



Építész-, Építő- és Közlekedésmérnöki Kar  
Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszék

## Cölöp és cölöpcsoport földrengés alatti viselkedésének vizsgálata

Lampert Lizett Olívia  
Építőmérnöki szak 4. évfolyam  
Szerkezetépítési szakirány

Konzulens: Dr. Wolf Ákos egyetemi adjunktus

2024/2025 1. félév

# Tartalom jegyzék

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Absztrakt.....                                                    | 3  |
| 1 Bevezetés.....                                                  | 4  |
| 1.1 Téma választás .....                                          | 4  |
| 1.2 Kutatás célja.....                                            | 4  |
| 1.3 Kutatás módszertana .....                                     | 4  |
| 2 Irodalom kutatás .....                                          | 5  |
| 2.1 Cölöpök földrengés alatti viselkedése .....                   | 5  |
| 2.2 Cölöpökben ébredő kinematikai igénybevétel.....               | 7  |
| 2.2.1 Réteghatáron ébredő kinematikai igénybevétel becslése ..... | 8  |
| 2.2.2 Cölöpfejnél ébredő kinematikai igénybevétel becslése.....   | 9  |
| 2.3 Cölöpcsoport hatása a kinematikai igénybevételre.....         | 10 |
| 3 Egyedi cölöp vizsgálata végeselemes szoftverrel.....            | 13 |
| 3.1 Modellezés célja .....                                        | 13 |
| 3.2 Plaxis 3D modell bemutatása és verifikálása.....              | 13 |
| 3.3 2D modellek bemutatása.....                                   | 16 |
| 3.4 2D modell eredményei.....                                     | 16 |
| 3.5 3D modellek eredménye .....                                   | 19 |
| 3.6 2D és 3D eredmények összehasonlítása .....                    | 21 |
| 4 Cölöpcsoport vizsgálata.....                                    | 23 |
| 4.1 Csoport modellezés bemutatása.....                            | 23 |
| 4.1.1 Lineárisan rugalmas anyagmodell alkalmazása .....           | 23 |
| 4.1.2 HSS anyagmodell alkalmazása.....                            | 24 |
| 4.2 Csoport eredményeinek bemutatása .....                        | 27 |
| 4.2.1 Lineárisan rugalmas anyagmodell eredményei .....            | 27 |
| 4.2.2 HSS anyagmodellel eredményei.....                           | 31 |
| 5 Egyéb vizsgálatok.....                                          | 36 |
| 5.1 Becslő képletek alkalmazása .....                             | 36 |
| 5.2 Pszeudostatikus vizsgálatok.....                              | 39 |
| 6 Összefoglalás.....                                              | 43 |
| 7 Ábrajegyzék.....                                                | 45 |
| 8 Táblázat jegyzék.....                                           | 48 |
| 9 Irodalom jegyzék.....                                           | 49 |

## Absztrakt

A cölöpöket földrengés során két hatás éri, a felszerkezet kilengéséből származó tehetetlenségi, valamint a cölöp körüli talaj elmozdulásából származó kinematikai hatás. Az Eurocode előírásai szerint előbbire a felszerkezetről származó egyéb hatásokkal együttesen valamennyi alapozást méretezni kell, utóbbit egyes speciális esetekben kell elemezni. Dolgozatom a talajdeformációból származó kinematikai igénybevételek vizsgálatára fókuszált, mely kevésbé kutatott téma hazánkban.

A kutatáshoz a Plaxis 2D és 3D szoftvert használtam. A modellt nemzetközi szakirodalomban fellelhető konkrét példával verifikáltam. Elsősorban a modell alsó síkján működtetett valós idő-gyorsulás függvény reprezentálta a földrengési hatást, de pszeudostatikus analízist is végeztem. Számításaimat kétféle rétegmodell és kétféle anyagmodell (Lineárisan rugalmas és HSS) alkalmazásával is elvégeztem.

Kezdetben az egyedi cölöp földrengés alatti viselkedésén keresztül a Plaxis 2D szoftver alkalmazhatóságát elemeztem. A nemzetközi szakirodalomban fellelhető konkrét példán hasonlítottam össze a 2D és 3D szoftverrel kapott eredményeket egymással és a szakirodalmi adatokkal. E fázis a cölöpök földrengés alatti viselkedésének megértését is szolgálta.

A dolgozat második részében Plaxis 3D modellt alkalmazva vizsgáltam cölöpcsoport földrengés alatti viselkedését. Az egyedi cölöp mellett két, a gerjesztéssel párhuzamosan és arra merőlegesen elhelyezett cölöpből álló csoportot, valamint négyes cölöpcsoportot is modelleztem. Összehasonlítottam a cölöpökben ébredő igénybevételeket egymással és a szakirodalomban fellelhető képletekkel becsült értékekkel is.

# **1 Bevezetés**

## **1.1 Téma választás**

A TDK dolgozatom témájaként a cölöpök földrengés alatti viselkedésének vizsgálatát választottam. A téma összetettsége indokolta, hogy egy konkrétumra szűkítsem le a kutatást, így a dolgozatom fókuszába a kinematikai hatás került. A téma Magyarországon kevésbé kutatott, ezért fontosnak tartom, hogy figyelmet fordítsak rá. A talaj deformációjából származó kinematikai igénybevételeket a szabvány szerint nem minden esetben kell vizsgálni, ezért szeretnék rávilágítani, hogy hatásuk akár jelentős is lehet. A kutatást az egyedi cölöppel és annak viselkedésének megértésével kezdtem, majd pedig áttértem a cölöpcsoport vizsgálatára.

## **1.2 Kutatás célja**

A kutatás folyamán szeretném megvizsgálni, hogy a földrengések során hogyan viselkednek a cölöpök, milyen igénybevételek keletkeznek bennük és milyen hatások érik azokat. Ezen belül is leginkább a kinematikai hatással kapcsolatos jelenségek megértése a cél. Továbbá szeretném összevetni, hogy milyen modellezési lehetőségek vannak 2D, illetve 3D modellek készítésére, ezeknek milyen az alkalmazhatóságuk és megbízható eredményre juthatunk-e használatukkal. A 2D modellben egyedi cölöp vizsgálatra van leginkább lehetőség, míg a 3D-s modellben teret kapunk arra is, hogy a cölöpcsoportot és a csoporthatást elemezzük.

## **1.3 Kutatás módszertana**

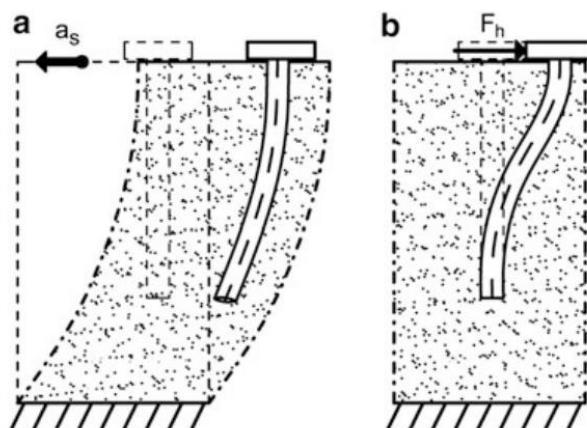
A kutatás során a Plaxis 2D és 3D geotechnikai végesesemes szoftverrel modelleztem. Ezek lehetőséget biztosítanak arra, hogy fejlett talajmodelleket alkalmazzunk. Először a Plaxis 2D szoftverrel az egyedi cölöp viselkedését vizsgáltam és külföldi szakirodalomban fellelhető példával verifikáltam, azonban ez nem adott egyértelmű igazolást, ezért a cölöpcsoport vizsgálatára már a 3D modellezést alkalmaztam. Ebben az esetben is az egyedi cölöp vizsgálatával indultam el, majd annak a verifikálásával folytattam külföldi szakirodalomban található példával. Ezek után áttértem a cölöpcsoport elemzésére lineárisan rugalmas, majd a Hardening-Small-Strain, azaz a felkeményedő talajmodell kis alakváltozásokra kiterjesztett változatának használatával. Az eredményeimet összevetettem a szakirodalomban megjelenő becslő képletekkel és pszeudostatikus vizsgálatok eredményeivel. A kapott eredmények alapján megállapításokat tettem a kinematikai igénybevétel jelentőségével kapcsolatban és további kutatási lehetőségeket fogalmaztam meg.

## 2 Irodalom kutatás

### 2.1 Cölöpök földrengés alatti viselkedése

Abban az esetben, mikor cölöpök földrengés alatti viselkedését szeretnénk vizsgálni fontos, hogy tisztában legyünk néhány ide kapcsolódó alapvető fogalommal és jelenséggel, annak érdekében, hogy megértsük mi is történik valójában. A következőkben ezeket fogom röviden bemutatni.

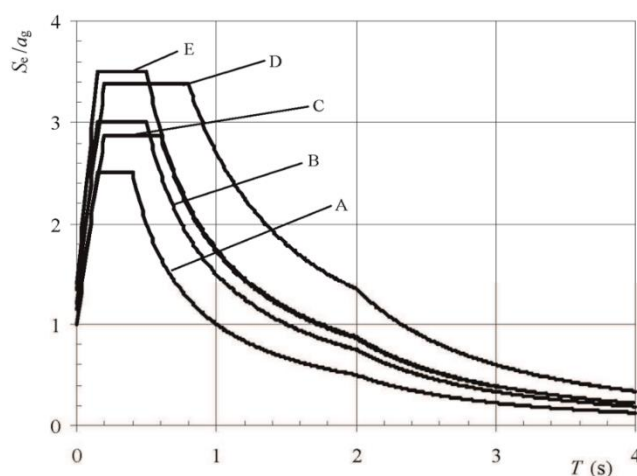
Amikor a földrengés hullám a talajban terjed, akkor a talaj alakváltozik a mechanikai tulajdonságaitól függően. Az alapozás típusától függetlenül, ha a talajban lévő szerkezet nem tudja lekövetni a talaj deformációját, kinematikai igénybevétel keletkezik benne. (Kramer, 1996) (Wolf, 2012). Az alapozást a földrengés során érő másik hatás a tehetetlenségi hatás, mely a felszerkezet kilengéséből adódó igénybevétel többlet. (Kramer, 1996) szerint ez utóbbinak a hatása jelentősebb, mint a kinematikaié. A hazai Eurocode előírásai szerint a tehetetlenségi hatásra mindig ellenőrizni kell a szerkezeteinket és azt pszeudostatikus terhelésként szokták figyelembe venni. A 2.1. ábrán láthatjuk e két hatást.



2.1. ábra Cölöpöket érő kinematikai (a) és tehetetlenségi (b) hatás a földrengés során Forrás: (George Mylonakis, 2014)

Azt, hogy az adott területen milyen földrengési hatásra kell méreteznünk az Eurocode az alapkőzetre jellemző csúcsgyorsulás és a felső 30 méteres talajrétegződés alapján határozza meg. A talajrétegződés szerinti besorolás különböző talajvizsgálati eredmények alapján történhet, a szabvány 7 kategóriát különböztet meg. Ezekhez egy-egy válaszspektrum görbét rendel, melyek alapján történik az épület földrengésre való méretezése, a tehetetlenségi hatás meghatározása. A talajrétegződés figyelembevételének azért van jelentősége, mivel a puha talajokban a nyíró hullám terjedési sebessége alacsonyabb, így a hullám amplitúdója jóval

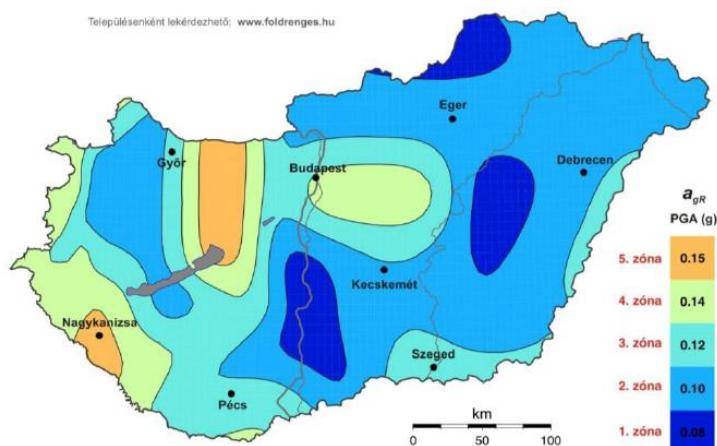
nagyobb az energiamegmaradás törvénye miatt. Éppen ezért az épületeinkre nagyobb hatást fejt ki. Amennyiben keményebb talajra építkezünk a terjedési sebesség nő, az amplitúdó csökken, így a földrengésből származó nyíróhullám hatása kisebb.



2.2. ábra Ajánlott talajosztálytól függő rugalmas válaszspektrum görbék (5% csillapítás) Forrás: (Richard P. Ray, 2016)

A 2.2. ábrán látható az öt fő talajosztályhoz tartozó rugalmas válaszspektrum görbe, melynek vízszintes tengelyén a periódus idő, függőleges tengelyén a gyorsulás szerepel. Minden talajosztályhoz tartozik egy-egy görbe, így az építmény periódus idejét kell meghatároznunk, majd a gyorsulás leolvasható a görbéről.

Az Eurocode földrengésről szóló kötetében a Nemzeti Alkalmazási mellékletben találjuk az alábbi 2.3. ábrát, mely az alapkőzet horizontális csúcsgyorsulását adja meg. Látható, hogy Magyarországon is vannak jobban veszélyeztetett régiók, ilyen a Móri árok és környéke, valamint az ország dél-nyugati csücske, az Adriai mikrolemez mozgásai miatt.



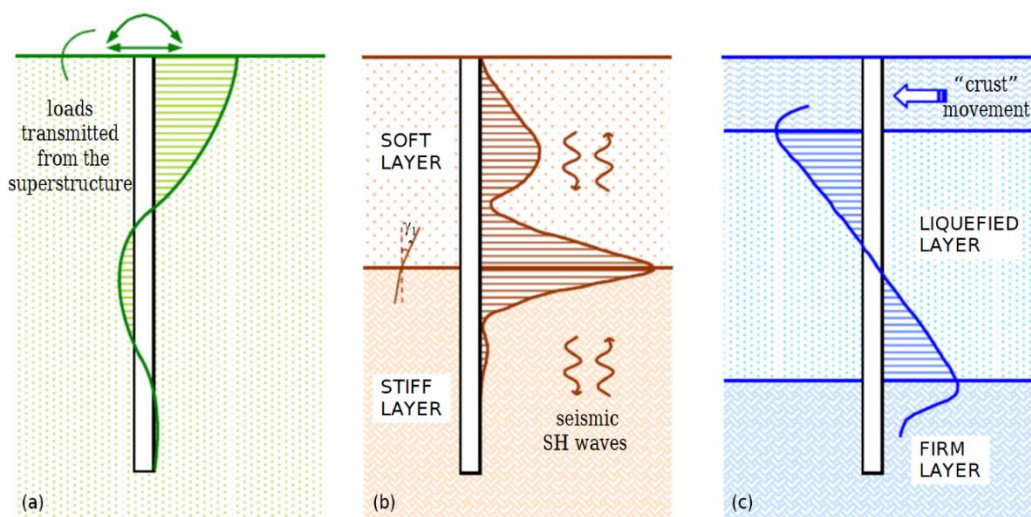
2.3. ábra Magyarország szeizmikus zóna térképe (MSZ EN 1997-1:2006 Geotechnikai tervezés 1. rész: Általános szabályok, )

A fent említettek szerint a puhább talajokban nagyobb deformáció alakul ki, ezért azok a talajban lévő szerkezetben nagyobb kinematikai igénybevételt okoznak. Ezt figyelembe véve az Eurocode előírásai szerint akkor kell a cölöpöket a kinematikai hatásra vizsgálni, amennyiben az alábbi feltételek együttesen teljesülnek:

- Talajosztály D, S1 vagy S2
- A megtámasztott szerkezet fontossága III. vagy IV.
- A felszín talajgyorsulása nagyobb mint 0,1 g

A földrengések hatásánál fontos még megemlíteni a csillapítást, melynek két típusa van. Az első a radiális csillapítás, mely a hullámok terjedéséből származó energiát nyeli el, leginkább a cölöp és a talaj találkozásánál. A második a hiszterézis csillapítás, mely a hullám talajban megtett útja során következik be. Ez függ az adott talaj merevségétől. (Wolf, 2018)

Összefoglalva a földrengés során 2 lehetséges hatásból ébredhet igénybevétel a cölöpben. Az első a tehetetlenségi hatás, mely a felszerkezet kilengéséből adódik. A második a kinematikai hatás, mely a földtömeg elmozdulásának a hatásából származik. Az utolsó, amiről eddig nem esett szó a talajfolyósodás, mely szintén kinematikai igénybevétel, csupán a talaj folyadékként viselkedik. Az alábbi 2.4. ábra szemléletesen mutatja be ezeket az eseteket.



2.4. ábra Cölöpökben lehetségesen ébredő hatások a földrengés során a) tehetetlenségi b) kinematikai c) talajfolyósodás hatása (George Mylonakis, 2014)

## 2.2 Cölöpökben ébredő kinematikai igénybevétel

A cölöpökben a kinematikai igénybevétel az eltérő merevségű rétegek határán, illetve a fejtömbhöz való csatlakozásnál ébred. A dolgozatban vizsgálom a cölöpfejben, valamint a réteghatáron ébredő nyomatékokat egyaránt. A cölöpfejben ébredő igénybevételt is a

kinematikai hatás okozza, mivel felszerkezet nincs a modellben és maga az igénybevétel abból származik, hogy a cölöpfej elfordulni nem tud, de a talaj oldalról megnyomja a cölöpöt. Ahogy fentebb leírtam a kinematikai hatás vizsgálatára nem minden esetben kerül sor, holott rendkívül nagy igénybevételek is keletkezhetnek belőle, melyek általában abban az esetben alakulnak ki, ha mélyen egy jobb adottságú réteg van, amibe beköt a cölöp s felette egy puha, laza talaj települt.

A kinematikai hatást befolyásolja egyrészt a két talajréteg merevsége és azoknak is leginkább az egymáshoz viszonyított aránya, a talaj és a cölöp merevségének egymáshoz képesti viszonya, a cölöpfej távolsága a réteghatártól (felső réteg vastagsága), valamint a földrengés hullám, tehát a gerjesztés. A gerjesztés esetén a ciklusszám és a gerjesztési frekvencia, mint jellemzők befolyásolják a kinematikai hatást. (Wolf, 2018)

A kinematikai igénybevétel hatásával már több kutató foglalkozott és a rengeteg mérés, számítás alapján becslő képletek határoztak meg, melyek közül néhányat a következőkben fogok bemutatni.

### 2.2.1 Réteghatáron ébredő kinematikai igénybevétel becslése

(Dobry, 1983) cikkében közölte az alábbi explicit formulát:

$$M = 1,86 \cdot (E_p \cdot I_p)^{\frac{3}{4}} \cdot G_1^{\frac{1}{4}} \cdot \gamma_1 \cdot F_M \quad 2-1. \text{ egyenlet}$$

(Dobry, 1983) becslő képletét rugalmas ágyazású gerenda modellel végzett vizsgálatai alapján állapította meg, melyben a tagok a következők:

$E_p \cdot I_p$ - A cölöp hajlítási merevsége

$G_1$ - A felső talajréteg nyírási modulusa

$\gamma_1$ - Szabadfelszínű rezgés esetén a felső talajnak a réteghatáron létrejövő maximális nyírási alakváltozása

$F_M$ -A rétegek nyírási modulusának arányát figyelembe vevő dimenzió nélküli tényező, melynek részletes meghatározását (Dobry, 1983) tartalmazza.

(Dobry, 1983) eredményeit fejlesztette tovább (Mylonakis, 2002) rugalmasan ágyazott gerendamodellel (BDWF-vel) végzett számításai alapján.

$$M = \frac{2 \cdot (E_p \cdot I_p) \cdot \left(\frac{\varepsilon_p}{\gamma_1}\right) \cdot \phi}{d} \cdot \gamma_1 \quad 2-2. \text{ egyenlet}$$

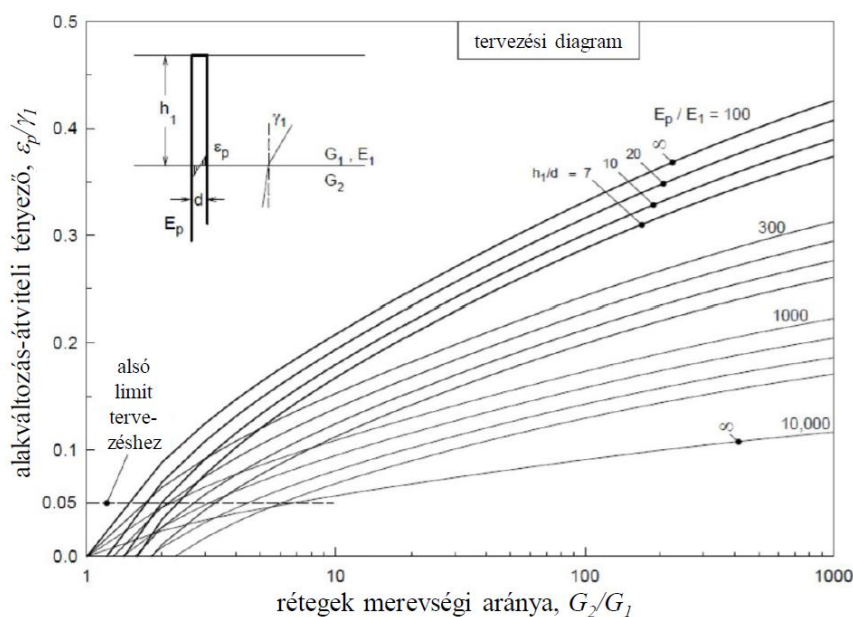
ahol a tényezők a fentiekén túl a következők:

$\varepsilon_p$ - Nyomatéki alakváltozás

d- A cölöp átmérője

$\phi$ - Gerjesztés hatását figyelembe vevő tényező

Mindkét bemutatott esetben azt tapasztaljuk, hogy a fent említett négy befolyásoló tényező valóban megjelenik. (Geroge Mylakis, 2002) állította össze a 2.5. ábrát, melyen a következők láthatók. A vízszintes tengelyen a rétegek merevségi aránya, míg a függőleges tengelyen az alakváltozás-átviteli tényező található. Az utóbbi a cölöpben kialakuló nyomatéki alakváltozás és a talaj nyírási alakváltozásának a hányadosa. A görbe csoportok a cölöp és a felső réteg rugalmassági modulusának arányához tartoznak. Görbecsoportokon belül pedig a felső réteg vastagságának és az átmérő arányához találunk görbéket. Az ábráról azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a kialakuló nyomaték értéke a rétegek nyírási modulusának arányának növekedésével nő, továbbá, hogy a felső réteg vastagságának csökkenése a nyomaték csökkenését eredményezi.



