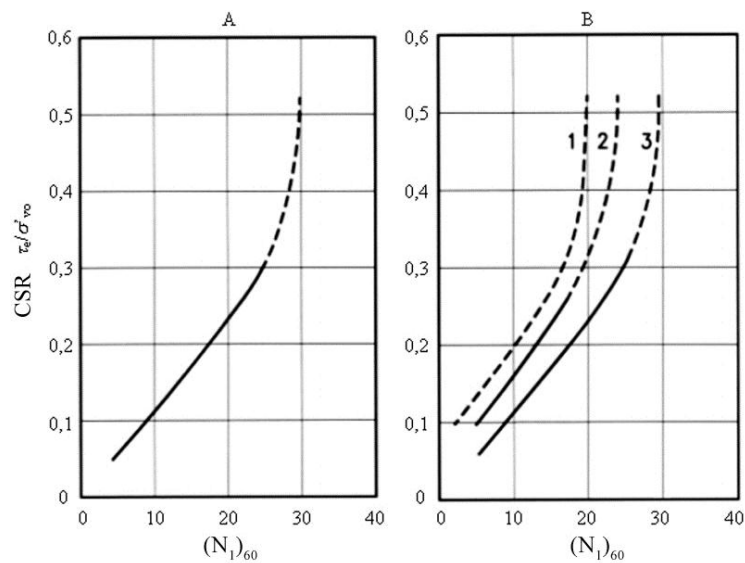
ahol  $\sigma_{v0}$  a teljes geosztatikus nyomás, a többi változót korábban definiáltuk. Ez a képlet nem alkalmazható 20 m-nél nagyobb mélység esetén.

A B melléklet szerint a ciklikus ellenállási arány meghatározásához használható a CPT vizsgálatból származó normalizált csúcsellenállás, a nyíróhullám terjedési sebesség ( $v_s$ ), illetve az SPT vizsgálatból származó normalizált beütésszám  $(N_1)_{60}$ .

A B melléklet a CPT eljárást abban az esetben nem ajánlja, ha a potenciálisan megfolyósodó réteg vastagsága mindössze néhány tíz centiméter. CPT vizsgálat alkalmazásával kapcsolatban a szabvány azokat a módszereket helyezi előnybe, amelyek a CPT szonda csúcsellenállását közvetlenül a talaj folyósodással szembeni ellenállásával hozzák kapcsolatba, nem pedig visszavezetik azt az SPT vizsgálat normalizált ütésszámára.

A nyíróhullám sebesség mérésével kapcsolatos eljárások kezdetleges volta miatt azok használatát csak ahhoz értő specialista segítségével ajánlja a szabvány.

SPT vizsgálat esetén tiszta homokra és iszapos homokra a 37. ábra grafikonjait adja meg a szabvány:



**37. ábra:** SPT vizsgálathoz tartozó grafikonok tiszta homokra (A) és iszapos homokra (B). Az iszapos homok görbéi 35 (1), 15 (2) és 5%-os (3) finomrész tartalomhoz tartoznak. [21]

Egy bizonyos ciklikus feszültség arány alatt a talaj elasztikusan viselkedik, a pórusvíznyomás nem fog megemelkedni, ezért nincsenek a fenti görbék extrapolálva az origóba. Ezek a görbék 7,5-ös magnitúdójú referencia földrengéshez vonatkoznak, más magnitúdójú földrengéshez a ciklikus feszültség arányt szorozni kell az 1. táblázat szerinti magnitúdó skálatényezővel.

Terepi mérésekre megállapított korreláció alkalmazásakor egyenletes talajviszonyok esetén az általaj megfolyósodásra hajlamosnak kell tekinteni, ha a földrengés okozta nyírófeszültség meghaladja annak a kritikus feszültségnek a  $\lambda$  hányadát, amelyről tudható, hogy korábbi földrengésekkor már okozott megfolyósodást. A  $\lambda$  értéke valamely országra vonatkozóan a nemzeti mellékletben található meg. Ajánlott értéke:  $\lambda = 0,8$ , amely az 1,25 értékű biztonsági tényezőt is magában foglalja.

Ha a talaj megfolyósodásra hajlamosnak bizonyul, és az ebből eredő hatások az alapozás teherbíró képességét vagy állékonyságát veszélyeztetik, akkor az alapozás biztonsága érdekében külön intézkedéseket kell tenni, pl. talajjavítással, mélytömörítéssel, talajbevonással vagy drénezéssel (hogy a terhet ne a megfolyósodásra hajlamos rétegre továbbítsák). Ezeket a lehetőségeket részletesebben bemutatjuk a következő fejezetben.

Cölöpalapozás alkalmazásakor figyelmet kell fordítani arra, hogy a megtámasztó talaj hiányában a cölöpökre nagy erők hatnak.



## 7. MÓDSZEREK A MEGFOLYÓSODÁSSAL SZEMBENI ELLENÁLLÁS NÖVELÉSÉRE

### 7.1. Tömörítés

Ismert, hogy a laza homokok sokkal hajlamosabbak a talajfolyósodásra, mint a tömör homokok. Tehát a talajfolyósodással szembeni biztonság növelhető, ha a laza homokot tömöríteni tudjuk. Ezt az eljárást az építkezés megkezdése előtt kell elvégezni. Többféle módszerrel lehet a laza homokot tömöríteni, e módszereket tömören alább ismertetjük:

- Tömörítés gumikerekes tömörítőgéppel. Ebben az esetben a laza homokot bizonyos mélységig kiemelik, majd 15-20 cm-es rétegekben tömörítik. Ilyen módszerrel vastag rétegeket nem lehet tömöríteni (Kamalesh [22]).
- Tömörítés lapvibrátorral, vibrációs hengerrel. Ezen technikákkal maximálisan 1,0-1,5m vastag talajréteg tömöríthető. Az eljárás azon alapul, hogy a szemcsés talajok szerkezete vibrációval megváltoztatható.
- Dinamikus tömörítés. Az eljárás során 10-20 méter magasságból 2-10 tonna tömeget ejtetve tömörítjük a talajt. Az eljárással ejtési energiától és talajtól függően akár 10 m mélységig is tömöríthető a talaj. Amint a tömeg becsapódik a talajba, lokális talajfolyósodás alakul ki, a talaj tömörebb állapotba kerül. Emellett a pórusvíznyomás csökkenésékor, a konszolidációs folyamat során a talaj tovább tömörödik.

