



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
HIDAK ÉS SZERKEZETEK TANSZÉK

TDK DOLGOZAT

ZSALUZÓPANELES FÖDÉMRENDSZER NUMERIKUS VIZSGÁLATA

KÉSZÍTETTE: PUSKÁS GERGELY
SQCFVZ

KONZULENSEK: DR. HARIS ISTVÁN
ROSZEVÁK ZSOLT

ÖSSZEFOGLALÓ

| | |
|--------------|---|
| Feladat: | Zsaluzópaneles födémrendszer vizsgálata |
| Készítette: | Puskás Gergely |
| Konzulensek: | Dr. Haris István Roszevák Zsolt |

A TDK dolgozatom tanulmány részében röviden áttekintem a vasbeton történelmét. Bemutatom az előregyártott elemeket, itt külön beszélek a kéregzsalus födémrendszerről, különösen a LEIER Mesterpanelről. Az előregyártott elemes építésnél megemlítem a pozitívumokat és negatívumokat. Továbbá a LEIER előregyártott elemek tárolásáról, szállításáról és beépítéséről írok.

A tanulmányt követően a TDK dolgozatomban a LEIER Mesterpanel mintájára, de általam választott keresztmetszettel és vasalással vizsgálom a zsaluzópanelt numerikusan. A megfelelő anyagmodellek segítségével modellezem a szerkezetet miközben nagy hangsúlyt fektetek a monolit és az előregyártott vasbeton kapcsolatára. A kapcsolat modellezéséhez két variációt veszek számításba melyek különbsége az eltérő betonozási időpontokból adódik. A numerikus modellekkel igyekszem közelíteni a valós szerkezet viselkedését.

TDK dolgozat célja:

- Numerikus modell segítségével megvizsgálni a vasbeton kéregzsalus födémrendszereket
- Olyan anyagmodellek megválasztása melyekkel a numerikus modell jól közelíti a valós szerkezetet
- Olyan kontaktelemelek megválasztása melyekkel a numerikus modell jól közelíti a valós szerkezetet
- Módosított paraméterek segítségével további zsaluzópanelek vizsgálata

OVERALL

Object: Fromwork panel ceiling system analysis
Fabricant: Puskás Gergely
Consultants: Dr. Haris István
Roszevák Zsolt

A TDK dolgozatom tanulmány részében röviden áttekintem a vasbeton történelmét. Bemutatom az előregyártott elemeket, itt külön beszélek a kéregzsalus födémrendszerről, különösen a LEIER Mesterpanelről. Az előregyártott elemes építésnél megemlítem a pozitívumokat és negatívumokat. Továbbá a LEIER előregyártott elemek tárolásáról, szállításáról és beépítéséről írok.

A tanulmányt követően a TDK dolgozatomban a LEIER Mesterpanel mintájára, de általam választott keresztmetszettel és vasalással vizsgálom a zsaluzópanelt numerikusan. A megfelelő anyagmodellek segítségével modellezem a szerkezetet miközben nagy hangsúlyt fektetek a monolit és az előregyártott vasbeton kapcsolatára. A kapcsolat modellezéséhez két variációt veszek számításba melyek különbsége az eltérő betonozási időpontokból adódik. A numerikus modellekkel igyekszem közelíteni a valós szerkezet viselkedését.

TDK dolgozat célja:

- Numerikus modell segítségével megvizsgálni a vasbeton kéregzsalus födémrendszereket
- Olyan anyagmodellek megválasztása melyekkel a numerikus modell jól közelíti a valós szerkezetet
- Olyan kontaktelemelek megválasztása melyekkel a numerikus modell jól közelíti a valós szerkezetet
- Módosított paraméterek segítségével további zsaluzópanelek vizsgálata

Tartalomjegyzék

| | |
|---|----|
| 1, BEVEZETÉS: | 5 |
| 1.1, A VASBETON TÖRTÉNETE: | 5 |
| 1.2, ELŐREGYÁRTOTT SZERKEZETEK BEMUTATÁSA: | 7 |
| 1.3, LEIER ELŐREGYÁRTOTT ELEMÉK JELLEMZŐI: | 9 |
| 1.3.1, LEIER KÉREGFAL: | 9 |
| 1.3.2, LEIER MERSTERFÖDÉM: | 10 |
| 1.3.3, ÜREGES FÖDÉMPALLÓ: | 12 |
| 1.3.4, MESTERPANEL: | 13 |
| 2, SZAKIRODALMI KUTATÁS: | 14 |
| 2.1, Roszevák Zsolt – Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata . | 15 |
| 2.2, Bodó Pál Boldizsár – Vasbeton síklemez egyenértékű kerettel történő helyettesítése vízszintes teherre, numerikus vizsgálatok alapján..... | 16 |
| 2.3, Bogár Blanka, Blázsán Dániel – Különböző csomóponthasználati numerikus modellek hatása egyszerű előregyártott vasbeton keretváz igénybevételeire | 16 |
| 3, FELADAT BEMUTATÁSA: | 18 |
| 3.1, GEOMETRIA KIALAKÍTÁSA: | 18 |
| 3.2, VASALÁS KIALAKÍTÁSA: | 20 |
| 3.3, ANYAGMODELLEK: | 22 |
| 3.3.1, BETONACÉL ANYAGMODELL: | 22 |
| 3.3.2, ACÉLLEMEZEK ANYAGMODELL: | 22 |
| 3.3.3, BETON ANYAGMODELLEK: | 23 |
| 3.3.4, BETONOK KÖZÖTTI KAPCSOLATI ELEM: | 26 |
| 3.4, TERHEK ÉS MEGTÁMASZTÁS: | 27 |
| 3.5, VÉGESELEM HÁLÓ DEFINIÁLÁSA: | 28 |
| 4, NUMERIKUS VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI: | 28 |
| 4.1, V5 – MODELL VERZIÓ: | 29 |
| 4.2, V6 – MODELL VERZIÓ: | 33 |
| 4.3, V10 MODELL VERZIÓ: | 35 |
| 4.4, V15 MODELL VERZIÓ: | 38 |
| 4.5, V20 MODELL VERZIÓ: | 39 |
| 4.6, V22 MODELL VERZIÓ: | 42 |
| 5, ÖSSZEGZÉS: | 44 |
| 6, TOVÁBBI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK: | 46 |
| FELHASZNÁLT IRODALOM: | 47 |

FELHASZNÁLT KÉPEK:..... 47

1, BEVEZETÉS:

1.1, A VASBETON TÖRTÉNETE:

A vasbeton története nem az építőiparban kezdődik, hanem a kertészet nemes piacán 1849-ben. Egy Joseph Monier (lásd 1.ábra) nevezetű francia úriember, aki nem volt megelégedve az agyag és fa virágédényekkel, cementhabarcsból készített tárolót melyekbe dróthálót ágyazott.

Ezekben az években Joseph Louis Lambot pedig egy vasbeton csónakot készített melyet az egyik közeli kis tavon ki is próbált.



1, Joseph Monier¹

Ezen próbálkozások és az azokat követő rengeteg kísérletezés, elgondolás és próbálkozás vezetett az építőiparban most elfoglalt helyéig.²

Aki már az építés területén ért el eredményeket az Francois Coignet, aki 1861-re vasbeton tetőfedéseket és csatornákat készített, illetve épített saját magának egy vasbeton házat.

Monier 1878-ban szabadalmat kapott lemezek, boltozatok, födémek építésére. Ezen ötleteit főleg külföldön tudta értékesíteni. A sors fintorra, hogy 1906-ban egy szegényes párizsi padlásszobában hunyt el az az ember, akinek korunk egyik leginkább használt építőanyagának, a vasbetonnak, kezdeti elgondolásait köszönhetjük.

1877-ben Amerikában Thaddeus Hyatt a vasbeton tűzállóságának kutatása közben megállapította, hogy a két anyag hőtágulása azonos, illetve bebizonyította, hogy jobb, ha a húzóerőt acélbetétekkel és a nyomóerőt a betonnal vesszük fel. Ebben az időben szintén Amerikában, William E. Ward, gépészmérnök, is vasbetonnal foglalkozott, hogy felesége félelmét lecsendesítse egy tűzálló ház megalkotásával. 1875-ben Robert Mook, New Yorki

¹ Wikipédia.hu: Joseph Monier

https://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Monier#/media/File:Joseph_Monier.jpg

² Palotás László: A vasbeton elmélete (1973) p.20

építész segítségével megalkották az első teljesen vasbeton házat. Vasbetonból voltak a falak, a gerendák, a padló, a födémek stb. Fából csak az ajtók, az ablakkeretek és a lépcsőkorlát volt.³

Az egyesült államokban valószínűleg Ernest Leslie Ransome-nál kevesen tettek többet a vasbeton népszerűsítésért. Az apja Frederick Ransome találta fel Angliában az egyik első forgódobos kemencét a cementgyártáshoz. Ernest L. Ransome lett 1870-ben a Pacific Stone Company vezetője San Franciscóban. Ransome-t egyre jobban érdekelt a vasbeton és később egész Amerikát behálózóan épített vasbeton szerkezeteket. A vasbetétei négyszög keresztmetszetűek voltak és az elcsúszás ellen nem bordázatot használt, hanem csavarodó betonacél keresztmetszetet.

Ebben az időben rendkívül népszerű volt a Melan-rendszer. Itt nem köralakú acélbetéteket hanem merev vasbetétek voltak a tartóban.

1885-ben Németországban Wayss és Koenen nagyszabású hajlító kísérleteket végeztek. Itt Koenen közelítő méretezési módszert is alkalmaz. A semleges tengelyt a tartó keresztmetszetének közepén vette fel, a nyomófeszültség ábra pedig háromszögalakú.

1886-ban Amerikában Jackson szabadalmaztatta a vasbeton födémek feszítését, igaz az ő feszítése még igencsak kezdetleges, de mégis zseniális elgondolás alapján csavarokkal és csavaranyákkal történt. Az ezt követő években többen próbálkoztak az előrefeszítéssel de nem jártak sikerrel, mert nem számoltak a beton zsugorodásával és a lassú alakváltozásokkal melyek csökkentik a feszítőerőt.⁴

Egy francia mérnök François Hennebique építkezéseivel járult hozzá a vasbeton fejlődéséhez. Műszaki szemlélet alapján dolgozott és úgy vélte a semleges tengely ott található, ahol a nyomófeszültségek eredője és a húzófeszültségek nyomatéka megegyezik a külső nyomaték felével.

Oroszországban a XIX. század végén Beljelyubszkj professzor kezdett vasbetonnal foglalkozni. Rendkívül impozáns és merész épületeket hozott létre ebből az új anyagból. Így tehát ez az új anyag behálózta a világot.

1894-ben Edmund Coignet és Napoleon De Tedesco hajlított vasbetontartók laboratóriumi vizsgálataik segítségével javaslatot adnak a semleges tengely helyére és a húzó és nyomófeszültségek felvételére.

³ Palotás László: A vasbeton elmélete (1973) p.21

⁴ The Aberdeen Group: The development of reinforced concrete (1961)

1899-ben Paul Christophe kiad egy könyvet melyben Coginet-Tedesco elmélet alapján egy számítóeljárást mutat be. Ennek a számításnak köszönhetően a méretezés tudatossá vált és a vasbetonszerkezetek széleskörben elterjedhettek.⁵

1908-ban Zielenszky Szilárd (lásd. 2. ábra) a víz/cement tényező és a nyomószilárdság kapcsolatát tudományosan lefekteti. Az első magyar vasbeton szabályzat 1909-ben jelent meg.

1923-ban, Csehszlovákiában Karl Wettstein beton pallókba tett zongorahúrok megfeszítésével kísérletezett.⁶



2, Zielinski Szilárd⁷

Később ezen megoldás újragondolásával Hoyer 100m hosszú feszített vasbeton gerendákat készített. Freysinnet nagynyílású hidakat tervezett útófeszítéssel.

1.2, ELŐREGYÁRTOTT SZERKEZETEK BEMUTATÁSA:

Vasbeton szerkezeteknél megkülönböztetjük a helyszínen készített elemeket és az előre gyártott elemeket. A helyszínen készítéseket monolit vasbeton szerkezeteknek nevezzük mely görögül *monolit* „egy kőből valót” jelent. Az előre gyártott elemek között még megkülönböztetünk helyszínen előregyártottat és gyárban előregyártottat.

Mindkét gyártási módszernek vannak előnyei és hátrányai. Az épület típusa, a kivitelező képzettsége, az időjárás stb. segítenek eldönteni, hogy mikor melyik módszer a hatékonyabb vagy gazdaságosabb.

Ha egy gyárban készítjük el vasbeton elemeinket akkor biztosak lehetünk a kiváló minőségben. Az előregyártó üzemben környezeti hatásoktól mentesen, minimális mérethibákkal készülnek. Ebben az esetben a legmagasabb tűzvédelmi követelményeknek is megfelehetnek a szerkezeteink, ha erre igény van.⁸

⁵ Palotás László: A vasbeton elmélete (1973) p.26

⁶ Beton szakmai lap: XXIX. évfolyam III. szám: Asztalos István: A beton története IV. rész - Mit tett egy kevésbé ismert népcsoport a beton érdekében, még a rómaiak előtt? - 2021. június

⁷ Wikipédia.hu: Zielinski Szilárd

https://hu.wikipedia.org/wiki/Zielinski_Szil%C3%A1rd#/media/F%C3%A1jl:Zielinski_Szil%C3%A1rd.jpg

⁸ Szalai Kálmán: Vasbeton Szerkezetek (1987) p.55-56



3, Előregyártott vasbeton csarnoképület⁹

Például csarnok építésnél (lásd. 3. és 4. ábra) a sok ismétlődő, egymással megegyező vagy közel megegyező elemek üzemben történő gyártása igencsak meggyorsítja az építkezés menetét. Továbbá azt a minőséget és pontosságot helyszínen csak megfelelő szakemberekkel lehet megközelíteni, elérni nem.

Az előregyártó üzemekben rendszerint magasabb betonszilárdsággal dolgoznak, így az előregyártott elemeink méretei kisebbek lehetnek a monolitokénál. Az építkezéseken használt vibrátorok helyett itt nagyobb hatékonyságú vibrálóasztal segítségével tömörítik a vasbeton elemeket.



4, Előregyártott vasbeton pillér-gerenda kapcsolat¹⁰

Előregyártás esetén az egyik probléma, amellyel szembe kell néznünk, az elkészült elemek szállítása. Ez nem csak annyiban befolyásolja az előregyártott szerkezetünket, hogy felső korlátot ad a geometriai méretének. Ha az elem nem a rendeltetési helyén készül, akkor figyelembe kell vennünk az utaztatásán, mozgatásán kívül az ideglenes tárolását is. Szállítás, mozgatás és tárolás közben rendeltetésétől eltérő igénybevételeknek kell kitenünk az elemünket.¹¹

⁹ Saját fotó: Unilever hidegraktár - Nyírbátor, 2021

¹⁰ ua.

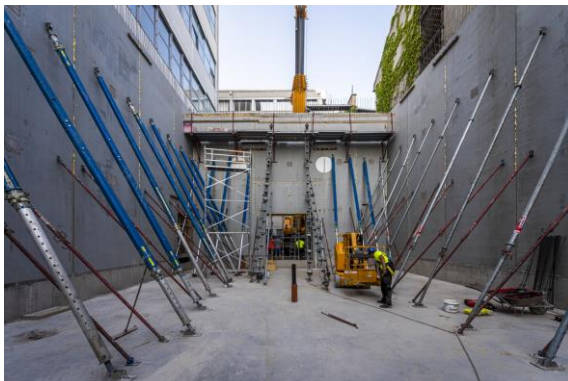
¹¹ Bogár Blanka, Blázsán Dániel – Különböző csomópontú numerikus modellek hatása egyszerű előregyártott vasbeton keretváz igénybevételeire (2019) p.1-2

Ezekre a hatásokra fel kell készülnünk megfelelő vasalás betervezésével. Ezt azonban csak akkor tudjuk megtenni, ha pontosan tudjuk, hogy a szállítás hol okoz majd húzást, hol nyomást a tartókban. Ezért szigorú szabályokat kell meghatároznunk az elemek mozgására, utaztatására és tárolására egyaránt.

A szállítás és tárolás nehézségei után a beépítésnél megtérül a fent említett fáradtság. Ezen elemeknél vagy nincs szükség, vagy csak minimális szükség van zsaluzásra. A zsaluzás elhagyásával rengeteget nyerünk, a zsaluzat bérlésén, amely az utóbbi idő építőiparában jelentős költség, illetve nem kell élőmunka a zsaluzat össze- és szétszerelésére. A minimális élőmunka a jelen építőiparban hatalmas előnye az előregyártott elemeknek. Az élőmunka folyamatosan drágul az építőiparban is. De egyre többet építkezünk így a megfelelő szakemberekre rengeteget kell várni. Így rosszabb minőséggel kell megelégednie annak, aki tartani akarja a határidőt.

1.3, LEIER ELŐREGYÁRTOTT ELEMÉK JELLEMZŐI:

1.3.1, LEIER KÉREGFAL:



5, Leier kéregfal¹²

A kétoldali vasbeton kéreg vastagsága oldalanként 5-7cm. A kialakítható falvastagság 18-40cm. A legnagyobb elemméret 8x3m. A kéregfalak beépíthetők egy vagy többemeletes családiházakba, illetve ipari, kereskedelmi, mezőgazdasági célú épületekbe.

A kéregfal panelek egyedigyártásúak és testreszabhatóságuk sokféle.

A gépész, villamos és egyéb áttöréseket már a gyárban fel tudják vezetni a falakra ez a helyszíni monolitrészek csökkentésével járhat, cserébe kevesebb lehetőséget ad utólagos áttörések felvezetésére.¹³

A falpanelek tökéletesen igazodnak a kéregpaneles födémekhez. Így együtt dolgoztatásuk merev szerkezetet eredményez. A falsarkoknál a kapcsolat kengyelkosarak segítségével jön létre melyeket a falelemekkel együtt készítenek és szállítanak. A falpanelek helyét ki kell

¹² Leier.hu: Leier kéregfal LKF <https://www.leier.hu/leier-kerregfal-lkf>

¹³ Leier: Előregyártott betonelemek, alkalmazástechnika és tervezési segédlet p.5-18

tüskézni az alaplemezből. A panelek között 1cm-es hézagok kerülnek kialakításra, a helyszíni beton megkötéséig (betonozás után 9-14 nap) meg kell támasztani a falat 2/3 magasságában (lásd. 5. ábra). Minden panelt legalább 2 ponton kell megtámasztani.

