

RIGID INCLUSIONS ALTALAJJAVÍTÁS TERVEZÉSE ÉS MODELLEZÉSE



Lődör Kristóf – Dr. Móczár Balázs

<https://doi.org/10.32969/VB.2024.4.3>

Az elmúlt évtizedekben a fejlődő és szerteágazó kivitelezői technológiáknak köszönhetően a talajjavítási eljárások versenyképes és gazdaságos alternatívát nyújtanak a hagyományos mélyalapozásokhoz képest az altalaj teherbírásának növelésére, ezzel együtt képesek hatékonyan csökkenteni a szerkezetek alakváltozásait. Magyarországon az egyik legelterjedtebb altalajerősítési mód a rigid inclusions altalajjavítás, amelynek vizsgálata a rendszert alkotó szerkezeti elemek összetett viselkedése miatt nagy kihívást jelent a tervező mérnökök számára. Nincs kiforrott, egyszerűsített méretezési eljárás, így szinte minden esetben célszerű térbeli véges elemes modellezést készíteni az alakváltozások pontos meghatározásának érdekében, ugyanis a legtöbbek által alkalmazott egyszerűsített numerikus modellezésekkel, vagy analitikus számítási módszerekkel nem érhető el gazdaságos tervezés. Az alapozási rendszer komplex viselkedése ellenére megfelelően felállított talajfizikai modellparaméterekkel és szerkezeti modellgeometriával térbeli szimulációk segítségével lekövethetők annak alakváltozásai és igénybevételei.

KULCSSZAVAK: rigid inclusions, cella modell, térbeli modell, Plaxis 3D, back analízis

