



Közúti infrastruktúra elemeinek szeizmikus teljesítőképességének vizsgálata

Hübner Balázs¹, Mahler András¹

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnika és
Mérnökgeológia Tanszék

E-mail: hubner.balazs@epito.bme.hu, mahler.andras@epito.bme.hu

DOI: [10.36246/UL.2020.1.04](https://doi.org/10.36246/UL.2020.1.04)

KIVONAT

Hazai gyakorlatban a földrengésre való méretezést az Eurocode-8, illetve annak nemzeti mellékletei szabályozzák, melyek a különböző infrastruktúra szerkezetek méretezése során első sorban a tönkremenetellel szembeni biztonság meghatározását célozzák. A különböző infrastruktúra és vízépítési műtárgyakhoz kapcsolódóan a szerkezetek használhatósága már a tönkremenetelt megelőzően is korlátozódhat, ezért a biztonsági tényező meghatározása mellett fontos a szeizmikus teher hatására történő várható elmozdulások és a szeizmikus teljesítőképesség ismerete is. Az elmozdulásokat talajválasz elemzés eredményeként határozhatjuk meg. A különböző elmozdulásokat a károk mértékétől függően károsztályokba sorolva, az egyes károsztályok meghaladási valószínűségét meg lehet határozni. Ezt a meghaladási valószínűséget különböző intenzitású szeizmikus hatások esetére a sérülékenységi görbék fogják jellemezni. Cikkünkben bemutatjuk a talajválasz elemzés lehetséges módszereit, különös tekintettel a véges elemes módszerekre, majd egy esettanulmányon keresztül bemutatunk egy, a sérülékenységi görbék meghatározását célzó módszertant.

Kulcsszavak: talajválasz elemzés, földrengés, sérülékenység

ABSTRACT

In domestic practice, the earthquake design is governed by Eurocode-8 and its National Annexes, which are primarily used to determine the safety against failure during the design of various infrastructure elements. The serviceability of these structures may be limited even before their failure, therefore it is important to know not only the safety factors, but also the expected displacements and performance of the structure under seismic loading. These displacements can be determined based on ground response analysis. Classifying the various displacements into damage classes depending on the extent of damage, it is possible to determine the probability of exceeding the damage classes. This probability of exceedance for different seismic intensity is characterized by the seismic fragility curves. In this paper, possible ways for ground response analysis will be presented, with particular emphasis on finite element methods. A practical method to determine the fragility curves will be presented through a case study.

Keywords: Ground response analysis, earthquake, fragility

Hübner Balázs

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének doktorandusz hallgatója. Kutatási területe a talaj és szerkezet kölcsönhatásának véges elemes vizsgálata szeizmikus teher hatására.

Dr. Mahler András

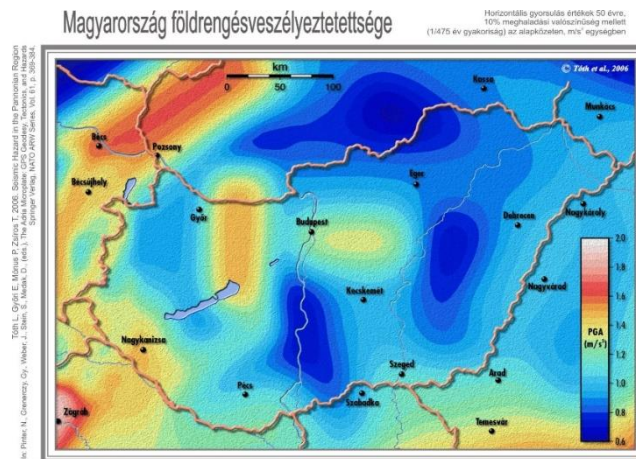
A Magyar Geotechnikai Egyesület elnöke, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének docense. Többek között a talajfolyósodás jelenségének vizsgálata, talajválás elemzés és a telítetlen talajok viselkedése tartozik kutatási területei közé.

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedben a nemzetközi szakirodalomban a korábbinál nagyobb figyelem fordult a mérnöki szerkezetek szeizmikus teherre való méretezésére, aminek eredményeként több nemzetközi együttműködés is indult újfajta vizsgálati módszerek kidolgozására, melyek segítségével a földrengések hatásai jellemezhetőek. A mérnöki gyakorlatban a magasépítési szerkezetek földrengésre való teljesítőképességének vizsgálatára bevett módszerek léteznek, ugyanakkor a közúti infrastruktúra különböző szerkezeteinek, földműveinek vizsgálata a mai napig jellemzően egyszerűsített, pszeudostatikus módszerekkel történik, annak ellenére, hogy ezen a szerkezetek vizsgálatára a nemzetközi szakirodalomban számtalan javaslat lelhető fel. Az infrastruktúra különböző elemeinek vizsgálata, a vizsgálati módszerek pontosítása különösen fontos lehet egy szeizmikus esemény bekövetkezése esetén, ugyanis ezek adják legtöbb esetben a mentési munkálatok elsődleges útvonalait. Ahhoz, hogy az építményeink szeizmikus teljesítőképességét számszerűsíteni lehessen, a várható károk mértékét, azok bekövetkezésének valószínűségét kell megbecsülnünk. Erre az egyik legelterjedtebb módszer az egyes szerkezetek sérülékenységi görbéinek meghatározása, melyek valamely szeizmikus intenzitásparaméterhez tartozóan különböző kárstípusok meghaladási valószínűségét mutatják meg. A görbék előállítása bevett gyakorlat magasépítési szerkezetek esetén, infrastruktúra földművek esetén azonban hazai gyakorlatban a szeizmikus hatások vizsgálatában kevés hangsúlyt kap. A görbék meghatározásához szeizmikus talajválás elemzésre van szükség. Erre a mai napig leggyakrabban alkalmazott módszerek az ekvivalens lineáris, illetve a nemlineáris, egydimenziós elemzések, melyek azonban nem képesek a különböző szerkezetek geometriájának a hatásának a figyelembe vételére. Infrastruktúra szerkezetek vizsgálatához jellemzően legalább 2 dimenziós elemzést kell végrehajtani, mely jellemzően véges elemek vagy véges differenciák módszerén alapuló számításokat jelent. A talajválás elemzés alapján meghatározhatók az egyes szerkezetek különböző szeizmikus intenzitás melletti viselkedése, majd erre alapozva a sérülékenységi görbék előállíthatók.

2. FÖLDRENGÉS-VESZÉLYEZTETETTSÉG

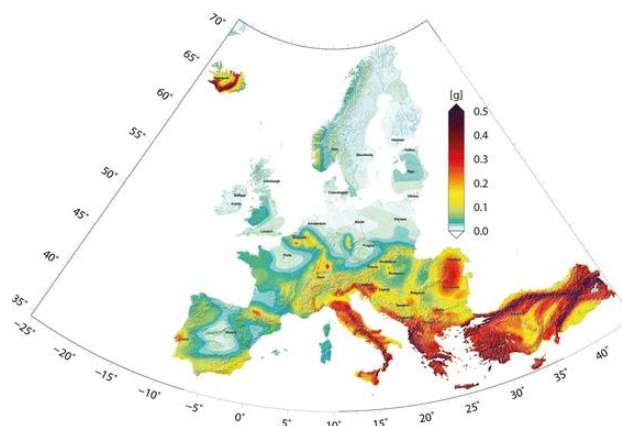
A különböző tartószerkezetek földrengésre való tervezése során bevett módszer az Eurocode-8-ban meghatározott, 5%-os szerkezeti csillapításhoz tartozó rugalmas válaszspektrumok alkalmazása az adott szerkezet szeizmikus válaszána vizsgálatára. Ezek a válaszspektrumok különböző periódusidejű, egyszabadságfokú rendszerek által elszűnvedett legnagyobb gyorsulások burkológörbéi, melyek alapján a különböző szerkezetek szeizmikus terhekre való válasza meghatározható. Az analízis alapjaként szeizmikus veszélyeztetettségi analízisek eredményeként meghatározott, alapköveti gyorsulások értékei, valamint az alapkövetre jellemző válaszspektrum alakja szolgál. Különböző rézsűkre, illetve bevágásokra vonatkozóan a szabvány megengedi a véges elemek és véges differenciák, valamint merev blokkok elcsúszásának elvén való analízist (MSZ EN 1991-1-7, 2006), ezek mellett pedig lehetőséget ad egy ezektől jelentősen egyszerűbb, pszeudostatikus vizsgálat elvégzésére. Hasonló módszerek állnak rendelkezésre nagyobb vízépítési műtárgyak, pl. völgyzárógáták szeizmikus vizsgálatára is (Nagy & Illés 2020). A földrengésveszélyeztetettség tartószerkezetek és különböző infrastruktúra és vízépítési földművek esetén is az Eurocode 8 nemzeti mellékletében meghatározott szeizmikus zónatérképpel (MSZ EN 1991-1-7 NB, 2006) vehető figyelembe, mely a 475 éves visszatérési idejű, alapkövetre megadott horizontális gyorsulások értékeit mutatja be. A szabványban bevezetett zónatérkép az 1. ábrán látható földrengésveszélyeztetettségi térképen alapul (Tóth et al., 2006).



1. ábra: Magyarország földrengésveszélyeztetettsége 475 éves visszatérési idejű alapkőzeti horizontális gyorsulások értéke (Tóth et al., 2006)

Hasonló alaptérképek más országokban is elérhetők, azonban a jelenlegi szabályozások nem biztosítják az országhatárokon az azonos gyorsulási értékeket így olyan esetek is előfordulnak, hogy az országhatárt átlépve az alapkőzeti gyorsulások jelentősen csökkennek vagy növekednek. Ennek az ellentmondásnak a feloldását célozta meg a SHARE projekt (Giardini et al., 2014), mely eredményeinek mérnöki gyakorlatba való átvezetése azonban még a jövőbeni szabályozások feladata.

