

Ipari padlók méretezése

1. rész

- irányelvek áttekintése, speciális méretezési kérdések

JUHÁSZ KÁROLY PÉTER TARTÓSZERKEZETI TERVEZŐ, SZAKÉRTŐ, LABORVEZETŐ, BME SZILÁRDSÁGTANI ÉS TARTÓSZERKEZETI TANSZÉK - CZAKÓ ADOLF LABORATÓRIUM

SCHAUL PÉTER DOKTORANDUSZ, OKLEVELES ÉPÍTŐMÉRNÖK, BME ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉSI TANSZÉK

NAGY LÓRÁNT TARTÓSZERKEZETI TERVEZŐ, JKP STATIC KFT.

Egyre nagyobb hangsúlyt fektetünk az épületek tartószerkezeti tervezési során azok ipari padlóinak a méretezésére is. Jelenleg kevés elfogadott méretezési útmutatás van hazánkban, ami alapján gyakorló mérnökök egyszerűen méretezhetik az ipari padlókat. Inkább az a bevált gyakorlat, hogy az egyes termékek gyártói (pl. beton szálerősítés, fugaprofilok) végzik el többé-kevésbé szakemberként a méretezést. Ezen felül a nemzetközileg elfogadott irányelvek alkalmazása esetén is sok kérdés merül fel azok alkalmazhatóságáról, megbízhatóságáról.

Írásunk több éves iparipadló-méretezés tapasztalatain alapul.

Cikksorozatunk első részében végigvesszük a főbb irányelveket, azok sajátosságait és alkalmazási lehetőségeit. A második részben a legjobban elterjedt TR34-es brit irányelvet nézzük meg közelebbről, bemutatva a legfontosabb méretezési képleteket, segítve a gyakorló mérnökök munkáját, hogy saját maguk is elvégezhesék az ipari padlók méretezését. A harmadik részben fejlett végeselemes méretezéseket mutatunk be, összehasonlítva az eredményeket valós méretű kísérletekkel és az irányelvek eredményeivel.

1. BEVEZETÉS

Ipari épületek tervezése során az ipari padlók méretezése mindig is mostoha-gyerekeknek számított, a tervezők szívesen hárították ezt a feladatot a kivitelezőkre, leginkább a használható műszaki irányelv hiánya miatt. A szakkivitelező cégek több évtizedes tapasztalataikra hagyatkozva készítették el a padlót, saját meggyőződéssel, különféle technológiákkal és felhasznált anyagokkal. Vannak kivitelező cégek, amelyek a vasalt ipari padlót részesítik előnyben, vannak, akik a szálerősítésű betonokban hisznek, és akadnak olyanok is, akik mindenféle erősítés helyett a jól megtervezett betontechnológiát tartják szem előtt. A szálerősítésű beton megjelenésével a gyártók szívesen vállalták át a padlók méretezését, ahol legtöbbször nem az alkalmazott padló minősége, hanem az ára a döntő. Ritka az, ahol a generáltervező ebbe bele tud szólni, vagy bele akar szólni, a felelősség kérdésköre tisztázatlan. Ennek a hiányosságnak a fő oka, hogy a tervezőknek nincs a kezükben egy olyan irányelv, amely alapján ipari padlót tudnának tervezni.

2. MÉRETEZÉSI MÓDSZEREK ÉS IRÁNYELVEK

Ipari padlók méretezése során a következő méretezési módszerekről beszélhetünk:

- kézi méretezésről;
- lineáris végeselem méretezésről;
- és nemlineáris végeselem méretezésről.

A legtöbb irányelv a kézi méretezéshez ajánl különféle képleteket, a végeselem méretezést legfeljebb említik, azok használatára ajánlásokat nem tesznek (ACI360 1.4.3).

2.1. TR34

Európában a legismertebb és legelfogadottabb ipari padló méretezési irányelv a brit, The Concrete Society által készített TR34-es műszaki irányelv (Technical Report 34 – Concrete Industrial Ground Floors – A guide to design and construction). Mára már 4 kiadást ért meg, a kiadások 1988-ban, 1994-ben, 2003-ban, valamint 2013-ban jelentek meg. Magyarországon az ipari padlók méretezése jellemzően a 3. kiadás megjelenése után terjedt el, így közel 10 éven keresztül ez alapján történt a tervezésük, egészen a 4. kiadás megjelenéséig. A 3. kiadás alapján kizárólag erősítés nélküli beton,



vagy szálerősítésű beton padlókat lehetett méretezni, a 4. kiadás viszont már alkalmas a legtöbb típusú ipari padló méretezésére, anyagát tekintve a beton, szöveterősítésű beton, szálerősítésű beton, vasbeton és hibrid, azaz szálerősítésű vasbeton tervezésére.

Az összes kiadás jellemzően az ágyazási tényező (k) felvételével veszi figyelembe az altalaji adottságokat, azonban az ágyazási tényező a talaj CBR (California Bearing Ratio) vagy rugalmassági modulus (E_{vd}) ér-

” A TR34 alapján különböző terhekre végezhetünk méretezést, ami lehet pontteher, két közeli pontteher, két pontteher, négy pontteher (pl. polclábak), vonalmenti teher, vagy akár felületen megoszló teher.

tékéből is kiszámolható. Amennyiben nem áll rendelkezésre ilyen adat, az ágyazási tényezőt egy minimum értékkel kell felvenni, melyet a helyszínen ellenőrizni kell a kivitelezés megkezdése előtt. A talajon fekvő ipari padló lemeztvastagságára a TR34 korlátozásokat ír elő, a 3. kiadás szerint a minimális lemeztvastagság 100 mm, míg a 4. kiadás már 150 mm értéket irányoz elő.

Mindkét kiadásban megadhatjuk a tervezett beton szilárdsági osztályra jellemző paramétereket, melyek alapján végezzük a méretezést. Fontos kérdés a szálerősítés figyelembe vétele a tervezés során, mely kérdésben jelentős eltérés van a 2003-as és a 2013-as kiadás között. Míg a 3. kiadás a szálerősítésű betonoknál az R_{e3} értéket használja a szálerősítésű beton jellemzésére, addig a 4. kiadásban teljesen áttáltak a pontosabb, meghatározott $CMOD$ (Crack Mouth Opening Distance) értékekhez tartozó maradó hajlító-húzószilárdság értékek használatára. Az R_{e3} és a maradó hajlító-húzószilárdság értékek megadása

minden esetben a szál gyártójának vagy forgalmazójának a feladata, azonban a meghatározott $CMOD$ értékekhez tartozó, maradó hajlító-húzószilárdság értékek kimérése bonyolultabb, így a 4. kiadás megjelenésével a gyártók/forgalmazók dolga megnehezült. Ezen maradó hajlító-húzószilárdság értékekkel viszont sokkal pontosabban megtervezhető a szálerősítésű beton ipari padló. Fontos még kiemelni, hogy a 3. kiadás megadott egy minimum R_{e3} értéket, melyet a szál teljesítményének el kellett érnie, ennek hiányában a padlót csak erősítés nélküli betonként lehetett méretezni.

