



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki kar

Hidak és Szerkezetek Tanszék

**Acélbetétek tapadásának numerikus modellezése
repedésmentes betonban**

TDK Dolgozat

2020

Készítette:

Szinvai Szabolcs – STL06D

Építőmérnök Hallgató – MSc II. Évfolyam

Konzulens:

Dr. Kovács Tamás

BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

Összefoglaló

Előfeszített vasbetonszerkezetek tervezése esetén az egyik fontos tényező a beton és a feszítőbetétek együttműködése. Ez a két anyag közötti tapadáson keresztül valósul meg. A megfelelő erősségű kapcsolat szükséges, hogy az erőátadás megtörténhessen, hogy a terheket közösen viseljék.

A feszítőerő átadása a betonnak a tapadási mechanizmusok segítségével valósul meg, ezek az adhézió, mechanikus tapadás, súrlódás és a Hoyer hatás. Az erőátadási zóna addig tart, amíg relatív elmozdulások tapasztalhatóak a beton és a betét felülete között, azaz van megcsúszás. Ezért ezt a szakaszt zavart zónának szokás nevezni. Ha előfeszített vasbeton gerendáról beszélünk, akkor az elem két végén van egy-egy zavart zóna, a kettő között pedig az úgynevezett zavartalan zóna. Terheletlen esetben itt a feszítőbetétben a hasznos feszítőerő van jelen, és nincsen megcsúszás.

A TDK dolgozatomban három különböző betétettel foglalkoztam: sima felületű acél feszítőhuzal, bordázott acélbetét és acél héteres pászma. A vizsgálat alapját GiD és Atena szoftverek segítségével előállított numerikus modellek adták. A célom az említett betétek geometriai modellezése és gerendavizsgálati elrendezésben történő nemlineáris végelelemes analízise volt. Mindegyik modellnél azonosak voltak a tapadási körülmények, a betonminőség, geometriai méretek stb. A kísérleti elrendezéssel a zavartalan zónát, egy gerenda közbenső szakaszát szimuláltam. A betéteket feszítetlen állapotban vizsgáltam, a valós kísérletnek megfelelően.

Kétféle beágyazási hosszt vizsgáltam, az első esetben a standard kísérletnek megfelelően a névleges átmérő tízszeresével megegyező, a második esetben pedig a teljes hossz mentén ágyaztam be a betéteket. Ezzel különválasztottam a tönkremeneteli módokat, rövidebb beágyazási hossz esetén a kapcsolat tönkremenetelével végződtek a kísérletek, míg a hosszabb beágyazási hossz esetén a betét érte el hamarabb a folyáshatárát. Így összesen hat modellt állítottam elő.

A huzal esetén csak az adhézió és a súrlódás játszott szerepet, vagyis a modellben definiált kontaktparaméterek határozták meg a viselkedést. Ezért ezeket a paramétereket korábbi kísérletek segítségével állítottam be, majd mindegyik modellnél ezt alkalmaztam. Ezáltal a modellek összehasonlíthatóvá váltak.

Célom volt előállítani minden esethez a tapadási feszültség-megcsúszás diagramokat és megfigyelni a tönkremenetel módját. A numerikus vizsgálat előnye, hogy a szükséges értékeket bármelyik pontban ki lehet nyerni, ezáltal azok hossz menti eloszlása is vizsgálható. A kapott eredmények kiértékelése során összehasonlítottam a különböző betéteket egymással.

Továbbá megvizsgáltam azt is, hogy az analitikus összefüggések mennyire összeegyeztethetőek a numerikusan kapott eredményekkel.

Abstract

During the design of pretension prestressed reinforced concrete structures, one of the key aspects is the interaction of the concrete and prestressing bars. This could happen due to the bond between the concrete and steel material. The connection has to be strong enough, so that the adequate force transfer could happen, and they could bear the loads together.

The transfer of the prestressing force to the concrete occur with the help of the bond mechanisms: adhesion, mechanical interlock, friction and the Hoyer effect. The end of this zone is where there are no relative displacements, slips anymore. Therefore, this zone is also referred to as the disturbed zone. Given a pretensioned prestressed concrete beam, we can divide it to the disturbed zone at each end of the member and the undisturbed zone in between. In case of an unloaded specimen, no slip occurs here, and the effective prestressing force is present.

In this paper I examined three different kind of bar: steel prestressing wire with plain surface, ribbed steel bar, steel seven wire strand. The analysis was based upon the numerical models created with the GiD and Atena software. The goal was the precise geometrical modelling of the bars and their nonlinear finite element analysis in a flexural beam experiment setting. The bonding conditions were the same for every model: the concrete parameters, geometrical sizes etc. The beforementioned experimental setting was meant to simulate the undisturbed zone, the inner part of a beam.

I was examining two different embedment length, in the first case I use a length of ten times the nominal diameter of the bar. In the second case I was embedding the bars in the full length of the member. This way I had results for both failure modes. The experiments with the shorter embedment length ended with the failure of the connection, while experiments with the longer embedment length ended with the failure of the bar. Hence, I made 6 finite element model in total.

The behaviour of the wire is simple, since only the adhesion and the friction play a role, which means that the defined contact parameters determine the behaviour. Therefore, I set these parameters with the help of previous laboratory experiments and I used them for every model. This made the models comparable.

The goal was to create the bond stress-slip diagram for each case and evaluate the mode of failure. I compared the three type of bars and the two types of failure modes. A benefit of the numerical analysis is that I could gather data about the bond stresses and slips along the embedment length, therefore I could also examine their distribution.

Moreover, I examined how the numerical results correlate with the analytical models.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	1
1.1 A tapadás összetevői	1
1.2 Zavart és zavartalan zóna értelmezése	2
1.3 A tapadás összetevőinek értelmezése és kombinációjuk	2
1.4 A tapadást befolyásoló tulajdonságok.....	9
1.5 A vizsgált betétek felületi tulajdonságai	9
1.6 A tapadást vizsgáló kísérletek elrendezései	10
1.7 A dolgozat célja, felépítése	11
2. Előfeszített szerkezetek, feszítőbetétek.....	13
3. Irodalomkutatás	16
3.1 Analitikus megoldások.....	16
3.2 Numerikus modellek készítése.....	19
4. Numerikus modellek	24
4.1 Geometria	25
4.2 Anyagok, anyagmodellek.....	29
4.3 Megtámasztási viszonyok	33
4.4 Monitor pontok.....	34
4.5 Intervallumok, a kísérlet menete	34
4.6 Végeselemes háló	35
5. Eredmények, kiértékelés	36
5.1 Modellek validálása.....	36
5.2 Vizsgált eredmények	40
5.3 Kiértékelés.....	41
5.3.1 A kapcsolat tönkremenetele	42
5.3.2 A betét megfolyása.....	45
5.3.3 Az eredmények összevetése analitikus modellekkel.....	47
5.4 Eredmények a feldolgozás után.....	48
6. Konklúziók, összefoglalás.....	56
Irodalomjegyzék.....	57

1. Bevezetés

Az 1930-as években Ewald Hoyer német mérnök kifejlesztett egy rendszert, amivel egyszerű acél huzalokat lehetett megfeszíteni, majd ezek kibetonozásával folytonos gerendákat létrehozni. [1] A huzalok viselkedését zongorák húrjához hasonlította, rendszerét Stahlsaitenbeton-nak nevezte, magyarul „zongorahúr beton”. Ez volt az előfeszített vasbeton gerenda születése.

Azóta ez a rendszer sokat fejlődött, de az alapötlet nem változott. Hosszú feszítőpadokat alkalmaznak egyszerre több gerenda elkészítéséhez. Az előállított előregyártott előfeszített vasbeton szerkezeteket előszeretettel alkalmazzák tartószerkezetek építéséhez.

Annak következtében, hogy az előfeszítési technológia alkalmazása esetén a betétek mindennemű lehorgonyozószerkezet segítségével nélkül működnek együtt a betonnal, az elemek viselkedését, teherbírását alapvetően meghatározza a beton és a feszítőbetét együttdolgozása, a tapadás (bond) minősége.

1.1 A tapadás összetevői

A tapadás (bond) szó megtévesztő lehet, hiszen más kontextusban könnyen gondolhatunk a tapadási súrlódásra, ami tulajdonképpen azt fejezi ki, hogy egy mozdulatlan tárgy kimozdításához mekkora erőre van szükség. Az angol „bond” szó pedig szintén sok mindent jelent, többek között a kémiai kötések (pl.: kovalens kötés) megnevezéséhez is használják. Jelen dolgozatban tapadás alatt a beton és az abba ágyazott acélbetét határfelületén, azaz az acélbetét betonnal közvetlenül érintkező felületén kialakuló tapadást értem, ez biztosítja a két anyag együttdolgozását.

Feszített betétek tapadási jelenségét négy fő mechanizmusra lehet osztani:

- 1) Adhézió az acél és a beton (cement) között
- 2) Mechanikus tapadás („mechanical interlock”) a betét geometriai, illetve felületi kialakítása miatt
- 3) Súrlódás az acél és a beton felületi érdessége miatt
- 4) Hoyer hatás a feszítőerő átadásának környezetében

A kihúzóerő ellenállás a tapadási mechanizmusok kombinációjából áll össze. A tapadási szilárdság az együttdolgozás hatékonyságát számszerűsíti, azaz kifejezi, hogy mekkora feszültséget képes elviselni a kapcsolat tönkremenetel nélkül.

1.2 Zavart és zavartalan zóna értelmezése

A feszítőbetétek erőátadása a tartó végén történik, az úgynevezett erőátadási hosszon a feszítőbetétek a feszítőerőt felületi tapadás útján átadják a betonnak. Az érintkezési felületen fellépő tapadási (nyíró) feszültség döntő mértékét a feszítőbetét és a beton közötti relatív elmozdulás mobilizálja. Ebből következően az erőátadódási hossz elsősorban a tapadási nyírófeszültségek mértékének a függvénye, minél kedvezőbbek a paraméterek, annál rövidebb. A szerkezeti elem terheletlen állapotában csak ebben a zónában van relatív elmozdulás (megcsúszás) a beton és a feszítőbetét felülete között. A betonra átadódó erők ebben a zónában terjednek szét a szerkezeti elemre jellemző módon, ezért ebben a zónában még nem alakul ki a szerkezeti elem jellegzetes (pl. gerendaszerű) erőjátéka. Ezért szokás az erőátadódás környezetét zavart zónának hívni, az ezen kívül eső rész pedig a zavartalan zóna, amelyben már a szerkezeti elemre jellemző erőjáték működik (többé-kevésbé függetlenül az erőátadás módjától).

A zavartalan zónában bekövetkező repedés környezetében a megrepedt beton nyúlása a repedésfal mögötti zónában eltér az acélbetét nyúlásától, ezért mobilizálódik a tapadás. Minél jobb a tapadás, annál kisebb az a szakasz, ahol az acélbetét és a beton között megszűnt a közvetlen kapcsolat, azaz a repedéstágasság. A tapadás mértékét a tapadási mechanizmusok határozzák meg: az adhézió, a mechanikus tapadás és a súrlódás.

1.3 A tapadás összetevőinek értelmezése és kombinációjuk

Adhézió

A kémiai adhézió az acél és a beton (cement) szemcsék közötti kölcsönhatás molekuláris szinten. Hozzájárulása a tapadási ellenálláshoz kicsi, de nem elhanyagolható. Gyorsan, ridegen megy tönkre.

A betét és a beton közötti relatív elmozdulás esetén az adhéziós kötés felszakad, tovább nem járul hozzá a tapadáshoz. [3]. Mivel az adhézió mindenhol megszűnik, ahol van megcsúszás, ezért a feszítőerő teljes átadása után az erőátadási zónában az adhézió már nincsen jelen, viszont a feszítőerő ráengedése előtt még nem szakadt fel, a feszítőerő ráengedésének kezdete és a teljes feszítőerő ráadása között megy tönkre.

Ez azt is magában foglalja, hogy a zavartalan zónában, terheletlen elem esetén, az adhéziós kötés megmarad, mert nincsen relatív megcsúszás a felületek között. Terhelés hatására további relatív elmozdulások keletkeznek, ami az adhéziós kötés felszakadását eredményezi.

Mechanikus tapadás

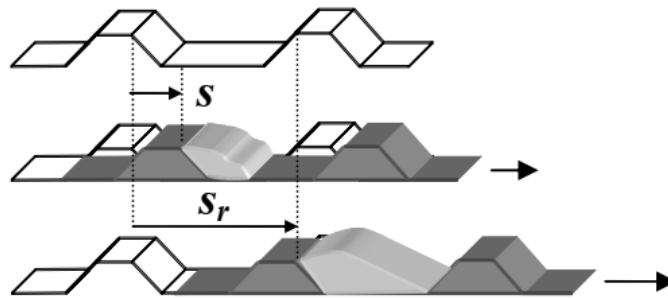
A mechanikus tapadás a betétek geometriai alakjának, illetve felületkialakításának köszönhető. Pázmák esetében a sodort, spirális kialakítás miatt az acél felülete közvetlenül hozzányomódik a betonhoz, gátolva ezzel a relatív elmozdulásokat. Ezt úgy lehet elképzelni, mintha egy csavart próbálnánk meg kihúzni. A különböző felületkialakítások, bordázások, rovátkolások ugyanezt hivatottak elérni. Minden esetben, amikor a kapcsolat nem tud teljes hosszon egy sima felület mentén elnyíródni, fellép ez a jelenség.

Meglehetősen fontos mechanizmusa a tapadásnak. A tapadási ellenálláshoz való hozzájárulása akkor is megmarad, amikor a betét megcsúszik. Ráadásul a betét teljes elem menti megcsúszását követően is képes ellenállást biztosítani, ugyanis a betét geometriai értelemben történő nekinyomódása az őt körülvevő betonba nem az egyetlen összetevője ennek a mechanizmusnak.

A kapcsolat megcsúszásakor a betétet körülvevő betonból darabok törnek le. Pázmák esetén a külső felület nem egységes, nem henger alakú, hanem a huzalok felülete adja. A huzalok közötti beton relatív elmozdulás esetén letörik. Ez amiatt van, hogy a relatív elmozdulás következtében a pázmában csökken a feszültség, illetve csökken a hossza is, és mivel sodort, a hossz, illetve feszültség változásának hatására nem csak tengelyirányban tolódik el a pázma egy adott keresztmetszete, hanem el is fordul, illetve a Poisson-hatás következtében keresztirányban is szeretne alakváltozni. A feszítőbetét ilyen formában történő elmozdulásai miatt az őt körülvevő betonból darabok törnek le, illetve ezek a darabok egyre jobban beékelődnek a pázma elfordulása, alakváltozásai következtében. Ez a jelenség meglehetősen nagy kihúzási ellenálláshoz vezethet, ezt már Logan is vizsgálta [4]. 1997-ben. Ez a jelenség különálló huzalok alkalmazásakor nem figyelhető meg, mivel azok sima felületűek és nem fordulnak el.

A leírtakból következően pázmák esetén meg kell különböztetnünk a „kezdeti tapadási állapotot”, amikor pusztán a pázma geometriai kialakítása áll ellen az elmozdulásnak, és a „megcsúszott állapotot”, amikor a feszítőbetét megcsúszásának következtében a mechanikus tapadás további növekedett értékkel járul hozzá a tapadási ellenálláshoz.

Különböző felületkialakítású betétek esetében az 1. ábrán látható módon a betonnak feszülő acél felület tolja maga előtt, morzsolja a betont.



1. ábra: Beton morzsolódása a borda előtt, miközben a betét megcsúszik

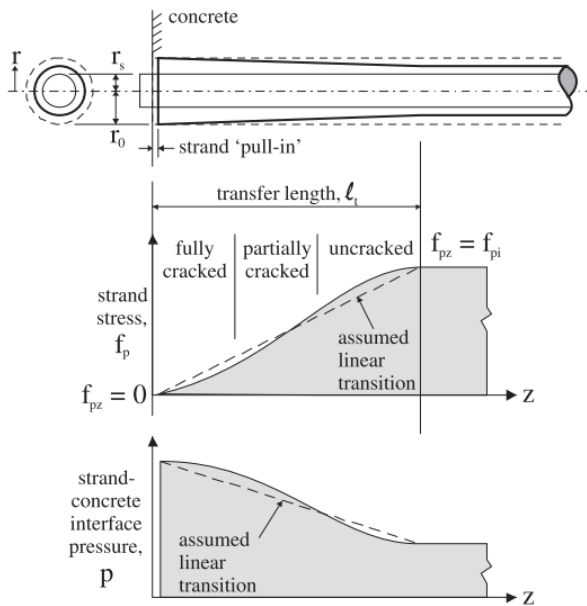
Acél betéteknél a beton fog elnyíródni, a jellemzően kisebb ellenállása miatt, míg bizonyos műanyag betéteknél a betét bordái nyíródnak el a beton helyett, a szilárdsági viszonyok függvényében. Ebből következően a pászmákhoz hasonlóan itt sem lesz konstans a mechanizmus hozzájárulása a tapadáshoz a terhelés során.

A közelben lévő lágyvasalás szintén hozzájárulhat a mechanizmushoz, ugyanis a betétet körülvevő betonban húzófeszültségek keletkeznek. Ha ezeket a húzóerőket fel tudja venni a vasalási armatúra, akkor nagyobb lesz a körülvevő beton megtámasztásának hatása, aminek következtében a betét geometriai értelemben jobban gátolt, és a mechanikus tapadás hatása nagyobb lesz.

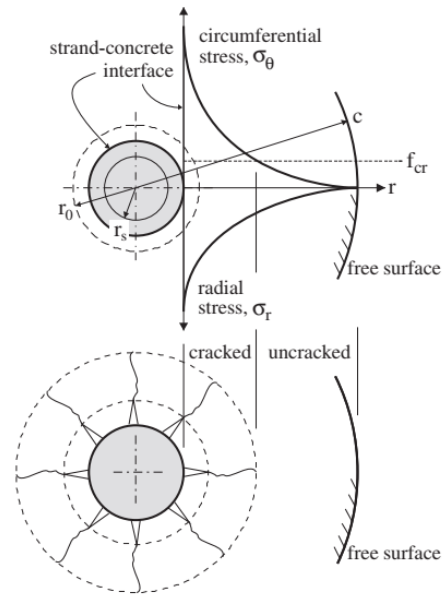
Ez a mechanizmus a terhelés során végig jelen van, és tönkremenetele (ellenálláshoz való hozzájárulásának csökkenése) nem hirtelen következik be, hanem egy progresszív leépülés történik. Ebből kifolyólag ez egy sokkal duktilisabb viselkedést eredményez, mint az adhézió felszakadása.

Hoyer hatás [5]

Ez a mechanizmus csak feszített betétek esetén van jelen, az erőátadásnál van jelentősége. Amikor egy egyenes huzalt megfeszítünk, akkor a huzal átmérője lecsökken a Poisson hatás következtében. Amikor a feszültség megszűnik, a huzal megkísérli visszanyerni az eredeti átmérőjét. Ahol a huzalt nem veszi körbe beton, a huzal visszanyeri eredeti átmérőjét, illetve hasonlóan, ahol a hasznos feszítőerő működik (vagyis a lehorgonyzási hosszon túl), a huzal megőrzi a feszített átmérőjét. A feszítőerő erőátadás menti eloszlását a 2. ábra szemlélteti. Az átmérő a betétben lévő feszültségnek megfelelően változik. A tartó vége felé, ahol a feszítőerő lecsökken, a huzal megpróbálja visszanyerni az eredeti átmérőjét, aminek következtében a sugárirányú erők megnőnek. Ezek az erők kedvezően hatnak a tapadásra, segítenek átadni a feszítőerőt a betonnak.



2. ábra: Hoyer hatás



3. ábra: Repedések és feszültségek a huzal környezetében

A kialakult sugárirányú erők a betonban nyomást okoznak. Ennek következtében merőleges kerületi húzófeszültségeknek is ki kell alakulniuk. Ez a huzal felületétől kiinduló repedéseket okozhat, ahogy az a 3. ábrán látható. A repedések rontják az erőátadási mechanizmust.

Abban az esetben, ha a vasbetonszerkezetben sok egymáshoz közel lehorgonyzott betét található, ezeknek az egymásra hatása súlyos repedezettséget, és akár a betonfedés leválását is okozhatja. Ennek a hatásnak a csökkentésére bizonyos esetekben néhány betétnek a lehorgonyzását részlegesen feloldják, hogy az erőátadás ne minden betétnél ugyanott történjen meg. Ez például úgy is megoldható, hogy néhány betétet a betonozás előtt a tartó végén csövekkel vonnak be, hogy a lehorgonyzódás ne ott történjen meg, hanem messzebb, így az egyes betétek erőátadási zónáit eltolva elkerülhető a feszültségelmozdulás.

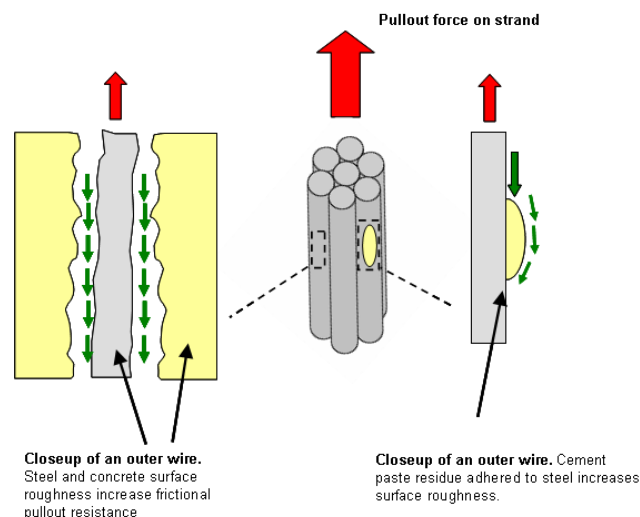
Pázmákat is lehet tömör hengerrel modellezni, ebben az esetben a 3. ábrán látható módon alakul a repedéskép a huzallal megegyező módon. Ez persze csak közelítés, de jól szemlélteti a jelenséget. A hengeres pázma hengeres beton elembe van, a „c” betonfedést a pázma középpontjától mérjük. A pázma feszítetlen sugarát r_0 -val, a feszített sugarát pedig r_s -el jelöli az ábra.

A tartó szabad végétől eltávolodva a feszültségek gyorsan lecsökkennek. Megfelelően nagy betonfedés esetén ez azt jelenti, hogy lesz egy berepedt zóna a pázma környezetében, amit körbevesz egy be nem repedt betonzóna, ahol a feszültségek a beton húzószilárdsága alatt vannak. Numerikus megoldások alapján ez a 2-es ábrán látható módon a lehorgonyzási hossz mentén berepedt, részben berepedt és be nem repedt zónákra osztható.

Súrlódás

A sugárirányú feszültségből származó súrlódással ellentétben a felületek érdességéből származó súrlódás jelen van attól függetlenül, hogy a betét feszített, vagy sem. Ide tartozik minden anyagi durvaság, egyenetlenség az acél-beton(cement) felületen, ami akadályozza a feszítőbetét és a beton relatív elmozdulását. Ebből következőleg ez a mechanizmus csak akkor aktivizálódik, amikor relatív elmozdulás létrejön. Azaz a zavart zóna egészében, terhelés esetén a zavartalan zóna megcsúszott szakaszain, illetve globális megcsúszás esetén az elem teljes hosszán.

Továbbá előfordulhat olyan eset is, amikor a cement részecskék hozzátapadnak az acél felületéhez, és megcsúszáskor a betéttel együtt mozdulnak el. Ez látható a 4. ábrán. Ilyen esetben ez további ellenállás növekményt jelent.



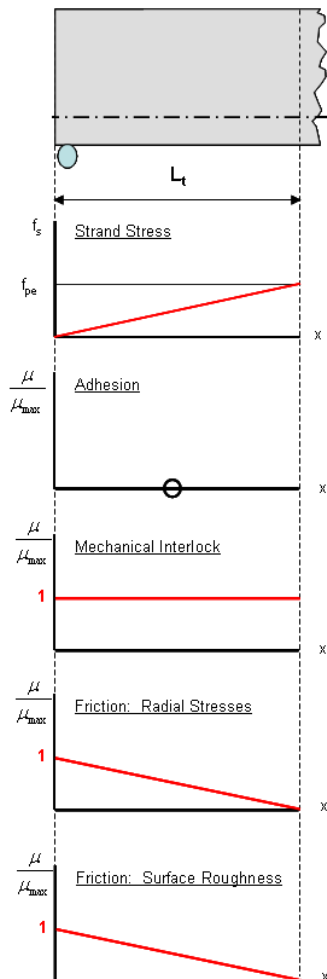
4. ábra: Felület érdességéből adódó súrlódási ellenállás

A cement részecskék ott tudnak a pászma felületén maradni, ahol az adhézió nagyobb, mint a betétet körülvevő beton húzószilárdsága. A megcsúszás növekedésével a betétre tapadt betonrészecskék az „örülő” hatás (a betét folytatólagos megcsúszása,) miatt le tudnak válni, ezért hatásuk csökken. Amikor ezek a részecskék leválnak, már nem a súrlódási mechanizmus részei, hanem a mechanikus tapadáshoz járulnak hozzá.