A földrengések intenzitásának jellemzésére leggyakrabban a legnagyobb gyorsulás (Peak Ground Acceleration, PGA) értékét alkalmazzák a szakirodalomban, a hazai földrengésveszélyeztetettségi térképek is ezt a jellemzőt adják meg. A legnagyobb gyorsuláson túl azonban az adatsor idő szerinti integrálásával a rögzített sebességek, valamint elmozdulások adatsora is meghatározható. A rögzített legnagyobb elmozdulás értékével (Peak Ground Displacement, PGD) többek között a szerkezetek által elszenvedett elmozdulások is jellemezhetőek, mely töltések és rézsúk vizsgálatának alapjául szolgálhat. A PGA értéke mutatja az egyes rengések során rögzített legnagyobb gyorsulás értékét, ugyanakkor nem alkalmas a földrengés során felszabaduló energia meghatározására. Ennek a jellemzésére többek között az Arias-intenzitás (Ia), vagy az összegzett abszolút sebesség (CAV) alkalmazható (Kramer, 1996).



2. ábra: Share projekt keretében meghatározott ESHM13 modell 475 éves visszatérési idejű alapkőzeti horizontális gyorsulások értékeivel (Woessner et al., 2015)

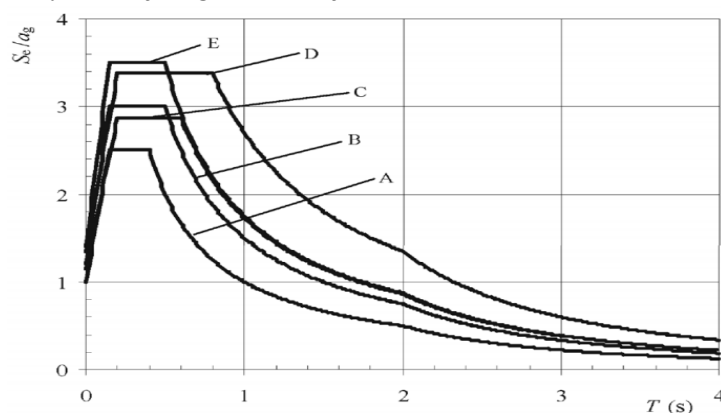
Mérnöki értelemben alapkőzetként a 700-800 m/s-nál magasabb nyíróhullám terjedési sebességgel rendelkező kőzeteket tekintjük (a SHARE projekt, illetve a hazai szabályozások is 800 m/s értéket vesznek figyelembe). Általánosságban a nem kőzetszerű viselkedést mutató talajok nyíróhullám terjedési sebessége ennél jelentősen alacsonyabb, alapkőzetként jellemezhető talajokat csak akár 60 m-nél is nagyobb mélységekben találunk különböző hazai talajrétegződéseket vizsgálva. A felszín felé

csökkenő nyíróhullám terjedési sebesség módosítja az alapkőzet felől érkező rengéshullámokat, melyek hatását a jelenlegi szabályozásokat követve az Eurocode 8-ban meghatározott talajszorzókkal vehetjük figyelembe. A talajszorzók értéke alapvetően az adott helyszíni talajrétegződés felső 30 m-es mélységében jellemző átlagos nyíróhullám terjedési sebesség ($V_{s,30}$) alapján határozható meg. A mérnöki gyakorlatban csak ritkán készülnek olyan vizsgálatok, melyek célja a nyíróhullám-terjedési sebesség mérése, ezért a szabvány a rétegsor rövid leírásával, valamint egyéb, egyszerűbb, és jellemzően olcsóbban elvégezhető módszerekkel is meghatározható paramétereket is megad az egyes talajosztályokhoz.

1. táblázat: Eurocode 8-ban meghatározott talajosztályok (MSZ EN 1997-1-7, 2006)

Általajosztály	Leírás	Paraméterek		
		$V_{s,30}$ (m/s)	N _{SPT} (ütés/30cm)	c_u (kPa)
A	Szilárd kőzet vagy kőzetszerűen viselkedő geológiai képződmény, amely felett legfeljebb 5m gyengébb van	> 800	-	-
B	Nagyon tömör homok-, kavics-, vagy kemény agygrétegek, legalább több 10 m vastagságban, a mechanikai jellemzők a mélységgel fokozatosan növekednek	360 – 800	> 50	> 250
C	Tömör vagy közepesen tömör homok-, kavics- vagy merev agygrétegek, több tíz vagy akár több száz m vastagságban.	180 - 360	15 – 50	70 - 250
D	Laza vagy közepesen tömör kohézió nélküli talaj (némi puha kötött réteggel vagy anélkül), vagy túlnyomóan puha – gyúrható kötött talaj	<180	< 15	< 70
E	Felszíni üledékréteg, amely a V_s értékek szerint C vagy D osztályú, 5-20 m vastagságú, alatta 800 m/s-nál nagyobb nyíróhullám-sebességű, merevebb agyag			
S₁	Puha agyagból/iszapból álló vagy legalább egy 10 m vastag agyagot/iszapot tartalmazó, nagy plaszticitású ($I_p > 40$) és víztartalmú rétegek	<100	-	10 - 20
S₂	Folyósodásra hajlamos talajok, érzékeny agyagok vagy más olyan talajrétegek, amelyek nem sorolhatók az A-E vagy S1 osztályba			

A különböző talajosztályokhoz különböző alakú válaszspektrumok tartoznak, melyek fő paramétereit alapvetően a jellemző periódusidők, valamint a különböző talajszorzók határozzák meg. A talajokra vonatkozó paramétereken túl a szerkezetek duktilitása, fontossági osztálya, valamint a szerkezeti csillapítás mértéke befolyásolhatja a görbék alakját.



3. ábra: MSZ EN 1998-ban meghatározott válaszspektrumok a talajosztályokhoz (MSZ EN 1991-1-7, 2006)

2. táblázat: Általajosztályokhoz tartozó talajtényezők (MSZ EN 1991-1-7, 2006)

Talajosztály	S talajtényező
A	1,00
B	1,20
C	1,15
D	1,35
E	1,40

Különböző rézsűk pszeudostatikus vizsgálata esetén a szeizmikus terhet a talajtömegre ható függőleges és vízszintes erőként kell figyelembe venni az Eurocode-8 javaslatait követve. A vízszintes teher (F_h) értéke az alapközeti gyorsulás (a_g), a gravitációs gyorsulás (g) és a talajszorzó (S), valamint az elcsúszó talajtömeg súlyának (W) együttes figyelembe vételével határozható meg az alábbi formában. A függőleges teher értéke a horizontális erő függvényében határozható meg.

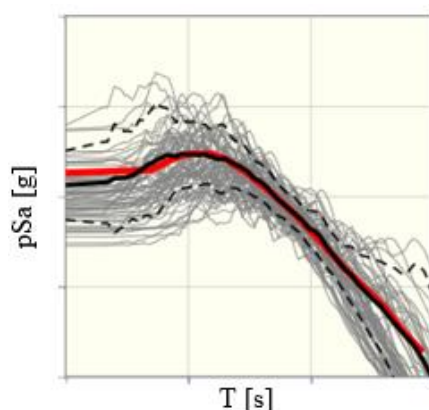
$$F_h = 0.5 \cdot \frac{a_g}{g} \cdot S \cdot W \quad (1)$$

Az előzőekben összefoglalt módszerek segítségével az adott szerkezet szeizmikus teherre való teljesítőképessége meghatározható, egy biztonsági tényező számítható. A különböző földművek, rézsűk, bevágások esetén az Eurocode-8 nem rendelkezik egyértelműen a szeizmikus hatásokra való megkövetelt biztonság értékéről, a tervezés során a tönkremenetellel szembeni biztonságot 1,25-1,35 között javasolja figyelembe venni, de a pontos érték meghatározását a tervező belátásra bízta. A közúti infrastruktúra különböző szerkezetei, illetve vízépítési földművek esetén ugyanakkor sokszor nem a tönkremenetellel szembeni biztonság, hanem a földrengések hatására elszendvedett elmozdulások nagysága a mértékadó a szerkezetek használhatósága szempontjából.

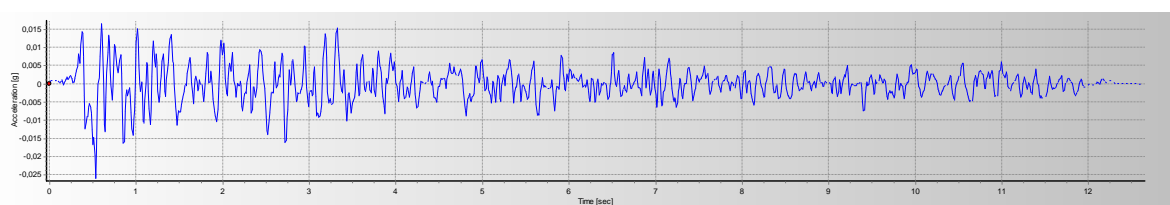
A kialakuló elmozdulások meghatározása talajválasz elemzés segítségével történik. Ebben az esetben a talajoszlop módosító hatását nem a szabványban megadott talajszorzók alkalmazásával vesszük figyelembe, hanem az adott helyszínen feltárt talajrétegződés módosító hatását vizsgáljuk különböző módszerekkel. A vizsgálat eredményeként az adott helyszínen pontosan meghatározható, hogy az alapközet felől érkező földrengéshullámok hatása (pl. gyorsulások, elmozdulások) hogyan változik a felszín felé haladva. Az ilyen jellegű talajválasz-elemzés pontosabban jellemzi a helyszíni viszonyokat, és jellemzően a szabványos módszerekhez képest alacsonyabb igénybevételeket eredményez.