Mindkét kiadás alapján az ipari padlók teherbírását a pozitív és negatív hajlító nyomatékok felvételére, valamint a nyírási ellenállásra kell méretezni. A pozitív nyomaték az ipari padló alsó felületén, míg a negatív nyomaték a felső felületén okoz repedéseket. A TR34 szerint a padló teherbírása a felső felületen megjelenő repedésig tart, holott a valóságban ez nem igaz, hiszen az első megjelenő repedés szabad szemmel nem is látható, a használhatósági határállapot követelményeinek (maximális repedéstágasság) betartásával nagyobb

teherbírás is figyelembe lehetne venni. Ezek alapján a TR34 eléggé konzervatívnak tekinthető a teherbírás megállapításának szempontjából. A nyírási ellenállás szempontjából is különbséget találunk a két kiadás között. A 3. kiadás kizárólag acél szálerősítés esetén enged figyelembe venni a szálerősítés nyírási ellenállását, a 4. kiadásban viszont már az acél szálerősítés is csak hagyományos vasalással együtt vehető figyelembe nyírásra. Tehát a szálerősítést a nyírási szempontjából nem vehetjük figyelembe, arra erősítés nélküli betonként kell méretezni.

A 2003-as kiadás az anyagi és teher oldalon is meghatároz biztonsági tényezőket. A teher oldali biztonsági tényezők elnagyoltak és nem túlságosan differenciáltak. A 2013-as kiadásban már jóval differenciáltabb biztonsági tényezőkkel találkozhatunk pontterhek esetében, viszont a vonal- és egyenletesen megoszló terheknél nem érvényesül az osztott biztonság elve, hiszen csak az anyagi oldalon vesz figyelembe biztonsági tényezőt. A TR34 alapján különböző terhekre végezhetünk méretezést, ami lehet pontteher, két közeli pontteher, két pontteher, négy pontteher (pl. polcláb-



bak), vonal menti teher, vagy akár felületen megoszló teher. Pontterhek esetében méretezést végezhetünk belső mezőben, vágott dilatációnál, átmenő dilatációnál, illetve szabad szélén. A dilatációknál az esetlegesen átmenő vasalás vagy tűskézés hatását is figyelembe lehet venni.

A 2003-as kiadásban megjelent a zsugorodásra való méretezés lehetősége, mely figyelembe veszi a zsugorodásból, valamint a hőmérséklet-különbségekből adódó kényszerfeszültségek hatását is. A 2013-as kiadásból kikerült a zsugorodásra való méretezés, a kiadás szerint megfelelő beton-technológia, kivitelezés és dilatációképzés mellett nem kell foglalkozni ezzel a kérdéssel, azonban a hazai viszonyok között érdemes erre is méretezni a padlószerkezetet. A 2013-as kiadás újdonságaként megjelent a fáradásra való méretezés, melyet anyagkezelő gépek terheire végezhetünk el, viszont kizárólag szöveterősítésű ipari padlók esetére ad meg képleteket.

Összefoglalásul elmondhatjuk, hogy a TR34 2013-as kiadásával, valamint a 2003-as kiadás bizonyos részeinek átvételével (pl. zsugorodásra való méretezés) a legtöbb típusú ipari padló megtervezhető.

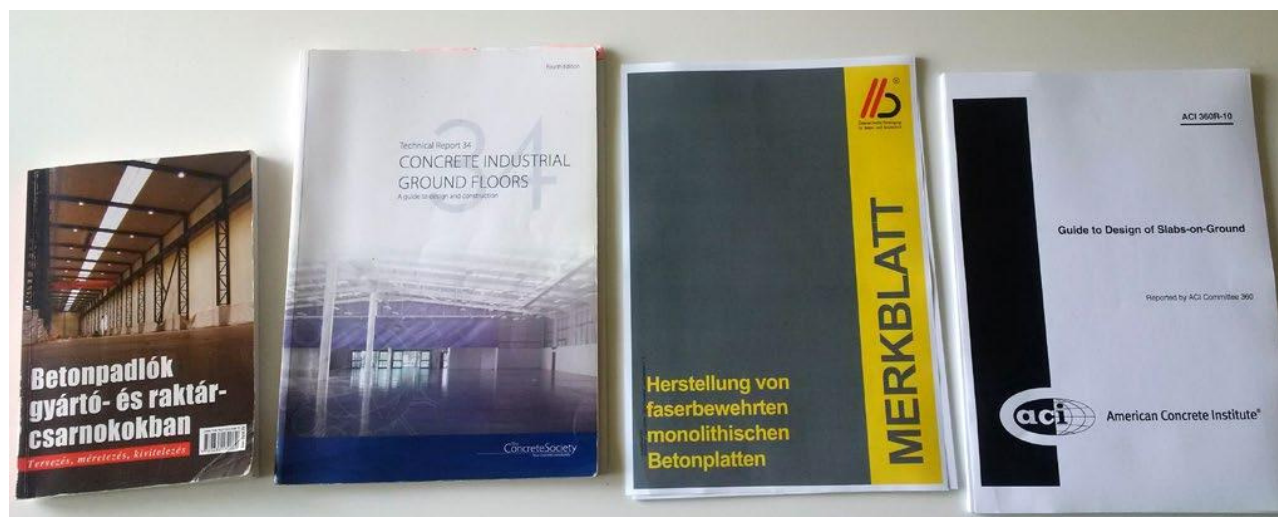


„ Az irányelv részletes leírást ad a padlók kivitelezésére, a kapcsolatok kialakításának módjára, a szükséges kapcsolóelemek használatára.

2.2. ACI360

Amerikában a TR34 megfelelője az American Concrete Institute által kiadott ACI360 irányelv.

Az irányelv részletes leírást ad a padlók kivitelezésére, a kapcsolatok kialakításának módjára, a szükséges kapcsolóelemek használatára. Az irányelv megkülönbözteti az erősítés nélküli beton padlókat, valamint a különböző erősítéssel ellátottakat. Erősítésnek az acélbetét erősítést, valamint az acél és a szintetikus makro szálerősítést te-



kinti. Kijelenti, hogy a szintetikus mikroszálak nem adnak többlet teherbírást a padlónak, sőt a száradási zsugorodásból keletkező zsugorodási repedések korlátozására sem alkalmasak. Az irányelv hosszan részletezi a geotechnikai tulajdonságok megállapításának módjait, valamint a padló megfelelő működéséhez szükséges talajparamétereket. Táblázatos formában megadja, hogy milyen határok között mozoghat a különböző típusú talajok tömörségi értéke. Az irányelv a talaj kapcsolatait három csoportra bontja, melyek kialakításáról, valamint a szükséges kapcsolóelemekről részletes leírást is ad. Ezek a vágott dilatáció, a teljes izolálás, valamint a kapcsolt dilatáció. A padlókon előforduló terhek a részletes leírásban szerepelnek, továbbá megemlíti milyen lehetséges előforduló hatások érhetik a szerkezetet. A biztonsági tényezők értéke nagyobb, mint az európai szabványok esetén, ennek értéke 1,7- 2,0 között mozog a teher fajtájától függően.

A számítások háttereként megemlíti, hogy törésvonal-elmélet alapján történik a rugalmasan alátámasztott lemez törőerejének meghatározása, valamint, hogy a lemez

rugalmas alátámasztásánál a Winkler-féle ágyazást veszi figyelembe, azonban a számítás részleteit nem mutatja be. A pontteher hatására bekövetkező törőerő meghatározásakor bemutatja a különböző formulákat a pontteher elhelyezkedésétől függően (szabad sarok, szabad szél, mezőközép), azonban két és négy egymástól adott távolságra elhelyezkedő pontteherre nem ad ajánlást. Megjegyzendő továbbá, hogy a TR34-hez hasonló képleteket használ a törőerő meghatározására, azonban több helyen erős közelítéseket használ, pl.: $2 \cdot n = 6$.

