



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia

Zártszelvényű öszvéroszlop szerkezeti viselkedése

Készítette: Király Krisztián

Másodéves MSc építőmérnök hallgató

Konzulensek:

Dr. Dunai László

Hidak és Szerkezetek Tanszék

Dr. Kövesdi Balázs

Hidak és Szerkezetek Tanszék

Kocsis András Balázs

BIM Design Kft.

2020.11.02.

Összefoglaló

A magasépítésben és a hídépítésben is elterjedten alkalmaznak öszvérszerkezeteket. Az Eurocode 4 szabvány méretezési eljárást biztosít öszvégerendák és öszvéroszlopok tervezésére, adott alkalmazási határokkal. További kutatások tárgyát képezik a határok kiterjesztése, valamint az együttműködésből és a beton berepedésének hatásából származó bizonytalanságok. A dolgozatomban az új Komáromi Duna híd pilonját vizsgálom, amely részben öszvér-, részben acélszerkezet. Egy ilyen szerkezet méreteiben és viselkedésében is lényegesen eltér egy magasépítésben használatos kibetonozott zártszelvényű oszloptól, így a szabványos méretezési módszerek közvetlenül nem alkalmazhatók a vizsgálatára. A jelen munkám fő célja ennek a speciális öszvérszerkezetnek a vizsgálata.

Az előtanulmányomban olyan megvalósult öszvérszerkezetű példákat mutatok be, ahol hasonló problémák merülnek fel a szerkezetek tervezésénél. A magasépítésben ilyenek az öszvér kialakítású merevítő magok és merevítő falak, a hídépítésben pedig a kibetonozott csőszelvényű hídszerkezetek.

Az elemzéshez kifejlesztettem a pilon vizsgálatára különböző szintű végeeselemes modelleket. A modellezési folyamat kiindulása a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék által korábban kidolgozott globális modell a teljes hídszerkezetről, amelyben a pilon rúdelemként volt definiálva. Ebből kiindulva fejleszték egy olyan végeeselemes modellt, ahol a pilont acél és beton testelemekből építettem fel. Emellett elkészítettem több lokális modellt is, melyekkel a pilon szerkezeti részletei vizsgálhatók nagyobb pontossággal. A lokális modelleket először alapesetekre ellenőriztem, szilárdságtani alapon meghatározott feszültségek alapján. A feszültségeken kívül a modellek merevségét is vizsgáltam. Kiindulásként minden esetben teljes együttműködést feltételeztem az acél és a beton között. A TDK dolgozatom beadása idején készült el a pontosított testelemes modell, ennek első eredményeiről számolok be.

A modellfejlesztésem idején, a Komáromi Duna hídon 2020. május 16-án megtörtént a szerkezet statikus és dinamikus próbaterhelése, amit a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék hajtott végre. A mérésen személyesen is részt vettem az egyik mérőcsapat tagjaként. A próbaterhelés során a pilon alsó keresztmetszetében nyúlásmérő bélyegekkel feszültségmérés történt, valamint mérték a piloncsúcs elmozdulását. A tanulmányom másik célja, a pilonra vonatkozó mérési eredmények feldolgozása.

A pilon keresztmetszetében létrejövő feszültségeket kiértékeltem és elemeztem az összes teherállásban. Ezen eredményeket összevettem a rúdelemekből és a testelemekből létrehozott globális végeeselemes modellek alapján számított feszültségekkel. A piloncsúcs elmozdulásaiból pedig a szerkezet merevségére következtettem.

A kidolgozott modelljeim és a próbaterhelés eredményei alapján elkészült a feltételezett és a valódi viselkedésű szerkezet összehasonlító elemzése. A vizsgálatok eredményeként validáltam a globális és a lokális viselkedés követésére kidolgozott modelljeimet. A következtetésekben javaslatokat fogalmaztam meg az ilyen összetett erőjátékú öszvérszerkezet modellezésére vonatkozóan. A validált modellek alkalmazhatók lesznek – további kutatások végrehajtásával – a szerkezet szilárdsági és stabilitási méretezésére.

Abstract

Structural behavior of hollow section composite column

Steel-concrete composite structures are widely used in building and bridge structural constructions. The Eurocode 4 standard provides design procedures for typical composite beams and columns with specific application limits. Further research is under way to expand these limits and the uncertainty of the composite action between the concrete and steel, furthermore the effect of concrete cracking. In my research the pylon of the new Danube bridge at Komárom is studied, which is partly composite and steel structure. A complex structure like this is different in their sizes and behavior from the typical hollow section composite columns applied in building construction, so the standard cannot be used directly during the design. The main aim of the current study is the examination of this type of special composite structures.

The first step of the study is to overview composite structures where we can find similar problems in behavior and designing. In the building construction there are composite shear walls and concrete-filled hollow sections in bridge structures.

For the examination of the pylon I developed several finite element models on different levels. The starting point for the model processing is a previously completed global model of the whole bridge applied by the Department of Structural Engineering, BME. In this model the pylon is defined as beam element. I improved this model and the pylon parts are defined as solid elements for both steel and concrete components. Besides these models further local models are also developed in order to examine the details more precisely. First of all, I inspected these local models for simple loads and determined the stresses on the elementary cross-section basis of strength of materials. Besides that, I studied the stiffness of the models. Initially I assumed full composite action between the steel and the concrete in all models. The specified solid element model was done at the time of submission of my TDK study, I present its first results.

A load test took place at the Danube bridge at Komárom in parallel with the model development on May 16, 2020. There were static and dynamic loading tests, executed by the Department of Structural Engineering, BME. I had the opportunity to take part in the loading test as a member of a measuring team. During the event stresses were measured with strain gauges in the pylon's lower cross-section, furthermore they measured the displacements of the pylon's highest point. In my research I analysed the measurement results, too.

I evaluated and analysed the stresses of the pylon's cross-section in all the applied load cases. I compared the experimental and the beam and the solid global models' stress results. I also analysed the displacements of the pylon's tip and I evaluated the stiffness of the structure.

On the basis of my elaborated models and the results of the bridge's load test a comparative analysis of the hypothetical and the real behavior of the structure is completed. From the results of the studies, I validated my models developed to follow the global and local behavior. In the conclusions, I made suggestions for modeling such a complex composite structure. These validated models are applicable for further research, and to apply them in the strength and stability design of the structure.

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	2
Abstract	3
1. Bevezetés.....	6
1.1 Áttekintés.....	6
1.2 A célkitűzés	6
1.3 A megoldás menete	6
2. A szerkezeti kialakítás vizsgálata.....	7
2.1 A zártszelvényű öszvéroszlop	7
2.2 Öszvér merevítő fal	8
2.3 Kibetonozott csőszelvény – Shinkansen gyorsvasúti híd.....	9
2.4 Összegzés.....	10
3. A Komáromi Duna híd	11
4. A pilon vizsgálata keresztmetszeti szinten.....	12
4.1 A szerkezeti kialakítás	12
4.2 Az öszvér keresztmetszet.....	15
5. A keresztmetszet lokális numerikus vizsgálata	17
5.1 A lokális numerikus modellek általános információi	17
5.2 Egyszerű vizsgálatok	18
5.3 További vizsgálatok.....	19
6. A pilon globális numerikus vizsgálata	20
6.1 A globális modellek áttekintése.....	20
6.2 Rúdelemekből készült pilon globális modellje.....	21
6.3 Testelemekből készült pilon globális modellje	22
6.4 A modellek vizsgálata	24
7. A híd próbaterhelése.....	26
7.1 A próbaterhelés áttekintése.....	26
7.2 A teherállások	27
7.3 A lehajlások mérése.....	29
7.4 A piloncsúcs elmozdulásának mérése	29
7.5 A nyúlások mérése.....	30
7.6 További mérések.....	30
8. A hídszerkezet lehajlása	31
9. A piloncsúcs elmozdulásának vizsgálata	33

9.1	A piloncúcs elmozdulása a próbaterhelés alatt	33
9.2	A piloncúcs elmozdulása a globális rúdmodellben.....	35
9.3	Az eredmények összefoglalása	37
10.	A pilonban keletkező feszültségek vizsgálata	37
10.1	A mérési eredmények feldolgozása	37
10.1.1	A vizsgált keresztmetszet	37
10.1.2	A mérési adatok.....	38
10.1.3	A vizsgált keresztmetszet feszültségeloszlásai	39
10.2	A globális rúdmodell feszültségei.....	42
10.2.1	Áttekintés	42
10.2.2	A vizsgált keresztmetszet feszültségeloszlásai	45
10.3	A globális testelemekből létrehozott modell feszültségei.....	48
10.3.1	Áttekintés	48
10.3.2	A vizsgált keresztmetszet feszültségeloszlásai	49
10.4	Az eredmények összefoglalása	52
11.	Összefoglalás.....	53
	Irodalomjegyzék.....	55
	Ábrajegyzék	56
	Táblázatok jegyzéke.....	57

1. Bevezetés

1.1 Áttekintés

A jelen munkám célja az új Komáromi Duna híd – részben öszvér-, részben acélszerkezetű – pilonjának a vizsgálata. A BSc szakdolgozatomban egy öszvérszerkezetű irodaházat terveztem öszvéroszlopokkal és integrált öszvér födémszerkezettel. Az öszvérszerkezetek vizsgálata már korábban is érdekelt, 2017-ben TDK dolgozat keretein belül innovatív nyírt kapcsolóelemekkel kialakított öszvérgerendák viselkedését elemeztem a Hidak és Szerkezetek Tanszék által végzett gerendakísérletek alapján. A korábbi munkáim során egyre nyilvánvalóvá vált számomra, hogy az öszvérszerkezetek viselkedésében számtalan bizonytalanság rejlik, mint például az együtdolgozás hatékonysága, a beton berepedésének hatása, vagy az öszvér csomópontok viselkedése. Úgy tűnhet, a jelenlegi munkámmal némi kitérőt teszek, de valójában egy kibetonozott zártszelvényű oszlop vizsgálata szorosan az öszvérszerkezetek megismeréséhez kapcsolódik.

A témám tehát egy olyan öszvéroszlop elemzése, amely méreteiben, szerkezeti kialakításaiban és terhelés szempontjából is eltérő egy egyszerűbb, magasépítésben használt kibetonozott zártszelvénytől. Ez a különleges öszvérszerkezet a Komáromi Duna híd pilonja. A célom, hogy megismerjem a szerkezet viselkedését végelesemes modellen alapuló analízis segítségével, amit a híd próbaterhelésének mérési adataival hasonlítok össze.

Először részletezem a feladatot: mik a szerkezeti viselkedés jellegzetességei és hogyan lehet ezeket vizsgálni. A szakirodalmi áttekintéssel bemutatok néhány példát, ahol hasonlóan bonyolult öszvérszerkezeteket vizsgáltak, majd kapcsolatot teremtek ezek és a jelenlegi feladat között.

1.2 A célkitűzés

A kutatásom célja az új Komáromi Duna híd pilonja kapcsán a teljesen vagy részlegesen kibetonozott öszvéroszlopok merevségének, feszültségi állapotának és teherbírásának vizsgálata. Az elemzéshez globális és lokális vizsgálatokra alkalmas végelesemes modelleket hozok létre. 2020. május 16-án megtörtént a híd próbaterhelése, amely a kutatásom kísérleti háttereként szolgál. A pilon mért merevsége és feszültségei alapján kidolgozom és validálom a különböző szintű numerikus modelleket.

1.3 A megoldás menete

Első lépésként szakirodalmi áttekintés végzek, amiben ismertetem a zártszelvényű öszvéroszlopokra jellemző szerkezeti kialakítást és viselkedésének jellegzetességeit. Az ilyen speciális szerkezetek alkalmazását magasépítésben és hídépítésben megvalósult példákon keresztül mutatom be. Ezt követően áttekintem az új Komáromi Duna híd szerkezeti tulajdonságait, különösen a vizsgálat tárgyát képező pilont és annak környezetét.

Megvizsgálom a pilont keresztmetszeti szinten, mint öszvér keresztmetszetet, majd közelítő számítást végzek rugalmas elven, összhangban az Eurocode 4 (MSZ EN 1994-1-1: 2010) szabvány méretezési elveivel. Az itt kapott eredmények jó közelítő alapot jelentenek a későbbi vizsgálatokhoz, továbbá kimutatható, hogy mennyire megbízható a számítási módszer egy ilyen speciális esetben.

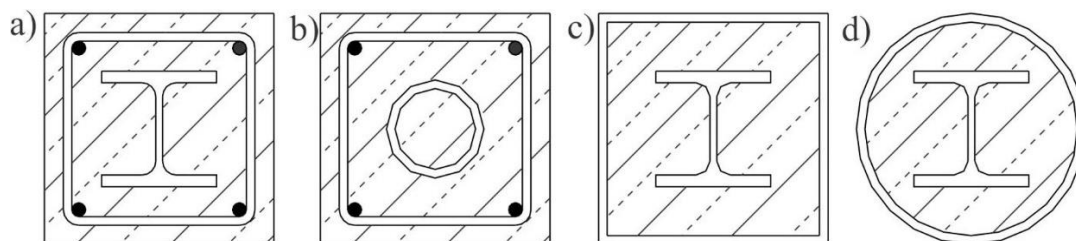
A vizsgálatot különböző szintű végeeselemes modellek kidolgozásával folytatom. A választott szoftver az Ansys végeeselemes program. A hídról korábban elkészült egy globális modell, amit felhasználok és kibővítek. Emellett lokális numerikus modelleket is létrehozok, részletes vizsgálatok elvégzése céljából. A kutatásom hosszabb távú célja, hogy a működő modellek alapján meg tudjam határozni a viselkedés jellegzetességeinek elemzésével a szerkezet merevségét, az együttdolgozó kapcsolatok hatékonyságát, a feszültségek eloszlását és végül a teherbírást.

A dolgozat beadásának idején a kutatómunkámban feldolgoztam és elemeztem a próbaterhelés során a pilonra vonatkozó mérési eredményeket. Ezek alapján részben elkészítettem a kísérleti és a numerikus eredmények összehasonlító elemzését, valamint a modellek validálását.

2. A szerkezeti kialakítás vizsgálata

2.1 A zártszelvényű öszvéroszlop

Az öszvéroszlopokat jellemzően egy gerinclemezes tartó részleges vagy teljes körbebetonozásával, valamint csőszelvények, illetve zártszelvények kibetonozásával lehet kialakítani. Az utóbbi esetekben lehetőség van a zártszelvényen belül további acél szelvényt elhelyezni. Az acél és a beton együttdolgozásával így kedvezően nagy teherbírási szerkezetet kapunk, továbbá a beton növeli az oszlop tűzzel szembeni ellenálló képességét, ami a magasépítésben előnyös tulajdonság. További nagy előny, hogy az építési állapotban nem kell feltétlenül megvárni a beton megszilárdulását, hiszen az acél szelvény a beépítés pillanatától kezdve terhelhető. Egyes esetekben az öszvéroszlopok előregyártása is lehetséges. Hátránya viszont, hogy nehézkes lehet az oszlopok kiszaluzása és betonozása, továbbá a nyírt kapcsolatok létrehozása is munkaigényes. A csomóponti kialakítások is viszonylag bonyolultak, ráadásul bizonytalanságok vannak már a tervezés fázisában is. A kibetonozott zártszelvények esetén további teherbírási érhető el, mivel a beton szilárdsága az acél megtámasztása miatt a tapasztalatok szerint közel háromszorosára növekszik (abroncsoló hatás). Elmondható, hogy az öszvéroszlopok merevsége, duktilitása és energiaelnyelő képessége is kedvezőbb, mint tisztán acél-, vagy vasbeton oszlopok esetében. A 2.1. ábra mutat példát néhány jellemző öszvéroszlop kialakításra. [1] [2]



2.1. ábra: Öszvéroszlopok jellemző kialakításai [2]

A Komáromi Duna híd pilonja egy speciális kibetonozott zártszelvény, ahol az acél kéreg és a beton között természetesen létrejön az együttdolgozás. Egyszerűbb és bonyolultabb kialakítású öszvéroszlopokra vannak tervezési útmutatások. A vizsgált szerkezet méreteiben és viselkedésében is lényegesen eltér egy magasépítésben használatos kibetonozott zártszelvény oszloptól, így a szabványos méretezési módszerek közvetlenül nem alkalmazhatók a vizsgálatára.

Jelen esetben fontos a pilon merevségének és teherbírási vizsgálatára. Egyértelmű, hogy egy kibetonozott zártszelvény jelentős teherbírással bír: az acélt megtámasztja a beton, amely nem fogja stabilitását veszíteni (nem alakul ki horpadás és a kihajlási ellenállása is jelentősen

megnő); a betont megtámasztja az acél, aminek köszönhetően a beton szilárdsága akár többszörösére növekedhet.

A viselkedésben fontos szerepet játszik az együttdolgozás mértéke. Öszvéroszlopoknál az erőbevezetés helyénél nyírt kapcsolóelemekkel kell átadni a terhet a beton és acél között, minden más helyen a beton acélhoz való befeszülésével is létre jön az együttdolgozás. Jelen esetben is létrejön a súrlódás révén az acél és beton részek kapcsolata. Kutatási céljaim között szerepel az együttdolgozást hatásának vizsgálata, amely pontosított modell kidolgozását igényli.

2.2 Öszvér merevítő fal

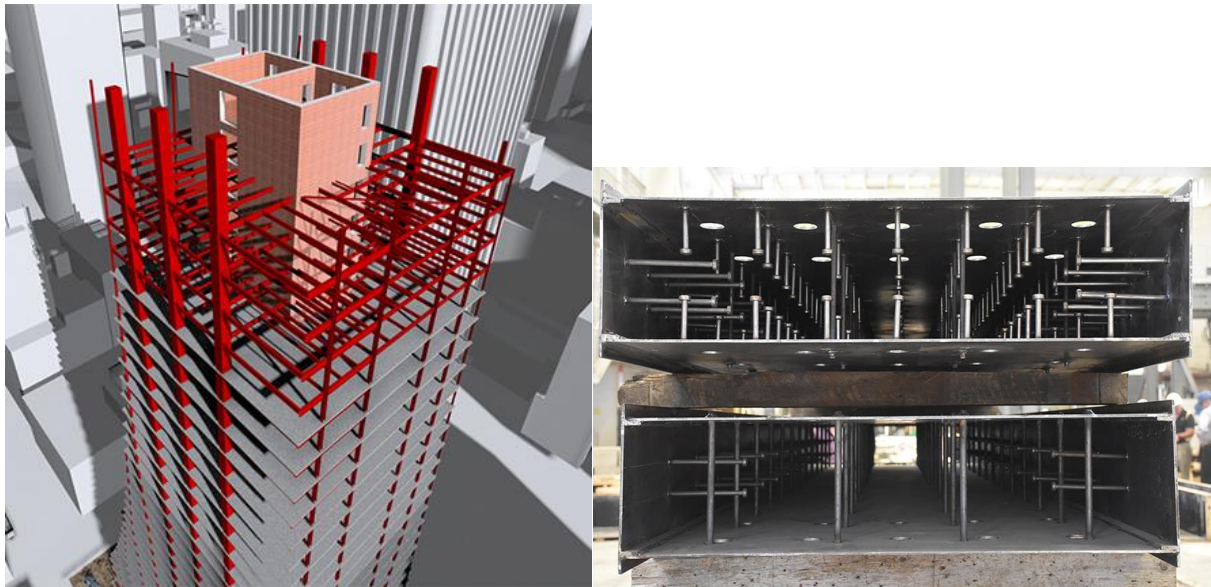
A magasépítésben az egyszerűbb öszvéroszlopok mellett egyre gyakoribb az öszvér merevítő falak kialakítása. Acél és beton együttdolgoztatásával nyírt fal (shear wall) is kialakítható, amely merevítő falként vagy merevítő magként funkcionálhat. Az öszvér keretszerkezet és az öszvér merevítő mag megfelelő kombinálásával kedvező szerkezeti kialakítást kaphatunk. Ilyen merevítésre példa az Amerikai Egyesült Államokban, Washingtonban található Afrikai Amerikai Nemzeti Történelmi és Kulturális Múzeum merevítő rendszere, amely négy öszvér merevítő magból áll (2.2. ábra). A nagy normálerő mellett jelentős nyíróerő és csavaró hatás is megjelenik, így a szerkezet viselkedése túlmutat az egyszerű öszvéroszlop viselkedésén. [3]



2.2. ábra: Az öszvér merevítő magok, merevítés és födémszerkezet [4]

Egy másik speciális példa, az Amerikai Egyesült Államok Washington államában, Seattle-ben épülő felhőkarcoló, a 260 méter magas Raineier Square Tower. [5] [6]

A felhőkarcoló tartószerkezetének legfontosabb eleme az úgynevezett Speed Core öszvér merevítő mag. A tartószerkezetet a 2.3. ábra szemlélteti. A Speed Core egy új technológia, aminek lényege, hogy a merevítő mag nem a megszokott módon vasbetonból készül, hanem acél falszerkezetből, ahol a két acéllemez közötti hézagot a helyszínen kiöntik betonnal. Az acél fal és a kitöltött beton között nyírt kapcsolóelemek és lehorgonyzó vasalások biztosítják az együttdolgozást. A szakirodalom Concrete-Filled, Composite Plate Shear Wall System (CF-CPSW) elnevezést használja erre a szerkezet típusra. Az így kialakított öszvérszerkezet lényegében egy betonnal kitöltött zártszelvényre emlékeztet, igen nagy méretekkkel. A legfontosabb előnye, ami miatt a nevét is kapta, hogy sokkal gyorsabban szerelhető, így lecsökkenti az építési időt. Ez annak köszönhető, hogy a daruval helyére emelt acél falszerkezethez azonnal szerelhetők az aktuális szintek további tartószerkezetei, hiszen nem szükséges megvárni a beton szilárdulását, mivel az acél falszerkezet már így is terhelhető.

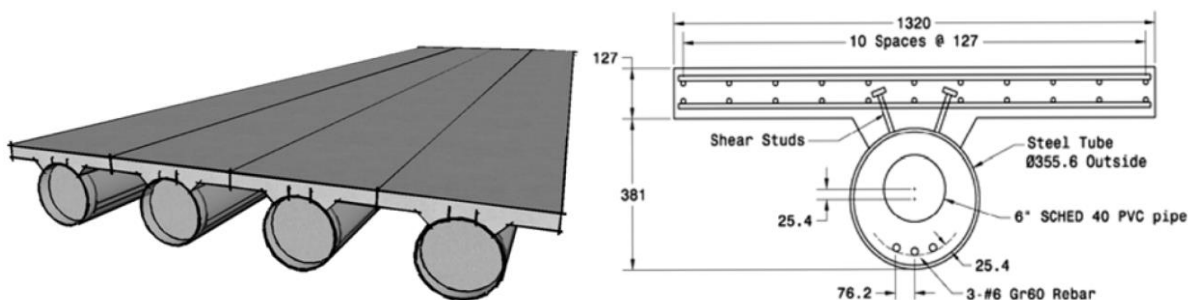


2.3. ábra: A tartószerkezet [7] és az öszvér merevítő mag fal elemei [8]

Természetesen érvényesülnek azok az előnyök, amik egy egyszerű kibetonozott zártszelvényű oszlop esetében is megjelennek. Az acél-beton együttműködésével jelentősen megnövekszik a merevség és a teherbírás függőleges és vízszintes terhelés esetén is. Jelentős előny, hogy az acéllemezeknek köszönhetően a falszerkezet sokkal kedvezőbben reagál lökésszerű, robbanás-szerű terhekre. Jó duktilitási tulajdonságai miatt földrengés hatására is kedvezőbben viselkedik, mint a hasonló méretekkel rendelkező vasbeton falszerkezet.

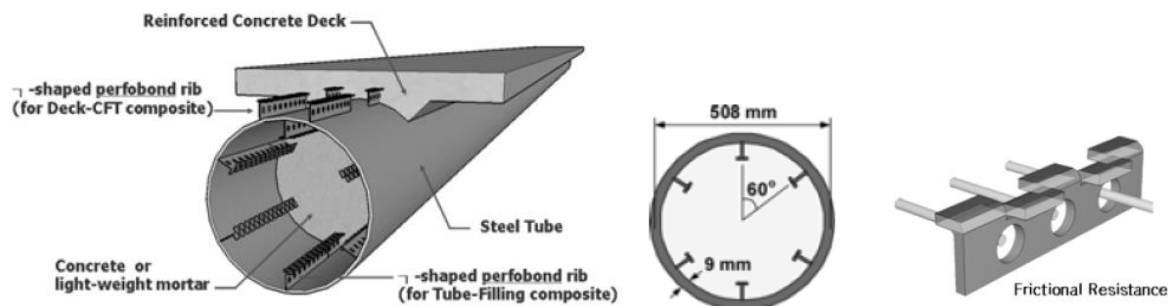
2.3 Kibetonozott csőszelvény – Shinkansen gyorsvasúti híd

A kibetonozott acélcső gerendák (CFT – concrete filled tube) alapötlete az öszvéroszlopból származik. Ilyen CFT szerkezetek a magasépítésben és a hídépítésben is elterjedtek. Jelen példában olyan öszvérgerendáról van szó, amely hidak főtartóiként funkcionálnak, ezt mutatja a 2.4. ábra. A csőszelvénybe öntött beton nyomószilárdsága a harántkontrakció meggátlása miatt jelentősen növekszik, az acél cső horpadási ellenállása a beton megtámasztó hatása miatt szintén növekszik, csakúgy, mint öszvéroszlopok esetében. Ezen kedvező tulajdonságok főleg támaszok környezetében jelentkeznek, ahol a szelvény nyomott. Ilyen típusú szerkezeteket elsősorban Japánban, a gyorsvasút hálózat (Shinkansen) építése során alkalmazták, ahol a szerkezet deformációja erősen korlátozva van. [10] A CFT hidak kellően merev, nagy duktilitású, rezgéseknek ellenálló, anyagtakarékos és gyorsan építhető szerkezetek.