3. TALAJVÁLASZ ELEMZÉS

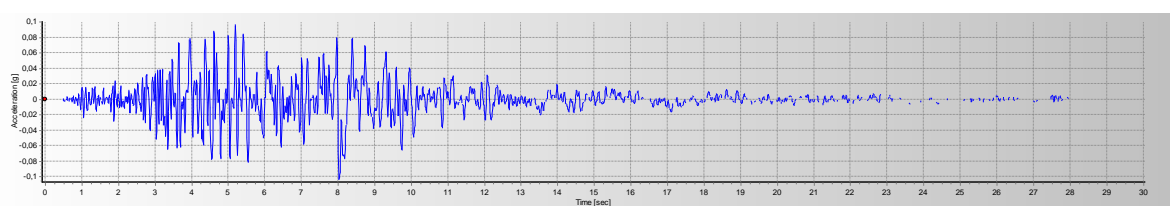
A talajválasz elemzést ebben az esetben az alapközeti válaszspektrum alakját követő földrengés-adatsorok alapján javasolt elvégezni. Különböző regisztrátumok kiválasztása számos nyilvánosan elérhető adatbázisból történhet. Európai szinten a SHARE projekt keretében kidolgozott RESORCE (Akkar et al., 2013) adatbázis foglalja össze a különböző adatbázisokban fellelhető adatsorokat, míg az amerikai földrészen a PEER, 2013 különböző adatbázisai nyújtanak hozzáférést különböző földrengés-adatsorokhoz. Ezekon felül különböző szoftverek is elérhetők, melyek segítséget nyújtanak a különböző adatbázisokhoz való hozzáféréshez. Az alkalmazott rengéseket úgy kell megválasztani, hogy azok jellemzői egybeessenek a vizsgált területen várhatóan bekövetkező földrengések különböző paramétereivel (pl. fészekmélység, epicentrális távolság, magnitúdó, törésvonal jellege, talajosztály), valamint az egyes rengések adatsora alapján számítható 5%-os szerkezeti csillapításhoz tartozó rugalmas válaszspektrum alakja a lehető legjobb egyezést mutassa az alapközeti válaszspektrum alakjával. A rengéseket javasolt „A” osztályú altalajon rögzített adatsorok közül kiválasztani, mely esetben nincs szükség további dekonvolúciós számításokra az alapközeti rengés adatsorának meghatározásához. A 4. ábra különböző regisztrátumok alapján számítható rugalmas gyorsulások válaszspektrumok illeszkedését mutatja az alapközeti válaszspektrumhoz. Az 5-6. ábrán a fentiek szerint megadott feltételeknek megfelelő idő-gyorsulás adatsorok láthatók.



4. ábra: A PEER adatbázisból megadott paramétereknek megfelelő földrengések válaszspektrumai a feltételként megadott rugalmas spektrumhoz képest (PEER, 2013)



5. ábra: San Fernando rengés



6. ábra: Northridge-01 rengés

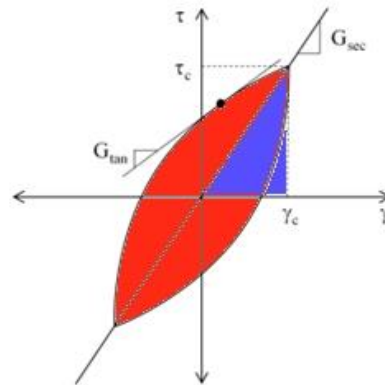
Az input adatsorok kiválasztását követően a talajválasz elemzés elvégzésre különböző módszerek állnak rendelkezésre, melyek a számítástechnika fejlődésével egyre bonyolultabbá váltak és melyek segítségével a talajok viselkedését egyre pontosabban képesek leírni. A folyamatos fejlődés ellenére azonban egyik módszer sem képes maradéktalanul leírni a viselkedést, ezért minden esetben egyszerűsítésekkel kell élnünk. A módszereket ezek alapján lineáris, ekvivalens lineáris, illetve nemlineáris módszereként szokás osztályozni. Az analíziseket általában 1D talajoszlopokra végezzük el, a talajrétegeket végtelen kiterjedésűnek és vízszintes felületűnek feltételezve. Az 1D analízisek azonban nem képesek figyelembe venni a különböző szerkezetek geometriájának miatti módosító hatásait. Amennyiben ennek a vizsgálata a cél, 2D vagy 3D analízis elvégzése szükséges. Háromdimenziós vizsgálatok jellemzően csak speciális esetekben (pl. nukleáris erőművek, kiemelt fontosságú épületek) kerülnek elvégzésre, az analízisek számítási igénye miatt jellemzően 2D vizsgálatok készülnek, melyek az infrastruktúra jellemzően vonalas szerkezetei esetén jó közelítéssel alkalmazhatók. Bár a talajok viselkedését jobban leíró módszerek is rendelkezésre állnak, a mérnöki gyakorlatban a mai napig a legelterjedtebb az ekvivalens lineáris analízisek alkalmazása.

Az egyes módszerek között a talajok viselkedésének a modellezésében lehet különbséget tenni, ezért ezek vizsgálata előtt röviden a talajok ciklikus terhelésre való viselkedését kell tárgyalnunk.

4. TALAJOK CIKLIKUS TERHELÉSRE VALÓ VISELKEDÉSE

A talajok ciklikusan ismétlődő terhelésre való viselkedését elősorban két paraméter határozza meg: a nyírési modulus és az anyagi csillapítás mértéke. Egy talajkörnyezetből kiragadott elemi hasáb ciklikus

teherre való viselkedése a hasábban ébredő nyírófeszültségeket és nyírási alakváltozásokat vizsgálva hiszterézises viselkedést mutat, a nyírási alakváltozások változásával a nyírófeszültségek nemlineárisan változnak. A görbe meredeksége meghatározza az adott ciklusra jellemző nyírási modulus (érintő- (G_{tan}) , vagy húrmodulus (G_{sec})) értékét. A görbe alatti terület pedig az energiadisszipáció mértékét mutatja meg.



7. ábra: Feszültségpálya tehermentesítés - újratelhelés ciklus során

Egy ciklus alatti energia-vesztés mértékét a csillapítási tényező jellemzi, mely a disszipált és a teljes energia arányát fejezi ki. A disszipált energia a hiszterézisgörbe területe, a teljes energia pedig a húrmodulus alatti terület. A húrmodulus a következőképpen fejezhető ki:

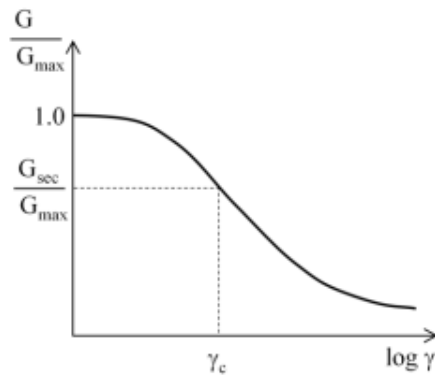
$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \tag{2}$$

,ahol τ_c a nyírófeszültség, γ_c pedig a nyírási alakváltozás egy ciklusra jellemző amplitúdója. A csillapítási tényező pedig a következőképpen határozható meg:

$$\xi = \frac{\Delta W}{4\pi W} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{hurok}}{G_{sec}\gamma_c^2} \tag{3}$$

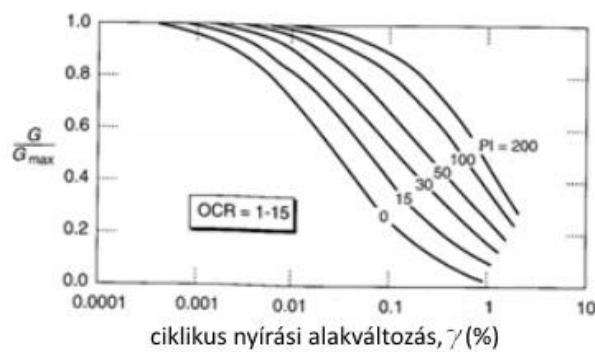
,ahol A_{hurok} a hiszterézishurok területe, G_{sec} a húrmodulus, γ_c pedig a nyírási alakváltozás amplitúdója. Az alakváltozások növekedésével a nyírási modulus értéke csökken, a csillapítási tényező értéke azonban ezzel ellentétesen növekszik.

A nyírási modulus értéke tehát a létrejövő alakváltozások függvénye, minél kisebbek az alakváltozások, annál nagyobb a nyírási modulus értéke. Növekvő ciklikus alakváltozások hatására az egyes ciklusokhoz tartozó nyírási modulus értékek megadják a modulus leromlási görbét. Zérus alakváltozás esetében a nyírási modulus értéke maximális (G_{max}) értékű. A pillanatnyi nyírási merevség értékét a maximális nyírási modulussal normalizálva a leromlási görbe általános formája állítható fel:

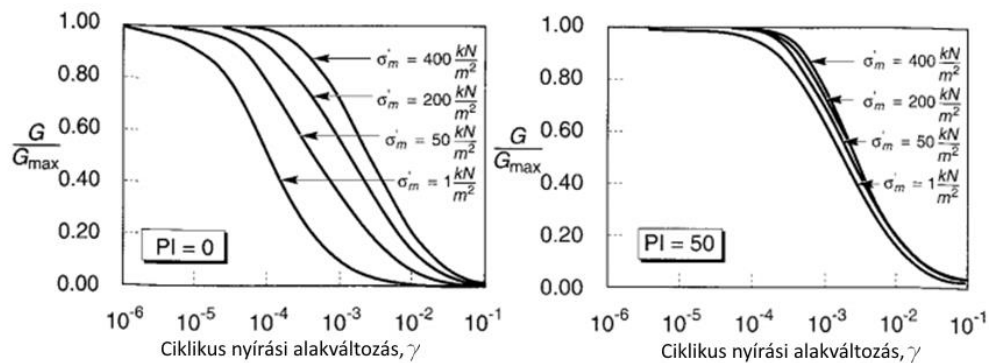


8. ábra: Nyírási modulus megváltozása az alakváltozások függvényében (Vucetic & Dobry 1991)

A kötött talajok nyírási modulusának értéke jelentősen függ a plaszticitásuktól. Laboratóriumi vizsgálatok alapján kimutatható, hogy a leromlási görbe jobbra tolódik kisebb plasztikus index és átlagos feszültségek esetén (Vucetic & Dobry 1991, Darendeli, 2001)



9. ábra: Normalizált nyírási modulus változása kötött talajok plaszticitása függvényében (Vucetic & Dobry 1991)