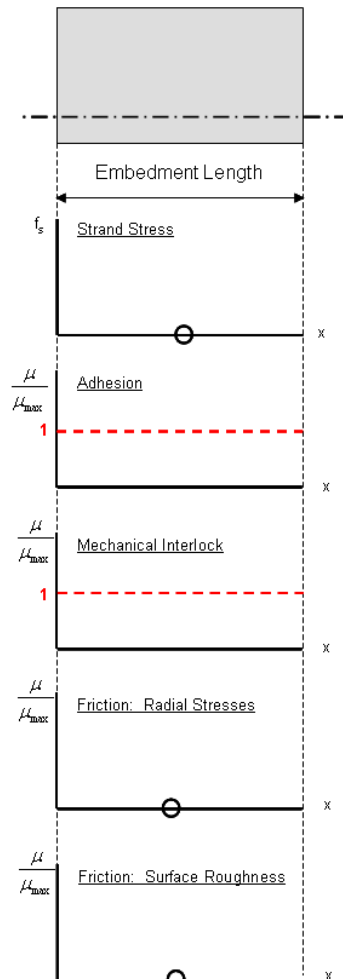
A súrlódás tehát az acél felület érdességét, a beton felület érdességét, és a betét felületére tapadt cement részecskék ellenállását jelenti. A felület kialakítása, illetve a geometria csak olyan szempontból van hatással erre a mechanizmusra, hogy módosítja a betét fajlagos felületét, vagyis ugyanakkora terhelés esetén más felületen tud a súrlódás végbemenni, más lesz az eredő erő. A súrlódásból származó feszültséget a két felület között azonban nem módosítja.

Tapadási mechanizmusok kombinációja

Az ismertett mechanizmusok egyedi kölcsönhatásban vannak egymással, a tapadási szilárdságot nem tudjuk megkapni egyszerűen összeadva őket. Mivel egyes mechanizmusok jelen vannak a feszítés hatására, más mechanizmusok pedig ettől függetlenül feszített és feszítetlen betétek esetén is, ezért ezt a két esetet egyértelműen ketté kell választanunk.



6. ábra: Tapadási mechanizmusok jelenléte az erőátadási zónában előfeszített gerenda esetén



5. ábra: Tapadási mechanizmusok jelenléte a hatásvos feszítőerő zónájában előfeszített gerenda esetén

A vizsgált betétre ráadott teher (kihúzó erő) hatására az acél és a beton relatívan el fog mozdulni, ami megváltoztatja a mechanizmusok hozzájárulását a tapadási szilárdsághoz. A hozzájárulás eloszlása a terheléstől függ, azaz, hogy hol tart a tönkremenetel.

A 6. ábrán a tapadási mechanizmusok feltételezett nagysága látható az erőátadási hossz mentén, terheletlen előfeszített gerenda esetén. μ_{\max} itt most az adott mechanizmus maximum nagysága a vizsgált zónán belül. A betétben lévő feszültséget az ábra f_s -el jelöli. A lehorgonyzási hossz végén a feszültség értéke eléri a hatásvos feszítőerőt.

Mivel a lehorgonyzási zónában a feszítőbetét megcsúszik, ezért a kémiai adhéziót felszakadtnak tekintjük, értéke a vizsgált szakaszon végig zérus. Míg kicsi megcsúszások esetén az erőátadási zóna belső környezetében lehetséges, hogy nem mindenhol szakad fel az adhéziós kötés, kísérleti eredmények azt mutatják, hogy az adhézió általában kicsi megcsúszások esetén is felszakad, illetve nagy bizonyossággal állítható, hogy a lehorgonyzási zónában az adhézió hatása minden esetben elhanyagolható. [6]

Feszítőerő ráengedése után a hatásos feszítési feszültség zónájában megmarad az adhézió. Mivel a feszítőbetét geometriai kialakítása nem változik, a mechanikus tapadást a teljes elem hossza mentén jelenlévőnek tekinthetjük. Ez a mechanizmus csak a lehorgonyzási zónában aktiválódik, ahol a feszítőbetét feszültségváltozása miatt erre szükség van. A relatív elmozdulás ebben a zónában a már említett módon meg tudja növelni a mechanikus tapadás okozta ellenállás nagyságát, ezt már hajlított gerenda teszteken is bebizonyították. [6]

A Hoyer hatás hozzájárulásának az eloszlását most a 6-os ábra lineárisnak feltételezi, de ahogy már láttuk, a valóságban ez nem így van. A zavartalan zónában ez a hatás nincsen jelen. A súrlódásból származó ellenállást szintén lineárisnak feltételezzük, mert a feszültségeloszlást is lineárisnak feltételezzük, ez a mechanizmus pedig a feszültség változásával arányos.

Fontos megjegyezni, hogy az adhézió és a mechanikus tapadás potenciálja a lehorgonyzási zónák között megvan, azaz ahol a feszítési feszültség konstans, és nincs a tapadási ellenállás igénybe véve. Ez az 5-ös ábrán van szaggatott vonalakkal jelölve. Ez amiatt van, hogy adhéziós kötések, és a geometria miatt jelenlévő mechanikus tapadás a terheléstől függetlenül jelen van. Ez például hajlított gerendakísérleteknél, vagy kihúzókérdéseknél vizsgálható.

Terhelés hatására az adhézió itt is felszakad, a kapcsolat tönkremenetele progresszívan következik be. [7] Az 5. ábrán láthatóan ezzel párhuzamosan a betét hossza mentén a mechanikus tapadás, illetve a súrlódás megnő a megcsúszás függvényében, ezek fogják biztosítani az ellenállást. A kezdeti kihúzó erőt azonban csak az adhézió és a mechanikus tapadás akadályozza.

Mennyiségi értékelése a tapadási feszültségeknek terheletlen elemeknél hasznos lehet annak megértésében, hogy az egyes mechanizmusok milyen mértékben járulnak hozzá a teljes tapadási szilárdsághoz. Meg kell még jegyezni, hogy a mechanizmusok hozzájárulásának aránya változik a feszítőbetétben lévő feszültség változtatásával, illetve a kísérlet közbeni megcsúszás nagyságával. A tapadási szilárdság tehát a relatív elmozdulás függvényében értelmezendő, különböző tapadási szilárdságokat fogunk kapni különböző kísérleteknél.

1.4 A tapadást befolyásoló tulajdonságok

Az adhéziót a beton összetétele és az acél felületének érdessége, illetve a szilárdulási körülmények befolyásolják. A súrlódást elsősorban a felületre merőleges nyomófeszültség, és a súrlódási együttható befolyásolja, az utóbbi a két súrlódó felület érdességétől függ.

Tartószerkezeti célokra használt nem sima felületű acélbetétek esetén a mechanikus tapadás a domináns a súrlódással és az adhézióval szemben. A mechanikai tapadás mértékét sok paraméter befolyásolja, a legjelentősebbek [26]:

- az acélbetét felületi kialakítása (bordázat, rovátkolás, sodrás tulajdonságai)
- az acélbetét anyagi paraméterei
- a beton tulajdonságai – összetétele és szilárdsági paraméterei
- a tapadás környezetében a beton feszültségállapota (a felületre merőleges nyomófeszültség, és a környező vasalás mértéke)
- a terhelés jellege (terhelési sebesség, tartós terhelés aránya, ismétlődő terhelés, váltakozó előjelű terhelés)

1.5 A vizsgált betétek felületi tulajdonságai

Három alapvetően különböző tulajdonságú betétet vizsgáltam:

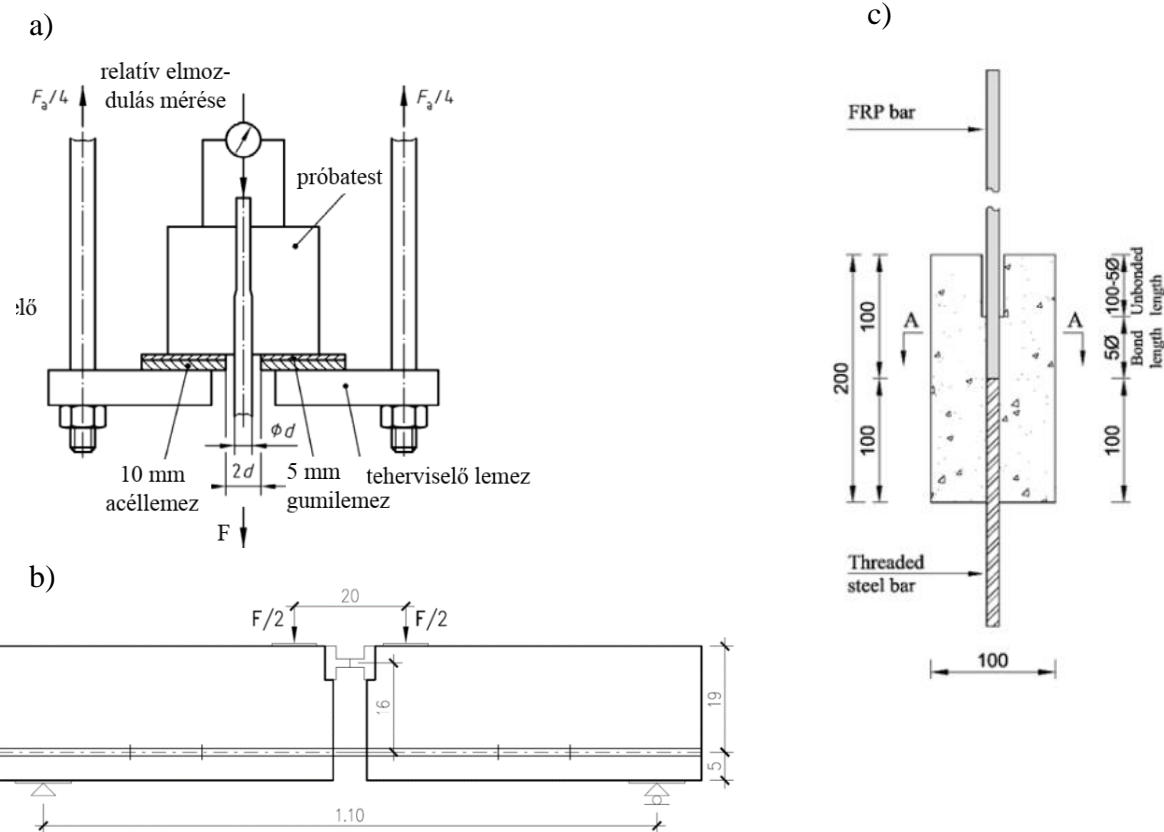
- feszítetlen bordázott acélbetétet,
- feszített sima felületű huzalt, és
- héteres feszítópásmát (megfeszítetlen állapotban)

Ezek közül elsődlegesen a feszítópásmák viselkedésének a mélyebb megértése a cél. A sima felületű huzal esetén csak az adhézió és a súrlódás hatása van jelen, a mechanikus tapadás nem játszik szerepet, ezáltal megfelelő alapul tud szolgálni a többi kísérlethez.

Bordázott acélbetét esetén a mechanikus tapadást a bordázat kialakítása okozza, míg pásmák esetén a sodort geometria következménye. Mindkét esetben gátolva van a betét egyszerű kihúzódása, a környező betonnak közvetlenül nekitámaszkodandó, ami jelentős ellenállás növekményt okoz.

A három betét közötti különbséget tehát döntően a mechanikus tapadás okozza, ami a felületkialakítás következménye. A bordázott acélbetét vizsgálatára azért van szükség, mert a viselkedésének leírására már jól használható analitikus modellek állnak rendelkezésre. Ezeket számtalan kísérlet elvégzése segítségével validálták, egyes modellkódok (pl.: CEB-FIP) ezeket tartalmazzák. Az így kapott eredményekkel jobban megérthető a pásmák esetén tapasztalható mechanikus tapadás jelensége.

1.6 A tapadást vizsgáló kísérletek elrendezései



7. ábra: Tapadást vizsgáló kísérletek: a) Kihúzó kísérlet, b) Gerendakísérlet c) Közvetlen feszültség alatti kihúzó kísérlet

A 7. ábrán néhány jellemző kísérleti elrendezés látható. Habár mindegyik a tapadást vizsgálja, a kihúzó terhelést máshogyan adják rá az elemre, ezáltal különböző tapadási körülményeket teremtenek.

Az a) esetben, kockán elvégzett standard kihúzó kísérletnél a vizsgált betét húzzuk, miközben a terhelés felőli oldalon a beton próbatétel alátámasztjuk. Így a vizsgálat során a beton alapvetően nyomott lesz. Ez a nyomófeszültség nagyobb, mint egy valós gerenda környezetében, és ez ellenállás növekményt okoz. A betét nem teljes hosszon, hanem a névleges átmérő ötszörösének megfelelő szakaszon van beágyazva, biztosítva a kapcsolat tönkremenetelét (így nem a betét folyik meg vagy a beton hasad fel).

A b) esetben, gerendán elvégzett hajlítóvizsgálatnál a képnek megfelelően az elemet terheljük, miközben a hajlításnak a fent elhelyezett csuklóban, és lent átmenő betétben ébredő erő alkotta erópárral áll ellen. A két oldalon közepén a névleges átmérő tízszeresének megfelelő hosszon van beágyazva a betét. A feszültségviszonyok a beágyazás környezetében így jól szimulálják egy való gerenda közbenső keresztmetszetét.

A c) jelű képen Sólyom Sándor [24] doktori értekezésében vizsgált egyik kísérleti elrendezés látható. Itt a megtámasztást a próbatestbe beágyazott csavarmentes acélbetét megfogása adja, az adott hosszon beágyazott betétet pedig húzzuk, ezáltal a beton próbatest alapvetően húzott lesz, ami jobban megfelel a valós tapadási körülményeknek.

Természetesen más megoldások is léteznek, most csak a néhány jellemző példát mutattam be.

1.7 A dolgozat célja, felépítése

A TDK dolgozatomban az ismertetett három különböző betét tapadási viselkedését hasonlítottam össze numerikus eszközökkel, azonos tapadási körülmények estén, egy közbenső gerendaszakaszon, feszítetlen állapotban, annak érdekében, hogy a mechanikus tapadás mechanizmusát jobban megértsük.

A zavartalan zóna vizsgálatának érdekében az alkalmazott kísérleti elrendezés a standard gerenda kísérletnek felel meg, numerikusan modelleztem a tönkremeneteli folyamatot. Fontos hangsúlyozni, hogy a betéteket a kísérleti algoritmusnak megfelelően, azaz feszítetlen állapotban vizsgáltam, mert a jelen dolgozat elsődleges célja az volt, hogy a mechanikus tapadás jelenségét vizsgáljam. A körülmények tehát nem egyeznek meg teljesen egy előfeszített gerenda közbenső szakaszával. A gyakorlatban viszont bonyolult feszített próbatesteket létrehozni, ezért, míg numerikusan nem okozna különösebb nehézséget, feszítetlen modelleket készítettem, így a rendelkezésre álló kísérleti tapasztalatokkal összeegyeztethető eredményeket kaptam.

Mindegyik betéthez kétféle tönkremeneteli módot vizsgáltam, az egyik, amikor a beágyazási hossza a kísérletben előírt, névleges átmérő tízszerese, ekkor a kapcsolat tönkremenetelét vártam, a másik pedig, amikor a próbatest teljese hosszában beágyaztam az egyes betéteket, ezzel elérve, hogy a kapcsolat helyett a betét menjen tönkre, azaz az acél folyásával érjen véget a kísérlet.

A tapadást befolyásoló sok paraméter közül tehát a betétek geometriai kialakításának hatását vizsgáltam. A sima felületű huzal esetén csak az adhézió és a súrlódás hatása van jelen, a mechanikus tapadás nem játszik szerepet, ezáltal megfelelő alapul tud szolgálni a többi kísérlethez. Mivel numerikusan az adhézió és a súrlódás nagysága a definiált kontakt felületek anyagának tulajdonságaitól függ, ezért ezeket az adatokat rendelkezésre álló kísérleti eredmények segítségével határoztam meg, majd az összes modellben ugyan ezekkel a paraméterekkel operáltam (a 4. pontban lesz részletesebben kifejtve).

Annak érdekében, hogy az említett mechanikus tapadást vizsgálni tudjam, célom volt a vizsgált betétek minél pontosabb geometriai modellezése, majd a kiértékelés alapját adó tapadási feszültség-relatív megcsúszás diagramok előállítása, a jelenség minél szemléletesebb megjelenítése.

További célom volt a szakirodalomban rendelkezésre álló [2] analitikus függvények összehasonlítása a numerikus eredményekkel.

A második fejezetben be fogom mutatni az előfeszített szerkezeteket, azok felhasználási lehetőségeit, és a gyakorlatban elterjedt feszítőbetét típusokat. A harmadik fejezet a vizsgálat kiinduló pontjait mutatja be, a szakirodalomban rendelkezésre álló információkat taglalja. Az itt bemutatott analitikus módszerek lesznek az elméleti összehasonlítás alapjai.

Ezt követően a numerikus modellek előállításáról lesz szó. Ehhez az ATENA nevű, vasbetonszerkezetekhez kifejlesztett nemlineáris végeselemes szoftvert, és a vele kompatibilis GiD szerkesztő szoftvert alkalmaztam. A modelleket GiD-ben készítettem el, majd az ATENA-ban nemlineáris végeselemes analízist futtattam. A kiértékeléshez mindkét programot igénybe vettem, az ATENA számszerű adatok kivételére, diagramok előállítására alkalmasabb, míg a GiD-nek a 3D-s adatmegjelenítésben vannak számottevő előnyei.

Az ötödik fejezetben a végeselemes modellekből kapott eredményeket dolgozom fel. A két terhelési módot, illetve a három betétet hasonlítottam össze, mind egymással, mind az analitikus modellekkel.

Az utolsó fejezetben végezetül a levont következtetéseket és az elért eredményeket foglaltam össze.

2. Előfeszített szerkezetek, feszítőbetétek

Feszítésnek nevezzük azt, amikor belső sajátfeszültségi állapotot hozunk létre egy elemben (például gerendában) annak érdekében, hogy ellensúlyozzuk a külső terhekből származó feszültségeket. Gyakorlatban legelterjedtebb a használata vasbetonszerkezeteknél, a betonra jellemző alacsony húzószilárdság okozta hátrányokat a feszítéssel bevitt sajátfeszültségekkel lehetséges ellensúlyozni.

A feszítőbetétek számának, vonalvezetésének, illetve a feszítés mértékének megtervezésével adott teherre optimalizálható a szerkezet, jobban kihasználva a betonra jellemző nagy nyomószilárdságot. Feszített vasbeton hidak esetén például az Eurocode előírja, hogy üzemi teher esetén a keresztmetszet a szerkezet teljes hosszában nyomófeszültség alatt legyen, aminek következtében az esetlegesen korábban kialakult repedések mindenhol záródnak. Ez a szerkezet élettartamára pozitívan hat, csökkenti a korrózió veszélyét.

Az feszítési technológiákat több szempont alapján is lehet csoportosítani, például a betonozás ideje alapján. Így megkülönböztethetünk utó- és előfeszített szerkezeteket. Utófeszítés esetén a feszítőbetétek a beton megszilárdulását (adott szilárdsági osztály elérését) követően kerülnek elhelyezésre és megfeszítésre. A betétek vonalvezetését a betonozáskor elhelyezett csövek, illetve iránytörő szerelvények segítségével lehet biztosítani. Az erőátadást az erre a célra kifejlesztett lehorgonyzófejek alkalmazásával lehet elérni, ez a gyártó utófeszítési rendszerének része.

Előfeszített szerkezetek esetén a betéteket a betonozást megelőzően feszítjük meg, így azok akadálytalanul meg tudnak nyúlni. Ezt külön tartószerkezet, úgynevezett feszítőpad segítségével lehet megtenni. Ezután elhelyezhető a lágyvasalási armatúra, majd a beton bedolgozható. Miután elérte a friss beton a szükséges szilárdságot, a feszítőerőt ráengedjük az elemre, a betétek oldásával. Ez történhet például lángvágással, ekkor a feszítőerőt hirtelen engedjük rá az elemre, vagy egyenletesen, például hidraulikus sajttal. Ekkor a feszítőbetét megpróbál visszatérni az eredeti alakjába. Az utófeszített szerkezetekkel ellentétben itt nincsen semmilyen lehorgonyzó elem, az erőátadást a feszítőbetét és a beton közötti kölcsönhatás, a tapadás biztosítja.

A legelterjedtebb előfeszített szerkezeti elem az előregyártott előfeszített vasbeton gerenda. Ilyen gerendák egyaránt alkalmazhatóak mind híd, mind magasépítési szerkezeteknél.



8. ábra: Sűrűbordás vasbeton híd építés közben



9. ábra: Üreges, előfeszített födempalló beépítés közben

Erre látható példa a 8. ábrán, sűrűbordás kialakítású híd építés közben. Magyarországon számtalan autópálya, illetve ártéri híd épült meg ilyen módon. Magasépítésben tető- és födémgerendaként használják jellemzően. Természetesen nemcsak gerendákat lehet így készíteni, az 9. ábra üreges, előfeszített födempallóra mutat példát.

Előregyártott szerkezeti elemek alkalmazása több előnnyel is jár, többek között csökkenti az élők munkaidőt, a kiviteli időt, valamint az építési hulladékmennyiséget. Alkalmazásuk egyre elterjedtebb, fejlesztésük folyamatos.

Előfeszített előregyártott vasbeton szerkezetek esetén a feszítőbetétek és a beton együttdolgozása, a kapcsolat minősége kulcskérdés. A tapadási mechanizmusok felelősek a tartóvégen történő feszítőerő átadásáért, illetve biztosítják a beton és a feszítőbetétek együttdolgozását, a terhek közös viselését. A nem megfelelő tapadás repedésekhez, a szerkezet teherbírásának csökkenéséhez, végső soron leszakadáshoz, összeomláshoz vezethet. Ezért a megfelelően biztonságos tervezéshez elengedhetetlen, hogy a szerkezet tapadási teherbírását minél pontosabban ismerjük.

A tapadási teljesítményt sok minden befolyásolja, alapvetően a beton tulajdonságai, és a feszítőbetét tulajdonságai. A feszítőbetétek általában nagyszilárdságú acélból készülnek (a szakítószilárdság karakterisztikus értéke ~ 1570-1860 MPa). A legkisebb egység a huzal, ezek szokásos átmérője 4-7mm (11. ábra), de akár 10-11mm átmérőben is gyártanak.

Types of
PC Wire

www.onestockhome.com

12. ábra: Különböző felületkialakítású feszítőhuzalok



11. ábra: Járatos feszítőhuzal átmérők



10. ábra: Feszítőpázmák

Annak érdekében, hogy javítsák a betét-beton közötti tapadást, különböző felületkialakítású huzalokat gyártanak, ez látható a 12. ábrán. Balról jobbra látható bordázott/mintával ellátott (chevron), gyűrött/hullámos (crimped), benyomott/rovátkolt (indented) és sima (plain) felületű huzal. Használatban a legelterjedtebb a sima és a rovátkolt felületű huzalok.

Ezekből a huzalokból aztán pászmákat lehet sodorni, általában 7 huzalból, úgynevezett héteres pászmákat lehet készíteni. Járatos névleges külső átmérői: 12.5, 12.9, 15.4, 15.7mm. Erre az 10. ábra mutat példát. A pászmákhoz használt huzalok jellemzően sima felületűek, mert a pászma spirális geometriája önmagában is kedvezően befolyásolja a tapadást, így általában nincsen szükség felületkezeléssel javítani a kapcsolatot. Amennyiben mégis jobb tapadásra van szükség, található forgalomban rovátkolt huzalokból sodort pászma is. Pászmákat jellemzően gerendák, vagy nagyobb födempallók, míg huzalokat kisebb födempallók, vasúti betonajlak, illetve vasbeton csövek feszítéséhez alkalmaznak.

A TDK dolgozat az említett szerkezetekhez használt feszítőbetétek tapadási vizsgálatára van kihegyezve. A következő fejezetben bemutatom, hogy ennek mi az elméleti háttere.

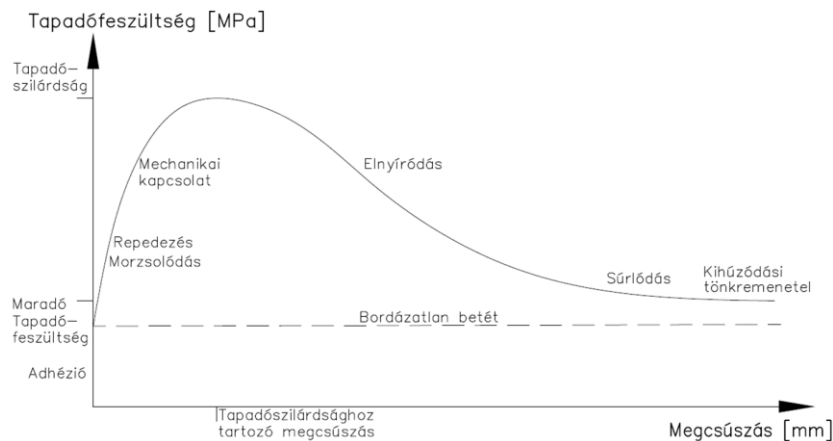
3. Irodalomkutatás

3.1 Analitikus megoldások

Ebben az alfejezetben arról lesz szó, hogy milyen analitikus modellek születtek acél betétek viselkedésének leírására. Mivel a dolgozatban a zavartalan zóna vizsgálatával foglalkozom, ezért a felsorolt modellek is ilyenek.