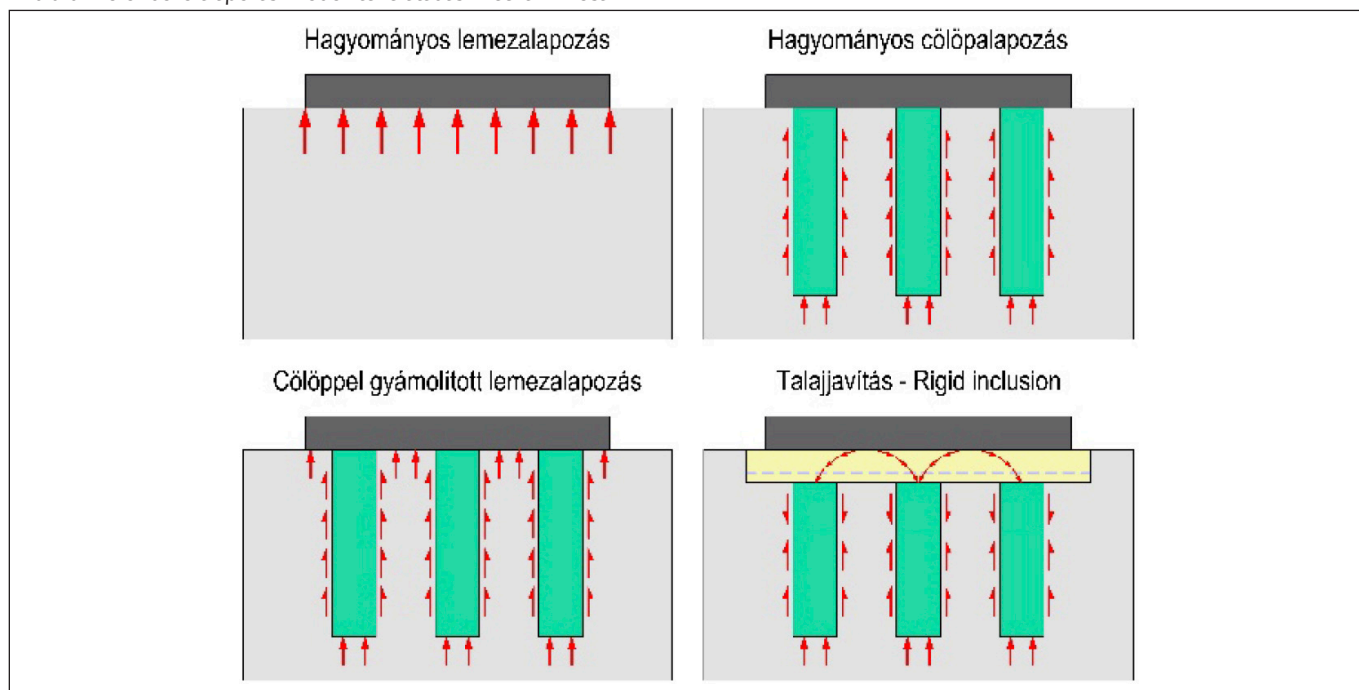
1. BEVEZETÉS

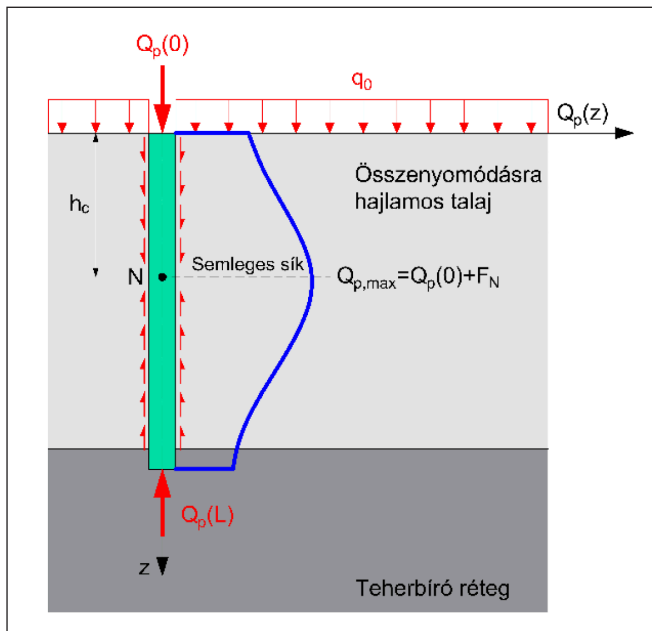
A 2000-es évek elejétől egyre gyakrabban merült fel a tervezési folyamatoknál a költségek optimalizációjának céljából, valamint a környezettudatosabb kivitelezés érdekében a különféle altalajjavítások alkalmazása. Ezt a trendet az urbanizáció felgyorsulása, valamint a geotechnikailag kedvező adottságú területek számának csökkenése tovább erősítette. Az utóbbi években számos olyan ipari és mezőgazdasági beruházásban sikerült részt vennünk, ahol műszakilag és gazdaságilag a rigid inclusions altalajerősítés bizonyult a

legkedvezőbb megoldásnak. Ezen projektek között számos tartály, siló, valamint nagy alapterületű kiterjedésű csarnok (ipari padló) volt. Rigid inclusions altalajjavítással mára már nagyszámú projekt valósult meg, de egy-egy esettanulmányt leszámítva a hazai tervezési és mozgásmérési tapasztalatokat összegző, átfogó publikáció eddig nem jelent meg.

A rendszer alakváltozásait 8-10 paraméter befolyásolja, így numerikus szimulációk során több körös (sok esetben hosszantartó) iterációt követően tudunk eljutni az optimális és gazdaságos altalajerősítési geometriához. Mindezek miatt a projektek kezdeti fázisában a tervezők analitikus számítási

1. ábra: Különböző alapozási módok teherátadási mechanizmusa





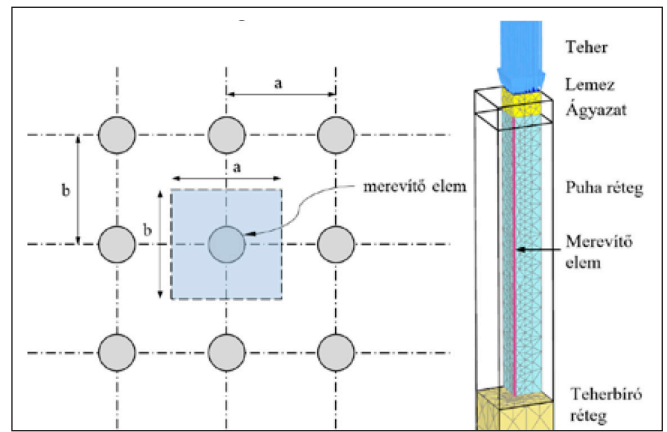
2. ábra: Merevítő elemen belüli normál igénybevétel eloszlás

módszereket, vagy leegyszerűsített véges elemes modelleket (egységcella modell) alkalmaznak a geometriai méretek becslésére adott talaj-és talajvízviszonyok, valamint terhelési intenzitások mellett. Azonban mint minden közelítő eljárásnak ezeknek is megvannak a maguk hátrányaik, buktatóik, amelyeknek esetenként jelentős negatív hatásuk tud lenni és gazdaságtalan túltervezéshez vezethetnek.

2. A RENDSZER ÁLTALÁNOS BE-MUTATÁSA

A valóságban ezt a technológiát a történelem során a korai években már több ízben is alkalmazták, elsősorban mocsaras, lápos területeken anélkül, hogy tudatában lettek volna a rendszer összetett mechanizmusáról. Eleinte fa cölöpöket juttattak az altalajba, majd a mocsaras területet homokos talajjal töltötték fel és arra építették az épületeket. Többnyire olyan építmények körében elterjedt, ahol a jelentős intenzitású teher nagy kiterjedésű felületen oszlik meg, valamint a süllyedéskülönbségekre a szerkezet érzékenyen reagál. A talajjavítás rendszer szintű alkalmazását Európában az 1970-es években kezdték el Svédországban és Finnországban, elsősorban útpálya töltések alatt (Rathmayer, 1975; Broms, 1979), majd később Skóciában és Németországban hidak háttöltése, valamint vasúti töltések alatt készítettek merev betételes talajerősítést. A talajjavítás hagyományos műtárgyak alatti alapozási célú alkalmazását Franciaországban Gigan (Gigan, 1975) nyomán kezdték el.

A rigid inclusions elemekkel gyámolított lemezalapozás alkalmazásának számos előnye van a hagyományos cölöppel gyámolított lemezalapozáshoz képest (Katzenbach és Choudhury, 2013), a különböző alapozási módszerek teherátadási módját a 1. ábra szemlélteti. Cölöppel gyámolított lemezalapozások esetében a cölöpökre közvetlenül átadódó függőleges-és vízszintes erők, valamint nyomatermek azt eredményezik, hogy a cölöpöket erősítő vasalással kell ellátni a szerkezeti stabilitás megőrzésének érdekében. Rigid inclusions altalajjavításnál a cölöpök és az alaplemez között nincs közvetlen kapcsolat, a terhek az ágyazati rétegen keresztül továbbítódnak a betételekre, így azokban jellemzően csak normál igénybevétel ébred, vagy esetleg olyan minimális



3. ábra: Cella modell értelmezési tartománya és Plaxis 3D cella modell felépítése