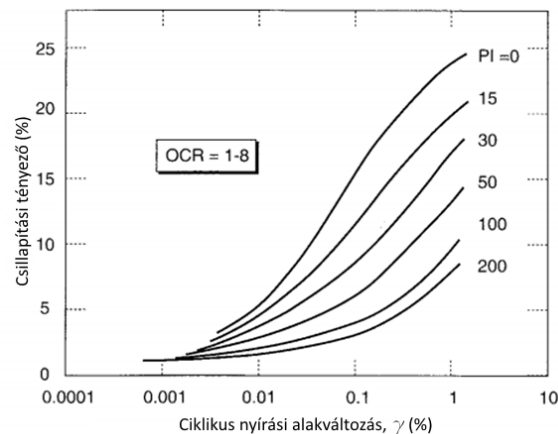
10. ábra: Normalizált nyírási modulus megváltozása az átlagos feszültségek függvényében különböző plaszticitású talajok esetén (Ishibashi & Zang 1993)

A nyírási modulus értéke helyszíni vizsgálatok alapján az adott helyszín in-situ állapotára jellemző feszültségek mellett nyíróhullám terjedési sebességek (v_s) és a sűrűség (ρ_s) alapján a következő képlettel meghatározható:

$$G_{max} = \rho_s v_s^2 \tag{4}$$

Elméleti megfontolások alapján a talajok egy lineáris viselkedéshez rendelhető alakváltozási határ alatt nem rendelkeznek csillapítással. Az elméletnek laboratóriumi mérések tapasztalatai azonban ellentmondanak, a talajok még nagyon kis alakváltozások mellett is rendelkeznek bizonyos mértékű

csillapítással. A nyírási modulus csökkenéséhez hasonlóan a csillapítási tényező értéke is jelentősen függ a plaszticitás mértékétől (Vucetic & Dobry 1991).



11. ábra: Plaszticitás hatása a csillapítási tényező megváltozására (Vucetic & Dobry 1991)

A csillapítás értékét továbbá az átlagos feszültség mértéke is befolyásolja, különösen alacsony plaszticitású talajok esetében. Ishibashi & Zhang 1993 után a csillapítási tényező kötött és szemcsés talajokra vonatkozóan is becsülhető a következő egyenlettel, ahol PI a plaszticitási indexet jelöli:

$$\xi = 0.333 \frac{(1 + \exp(-0.0145PI^{1.3}))}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right] \tag{5}$$

5. TALAJVÁLASZ ELEMZÉS MÓDSZEREI

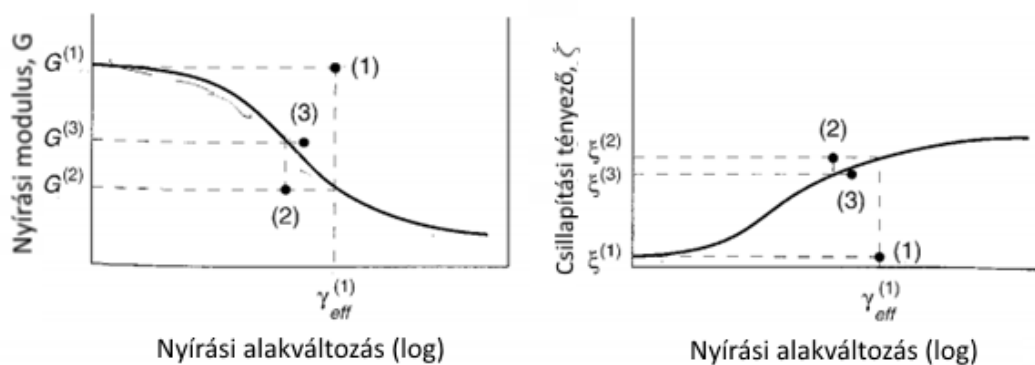
5.1. LINEÁRIS MÓDSZEREK

A talajválasz elemzés során alkalmazott lineáris modellek az előzőekben ismertetett viselkedést lineáris közelítésekkel írják le. A nyírási modulus és a csillapítás értékének viselkedése miatt ezek a lineáris közelítések csak kis alakváltozások esetén, mikor az alakváltozás növekedésével való változás még lineáris egyenletekkel megfelelően pontosan leírható, adnak elfogadható megoldást. A lineáris megoldások ebből kifolyólag csak relatív kis alakváltozásokkal járó földrengések esetén alkalmazhatók, ennek ellenére mégis meg kell említeni őket, mivel máig ezek az egyik leggyakrabban alkalmazott módszerek.

Lineáris talajválasz vizsgálat esetén az altalajviszonyok módosító hatását különböző transzferfüggvények írják le, melyek a figyelembe vett talajrétegződés felszínén meghatározott és az alapkőzetben működtetett paraméterek arányát írják le. A transzferfüggvények alkalmazását a földrengés alapkőzetben működtetett adatsorának Fourier-transzformációja teszi lehetővé, melynek segítségével a rengések bonyolult rezgésalakja különböző frekvenciájú harmonikus rezgések összegeként kifejezhető. Az így kapott rezgésalakok együtthatóit a hozzájuk tartozó transzferfüggvénnyel megszorozva a felszíni paraméterek Fourier-sorozata meghatározható, majd ennek az inverz Fourier-transzformációja megadja a módosult felszíni adatsort. Mivel a Fourier-transzformáció szuperpozícióra épül, ezért csak lineáris egyenletek és módszerek esetén alkalmazható.

5.2. EKVIVALENS LINEÁRIS MÓDSZEREK

A nemlineáris viselkedés közelítésére a lineáris számítások egyszerűségének megőrzése mellett az ekvivalens lineáris analízis ad lehetőséget, mely a számítások során alkalmazott nyírási modulus és csillapítás értékét a leromlási görbék alapján határozza meg az egyes talajrétegeket jellemző alakváltozásokkal kompatibilisen. A számítás a paraméterek iterációján alapul.



12. ábra: Ekvivalens lineáris számítás iterációs lépései (Kramer, 1996)

Habár a talajok nemlineáris viselkedése ilyen módon közelíthető, a nyírási modulus és a csillapítás értéke az analízis során továbbra is konstans értékű, annak ellenére, hogy a földrengés során az alakváltozások mértéke, ezzel együtt az ekvivalens lineáris paraméterek is nagymértékben változhatnak.

Az egyszerűsítések miatt a lineáris módszerek alkalmazása nagyobb alakváltozásokkal járó földrengések vizsgálata esetén már nem ad a valós viselkedést jól reprezentáló eredményeket, ezekben az esetekben mindenképpen bonyolultabb talajválasz elemzési módszerekhez javasolt fordulni.

5.3. NEMLINEÁRIS MÓDSZEREK

Az altalaj valós viselkedésének figyelembe vételére adnak lehetőséget a nemlineáris módszerek. Ezek a talajrétegződés módosító hatását nem a különböző frekvenciák függvényében, hanem az idő függvényében vizsgálják a Newmark-Beta integrálási séma (Newmark, 1959) alkalmazásával. A mozgásegyenletet az időben kis lépésközöket figyelembe véve integrálva bármilyen anyagmodell, legyen az lineáris, vagy bonyolultabb összefüggéseken alapuló, alkalmazható a talajválasz elemzésre. Minden lépés kezdetén a nyírási modulus leromlási görbéje segítségével meghatározható az aktuális feszültség- és alakváltozásviszonyokra jellemző nyírási modulus és csillapítás értéke, így bármilyen bonyolult talajviselkedés megfelelő lépésköz megválasztása mellett lineáris viselkedéssel közelíthető. Ezekkel a módszerekkel a földrengés során folyamatosan változó merevségi viszonyok jól jellemezhetők, bár ez a lineáris, ekvivalens módszerekhez képest jelentősen nagyobb számítási erőfeszítéseket igényel.

A gyakorlatban az adott feladat bonyolultságától függően mind a lineáris, mind az ekvivalens lineáris analízist is alkalmazzák. A számítások alapelvének eltérő volta miatt akár nagy eltérések is lehetnek a kapott eredményekben, ezért minden esetben alaposan meg kell vizsgálni az adott módszer alkalmazhatóságát, valamint a számítások eredményeit. A számítási módszerek rövid összehasonlítása a következőképpen foglalható össze:

- Az ekvivalens lineáris számítás során valótlanul nagy elmozdulások jelenhetnek meg, amennyiben az input mozgás egy jellemző, domináns frekvenciája megegyezik, vagy megközelíti a talajrétegződés rezonanciafrekvenciáját.
- Az ekvivalens lineáris és lineáris analízisek legnagyobb előnye kis számításigényükben rejlik, mely előny azonban a számítási kapacitások drasztikus fejlődésének hatására egyre inkább a háttérbe szorul.
- A nemlineáris analízis során megfelelően megválasztott anyagmodell segítségével a talajoszlop egyéb jellemzőinek megváltozása, mint a pórúsvíznyomás dinamikus hatásra való megnövekedése is figyelembe vehető, így akár a talajfolyósodás veszélye is értékelhető a számítások eredményeképpen.
- A nemlineáris anyagmodellek alkalmazása a leromlási és csillapítási görbék minél pontosabb ismeretét feltételezi, ezért ezek az analízisek jellemzően nagyobb mértékű előkészítő munkát igényelnek.

- Az egyes analízisek alkalmazhatóságát elsősorban a vizsgált földrengés hatására kialakuló alakváltozások mértéke befolyásolja. Alacsony alakváltozásszint esetén (kis magnitúdó, kis mozgások, merev altalaj) az ekvivalens lineáris és a nemlineáris számítások hasonló eredményre vezetnek, ezért ezekben az esetekben az egyszerűsége miatt az ekvivalens lineáris analízis a preferált. Nagy alakváltozások kialakulása esetén a talajrétegződés viselkedése már erős nemlinearitást mutat, ezért az ekvivalens lineáris számítások téves eredményekhez vezetnek. Ekkor mindenképpen nemlineáris analízis elvégzése szükséges.

