

Vasbeton szerkezetek korszerű numerikus modellezése

Modern numerical modeling of reinforced concrete structures

ROSZEVÁK Zsolt¹, Dr. HARIS István²

¹BME Építőmérnöki Kar, Hidak és Szerkezetek Tanszék, PhD hallgató, roszevak.zsolt@emk.bme.hu

²BME Építőmérnöki Kar, Hidak és Szerkezetek Tanszék, adjunktus, haris.istvan@emk.bme.hu

^{1,2}1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3-9., Tel.: +36 1 463 1771

Abstract

Nowadays, many computer softwares are available for the numerical modeling of reinforced concrete structures, however, the accuracy of the numerical models created with the programs can only be accepted with a properly developed and verified modeling procedure. Within the framework of the present article, we present the numerical modeling possibilities of reinforced concrete structural elements and their connections through numerical models made with a modeling procedure we have built. In our studies, we also dealt with quasi-static unidirectional (horizontal and vertical) and cyclically variable direction and magnitude loads. The numerical models were created with ATENA 3D three-dimensional nonlinear finite element software developed specifically for the study of concrete and reinforced concrete structures. In many cases, the results obtained with numerical experiments were compared with the results obtained by laboratory experiments, and some of our numerical experiments were compared with the results obtained with two-dimensional finite element software. Within the framework of this article, we would like to give a comprehensive picture of the numerical studies we have performed and the results obtained with them.

Keywords: ATENA 3D software, nonlinear finite element analysis, cast-in-situ reinforced concrete structures, prefabricated reinforced concrete structures

Kivonat

A vasbeton szerkezetek numerikus modellezésére napjainkban számos számítógépes szoftver áll rendelkezésünkre, azonban a programokkal megalkotott numerikus modellek pontossága csak megfelelően kidolgozott és verifikált modellezési eljárással lehet elfogadható. Jelen cikk keretein belül egy általunk felépített modellezési eljárással készített numerikus modelleken keresztül mutatjuk be a vasbeton szerkezeti elemek és azok csomópontjainak numerikus modellezési lehetőségeit. A vizsgálataink során foglalkoztunk a kvázi-statisztikus egyirányú (függőleges és vízszintes), illetve a ciklikusan változó irányú és nagyságú terheléssel is. A numerikus modelleket kifejezetten a beton, illetve vasbeton szerkezetek vizsgálatához fejlesztett ATENA 3D háromdimenziós nem-lineáris végelelemes szoftverrel készítettük el. A numerikus kísérletekkel kapott eredményeket számos esetben laboratóriumi kísérleti eredményekkel hasonlítottuk össze, valamint egyes numerikus vizsgálatainkat kétdimenziós végelelemes szoftverrel kapott eredményekkel vetettük össze. Jelen cikk keretein belül átfogó képet szeretnénk adni az általunk elvégzett numerikus vizsgálatokról és az azokkal kapott eredményekről.

Kulcsszavak: ATENA 3D szoftver, nem-lineáris végelelem számítás, monolit vasbeton szerkezetek, előregyártott vasbeton szerkezetek,

1. BEVEZETÉS

A kutató mérnökök napjainkban számos témában készítenek numerikus vizsgálatokat, melyekkel az egyes szerkezeti elemek viselkedését számítógépes úton is képesek modellezni. Erre egyúttal a praktizáló mérnökök részéről is egyre nagyobb igény mutatkozik. A numerikus modellek és azok eredményeinek verifikálásához azonban elengedhetetlen olyan laboratóriumi kísérletek elvégzése, melyekkel a számítógépes vizsgálataink helyességét és pontosságát alá tudjuk támasztani. Gyakorlati szempontból fontos, hogy a megalkotott numerikus modell a lehető legjobban kövesse a szerkezet valós viselkedését, ezért a modelljeink egyre részletesebbek és ezáltal bonyolultabbak is lesznek. A vasbeton szerkezetek modellezése szempontjából korántsem elhanyagolható a megválasztott végelelemes szoftverben alkalmazható anyagok és anyagmodellek

tulajdonságai, így mindenképpen olyan szoftvert kell használnunk/alkalmaznunk, mellyel az általunk elemzett problémát megfelelően tudjuk vizsgálni.