A kitöltő beton minőségénél fontos előírás, hogy a legnagyobb szemcseméret 16mm és a konzisztencia F3. 50cm fal magasság kibetonozása után tömörítésre van szükség. A belső kéreg felső síkja alatt 30cm-el kell a betonozást abbahagyni, és elhelyezni a következő szint falainak kitüskézését.

A daruzásnál 8m/s szélesebbég már kizáró ok lehet. Elemenként minimum 2db emelőfület el kell helyezni (lásd. 6. ábra)., 5 tonna felett javasolt ezt duplázni A fal felső éle és a kötél által bezárt szög minimum 60° kell legyen.¹⁴



6, Leier kéregfal daruzása¹⁵

Az emelőkampókat függőlegesen javasolt 30cm-el a fal felső síkjától elhelyezni. A vízszintes pozíciójuk a súlypont helyzetétől függ.

A falpanelek szállításánál az elemeket szorosan egymásmellé szállítókeretekbe kell helyezni és rögzítő csapokkal biztosítani. A jármű platójának közel síknak kell lennie, tehát 6méterenként maximum 25cm egyenlőtlenség lehet benne. A panelek maximális hossza kb. 16m-re tehető, míg a szállítási magasság 4m-ben van korlátozva. De a 3m-nél magasabb paneleket fektetve szabad csak szállítani.¹⁶

1.3.2, LEIER MERSTERFÖDÉM:

A födém 3 részből áll, vasbeton mestergerendák között függesztett beton béléstestek helyezkednek el (lásd. 7. ábra) és az egészre kerül még 4-11cm helyszíni felbeton. A gerendákban alul két hidegen húzott, felül egy simafelületű betonacél található. A gerendarács magassága 15cm vagy 19 cm. Kétféle szélességben készülnek a gerendák és ennek nem gyakorlati az oka, hanem földrajzi. A jánossomorjai üzemben a gerendák 12,5cm szélesek míg a pécsi üzemben 11cm szélesek. A gerendák 20cm-es méretlépcsőben 2,0-9,2m-ig rendelhetőek. 680cm-es gerendahosszig minimum 10cm feltámaszkodást kell biztosítani.

¹⁴ Leier: Előregyártott betonelemek, alkalmazástechnika és tervezési segédlet p.5-18

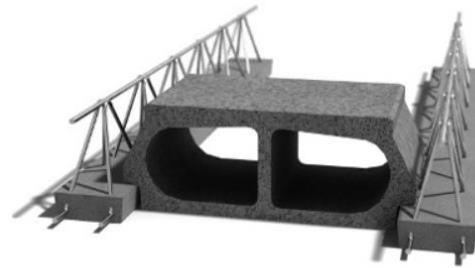
¹⁵ Leier.hu: Leier kéregfal LKF <https://www.leier.hu/leier-keregfal-lkf>

¹⁶ Leier: Előregyártott betonelemek, alkalmazástechnika és tervezési segédlet p.5-18

700cm-es hosszától minimum 15cm-es feltámaszkodásra van szükség és a gerendákat kettőzve kell elhelyezni.¹⁷

A födémgerendákat be kell kötni a koszorúba. Ezek a betonvasak veszik fel a támasznál a részleges befogásból adódó nyomatókakat. A bekötővasak a támaszköz 1/6-ával lógnak be a födémmezőbe.

A gerendák együttdolgoztatása érdekében a béléstestek fölé 4-6cm felbeton készül melybe egy hálós vasalás kerül elhelyezésre. Továbbá, ha a falköz mérete nagyobb, mint 6m akkor keresztgerendákat kell elhelyezni a födémbe. Egy béléstest szélességű legalább 4db $\phi 12$ -es vasalású gerenda, amely egy sor béléstest helyére kerül. A helyszíni betonok minimális betonminősége C20/25.



7, Mesterfödém¹⁸

A födém áttöréseit célszerű a béléstest sávok helyére választani. Ha ez nem megoldható akkor az áttörés mentén az előregyártott gerendákat ki kell váltani áttörést szegélyező monolit gerendákkal. Ezen kiváltó gerendák hossza nem lehet több mint 2,00m.¹⁹

A födémre kerülő válaszfalak esetén a gerendákkal párhuzamos válaszfalak alatt gerendakettőzésre van szükség. A válaszfalak pozíciója később nem módosítható.

A födémgerendákat alátétfákra kell rögzíteni szállítás és tárolás során. A megtámasztások távolsága maximum 2m lehet. Egymás fölé legfeljebb 10 sor kerülhet. Fontos, hogy az alátétfák egymás fölött helyezkedjenek el és hegesztési csomópontra üljenek. A gerendák kis tömegének köszönhetően akár kézzel is mozgathatóak, nincs szükség daruzásra.

Beépítés előtt a gerendák alá támasztó állványzatot kell készíteni. A megtámasztások nem lehetnek egymástól 1,6m-nél távolabb. Az alátámasztási vonalak közepén a gerendákat a fesztáv 1/300-ad részével túl kell emelni. A gerendák közvetlenül a falra ülhetnek fel, alájuk csak egy 1cm vastag cement-habarc s ágyazat kerül az egyletes felfekvés biztosítására.²⁰

¹⁷ Leier: Előregyártott betonelemek, alkalmazástechnika és tervezési segédlet p.79-90

¹⁸ Leier.hu: Mesterfödém <https://www.leier.hu/mesterfodem-mesterfodem>

¹⁹ Leier: Előregyártott betonelemek, alkalmazástechnika és tervezési segédlet p.79-90

²⁰ uo. p.92

1.3.3, ÜREGES FÖDÉMPALLÓ:

Nagyobb fesztávokhoz javasolt födémrendszer (lásd. 8. ábra), mely felbeton nélkül viseli a terheit. A födempallók 16-50cm között összesen 7 féle típus vastagságban érhetőek el. A pallók szélessége 1,2m és 3,5m-től egészen 23,5m támaszközig alkalmazhatóak. A pallók betonminősége C40/50 és C50/60.



8, Üreges födempallók²¹

A panelek közé 1-2cm-es hézagot kell biztosítani melyekbe hézagvasalást kell elhelyezni. A panelek felfekvésénél szükség van egy teherelosztó sáv kialakítására és a felfekvés a fesztáv 1/100-ad része, de semmiképp sem lehet kevesebb mint 80-150mm. Hogy pontosan mennyi az a palló típusától függ.²²

Közvetlenül a pallók alá neoprén csík kerül. A koszorúk olyan magasak, mint a pallók és a pallók közötti vasalás a koszorú hosszvasait körül hurkolva köti be a pallókat. A koszorút ebben az esetben külön kengyelezéssel is el kell látni.

A pallók úgy lettek kialakítva, hogy a kéregfallal tökéletesen összeépíthetőek legyenek, illetve összeépíthető a mesterpanellekkel is! Minden esetben a födémáttöréseket a gyártásnál kell kialakítani. Utólagosan nem hozható létre födémáttörés.

Acél teherelosztó gerendákon történhet csak a szállítás. Csak a tervezett beépítéssel megegyező pozícióban és megtámasztásokkal szabad szállítani. A pallókat maximum 8 sorban lehet elhelyezni és a legalsó palló és talajszint között legalább 20cm-t kell biztosítani. Így, ha a palló tárolás közben lehajlik semmiképp sem éri el a térszint és nem rendeződnek át az igénybevételek. Tárolásnál az alátétfák teljes egészében alá kell támasszák a pallókat, illetve a támasz 50cm-nél nem lehet távolabb a szélétől.²³

²¹ Leier.hu: Üreges, előfeszített födempalló <https://www.leier.hu/ureges-elofeszitett-fodempallo>

²² Leier: Előregyártott betonelemek, alkalmazástechnika és tervezési segédlet p.57

²³ uo. p.65

A pallók emeléséhez speciális megfogó csipeszek szükségesek (lásd. 9.ábra). Ezek a megfogó csipeszek a hosszbordákba kapaszkodnak. Ahogy tárolásnál, itt is fontos az erőbevezetés helye, ezért a csipeszek nem lehetnek távolabb 1m-nél a két széltől. Az emelőkötelek vízszintessel bezárt szöge itt is, mint a kéregfalnál, 60cm kell, hogy legyen.²⁴



9, Megfogó csipesz²⁵

1.3.4, MESTERPANEL:

A mesterpanelek maximális hossza 9m és a maximális elemszélesség 2,4m, a vastagságuk 5-9cm között változik. A betonminőség mind a helyszíni mind a panelok esetében legalább C25/30 kell legyen.

A panelok közvetlenül a falra ülnek fel (lásd. 10.ábra), illetve az utolsó téglasoron lévő habarcsra. Minimum 10cm felfekvést kell biztosítani a pallók számára.



10, Leier mesterpanel²⁶

A koszorúba a bekötővasalás köti be a panelokat, ezek mellé külön kengyelezés csak szükség esetén kell.²⁷

A födémelek áttörését az előregyártás során fel lehet vezetni a panelokra, ennek megfelelően készül a panelok vasalása. Lehetőség van utólagos áttörések kialakítására maximum 20cm átmérőben maximalizálva, illetve az áttörések egymástól minimum 70cm-re kell, hogy elhelyezkedjenek.

²⁴ Leier: Előregyártott betonelemek, alkalmazástechnika és tervezési segédlet p.65

²⁵ Leier.hu: Üreges, előfeszített födempalló <https://www.leier.hu/ureges-elofeszitett-fodempallo>

²⁶ Leier.hu: Mesterpanel <https://www.leier.hu/mesterpanel>

²⁷ Leier: Előregyártott betonelemek, alkalmazástechnika és tervezési segédlet p.36

A válaszfalakat csak 20cm-es falvastagság felett helyezzük vonalmenti teherként rá a panelekre. A vasalás számításánál 2cm betontakarás elegendő. A mesterpanelek tudnak kétirányba teherbírók lenni. Ilyenkor a keresztirányú vasalást közvetlenül a panelokra kell elhelyezni. A paneleket a négy sarkukon a szélektől $1/5$ lemezhosszra kell megemelni és a kötél legalább 60° -ot kell bezárjon a panel síkjával.²⁸ (lásd. 11.ábra)

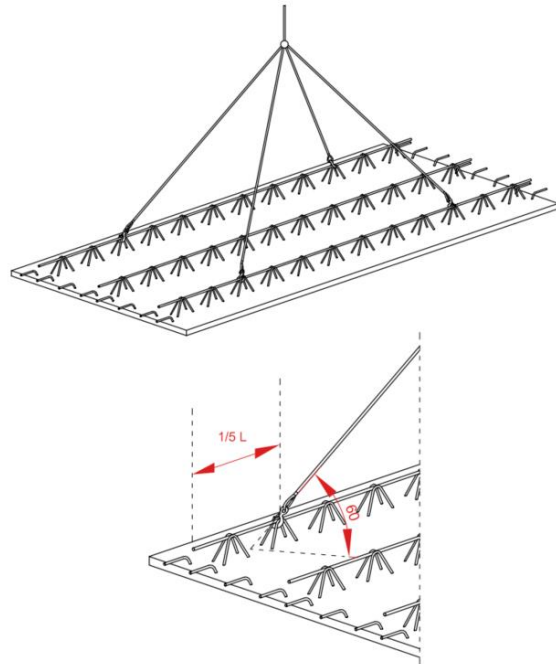
Ezen elemek szállításánál fontos, hogy hosszában, átlósan meglegyenek támasztva az elcsúszás elkerülése végett. Tárolásnál az elemeket meg kell támasztani a végüktől $L/5$ távolságra. Az elemek közé is célszerű plusz megtámasztást helyezni, ezek a rácsostartó vasalással párhuzamosan, tehát a teherhordás irányában kerülnek be. Maximum 7 sor panel kerülhet egymásra.

A paneleket építésközben alá kell állványozni. A tartó hossz tengelyére merőlegesen a maximális támasztávolság 1,6m. A mesterfödémeket középen túl kell emelni, kéttámaszú tartó esetén a fesztáv $1/300$ -ad részével.

Az egymás mellé kerülő panelek 5mm-es hézag távolságnál ne kerüljenek messzebb egymástól. Betonozás során ügyelni kell, hogy legfeljebb 25cm magasságból hulljon a beton a pallóra, a pontszerű erőhatásokat el kell kerülni!³⁰

2, SZAKIRODALMI KUTATÁS:

A tanszéken több TDK dolgozat is készült már az enyémhez hasonló kutatási témából. Ebben a szakirodalmi kutatásban az ő munkáikat mutatom be és foglalom össze néhány szóban.



11, Mesterpanel daruzása²⁹

²⁸ Leier: Előregyártott betonelemek, alkalmazástechnika és tervezési segédlet p.37

²⁹ uo. p.41

³⁰ uo. p.38

2.1, Roszevák Zsolt – Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata³¹

Roszevák Zsolt a TDK dolgozatában vizsgál előregyártott vasbeton gerendákat numerikusan. A 3. fejezetében ír az anyagmodellek definíciójáról. „Az anyag külső hatásokra adott válaszát nevezzük anyagmodellnek.”³²

Fontos a helyes anyagmodell megválasztása, illetve az anyagmodelljeinken belül az egyes paraméterek helyes megadása. Rugalmas anyagmodellek esetén amint az elem tehermentesül visszanyeri eredeti alakját. Ide tartozik például a Cauchy-féle anyagmodell, amely a pillanatnyi deformációs állapot és feszültség állapot között teremt összefüggést. Képlékeny anyagmodellek esetén már létrejönnek az anyagokban olyan deformációk melyek a teher megszüntetésével sem tűnnek el. Ez a folyási feltételektől függ melyek szimbolizálják a rugalmas állapot végét és a képlékeny állapot kezdetét. Képlékeny anyagmodellekhez tartozik a Tresca-modell és a HMH anyagmodell. Szót kell még ejteni a keményedési feltételekről is melyben az anyag képlékeny állapotban van és a mikrostruktúrájának átalakulásával képes további terheléseket felvenni. Rideg és rugalmas-képlékeny-fellazuló anyagok komplex modelljei, ahova besorolhatók a morzsolódó anyagok melyeknél a mikrorepedések kialakulása miatt a rugalmassági modulusok érintői egyre laposabbak.

Három vasbeton gerendáról készített numerikus modellt, a modellek között a vashányad a különbség. Az erőbevezetésnél acéllemezeket helyezett el, ezek segítségével elkerülte az irreális feszültségkoncentrációkat. A beton anyagmodelljét három különböző módon határozta meg. Az acéllemezekre egy izotróp lineárisan rugalmas modellt határozott meg és a betonacélokra egy lineárisan rugalmas lineáris felkeményedő modellt használt.

A teher a gerendán elmozdulás vezérelt. A vizsgálat során erő-elmozdulás diagrammokat készített melyekhez monitor pontokat helyezett el a szerkezeten. Többféle végeelem hálót alkalmazott, de mindegyik téglatest alakú.

Az eredményekből kiderül, hogy a beton berepedése után 40%-kal visszább esik a gerenda merevsége. Továbbá a 40mm-nél nagyobb hálóméret esetén a gerenda lehajlásai elkezdenek nagyon megnőni.

A valós kísérlet és az ATENA program által megadott eredmények arra mutatnak, hogy az ATENA beton anyagmodelljei enyhén ugyan, de felül becsülik a valós viselkedést.

³¹ Roszevák Zsolt – Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata (2015), TDK dolgozat

³² Roszevák Zsolt – Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata, TDK dolgozat p.7

2.2, Bodó Pál Boldizsár – Vasbeton síklemez egyenértékű kerettel történő helyettesítése vízszintes teherre, numerikus vizsgálatok alapján³³

Bodó Pál Boldizsár TDK dolgozatában egy vasbeton síklemezt vizsgált, mint egyenértékű keret, vízszintes teherre. A modellben 2 pillér és egy födémlemez található. Két szoftver segítségével számolt. Az egyik az AxisVM X4, itt „lineárisan rugalmasan vizsgáló, de nem lineárisan numerikus eredmények alapján a vízszintes eltolódások leírása meghatározott helyettesítő geometriai méretekkel felépített rúd-keretmodell” készített. A háló 30cm.

A másik szoftver az ATENA volt. Ebben az esetben több modell készült melyek a betonacélok modellezésében különböznek egymástól. Az acéllemezekre ő is egy izotróp lineárisan rugalmas anyagmodellt használt. A betonra egy nemlineáris anyagmodell-t alkalmazott. És még egy rugó-anyagmodellt épített be a modellbe, hogy segítségével biztosítsa a szimmetrikus viselkedést. A megtámasztások szintén a szimmetriát figyelembe véve alakultak ki. A pillérek megtámasztásánál függőleges és vízszintes megtámasztásokat alakított ki.

A berepedetlen állapotban a lineáris és nemlineáris modellek hasonló eredményt adnak. A berepedést követően jelentős eltérések mutatkoznak. A lemezek összeroppedése jól kimutatható a pillérek környezetében. Ebben az esetben is az ATENA minimális mértékben alul becsüli a merevségcsökkenést a valós modellhez képest.

2.3, Bogár Blanka, Blázsán Dániel – Különböző csomóponti numerikus modellek hatása egyszerű előregyártott vasbeton keretváz igénybevételeire³⁴

A TDK dolgozatukban írnak a magasépítésben alkalmazott előregyártott vasbeton szerkezetekről, az előregyártás előnyeiről és hátrányairól és a magyarországi előregyártókról illetve a termékeikről.