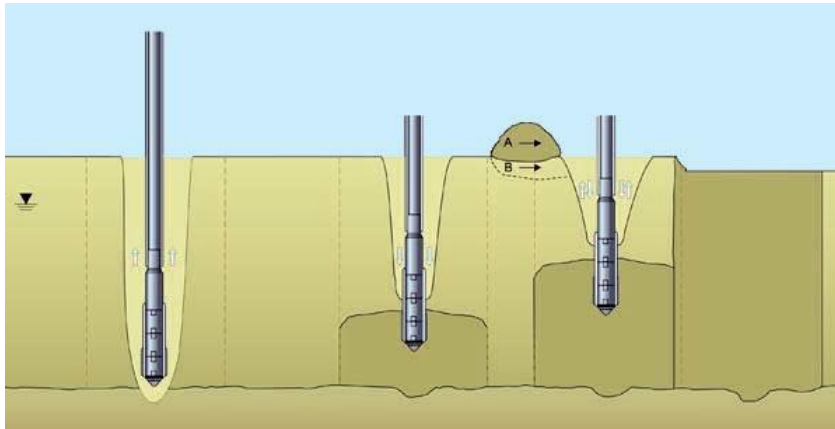


38. ábra: Dinamikus tömörítés

A módszer hátránya, hogy a dinamikus tömörítés végeztével a felszínen a terepet rendezni, illetve a legfelső 1-2 m-es réteget ismételtén tömöríteni kell.

- Vibroflotáció, amely egy mélytömörítő eljárás, szemcsés, kohézió nélküli talajok tömörítésére, szilárdítására alkalmas. A tömörítést egy speciális vibroszonda végzi, amelynek alsó végén vibrációs egység helyezkedik el. Először leverik a berendezést a kívánt mélységig, majd az eszköz oldalán nagy nyomással vizet injektálnak a talajszemcsék közé, aminek hatására a szemcsék közötti súrlódás átmenetileg csökken, és a nehézségi erő hatására a talaj tömörebb állapotba rendeződik. Eközben a berendezést lassan húzzák felfelé. A folyamatot a 39. ábra mutatja be.





**39. ábra:** Vibroflotációs eljárás folyamata

Az eljárás hatására a megfolyósodással szembeni ellenállás javul, mivel a hézagterefogat csökken. (Emellett a teherbírás is megnő, mivel növekszik a belső súrlódási szög és a térfogatsúly is.)

- Tömörítés robbantással. A robbanás hatására a talajtömegben talajfolyósodás alakul ki, majd a pórusvíznyomás leépülése során a részecskék tömörebb állapotba kerülnek. Ezzel a módszerrel szinte tetszőleges vastagságú rétegek tömöríthetők. A talaj legfelső 1-1,5 méterében ez a módszer kevésbé hatékony.

## 7.2. Jethabarcosítás és kémiai talajstabilizáció

Jethabarcosítás (Jet Grouting) során nagy nyomással stabilizáló anyagot juttatnak a talajrészecskék közé. A leggyakrabban használt stabilizáló anyag cement és víz keverékéből áll. Az eljárás általában akkor alkalmazható eredményesen, ha a talaj vízáteresztő képessége nagyobb, mint  $10^{-5}$  m/s. Az eljárás előnye, hogy meglévő épületek alapjainak erősítésére is alkalmazható, mivel a stabilizáló anyagot, oldalról, ferde hajlásszöggel is az épület alá lehet juttatni.

Kémiai stabilizáció során a stabilizáló anyag lehet mész, cement, pernye, illetve az előzőek kombinációja.

## 7.3. Többletterhelés alkalmazása

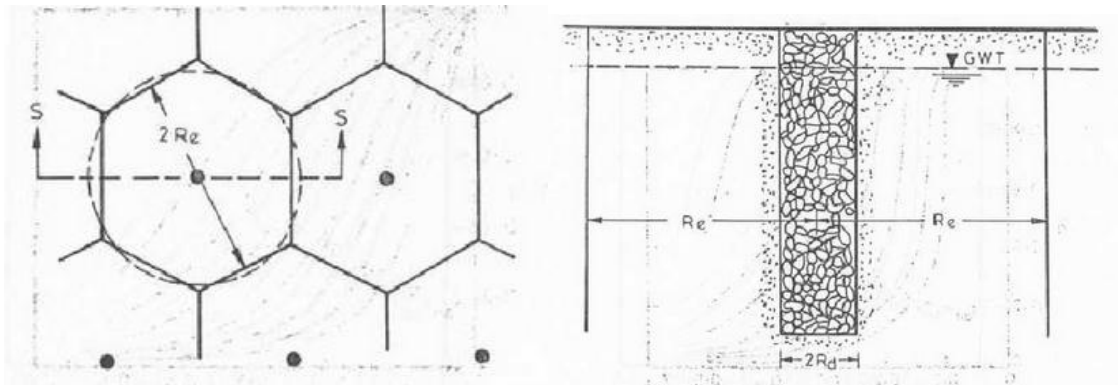
Megfelelő nagyságú függőleges terhelés szintén alkalmas lehet a talajfolyósodás kiküszöbölésére. A felszíni terhelés alkalmazásával növelhető a talajban ébredő geosztatikus nyomás. Mint azt korábban bemutattuk, a mélység növekedésével (függőleges feszültség növekedésével) a megfolyósodás bekövetkezésének esélye csökken.

## 7.4. Drénezés

A folyósodással szembeni biztonság növelhető olyan drénrendszer alkalmazásával, mely a földrengés során felépülő pórusvíznyomás többletet csökkenteni tudja. Ezek a drének akkor működnek hatékonyan, ha vízáteresztő képességük kb. két nagyságrenddel nagyobb, mint a



drénezni kívánt talajé.



**40. ábra:** Drénrendszer alaprajza és metszete (Swami, [23])

A drénrendszer tervezéséhez többek között Swami [23] adott eljárást. A talaj, illetve a drén vízáteresztő képességének és a drén átmérőjének függvényében meghatározható annak a körnek a sugara, amelyben a drén hatékonyan tudja csökkenteni a földrengés során megemelkedő pórusvíznyomást.