2.5. ábra A rétegek merevségének aránya és az alakváltozás-átviteli tényező közötti összefüggés, eltérő felső réteg vastagság és talaj-cölöp merevségi arányok esetén (Geroge Mylakis, 2002)

### 2.2.2 Cölöpfejnél ébredő kinematikai igénybevétel becslése

A cölöpfejnél a befogás miatt alakul ki kinematikai igénybevétel, ezzel a kialakítással a gyakorlatban gyakran találkozhatunk. A cölöpfejnél kialakuló kinematikai igénybevétel jelentős is lehet, melynek figyelmen kívül hagyása akár a szerkezet alul tervezéséhez is vezethet (Di Laora, 2013).

Több kutató vizsgálataiból kimutatta, hogy ebben az esetben a kialakuló nyomaték nagyságát leginkább a cölöpátmérő, a cölöp-talaj merevségi aránya és a felső réteg vastagsága, valamint a merevsége befolyásolja.

(Di Laora, 2013) a következő becslő képletet adja a cölöpfejnél ébredő nyomaték számítására:

$$M_{CAP} = E_p \cdot I_p \cdot \frac{a_s}{v_{s1}^2} \quad 2-3. \text{ egyenlet}$$

ahol,

$E_p \cdot I_p$ - A cölöp hajlítási merevsége

$a_s$ - A felszíni gyorsulás

$v_{s1}$ - Normalizált nyíróhullám terjedési sebesség

(de Sanctis, 2010) az alábbi becslő képletet adja:

$$M_{CAP} = \beta_{CAP} \cdot \frac{64}{\pi} \cdot a_{s,max} \cdot \rho_s \cdot \frac{E_p \cdot I_p}{E_{s1}} \quad 2-4. \text{ egyenlet}$$

ahol,

$\beta_{CAP}$ - Korrelációs tényező

$a_{s,max}$  -Maximális felszíni gyorsulás

$\rho_s$  -Talaj térfogat sűrűsége

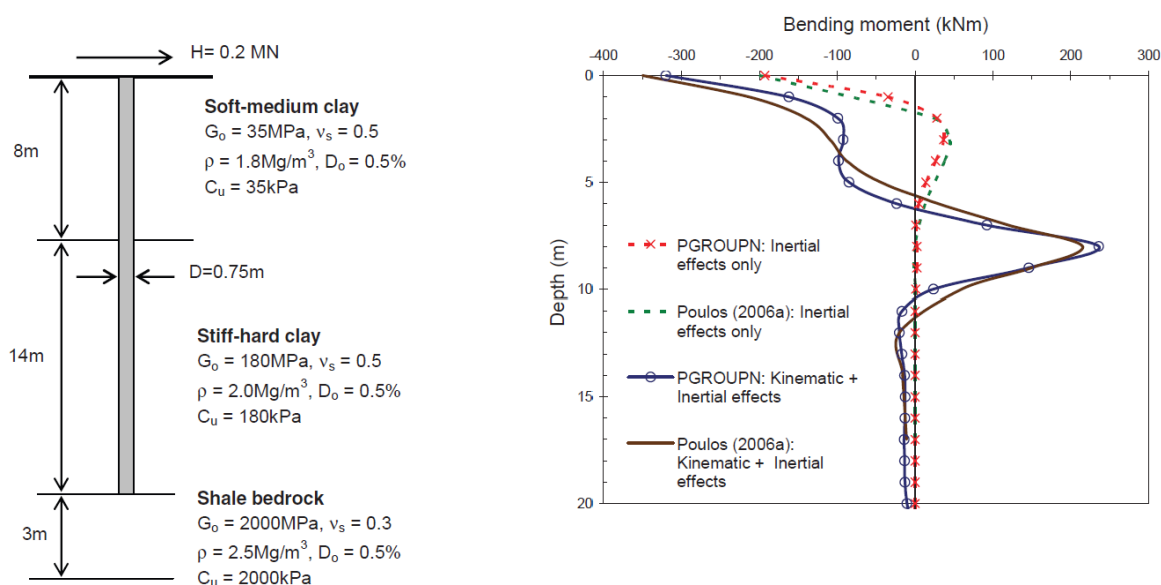
$E_{s1}$ -Talaj felső rétegének rugalmassági modulusa

Ezen összefüggések alapján elmondható, hogy a fejtömbnél kialakuló nyomaték értéke a felszíni gyorsulással lineárisan arányos, míg a talaj felső rétegének merevségével fordítottan arányos.

### **2.3 Cölöpcsoport hatása a kinematikai igénybevételre**

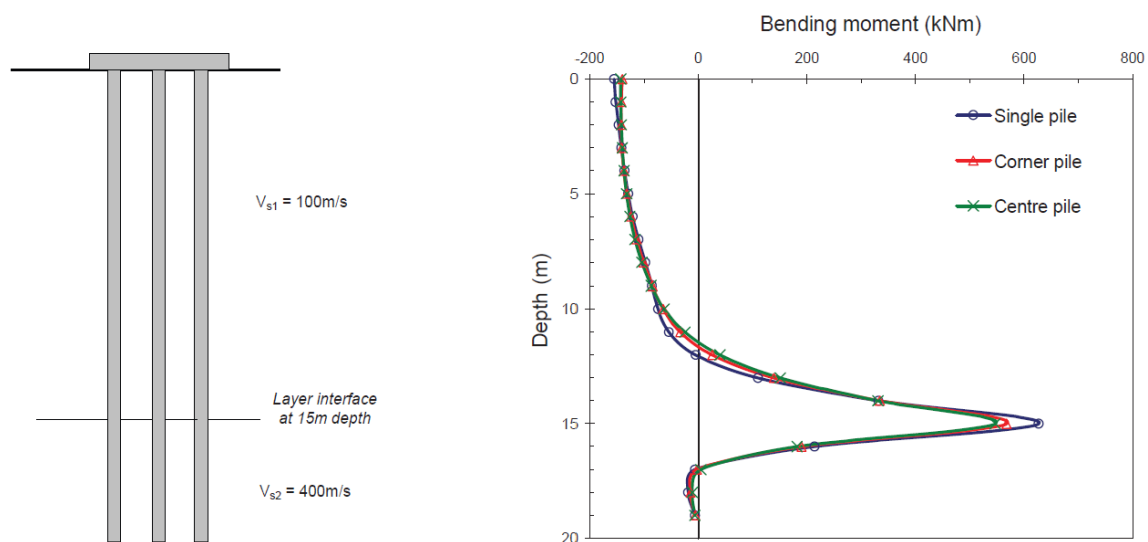
Cölöpcsoportok esetén a vizsgálat során egy új szempontot méghozzá a csoporthatást kell figyelembe vennünk. Ez a tehetetlenségi hatás esetében lényegében azt fogja eredményezni, hogy az egy sorban található cölöpökben eltérő lesz az igénybevételek értéke. Ennek a jelenségnek a magyarázata az, hogy a felszerkezetről érkező vízszintes erő az elől lévő cölöpöt neki nyomja a földtömegnek, mögöttük pedig fellazulás következik be. Így a mögöttük lévő cölöp már ennek a fellazult talajzónának támaszkodik neki, így kisebb erőátadására képes. Ez a jelenség azonban a földrengésből adódó kinematikai igénybevételek esetén (Basile, 2012) eredményei alapján nem teljesül.

(Basile, 2012) 3x3 db-os cölöpcsoportot végeselemes program segítségével vizsgált. Első körben egyedi cölöpöt elemzett az alkalmazott modell verifikálásához, melyet rétegzett talajkörnyezetbe helyezett. Eredményeit egy korábbi cikkben leírtakkal összevetve igazolta a program alkalmazhatóságát. A tehetetlenségi hatás (szaggatott vonalak), valamint a kinematikai és a tehetetlenségi hatás interakciójának (sima vonalak) összehasonlítását mutatja a 2.6. ábra. Az így verifikált modellt alkalmazta a cölöpcsoport vizsgálatára.



2.6. ábra (Basile, 2012) végeselemes szoftverrel kapott eredményei és az általa választott vizsgálat eredményeinek összehasonlítása

A csoport vizsgálatok a nyomatékok a 2.7. ábra szerint alakultak. Fontos kiemelni, hogy (Basile, 2012) pszeudostatikusan vizsgálódott. Első körben meghatározta az adott gerjesztésre a talaj elmozdulását, majd ezt az elmozdulást működtette a cölöpökön. Ebben az esetben mindegyik cölöpre közel azonos igénybevételt kapott, azonban kisebbeket, mint az egyedi cölöp esetén. Ezért vizsgálataiból azt a következtetést lehet levonni, hogy ha a csoport tagjait egyedi cölöpként vizsgáljuk és méretezzük, akkor a biztonság javára „tévedünk”. Szeretném már itt kiemelni, hogy első körben én nem ezt a számítási módszert alkalmaztam, hanem a modell alsó síkján működtetett gerjesztéssel szimuláltam a földrengés hatását. Később végeztem én is pszeudostatikus vizsgálatokat, melyek eredményeit a hozzátartozó fejezetben fogom bemutatni.



2.7. ábra Cölöpcsoport hatása az igénybevételekre, pszeudostaiikus számítás esetén (Basile, 2012)

### **3 Egyedi cölöp vizsgálata végeselemes szoftverrel**

#### **3.1 Modellelés célja**

A modellezés elsődleges célja, hogy igazoljuk a 2D végeselemes szoftver alkalmazhatóságát a cölöpök földrengésre történő vizsgálatára. Ehhez a Plaxis 2D szoftvert alkalmaztam, mivel Magyarországon ez viszonylag elterjedt szoftver a szakmában. A vizsgálatot (R. Maiorano, 2009) cikkével verifikáltam. (Wolf, 2018) disszertációjában szintén ezzel a vizsgálattal igazolta modellének helyességét. (Wolf, 2018) doktori értekezésében a Plaxis 3D modellt alkalmazta és kimutatta, hogy 3D modellben is működik ez a fajta vizsgálat. Így ez a két kutatás lett a vizsgálatom alapja.

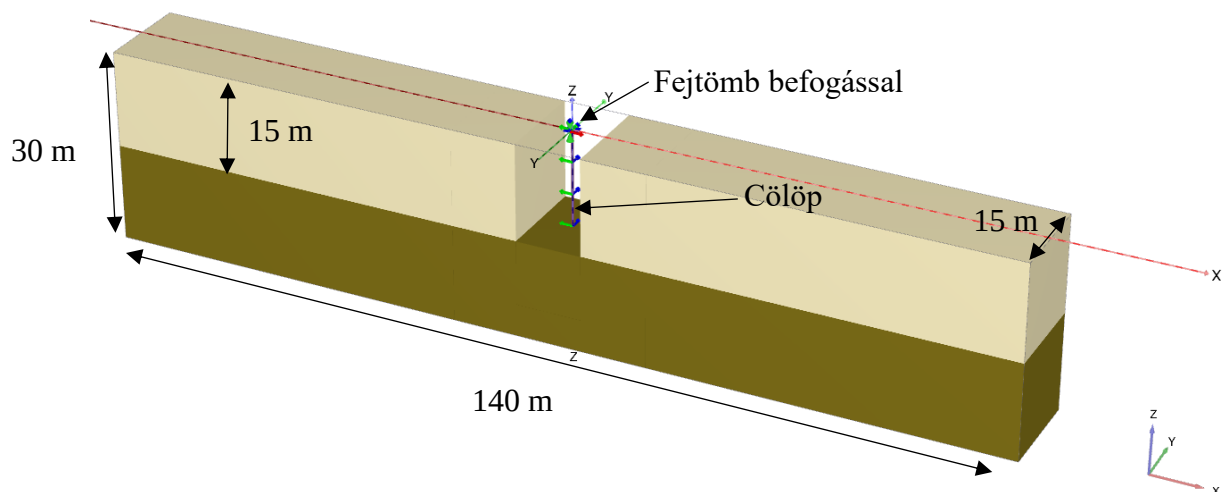
A Plaxis 2D modell eredményeit a Plaxis 3D (R. Maiorano, 2009) és (Wolf, 2018) eredményeivel verifikált számításaival vetettem össze, ezért elsőként ezt mutatom be.

#### **3.2 Plaxis 3D modell bemutatása és verifikálása**

Első lépésben (R. Maiorano, 2009) cikkében bemutatott modellre az ott kapott eredményekkel verifikáltam a modelletemet. Ugyanezt a cikket használta (Wolf, 2018) doktori értekezésében is modelljének vizsgálatára. (Wolf, 2018) eredményei rendelkezésemre álltak, így azokat etalonként kezeltem, de én is elkészítettem az egyedi cölöp modelljét 3D-ben és összehasonlítottam az eredményeit (Wolf, 2018) eredményeivel. (Wolf, 2018) eredményeire a továbbiakban eredetiként hivatkozok.

A modell felépítése a 3.1. ábrán látható. A modell 140 méter hosszú. Ezt az értéket, úgy választottam meg, hogy a peremfeltételek a cölöp körüli viselkedést ne befolyásolják. A mélységet (R. Maiorano, 2009)-val azonosra vettem, tehát 30 méter, a réteghatár 15 méteren található. A modell szélessége 15 méter. A lineárisan rugalmas anyagmodell talajjellemzőit a 3-1. táblázat tartalmazza.

A modellezés során a talajvíz szintet a modell alsó síkjára vettem fel, így annak kihatása az eredményekre nincsen. A modell közepébe a (R. Maiorano, 2009) által vizsgált cölöpöt és egy hozzá tartozó cölöpfejet tettem, melyek között merev kapcsolatot állítottam be, s a befogás biztosítása érdekében a cölöpfej elfordulását megakadályoztam. A cölöpöt „embedded beam”, a fejtömböt „plate”, azaz fal elemmel modelleztem meg. A cölöpfej méretét a 3D egyedi cölöp modell esetén 2x2 méterre állítottam, valamint a cölöpfej térfogat súlyát zérusra vettem, hogy abból tehetetlenségi hatás ne ébredjen. Ezek jellemzői a 3-2. táblázatban olvashatóak.



3.1. ábra 3D modell felépítése egyedi cölöp esetén

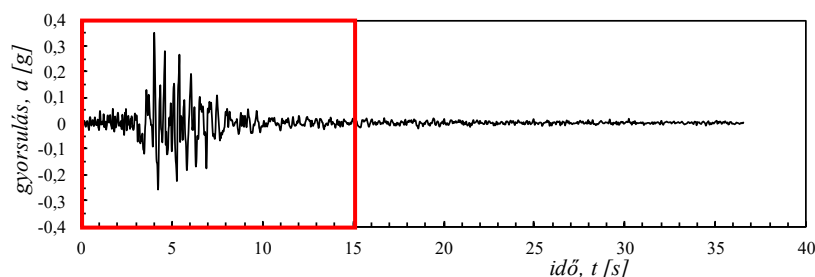
| Talajrétegek bemutatása         |                                              |                         |                         |
|---------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Jellemző adatok                 |                                              | Felső réteg             | Alsó réteg              |
| Talajmodell                     |                                              | Lineárisan rugalmas     | Lineárisan rugalmas     |
| Térfogat súlyok                 | $\gamma_{\text{sat}}, \gamma_{\text{unsat}}$ | 19,40 kN/m <sup>3</sup> | 19,40 kN/m <sup>3</sup> |
| Rayleigh csillapítási jellemzők | $\xi_1 \xi_2$                                | 10% és 10%              | 10% és 10%              |
|                                 | $f_1 f_2$                                    | 0,7 Hz és 2,8 Hz        | 0,7 Hz és 2,8 Hz        |
| Poisson tényező                 | $\nu$                                        | 0,4                     | 0,4                     |
| Nyírási modulus                 | $G_{\text{ref}}$                             | 19.780 kPa              | 316.400 kPa             |
| Nyíróhullám terjedési sebessége | $v_s$                                        | 100 m/s                 | 400 m/s                 |

3-1. táblázat 3D modell talajrétegződésének paramétereit

| Cölöp paramétereit        |                       |                        |
|---------------------------|-----------------------|------------------------|
| Térfogat súly             | $\gamma$              | 22,0 kN/m <sup>3</sup> |
| Hossz                     | $L$                   | 20,0 m                 |
| Átmérő                    | $D$                   | 60 cm                  |
| Rugalmassági modulus      | $E_p$                 | 25,0 GPa               |
| Palástellenállás maximuma | $T_{\text{skin,max}}$ | 185 kN/m               |
| Talpellénállás maximuma   | $F_{\text{max}}$      | 560 kN                 |
| Fejtömb paramétereit      |                       |                        |
| Térfogat súly             | $\gamma$              | 0 kN/m <sup>3</sup>    |
| Merevség                  | $EI$                  | 25,0 GPa               |

3-2. táblázat Cölöp és fejtömb jellemzőit

A számítás során az 1976-os Friuli, olaszországi földrengés idő-gyorsulás adatsorát alkalmaztam, ahol a maximális gyorsulás értéke 0,35g volt. Az eredeti adatsor 40 másodperces, de mivel a második felében lényegesen kisebb gyorsulási értékek találhatók, így a számítási idő csökkentése érdekében csak a cölöp viselkedése szempontjából releváns első 15 másodperces időintervallumban vizsgáltam, mely a 3.2. ábrán látható.

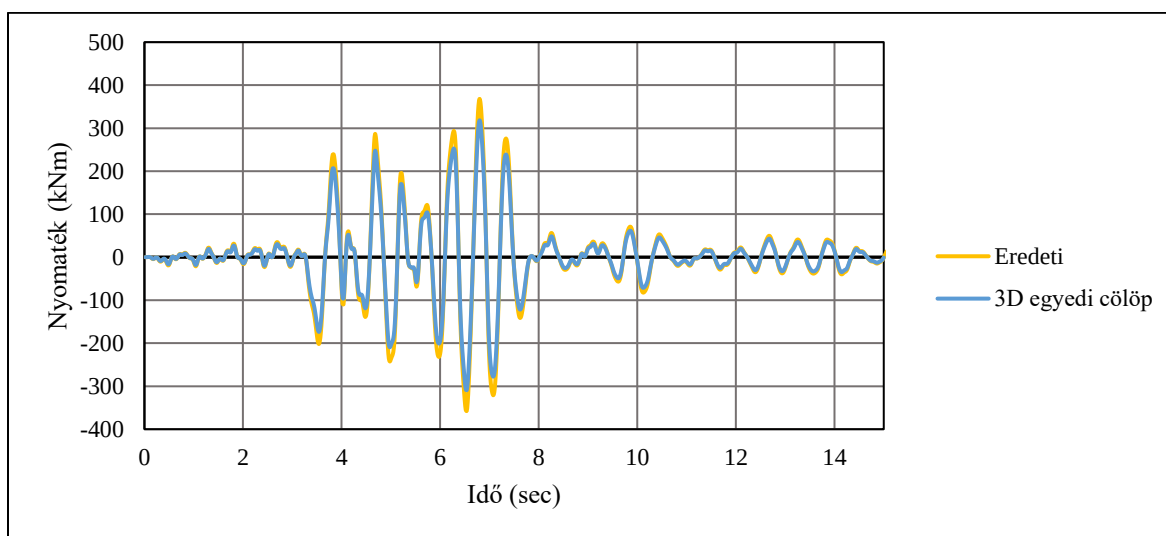


3.2. ábra Eredeti Friuli idő-gyorsulás grafikon

Habár az eredeti és az általam készített modell között van némi eltérés a számszerű végeredményekben, viselkedésében ugyanazt kapjuk ezért elfogadható. Az eredmények a 3-3. táblázatban láthatók, a cölöp viselkedését mutató diagramm pedig a 3.3. ábrán látható.

| Modell típusa        | Fejtőmbnél keletkező nyomaték | Réteghatáron ébredő nyomaték |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 3D egyedi cölöp      | 67,3 kNm                      | 318,4 kNm                    |
| Eredeti (Wolf, 2018) | 68,8 kNm                      | 368,1 kNm                    |
| (R. Maiorano, 2009)  | 95 kNm                        | 348 kNm                      |

3-3. táblázat 3D egyedi cölöp verifikálásának eredményei

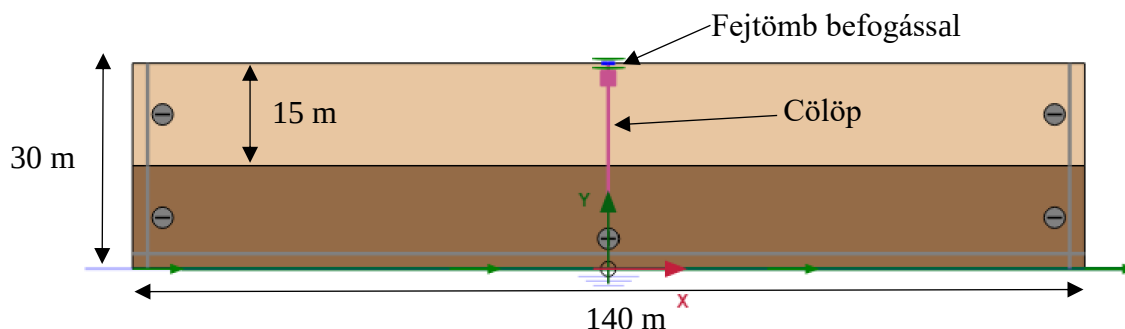


3.3. ábra 3D egyedi cölöp viselkedése a réteghatáron a szakirodalomban található példához (Wolf, 2018) hasonlítva

Összefoglalva elmondható, hogy a 3D modellt sikerült verifikálnom a réteghatáron, azonban a cölöpfejnél kisebb eltérés tapasztaltam. Ettől függetlenül módszer alkalmas cölöpök föld-rengés alatti viselkedésének vizsgálatára.