Feladatukban egy keretállás két csomópontját vizsgálták lineáris és nemlineáris modellek segítségével, miközben ezek paramétereit folyamatosan változtatták. Az egyik csomópont egy kehelyalap és az abba bekötött pillér kapcsolatának vizsgálata, míg a másik egy pillér-gerenda kapcsolat. A vizsgálatokhoz ATENA, illetve AxisVM szoftvereket használtak.

³³ Bodó Pál Boldizsár – Vasbeton síklemez egyenértékű kerettel történő helyettesítése vízszintes teherre, numerikus vizsgálatok alapján (2019)

³⁴ Bogár Blanka, Blázsán Dániel – Különböző csomópontú numerikus modellek hatása egyszerű előregyártott vasbeton keretváz igénybevételeire (2019)

Többféle betonszilárdsággal vizsgálták a keretállást, az anyagmodelljük a „3D Nonlinear Cementious” volt. A betonacélok modellezésénél egy létező anyagmodellel dolgoztak és beállították a betonacélok megcsúszását. Továbbá szükségük volt még tüskék, saruk és acél kapcsoló elemek anyagi definiálására is, hogy a csomópont minél pontosabban közelítse a valós viselkedést. Az elemek közötti kapcsolóelemek tulajdonságainak beállításánál szintén igyekeztek a valós erő átadásokat figyelembe venni. Ilyen feltétel volt például, hogy a tüske ne adjon át tengelyirányú erőt, illetve a saru kizárólag nyomást közvetítsen.

A pillérek keresztmetszetének változtatásával, illetve a kehelynyak kitöltő beton magasságának módosításával különböző eredményeket kaptak és azokat összehasonlították.

Elmozdulás vezérelt numerikus vizsgálatokat hajtottak végre. A pillér tetején egy elmozdulást és egy nyomóerőt működtettek egy gúla kontakelemre. A háló méretét minden elemnél egyedien adták meg.

A kehely-pillér kapcsolatnál a vizsgálataik egyik eredménye, hogy a kitöltő beton felső síkja minél lejjebb kerül a kehelynyak felső síkjától, annál nagyobb eltérés mutatkozik az ATENA és az AXIS számítása között. Az eltéréseknél az Axis nagyobb erőkhöz írja ugyan azon elmozdulásokat. A kitöltő beton anyagminőségének csökkentése minimálisan befolyásolja az eredményt.

A pillér gerenda kapcsolatnál 2 modell készült. Az első verzióban a teljes keretállás felét modellezték és az alapozást egy befogással helyettesítették. A második esetben a gerenda fele került csak a modellbe, illetve a pillérből csak a felső 1 méter. Ezen változatoknál is több futtatást készítettek, a különbség a gerenda magassága, a pillér mérete és tüske keresztmetszete, illetve itt is változások voltak a betonminőségekben. A megtámasztások során különböző megfontolásokat tettek.

A vizsgálat során azt a megállapítást tették, hogy a tüske átmérője jelentősen befolyásolja a csomópont tönkremenetellel szembeni ellenállását. A kitöltő beton rugalmassági modulusa befolyásolja a gerenda vízszintes eltolódását a sarun. A gerenda keresztmetszetének növelése csökkenti a betonacélokban ébredő feszültségeket, a gerenda lehajlását és az azon kialakuló repedések mennyiségét.³⁵

³⁵ Bogár Blanka, Blázsán Dániel – Különböző csomópontú numerikus modellek hatása egyszerű előregyártott vasbeton keretváz igénybevételeire (2019)

3, FELADAT BEMUTATÁSA:

A munkám során egy vasbeton kéregzsalus rendszer viselkedését vizsgálom ideálisan csuklós megtámasztások mellett, mint a rendszerből kiragadott egyedi elem. A vizsgálatok alapvető célja az eltérő időpontokban történő betonozás (előregyártott kéreg és helyszíni beton) numerikus modellezési lehetőségeinek megismerése. A vizsgálatához numerikus modelleket építék fel, melyek segítségével különböző kialakítású (geometriai, vasalású) és anyagjellemzőjű (virtuális) kísérleti elemek viselkedését mutatom meg, illetve hasonlítom össze.

Adva van egy általam megválasztott keresztmetszetű és hosszúságú zsaluzópanel. Ezen panel betonminőségét a Leier-zsaluzópanelnél megadottak alapján vettem fel. Hasonlóan tettem a panel vasalását illetően. Ezeket az adatokat a későbbiekben részletesen leírom.

Az előregyártott elemeknél a C25/30-as betonminőség ritka, általában nagyobb betonminőséggel dolgoznak. Feltehetőleg a felbeton is magasabb betonminőségű, hogy minimalizálják a zsugorodást, illetve az abból keletkező repedéseket.

A panelek beépítésénél egyik gyakori probléma, hogy a felbeton a támasznál megreped. Jelen kutatásban ezzel én nem foglalkozom, de egy későbbi kutatás ezen kérdést vizsgálva, érdekes lehet.

A feladat során egy csapat munkájába csatlakozom bele. A csapat tagjai szintén ezen program segítségével hasonló problémák megoldásán dolgozik. Ezen eredményeket és felvetéseket felhasználtam a TDK dolgozatomban.

A modellezést ATENA 3D végelelemes programmal végeztem.

3.1, GEOMETRIA KIALAKÍTÁSA:

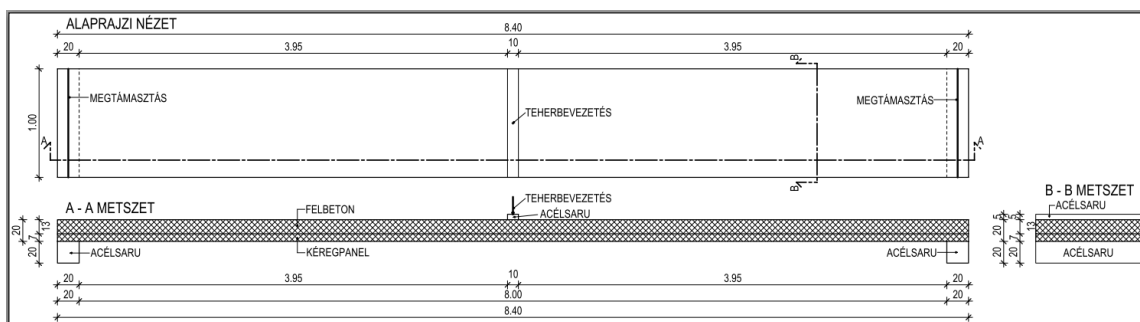
Az általam tervezett mesterpanel méretei: 1m x 8m x 0,07m (*lásd. 12.ábra*). Törekedtem, hogy a fesztáv a felső határ közelében legyen, így a paneleket a numerikus modellezés segítségével hajlításra tudtam tönkre tenni anélkül, hogy a tartóvég nyírásra tönkrement volna. A szerkezet statikai modellje: kéttámaszú tartó.

A panel a két végén acéllemezekre támaszkodik fel. A panel és az acéllemezek közötti kontakt elem tökéletesen együtt dolgoztatja a két elemet. Az acéllemez alján vonalmenti megtámasztás van, amely csuklós. Így a tartó az acéllemezzel együtt képes elfordulni. Mindkét támasz képes felvenni a z irányú függőleges erőket és az x irányú vízszintes erőket melyek a

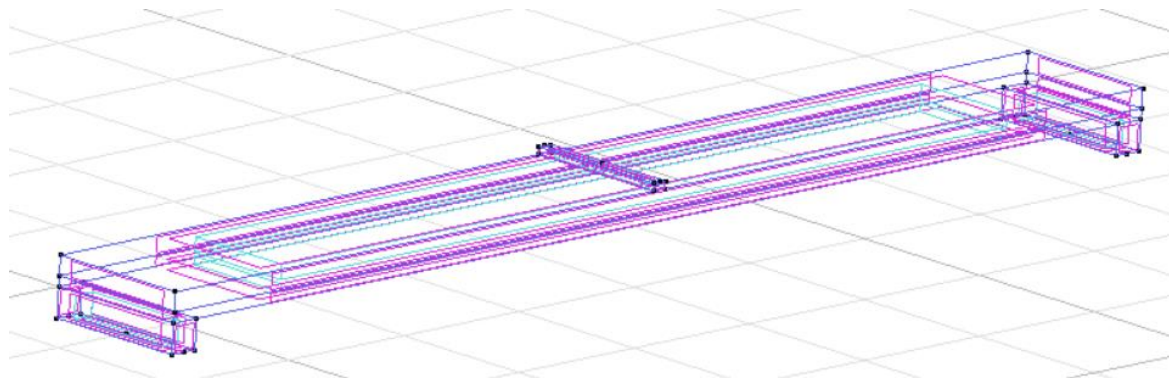
támaszvonallal megegyező irányúak. Az y azaz a tartó irányú erők felvételére csak az egyik oldali támasz képes, így elkerülöm a tartó befeszülését. Nyomatékot egyik támasz sem képes felvenni. A valós szerkezet megtámasztása részlegesen befogott, így képes az elfordulások bizonyosfokú meggátolására és a nyomaték viselésére. Az acéllemezeim 20cm szélesek és 20cm magasak, egymástól 8,2m re helyezkednek el.

A panelra kerül 13cm felbeton így a teljes födémvastagság 20cm. A felbeton esetében egyes számításokban úgy tekintettem, hogy a kizsaluzás nem érte el a 28napot, így a szilárdsága még alacsonyabb, mint amit a megadott betonminőségtől elvárnánk.

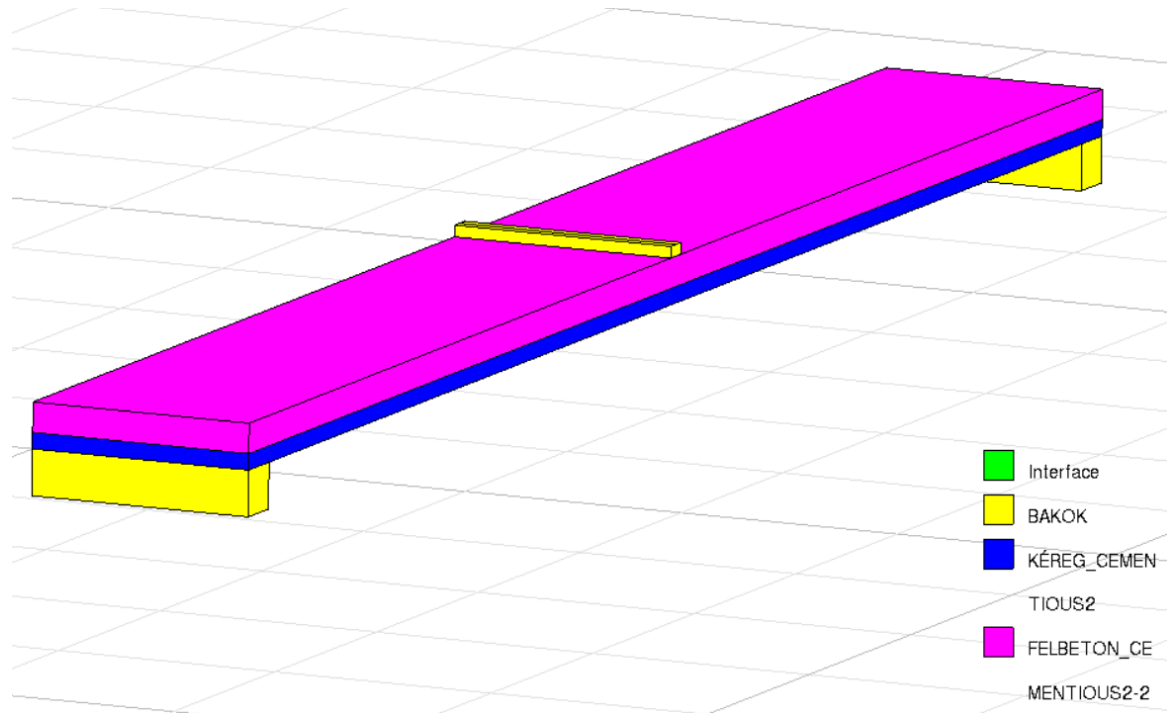
A monolit felső síkjára szintén egy acélelem kerül, hogy a terhet a tartó ne pontszerű teherként kapja meg. Az acél elem geometriai méretei: 10x5cm.



12/a, Vázlattev a geometriáról



12/b, ATENA 3D geometriai modell



12/c, ATENA 3D geometriai modell anyagjelölésekkel

3.2, VASALÁS KIALAKÍTÁSA:

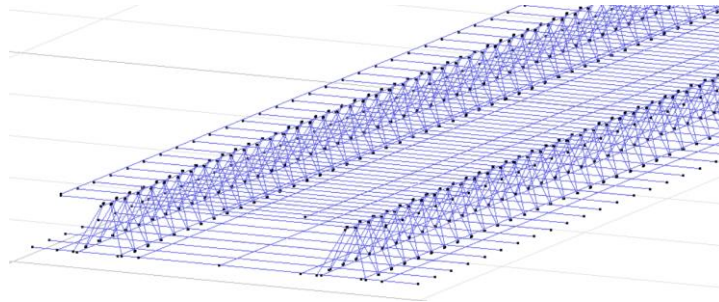
A födémrendszerben lévő vasalásokat 3 csoportra osztottam, csoportonként eltérő keresztmetszeti vastagsággal.

A kéregbetonban lévő hálónak a kéregvasalás nevet adtam a numerikus modellben és a betonacélok átmérője $\phi 12$. A háló vasalása mindkét irányban megegyező átmérőjű és a betonacélok távolsága egységesen 20cm. Így a gyakorlatban monolit födémeknél népszerű alsó alapháló a $\phi 12/20/20$ mintájára készült. (lásd. 13.ábra)

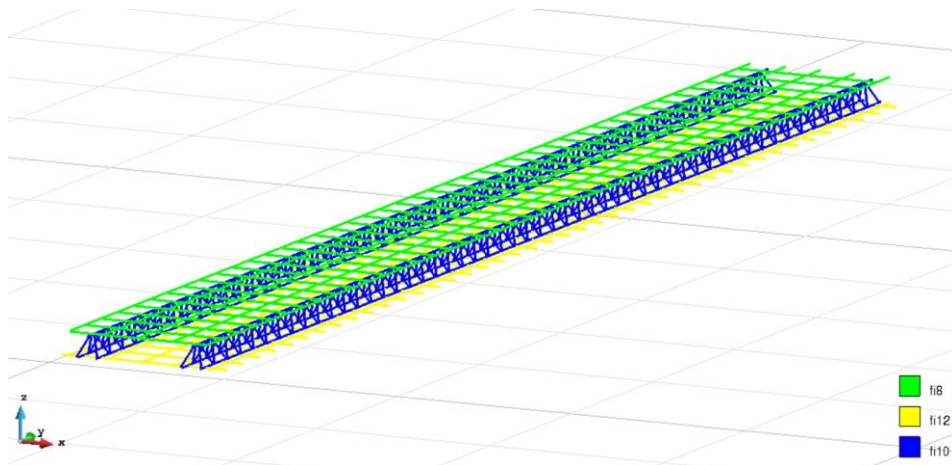
A helyszíni felbetonba kerül egy $\phi 8$ átmérőjű háló vasalás. Ezen vasak távolsága szintén egységesen 20cm. Így a panel felső vasalása $\phi 8/20/20$. Felső vasalás erősítésére a támaszoknál szükség lenne. A valós szerkezet esetében ez a vasalás a pallóból kiállva a támaszoknál található. Illetve a koszorúba való lehorgonyzás is kampós vasakkal erősíti a felső hálót. Ezen vasalások az én numerikus modellemben nem kerültek bele. Azzal, hogy a tartó megtámasztásainál megengedem a szabad elfordulásokat nem lesz negatív nyomaték a tartó végein. Ennek következtében nincs szükség a támasz felett vasalásra.

A teljes felbeton vasalása elhanyagolható lenne hiszen a tartó felső övén nem keletkezik húzóigénybevétel. Azonban a háló vasalást mégis elhelyeztem, hogy ha a későbbiekben további kutatásokra kerülne sor ez konzisztens maradjon az én modelljeimmel.

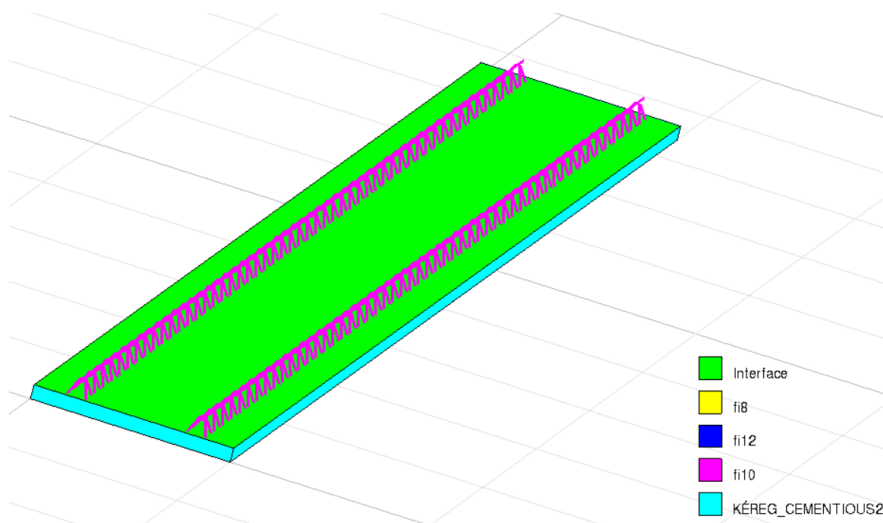
A panelba és a felbetonba is kerül további hosszvasalás. A panelba 4db a felbetonba 2db. Ezen vasakat köti össze a háromszög alakú „rácstartó vasalás” (lásd. 14.ábra). A rácstartó vasai $\phi 10$ -esek, és a háromszögek alsó pontjai egymástól 15cm távolságra vannak a tartó hossza mentén. A födémlemben két ilyen rácstartó vasalást kap helyet melyek egymástól 60cm-re kaptak helyet.