Kavicscölöpöket készítettek az új-zélandi AMI Stadion építéskor is. 12 500 m<sup>2</sup>-es területen 600 mm átmérőjű, 8-10 m mély cölöpöket készítettek egymástól 1,5 méterre. A kavicscölöpök felgyorsítják a pórusvíz elvezetését, emellett szilárdságot és merevséget adnak a talajnak.



## 8. KRITIKUS HÉZAGTÉNYEZŐ MEGÁLLAPÍTÁSA KÍSÉRLETTEL

A dolgozat keretében laboratóriumi vizsgálatot végeztünk különböző víztartalmú homokok kritikus hézagtenyezőjének megállapítására. A mérések során a homoktalajt közvetlen nyírókísérlettel vizsgáltuk. A minták 1,8 méter mélyről származtak, ennek a mélységnek az alkalmazott, 32,4 kN/m<sup>2</sup>-es függőleges nyomás nagyjából megfelel.

Háromfajta víztartalmú mintát vizsgáltunk:

- száraz mintát (w=0%),
- nedves mintát (w=16%),
- telített mintát (w=23%).

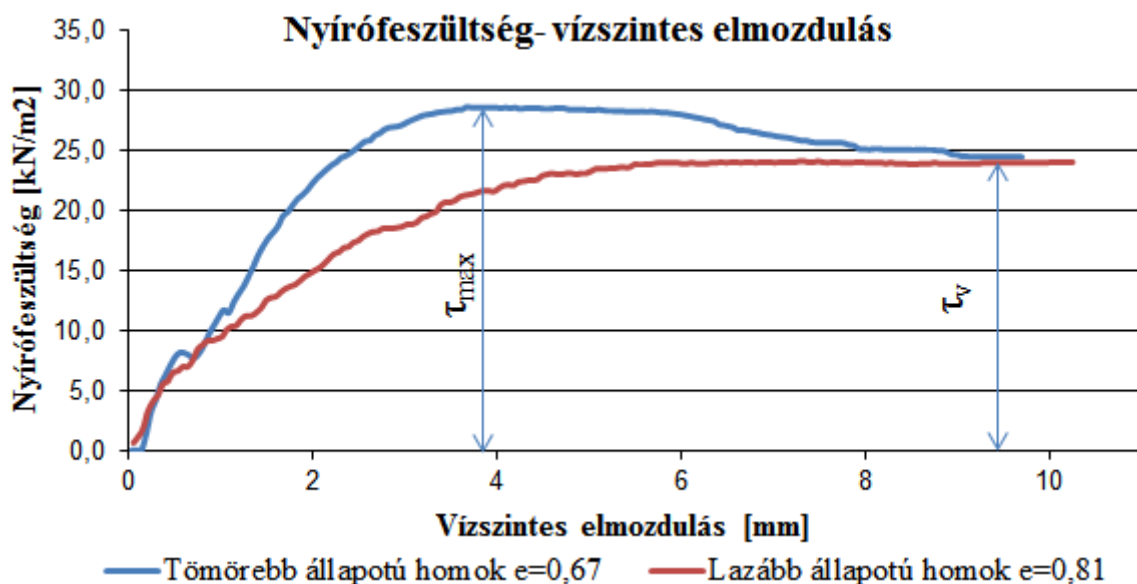
A száraz homok anyagsűrűsége:  $\rho_s = 2,65 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ .

A kezdeti hézagtenyezőt a víztartalom, a minta térfogata és nedves térfogatsűrűsége alapján az alábbi képlettel számítottuk:

$$e_0 = \rho_s \cdot \frac{1+w}{\rho_n} - 1 \quad (8.1)$$

Az idő függvényében mértük a vízszintes és függőleges elmozdulásokat, illetve a nyíróerőt.

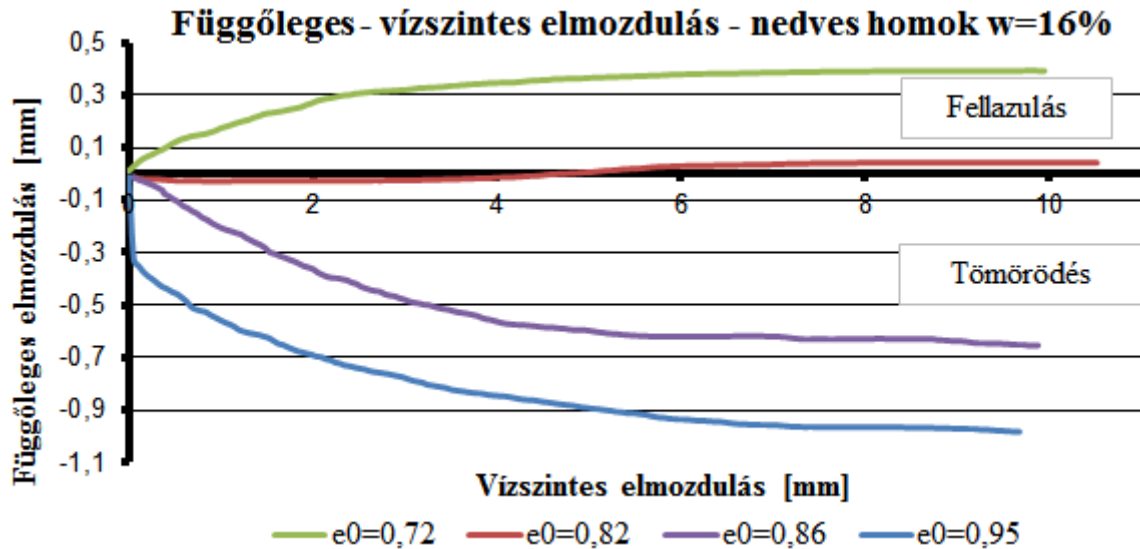
Vizsgáltuk a nyírófeszültségek kapcsolatát a vízszintes elmozdulásokkal (41. ábra). Tömör homokok esetén a nyírófeszültség elért egy maximumot ( $\tau_{\max}$ ), és amennyiben a nyírást tovább folytattuk, a nyírófeszültség visszaesett egy állandósult  $\tau_v$  értékre. Ez a  $\tau_v$  érték a reziduális nyírószilárdság. Laza homokok esetében a nyírófeszültség monoton növekedett mindaddig, amíg el nem érte  $\tau_v$  nyírószilárdságot, és amennyiben az elmozdulás e ponton túl folytatódott, az ellenállás változatlan maradt.