### 3.3 2D modellek bemutatása

3.4. ábra Plaxis 2D modell felépítése



A 3.4. ábrán látható módon építettem fel a Plaxis 2D modellt. Ehhez kettő féle talajtípust választottam, melyek ugyanazokkal a paraméterekkel rendelkeznek, mint (R. Maiorano, 2009) cikkében bemutatott modell a verifikálás érdekében. A modell szélessége 140 méter, magassága pedig 30 méter, a réteghatár 15 méteren található. A szélesség megválasztását szintén az indokolta, hogy a peremfeltételek ne befolyásolják a cölöpben keletkező igény-bevételeket. A rétegződés jellemzői a 3-1. táblázatban, a cölöp és a fejtömb jellemzői pedig a 3-2. táblázatban láthatóak. A 2D programban cölöp modellezésre az „embedded beam row” elem használatos, mely valójában cölöpsort jelent, így az  $L_{spacing}$ , azaz a modellre mérőleges irányban a tengelytávolság állítására van lehetőség. Ezt az értéket minden modellnél változtattam, melynek hatását a következő fejezetben ismertetem. A cölöpfejet fal (plate) elemmel jelenítettem meg a modellben. A cölöpfej merevségének minden tengelytávolság esetén ugyanazt a  $260.000 \text{ kN/m}^2/\text{m}$ . A cölöp és cölöpfej között merev kapcsolatot állítottam be, s a befogás biztosítása érdekében a cölöpfej elfordulását megakadályoztam. A földrengés szimulálására a 3.2. ábrán látható idő-gyorsulás adatsort alkalmaztam.

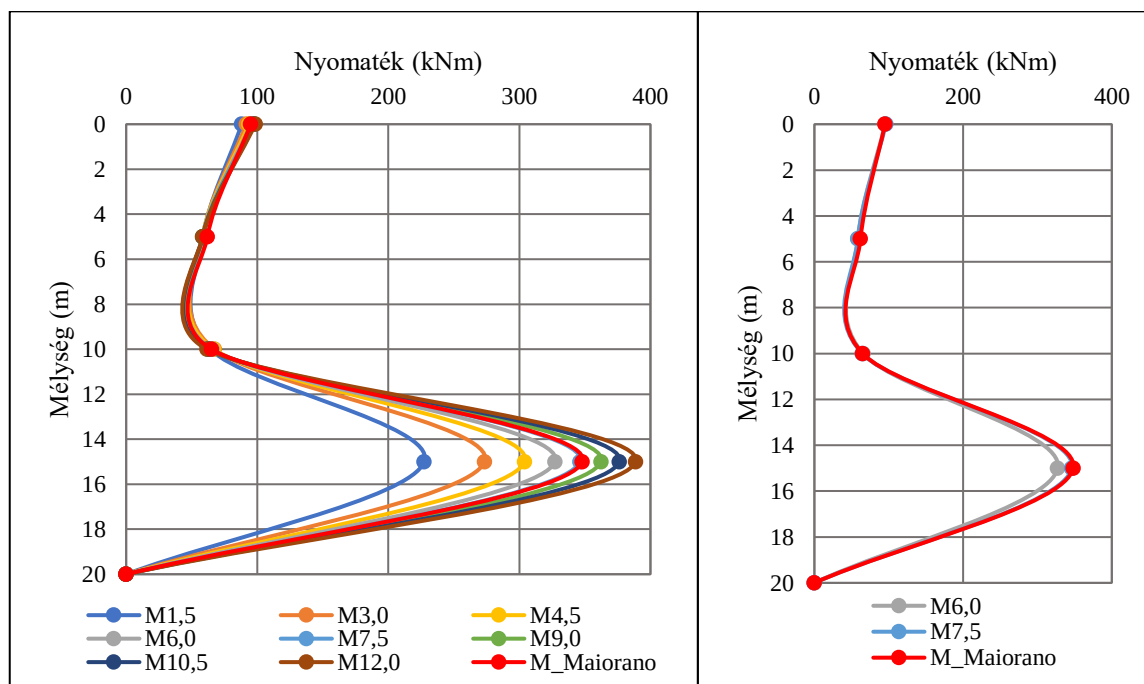
### 3.4 2D modell eredményei

A vizsgálatot a Plaxis 2D programmal végeztem, melyet a szakirodalomból vett (Wolf, 2018) és a saját magam által készített 3D modell eredményeivel vetettem össze. Ahogy fenn említettem 2D modell esetében lehetőség van a tengelytávolság állítására, így az első lépésként ennek a helyes beállítása volt a cél. A tengelytávolság beállításának abban van szerepe, hogy ebből a modell egy helyettesítő méteres szakaszra jutó merevséget számol. Végeztem számításokat a cölöpátmérő (D) függvényében az alábbi módokon, melyek eredményét a 3-4. táblázatban foglaltam össze.

| Cölöpök tengelytávolsága | Fejtömbnél keletkező nyomaték | Réteghatáron keletkező nyomaték |
|--------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 1,5 m (2,5 D)            | 88,1 kNm                      | 227,4 kNm                       |
| 3,0 m (5 D)              | 91,6 kNm                      | 273,5 kNm                       |
| 4,5 m (7,5 D)            | 93,7 kNm                      | 304,0 kNm                       |
| 6,0 m (10 D)             | 95,1 kNm                      | 327,2 kNm                       |
| 7,5 m (12,5 D)           | 96,2 kNm                      | 346,1 kNm                       |
| 9,0 m (15 D)             | 97,1 kNm                      | 362,2 kNm                       |
| 10,5 m (17,5 D)          | 97,8 kNm                      | 376,3 kNm                       |
| 12,0 m (20 D)            | 98,5 kNm                      | 388,7 kNm                       |
| Eredeti (Wolf, 2018)     | 68,8 kNm                      | 368,1 kNm                       |
| (R. Maiorano, 2009)      | 95,0 kNm                      | 348 kNm                         |

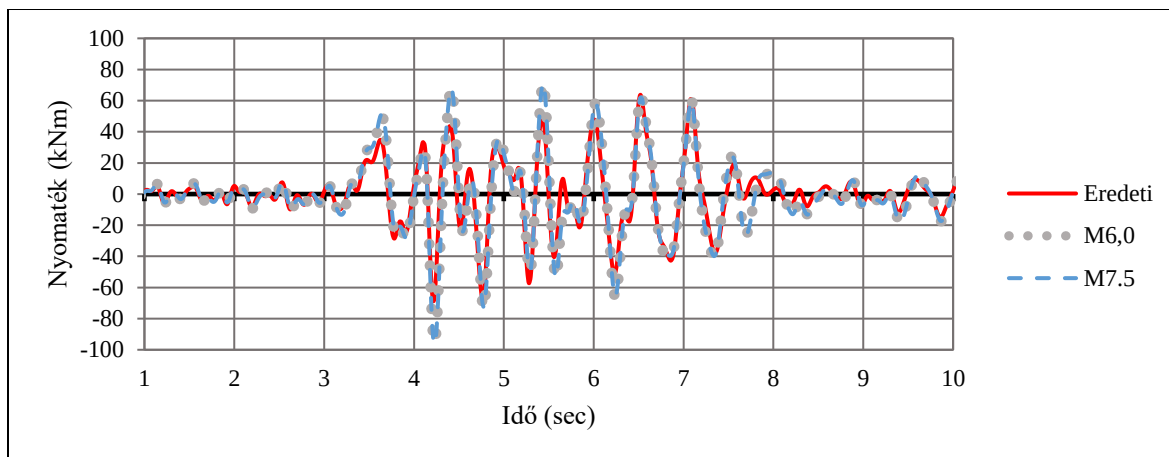
3-4. táblázat 2D eredmények a tengelytávolság függvényében

A vizsgálat során több megállapításra is jutottam. Az első, hogy az eredeti eredményekhez leginkább a 6,0 és a 7,5 méteres tengelytávolságú modell illik, sőt a 7,5 méteres modell szinte teljesen leköveti az eredeti eredményeket. Ezt a 3.5. ábrán láthatjuk, melynek a bal oldali részén az összes modell eredménye látható, míg a jobb oldalán az eredeti és a hozzá leginkább hasonlító 2 modell eredménye. A fejtömb esetében a tengelytávolságnak nincsen ilyen mértékű hatása.

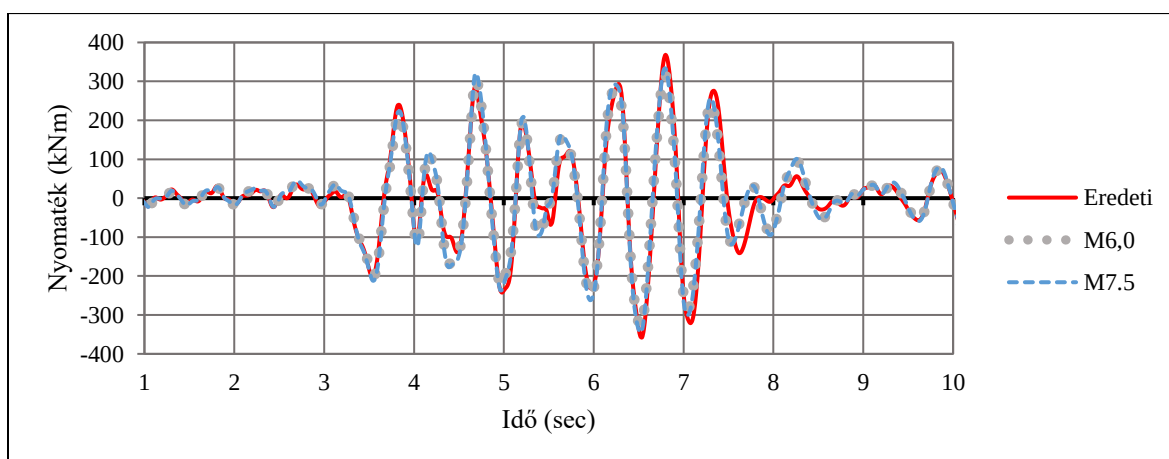


3.5. ábra Maximális nyomaték alakulása a cölöphossza mentén

Amennyiben nem csak a maximum értékeket vetjük össze, hanem időben vizsgálódunk, akkor is látszódik az, hogy az említett két modell mennyire megközelíti az eredeti eredményeket. Az egyezés a földrengés során időben is jól kimutatható, ezt igazolja a 3.6. ábra a réteghatáron ébredő nyomatékokkal és a 3.7. ábra a fejtömbnél ébredőkkel.



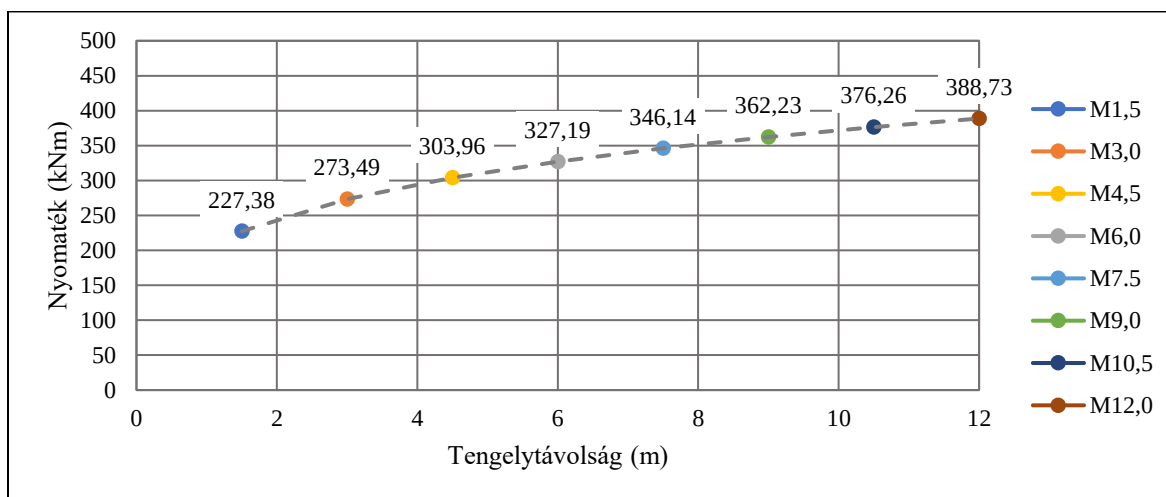
3.6. ábra A kiválasztott 2D modellek nyomatékának alakulása a réteghatáron az eredeti modellel összevetve



3.7. ábra A kiválasztott 2D modellek nyomatékának alakulása a fejtömbnél az eredeti modellel összevetve

Amennyiben a réteghatáron keletkező nyomatékok értékét összevetjük azt tapasztaljuk, hogy a tengelytávolság növekedésével a réteghatáron lévő nyomaték értéke is növekszik. Ezt a 3.8. ábrán láthatjuk. A modellezés kezdetén hasonló eredményt vártunk, hogy a tengelytáv növekedésével a nyomaték is növekedni fog, viszont arra számítottunk, hogy a pontokra illeszthető „görbe” jobban el fog laposodni és egy adott értékhez tart. Ennek a magyarázata az lehet, hogy a valóságban, mikor egymástól elég távol kerülnek a cölöpök, a köztük lévő földtömegnek lesz egy olyan része, mely már nem hat egyik cölöpre sem, tőlük függetlenül mozdul el. Erre a 2D modellező program nem képes, az a megadott paraméterekből

egy folyóméterre jutó cölöp merevséget számol. Ezért lehet az, hogy minél inkább növekszik a tengelytávolság, annál inkább növekszik az egy cölöpre ható földtömeg nagysága, így pedig az igénybevétel a réteghatáron. A fejtömb esetében azonban ennek a hatása kisebb és az eredmények jó közelítést mutatnak (R. Maiorano, 2009) eredményeivel. Ez tehát a 2D modellekkel kapcsolatos második megállapítás. Ez a jelenség sarkalt annak a megvizsgálására, hogy a 3D modellezés esetén ez a probléma hogyan alakul.



3.8. ábra Réteghatáron ébredő nyomatékok az egyes modellek esetén

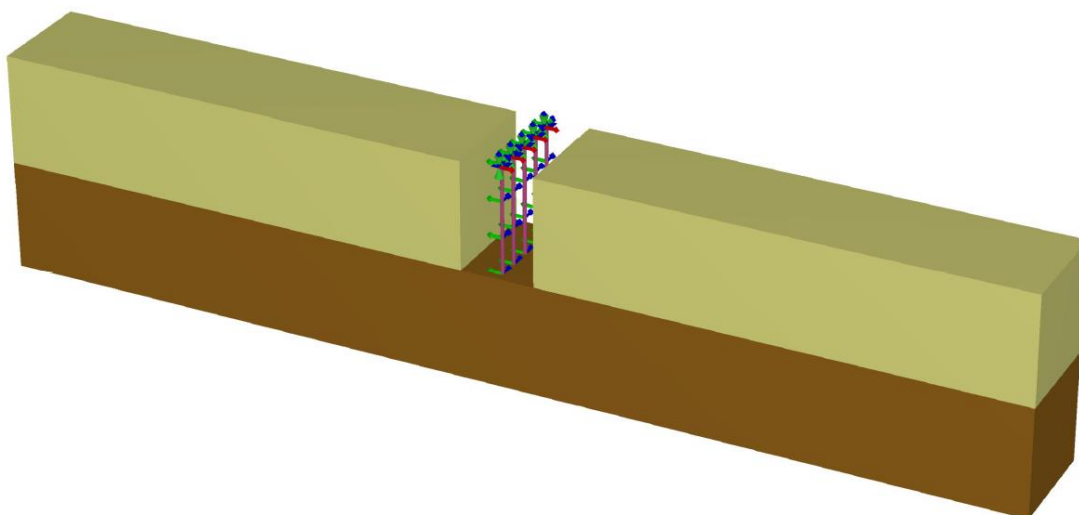
Összességében elmondható tehát, hogy amennyiben 2D modellel szeretnénk hasonló jelenséget vizsgálni első lépésként a helyes tengelytávolságot kell meghatároznunk. Azonban a fent említett probléma miatt nem feltétlenül a 2D modellezési verzió a legalkalmasabb ezen jelenségek vizsgálatára.

### 3.5 3D modellek eredménye

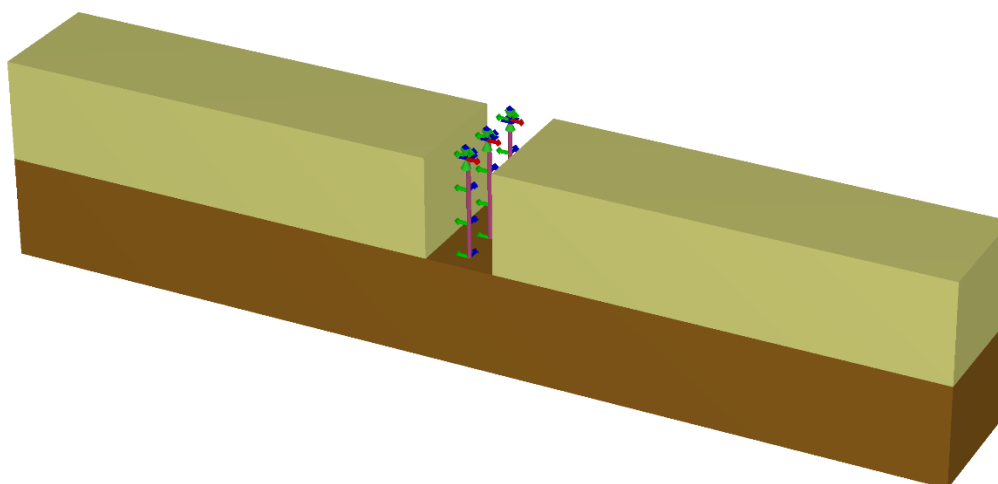
Az egyedi cölöpön kívül 3 darab 3D modellt építettem fel. Ezeknél a tengelytávolságot 3,0, 6,0 és 9,0 méterre állítottam. A modell nagyságát nem változtattam meg, így a 3 méteres tengelytávolságú cölöpökből 5 darab is elfért egy modellen belül, viszont a másik kettő esetben 3 cölöppel vizsgáltam. A modellekről készült képeket a 3.9. és a 3.10. ábra mutatja.

Mivel a 9 méteres tengelytávolságú modell is a 3.10. ábrával megegyezően nézett ki, ezért arról képet nem teszek be, viszont szeretném felhívni rá a figyelmet, hogy arra a továbbiakban V03 modellként fogok hivatkozni.

A következő ábrákon (3.11. és 3.12.) jól látható, hogy a réteghatáron és a fejtömbnél is közel azonos nyomatéki értékeket kapunk, a minimális eltérés a végelemek sűrűségéből adódhat. Az eredményeket a 3-5. táblázatban ismertetem.