13/a, ATENA 3D vasalási modell



13/b, ATENA 3D vasalás modell átmérő jelölésével



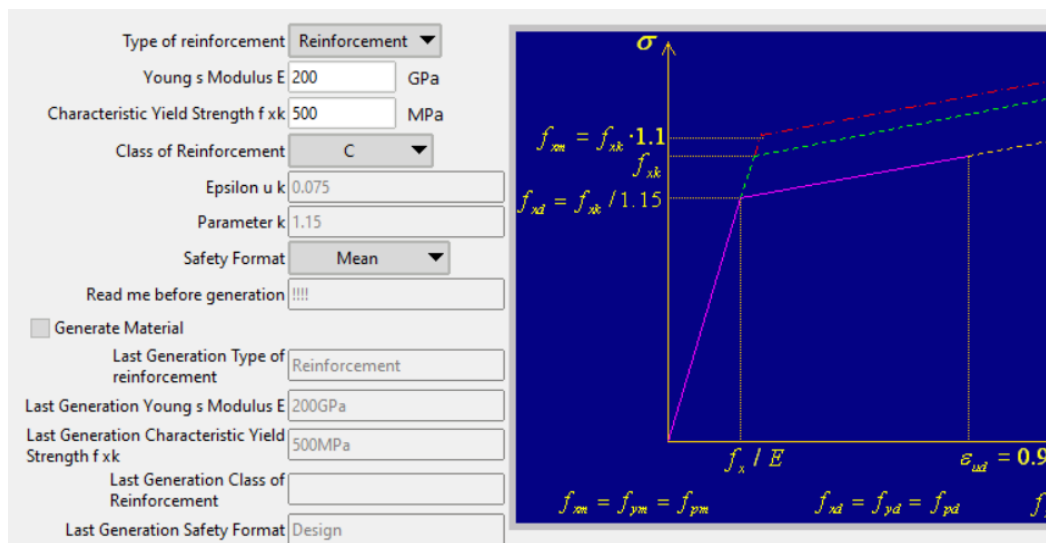
14, Kéregpanel és rácstartó vasalás

3.3, ANYAGMODELLEK:

3.3.1, BETONACÉL ANYAGMODELL:

A betonacélok modellezésénél lineárisan rugalmas lineárisan felkeményedő anyagmodellt alkalmaztam. Továbbá az acélbetétek az ATENA által nevezett „1D-s” elemként kerültek a numerikus modellbe. Így az acélok vonal elemként kerülnek bele 6 szabadságfokkal ebből 3 eltolódás 3 elfordulás. Megadtam az acélok rugalmassági modulusát és folyáshatárát.³⁶

Duktilitás szempontjából C osztályba soroltam, amely a legkedvezőbb és a B500-as betonacélokra vonatkozik (lásd. 15.ábra).

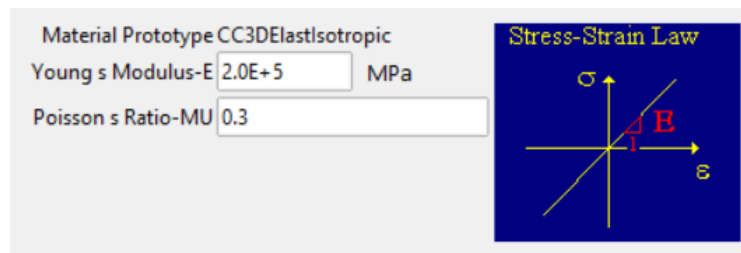


15, ATENA – Közelítő betonacél modell

3.3.2, ACÉLLEMEZEK ANYAGMODELL:

Az acéllemezek anyagmodelljének Izotrop, lineárisan rugalmas modellt választottam. A program „Elastic3D” anyagmodellnek nevezi, de a rugalmassági modulus és a Poisson tényező megegyezik az acélével (lásd.16.ábra). Ezek az elemek szolgálnak a végelem miatti feszültségkoncentrációk elkerülésére.

³⁶ Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka: ATENA Program Documentation Theory (2018) p.168-169



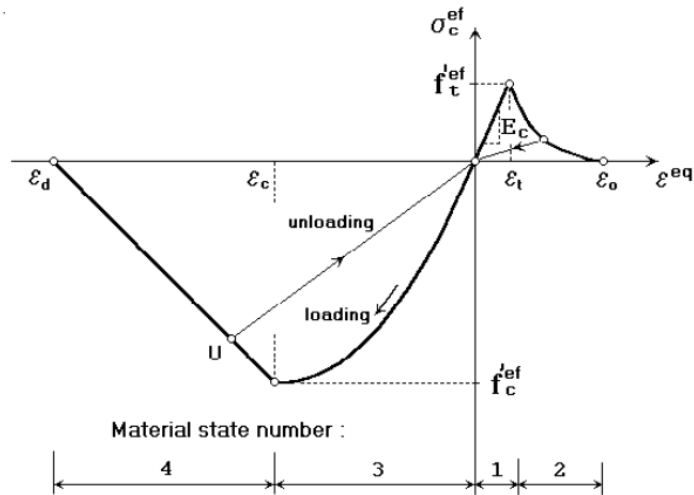
16, ATENA – Közelítő acéllemez modell

3.3.3, BETON ANYAGMODELLEK:

Az ATENA programban megadhatók egy teljesen egyenértékű egyirányú feszültség-alakváltozás görbe pontjai. Meg kell adni a programnak a rugalmassági modulus, nyomó- és húzószilárdságot. Ezen adatokat, többfuttatásnál többféle képen adtam meg, hogy a szerintem a valósághoz legjobban illeszkedőt kiválaszthassam. A változatok között használtam a program által ajánlott értékeket, illetve az EuroCode által ajánlottakat is.

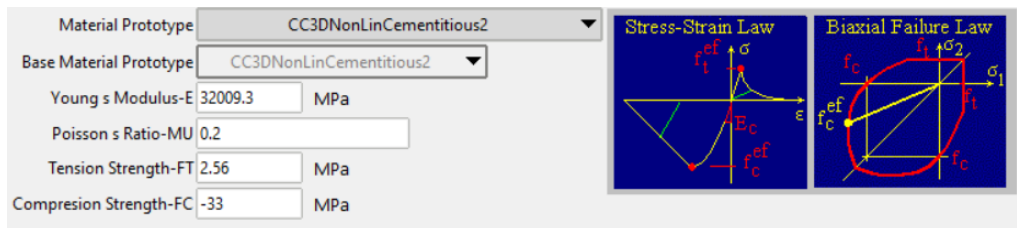
A program többféle anyagmodellezéssel is tud dolgozni, én ezek közül a „Cementitious2” -t és az „Eurocode2” -t használtam. Ezek közel azonosak, de a javasolt szilárdsági és egyéb értékekben bizonyos eltéréseket mutatnak. (lásd. 18.ábra) A lehetséges repedések megnyílásait, azoknak határértékeit különböző futtatási eredmények alapján állítottam be, azok alapján melyeket helyesnek véltem.

A betonminőség C25/30, a kéregbetonnál minden esetben, a felbeton esetében viszont a betonszilárdsági értékeit több futtatásnál csökkentett értékekkel vettem figyelembe egy esetleges korai dúcolat eltávolítás következményeit modellezve. Ezekben az esetekben próbálkoztam 7 napos betonszilárdság esetén, 1 napos betonszilárdság esetén, illetve a 28 napos közel teljes szilárdság esetén. Készítettem futtatást olyan esetre is, amikor a helyszíni beton egyel gyengébb szilárdsági osztályú.



17, Egyirányú feszültség-alakváltozás diagram betonokra³⁷

„Az 1-es szakasz a húzófeszültség kimerüléséig tart, itt a rugalmassági modulus lineáris. A 2-es szakaszon a repedésnyílás modellezését egy exponenciális függvény írja le, mely a speciális törési energia és a húzószilárdság függvényéből számítható. A 3-as szakasz a nyomófeszültség maximális értékének eléréséig tart. Ez a függvény a beton kezdeti és a maximális nyomófeszültséget metsző rugalmassági modulusok arányától, valamint a nyomószilárdság értékétől függ. A 4. szakasz a beton tönkremenetele utáni viselkedését szimbolizálja (lásd. 17.ábra). Ez a jelenség a fellazulás vagy morzsolódás. A program ezt a jelenséget egy lineáris függvénnyel írja le. Ezen a szakaszon feltételezzük, hogy az elmozdulás független szerkezet méretétől. A feltételezést Van Mier (1986) bizonyította is.”³⁸



18/a. Alaptulajdonságok

³⁷ Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka: ATENA Program Documentation Theory (2018) p.18

³⁸ Roszevák Zsolt – Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata (2015), TDK dolgozat p.42-44

Fracture Energy-GF $\frac{MN}{m}$

Fixed Crack

Activate Crack Spacing

Crack Spacing m

Activate Crack Spacing Min

Activate Tension Stiffening

Activate Aggregate Interlock

Agg Size m

Activate Shear Factor

Activate Unloading factor

18/b. Húzáshoz tartozó tulajdonságok

Plastic Strain-EPS CP

Onset of Crushing-FCO MPa

Critical Comp Disp-WD m

Fc Reduction

Activate Crush Band Min

18/c. Nyomáshoz tartozó tulajdonságok

Excentricity-EXC

Dir of pl Flow-BETA

Rho-Density $\frac{kton}{m^3}$

Thermal Expansion-Alpha C^{-1}

18/d. Egyébb tulajdonságok

Geometrical Non-Linearity

Idealisation

Non-Quadratic Element

Ignore negative Jacobian

Inactive elements with error

Elemgeometria definiálása

18, Betonmodell definiálása programban

3.3.4, BETONOK KÖZÖTTI KAPCSOLATI ELEM:

A 3D Interface anyagtípussal két elem közötti, automatikusan létrejövő kontaktot lehet modellezni. Az anyagmodell a Mohr-Coulomb féle törési feltételen alapszik.

$$\begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{tt} & 0 & 0 \\ 0 & K_{tt} & 0 \\ 0 & 0 & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta u \end{Bmatrix}$$

K_{tt} a kezdeti rugalmas nyírómerevség, K_{nn} pedig a kezdeti rugalmas normálmerevség.

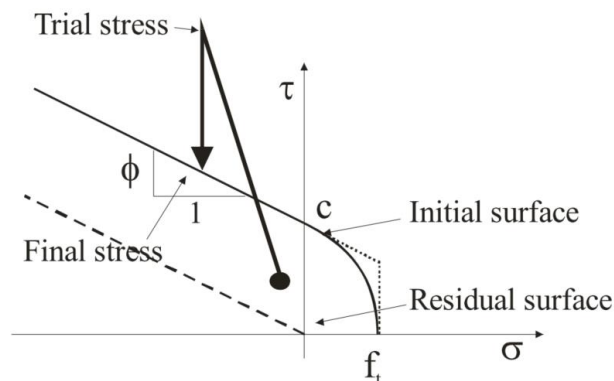
$$K_{nn} = K_{tt} = \frac{E_c}{s} \cdot 10$$

E_c a vasbeton rugalmassági modulusa, s a vasbeton elem végeelem hálójának a mérete.

Egy általános 3D eset konstitutív kapcsolatát a kontakt felületén való tapadással, valamint relatív csúszó- és nyíló elmozdulásokkal lehet jellemezni. A kezdeti felületi sérülések megfelelnek a Mohr-Coulomb feltételnek egy ellipszoid feszültségi rendszerrel. Amint a feszültségek már nem illeszthetők a Mohr-Coulomb feltételbe, a felületek elmozdulnak és ez száraz súrlódásnak felel meg. Feszültség esetén a meghibásodási feltételt egy ellipszoid váltja fel, amely metszi a normál feszültségtengelyt f_t értékén a függőleges érintővel és a nyírási tengely metszi a c értéken (azaz kohézió) a ϕ - ekvivalens érintővel (lásd. 19.ábra). Az Interface modell bizonyos értékei egymástól nem függetlenek.³⁹

$$f_t < \frac{c}{\phi}, \quad f_t < c$$

$$c > 0, \quad f_t > 0, \quad \phi > 0$$



19, Határfelület anyagi viselkedése⁴⁰

³⁹ Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka: ATENA Program Documentation Theory (2018) p.62-63

⁴⁰ Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka: ATENA Program Documentation Theory (2018) p.63

A 3D interface anyagmodell sűrűdési jellemzőit a nyírási kohézió és a sűrűdési tényező határozzák meg. A Mohr-Coulomb feltételnek megfelelő tönkrementtel a következő egyenlőtlenségekkel lehet leírni, ahol f_t a húzószilárdság:

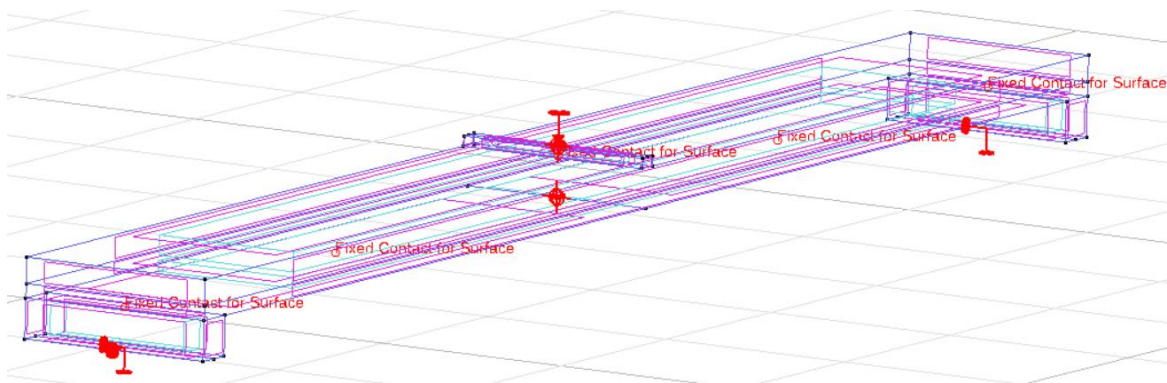
$$|\tau| \leq c - \sigma \cdot \phi, \quad \sigma \leq 0$$

$$\tau = \tau_0 \sqrt{1 - \frac{(\sigma - \sigma_c)^2}{(f_t - \sigma_c)^2}}, \quad \tau_0 = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_c^2}{(f_t - \sigma_c)^2}}}, \quad \sigma_c = -\frac{f_t^2 \phi}{c - 2f_t \phi}, \quad 0 < \sigma \leq f_t$$

$$\tau = 0, \quad \sigma > f_t$$

A határfelület húzószilárdságának értékét ajánlott a gyengébb kapcsolódó anyag húzószilárdságának 1/2 -1/4-edeként definiálni. Továbbá az anyagmodell kohézióját érdemes a húzószilárdság 1-2 szeresére felvenni.⁴¹

3.4, TERHEK ÉS MEGTÁMASZTÁS:



20, Peremfeltételek a tartón

A födémpanelt két végén csuklósan támasztottam meg. A megtámasztások vonalmentiek melyek az acéllemezek közepénél vannak elhelyezve. Az egyik oldali támasz mind három irányban képes igénybevételt felvenni, míg a másik támasz képes elcsúszni a tartó hossz tengelye mentén. (lásd. 20. ábra)

Elmozdulás-vezérelt a numerikus vizsgálat. 2 cm eltolódás terhet adok meg, melyet a felső acélelem továbbít a tartóra. Az elmozdulás a tartó közepén lévő acéllemez felső oldalának mértani közepén van.

⁴¹ Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka: ATENA Program Documentation Theory (2018) p.62-63

Monitorpontokat helyeztem el a tartón. Az első monitorpont reakcióerőket mér és az elmozdulás bevezetésénél található. A második monitorpont elmozdulásokat mér és a tartó középső keresztmetszetében alul található.

3.5, VÉGESELEM HÁLÓ DEFINIÁLÁSA:

Az ATENA 3D változatában megtalálható többféle végeelem. Ezek közül én 2 félért állítottam be. A hatsíkú téglatestelemet használtam a helyszíni felbetonnál. Tetraéder elemet pedig a panelnél. Elérhetőek a lineáris elemek, melyek csomópontjai az elem sarkaiban helyezkednek el, illetve lehetnek kvadratikusan elemek is, melyeknél az éleken és az elemen belül is vannak pontok (lásd. 21. ábra). Az integrálási pontokat a Gauss pontokban értelmezi.

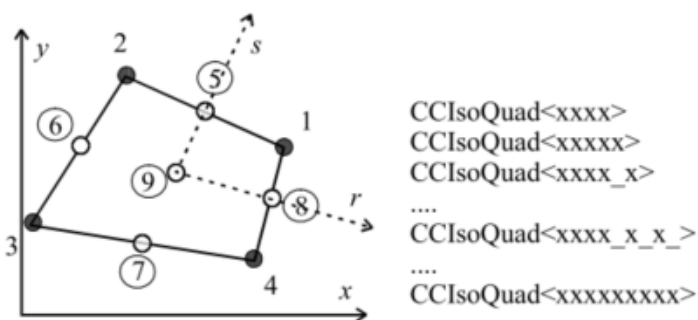


Fig. 3-4 Geometry of CCIsoQuad<...> elements.

21, Kvadratikusan elemek⁴²

A programban található háló generáló, melynél megadható a végeelem háló mérete, ezután a program a fentebb megadott elemekhez mérten elkészíti a szerkezetre a hálót. Ahhoz, hogy a programmal megfelelő eredményeket kapjunk nagyon fontos a végeelem háló méretének helyes felvétele. A modellemben én 5cm-es hálót alkalmaztam minden számításomnál.⁴³

4, NUMERIKUS VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI:

Numerikus vizsgálataim eredményeit ebben a fejezetben ismertetem. Bemutatom a különböző modelljeimet és azok eredményeit, majd ezeket egymással összehasonlítva

⁴² Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka: ATENA Program Documentation Theory (2018) p.89

⁴³ Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka: ATENA Program Documentation Theory (2018) p.89

megmutatom az egyes paraméterek változtatásával milyen különbségek keletkeznek a kéttámaszú tartók erő-elmozdulás ábráiban.