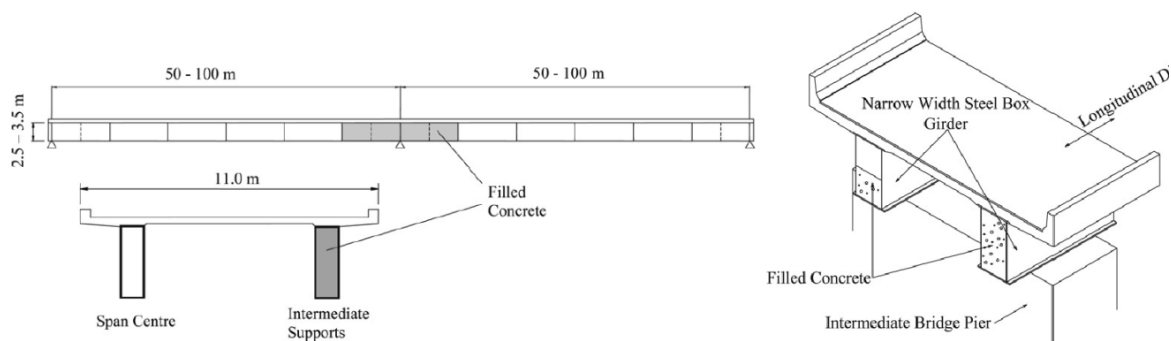
2.4. ábra: Kibetonozott acélcső gerendák kialakítása [10] és keresztmetszete [11]

A Japánban alkalmazott gerendákban a beton és az acél együttdolgozását a tapadás és súrlódás adja, nem alkalmaznak külön kapcsolóelemet. Koreai kutatások olyan kialakítást javasolnak, ahol a cső belsejébe acél L vagy T alakú perfobond lemezeket hegesztenek, amik nyírt kapcsolatként növelik az együttdolgozó képességet. Mindkét esetben a cső felső részére további nyírt kapcsolatot létesítenek fejes csapokkal vagy perfobond lemezekkel, amikkel az acélcső nemcsak az injektált betonnal, de a gerenda feletti vasbeton pályalemezzel is képes együttdolgozni és öszvérgerendaként működni. Ilyen kialakítást mutat a 2.5. ábra.



2.5. ábra: Kibetonozott acélcső nyírt kapcsolóelemmel [10]

Megjegyzem, hogy nemcsak kibetonozott csőszelvényeket vizsgáltak ilyen módon, hanem betonnal kitöltött keskeny szekrénytartókat is. A 2.6. ábrán látható kialakítást Nakamura és Moroshita vizsgálta, teljesen és részlegesen kibetonozott esetekben. [12]



2.6. ábra: Teljesen és részlegesen kibetonozott szekrénytartók [13]

A kutatások eredményei azt mutatják, hogy ilyen szerkezeti kialakítás esetében is érvényesülnek a CFT előnyei: az acél és beton nyírt kapcsolat nélkül is együttdolgozik, teherbírása és duktilitása növekedik. Megállapították azt is, hogy a feszültségkoncentráció csökken, amelynek következtében kevésbé jöhet létre fáradási tönkremenetel.

2.4 Összegzés

Láthattuk az öszvéroszlopok általános jellemzőit, majd két, egymástól teljesen különböző példát kibetonozott zártszelvényre. Mindkét esetben kedvező viselkedést mutatott az öszvérszerkezet, mivel növekedett a szerkezet teherbírása, merevsége és duktilitása, továbbá anyagtakarékoság és költséghatékonyság jellemzi a gyorsabb kivitelezés, építés miatt. Mindkét példa jó áttekintést ad a kibetonozott zártszelvények alkalmazásáról, előnyeiről és viselkedéseiről. A szerkezeti kialakításokból látható, hogy mindkét esetben speciális helyzet adódott, amiket a hagyományos módszerekkel már nem lehet egyszerűen vizsgálni. A Komáromi Duna híd pilonjának a kialakítására és vizsgálatára ez jellemző.

3. A Komáromi Duna híd

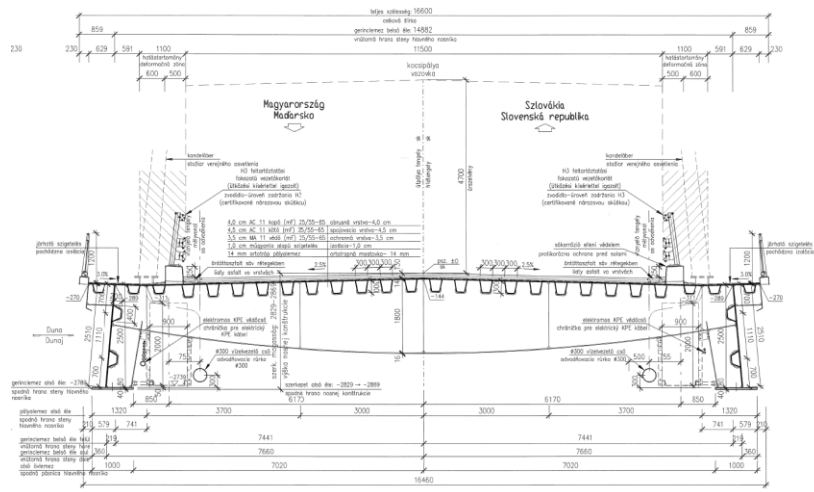
Az új Duna-híd Komáromot és Révkomáromot (Komárno - Szlovák Köztársaság) köti össze. Az új híd a Komárom városközpontjában lévő Erzsébet Duna-hídtól 2,8 km-re északkeletre helyezkedik el. [14] A híd látványterve a 3.1. ábrán látható.



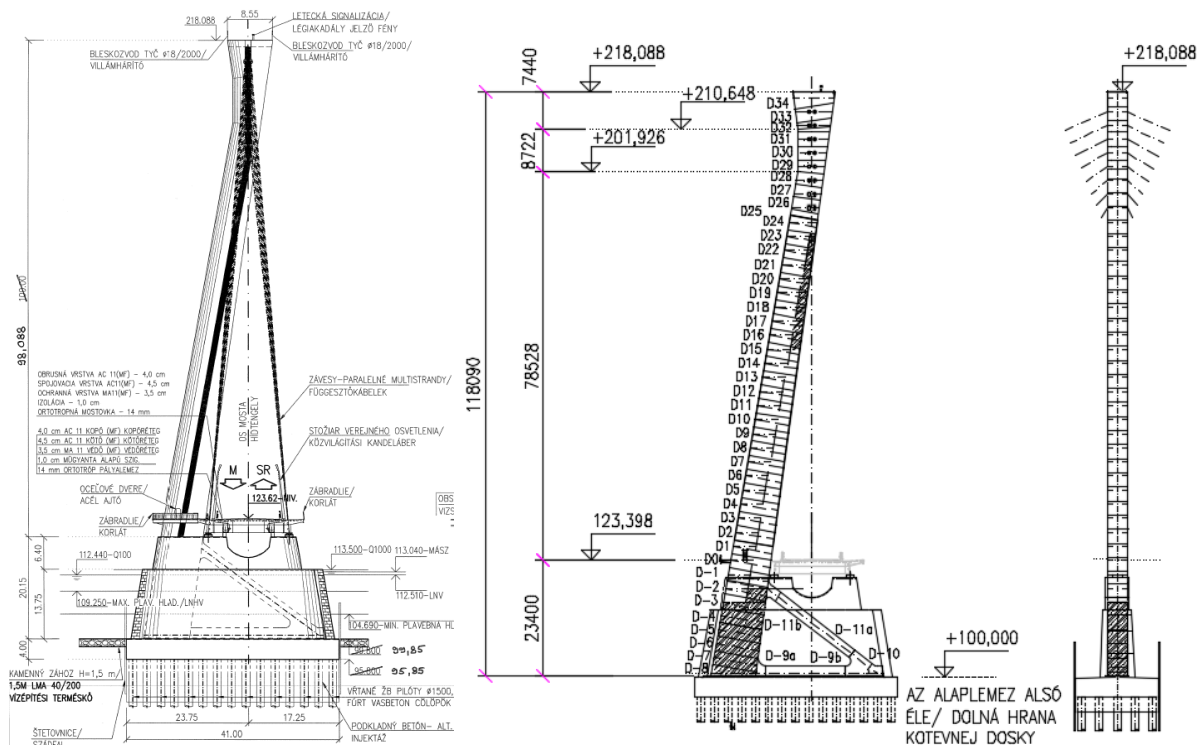
3.1. ábra: Az új Komáromi Duna híd látványterve [15]

A híd öt nyílásból áll, melyek közül három a meder felett, kettő pedig a szlovák oldali ártéren található. A középső fő nyílásokat egy egypilonos ferdekábeles tartószerkezet hidalja át, melyhez mindkét oldalon folytatólagos gerendaként csatlakozik egy-egy parti nyílás. A fő meder-nyílás fesztávolsága 252 m, a hátrakötési oldal egy közbenső lehorgonyzó pilonról két részre van osztva. Ez a közbenső pilon a kutatásaim tárgya, amely aszimmetrikus keresztmetszetű és a híd fölé hajlik. A pilon magassága a pályaszinttől a legfelső kábelbekötésig 90,488 m. A szerkezetre széttartó, legyező rendszerű kábelrendezés jellemző. A merevítőtartó ortotrop acél pályalemezes, két főtartós nyitott keresztmetszetű gerenda. A híd teljes szélessége 20,40 m. Az alapozás 150 cm átmérőjű béléscsővel ellátott fűrt vasbeton cölöpalapozás. [14]

A vizsgált pilon alsó bekötését, amely a külpontosság miatt jelentősen terhelve van nyomatékkal, a pilon felmenőfalába bebetonozott merev acélváz biztosítja. A pilon keresztmetszete a befolyási oldal felől lekerekített doboz, melynek szélessége 4,0 méter, keresztirányú mérete alul 8,35 m, ami felfelé 5,20 méterig keskenyedik, majd legfelül újra kiszélesedik 8,55 méterre. A szerkezet acél fala hosszbordákkal és diafragmákkal merevített, amikbe el lettek helyezve a ferde tartókábelek lehorgonyzó pontjai. A pilon belső oldala 70 méter magasságig kibetonozásra került, a húzott oldalon pedig az alsó szakaszon feszítőkábelek lettek betervezve. A pilon belsejében lépcső, valamint külön akna található. A pilon össztömege kb. 2070 tonna. A hídpálya egy általános szelvényét a 3.2. ábra, a pilon kialakítását a 3.3. ábra mutatja be. [14]



3.2. ábra: A hidpálya egy általános keresztmetszete [14]



3.3. ábra: A pilon geometriája [14]

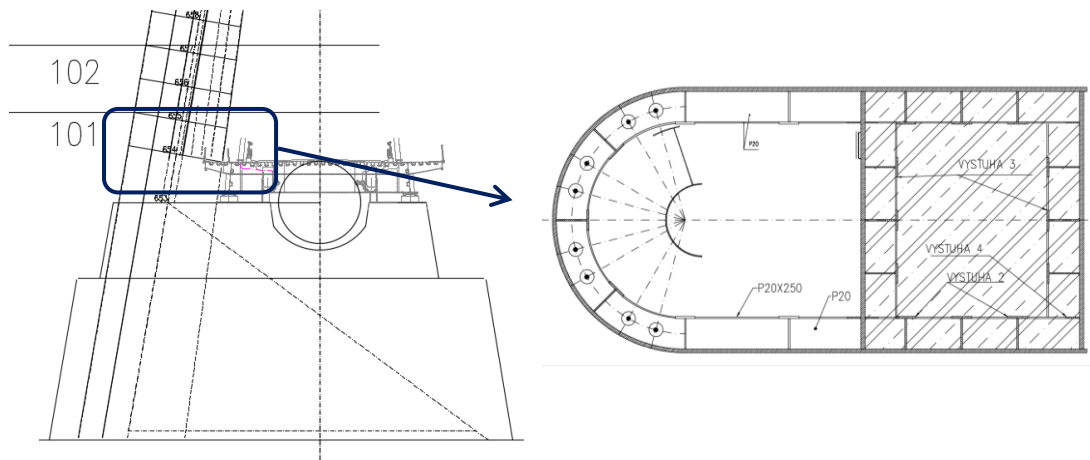
4. A pilon vizsgálata keresztmetszeti szinten

4.1 A szerkezeti kialakítás

Láthattuk, hogy a pilon változó keresztmetszetű, az alépitménynél körbe van betonozva az acél doboz, a belső beton kitöltés is csak egy bizonyos magasságig terjed. A szerkezet teljes vizsgálata ezen tényezők miatt meglehetősen bonyolult, így először csak egy keresztmetszetet vizsgálunk. A későbbiekben kerül sor a teljes pilon vizsgálatára.

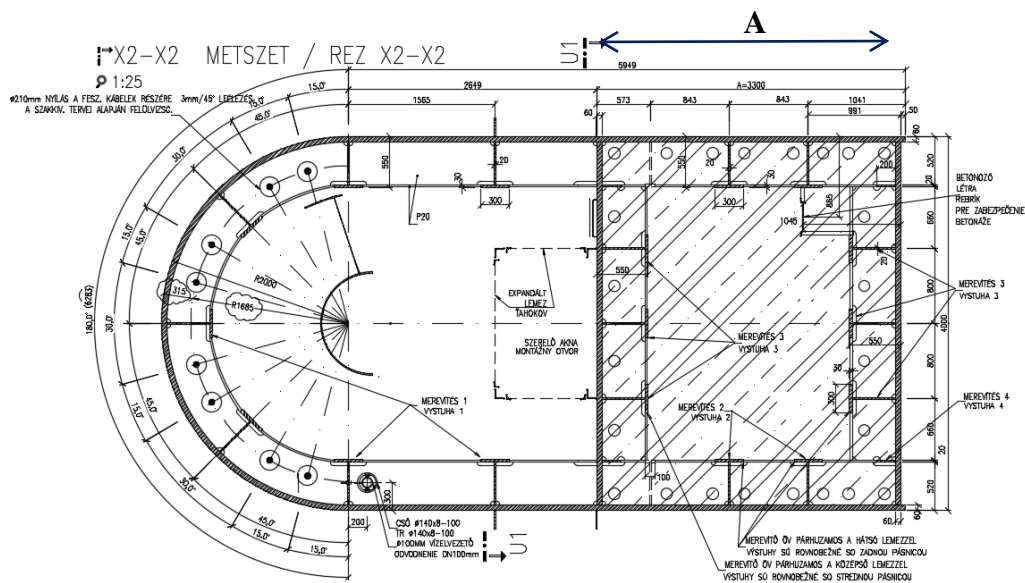
A kiválasztott keresztmetszet az alépitmény felett, a hidpályával nagyjából egy szinten helyezkedik el. Itt már nincs külső betonkéreg, belül pedig van betonkitöltés. Az újszerű kialakítás

miatt a próbaterhelés során ebben a tartományban lettek elhelyezve mérőműszerek. A vizsgált szakaszt a 4.1. ábra mutatja.



4.1. ábra: A kiválasztott pilon keresztmetszet [14]

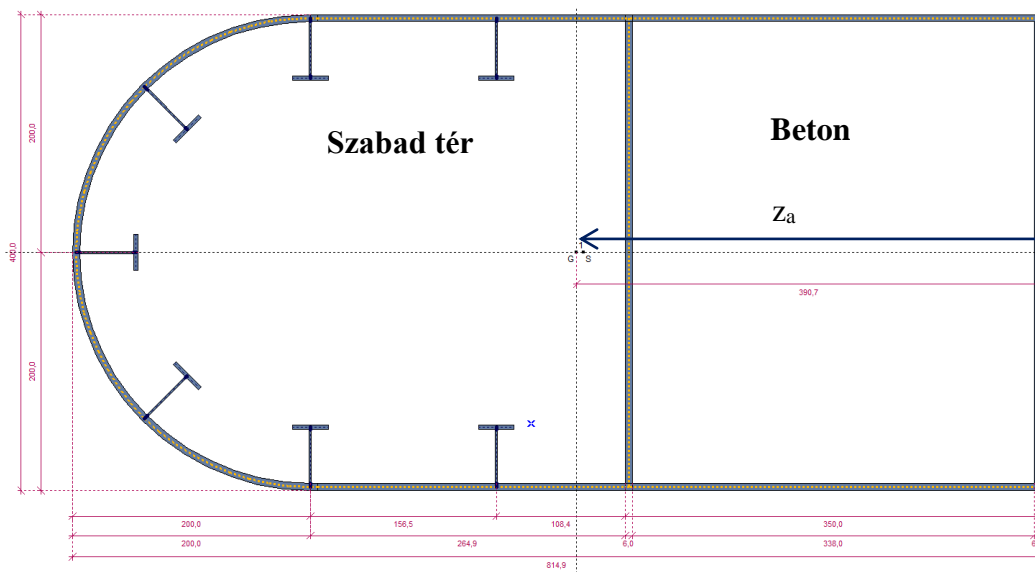
A vizsgált keresztmetszet méreteit és részleteit a 4.2. ábra ismerteti. Megjegyzem, hogy a magasság mentén a lekerekített szakasz méretei megegyeznek, az „A” jelű méret és a lemezek vastagsága csökken. Az ábrán láthatók a fő szerkezeti elemek mellett a csövek és aknák elhelyezkedése.



4.2. ábra: A vizsgált keresztmetszet méretei, részletei [14]

A vizsgálat során egyszerűsíttem a keresztmetszetet. A külső acél doboz teljes egészében modellezésre kerül. A bordákat az egyszerű számítás során csak a „bal oldali” szakaszon modellezem, a kibetonozott szakaszon azokat nem veszem figyelembe. A kibetonozást a „jobb oldali” részen a bordák nélkül modellezem. Az így kapott geometriát a 4.3. ábra szemlélteti. A doboz lemeztvastagsága minden esetben 60 mm. A kibetonozott tér így 3500 mm széles. A bordák méretei azonosak, a gerincek 20 mm az övek 35 mm vastagságúak. A bordák az acélfalhoz és az acélfalak egymáshoz minden esetben hegesztéssel csatlakoznak. A keresztmetszet vizsgálá-

tára az AxisVM X5 szoftver beépített keresztmetszet szerkesztő modulját használtam. Az alkalmazott acél anyagminősége minden esetben S460NL, a betonkitöltés pedig C50/60 minőségű.



4.3. ábra: A modellezett keresztmetszet

Így tehát öszvér keresztmetszetet kaptunk, amelyben az acéldoboz és a kitöltő beton teljes együttműködését feltételeztem. Öszvéroszlopok esetén együttműködő kapcsolatokra tipikusan csak az erőbevezetés helyén van szükség, amik jelenleg nem esnek bele a vizsgált tartományban, az összes többi pontban a súrlódás által kapcsolódik össze a beton az acéllal.



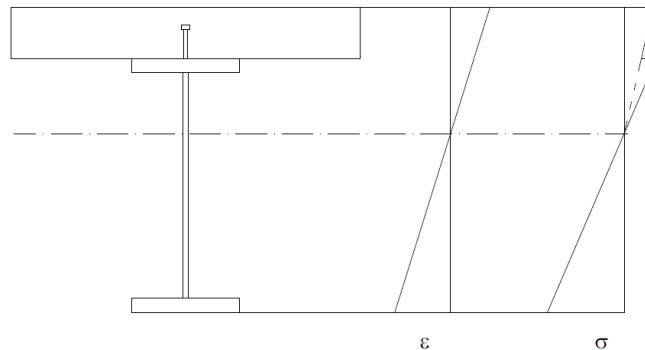
4.4. ábra: A pilon belső része

4.2 Az öszvér keresztmetszet

Az öszvérszerkezetek teherbírési vizsgálata esetén általában eljárhatunk rugalmas és képlékeny elven. Mivel itt hídszerkezetéről van szó, rugalmas méretezést alkalmazunk, így a feszültségek vizsgálatát rugalmas elven hajtom végre. Először röviden összefoglalom a vizsgálat menetét, feltételeit, alkalmazhatóságát, majd bemutatom azt a vizsgált keresztmetszetre. A későbbiekben pedig az így számított eredményeket hasonlítom össze a numerikus analízis során kapott feszültségekkel.

Elméleti összefoglaló

Mivel összekapcsoltuk a betont az acéllal, kedvezőbb keresztmetszeti tulajdonságokat kaptunk. Az öszvér keresztmetszet ideális keresztmetszeti területtel és ideális inerciával rendelkezik. A semleges tengely az acél rész súlypontja és a beton rész súlypontja között helyezkedik el. Az acél és a beton lineárisan rugalmasan viselkedik, így az alakváltozási ábra lineáris. A feszültségeloszlás szintén lineáris, de az acél és beton határán ugrás lesz, az acélban nagyobb, a betonban kisebb feszültségek ébrednek. Egy hagyományos öszvérgerenda esetén a 4.5. ábra mutat erre példát.



4.5. ábra: Öszvér gerenda rugalmas viselkedése [1]

A rugalmas számítás alapelvei a következők:

- A keresztmetszet részei követik a Bernoulli-Navier hipotézist.
- Mindkét anyag görbülete azonos, szorosan illeszkednek egymáshoz.
- A nyírt kapcsolat folytonos és végtelen merev, így nincs relatív eltolódás.
- A feszültségállapot egytengelyű.
- Homogén, izotrop, lineárisan rugalmas anyagmodellek jellemzik az acélt és a betont is.
- Az alakváltozások és az elmozdulások kicsik.
- Időtől függő hatásokat a vizsgálatban elhanyagoljuk.

A kiindulási feltételezések azért fontosak, mert a numerikus vizsgálatnál meg kell győződnie arról, hogy a modell követi-e ezeket az alapelveket. Ha ezek a modellben is teljesülnek, akkor a rugalmas elven történő számításoknak és a numerikus analízis során meghatározott eredményeknek azonos értéket kell adniuk.

Az ideális keresztmetszet

A fizikai jellemzők:

- Acél rugalmassági modulusa: $E_a := 210\text{GP}\varepsilon$
- Acél Poisson-tényezője: $\nu_a := 0.3$
- Acél anyagminősége: S 460 NL
- Beton rugalmassági modulusa: $E_{cm} := 37\text{GP}\varepsilon$
- Beton Poisson-tényezője: $\nu_c := 0.2$
- Beton anyagminősége: C50/60
- A rugalmassági modulusok aránya (rövid idejű terhekhez): $n := \frac{E_a}{E_{cm}} = 5.676$

Az acél geometriai jellemzői (AxisVM X5 keresztmetszetszerkesztő modulból):

- Szélesség: $b := 400\text{mm}$
- „A” méret: $A := 3560\text{mm}$
- Falvastagság: $t := 60\text{mm}$
- Teljes magasság: $h_a := 2000\text{mm} + 2649\text{mm} + A - t = 814.9\text{cm}$
- Keresztmetszeti terület: $A_a := 17118.1\text{cm}^2$
- Erős tengely körüli inercia: $I_a := 4.4 \cdot 10^8\text{cm}^4$
- Súlypont távolsága: $z_{a,1} := 390.7\text{cm}$

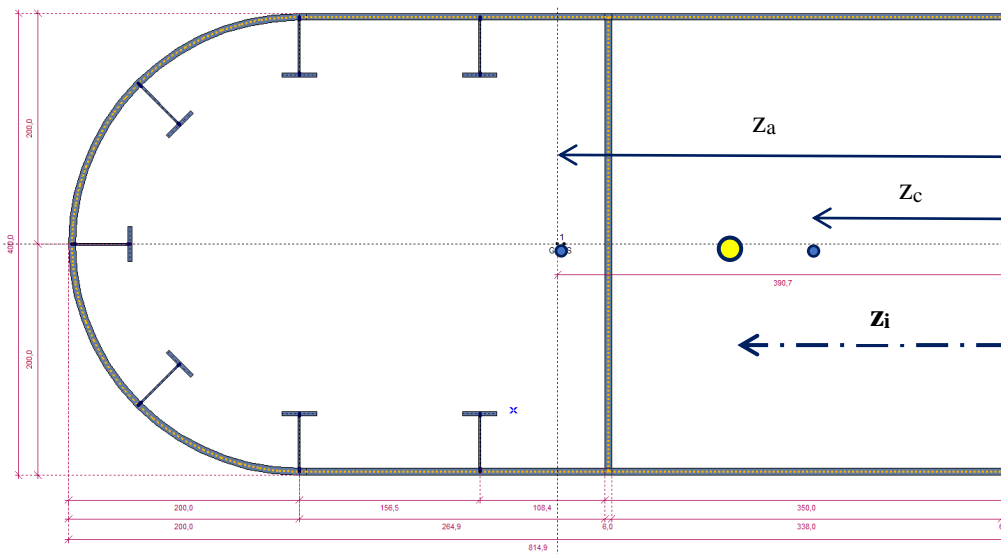
A beton geometriai jellemzői:

- Szélesség: $b_c := b - 2 \cdot t = 3.88\text{m}$
- Magasság: $h_c := A - 3 \cdot t = 3.38\text{m}$
- Keresztmetszeti terület: $A_c := h_c \cdot b_c = 1.311 \times 10^5 \cdot \text{cm}^2$
- Erős tengely körüli inercia: $I_c := \frac{b_c \cdot h_c^3}{12} = 1.249 \times 10^9 \cdot \text{cm}^4$
- Súlypont távolsága: $z_c := \frac{h_c}{2} + t = 175\text{cm}$

Az ideális keresztmetszet meghatározása:

- Az ideális keresztmetszeti terület: $A_i := A_a + \frac{A_c}{n} = 4.022 \times 10^4 \cdot \text{cm}^2$
- A semleges tengely: $z_i := \frac{A_a \cdot z_a + \frac{A_c}{n} \cdot z_c}{A_i} = 266.794\text{cm}$
- Az ideális inercia: $I_i := I_a + A_a \cdot a_a^2 + \frac{I_c}{n} + \frac{A_c}{n} \cdot a_c^2 = 1.117 \times 10^9 \cdot \text{cm}^4$, ahol
 $a_a := z_a - z_i = 123.906\text{cm}$ és $a_c := z_i - z_c = 91.794\text{cm}$

A súlypontok és az egyes méretek a 4.6. ábra szerint értelmezendők. Jól látható, hogy a semleges tengely a betonban van.