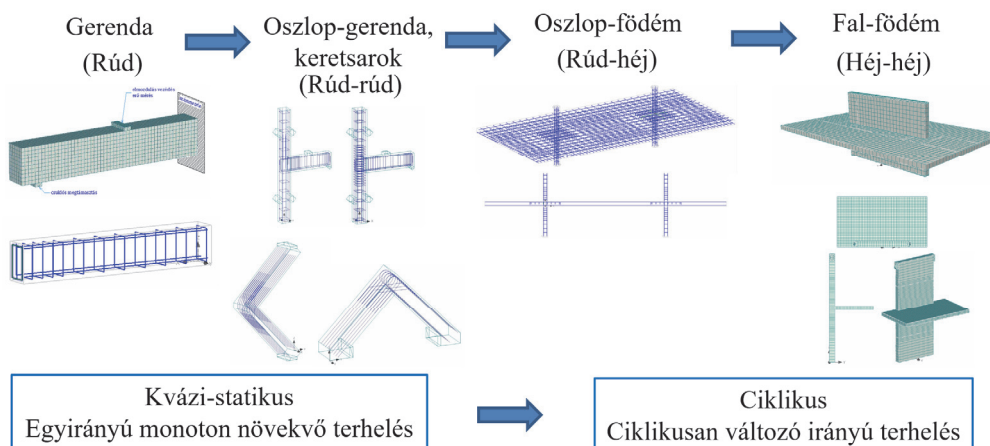
A kutatásaink során számos vasbeton szerkezeti elem numerikus vizsgálatával foglalkoztunk és foglalkozunk jelenleg is. Célunk, hogy a numerikus modellek fejlesztésével olyan széleskörűen kidolgozott és megfelelően megalapozott numerikus modellezési technikát állítsunk elő, mellyel egy kiemelkedő a célszoftverben a vasbeton szerkezeti elemeket, illetve azok csomóponti kialakítását a valóságnak legmegfelelőbb módon tudjuk vizsgálni. A numerikus modellfejlesztés során jelentős számban végzünk paramétervizsgálatot, mely alapvetően az egyes szerkezeti részletek, csomópontok és teljes szerkezeti elemekre kiterjedően végzünk. A végelemes szoftver által nyújtott lehetőségeket a legmagasabb szinten kihasználva, a szoftver(ek)ben egyedileg paraméterezhető anyagmodelleken keresztül a számítási idő és a végelemes felosztás optimalizációján át többszáz numerikus futtatást végeztünk. Jelen cikk keretein belül bemutatjuk a jelenlegi kutatási területen elért, illetve a korábbi kutatásaink során kapott eredmények közül a legfontosabbakat. Az eredmények számottevő része a numerikus modellezési eljárásra vonatkoznak, de a numerikus modellezi metódussal kapott eredmények is jelentős kutatási eredménynek számítanak a témában. A vizsgálataink előtt átfogó, széleskörű szakirodalmi áttekintést végeztünk, melyek alapján egyértelműen megállapítható, hogy a vasbeton szerkezetek numerikus modellezése alapvetően a magasszintű végeelemes számítások elvégzésének irányába halad, azonban a fellelhető forrásokban többnyire laboratóriumi kísérletek vannak publikálva, melyeket csak néhány esetben alkalmaztak numerikus modellek verifikálására, fejlesztésére. A numerikus modellek szinte kizárólag 2D-s lineáris [1], [2] és még ritkábban nemlineáris vizsgálatok [4], [6] csak elvétve találhatóak háromdimenziós nemlineáris végeelemes számítások [7], [8]. Mindezeket figyelembe véve a témában egyre nagyobb igény fogalmazódik meg a háromdimenziós nemlineáris végeelemes modellek fejlesztése és alkalmazása iránt. A vasbeton szerkezetek, így a jelen cikkben tárgyalt szerkezeti elemek, csomópontok magas szintű numerikus vizsgálatok korántsem tekinthetők teljesen kiaknázott kutatási területnek. A monolit- és előregyártott vasbeton szerkezetek viselkedésének megismerése és az eltérő csomóponti kialakítások, valamint az azokban alkalmazott különféle vasvezetések numerikus vizsgálatok segítenek az adott kapcsolat/szerkezeti elem működésének megértésében és leírásában. Így a valós laborkísérletek alapján igazolt 3D-s nemlineáris végeelemes szoftve-ekkel számos, még laboratóriumi körülmények között nem vizsgált vagy mérete miatt kísérletileg nehezen kezelhető szerkezeti kialakítás válik vizsgálhatóvá.