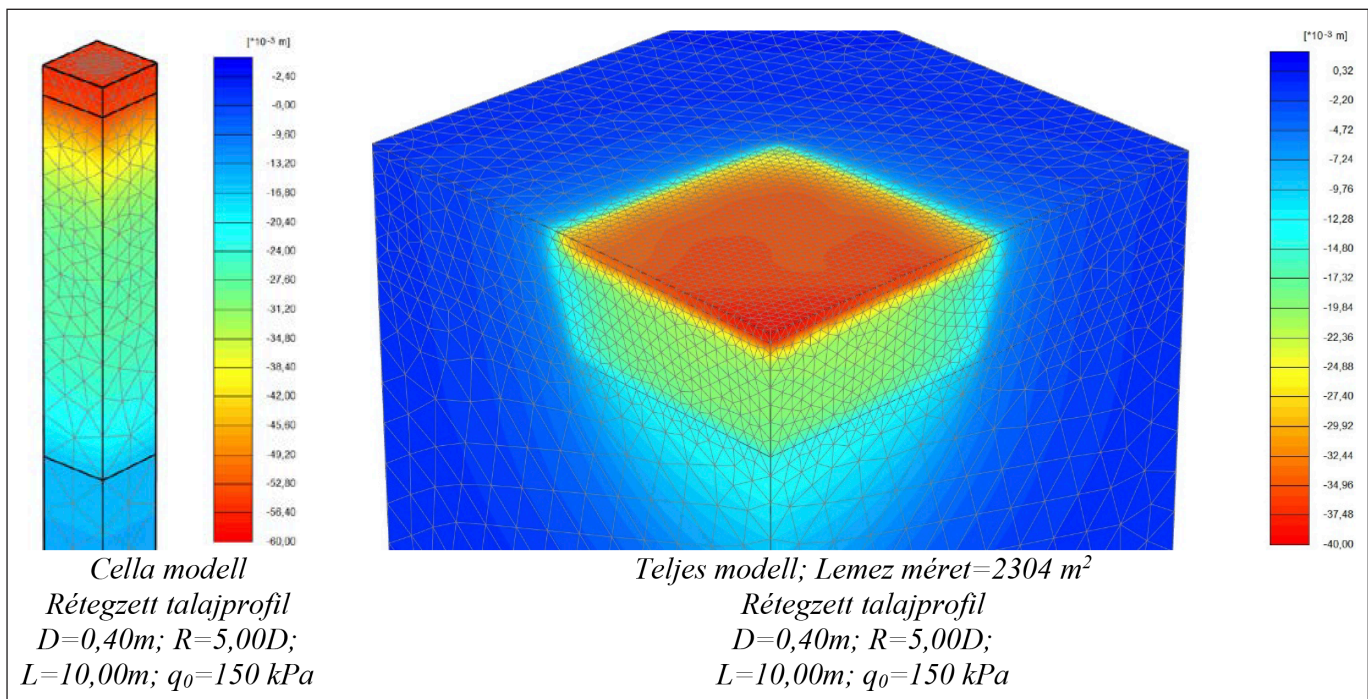
nyomaték és vízszintes teher, amelyet a keresztmetszeti méretének és anyagszilárdságának köszönhetően a cölöpök képesek felvenni (Varaksin és társai, 2016).

A szerkezeti (betét)elemek talp-és köpenymenti ellenállás segítségével ellensúlyozzák a felszerkezetről átadódó terhelést. A vasalatlan beton elemek felső részén az altalaj és a merevítő elemek relatív süllyedéskülönbségéből többletterhelés keletkezik negatív palástsúrlódás (Fellenius, 1984; ASIRI, 2012) formájában (2. ábra). A negatív köpenysúrlódás tulajdonképpen egy lefele ható súrlódás a merevítő elem palástja mentén, amely a szerkezeti elem körüli altalaj cölöphöz képesti nagyobb süllyedésének eredménye. Azt a mélységet, ahol a betételelem és a környező altalaj alakváltozása megegyezik semleges síknak nevezzük. A semleges sík fölött negatív köpenysúrlódás keletkezik, míg alatta pozitív, így a cölöpök felső részén a mélységgel lefelé haladva nő a normálerő egészen a semleges síkig, majd ezt követően a pozitív palástsúrlódásnak köszönhetően a betételelemek talpsíkjaig a normálerő folyamatosan csökken.

3. CELLA MODELL ÉS VALÓS MODELLEK KAPCSOLATÁNAK VIZSGÁLATA

Mind a hazai, mind a nemzetközi piacon egyre sűrűbben alkalmaznak térbeli 3D véges elemes szoftvereket a rigid inclusions altalajjavítás modellezése során, azonban ezekben az esetekben jellemzően nem a teljes, részletes geometriát építik fel a modelltérben belül, hanem csupán egy kiragadott részletet. Ezt a modellezési eljárást cella modellnek (ASIRI, 2012; Simon, 2012; Hor és társai, 2015) nevezik. A cella modellezésnél töltések, valamint egyenletesen megoszló terhelésű műtárgyak alatt alkalmazott rigid inclusions altalajjavításnál a szerkezetek középső tartományát vizsgálják. Kiragadva egy közbenső cölöpöt, a cölöpök tengelytávolságával megegyező modellméreten belül elemzik az alakváltozásokat, valamint a merevítő elemek erőjátékát (3. ábra). Az egységcella modellekkel a szerkezet max. süllyedési, illetve a cölöpökben ébredő max. normálerők határozhatók meg.