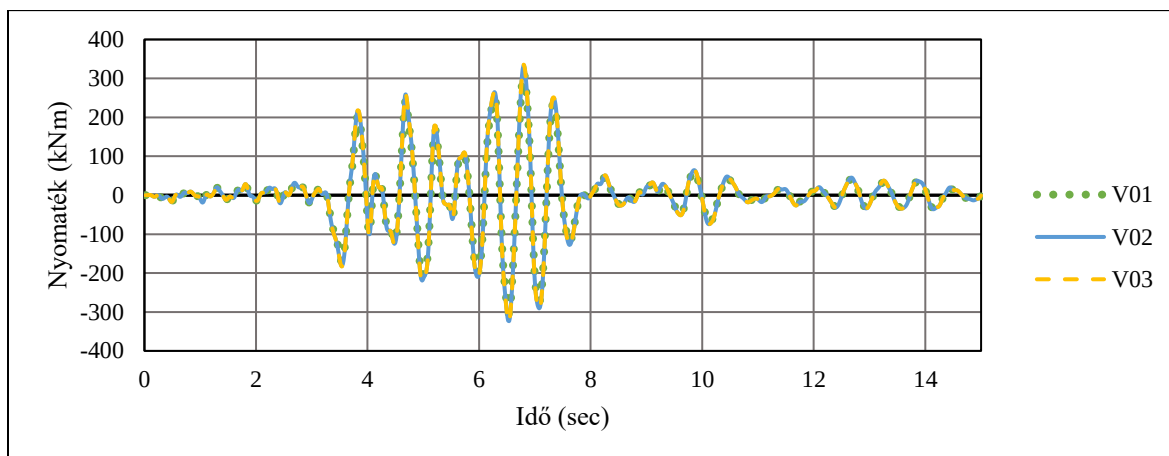
3.9. ábra 3 méteres tengelytávolságú 3D modell-V01 néven a továbbiakban



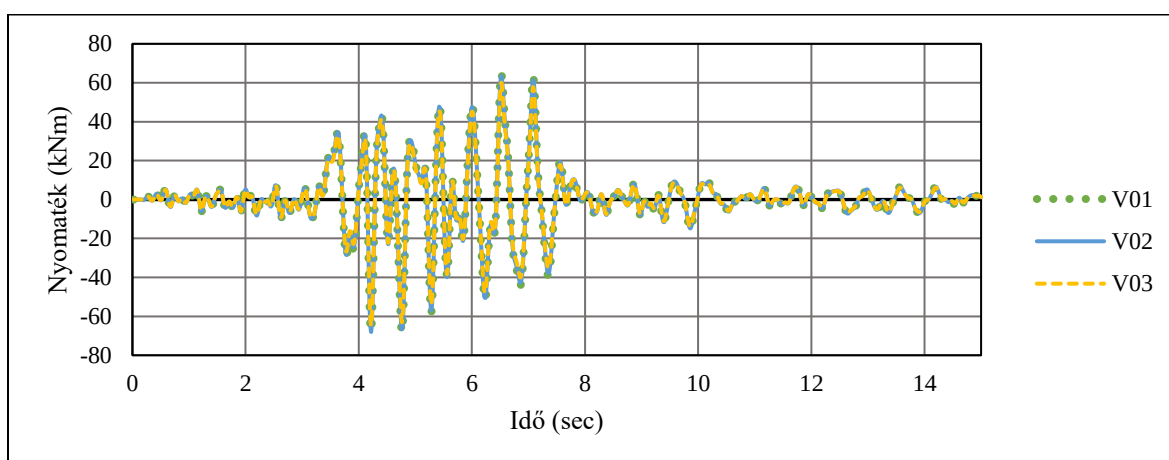
3.10. ábra 6 méteres tengelytávolságú 3D modell-V02 néven a továbbiakban

| Eltérő tengelytávolságú 3D modellek eredményei |           |           |           |
|------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Modell elnevezése                              | V01       | V02       | V03       |
| Tengelytávolság                                | 3 méter   | 6 méter   | 9 méter   |
| Réteghatáron ébredő nyomaték                   | 312,9 kNm | 333,3 kNm | 335,4 kNm |
| Fejtőmbnél ébredő nyomaték                     | 68,1 kNm  | 68,0 kNm  | 64,9 kNm  |

3-5. táblázat Eltérő tengelytávolságú 3D modellek eredményei



3.11. ábra Eltérő tengelytávolságú 3D modellek eredménye a réteghatáron egymáshoz viszonyítva



3.12. ábra Eltérő tengelytávolságú 3D modellek eredménye a fejtőmbnél egymáshoz viszonyítva

Ezekből az eredményekből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a 3D modell már képes kezelni azt a problémát, hogy a cölöpök között van olyan földtömeg, mely a cölöpöktől függetlenül mozdul el, ezért alkalmas a cölöpcsoport vizsgálatára. Továbbá azt is megállapíthatjuk, hogy a cölöpök ilyen távolsága esetén a földrengésre merőlegesen elhelyezve egymásra hatás nincsen, mindegyik az egyedivel közel azonos eredményt hoz.

### 3.6 2D és 3D eredmények összehasonlítása

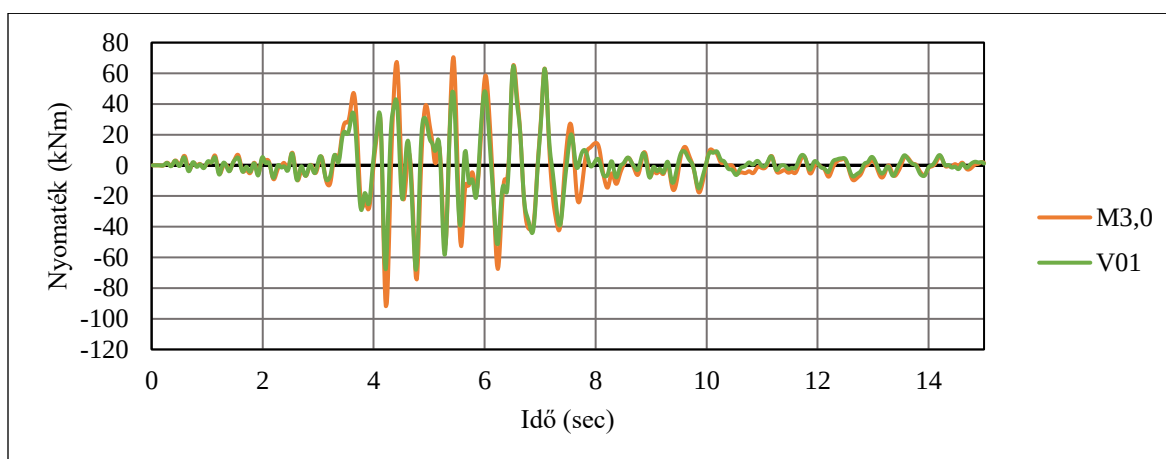
A következőkben az azonos tengelytávolságú 2D és 3D modellek eredményeit hasonlítom össze, melyek számszerűen a 3-6. táblázatban láthatóak.

A 3.13. és a 3.14. ábrák azt mutatják, hogy a réteghatáron ébredő igénybevétel időbeli alakulása, a nyomatékok iránya közel azonosan változik, de a szélsőértékekben van eltérés, ami bizonytalanságot jelent a 2D-vel kapcsolatban. A fejtőmb esetében (R. Maiorano, 2009) eredményeivel összehasonlítva a 2D megfelelő eredményeket mutat, azonban a 3D kicsit túlbecsüli azokat. Ezen eredményekből nehéz általános irányelvet megfogalmazni arra, hogy

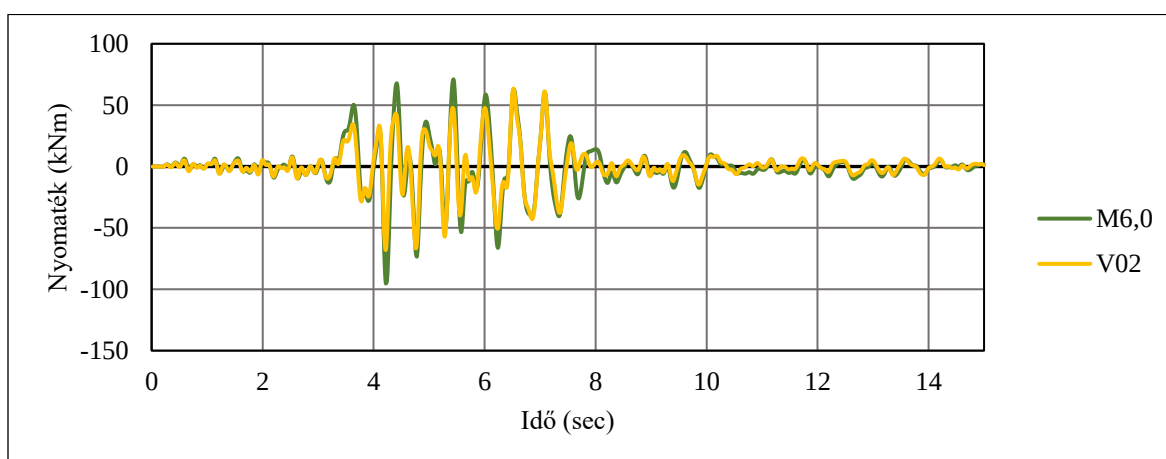
a 2D modellezésnél milyen cölöp tengelytávolságot kell beállítani, hogy reális eredményt kapjunk. Ezért a cölöpcsoport vizsgálatához a 3D szoftvert használom.

| 2D és 3D modellek eredményeinek összehasonlítása azonos tengelytávolság esetén |              |            |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------|
| Maximális nyomatékok                                                           | Réteghatáron | Fejtömbnél |
| M3,0                                                                           | 273,5 kNm    | 91,6 kNm   |
| V01                                                                            | 312,1 kNm    | 68,1 kNm   |
| M6,0                                                                           | 327,2 kNm    | 95,1 kNm   |
| V02                                                                            | 333,3 kNm    | 68,0 kNm   |
| M9,0                                                                           | 362,2 kNm    | 97,1 kNm   |
| V03                                                                            | 335,3 kNm    | 64,9 kNm   |

3-6. táblázat 2D és 3D modellek eredményeinek összehasonlítása azonos tengelytávolság esetén



3.13. ábra 2D és 3D modell eredményei 3 méteres tengelytávolság esetén réteghatáron



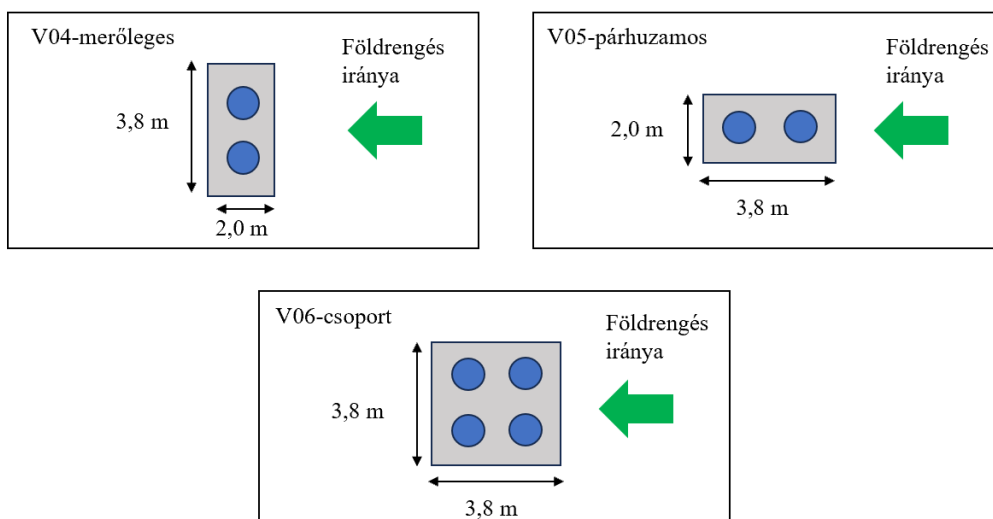
3.14. ábra 2D és 3D modell eredményei 6 méteres tengelytávolság esetén a réteghatáron

## 4 Cölöpcsoport vizsgálata

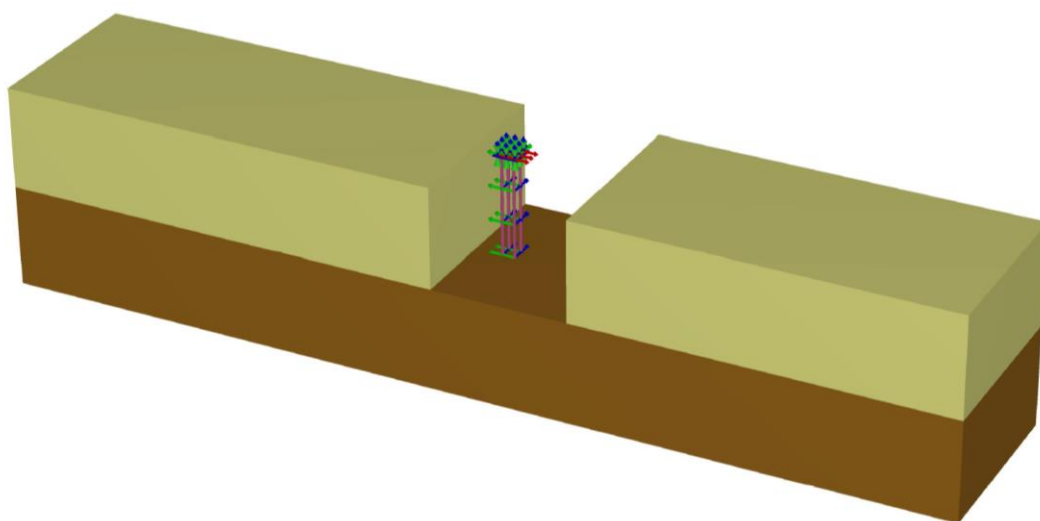
### 4.1 Csoport modellezés bemutatása

#### 4.1.1 Lineárisan rugalmas anyagmodell alkalmazása

A cölöpcsoportok közül 3 féle esetet vizsgáltam meg, melyet a 4.1. ábra mutat. Az első kettő esetben 2 db cölöpöt helyeztem el a földrengés irányára merőlegesen és azzal párhuzamosan. A harmadik modell esetében pedig egy 4 db cölöpből álló csoportot alkalmaztam. Minden esetben a cölöpök tengelytávolságának „3D”-t, azaz 1,8 métert alkalmaztam. A talajparaméterek, illetve a cölöp és a fejtömb tulajdonságai megegyeznek a 3-1. és 3-2. táblázatban leírtakkal. A modellre szintén a Friuli földrengés során mért idő gyorsulás diagrammot alkalmaztam, annak is az első 15 másodpercét. (3.2. ábra) A V06 eset modelljét a 4.2. ábra mutatja.



4.1. ábra 3D Csoportmodellek felépítése

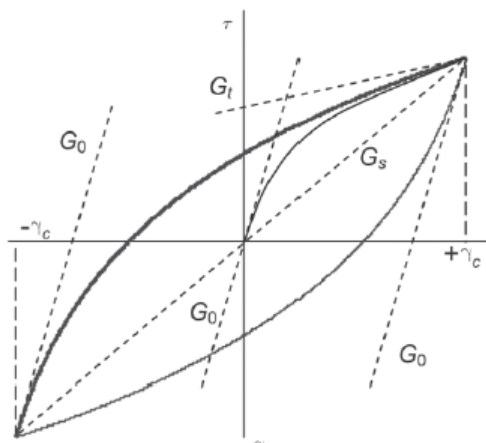


4.2. ábra V06 cölöpcsoport modellje

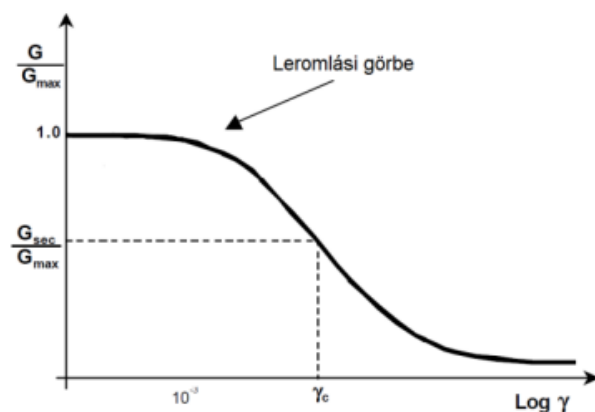
#### 4.1.2 HSS anyagmodell alkalmazása

Fontosnak tartottam, hogy a (R. Maiorano, 2009) modell csoportra való alkalmazásának eredményeinél tett megállapítások helyességét egy másik esetre is megvizsgáljam, hogy azok arra is érvényesek-e. Így egy új anyagmodellt és geometriát alkalmaztam. Ehhez (Wolf, 2018) disszertációjában bemutatott alapesetet vettem alapul, így az egyedi cölöp eredményeit, azokkal össze tudtam vetni. Azt vizsgáltam, hogy más cölöpgeometria, anyagmodell és földrengési hatás esetén is helyesek-e a megállapítások.

A felkeményedő anyagmodell kis alakváltozási tartományban nagyobb merevséget is figyelembe vevő változata (Hardening Soil Small Stiffnes – HSS) a geotechnikai modellezésben széles körben alkalmazott. Ezen anyagmodell egyrészt figyelembe veszi a talaj feszültség-szinttől való merevségfüggését, a tehermentesítés-újratelhelés alatti nagyobb merevséget. Másrészt, földrengés vizsgálat szempontjából kiemelten fontos, hogy a kis alakváltozásban nagyobb merevséget és a talaj hiszterézises csillapítását is figyelembe veszi. A 4.3. ábra a nyírási alakváltozás ( $\gamma$ ) és a nyírófeszültség kapcsolatát, egy hiszterézis hurkot mutat egy terhelési ciklus alatt. A nyírófeszültség és nyírási alakváltozás kapcsolata, a nyírási merevség pontról pontra változik, azaz az alakváltozási szinttől függően a nyírási modulus eltérő. Ez alapján felrajzolták a 4.4. ábrán látható leromlási görbét, mely szerint kis alakváltozási tartományban a talaj merevsége nagy. Azonban, ahogy nőnek az alakváltozások, a talaj merevsége egyre inkább csökken, ezt nevezzük leromlásnak. Ezenfelül a hurok területe a talaj energiaelnyelő képességével, a hiszterézis csillapítással arányos (Benz, 2007)

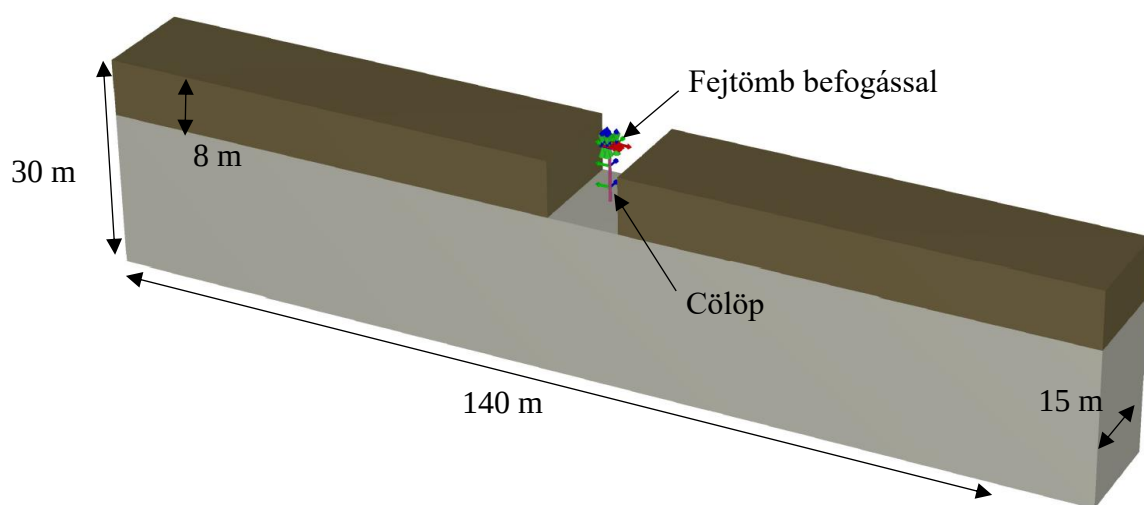


4.3. ábra Egy terhelési ciklus alatti hiszterézis hurok Forrás: (Brinkgreve, 2007)



4.4. ábra Leromlási görbe Forrás: (Szilvágyi, 2012)

A modell a 4.5. ábrán megjelenített módon a 4-1. és 4-2. táblázat paramétereivel épült fel. A modell hossza 140 méter, melyet az alapján választottam meg, hogy a cölöpben keletkező igénybevételeket a perem hatás ne zavarja. A modell magassága 30 méter, ám ezúttal a réteghatár 8 méteren található. A modell szélessége pedig szintén 15 méter. A cölöpöt a modell közepén helyeztem el, a fejtömbbel, melyek között a kapcsolat merev.