A szálerősítésű betonpadlók számítását külön mintapildán mutatja be. A szálerősítés hatását az Európában már korábban beszüntetett mérőszám, az R_{es} alapján veszi figyelembe. Ez a mérőszám a beton törőterhének, valamint a szálerősítés által hozzáadott maradó hajlító-húzószilárdság átlagos értékének hányadosa.

2.3. Osztrák irányelv

A TR34 és az ACI360 irányelvekhez hasonlóan megjelent az osztrák betonszövetség (Österreichische Vereinigung

für Beton- und Bautechnik) kiadványa, a *Merkblatt – Herstellung von faserbewehrten monolithischen Betonplatten*, amely teljesen a TR34 alapjaira épült, szálerősítésű beton ipari padlókhöz. Több közelítés, melyeket megemlíttet az ACI360 irányelv, az osztrák segédletben is megtalálhatók.

2.4. Lohmeyer-Ebeling könyve

Ipari padlók méretezéséről az eddig felsoroltakon kívül számos szakkönyv jelent meg. Hazánkban a legelterjedtebb a Lohmeyer és Ebeling által írt könyv, a *Betonpadlók gyártó- és raktár-csarnokokban, tervezés, méretezés, kivitelezés*. Sajátos módon értelmezve az ipari padlókat saját biztonsági tényezőket és méretezési módszereket állít fel a fellépő terhek és hatások méretezésére, beleértve a betonpadló zsugorodását és púposodását is. Sok nagyon hasznos érték szerepel a könyvben, amelyeket akár komoly végeselemes méretezéshez is használhatunk. A könyv részletesen bemutatja az egyes környezeti osztályokat, illetve, hogy ilyen környezetben milyen beton alkalmazása ajánlott. Továbbá a gyakorlatban is igen hasznos tényezőkre is ajánlást tesz (súrlódási tényezők, talajadatok stb.).

A könyv sorra veszi a tervezési lépéseket, beleértve a betonreceptúrákat is, valamint felsorolja a padlókkal szemben támasztott szokásos és különleges elvárásokat is. Részletes javaslatokat tesz a padlók kapcsolatainak kialakítására, szükséges vasalás elhelyezésére, de a meghibásodott padlók javítását és a hibás padló ellenőrzését is taglalja. A könyv az elméleti bemutatás mellett az egyes szerkezeti elemek elkészítéséről (vágott dilatációk, felületképzés, altalaj-tömörítés stb.) is gyakorlatias javaslatokat ad.

Sorozatunkat a Beton Újság következő számában folytatjuk.



Ipari padlók méretezése

2. rész

– irányelvek áttekintése, speciális méretezési kérdések

Folytatjuk a Beton újság 2017/3. számában megkezdett cikksorozatunkat az ipari padlók méretezéséről, meghatározva a főbb irányelveket, azok sajátosságait és alkalmazási lehetőségeit.

JUHÁSZ KÁROLY PÉTER TARTÓSZERKEZETI TERVEZŐ, SZAKÉRTŐ, LABORVEZETŐ
BME SZILÁRDSÁGTANI ÉS TARTÓSZERKEZETI TANSZÉK – CZAKÓ ADOLF LABORATÓRIUM

SCHAU L. PÉTER DOKTORANDUSZ, OKLEVELES ÉPÍTŐMÉRNÖK, BME ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉSI TANSZÉK

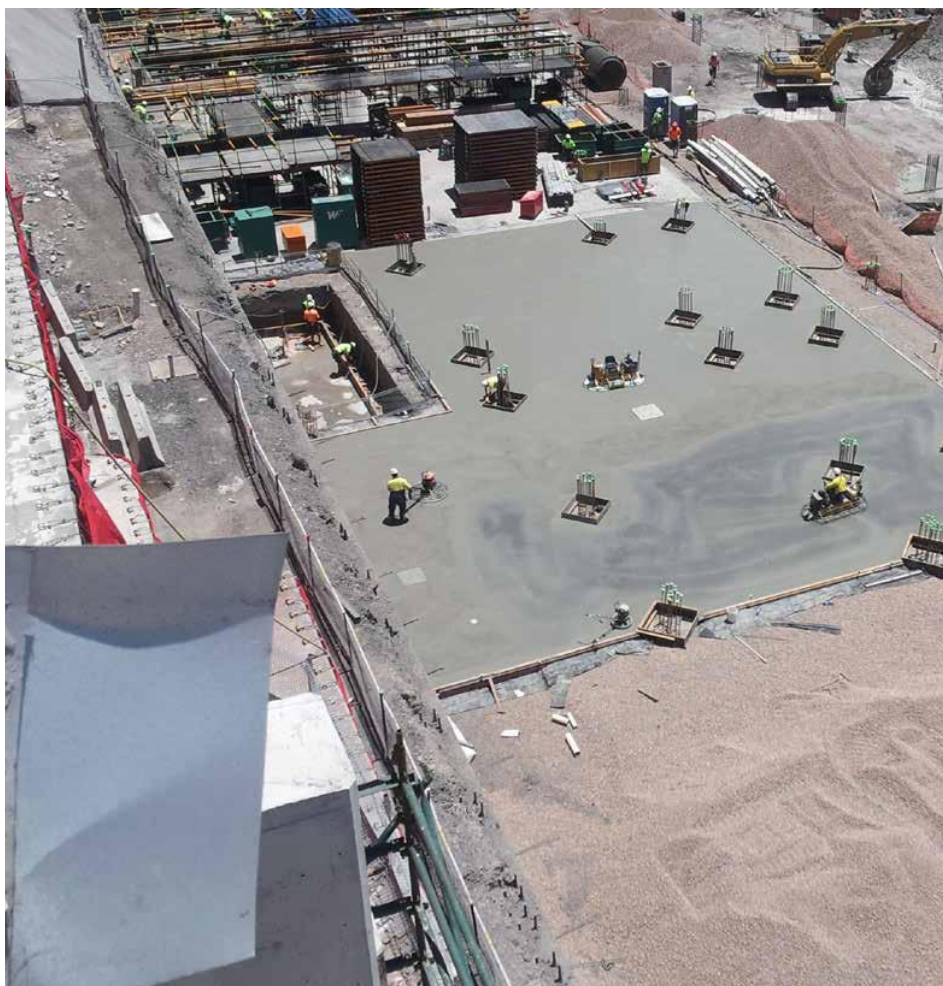
NAGY LÓRÁNT TARTÓSZERKEZETI TERVEZŐ, JKP STATIC KFT.

3. MÉRETEZÉSEK SPECIÁLIS KÉRDÉSEI

3.1. Biztonsági tényezők

Az ipari padlók méretezése mindenképp speciális statikai probléma, amely a terhek meghatározásától a méretezés módjáig más szemléletet követel, mint egy szokványos tartószerkezeti elem. Lohmeyer és Ebeling egyenesen ki is veszi a tartószerkezeti elemek köréből, mondván „a betonpadló meghibásodásakor semmi nem omlik össze, és nem veszélyezteteti az építmény stabilitását”, így nem vonatkoznak rá az EUROCODE^[5] biztonsági tényezői. Saját biztonsági tényezőket használ, amelyek sok tényezőtől függenek, kezdve a felhasználás módjától, az igényektől egészen a kivitelezés minőségéig.