4.6. ábra: Az ideális keresztmetszet

A keresztmetszetben keletkező feszültségek:

- Acél feszültségei (nyomás, nyomás és hajlítás): $\sigma_a := \frac{F}{A_i}$ és $\sigma_a := \frac{M}{I_i} \cdot y_a - \frac{F}{A_i}$
- Beton feszültségei (nyomás, nyomás és hajlítás): $\sigma_c := \frac{F}{A_i \cdot n}$ és $\sigma_c := \frac{M}{I_i} \cdot y_c - \frac{F}{A_i}$

Mivel a terhelés a későbbiekben eltérő, az eredményeket a vonatkozó szakaszokban közlöm.

5. A keresztmetszet lokális numerikus vizsgálata

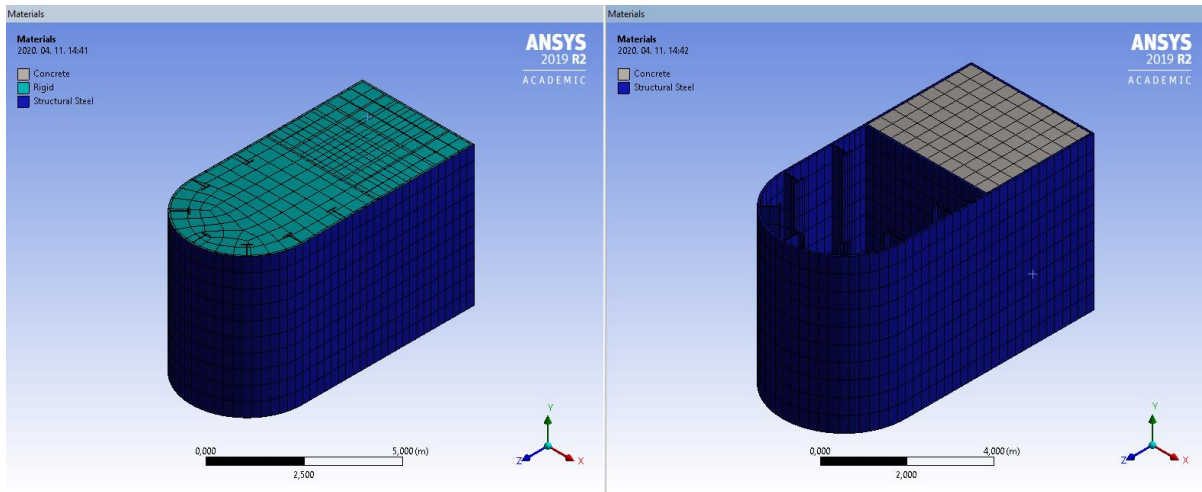
5.1 A lokális numerikus modellek általános információi

A keresztmetszet numerikus vizsgálatát az Ansys Workbench-ben végeztem el. A geometriát a programba beépített SpaceClaim szerkesztőben készítettem el. Az acélt és a betont is testelemből építettem fel. Mindkét anyagot a tényleges fizikai paramétereivel modelleztem és a program könyvtárában megtalálható anyagmodellekkel vettem figyelembe. A végelemháló többnyire 50 cm-es osztásközzel van generálva. Az acélt a betonnal „bonded” paranccsal kötöttem össze, amely teljes együttdolgozást jelent.

A terhelés módja az egyes modellekben eltérő, az aktuális modell vizsgálati céljától függ. Az egyszerűbb esetekben felület mentén megoszló állandó, vagy változó intenzitású erő jellegű terhet alkalmazok. A konkrét viselkedés és feszültségek modellezésénél pedig a tényleges igénybevételeket működtetem. Egyes esetekben ugyanígy felület mentén megoszló vagy koncentrált kinematikai terhet, elmozdulást működtetek a modellre.

A megtámasztási viszonyokat minden esetben alulról fix befogással modelleztem. Az alsó támaszon kívül diafragmát alkalmazok a legfelső pontban (de támasszal nincs megfogva a diafragma). A diafragmákat állandó vastagságú lemezzel modelleztem, amelyeknek anyagminőségét beállítottam végtelen merevre, a „Rigid” paranccsal. A vizsgált keresztmetszet geometriáját,

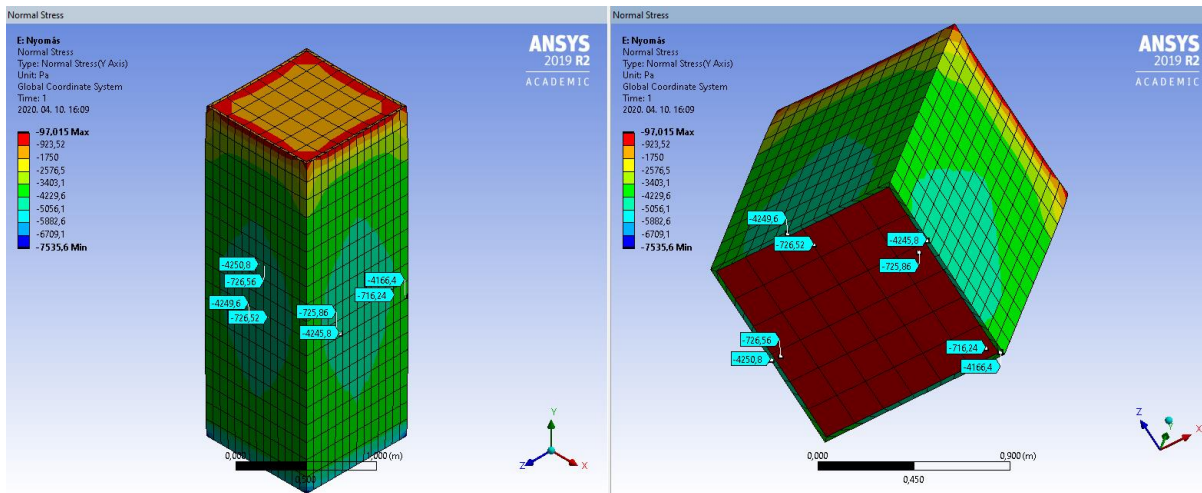
végeselemhálóját és az alkalmazott anyagokat az 5.1. ábra szemlélteti. A későbbiekben a diafragmákat már nem jelenítem meg, de az összes modellben ugyanígy jelen vannak.



5.1. ábra: A tényleges geometria, végeselemháló, anyagok

5.2 Egyszerű vizsgálatok

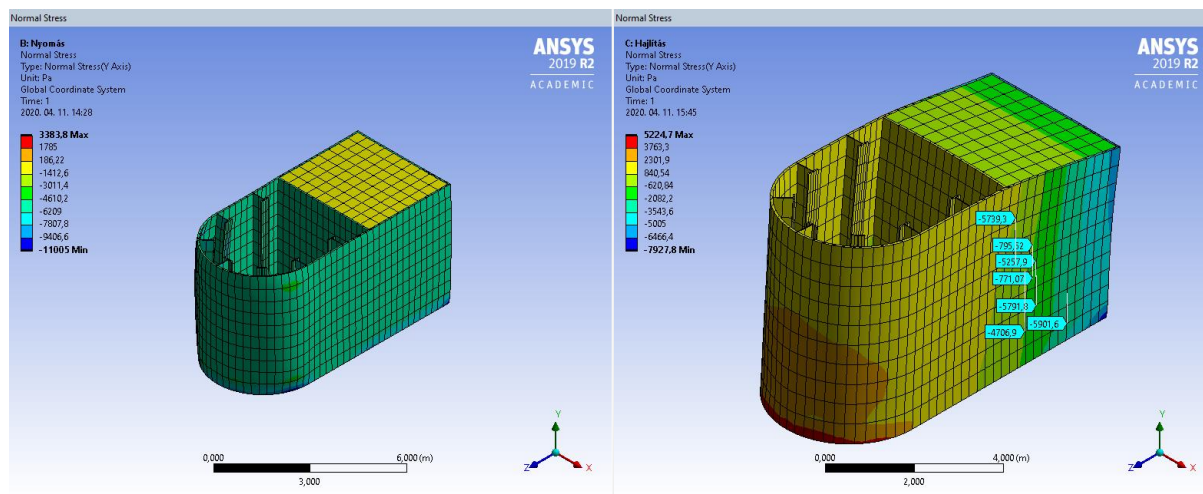
A numerikus vizsgálatot egy egyszerű öszvéroszloppal kezdtem, amely egy kibetonozott zártszelvény. Ennek célja, hogy egy egyszerű esetet vizsgálunk, így jobban követhető a szerkezet viselkedése. Másik előnye, hogy megmutatja a végeselemes program működését, esetleg rávilágít az egyes modellezési hibákra. A modellre egy fiktív, lefelé mutató egyenletesen megosztó terhet működtetnek. A modellt és a normálfeszültségeket az 5.2. ábra mutatja be.



5.2. ábra: Próbaanalízis - normálfeszültség

Az első fontos észrevétel, hogy a deformációs ábrán az acél és a beton között nincs eltérés, vagyis valóban működik az együttműködés, továbbá folytonos az alakváltozás (vagyis teljesül a kompatibilitás). A feszültségeket egy közbenső keresztmetszetben hasonlítom össze a rugalmas elmélet szerinti feszültségekkel, itt ugyanis már nincs zavaró hatása az erőbevezetésnek vagy a támasznak. A rugalmas elven számolt és a modelltől kivett feszültségek szinte megegyeznek, a numerikus pontosságon belüli az eltérés. A modell tehát jól visszaadja a kézi számítás eredményeit, továbbá láthatjuk, hogy ezekkel a beállításokkal alkalmazható ilyen típusú modell a tényleges vizsgálatra.

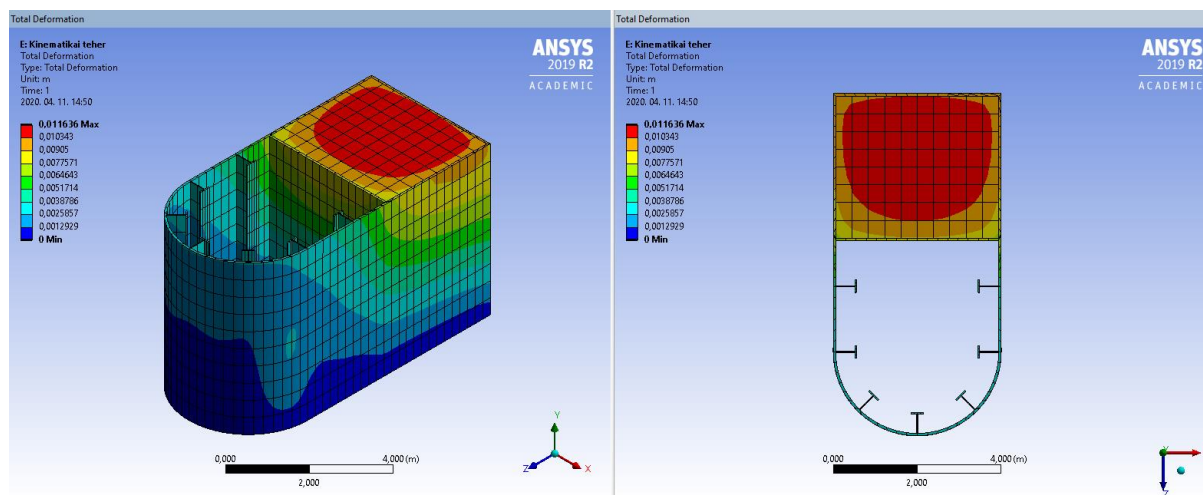
A próbaanalízis után a tényleges keresztmetszetre is végrehajtottam az analízist, tiszta nyomásra, majd hajlításra is, ahol lineáris terhet definiáltam (5.3. ábra).



5.3. ábra: Tiszta nyomás és hajlítás - normálfeszültség

Tiszta nyomás esetén néhány százalékos eltéréssel megegyeznek a kézi és gépi eredmények. Hajlítás esetén az eredmények már jobban eltérnek a korábbiakhoz képest, közel 15% különbség van a feszültségek között. Ennek lehetséges oka, hogy a vizsgált szakasz közel van a befofáshoz, ahol zavart zóna alakul ki. A deformációk azonban jól mutatják a hajlítás hatását.

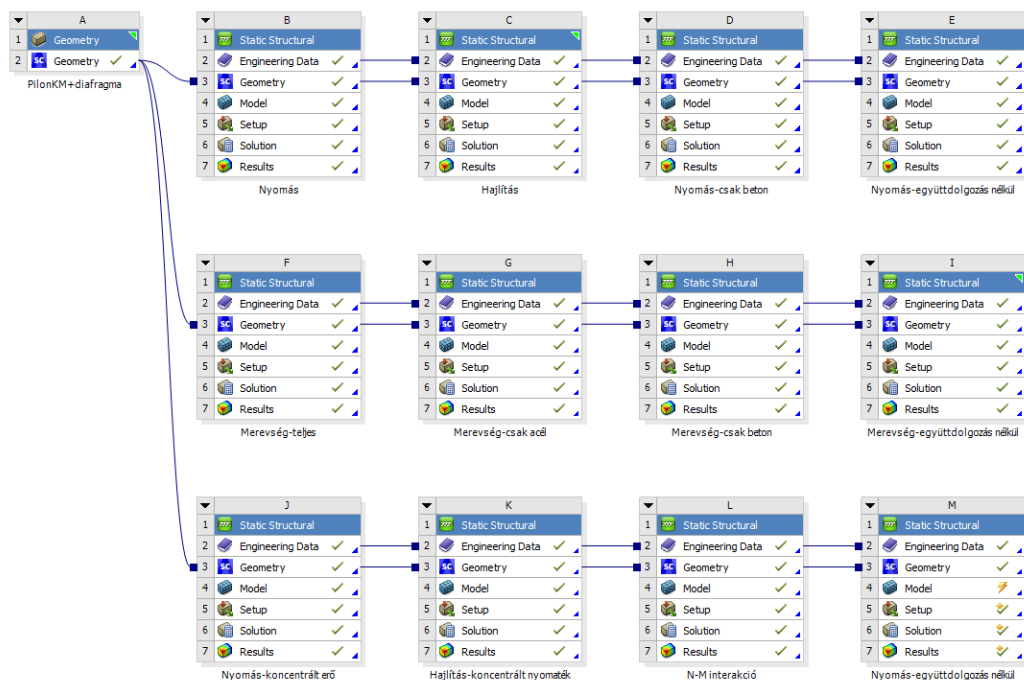
Végül a vizsgált keresztmetszetre a teljes felület mentén lefelé mutató kinematikai terhet működtetnek. A vizsgálat célja a keresztmetszet merevségének, deformációjának az elemzése (5.4. ábra).



5.4. ábra: Kinematikai teher - teljes deformáció

5.3 További vizsgálatok

Az imént bemutatott modellek célja elsősorban a viselkedés megértése, valamint a gépi és kézi számítások eredményeinek összevetése. A továbbiakban viszont tényleges terhekkel a tényleges igénybevételek, feszültségek és alakváltozások meghatározása a cél. Ennek érdekében további modelleket hoztam létre. A modellstruktúrát az 5.5. ábra szemlélteti.



5.5. ábra: Lokális modellek struktúrája

A geometriai modell az összes esetben azonos, de a korábbiakhoz képest itt magasabb részt vizsgálók. A legfelső keresztmetszetet szintén végtelen merev diafragmával fogom össze.

Az 5.5. ábrán látható első sor lényegében megegyezik a korábbi lokális modellekkel. A tiszta nyomás és a hajlítás megoszló teherrel lett definiálva. A második sorban a merevséget vizsgálom. Itt kinematikai terhet működtetek a teljes keresztmetszetre (teljes együttoldozást feltételezve), csak az acélra, csak a betonra és a teljes keresztmetszetre együttoldozás nélkül.

A harmadik sor modelljeiben „távoli” erőt és nyomatékot működtetek a „remote force” és a „remote moment” paranccsal. Ennek lényege, hogy a teherből nem keletkeznek lokális hatások a vizsgált szakaszon, mivel az erőbevezetés helye „távoli” van. Ezeknél a tényleges igénybevételeket lehet működtetni külön-külön és egyszerre is (nyomás-nyomaték interakció). Mint korábban, itt is teljes együttoldozást feltételezünk, de az utolsó oszlopban megszüntetjük a kapcsolatot az acél és beton felülete között.

Az itt bemutatott modellekkel a tényleges terheket egyszerűen be lehet állítani és vizsgálható a jelenség. Az elkészült lokális modellek helyességét és alkalmazhatóságát igazoltam, de ezek részletesebb elemzése nem képezi a TDK dolgozat tárgyát, ezek eredményeit egy későbbi munkámban foglalom össze.

6. A pilon globális numerikus vizsgálata

6.1 A globális modellek áttekintése

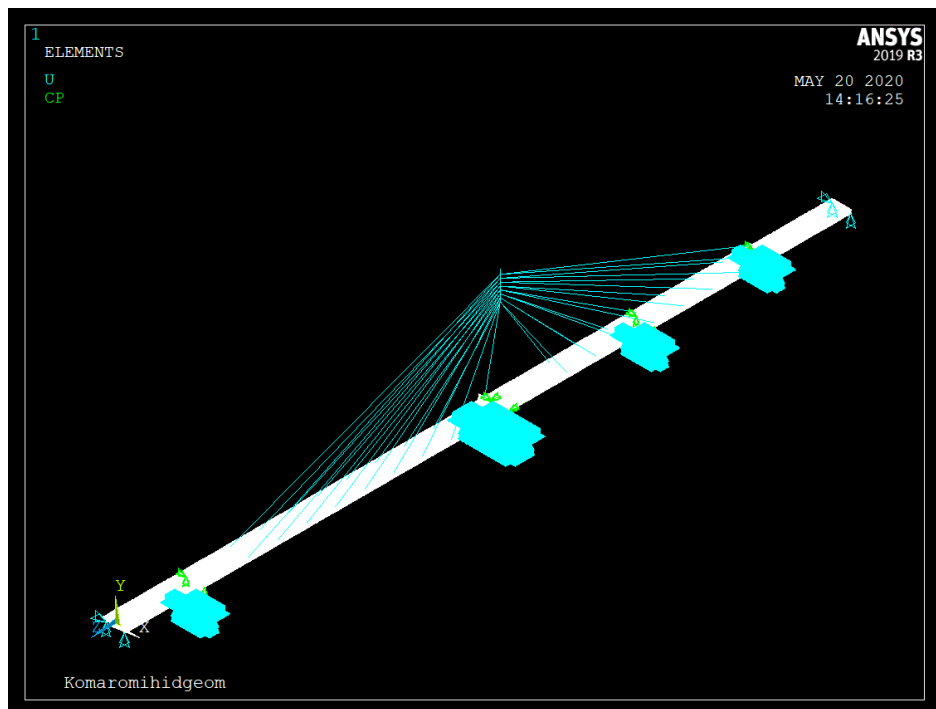
A munkámhoz rendelkezésre állt egy korábban megalkotott globális modell, amit a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék készített el. Itt a teljes szerkezetet modellezték, tehát a hídfőket, a pilléereket, a hídpályát, a kábeleket és a pilont is. Az ortotrop pályaszerkezet bordái és a kereszt-tartók felületszerkezettel lettek modellezve, a kereszt-tartókon a bordák helyén lévő kivágások is figyelembe lettek véve. A vizsgált pilont és a ferdekábeleket rúdelemekkel modellezték. A

további vizsgálatok céljából a kapott modellt továbbfejlesztettem, elkészítettem a teljes pilont a lokális modellekhez hasonlóan testelemekből, a szerkezet többi része változatlan a kiindulási modellhez képest. Ezt a modellszintet a későbbi, részletesebb vizsgálatok során fogom alkalmazni, az acél és beton közötti együttdolgozás elemzésére. A jelen dolgozatban bemutatom a fejlesztés alatt álló modell jellemzőit, valamint ismertetem a modell alkalmazásának első eredményeit.

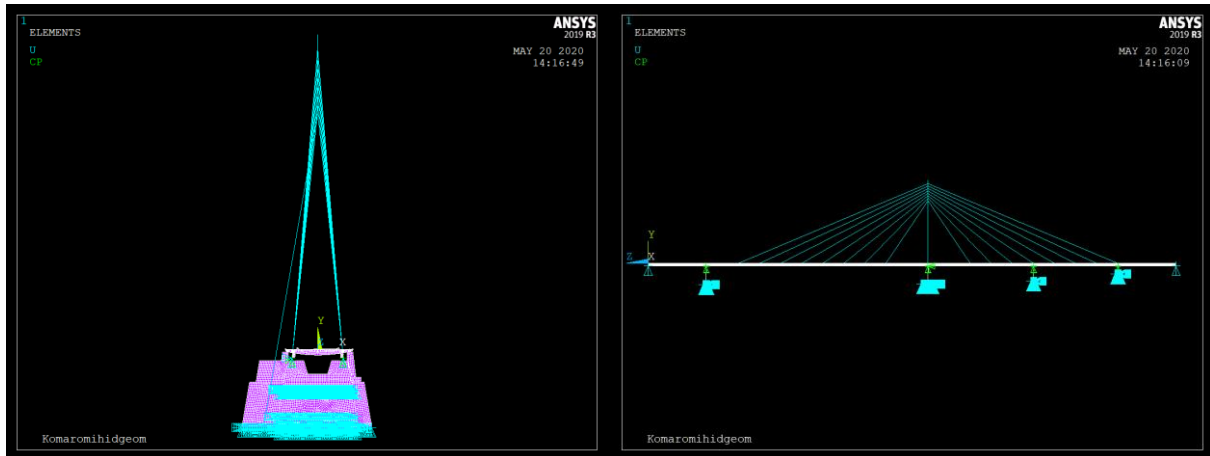
A végeelemhálók sűrűségét a lokális vizsgálatok eredményei, valamint a kiindulási modell alapján vettem fel minden esetben.

6.2 Rúdelemekből készült pilon globális modellje

Ebben a globális modellben a felhasznált felületszerkezeti elemek az ANSYS program SHELL181 elnevezésű 4 csomópontú héjelemei, a pilon és a kábelek pedig a BEAM188-as 2 csomópontú rúdelemként lettek modellezve. Az egyes kábelek minden esetben a pilon tengelyébe kötnek bele, hiszen maga a pilon is a tengelyével van modellezve. A pilon a tervekkel összhangban a magasság mentén változó keresztmetszetű. A globális rúdmodell a 6.1. és 6.2. ábrákon látható.