Kutatásaink során készítettünk egy vizsgálat sorozatot, amelynél elemeztük, hogy a cella modell valóban megbízhatóan alkalmazható-e egyenletesen megoszló terhelésű, nagyobb kiterjedésű lemezalapotok alatt, valamint azt is, hogy milyen korlátai vannak ennek a fajta egyszerűsített modellezési technikának, mekkora alapterületű alaplemezek esetében tekinthető annak eredményei reprezentatívnak. A számításokat



4. ábra: Cella és teljes modell Plaxis 3D süllyedési ábrák

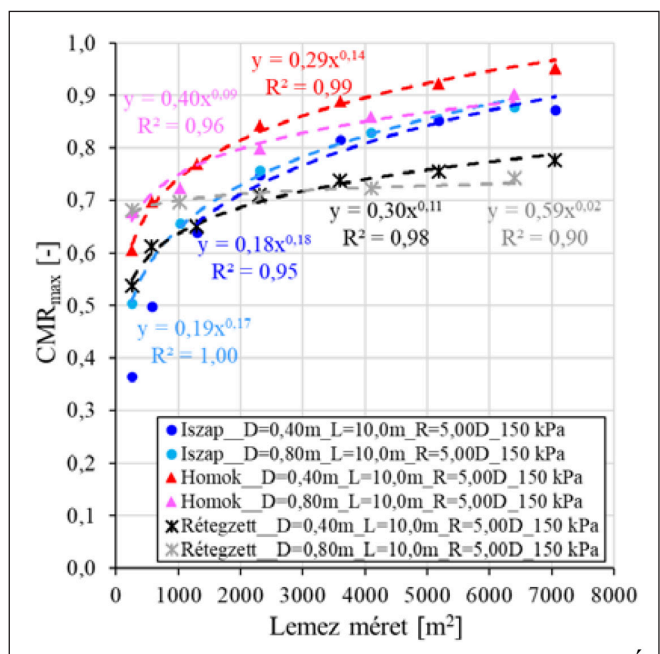
három különböző, a gyakorlatban jellemző réteprofilra végeztük el (valós helyszíni-és laboratóriumi vizsgálatok alapján), amelyek az alábbiak voltak (talajfizikai paramétereket az 1. táblázat tartalmazza):

- homogén, puha iszap/agyag réteg
- homogén, tömör homok réteg
- rétegzett talajprofil, ahol a terepszint alatt a cölöpök hosszával megegyező vastagságban puha iszap/agyag réteg van, ez alatt pedig tömör homok réteg (két réteg között jelentős merevségkülönbség van)

1. táblázat: Talajfizikai modellparaméterek – Cella modell

Paraméterek	Iszap/ Agyag	Tömör homok	Ágyazat (zúzottkő)
Anyagmodell	HSS	HSS	HSS
γ_{unsat} (kN/m ³)	19,0	17,0	20,0
γ_{sat} (kN/m ³)	20,0	19,0	20,0
$E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ (MPa)	5	17	70
E_{50}^{ef} (MPa)	5	17	70
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (MPa)	15	51	210
m (-)	0,9	0,5	0,5
φ° (°)	30	32	40
c'_{ref} (kPa)	20	7	5
$\gamma_{0,7}$ (-)	$2,010^{-4}$	210^{-4}	210^{-4}
G_0^{ref} (MPa)	75	50	131.25
R_{inter} (-)	0,9	0,67	0,67

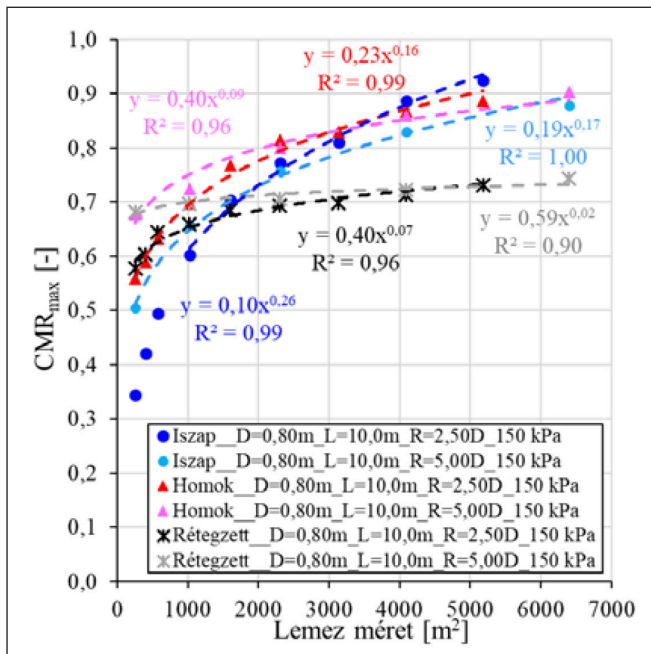
A modellekben a CFA technológiájú beton merevítő elemek $D=0,40\div 0,80\text{m}$ átmérőjük és $L=10,00\div 15,00\text{m}$ hosszúságúak voltak, míg tengelytávolságuk $a=b=2,50\cdot D=1,00\div 2,00\text{m}$ és $a=b=5,00\cdot D=2,00\div 4,00\text{m}$ volt. A teherközvetítő ágyazati réteg $h=0,80\text{m}$, míg a vasbeton alaplemez vastagsága $v=0,30\text{m}$. Az alaplemez felső síkján egyenletesen megoszló $q_0=50\div 150\div 250\text{ kN/m}^2$ terhelést definiáltunk. A vázolt geometriák mellett első lépésként felépítettük a $2,50\cdot D$ és $5,00\cdot D$ tengelytávolságokra vonatkozó cella modelleket, majd különböző, egyre növekvő négyzetes alapterületű alaplemezeket (vizsgált intervallum: 2567056 m^2). Az eredmények kiértékelésénél az alaplemezek