4.5. ábra HSS modellek felépítése

| Talajrétegek bemutatása |           |                        |                         |
|-------------------------|-----------|------------------------|-------------------------|
| Jellemző adatok         |           | Felső réteg            | Alsó réteg              |
| Talajmodell             |           | HSS                    | HSS                     |
| Térfogat súly           | $\gamma$  | 18,0 kN/m <sup>3</sup> | 19,00 kN/m <sup>3</sup> |
| Összenyomódási modulus  | $E_{oed}$ | 8 MPa                  | 20 MPa                  |
| Újraterhelési modulus   | $E_{ur}$  | 24 MPa                 | 60 MPa                  |
| Kohézió                 | $c$       | 1 kPa                  | 1 kPa                   |

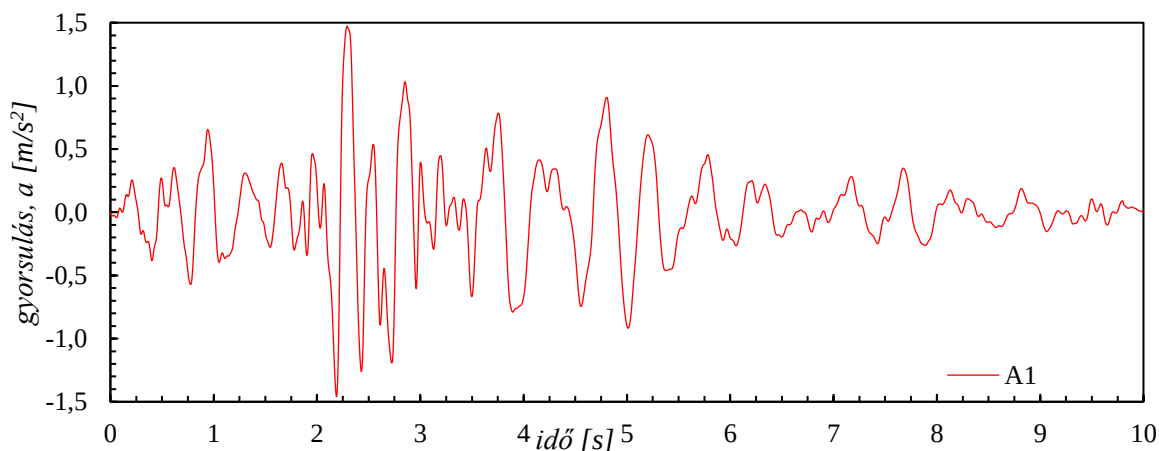
|                                                             |                    |                  |                |
|-------------------------------------------------------------|--------------------|------------------|----------------|
| Belső súrlódási szög                                        | $\varphi$          | 28°              | 32°            |
| Rayleigh csillapítási jellemzők                             | $\xi$              | 1,5%             | 1,5%           |
|                                                             | $f_1 f_2$          | 3,4 Hz és 1,0 Hz | 3,2 Hz és 1 Hz |
| Nyírási alakváltozás, ahol $G=0,772 \cdot G_{\text{ref},0}$ | $\gamma_{0,7}$     | 0,009%           | 0,009%         |
| Nyírási modulus kezdeti referencia értéke                   | $G_{\text{ref},0}$ | 40 MPa           | 120 MPa        |
| Nyíróhullám átlagos terjedési sebessége                     | $v_{s,\text{átl}}$ | 107,5 m/s        | 282,0 m/s      |

4-1. táblázat 3D-HSS modell talajrétegződésének paraméterei

| Cölöp paraméterei         |                       |                        |
|---------------------------|-----------------------|------------------------|
| Térfogat súly             | $\gamma$              | 22,0 kN/m <sup>3</sup> |
| Hossz                     | L                     | 12,0 m                 |
| Átmérő                    | D                     | 60 cm                  |
| Rugalmassági modulus      | $E_p$                 | 20,0 GPa               |
| Palástellenállás maximuma | $T_{\text{skin,max}}$ | 75 kN/m                |
| Talpellenállás maximuma   | $F_{\text{max}}$      | 565 kN                 |
| Fejtömb paraméterei       |                       |                        |
| Térfogat súly             | $\gamma$              | 0,0 kN/m/m             |
| Rugalmassági modulus      | E                     | 25 GPa                 |
| Vastagság                 | d                     | 0,6 m                  |

4-2. táblázat Cölöp és fejtömb jellemzői 3D-HSS modell esetén

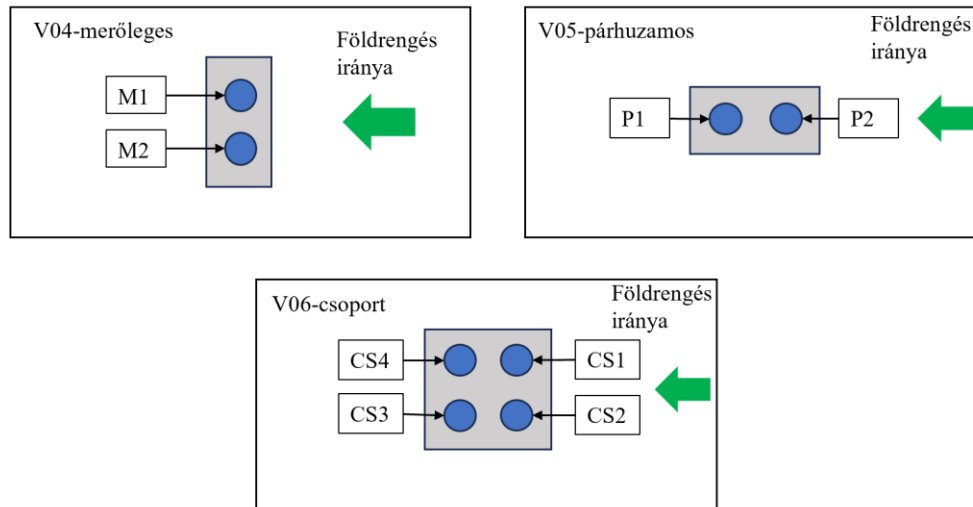
A vizsgálat során a 4.6. ábrán bemutatott idő-gyorsulás diagrammot működtettem a modellen.



4.6. ábra Az 1977 Friuli földrengés adatsora, a HSS anyagmodell során alkalmazott idő-gyorsulás diagramm

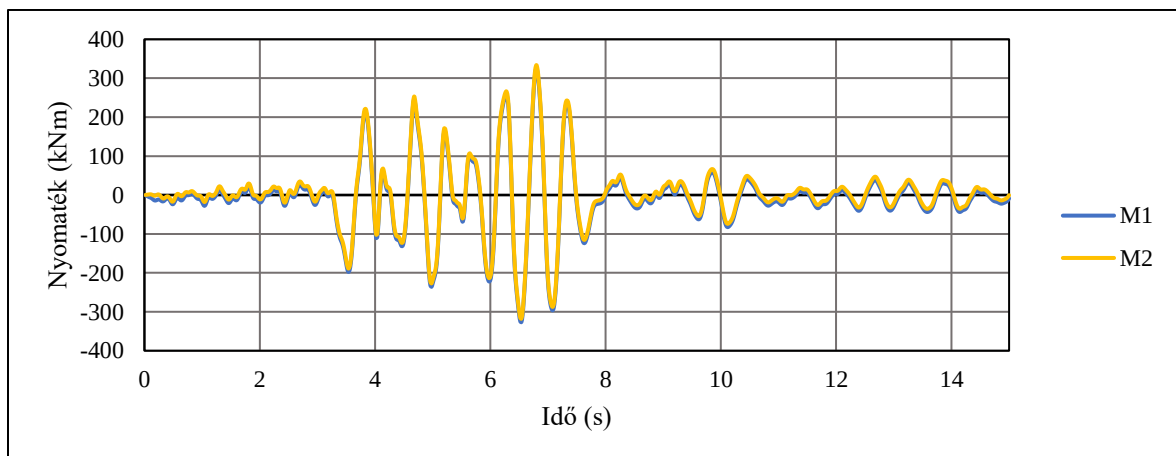
## 4.2 Csoport eredményeinek bemutatása

### 4.2.1 Lineárisan rugalmas anyagmodell eredményei



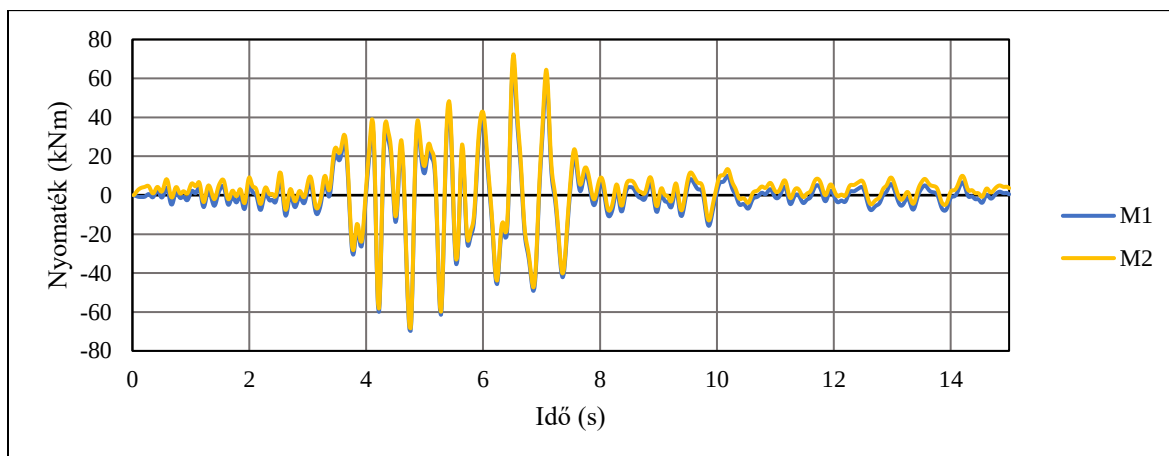
4.7. ábra Cölöpök elhelyezkedésének jelmagyarázata

A 4.7. ábrán a továbbiakban használatos cölöp és modell elnevezések láthatóak. A V04, tehát a földrengés irányára merőleges esetben jól látható a 4.8. és a 4.9. ábrán, hogy a réteghatár és a fejtömb esetében is a két cölöp igénybevételeben minimális eltérést tapasztalunk, melynek oka a végeselemes háló eltérésben keresendő. A vizsgálat eredménye, hogy földrengés irányára merőlegesen elhelyezett két cölöp megegyezően viselkedik. A cölöpök deformált alakja a maximális réteghatáron ébredő nyomaték időpillanatában a 4.10. ábrán látható.

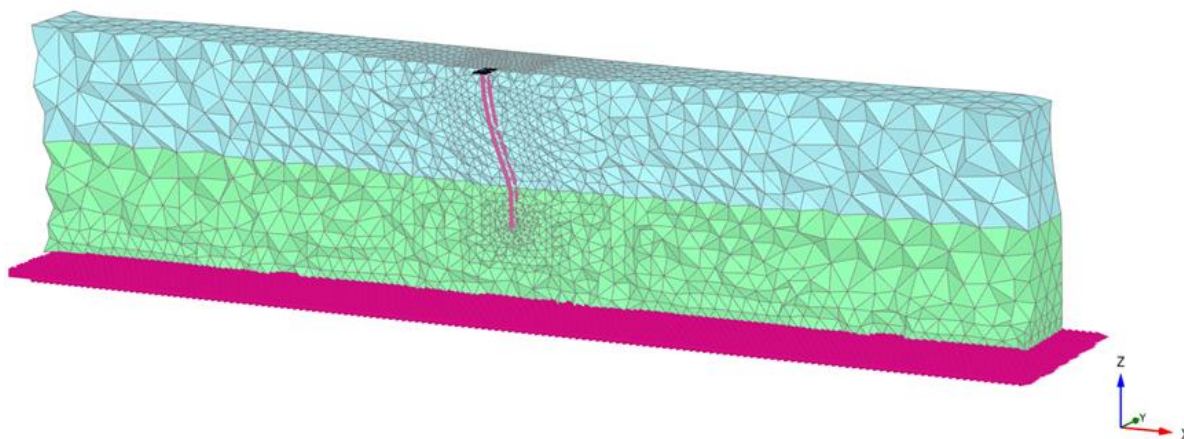


4.8. ábra V04 A földrengés irányára merőleges cölöpökben keletkező igénybevétel a réteghatáron

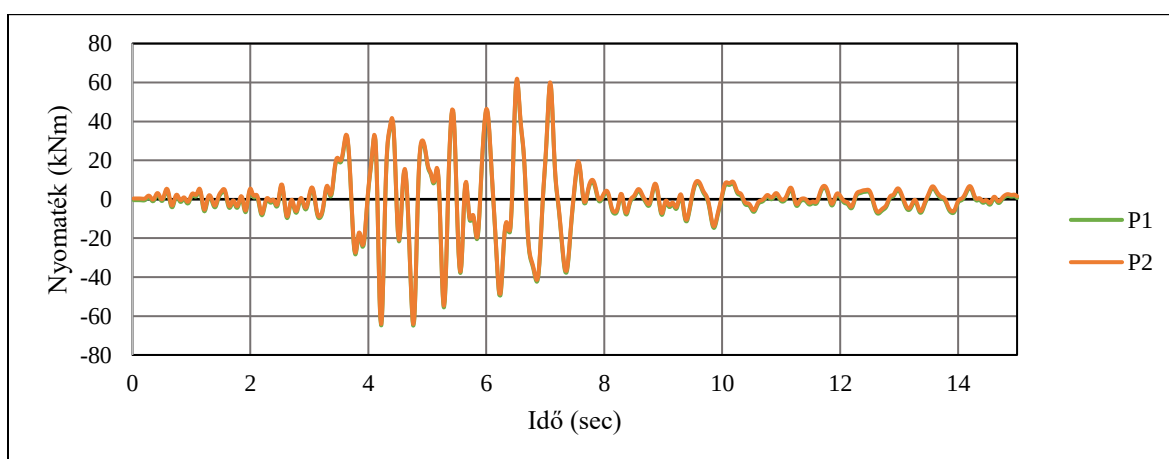
A V05, azaz a földrengés irányával párhuzamos esetben nem valósul meg az a viselkedés, mint a felszerkezetről átadódó vízszintes erő esetén, hogy az egyik cölöp „jobban dolgozik”, mint a másik. A 4.11. és 4.12. ábra a réteghatár és a fejtömb esetében szemlélteti az eredményeket a két cölöp esetében, melyek között nincs különbség.



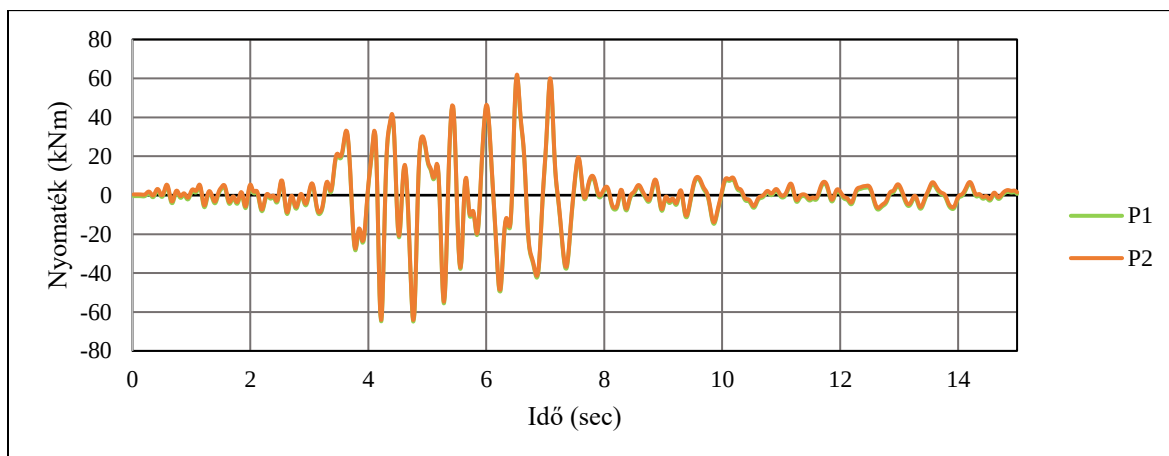
4.9. ábra V04 A földrengés irányára merőleges cölöpökben keletkező igénybevétel a fejtőbnél



4.10. ábra V04 modell deformált alakja a réteghatáron ébredő maximális nyomaték időpillanatában

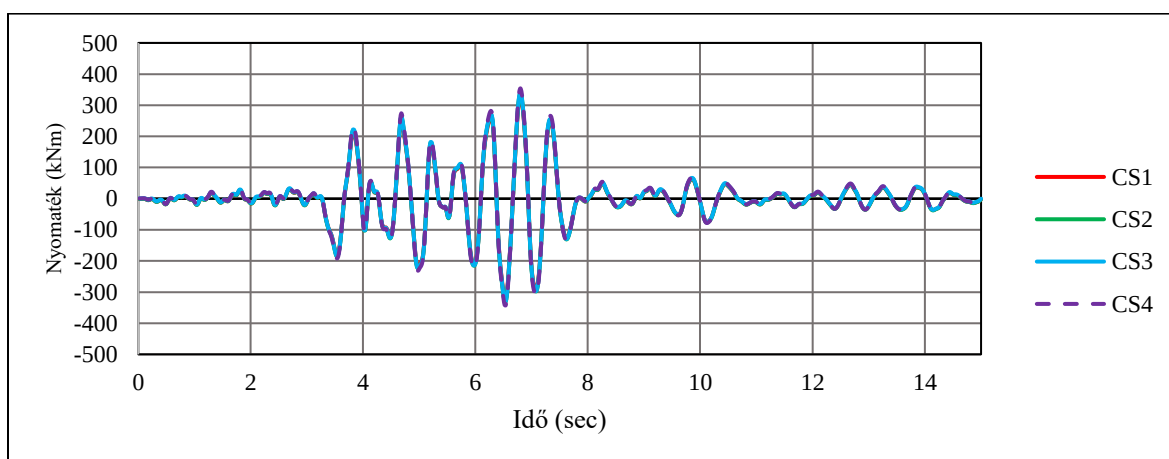


4.11. ábra V05 A földrengés irányával párhuzamos cölöpökben keletkező igénybevétel a réteghatáron

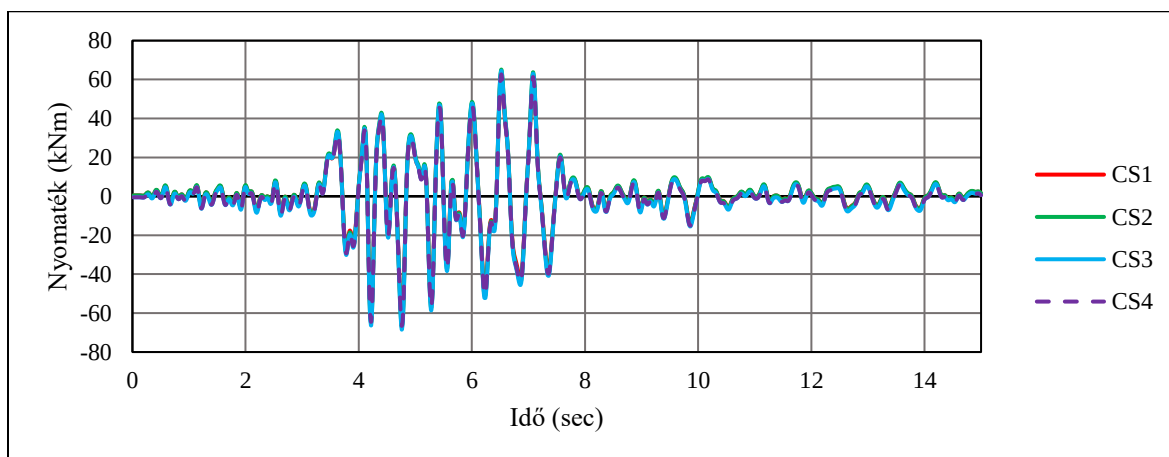


4.12. ábra V05 A földrengés irányával párhuzamos cölöpökben keletkező igénybevétel a fejtömbnél

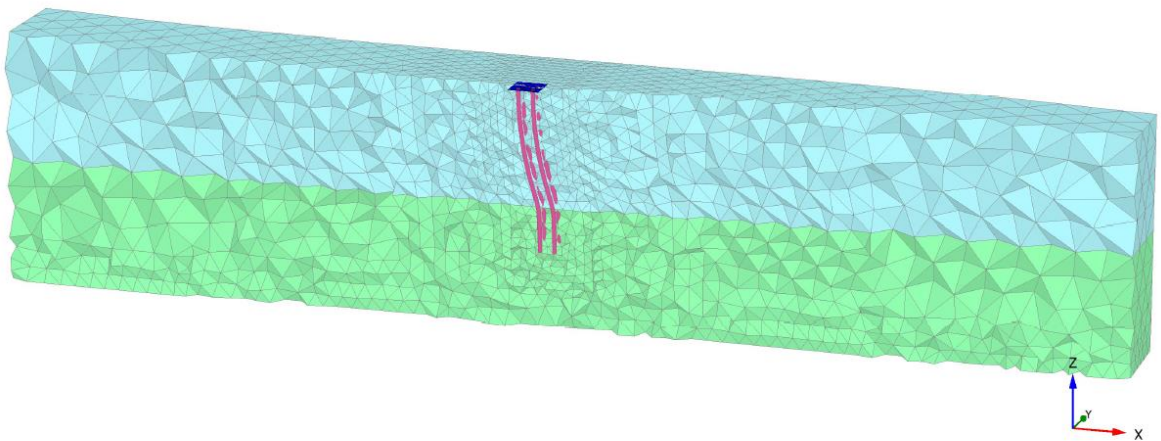
Végül pedig a V06, azaz a négyes cölöpcsoport eredményeit mutatnám be. Ezt láthatjuk a 4.13. és a 4.14. ábrán, a réteghatár, illetve a fejtömbnél keletkező igénybevételekkel. A cölöpök deformált alakját a 4.15. ábra mutatja.