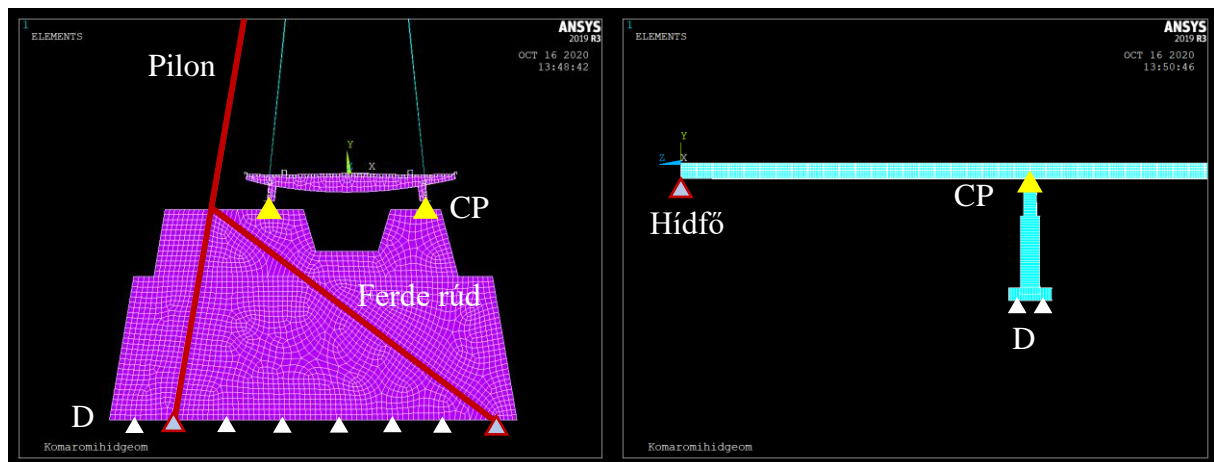


6.1. ábra: A globális rúdmodell – axonometria



6.2. ábra: A globális rúdmodell – előlnézet és oldalnézet

A pályaszerkezet végein, a hídfőknél „D” parancssal lett definiálva kényszer (UX, UY vagy UZ), a közbenső támaszoknál pedig „CP” parancssal lett létrehozva kapcsolat a felszerkezet és az alépítmény között. Utóbbinak a lényege, hogy a pályaszerkezetről érkező reakcióerő a hídpillérekre van közvetlenül működtetve. Az alépítmények támaszát szintén a „D” parancssal definiálták, ahogyan a pilon legalsó pontját is. A pilon alsó szakaszát azonban az alépítmény és egy bebetonozott ferde rúd még megtámasztja. A kényszerek komponensei változóak, de függőleges irányban mindig, pillér vagy hídfő esetén legalább az egyik támasznál gátolva van az oldalirányú elmozdulás. A pilon alsó keresztmetszete mindhárom irányban meg van támasztva. A megtámasztási viszonyokat a 6.3. ábra mutatja be.

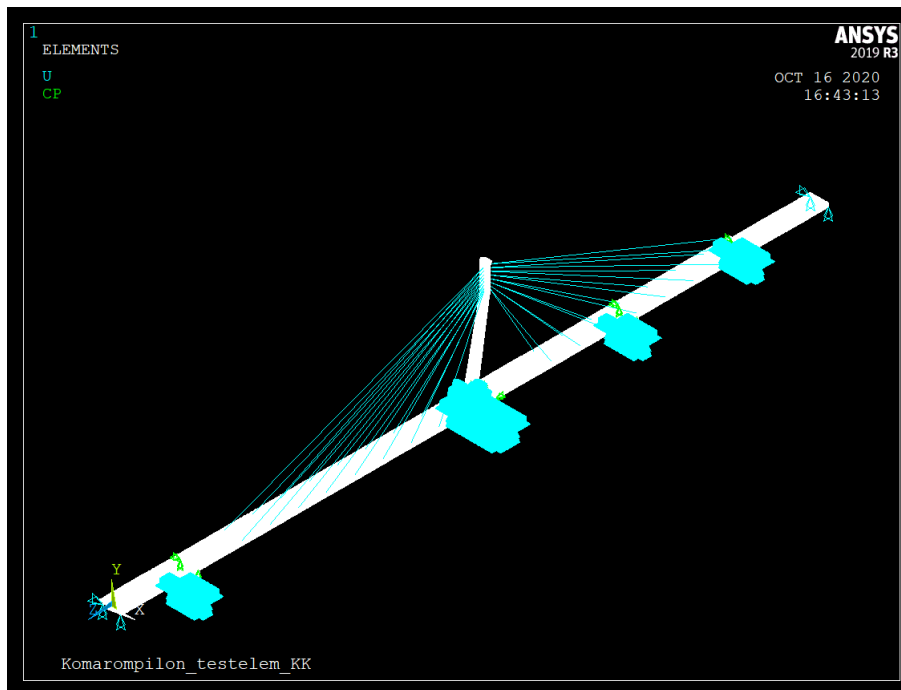


6.3. ábra: A támaszok kialakítása

6.3 Testelemekből készült pilon globális modellje

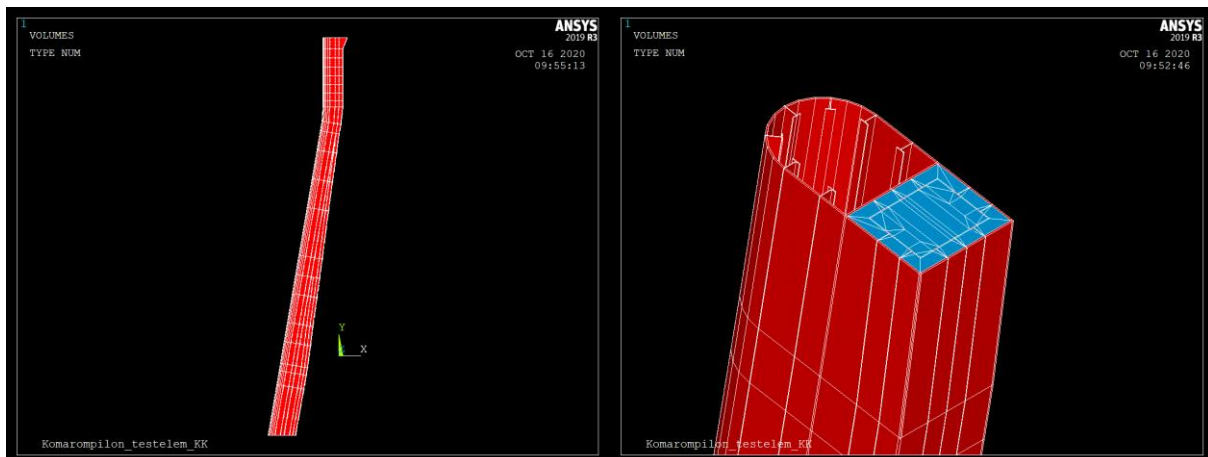
A korábbi modellekből kiindulva elkészült a pilon pontosított modellje SOLID185 testelemekből. Testelemekből modelleztem az acél körbemenő zártszelvényt, a húzott oldali belső bordákat és a nyomott oldali fő bordákat is. A tervek alapján további kisebb bordák is találhatóak a nyomott szakaszon bebetonozva, de ezeket most elhanyagoltam. A kibetonozott részt szintén SOLID185 testelemekből hoztam létre a tervek szerinti kialakítással a magasság mentén. A kibetonozás nagyjából a pilon kiegyenesített szakaszáig, a kábelek bekötéséig tart. Az így átalakított globális modellt a 6.4. ábra szemlélteti.

Ez a modell tehát azzal a céllal készült, hogy a későbbiekben lehetőség legyen az acél és beton közötti együttműködés vizsgálatára, amihez a rúdelemből definiált modell erre nem alkalmas. Kiindulásként mindenhol teljes együttműködést feltételezek, a későbbi munkám során fogom vizsgálni a pilont különböző szintűegyüttműködést eredményező szerkezeti kialakításokkal.



6.4. ábra: A globális testmodell - axonometria

A teljes pilont és a pályaszerkezet szintjén lévő keresztmetszetet a 6.5. ábra mutatja be. Piros szín jelzi az acél, kék a beton testelemeket.



6.5. ábra: A teljes pilon és egy keresztmetszete

A pilon testelemekből való elkészítése után a hídszerkezet többi részét is felépítettem a modellben. A pályaszerkezet és a pilon között lényegében csak a kábelek teremtenek kapcsolatot, így a többi rész (pályaszerkezet, alépítmények, megtámasztások) a korábban bemutatott rúdmodellhez képest változatlan. A kábelek továbbra is rúdelemből kerültek modellezésre. A kábelek az módosított modellben nem a pilon tengelyébe csatlakoznak be, hanem a keresztmetszet szélső acél elemeibe, követve a tényleges kialakítást. A becsatlakozás keresztmetszeteibe a ter-

vek szerinti 30 mm vastag acél diafragmát modelleztem, amely merevíti a pilont a nagy koncentrált erő bevezetésénél. A szerkezet támaszai a pilont leszámítva változatlanok. A pilon alsó részét az alépítmény teljes magasságában megtámasztottam UX, UY és UZ irányban is.

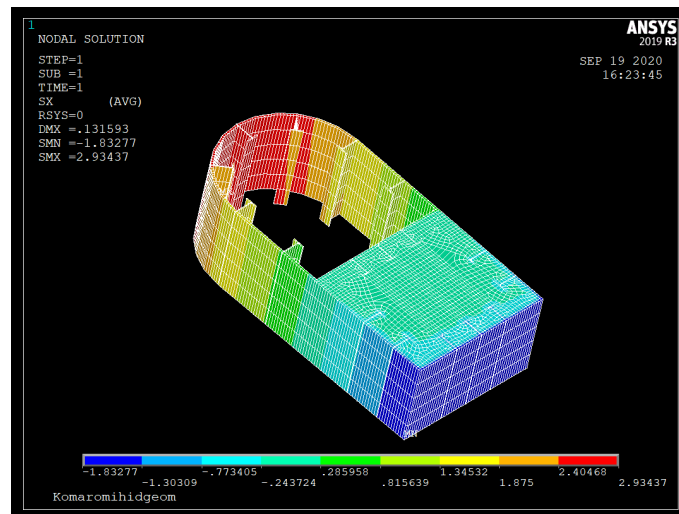
6.4 A modellek vizsgálata

A két modell összehasonlítása céljából egyszerű terhet helyezek a pilon tetején, majd összevelem az eredményeket. A globális rúdmodellben lefelé ható 1000 kN nagyságú koncentrált erőt működtetek. A testmodell esetében megoszló terhet definiáltam, aminek eredője szintén 1000 kN. A modellek a 6.6. ábrán láthatók.

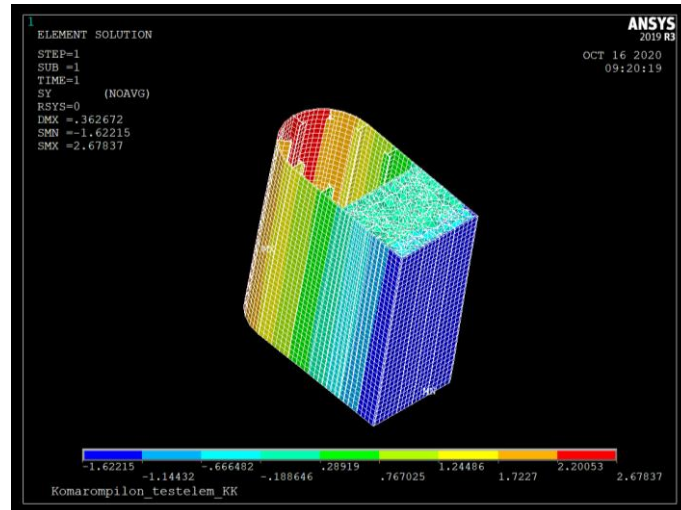


6.6. ábra: A vizsgált modellek rúdelemből és testeimből

A korábban lokális modellekkel vizsgált szakaszt, vagyis a hídpálya szintjében lévő keresztmetszetet és az ott keletkező feszültségeket rúdelemből és testeimből definiált modell esetében a 6.7. és 6.8. ábrák szemléltetik.



6.7. ábra: Normálfeszültségek – rúdelem



6.8. ábra: Normálfeszültségek – testelem

A globális modellek feszültségeloszlásai jó egyezést mutatnak. A rúdelem és testelem modellek feszültségei a következők:

Húzófeszültségek: $\sigma_{rúd,t} = 2,93 \text{ MPa}$ és $\sigma_{test,t} = 2,67 \text{ MPa}$

Nyomófeszültségek: $\sigma_{rúd,c} = -1,83 \text{ MPa}$ és $\sigma_{test,c} = -1,62 \text{ MPa}$

Láthatjuk, hogy a két modell eredményei között $\sim 10\%$ az eltérés. Az is megfigyelhető, hogy a rúdelem ad nagyobb feszültséget, vagyis ez viselkedik merevebben. A későbbiekben ennek megfelelően a két modelltől hasonló eredményeket várhatunk.

7. A híd próbaterhelése

7.1 A próbaterhelés áttekintése

A Komáromi Duna híd statikus és dinamikus próbaterhelését a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék hajtotta végre 2020. május 16-án. A vizsgálatra az új közúti híd forgalomba helyezése miatt volt szükség. A mérés legfontosabb célja a híd teherbírásának ellenőrzése, az egyes elemek szerkezeti viselkedésének vizsgálata, az elmozdulások (lehajlás, piloncsúcs eltolódás) mérése, majd ezen adatok összevetése a tervezett értékekkel. A híd próbaterhelése nem más, mint a szerkezet 1:1 arányú modellkísérlete.



7.1. ábra: A próbaterhelés [17]

A híd próbaterhelésén személyesen is részt vettem, mint az egyik mérőcsapat tagja. A csapat feladata a kijelölt szakasz lehajlásának mérése volt. A BME Hidak és Szerkezetek Tanszék a mérési adatokat oktatási céllal a rendelkezésemre bocsátotta. [16] A dolgozatomban ezeket a mért adatokat fogom feldolgozni, a pilon viselkedésére koncentrálni.

A próbaterhelés a terheletlen szerkezet vizsgálatával kezdődött. A terhelést 32 darab, átlagosan 31 tonna tömegű teherautóval hajtották végre.



7.2. ábra: A teherautók statikus teherállásban

A statikus teherállásoknál szintezéssel mértük a hídszerkezet lehajlását. Ugyanekkor a felszerkezet néhány keresztmetszetében és a pilon alsó szintjén nyúlásmérő bélyegekkel mérték a nyúlásokat. A pilon csúcsának elmozdulását szintén mérték. A statikus teherállások után 2 darab 31 tonnás tehergépkocsival felvették a híd vonathatásábráját. A szerkezet sajátfrekvenciáit gyorsulásmérő műszerekkel határozták meg. A hídszerkezet dinamikus próbaterhelése 2 darab egymás mellett haladó teherautóval 5, 20, 40, 60, 80 és 90 km/h sebességgel történt. A próbaterhelés végén szemrevételezéssel felülvizsgálták a szerkezetet: mindent rendben találtak, a próbaterhelés nem okozott károsodást a hídban.

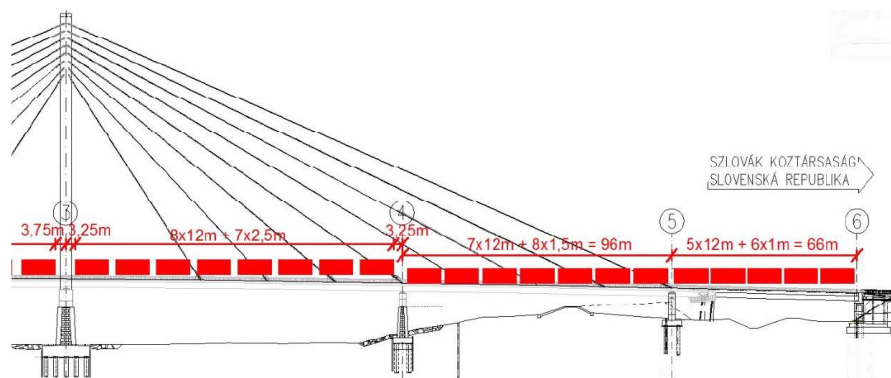
A mérés során szélcsendes, napos idő volt, csapadék nélkül. A levegő hőmérséklete +12 és +22 °C között változott, a mérés során egyenletesen. A pilonban és a pályalemezben a próbaterhelés alatt folyamatosan mérték a hőmérséklet alakulását.

7.2 A teherállások

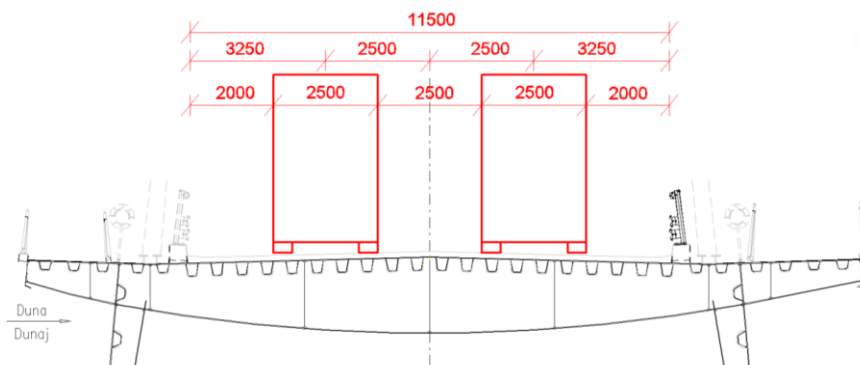
A teherállások úgy lettek kialakítva, hogy azokból mértékadó igénybevétel és elmozdulás keletkezzen: mező legnagyobb lehajlása, pilon legnagyobb elmozdulása, pályaszerkezet csavarodása és támaszreakciók. Összesen 16 teherállás volt, amelyekbe a terheletlen állások is benne vannak. A teherállások a következők:

1. Terheletlen híd
2. 2-3 támaszközre mértékadó totális terhelés fele
3. 2-3 támaszközre mértékadó totális terhelés
4. Terheletlen híd
5. 1-2 és 3-4 támaszközre mértékadó totális terhelés
6. 2. támaszra mértékadó totális terhelés
7. Terheletlen híd
8. 3. támaszra mértékadó totális terhelés
9. 4. támaszra mértékadó totális terhelés
10. 3-4 és 5-6 támaszközre mértékadó totális terhelés
11. 5. támaszra mértékadó totális terhelés
12. Terheletlen híd
13. Féloldalas terhelés a befolyási oldalon
14. Féloldalas terhelés a kifolyási oldalon
15. Csavaró terhelés (nyílásonként alternáló elrendezésben)
16. Terheletlen híd

A teherautók elhelyezkedésére és a teherállásokra a következő ábrákon láthatunk példát.

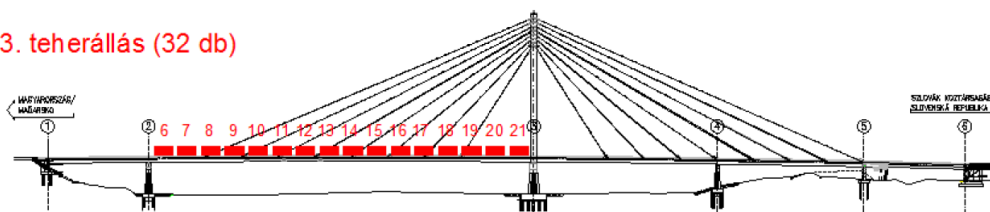


7.3. ábra: Példa a teherautók elhelyezésére



7.4. ábra: A teherautók keresztirányú elhelyezkedése

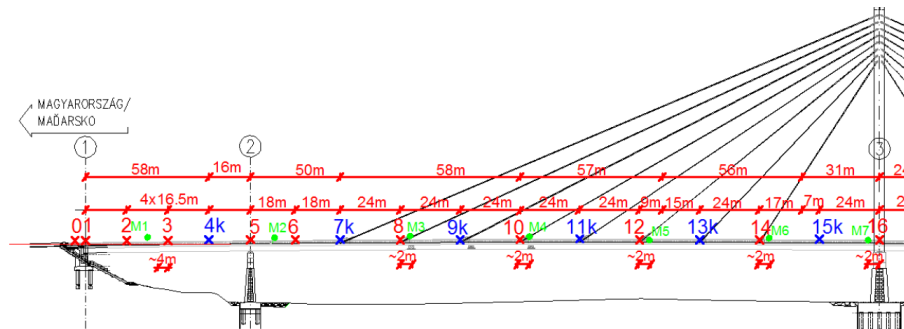
3. teherállás (32 db)



7.5. ábra: A harmadik teherállás

7.3 A lehajlások mérése

A lehajlásokat az összes teherállásban a befolyási és a kifolyási oldalon is meghatároztuk. A mérést $\pm 0,5$ mm megbízhatóságú felsőrendű automata szintezőműszerrel hajtották végre. Mindkét oldalon 34-34 pontot mértek, a hídfőknél pedig őrpontokat helyeztek el. A mérés hídfőtől hídfőig terjedt. A 7.6. ábrán láthatók a híd egyik szakaszának szintezési pontjai. Pirossal az általános szintezési pontok, kékkel a kötőpontok, zölddel a műszerállások vannak jelölve. A mérést egyszerre több csapat hajtotta végre.



7.6. ábra: Szintezési pontok elhelyezkedése

Az egyes teherállások értékelésénél minden esetben a korábbi üres teherálláshoz viszonyították az eredményeket.

7.4 A piloncsúcs elmozdulásának mérése

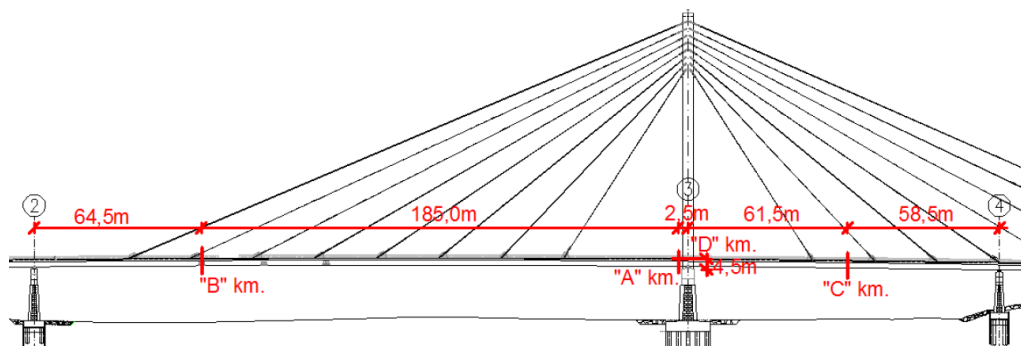
A pilon csúcsának elmozdulását a híd tengelyében, a szlovák oldalon, a mellvéd közepén felvett pontban mérték. Ez a pont egy Leica körprizma, aminek mozgását a szlovák oldalon létesített Leica 1201+ mérőállomással követték számítógép vezérléssel, automatikus irányzással. Teherállásonként 2-4 mérés történt nagyjából 10 perc különbséggel, amiket átlagoltak. Ezzel az eljárással meghatározható a pont eltolódása hosszirányban, keresztirányban, valamint függőlegesen. A meghatározott koordináták pontossága ± 3 mm. Mint korábban, itt is a terheletlen híd során mért értékekhez viszonyították a kiértékelés során. Már a próbaterhelés alatt látható volt, hogy a hőmérséklet változása következtében további elmozdulás is létrejött.



7.7. ábra: A piloncsúcs mérési pontja

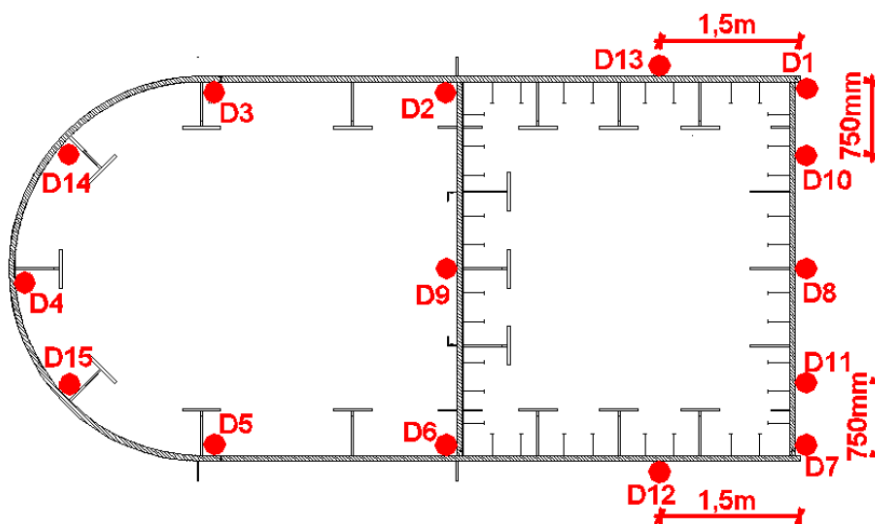
7.5 A nyúlások mérése

A nyúlásmérés célja a kiválasztott keresztmetszetekben fellépő normál feszültségek meghatározása az egyes terhelések hatására. Nyúlásmérő bélyegek a pályaszerkezet néhány keresztmetszetében és a pilon egyik keresztmetszetében lettek elhelyezve. A hídon összesen 73 db KMT-LIAS 3/350 típusú, uniaxiális, 3 mm mérőbázisú aktív nyúlásmérő bélyeget alkalmaztak. A nyúlásmérést a pilonon és a főtartó három keresztmetszetében végezték el. A 7.8. ábrán láthatók ezek a keresztmetszeteket.



7.8. ábra: A globális nyúlásmérés keresztmetszetei

Az „A”, „B” és „C” keresztmetszetek a főtartón találhatók (támaszok és kábelek környezetében), a „D” pedig a pilon alsó szakaszán. A jelen munka szempontjából legfontosabb, a „D” keresztmetszet, a pilon bekötési keresztmetszetétől 4,5 m-re, a pályalemez síkjától 0,2-1,5 m magasságban ferdén, a pilon tengelyét követve lettek elhelyezve a nyúlásmérő bélyegek. A pilonban elhelyezett bélyegeket a 7.9. ábra szemlélteti, a későbbiekben ezzel részletesen foglalkozok.



7.9. ábra: A pilon „D” keresztmetszetének nyúlásmérő bélyegei

7.6 További mérések

A statikus teherállások után a vonathatásábrát vették fel, ahol egymás mellett két teherautó kis sebességgel (~5 km/h) haladt végig a hídon. Ezzel elemezhető a szerkezet erőjátéka hosszirányban kvázi-statisztikus járműteher hatására. A mérési adatokat a korábban bemutatott nyúlásmérő bélyegek adták folyamatos vétellel.