5. ábra: CMR_{max} a lemez méret függvényében – Átmérő (D) hatásának vizsgálata

süllyedéseit hasonlítottuk össze úgy, hogy meghatároztuk a különböző méretű alaplemezek maximális ($u_{z,i,\text{max}}$) elmozdulásait, majd ezeket leosztottuk a cella modellben kapott eredményekkel ($u_{z,\text{cell,max}}$). Ha a hányados értéke ($u_{z,i,\text{max}}/u_{z,\text{cell,max}}$) 1,00, akkor azt mondhatjuk, hogy a cella modellel végzett süllyedésszámítás kompromisszumok nélkül kiterjeszhető nagyobb méretű alaplemezekre is. A süllyedési arányokra bevezettünk egy kifejezést, amelynek az elnevezése Cella Modell Ratio ($CMR_{\text{max}} = u_{z,i,\text{max}}/u_{z,\text{cell,max}}$).

Az eredményeket kiértékelve azt tapasztaltuk, hogy növekvő alaplemez méretek hatására a modellek alakváltozási arányai folyamatosan emelkedő tendenciát mutatnak, a cella és a valós modell alakváltozási eredményei közelítik egymást. Ennek elsődleges oka az alaplemez alaprajzi méretéből fakadó növekvő határmélység (összenyomódó talajzónának a vastagsága). Az egyes fázisokhoz tartozó számítási eredményekre illesztett

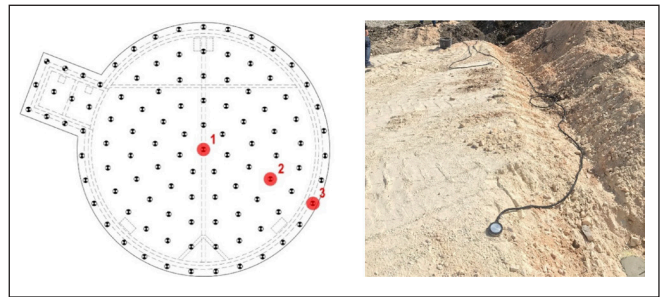


6. ábra: CMR_{max} a lemez méret függvényében – Rasztértávolság (R) hatásának vizsgálata

görbék hatványfüggvények segítségével jól leírhatók, jellemezhetők (a determinisztikus együttható $R^2=0,90\div 1,00$ közötti). Az 5. ábra alapján homogén iszap, agyag talaj mellett az átmérő módosításának minimális hatása van az eredményekre, a görbék egymáshoz közel futnak, míg nagyobb merevségű homogén homok és rétegzett talajkörnyezetnél kisebb átmérővel hamarabb érhető el a $CMR_{max}=1,00$ küszöbérték. A betételek tengelytávolságának hatását bemutató 6. ábrán alacsonyabb alaplemez mérettartományban az $R=5,00\cdot D$ rasztértávolságú görbék az $R=2,50\cdot D$ görbék felett futnak, majd ez a trend megfordul és végül minden esetben a kisebb rasztértávolságokkal érhető el leghamarabb az egyezőség a cella modellel.

Tartályok, silók esetében, ahol az az alapterület jellemzően kb. 250-3000 m^2 között van, a kísérletsorozat során egyik esetben sem értük el, vagy közelítettük meg a cella modellekkel számított deformációkat. A 2501500 m^2 közötti tartományban a cella modellhez képest talajkörnyezet függvényében homogén, puha talajprofilnál 33-71%, homogén, teherbíró homok talajnál 51-81%, míg rétegzett talajkörnyezet esetében 51-79% az abszolút, maximális süllyedések aránya. Még a Magyarországon egyedinek, speciálisnak mondható Kaposvári Cukor Zrt. területén rigid inclusions altalajjavítással megvalósult közel 2800-2900 m^2 alapterületű cukorsilónál is - ahol heterogén, rétegzett talajkörnyezet van - cella modellezéssel megközelítőleg 25-30 %-al nagyobb alakváltozásokat kapnánk eredményül.

A vizsgálati intervallumban (max. 7000 m^2 -es alapterületig) egyenletesen megoszló terhelés mellett a cella modellezés nem alkalmazható megbízhatóan, az minden esetben túlzó süllyedésekhez és a rigid inclusions altalajjavítási rendszer túltervezéséhez vezet, ami miatt sok esetben ez a talajjavítási módszer gazdaságossági okok miatt nem lesz versenyképes az egyéb alapozási, vagy talajerősítési rendszerekkel. A szimulációkban alkalmazott szerkezeti geometria és terhelés mellett homogén iszap, agyagnál kb. 700017500 m^2 , homogén homoknál kb. 620035800 m^2 , míg rétegzett talajközeg mellett csak irreálisan nagy, >56000 m^2 alapterületű alaplemezek esetében érhető el a $CMR_{max}=1,00$ küszöbérték. Ezek alapján kijelenthető, hogy rétegzett altalajprofil (cölöpök palástja



7. ábra: Boldog, Szennyvíztisztító telep – Feszültségmérő cellák helyszíni beépítése és alaprajzi elhelyezkedése

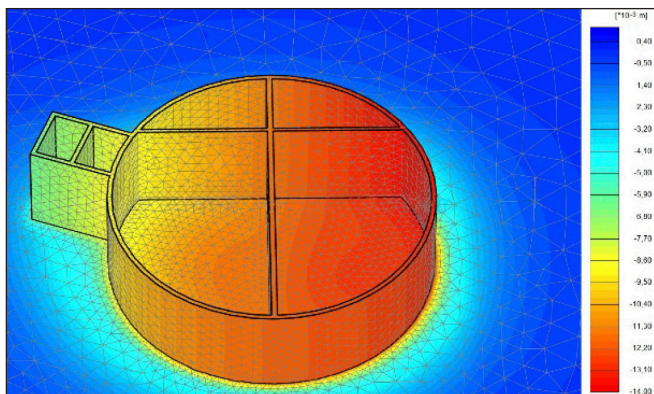
mentén puha, a talp alatt merev talaj) mellett a cella modell alkalmazása nem javasolt.

