

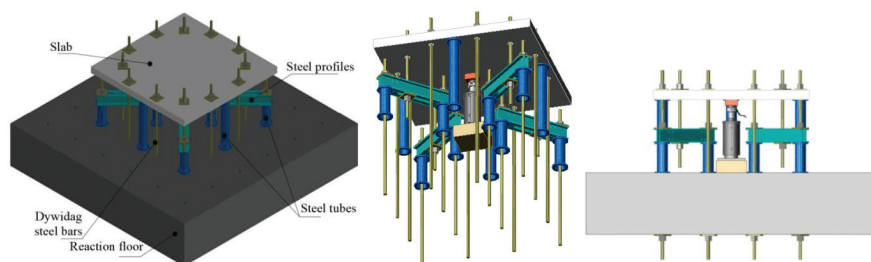
Hazai siker a szálerősítésű beton numerikus modellezésében

DR. JUHÁSZ KÁROLY PÉTER TARTÓSZERKEZETI VEZETŐ TERVEZŐ, JKP STATIC KFT.
SCHAUL PÉTER TARTÓSZERKEZETI TERVEZŐ, JKP STATIC KFT.

A szálerősítésű beton numerikus modellezésével foglalkozó *fib* Working Group WP2.4.1 [1] az idén rendezte meg a harmadik sztochasztikus szimulációs versenyét (blind simulation) [2], ahol a vizsgálat tárgya egy pontszerűen terhelt földemlemez átszűrődási tönkremenetelének előrejelzése volt. Az összehasonlító elemzést az a résztvevő nyerte, akinek a modellje legjobban közelíti a valós szerkezet viselkedését. A numerikus számítások elvégzése után a vizsgált szerkezetet laboratóriumban tönkremenetelig terhelik, miközben különböző értékeket mérnek. A kísérlet után összehasonlítják a numerikus és a valós eredményeket. Az a résztvevő nyert, aki a legpontosabb előrejelzést adta a szerkezet várható viselkedésével kapcsolatban. Ezen benchmarking célja a szálerősítésű beton modellezésének pontosítása, fejlesztése, amely alapján a *fib* pontosabb tervezési irányelveket tud szolgáltatni a gyakorló mérnökök számára.

Ennél a versenynél a vizsgált elem egy hagyományos vasalással és acélszállal erősített lemezszerkezet volt, melynek átszűrődási ellenállását kellett meghatározni a középponti pontszerű terhelésre. A laboratóriumi vizsgálati elrendezés az 1. ábrán látható.

A felhívás alapján a numerikus modellekkel a földem teherbírását, az erő-elmozdulás karakterisztikáját, négy helyen függőleges elmozdulást, a beton összenyomódását, a meghatározott acélbetétek nyúlását, valamint egy régióban a maximális repedéstágasságot kellett determinálni. Adatszolgáltatásként megkaptuk a laboratóriumi terhelési elrendezést, a földem pontos geometriáját és az alkalmazott anyagok különböző anyagvizsgálatának eredményeit. Az alkalmazott szálerősítés hatásának jellemzésére szabványos, hárompontos gerendahajlító vizsgálatot (EN 14561) és kör alakú panelvizsgálatot (ASTM C1550) készítettek. A beton nyomószilárdsági vizsgálatát 150 mm-es kockán végezték el (EN 12390-3). Az alkalmazott vasbetétekhez átmérőként erő-megnyúlás diagramok álltak rendelkezésre. A számításához szükséges anyagparamétereket ezen adatokból kellett megbecsülni.



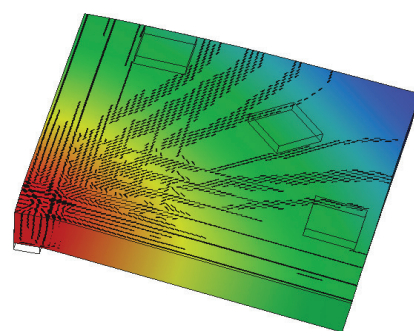
1. ábra: Laboratóriumi elrendezés: megtámasztások és központos terhelőerő