Ilyen eltéréseket találhatunk több helyen a TR34-ben is, ahol például a polcláb terhek biztonsági tényezőinél az EUROCODE által adott $\gamma=1,50$ -et 1,2-re csökkenti, mondván a polclábak terhei kontrollálva vannak. Vegyünk egy példát: van egy polcláb, amely maximálisan 50 kN-t tud elviselni, így felmerülhet a kérdés, hogy ha túl van terhelve, akkor a polc lába hamarabb megy tönkre, mint hogy nagyobb terhet tudjon átadni az ipari padlóra. Ez a gondolatmenet azonban hibás, hiszen egy polclábnál is figyelembe vették a biztonságot és valószínűleg az is képes nagyobb terhet felvételére. Egy polcnál a túlerhelés figyelmen kívül hagyása véleményünk szerint hibás feltételezés (nem úgy, mint egy



vízzel teli tartállyal, ahol a túlterhelés esetén a víz kifolyik a tartályból, így a nyomás fizikailag nem tud nagyobb lenni). A másik ilyen eltérés az EUROCODE alapelveitől az osztott biztonság elvének van, ahol a felületi terhek figyelembe vételénél a TR34 kimondja, hogy a terhek biztonsági tényezőjét nem

kell használni, hiszen a beton hajlító-húzó-szilárdságánál már figyelembe van véve. Az osztott biztonság elvének pont ez lenne a lényege, miszerint a terhek esetében is felvesszünk egy biztonsági tényezőt, illetve az anyagoldalon is. Sőt, további biztonságok vannak a statikai modellek felvételénél is.



„ Amennyiben még nem lehet tudni a padló funkcióját, a maximális értékeket lehet meghatározni, amelyekhez később igazodni kell.

A biztonsági tényezők ekképp való módosítása logikusnak tűnhet, azonban az EUROCODE-ban nincs erre való utalás, engedmény. Korszerű, nagy igényeket támasztó ipari padlók esetén azonban ez a biztonságtényező-csökkentés ugyancsak megkérdőjelezhető, bár emberéletet nem veszélyeztet, ugyanakkor az anyagi kár igen jelentős is lehet. A fentiek alapján a tervezőnek egyénileg kell mérlegelnie a biztonsági tényezőket, amely során figyelembe kell venni többek között a megrendelő igényeit, a padló minőségi szintjét, vagy akár a kivitelezési körülményeket. A felvett biztonsági tényezőket rögzíteni kell a számításban és el kell fogadtatni a megrendelővel.

3.2. Terhek típusai és felvétele

Födémek méretezése során a födém felületén ébredő maximális hasznos terhet kell meghatározni, amelynek biztonsági tényezővel növelt értékére kell méretezni a szerkezetet teherbírási határállapotban, illetve várható értékére használhatósági állapotban. Ennek megfelelően a födémek teherbírása kN/m^2 -es értékkel van megadva. Ipari padlók esetén is szeretik a megbízók ezt az értéket meghatározni, de ebben az esetben ez az érték keveset árul el a padló használata során ébredő terhekről. Sőt, a teljes felületén megtámasztott padlón, teljes felületén ébredő felületi teher alig okoz hajlító igénybevételt a padlóban (a padló megsüllyedhet, függőleges irányú normál-feszültség ébred benne, amely nagyságrenddel kisebb a beton nyomószilárdságánál). A padlóban akkor keletkezik hajlító igénybevétel, ha ezek a terhek szakaszosan terhelik a padlót. Létezik egy olyan teherállás, amelynél a pozitív, illetve ahol a negatív nyomaték a maximum értékét veszi fel. Azt azonban egyik irányelv sem taglalja, hogy ez a teherállás a valóságban létrejöhet-e, illetve hogy a dilatációk ezt hogyan módosítják. A padló terhelésének megadása során a felületi terhek definiálásánál további probléma szokott lenni a terhek értékének eltúlzása. A 100 kN/m^2 -es terhelés a valóságban ritkán jöhet létre, nehéz elképzelni, hogy ekkora terheket a padló felületén fektetve tárolnak, jellemzőbb inkább a polcokon vagy konténerekben való tárolás. Ezeknek a tárolóknak pedig lábaik vannak, amelyek már pontszerű terheket adnak át az ipari padlóra. A méretezés során érdemes a várható terhelések megállapításánál a padlón elhelyezésre kerülő vagy tárolandó anyagokból (polcokon, konténerekben), a padlón működő gépekből és a padlón közlekedő járművekből (targonca, tehergépkocsi) kiindulni, mintsem felületi teherként megadott értékekből. Amennyiben még nem lehet tudni a padló funkcióját, a maximális értékeket lehet meghatározni, amelyekhez később igazodni kell.

3.3. Méretezés zsugorodásra, dilatációk távolsága

Betonszerkezetek zsugorodásra való méretezése rendkívül bonyolult feladat. Az egyik oldalról a betont egy időben változó anyagparaméterű anyagként kell modellezni, míg a rá ható terhek is folyamatosan változnak. A zsugorodás mértékét számos tényező szabja meg: a beton összetétele (víz/cement tényező, finomrész tartalma, cement típusa), időjárás a kivitelezés alatt (hőmérséklet, páratartalom), a kivitelezés módja és az utókezelés tartalma, minősége. Ezeket gyakorlatilag nem lehet figyelembe venni a számításban, bár a szabványokban nagyságrendi értékük kiszámítására van





módszer. A méretezésük pedig fontos lenne, mivel az ipari padlók repedésének egyik fő okozója a beton zsugorodása. Ennek megfékezésére készülnek a vágott dilatációk, amelyeket még a beton fiatalkorában kell elkészíteni, irányítva ezzel a keletkező repedések megjelenését. A dilatációk távolságának méretezésére egyedül Lohmeyer-Ebeling ajánl módszert, ami azonban már a megszilárdult betont veszi számításba.

Az ipar ebben is előrébb jár, mint a szabványok, irányelvek, mivel a mostani fő irány a nagytáblás (vagy kis túlzással fugamentes) ipari padlók építése. Több irányzat is van, amely erre kínál megoldást. A legkézenfekvőbb a vasalással ellátott ipari padlók, esetenként kiegészítve szálerősítéssel. Magas acélszál adagolással ugyanezt az eredményt lehet elérni, erre a Dramix ad méretezési és kivitelezési módszereket. A Dramix méretezési megoldásában kitér a betontechnológia, a megfelelő tömörítés és az utókezelés fontosságára. A méretezési eljárás lényege a feszültségeloszlás számítása a keresztmetszeten belül, ahol a fiatal beton és a teljesen megszilárdult beton anyagparamétereit is figyelembe veszi. A méretezést a repedéstágasság korlátozására végzi el, tehát a használhatósági határállapotnak (SLS) való megfelelés a követelmény, a teherbírási határállapotra (ULS) való méretezést külön kezeli. A méretezési eljárásban a szálerősítést hagyományos vasalással együtt alkalmazza, viszont a számítási módszer nem veszi figyelembe a dilatációk távolságát, mely kulcsfontosságú lenne a nagytáblás ipari padlók esetében.