Az általunk vizsgált témaköröket az alábbiakban adjuk meg részletesen. A felsorolás alapvetően a numerikus modellek és a modellezési technika fejlődési irányát mutatja. Első lépésként gerenda elemekkel (rúd), majd oszlop-gerenda (rúd-rúd) kapcsolatokkal foglalkoztunk. A kapott eredményeket és tapasztalatokat felhasználva tovább léptünk az oszlop-födém kapcsolatok (rúd-héj) vizsgálatára, majd az azon modellezéssel megszerzett tudást építettük át a fal-födém (héj-héj) típusú kapcsolatok vizsgálatára. Az egyes vizsgálatokat továbbá eltérő irányú és módú terhek működtetésével végeztük. Kezdetben kvázi-statikusan egyirányban monoton növekvő terheket működtettünk a modelleken, majd az azzal kapott eredményeket felhasználva ciklikusan változó irányú és nagyságú terhek modellezését végeztük el és végezzük jelenleg is. A modellfejlesztés folyamatát lásd 1. ábrán.

- vasbeton gerendák laboratóriumi- és numerikus vizsgálata [9],
- monolit vasbeton keretsarok numerikus vizsgálata [11], [13], [14],
- vasbeton síklemez egyenértékű kerettel történő helyettesítése vízszintes teherre numerikus vizsgálatok alapján – kvázi statikus terhelés [12],
- monolit vasbeton fal-födém típusú kapcsolatok numerikus vizsgálata – kvázi statikus terhelés [9].

Jelenlegi folyó kutatásaink az alábbiak:

- vasbeton síklemez egyenértékű kerettel történő helyettesítése vízszintes teherre numerikus vizsgálatok alapján – ciklikus terhelés,
- monolit vasbeton fal-födém típusú kapcsolatok numerikus vizsgálata – ciklikus terhelés,
- különböző csomóponti numerikus modellek hatása egyszerű előregyártott vasbeton keretváz igénybevételeire – pillér-kehelynyak és oszlop-gerenda kapcsolat,
- előfeszített vasbeton gerenda numerikus és laboratóriumi vizsgálata,
- előfeszített körüreges födempalló numerikus és kísérleti vizsgálata,