A korábbi TDK dolgozatokból jól látszik, hogy a megfelelő numerikus modellek és a valós kísérletek hasonlóan viselkednek. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem lehetőséget biztosított számomra, hogy a numerikus modelljeimhez, - melyekkel a valós szerkezeteket modellezem - az ATENA nevezetű programot használhassam. Így a tartóm viselkedése és a repedések közelítik egy tényleges szerkezet viselkedését anélkül, hogy a valóságban eltörnének egy LEIER mesterpanelt.

4.1, V5 – MODELL VERZIÓ:

A V5- nevezetű Numerikus modellem geometriája és vasalása megegyezik a soron következő modellekkel. A különbségek a betonfelületek kapcsolataiban és az anyagminőségekben keresendők.

Ebben a modellben az anyagmodell az ATENA által nevezett „ConcreteEC2”. Ugyanakkor a szilárdsági paramétereket nem a program által megadott, hanem az Eurocode által javasolt értékekkel vettem fel. Ezek százalékosan csupán minimális eltérések. A panel betonminősége C25/30 és a szilárdsági értékek az Eurocode-ból, az ehhez a beton minőségéhez előírt értékek. A felbeton esetében csökkentett szilárdsági értékekkel számoltam, a rugalmassági modulust a teljes szilárdság 60%-ával vettem figyelembe, míg a nyomó és húzószilárdságot mindössze 20%-kal. *(lásd. 1.táblázat)*

Mind az előregyártott, mind a felbeton esetében a következő beállításokat tettem: A „Crack Spacinget”, azaz repedéstágasságot 5mm-ben korlátoztam. Erősen vasalt vasbeton szerkezeteknél vagy nagy végeelemes modelleknél a szerkezetben megadott rudak (betonacélok) keresztezik az egyes végeelemeket és emiatt a repedéssávokat és repedésszélességüket hibásan becsülhetjük. Ez annak a következménye, hogy az ún. „crack band” elmélet feltételezi, hogy a repedésköz nagyobb, mint egy végeelem méret. Ezekben az esetekben hasznos manuálisan megadni a repedésközöket, mivel a program túlbecsüli a repedéseket, és emiatt nagyobb eltérések is előfordulhatnak. Az ATENA program lehetővé teszi, hogy a felhasználó manuálisan határozza meg a repedési távolságot.⁴⁴

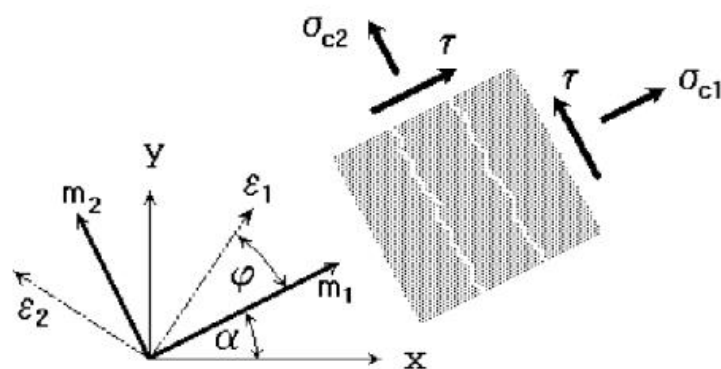
⁴⁴ Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka: ATENA Program Documentation Theory (2018) p.47-48

Mindkét esetben az „Aggregate Interlock”-ot vagyis az adalékanyag méretét 2cm-ben korlátoztam, ahol f_c' a nyomószilárdság MPa -ban, a_g a maximális adalékanyag méret mm -ben, és w a legnagyobb repedési szélesség mm -ben az adott helyen. Ennek megadásával aktiválódik a maximális adalékanyag méret a_g , ellenkező esetben az alapértelmezett viselkedést használja a program ott, ahol a nyírófeszítés a repedés felületén nem haladhatja meg a szakítószilárdságot⁴⁵ (lásd. 18.ábra).

Ami különbség a helyszíni és előregyártott beton között az a „Fixed Cracks” beállítás fűl, amely lehetővé teszi a repedések szerteágazódását, melyet a panelnál 0-ra állítottam és a felbetonnál 1-re.⁴⁶

A Cementált anyagcsaládban is választható fix és elforgatott repedésmodellek. A 0.0 azt jelenti teljesen elforgatott repedésmodell, az 1.0 fix repedésmodellt jelent, a 0,0 és 1,0 közötti értékek pedig meghatározzák a repedés irányának rögzítési szintjét.

A rögzített repedéses-terjedéses modellben (CERVENKA 1985, DARWIN 1974) a repedés irányát a fő feszültségirány adja meg a repedés kezdetekor. A további terhelés során ez az irány rögzített és az ortotrópia anyagi tengelyét jelenti. A fő feszültség és húzás irányok egybeesnek a repedésmentes betonban izotrópia feltételezése esetén. A repedés után a program bevezeti az ortotrópiát. A gyenge anyagtengely m_1 a repedés irányával normális, az erős m_2 tengely párhuzamos a repedésekkel. Általános esetben a fő húzó tengelyek ε_1 és ε_2 forognak, és nem kell egybeesniük a tengelyekkel. Ez nyírófeszítést okoz a repedés felületén. A σ_{c1} és σ_{c2} feszültségkomponensek a normál és vele párhuzamos feszültségeket jelölik, a repedéssík és a nyírófeszítés miatt nem ezek a fő igénybevételek⁴⁷ (lásd. 22.ábra).



22, Fixed Crack modell⁴⁸

⁴⁵ uo. p.37

⁴⁶ uo. p.27-28

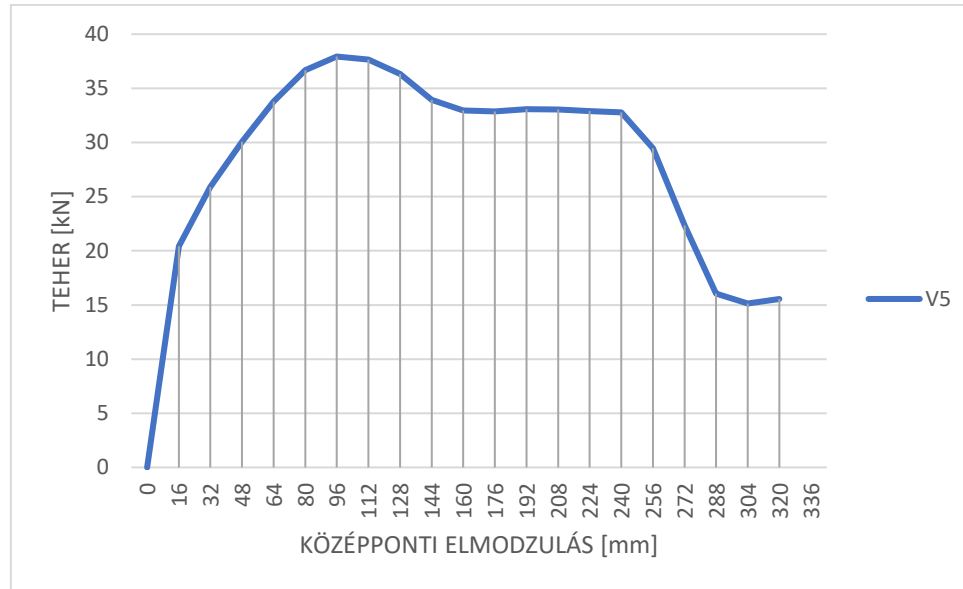
⁴⁷ Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka: ATENA Program Dokumentation Theory (2018) p.28

⁴⁸ uo.

A helyszíni és a monolit beton közötti együttdolgozást csak a rácsostartó vasalás biztosítja.

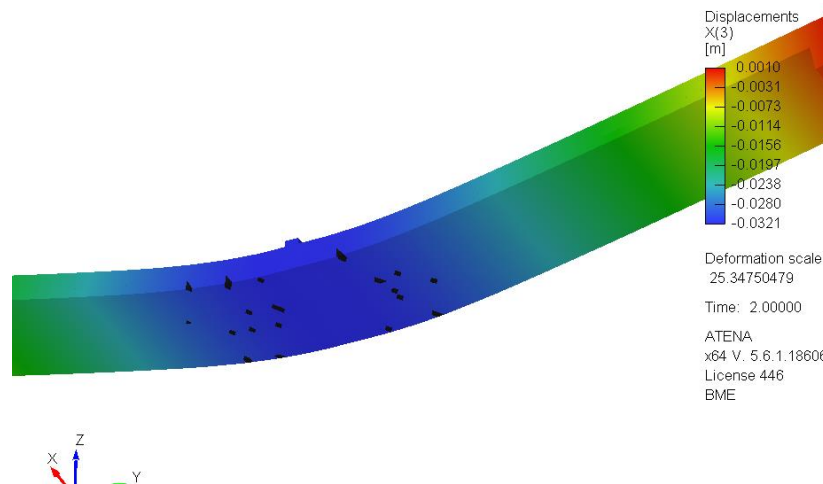
| ANYAGTULAJDONSÁG - PANEL | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------|---------|----------|----------|-------------|---------------------|-----------------------|-----------------|------------|------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| FUTTATÁSOK | BASIC | | | TENSILE | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | | |
| EUROCODE2 | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | $\epsilon - CP$ | FC.0 [MPa] | W.d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION |
| 5. V5 | 31000 | 0,2 | 2,6 | -33 | 0 | 0,05 | 0,02 | -0,001 | -5,46 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| ANYAGTULAJDONSÁG - FELBETON | | | | | | | | | | | | | |
| FUTTATÁSOK | BASIC | | | TENSILE | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | | |
| EUROCODE2 | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | $\epsilon - CP$ | FC.0 [MPa] | W.d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION |
| 5. V5 | 18600 | 0,2 | 0,52 | -6,6 | 1 | 0,05 | 0,02 | -0,001 | -5,46 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |

1, Táblázat V5 modell anyagtulajdonságai



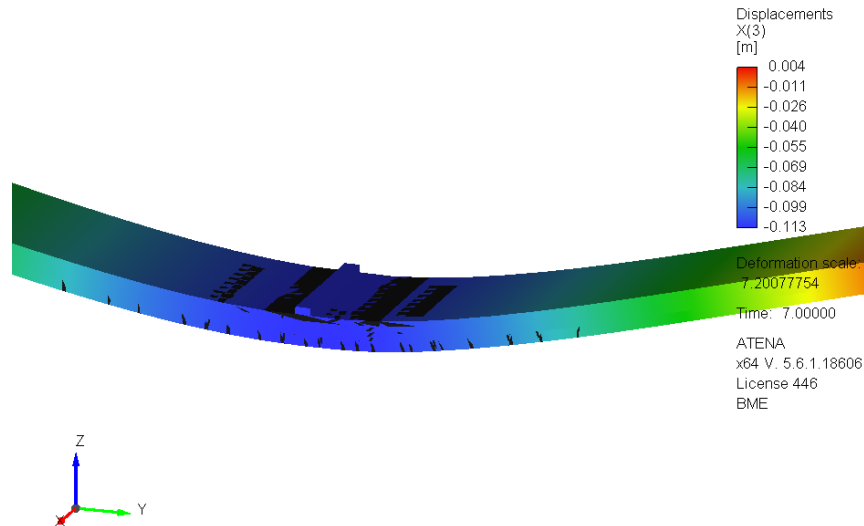
23, V5 Modell Erő-elmozdulás diagrammja a középső keresztmetszetben

A 23. ábrán jól megfigyelhető a terhelés kezdeti szakaszán, hogy a tartó még az I. feszültségi állapotban van. A tartó ekkor $20,44\text{kN}$ terhet vesz fel. Ezt követően a II. feszültségi állapotban megjelennek az első repedések a panel alján (lásd. 24.ábra). Csak a $0,2\text{mm}$ -nél szélesebb repedéseket jeleníttem meg a tartón.



24, V5 modell első repedései és elmozdulásai

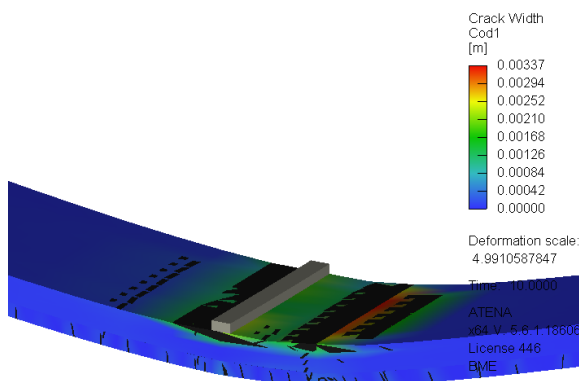
A terhelés további növelésével megfigyelhető, hogy az alsó repedések megsűrűsödnek, és a felbetonon is megjelennek kisebb repedések, melyek szélessége $0,024\text{mm}$. Ekkor a tartóra már $33,073\text{kN}$ teher kerül, és ettől a középső keresztmetszet 64mm -t mozdul el.



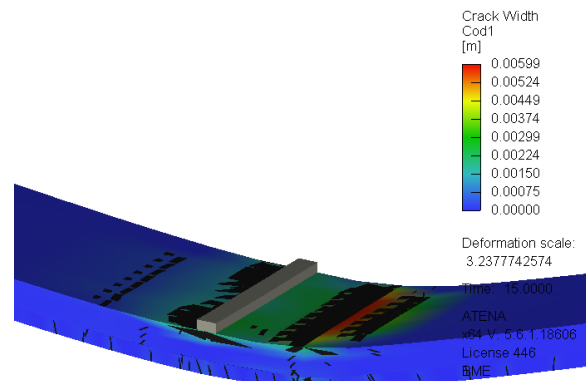
26, V5 modell repedései és elmozdulásai a 24. diagram tetőpontján

Végül elérjük a diagramm tetőpontját. A tartó elérte a maximális terhet, amit viselni képes, de még nem tört el. A panel gyakorlatilag teljes keresztmetszetében végig repedt. (lásd. 26.ábra) A teher további növelésével az elmozdulások ekkor már jelentős mértékben nőnek, de kialakul egy platós rész a diagrammon, (lásd. 23.ábra) ahol a teher közel konzisztens marad és az elmozdulások tovább nőnek.

A diagram platós részének két végén jelentős különbség van a felbeton repedéseinek megnyílásában. A plató elején 3-4mm a repedések szélessége, míg a végére ez közel a duplája. (lásd. 27. és 28. ábrákon)



27, Plató kezdetén repedezettség



28, Plató végén repedezettség

Végül a felbeton teljesen összemorzsolódik és a tartó tönkremegy (lásd. 28.ábra), a panel csak ez után törik el a nyomott zóna lecsökkenésével.

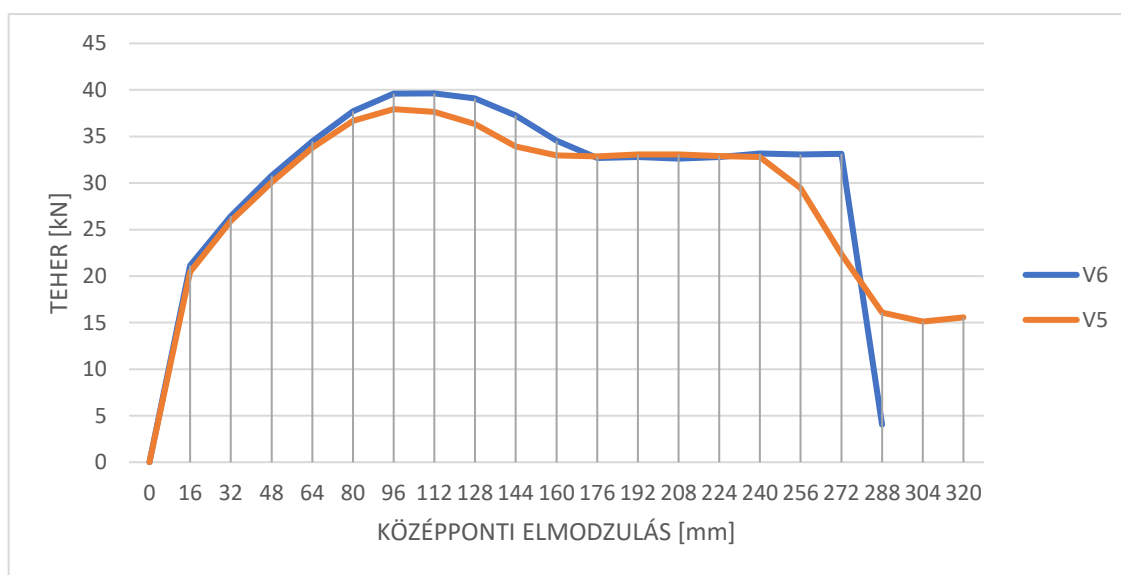
A V5 modell maximálisan 37,653kN terhet volt képes felvenni és ehhez 96,495mm elmozdulás tartozott.

4.2, V6 – MODELL VERZIÓ:

| ANYAGTULAJDONSÁG - PANEL | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------|---------|----------|----------|-------------|---------------------|-----------------------|----------------|------------|-----------|------------------|--------------------------|--------------|
| FUTTATÁSOK | BASIC | | | | TENSILE | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | |
| EUROCODE2 | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | ϵ -CP | FC.0 [MPa] | W.d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION |
| V5 | 31000 | 0,2 | 2,6 | -33 | 0 | 0,05 | 0,02 | -0,001 | -5,46 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V6 | 31000 | 0,2 | 2,6 | -33 | 0 | 0,05 | 0,02 | -0,001 | -5,46 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| ANYAGTULAJDONSÁG - FELBETON | | | | | | | | | | | | | |
| FUTTATÁSOK | BASIC | | | | TENSILE | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | |
| EUROCODE2 | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | ϵ -CP | FC.0 [MPa] | W.d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION |
| V5 | 18600 | 0,2 | 0,52 | -6,6 | 1 | 0,05 | 0,02 | -0,001 | -5,46 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V6 | 18600 | 0,2 | 0,52 | -6,6 | 1 | 0,05 | 0,02 | -0,001 | -5,46 | -5,00E-04 | 0,8 | NONLIN | 3D |

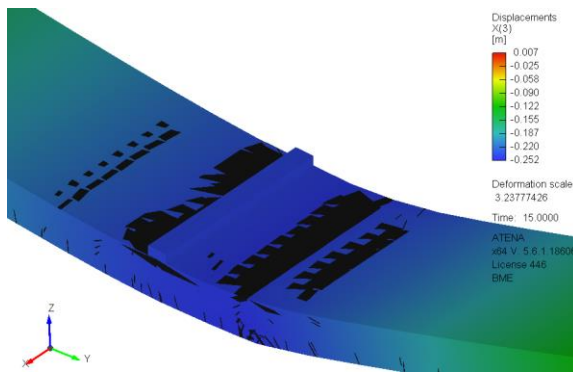
2, Táblázat V5 és V6 tulajdonságú modell

A V6 nevű numerikus modellem annyiban tér el a V5 modelttől, hogy a betonfelületek közötti kapcsolat fix, tehát a modell szempontjából olyan mintha a panel és a felbeton egy elem lenne más hálózással és anyagtulajdonságokkal. (lásd. 2.táblázat) A betontulajdonságok továbbra is eltérnek a helyszíni és a monolit részek között, így továbbra is úgy veszem figyelembe a felbetont, hogy nem érte el a teljes szilárdságát.