A Dramix külön hangsúlyt fektet a nagytáblás ipari padlóknál a kivitelezésre is. Kitér az altalaj és ágyazat kérdésére, melyek nem összekeverendő és nem azonos fogalmak. Az altalaj az eredeti talajréteget jelenti, melyet megfelelően tömöríteni kell, és megfelelő simaságúra kell kialakítani. Az ágyazat a tömörített altalajon készülő réteg, mely a Dramix útmutatója szerint cementkötésű réteg vagy terített kavicsréteg. A már korábban említett ágyazási tényezőt a betonozás megkezdése előtt ellenőrizni kell az ágyazati

rétegen. A Dramix az ágyazattal egybeépített ipari padlót (tehát közvetlenül az ágyazatra öntött, elválasztó fólia nélküli padló) javasolja, amelynél nem a repedések kiküszöbölése a cél, hanem a repedések méretének a kontrollálása, azaz sok sűrűn elhelyezkedő, de szemmel nem látható repedés kialakulása. Minimális lemezvastagságként 140 mm-t ad meg.



Külön kitér a betontechnológia fontosságára, úgy mint a cement és adalékanyag típusára, a víz/cement tényezőre, az alkalmazandó adalékszerekre, valamint a bedolgozhatóságra. A Dramix a nagytáblás padlók esetén magas száladagolást javasol, illetve a kritikus helyeken kiegészítő hagyományos vasalást. Különösen fontos a padló utókezelése, a részben megszilárdult betonon zsugorodást kompenzáló adalékszer alkalmazása, majd ennek megszilárdulása után a padló vízzel történő elárasztása és legalább 14 napon keresztül fóliával való lefedése. Az útmutató alapján a padló a végleges terhelését hat hét

után kaphatja meg. A Dramix előírása szerint megfelelő betontechnológiával, tervezéssel, kivitelezéssel és utókezeléssel akár 45 méteres átmenő dilatációs távolság is elérhető.

Amerikában elterjedt az utófeszített vasbeton ipari padlók alkalmazása is, bár nagytáblás ipari padlók méretezésére jelenleg nem létezik elfogadható irányelv.

3.4. Szálerősítésű betonok

Bár a szálerősítésű betonokat az iparban már régóta használják, kevés méretezési módszer áll rendelkezésre. Ipari padlók esetében ugyancsak a TR34 ezek közül a legkorszerűbb. Míg a 3. kiadás a szálerősítésű betonoknál az R_{e3} értékeket használja a szálerősítésű beton jellemzésére, addig a 4. kiadásban teljesen átalítottak a pontosabb, meghatározott CMOD értékekhez tartozó, maradó hajlító-húzószilárdság értékek használatára. Az R_{e3} értékeket a japán JSCE^[6] szabványban rögzített laboratóriumi vizsgálat alapján lehet megkapni, míg a megha-

tározott CMOD értékekhez tartozó, maradó hajlító-húzószilárdság értékeket a RILEM TC162^[9] irányelvben rögzített vizsgálat alapján. A maradó hajlító-húzószilárdság értékek pontosabban jellemzik a szálerősítést, mint az R_{e3} érték. Az irányelv egyértelműen kijelenti, hogy a méretezés során csak az acél- vagy makro szintetikus szálak használhatók, mikroszálak (mono és fibrillált) nem vehetők figyelembe statikai szempontból. Mikroszál-erősítésű beton mint betonszerkezet méretezhető lineáris módon. Ez alapján a „mikroszálakkal történő vasalás kiváltása” statikai szempontból nem értelmezhető.



Az ACI és a TR34 2003 a japán szabvány^[6] alapján veszi fel a szálerősítésű beton adatait, a TR34 2013 a RILEM TC162, míg az osztrák irányelv a Richtlinie Faserbeton^[7] alapján.

Az acél- vagy makro szintetikus szákkal erősített beton anyagparamétereit a gyártó szolgáltatja a saját vizsgálatai alapján, de nagyobb beruházásoknál érdemes a projektnél alkalmazni kívánt betonnal készített próbatestek laboratóriumi vizsgálataiból venni az eredményeket. Mivel a vizsgálatot a beton 28 napos korában kell elvégezni, így ipari padlók esetén ritka, hogy a projekt elkészítése előtt ez elkészül.

3.5. Lineáris és nemlineáris méretezés

Az ipari padló statikai szempontból teljes felületén lineáris vagy nemlineáris rugókkal rugalmasan alátámasztott lemez, melynek anyagmodellje a beton repedésmentes állapotáig lineáris anyagmodellel közelíthető, vasalt vagy szálerősített beton esetében pedig húzott oldalon a lineárisan rugalmas-tö-

kéletesen képlékeny anyagmodell használható, bizonyos megkötések mellett. A fentiek alapján a beton vagy mikroszál (mono vagy fibrillált) erősítésű beton ipari padlókat lehet rugalmas anyagmodellel közelíteni, míg a vasalt vagy makroszál-erősítésű beton ipari padlókat rugalmas-képlékeny anyagmodellel. A támasz figyelembe vételekor lehet lineáris rugóval számolni, amely az ipari padló felemelkedését nem tudja kezelni, illetve nemlineáris rugóval, amely húzás esetén nem működik, azaz a padló fel tud emelkedni. Így a nemlineáris méretezés elnevezés utalhat a támaszok vagy az anyagmodell nemlineáris volta is. Míg az elsőt a legtöbb szoftver tudja kezelni, addig a másodikat csak komoly végeselem szoftverekkel lehet számolni. Lineáris anyagmodell esetén csak repedésmentes beton méretezhető, amelynek alapfeltétele, hogy a megépített ipari padló a beton szilárdulása alatt se repedjen meg. Ez a megfelelő betontechnológiával (kis zsugorodású beton, mikroszálak alkalmazása), illetve a megfelelő módú és ideig tartó utókezeléssel érhető el. Ennek elérése komoly kivitelezői szaktudást és tapasztalatot igényel, mérnöki szempontból pedig egy ilyen szerkezetben semmilyen tartalék nincs.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ipari padlók méretezéséhez számos irányelv létezik, a maguk előnyeivel és hátrányaival. A hazai tervezési gyakorlatban azonban ezeket a mérnökök kevésbé használják, a méretezést és a felelősséget is a kivitelezőkre hárítják. Cikksorozatunk 1. és 2. részében a legfontosabb ipari padló irányelveket vettük sorra, elemezve előnyüket és hátrányukat, illetve az ipari padló méretezése során megismert speciális méretezési kérdéseket. Bár az ipari padlók az épületek összértékének csak kis részei, az egyre emelkedő igényszintek miatt egyre fontosabb szerepet kapnak, amelyek megkövetelik a mérnöki méretezést. Cikksorozatunk következő részében egy konkrét méretezési módszert mutatunk be.

Felhasznált irodalom:

- [1] ACI 360R-10, Guide to Design of Slabs-on-Ground, ACI, 2010, 76 p.
- [2] Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction: CNR-DT 204/2006 Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures. Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome 2006.
- [3] British-Adopted European Standard: Fibres for concrete. Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity, Standard BS EN 14889-2:2006 (2006)
- [4] Concrete Society: TR34 Concrete industrial ground floors. Concrete Society, Crowthorne 2003.
- [5] EUROCODE EN 1992: European Code for design of concrete structures.: European Committee for Standardization), Brussels, 2004.
- [6] Japan Society of Civil Engineers: Method of test for flexural strength and flexural toughness of SFRC, Standard JSCE SF-4 (1985)
- [7] Lohmeyer G., Ebeling K.: Betonpadlók gyártó- és raktárcaarnokban. Publikál Kft., Budapest, 2008
- [8] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Richtlinie Faserbeton. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Wien 2008..
- [9] Vandewalle, L., et al.: RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Materials and Structures, Vol. 33 (2002), January-February 2000, pp 3-5.