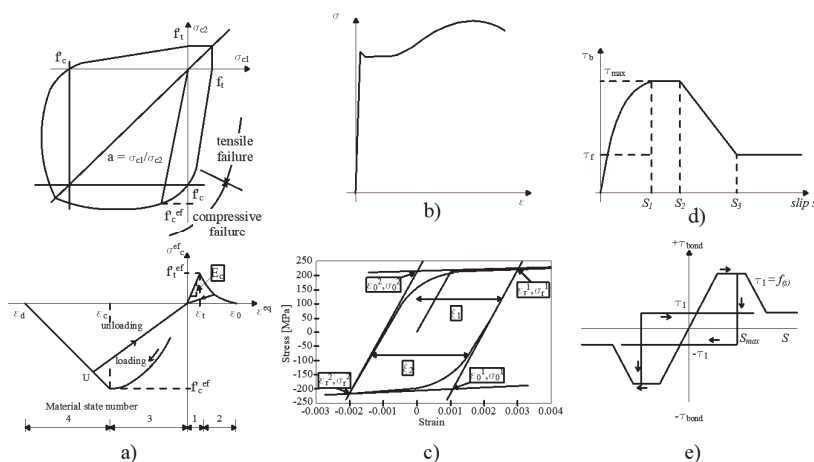


1. ábra: A numerikus modellfejlesztés folyamata

2. NUMERIKUS MODELLEZÉSI ELJÁRÁS FEJLESZTÉSE

A végeelemes modelleket az *ATENA 3D* nemlineáris végeelemes szoftverrel építettük fel. A numerikus modelleket alapvetően az általunk tervezett, illetve a szakirodalomban fellelhető laboratóriumi kísérletekben magadott próbatesteknek megfelelően építettük fel.

A vizsgálataink során a betonra vonatkozóan a 2.(a) ábrán bemutatott anyagmodellt alkalmaztuk. Az alkalmazott elkent repedésmodell (smeared crack) a fix repedésmodellt használja fel [15], továbbá kombinálja a húzásra (Rankine törési feltétel) és nyomásra (Menetery-William) megalkotott modelleket. A beton nyomás hatására bekövetkező képlékenyedését a Menetery-William törési felülettel írja le az általunk alkalmazott anyagmodell, mely három független feszültség invariánsal fejezhető ki (hidrosztatikus feszültség, deviátoros feszültség és deviátoros poláris szög).



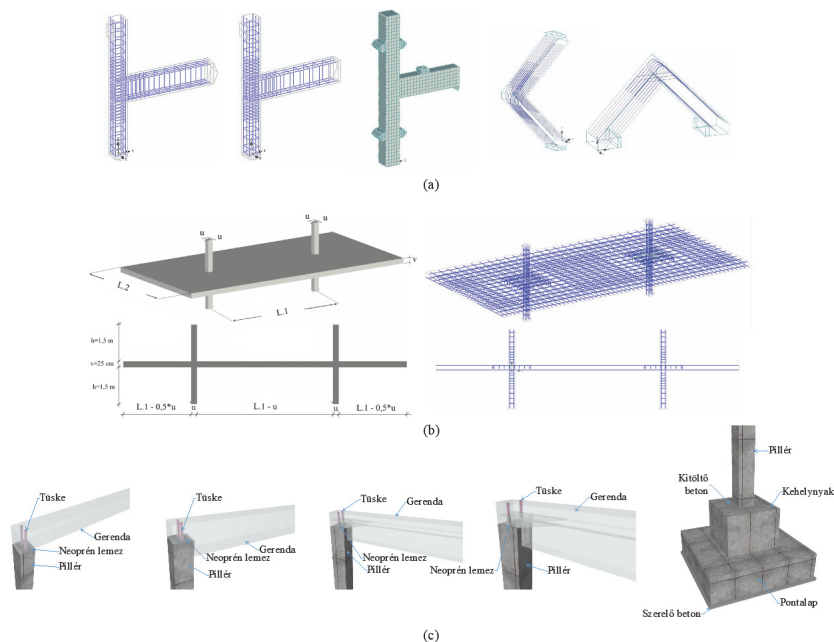
2. ábra: Alkalmazott anyagmodellek

(a) beton anyagmodell, (b) valós feszültség-alakváltozás karakterisztika, (c) ciklikus betonacél anyagmodell, (d) beton-betonacél kapcsolati modell- CEB-FIB, (e) beton-betonacél kapcsolati modell- memory bond