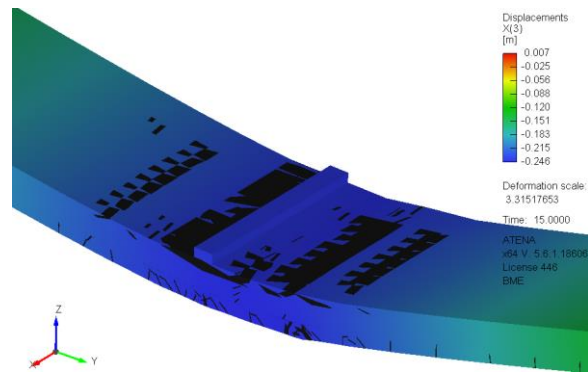


29, V5 és V6 Modell Erő-elmozdulás diagrammja

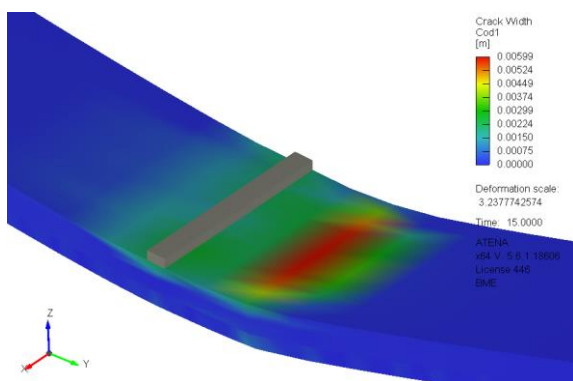
Ha tökéletes erőátadó kapcsolatot modellezünk, akkor az együttdolgozás nem csupán a rácsostartó vasain múlik, ennek köszönhetően ugyanakkora elmozdulás nagyobb külső erőhöz tartozik, amely értelemszerűen nagyobb hajlítási igénybevételt jelent a numerikus modell esetén. (lásd 29.ábra) Ebben az esetben a panel csupán mint a tartó húzott beton része megy tönkre, és nem mint önálló szerkezet.



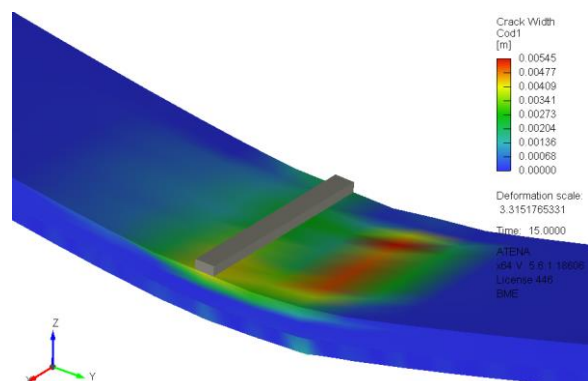
30/a, V5 elem lehajlása a tönkremenetel időpontjában



30/b, V6 lehajlása V5 tönkremenetelének pontjában



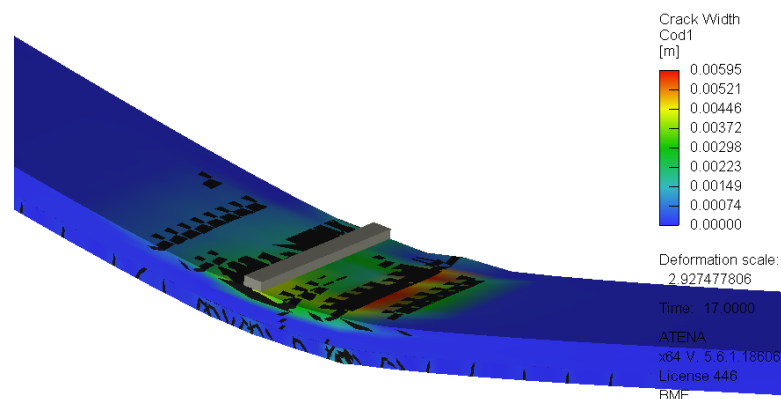
30/c, V5 repedéseinek szélessége a tönkremenetel időpontjában



30/d, V6 repedéseinek szélessége V5 tönkremenetelének időpontjában

A felbeton repedezettsége ugyan jelentős, de nem olyan mértékben, mint a V5-ös esetben. Az elmozdulás szélső értéke 8mm-el nagyobb, illetve a repedések megnyílása 0,54mm el több és sokkal sűrűbben helyezkednek el. (lásd. 30. ábra)

Ebben az esetben is a felbeton tönkremenetele okozza az egész tartó tönkremenetelét. De nem a lassú összemorzsolódás következtében, hanem a nyomott betonból kiszakad egy darab a tartó szélén és hirtelen tönkremenetel következik be. (lásd. 31. ábra)



31, Repedéstágasságok a diagramm platójának végén

A V6 modell maximálisan 39,629kN terhet volt képes felvenni és ehhez 112,688mm elmozdulás tartozott.

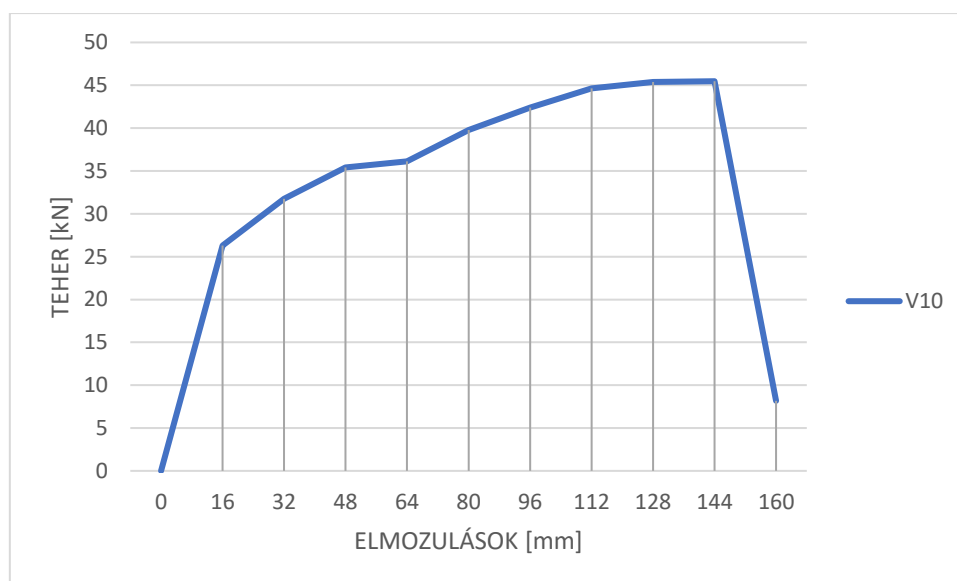
4.3, V10 MODELL VERZIÓ:

Ebben a verzióban az előregyártott vasbeton panel esetén fix repedésterjedési modellt használtam úgy, hogy a repedéstágasságot és repedések közötti távolságot nem korlátoztam. A helyszíni beton ez esetben teljes szilárdsággal szerepel, azaz megegyezik a panelével.

Ezúttal a panel és a felbeton közötti együttműködést egy nagyszilárdságú Interface felület biztosítja. Az Interface felületnek viszont a kohézió értéke 1MPa és a belső súrlódási szög csak $0,1$. A kapcsolat a két elem között főleg nyomásból adódik. (lásd. 3.táblázat)

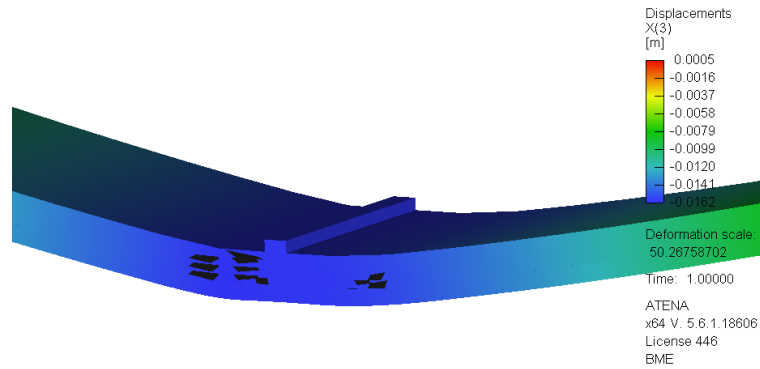
| ANYAGTULAJDONSÁG - PANEL | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------|---------------------------------------|----------|---|-------------|---------------------|-----------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------|--------------|--------------------------|--------------|----|
| FUTTATÁSOK | BASIC | | | TENSILE | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | | | |
| CEMENTIÓUSZ | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | $\epsilon - CP$ | FC.0 [MPa] | W.d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION | |
| V10 | 32009 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| ANYAGTULAJDONSÁG - FELBETON | | | | | | | | | | | | | | |
| FUTTATÁSOK | BASIC | | | TENSILE | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | | | |
| CEMENTIÓUSZ | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | $\epsilon - CP$ | FC.0 [MPa] | W.d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION | |
| V10 | 30303 | 0,2 | 2,21 | -28 | 1 | - | | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| KONTAKTELEM TULAJDONSÁGAI | | | | | | | | | | | | | | |
| FUTTATÁSOK | MATERIAL PROTOTYPE | NORMAL STIFFNESS [MN/m ³] | | TANGENTIAL STIFFNESS [MN/m ³] | | COHESION [MPa] | FRICTION COEFFICIENT | | TENSION STRENGTH FT [MPa] | BETONACÉL MEGCSÚSZÁSA | | | | |
| V10 | CC3DINTERFACE | 2+8E | | 2+8E | | 1 | 0,1 | | 0,3 | - | | | | |

3, Táblázat V10 modell anyagtulajdonságai és a kontakt elem tulajdonságai



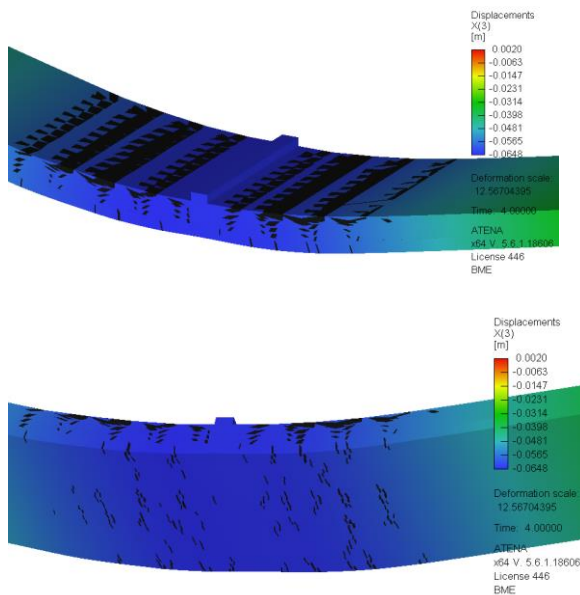
32, V10 Modell Erő-elmozdulás diagrammja

Jól kivehető az I. feszültségi állapot és a berepedt állapot éles iránytörése. Ezt követően a már berepedt keresztmetszet további terheket vesz fel. (lásd. 32.ábra) A berepedés nem csak a tartó alján jelenik meg a panelban, jelentős repedések figyelhetők meg a felbeton szélein is. A felbeton oldalán az alsó síkhoz közel 0,25-0,3mm vastagságú repedések láthatóak. (lásd. 33.ábra) A panel alsó síkján 0,1mm vastagságú repedések találhatóak.

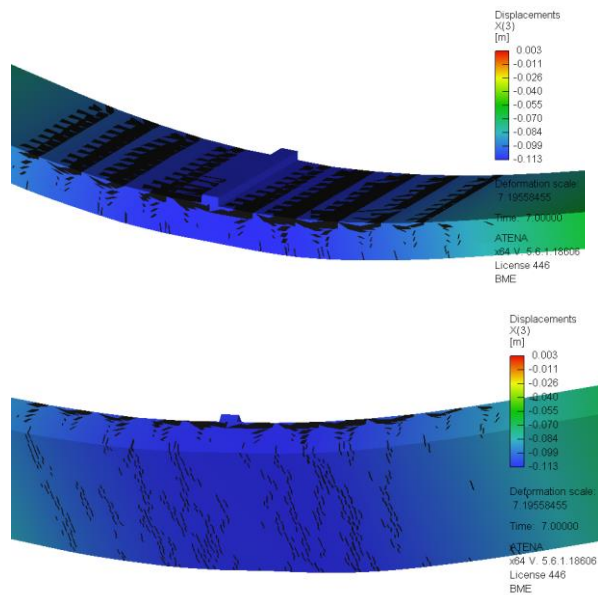


33, Repedések a felbetonban

Ahogy a 32. ábra mutatja, az elmozdulás 16mm és 64mm közötti szakaszán sokkal sűrűbben keletkeznek a felbetonban morzsolódások és repedések, mint a tartó alsó síkján.

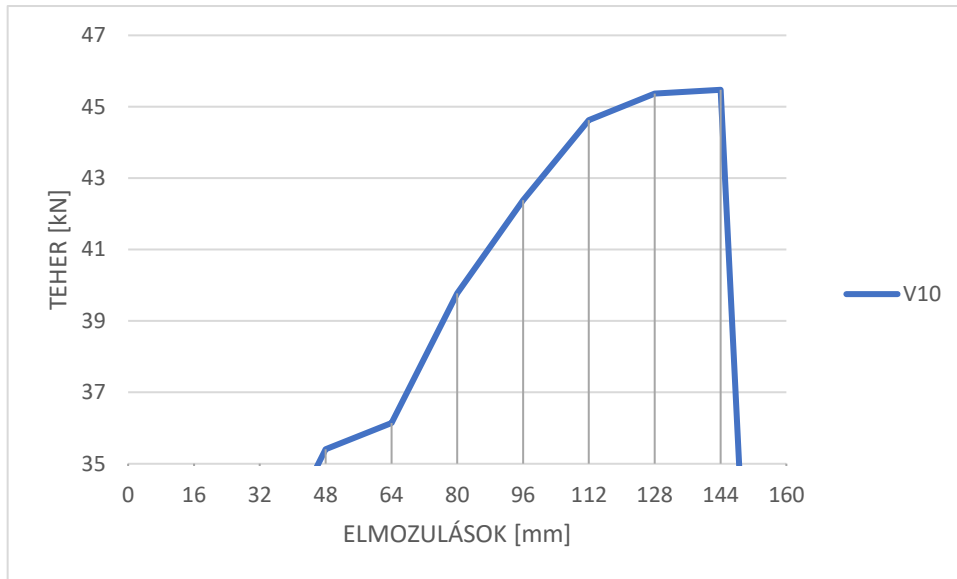


34/a, Fázis kezdete



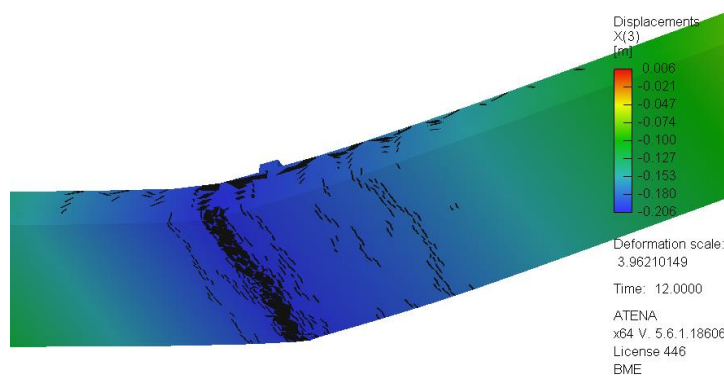
34/b, Fázis vége

A felső öv egyre jobban összeropedezik és elindul egy következő fázis, (lásd. 34.ábra) ahol a panel további terheket vesz fel. Tehát a panel viszonylag rugalmasan viselkedik a felbetonhoz képest, de a kapcsolódó felület miatt kénytelen lekövetni az elmozdulásokat. Ahogy a felbeton morzsolódik a középső keresztmetszetben, megcsúszhat a panelhez képest és úgy képes a panel újabb terhek felvételére. (lásd. 35.ábra)

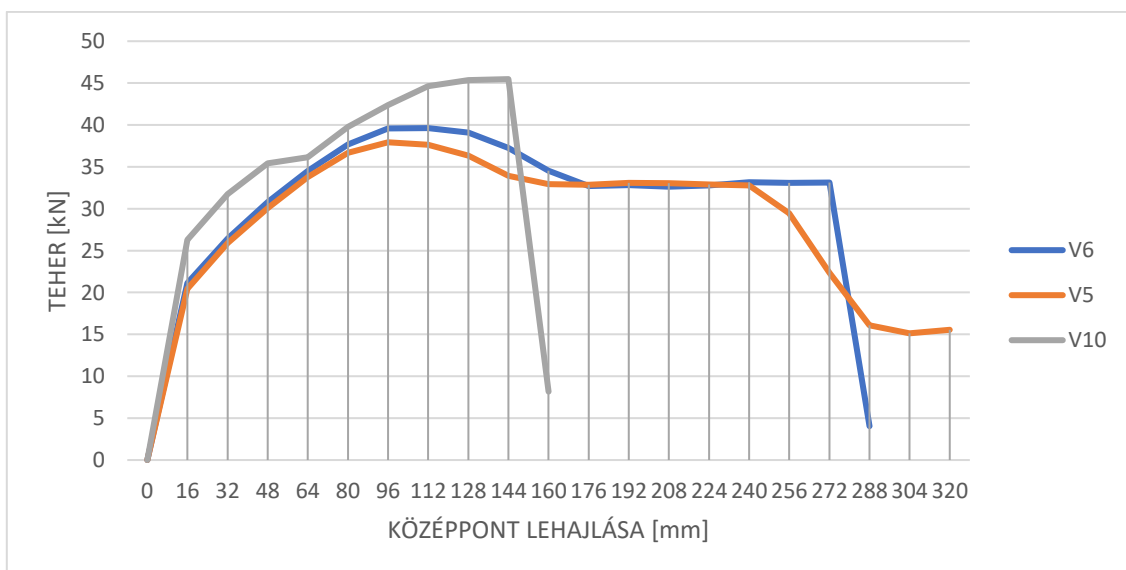


35, V10 modell erő elmozdulás diagramja

Ezen fázis végére a panel is teljesen összeropedezik. Végül a tartó a panel eltörésével tönkremegy. (lásd. 36.ábra) Tehát kulcsfontosságú a betonok közötti kapcsolat értékeinek helyes megválasztása.