5.3.1. VÉGES ELEMES MÓDSZEREK

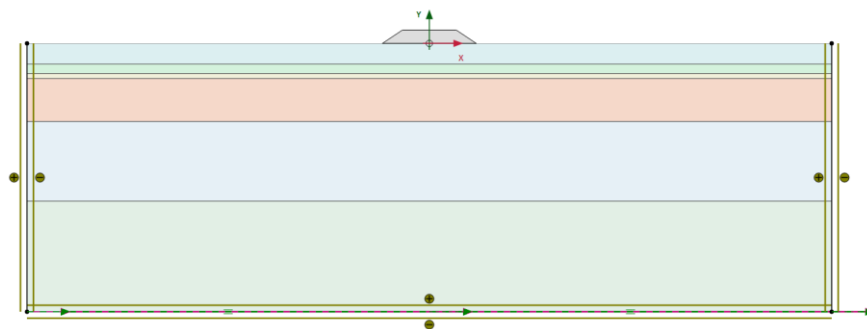
A véges elemes módszerek alkalmazása talajválasz elemzésre a számítási kapacitások drasztikus növekedésével az elmúlt évtizedben vált igazán lehetővé. A rendelkezésre álló módszerek közül a hazánkban legelterjedtebb PLAXIS 2D geotechnikai véges elemes szoftver talajválasz elemzésre való alkalmazását mutatjuk be.

A dinamikus vizsgálatokhoz alkalmazott végeselemes modell tér méretét a statikus vizsgálatokhoz hasonlóan úgy kell felvenni, hogy a modellhatárok szerepe a vizsgált tartománynál már ne érvényesüljön. Irodalmi ajánlások alapján a modellek szélesség/ mélység aránya 8 (Amorosi et al., 2010, Vrettos, 2013) – 30 (Visone et al., 2008) közötti értéket kell felvegyen ahhoz, hogy a peremfeltételek hatásai ne érvényesüljenek a modellközépen található vizsgált tartományában. Mivel a talajválasz analízis célja a talajrétegződés módosító hatásának értékelése, alapközetig gyorsulás-idő adatsorra alapozott vizsgálat esetén a talajrétegződést az alapközetig kell modellezni, mely 40-60 m-es mélységben található alapközet esetén ~300-500m szélességű modelleket is eredményezhet.

Szeizmikus analízisek esetén a véges elemes modell peremfeltételeit a vizsgálni kívánt földrengés szcenárió figyelembe vételével kell meghatározni. Földrengés-adatsor alkalmazása esetén az egyes modellperemeken viszkózus peremfeltételeket kell alkalmazni, melyek a beérkező hullámok egy részét képesek elnyelni, másik részét a modelltér felé visszaverik. A PLAXIS szoftverben alapközetben működtetett szeizmikus input esetén a vizsgálatokhoz különböző viszkózus peremfeltételek állnak rendelkezésre, valamint egy további feltétel, mely segítségével egydimenziós talajválasz elemzés végezhető (Plaxis Scientific Manual, 2018). Ezeket a peremfeltételeket röviden az alábbiakban foglaljuk össze.

- Compliant base (félig-elnyelő peremfeltétel) + free field (szabad közeg)

Egy képlékeny peremfeltétel és egy előírt elmozdulás együttes alkalmazását jelenti az alsó modellhatáron. Az előírt elmozdulás lehetővé teszi földrengések regisztrátumának működtetését egy dinamikus szorzó megadásával, miközben a bejövő hullámok energiájának egy része elnyelődik (Joyner & Chen 1975) a modellhatárokon alkalmazott interface elemek segítségével, melyek az energiaelnyelést biztosítják. A modell oldalsó peremein a hasonló elven működő free field peremfeltétellel közösen alkalmazva javasolt a használata szeizmikus vizsgálatokhoz. A peremfeltételek megfelelő figyelembe vételéhez a modell alsó peremén az alapközetben rögzített rengés rögzített adatsorának értékeit azok 0,5-szeresére kell csökkenteni a végeselemes egyenletek formulációjából kifolyóan (Plaxis Scientific Manual, 2018). Ez legegyszerűbben a kezdeti elmozdulásként 0,5 m megadásával történhet. A modellperemen inputként gyorsulás, sebesség vagy elmozdulás adatsorok is alkalmazhatók.



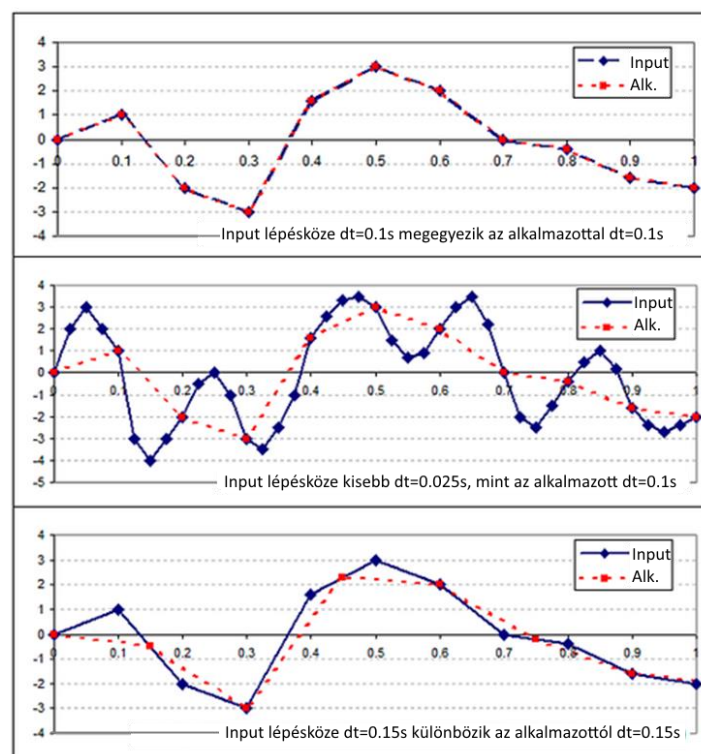
13. ábra: Szeizmikus vizsgálat céljából épített végeselemes modell képlékeny peremfeltételekkel

- Tied degrees of freedom (kapcsolt szabadsági fok)

Alkalmazása lehetőséget ad egydimenziós talajválasz-elemzés elvégzésére. A modell oldalsó határain alkalmazható, egyetlen végeelem szélességű talajoszlop modellezésére. A szoftver 2019.000 verzióját követően lehetőség adódik egy feltárás szelvényében megadott talajrétegződés alapján az egydimenziós talajválasz-elemzés automatikus elvégzésére egy beépített, Python alapú script segítségével. Az automatikus egydimenziós talajválasz elemzés egyszerű lehetőséget ad a kétdimenziós végeelemes modell néhány lépésben történő kalibrálására.

A véges elemes szoftverek az időben változó bemenő adatokat (pl. rögzített gyorsulás-idő adatsort) az implicit Newmark-Beta integrációs séma (Newmark, 1959) alkalmazásával veszik figyelembe, mely az analízis különböző időpontjaiban a megelőző lépéseket veszi alapul a következő időpillanat eredményeinek meghatározásához. Az integrációs séma paramétereinek beállításai manuálisan módosíthatók, ugyanakkor javasolt a $\alpha = 0.25$ valamint $\beta = 0.50$ alapértékeket alkalmazni.

Az alapközetben időben változó amplitúdójú adatsorok megadása esetén az adott adatsorhoz kapcsolódóan meg kell határozni az egymást követő lépések között eltelt idő mértékét, mely erőteljesen befolyásolja a megadott adatsor, illetve a számítások során alkalmazott adatsor viszonyát. Az input adatsor adatrögzítési frekvenciájához képest nem megfelelő lépésköz alkalmazása esetén a program az adott időpontokhoz tartozó értékeket veszi figyelembe, majd köztük lineárisan interpolál, mely az adatsor torzításához vezet. Ezt a hatást a 14. ábra szemlélteti. A lépésköz mértékét a szoftver automatikusan meghatározza, azonban javasolt manuálisan a rögzített adatok számával megegyező lépéseket beállítani az analízishez. A PLAXIS legfeljebb 10.000 különböző lépést tud kezelni dinamikus számítások esetén, mely az alkalmazható adatsorok hosszában való korlátként is értelmezhető. Az földrengésregisztrátumok rögzítési frekvenciája jellemzően 100-200 Hz között mozog, az alkalmazott adatsorok hosszát ennek megfelelően 50-100 s időtartamban kell korlátoznunk.



14. ábra: A lépésköz hatása az alkalmazott adatsorra (Visone et al, 2008)

A talajválasz elemzés során a rétegek maximális vastagságát a talajréteg sajátfrekvenciájának (f_m) és az adott rétegben a nyíróhullám terjedési sebességének (V_s) figyelembe vételével lehet meghatározni a

következő képlettel (Kramer, 1996), amely biztosítja, hogy a rétegek vastagsága nem korlátozza a vizsgált rengés egyes frekvenciatartományainak terjedését a talajoszlopban.

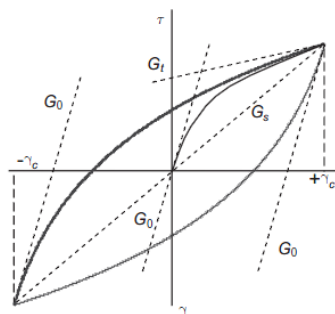
$$H = \frac{V_s}{4 \times f_m} \tag{6}$$

A végeselemes modellekben a feltételt a végeselemek méretére kell megszabni. A szeizmikus inputtól függően az elemméret a vizsgált földrengés-adatsor jellemző frekvenciatartományának maximumához tartozó hullámhossz (λ) 1/8-a és 1/5-e között kell legyen (Kuhlmeyer & Lysmer 1973), amely kifejezhető a rétegre jellemző nyíróhullám terjedési sebességgel (V_s) és a jellemző frekvenciával (f).

$$\frac{\lambda}{5 \div 8} = \frac{V_s}{8 \times f} \tag{7}$$

A javasoltnál nagyobb elemméret alkalmazása esetén a számítás kiszűri a rengés magas frekvenciájú tartományát, mert az egyes végeselemek közti távolság nagyobb, mint azok hullámhossza.