A beton anyagmodellt a „tehermentesítési tényező” (Unloading Factor) parametrizálásával tettük a ciklikusan változó terhelés vizsgálatára alkalmassá. Ez az érték befolyásolja leginkább a hiszterézis görbe alakját. A hosszirányú betonacélokat tényleges geometriájukkal és vonalvezetésükkel egy dimenziós végeelemekkel definiáltuk. A kvázi-statiszikus kísérletekben a betonacélra vonatkozó anyagmodell a laboratóriumi kísérletekben is alkalmazott betonacélok tulajdonságainak megfelelően, a valós feszültség-alakváltozás karakterisztikával (2.(b) ábra) lettek megadva. A ciklikus vizsgálatok során a betonacélt a ciklikus tulajdonságokkal rendelkező Menegotto-Pinto modellen [15] alapuló ciklikus anyagmodellel (2.(c) ábra) modelleztük. A numerikus modellekben a beton és a betonacél közötti kapcsolatot (2.(d). ábra) a CEB-FIB 1990 Model Code-ban megadottak alapján számítottuk és definiáltuk a kvázi-statiszikus vizsgálatok során a [16]. A ciklikus vizsgálatok során is lehetőség nyílik a beton és a betonacél közötti kapcsolat magasabb szintű figyelembevételére melyet az úgynevezett „memory bond” modellel parametrizálhatunk (2.(e) ábra). A jelenleg is folytatott előregyártott vasbeton oszlop-gerenda, illetve oszlop-kehelynyak kapcsolatoknál egy-egy újfajta kapcsolati anyagmodell

parametrizálását is elvégeztük. Az előregyártott szerkezeti elemeknél új a korábbiakban még nem alkalmazott, (kiegészítő) kapcsolatot leíró anyagmodellt is fejlesztettünk. A pillér-gerenda kapcsolatoknál elhelyezendő neoprén lemez és a beton közötti kapcsolatot úgynevezett kontakt kapcsolati anyaggal modelleztük. A súrlódásos kapcsolatnak megfelelő paraméterezett anyagmodellt fejlesztettünk ki a kapcsolat tényleges viselkedésének figyelembevételével. A neoprén lemezre multilineáris anyagmodellt definiáltunk annak valós feszültség-alakváltozás karakterisztikájának figyelembevételével [17]. A beton-beton kapcsolatokat úgynevezett „3D Interface” kapcsolati modellel definiáltuk, melyek húzó erőt nem képesek közvetíteni.

Az iterációs folyamat végrehajtásához valamennyi nemlineáris analízisnél implicit megoldási módszert, a Newton-Raphson iterációs eljárást alkalmaztuk. A szerkezet állapotegyenletének megoldására a Cholesky-felbontást használtuk. A numerikus modellekben egységesen kvadratikus bázisfüggvényeket használtunk, valamint a beton elemekre 20 csomópontos téglatest, illetve 10 csomópontos tetraéder végelemeket használtunk [9]. A végelem hálót úgy osztottuk ki egységesen, hogy az adott keresztmetszeti méreten belül minimum 4 db végelem legyen [9]. A végelem hálóméretének megválasztása számos esetben függ a vizsgált szerkezeti elem és a csomóponti modellt alkotó testelemek méretétől, így számos esetben a kapcsolat környezetében a végelemes felosztás sűrítését alkalmaztuk. A végelemes felosztás sűrítése ezekben az esetekben szükségszerű, mely a futtatási idő exponenciális növekedését okozza, azonban ezekben az esetekben a kutatás jelenlegi fázisában nem ismerünk jobb megoldást. A felépített numerikus modelleket az alábbi 3. ábrán szemlélhetjük.



3. ábra: Numerikus modellek geometriai kialakítása, vasalása és végelemes felosztás
(a) oszlop-gerenda csomópontok, (b) oszlop-födém csomópontok, (c) előregyártott vasbeton csomópontok