A tapadási viselkedést általában a tapadási feszültség-relatív megcsúszás diagrammal írják le. A tapadási feszültség a nyírófeszültség a betét és a beton felülete között. Ezt a diagramot kísérleti úton az úgynevezett kihúzó kísérletekkel szokták meghatározni. [8,9-11]. A legtöbb esetben viszonylag rövid beágyazási hosszal rendelkezik a próbatest (~10*átmérő), így a kísérlet a kapcsolat tönkremenetelével ér véget. Közelítésként a tapadási feszültség eloszlását a hossz mentén konstansnak szokták feltételezni. Ez természetesen közelítés, a valóságban ennél bonyolultabb az összefüggés.

Egy általános tapadási feszültség-megcsúszás diagram látható a 13. ábrán. A diagram két fő részre osztható, a tapadási szilárdság elérése előtti és utáni szakaszra. Amíg nem bomlik fel az adhéziós kapcsolat nincsen megcsúszás, ezért a görbe nem az origóban metszi a függőleges tengelyt, hanem az adhézió értékénél. Ahogy a kémiai kapcsolat felbomlik belső mikro-repedések alakulnak ki, és a mechanikus tapadás mechanizmusa lesz a domináns, míg a súrlódás is jelen van, kisebb jelentőséggel. Feltételezve, hogy a beton nem ment tönkre (hasadt szét), a tapadási szilárdság elérése után a növekvő megcsúszás közben a súrlódás lesz a maradó mechanizmus, ami hozzájárul az ellenálláshoz. (A Hoyer hatás itt most nem játszik szerepet, mert a betét nincsen feszítve). Sima felületű betét esetén a szaggatott vonal mutatja a viselkedést, az ellenállást lényegében csak az adhézió és a súrlódás adja.



13. ábra: Általános tapadó-feszültség-relatív megcsúszás diagram jellemző pontjai

Az analitikus megoldások során a tapadási feszültség és a megcsúszás kapcsolatára próbálnak meg összefüggéseket felírni, törekedve a valós viselkedés minél pontosabb leírására.

A megalkotott modellek a különböző konstansok kalibrálásával többféle betétre is alkalmazhatóak lehetnek, ugyanakkor vannak alapvető különbségek is. Például különböző alternatív anyagokból készült (üvegszál, szénszál stb.) betétek nem képlékenyednek, ezért az őket leíró modelleket módosítani kell. [12]

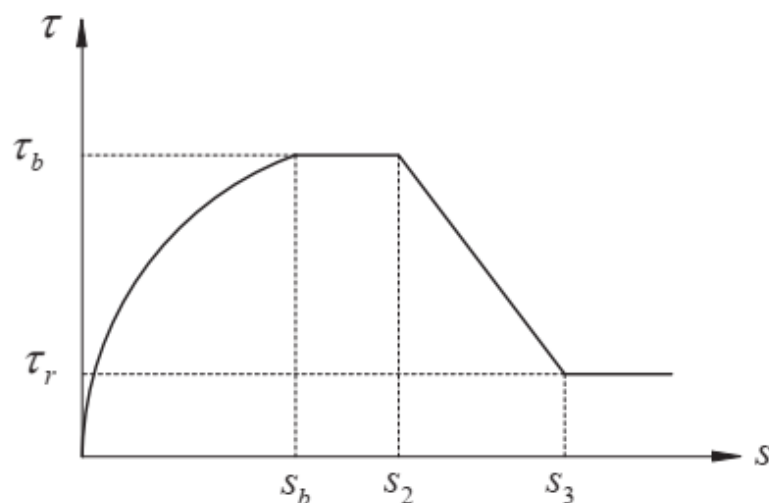
A tapadási feszültség és a megcsúszás közötti kapcsolatot: $\tau=\tau(s)$, az alábbi másodrendű differenciálegyenlettel lehet felírni:

$$\frac{d^2s}{dx^2} - \frac{\pi D}{E_s A_s} \tau(s) = 0$$

ahol D a betét átmérője, A_s a betét keresztmetszeti területe, E_s a betét rugalmassági modulusa, $s(x)$ a relatív elmozdulás a betét és a beton felülete között, x abcisszával. Ennek az egyenletnek a felhasználásával több fontos jelenség is leírható, mint például: a lehorgonyzódási hossz alakulása vagy a repedéstágasság, illetve a repedések távolságának alakulása. Ezek a problémák a differenciálegyenlet kerületi feltételeinek felírásával definiálhatóak, és megoldhatóak. [13]

BPE modell

A BPE modellt Eligehausen (1983) fejlesztette ki bordázott acélbetétekre [14]. Az idealizált tapadási-feszültség-megcsúszás diagram a 14. ábrán látható. Az acélból készült betét képlékeny szakaszát konstansnak, a tapadási szilárdság elérése utáni szakaszt lineárisnak, és a súrlódás okozta maradó ellenállás szakaszát is konstansnak veszi a modell, egyszerűsítve a viselkedést.



14. ábra: BPE modell acél betétekre

A diagram így összesen négy szakaszra osztható, ezek egyenletei:

- emelkedő szakasz ($0 \leq s \leq s_b$) $\tau = \tau_b \left(\frac{s}{s_b}\right)^\alpha$
- képlékeny plató ($s_b < s \leq s_2$) $\tau = \tau_b$
- ereszkedő szakasz ($s_2 < s \leq s_3$) $\tau = \tau_b - (\tau_b - \tau_r) \frac{s-s_2}{s_3-s_2}$
- maradó szakasz ($s_3 < s$) $\tau = \tau_r$

Ahol τ a tapadási feszültség, s a megcsúszás, τ_b a tapadási szilárdság, s_b pedig a hozzá tartozó megcsúszás. A képlékenyedés vége s_2 megcsúszásnál van, a maradó ellenállás értékét pedig s_3 relatív elmozdulásnál éri el a diagram. A meghatározandó konstans érték α , amit kísérletek alapján, függvényillesztéssel lehet meghatározni. Továbbá a tapadási szilárdságot (τ_b) és a maradó ellenállást (τ_r) is meg kell határozni.

A modellben a felületkialakítás hatása figyelembe van véve. [15] Ahhoz, hogy fizikailag értelmes eredményt kapjunk, α nem lehet nagyobb mint 1. Bordázott betonacélok esetére általános megközelítésként $\alpha=0.4$ -et lehet felvenni. [16]. A CEB-FIP 2010-es modellkód is ezt használja. Ez az ATENA-ban is elérhető, amennyiben vonalelemként modellezzük a betéteket.

A modell pászmákra történő átültetésével már többen próbálkoztak. [17,18] A pászmákhoz használt standard kihúzókérdések (STSB [19]) kapott eredmények azt mutatták, hogy α 0.12 és 0.21 közötti értéket vehet fel, és felírható:

$$\alpha = \frac{\ln(\tau_{0.25}/\tau_{2.5})}{\ln(s_{0.25}/s_{2.5})}$$

$$\alpha = \frac{\ln(P_{0.25}/P_{2.5})}{\ln(0.1)}$$

ahol $\tau_{0.25}$ és $\tau_{2.5}$ 0.25 és 2.5 mm-es tartó végén mért megcsúszáshoz tartozó átlagos tapadási feszültség értékek, $P_{0.25}$ és $P_{2.5}$ pedig az ezekhez tartozó kihúzóerő értéke. Ez azért igaz, mert a kihúzó erő és az átlagos tapadási feszültség egyenesen arányos egymással, és $0.25\text{mm}/2.5\text{mm}=0.1$.

Tapadási szilárdság szabvány szerint

Az Eurocode szerint bordázott acélbetétek tapadási szilárdsága az alábbi képlettel számítható (EN 1992-1-1):

$$f_{bd} = 2.25\eta_1\eta_2f_{ctd}$$

Ahol:

- f_{ctd} a beton húzási szilárdságának tervezési értéke
- η_1 a tapadási körülményeket és a betét elhelyezkedését jellemzi
 - 1.0, „jó” körülmények esetén, és
 - 0.7 minden más esetben
- η_2 a betét átmérőjét veszi figyelembe
 - 1.0, ha $\emptyset \leq 32mm$
 - $(132 - \emptyset)/100$, ha $\emptyset > 32mm$

Mint látható ez a számítási módszer kissé elnagyolt, nem veszi figyelembe az acélbetét bordázatának típusát, valamint a tapadási körülményeket is csak két, nehezen definiálható kategóriába sorolja. Továbbá a beton tulajdonságai közül csak a húzási szilárdságát veszi figyelembe, míg a beton több paramétere is befolyásolja a tapadási szilárdságot. A bemutatott modell kód lényegesen részletesebb, de a gyakorlat szempontjából a szabvány által megadott képlet sok esetben kielégítően pontos lehet.

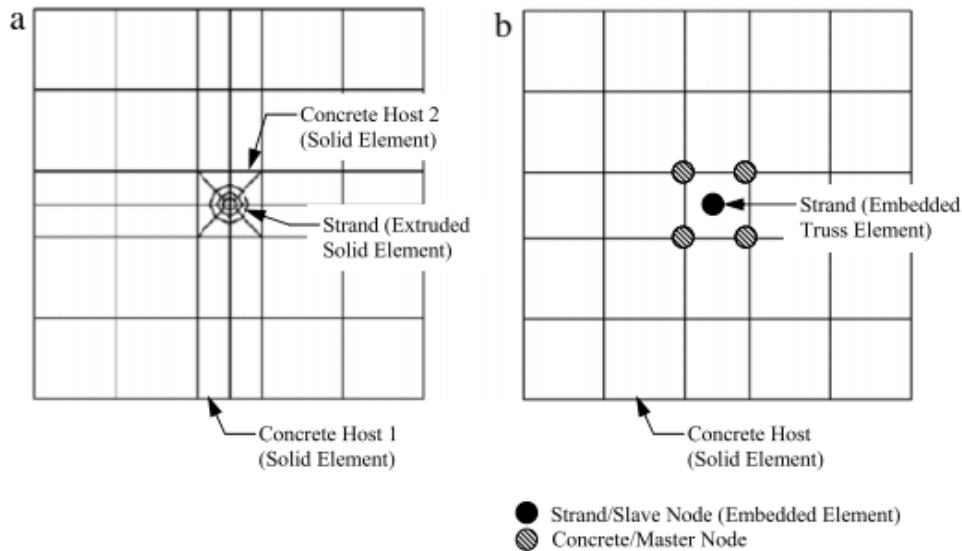
A vizsgálatok alapját tehát a mért megcsúszás, és a kihúzó erőből számolt átlagos tapadási feszültség jelenti. Így nem veszi figyelembe az elem belsejében a tapadási feszültség eloszlását. Amennyiben az eredményeket vége-selemes modellekből nyerjük, lehetőségünk van olyan modellt létrehozni, amiből ezek az adatok is kinyerhetőek. Ez segítheti a megértést és vizsgálhatóvá teszi az egyszerűsítés okozta eltérést.

3.2 Numerikus modellek készítése

Vége-selemes modell készítésekor mindig fontos kérdés az alkalmazott modellezési szint. A vizsgált tapadási probléma csak hárdomdimenzióban írható le, kétdimenziós esetben nem lehet megfelelően modellezni a jelenséget. A betont tehát az alkalmazott szoftvertől függetlenül térfogatelemekkel érdemes modellezni.

Amennyiben a próbatest tartalmaz a vizsgált betéteken kívül lágyvasalást, azt a leghatékonyabban vonalelemek formájában lehet definiálni a modellben. A betonacél és a beton közötti kapcsolatot ilyenkor a szoftverben található függvények írják le, ezek jó egyezést mutatnak a valósággal [20].

A vizsgált betét modellezésekor két lehetőség közül választhatunk, az extrudálásos és a beágyazásos technika, ezt mutatja a 15. ábra [21].



15. ábra: A betét kapcsolatának modellezési lehetőségei: a) extrudálás, b) beágyazás

Extrudálásos technika

Az extrudálásos, vagy kihúzásos technika azon alapul, hogy a betét és a beton felületi érintkezését a programba bevitt formulákkal vesszük figyelembe. Ebben az esetben a betétet térfogat elemekből építjük fel és kihúzzuk. A betét és a beton felülete közvetlenül érintkezik. Különbféle érintkezési paramétereket kell beállítani, amik figyelembe veszik a két anyag közötti súrlódást, megcsúszást, nyomásátadást és felületek összenyomódását.

Ahhoz, hogy a kihúzott modell kontaktfelületei megfelelő pontossággal szimulálják a kapcsolatot több almodellre van szükség. A betét és a beton között nyíró-és normálfeszültségeknek kell tudni átadódniuk, vagyis a kapcsolati modell két részre szedhető: az érintő modellre, és a normálfeszültségi modellre.

Az érintőirányú viselkedést alapvetően a súrlódási együttható és a tangenciális merevség határozza meg. A tapadási kísérlet során a vizsgált betét megcsúszik. Ez numerikusan kétféleképp lehetséges: (1) a két felületet úgy kötjük össze, hogy a megcsúszás megengedett, ekkor a relatív elmozdulás nem okozza a kapcsolat tönkremenetelét, úgynevezett mozgó kontakt elemekkel.

(2) a kapcsolat a beton felületéhez van kötve, és megcsúszás csak akkor következhet be, amikor az anyagmodellben definiált feszültséget (adhéziós kötés) túllépi a terhelés okozta feszültség. Utána a két felület közötti kölcsönhatás a modellben definiált függvények szerint alakul.

Beágyazásos technika

A beágyazásos technika egy nagyon hasznos végelelemes módszer, ami lehetővé teszi egy vagy több elem beágyazását egy fogadó elembe. A legfontosabb előnye a technikának, hogy nem szükséges a kontakt felszínnek modellezése, aminek következtében rengeteg drága numerikus iterációt tudunk megspórolni. A beágyazott elem geometriailag a fogadó elembe kell korlátozva legyen. A szabadságfokuktól megfosztott csomópontok lesznek a beágyazott csomópontok, ezek hozzá lesznek kapcsolva a fogadó csomópontokhoz. A csomópontok közötti kényszert meg kell határozni. A módszer legfontosabb előnye a kisebb számítógépes kapacitás igénye. Hátránya, hogy ezzel a módszerrel nehezebb leírni és megfelelően beállítani a felületek kölcsönhatását. Bizonyos esetekben azonban nagyon hasznos lehet.

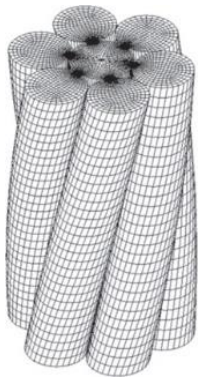
A betét geometriai modellezése

Amennyiben a kihúzásos technikát használjuk felmerül a vizsgált betét pontos geometriai modellezésének igénye. Ez sok nehézséget okozhat, főleg, ha összetett geometriájú betétet vizsgálunk, például egy héteres pászmát.

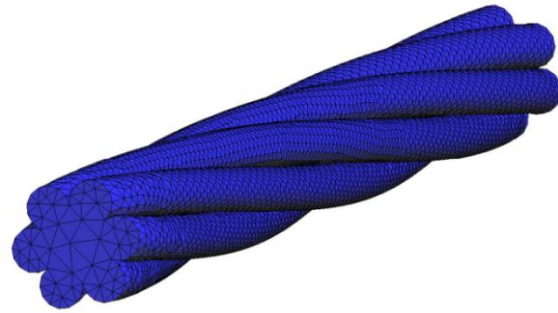
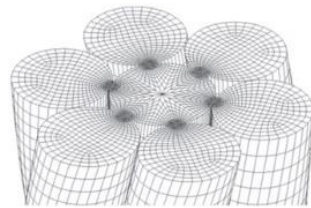
A legegyszerűbb megoldás, ha a pászma keresztmetszeti kontúrjának megrajzolása után az elemet tengelyirányban elforgatva kihúzzuk [22]. Ilyenkor a pászma egy tömör test lesz, ezt szemlélteti a 16. ábra. Ebben az esetben a beton és a pászma felületének, a pászma geometriájának pontossága a felvett végelelemes hálónak a sűrűségétől fog függeni. Így a kontaktfelületet meglehetősen precízen lehet megadni, azonban mivel a pászmát tömör testként modelleztük kérdések merülnek fel. Az egyik, hogy modellben lévő keresztmetszeti terület nagyobbra adódhat, mint a valóságban, mivel a huzalok közti réseket is acélként vesszük figyelembe. Az íveket sokszögekkel közelítjük, ennek következtében vizsgált keresztmetszeti terület a valóshoz képest csökken, azaz ez ellenkező irányban hat. Ennek azonban megfelelően sűrű felosztás esetén elhanyagolható a hatása. A huzalok közti rések kicsik, de nem annyira, hogy ne legyen jelentőségük. Így ezzel mindenképpen számolni kell, ha ezt a modellezést alkalmazzuk, ugyanis fontos, hogy a modellezett felület és a modellezett keresztmetszeti terület aránya közel legyen a valóshoz.

Továbbá, ha a huzalokat nem egyenként modellezzük, akkor a betét húzás hatására sem teljesen úgy viselkedik, mint egy héteres pászma. Nyúlás közben a huzalok egymásnak feszülnek. Ennek a sodort geometria az oka, a pászma keresztmetszetei terhelés hatására elfordulnak, és a névleges átmerő mind emiatt, mind a Poisson-hatás miatt csökken.

Tömör esetben azonban sem a keresztirányú alakváltozás, sem az elfordulás mértéke nem egyezik meg a valósággal, de hogy ez mennyire okoz nagy hibát vizsgálat nélkül nehezen megmondható. A keresztirányú alakváltozás korrigálható, a modellben megadott Poisson tényezővel, amennyiben állnak rendelkezésünkre kísérletek. Ezek mindenképpen olyan problémák, amivel foglalkozni kell, ugyanis befolyásolják a tapadási feszültség-megcsúszás közötti összefüggést.



17. ábra: Pászma modellezése huzalonként



16. ábra: Pászma modellezése a külső felülettel

Az említett problémák kiküszöbölhetőek, ha a 17. ábrán látható módon a pászmát huzalonként modellezzük [23]. Ezt nagyobb munka előállítani, ugyanis nemcsak a pászma-beton kapcsolatát kell modellezni, hanem a huzal-huzal kapcsolatát is. Éppen ezért ami ebben az esetben kérdésessé válik, az a huzalok kölcsönhatása. Felvetődik a kérdés, hogy mekkora felületen érintkeznek egymással a huzalok, illetve, hogy az érintkezési felület terhelés hatására időben hogyan változik. Továbbá a kontaktfelület paramétereit is meg kell határozni. Ezek miatt nem biztos, hogy előnyösebb huzalonként modellezni ebben az esetben, hiszen a vizsgálat elsősorban a betét és a beton együttdolgozásáról szól. A módszer előnye tehát a pontosabb, megbízhatóbb viselkedés, hátránya viszont, hogy több munka, és nagyobb számítási kapacitást is igényel. A 4. fejezetben mérlegelni fogom, hogy melyik módszert érdemes alkalmazni.

További modellezési kérdések

Miután a fenti aspektusokat figyelembe véve elkészült a modell geometriai értelemben, hátra van még a terhek, megtámasztások, végeelemes háló és az analízis elvégzésének kérdése.

A terhek és megtámasztások elsősorban a választott kísérlettől függenek. Érdemes olyan modellt készíteni, ami megfelel valamelyik standard kísérleti elrendezésnek, így még ha nem is készül valós kísérlet a végeelemes modellel együtt, az eredményeket más kísérletek eredményeinek segítségével kontextusba tudjuk helyezni.

A végeselemes háló generálásakor körültekintően kell eljárni, ugyanis ez alapvetően meghatározza a modell lefutási idejét és pontosságát, azaz a hatékonyságot. A hálót általában ott érdemes sűrűbbre venni, ahol a valami változás történik vagy geometriában, vagy a terhelésben. Erről bővebben a 4. fejezetben lesz szó.

Az ilyen jellegű vizsgálatok a pontosság érdekében nemlineáris statikus 3D-s analízissel készülnek. A nemlineáris vizsgálat pontosabb eredménnyel tud szolgálni, mint a lineáris analízis, viszont ennek az ára a jelentősen megnövekedett számítási igény.

Nemlineáris analízis során a számítást tetszőleges számú lépésre lehet bontani, minden lépéshez tartoznak eredmények. A nemlinearitásnak alapvetően három fajtája van: a geometriai, anyagi és a támaszok, kapcsolatok nemlinearitása. Ilyen esetben a merevségi mátrix nem lesz konstans a vizsgálat során. Lineáris esethez képest nagyobb odafigyelésre van szükség az eredmények kiértékelésekor, nem megfelelő paraméterek megadása esetén könnyen hibába ütközhetünk.

A geometriai nemlinearitás azt veszi figyelembe, hogy a teher átadása közben a geometria változik, a terhelés hatása a szerkezetre nem konstans, például növekvő külpontosságú erő esetén. Az analízis lépésenként történik, minden lépésnél frissül a modell geometriája, az egyensúly mindig teljesül. Ez tapadási vizsgálatok esetén kulcsfontosságú, hiszen a terhelés során kialakuló relatív elmozdulást vizsgáljuk a beton és a betét felülete között. További előnye, hogy a beton repedezettsége is számolható így lépésenként, ami nagymértékben kihat a viselkedésre. A repedésterjedés időbeli követésével láthatjuk a tönkremenetel mechanizmusát, illetve esetleges problémák is kiszűrhetőek vele, amennyiben nem a vártak megfelelő repedésképet kapjuk.

Az anyagi nemlinearitás a végeselemes modellben a megadott anyagmodellnél vehető figyelembe. A fejlettebb végeselemes szoftvereknél lehetőség van nemlineáris anyagmodellek megadására, például rugalmas-képlékeny anyagmodellre, ahol az egyes paraméterek beállíthatóak. Ennek nagy előnye, hogy így nemcsak a pillanatnyi alakváltozást, de az előzményeket is figyelembe tudja venni az analízis, így lehetséges akár ciklikus terhelés hatását is vizsgálni.

A támaszok, illetve kapcsolatok nemlinearitása többféleképpen megnyilvánulhat. Lehet például olyan támaszt definiálni, ami csak egy adott elmozdulás után aktivizálódik, vagy valamilyen tetszőleges nemlineáris rugókarakterisztikát.

További fontos dolog, amire oda kell figyelni a modell készítése közben, az a konvergencia. Több nemlineáris végelelemes szoftver, például az ATENA már képes arra, hogy az analízis futtatása közben láthassuk a konvergencia tényezőket, és akár a már elvégzett lépésekhez tartozó eredményeket is [25]. Egy jól konvergáló modell sokkal gyorsabban képes lefutni, mert egy lépésen belül kevesebb iterációra van szükség ahhoz, hogy a kívánt hibahatáron belül maradjunk. A jobb konvergencia és a gyorsabb analízis eléréséhez tudni kell a kritikus terhelést vagy alakváltozást, és annak megfelelően sűríteni vagy ritkítani az adott helyeken a lépések számát.

4. Numerikus modellek

Összesen hat végelelemes modellt készítettem, ugyanis a 3 betét esetére két beágyazási hosszt vizsgáltam: az első a standard kísérletnek megfelelő, a névleges átmérő tízszeresével egyezik meg, míg a második esetben a próbatest teljes hosszán beágyazott a betét. Erre azért volt szükség, hogy azt az esetet is meg tudjam vizsgálni, amikor a kapcsolat megy tönkre, és a betét még a folyáshatár alatt van (standard kísérlet), és azt az esetet is, amikor nem a kapcsolat megy tönkre, hanem a betét folyik meg.