A versenyen – a korábbi évekhez hasonlóan – cégünk is részt vett. A numerikus modell megalkotásához az ATENA [3] végeeselemes programot használtuk, amit kifejezetten beton-, vasbeton- és szálerősítésű betonszerkezetek végeeselemes leképezésére fejlesztettek ki. A földem szerkezet modellezése során igyekeztünk a legpontosabb közelítéseket alkalmazni, így a vasbetétek a tényleges betontakarás alkalmazásával, diszkrét 1D-elemekkel kerültek be a modellbe. Az anyagparamétereket minden esetben a korábbi vizsgálatok alapján definiáltuk, jellemzően a mért értékek középértékével. Ez alól kivétel a szálerősítés, ebben az esetben figyelembe vettük a szálok orientációjának hatását is [4]. Ennek modellezésére a maradó hajlító-húzószilárdság értékét az átlagértékhez képest 19%-kal csökkentettük. A szálerősítés hatását a dr. Juhász Károly Péter doktori munkájában [5] ismertett módosított törési energia módszerével vettük figyelembe, amelyet az ATENA programban a FibreLAB projekt [6] által használtak fel. Az anyagmodell lényege a beton törési energiájának módosítása a szálok figyelembevételével.

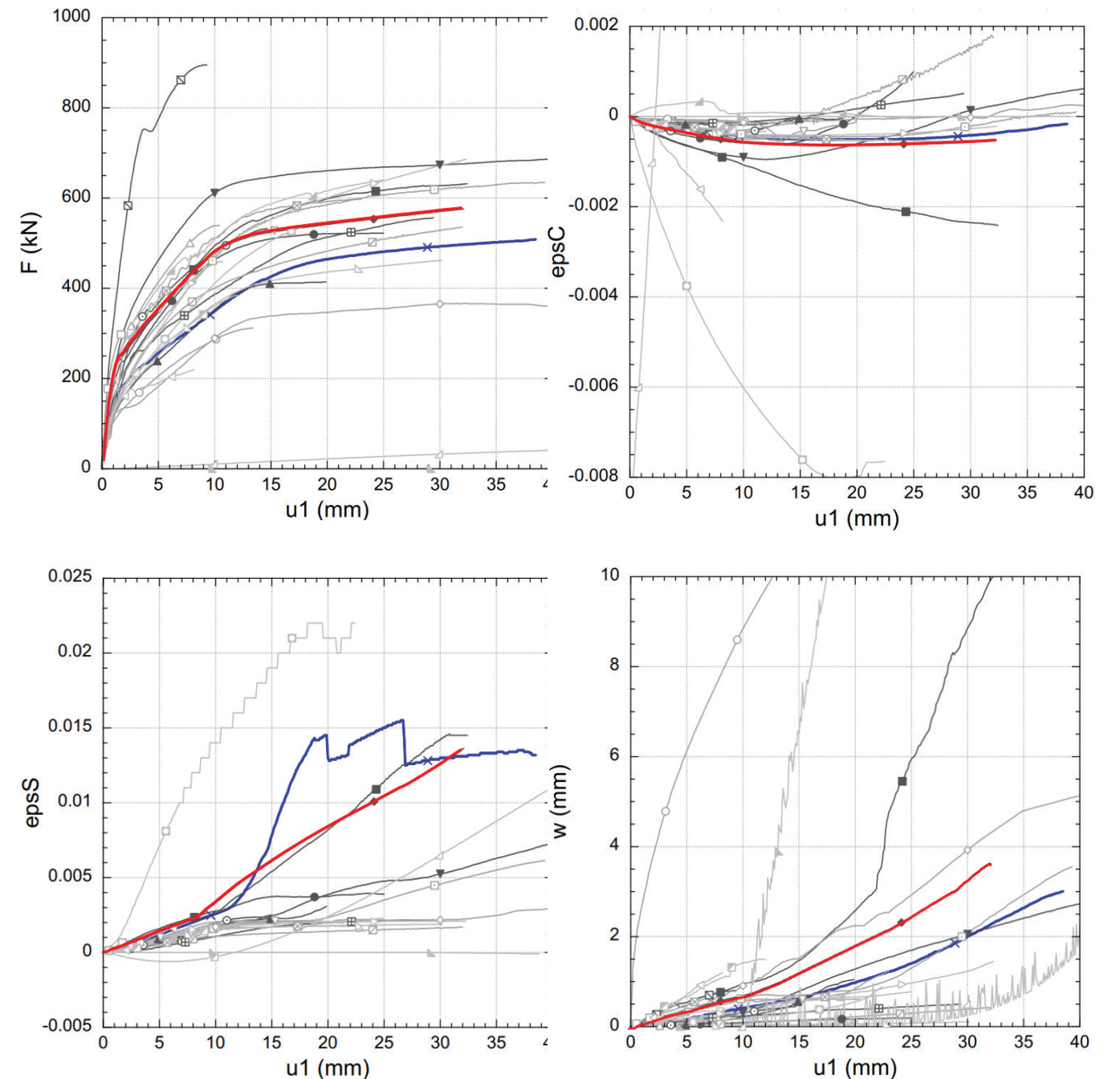
A mintadarab szimmetriája miatt a teljes szerkezetnek csak a negyedét modelleztük (2. ábra). A modellben 8 integrációs ponttal rendelkező, négyzög oldalú hexaéderelemeket alkalmaztunk. Az elemméret meghatározásánál figyelembe vettük, hogy az elemek oldaláránya ne haladja meg az 1:3 arányt, illetve ahhoz, hogy a hajlítás megfelelő modellezéséhez a vastagság mentén legalább 4 elemet használjunk. A végleges elemméret 2x2x2 cm volt, azonban a háló érzékenysége vizsgálatára a modellt ellenőriztük 5 és 10 cm-es elemekkel is. A mintát összesen 520 lépésben futtattuk, két terhelési esetre