4. HELYSZÍNI MÉRÉSI EREDMÉNYEK VS. VÉGES ELEMES MODELLELVIZSGÁLATOK

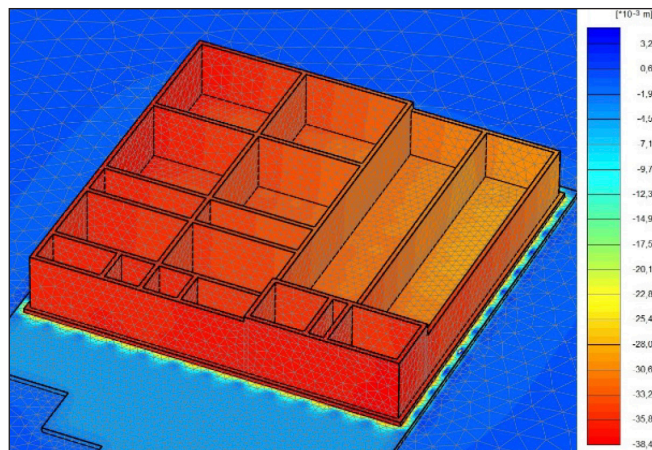
Magyarországi nagyobb, elsősorban ipari csarnokberuházásoknál a megnövekvő tárolási igényeknek-és terheléseknek, valamint a folyamatosan szigorodó süllyedési kritériumoknak köszönhetően számos projekt esetében sikeresen alkalmaztak merev betételemes altalajjavítást az ipari padlók alakváltozásainak csökkentése érdekében. Ezeknél a projekteknél sajnos az utólagos back-analízis vizsgálat nagyon nehézkes, mivel a terhelés polcrendszerek esetében pontszerű, a tárolás, raktározás pontos üteme a legtöbb esetben nem ismert, valamint az alakváltozások helyszíni mérésére limitáltan van csak lehetőség.

A szakmai tervezői és kutatói pályafutásunk során lehetőségünk volt magyarországi, rigid inclusions altalajjavítási technológiával megvalósult műtárgyak tervezésében, helyszíni monitoring méréseiben, valamint back-analízis vizsgálatában részt vennünk. Az egyik ilyen helyszín a Boldogi Szennyvíztisztító telep, ahol a 2019-ben megvalósult biológiai műtárgynál (18,30m átmérőjű kör alapterületű, tárolt anyag terhe: 55 kN/m^2) 3 darab merevítő elem (7. ábra) felső síkjára telepítettünk feszültségmérő cellákat (saját forrásból kutatási céllal), valamint mértük a szerkezet mozgásait. Rigid inclusions altalajjavítás esetében ez a fajta helyszíni monitoring mérés Magyarországon eddig egyedülálló, korábban ilyen fajta mérési eljárás nem készült, továbbá nemzetközi szinten is csupán néhány lelhető fel nyilvánosan. A másik beruházás, a Zsámbéki Szennyvíztisztító telepen 2021-ben megvalósult biológiai műtárgy (34,50x35,20m téglalap alapterületű, tárolt anyag terhe: 55 kN/m^2), ahol beruházói döntésre a szerkezet vízpróbája során mérték annak mozgásait. Mind két esetben a talajvizsgálati jelentésben és műtárgyak alapozásának tervezésében résztvettünk, így a projekteket a kezdeti fázistól kezdve nyomon tudtuk követni. A tervezés során a műtárgyak süllyedéseinek modellezésére készült síkbeli Plaxis 2D (kezdeti fázis) és térbeli Plaxis 3D (kiviteli tervi fázis) modell, amelyek eredményeit az utólagos mozgásmérésekkel össze tudtuk hasonlítani és elemezni tudtuk a modellek pontosságát.

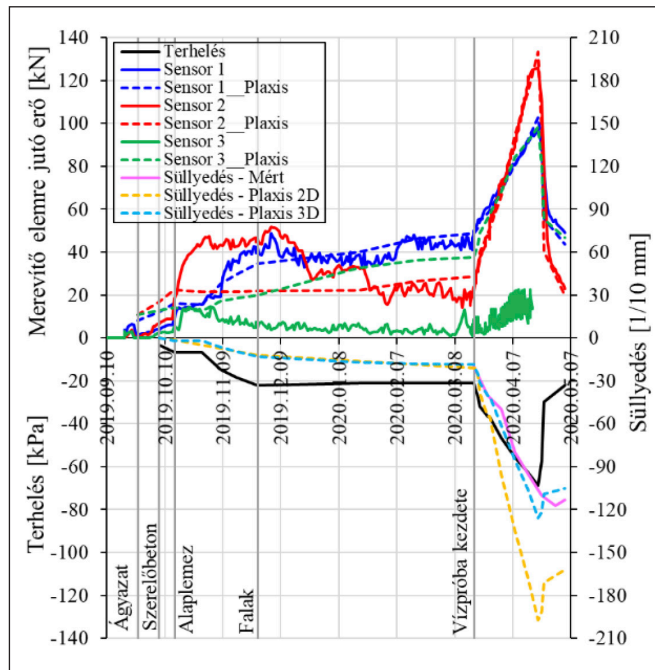
A 8. ábrán a boldogi biológiai műtárgy Plaxis 3D süllyedési ábrája látható teljesen feltöltött állapotban (2020.04.22.), míg a 9. ábrán a helyszíni monitoring mérési eredmények és a véges elemes modellezések alakváltozás és cölöp felső síkján ébredő normálerő görbék összehasonlítását ábrázoltuk. Megfigyelhető, hogy 3. szenzor feltételezhetően a kivitelezés során megsérült, vagy esetleg elmozdult, ezért a teljes mérés időtartamán