41. ábra: Nyírási alakváltozási görbék száraz homok esetén

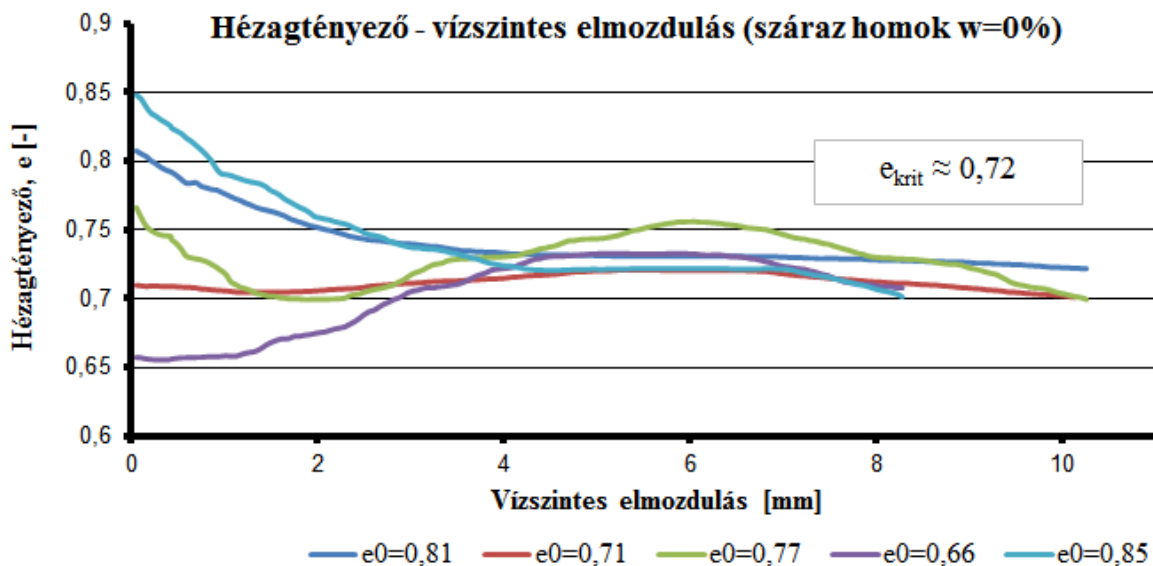


A vizsgálat során a mintáknak megváltozott a térfogata. A várakozásoknak megfelelően a nyírási elmozdulás hatására a tömörebb állapotú minták fellazultak, míg a lazább állapotúak tömörödtek. Megfelelően nagy elmozdulások tartományában (amikor a talaj nyírószilárdsága már a reziduális nyírószilárdsággal azonos) a minta térfogata konstans értéket vett fel. Ehhez az állapothoz tartozó hézagtenyézőt hívják kritikus hézagtenyézőnek.

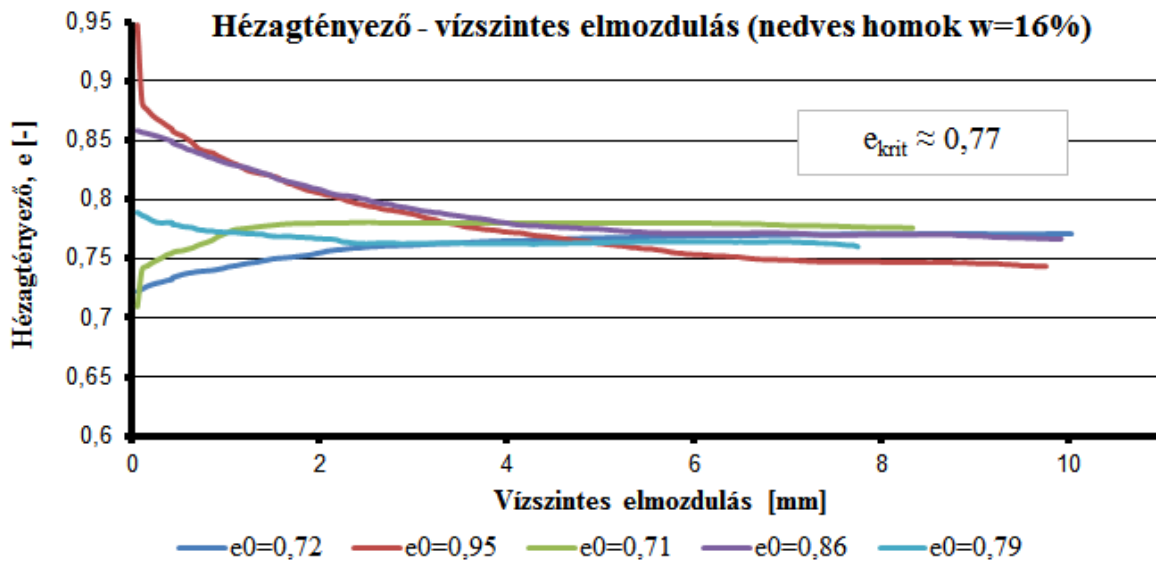


42. ábra: Nyírási alakváltozási görbék

Azonos kezdeti feszültségállapotú és azonos víztartalmú homokok nyírásakor bármekkora is volt a kezdeti tömörség, a nyírás során kialakuló tömörség egyazon konstans értékhez közelített.