36, Leszakadt palló



37, Erő elmozdulás ábrák összehasonlítása.

Ridegebb tönkremenetelt okoz, ha a felbeton és a panel is azonos betonminőségűek, de azonos elmozduláshoz nagyobb teher tartozik. (lásd. 37.ábra)

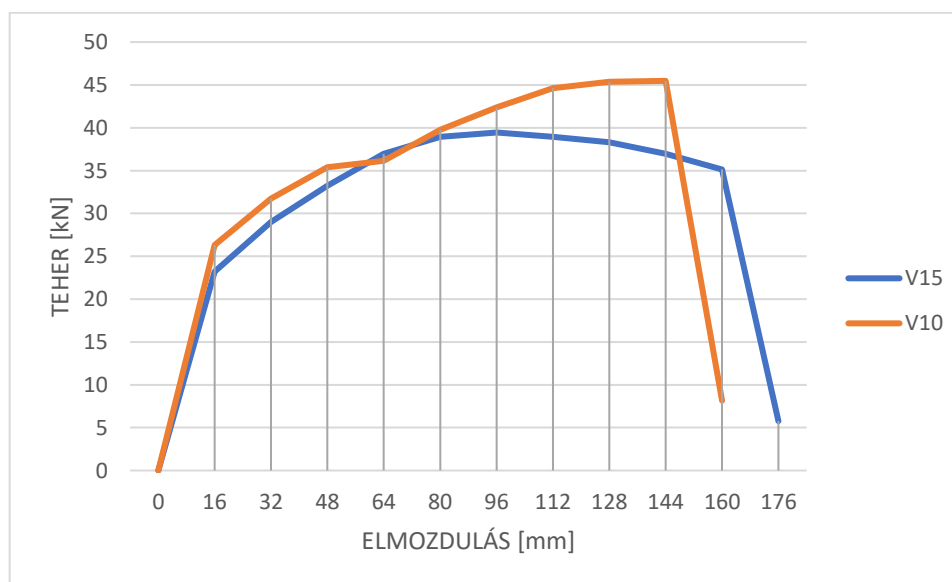
A V10 modell maximálisan 45,475kN terhet volt képes felvenni és ehhez 144,787mm elmozdulás tartozott.

4.4, V15 MODELL VERZIÓ:

Ezen modell esetében hasonlóak a tulajdonságok a V10-eséhez. Különbség ugyanakkor a felbeton szilárdsága. 24 óra utáni kizsaluzás esetén a felbeton anyagtulajdonságai még közel sem érik el a 28-napos betonét. Továbbá különbség a két beton közötti kapcsolati elem értékeinek jelentős lecsökkentése, kivéve a súrlódási együttható (*friction coefficient*), amelynek értékét 0,2-re növeltem 0,1-ről. (lásd. 4.táblázat)

| ANYAGTULAJDONSÁG - PANEL | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------|---------|--------------------------|----------|------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|---------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|
| FUTTATÁSOK | BASIC | | | | TENSILE | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | |
| CEMENTIOUS2 | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | $\epsilon - CP$ | FC.0 [MPa] | W.d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION |
| V10 | 32009 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V15 | 32009 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| ANYAGTULAJDONSÁG - FELBETON | | | | | | | | | | | | | |
| FUTTATÁSOK | BASIC | | | | TENSILE | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | |
| CEMENTIOUS2 | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | $\epsilon - CP$ | FC.0 [MPa] | W.d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION |
| V10 | 30303 | 0,2 | 2,21 | -28 | 1 | - | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V15 | 16005 | 0,2 | 0,64 | -8,25 | 1 | - | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| KONTAKTELEM TULAJDONSÁGAI | | | | | | | | | | | | | |
| FUTTATÁSOK | MATERIAL PROTOTYPE | | NORMAL STIFFNESS [MN/m3] | | TANGENTIAL STIFFNESS [MN/m3] | | COHESION [MPa] | | FRICTION COEFFICIENT | | TENSION STRENGTH FT [MPa] | | BETONACÉL MEGCSÚSZÁSA |
| V10 | CC3DINTERFACE | | 2+8E | | 2+8E | | 1 | | 0,1 | | 0,3 | | - |
| V15 | CC3DINTERFACE | | 1000 | | 1 | | 1 | | 0,2 | | 0,3 | | - |

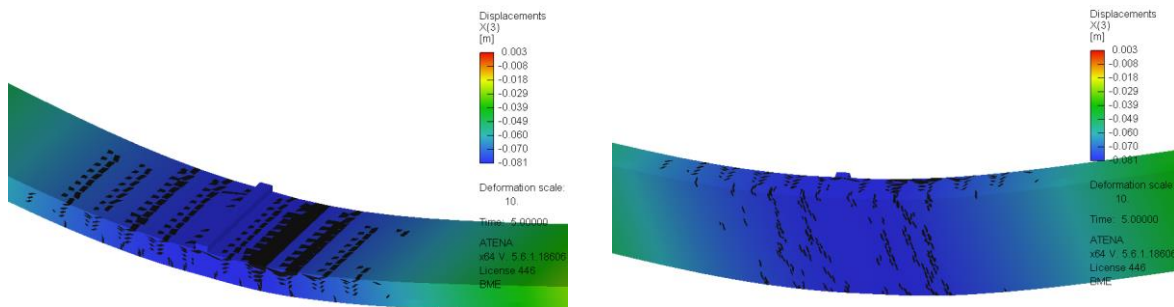
4, Táblázat V10 és V15 modellek anyagtulajdonságai és a kontakt elemeik tulajdonságai



38, V10 és V15 Modell Erő-elmozdulás diagrammja

Az I. feszültségi állapot kisebb tehernél ér véget, mint a V10-es modell esetében (V10-26,296kN és V15-23,199kN). Ezt követően közel folytonos a diagramja ellentétben a V10-esével. (lásd. 38.ábra) A V15-ös modell esetén a panel alja bereped, majd jelentősen elkezd repedezni a felbeton a csökkentett szilárdsága miatt. A repedések a felbetonon 1,5mm

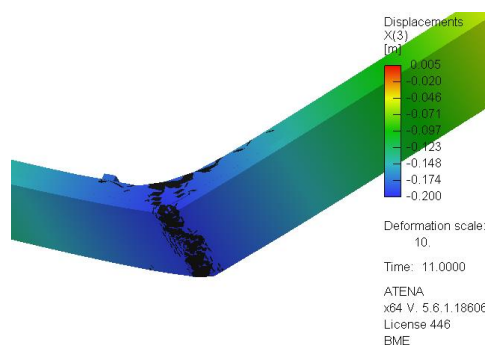
szélességűek. A panel alján is folyamatosan jelennek meg keresztirányú repedések bár kevésbé sűrűn, mint a felbetonnál. Az alsó repedések megnyílása minimális 0,02mm. (lásd. 39.ábra)



39, Repedezettség a szerkezet alsó és felső síkján

Végül a felbeton repedezettsége miatt a nyomott zóna lecsökkenésével a panel egyszerűen ketté törik a terhelés alatt. (lásd. 40.ábra)

A V15 modell maximálisan 39,448kN terhet volt képes felvenni és ehhez 96,242mm elmozdulás tartozott.



40, V15 Modell tönkremenetele

4.5, V20 MODELL VERZIÓ:

A V20-as modell esetén a felbeton is teljes szilárdsággal szerepel. A kontakt elem értéke még mindig le van csökkentve. A különbség ezen modell és a korábbi modellek között annyiban jelenik meg a felbeton szilárdságán kívül, hogy figyelembe veszem az acélbetétek megcsúszását a panelben és a felbetonban egyaránt. Az acélbetétek megcsúszását Roszevák Zsolt TDK dolgozata alapján veszem figyelembe.⁴⁹ (lásd. 5.táblázat)

⁴⁹ Roszevák Zsolt – Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata (2015), TDK dolgozat p.46

| ANYAGTULAJDONSÁG - PANEL | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------|----------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------|-----------|---------|------------------|--------------------------|--------------|
| FUTTATÁSOK | BASIC | | | TENSILE | | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | |
| CÉMENTIÓUSZ | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | $\epsilon - CP$ | FC0 [MPa] | W.d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION |
| V20 | 32009 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V15 | 32009 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| ANYAGTULAJDONSÁG - FELBETON | | | | | | | | | | | | | |
| FUTTATÁSOK | BASIC | | | TENSILE | | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | |
| CÉMENTIÓUSZ | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | $\epsilon - CP$ | FC0 [MPa] | W.d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION |
| V20 | 32009 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V15 | 16005 | 0,2 | 0,64 | -8,25 | 1 | - | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| KONTAKTELEM TULAJDONSÁGAI | | | | | | | | | | | | | |
| FUTTATÁSOK | MATERIAL PROTOTYPE | NORMAL STIFFNESS [MN/m3] | TANGENTIAL STIFFNESS [MN/m3] | COHESION [MPa] | FRICTION COEFFICIENT | TENSION STRENGTH FT [MPa] | BETONACÉL MEGCSÚSZÁSA | | | | | | |
| V20 | CC3DINTERFACE | 1000 | 1 | 1 | 0,2 | 0,3 | BAR WITH BOND | | | | | | |
| V15 | CC3DINTERFACE | 1000 | 1 | 1 | 0,2 | 0,3 | - | | | | | | |

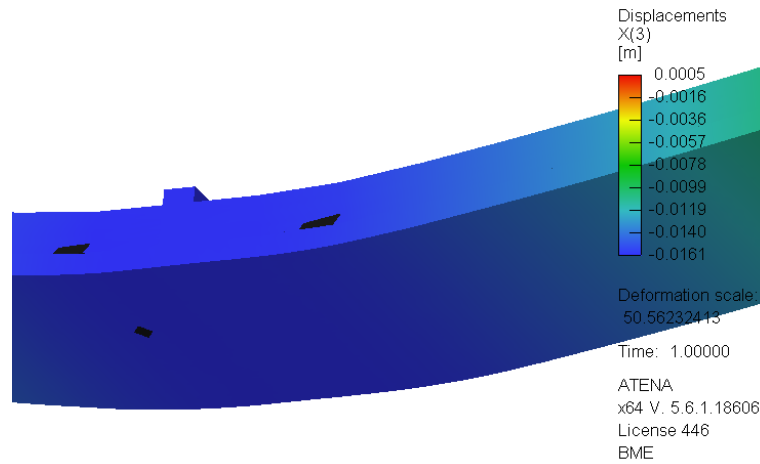
5, Táblázat V15 és V20 modellek anyagtulajdonságai és a kontakt elemeik tulajdonságai



41, V15 és V20 Modellek Erő-elmozdulás diagramja

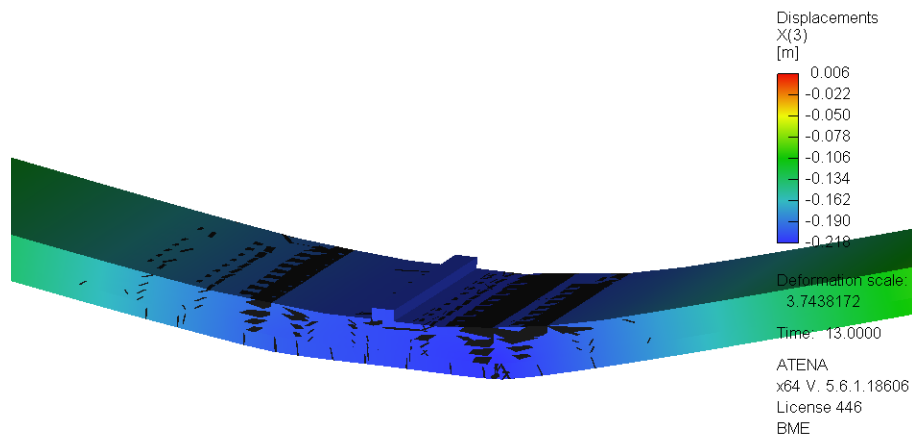
Az I. feszültségi állapot közel azonosnak tekinthető a két modellben. V15 modell esetén: 16mm – 23,1988kN, míg V20 esetén: 16mm – 21,902kN. (lásd. 41.ábra) Ezt követően a V15-ös modell esetében nagyobb a görbe meredeksége, mely nagyobb hajlítási merevséget jelent.

A berepedés a középső keresztmetszet közelében következik be. Megjelennek repedések a panel alsó síkján, illetve elmozdul egymáshoz képest a panel és a felbeton. A kettő határán is észrevehetőek a repedések. A panel és a felbeton betonminősége megegyezik, ami egy eltérés a V15-ös modell verzióhoz képest, de ez nem indokolná a repedést a két elem között. (lásd. 42.ábra) Ezért arra következtettek, hogy a másik változtatás okozhatta, azaz a betonacélok megcsúszásának engedélyezése.



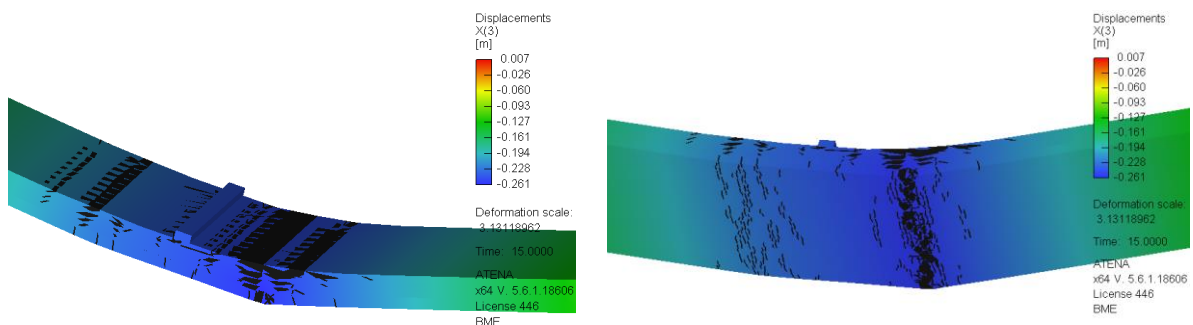
42, Repedések az I. feszültségi állapot végén

Ezt követően a felbeton kezd teljesen összemorzsolódni (lásd. 43. ábra), míg a panel alsó síkján is egyre több repedés jelentkezik. A repedések kialakulása a felbeton morzsolódásának tönkremenetelét prognosztizálja előre.



43, V20 Leszakadás közeli állapot lehajlásai és repedései

A teher további növelésével közel a tartó tönkremeneteléhez, egyre nagyobb mezőben jelennek meg a repedések mind alul (0,5mm) mind felül (10mm). A felbeton repedéseinek megnyílása ugyanekkor lesz a V15-ös modell esetén is, de a kettő elmozdulás között ~5 cm a különbség.



44, Tönkrement tartó repedései és lehajlása

Amíg a tartó felső öve teljes mértékben kezd összerepedezni, addig az alsó síkján minimálisabb keresztirányú repedés jelenik meg. Végül a felbeton egy keresztmetszetben teljesen összemorzsolódott, ennek következtében a nyomott öv minimálisan vett részt az erőtájtékban, a panel pedig eltört (lásd. 44.árba). A tönkremenetel: 30,286kN-nál és 224,847mm elmozdulásnál következett be.

A panel kéregvasalása igen jelentős, így a tönkremenetel gyakran a felbeton morzsolódásához vezet.

A V20 modell maximálisan 34,129kN-t tudott felvenni és ehhez 144,254mm-es elmozdulás tartozik.