Ipari padlók méretezése

3. rész

- méretezés a TR34 alapján

Jelen cikksorozat az ipari padlók méretezésének módszereit mutatja be. A harmadik rész a brit TR34-es irányelv méretezéseit taglalja a legfontosabb terhelési esetekre. Ipari padlók méretezése előtt mindenképp javasolt a teljes irányelv ismerete, jelen cikk csak részleteiben tartalmazza a lépéseket.

JUHÁSZ KÁROLY PÉTER TARTÓSZERKEZETI TERVEZŐ, SZAKÉRTŐ, LABORVEZETŐ,
BME SZILÁRDSÁGTANI ÉS TARTÓSZERKEZETI TANSZÉK - CZAKÓ ADOLF LABORATÓRIUM
SCHAUL PÉTER DOKTORANDUSZ, OKLEVELES ÉPÍTŐMÉRNÖK, BME ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉSI TANSZÉK
NAGY LÓRÁNT TARTÓSZERKEZETI TERVEZŐ, JKP STATIC KFT.

1. BEVEZETÉS

Az ipari padlók tartószerkezeti szempontból felületen megtámasztott lemezszerkezetek. Lényegében ezt a statikai problémát a legegyszerűbben lineáris rugók feltételezésével (Winkler-féle ágyazás), illetve a lemezt lineáris anyagmodell alkalmazásával lehet modellezni. Ez a modellezési módszer többé-kevésbé helyes is, amíg a betonszerkezet nem reped meg, ugyanis onnantól kezdve a beton erősítési módjának megfelelően különféle módon viselkedik a szerkezet. Mivel a beton ipari padló építése közben a mikro-repedések kialakulása szinte elkerülhetetlen, így ez a legegyszerűbb modellezési módszer sem alkalmazható mindig.

Ennek ellenére a tervezési irányelvek leg többje ezen a feltételezésen alapul.

2. IPARI PADLÓK KIALAKÍTÁSA

Az ipari padló tartószerkezeti szempontból egy felületen rugalmasan alátámasztott szerkezet, amely az épület fő tartószerkezetétől teljesen független. Célja a rajta ható terhek közvetítése az alatta levő ágyazatra, majd talajra. Rossz talaj esetén cölöpökkel is gyámolítják az ipari padlót, ám ebben az esetben a méretezés is bonyolultabb és mindenképp vasalással kell ellátni a padlót.

A padlók jellemző rétegrendje a következő:

- teherhordó altalaj;
- ágyazat;
- (hőszigetelés);



- elválasztó/csúsztató réteg;
- beton padlólemez.

2.1. Ágyazat

Az ipari padló alatti talaj vizsgálata, kialakítása és tömörítése mindig létfontosságú, hiszen ebben az esetben a talaj adja a szerkezet egyetlen támaszát. A talaj tö-

mörségét a számítások során a talaj ágyazási modulussal (k) vesszük figyelembe, melynek dimenziója N/mm^3 . Ennek meghatározása például a DIN 18134^[2] szabvány szerinti terhelőlemez próba elvégzésével történhet.

Az ipari padlók alatti ágyazat sokféle lehet, kialakításának a módja leginkább

az altalaj talajmechanikai paramétereitől függ. Amennyiben nem ismerjük a majdan készíthető ipari padló alatti ágyazat ágyazási tényezőjét, előírhatjuk annak mértékét, amelyet a kivitelezés előtt ellenőrizni kell. Javasolt legkisebb értéke a $k = 0,03 \text{ N/mm}^3$.

2.2. Beton ipari padló

Ipari padló kialakítása és erősítése többféle lehet. Kis terhelés esetén létezhet beton anyagú ipari padló, nagyobb terhelés esetén készülhet szálerősítéssel, extrém nagy terhelés esetén kiegészítve acél hálólal. A beton betontechnológiai jellemzői rendkívül fontosak, így külön részben foglalkozunk vele. Ugyancsak nagy szerepe van a dilatációknak is, mivel ezek helyes kialakításával szabályozhatjuk a repedések képződését.

2.2.1. Beton anyagmodellje

A tervezés során igen fontos a beton jellemzőinek meghatározása, amely jellemzően a beton szilárdsági osztályának függvénye. A főbb paraméterek megmutatják a beton különböző hatásokkal szembeni szil-



árdsági és alakváltozási értékeit, melyek a tervezés alapjai. A tervezéshez a hatályos Eurocode^[3] szabványsorozatban megadott értékeket használhatjuk.

2.2.2. Dilatációk kialakítása

A beton padlólemezekben különböző távolságonként szükséges hézagok ki-



alakítása, hogy ne keletkezzenek jelentős hosszanti irányú igénybevételek, melyek a padló repedését okoznák. Ezekkel a kapcsolati elemekkel lokalizálni lehet a repedések helyét, így maga a betonlemez felülete repedésmentes maradhat. A hézagoknak több fajtája használatos, hogy a változó követelményeket ki tudják elégíteni. A hézagok főbb fajtái:

- vakhézagok (vágott dilatáció): előre be- tervezett repedési hézagok. A betonke- resztmetszet felső tartományában be- vágás készül, így lokálisan gyengítve a keresztmetszetet, mely lehetővé teszi a tiszta repedéstervezést a bevágás alatt. Betonpadlók hézagainak arányát nem ajánlott 1:1,5-nél nagyobbra tervezni.
- szoros hézagok: teljes vastagságában elválasztják a betonlemez, így nem nyújtanak lehetőséget a beton tágulá- sára. Szoros hézag ellenbetonozással alakítható ki egy előre betonozott be- tonmező kiszalasztott homlokoldalán.
- peremhézagok (tüskés dilatáció): a be- tonlemez szélén kialakított csatlakozá- sok, melyek elválasztják a különböző épületrészeket. A kapcsolat kialakítha- tó csúszó tüskékkel, vagy előregyártott acél kapcsolati elemekkel. A kapcsolat funkciója, hogy engedje a beton hőtá- gulását, ugyanakkor a padló vonalára merőleges nyírási mozgások hatására létrejövő igénybevételek ellenére ösz- szetartsa a különböző padlórésszelteket. Hasonló kapcsolatok készülnek a mun- kafolyamatok határán is.

Hézagok kialakítása szükséges a felme- nő szerkezet oszlopai körül is, hiszen eze- ken a helyeken jellemzően ponttalpozás készül, melynek függőleges mozgása eltér a lemez mozgásától.