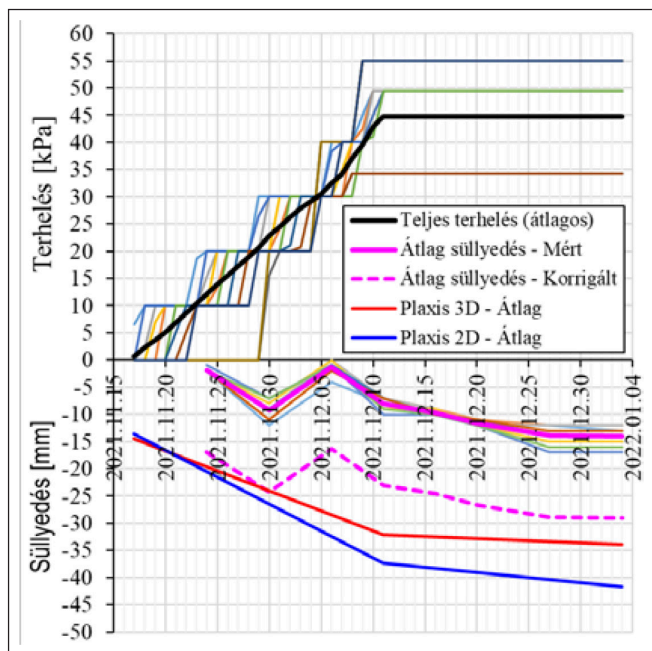
8. ábra: Plaxis 3D süllyedési ábra – Boldog, teljesen feltöltött állapot



10. ábra: Plaxis 3D süllyedési ábra – Zsámbék, teljesen feltöltött állapot



9. ábra: Helyszíni mérések és véges elemes számítási eredmények összehasonlítás - Boldog, Biológiai műtárgy



11. ábra: Helyszíni mérések és véges elemes számítási eredmények összehasonlítás - Zsámbék, Biológiai műtárgy

rossz eredményeket közölt. A szerkezet kivitelezése alatt a mért-és a számított görbék kissé eltérnek egymástól, amely különbségek a beton zsugorodásából, az ismeretlen kivitelezési körülményekből, és esetleges anyagtaralásokból adódnak. Ezen eltérések a falak kivitelezésének végeztével folyamatosan csökkentek és a vízpróba kezdetére már közel azonos értéket mutattak a mért és számított eredmények. Látható, hogy a vízpróba során a betöltött víz hatására a terhelés folyamatosan, egyenletesen nő, amelynek hatására a beton merevítő elemek felső síkján is növekszik a normálerő. A vízpróba teljes időtartama alatt a mért és modellezett eredmények szorosan egymás mellett futnak, ami az alapozási rendszer és a tervezés, modellezés helyességét igazolja.

A zsámbéki műtárgynál csak helyszíni süllyedésmérés történt, azonban ennél is látható a 11. ábrán, hogy térbeli Plaxis 3D véges elemes modellezéssel a szerkezet tényleges mozgása jól szimulálható, a mért és számított süllyedési görbék között minimális az eltérés.

A helyszíneken a műtárgyak mozgásait geodéziai mérésekkel rögzítették, azonban mind a két esetben a süllyedéseket a szerkezetek megépítését követően kezdték el mérni, azaz a kivitelezésből, a szerkezet önsúlyából származó alakváltozásokat ezen deformációs értékek nem tartalmazták. Így amikor a véges elemes szimulációk eredményeit összehasonlítottam a monitoring mérésekével, akkor a helyszíni mozgásvizsgálatokkal előállított süllyedésgörbét eltoltam

(„korrigáltam”) azzal az értékkel, amekkora alakváltozás a Plaxisban adódott a szerkezetépítést követő fázisban.

A véges elemes modellezéssel előállított süllyedési eredményekről összességében elmondható, hogy azok térbeli szimulációk esetében nagyon jól közelítik a helyszíni monitoring méréseket, úgy, hogy az egyes altalajrétegek input paraméterein utólagosan nem változtattunk, manipuláltunk. Azok minden esetben a talajvizsgálati jelentésben megadott talajfizikai jellemzők, valamint a laboratóriumi mérések és helyszíni szeizmikus-és statikus nyomószondázások adatait feldolgozva lettek definiálva.

A szerkezetek két-és háromdimenziós süllyedésmo- dellezésénél jelentős eltéréseket kaptunk. A kétdimenziós modellezések során minden esetben jelentősen nagyobbak voltak az alakváltozások, mint amit térbeli modellezésnél, valamint a helyszíni méréseknél tapasztaltunk. Ennek legfőbb oka 2D tengelyszimmetrikus modellezésnél, hogy a cölöpök pontos geometriája (átmérő, keresztmetszeti terület és palást felület), kiosztása nehezen parametrizálható, míg 2D síkbeli (plain strain) modellezésnél az alaplemez valós alaprajzi mérete nem definiálható a modellterén belül. Annak síkra merőleges méretét végtelennek értelmezi a szoftver, így a határmélység jóval mélyebb lesz, ami mindenképpen az alakváltozások - reálishoz képesti - növekedését eredményezi.