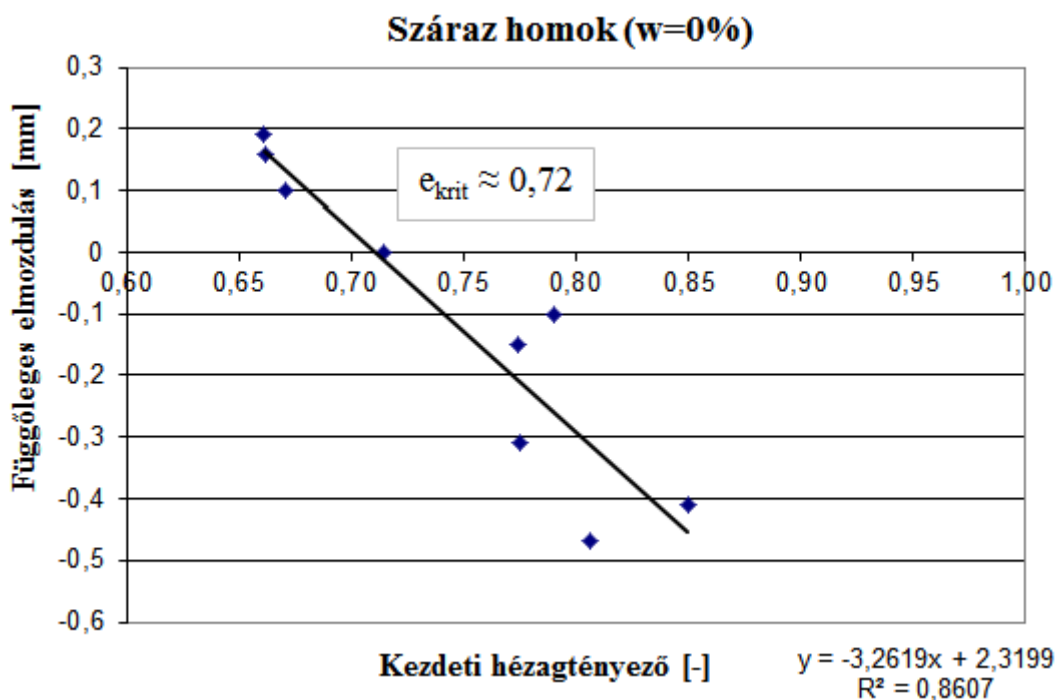


43. ábra: Hézagtenyező változása a nyírási elmozdulások során (száraz homok)

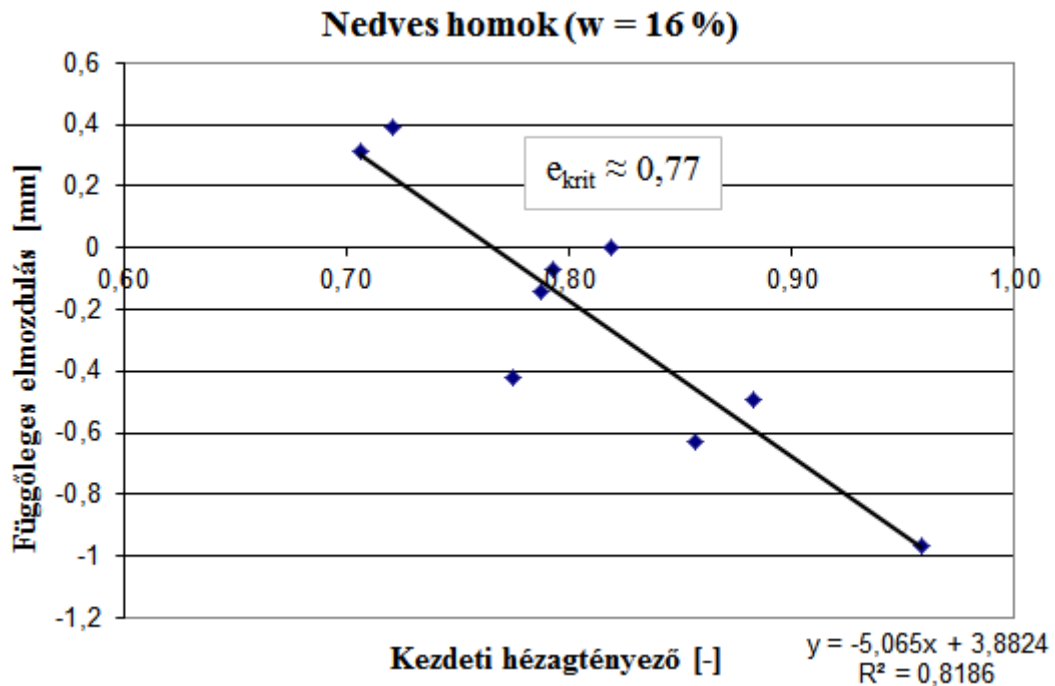


44. ábra: Hézagtérféyző változása a nyírási elmozdulások során (nedves homok)

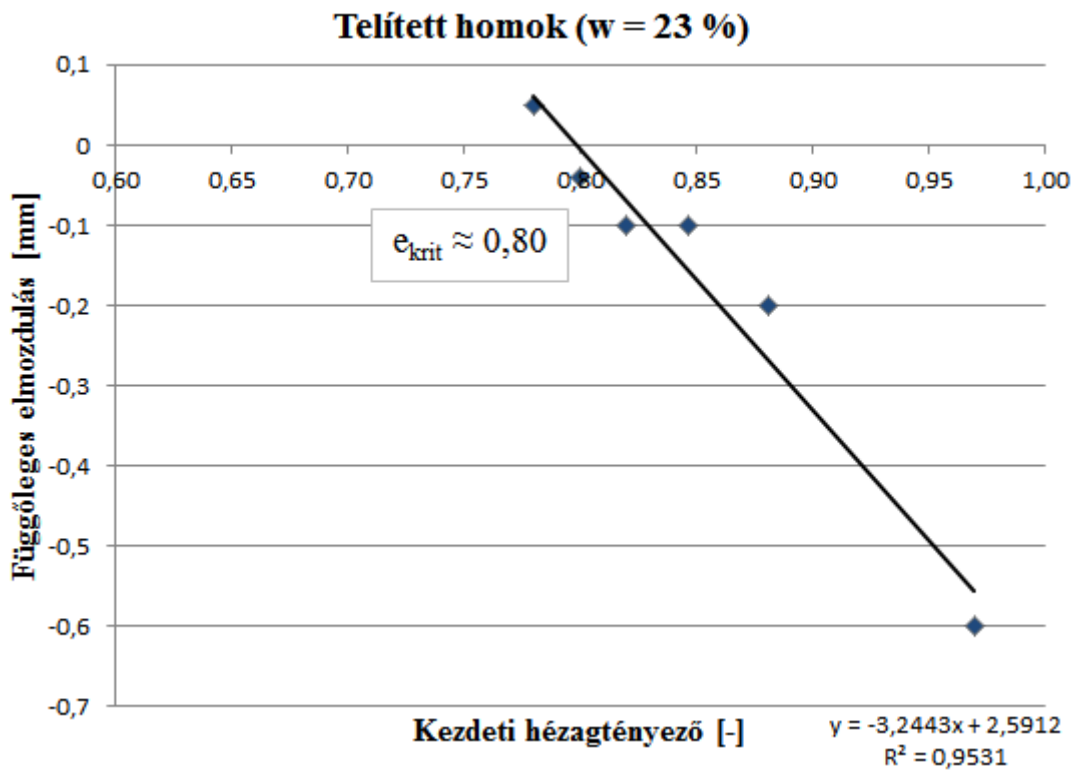
A kritikus hézagtérféyzőt úgy is megfogalmazhatjuk, hogy az ennél nagyobb kezdeti tömörségű homokok fellazulnak, az ennél kisebb tömörségűek pedig összetömörödnek. Ezt kihasználtuk a méréseink során. Ugyanazt a homokmintát különböző tömörségek mellett is elnyírtuk a nyíródobozban. Minden kezdeti hézagtérféyzőhöz hozzárendeltük azt a függőleges elmozdulást, amely a nagy elmozdulások tartományában állandósult. Az eredményeket ábrázolva a függőleges elmozdulás - kezdeti hézagtérféyző diagramon, és a pontokra egyenest illesztve, az egyenes x tengellyel való metszéspontja (ahol a térfogatváltozás zérus) lesz a kritikus hézagtérféyző.