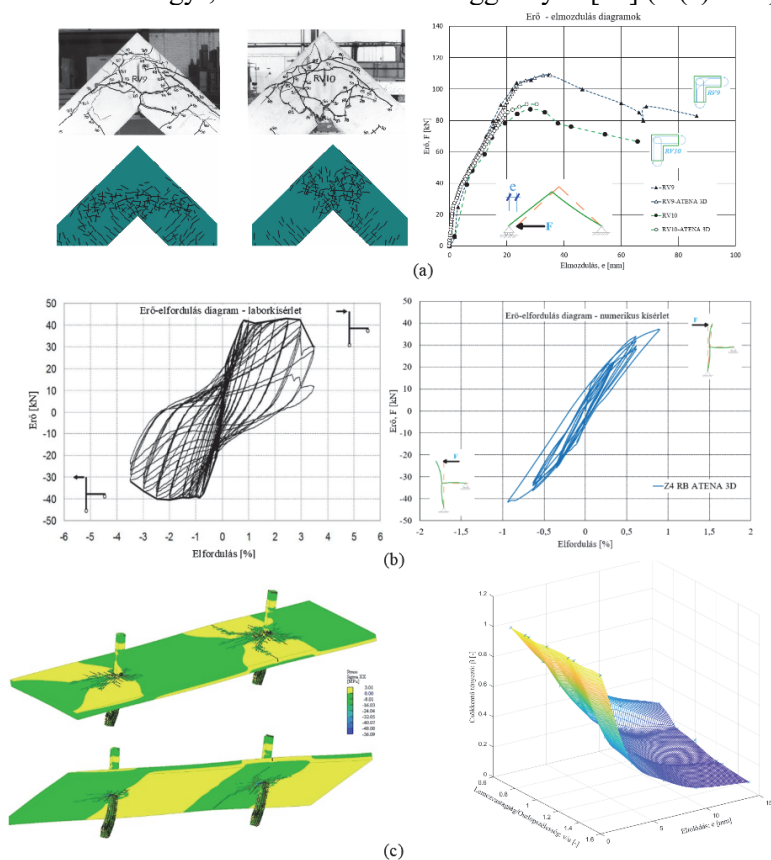
3. ELÉRT ÖSSZEFOGLALÓ EREDMÉNYEK

A bemutatott modellezési eljárással számos területen kiemelkedő eredményeket értünk el. Jelen kéziratban a tényleges eredmények részletes bemutatása nélkül ismertetjük a modellezési eljárással készített végelemes számítások eredményeit.

Az előregyártott vasbeton gerendák numerikus modelljeit verifikáltuk és megállapítottuk, hogy a vasbeton gerendák eltérő vasalási kialakítással készített modelljeinek tönkremeneteli módjai, viselkedése rendkívül jól vizsgálható [9]. A monolit vasbeton oszlop-gerenda csomópontok vizsgálatainál megmutattuk, hogy a modellezési technikával lehetőség nyílik a szerkezeti csomópontok, illetve részletek összetett viselkedését alapvetően befolyásoló tényleges vasvezetés hatásának vizsgálatára. Numerikusan vizsgálható az alkalmazott vasalási kialakítás és vasmenyiség „hatékonysága”, ezzel adott esetben optimalizálható is a kapcsolat (teherbírásra, alakváltozóképessegre, vasmenyiségre, akár költségekre is). Megmutattuk továbbá, hogy lehetséges a nagyon költséges laboratóriumi kísérletsorozatokat helyett numerikus vizsgálatokkal az azonos vashányaddal, de eltérő vasvezetéssel kialakított monolit vasbeton keretcsomópontok összetett (hajlított-nyírt) viselkedésének elemzése egyirányú monoton növekvő kvázi-statisztikus terhelése esetén [11] (4.(a) ábra).

Az általunk továbbfejlesztett modellezési eljárással a monolit vasbeton oszlop-gerenda kapcsolatok valószínűs viselkedése (meghatározott eltolódás korlátán belül) vízszintes ciklikusan változó irányú terhelés esetén rendkívül jól közelíthető végesselemes számítással a megadott vizsgálati tartományon belül (4.(b) ábra). Az eltérő húzott vasalással és kengyelezéssel kialakított kapcsolatok az általunk meghatározott modellezési technikával nemlineáris, háromdimenziós végesselemes programmal a megadott alakváltozási tartományon belül ($H/300$) a viselkedés leírásához kellő pontossággal modellezhetők [13], [14].