A kétdimenziós modellezés további hátránya, hogy a komplex geometriájú, több medencetérrel rendelkező tartályoknál a falak tényleges, valós merevítő hatása nehezen vehető figyelembe. Az alaplemezen belüli, medencetereként változó terhelések csupán korlátozottan határozhatók meg helyettesítő terhelés formájában, így az egyenlőtlen süllyedések értelmezése limitált.

5. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A cikkben bemutatott közelítő véges elemes cella modellezés során megfigyelhető volt, hogy ezzel az egyszerűsített modellezési technikával jellemzően túlbecsüljük a tervezett rigid inclusions általajjavítási rendszer maximális mozgásait, így a tervezés nem gazdaságos. Célszerű a vizsgált tartományba eső alaplemezeket a tényleges méretükkel figyelembe venni már az előtervezések során is. A kísérletsorozatban alkalmazott szerkezeti geometria és terhelés mellett homogén iszap, agyagnál kb. 7000-17500 m², homogén homoknál kb. 6200-35800 m², míg rétegzett talajközeg mellett csak irreálisan nagy, >56000 m² alapterületű alaplemezek esetében érhető el a $CMR_{max}=1,00$ küszöbérték. Ezek alapján kijelenthető, hogy rétegzett talajkörnyezet mellett a cella modell alkalmazása nem javasolt.

Magyarországon, rigid inclusions általajjavítással két különböző helyszínen megvalósult szennyvíztisztító medencéknél végzett helyszíni monitoring mérési eredményeket összehasonlítva a numerikus számításokkal azt tapasztaltuk, hogy helyes talajmodell, talajfizikai jellemzők és modellgeometria felvételével térbeli szimulációkkal a mért és számított értékek közötti különbség minimális. A szerkezetek két-és háromdimenziós süllyedésmodellezésénél jelentős eltéréseket kaptunk, amelyek alapján a pontos és gazdaságos tervezés érdekében javasolt minden esetben térbeli geotechnikai véges elemes süllyedésanalízist készíteni.

6. HIVATKOZÁSOK

- ASIRI National Project, IREX, (2012), „Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusions ground improvements.” *Paris: Press des Pontos*.
- Broms, B., B., (1979), „Problems and solutions to construction in soft clay” *Proceeding, 6th Asian regional conference on soil mechanics and foundation engineering*. vol. 2, pp. 28-30. Singapore.
- Fellenius, B., H., (1984), „Negative skin friction and settlement of piles.” *Second International Seminar, Pile Foundations*, Nanyang Technological Institute, Singapore, 28-30 November 1984.
- Gigan, J., P., (1975), „Consolidation d'un sol de fondation par pilotes” *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*. no. 78, pp. 12-16.

- Hor, B., Song, M.-J., Jung, M.-H., Song, Y.-H. & Park, Y.-H., (2015), „A 3D FEM analysis on the performance of disconnected piled raft foundation.” *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. vol. 2: 1238-1243.
- Katzenbach, R., Choudhury, D., (2013), „ISSMGE Pile-Raft Foundation Guideline.” *Technische Universität Darmstadt. Institute and Laboratory of Geotechnics*. Darmstadt. Germany. July 2013
- Rathmayer, H., (1975), „Piled embankment supported by single pile caps” *Proceeding, Istanbul conference on soil mechanics and foundation engineering*.
- Simon, B., (2012), „General report S5 - Rigid inclusions and stone columns.” *ISSMGE – TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI*, Brussels, May 31st and June 1st, 2012.
- Varaksin, S., Hamidi, B., Huybrechts, N. Denies, N., (2016), „Ground Improvement vs. Pile Foundations?” *ISSMGE-ETC 3 International Symposium on Design of Piles in Europe*, Leuven, Belgium, 28-29 April, 1-48.

Dr. Móczár Balázs (1971) okl. építőmérnök, okl. igazságügyi szakmérnök, PhD, egyetemi docens, a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék oktatója. Fő érdeklődési területei: talaj és szerkezet kölcsönhatása, sík- és mélyalapozások, mély munkagödörök, talajjavítások. Az MMK Geotechnikai Tagozat elnöke. Az ISSMGE és a Magyar Geotechnikai Egyesület tagja.

Lődör Kristóf (1990) okl. építőmérnök (MSc), a Strabag Építőipari Zrt. geotechnikai tervezője és a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék oktatója. Fő érdeklődési területei: a speciális mélyépítés, mély munkagödörök, talaj és szerkezet kölcsönhatása, talajjavítások. Az ISSMGE és a Magyar Geotechnikai Egyesület tagja.

DESIGN AND MODELLING PROCESS OF RIGIDI INCLUSIONS GROUNDIMPROVEMENT

Kristóf Lődör - Balázs Móczár

Thanks to the evolving and diversifying construction technologies in the recent decades, ground improvement offers a competitive and economical alternative to traditional deep foundations for increasing the bearing capacity of the ground, while also being able to reduce the deformation of structures. In Hungary, one of the most commonly used ground improvement technologies is the rigid inclusions. The design of rigid inclusions is a challenging task for engineers because due to the complex behaviour of the structural elements of the system, there are no well-developed simplified methods for the design, and therefore it is always advisable to perform complex 3D finite element modelling to accurately determine its behaviour. The verification of the numerical simulations was aided by projects in Hungary, where rigid inclusions ground improvement was used to limit deformations under the designed structures and a variety of field measurements were carried out during construction and operation. Based on the results of these monitoring measurements, the models, structural geometries and geotechnical parameters were validated by numerical back-analysis and recommendations were made on how to define these in a finite element model.