A talajok szeizmikus teherre való viselkedését a PLAXIS alkalmazása esetén a Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSSmall) anyagmodellel (Benz, 2007) lehet figyelembe venni. Az anyagmodell segítségével a talajok kis alakváltozások tartományában magasabb nyírási merevsége, valamint annak az alakváltozások növekedésével való csökkenése is modellezhető. A tehermentesítés-újraterhelés ciklusok során a hiszterézises viselkedés a kezdeti feszültségpálya kétszeres növekményeként vehető figyelembe (Brinkgreve et al., 2007, Masing, 1926).



15. ábra: a HSSmall anyagmodellben a Masing-féle hiszterézises viselkedés (Brinkgreve et al, 2007)

Az anyagmodell input paraméterként kezeli a talajok nyírási modulusának kezdőértékét, valamint a nyírási modulus ~70%-ára csökkenéshez tartozó alakváltozás ($\gamma_{0,7}$) nagyságát.

A kis alakváltozásokhoz tartozó nyírási modulus helyszíni geofizikai vizsgálatok alapján közvetve meghatározható a talajok nyíróhullám terjedési sebességének mérésével (MASW, Down-hole teszt, szeizmikus CPT), vagy közvetlenül mérhető speciális laborvizsgálatok alapján. A nyíróhullám-terjedési sebesség mérésére alkalmazott helyszíni módszer megválasztásánál figyelembe kell venni, hogy az egyes módszerek az altalaj különböző kiterjedésű területeit jellemzik (Lin & Stokoe 2008).

Minden előnye ellenére a HSSmall anyagmodell nem képes figyelembe venni a pórusvíznyomás megváltozását a földrengés időtartama alatt. A pórusvíznyomás szeizmikus teherre való változásának figyelembe vétele érdekében fejlettebb anyagmodellek (pl. UBC3D-PLM (UBCSAND), PM4SAND, Hypoplasztikus) (Beatty & Byrne 2011, Laera & Brinkgreve 2015) alkalmazása javasolt.

A talajok anyagi csillapítása többek között a talajszemcsék súrlódása és plaszticitása miatt lép fel. Ugyan a HSSmall anyagmodell képes bizonyos mértékű anyagi csillapítás figyelembe vételére a ciklikus terhelések esetén, ennek mértéke különösen kis alakváltozások esetén a tapasztalatok alapján csekélyebb a valóságban tapasztalható értéknél, ezért a valós viselkedés jobb reprezentációja érdekében többlet csillapítás alkalmazására van szükség. Az anyagi csillapításon felül a Rayleigh-féle csillapítással tudunk többletcsillapítást figyelembe venni, mely frekvenciától függő csillapítás formájában jelenik meg a véges elemes modellekben. A Rayleigh csillapítás paramétereinek meghatározására (a csillapítási

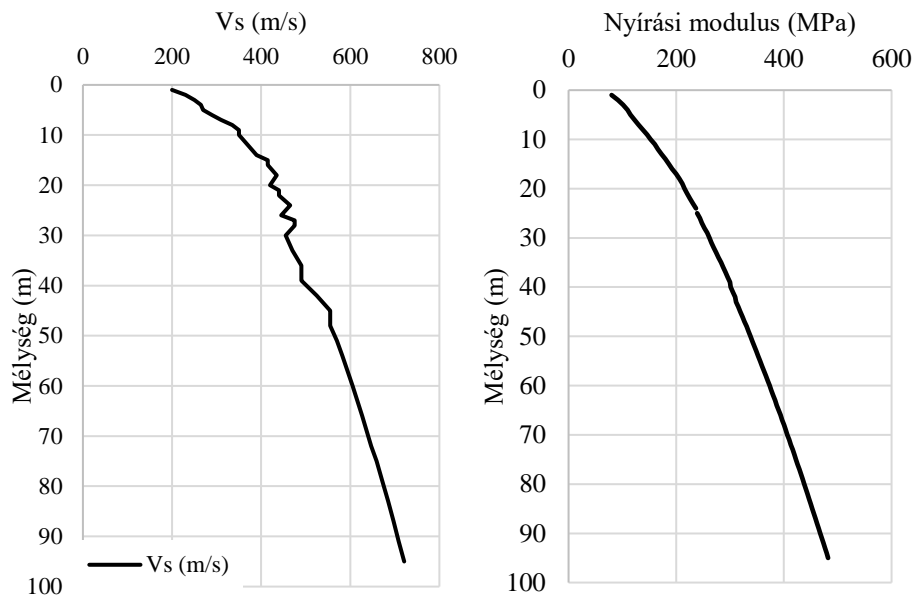
mátrixban α_R a tömegmátrix; β_R pedig a merevségi mátrix szorzótényezője) több javaslat létezik (Park & Hashash, 2004). A paraméterek ~ 100 m vastagságú talajrétegződés esetén jó közelítéssel meghatározható a talajrétegződés sajátfrekvenciája (f_m), illetve egy magasabb rendű, az input rengés jellemző frekvenciatartományába eső sajátfrekvencia (f_n) segítségével. Mélyebben fekvő alapkőzet esetén a bővített Rayleigh-formula használata javasolt, legalább négy sajátfrekvencia felhasználásával. A figyelembe vett többlet csillapítási értéke esetén ξ_i csillapítási tényező állandó, a Rayleigh-formulához szükséges paraméterek (α_R és β_R) pedig egyszerűen meghatározhatók a két frekvencia alapján. A többlet csillapítási tényező értékét 1-3% között javasolt figyelembe venni.

A megfelelően felállított véges elemes modellek eredményeként meghatározható a talajrétegződés módosító hatása.

A véges elemes módszerek lehetőséget adnak bonyolultabb anyagmodellek használatára, valamint egyszerűbb geotechnikai szerkezetek (pl. töltések, bevágások (Argyroudis & Kaynia 2015), útpályák és kifutópályák), vagy bonyolultabb építmények (hídfelek, azok háttöltése (Argyroudis et al., 2016), talajjavítási módszerek (Floroiu, 2016)) szeizmikus teljesítőképességének elemzésére.

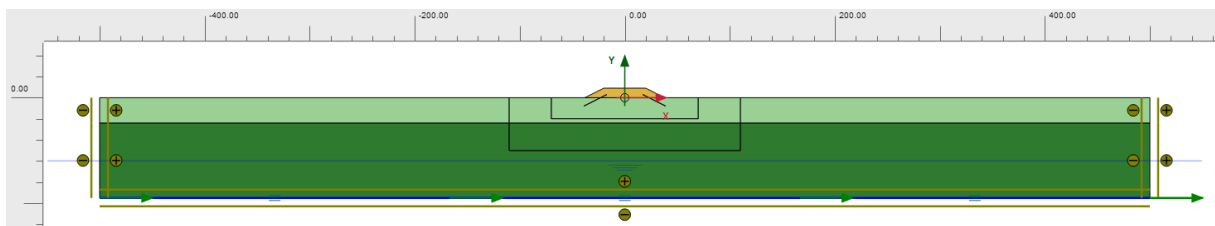
Az Eurocode-8 legalább 3 rengés-adatsorra elvégzett talajválasz-elemzés esetén a legkedvezőtlenebb eredmény figyelembevételét javasolja, míg 7 db független rengésre vonatkozóan már az eredmények átlaga vehető figyelembe. A szerkezet viselkedését ugyanakkor jellemezhetjük különböző intenzitású szeizmikus teherre való viselkedés szempontjából is, melyet alapul véve a szeizmikus teljesítőképességét jellemző sérülékenységi görbék meghatározhatók. A különböző infrastruktúra szerkezetek sérülékenységi görbéinek analitikus módszerekkel történő meghatározására többek között a SYNER-G (NGI, 2011) projekt keretében Argyroudis & Kaynia által kidolgozott módszertanok alkalmazhatók.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnika és Mérnökgeológia, valamint Hidak és Szerkezetek Tanszékének együttműködésében lehetőségünk adódott Irán fővárosában, Teheránban található autópálya híd rekonstrukciójához kapcsolódóan elvégzett geofizikai (Down-hole teszt) és talajmechanikai feltárások alapján a csatlakozó töltés nemlineáris, véges elemek módszerén alapuló szeizmikus teljesítőképességének vizsgálatára. Az altalaj rétegződését az elvégzett helyszíni feltárások, illetve a talajmechanikai feltárából vett talajminták laboratóriumi vizsgálati eredményei alapján kerültek meghatározásra. A területen a terepszint alatt 24m mélységig homokos iszap, majd sovány agyag talajokat tártak fel, a vizsgált töltés pedig helyi anyagú kavicsos iszapos homok – homokos iszap talajokból készült. A nyíróhullám terjedési sebességek meghatározása céljából készített Down-hole teszt 48 m-es mélységet ért el. A vizsgálat során mért legnagyobb terjedési sebesség 555 m/s értékre tehető, mely nem érte el a területre vonatkozó szabványban az alapkőzetre meghatározott 760 m/s értéket, az alapkőzet mélysége a mért értékek extrapolációjával 95 m-es mélységben határozható meg. A mért és extrapolált nyíróhullám terjedési sebességek, valamint az ezek alapján a 4. egyenlet szerint számítható nyírási modulusok értékét a 17. ábra mutatja. (Hübner & Mahler 2019)



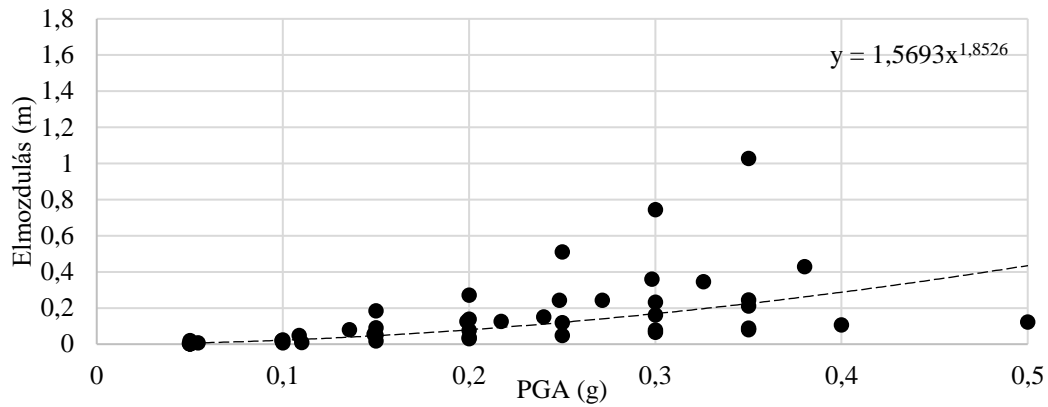
16. ábra: a) Nyíróhullám-terjedési sebesség; b) Nyírási modulus változása (Hübner & Mahler 2019)