A modellezési eljárás alkalmas továbbá a pontonként alátámasztott síklemez födémekek függőleges és vízszintes terhekre történő analizisére. A verifikált numerikus modell segítségével egy a laborkísérletekkel megegyező geometriai elrendezésben megmutattuk, hogy előállítható az oszlopokkal alátámasztott síklemez födémekek viselkedését leíró nemlineáris virtuális kísérletek eredményeit közelítő lineáris számítási keretmodell az ún. helyettesítő egyenértékű lemezszélesség segítségével [12]. Megmutattuk, hogy a modellezési módszer alkalmas a valós, jelentős képlékeny alakváltozásokkal járó szerkezeti viselkedési szakaszok pontos(abb) leírására. A nemlineáris numerikus eredmények és a jóval egyszerűbb, de könnyebben kezelhető lineárisan rugalmas számítási modell eredményeinek összehangolásával megmutattuk, hogy előállítható a helyettesítő lemezszélesség felvételére alkalmas egy-, illetve kétváltozós függvény is [18] (4.(c) ábra).



4. ábra: Összefoglaló eredmények

(a) keretsarok csomópontok - kvázi-statisztikus vizsgálatok, (b) oszlop-gerenda csomópontok ciklikus vizsgálatok, (c) oszlop-födém modellek – egyenértékű keret vizsgálata

Az elért eredmények és a kifejlesztett modellezési metódus az általunk vezetett kutatócsoport számos vizsgálatát alapozták és alapozzák meg. További kutatási területek, valamint szerkezeti kialakítások vizsgálatai váltak elérhetővé, melyeket már el is kezdtünk feldolgozni. Az alapvetően monolit vasbeton szerkezetek vizsgálatán kifejlesztett technikát továbbfejlesztve az előregyártott vasbeton szerkezeti elemek és azok csomóponti kialakítását vizsgáló kutatásokat végzünk jelenleg. A lágyvasalású elemeket egy egyszerű előregyártott vasbeton keretváz alapozási (pillér-kehelynyak) és oszlop-gerenda kapcsolatának vizsgálatával kezdtük. A csomóponti modelleket készítettünk, melyekkel a szerkezeti viselkedés kellő pontossággal leírható/modellezhető. A kapcsolatokra jellemző kialakítások (bordázott/simaoszlopvég, kiöntőhabarcs, eltérő ütemben betonozott elemek zsugorodása stb.) modellezési lehetőségein át a teljes keretváz globális viselkedésére vonatkozó modelleket készítettünk. A rendelkezésre álló modellezési eljárás újabb szintre történő emelését az előregyártott vasbeton feszített szerkezeti elemek és azok csomóponti kialakításának vizsgálatával végezzük. Jelenlegi kutatások folynak az előregyártott feszített vasbeton gerendák és az előregyártott feszített körüreges födempallók

témakörében. A kifejlesztett modellezési eljárás továbbá téglaszerkezeti elem(ek) numerikus vizsgálatánál is felhasználásra kerül.