45. ábra: Kritikus hézagtérféyző megállapítása a minták térfogatváltozása alapján



46. ábra: Kritikus hézagtényező megállapítása a minták térfogatváltozása alapján



47. ábra: Kritikus hézagtényező megállapítása a minták térfogatváltozása alapján

A három eltérő víztartalmú minta kritikus hézagtényezőjéből arra lehet következtetni, hogy a víztartalom növekedésével, a kritikus hézagtényező értéke kismértékben növekszik.



## 9. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatunkban összefoglaltuk a talajfolyósodással kapcsolatos alapvető ismereteket. Bemutattuk a folyósodás fizikai hátterét, a jelenség laboratóriumi vizsgálatának lehetőségeit. Áttekintést adtunk a manapság elterjedtebb, helyszíni vizsgálatok (SPT, CPT) eredményein alapuló talajfolyósodási veszély kiértékelésére szolgáló módszerekről. Ezen eljárások többsége determinisztikus, de ma már akadnak valószínűségi alapokon nyugvó eljárások is. Szemléltettük a folyósodás következményeit, hatásait az épített környezetre. A hazánkban is érvényben lévő Eurocode-8 szabvány szerint a tervezés során a talajfolyósodás bekövetkezésének lehetőségével számolni kell. Ezért bemutattuk, hogy a mérnöknek mit kell vizsgálnia a megfolyósodással kapcsolatban. Több módszert is ismertettünk a folyósodással szembeni ellenállás növelésére.

A közvetlen nyírókísérlettel végzett mérésünk a kritikus hézagtenyező meghatározására azért fontos a mérnök számára, mert a kritikus hézagtenyező segítséget nyújt a talaj folyósodási hajlamának értékelésekor. A Casagrande által 1936-ban kidolgozott elmélet alapján a kritikus hézagtenyezőnél nagyobb hézagtenyezővel rendelkező (lazább) talajok ugyanis folyósodásra hajlamosak, míg az ennél tömörebb talajok kevésbé hajlamosak a megfolyósodásra. Méréseinkkel a két állapot közötti, ún. kritikus hézagtenyezőt határoztuk meg. Megállapítottuk, hogy a kritikus hézagtenyező értéke függ a talaj víztartalmától is. Bár ezen vizsgálat reprodukálhatósága nem tűnik olyan megbízhatónak, mint a helyszíni mérések eredményei, azért jó tájékozási értéket ad. Casagrande azt feltételezte, hogy megfolyósodás csak a kritikus hézagtenyezőnél nagyobb hézagtenyezőjű talajokban alakulhat ki, az azóta bekövetkezett földrengések azonban azt mutatják, hogy kisebb hézagtenyezővel rendelkező talajok is megfolyósodhatnak.

### *Későbbi terveink:*

Amíg a talaj folyósodási hajlamát megállapító, és a folyósodással szembeni biztonságot kimutató eljárások jól megalapozottak és verifikáltak, addig a talajfolyósodás következményeit ma még nehezen tudjuk becsülni. Ezért a továbbiakban érdemes lenne a megfolyósodás bekövetkezése utáni eseményeket alaposabban tanulmányozni. Többek között értékes eredmény lenne a folyósodás során bekövetkező elmozdulások számítására kidolgozott eljárás.



## FÜGGELÉK

### Földrengéssel kapcsolatos fogalmak

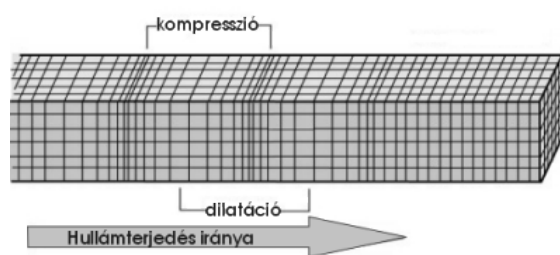
A *földrengés* a Föld felszínének hirtelen rázkódása, amely a Föld szilárd burkát alkotó kőzetekben felhalmozódott feszültség által okozott törés illetve hirtelen elmozdulás következménye.

A földrengéseket az esetek túlnyomó többségében törési felületek mentén elmozduló kőzetblokkok okozzák. A *törésvonalak* a törési felületek földfelszínről látható megnyilvánulásai. *Hipocentrumnak* nevezzük a földrengés kipattanási helyét, míg *epicentrumnak* a földfelszín azon pontját, ami közvetlenül a hipocentrum felett van. A földrengés által okozott károk itt a legjelentősebbek.

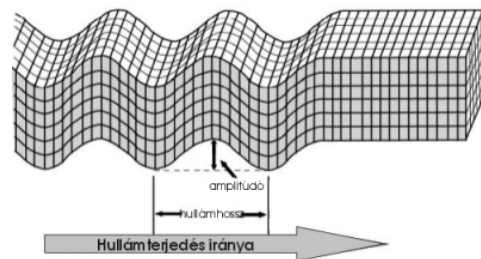
A földrengéskor felszabaduló energia rugalmas hullámokat, földrengéshullámokat kelt, amely hullámok különböző útvonalakon haladva eléri a Föld felszínét. E hullámok alkalmas műszerrel, a szeizmográfval, nagy távolságban is regisztrálhatók.