A talajvázalás elemzés alapjául a PEER adatbázisból kiválasztott, „A” talajosztályú helyszínen rögzített hat földrengésadatsor került alkalmazásra az alapközeti válaszspektrum alakjához igazodva. Az egyes rengések adatsorait 0.05g – 0.35g legnagyobb horizontális gyorsulás értékekre skálázva a felszíni szerkezetek elmozdulásai különböző intenzitású rengések esetére meghatározhatók. Az analízis során különböző magasságú rézsúk kerültek vizsgálat alá, melyek 3.0 m, 6.0m, illetve 9.0 m magassággal, valamint 1:2 rézsűszöggel rendelkeztek. A rézsúk geometriája miatt kétdimenziós talajvázalás elemzés szükséges, melynek céljából a PLAXIS geotechnikai véges elemes szoftver lett alkalmazva. A szeizmikus vizsgálatok céljából a ciklikus viselkedés figyelembevételére képes Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSSmall) anyagmodell alkalmazható. A véges elemes modell felépítése során a „compliant base” és „free field” képlékeny peremfeltételek kerültek figyelembe vételre, a Rayleigh-csillapítás mértéke pedig 1,0 %-ban lett megállapítva. A modell geometriáját a 18. ábra mutatja.

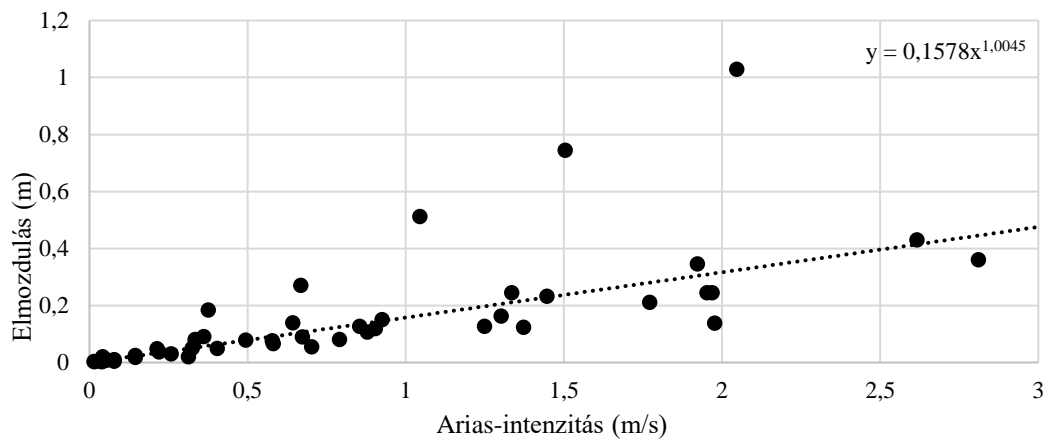


17. ábra: Véges elemes modell geometriája (Hübner & Mahler 2019)

Infrastruktúra szerkezetek esetében a szakirodalom a szeizmikus hatást, illetve a teljesítőképességet leggyakrabban az elszennvedett elmozdulások mértékével jellemzi, melyek az elvégzett talajvázalás elemzés eredményeként a különböző szeizmikus intenzitásértékekhez tartozóan meghatározhatók. A töltéskorona elmozdulásait 6,0 m-es töltés esetére a 19. ábra mutat.



18. ábra: 6.0 m magas töltés elmozdulásai különböző maximális gyorsulások mellett (Hübner & Mahler 2019)



19. ábra: Elmozdulás – Arias-intenzitás összefüggés 6,0 m-es töltés esetén (Hübner & Mahler 2019)

A meghatározott diszkrét pontokra hatványfüggvény illeszthető, melynek általános alakja a 8. egyenlet formájában került meghatározásra:

$$PGD = \alpha_{Int} \times Intenzitásjellemező^{\beta_{Int}} \tag{8}$$

A függvény egyes paramétereit különböző intenzitásjellemező és töltésmagasság esetére a 3. táblázatban láthatók. (Hübner & Mahler 2019)

3. táblázat: Hatványfüggvény paramétereit

	PGA		Arias-intenzitás	
	α_{PGA}	β_{PGA}	α_{Arias}	β_{Arias}
9,0	3,7151	2,0004	0,2546	0,9225
6,0	1,5693	1,8526	0,1578	1,0045
3,0	0,9962	2,0384	0,0674	1,0017

A 3. táblázat alapján a PGA szeizmikus intenzitásjellemezőként való alkalmazása esetén közel négyzetes, az Arias-intenzitásra vonatkozóan pedig közel lineáris összefüggés állítható fel (Hübner & Mahler 2019).

A talajválasz elemzés eredményeként meghatározott elmozdulások, illetve az elmozdulások és a szeizmikus intenzitásjellemzők közötti összefüggéseket jellemző hatványfüggvények képezik a sérülékenységi görbék előállításának alapját.

6. SÉRÜLÉKENYSÉGI GÖRBÉK

A szerkezetek sérülékenységi görbéinek előállítására különböző módszerek léteznek (Kramer, 1996, Argyroudis et al., 2018), melyek közül az analitikus módszerek elsősorban a mérsékelt szeizmicitású területeken való alkalmazhatóságuk miatt emelkednek ki. Ezek a területeken, mint hazánkban is, kevés tapasztalat, írásos feljegyzés áll rendelkezésre a földrengések hatására bekövetkező károkról, melyek felhasználhatók volnának részletesebb statisztikai elemzések készítésére. Az analitikus módszerek segítségével nagy mennyiségű adat előállítható, melyek segítségével a szerkezetek sérülékenységének jellemzése már lehetővé válik. Magasabb szeizmicitású területeken ezen módszerek kisebb hangsúlyt kapnak, a földrengések során bekövetkezett károk mértékéről és kiterjedéséről készült felmérések nagy mennyisége miatt.

A szerkezetek sérülékenységének jellemzéséhez valamely intenzitásparaméter kiválasztott tartományát kell vizsgálni, melyet úgy kell megválasztani, hogy a szerkezet tervezési élettartama során várható szeizmikus hatásokat lefedje. A szakasz felső határaként szolgálhat többek között a nemzeti mellékletben meghatározott alapközeti gyorsulás értéke, mely esetben hazai szerkezetekre vonatkozóan az alapközeti legnagyobb horizontális gyorsulás értékét $PGA = 0.15g$ értékben lehet felvenni. Az 5.3.1. fejezetben bemutatott analízis esetében az intervallum $PGA = 0.05g - 0.35g$ között lett meghatározva. A szeizmikus hatást a tartományba eső különböző intenzitások mellett kell vizsgálni.

Az elmozdulásokat a gyakorlati alkalmazás megkönnyítése érdekében javasolt az elszenvedett károk mértéke alapján osztályozni, majd a sérülékenységi görbéket ezen károsztályok meghaladási valószínűségeként értelmezni. A különböző károsztályok határait a vizsgált szerkezetre vonatkozóan kell meghatározni. Földművekre és azokhoz kapcsolódó szerkezetekre vonatkozóan az alábbi károsztályok alkalmazása javasolt (Argyroudis & Kaynia 2015).

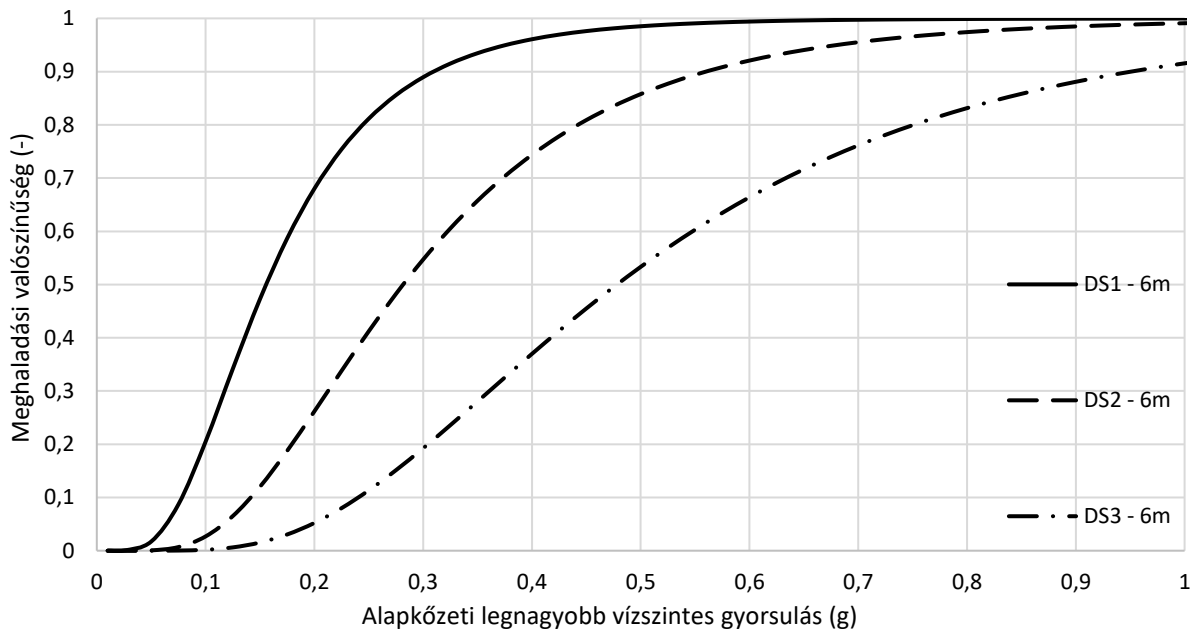
4. táblázat: Földművek jellemzésére javasolt károsztályok (Argyroudis & Kaynia 2015)