3. IPARI PADLÓN ÉBREDŐ TERHEK

Az ipari padlókon a terhek igen válto- zatosak lehetnek a különböző funkciókból adódóan. A terhelt felület méretének függ- vényében megkülönböztetünk pontszerű, vonal mentén megoszló és felületen meg- oszló terheléseket. Födémek méretezése során a födém felületén ébredő maximális hasznos terhet kell meghatározni, amely- nek biztonsági tényezővel növelt értékére kell méretezni a szerkezetet teherbírási ha- tárállapotban, illetve várható értékére hasz- nálhatósági állapotban. Ennek megfelelően a födémek teherbírási kN/m^2 -es értékkel van megadva. Ipari padlók esetén ez az ér- ték keveset árul el a padló használata során ébredő terhekről, sőt, a teljes felületén meg- támasztott padlón a teljes felületén ébredő felületi terhelés alig okoz hajlító igénybevételt a padlóban (a padló megsüllyedhet, függő- leges irányú normálfeszültség ébred ben- ne, amely nagyságrenddel kisebb a beton nyomószilárdságánál). A padlóban akkor keletkezik hajlító igénybevétel, ha ezek a terhek szakaszosan terhelik a padlót. Léte- zik egy olyan teherállás, amelynél a pozitív, illetve ahol a negatív nyomaték a maximum

értékét veszi fel. A padló terhelésének megadása során a felületi terhek definiálásánál további probléma szokott lenni a terhek értékének eltűzése. A 100 kN/m²-es terhelés a valóságban ritkán jöhet létre, nehéz elképzelni, hogy ekkora terheket a padló felületén fektetve tárolnak, jellemzőbb inkább a polcokon vagy konténerekben való tárolás. Ezeknek a tárolóknak pedig lábaik vannak, amelyek már pontszerű terheket adnak át az ipari padlóra. A méretezés során érdemes a várható terhelések megállapításánál a padlón elhelyezésre kerülő vagy tárolandó anyagokból (polcokon, konténerekben), a padlón működő gépekből és a padlón közlekedő járművekből (targonca, tehérgépkocsi) kiindulni, mintsem felületi teherként megadott értékekből. Amennyiben még nem lehet tudni a padló funkcióját, a maximális értékeket lehet meghatározni, amelyhez később igazodni kell.

4. SZÁMÍTÁS

Jelen fejezetben a TR34 brit irányelv^[1] főbb számítási lépései kerülnek bemutatásra. Az irányelv a talajon fekvő betonpadlót mint rugalmasan ágyazott lemezt tekinti, és ennek megfelelően törésmechanikai alapokra helyezi a számítást, mely segítségével a repedések kialakulása utáni nemlineáris állapot is számítható. A rugalmas anyagként viselkedő talajt Winkler rugókkal modellezi.

4.1. Beton hajlító-húzószilárdságának a meghatározása

A hajlító-húzószilárdság a betonnál nem anyagi paraméter, hanem függ a szerkezet vastagságától (h), azaz figyelembe veszi a mérethatast.

A számítás alapjaként meg kell határozni ezen értéket a felvett geometria és anyagjellemzők felhasználásával, az alábbi képlet segítségével:

$$f_{ctd,fl} = f_{ctm} \times (1.6 - h/1000)/\gamma_m \quad (1)$$

ahol: γ_m : anyagi biztonsági tényező, amely beton esetében 1,5.

4.2. Padlólemez keresztmetszetének nyomatóéki teherbírása

Ezt követően lehetőség nyílik a padló nyomatóéki teherbírásiának meghatározására. Ebben az esetben a padlót az alkalmazott erősítés függvényében különböző típusokra kell bontani, melyek a következők:

- erősítés nélküli betonpadlók;
- hagyományos vasbetétekkel erősített betonpadlók;
- makro- vagy acélszálerősítésű betonpadlók;

- hibrid erősítésű padlók (szálerősítés és hagyományos vasbetét erősítés együttes alkalmazása).

A TR34 tervezési irányelv a mikro- és fibrillált szálaokról a következőt írja:

„A mikro-szintetikus szálaak nem nyújtanak semmilyen hozzáadott törési energiát. Nem gátolják a repedéseket a megszilárdult betonban, ezért nem használhatók más erősítések kiváltásaként. Méretezésnél nem vehetők figyelembe.”

Erősítés nélküli beton esetén (fibrillált is):

$$M_{un} = f_{ctd,fl} (h^2/6) \quad (2)$$

Vasalt padló esetén:

$$M_{u,RC} = 0.95 A_s f_{yk} d / \gamma_m \quad (3)$$

ahol: A_s : az alkalmazott vasbetétek területe
 f_{yk} : a vasbetétek folyási határának karakterisztikus értéke

d : a padló hasznos magassága

γ_m : anyagi biztonsági tényező

$$M_{u,FRC} = \frac{h^2}{\gamma_m} (0.29 \sigma_{r4} + 0.16 \sigma_{r1}) \quad (4)$$

A maradó hajlító-húzószilárdság számításához szükséges az átlagos tengelyirányú húzószilárdság meghatározása, melyre a RILEM TC162^[7] ad ajánlást két különböző CMOD értéknél (0,5 és 3,5):

$$\begin{aligned} \sigma_{r1} &= 0.45 f_{R1} \\ \sigma_{r4} &= 0.37 f_{R4} \end{aligned} \quad (5)$$

0,15%-nál kisebb vashányad esetén a padlóknál a hajlítás teherbírási:

$$M_{u,HVB1} = \frac{h^2}{\gamma_m} (0.29 \sigma_{r4} + 0.16 \sigma_{r1}) + \frac{A_s f_{yk} (d - 0.048h)}{\gamma_s} \quad (6)$$

0,15%-nál nagyobb vashányad esetén a padlóknál a hajlítás teherbírási:

$$M_{u,HVB2} = \frac{[0.5(\sigma_{r1} - \sigma_{r4})(h - h_{ux})(0.28h_{ux} + 0.33h)]}{\gamma_m} + \frac{[\sigma_{r4}(h - h_{ux})(0.11 \times h_{ux} + 0.5h)]}{\gamma_m} + \frac{[A_s f_{yk} (d - 0.39h_{ux})]}{\gamma_s} \quad (7)$$

ahol a nyomott beton zóna magassága:

$$h_{ux} = \frac{h[\sigma_{R4} + 0.5(\sigma_{r1} - \sigma_{r4})] + A_s f_{yk}}{[0.64 f_{ck} + \sigma_{r4} + 0.5(\sigma_{r1} - \sigma_{r4})]} \quad (8)$$

4.3. Pontszerű terhelések méretezése

A teher elhelyezkedésének függvényében megkülönböztetjük az alábbi eseteket, amelyeknél a méretezés módja is változni fog:

- belső teher: ebben az esetben a teher a padló minden szélétől legalább $l+a$ távolságra van;
- teher a padlószélén: ezen terhelési eset során a teher a padló egyik szélétől kisebb, mint $l+a$, a többi szélétől nagyobb, mint $l+a$ távolságra található;

- sarok terhelés: a teher két szélétől is $l+a$ távolságnál kisebb távolságra helyezkedik el.

ahol:

$$l = [(E_{cm} h^3 \times 10^6) / (12(1 - \nu^2)k)]^{0.25} \quad (9)$$

a : terhelő felület ekvivalens sugara, azaz annak a körnek a sugara, amelynek területe megegyezik a tényleges terhelő elem felületével.

Az alábbi egyenletek, valamint mechanikai hátterük Meyerhof^[6] vonatkozó műveiben találhatók meg. Minden összefüggésnek két típusa van az a/l arány függvényében.

Közbenő pontszerű terhelés esetén:

$$a/l=0 \quad P_{u,0} = 2\pi(M_p + M_n) \quad (10)$$

$$a/l>0.2 \quad P_{u,0.2} = 4\pi(M_p + M_n)/[1 - (a/3l)] \quad (11)$$

Padlószéli pontszerű terhelés esetén:

$$a/l=0 \quad P_{u,0} = [\pi(M_p + M_n)/2] + 2M_n \quad (12)$$

$$a/l>0.2 \quad P_{u,0.2} = [\pi(M_p + M_n) + 4M_n]/[1 - (2a/3l)] \quad (13)$$

Szabad sarok esetén:

$$a/l=0 \quad P_{u,0} = 2M_n \quad (14)$$

$$a/l>0.2 \quad P_{u,0.2} = 4M_n/[1 - (a/l)] \quad (15)$$

ahol: M_n a negatív nyomatóék a (2) képlet alapján, M_p pedig a keletkező pozitív nyomatóék a (3), (4), (6) és (7) képletek alapján, az erősítés függvényében.