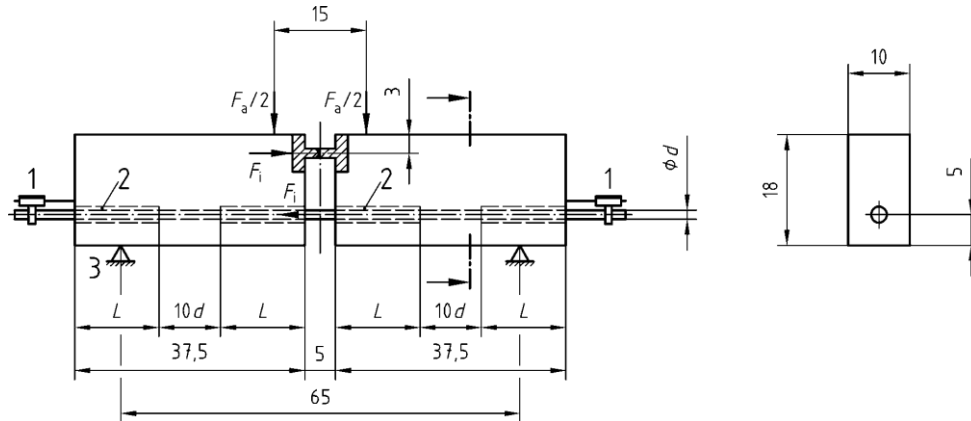
A terhelő erővel a beágyazási hossz menti tapadási feszültség tart ellen, ez a terhelés növekedésével úgy tud növekedni, hogy mobilizálódnak egyre nagyobb szakaszon az egyes tapadási mechanizmusok, azaz relatív megcsúszás következik be. Az első esetben a megcsúszás a teljes beágyazási hosszon végbemegy, a kísérlet a kapcsolat tönkremenetelével fejeződik be. A második esetben a megcsúszás csak egy adott szakaszon következik be, amit a betét megfolyását okozó terhelő erő nagysága határoz meg, ezzel kell egyensúlyban legyen. A tönkremenetel módja jelentős különbséget okoz a tapadási feszültség-relatív megcsúszás diagramokban.

A beton próbatest anyaga és geometriai méretei, valamint a vasalási armatúra mindegyik esetben megegyezik. Továbbá a támaszok és a terhelés módja is azonos. A végelelemes háló, mint látni fogjuk, jelentős szerepet játszott a modellekben, ezt modellenként speciálisan kellett beállítani.

A három különböző betéttípushoz és a kétféle tönkremeneteli módhoz készült összesen hat darab modell. Mivel a huzal vizsgálatához rendelkezésre álló laboratóriumi kísérleti eredmények [26] kocka próbatesten elvégzett kihúzó kísérlethez tartoznak, ezért készült egy hetedik modell is, ami kontaktfelület anyagmodelljének paramétereinek kalibrálásához készült.

A következő fejezetekben az elkészült modelleket mutatom be, és ismertetem, hogy milyen megfontolások mentén születtek a különböző döntések.

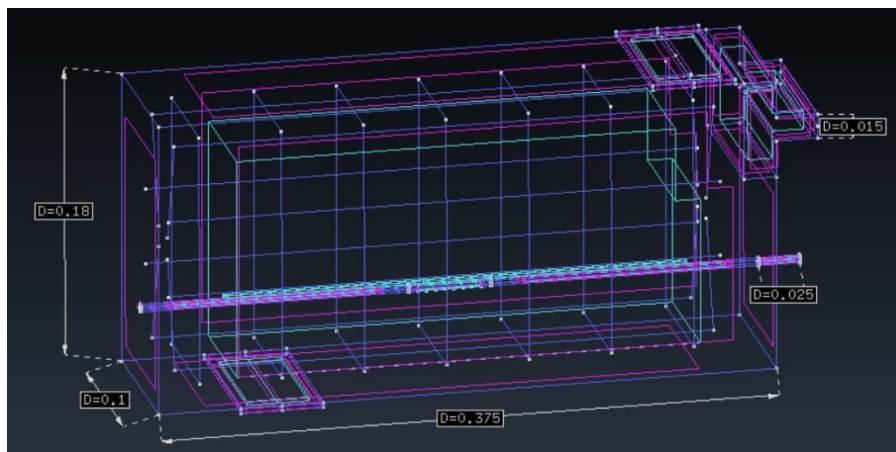
4.1 Geometria



18. ábra: Gerendakísérleti elrendezés

A 18. ábrán látható az MSZ EN 10080 szabvány szerinti elrendezése a gerendakísérletnek 16 mm-nél kisebb átmérőjű betétek vizsgálata esetén. Ennek megfelelően vettem fel a geometriai méreteket, de csak a kísérlet felét modelleztem, kihasználva a szimmetrikus elrendezést. A támaszoknál és a terhelés helyénél elhelyeztem teherátadó lemezeket, hogy elkerüljem a beton lokális tönkremenetelét a külső erőhatásoknál. Huzal esetére ez a 19. ábrán látható módon néz ki.

Huzal esetén 5mm átmérőt vizsgáltam, mert ez igen gyakori. Így a beágyazási hossz 50 mm-re adódott az első tönkremeneteli módnál. Bordázott acélbetétből 8 mm átmérőjűt modelleztem, így a beágyazási hossz 80 mm. Pászma esetén a névleges átmérő 12,9 mm, így a beágyazási hossz 129 mm. A második tönkremeneteli módnál mindegyik modellnél a beágyazás hossza 375 mm.



19. ábra: A numerikus modellek geometriai méretei (a képen a huzal próbatest 10fi beágyazási hosszal)

A modellek tehát a következő módon épülnek fel: szabványos beton próbatest, a közepén a vizsgált betétnek megfelelő üreggel, terhelő lemezek, erőátadó csukló, lágyvasalás vonalelemekkel modellezve, és a vizsgált betét az adott hosszal beágyazva a betonba kontaktterefogat elemekkel.

Huzal geometriája



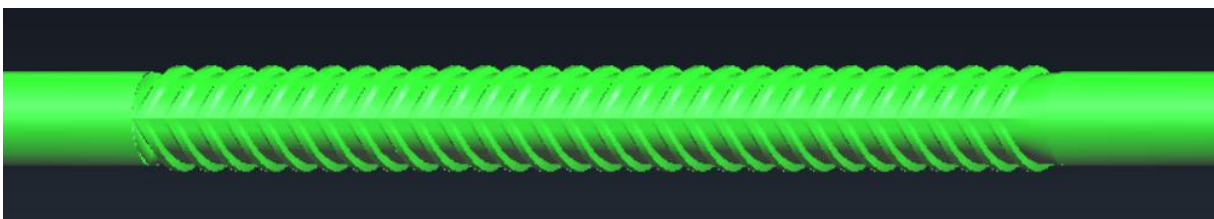
20. ábra: A huzal keresztmetszete a modellben

Abban az esetben, ha kicsi sugarú henger felületére próbálunk meg végeleemes hálót generálni, akkor a kontaktfelület hálózásakor a GiD-ben könnyedén hibába ütközhetünk, problémák léphetnek fel [sa]. Ez a nem megfelelő oldalarányú, illetve túl hegyesszögű végelelemek miatt következik be. Ennek elkerülése végett szabályos nyolcszöggel közelítettem a huzalt. Ebben az esetben könnyebben lehet definiálni a végelelem méreteket, és az említett hiba elkerülhető.

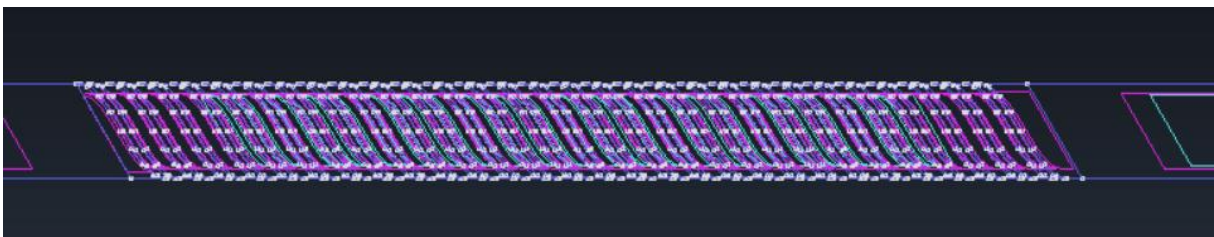
A keresztmetszet definiálása után a felületet tengelyirányban kihúzva definiáltam a huzalt.

Bordázott acélbetét geometriája

Bordázott acélbetétnél csak a beágyazási hosszon modelleztem a bordákat, a fennmaradó hosszon 12 mm átmérőjű hengerrel helyettesítettem. Így jelentős számítási mennyiséget tudtam megspórolni. A 21. és a 22. ábrán látható a betét modellbeli kinézete.



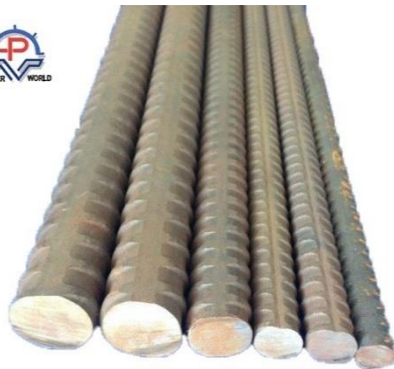
21. ábra: Bordázott acélbetét perspektivikus ábrázolásban



22. ábra: Bordázott acélbetét oldalnézete

A bordázat mintájának alapjául egy a forgalomban is megtalálható deformált betonacél szolgált [33]. Az MSZ EN 10080-ban foglalt kritériumok segítségével vettem fel a geometriai méreteket.

- betét átmérője: $d = 8\text{mm}$
- keresztborda magassága: $h = 0,03d - 0,15d$, felvett érték: $h = 0,67\text{mm}$ ($\sim 0,08d$)
- borda hosszteneggelyel bezárt szöge: $\beta = 35^\circ - 75^\circ$, felvett érték: $\beta = 60^\circ$
- borda oldalának hajlásszöge: $\alpha \geq 45^\circ$, felvett érték: $\alpha = 60^\circ$
- bordaköz: $c = 0,4d - 0,15d$, felvett érték: $c = 2,67\text{mm}$ ($\sim 0,33d$)

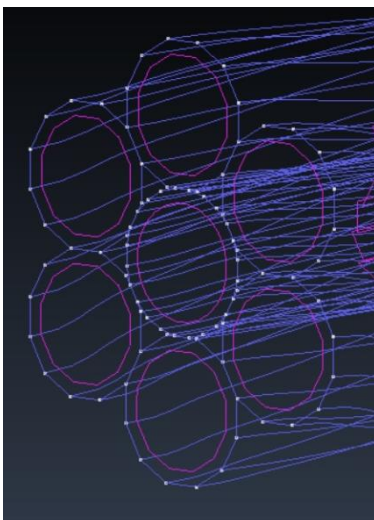


A modellezés során először egy bordát szerkesztettem meg, majd tengelyirányban eltolva másoltam a beágyazási hosszának megfelelően. A borda előállításához egy pontot hosszirányban elforgatva kihúztam, majd felosztottam 8 részre. Így a kapott pontokat külön-külön tudtam mozgatni, lehetőségem volt korrigálni a geometriát.

23. ábra: A modell alapjául szolgáló betonacél

A beágyazott rész elejét és végét a bordával párhuzamosan, a tengellyel 60° -ot bezáró felülettel metsztem el. A vizsgált beágyazott felület mérete így megfelelő maradt, azonban nem kellett a csonkolt bordákkal, és az azok által kialakított szabálytalan felület hálózásával bajlódni. Ezután létre lehetett hozni a beton betétet körülölelő felületét és a kontaktterefogat elemeket.

Héteres pászma geometriája



A 3.2-es pontban említettem, hogy a pászma modellezésére alapvetően két lehetőség van. A fő különbség, hogy huzalonként modellezve a kihúzódás közbeni elcsavarodás pontosabban vehető figyelembe, ezért a bonyolultabb, de pontosabb módszert választottam.

A 24. ábrán látható a pászma keresztmetszete. A gyakorlatban a héteres pászma középső huzalja nagyobb, mint az öt körülvevő másik hat. Azonban, ha körként modelleznénk az összes huzalt, akkor hat kisebb kör alakú huzalt nem lehet úgy

24. ábra: A pászma modellezett keresztmetszete

elhelyezni, hogy zárt felületet alkossanak. A valóságban a sodrás hatására tudnak zárt felületet létrehozni.

Annak érdekében, hogy a középső huzal nagyobb területű legyen, a pászma zárt felülülettel rendelkezzen, és az össz keresztmetszeti terület ne változzon a képen látható módon definiáltam a keresztmetszeteket.

A külső huzalok szabályos 12 oldalú sokszögek, a középső huzal pedig egy modifikált szabályos 24 oldalú sokszög. A hat huzalt úgy helyeztem el, hogy egy oldaluk összeérjen, így a huzalok között tudtam kontaktterefogat elemeket definiálni. A belső huzalt ezután úgy alakítottam ki, hogy a lehető legnagyobb körhöz közeli helyet foglalja el középen és érintkezzen a többi huzallal. Az így kapott összterület 101 mm^2 , azaz 1%-os eltérés van a tényleges 100 mm^2 -hez képest.

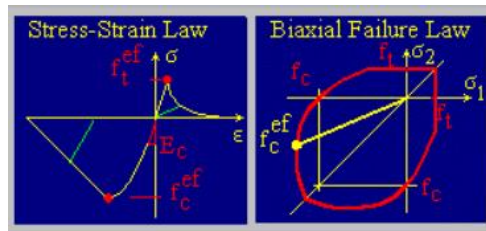
Kontaktterefogat elemek

Modellezés során az egyik legfontosabb a kontakttelemek megfelelő definiálása. Ez a GiD-ben igen egyszerűen elvégezhető, némi odafigyeléssel. A legcélszerűbb először a vizsgált betétet létrehozni, az összes felületével, terfogatával. Ezután a felületét zérus távolságba lehet másolni, egy másik fóliára (pl. beton) helyezni. Abban az esetben, ha az „összeesés” parancs ki van kapcsolva sikeresen létre tudjuk hozni a körülölelő betonfelületet, illetve, ha a kontakt létrehozása parancsot is engedélyezzük, akkor az eredeti és a másolt felület között a program automatikusan létrehozza nekünk a kontaktterefogatókat.

Ennek hatására a két kapcsolt felület között bizonyos feltételeknek teljesülnie kell, a legfontosabb, hogy azonos végeelemes hálóval kell rendelkezniük. Ezt a program helyettünk biztosítja, amilyen hálót beállítunk az egyik felületnél, olyan hálóval fog rendelkezni a másik felület is. Arra viszont figyelni kell, hogy az összekapcsolás után a két felületet nem szabad külön-külön módosítani, mert ha így teszünk, akkor azzal megbontjuk a kapcsolatot és nem fog működni a modell.

4.2 Anyagok, anyagmodellek

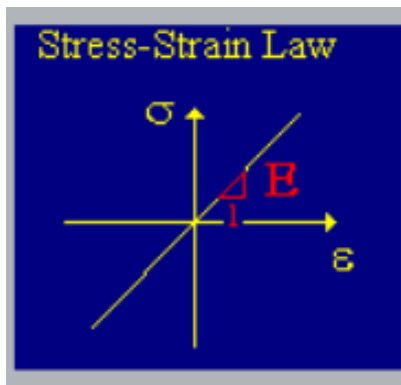
Beton anyagmodellje



25. ábra: Az alkalmazott beton anyagmodell

Az alkalmazott beton C25/30-as anyagminőségű. Az alkalmazott anyagmodell a szoftverbe épített „CC3NonLinCementitious2” névre hallgat. Ennek a diagramja látható a 25. ábrán. Ez figyelembe veszi a beton nemlineáris viselkedését. A szoftverben definiálni lehet az Eurocodenak megfelelő anyagminőségeket. A nemlineáris viselkedést ki lehet kapcsolni, én most bekapcsolva hagytam.

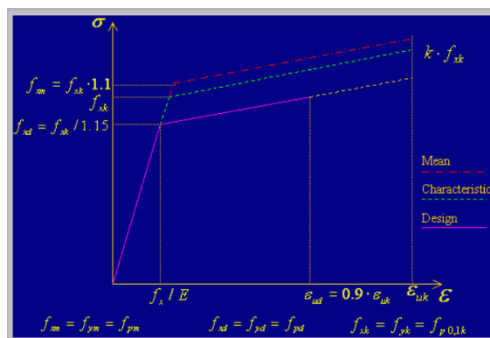
Terhelő lemezek, csukló anyagmodellje



26. ábra: Terhelő elemek anyagmodellje

A terhelő elemeknek és a csuklónak egy egyszerű lineárisan rugalmas anyagmodellt adtam meg, a szoftverben „CC3DElasIsotropic” névre hallgat. Rugalmassági modulusnak 200 GPa-t adtam meg, Poisson tényezőnek pedig 0,3-at. Ezeknek az elemeknek tényleg csak az a szerepe, hogy a beton ne menjen lokálisan tönkre, az erők megfelelően átadódjanak.

Vasalási armatúra anyagmodellje



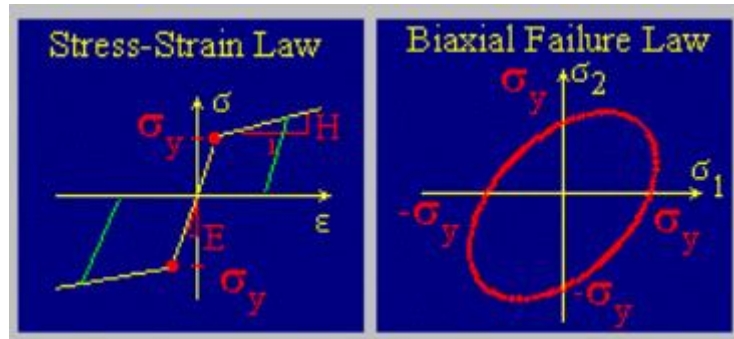
27. ábra: Vasalási armatúra alkalmazott anyagmodellje

A lágyvasalást a modellben vonalelemek formájában definiáltam. Ezeknek az anyagmodellje a 27. ábrán látható.

Ezeknek az elemeknek nem várható különösebb igénybevétele, csak azért vannak, hogy a feszültségeket elosszák a betonban, hogy ne legyenek lokális repedések. Ahhoz túl messze vannak a vizsgált betétől, hogy megtámasztó hatásuk legyen.

Vizsgált betétek anyagmodellje

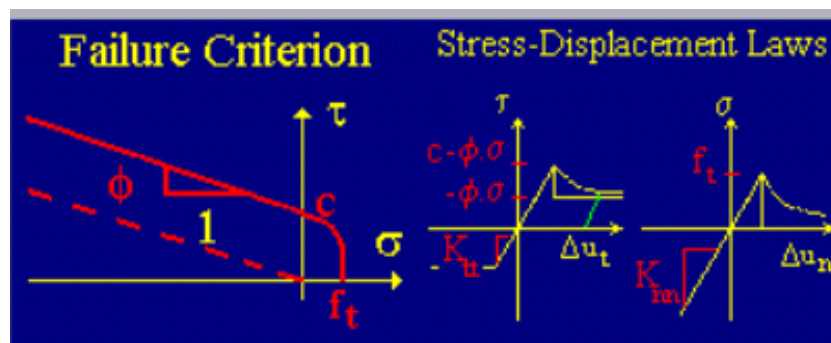
Mindegyik betéthez a szoftverbe beépített „CC3DBilinearSteelVonMises” névre hallgató anyagmodellt adtam meg, csak a paramétereket definiáltam különféleképpen.



28. ábra: A vizsgált betétek anyagmodellje

Ez egy húzásra és nyomásra is lineáris, majd megfolyás után lineárisan felkeményedő anyagmodell, diagramjai a 28. ábrán láthatóak. A rugalmassági modulust 195 GPa-nak adtam meg huzal és pászma esetén, illetve 200 GPa-nak a betonacél esetén. A feszítőbetétek folyáshatárát 1540 MPa-nak, a bordázott betétét 500 MPa-nak vettem fel. A Poisson tényező mindegyik esetben 0,2.

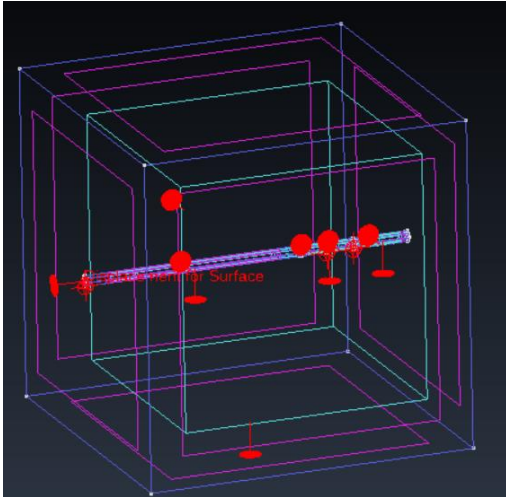
Kontaktelemek anyagmodellje



29. ábra: A kontaktterefogat elemek anyagmodellje

A kontaktterefogat elemekhez az úgynevezett „CC3DInterface” nevű anyagmodellt használtam, ennek jellemző diagramjai a 29. ábrán láthatóak.

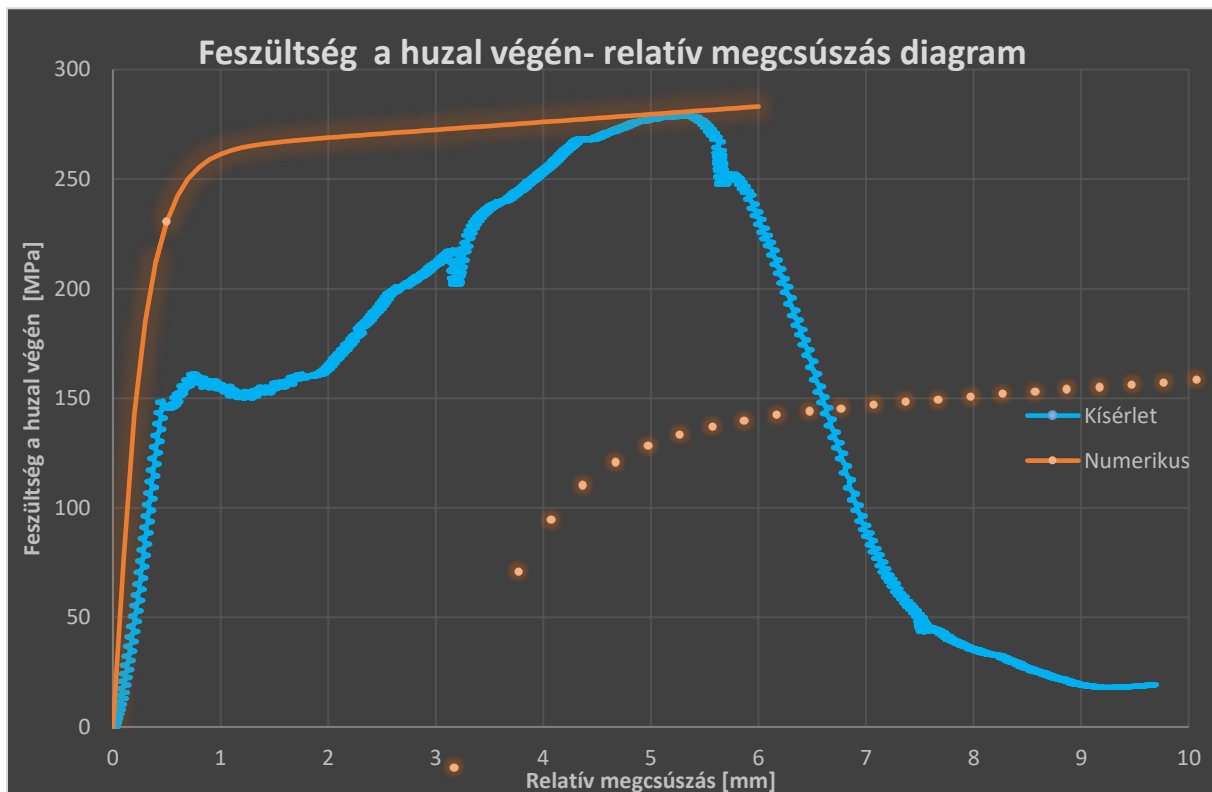
A kapcsolat normálmerevségét $K_{nn}=5 \cdot 10^7$ MN/m³-nek adtam meg, a nyíromerevségét pedig $K_{tt}=2,5 \cdot 10^6$ MN/m³-nek. A kontaktelem tönkremenetele utáni maradó merevségeket a program készítőinek ajánlása alapján az eredeti merevségek ezredének definiáltam. Az adhézió értékét 8 MPa-nak vettem fel, a súrlódási tényezőt pedig 0,1-nek. A húzószilárdságot 0,5 MPa-nak adtam meg. Az anyagi nemlinearitásokat is figyelembe vettem.



30. ábra: Kocka modell megtámasztásai

A fenti paraméterek meghatározása nem volt könnyű feladat. Rendelkezéseimre álltak huzallal elvégzett kihúzókísérletek eredményei, kocka próbatesten elvégezve. Ezért készítettem egy ennek megfelelő végeselemes modellt, ez látható az x. ábrán. A modell megtámasztási viszonyai a valós kísérletnek megfelelőek, amelyik oldalról húzzuk a huzalt, ott van megtámasztva a beton. A modell megtámasztási viszonyai a 30. ábrán láthatóak.

A terhelést elmozdulásként definiáltam, és mértem a terhelés helyénél a huzalban ébredő feszültséget.