4.13. ábra V06 A négyes csoport cölöpjeiben keletkező igénybevétel a réteghatáron



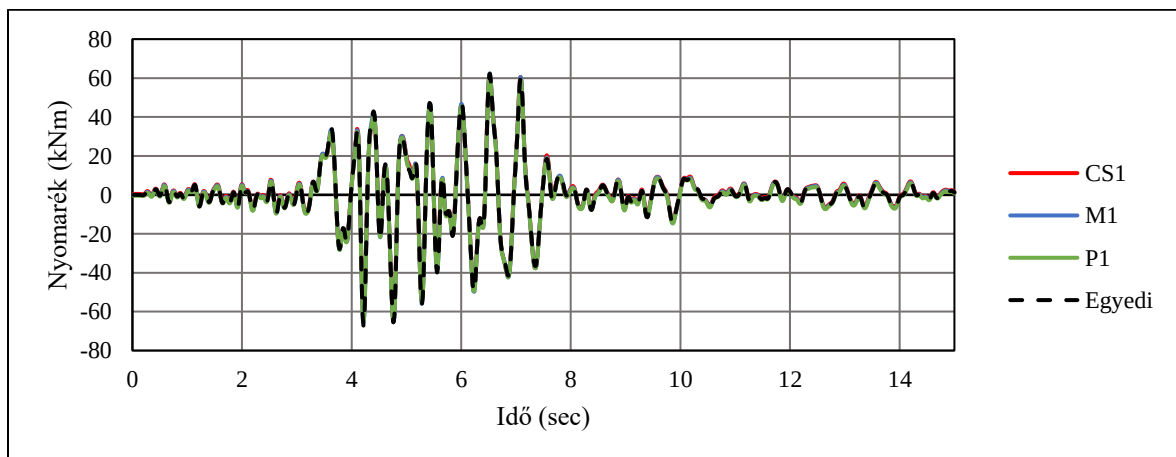
4.14. ábra V06 A négyes csoport cölöpjeiben keletkező igénybevétel a fejtömbnél



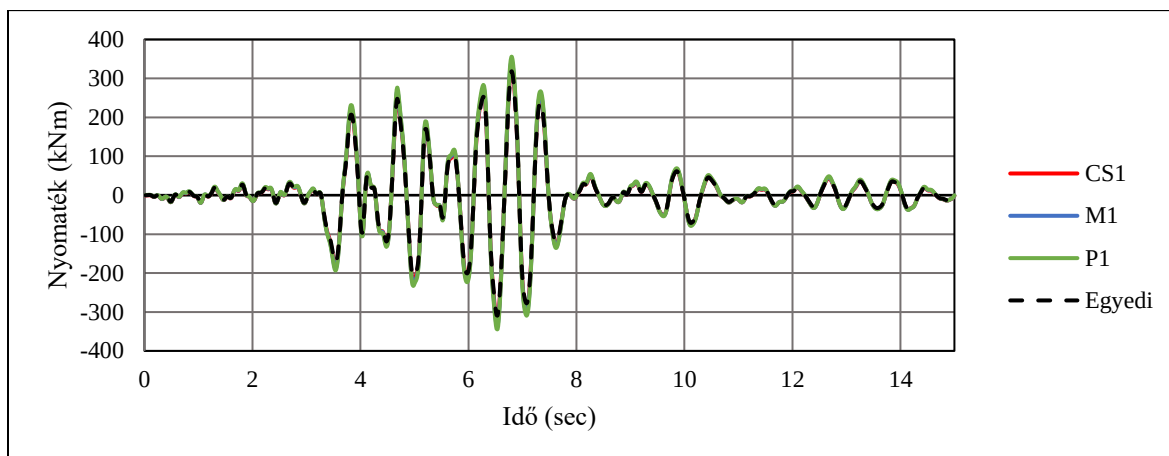
4.15. ábra V06 modell deformált alakja a réteghatáron ébredő maximális nyomaték időpillanatában

Összességében elmondható, hogy a csoportokon belül az egyes cölöpök eredményeiben eltérés nem tapasztalható. A következőkben az egymáshoz képesti viszonyokat fogom összevetni, azzal az egyszerűsítéssel élve, hogy mindegyik modellből egy eredményt jelenítek meg.

A 4.16. és 4.17. ábrák alapján megállapíthatjuk, hogy a csoportok és az egyedi cölöpök esetében ugyanazt az eredményt kapjuk. Tehát ezek alapján a csoport tagjait méretezhetjük egyedi cölöpként. S még azt a megállapítást is tehetjük, hogy az egyedi cölöp körüli és a csoporton belül, a cölöpök közötti talajtömegre a felfelé irányuló hullámterjedésből származó deformáció ezek alapján megegyezik, nincsen különbség ezek között.



4.16. ábra Csoportok és egyedi cölöp eredményeinek összehasonlítása a fejtömbnél

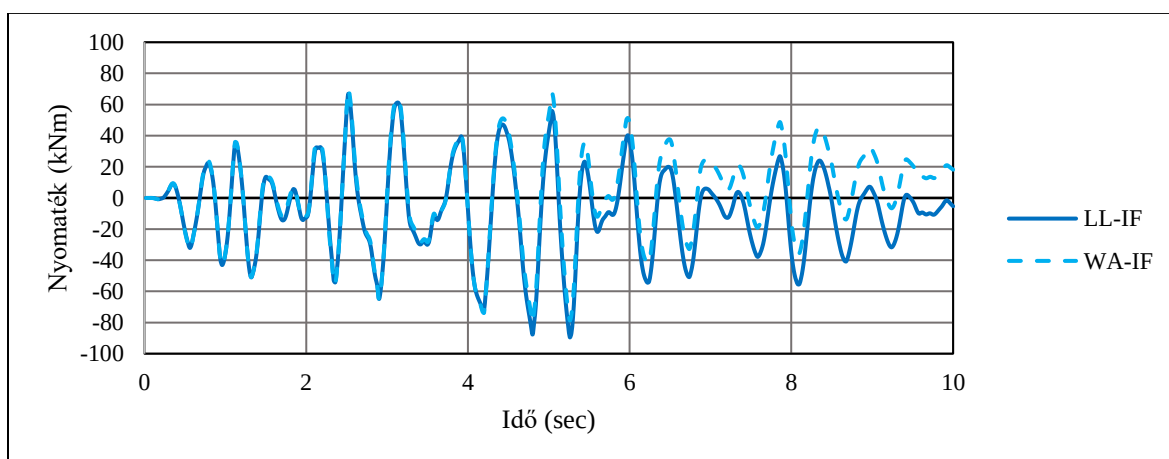


4.17. ábra Csoportok és egyedi cölöp eredményeinek összehasonlítása a réteghatáron

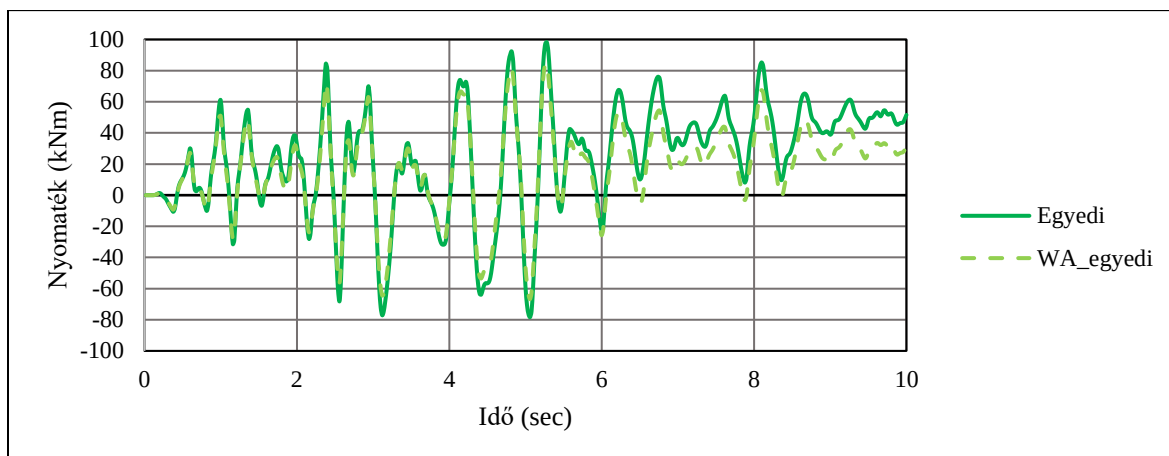
#### 4.2.2 HSS anyagmodellel eredményei

A modellt (Wolf, 2018) doktori disszertációjában bemutatott eredményekkel verifikáltam, melyet a következő 4.18. és 4.19. ábra mutat a réteghatár és a fejtömb esetében. Mindkét esetben azt tapasztaljuk, hogy az eredmények jól lekövetik egymást, egészen nagyjából a 6. másodpercig, ahol valamilyen oknál fogva szétválnak. Ennek az okára nem találtam egyelőre magyarázatot, viszont a cölöp igénybevételek szempontjából releváns időtartamában a két modell nagyon jó egyezést mutat, ezért elfogadtam az eredményeket.

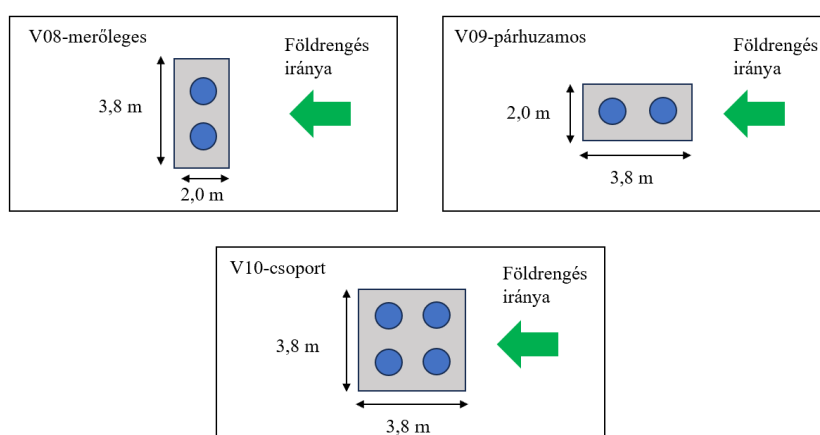
A verifikációt követően a lineárisan rugalmas anyagmodellel megegyezően felépítettem a modelleket, melyek elnevezését és geometriáját a 4.20. ábra tartalmazza.



4.18. ábra A réteghatáron keletkező nyomatékok értékei a HSS modell verifikációja során

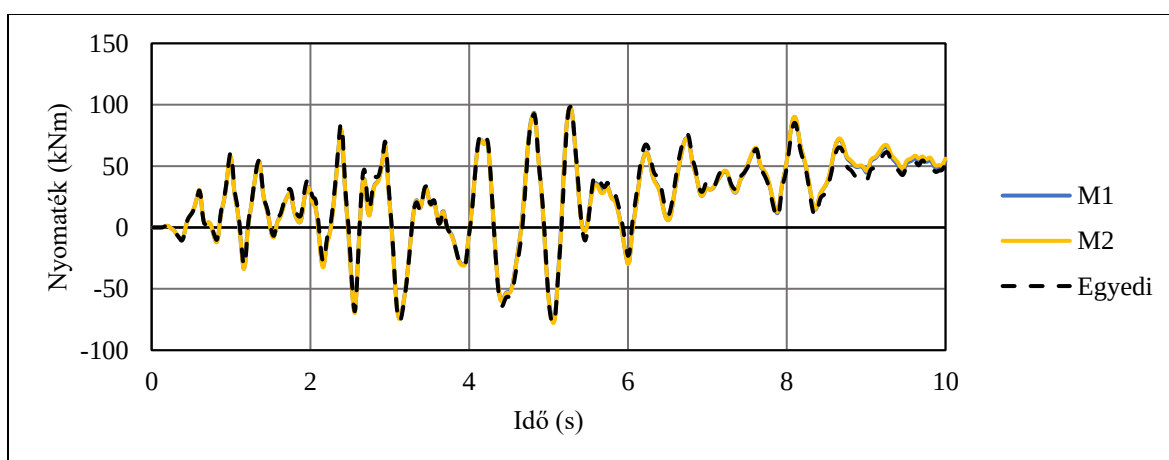


4.19. ábra A fejtőmbnél keletkező nyomatékok értékei a HSS modell verifikációja során

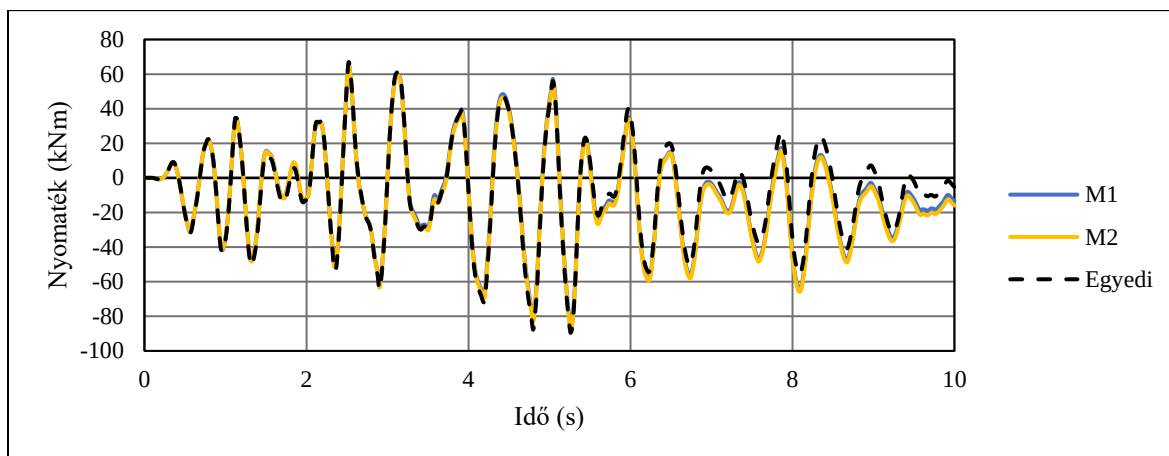


4.20. ábra HSS anyagmodellek elrendezési geometriája

Az eredmények a V08, azaz a földrengésre merőleges irányban a következőképpen alakultak (4.21. és 4.22. ábra). Az tapasztalható, hogy a fejlett anyagmodell esetén is a csoport nem befolyásolja a cölöp igénybevételeit, mivel a viselkedés leköveti az egyedi cölöpét.

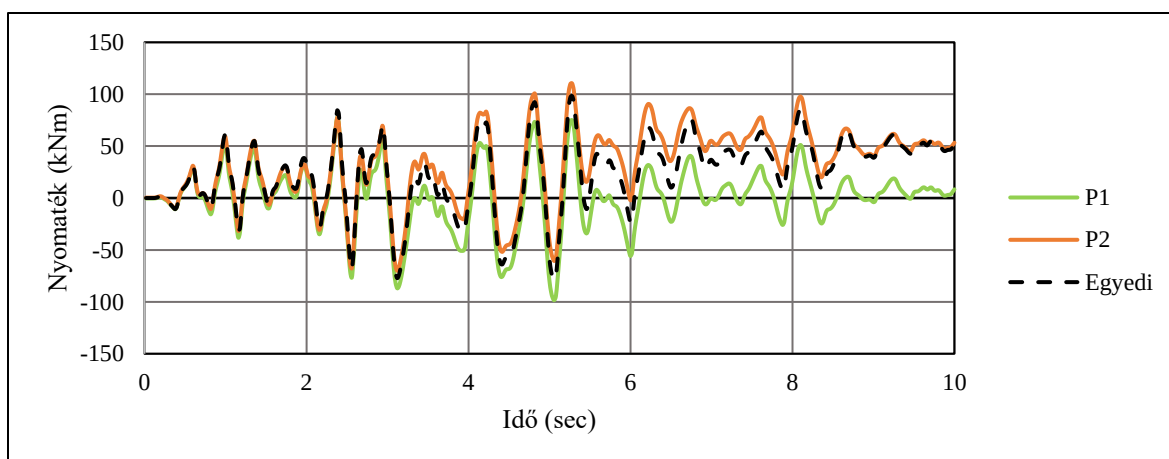


4.21. ábra V08 modell eredményei a fejtőmbnél az egyedi cölöppel összehasonlítva

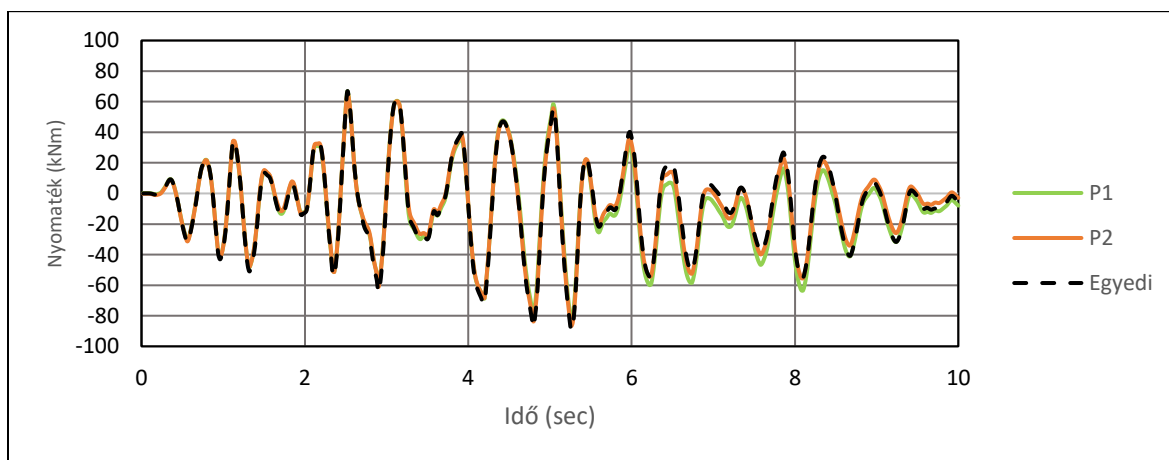


4.22. ábra V08 modell eredményei a réteghatáron az egyedi cölöppel összehasonlítva

A földrengés irányára párhuzamos esetben a réteghatáron (4.23. ábra) nem, de a (4.24. ábra) egy idő után a nyomatékok értékei eltérnek. Ennek a magyarázata további vizsgálódásokat igényel.

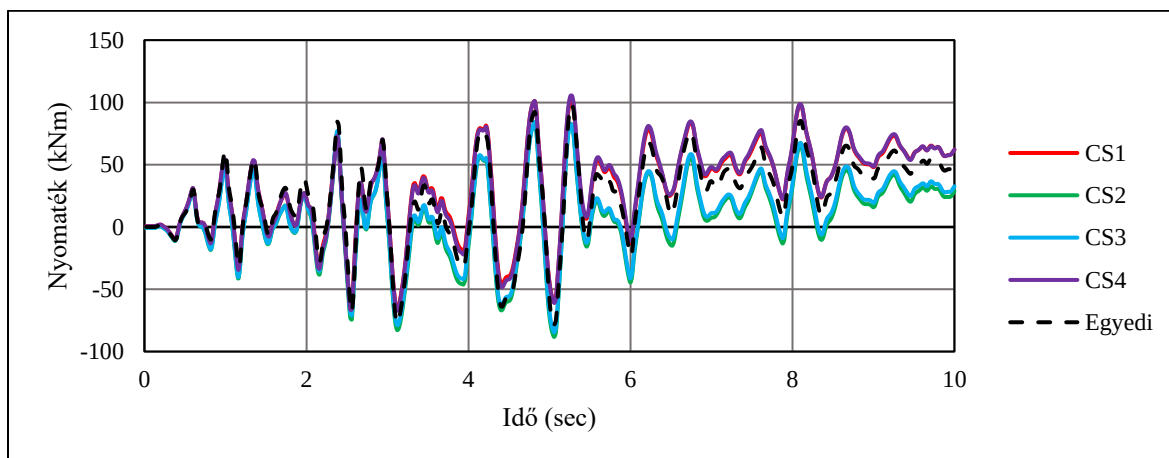


4.23. ábra V09 modell eredményei a fejtömbnél az egyedi cölöppel összehasonlítva

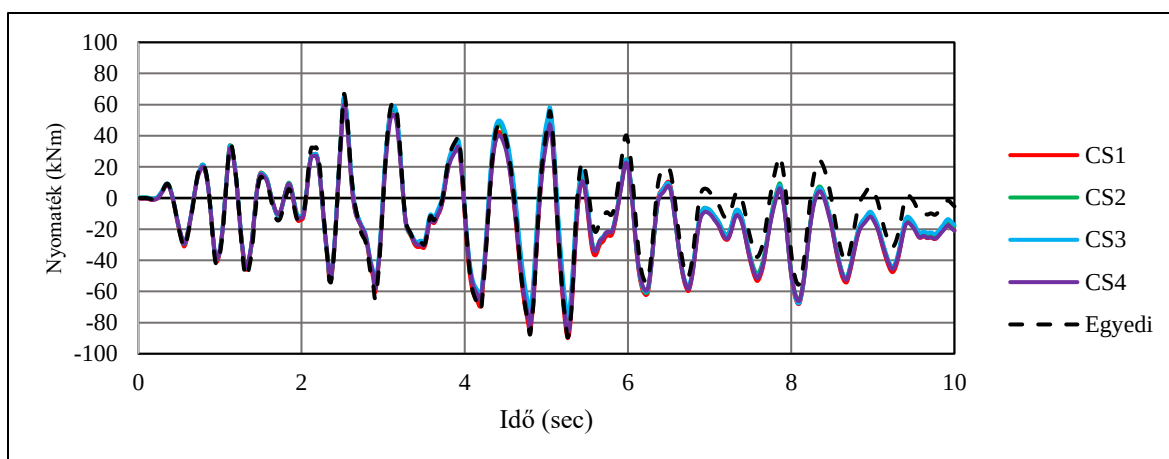


4.24. ábra V09 modell eredményei a réteghatáron az egyedi cölöppel összehasonlítva

A 4 darabból álló cölöpcsoport esetében a réteghatáron minimális eltérés tapasztalható (4.25. ábra), azonban a fejtömbnél megjelenik az a hasonló jelenség (4.26. ábra), mint az előző V09 modell esetében. Ennek a jelenségnek további vizsgálata szükséges.