A dinamikus próbaterhelés során a szerkezet dinamikus viselkedését vizsgálták a pályán végighaladó járműteher hatására, majd meghatározták az egyes szerkezeti részletekhez tartozó dinamikus többlettényezőket. A mérést több, különböző sebességű futamban hajtották végre, szintén két egymás mellett, azonos sebességgel haladó tehergépkocsi segítségével. Mint korábban, itt is a 73 nyúlásmérő bélyeg szolgáltatta a mérési adatokat. Ezen kívül gyorsulásmérő műszerekkel meghatározták a híd sajátfrekvenciáját természetes gerjesztés hatására.

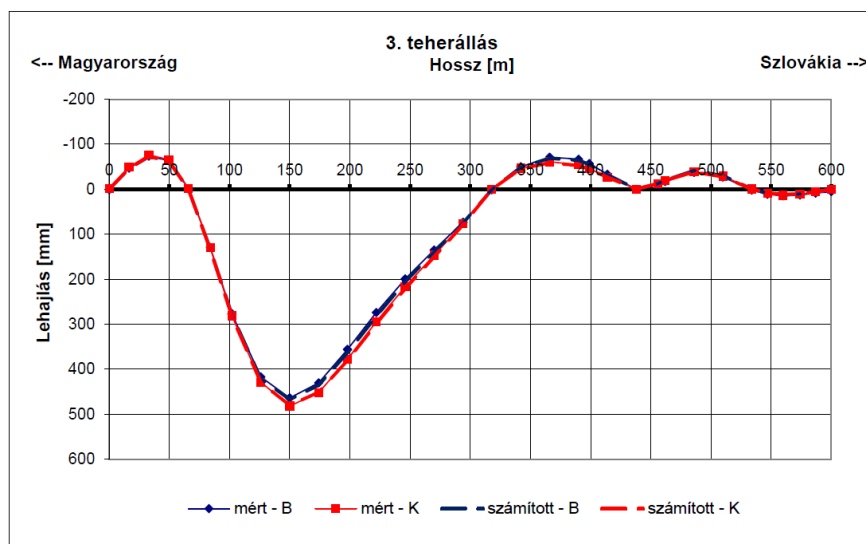
A továbbiakban a próbaterhelés során kapott mérési eredményeket fogom feldolgozni. Ahogyan már korábban említettem, a cél a numerikus modell és a valós szerkezet viselkedésének összehasonlítása. A numerikus analízisek során a korábbiakban bemutatott globális és lokális végeleemes modellek alapján készültek.

8. A hídszerkezet lehajlása

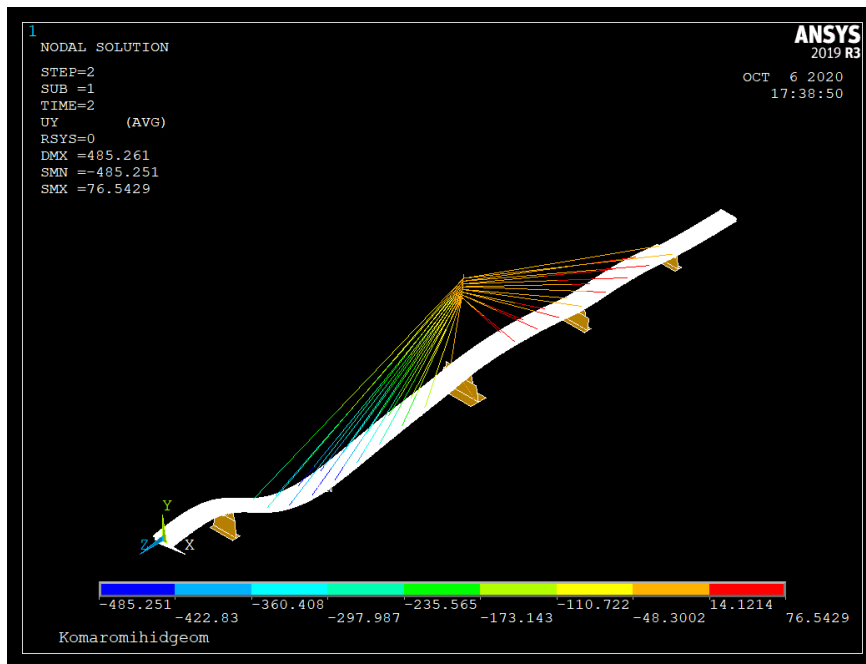
A teljes híd lehajlásának kiértékelése a próbaterhelési jelentésben megtörtént. Az eredményeket fontosnak találom a dolgozatomban összefoglalni, mivel a lehajlás egy olyan integrált mennyiség, ami a lehető legjobban mutatja egy szerkezet globális viselkedését. Ha a mért lehajlás meggyezik a modellben számított lehajlással, akkor tudjuk, hogy merevség szempontjából jól működik a modell. A jelentés alapján a mért értékek 97-100%-a a számított értékeknek, így kijelenthető, hogy a rúdmodell egészen pontosan követi a valós viselkedést. [16]

Az üres teherállások között mért maradó alakváltozás maximális értéke 7,4%, amely a hőmérsékletváltozással magyarázható.

A legnagyobb lehajlások a harmadik teherállás során keletkeztek. Az ehhez tartozó rúdmodellből számolt, illetve mért lehajlások közös diagramja a 8.1. ábrán látható. A 8.2. ábrán látható a modell deformációja (a „B” jelenti a befolyási, a „K” pedig a kifolyási oldalt).



8.1. ábra: A 3. teherállás lehajlásai (mért és rúdmodell) [16]



8.2. ábra: A 3. teherállás lehajlásai – rúdmodell

Egyértelműen látszik a diagramon, hogy jól követik a rúdmodellel számított értékek a valódi lehajlásokat.

9. A piloncsúcs elmozdulásának vizsgálata

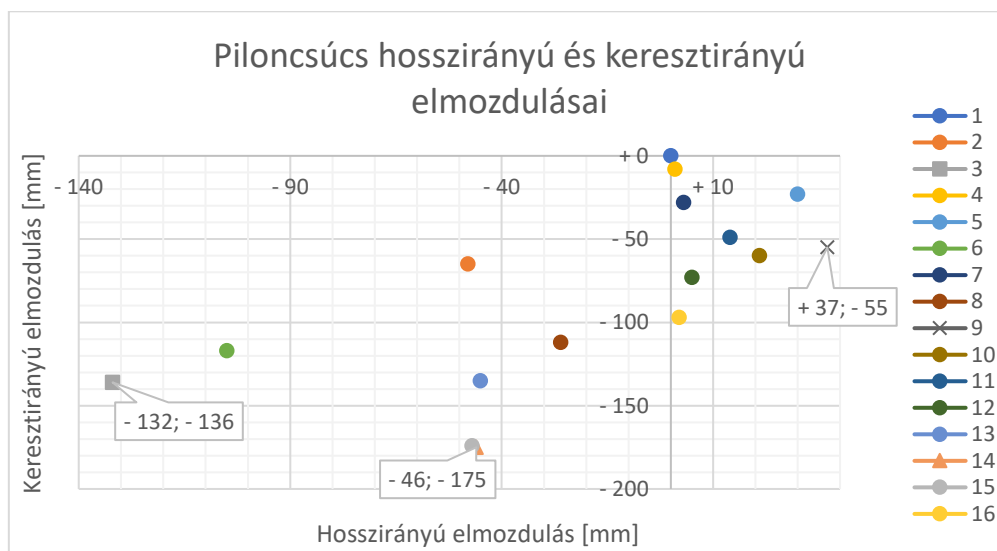
9.1 A piloncsúcs elmozdulása a próbaterhelés alatt

A próbaterhelés során a szlovák oldalról, fix pontról mérték a pilon csúcsának hosszirányú, keresztirányú és magassági értelemben vett elmozdulását. Az elmozdulások értékét az egyes teherállásokban meghatározott 2-4 mérési eredmény átlaga adja. Hosszirányban a pozitív elmozdulások Szlovákia felé mutatnak, keresztirányban a pozitív elmozdulások a befolyás irányában értelmezendők. Függőlegesen a felfelé irányuló elmozdulás pozitív. A mérési adatokat a 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat: A piloncsúcs elmozdulási [16]

Teherállás	Mérés időpontja	Elmozdulás [mm]		
		Hosszirányban	Keresztirányban	Magasságban
1. (üres)	8:17	+0	+0	+0
2.	8:52	-48	-65	-9
3.	9:35	-132	-136	-14
4. (üres)	9:58	+1	-8	+1
5.	10:28	+30	-23	-1
6.	10:51	-105	-117	-10
7. (üres)	11:17	+3	-28	+1
8.	11:47	-26	-112	-9
9.	12:21	+37	-55	-2
10.	12:44	+21	-60	-2
11.	13:08	+14	-49	-1
12. (üres)	14:24	+5	-73	-3
13.	14:58	-45	-135	-10
14.	15:33	-46	-175	-13
15.	15:57	-47	-174	-14
16. (üres)	16:18	+2	-97	-4

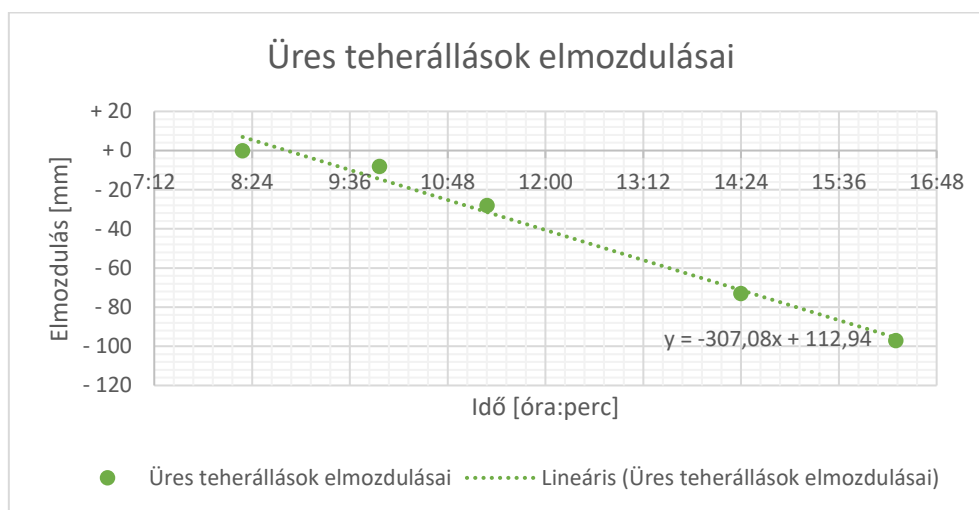
A mérési adatok előjelei és nagyságai alapján megállapítható, hogy hosszirányban a terheléstől függően Magyarország vagy Szlovákia felé történik elmozdulás, míg keresztirányban minden esetben a Duna kifolyási irányában látható eltolódás. Ez utóbbi szemléletből is jól követhető, hiszen ebben az irányban ferde a pilon, a kábeleken keresztül a teher pedig minden esetben erre mozdítja el a szerkezetet. Magassági értelemben csak az üres teherállásokban pozitív, azaz felfelé mutató az elmozdulás. Ez is jól követhető, hiszen terhelés hatására lefelé húzzák a kábelek a pilonszerkezetet. Megfigyelhetjük, hogy mindhárom esetben a mérési adatok abszolút értéke egyre növekszik az üres teherállásokban. Ez a hőmérséklet növekedése miatt van, amit már a mérés során is megfigyeltek. Ennek vizsgálatára a későbbiekben még visszatérek. Az összes teherállásban létrejött hosszirányú és keresztirányú elmozdulást a 9.1. ábra szemlélteti.



9.1. ábra: A piloncsúcs hosszirányú és keresztirányú elmozdulásai

A legnagyobb abszolút elmozdulás a 3. teherállásban jött létre (négyzettel jelölve), míg a legnagyobb keresztirányú eltolódás a 14. állásban (háromszög). Hosszirányban a legnagyobb pozitív elmozdulást a 9. teherállás okozta (kereszt). Korábban láthattuk már, hogy a 3. teherállásból keletkeznek a legnagyobb feszültségek. Ezzel összhangban ekkor jönnek létre a legnagyobb elmozdulások is.

Azt látjuk az ábra és a mérési adatok alapján, hogy az üres teherállásokban (1-4-7-12-16. állások) nem mindig zérus az eltolódás. A reggeli mérést tekintettük kiindulásnak, ehhez képest a délutáni mérések során lényegesen nagyobb elmozdulásokat mértek az üres teherállásokban. Ez a jelenség a hőmérséklet változásával magyarázható. Az üres állásokhoz tartozó hosszirányú és keresztirányú elmozdulásokat az idő függvényében a 9.2. ábra mutatja be.



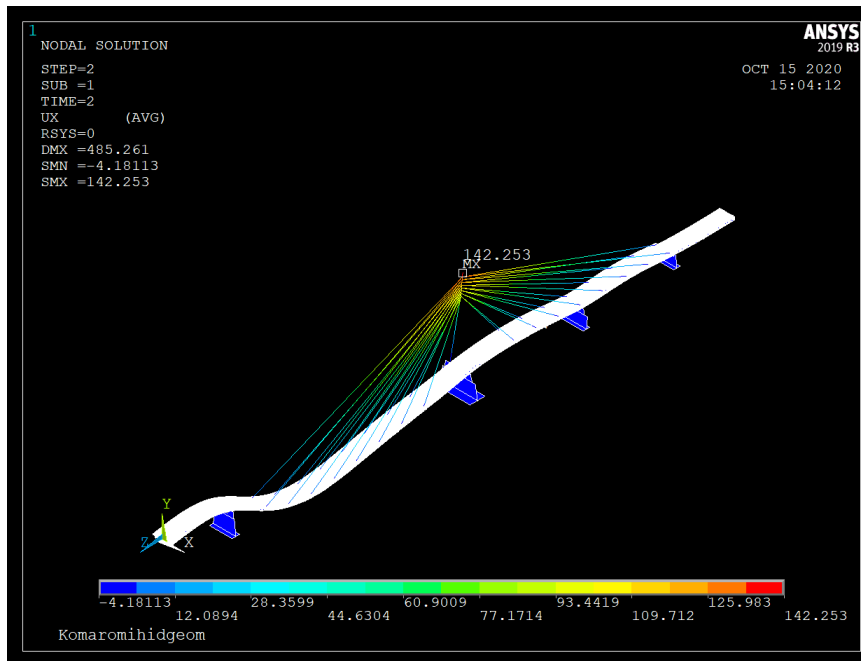
9.2. ábra: Üres teherállások elmozdulásai az idő függvényében

Azt látjuk, hogy nagyjából lineárisan változik az elmozdulás az idő függvényében. Korábban, a próbaterhelés bemutatásánál (7. bekezdés) már tárgyaltuk, hogy ezek tisztán a hőmérséklet növekedéséből keletkező elmozdulások. Megállapítható tehát, hogy a szerkezet igen érzékeny

a hőmérséklet változására. A mérés napján pedig 12-22 °C között alakult a léghőmérséklet, így valóban hatással volt a hőmérséklet a szerkezetre.

9.2 A piloncács elmozdulása a globális rúdmodellben

A pilon felső pontjának elmozdulásait kiolvastam a globális rúdmodellből. Az elmozdulásokat hosszirányban, keresztirányban és magassági értelemben is leolvastam. Példaként a 9.3. ábra mutatja a harmadik teherálláshoz tartozó keresztirányú (UX) elmozdulást.



9.3. ábra: A piloncács 3. teherálláshoz tartozó keresztirányú (UX) elmozdulása

Az egyes teherállásokhoz tartozó elmozdulások komponenseit a 2. táblázatban mutatom be. A sorokban a teherállások sorszáma található, az oszlopokban az egyes elmozdulások mért és modellből számított értékei, valamint a kettő százalékos eltérése látható. Az üres teherállások esetében a modellben nincs, a valóságban a hőmérséklet hatása miatt mérhető elmozdulás. Mivel a mérés ± 3 mm pontossággal történt, ennél kisebb értékek esetén nem számolom az eltérést.

2. táblázat: A piloncúcs elmozdulásainak összehasonlítása

Teherállás	Elmozdulás [mm]								
	Hosszirányban (Z)			Keresztirányban (X)			Magasságban (Y)		
	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés
1. (üres)	0			0			0		
2.	-48	-52,2	-8,8%	-65	-67,38	-3,7%	-9	-7,86	12,7%
3.	-132	-131	0,8%	-136	-142,3	-4,6%	-14	-16,75	-19,6%
4. (üres)	+1			-8			+1		
5.	+30	+23,15	22,8%	-23	-12,32	46,4%	-1	-1,37	-37,0%
6.	-105	-106,4	-1,3%	-117	-108,2	7,5%	-10	-12,78	-27,8%
7. (üres)	+3			-28			+1		
8.	-26	-28,87	-11,0%	-112	-84,66	24,4%	-9	-9,82	-9,1%
9.	+37	+30,48	17,6%	-55	-14,69	73,3%	-2	-1,68	16,0%
10.	+21	+12,84	38,9%	-60	-17,51	70,8%	-2	-1,98	1,0%
11.	+14	+11,05	21,1%	-49	+2,37	104,8%	-1	+0,25	125,0%
12. (üres)	+5			-73			-3		
13.	-45	-48,86	-8,6%	-135	-61,78	54,2%	-10	-7,5	25,0%
14.	-46	-50,14	-9,0%	-175	-90,09	48,5%	-13	-10,32	20,6%
15.	-47	-49,84	-6,0%	-174	-84,95	51,2%	-14	-9,79	30,1%
17. (üres)	+2			-97			-4		

A táblázatból láthatjuk, hogy hosszirányban többnyire csak néhány mm, de legfeljebb 8 mm eltérés tapasztalható a mért és a számított érték között. Látható, hogy a legnagyobb eltérések akkor következtek be, amikor a legnagyobb volt az üres teherállásban mért elmozdulás, vagyis a legerősebb volt a hőmérséklet hatása. Keresztirányban már lényegesen nagyobb különbségek tapasztalhatók, de ebben az irányban a legjelentősebb a hőmérsékletből keletkező eltolódás. Magassági értelemben jóval kisebbek az elmozdulások és a viszonyított eltérések is (legfeljebb néhány mm között mozognak).

Az első hat teherállásban még jól közelítették egymást az értékek, csak az 5. állásban tapasztalható nagyobb eltérés. A 7. (üres) teherállástól egyre nagyobbak a hőmérsékletből keletkező eltolódások, így a mérési értékek is egyre jobban térnek el a modell értékeitől.

A legnagyobb elmozdulások a harmadik, nyolcadik és tizennegyedik teherállások során jöttek létre, így az ezekhez tartozó eredményeket itt is részletesebben vizsgálom. Mivel hosszirányban és magassági értelemben is jók a közelítések, csak a keresztirányú eltolódások elemzésére koncentrálok. A 9.2. ábrán bemutatott üres teherállásokhoz tartozó elmozdulás értékeire egyenes illesztettem, aminek egyenlete $y = -307,08x + 112,94$, ahol x a mérés idejét jelenti óra:percben, y az eltolódást mm-ben. Ezzel a teherállások időpontjában meghatározható a hőmérsékletből keletkező elmozdulás, amit ki kell vonni a mérési értékből, hogy megkapjuk a hőmérséklet nélküli elmozdulásokat. A harmadik teherállás eltolódását nem korrigálok, mivel az egyenes kezdeti szakaszán viszonylag rosszul illeszkednek a mérési pontok, továbbá ekkor (9:35-kor) még nem volt jelentős a hőmérséklet hatása. Korábban láthattuk, hogy a későbbi órákban végzett méréseknél egyre nagyobb a hőmérsékletből keletkező többlet eltolódás, így a kilencedik

és a tizennegyedik teherállásban már az előbb bemutatott korrekciót alkalmazom. Az így kapott értékeket a 3. táblázat mutatja.

3. táblázat: A korrigált keresztirányú elmozdulások összehasonlítása

Teherállás	Korrigált elmozdulás [mm]						
	Mérés ideje	Keresztirányban (X)					
		Mérés	Korrekció	Korrigált érték	Modell	Eltérés az eredetitől	Eltérés a korrigálttól
3.	9:35	-136	-	-	-142,25	-4,6%	-
8.	11:47	-112	-37,8	-74,2	-84,66	24,4%	-14,1%
14.	15:33	-175	-86,0	-89,0	-90,09	48,5%	-1,3%

A harmadik teherállás esetében mindössze 6 mm az eltérés. Ez a nyolcadik állásban korrekció nélkül 27 mm, korrekcióval 10 mm, a tizenegyedikben 85 mm és 1 mm. Látható tehát, hogy a hőmérsékleti korrekció a későbbi mérések esetén pontosabb, mint a korábbiaknál.

9.3 Az eredmények összefoglalása

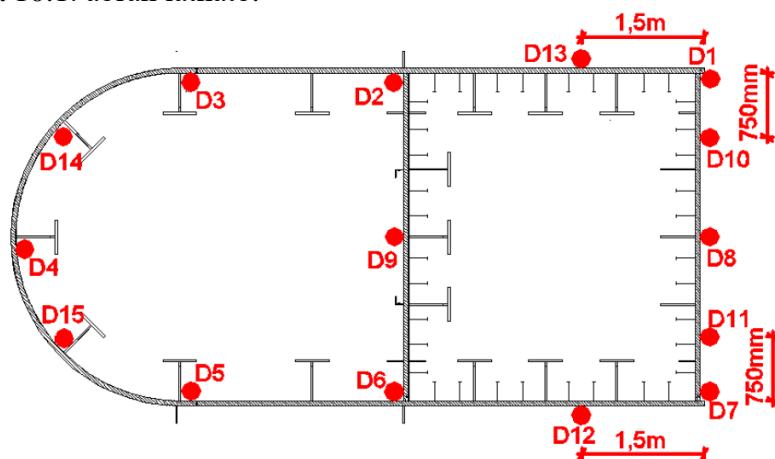
Már a mérési eredményekből is láthattuk, hogy a szerkezet érzékeny a hőmérséklet-változásra, amely az üres teherállásokban mért egyre nagyobb elmozdulásokból következik. Ez főleg keresztirányban jelentős, de hosszirányban és magassági értelemben is megjelenik. Az üres állások eredményeiből meghatároztam egy hőmérsékleti korrekciót, amiből látható a csak teherből keletkező elmozdulásokat. Megállapítható, hogy a globális rúdmodell elmozdulásai jól követik a mérési eredményeket. Az első teherállásokban korrekció nélkül, a többiben a korrigált értékekkel is jó egyezést mutatnak a mérési adatokkal.

10. A pilonban keletkező feszültségek vizsgálata

10.1 A mérési eredmények feldolgozása

10.1.1 A vizsgált keresztmetszet

A pilon alsó szakaszán, a bekötéstől 4,5 m-re, a pályalemez felső síkjától 0,2-1,5 m magasságban ferdén, a pilon tengelyét követve található a vizsgált „D” keresztmetszet. Ebben a síkban lett elhelyezve 14 db nyúlásmérő bélyeg. A műszerek számozása D1-től D14-ig terjed, amelyek elhelyezkedése a 10.1. ábrán látható.



10.1. ábra: A pilonban elhelyezett nyúlásmérő bélyegek

A félköríves szakaszon a bélyegek a szerkezet belső falára lettek elhelyezve, míg a másik, teljesen kibetonozott szakaszon csak a külső falakra volt lehetőség azokat rögzíteni. Fontos megjegyezni, hogy minden esetben az acélban keletkező nyúlást lehet mérni, vagyis az acélban keletkező feszültséget ismerjük, a betonban keletkezőt nem.

10.1.2 A mérési adatok

A BME Hidak és Szerkezetek Tanszék a mérési adatokat kiértékelte, amit a rendelkezésemre bocsátott.

Ahhoz, hogy a csak terhelésből származó nyúlásokkal tudjunk dolgozni, a két egymás utáni üres teherállásokban mért nyúlások értékének különbségét időarányosan osztották el a köztes teherállások között, úgy, hogy az esetleges maradó alakváltozások hatása ne tűnjön el. A kiértékelés során kiderült, hogy a próbaterhelés alatt nem keletkezett jelentős mértékű maradó alakváltozás, képlékeny alakváltozásra utaló jelet nem találtak. Emiatt az üres teherállások nyúlásai minden esetben zérus értéket vesznek fel. Ezekből a nyúlásértékekből tökéletesen rugalmas állapotot feltételezve kiszámították a vizsgált pontokban a feszültségeket. Ezen eredmények a terheletlen szerkezet feszültségállapotához adódnak hozzá, vagyis nem abszolút értelemben kell kezelni a húzó- és nyomófeszültségeket. Az értékek tehát a terheletlen állapot (üres teherállás) és az adott teherállás közötti különbséget mutatják. Az így feldolgozott adathalmazt kaptam meg, amelyet a fejezetben részletesen elemzek. A pilon „D” keresztmetszetében meghatározott feszültségeit következő táblázatok mutatják be.