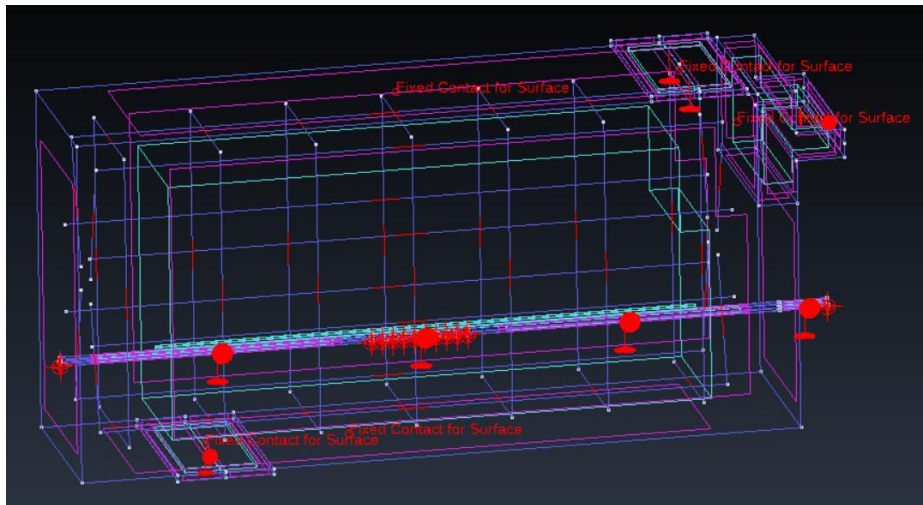
1. Diagram: Huzal végi feszültség-relatív elmozdulás diagram kocka próbatest esetén, kísérleti és numerikus módon

A kísérleti és a numerikusan előállított értékek az 1. diagramon láthatóak. A terhelő erőt átszámoltam a huzalban ébredő feszültséggé, mert a modelltől könnyebb, és pontosabb, ha a feszültség értéket vizsgálom monitor ponttal. Az értékeket úgy állítottam be, hogy a maximum érték helyénél a numerikus eredmény megegyezzen a kísérleti eredményekből előállított görbe maximumával.

Mint látható, a két görbe jellegét tekintve különböző. A numerikus értékekből előállított diagram az elméletnek megfelelő kinézetű, nagy meredekséggel emelkedik, amíg egy nagyon kicsi relatív elmozdulásnál el nem éri az adhézió értékét, majd súrlódás veszi át a szerepet, és a görbe kis meredekséggel megy tovább. Ezzel ellentétben a kísérlet során az látszik, hogy az adhéziós kötés felszakadása után még van ellenállás növekmény, és csak később éri el a maximum ellenállás értékét. Ez azzal magyarázható, hogy a tönkremenetel során az adhézió felszakadása után az érintkezési felületek közötti súrlódás ellenállás növekményt okoz, majd a relatív elmozdulások során az érdesség degradálódik, és progresszív tönkremenetel figyelhető meg.

A fentiekben ismertetett módon eljárva azonban sajnos csak az érintőirányú viselkedést befolyásoló paraméterek határozhatóak meg, ugyanis a huzal sima felületű. Ez azt jelenti, hogy a normálmerevség meghatározásához ez nem alkalmas. A mechanikus tapadást viszont nagyban befolyásolja ez a mennyiség, a pászma és a bordázott acélbetét viselkedésének leírásához ezt is meg kellett határozni. Ennek meghatározásakor a pászma modellt használtam, kiindulási értéként a szoftver ajánlását vettem fel, majd több futtatást végeztem különféle képpen felvéve ezt az értéket. Végül azt tapasztaltam, hogy a legjobb viselkedést akkor mutatja a modell, ha $K_{nn}=5 \cdot 10^7$ MN/m³-nek veszem fel, ez körülbelül egy nagyságrenddel nagyobb, mint a beton rugalmassági modulusából meghatározható ajánlott érték. Ez a kicsit nagyobb merevség jobb eredményeket mutatott, az elméletben foglalt tapasztalatokat jobban követte (bővebben az eredmények kiértékelésénél).

4.3 Megtámasztási viszonyok



31. ábra: A modellek megtámasztási viszonyai

A gerenda függőleges (z) irányban meg van támasztva a 31. ábrán látható módon a két erőátadó lemeznél. Normális esetben a felső erőátadó lemeznél történik a terhelés, azonban numerikusan zavart okozott a lehajlás közben a betét erő átadó csukló felőli oldalának hajlítása, különösen pászma esetén. A huzalok egymásba nyomódtak, és hátráltatták a modell lefutását, illetve a kiértékelést is nehezítették.

A probléma kiküszöbölésének érdekében módosítottam az eredeti kísérlet megtámasztási viszonyait. A felső lemezt nem terhelésre használom, hanem csak függőlegesen megfogtam a középvonala mentén, a terhelést pedig közvetlenül a betétre adtam rá felületi elmozdulás formájában. Így a betét szimmetria viszonyát egy teherrel helyettesítettem. A tengely (x) irányú terheléssel a csukló középvonalának x irányú megfogása tart ellen. Merőleges (y) irányban az alsó erőátadó lemez és a csukló középvonalát fogtam meg, hogy ne legyenek numerikus problémák. Ezáltal egy olyan modell jött létre, ami tartalmazza a gerenda kísérlet előnyét a kihúzó kísérlettel szemben, vagyis, hogy a betét környezetében nincsen nyomófeszültség a betonban, illetve leegyszerűsítette egy kihúzó kísérlethez hasonló esetre. A betétek csak húzva vannak, hajlítás nem történik. A valós kísérletnél ez nem megoldható, de numerikusan semmi akadálya nincsen ennek az elrendezésnek.

A betonhoz az erőátadó elemek és a csukló fix kontakt felület segítségével csatlakoznak. A betétek oldalát függőlegesen, alját pedig keresztirányban fogtam meg, ezzel nem gátolva a keresztirányú alakváltozásait, de biztosítva, hogy a tengelyük egyenes maradjon. Erre szükség van, mert a vizsgálat közben könnyen elferdülhetnek apró számítási hibák miatt is.

4.4 Monitor pontok

A monitor pontok elhelyezése huzal esetén az első tönkremeneteli módra a 31. ábrán megfigyelhető. A monitor pontok segítségével le tudom kérni a megfelelő adatokat az analízis után, illetve a számítás közben is lehet görbéket felrajzolni a monitor pontok által figyelt értékekből.

Mértem a terhelő elmozdulást és a hozzá tartozó feszültséget a betétben, a betét terhelt oldalán, illetve a valós kísérletnek megfelelően helyeztem el monitor pontokat a gerenda szabad végén is. Itt mértem a betét feszültségét, az elmozdulását, illetve a beton elmozdulását, hogy később relatív elmozdulást is lehessen számítani. Sajnos relatív elmozdulás közvetlenül nem kérhető le a modellből.

Továbbá a numerikus modell adta előnyök kihasználásához helyeztem el monitor pontokat a betétek beágyazott hossza mentén is. A gyakorlatban jelenleg nincsen lehetőség a belső folyamatokat vizsgálni azok megzavarása nélkül, ezért ez a vizsgálat igen hasznos lehet. A rövidebb beágyazási hossz esetén egyenletesen elosztva 10 helyen mértem adatokat, a hosszabb beágyazási hossz esetén pedig a teljes hosszon, szintén egyenlő távolságra helyeztem el 10 mérőpontot. A pontokban lekértem a betét tengelyirányú feszültségét, az elmozdulását, a beton elmozdulását, illetve a tapadási feszültség értékeket. Ennek eredményeképpen vizsgálhatóvá vált a tapadási feszültségek, illetve a megcsúszások vizsgálata a betétek hossza mentén.

4.5 Intervallumok, a kísérlet menete

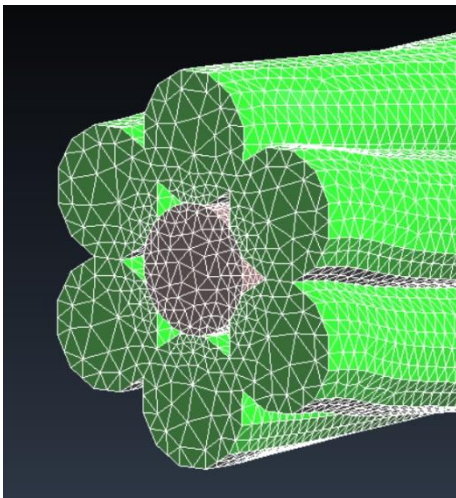
A terhelést, mint a 4.3-as pontban említettem a betét csukló felőli végén, annak felületére definiált elmozdulással adtam meg. Mivel a terhelés során különböző helyeken tapasztalható jelentősebb változás, például az első megcsúszásnál, a repedések kezdetekor, ezért érdemes lehetne különböző terhelési sebességeket definiálni az egyes elmozdulás tartományokhoz. Jelen esetben azonban, mivel több betétet is vizsgálok, és az eredményeket össze szeretném hasonlítani, ezért a terhelés sebességének a hatását kizárom. Ez azt jelenti, hogy mindegyik modell esetén ugyanazt az egyenletes terhelési sebességet használom, az pedig, hogy meddig tart a kísérlet az adott betéttől és a tönkremeneteli módtól függ.

Természetesen ez megnöveli a számítási időt, ugyanis finom felosztást kell alkalmazni, különben nem lehet megfelelően vizsgálni a tönkremenetelt. A terhelés sebességét több futtatás és vizsgálat után 0,05mm/lépés -ben határoztam meg.

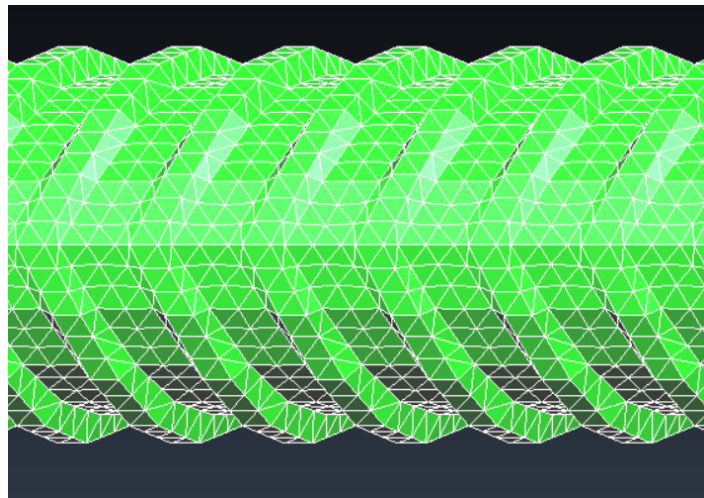
4.6 Végeselemes háló

A végeselemes háló elkészítésekor néhány alapvető szempontot vettem figyelembe. A betonnak a betéttől távolodva a lehető legnagyobb hálót adtam meg, hogy gyorsítsam a számítást. Ezzel összefüggésben a betonhoz kapcsolt terhelő elem, illetve csukló felületének ennél sűrűbb hálóval kellett rendelkeznie, ugyanis a beton a „master node” a terhelő elemek pedig a „slave node” -al rendelkeznek, ami azt jelenti, hogy a terhelő elemek pontjai vannak a beton pontjai alá rendelve. Az alárendelt pontok számának nagyobbak kell lennie, mint a felsőbbrendű pontoknak, mert több alárendelt pont tartozhat egy felsőbbrendű ponthoz, de fordítva nem igaz.

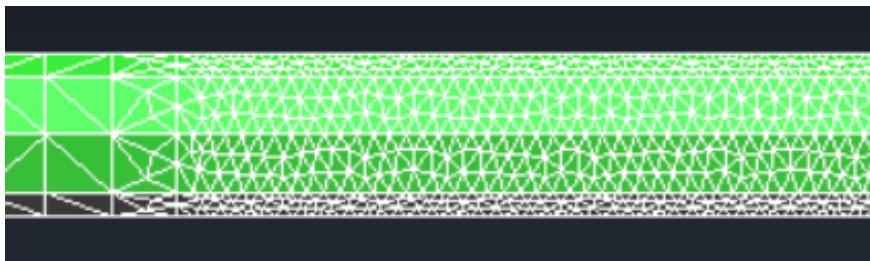
A másik szempont, hogy a vizsgált betét végeselem hálójának olyannak kell lennie, ami megfelelően pontos eredményekkel szolgál, de ne túl sűrűnek, hogy numerikus problémákat okozzon, és ezáltal okozva hibás eredményeket. Szélsőséges esetben túl kicsi végeselemméret esetén a modell nem is tudott lefutni, mert zérus térfogatú elemekként értelmezte, és ellentmondást okozott. Ez gyakorlatilag azt jelentette, hogy 0,5mm-es elemméret alá nem érdemes menni, mert akkor a számítás el sem indult. A 31-33. ábrán láthatóak az alkalmazott végeselemes felbontások.



33. ábra: Pászma végeselemes felbontása



32. ábra: Bordázott acélbetét végeselemes felbontása



34. ábra: Feszítőhuzal végeselemes felbontása

5. Eredmények, kiértékelés

Az előző fejezetben bemutatam a numerikus modellek felépítését. Ebben a fejezetben arról lesz szó, hogy az eredményeket hogyan vettem ki a modellekből, hogyan vizsgáltam a helyességüket, és hogyan dolgoztam fel őket. Ezek után értékelem a modelleket, összehasonlítom egymással a különböző betéteket és a tönkremeneteli módokat. Továbbá röviden a 3.1-es pontban bemutatott analitikus modellek segítségével is vizsgálom a kapott eredményeket.

5.1 Modellek validálása

A vizsgált betétek geometriai méretei nagyon kicsik, kis oldalhosszúságú sokszögekből tevődnek össze (tizedmilliméteres nagyságrend). Ezeket az oldalakat pedig legalább egy, de volt, hogy akár több részre is felosztottam. Eredményképpen a betétek felülete, és a környező beton térfogat igen kis méretű végelemekre lett felosztva. Ez a geometria minél pontosabb modellezési igényének szükségszerű következménye, azonban ez több kedvezőtlen dolgot is eredményez. A legkézenfekvőbb, hogy megnövekszik a számítási igény, nagy számítógépes kapacitásra van szükség, a modellek futtatása sok ideig tart (a leghosszabb idő 18 óra volt). A másik, hogy habár a sűrűbb felosztás növeli a számítás pontosságát, a modell érzékenyebbé válik a lokális hatásokra, például az adhézió felszakadása adott kontakttér fogat esetén.

A kontaktlemek anyagi paramétereinek beállításához futtatott modellek esetében törekedtem a számítási idő csökkentésére, annak ellenére is, hogy ez észrevehetően csökkentette az eredmények pontosságát (numerikus értelemben). Ez szükséges volt, különben csak ez a folyamat hónapokat vett volna igénybe. Elsősorban két mennyiséget változtattam: a különböző méretű végelemek közötti átmenet sebességét, illetve a terhelés lépéseinek számát, azaz a terhelés sebességét. A végelelemméret növelésének sebességét a lehető legnagyobbra állítottam, úgy, hogy még lefusson a modell. Túl gyors esetben numerikus problémák léptek fel, zérus merevségű elemek adódtak. A terhelés sebességét 0,1 mm/lépés-re állítottam maximum, ennél gyorsabb terhelés esetén nem lett volna kellőképpen megfigyelhető a jelenség.

Az ATENA képes rá, hogy az analízis közben párhuzamosan megjelenítse a már kiszámolt terhelési lépések eredményeit. Ez nagy segítségnek bizonyult, mert így nem kellett megvárni a teljes számítást, ha közben látszott, hogy valami nem működik megfelelően, akkor le tudtam állítani az analízist, és a modell megfelelő változtatása után újraindítani.

A számolás futtatása közben figyeltem a modell konvergenciáját, a repedések terjedését, az elmozdulásokat, illetve a terhelés hatására a betét végén fellépő feszültség és a terhelő elmozdulás diagramját. Ezek alapján a következő problémákkal találkoztam a modellek analízise közben:

- 1) nem megfelelő konvergencia – a vizsgálat lefut, de túl nagy hibaszázalékkal
- 2) nem konvergáló modell – a vizsgálat leáll a kiugróan magas hibaszázalék miatt
- 3) a vizsgálat nem indul el - hibás merevségi mátrix, zérus vagy negatív elem
- 4) a pászma nem húzódik ki – hamarabb folyik meg, mint hogy tönkremenne a kapcsolat
- 5) a beton felhasad – a beton tönkremegy, mielőtt kihúzódna a betét
- 6) a beton nem reped meg szinte egyáltalán
- 7) betétek irreálisan nagy tengelyre merőleges kimozdulása
- 8) a számolás megáll a terhelés lecsökkenésekor – merevségi mátrix zérus elem

Természetesen kerestem megoldást ezekre a jelenségekre, ezt most röviden ismertetném is. Az 1) probléma nem súlyos, lefut a számítás, csak sok iterációval és viszonylag nagy hibaszázalékkal. Erre az egyik legkönnyebb megoldás a terhelési sebesség csökkentése, a végleges modelleknél lassabb terhelést beállítva sokkal kedvezőbb hibaszázalékok adódtak, kevesebb iterációval. A másik oka a nem megfelelő konvergenciának a túl nagy érintő, illetve normálmerevség megadása. Ennek numerikus okai vannak, de könnyen belátható, hogy nagyobb merevségű kontaktelelem esetén több repedés fog egy terhelési lépésben kialakulni a betonban, a nagyon sok repedés pedig a pontos eredményhez való lassabb konvergálást eredményez. A véglegesen alkalmazott merevségek alkalmazásával megfelelően konvergáló modelleket tudtam létrehozni.

A 2) probléma esetén az volt megfigyelhető, hogy egy lépésen belül a repedések szinte a teljes beton elembe végigfutottak, és emiatt nagymértékben megnőtt a hibaszázalék, leállítva a számítást. Ennek az egyik oka az volt, hogy végelelemméretek között túl gyors átmenetet állítottam be, és amikor a nagyobb végelelemeket is elérték a repedések a teljes betontest szétrepedt. A másik ok a túl nagy kihúzó erő volt. Ez a hatás a terhelés sebességének mérséklésével, illetve a merevség csökkentésével kiküszöbölhető volt.

A 3) probléma a pászma modellnél jelentkezett, a huzalok közötti kontaktelemelek miatt. A program se a túl nagy, se a túl kicsi végelelemméretet nem tudta feldolgozni, végül a 4.6-os pontban ismertetett méretekkkel sikerült működőképes modellt létrehozni.

A 4) -6) probléma a kontaktelemelek anyagi paramétereinek beállításával volt megoldható. A 4) és az 5) probléma a túl nagy szilárdsági paraméterek, a 6) probléma a túl alacsony merevségi paraméterek miatt következett be.

A 7) probléma a be nem ágyazott szakaszokon következett be, mert bár nem volt terhelve tengelyre merőlegesen, a megtámasztás hiánya miatt a numerikus számítás eredményeként mégis elmozdultak. Ezért függőleges irányban a szabad betétszakaszokat az egyik vízszintes élük mentén, vízszintes irányban az egyik függőleges élük mentén megtámasztottam, így az alakváltozásukat nem befolyásoltam, de kiküszöböltem a numerikus hibákat.

A 8) probléma komplikáltabb, mint az előzőek. Mind a pászmánál, mind a bordázott acélbetétnél megfigyelhető volt, a feszítőhuzalnál azonban nem. Az ok a tönkremenetel módjában keresendő. Feszítőhuzal kihúzása esetén kontaktelemelek ellenállásának kimerülésével a sima acél és a sima beton felület szabadon el tud mozdulni, a fennmaradó ellenállást a súrlódás okozza. Tehát a kontakttérfogatok tönkremenetelével húzódik ki a betét. A beton és az acél felület elnyíródik, a folyamatot döntően a kontaktelemelek anyagmodelljében definiált érintőirányú paraméterek befolyásolják.

Bordázott betonacél és héteres pászma esetében azonban a mechanikus tapadás is jelen van. Ennek következtében van érintőirányú, és normálirányú ellenállás is. Az érintőirányú ellenállás hasonlóképpen működik, mint a feszítőhuzal esetében. A normálirányú ellenállás viszont az jelenti, hogy a betét felülete nekinyomódik a betonnak. A betétek kihúzódása tehát a beton tönkremenetelére miatt tud bekövetkezni. Az 1. ábrán látható módon bordázott betét esetében a két borda közötti beton a valóságban morzsolódik, és a bordák tolják maguk előtt. A teljes tönkremenetelnek úgy kellene bekövetkeznie, hogy a betét felületétől szétterjednek a repedések, majd végül a betét és a környezetében kialakult hengerszerű beton test elnyíródik, engedve ezzel a nagyobb elmozdulásokat. A tönkremenetel tehát a betonban bekövetkező nyírás hatására következik be, a betonban kialakul egy olyan nyírt felület, ami mentén a beton a betéttel együtt kihúzódik a próbatestből.

Az ilyenfajta tönkremenetel a beton az ATENA-ban alkalmazott végeeselemes modellezésével nem kivitelezhető. A betonnak definiálva van egy maradó ellenállása, akár nyomásról, húzásról vagy nyírásról van szó. A nyírási tönkremenetel során az ellenállás lecsökken, és az elmozdulások megnövekednek. A végeeselemek továbbra is ugyanazokkal a végeeselemekkel lesznek szomszédosak.

A hibaüzenet akkor jelenik meg, amikor elérjük a tapadási szilárdságot, és kezdene leépülni a mechanikus tapadás, vagyis az ellenállás csökkenne. Ez annak a következménye, hogy a betonban megszűnik az anyagi folytonosság. Numerikusan ez úgy jelenik meg, hogy a tönkremenetel felületén lévő beton végelemek zérus merevségűvé válnak. Azonban amikor ez bekövetkezik a modell labilissá válik, mert a terhelő erőt nem tudja átadni a betét és a vele együtt kihúzódó beton a próbatestnek. Ez pedig az analízis végét jelenti.

Ahhoz, hogy ez kiküszöbölhető lehessen valami olyasmire lenne szükség, hogy a beton végelemek el tudjanak mozdulni egymáshoz képest, miközben van közöttük súrlódás, és az elnyíródott beton végelem rendelkezik maradó merevséggel.

Ez véleményem szerint az ATENA-n belül modellezési eljárással beton-beton térfogatok között definiált kontaktterefogat elemek használatával lenne csak megoldható. Ez persze rengeteg további problémát vet fel. Lehetne például a beton próbatestet két darab térfogat elemre osztani, az egyik a betét környezetében, a másik a maradék beton, a kettő között henger felülettel. A henger felületen kontaktterefogat elemeket definiálva el lehetne érni a „betonon belüli” elnyíródást. Ezzel azonban előre definiálnánk a tönkremeneteli felületet, illetve a kontaktelelem paramétereit is meg kéne határozni valahogyan.

A másik kissé elrugaskodott ötlet, hogy a betont lehetne úgy modellezni, hogy minden egyes végelem között lenne egy kontaktterefogat elem (természetesen akkor lenne a legjobb, ha ez valami módon automatikusan generálható lenne). Ez lehetővé tenné, hogy a végelemek anélkül elmozduljanak egymáson, hogy a modell labilissá válna. Természetesen megint fölvetődik a kérdés, hogy a kontaktelelemek anyagi paramétereit hogyan határozzuk meg. Továbbá húzási és nyírási tönkremenetelt így lényegében a kontaktterefogat elemek határoznák meg. Ez minden bizonnyal jelentősen megnövekedett számítási igényt is jelentene. Ez hasonlóan hangzik a diszkrét elemes modellezéshez (DEM), amit elsősorban szemcsés anyagok vizsgálatára használnak, és a diszkrét elemek közötti kölcsönhatás határozza meg az analízist. Azonban az említett módszer a beton térfogat modellezésére még mindig végeselemes vizsgálat, csak nem a szokványos módon végrehajtva.

A 8) probléma következménye a jelen dolgozatra nézve, hogy a pászma és a bordázott betonacél modelljei esetén a kapcsolat tönkremenetelének posztkritikus állapotát nem tudtam vizsgálni. A mérnöki szempontból legfontosabb felszálló szakaszt, illetve a tapadási szilárdságot azonban így is lehet vizsgálni, a modell a kapcsolat maximális ellenállásának elérése után válik csak labilissá.

5.2 Vizsgált eredmények

Pont	Acél elmozdulás [mm]	Beton elmozdulás [mm]	Megcsúszás [mm]	Tapadási feszültség [MPa]	Acél feszültség [MPa]
1					
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.15	0.02	0.13	0.00	273.91
	0.24	0.03	0.21	0.00	463.82
	0.32	0.04	0.28	0.00	619.15
	0.41	0.05	0.36	0.00	754.14
	0.50	0.06	0.44	0.00	875.12

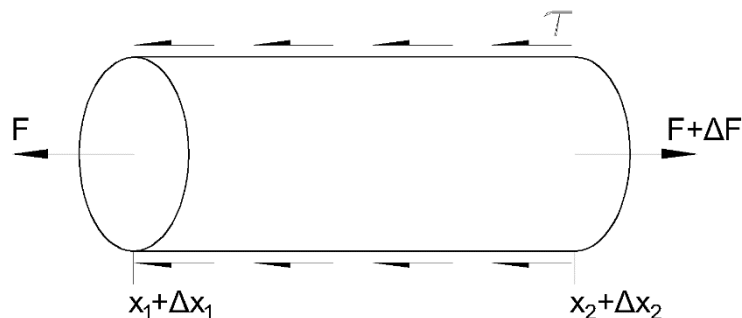
1. táblázat: a vizsgált adatok

Az 1. táblázat mutat egy részletet a monitorpontokból exportált adatokról. A 4.4 pontban ismertetett monitorpontokban mértem az acél és a beton elmozdulását, ebből tudtam relatív elmozdulást számolni. Továbbá minden pontban mértem a tapadási feszültséget és a betétben lévő feszültség értékét.