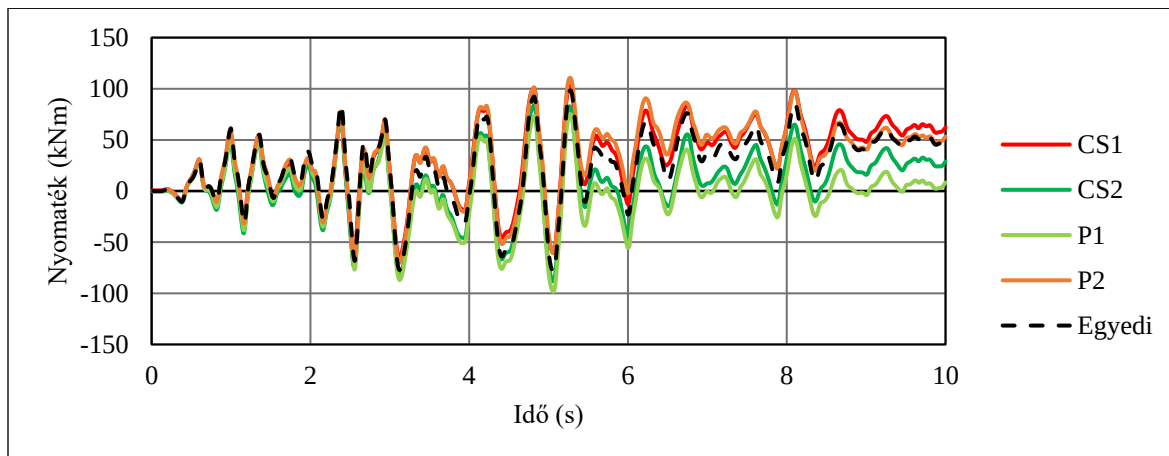


4.25. ábra V10 modell eredményei a fejtömbnél az egyedi cölöppel összehasonlítva

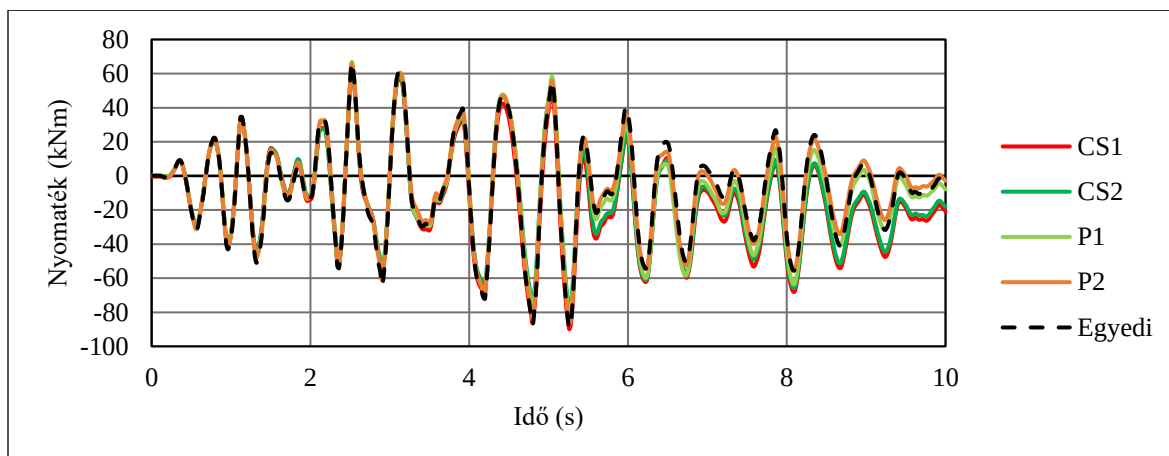


4.26. ábra V10 modell eredményei a réteghatáron az egyedi cölöppel összehasonlítva

A következőkben az egyes csoportok eredményeit fogom összehasonlítani.



4.27. ábra A fejtömbnél keletkező nyomatékok értékei az egyes cölöpcsoportok esetében



4.28. ábra A réteghatáron keletkező nyomaték értékei az egyes cölöpcsoportok esetében

Az eredményekből azt tapasztaljuk, hogy az egyedi cölöp és a cölöpcsoport viselkedésében jelentős eltérés nem mutatható ki. (4.27. és 4.28. ábrák). Habár a fejtömb esetében némi eltérés van, azonban ennek magyarázata további vizsgálódásokat igényel.

## 5 Egyéb vizsgálatok

Az eddigiekben ismertetett numerikus modellezés eredményeit összevetettem a 2.2 fejezetben bemutatott becselő képletekkel, valamint az első modellre a 2.3 fejezetben tárgyalt példához hasonlóan pszeudostatikus vizsgálatokat végeztem.

### 5.1 *Becslő képletek alkalmazása*

A 2.2.1. fejezetben bemutatott képletekbe behelyettesítve megvizsgáltam, hogy az általam felépített modellekre milyen megoldásokat kapok.

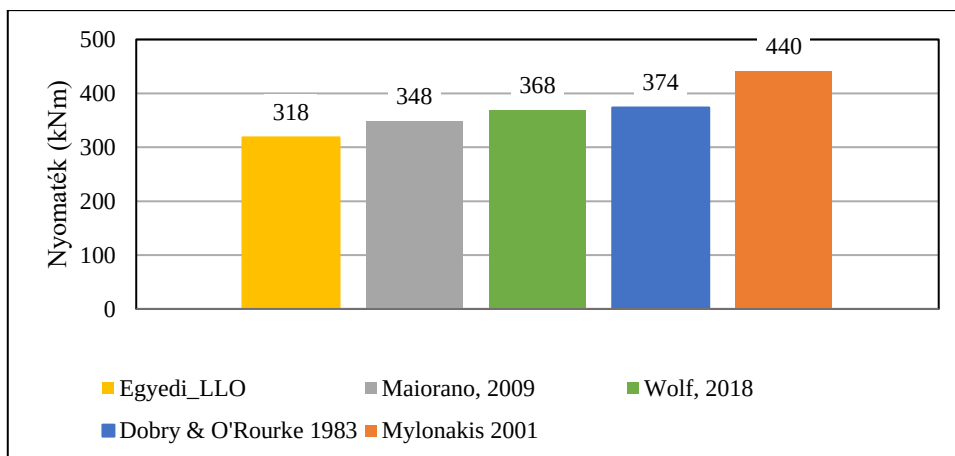
A vizsgálatot a lineárisan rugalmas anyagmodell használatával felépített modellekkel kezdem, melynek jellemzői a 3-1. és 3-2. táblázatok tartalmazzák. További kiinduló adatként az  $a_s$ -szabad felszín maximális gyorsulására, volt szükség, melyet a Plaxis 3D modellező programból nyertem ki, erről részletesen a következő fejezetben olvashatnak. A réteghatáron ébredő nyomaték meghatározásához az ott a felső rétegben fellépő nyírási alakváltozást a felszíni gyorsulásból a

$$\gamma_1 = \frac{r_d \cdot \rho_{sl} \cdot h_1 \cdot a_{smax}}{G_1}$$

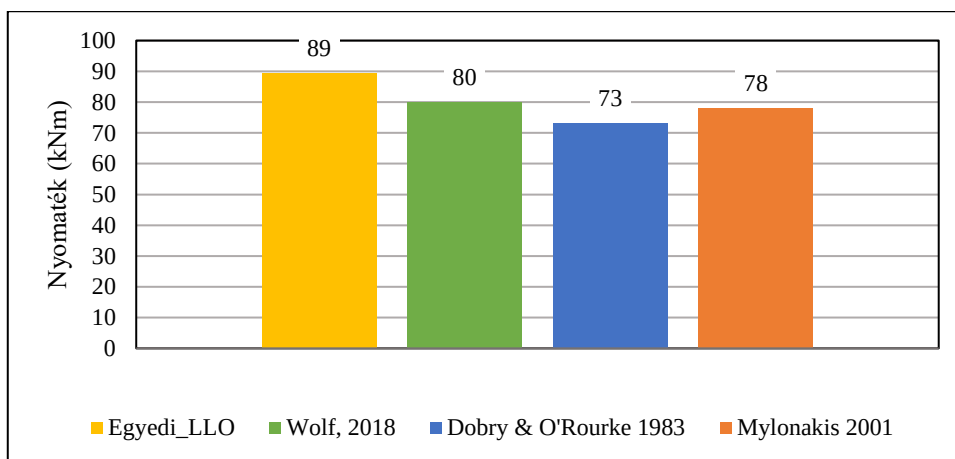
képlettel számítottam, ahol a korábban definiáltakon túl  $r_d$  a mélységi tényező. Az eredményeket az 5.1. ábra mutatja.

Az 5.2. ábrán már a HSS anyagmodell alkalmazásával jelennek meg az eredmények. Ebben az esetben a 4-1. és 4-2. táblázatokban találjuk a kiinduló adatokat. A szabad felszín maximális gyorsulására ebben az esetben is szükség volt, melyet szintén a Plaxis 3D programból nyertem ki és a következő fejezetben ismeretem.

A réteghatáron keletkező nyomaték becselő képletekről elmondható, hogy a lineárisan rugalmas anyagmodell esetében túl becsülik a kialakuló nyomaték értéket, a HSS anyagmodellnél pedig alul. Az előbbi esetben Mylonakis képlete jelentősen nagyobbat hoz, míg a többi négy eset  $\pm 10\%$ -on belül van. A HSS anyagmodellnél viszont mindegyik az átlaghoz képest  $\pm 10\%$ -on belül van.



5.1. ábra Réteghatáron keletkező nyomatékok értékei a becslő képletek és egyedi 3D cölöp modellek esetén, lineárisan rugalmas anyagmodell alkalmazásával



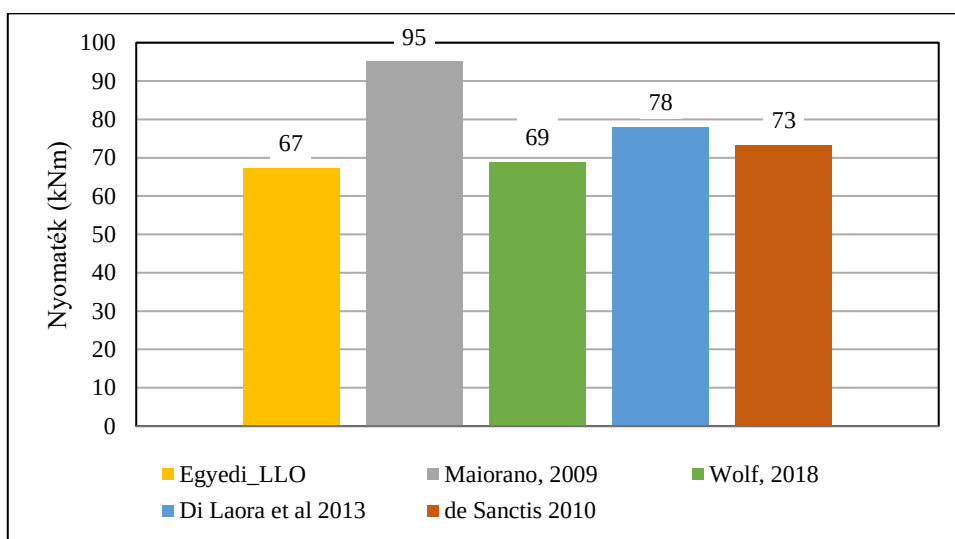
5.2. ábra Réteghatáron keletkező nyomatékok értékei a becslő képletek és egyedi 3D cölöp modellek esetén, HSS anyagmodell alkalmazásával

A fejtömbnél ébredő nyomatékok esetében bemenő adatként szintén a 3-1. és 3-2. táblázatban szereplő adatok voltak a meghatározóak. Ennek eredményeit az 5.3. ábra jeleníti meg a lineárisan rugalmas anyagmodell esetén. Ezek az eredmények jó egyezést mutatnak, mivel a felső talajréteg paraméterei állandóak.

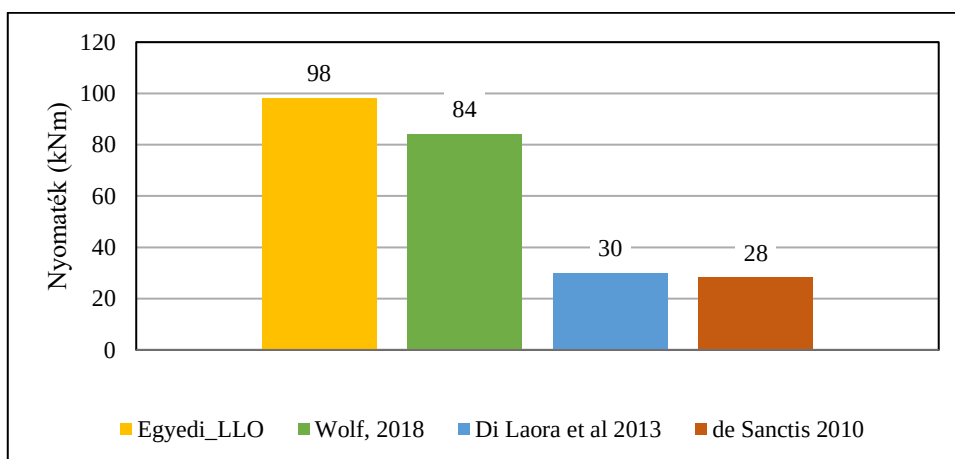
A HSS anyagmodell alkalmazásakor a nyíróhullám terjedési sebessége- és így a nyírási modulus- a mélységgel növekszik, nem konstans, s a gerjesztés okozta alakváltozási szint függvényében leromlik. Így a becslőképletek bemenő adataként a felső réteg tulajdonságainak jellemzésénél ezt figyelembe kell venni. Két féle számítást végeztem. Egyrészt végeztem számítást a felső réteg nyírási modulusát a 4-1. táblázatban szereplő értékkel figyelembe véve, ennek eredményét az 5.4. ábra mutatja. Látható, hogy így a számítás jelentősen alulbecsüli a nyomatékok értékét, tehát ez hibás közelítésének tekintendő. (Wolf, 2018) azt kapta, hogy a felső zónában az adott földrengés esetén a nyírási modulus kb. 40%-ra való

leromlását figyelembe véve adnak közel jó eredményt a becselő képletek, így erre vonatkozóan végeztem én is számításokat. Ennek eredményét mutatja az 5.5. ábra, mely még szintén az eredmények alulbecsülését jelzi, bár már jóval kisebb mértékben.

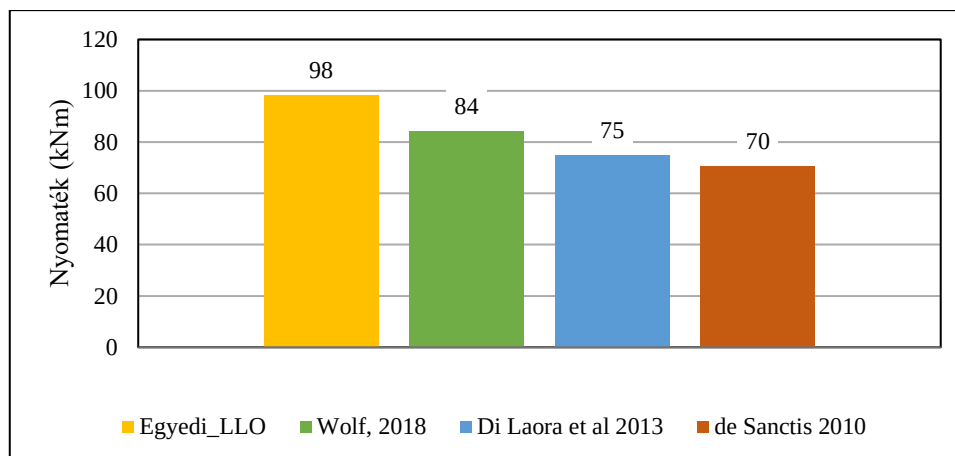
Összességében elmondható, hogy a becselő képletek a réteghatáron ébredő nyomaték értékét közel jól becsülik, esetenként túl. Amennyiben konstansok a felső réteg paraméterei jó becslést adnak, de ha nem konstansok a paraméterek, akkor felvételüknél különös óvatsággal kell eljárni.



5.3. ábra A fejtőmbnél kialakuló nyomatékok értékei a lineárisan rugalmas anyagmodell esetén a 3D modellek és a becselő képletek esetében



5.4. ábra HSS anyagmodell esetében a fejtőmbnél ébredő nyomatékok a felső réteg kiindulási me-revségével számolva



5.5. ábra HSS anyagmodell esetében a fejtőmbnél ébredő nyomatékok a felső A felső réteg nyírási alakváltozási szint miatt csökkentett modulusa alapján

## 5.2 Pszeudostatikus vizsgálatok

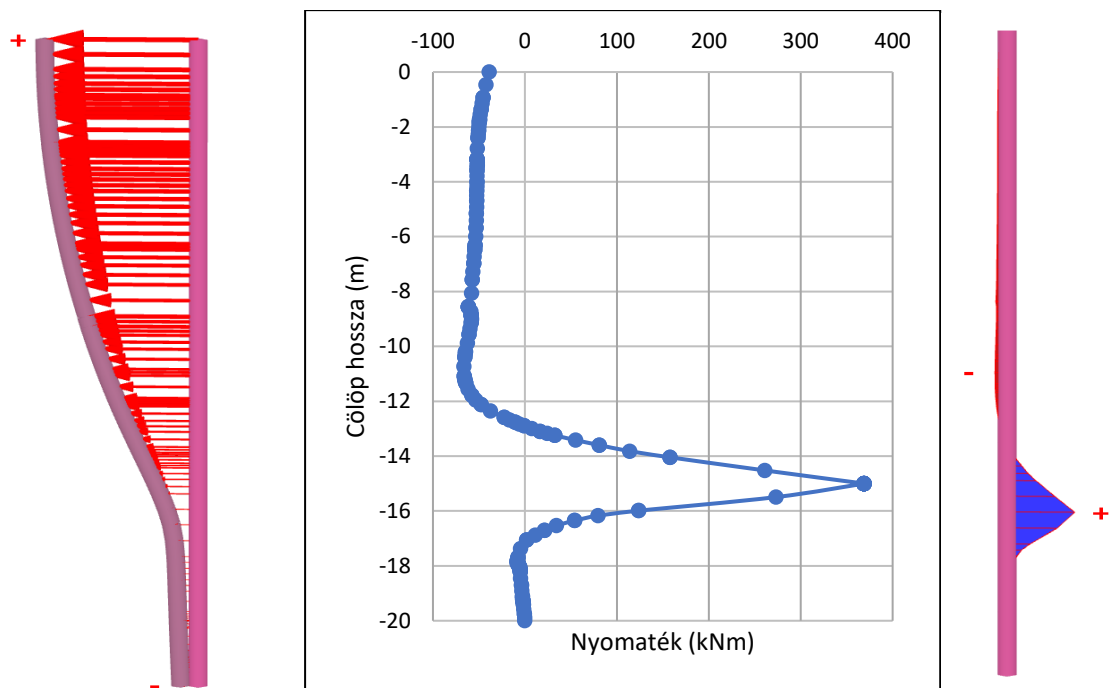
A pszeudostatikus vizsgálatokról a 2.3 fejezetben már esett szó. (Basile, 2012)-től eltérően én nem a talaj elmozdulását, hanem a Plaxis szoftver által felkínált lehetőségként egy adott vízszintes gyorsulást működtettem a modell egészen. Két számítást végeztem, egyrészt a modell alsó síkján működtetett accelogram maximális gyorsulását, másrészt a szabadfelszín gyorsulást, amit a Plaxis 3D modellből nyertem ki.

Az 5-1. táblázat tartalmazza azokat a vizsgálati kombinációkat, melyekre elvégeztem a pszeudostatikus analízist.

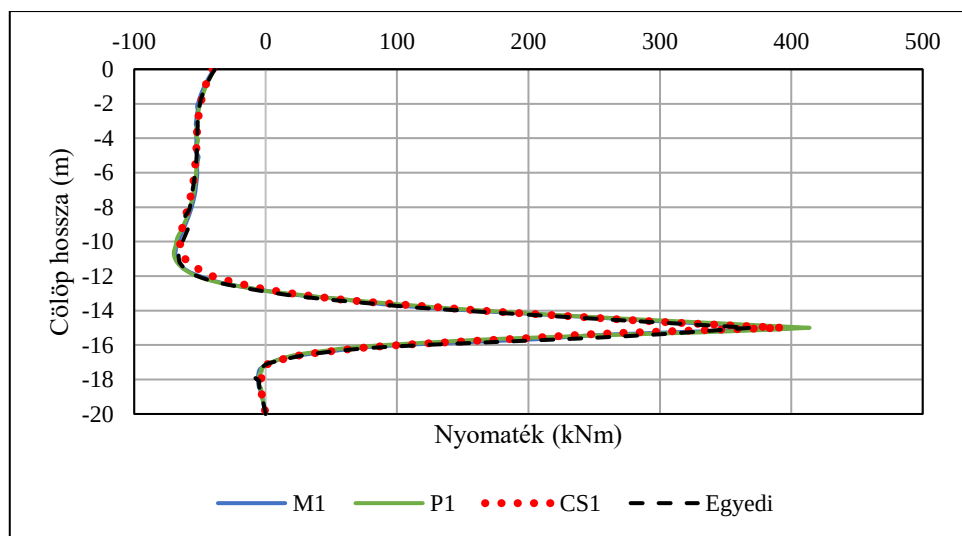
| Vizsgálati esetek         | Lineárisan rugalmas anyagmodell |
|---------------------------|---------------------------------|
| Szabadfelszínű gyorsulás  | 0,5g                            |
| Alapkőzet csúcsgyorsulása | 0,35g                           |

5-1. táblázat Pszeudostatikus vizsgálati esetek

Mind a két vizsgálati esetre 4 modellt vizsgáltam. Az egyedi cölöpöt és a 4.1. ábrán bemutatott 3 csoport modelljét. A lineárisan rugalmas anyagmodell egyedi cölöp vizsgálatakor az alapkőzet csúcsgyorsulását működtetve a modellen az 5.6. ábrán látható eredményeket kapjuk.



5.6. ábra Alapközet csúcsgyorsulása a lineárisan rugalmas anyagmodell alkalmazásával az egyedi cölöp esetén. Bal ábra: elmozdulás ábra  $u_{x,max}=0,04$  mm. Középső ábra: Szerkesztett nyomatéki ábra, Jobb ábra: Nyomatéki ábra Plaxis szoftverből



5.7. ábra Eredmények összehasonlítása a lineárisan rugalmas anyagmodell esetén az alapközeten működtetett gyorsulásra

Az 5.7. ábrán a három csoport modell és az egyedi cölöp esetén kapott eredmények kerültek ábrázolásra. Megállapítható, hogy a valós-idő gyorsulás adatsorral gerjesztett modellhez hasonlóan az egyedi cölöp és a cölöpcsoport viselkedésében érdemi különbség nincs. Habár a csúcserőben némi különbség van, ez nem jelentős és feltételezhető, hogy a végelem háló sűrűsége is közrejátszik. Ezek számszerű feltüntetése az 5-2. táblázatban található. A táblázatból azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a pszeudostatikus vizsgálat a réteghatáron

túlbecsüli a nyomatéki igénybevétel nagyságát, bár az egyedi cölöp eredményei abba a tartományba esnek, mint amiket a valós idő-gyorsulás gerjesztés esetén kapunk.