4.6, V22 MODELL VERZIÓ:

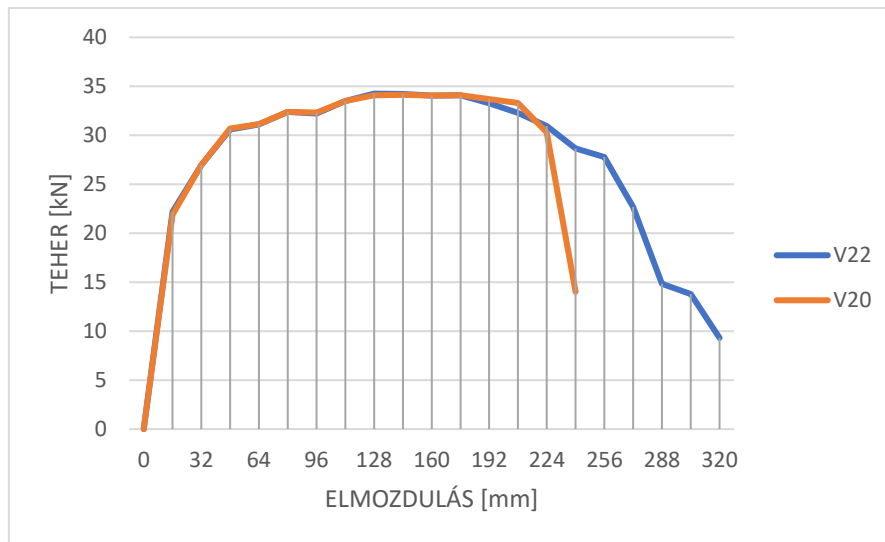
| ANYAGTULAJDONSÁG - PANEL | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------|--------------------|---------|---------------------------------------|----------|---|---------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|---------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|--|
| FUTTATÁSOK | | BASIC | | | | TENSILE | | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | |
| | CEMENTIOUS2 | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | $\epsilon - CP$ | FC.0 [MPa] | W.d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION | |
| V20 | | 32009 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D | |
| V22 | | 32009 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D | |
| ANYAGTULAJDONSÁG - FELBETON | | | | | | | | | | | | | | | |
| FUTTATÁSOK | | BASIC | | | | TENSILE | | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | |
| | CEMENTIOUS2 | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | $\epsilon - CP$ | FC.0 [MPa] | W.d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION | |
| V20 | | 32009 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D | |
| V22 | | 32009 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D | |
| KONTAKTELEM TULAJDONSÁGAI | | | | | | | | | | | | | | | |
| FUTTATÁSOK | | MATERIAL PROTOTYPE | | NORMAL STIFFNESS [MN/m ³] | | TANGENTIAL STIFFNESS [MN/m ³] | | COHESION [MPa] | | FRICTION COEFFICIENT | | TENSION STRENGTH FT [MPa] | | BETONACÉL MEGCSÚSZÁSA | |
| V20 | | CC3DINTERFACE | | 1000 | | 1 | | 1 | | 0,2 | | 0,3 | | BAR WITH BOND | |
| V22 | | CC3DINTERFACE | | 64000 | | 64000 | | 3 | | 3 | | 2,5 | | BAR WITH BOND | |

6. Táblázat V20 és V22 modellek anyagtulajdonságai és a kontakt elemeik tulajdonságai

Az előző eredményeket látva, egy a végleges állapotot leíró komplett modellt készítettem. Ezen modellnél a panel és a felbeton is teljes szilárdságú, C25/30-as betonszilárdsághoz tartozó értékek.

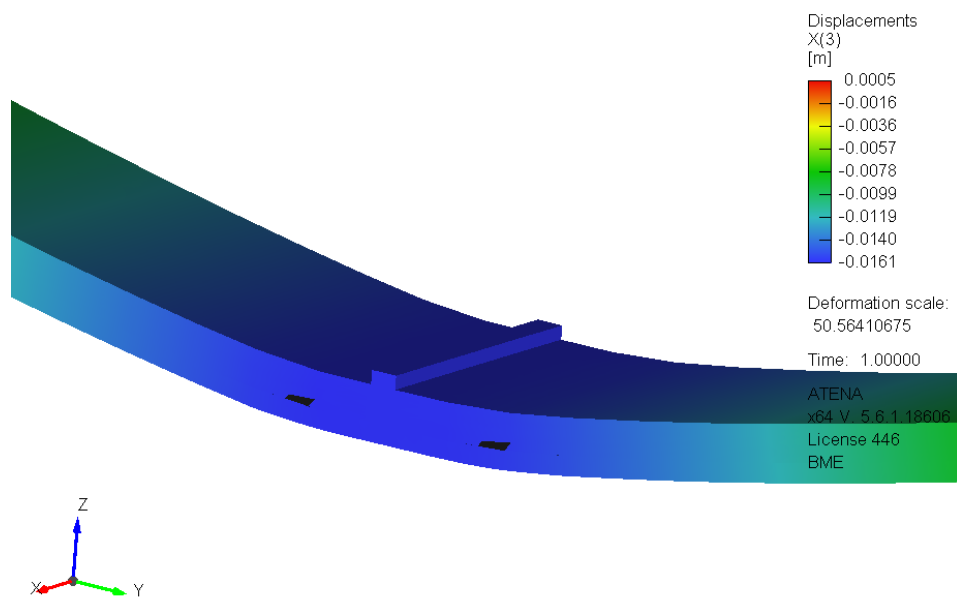
Mint korábban már, így ebben a modellben is, a „Fixed Crackinget” 1,0-ra állítottam be, illetve az „Aggregate Interlockot” 2cm-ben korlátoztam.

A jelentős különbség a V22-es modell és a V20-as modell között a betonok közötti kapcsolóelem definiálásban van. Az 5.3.4, fejezetben bemutatott képletekkel a kapcsolóelem merevségét és kohézióját pontosan kiszámoltam. (lásd. 6.táblázat.)



45, V20 és V22 modell Erő-elmozdulás diagramja

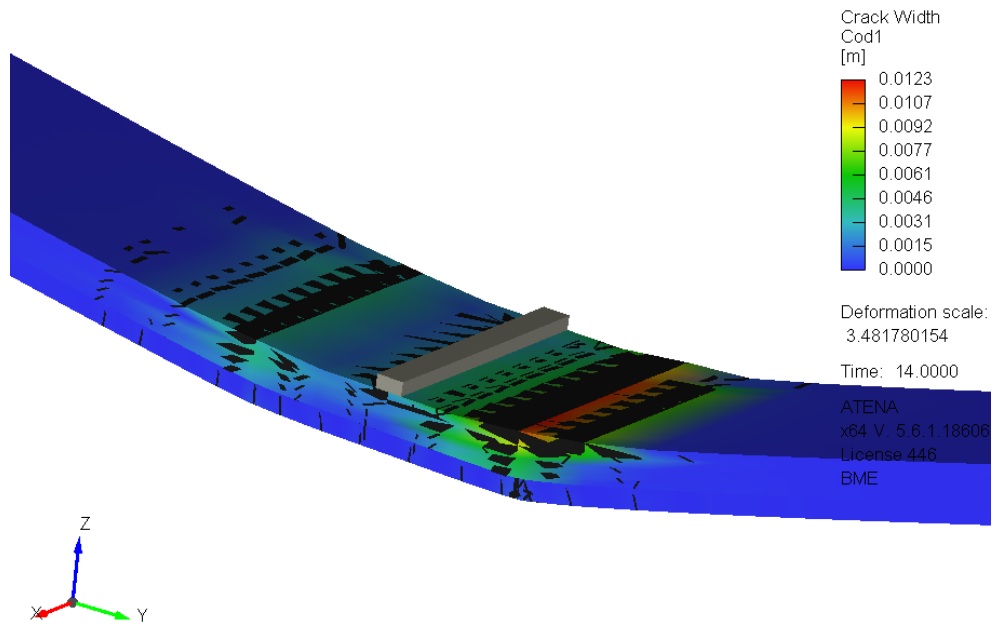
A két modell a kezdeti szakaszon közel azonosan viselkedik (lásd. 45.ábra). Itt is megjelennek repedések a felbeton és a panel között az I. feszültségi állapot végén (lásd. 46.ábra).



46, V22 modell elmozdulásai és repedései

A V20-as modellhez hasonlóan itt is jelentős (12mm) repedésmegnyílások figyelhetők meg a felbetonban (lásd. 47.ábra), viszont ebben az esetben a tönkremenetel kevésbé direkt módon következik be.

A V22-es modell maximálisan 39,448kN terhet volt képes felvenni és ehhez 96,242mm elmozdulás tartozott.



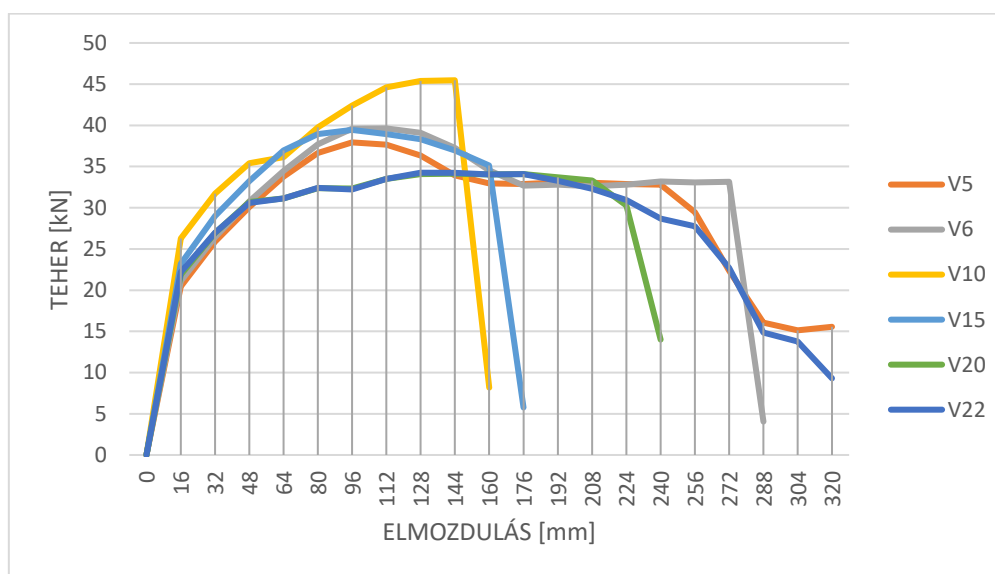
47.ábra V22 modell tönkremenetel előtti elmozdulások és repedések

5, ÖSSZEGZÉS:

A modellek különböző paramétereinek változtatásával lépésről lépésre próbáltam megközelíteni a valós panel viselkedését. (lásd. 7.táblázat és 46.ábra) Ezen paraméterek a beton különböző tulajdonságait befolyásolják, mint például a felbeton betonminősége. Nagyon fontos volt a kísérletek során a felbeton és a panel közötti kapcsolat helyes kiválasztása. Itt a szélső értékeken kívül konkrét értékeket is vizsgáltam. Az eredmények között néhány számomra érdekesebb variációt mutattam be jelen TDK dolgozatomban. Ezen variációkat mind elmozdulások, mind repedések szempontjából elemeztem, a terhelés kezdetétől fogva egészen a tönkremenetelig. Az eredményeket összehasonlítottam és kiválasztottam azokat a modellezési eljárásokat és beállításokat, melyre a későbbi modellek épültek. Nehezítette a feladatot, hogy valós kísérletek eredményei nem állnak még rendelkezésemre. Következő lépésként a numerikus modell valós kísérletekkel (irodalmi, vagy gyártó adatok alapján) verifikálása válik szükségessé.

| ANYAGTULAJDONSÁG - PANEL | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------|---------------------------------------|---|----------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------|-----------|---------|------------------|--------------------------|--------------|----|
| FUTTATÁSOK | BASIC | | | | TENSILE | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | | |
| | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | $\epsilon - CP$ | FC0 [MPa] | W d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION | |
| V5 | 31000 | 0,2 | 2,6 | -33 | 0 | 0,05 | | 0,02 | -0,001 | -5,46 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V6 | 31000 | 0,2 | 2,6 | -33 | 0 | 0,05 | | 0,02 | -0,001 | -5,46 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V10 | 32009,3 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V15 | 32009,3 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V20 | 32009,3 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V22 | 32009,3 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| ANYAGTULAJDONSÁG - FELBETON | | | | | | | | | | | | | | |
| FUTTATÁSOK | BASIC | | | | TENSILE | | | COMPRESSIVE | | | ELEMENT GEOMETRY | | | |
| | E [MPa] | POISSON | FT [MPa] | FC [MPa] | Fixed crack | REPEDÉSTÁGASSÁG [m] | ADALÉKANYAG MÉRET [m] | $\epsilon - CP$ | FC0 [MPa] | W d [m] | FC Reduction | GEOMETRIAI NEMLINEARITÁS | IDEALISATION | |
| V5 | 18600 | 0,2 | 0,52 | -6,6 | 1 | 0,05 | | 0,02 | -0,001 | -5,46 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V6 | 18600 | 0,2 | 0,52 | -6,6 | 1 | 0,05 | | 0,02 | -0,001 | -5,46 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V10 | 30303,4 | 0,2 | 2,21 | -28 | 1 | - | | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V15 | 16004,65 | 0,2 | 0 | 0 | 1 | - | | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V20 | 32009,3 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| V22 | 32009,3 | 0,2 | 2,56 | -33 | 1 | - | | 0,02 | -0,00133 | -5,39 | -0,0005 | 0,8 | NONLIN | 3D |
| KONTAKTELEM TULAJDONSÁGAI | | | | | | | | | | | | | | |
| FUTTATÁSOK | MATERIAL PROTOTYPE | NORMAL STIFFNESS [MN/m ³] | TANGENTIAL STIFFNESS [MN/m ³] | COHESION [MPa] | FRICTION COEFFICIENT | TENSION STRENGTH FT [MPa] | BETONACÉL MEGCSÚSZÁSA | | | | | | | |
| | V5 | CC3DINTERFACE | 2+8E | 2+8E | 1 | 0,1 | 0,3 | - | | | | | | |
| V15 | CC3DINTERFACE | 1000 | 1 | 1 | 0,2 | 0,3 | - | | | | | | | |
| V20 | CC3DINTERFACE | 1000 | 1 | 1 | 0,2 | 0,3 | BAR WITH BOND | | | | | | | |
| V22 | CC3DINTERFACE | 64000 | 64000 | 3 | 3 | 2,5 | BAR WITH BOND | | | | | | | |

7. Táblázat Összes modell anyagtulajdonságai és a kontakt elemek tulajdonságai



46. Modellek Erő-elmozdulás diagramja

A legtöbb esetben jól kivehető, hogy a kéregvasalás erőssége miatt a tönkrementel oka a felbeton összemorzsolódása. Erre hatással van a kizsaluzás időpontja, azaz a felbeton elért szilárdsága, a kapcsolóelem, illetve a betonacélok megcsúszása.

A berepedés a panel alján kezdődött az esetek többségében, de ezzel párhuzamosan bizonyos paraméterű modelleknél a felbetonban, illetve a két beton közötti kapcsolatnál is repedések indultak meg. Ezen felbetonban található repedések sok esetben jelentősen megsűrűsödtek, és végül a teljes szerkezet tönkremenetelét okozták a beton nyomott zónájának lecsökkenésével.

Fontos paraméter, hogy a betonacélok elcsúszása miként befolyásolja a tartó viselkedését, valamint az is, hogy a kapcsoló elem, amely a felbeton és a panel közti felületen található

hogyan adja át a terheit az elemek között és ez hogyan befolyásolja a teljes szerkezet viselkedését.

6, TOVÁBBI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK:

A megfelelő modellezési eljárás kidolgozása révén a szerkezet paramétervizsgálatával a szerkezetet lehetne optimalizálni.

Lehetne gyengíteni az alsó vasalást és vizsgálni a tartót olyan tönkremenetelekre, ahol a felbeton morzsolódása nem mértékadó, illetve a felbeton betonminőségét növelni, hogy annak tönkremenetele a panelével egyidőben következzen be.

A betonok közötti kapcsolóelem különböző módosításai szintén érdekes eredményekre vezethetnek. Továbbá érdemes lehet vizsgálni a kapcsoló elem beállításának további lehetőségeit és annak kihatását az egész szerkezet viselkedésére.

A támaszok az én vizsgálatom esetében csuklósak, de ha ezeket befogottá tennénk egészen másféle igénybevételeket kaphatnánk. Ugyanez igaz olyan vizsgálatok készítésére is, ahol a támaszok csak részlegesen befogottak. Ezen modellenél próbálnánk a valós viselkedést lekövetni.

Lehetne a tartó geometriáját is módosítani azzal, hogy a nyíróigénybevételeket dominánsabbá tesszük és megvizsgáljuk a panel és a felbeton kapcsolatát.

Lehetne egy olyan modellt készíteni melyre nem helyezünk elmozdulás vezérelt terhet viszont a felbeton zsugorodásából származó igénybevételeket működtetünk a tartón.

A fentiekben felsorolt változtatások segítségével lehetséges egy komplex, megfelelő megtámasztású, optimális vasalású és betonminőségű modellt készíteni, melyre rá kerülhetne a zsugorodásból létrejövő igénybevétel is.

FELHASZNÁLT IRODALOM:

Beton szakmai lap: XXIX. évfolyam III. szám: Asztalos István: A beton története IV. rész - Mit tett egy kevésbé ismert népcsoport a beton érdekében, még a rómaiak előtt? - 2021. június

Bodó Pál Boldizsár: Vasbeton síklemez egyenértékű kerettel történő helyettesítése vízszintes teherre, numerikus vizsgálatok alapján (2019)

Bogár Blanka, Blázsán Dániel: Különböző csomópontú numerikus modellek hatása egyszerű előregyártott vasbeton keretváz igénybevételeire (2019)

Palotás László: A vasbeton elmélete (1973)

Roszevák Zsolt: Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata TDK dolgozat

Szalai Kálmán: Vasbeton Szerkezetek (1987)

The Aberdeen Group: The development of reinforced concrete (1961)

Leier: Előregyártott betonelemek, alkalmazástechnika és tervezési segédlet

Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka: ATENA Program Documentation Theory (2018)

FELHASZNÁLT KÉPEK:

Wikipédia.hu: Joseph Monier

https://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Monier#/media/File:Joseph_Monier.jpg

Wikipédia.hu: Zielinski Szilárd

https://hu.wikipedia.org/wiki/Zielinski_Szil%C3%A1rd#/media/F%C3%A1jl:Zielinski_Szil%C3%A1rd.jpg

Saját fotó: Unilever hidegraktár - Nyírbátor, 2021

Leier.hu: Leier kéregfal LKF <https://www.leier.hu/leier-keregfal-lkf>

Leier.hu: Mesterfödém <https://www.leier.hu/mesterfodem-mesterfodem>

Leier.hu: Üreges, előfeszített födempalló <https://www.leier.hu/ureges-elofeszitett-fodempallo>

Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka: ATENA Program Documentation Theory (2018)