*Szeizmográf*nak nevezik azt a földrengésjelző műszert, amely regisztrálja a talajelmozdulások nagyságát az idő függvényében. További, földrengéshullámok regisztrálására alkalmas műszer a gyorsulásmérő (strong motion seismometer).

A földrengés során keletkező rugalmas hullámok két fő csoportba sorolják aszerint, hogy képesek-e áthaladni a Föld belsején, vagy sem. A keresztülhatolni képes hullámokat térhullámoknak nevezzük, ezeknek két altípusa van: longitudinális (P, primer) és transzverzális (nyíró-) hullámok (S, szekunder).

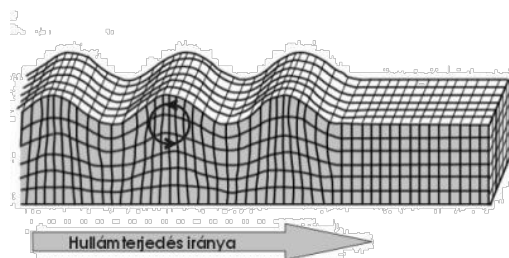


Longitudinális (nyomási, P) hullám

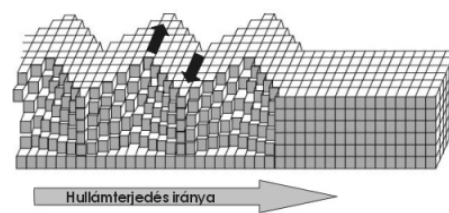


Transzverzális (nyírési, S) hullám

A Föld belsején áthaladni nem tudó, csakis a felszínen haladni tudó hullámokat felületi hullámoknak nevezzük. A felületi hullámoknak két típusa a Rayleigh és a Love típusú felületi hullám.



Rayleigh típusú felületi hullám



Love típusú felületi hullám





*Magnitúdónak* nevezzük a földrengés erősségének műszeres megfigyelésén alapuló mérőszámát. A magnitúdó skálák logaritmikusak, így közelítőleg egy egység magnitúdó növekedés mellett a földrengés energiája a 30-szorosára nő.

*Richter (lokális) magnitúdó* -  $M_L$ : Richter amerikai szeizmológus vezette be kaliforniai rengések összehasonlíthatósága érdekében. A szeizmográfól 600 km-re lévő földrengéseket lehet vele mérni, nagyobb rengések esetén erősen alábecsüli a földrengés nagyságát.

*Térhullám magnitúdó* -  $M_B$ : melyet a P hullám amplitúdójának felhasználásával számítanak.

*Felületi hullám magnitúdó* -  $M_S$ : melyet ugyanazok a kutatók fejlesztettek, mint a lokális magnitúdót. A felületi hullám magnitúdót az erősebb földrengések pontosabb mérésére alkalmazzák. Manapság ezt az amplitúdót használják Kínában. Számításához a Rayleigh-hullámot amplitúdóját mérik.

*Momentum magnitúdó* –  $M_W$ , illetve  $M$ : manapság ezt a magnitúdót alkalmazzák a leggyakrabban. Ezt a magnitúdót a földrengés során keletkező törés fizikai méretéből számítják.

A mérnökök a gyakorlatban a földrengés hatását leggyakrabban a földrengés által okozott maximális vízszintes talajgyorsulással (PGA – Peak Ground Acceleration) jellemzik.

### **Talajfolyósodással és talajmechanikával kapcsolatos fogalmak**

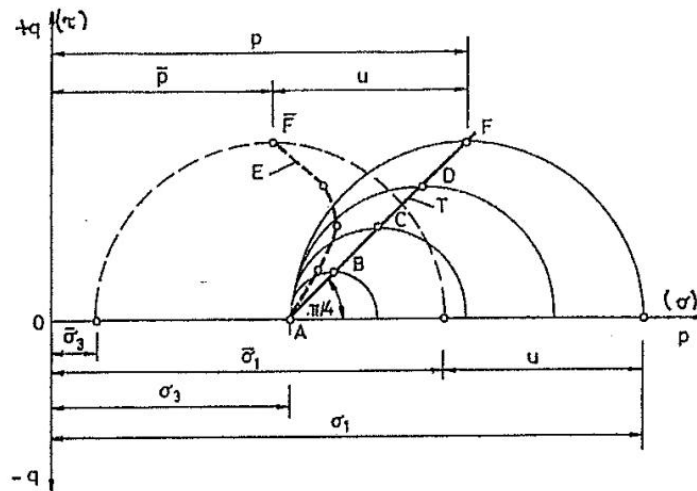
*Megfolyósodás (liquefaction)* – a vízzel telített, kohézió nélküli anyagokban a földrengés közben fellépő pórusvíznyomás-növekedés okozta oly mértékű szilárdság- és/vagy állékonyságcsökkenés, amely már jelentős tartós alakváltozásokat vagy zéró közeli hatékony feszültségekkel jellemezhető állapotot eredményez.

*Pórusvíznyomás tényező (pore-pressure ratio),  $r_u$* , - a folyósodás során megnövekedett pórusvíznyomás aránya a kezdeti hatékony feszültséghez, általában %-ban kifejezve. Értéke zérus a földrengés kezdetén, illetve 100%, amennyiben a hatékony feszültség zérus.

*Kezdeti megfolyósodás (initial liquefaction)* – az az állapot, mikor a talajban hatékony feszültség akár pillanatnyilag is zérus közeli állapotot ér el (azaz a pórusvíznyomás tényező 100 %). A talaj merevsége ekkor nagyon alacsony.

*Reziduális (maradó) nyírószilárdság (residual strength)* – a folytonos alakváltoztatáshoz tartozó nyírószilárdsági végérték.

*Feszültségpálya* – A feszültségi pálya fogalmát a Mohr-féle feszültségábrázolásból kiindulva lehet definiálni.



48. ábra: Feszültségpályák értelmezése (Kabai, [6])

Hidrosztatikus feszültségállapotból ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) kiindulva növeljük a deviátor feszültséget, ekkor B, C, D, F főfeszültségi köröket kapjuk. Így egy feszültségállapotot egyetlen ponttal, a maximális nyírófeszültséghez tartozó ponttal jellemezhetünk. Ennek a pontnak a koordinátái megadhatók a teljes feszültség függvényében:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

és a hatékony feszültségek függvényében:

$$p' = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + u \quad q' = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Amennyiben az egymást követő főfeszültségi körök maximális nyírófeszültségeihez tartozó pontokat összekötjük, a feszültségi pályát kapjuk.