4. táblázat: A „D” keresztmetszet feszültségei [MPa] – 1 [16]

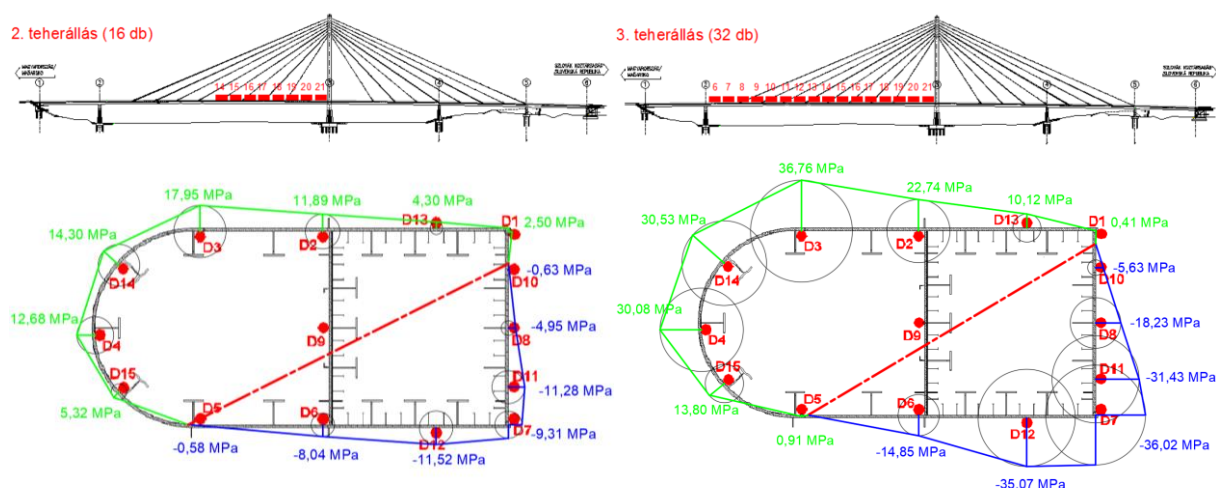
Teherállás	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
1. (üres)	0	0	0	0	0	0	0	0
2.	2,50	11,89	17,95	12,68	-0,58	-8,04	-9,31	-4,95
3.	0,41	22,74	36,76	30,08	0,91	-14,85	-36,02	-18,23
4. (üres)	0	0	0	0	0	0	0	0
5.	-7,46	-5,76	-3,93	2,71	7,14	6,38	4,40	-1,70
6.	-0,16	15,85	27,04	22,44	0,84	-10,65	-25,44	-14,71
7. (üres)	0	0	0	0	0	0	0	0
8.	-6,21	6,73	15,62	18,05	6,79	-2,24	-14,94	-11,64
9.	-7,74	-5,79	-4,46	3,17	7,98	7,17	4,02	-1,50
10.	-7,60	-5,24	-3,68	3,98	7,90	7,13	3,33	-1,91
11.	-0,07	-0,66	-1,61	-0,26	0,27	1,21	0,84	0,54
12. (üres)	0	0	0	0	0	0	0	0
13.	-1,78	7,54	13,89	12,34	1,56	-5,15	-13,34	-8,63
14.	-4,34	9,33	18,73	18,34	5,59	-4,54	-16,72	-11,65
15.	-3,77	8,92	17,56	17,25	4,85	-4,38	-15,99	-10,99
16. (üres)	0	0	0	0	0	0	0	0

5. táblázat: A „D” keresztmetszet feszültségei [MPa] – 2 [16]

Teherállás	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
1. (üres)	0	0	0	0	0	0	0
2.	0,04	-0,63	-11,28	-11,52	4,30	14,30	5,32
3.	0,91	-5,63	-31,43	-35,07	10,12	30,53	13,80
4. (üres)	0	0	0	0	0	0	0
5.	1,36	-5,66	2,61	5,60	-5,48	-0,10	6,19
6.	0,97	-5,59	-23,74	-26,30	7,30	24,20	10,99
7. (üres)	0	0	0	0	0	0	0
8.	1,57	-8,33	-15,21	-14,09	-2,06	13,50	12,74
9.	1,34	-5,63	2,26	6,10	-8,13	-4,04	6,83
10.	1,18	-5,62	1,57	5,76	-8,00	-3,39	7,25
11.	-0,15	0,21	0,67	1,56	-1,73	-4,37	0,38
12. (üres)	0	0	0	0	0	0	0
13.	0,37	-4,28	-12,79	-13,66	2,19	12,28	6,51
14.	1,61	-7,12	-16,32	-16,49	1,44	17,02	11,44
15.	1,31	-6,67	-15,55	-15,89	1,86	16,13	10,69
16. (üres)	0	0	0	0	0	0	0

10.1.3 A vizsgált keresztmetszet feszültségeloszlásai

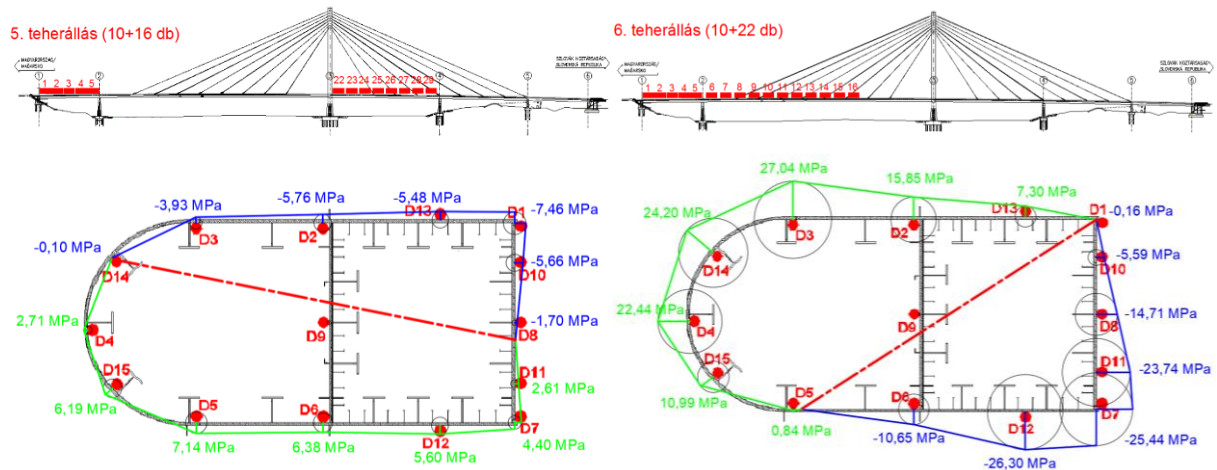
Az előzőekben bemutatott feszültségek értékeit grafikusán ábrázolom. A feszültségek nagyságát a nyúlásmérő bélyegek pozíciójába helyezett fekete körök mutatják. A pozitív értékeket zöld, a negatívakat kék szín jelzi. Minden esetben az aktuális teherálláshoz tartozó semleges tengely piros színnel van jelezve. A következő ábrákon bemutatom az egyes teherállásokhoz tartozó feszültségeloszlásokat. Minden esetben feltüntettem az aktuális teherállást a jobb átláthatóság szempontjából. Ahogyan korábban írtam, az üres teherállásokhoz (1., 4., 7., 12. és 16.) nulla a mért feszültség minden pontban, mivel ezekhez történt a viszonyítás. A feszültségeket a 10.2. –10.6. ábrák szemléltetik.



10.2. ábra: A 2. és 3. teherálláshoz tartozó feszültségek

A 2. és a 3. teherállásból keletkező feszültségek eloszlása és a semleges tengely helyzete közel azonos, ugyanakkor a 3. állás feszültségei jóval nagyobbak. Ez természetesen abból következik, hogy az egyik teherállásban csak 16, míg a másiknál 32 teherautó terheli a szerkezetet. Az is belátható, hogy ugyan egyik teher fele a másiknak, de a feszültségek nem fele-fele arányban

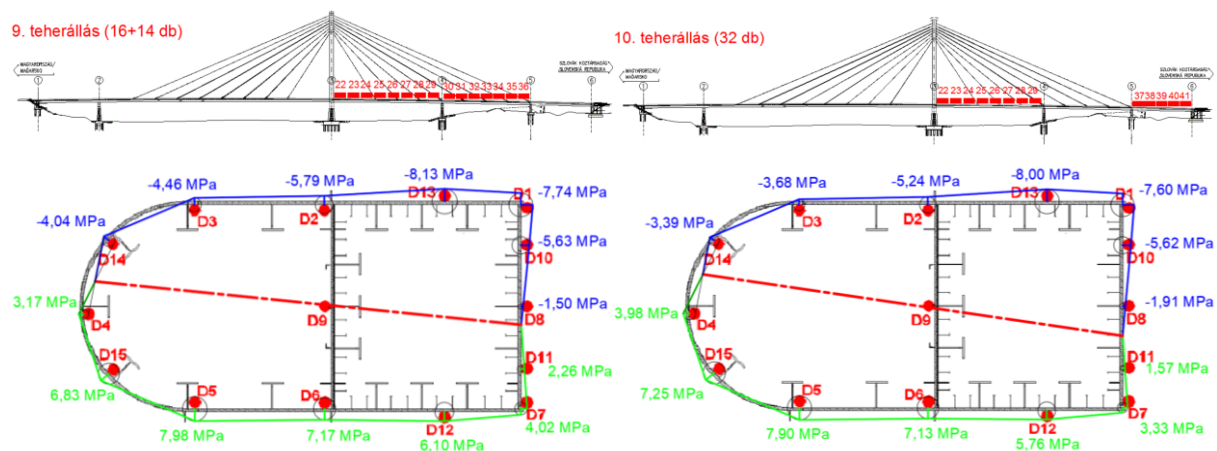
viszonyulnak egymáshoz. Ez a terhek eloszlása miatt van így. Megjegyzem, az összes teherállás közül a 3. elrendezésből alakultak ki a legnagyobb feszültségek. Ez a szerkezet statikai kialakításából következik, mivel a legnagyobb feszítávra került a legnagyobb terhelés. A semleges tengely jól láthatóan ferde, hiszen a terhek elrendezése is ferde a pilonhoz viszonyítva. Jogos felvetés lehet, hogy miért nem középen helyezkedik el a semleges tengely. Ez amiatt nem lehetséges, mert a „terheletlen” oldali kábelek nem hatástalanok, azokban is erő keletkezik, ami átadódik a pilonra. Ne feledjük, hogy a keresztmetszet jobb oldalán teljesen kibetonozott rész van, így ennek jelenleg nagy része nyomott.



10.3. ábra: Az 5. és 6. teherálláshoz tartozó feszültségek

Az 5. teherállásban csak 16 teherautó terheli a pilont, mivel az első támaszközben lévő 10 gépkocsi közel független a pilontól. Az így kapott feszültségeloszlás nagyon hasonlít a 2. teherállásra, csak a másikkól nézve. Nagyjából itt is 16 teherautó terheli a hidat, viszont a feszítáv itt jóval kisebb, mint a korábbi esetben, így a szerkezet statikája miatt mégis eltér ez az állás a 2-től. Emiatt tehát kisebb feszültségek keletkeznek a vizsgált pontokban.

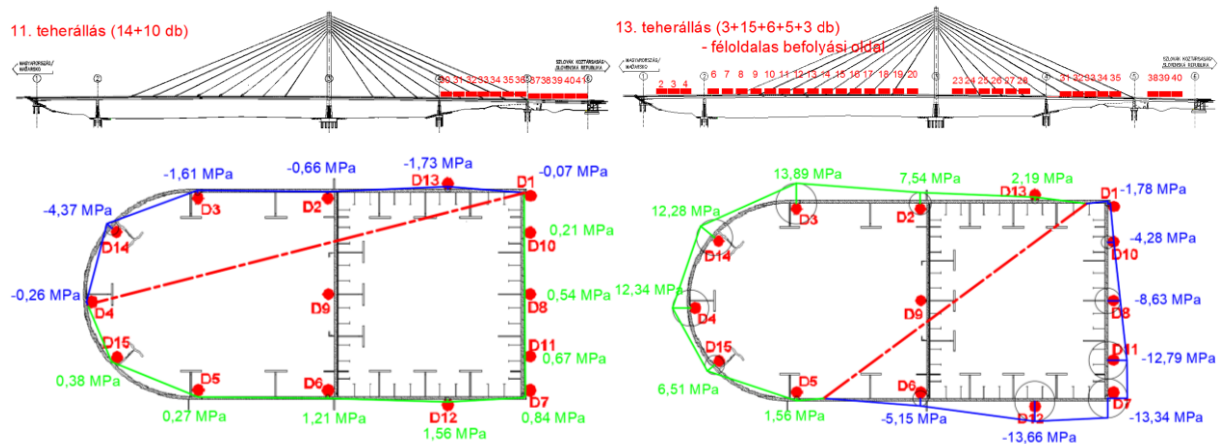
A 6. elrendezés szintén hasonlít a korábbi 2. és 3. álláshoz, a feszültségeloszlások és a semleges tengely elhelyezkedése is jól közelíti a korábbiakat. A feszültségek azonban kisebbek, hiszen itt is kevesebb teher jut a legnagyobb feszítávra.



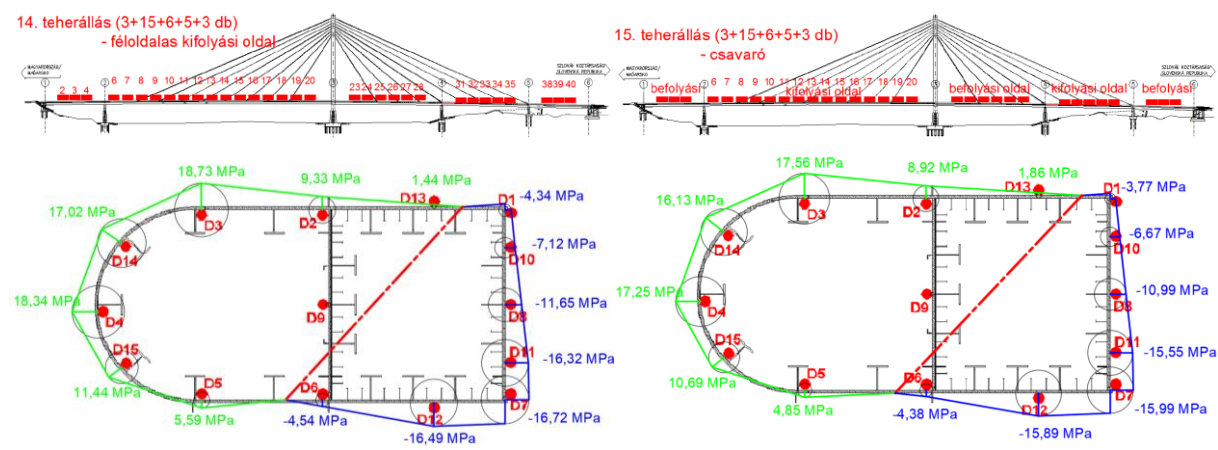
10.4. ábra: A 9. és 10. teherálláshoz tartozó feszültségek

A 9. és 10. teherállásban a szerkezet válasza hasonlít egymáshoz. Első esetben nagyobb teher jut a pilonra, bár a kis fesztávok és a közbenső alátámasztások miatt ennek hatása nem jelentős (látható, hogy szinte azonosak a mért feszültségek). A semleges tengelyek pozíciója is szinte azonos, csak kis szögben tér el a keresztmetszet erős tengelyétől. Itt sem eshet egybe a tengelyvel, hiszen a kábelekben eltérő erő keletkezik, valamint jelen van egy közbenső támasz is.

A 11. teherállás (10.5. ábra) hasonló feszültségeloszlást eredményez, persze a kisebb terhelés miatt kisebb feszültség is keletkezik a pilonban, de a tendencia ugyanaz.



10.5. ábra: A 11. és 13. teherálláshoz tartozó feszültségek



10.6. ábra: A 14. és 15. teherálláshoz tartozó feszültségek

Az utolsó három teherállás féloldalas, illetve csavaró jellegű teherelrendezéssel lett kivitelezve. Itt elsősorban a hídpálya viselkedésének megfigyelése volt a cél, a pilont lényegesen nem érinti. Láthatjuk, hogy a tendenciák, de a feszültség értékei is közel megegyeznek a három állásban. A semleges tengely sem mozdul el különösen.

Összességében megállapítható, hogy a feszültségek előjeles eloszlása a várható módon alakult. Bár a statikai váz nem egyértelmű, hiszen kábelek és további alátámasztások is jelen vannak, a húzott és nyomott oldal szemléletből jól következtethető. A semleges tengely helyzetének alakulása már nagyobb körültekintést igényel, szintén a statikai váz alakulása miatt, hiszen hiába a féloldalas teher, nem csak a terhelt oldalon lévő kábelek működnek. Emiatt szinte kizárt olyan terhelés, hogy a semleges tengely egybeessen a keresztmetszet gyenge tengelyével.

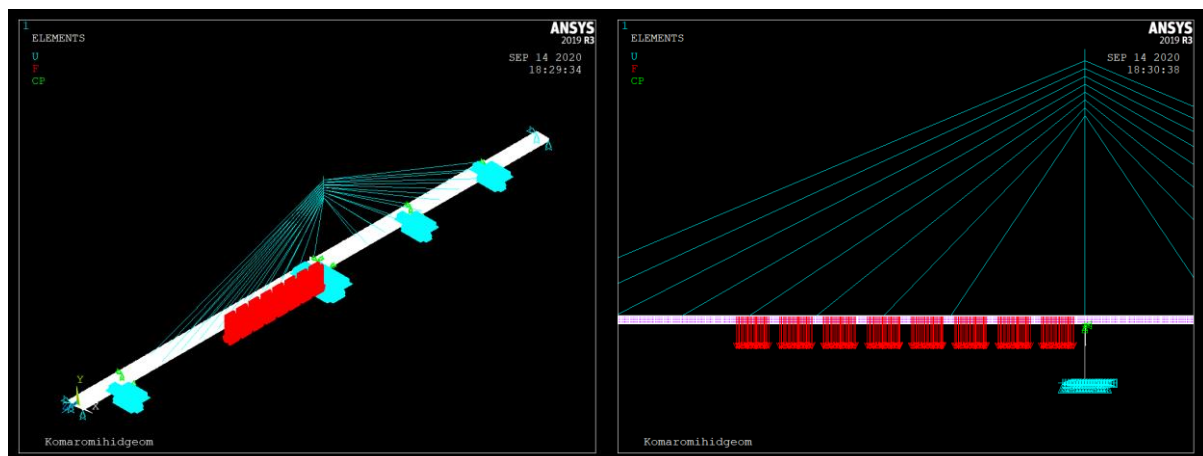
Fontos megjegyezni, hogy a feszültségeloszlás minden esetben lineáris, képlékenyedés, vagy folyáshoz közeli állapot nem alakul ki a próbaterhelés során. Ezt a helyszíni vizsgálatok is alátámasztották. Figyeljük meg, hogy a keresztmetszet sarokpontjaira helyezett „D1” és „D7”, vagy a „D12” és „D13” bélyegek olykor nem követik jól a lineáris eloszlást. Ez alacsony és magas feszültségek esetén is így van, tehát itt sem történik képlékenyedés. A jelenség vélhetően a „D12” bélyeg pontatlanságából következik. Megjegyzem, hogy a félköríves szakaszon megtevesztő lehet a szerkesztett „lineáris feszültségeloszlás”, mivel több helyen is belemetsz az anyagba, de ez csak a mérési pontok kis értékének összekötéséből származik.

10.2 A globális rúdmodell feszültségei

10.2.1 Áttekintés

Ahogy a 6.2. bekezdésben bemutattam, ebben a modellben a pilon rúdszerkezetként lett definiálva. A próbaterhelés egyes teherállásai itt modellezésre kerültek, tehát a tervezett és a valós teher megegyezik. Megjegyzem, hogy a próbaterhelésről készült szakértői jelentés [16] alapján a teherautók átlagos tömege 99,91%-a a tervezett tömegnek (31 tonna). A terhelések nagysága így megegyezik, eltérés a terhek elrendezésében lehet. Mivel a próbaterhelést megelőző napokban gondosan kimérték és kijelölték az egyes tehergépkocsik pozícióját, úgy gondolom ez utóbbi sem jelent problémát.

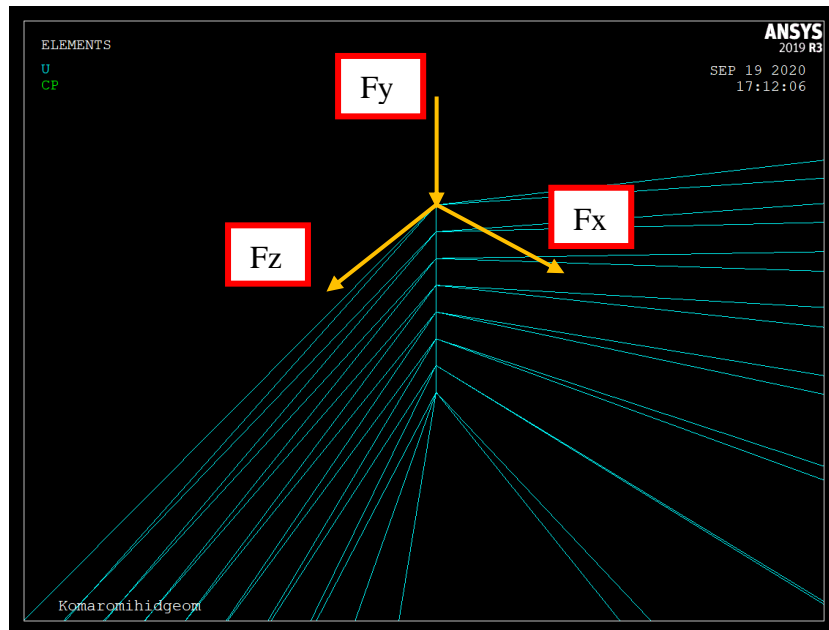
A modellen más teher nincs definiálva, tehát se a szerkezet önsúlya, se meteorológiai, vagy egyéb teher nem jelenik meg. Megjegyzendő, hogy jelen esetben ez a megfelelő eljárás, hiszen a mérés során az üres teherállást tekintettük kiindulásnak, amiben természetesen nem szerepelt a szerkezet önsúlya, hőmérsékletből adódó terhelés, esetleg további terhelések (erről a 10.1.2 bekezdésben már részletesen írtam). Így tehát a modellben is ezt az „üres teherállást” kell kiindulási alapnak tekinteni, vagyis a modellen csak a teherállásokból származó teher lehet jelen. Ezek alapján tehát nyomon követhető a modellel a szerkezet valódi viselkedése. A globális modellt és példaként a 2. teherállást a 10.7 ábra szemlélteti.



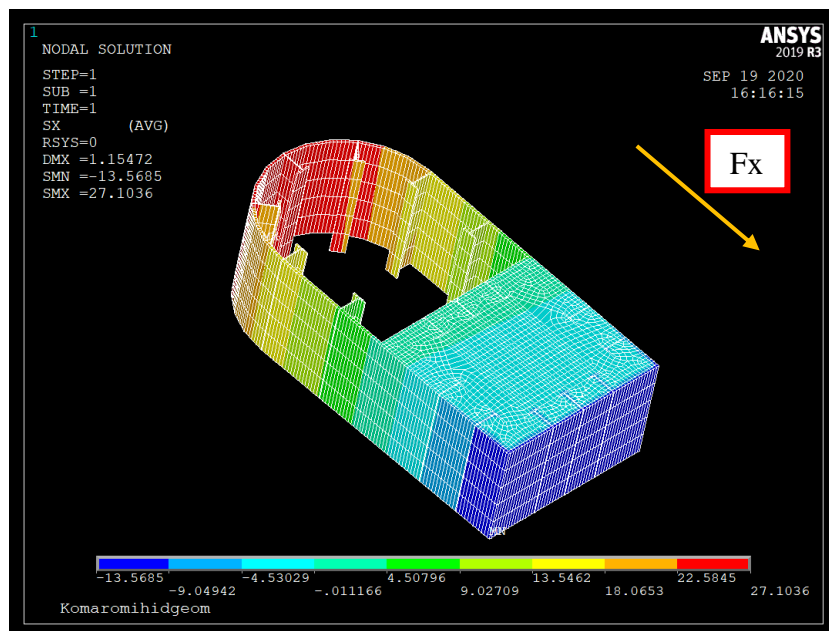
10.7. ábra: A globális modell és a 2. teherállás

Ahogy a mérési adatok feldolgozásánál, itt is az egyes teherállásokhoz tartozó feszültségértékeket fogom vizsgálni. Minden álláshoz lekérem a modellből a pilon alsó részéhez, azaz a mérés keresztmetszetéhez tartozó szakasz feszültségeloszlását, majd összehasonlítom a mért értékekkel. A munkámban csak néhány kiválasztott teherállás eredményeit ismertetem.

Az elemzés előtt azonban egy egyszerűbb terhelést mutatok be. A mérési adatok értékelésénél többször hivatkoztam a bonyolult statikai vázra, amely megnehezíti szemléletből eldönteni az egyes terhelésekhez tartozó feszültségeloszlásokat. Éppen ezért a modellben, a pilon legfelső pontjára definiáltam 100 kN nagyságú terhet három irányban a 10.8. ábra szerint. Mindhárom irányban bemutatom az egyes erőkből keletkező feszültségeloszlást. „Fx” a Duna kifolyási irányába, „Fz” Magyarország irányába, „Fy” pedig lefelé mutat. Az egyes irányú terhelésből keletkező feszültségeloszlások a vizsgált keresztmetszetben a 10.9 – 10.11. ábrákon láthatók.