Az eredmények feldolgozásából kapott diagramok és ábrák az 5.4. pontban láthatóak, egy oldalon egyféle eredmény látható a hat különböző modellre, hogy az eredményeket könnyen össze lehessen hasonlítani. A következőket jelenítettem meg:

- repedéskép a betonban az analízis végén
- betétben ébredő normálfeszültség a terhelésnél – terhelő elmozdulás diagram
- egy pontban értelmezett betétben ébredő normálfeszültség – relatív elmozdulás diagram
- beágyazás hossza mentén ábrázolt abszolút elmozdulása a betétnek
- beágyazás hossza mentén a betétben ébredő normálfeszültség
- a vizsgált értékekből számolt tapadási feszültség – megcsúszás diagram

A tapadási feszültség – megcsúszás diagramokat az alábbi módon határoztam meg.



35. ábra: Egy henger alakú betétszakasz egyensúlya

A 35. ábrán látható egy hengeralakú betétszakasz egyensúlya látható. Ez megfelel annak az állapotnak, ami a beágyazási hossz mentén két monitor pont között van. Az ábrán F és $F+\Delta F$ a betétdarab két végét húzó erő. Ez a normálfeszültségből könnyen számolható: $\sigma=F \cdot A$, csupán a keresztmetszeti területtel kell beszorozni. A két koordináta x_1 és x_2 a betét kétszakasz két végén a betét tengely menti abszolút elmozdulása. Ezek után egyensúlyi egyenlet felírásával a tapadási feszültség könnyen számolható:

$$F + \tau \cdot K \cdot ((x_2 + \Delta x_2) - (x_1 + \Delta x_1)) = F + \Delta F$$

$$\tau = \frac{\Delta F}{K \cdot ((x_2 + \Delta x_2) - (x_1 + \Delta x_1))}$$

Ezzel a módszerrel két monitorpont közötti szakaszra tudtam átlagos tapadási feszültséget számolni, miközben a megcsúszás $\Delta x_2 - \Delta x_1$, azaz a két végpont közötti abszolút elmozdulás különbsége.

Kétféle tapadási feszültség – megcsúszás diagramokat állítottam elő, az első esetben a 10 monitorpontból előállított 9 értékpárt ábrázoltam egy diagramon, egy terhelési esetben. Ezekből a diagramokból készítettem az 1. videót, itt a diagramok egészen a szilárdsághoz tartozó terhelésig vannak felrajzolva, a terhelést 10%-ként növeltem, amikor is a szilárdsághoz tartozó terhelő elmozdulás a 100%.

A másik ábrázolás az összesített tapadási feszültség – megcsúszás diagram, ekkor a egy modellhez az összes terheléshez tartozó értékpárt egy diagramon ábrázoltam. Ennek az lett az eredménye, hogy mivel nagyon hasonló megcsúszás értékek adódnak akkor, ha például kicsi a terhelés a terheléshez közel, és akkor, amikor nagyobb a terhelés a terheléstől távolabb, azaz több tapadási feszültség – megcsúszás értékpár áll elő úgy, hogy a megcsúszás értékek közel vannak, de más a környező beton állapota, más a tapadási körülmény, ezért a kapott diagramok nagy szórást mutatnak. Héteres pázsmánál, és bordázott acélbetétnél különösen, a mechanikus tapadás következtében.

5.3 Kiértékelés

Az adatok kiértékelése során, ahogyan azt az 5.2-es pontban leírtam, a monitorpontokban kapott elmozdulásokat, és a betétben ébredő normálfeszültségeket vizsgáltam. A pontokban mért tapadási feszültség értékeket azért nem használtam fel, mert ezekre az adatokra jellemző, hogy nagy szerepe van a lokális hatásoknak. Ezért hagyatkoztam inkább a jobban vizsgálható és megbízhatóbb normálfeszültség értékek vizsgálatára az acélbetétek egyes keresztmetszeteiben.

5.3.1 A kapcsolat tönkremenetele

Ebben a fejezetben a névleges átmérő tízszeresenék megfelelő beágyazási hosszal elvégzett kísérletek eredményeit mutatom be, kezdve a huzallal, folytatva a bordázott acélbetéttel, majd a pászmával. Bemutatom a tönkremenetel módját, ismertetem a hasonlóságokat és a különbségeket a betétek viselkedése között.

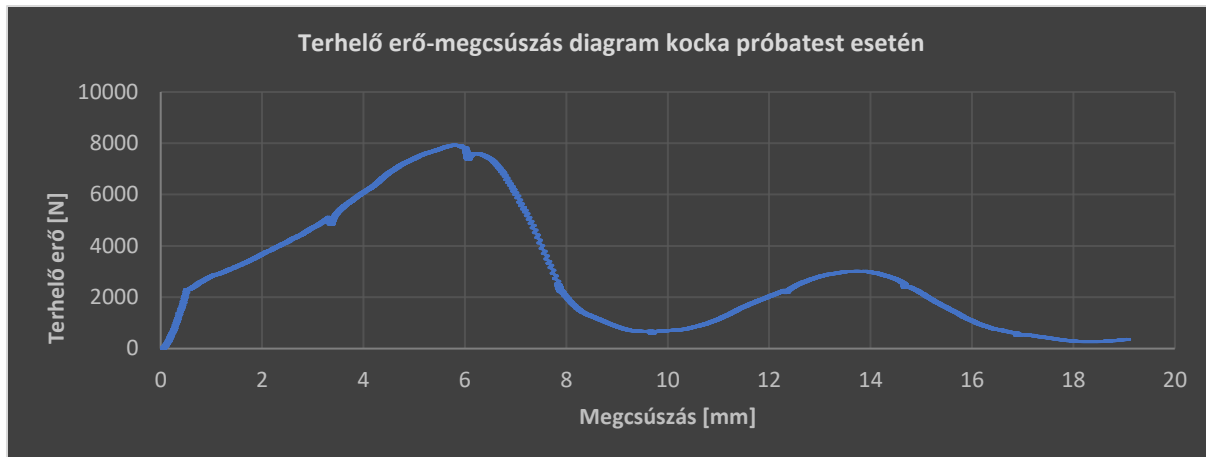
Feszítőhuzal

Az eredmények a vártak megfelelően alakultak. Mivel sima felületű egyszerű feszítőhuzalt vizsgáltam, csak az adhézió és a súrlódás játszott szerepet. A viselkedést a kontaktusok érintőirányú paraméterei befolyásolták.

A huzal terhelt végében ébredő feszültség-terhelő elmozdulás diagramon az látható, hogy nagyon kicsi elmozdulás esetén nagy meredekséggel megnő a feszültség, majd eléri az adhézió értékét, és hirtelen lecsökken a meredekség. A maradó meredekség a súrlódásnak köszönhető, illetve az anyagmodellben megadott maradó érintőirányú merevségnek. A beágyazási hossz középső pontját vizsgálva a feszültség először felszökik, majd az adhézió felszakadása után megnő a relatív elmozdulás, ezért a feszültség leesik, végül pedig egy maradó meredekség szerint nő a feszültség.

A tönkremeneteli módnak megfelelően alakult ki a betonban a repedéskép. A beágyazási hossz mentén kis kiterjedésben egy hengertestnek megfelelően repedt meg. A kis kiterjedés az érintőirányú viselkedés következménye, a felületek közötti erőátadás eredménye, a tönkremenetel során a betét nem feszíti a betont.

A huzal abszolút elmozdulásai a beágyazási hossz mentén szép parabolikus viselkedést mutatnak, a normálfeszültségeket hasonló módon ábrázolva pedig egy dominánsan lineáris görbét sikerült előállítani, egyedül a terhelés felőli oldal végén van egy egyre meredekebb szakasz. Már kicsi elmozdulásnál is a teljes hossz mentén végigfuta a feszültség a betétben, vagyis az adhézió hamar felbomlik, és történik relatív elmozdulás.



2. Diagram: Terhelő erő – megcsúszás diagram feszítőhuzal esetén kocka próbatestet használva, laborkísérlet eredménye

A számolt tapadási feszültség – megcsúszás diagram hasonlít a 2. diagramon látható, szintén huzalra elvégzett, kocka próbatesten végrehajtott kihúzóvizsgálat terhelő erő – megcsúszás diagramjára. Egy hullámzó viselkedés figyelhető meg, miután eléri a maximum értéket, az ellenállás csökken, majd növekvő megcsúszások mellett megint elkezd emelkedni, de már csak egy kisebb értékig.

Bordázott acélbetét

Az 5.1-es fejezetben már kifejtettem, hogy bordázott betonacél esetén csak a felszállóágát tudtam vizsgálni a jelenségnek, a kapcsolat maximum szilárdságának elérésig. A repedések a huzalhoz képest sokkal nagyobb betontérfogatra terjedtek szét, ez a bordák feszítő hatása miatt van. A normálfeszültség – terhelő elmozdulás diagramon látható, hogy itt már az adhézió és a súrlódás mellett a mechanikus tapadás is szerepet játszik, ezért a görbe meredeksége nem csökken le hirtelen, mint a huzal esetén. Továbbá igen nagy erőre volt szükség, hogy az ellenállás maximumát elérjem, ~400 MPa nagyságú feszültség ébredt a betétben a terhelésnél. A beágyazási hossz közepén felvett normálfeszültség -terhelő elmozdulás görbe meredeken indul, majd szépen ellaposodik, a tönkremenetel után pedig a súrlódás értékére csökkenne.

A betét abszolút elmozdulásait ábrázolva a tengely mentén látható, hogy a huzalhoz képest egy jóval nagyobb tapadásról beszélhetünk, a görbe jóval meredekebb, a az elmozdulások gyorsan csökkennek a terheletlen oldal felé haladva. A normálfeszültségeket a hossz mentén ábrázolva is az látható, hogy a feszültségek nem futnak olyan gyorsan végig a betétben. A görbék itt a terhelés hatására egyre nagyobb meredekségű egyenesek.

A számolt tapadási feszültség – megcsúszás összefüggés kevésbé szép, mint huzal esetén, ennek az oka, hogy már nemcsak az érintőirányú, hanem a normálirányú viselkedés is szerepet

játszik. Ezért ott ahol még jelen van, vagy éppen felszakad az adhézió, nagyobb tapadási feszültség értékek adódnak, ahol pedig már csak a mechanikus tapadás és a súrlódás van jelen, kisebb értékeket kapunk. Az látható, hogy az adhézió egyre több helyen szakad fel, és emiatt csökken az értékek ingadozása, majd egy bizonyos megcsúszás után beáll egy értékre.

Héteres pászma

A héteres pászma esetében szintén jelen van a mechanikus tapadás, azonban jóval kisebb a „bordázottság”, a kialakuló betonfogak kisebb méretűek, mint bordázott betonacél esetén, ezért arányában nézve kevésbé dominál a normálirányú viselkedés. Már a repedésképnél is látszik, hogy kisebb a repedések kiterjedése, és hengersizűbb, kevésbé kúp alakú, mint a bordázott betonacélnál.

A terhelésnél a betétben ébredő normálfeszültség – terhelő elmozdulás diagram vizsgálatánál azt tapasztaltam, hogy ugyan kialakul egyfajta leszálló ág, de ez el is kezd visszafelé görbülni, az ellenállás ismét elkezd növekedni. Ez úgy magyarázható, hogy mivel a mechanikus tapadás nem annyira nagy, kicsik a betonfogak, sikerült elérnem egy olyan terhelést, hogy a betét szét tudta nyomni a környező betont annyira, hogy szabadabban elmozdulhasson, ezért kialakult egy leszálló ág. Azonban egy bizonyos elmozdulás után a pászma újra összefeszül a beton felülettel, ezért ismét elkezd növekedni az ellenállás. Ezzel párhuzamosan alakulna ki a tönkremeneteli felület a betonban, ami az 5.1-es pontban ismertetett problémát hordozza, ezáltal az analízis leáll a modell labilissá válása miatt.

A betét a beágyazás menti egyik középső pontját vizsgálva a normálfeszültségek hasonlóan alakulnak, mint a terhelő elmozdulásnál, azzal a különbséggel, hogy kevésbé intenzív az ellenállás csökkenése.

Az abszolút elmozdulásokat a tengely mentén vizsgálva szintén azt erősíti meg, hogy a mechanikus tapadás hatása kisebb, mint a bordázott betonacél esetén, a görbe inkább hasonlít a feszítőhuzalhoz felrajzolt görbére.

A normálfeszültségek a beágyazás mentén hasonlóképpen alakulnak, mint bordázott betonacél esetén, egyre nagyobb meredekségű egyenesek sokasága, azzal a különbséggel, hogy a terhelés felőli oldal végén csökkenő meredekségűek lesznek.

A számolt tapadási feszültség – megcsúszás diagram a bordázott betonacélhoz hasonlóan nagy szórást mutat.

5.3.2 A betét megfolyása

Ebben a fejezetben a próbatest mentén teljes hosszon beágyazott betétekkel elvégzett kísérletek eredményeit mutatom be.

Huzal

A teljes hosszon beágyazva a tönkremenetel során egy szép vékony kúp alakú repedéskép rajzolódott ki a feszítőhuzal körül. A terhelésnél ébredő normálfeszültség – terhelő elmozdulás diagram jelentősen eltér a rövidebb beágyazási hossz esetéhez képest, először nemlineárisan emelkedik, majd a folyáshatár elérése után az acél posztkritikus viselkedésének megfelelő meredekséggel emelkedik lineárisan tovább. Nincsen meg az adhézió teljes hosszon történő hirtelen felszakadása. Az adhézió progresszívan ment tönkre a terhelés oldala felől befelé haladva, ahol már felszakadt ott a súrlódás jelentett ellenállást. Nem ment tönkre teljes hosszon az adhéziós kapcsolat, a tönkremenetel a betét folyásával következett be. Hasonló figyelhető meg, amikor a beágyazási hossz felénél vizsgáltam a normálfeszültség alakulását a betétben, a hirtelen változás helyett egy nemlineárisan emelkedő görbét kaptam.

A betét abszolút elmozdulását a tengely mentén ábrázolva látszik, hogy 0,40mm-es terhelő elmozdulás esetén az adhézió ~175mm mélyen ment tönkre a beágyazás tengelye mentén, a fennmaradó 200mm-en szinte nem történt elmozdulás. Ezzel jó összhangban vannak a beágyazás mentén ábrázolt normálfeszültségek a betétben, 0,40mm-es terhelő elmozdulásnál 200mm-ig zérusnak tekinthető a feszültség a feszítőhuzalban. Ahogyan növekszik a terhelés, egyre nagyobb hosszon szakad fel az adhézió, 2mm-es terhelő elmozdulásnál már a teljes tönkrement, és már csak a súrlódás tart ellen a terhelésnek. A betét terhelés közben megfolyt, így a kívánt célt sikerült elérni.

A számolt tapadási feszültség – megcsúszás diagram esetében az látszik, hogy kis elmozdulásoknál tönkrement az adhézió, ez egy egészen nagy ellenállást eredményezett, majd a maradó ellenállást csak a súrlódás okozta. A rövidebb beágyazási hosszon elvégzett modell eredményeiből számolt görbéhez viszonyítva olyan, hogy azzal a görbével csak a viselkedés elejét sikerült leírni, viszont ezzel a modellel sikerült a nagyobb elmozdulások zónáját is felrajzolni.

Bordázott betonacél

Már a repedésképen is látszik, hogy igen nagy a kihúzóerős ellenállása ennek a betétnek, egy nagy kúp alakú repedés alakult kis a beágyazási hossz körülbelül a felétől kiindulva. A

terhelésnél ébredő normálfeszültség a betétben – terhelő elmozdulás diagram szép viselkedést mutat, a betét probléma nélkül megfolyt. A felszálló ága enyhe nemlinearitást mutat, ugyanaz látható a betét szabad végétől mérve 260mm-nél, a betétben a feszültség közel lineáris módon emelkedik.

A beágyazási hossz mentén ábrázolva a betét abszolút elmozdulásait, illetve különböző terhelő elmozduláshoz a normálfeszültségeket, látszik, hogy a betét igen nagy tapadási ellenállással rendelkezik. A huzalhoz képest itt nem futott végig a feszültség a betétben, a megfolyás pillanatában még csak a beágyazási hossz felénél történt megcsúszás, illetve feszültségnövekedés. Egyre növelve a terhelést a tapadásban aktivizálódott szakasz nem növekedett jelentősen, a betét befeszült a betonba, inkább a mereedség növekedett.

A számolt tapadási feszültség – megcsúszás diagram szintén tartalmaz zavaros pontokat, azonban, ha megnézzük, a zajt okozó kis értékű pontokat elhagyva hasonló összefüggést kapunk, mint a rövidebb beágyazási hossz esetén egy alsó burkoló görbét felrajzolva.

Héteres pászma

A kialakult repedéskép a hasonlít a feszítőhuzalnál kialakulthoz, azzal a különbséggel, hogy nagyobb a kiterjedése a mechanikus tapadás okozta feszítőhatás miatt.

A terhelésnél lévő normálfeszültség – terhelő elmozdulás diagram felosztható egy lineáris szakaszra a folyáshatár elérésig, és a folyáshatár elérése után egy kisebb mereedségű lineáris szakaszra. A beágyazás egy középső pontját vizsgálva ugyanez figyelhető meg, azzal a különbséggel, hogy itt nem folyik meg a betét, csak a felszálló ág látható.

Érdekes módon a betét abszolút elmozdulásait a tengely mentén ábrázolva a többi diagramtól eltérően egy majdnem lineárisnak tekinthető görbét kaptam. Ez azzal magyarázható, hogy a vizsgált 0.12mm-es terhelő elmozdulásnál a betét még nem feszült neki a betonnak.

A betétben ébredő normálfeszültségeket a beágyazás hossza mentén ábrázolva az látható, hogy az utolsó 50mm -es szakaszon nem szakadt fel az adhézió, nem fut végig a feszültség. A fennmaradó szakaszon egyre nagyobb mereedségű görbéket lehet látni. A bordázott betéthez képest nagyobb hosszra volt szükség a tapadási ellenálláshoz, míg a huzalhoz képest nem kellett a teljes hosszon mobilizálnia a tapadásnak.

A számolt tapadási feszültség megcsúszás diagram itt is nagymértékű szórást tartalmaz.

5.3.3 Az eredmények összevetése analitikus modellekkel

Az 5.1-es pontban kifejtettem, hogy csak a tapadási szilárdság eléréséig tudtam vizsgálni a jelenséget, így az analitikus modelleknél a felszálló ágat hasonlítottam össze a numerikus eredményekkel.

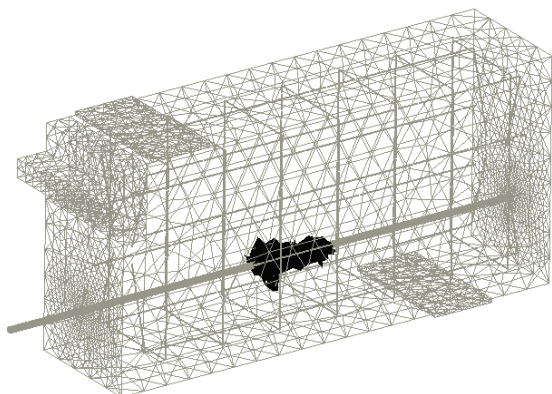
A 3.1-es pontban bemutatott képletet használtam:

$$\tau = \tau_b \left(\frac{s}{s_b} \right)^\alpha, \quad \text{pászma esetén:} \quad \alpha = \frac{\ln(P_{0.25}/P_{2.5})}{\ln(0.1)} = \frac{\ln(64.92\text{MPa}/82.89\text{MPa})}{\ln(0.1)} = 0.1061$$

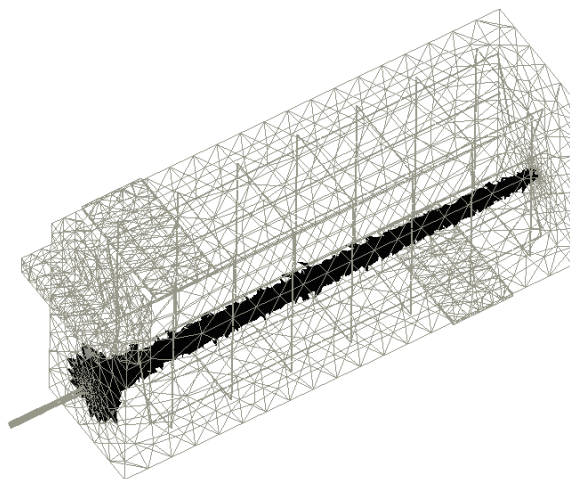
Ebből a görbékét a számolt tapadási feszültség – megcsúszás diagramokba berajzoltam (46-49. ábra), a bordázott acélbetét és a pászma esetén is. Bordázott betonacél esetén 10 és 6,38 MPa tapadási szilárdság értékkel számoltam, az ehhez tartozó megcsúszást 0,024mm, illetve 0.067mm-re vettem föl a rövidebb és a hosszabb beágyazási hosszánál. α -t 0.4-nek adtam meg. Pászma esetére a rövidebb beágyazási hosszánál 3.54 MPa-t, és 0,0041mm-t, a hosszabb beágyazási hosszánál 12 MPa-t és 0,04mm-t adtam meg tapadási szilárdság, és a hozzá tartozó megcsúszás értéknek.

Az ilyen módon előállított ábrákon az látszik, hogy habár az analitikus függvények le tudják írni az eredményt, a numerikus eredmények esetén a tapadási feszültség alakulása a lokális hatások miatt sokkal inkább ingadozóbb, nagyobb eltéréseket lehet tapasztalni. Ez arra enged következtetni, hogy az analitikus modell nem tökéletes, lehetne még finomítani.