bontva: az első 20 lépésben a szerkezet önsúlyát és a monitorpontokat definiáltuk, míg a hátralévő 500 lépésben elmozdulásvezérelt módon a központos terhelést működtettük. Minden lépésnél a konvergenciafeltételhez szükséges iterációk megengedett száma 100 volt. A modellezéshez 38 188 darab végeeselemet használtunk, a futtatási idő pedig 4,5 óra volt.

A valós szerkezet tesztelésére a Minho Egyetem laboratóriumban (Universidade do Minho) került sor. A vizsgálatok során két elemet ellenőriztek, eredményként a vizsgált értékek átlagát határozták meg. A tesztelésről készült videófelvétel megtekinthető társaságunk honlapján [7]. Az eredmények értékelését, valamint az azokból számított pontszámot szintén a Minho Egyetem végezte. Az egyes versenyzők modelljeinek és a valós tesztelés eredményének eltérését egy előre közölt számítási módszer szerint határozták meg, és ez alapján állították fel a végeredményeket. Nagy büszkeség volt számunkra, hogy a 26 résztvevő közül cégünk a második helyen végzett. A versenyt a holland ABT BV. cég nyerte.



2. ábra: Numerikus modell



3. ábra: Laboratóriumi és numerikus eredmények, F: erő, u1: középponti elmozdulás, epsC: beton megnyúlása, epsS: acél megnyúlása, w: repedéstágasság

A benyújtott modellünk mind az erő-elmozdulás diagramban, mind pedig a mért értékekben igen jó közelítést adott a valós viselkedésre. A szerkezeten keletkező repedések és azok megnyílása, illetve a tönkremenetelkor repedéskép is nagy hasonlóságot mutatott a laborvizsgálattal. Az alábbi 3. ábrán – a többi versenyző eredményeivel együtt (szürke) – a főbb vizsgált paraméterek laboratóriumban mért (kék), illetve a cégünk modelljének eredményei (piros szín) szerepelnek.

A verseny alapján több következtetés is levonható. Az eredmények nagy szórása azt mutatja, hogy a nem megfelelően használt végeeselemes számítás igen komoly kockázatot rejt magában, ugyanakkor hozzáértő kezekben, megfelelő tapasztalattal és

háttértudással a state-of-the-art numerikus vizsgálatok igen jól közelítést adhatnak egy szerkezet valós viselkedésére. Ezekkel a módszerekkel olyan magas szintű optimalizáció érhető el, amelyre mindenképp szükség lesz a fenntartható fejlődés és a karbonlábnyom csökkentésének eléréséhez. Az általunk alkalmazott numerikus módszerek segítségével már közel ezer szerkezetet terveztünk, optimalizáltunk vagy vizsgáltunk hazai és nemzetközi megbízásoknál.

A modell további részletei és bővebb információk a [6] linken érhetők el.

[1] <https://www.fib-international.org/>
 [2] <https://www.fib-international.org/news/504-3rd-blind-simulation-competition-results.html>

[3] Cervenka, J., Papanikolaou, V. K. (2008), Three dimensional combined fracture-plastic material model for concrete, International Journal of Plasticity (24) pp. 2192-2220.

[4] Juhász K. P. (2020), A proposed evaluation method for three-point beam tests of fiber-reinforced concrete, ASTM Journal of Testing and Evaluation, Volume 49, Issue 5.

[5] Juhász K. P. (2018), The effect of synthetic fibre reinforcement on the fracture energy of the concrete, Doktori disszertáció, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.

[6] www.fibrelab.eu

[7] <https://jkpstatic.com/newsroom/fib-frc-bsc>