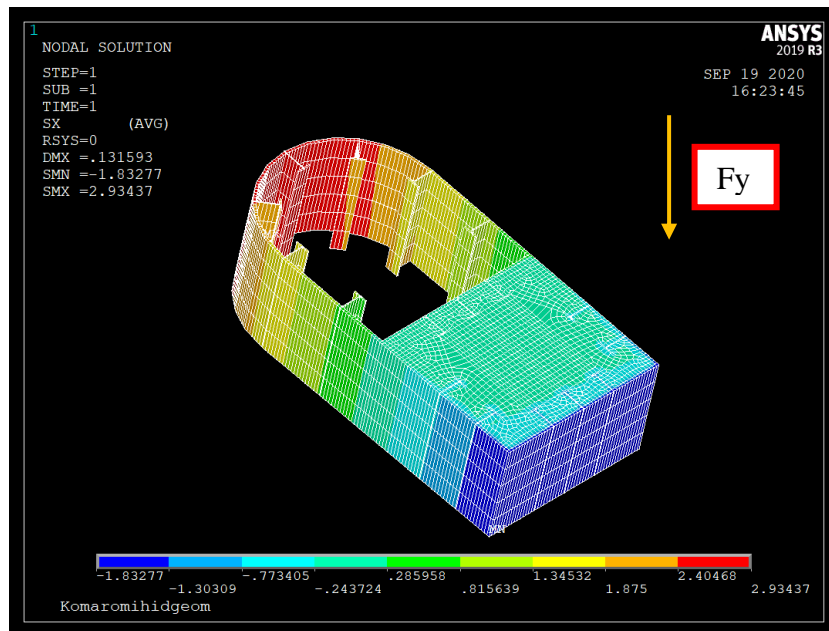


10.8. ábra: Három irányú terhelés a pilon csúcsán



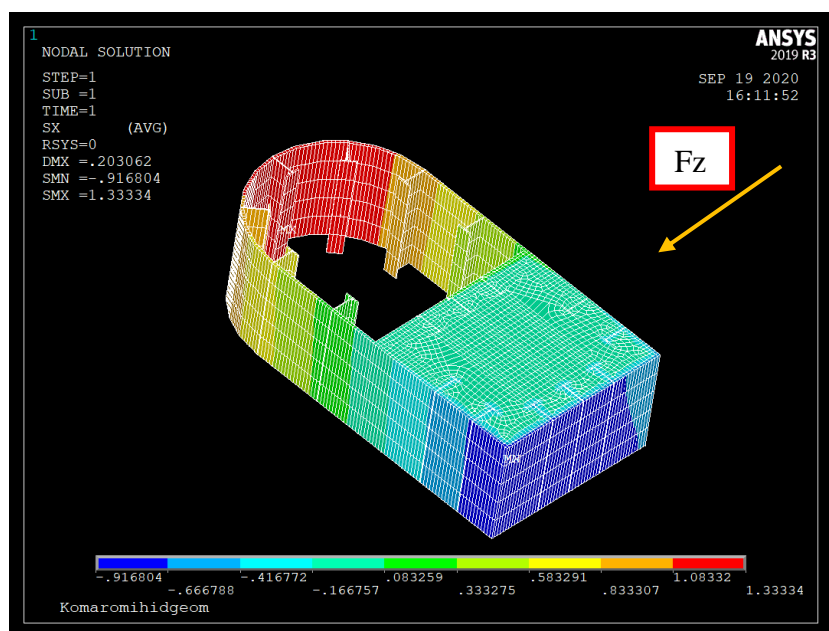
10.9. ábra: Feszültségeloszlás „Fx”-ből

Az első, talán a legegyszerűbb, hiszen ha a kifolyási oldal felé mutat a terhelés („Fx”), akkor a betonozott rész nyomott, a többi rész húzott lesz. A szemleges tengely valahol a betonozás végén található, de mindenképpen párhuzamos a keresztmetszet gyenge tengelyével.



10.10. ábra: Feszültségeloszlás „Fy”-ból

A függőlegesen lefelé ható erő („Fy”) hatására hasonlóan viselkedik a keresztmetszet, mint korábban. Ez főleg amiatt is van, hogy a ferde pilonban függőleges terhelés hatására mindig lesz hajlítás is. A feszültségeloszlás és a semleges tengely szinte azonos az előzővel, csak a feszültségek nagyságában van különbség.



10.11. ábra: Feszültségeloszlás „Fz”-ből

Végül az „Fz” esetén látható az a jelenség, amit a próbaterhelés során mért feszültségeloszlásokból is kiolvashattunk, azaz a semleges tengely elferdül. Láthatjuk tehát, hogy a modell követi a valós jelenséget. Azt is megállapíthatjuk, hogy a valóságban nem tud fellépni olyan terhelés, amiben csak egyirányú komponens van, minden esetben a bemutatott esetek kombinálnak. A mérési adatok feldolgozásánál már megfigyelhettük, hogy a legutóbbi, az „Fz” irányú

komponens dominál a többi között. Ez személetről is következik, hiszen ebben az irányban található a kábelek, amikről nagyobb „Fz” irányú erő adódik a pilonra, mint „Fx”.

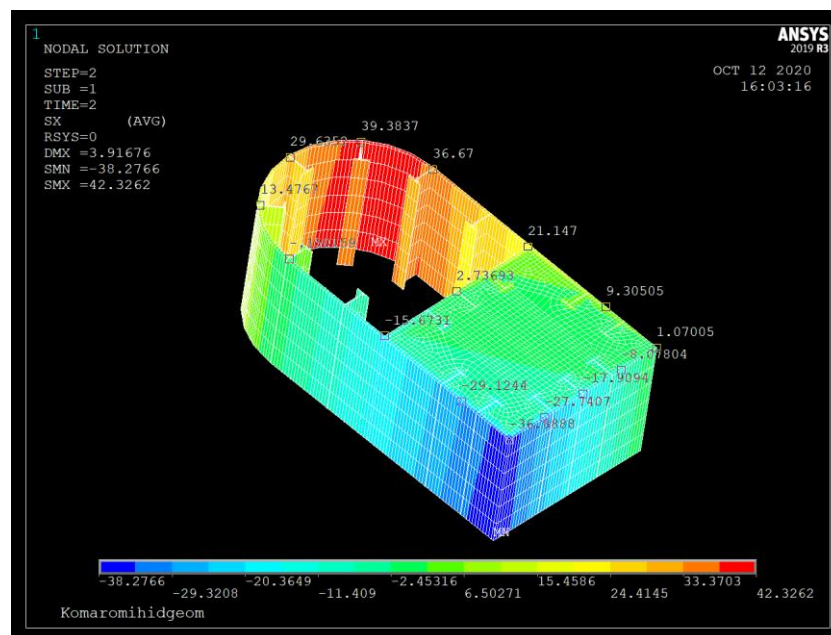
Ezzel az egyszerű vizsgálattal tehát jól szemléltethető a semleges tengely ferdesége és a modell működése.

10.2.2 A vizsgált keresztmetszet feszültségeloszlásai

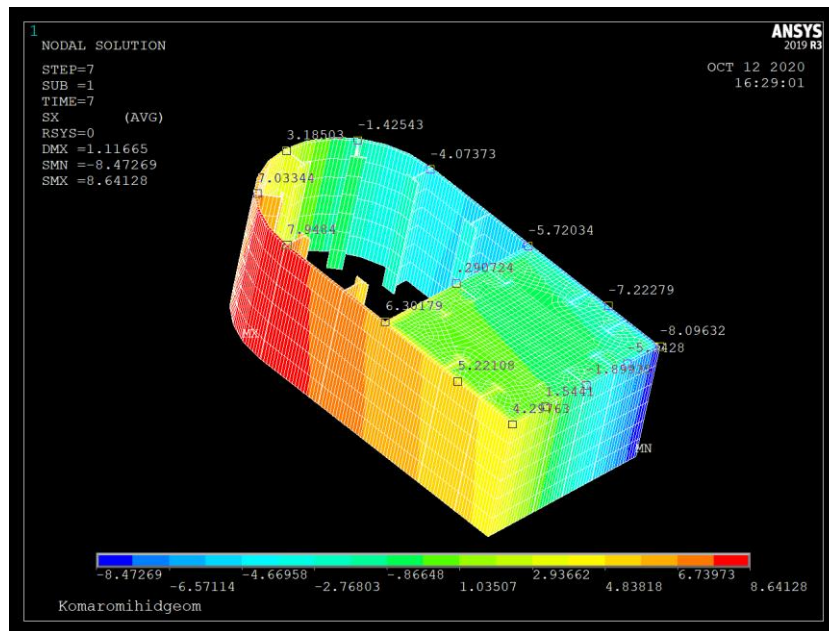
A próbaterhelés eredményei alapján láthattuk az egyes teherállásokhoz tartozó jellemző feszültségeloszlásokat. Ezeket az eredményeket a modell jó közelítéssel visszaadja. Jelen dolgozatban csak néhány kiválasztott teherállás feszültségeit vizsgálom részletesen.

A 3. teherállásban mértük a legnagyobb feszültséget, így ez tekinthető a mértékadó terhelési esetnek. Ebben az esetben ferde a semleges tengely, valamint azokban a terhelési esetekben is, amikor a legnagyobb feszítávolságú mezőben hat a teher. A 9. teherállásnál a semleges tengely szinte egybeesik a keresztmetszet erős tengelyével, ez akkor jellemző, amikor a támaszok felett van terhelés. Ezekon kívül a 14. teherállást is vizsgálom, amikor a legmeredekebb a semleges tengely.

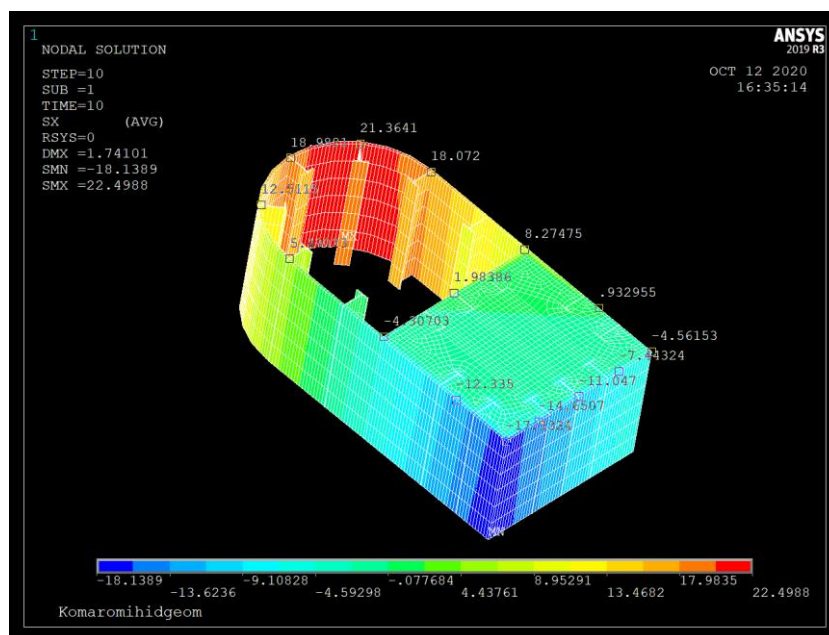
A modellből kiválasztottam a rúdelem azon keresztmetszetét, ahol a mérés is történt, majd ezen a rész-modellen helyeztem el jelölőket a bélyegek helyére, amik mutatják a normálirányú feszültség nagyságát. A vizsgált rész feszültségeloszlását szintartomány mutatja. A 10.12 – 10.13. ábrákon láthatók a kiválasztott teherállásokhoz tartozó eredményeket.



10.12. ábra: A 3. teherálláshoz tartozó feszültségeloszlás – rúdmodell



10.13. ábra: A 9. teherálláshoz tartozó feszültségeloszlás – rúdmodell



10.14. ábra: A 14. teherálláshoz tartozó feszültségeloszlás – rúdmodell

Ahhoz, hogy pontosan össze lehessen hasonlítani a mért és a modelltől kapott értékeket, táblázatos formában és grafikusan is bemutatom az eredményeket. A következő táblázatokban láthatjuk az egyes teherállásokhoz tartozó feszültségeket a mérési pontokban. A sorok a vizsgált teherállást mutatják, az oszlopok a mérési pontokban (D1-D15) mért és számított feszültségek, valamint a modelltől kivett értékek eltérése látható a mérési értékekhez képest. Mivel a mérési pontosság 1-2 MPa, a nagyon alacsony mért és számított feszültségek értékét bemutatom, de nem vizsgálom az eltérést.

6. táblázat: A vizsgált keresztmetszet feszültségei [MPa] – rúdmodell – 1

T.Á.	D1			D2			D3			D4			D5		
	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés
3.	0,41	1,07	-	22,74	21,15	7,0%	36,76	36,67	0,2%	30,08	29,64	1,5%	0,91	-0,15	-
9.	-7,74	-8,10	-4,7%	-5,79	-5,72	1,2%	-4,46	-4,07	8,7%	3,17	3,19	-0,6%	7,98	7,95	0,4%
14.	-4,34	-4,56	-5,1%	9,33	8,27	11,4%	18,73	18,07	3,5%	18,34	18,99	-3,5%	5,59	5,49	1,8%

7. táblázat: A vizsgált keresztmetszet feszültségei [MPa] – rúdmodell – 2

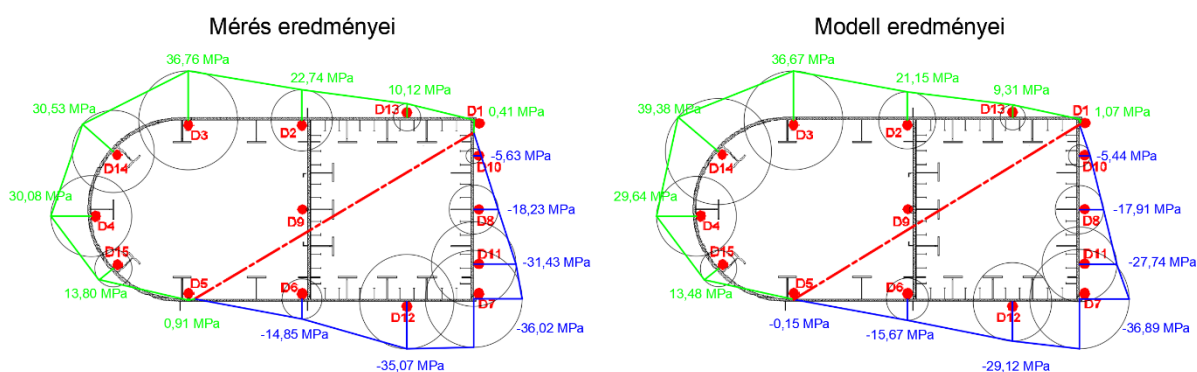
T.Á.	D6			D7			D8			D9			D10		
	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés
3.	-14,85	-15,67	-5,5%	-36,02	-36,89	-2,4%	-18,23	-17,91	1,8%	0,91	2,74	-	-5,63	-8,08	-43,5%
9.	7,17	6,31	12,0%	4,02	4,30	-7,0%	-1,50	-1,89	-	1,34	0,30	-	-5,63	-5,44	3,4%
14.	-4,54	-4,31	5,1%	-16,72	-17,23	-3,1%	-11,65	-11,05	5,2%	1,61	1,98	-	-7,12	-7,44	-4,5%

8. táblázat: A vizsgált keresztmetszet feszültségei [MPa] – rúdmodell – 3

T.Á.	D11			D12			D13			D14			D15		
	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés
3.	-31,43	-27,74	11,7%	-35,07	-29,12	17,0%	10,12	9,31	8,0%	30,53	39,38	-29,0%	13,80	13,48	2,3%
9.	2,26	1,54	-	6,10	5,22	14,4%	-8,13	-7,22	11,2%	-4,04	-1,43	64,6%	6,83	7,03	-2,9%
14.	-16,32	-14,65	10,2%	-16,49	-12,34	25,2%	1,44	0,93	-	17,02	21,36	-25,5%	11,44	12,51	-9,4%

A táblázatos összehasonlítás alapján az derül ki, hogy legfeljebb 5 MPa különbség van a mért és a modelltől kivett értékek között. A százalékos eltérés változó, de megfigyelhetjük, hogy nagyobb feszültségek esetén ez legfeljebb 5-10%. Megjegyzem, hogy további pontatlanságokhoz vezethet a nyúlásmérő bélyegek és a kiértékelési pontok pozíciói közötti eltérés. A D1-D7 és D14-15 bélyegek a keresztmetszet valamilyen sarokpontjaira lettek elhelyezve, aminek pozíciói egyértelműek a modellben is. A többi bélyeg, illetve mérési pont elhelyezését tekintve nagyobb a bizonytalanság.

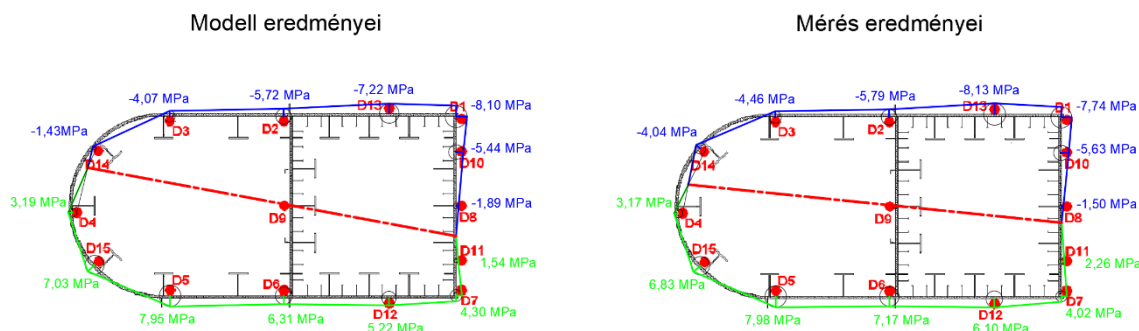
Ezeket figyelembe véve elmondható tehát, hogy a modell feszültségei jól követik a mérés eredményeit, általánosan 5-10% eltéréssel. A 10.15 – 10.17. ábrákon láthatjuk az említett teherállások grafikus összehasonlítását.



10.15. ábra: A 3. teherálláshoz tartozó mért és számított feszültségeloszlások – rúdmodell

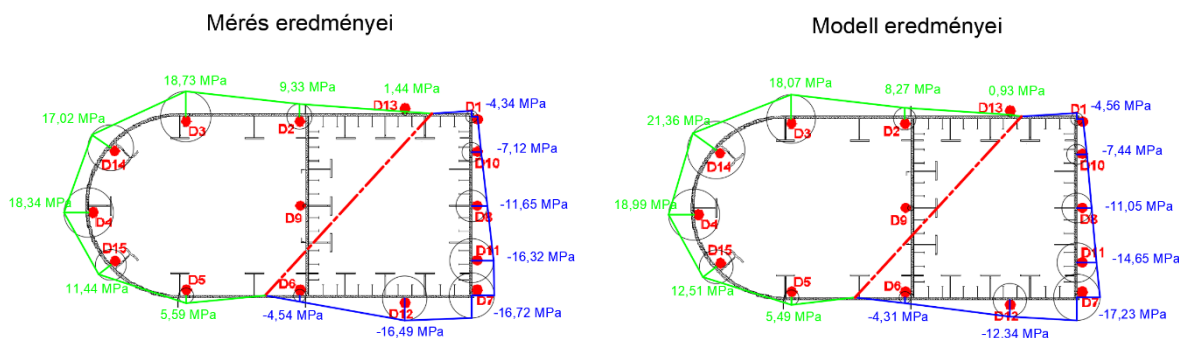
A 3. teherállás esetében az első, legfontosabb észrevétel, hogy a maximális feszültség -36,89 MPa a modellben, míg a valóságban -36,07 MPa, ami nagyon jó egyezésnek mondható. A D11 és D12 pontban tapasztalható néhány MPa eltérés, de a többi érték szintén jó egyezést

mutat. A feszültségek eloszlása is ugyanazt a tendenciát mutatja, bár néhány pontban látható kisebb kiugrás. A semleges tengely pozíciója szinte változatlan.



10.16. ábra: A 9. teherálláshoz tartozó mért és számított feszültségeloszlások – rúdmodell

A 9. teherállásban kisebb feszültségek ébredtek, a táblázattal összehangban nagyobbak az eltérések, de még mindig csak néhány MPa. A feszültségeloszlások itt is jól követik egymást, szintén kisebb kiugrások figyelhetők meg a mérés esetében. A semleges tengely a modellben meredekebben helyezkedik el, de nincs jelentős eltérés.



10.17. ábra: A 14. teherálláshoz tartozó mért és számított feszültségeloszlások – rúdmodell

A 14. teherállás eredményei itt is jól egyeznek. Néhány MPa eltérés és kisebb kiugrások láthatók. A semleges tengely helyzete nem változik a két esetben.

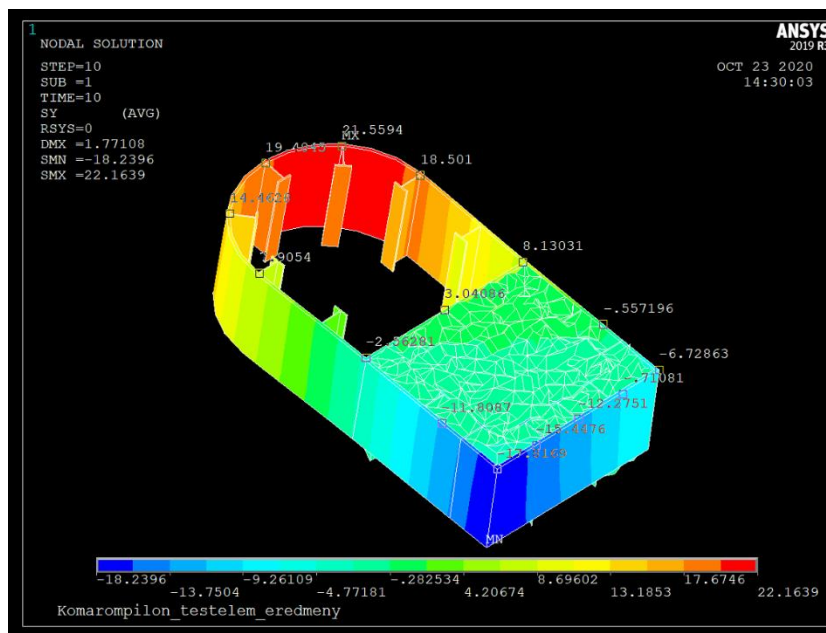
Összességében látható, hogy néhány kisebb eltérést és mérési pontatlanságból adódó kiugró értéket leszámítva nagyon pontosan közelíti a rúdmodell a tényleges viselkedést.

10.3 A globális testelemekből létrehozott modell feszültségei

10.3.1 Áttekintés

Ahogy korábban már említettem, a fejlesztés alatt álló, testelemekből létrehozott modell elsődleges célja az együttműködés és teherbírás részletes vizsgálata, amikre a jelen munkában már nem kerül sor. A TDK dolgozatban a modell első eredményeit ismertetem.

A testelemekből felépített pilon globális modelljében a terhelés ugyanúgy lett definiálva, mint korábban, a rúdmodell esetében, összehangban a próbaterheléssel. A kettő közötti különbség csak a pilon modellezése. A vizsgálat célja, hogy megfigyeljük mennyiben tér el az itt tapasztalt eredmény a korábbiaktól.



10.20. ábra: A 14. teherálláshoz tartozó feszültségeloszlás – testmodell

Az eredményeket a következő táblázatokban mutatom be. A nagyon kis feszültségeket (1-2 MPa) továbbra sem hasonlítom össze.