Mindezek alapján célunk a numerikus modellezési eljárás továbbfejlesztése, finomítása. Az eljárás továbbá kiválthatja az igen költséges laboratóriumi kísérletek egy részét vagy teljes egészét. Célunk, hogy a modellezési technika által kapott eredmények szerteágazó körben, hazai és nemzetközi szinten is felhasználhatók legyenek, valamint átültethetővé válhassanak a mindennapi mérnöki gyakorlatba.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton köszönjük a BME Szerkezet- és Anyagvizsgáló Laboratórium munkatársainak a felhasznált kísérletek lebonyolításában való közreműködésüket, valamint a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék munkatársainak a numerikus modellfejlesztéshez biztosított támogatásukat.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Szczecina M., Winnicki A., (2015), „Numerical simulations of corners in RC frames using strut-and-tie method and CDP model”, *XIII International Conference on Computational Plasticity, Fundamentals and Applications COMPLAS XIII*.
- [2] S-J. Hwang, H-J. Lee, Analytical Model for Predicting Shear Strength of Exterior Reinforced Concrete Beam-Column Joints for Seismic Resistance, *ACI Journal*, V. 96, No. 5, September-October 1999.
- [3] Pampanin S., Calvi G. M., Moratti M., Seismic Behaviour of R.C. Beam-Column Joints Designed for Gravity Loads, *12th European Conference on Earthquake Engineering*, 2002. Paper Reference 726
- [4] Hawileh, R.A., Rahman, A., Tabatabai, H., (2010). Nonlinear finite element analysis and modeling of a precast hybrid beam-column connection subjected to cyclic loads. *Applied Mathematical Modelling*, 34(9), 2562-2583.
- [5] Angelo M., Giuseppe S., Domenico N., Cyclic Tests on External RC Beam-Column Joints: Role of Seismic Design Level and Axial Load Value on the Ultimate Capacity, *Journal of Earthquake Engineering*, 17:110–136, 2013.
- [6] Priya et al., Analytical Investigation On The Seismic Behaviour of Precast Pocket Foundation Connection, *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, Vol. VII, Issue I, Jan.-March 2016, pp: 214-218.
- [7] Giuseppe S., Angelo M., Finite Element Analysis of Experimental RC Wide Beam-Column Joints Provided with Different Detailing Solutions, *COMPADYN 2017, 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, M. Papadrakakis, M. Fragiakadis (eds.), Rhodes Island, Greece, 15-17 June 2017.
- [8] S A. Arjamadi., M. Yousefi, Numerical Modelling of Seismic Behavior of Retrofitted RC Beam-Column Joints, *Civil Engineering Journal*, Vol. 4, No. 7, July 2018.
- [9] Haris I., Roszevák Zs. (2017), „Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata” *Vasbetonépítés: A FIB magyar tagozat lapja: Műszaki folyóirat XIX*: (1) pp. 2-11., 2017.
- [10] Roszevák Zs., Haris I. (2017), Comparison of different models on different cast-in-situ RC joints, *12th Central European Congress on Concrete Engineering 2017 Tokaj*, pp.: 648-658., 2017.
- [11] Roszevák Zs., Haris I. (2019), „Monolit vasbeton keretsarok numerikus vizsgálata - 1. rész Egyirányú monoton növekvő terhelés” *Vasbetonépítés: A FIB magyar tagozat lapja: Műszaki folyóirat XXI*: (3) pp. 78-86., 2019.
- [12] Roszevák Zs., Bodó P. B., Haris I., Vasbeton síklemez egyenértékű kerettel történő helyettesítése vízszintes teherre numerikus vizsgálatok alapján, *XIII. Magyar Mechanikai Konferencia*, Miskolc, 2019.
- [13] Roszevák Zs., Haris I. (2019), „Finite element analysis of cast-in-situ RC frame corner joints under quasi static and cyclic loading”, *Revista de la Construcción*, 18: (3) pp. 579-594. (2019)
- [14] Roszevák Zs., Haris I. (2020), „Monolit vasbeton keretsarok numerikus vizsgálata - 2. rész Ciklikusan változó terhelés” *Vasbetonépítés: A FIB magyar tagozat lapja: Műszaki folyóirat XXII*: (3) pp. 73-82., 2020.
- [15] Cervenka, V., Jendele, L., Cervenka, J. (2014), „ATENA Program Documentation Part 1, Theory” *Cervenka Consulting s.r.o*
- [16] *fib Model Code for Concrete Structures 2010* (2013), *Wilhelm Ernst & Sohn*, Berlin
- [17] Hooper C. D. (1964). Low-temperature elastic behavior of fourteen compounded elastomers, *NASA Technical Memorandum*, NASA TM X-53137
- [18] Bodó P. B. (2020), Monolit vasbeton földem-pillér kapcsolat vizsgálata vízszintes hatásra, *MSc. diplomamunka*