## JELÖLÉSRENDSZER

A könnyebb áttekinthetőség, illetve a félreértések elkerülése érdekében témakörönként csoportosítva összegyűjtöttük a dolgozatban használt jelöléseket, és azok jelentéseit:

### Talajmechanikai jelölések

$e$	hézagtényező
$I_d$	tömörégi index (EC előtt: $T_r$ relatív tömörség)
$r_u$	pórusvíznyomás tényező
$w_L$	folyási határ
$I_L$	relatív folyási index
$\sigma_{v0}$	teljes függőleges feszültség
$\sigma'_{v0}$	hatékony függőleges feszültség

### Helyszíni vizsgálatok

$(N_1)_{60}$	korrigált ütésszám (SPT)
$q_{1cs}$	korrigált csúcsellenállás (CPT)
$v_s$	nyíróhullám sebesség

### Megfolyósodási veszély értékelése

CSR	ciklikus feszültség arány
CRR	ciklikus ellenállás arány
MSF	magnitúdó skálatényező
$r_d$	mélység miatti redukciós tényező
FS	folyósodással szembeni biztonság

### Földrengés jellemzői

$M_w, M$	momentum magnitúdó
$M_s$	felületi hullám magnitúdó
$M_L$	Richter (lokális) magnitúdó
$a_{max}$	maximális felszíni gyorsulás

### Eurocode 8

$a_{g,R}$	sziklán megadott referencia gyorsulás
$a_g$	sziklán megadott maximális tervezési gyorsulás
$\gamma_I$	fontossági tényező
S	talajszorzó

### Megfolyósodási veszély értékelése

w	víztartalom
$\rho_s$	anyagsűrűség
$\rho_n$	nedves térfogatsűrűség
$e_0$	kezdeti hézagtényező
$e_{krit}$	kritikus hézagtényező
$\tau_{max}$	nyírószilárdsági csúcserték
$\tau_v$	reziduális nyírószilárdság

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] U.S. Geological Survey, Historic Earthquakes: Niigata, Japan, [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1964\\_06\\_16.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1964_06_16.php)  
Hozzáférés dátuma: 2012. 10. 08.
- [2] **Kramer, S. L.; Elgamal A. -W.**, Modeling Soil Liquefaction Hazards for Performance-Based Earthquake Engineering
- [3] **Cakmak, Sefik A.** , Soil dynamics and liquefaction, Computational Mechanics Publ., Mexico 1989
- [4] **Zeghal, M., and Elgamal, A.-W.** (1994). Analysis of site liquefaction using earthquake records. *J. Geotechnical Engineering* 120(6): 996–1017. ASCE.
- [5] **Ishihara, K.** (1993). “Liquefaction and Flow Failure During Earthquakes.” *Geotechnique*, vol. 43, no.3, London, England, pp. 351-415.
- [6] **Kabai I.** : Geotechnika I., Műegyetemi Kiadó, 2006
- [7] **Castro, G.** (1969), „Liquefaction of Sands”, Harvard Soil Mechanics Series No. 81, Harvard University 15: 523–47.
- [8] **Seed, H. B.**, (1979). Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. *J. Geotechnical Engineering Division* 105(GT2): 201–55. ASCE.
- [9] **Tang, L.; Xu P.; Ling X.; Gao X.** (2008) Shaking table test and numerical simulation for seismic soil-pile bridge structure interaction in liquefiable ground. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China
- [10] **Ishihara, K., and Koseki, J.** (1989) “Cyclic Shear Strength of Fines-Containing Sands”. Earthquake and Geotechnical. Engrg., Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 101-106
- [11] **Seed, H. B., Lee, K. L., Idriss, I. M., and Makdisi, F. I.** (1975). The slides on the San Fernando dams during the earthquake of February 9, 1971. *J. Geotechnical Engineering Div.* 101(7): 651–88. ASCE.
- [12] **Day, R. B.** : Geotechnical Earthquake Engineering Handbook, McGraw-Hill, 2002
- [13] **Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F. III, Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., and Stokow, K.H. II** (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127(10): 817–33.
- [14] **Stark, T.D.; Olson, S.M.** (1995): Liquefaction resistance using CPT and field case histories. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 121(12), 856-869.



- [15] **Liao, S. S. C., Veneziano, D., Whitman, R.V.** (1988): Regression Models for Evaluating Liquefaction Probability”m Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 4, pp. 389-409.
- [16] **Dobry, R. Ladd, R.S., Yokel, F.Y, Chung, R.M., Powell D.** (1982): Predictions of Poere Water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands During Earthquakes by the Cyclic Strain Method, National Bureau of Standards, Building Science Series, U.S. Dept of Commerce.
- [17] **Nemat, Nasser S.; Shokooh, A.** (1979): A new approach for the analysis of liquefaction of sandi in cyclic shearing, Northwestern University, Dept. of Civil Engineering, 17p
- [18] **Kayen, R.,E., and Mitchell, J.K.,** (1997): “Assessment of Liquefaction Potential During Earthquakes by Arias Intensity,” in Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Dec. 1997, pp. 1162-1174.
- [19] **Galli, P.** (2000), New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction, Tectonophysics
- [20] **Rauch, Alan F.** EPOLLS: An Empirical Method for Prediciting Surface Displacements Due to Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Earthquakes, doktori disszertáció.  
<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-219182249741411/>  
Hozzáférés dátuma: 2012. október 21.
- [21] EN 1998-5 Eurocode 8 (Final draft): Design of structeres for earthquake resistance, Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects
- [22] **Kamalesh, K.,** (2008): Basic Geotechnical Earthquake Engineering, New Age International, New Delhi.
- [23] **Swami S.** (1999): “Soil dynamics and machine foundations” Galgotia Publications, New Delhi.
- [24] **Nagy L.:** Infrastruktúrák földművei, előadásjegyzet,  
[http://www.gtt.bme.hu/gtt/oktatas/feltoltesek/BMEEOGTMIT5/infra\\_foldmu\\_jegyzet\\_2.pdf](http://www.gtt.bme.hu/gtt/oktatas/feltoltesek/BMEEOGTMIT5/infra_foldmu_jegyzet_2.pdf)  
Hozzáférés dátuma: 2012. október 20.