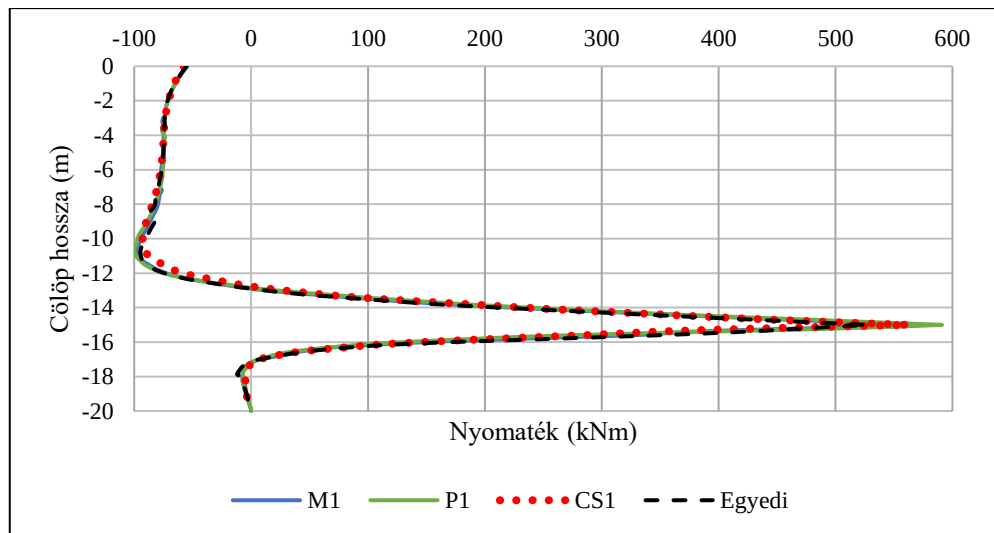
| Modell elnevezése            | Egyedi cölöp | V04 <sub>p</sub> | V05 <sub>p</sub> | V06 <sub>p</sub> | 3D időbeli vizsgálat egyedi cölöp |
|------------------------------|--------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------------------|
| Réteghatáron ébredő nyomaték | 369,1 kNm    | 400,5 kNm        | 413,9 kNm        | 393,4 kNm        | 318,4 kNm                         |
| Fejtőmbnél ébredő nyomaték   | -38,7 kNm    | -39,3 kNm        | -38,9 kNm        | -40,1 kNm        | -34,7 kNm                         |

5-2. táblázat Lineárisan rugalmas anyagmodell eredményei az alapkőzetre való csúcsgyorsulásra pszeudostatikus vizsgálat esetén

Amennyiben a szabadfelszínű csúcsgyorsulást működtetem a fent említett modelleken a következő eredményeket kapom. (5-3. táblázat). A modellek különböző eredményei az 5.8. ábrán kerültek összehasonlításra. Az ábráról megállapíthatjuk, hogy az egyedi cölöp és a cölöpcsoportok viselkedésében lényeges különbség nincsen, azonban mind a réteghatáron mind a fejtőmb esetében a túlbecslés mértéke túl nagy, így pszeudostatikus vizsgálatok esetén nem alkalmazhatjuk.

| Modell elnevezése            | Egyedi cölöp | V04 <sub>p</sub> | V05 <sub>p</sub> | V06 <sub>p</sub> | 3D időbeli vizsgálat egyedi cölöp |
|------------------------------|--------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------------------|
| Réteghatáron ébredő nyomaték | 527,3 kNm    | 573,4 kNm        | 591,1 kNm        | 562,4 kNm        | 318,4 kNm                         |
| Fejtőmbnél ébredő nyomaték   | -55,3 kNm    | -54,7 kNm        | -55,38 kNm       | -57,7 kNm        | -34,7 kNm                         |

5-3. táblázat Lineárisan rugalmas anyagmodell eredményei a szabadfelszínű csúcsgyorsulása



5.8. ábra Eredmények összehasonlítása a lineárisan rugalmas anyagmodell esetén a szabadfelszíni gyorsulásra

Elmondható, hogy a különböző modellek esetén közel azonos eredményekre jutunk, azonban mind két gyorsulás alkalmazásával a valós idő-gyorsulás adatsorral gerjesztett modellben ébredő nyomatékok értékét túlbecsüljük.

## 6 Összefoglalás

A dolgozatomban a cölöpök földrengés alatti viselkedését vizsgáltam Plaxis 2D és 3D geotechnikai végelelemes modellezéssel.

Először a 2D modellezés lehetőségeit és alkalmazhatóságát vizsgáltam meg 3D-ben végzett, más szakirodalmi adatok alapján verifikált modell eredményeivel összevetve. A lineárisan rugalmas kétrétegű, alsó síkján idő-gyorsulás adatsorral gerjesztett modell esetén arra a megállapításra jutottam, hogy a tengelytávolság beállítása nagy mértékben befolyásolja az eredményeket, annak növelése folyamatosan növekvő nyomatéki igénybevételt eredményezett. A helyes, a cölöp valós viselkedését reprezentáló tengelytávolság meghatározásáról szóló általános javaslat megfogalmazásához azonban további vizsgálódások szükségesek.

A 2D modellezésről az említett probléma miatt a cölöpcsoport vizsgálatához áttértem a 3D modellezésre. Ehhez első lépésként megvizsgáltam a 2D modellezésnél említett tengelytávolság problémáját és arra jutottam, hogy a 3D modell esetében ennek hatása nincsen, a minimális különbségek a végelelemes háló hatási csak.

Ezek után a cölöpcsoportok vizsgálatával folytattam, melyből 3 esetet modelleztem, két 2 db-os és egy 4 db-os cölöpcsoportot. Ezt kétféle anyagmodellel felépített eltérő rétegződésű és cölöpgeometriájú, különböző accelerogrammal a modell alján gerjesztett modellen elemeztem. Mint kiderült, a cölöpök elhelyezkedésének és a gerjesztés irányának viszonya nem hat ki úgy a kinematikai igénybevételekre, mint ahogyan a tehetetlenségi hatásokból. A csoport valamennyi tagjára megegyező eredményeket kaptam.

A szakirodalomban fellelhető néhány becslő képlet alapján meghatároztam a réteghatáron és a fejtömbnél ébredő nyomaték értéket. Ezek modellezési eredményekkel való összevetése alapján az mondható el, hogy a réteghatáron ébredő nyomaték értékét kissé túlbecsülik, viszont a fejtömbnél ébredőt egészen jól, kissé alulról közelítik. Ugyanakkor fejlett anyagmodellek esetén a felső réteg jellemző paramétereinek felvételénél figyelemmel kell lenni arra, hogy a merevség a mélységgel és a földrengés okozta alakváltozási szinttel változik.

Ezek után pszeudostatikus vizsgálatokat végeztem el, melynél az alapközetre vetített csúcsgyorsulás és a szabadfelszínen keletkező csúcsgyorsulás értékét működtettem a lineárisan rugalmas anyagmodell tartalmazó modellen, melynek az eredménye, hogy a valós igénybevételekhez képest mindkét gyorsulás túlbecsüli azokat. További vizsgálatokat igényel, hogy mely csúcsgyorsulást válasszuk ahhoz, hogy a legpontosabb eredményt kapjuk.

Az elvégzett kutatás alapján az alábbi további vizsgálati témák merültek fel:

- A kapott eredményeket további talajrétegződés, cölöpgeometria és gerjesztés esetére ellenőrizni.
- A kinematikai és a tehetetlenségi hatás interakciója során a cölöp csoportban lévő cölöpökben milyen igénybevételek keletkeznek és azok hogyan viszonyulnak egymáshoz.
- A közelítő képletekben figyelembe veendő paraméterek meghatározási elvének kidolgozása nem lineáris talajprofil esetén.
- A Plaxis szoftver által felkínált pszeudostatikus számítási eljárás alkalmazhatóságának vizsgálata.

## 7 Ábrajegyzék

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. ábra Cölöpöket érő kinematikai (a) és tehetetlenségi (b) hatás a földrengés során Forrás: (George Mylonakis, 2014).....                                                                        | 5  |
| 2.2. ábra Ajánlott talajosztálytól függő rugalmas válaszspektrum görbék (5% csillapítás) Forrás: (Richard P. Ray, 2016).....                                                                        | 6  |
| 2.3. ábra Magyarország szeizmikus zóna térképe (MSZ EN 1997-1:2006 Geotechnikai tervezés 1. rész: Általános szabályok, ).....                                                                       | 6  |
| 2.4. ábra Cölöpökben lehetségesen ébredő hatások a földrengés során a) tehetetlenségi b) kinematikai c) talajfolyósodás hatása (George Mylonakis, 2014) .....                                       | 7  |
| 2.5. ábra A rétegek merevségének aránya és az alakváltozás-átviteli tényező közötti összefüggés, eltérő felső réteg vastagság és talaj-cölöp merevségi arányok esetén (Geroge Mylakonis, 2002)..... | 9  |
| 2.6. ábra (Basile, 2012) végeelemes szoftverrel kapott eredményei és az általa választott vizsgálat eredményeinek összehasonlítása .....                                                            | 11 |
| 2.7. ábra Cölöpcsoport hatása az igénybevételekre, pszeudostaikus számítás esetén (Basile, 2012).....                                                                                               | 12 |
| 3.1. ábra 3D modell felépítése egyedi cölöp esetén .....                                                                                                                                            | 14 |
| 3.2. ábra Eredeti Friuli idő-gyorsulás grafikon.....                                                                                                                                                | 15 |
| 3.3. ábra 3D egyedi cölöp viselkedése a réteghatáron a szakirodalomban található példához (Wolf, 2018) hasonlítva.....                                                                              | 15 |
| 3.4. ábra Plaxis 2D modell felépítése .....                                                                                                                                                         | 16 |
| 3.5. ábra Maximális nyomaték alakulása a cölöphossza mentén .....                                                                                                                                   | 17 |
| 3.6. ábra A kiválasztott 2D modellek nyomatékának alakulása a réteghatáron az eredeti modellel összevetve.....                                                                                      | 18 |
| 3.7. ábra A kiválasztott 2D modellek nyomatékának alakulása a fejtömbnél az eredeti modellel összevetve.....                                                                                        | 18 |
| 3.8. ábra Réteghatáron ébredő nyomatékok az egyes modellek esetén.....                                                                                                                              | 19 |
| 3.9. ábra 3 méteres tengelytávolságú 3D modell-V01 néven a továbbiakban.....                                                                                                                        | 20 |
| 3.10. ábra 6 méteres tengelytávolságú 3D modell-V02 néven a továbbiakban.....                                                                                                                       | 20 |
| 3.11. ábra Eltérő tengelytávolságú 3D modellek eredménye a réteghatáron egymáshoz viszonyítva.....                                                                                                  | 21 |
| 3.12. ábra Eltérő tengelytávolságú 3D modellek eredménye a fejtömbnél egymáshoz viszonyítva.....                                                                                                    | 21 |
| 3.13. ábra 2D és 3D modell eredményei 3 méteres tengelytávolság esetén réteghatáron ...                                                                                                             | 22 |
| 3.14. ábra 2D és 3D modell eredményei 6 méteres tengelytávolság esetén a réteghatáron                                                                                                               | 22 |
| 4.1. ábra 3D Csoportmodellek felépítése.....                                                                                                                                                        | 23 |
| 4.2. ábra V06 cölöpcsoport modellje.....                                                                                                                                                            | 23 |
| 4.3. ábra Egy terhelési ciklus alatti hiszterézis hurok Forrás: (Brinkgreve, 2007).....                                                                                                             | 24 |
| 4.4. ábra Leromlási görbe Forrás: (Szilvággyi, 2012).....                                                                                                                                           | 25 |
| 4.5. ábra HSS modellek felépítése.....                                                                                                                                                              | 25 |
| 4.6. ábra Az 1977 Friuli földrengés adatsora, a HSS anyagmodell során alkalmazott idő-gyorsulás diagramm.....                                                                                       | 26 |
| 4.7. ábra Cölöpök elhelyezkedésének jelmagyarázata .....                                                                                                                                            | 27 |

|                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.8. ábra V04 A földrengés irányára merőleges cölöpökben keletkező igénybevétel a réteghatáron .....                                                                                                                                                     | 27 |
| 4.9. ábra V04 A földrengés irányára merőleges cölöpökben keletkező igénybevétel a fejtömbnél.....                                                                                                                                                        | 28 |
| 4.10. ábra V04 modell deformált alakja a réteghatáron ébredő maximális nyomaték időpillanatában .....                                                                                                                                                    | 28 |
| 4.11. ábra V05 A földrengés irányával párhuzamos cölöpökben keletkező igénybevétel a réteghatáron .....                                                                                                                                                  | 28 |
| 4.12. ábra V05 A földrengés irányával párhuzamos cölöpökben keletkező igénybevétel a fejtömbnél.....                                                                                                                                                     | 29 |
| 4.13. ábra V06 A négyes csoport cölöpeiben keletkező igénybevétel a réteghatáron .....                                                                                                                                                                   | 29 |
| 4.14. ábra V06 A négyes csoport cölöpeiben keletkező igénybevétel a fejtömbnél .....                                                                                                                                                                     | 29 |
| 4.15. ábra V06 modell deformált alakja a réteghatáron ébredő maximális nyomaték időpillanatában .....                                                                                                                                                    | 30 |
| 4.16. ábra Csoportok és egyedi cölöp eredményeinek összehasonlítása a fejtömbnél.....                                                                                                                                                                    | 30 |
| 4.17. ábra Csoportok és egyedi cölöp eredményeinek összehasonlítása a réteghatáron .....                                                                                                                                                                 | 31 |
| 4.18. ábra A réteghatáron keletkező nyomatékok értékei a HSS modell verifikációja során .....                                                                                                                                                            | 31 |
| 4.19. ábra A fejtömbnél keletkező nyomatékok értékei a HSS modell verifikációja során                                                                                                                                                                    | 32 |
| 4.20. ábra HSS anyagmodellek elrendezési geometriája.....                                                                                                                                                                                                | 32 |
| 4.21. ábra V08 modell eredményei a fejtömbnél az egyedi cölöppel összehasonlítva .....                                                                                                                                                                   | 32 |
| 4.22. ábra V08 modell eredményei a réteghatáron az egyedi cölöppel összehasonlítva.....                                                                                                                                                                  | 33 |
| 4.23. ábra V09 modell eredményei a fejtömbnél az egyedi cölöppel összehasonlítva .....                                                                                                                                                                   | 33 |
| 4.24. ábra V09 modell eredményei a réteghatáron az egyedi cölöppel összehasonlítva.....                                                                                                                                                                  | 33 |
| 4.25. ábra V10 modell eredményei a fejtömbnél az egyedi cölöppel összehasonlítva .....                                                                                                                                                                   | 34 |
| 4.26. ábra V10 modell eredményei a réteghatáron az egyedi cölöppel összehasonlítva.....                                                                                                                                                                  | 34 |
| 4.27. ábra A fejtömbnél keletkező nyomatékok értékei az egyes cölöpcsoportok esetében                                                                                                                                                                    | 34 |
| 4.28. ábra A réteghatáron keletkező nyomaték értékei az egyes cölöpcsoportok esetében                                                                                                                                                                    | 35 |
| 5.1. ábra Réteghatáron keletkező nyomatékok értékei a becslő képletek és egyedi 3D cölöp modellek esetén, lineárisan rugalmas anyagmodell alkalmazásával .....                                                                                           | 37 |
| 5.2. ábra Réteghatáron keletkező nyomatékok értékei a becslő képletek és egyedi 3D cölöp modellek esetén, HSS anyagmodell alkalmazásával .....                                                                                                           | 37 |
| 5.3. ábra A fejtömbnél kialakuló nyomatékok értékei a lineárisan rugalmas anyagmodell esetén a 3D modellek és a becslő képletek esetében .....                                                                                                           | 38 |
| 5.4. ábra HSS anyagmodell esetében a fejtömbnél ébredő nyomatékok a felső réteg kiindulási merevségével számolva .....                                                                                                                                   | 38 |
| 5.5. ábra HSS anyagmodell esetében a fejtömbnél ébredő nyomatékok a felső A felső réteg nyírási alakváltozási szint miatt csökkentett modulusa alapján .....                                                                                             | 39 |
| 5.6. ábra Alapkőzet csúcsgyorsulása a lineárisan rugalmas anyagmodell alkalmazásával az egyedi cölöp esetén. Bal ábra: elmodulás ábra $u_{x,max}=0,04$ mm. Középső ábra: Szerkesztett nyomatéki ábra, Jobb ábra: Nyomatéki ábra Plaxis szoftverből ..... | 40 |
| 5.7. ábra Eredmények összehasonlítása a lineárisan rugalmas anyagmodell esetén az alapkőzeten működtetett gyorsulásra.....                                                                                                                               | 40 |

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.8. ábra Eredmények összehasonlítása a lineárisan rugalmas anyagmodell esetén a szabadfelszíni gyorsulásra ..... | 42 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## 8 Táblázat jegyzék

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3-1. táblázat 3D modell talajrétegződésének paraméterei .....                                                                       | 14 |
| 3-2. táblázat Cölöp és fejtömb jellemzői .....                                                                                      | 14 |
| 3-3. táblázat 3D egyedi cölöp verifikálásának eredményei .....                                                                      | 15 |
| 3-4. táblázat 2D eredmények a tengelytávolság függvényében .....                                                                    | 17 |
| 3-5. táblázat Eltérő tengelytávolságú 3D modellek eredményei .....                                                                  | 20 |
| 3-6. táblázat 2D és 3D modellek eredményeinek összehasonlítása azonos tengelytávolság esetén .....                                  | 22 |
| 4-1. táblázat 3D-HSS modell talajrétegződésének paraméterei .....                                                                   | 26 |
| 4-2. táblázat Cölöp és fejtömb jellemzői 3D-HSS modell esetén .....                                                                 | 26 |
| 5-1. táblázat Pszeudostatikus vizsgálati esetek.....                                                                                | 39 |
| 5-2. táblázat Lineárisan rugalmas anyagmodell eredményei az alapkőzetre való csúcsgyorsulásra pszeudostatikus vizsgálat esetén..... | 41 |
| 5-3. táblázat Lineárisan rugalmas anyagmodell eredményei a szabadfelszínű csúcsgyorsulása .....                                     | 41 |

## 9 Irodalom jegyzék

- Basile, F., 2012. *PILE-GROUP RESPONSE UNDER SEISMIC LOADING*, Taormina, Italy: Second International conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering.
- Bentley, 2024. *Plaxis Material Manual 2D*, : Bentley Advancing Infrastructure.
- Bentley, 2024. *PLAXIS Material Models Manual 3D*, : Bentley Advancing Infrastructure.
- Bentley, 2024. *PLAXIS Tutorial Manual 2D*, : Bentley Advancing Infrastructure.
- Bentley, 2024. *Tutorial Manual 3D*, : Bentley Advancing Infrastructure.
- Benz, T., 2007. *Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences*. Stuttgart: Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart .
- Brinkgreve, R. K. M. & B. P., 2007. *Hysteretic damping in a small-strain stiffness model*, London, Anglia: Numerical Models in Geomechanics, Taylor & Francis Group.
- de Sanctis, L. M. R. & A. S., 2010. A method for assessing kinematic bending moments at pile head. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39. kötet, pp. 1133-1154.
- Di Laora, R. M. G. & M. A., 2013. Pile-head kinematic bending in layered soil. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42. kötet, pp. 319-337.
- Dobry, R. & O. M., 1983. *Discussion on 'Seismic response of end-bearing piles' by R. Flores-Berrones and R.V. Whiteman*, : Journal of the Geotechnical Engineering Division.
- George Mylonakis, R. D. L. a. A. M., 2014. The Role of Pile Diameter on Earthquake-Induced Bending. In: *The Role of Pile Diameter on Earthquake-Induced Bending*. London, Anglia: Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology, pp. 533-556.
- George Mylonakis, S. N., 2002. *DESIGN METHODS FOR EARTHQUAKE-INDUCED PILE BENDING*, New York, USA: International Conference and Exposition, Deep Foundations Institute.
- Kramer, S. L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Washington: Prentice Hall.
- MSZ EN 1997-1:2006 *Geotechnikai tervezés 1. rész: Általános szabályok* ( ) .
- Mylonakis, G., 2002. *Simplified Model for Seismic Pile Bending at Soil-Layer Interfaces*. , Japanese Geotechnical Society.
- R. Maiorano, L. S. A. A. M., 2009. Kinematic response analysis of piled foundations under seismic excitation. *Journal* 46(pp. 571-584.).
- Richard P. Ray, K.-B. O., 2016. *Tartószerkezetek tervezése földrengésre- Talajválasz*, Győr: Széchenyi István Egyetem.
- Szilvágyi, Z., 2012. Dinamikus talajparaméterek meghatározása. *Tavaszi Szél 2012 Konferenciakötet*(pp. 458-465).

Wolf, Á., 2012. Cölöpalapozás az Eurocode 8 tükrében. *Tavaszi Szél 2012 Konferencia Kötet, Doktoranduszok Országos Szövetsége*, Tavaszi Szél 2012 Konferenciakötet. kötet, pp. 505-512.

Wolf, Á., 2018. *Cölöpalapok viselkedése szeizmikus terhelés hatására szemcsés talajkörnyezetben*, Győr: Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola.

1