9. táblázat: A vizsgált keresztmetszet feszültségei [MPa] – testmodell – 1

T.Á.	D1			D2			D3			D4			D5		
	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés
3.	0,41	-3,06	-	22,74	19,96	12,2%	36,76	36,15	1,7%	30,08	30,1	-0,1%	0,91	4,63	-
9.	-7,74	-8,23	-6,3%	-5,79	-5,06	12,6%	-4,46	-2,94	34,1%	3,17	3,74	-18,0%	7,98	7,93	0,6%
14.	-4,34	-6,73	-55,1%	9,33	8,13	12,9%	18,73	18,5	1,2%	18,34	19,49	-6,3%	5,59	7,91	-41,5%

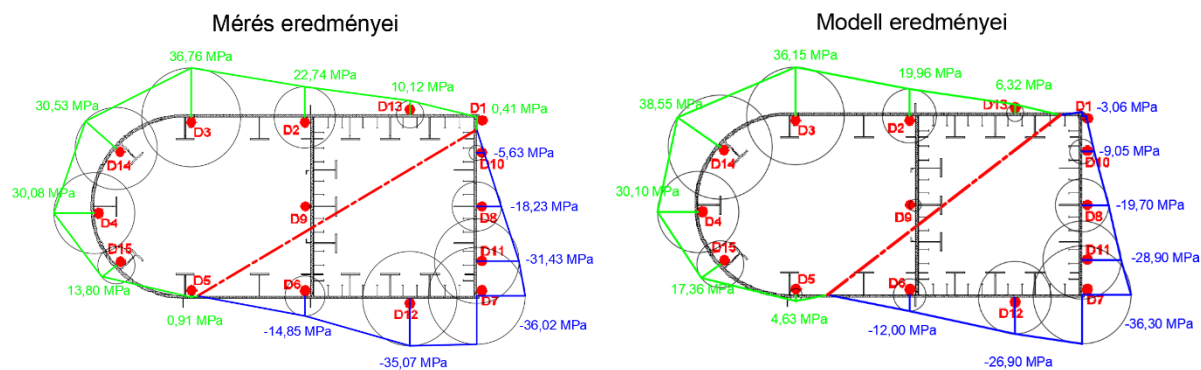
10. táblázat: A vizsgált keresztmetszet feszültségei [MPa] – testmodell – 2

T.Á.	D6			D7			D8			D9			D10		
	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés
3.	-14,85	-11,96	19,5%	-36,02	-36,31	-0,8%	-18,23	-19,67	-7,9%	0,91	4,41	-	-5,63	-9,05	-60,7%
9.	7,17	6,02	16,0%	4,02	3,39	15,7%	-1,50	-2,42	-	1,34	0,53	-	-5,63	-6,09	-8,2%
14.	-4,54	-2,56	43,6%	-16,72	-17,82	-6,6%	-11,65	-12,28	-5,4%	1,61	3,04	-	-7,12	-7,11	0,1%

11. táblázat: A vizsgált keresztmetszet feszültségei [MPa] – testmodell – 3

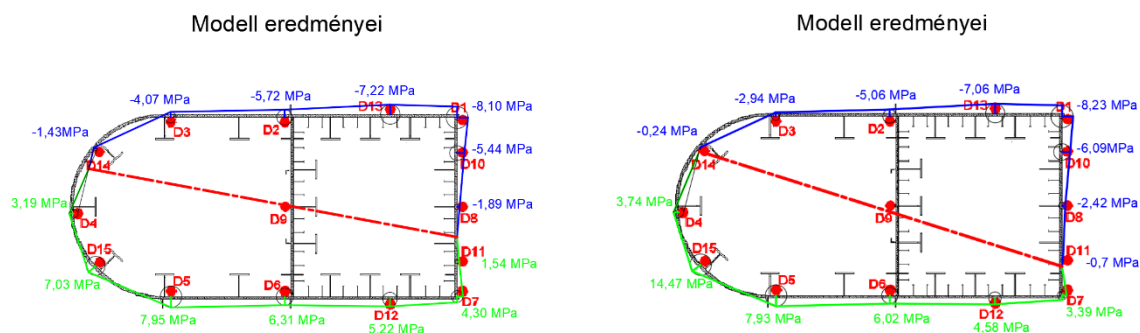
T.Á.	D11			D12			D13			D14			D15		
	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés	Mérés	Modell	Eltérés
3.	-31,43	-28,87	8,1%	-35,07	-26,91	23,3%	10,12	6,32	37,5%	30,53	38,55	-26,3%	13,80	17,36	-25,8%
9.	2,26	-0,7	-	6,10	4,58	24,9%	-8,13	-7,06	13,2%	-4,04	-0,24	-	6,83	7,94	-16,3%
14.	-16,32	-15,45	5,3%	-16,49	-11,81	28,4%	1,44	-0,56	-	17,02	21,56	-26,7%	11,44	14,47	-26,5%

Azt láthatjuk, hogy néhány pontban jól egyeznek a mért és a számított értékek, de többnyire 20-30% eltérés tapasztalható, néhol pedig még magasabb. Általában a modell nagyobb feszültséget ad, de nem következetesen. Ugyanezeket a feszültségeket a következő ábrákon láthatók grafikususan is.



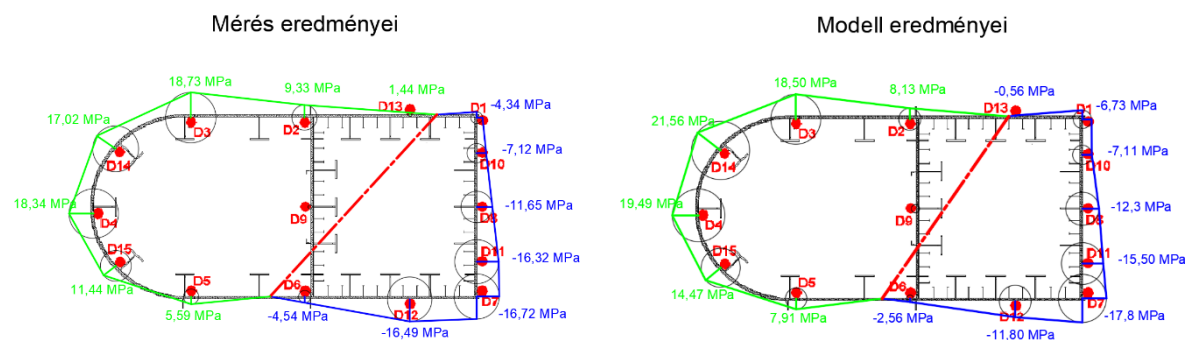
10.21. ábra: A 3. teherálláshoz tartozó mért és számított feszültségeloszlások – testmodell

Azt már megfigyeltük, hogy nagyobb az eltérés, mint a rúdmodell esetében, de a 10.21. ábrán azt is láthatjuk, hogy a semleges tengely az óramutató járásával ellenkező irányba elfordul. A legnagyobb nyomófeszültség a D7 pontban keletkezik mindkét esetben és az eredmények is jól közelítenek, a legnagyobb húzófeszültség nagyságában és pozíciójában is eltér.



10.22. ábra: A 9. teherálláshoz tartozó mért és számított feszültségeloszlások – testmodell

A kilencedik teherállásnál a legnagyobb feszültségek ugyanott találhatóak és nagyságuk is kisebb eltéréssel megegyezik. A semleges tengely itt is elfordul, itt az óramutató járásával megegyező irányba. Ebben az esetben nagyobb is az eltérés, mint a harmadik teherállásnál.



10.23. ábra: A 14. teherálláshoz tartozó mért és számított feszültségeloszlások – testmodell

A tizennegyedik teherállásnál is megfigyelhető a semleges tengely elfordulása, továbbá a legnagyobb feszültségek sem azonos pontban vannak.

Azt láthatjuk az eredmények alapján, hogy a feszültségeloszlások tendenciája és a feszültségek nagysága néhány MPa eltéréssel többnyire megegyezik a mérési értékekkel, de nem követi olyan pontosan a mért eredményeket, mint a rúdmodell.

10.4 Az eredmények összefoglalása

A próbaterhelés során mért feszültségek kiértékelésénél már szemléletből is láthattuk a szerkezet viselkedését. A feszültségeloszlások összhangban vannak a terheléssel. A globális rúdmodell eredményei kiértékelésénél táblázatosan láthattuk a mért és számított feszültségek eltéréseit, ahol összességében néhány MPa eltérés volt tapasztalható. A feszültségeloszlás és a semleges tengely pozíciója szintén jó egyezést mutatott a mérési eredményekkel. Kiértékelésre kerültek a testelemekből definiált modell feszültségei. Azt tapasztaltuk, hogy itt már nagyobb eltérések vannak a mérési eredményekhez képest. A legnagyobb feszültségek pozíciója és a semleges tengely is jobban eltér a valótól, és a rúdmodellhez képest. A korábban elemzett három teherállás összefoglaló feszültségei a következő táblázatokban láthatók.

12. táblázat: Feszültségek összehasonlítása [MPa] – 1

T.Á.	D1			D2			D3			D4			D5		
	Mérés	Rúd	Test	Mérés	Rúd	Test	Mérés	Rúd	Test	Mérés	Rúd	Test	Mérés	Rúd	Test
3.	0,41	1,07	-3,06	22,74	21,15	19,96	36,76	36,67	36,15	30,08	29,64	30,1	0,91	-0,15	4,63
9.	-7,74	-8,10	-8,23	-5,79	-5,72	-5,06	-4,46	-4,07	-2,94	3,17	3,19	3,74	7,98	7,95	7,93
14.	-4,34	-4,56	-6,73	9,33	8,27	8,13	18,73	18,07	18,5	18,34	18,99	19,49	5,59	5,49	7,91

13. táblázat: Feszültségek összehasonlítása [MPa] – 2

T.Á.	D6			D7			D8			D9			D10		
	Mérés	Rúd	Test	Mérés	Rúd	Test	Mérés	Rúd	Rúd	Test	Rúd	Test	Mérés	Rúd	Test
3.	-14,85	-15,67	-11,96	-36,02	-36,89	-36,31	-18,23	-17,91	-19,67	0,91	2,74	4,41	-5,63	-8,08	-9,05
9.	7,17	6,31	6,02	4,02	4,30	3,39	-1,50	-1,89	-2,42	1,34	0,30	0,53	-5,63	-5,44	-6,09
14.	-4,54	-4,31	-2,56	-16,72	-17,23	-17,82	-11,65	-11,05	-12,28	1,61	1,98	3,04	-7,12	-7,44	-7,11

14. táblázat: Feszültségek összehasonlítása [MPa] – 3

T.Á.	D11			D12			D13			D14			D15		
	Mérés	Rúd	Test	Mérés	Rúd	Test	Mérés	Rúd	Test	Mérés	Rúd	Test	Mérés	Rúd	Test
3.	-31,43	-27,74	-28,87	-35,07	-29,12	-26,91	10,12	9,31	6,32	30,53	39,38	38,55	13,80	13,48	17,36
9.	2,26	1,54	-0,7	6,10	5,22	4,58	-8,13	-7,22	-7,06	-4,04	-1,43	-0,24	6,83	7,03	7,94
14.	-16,32	-14,65	-15,45	-16,49	-12,34	-11,81	1,44	0,93	-0,56	17,02	21,36	21,56	11,44	12,51	14,47

Az összefoglaló táblázatok és a korábbiak alapján kijelenthető, hogy a globális rúdmodell jól követi a szerkezet valódi viselkedését, a globális testmodell esetében viszont még nagyobbak az eltérések. A testmodell fejlesztése folyamatban van, a modell viselkedését és eredményeit tovább vizsgálom, hogy az eltérés okára magyarázatot találjak.

11. Összefoglalás

A dolgozatomban az új Komáromi Duna híd pilonszerkezetét vizsgáltam, mint kibetonozott zártszelvényű öszvérszerkezetet. A szakirodalmi áttekintés során olyan szerkezetekre mutattam példátként, ahol egyértelmű az öszvér-jellegű viselkedés, de túlmutat a hagyományos méretezési elveken, vagyis speciális vizsgálatot igényelnek. Ilyenek a bemutatott öszvér merevítő magok és a kibetonozott csőszelvényű hidak. A speciális szerkezetű pilon általános bemutatása után rugalmas elmélettel vizsgáltam meg a pilonszerkezetet, mint öszvéroszlopot.

Elkészült a Komáromi Duna híd lokális és globális végeselemes modellje. Először a pályaszerkezethez közeli szakaszt vizsgáltam lokális szinten. Itt testelemekből készült el az acél zártszelvény és a beton rész is. Egy egyszerű keresztmetszetű szemléltető modellen szemléltettem, hogy a szoftver alkalmas öszvérszerkezetek modellezésére, majd létrehoztam a tényleges keresztmetszetet és ezt vizsgáltam tovább. A cél az volt, hogy egyszerű terhekre lássam a modell válaszát és összehasonlítsam a feszültségeket a rugalmas elmélet alapján számolt értékekkel. Ugyanerre a mintára további lokális modelleket hoztam létre, amiknek célja a tényleges igénybevételekből keletkező hatások vizsgálata lokális szinten (a lokális szintű vizsgálatokat nem részleteztem a dolgozatban).

Elkészült a pilon és az egész hídszerkezet globális modellje, úgy, hogy a pilon rúdelemekkel van modellezve és úgy is, hogy az acél és a beton részt is testelemekből definiáltam a teljes magasság mentén. A híd globális modellje a rendelkezésemre állt, ebből kiindulva hoztam létre a testelemekből álló modellt. Ezekkel a globális végeselemes modellek segítségével lehetőség nyílt nemcsak a pilon, hanem a teljes hídszerkezet globális vizsgálatára. A testmodellekből elkészült globális modell további célja az együttlételem elemzése. Ez a modellezési szint teszi lehetővé az acél és beton közötti részleges együttlételem vizsgálatát. A modell fejlesztése még folyamatban van, így a további vizsgálatok és a validálás egy további kutatási tervben szerepelnek.

A Komáromi Duna hídon 2020. május 16-án megtörtént a szerkezet statikus és dinamikus próbaterhelése, ami a kutatásom kísérleti hátterét képezte. A próbaterhelés során a pilon alsó keresztmetszetében nyúlásmérő bélyegekkel feszültségmérés történt, valamint mérték a piloncsúcsmozdulását. Ismertettem a próbaterhelés legfontosabb tudnivalóit, feldolgoztam, majd elemeztem a pilonra vonatkozó mérési eredményeket.

A teljes hídszerkezet lehajlása a próbaterhelés során néhány mm eltéréssel, szinte teljesen visszaadta a globális rúdmodell eredményeit. Ez jól mutatja, hogy a modell jól követi a valódi szerkezetet. A pilon alsó keresztmetszetében mért feszültségeket is kiértékeltem az összes terhelésben. Minden esetben a feszültségek nagyságát, eloszlását és a semleges tengely helyzetét vizsgáltam. A feszültségeloszlások a terhelésnek megfelelően alakultak, nem tapasztalható rendellenesség.

A globális modellből kiragadtam azt a keresztmetszetet, ahol a mérés is történt, majd az itt keletkező feszültségeket hasonlítottam össze a mérési eredményekkel. A magasabb feszültségi szintekhez tartozó eredmények legfeljebb 5-10%-kal térnek el a mért értékektől, kisebb feszültségi szinteken legfeljebb néhány MPa eltérés tapasztalható. A feszültségeloszlás és a semleges tengely pozíciója szintén jó egyezést mutat a mérési eredményekkel. Összességében elmondható tehát, hogy a rúdelemből épült globális modell jól követi a szerkezet viselkedését.

A testelemből definiált modell feszültségeit is kiértékeltem, a korábbihoz hasonlóan. Az itt kapott feszültségek már jobban eltérnek a mérési és a kiindulási modell eredményeitől. A legnagyobb feszültségek pozíciója is változott és a semleges tengely elferdült a mérés során meghatározott helyzetéhez képest.

A piloncúcs elmozdulását is vizsgáltam. Az üres teherállások esetében a mérés során egyre nagyobb elmozdulásokat mértek, aminek oka a hőmérséklet növekedése volt. Kijelenthető, hogy a szerkezet érzékeny a hőmérséklet-változásra. Emiatt a mért elmozdulások és a modelltől kivett értékek, főleg az utolsó teherállásokban egyre jobban eltértek egymástól. Ez mindhárom irányú eltolódásra érvényes, de keresztirányban a legjelentősebb. Néhány teherállás eredményeit korrigáltam, így már csak néhány mm eltérés volt tapasztalható a modell és a valódi szerkezet elmozdulása között. A globális rúdmodell elmozdulásai itt is jól követik a mérési eredményeket.

A további kutatásaimban a testmodell fejlesztését folytatom: a dolgozat eredményei alapján elemzem a modell viselkedését, és magyarázatot keresek a kapott eredményekre. Az ily módon validált, megfelelően pontos modellel olyan jelenségeket fogok vizsgálni, amelyek a rúdmodellel nem tehetők meg. Tervem a pilonban az acél és a beton együttdolgozásának vizsgálata, valamint a pontosított numerikus modellek alkalmazásával szilárdsági és stabilitási méretezési javaslatok kidolgozása.

Irodalomjegyzék

- [1] Kovács Nauzika, „Öszvérszerkezetek Előadás Jegyzet,” BME, Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest, 2017.
- [2] Piotr Lacki, Anna Derlatka, Przemysław Kasza, Comparison of steel-concrete composite column and steel column, Elsevier, 2018.
- [3] „ESDEP WG 10: Composite Construction,” [Online]. Available: <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/ESDEP/master/wg10/10900.htm>.
- [4] Rebecca Laberrenne, Ben Rosenberg és Erich Oswald, „Modern Steel Construction: Engineering an Experience,” American Institute of Steel Construction, 2016.
- [5] „Continuing Education Center,” június 2018. [Online]. Available: <https://continuingeducation.bnppmedia.com/courses/the-steel-institute-of-new-york/introducing-the-steel-plate-composite-core/1/>.
- [6] „Wikipedia,” február 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Rainier_Square_Tower.
- [7] [Online]. Available: <https://www.aisc.org/globalassets/modern-steel/news/2019/january/rainier-square---msc-newspage.png>.
- [8] [Online]. Available: <https://www.enr.com/ext/resources/News/2017/09-September/1002wall.jpg?1506537083>.
- [9] Dr. Dunai László, „SteelBeam pályázat, Szakértői jelentés, 3. feladatrész: Öszvér szerkezeti rendszerű gerendatartók fejlesztése,” Budapest, 2015..
- [10] Eun-Suk Choi, Won-Jong Chin, Jung-Woo Lee, Jae-Yoon Kang, „Flexural Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Members and Its Application,” Steel Structures, 2007.
- [11] Airong Chen, Suhaib Yahya Kasim Al-Darzi, „Conceptual Design and Analysis of Steel-Concrete Composite Bridges: State of the Art,” Steel Structures, 2006.
- [12] Yoshiyuki Momiyama, Tetsuya Hosaka, Koji Homma, Shun-ichi Nakamura, „New technologies of steel/concrete composite bridges,” Constructional Steel Research, 2002.
- [13] Rózsás Árpád, „Plastic Design of Steel-Concrete Composite Grider Bridges,” Budapest, 2011..
- [14] Pont-Terv, A Komárom és Komárno közötti új közúti Duna híd kiviteli tervei, műszaki leírás, 2015.
- [15] „Új Komáromi-híd Látogatóközpont hivatalos Facebook oldala,” 2018. [Online]. Available: <https://www.facebook.com/865678463621469/photos/p.866069220249060/866069220249060/?type=1&theater>.

- [16] Dr Dunai László és Kövesdi Balázs, Komárom - Komárno határon átívelő Duna-híd próbaterhelése - Szakértői jelentés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, 2020.
- [17] „Magyar Építők,” [Online]. Available: <https://magyarepitok.hu/utepites/2020/05/a-statikus-es-a-dinamikus-probaterheles-is-sikerrel-lezajlott-a-komaromi-hidnal>. [Hozzáférés dátuma: 4 szeptember 2020].

Ábrajegyzék

2.1. ábra: Öszvéroszlopok jellemző kialakításai [2].....	7
2.2. ábra: Az öszvér merevítő magok, merevítés és födémszerkezet [4]	8
2.3. ábra: A tartószerkezet [7] és az öszvér merevítő mag fal elemei [8]	9
2.4. ábra: Kibetonozott acélcső gerendák kialakítása [10] és keresztmetszete [11].....	9
2.5. ábra: Kibetonozott acélcső nyírt kapcsolóelemmel [10]	10
2.6. ábra: Teljesen és részlegesen kibetonozott szekrénytartók [13]	10
3.1. ábra: Az új Komáromi Duna híd látványterve [15].....	11
3.2. ábra: A hídpálya egy általános keresztmetszete [14]	12
3.3. ábra: A pilon geometriája [14]	12
4.1. ábra: A kiválasztott pilon keresztmetszet [14]	13
4.2. ábra: A vizsgált keresztmetszet méretei, részletei [14]	13
4.3. ábra: A modellezett keresztmetszet.....	14
4.4. ábra: A pilon belső része	14
4.5. ábra: Öszvér gerenda rugalmas viselkedése [1]	15
4.6. ábra: Az ideális keresztmetszet	17
5.1. ábra: A tényleges geometria, végelemekháló, anyagok.....	18
5.2. ábra: Próbaanalízis - normálfeszültség.....	18
5.3. ábra: Tiszta nyomás és hajlítás - normálfeszültség	19
5.4. ábra: Kinematikai teher - teljes deformáció	19
5.5. ábra: Lokális modellek struktúrája	20
6.1. ábra: A globális rúdmodell – axonometria	21
6.2. ábra: A globális rúdmodell – előlnézet és oldalnézet.....	22
6.3. ábra: A támaszok kialakítása.....	22
6.4. ábra: A globális testmodell - axonometria	23
6.5. ábra: A teljes pilon és egy keresztmetszete	23
6.6. ábra: A vizsgált modellek rúdelemből és testeleméből.....	24
6.7. ábra: Normálfeszültségek – rúdelem.....	24
6.8. ábra: Normálfeszültségek – testelem.....	25
7.1. ábra: A próbaterhelés [17].....	26
7.2. ábra: A teherautók statikus teherállásban	27
7.3. ábra: Példa a teherautók elhelyezésére	28
7.4. ábra: A teherautók keresztirányú elhelyezkedése	28
7.5. ábra: A harmadik teherállás.....	28
7.6. ábra: Szintezési pontok elhelyezkedése	29
7.7. ábra: A piloncsúcs mérési pontja	29
7.8. ábra: A globális nyúlásmérés keresztmetszetei	30

7.9. ábra: A pilon „D” keresztmetszetének nyúlásmérő bélyegei	30
8.1. ábra: A 3. teherállás lehajlásai (mért és rúdmodell) [16]	31
8.2. ábra: A 3. teherállás lehajlásai – rúdmodell	32
9.1. ábra: A piloncsúcs hosszirányú és keresztirányú elmozdulásai	34
9.2. ábra: Üres teherállások elmozdulásai az idő függvényében.....	34
9.3. ábra: A piloncsúcs 3. teherálláshoz tartozó keresztirányú (UX) elmozdulása	35
10.1. ábra: A pilonban elhelyezett nyúlásmérő bélyegek.....	37
10.2. ábra: A 2. és 3. teherálláshoz tartozó feszültségek.....	39
10.3. ábra: Az 5. és 6. teherálláshoz tartozó feszültségek.....	40
10.4. ábra: A 9. és 10. teherálláshoz tartozó feszültségek.....	40
10.5. ábra: A 11. és 13. teherálláshoz tartozó feszültségek.....	41
10.6. ábra: A 14. és 15. teherálláshoz tartozó feszültségek.....	41
10.7. ábra: A globális modell és a 2. teherállás	42
10.8. ábra: Három irányú terhelés a pilon csúcán.....	43
10.9. ábra: Feszültségeloszlás „Fx”-ből	43
10.10. ábra: Feszültségeloszlás „Fy”-ből	44
10.11. ábra: Feszültségeloszlás „Fz”-ből	44
10.12. ábra: A 3. teherálláshoz tartozó feszültségeloszlás – rúdmodell.....	45
10.13. ábra: A 9. teherálláshoz tartozó feszültségeloszlás – rúdmodell.....	46
10.14. ábra: A 14. teherálláshoz tartozó feszültségeloszlás – rúdmodell.....	46
10.15. ábra: A 3. teherálláshoz tartozó mért és számított feszültségeloszlások – rúdmodell ..	47
10.16. ábra: A 9. teherálláshoz tartozó mért és számított feszültségeloszlások – rúdmodell ..	48
10.17. ábra: A 14. teherálláshoz tartozó mért és számított feszültségeloszlások – rúdmodell	48
10.18. ábra: A 3. teherálláshoz tartozó feszültségeloszlás – testmodell	49
10.19. ábra: A 9. teherálláshoz tartozó feszültségeloszlás – testmodell	49
10.20. ábra: A 14. teherálláshoz tartozó feszültségeloszlás – testmodell.....	50
10.21. ábra: A 3. teherálláshoz tartozó mért és számított feszültségeloszlások – testmodell .	51
10.22. ábra: A 9. teherálláshoz tartozó mért és számított feszültségeloszlások – testmodell .	51
10.23. ábra: A 14. teherálláshoz tartozó mért és számított feszültségeloszlások – testmodell	51

Táblázatok jegyzéke

1. táblázat: A piloncsúcs elmozdulási [16].....	33
2. táblázat: A piloncsúcs elmozdulásainak összehasonlítása	36
3. táblázat: A korrigált keresztirányú elmozdulások összehasonlítása.....	37
4. táblázat: A „D” keresztmetszet feszültségei [MPa] – 1 [16].....	38
5. táblázat: A „D” keresztmetszet feszültségei [MPa] – 2 [16].....	39
6. táblázat: A vizsgált keresztmetszet feszültségei [MPa] – rúdmodell – 1	47
7. táblázat: A vizsgált keresztmetszet feszültségei [MPa] – rúdmodell – 2	47
8. táblázat: A vizsgált keresztmetszet feszültségei [MPa] – rúdmodell – 3	47
9. táblázat: A vizsgált keresztmetszet feszültségei [MPa] – testmodell – 1	50
10. táblázat: A vizsgált keresztmetszet feszültségei [MPa] – testmodell – 2.....	50
11. táblázat: A vizsgált keresztmetszet feszültségei [MPa] – testmodell – 3.....	50
12. táblázat: Feszültségek összehasonlítása [MPa] – 1	52
13. táblázat: Feszültségek összehasonlítása [MPa] – 2	52
14. táblázat: Feszültségek összehasonlítása [MPa] – 3	52