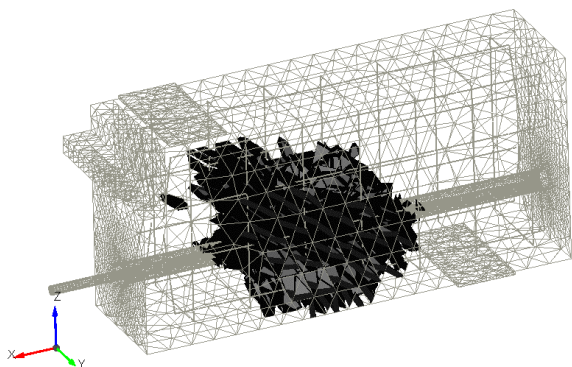
5.4 Eredmények a feldolgozás után



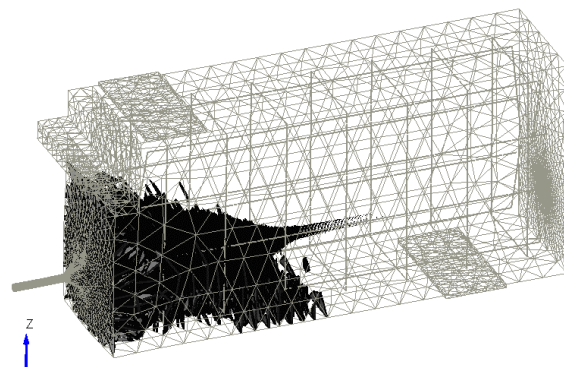
38. ábra: A betonban kialakult repedések a kapcsolat tönkremenetele után feszítőhuzal esetén



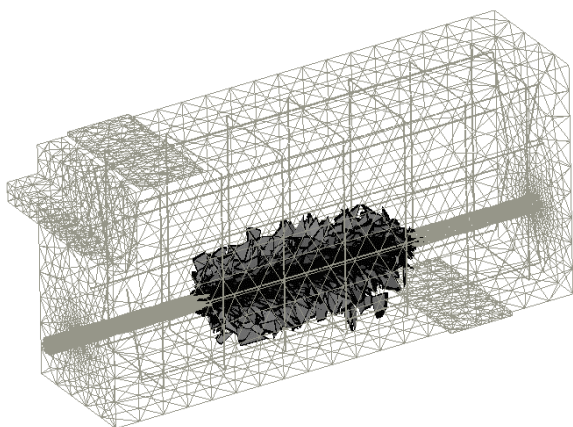
37. ábra: A betonban kialakult repedések a betét megfolyása után feszítőhuzal esetén



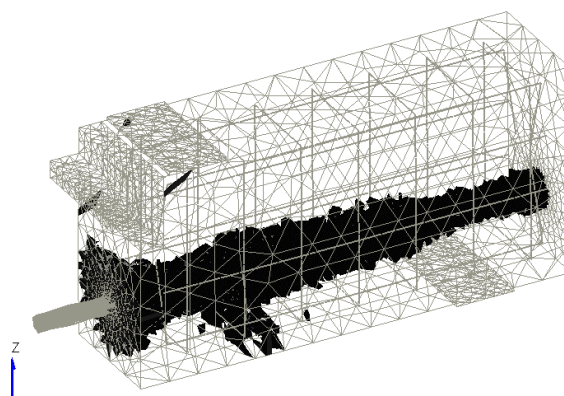
40. ábra: A betonban kialakult repedések a kapcsolat tönkremenetele után bordázott betonacél esetén



36. ábra: A betonban kialakult repedések a betét megfolyása után bordázott betonacél esetén

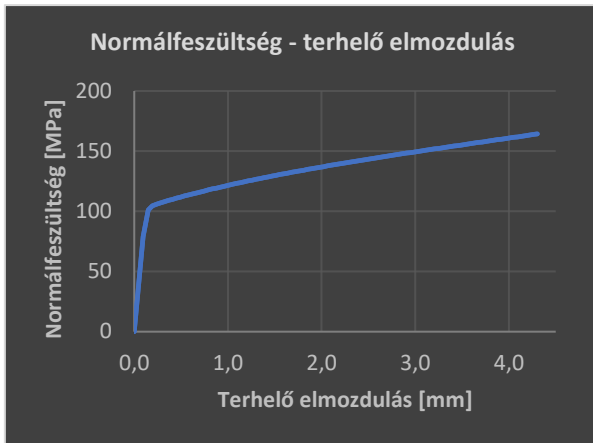


41. ábra: A betonban kialakult repedések a kapcsolat tönkremenetele után héteres pászma esetén

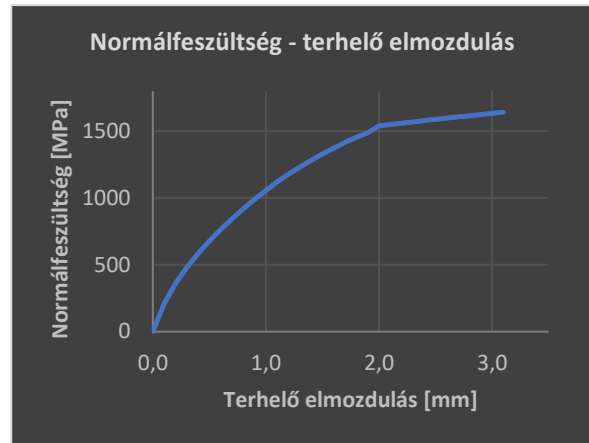


39. ábra: A betonban kialakult repedések a betét megfolyása után héteres pászma esetén

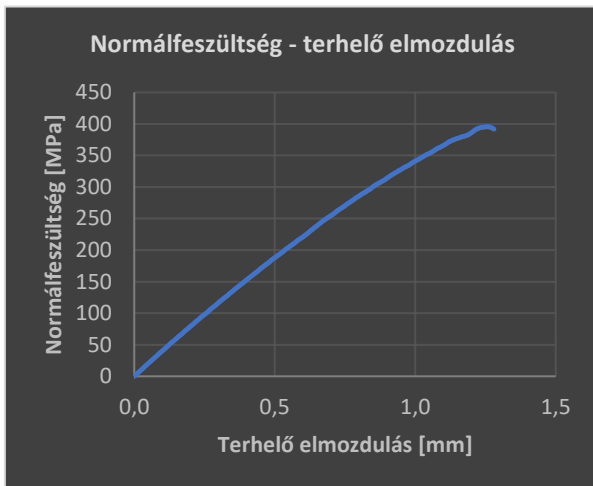
Betétben ébredő normál feszültség a terhelésnél – terhelő elmozdulás diagramok



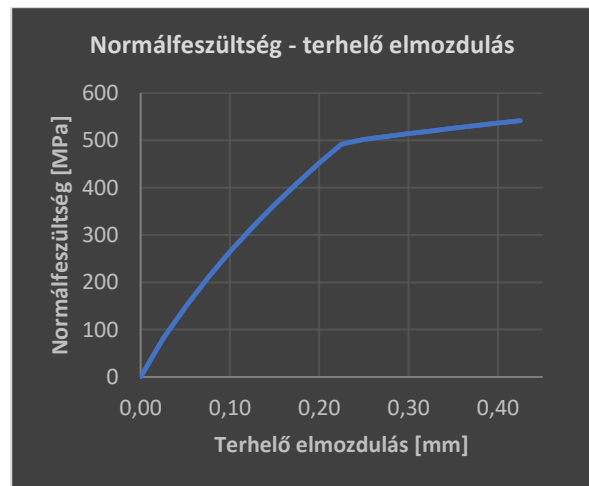
8. Diagram: Terhelésnél ébredő feszültség a feszítőhuzalban – terhelő elmozdulás diagram



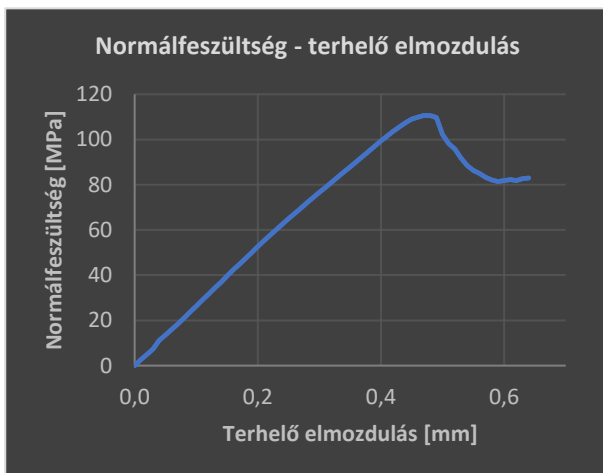
7. Diagram: Terhelésnél ébredő feszültség a feszítőhuzalban – terhelő elmozdulás diagram, teljes hosszön beágyazva



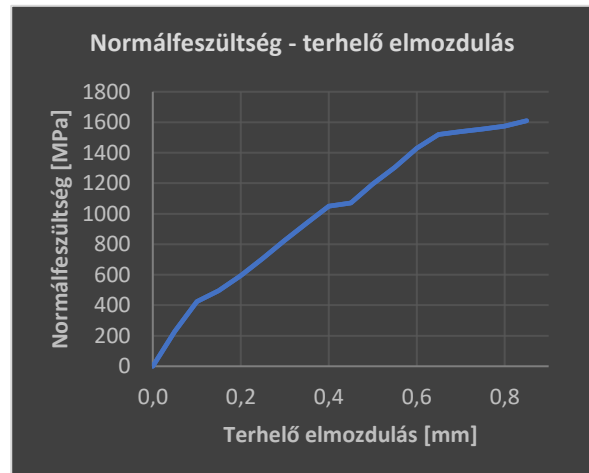
5. Diagram: Terhelésnél ébredő feszültség a bordázott betonacélban – terhelő elmozdulás diagram



6. Diagram: Terhelésnél ébredő feszültség a bordázott betonacélban – terhelő elmozdulás diagram, teljes hosszön beágyazva

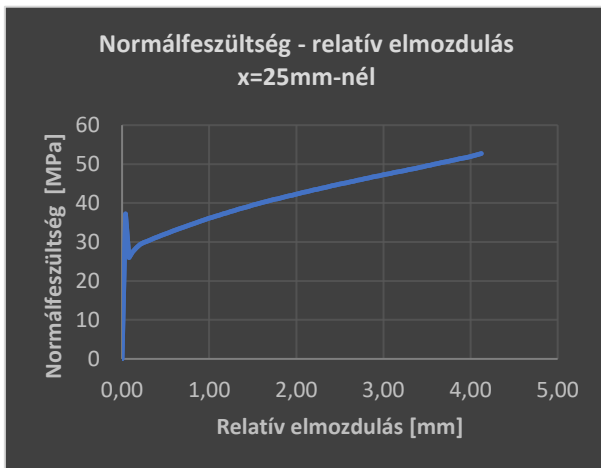


3. Diagram: Terhelésnél ébredő feszültség a héteres pázmában – terhelő elmozdulás diagram

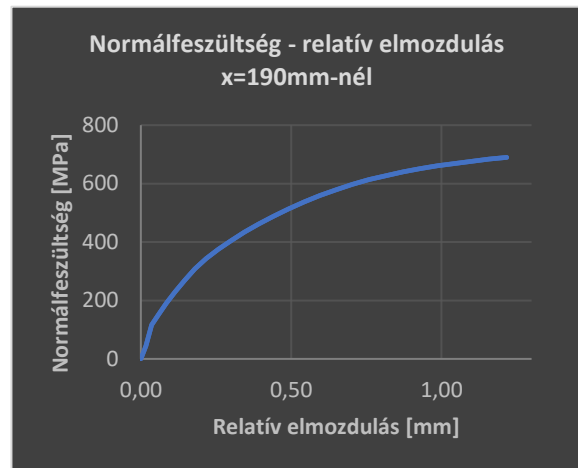


4. Diagram: Terhelésnél ébredő feszültség a héteres pázmában – terhelő elmozdulás diagram, teljes hosszön beágyazva

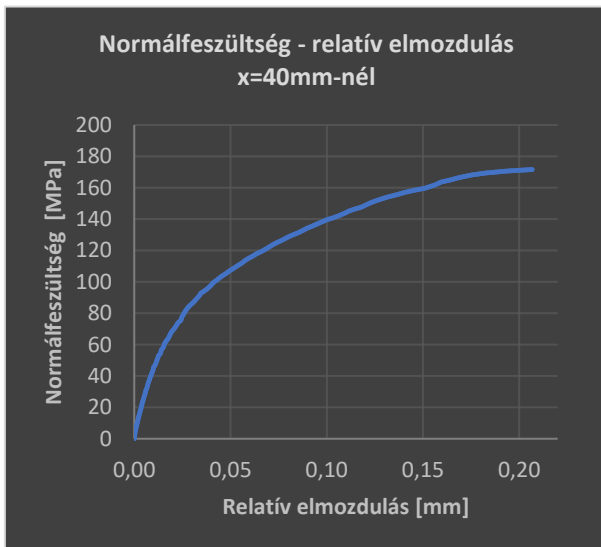
Egy pontban vett betétbenben ébredő normál feszültség – relatív elmozdulás diagramok



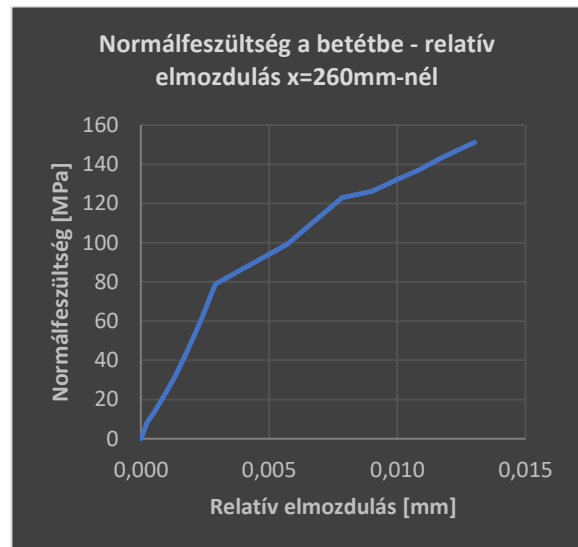
11. Diagram: Normál feszültség a feszítőhuzalban-relatív elmozdulás diagram a beágyazás $x=25\text{mm}$ -nél



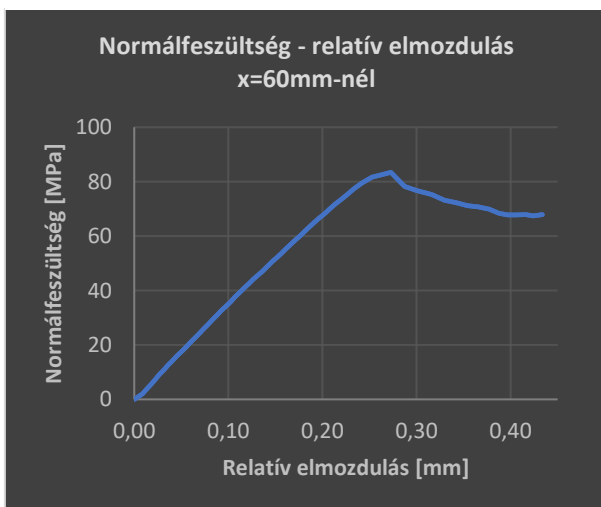
14. Diagram: Normál feszültség a feszítőhuzalban-relatív elmozdulás diagram a beágyazás $x=190\text{mm}$ -nél



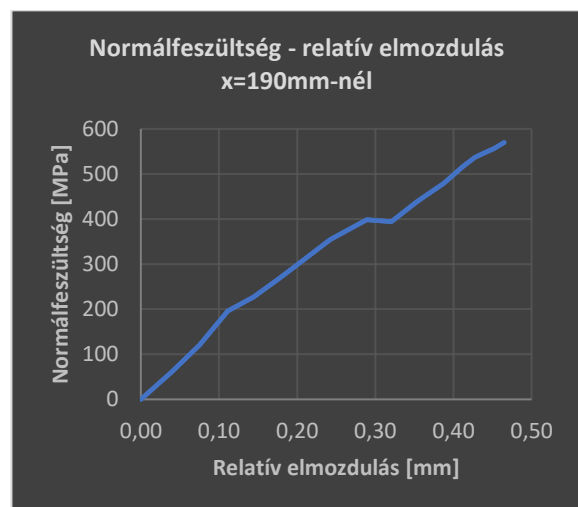
13. Diagram: Normál feszültség a bordázott betonacélban-relatív elmozdulás diagram a beágyazás $x=40\text{mm}$ -nél



12. Diagram: Normál feszültség a héteres pázmában-relatív elmozdulás diagram a beágyazás $x=260\text{mm}$ -nél

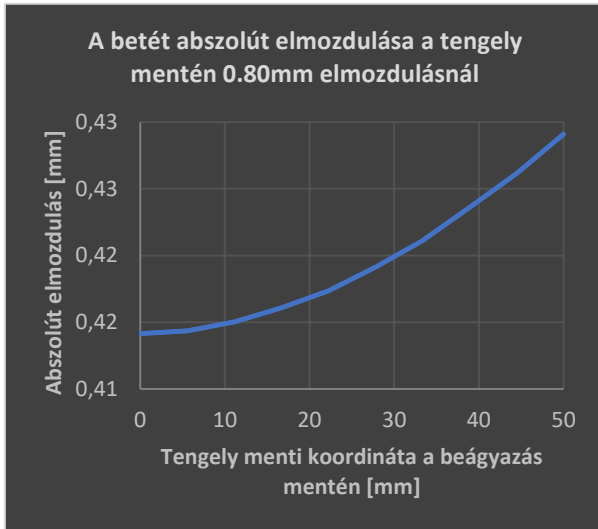


10. Diagram: Normál feszültség a héteres pázmában-relatív elmozdulás diagram a beágyazás $x=60\text{mm}$ -nél



9. Diagram: Normál feszültség a héteres pázmában-relatív elmozdulás diagram a beágyazás $x=190\text{mm}$ -nél

Beágyazás hossza mentén ábrázolt abszolút elmozdulása a betéteknek



18. Diagram: Feszítőhuzal abszolút elmozdulása a beágyazás hossza mentén 0.80mm terhelő elmozdulásnál



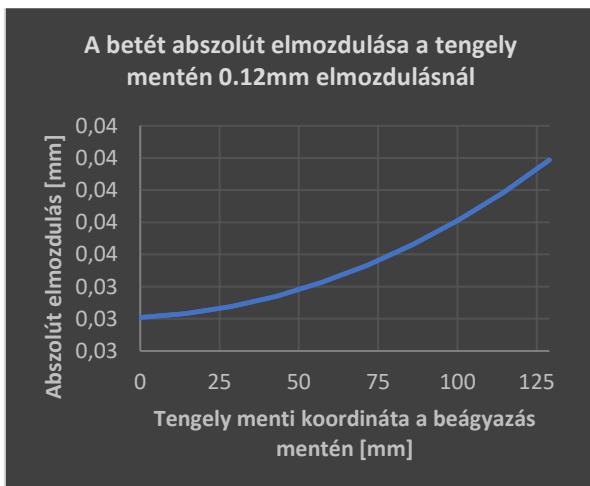
17. Diagram: Feszítőhuzal abszolút elmozdulása a beágyazás hossza mentén 0.12mm terhelő elmozdulásnál



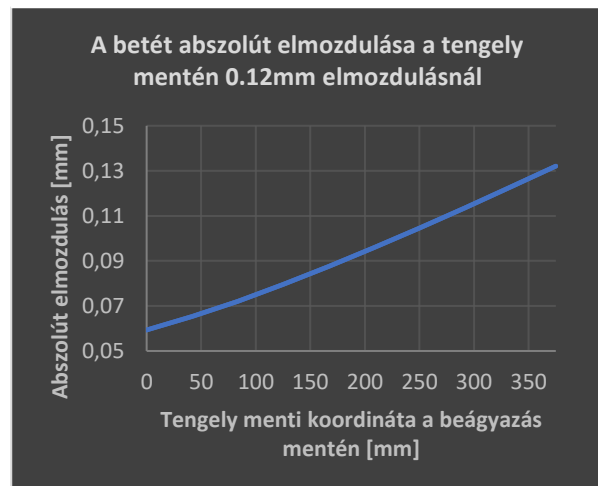
20. Diagram: Bordázott betonacél abszolút elmozdulása a beágyazás hossza mentén 0.10mm terhelő elmozdulásnál



16. Diagram: Bordázott betonacél abszolút elmozdulása a beágyazás hossza mentén 0.10mm terhelő elmozdulásnál

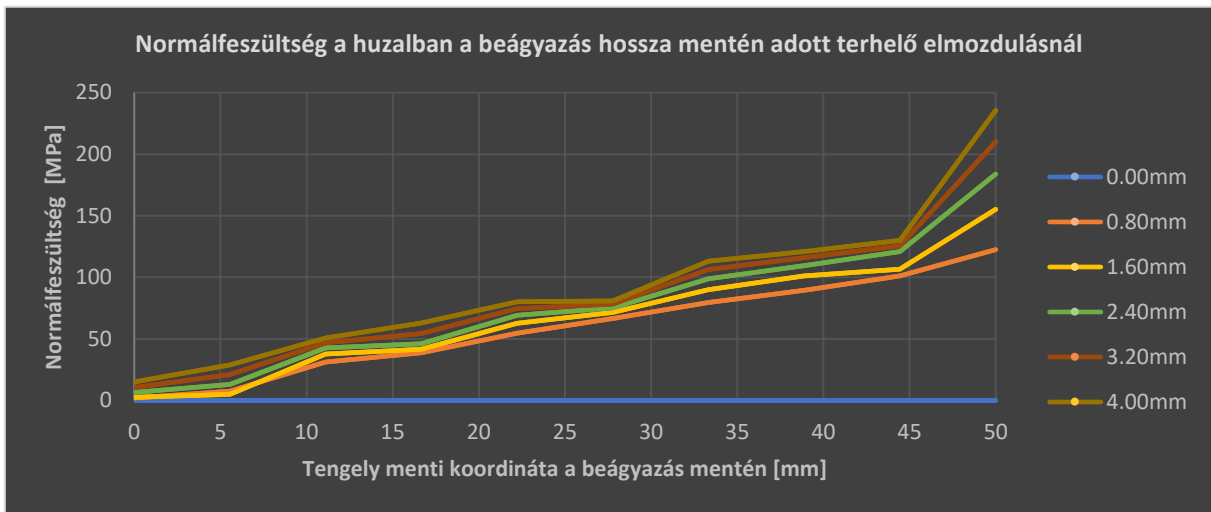


19. Diagram: Héteres pászma abszolút elmozdulása a beágyazás hossza mentén 0.12mm terhelő elmozdulásnál

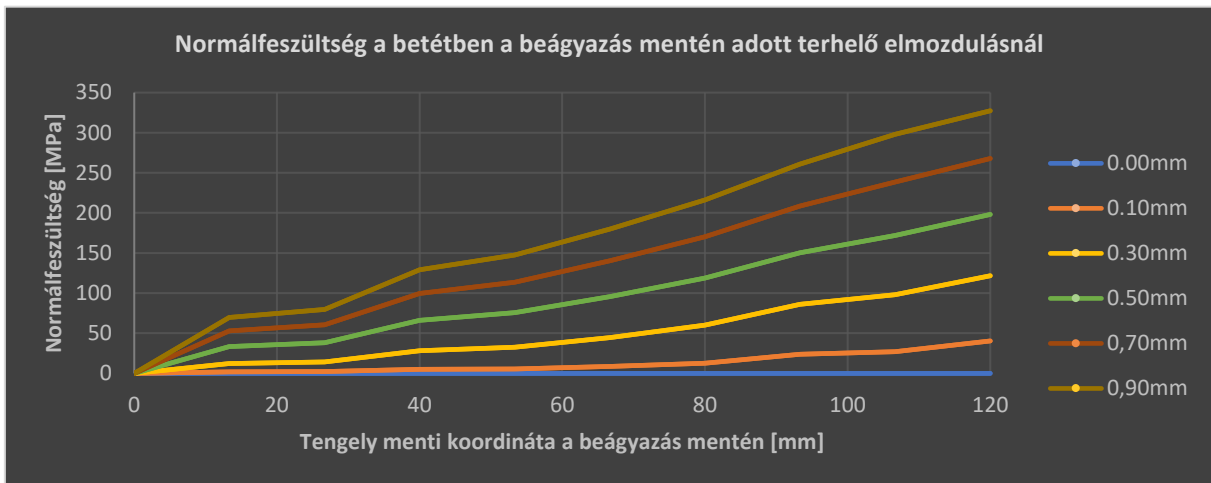


15. Diagram: Héteres pászma abszolút elmozdulása a beágyazás hossza mentén 0.12mm terhelő elmozdulásnál

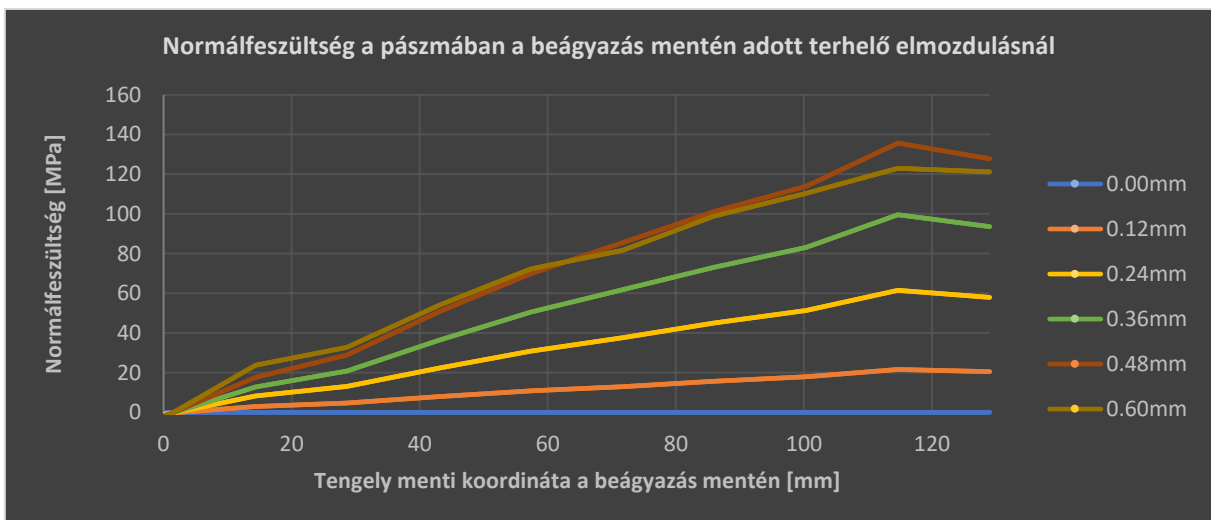
A beágyazás hossza mentén a betétben ébredő normálfeszültség diagramok