	Károsztály	Legnagyobb felszíni elmozdulás (PGD) [m]	
		min	max
Közúti töltés	Kismértékű (DS1)	0,02	0,08
	Közepes (DS2)s	0,08	0,22
	Kiterjedt/Teljes (DS3)	0,22	0,58
Vasúti töltés	Kismértékű (DS1)	0,01	0,05
	Közepes (DS1)	0,05	0,10
	Kiterjedt/Teljes (DS1)	0,10	0,30

Annak valószínűségét, hogy a szerkezet által elszenvedett kár (D) meghaladja a vizsgált károsztályt (DS_k), a sérülékenységi görbék írják le, melyeket a különböző szakirodalmak leggyakrabban lognormális eloszlású függvényekkel írnak le a 10. egyenlet alakjában, ahol a Φ a hibafüggvény, μ a medián jellemző, β pedig az analízisben rejlő bizonytalanságokat jellemző szórás értéke.

$$P(D > DS_k) = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{\ln PGA - \ln \mu}{\beta \sqrt{2}} \right) \right] \tag{10}$$

Az elvégzett vizsgálatok bizonytalanságának értékelése során figyelembe kell venni a károsztályok határainak megválasztásában (β_{DS}), a szerkezetek válaszában (β_C), valamint a szeizmikus teherben (β_D) rejlő bizonytalanságokat. A teljes analízis megbízhatósága ezek négyzetösszegeként jellemezhető. Egyéb adatok hiányában szakirodalmi ajánlásokat javasolt figyelembe venni az analízis megbízhatóságának becslésére (NIBS, 2004). A 21. ábra 6.0 m magasságú töltés esetére meghatározott sérülékenységi görbéket mutatja.



20. ábra Különböző károsztályokhoz meghatározott sérülékenységi görbék

A meghatározott sérülékenységi görbék alapján különböző szeizmikus intenzitásjellemző esetére meghatározható a különböző mértékű károk meghaladásának valószínűsége. A 19. ábrán bemutatott görbék alapján $PGA = 0.15g$ esetén a kismértékű károk meghaladásának valószínűsége ~50%-ra tehető, $PGA = 0.35g$ érték esetén azonban már 90 % feletti valószínűséggel bekövetkeznek a DS1 károsztályt meghaladó elmozdulások.

7. KONKLÚZIÓ

A különböző infrastruktúra szerkezetek szeizmikus terhelésre való vizsgálatára számos lehetőség áll rendelkezésre, ugyanakkor a szabványos keretek között a elvégzendő vizsgálatok jellemzően egy tönkremenettel szembeni biztonság meghatározását célozzák. Az infrastruktúra földművek és egyéb szerkezetek esetében azonban a földrengések hatására elszenvedett elmozdulások mértéke is meghatározó lehet a használhatóság szempontjából. A földrengések hatására különböző szerkezetek által elszenvedett elmozdulások, károk mértékét többdimenziós talajválasz elemzés eredményeként lehet meghatározni, mely eredményeit alapul véve különböző károsztályok meghaladásának valószínűségét jellemző sérülékenységi görbék előállíthatók. A cikkben bemutatásra kerültek a talajválasz elemzés alapjául szolgáló módszerek, különös tekintettel a véges elemes módszerek alkalmazására. A sérülékenységi görbék meghatározását Argyroudis & Kaynia által kidolgozott módszertant követve szemléltettük. A bemutatott módszertan mind a szerkezetek tervezése, mind meglévő építmények ellenőrzése során alkalmazható, valamint egyszerűen adaptálható más jellegű dinamikus terhelésre is (közúti, vasúti teher, árhullámok). Az elvégzett analízis segítségével ugyanakkor üzemeltetési kérdésekre vonatkozóan is hasznos információkkal szolgálhatnak az analízis eredményeként kapott sérülékenységi görbék, az egyes szerkezetek, földművek, műtárgyak gyengepontjai egyszerűen meghatározhatók.

8. IRODALOMJEGYZÉK

Akkar S., Sandikkaya M.A., Şenyurt M., Azari Sisi A., Ay B.Ö., Traversa P., Douglas J., Cotton F., Luzi L., Hernandez B. & Godey S. 2013: Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE), Bulletin of Earthquake Engineering, in press,

<http://link.springer.com/article/10.1007/s10518-013-9506-8>, <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9506-8>

Amorosi, A., Boldini, D. & Gaetano, E. 2010: Parametric study on seismic ground response by finite element modelling, *Computers and Geotechnics*, Vol. 37, 515-528, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.02.005>

Argyroudis, S. & Kaynia, A.M. 2015: Analytical seismic fragility functions for highway and railway embankments and cuts, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 44. 10.1002/eqe.2563, <https://doi.org/10.1002/eqe.2563>

Argyroudis, S., Mitoulis, S., Kaynia, A. & Winter, M. 2018: Fragility assessment of transportation infrastructure systems subjected to earthquakes. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V*, Austin, Texas, US, <https://doi.org/10.1061/9780784481479.018>

Argyroudis, S., Palaiochorinou, A., Mitoulis, S.A. & Pitilakis, D. 2016: Use of rubberised backfills for improving the seismic response of integral abutment bridges, *Bulletin of Earthquake Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0018-1>

Beatty, M. H. & Byrne, P.M. 2011: Ubsand constitutive model. Itasca UDM website 904aR

Benz, T. 2007: Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences, *Mitteilung 55 des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart*, Germany

Brinkgreve, R., Kappert, M & Bonnier, P. 2007: Hysteretic damping in a small-strain stiffness model. <https://doi.org/10.1201/noe0415440271.ch106>

Darendeli, M.B. 2001: Development of new family of normalized modulus reduction and material damping curves, PhD thesis, University of Texas, Austin.

Floroiu, L.G. 2016: A Contribution to Seismic Ground Response of Improved Foundation Soil, Dissertation, Technische Universität Graz

Giardini, D., Woessner J. & Danciu, L. 2014: Mapping Europe's Seismic Hazard. *EOS*, 95(29): 261-262, <https://doi.org/10.1002/2014eo290001>

Hübner, B. & Mahler, A. 2019: Közúti töltés sérülékenységi görbéinek vizsgálat, In: Baksa A., Bertóti E., Kiss L., Szirbik S. (szerk.): XIII. Magyar Mechanikai Konferencia elektronikus kiadványa. ISBN: 978-963-358-181-0

Ishibashi, I. & Zhang, X. 1993: Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*, 33:1, 182-191, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(94\)92508-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(94)92508-9)

Joyner, W. B., Chen, A. T. F. 1975: Calculation of nonlinear ground response in earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 65, No. 5, pp. 1315-1336

Kramer, S.L. 1996: *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall

Kuhlmeyer, R. L, Lysmer, J. 1973: Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 99 (n.5), 421-427

Laera, A. & Brinkgreve, R. B. J. 2015: Site Response Analysis and liquefaction evaluation

Lin, Y. C., Stokoe, K. H. II, & Rosenblad, B. L. 2008: "Variability in VS Profiles and Consistency between Seismic Profiling Methods: A Case Study in Imperial Valley, California", the 3rd International Conference on Site Characterization (ISC'3), Taipei, Taiwan. April 2008`

Masing, G. 1926: Eigenspannungen und verfestigung beim messing (Self stretching and hardening for brass), in: *Proceedings of the Second International Congress for Applied Mechanics*, Zurich, Switzerland, 332-335 (in German)

MSZ EN 1991-1-7:2006: Eurocode 1: A tartószerkezeteket érő hatások. 1-7. rész: Általános hatások. Rendkívüli hatások

MSZ EN 1991-1-7:2006 NB Nemzeti melléklet

Nagy, L. & Illés, Zs. 2020: Völgyzárógáták földrengésbiztos tervezésének fejlődése, Hidrológiai Közlöny (elfogadott cikk)

National Institute of Building Sciences, 2004, HAZUS-MH: User's Manual and Technical Manuals, Report prepared for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. USA

Newmark, N. M. 1959: A method of computation for structural dynamics. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 85 (EM3) 67-94.

Norwegian Geotechnical Institute. 2011: SYNER-G: D.3.7 – Fragility functions for roadway system elements. Deliverable 3.7 for the SYNER-G Project, 1-125

Park, D. & Hashash, Y.M.A. 2004: Soil Damping Formulation in Nonlinear Time Domain Site Response Analysis, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8 (n.2), 249-274, <https://doi.org/10.1080/13632460409350489>

PEER NGA-West2 Database: Timothy D. Ancheta, Robert B. Darragh, Jonathan P. Stewart, Emel Seyhan, Walter J. Silva, Brian S.J. Chiou, Katie E. Wooddell, Robert W. Graves, Albert R. Kottke, David M. Boore, Tadahiro Kishida, and Jennifer L. Donahue, 2013, PEER NGA-West2 Database, Report

Plaxis 2D Scientific Manual, 2018

Tóth et al. 2006: Seismic Hazard in the Pannonian Region, In: Pinter N., Grenczy Gy., Weber J., Stein, S., Medak, D. (eds.): The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards, Springer Verlag, NATO ARW Series, Vol. 61. p. 369-364, https://doi.org/10.1007/1-4020-4235-3_25

Visone, C., Bilotta E. & Magistris, FS De. 2008: Remarks on site response analysis by using Plaxis dynamic module, Plaxis Buletin Vol. 23, 14-18

Vrettos, C. 2013: Dynamic response of soil deposits to vertical SH waves for different rigidity depth-gradients. Soil Dynamics and earthquake Engineering Vol. 47, 41-50, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.04.003>

Vucetic, M. & Dobry, R. 1991: Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, Issue 1, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(91\)90820-C](https://doi.org/10.1016/0148-9062(91)90820-C)

Woessner, J., Danciu, L., D. Giardini & the SHARE consortium, 2015: The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results, Bull. Earthq. Eng., doi:10.1007/s10518-015-9795-1.