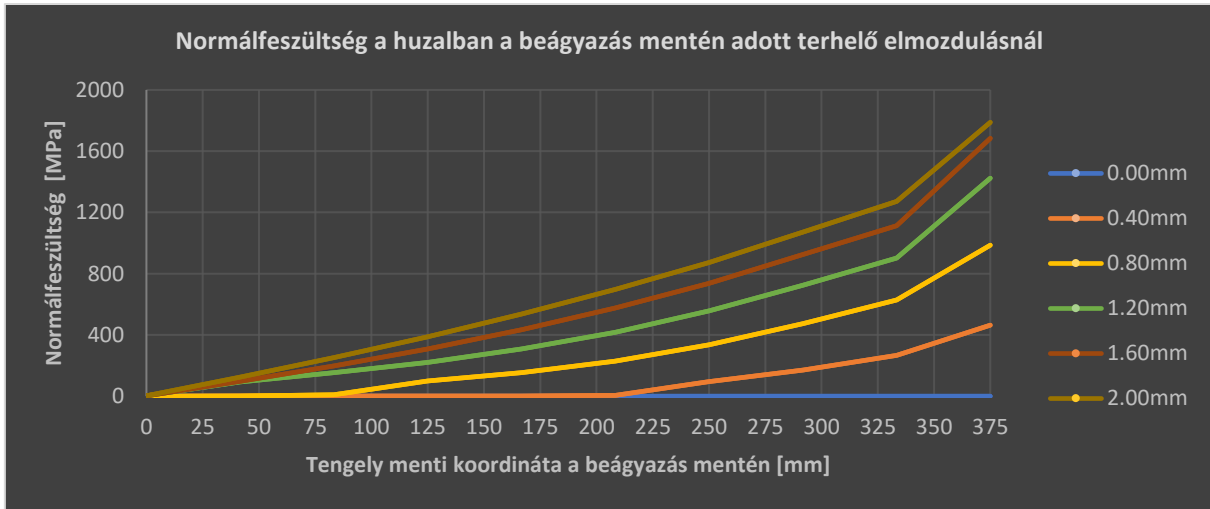
21. Diagram: Normálfeszültség a feszítőhuzalban a beágyazás hossza mentén adott terhelő elmozdulásnál



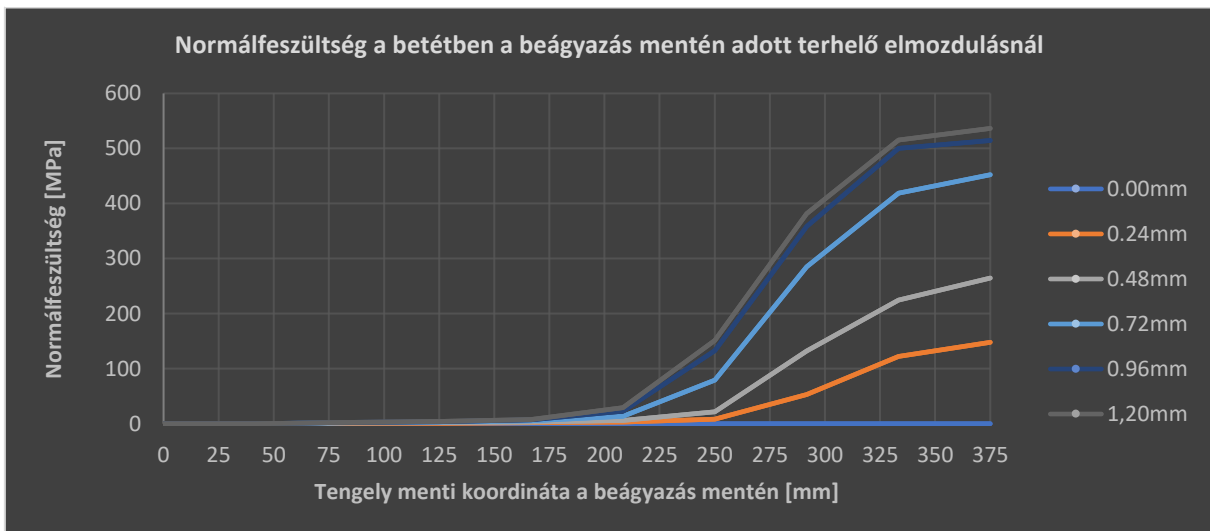
22. Diagram: Normálfeszültség a bordázott betonacélban a beágyazás hossza mentén adott terhelő elmozdulásnál



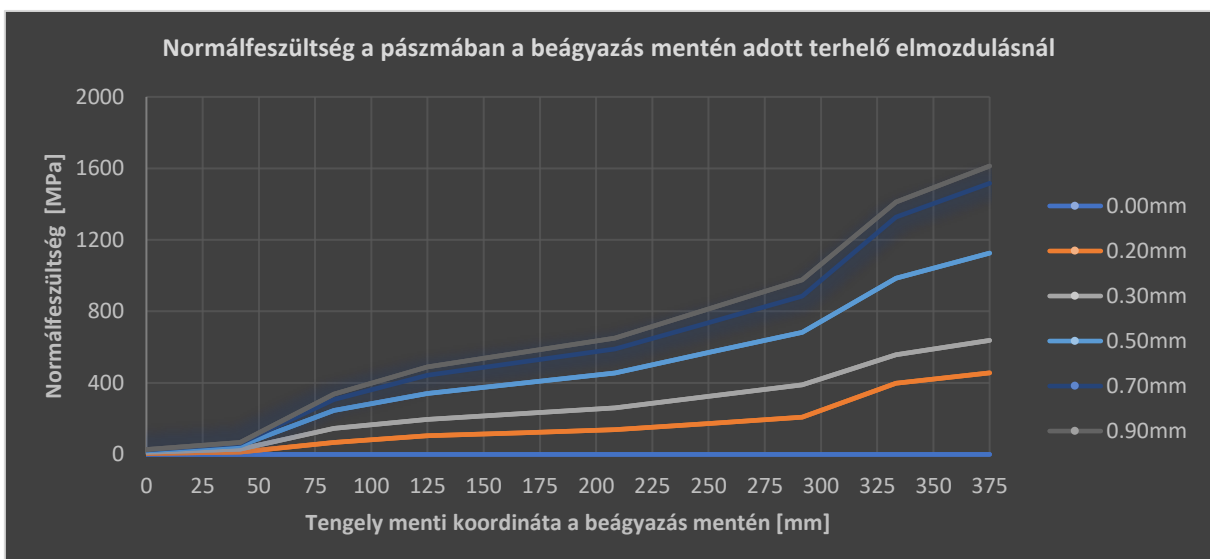
23. Diagram: Normálfeszültség a pászmában a beágyazás hossza mentén adott terhelő elmozdulásnál



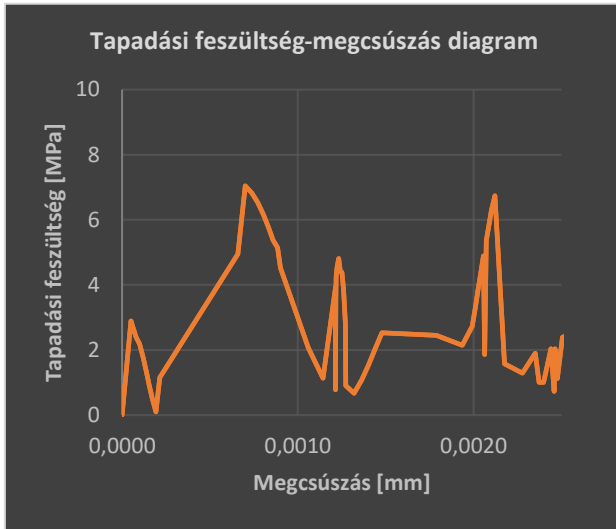
26. Diagram: Normál feszültség a feszítőhuzalban a beágyazás hossza mentén adott terhelő elmozdulásnál



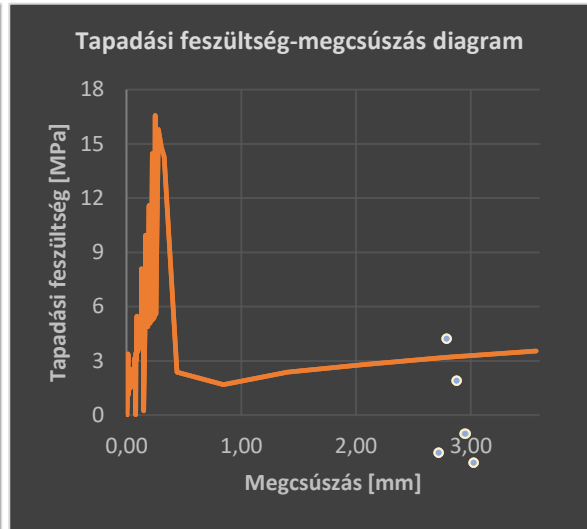
25. Diagram: Normál feszültség a bordázott betonacélban a beágyazás hossza mentén adott terhelő elmozdulásnál



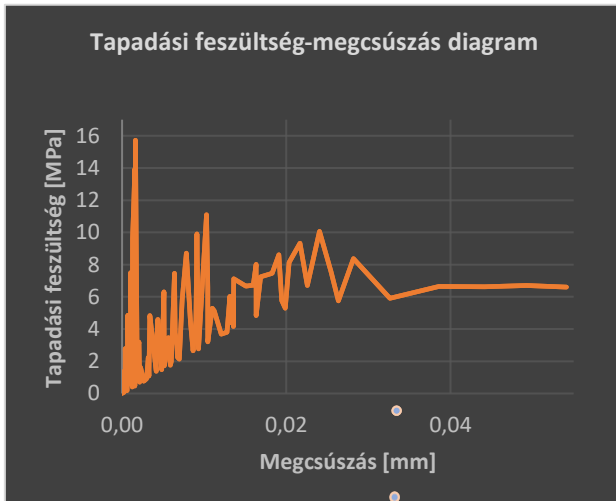
24. Diagram: Normál feszültség a héteres pászmában a beágyazás hossza mentén adott terhelő elmozdulásnál

Tapadási feszültség – megcsúszás értékek összesítve modellenként

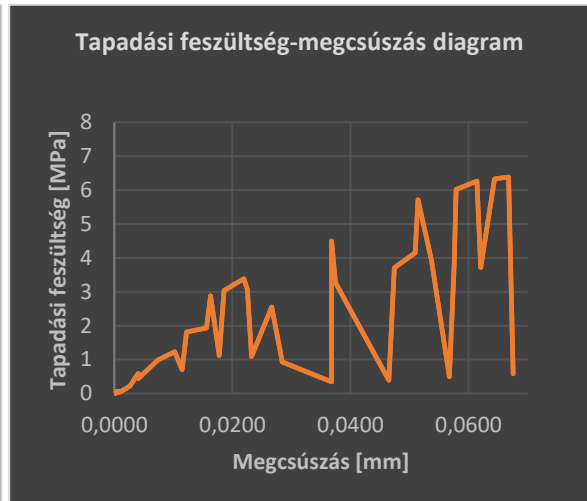
32. Diagram: Tapadási feszültség megcsúszás diagram feszítőhuzal, 50mm beágyazási hossz esetén



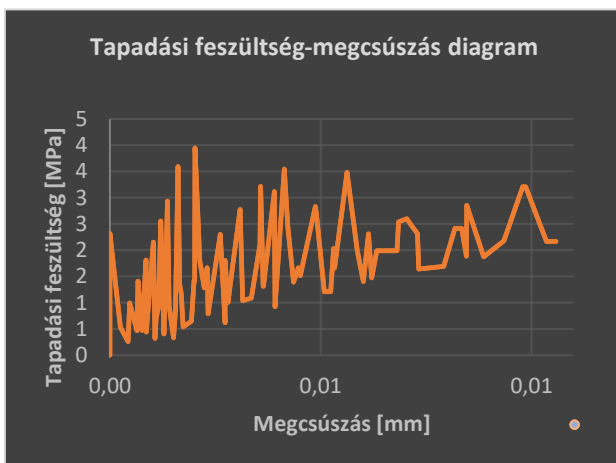
31. Diagram: Tapadási feszültség megcsúszás diagram feszítőhuzal, 375mm beágyazási hossz esetén



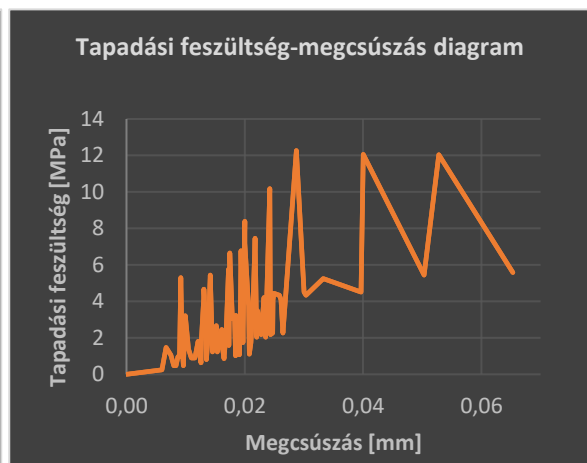
29. Diagram: Tapadási feszültség megcsúszás diagram bordázott betonacél, 80mm beágyazási hossz esetén



30. Diagram: Tapadási feszültség megcsúszás diagram bordázott betonacél, 375mm beágyazási hossz esetén

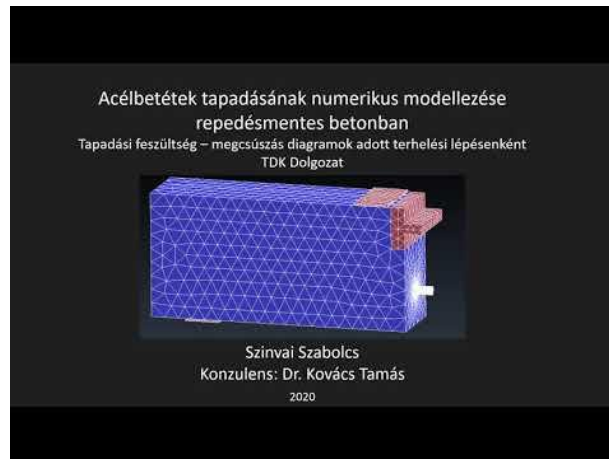


28. Diagram: Tapadási feszültség megcsúszás diagram héteres pászma, 129mm beágyazási hossz esetén

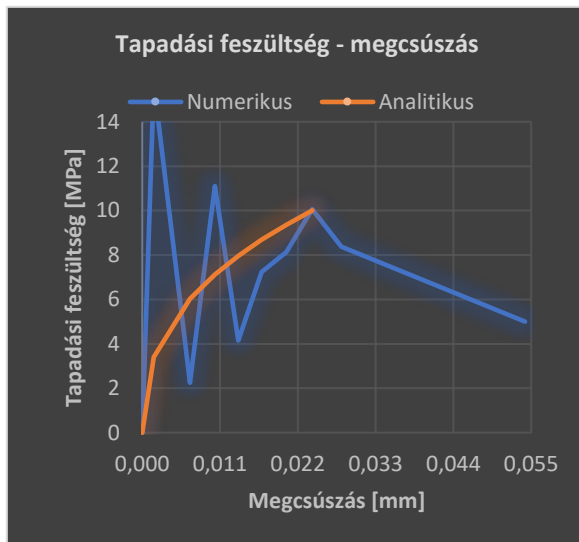


27. Diagram: Tapadási feszültség megcsúszás diagram héteres pászma, 375mm beágyazási hossz esetén

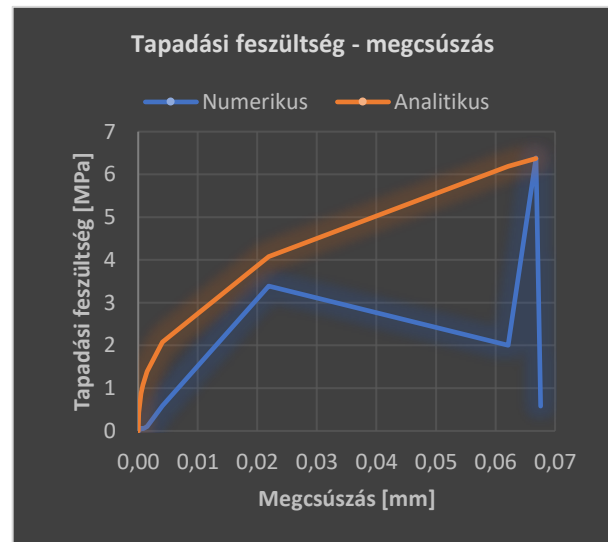
Tapadási feszültség - megcsúszás diagramok



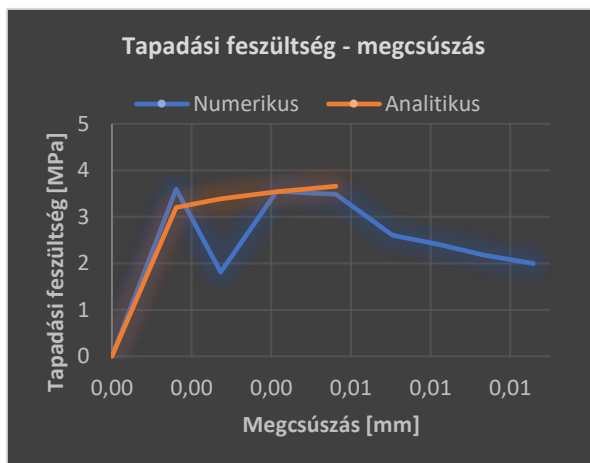
1. videó: Tapadási feszültség-megcsúszás diagramok adott terhelési lépésnél mind a 6 modell esetén



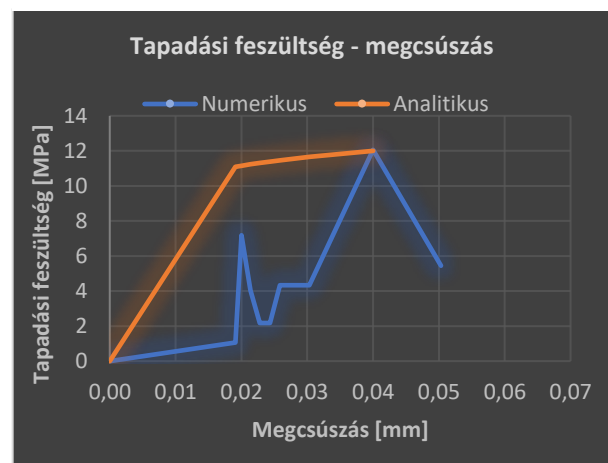
49. ábra: Tapadási feszültség-megcsúszás diagram bordázott acélbetét esetén 80mm beágyazási hosszal, a szilárdság elérésekor



48. ábra: Tapadási feszültség-megcsúszás diagram bordázott acélbetét esetén 375mm beágyazási hosszal, a szilárdság elérésekor



46. ábra: Tapadási feszültség-megcsúszás diagram héteres pászma esetén 129mm beágyazási hosszal, a szilárdság elérésekor



47. ábra: Tapadási feszültség-megcsúszás diagram héteres pászma esetén 375mm beágyazási hosszal, a szilárdság elérésekor

6. Konklúziók, összefoglalás

A dolgozatom célja az volt, hogy három, alapvetően különböző acélbetét tapadási viselkedését vizsgáljam numerikus modellek segítségével. Ehhez sikeresen előállítottam mindegyik betét precíz geometriai modelljét, a betétek felületi geometriája megfelelően közelíti a valós felületi geometriát (4.1-es pont).

Annak érdekében, hogy tudjam vizsgálni a beton és az acélbetétek közötti kapcsolat tönkremenetelét, létrehoztam a tapadási vizsgálatokhoz használt gerenda kísérlet végeसेlemes modelljét mindegyik betéttípushoz, ekkor a beágyazási hossz a betétek névleges átmérőjének tízszerese volt. Továbbá elő tudtam állítani azt az állapotot is, amikor a kísérlet a vizsgált acélbetét megfolyásával ért véget, ekkor a beágyazási hossz a próbatest teljes hosszával egyezett meg (numerikus modellek készítése a 4-es pontban). Ennek köszönhetően tudtam vizsgálni a tapadás hossz menti felépülését, és a tönkremeneteli folyamatot. A kapott eredmények azt mutatták, hogy ez a beágyazási hossz elegendő volt ennek a tönkremeneteli módnak a vizsgálatához, mindegyik acélbetét megfolyt a kísérlet során.

Bemutattam a tapadási kísérletek nemlineáris végeसेlemes analízise során fellépő jellemző problémákat, és ismertettem a hozzájuk tartozó lehetséges megoldási módszereket (5.1-es pont).

Az ilyen módon előállított eredményeket kiértékeltem, és sikerült a vizsgált tapadási jelenséget jellemző ábrákat, diagramokat létrehoznom (5.4-es pontban összefoglalva). Ezek segítségével meg tudtam magyarázni a tönkremeneteli folyamatokat, és összehasonlítottam a különböző betétek tapadási viselkedését (5.3.1 és 5.3.2-es pont). Így sikerült vizsgálnom a mechanikus tapadást, a jelenségből származó kihúzóerő ellenállást.

A definiált tapadási feszültség – megcsúszás diagramok segítségével össze tudtam vetni a numerikusan kapott eredményeket analitikus függvényekkel, a tapadási szilárdság eléréséig tartó szakaszon (5.3.3-as pont). Az eredmények alapján az látható, hogy az analitikus modell nem veszi figyelembe a lokális hatásokat, a kapcsolat tönkremenetele nem egyezik egészen a modellkódban bemutatottal, van még lehetőség tovább finomítani az összefüggést.

A bemutatott eredmények alapján elmondható (1. videó), hogy a tapadási kísérleteknél alkalmazott közelítés, a terhelő erőből számolt átlagos tapadási feszültség messze áll a valóságtól, a tapadási feszültség a beágyazás mentén nem oszlik el egyenletesen

Irodalomjegyzék

- [1] E. Hoyer. "Der Stahlsaitenbeton (piano-string-concrete)," *Otto Elsner, Berlin*, pp. 136., 1939.
- [2] J.R. Janney. "Nature of Bond in Pre-Tensioned Prestressed Concrete," *ACI Journal*, Vol. 25, pp. 717-736., No. 9. May. 1954.
- [3] T. Tate, C. Naito. „Evaluation of Bond Mechanics in Prestressed Concrete Applications”. *ATLSS Report*, No. 05-10, April 2005.
- [4] D. R. Logan. „Acceptance Criteria for Bond Quality of Strand for Pretensioned Concrete Applications”. *PCI Journal*, Vol. 42, pp. 52-90., No. 2. March-April 1997.
- [5] V. Briere, K. A. Harries, J. Kasan, C. Hager. „Dilation behavior of seven-wire prestressing strand – The Hoyer effect ”. *Construction and Building Materials*, pp. 650-659, Nov. 2012.
- [6] N.W. Hanson, P.H. Kaar, „Flexural Bond Tests of pretensioned prestressed beams”. *ACI Journal*, Vol. 55 No.7, pp. 783-802, Jan. 1959.
- [7] Szinvai Szabolcs. „*Feszítőhuzal erőátadásának numerikus vizsgálata*”, MSc Tartószerkezetek Projektfeladat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország, 2020
- [8] CSA-S806-12, „Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers”. *Canadian Standards Association*, 2012.
- [9] RILEM.RC6, „Bond test for reinforcement steel.2 Pull-out test”. *Material Structure*, 1983.
- [10] ACI Committee 440. ACI 440.3R-04, „Guide test methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures”. *Gramington Hills*, 2004.
- [11] ISO 10406-1, „Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test Methods Part 1: FRP bars and grids ”. 2014.
- [12] L. Xiaoshan, Zhang, YX., „Evaluation of bond stress-slip models for FRP reinforcing bars in concrete *Composite Structures Part B*, 2014.
- [13] S. Khalfallah, „Modeling of Bond for Pull-out Tests”. *Building Research Journal*, Vol. 56 No.1, 2008.
- [14] R. Eligehausen, „Local Bond stress slip relationship of deformed bars under generalized excitations”. 1982

- [15] Y. Fei, L. Zhiblin, Y. Mijia, „Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete”. *Elsevier Composites Part B*, pp. 56-69, May 2016.
- [16] EN 1992.1.1 2004 Design of concrete structures
- [17] C. N. Dang, R. W. Floyd, C. D. Murray, J. R. Martí-Vargas „Analysis of bond stress distribution for prestressing strand by Standard Test for Strand Bond” *Engineering Structures*, Aug. 2014.
- [18] A. Ramirez-Garcia, C. N. Dang, J. R. Mari-Vargas, „A higher- order equation for modeling strand bond in pretensioned concrete beams” *Engineering Structures*, Nov. 2016.
- [19] Y. Deng, Z. J. Ma, G. Morcouc, „Strand bond stress-slip relationship for prestressed concrete members at prestress release” *Materials and Structures*, Jan. 2015.
- [20] L. Jendele, J. Cervenka, „Finite element modeling of reinforcement with bond” *Computers&Structures*, Nov. 2006.
- [21] A. A. Arab, S. S. Badie, M. T. Manzari. „A methodological approach for finite element modeling of pretensioned concrete members at the release of pretensioning”. *Engineering Structures*, Feb. 2011.
- [22] Péter Pozsgai. „Pázmácsoport tapadásának kísérleti és numerikus vizsgálata”, MSc diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország, 2019
- [23] J. Wen-Guand, „A concise finite element model for pure bending analysis of simple wire strand”. *International Journal of Mechanical Sciences*, Jan. 2012.
- [24] Sólyom Sándor. „Bond Behaviour of FRP Bars: Influence of Bar Surface, Entrained Air and High Temperatures”, Doktori értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország, 2020
- [25] S. Johnson, „Comparison of Nonlinear Finite Element Modeling Tools for Structural Concrete”. *CEE561 Project*, University of Illinois. Dec. 2006.