Kaliszky vasbeton lemezek képlékenységtan szerinti méretezéséről szóló könyvében^[5] a koncentrált erővel terhelt ágyazaton fekvő lemezek teherbírásiát a törőnyomatóék és a külső teher munkájának egyenlősége alapján vezeti le, Meyerhof képletével (10) azonos eredményt kapva:

$$P_t = 2\pi(1 + \mu)m \quad (16)$$

ahol μ a negatív és pozitív törőnyomatóék viszonya.

A levezetés figyelmen kívül hagyja a nyírási tönkremenetelt és végtelen kiterjedésű lemezzel foglalkozik. Az eredményből az az érdekesség jön ki, hogy a törőteher független az ágyazat fajlagos teherbírásiától. A terhelő lemez méretének figyelembe vételekor azonban Meyerhof képletei alapján az ágyazási tényezőtől is függ a teherbírási, igaz, itt is csak kis mértékben.

A TR34 ezeken felül foglalkozik továbbá a kettő és négy pontos terhelésekkel is.

A padló nyírási méretezéséhez az Eurocode^[3] lemezátzúródás-vizsgálatát javasolja.

4.4. Felületi terhek méretezése

A felületen megoszló terhelés Hetényi^[4] által kidolgozott összefüggések alapján kerül bemutatásra. Felületi terhelés hatására keletkező nyomatóékok a λ paraméter segít-



5. ÖSSZEFOGLALÁS

Ipari épületek tervezése során az ipari padlók méretezése legalább akkora súlyt kell, hogy kapjon, mint maga a tartószerkezet, hiszen egy hibás padló ellehetetlenítheti a teljes csarnok funkcióját. A repedt, elmozdult padlók nemcsak esztétikai problémákat tudnak okozni, de a rendeltetésszerű használatot is megnehezítik, vagy akár alkalmatlanná teszik a padlót a használatra. Éppen ezért szükséges különösen nagy hangsúlyt fektetni a tervezésükre, méretezésükre.

Jelen cikkben az Európában leggyakrabban alkalmazott ipari padló irányelv, a brit TR34 főbb lépései kerültek bemutatásra. Ezen irányelv a jelenleg érvényben lévőkhöz közül a legrészletesebb, a legtöbb teherelrendezésre számítási módot és példát ad. Az irányelv alkalmazható vasalt és acél- vagy műanyag makroszál-erősítésű



padló tervezésére is. Természetesen nem tökéletes ez az irányelv sem, hiányosságok és hibák találhatók benne. Ilyen például a jól definiált helyen lévő felületen megoszló teher képlete.

Az irányelv áttanulmányozásával egy gyakorló mérnök is könnyen el tud igazodni a méretezésben, és így megfelelő ipari padlókat tud tervezni.

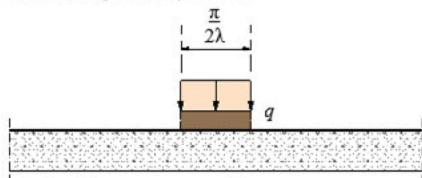
ségével határozhatók meg, melynek értéke a (17) képlet alapján számítható.

$$\lambda = \left(\frac{3k}{E_{cm} h^3} \right)^{0.25} \quad (17)$$

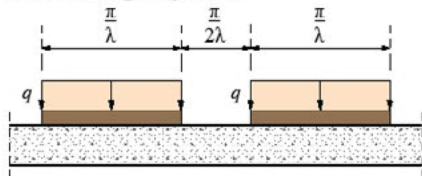
ahol: k a talaj ágyazási modulusa,
 E_{cm} a beton rugalmassági modulusa.

A felület mentén megoszló terhelés eloszlásának modellezésére a blokkmódszer alkalmazása a leggyakoribb, mely során a terhelt és a nem terhelt padlóreszek arányainak változtatásával határozzák meg a maximális igénybevételeket. Hetényi képletei alapján a maximális pozitív nyomatótkot a $\pi/2\lambda$ területen keletkező terhelés adja, míg a legnagyobb negatív nyomatótk a két oldalt π/λ területen leterhelt mezőnél keletkezik, mely között az 1. ábrának megfelelően $\pi/2\lambda$ terheletlen rész található.

Maximális pozitív nyomatótk



Maximális negatív nyomatótk



▲ 1. ábra: Maximális nyomatótkok felületen megoszló terhelés esetében

A maximális felületen megoszló q teher értéke a következő képlettel számítható:

$$q = 5.95\lambda^2 M_n \quad (18)$$

ahol: M_n a (2) egyenlet alapján meghatározható rugalmas alapon számolt nyomatótk.

Néhány fontos megjegyzést fűznénk a felületi terhekre való méretezési módszerhez. Mindenekelőtt fontos tisztázunk, hogy a képletek lineáris anyagmodellel számolnak, azaz az erősítések (szálerősítés, vasalás) hatását nem lehet figyelembe venni. Felületi terhekre ezek alapján csak beton ipari padlót tudunk méretezni, az első repedés megjelenéséig. Így kihasználatlan, túlméretezett padlókat kapunk. Az irányelv is tisztában van ezzel, oly módon próbálja meg ezt valamelyest javítani, hogy a felületi terhek esetében a biztonsági tényezőt csökkenti, mondván, hogy a beton anyagában is van biztonsági tényező. Ez a megközelítés hibás, teljesen ellentmond az Eurocode osztott biztonsági tényezők elvének. Fontos továbbá megjegyeznünk, hogy a képlet végtelen hosszúságú ipari padlóval számol, azaz nem veszi figyelembe a dilatációkat, illetve azok hatását. Amennyiben a maximális negatív nyomatótkhoz tartozó teherállás befoglaló mérete túlnyúlik a dilatációs hosszra, a képlet ismét hibás eredményt ad, ugyanis a dilatációt csuklóként figyelembe véve kedvezőbb eredményt kaphatunk. Végül, a TR34-ben a tetszőleges teherelrendezésre megadott képletek hibásak, felülvizsgálatra vagy korlátozásra szorulnak.

Felhasznált irodalom:

- [1] Concrete Society: TR34 Concrete industrial ground floors. Concrete Society, Crowthorne 2003.
- [2] Deutsche Norm: Determining the deformation and strength characteristics of soil by the plate loading test, 2001.
- [3] EUROCODE EN 1992: European Code for design of concrete structures: European Committee for Standardization) DIN 18134, Brussels, 2004.
- [4] Hetényi M.: Beams on elastic foundations, (Ninth printing), University of Michigan Press, 1971.
- [5] Kaliszky S.: Vasbeton lemezek méretezése a képlékenységtan szerint, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1967.
- [6] Meyerhof, G.G.: „Load carrying capacity of concrete pavement”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, proceedings of the ASCE, 1962.
- [7] Vandewalle, L., et al.: RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Materials and Structures, Vol. 33, January-February 2000, pp 3-5.
- [8] Westergaard, H.M.: „Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis”, Public Roads, vol. 7. no. 2., 1926.

Ipari padlók méretezése

4. rész

- végeselem módszer

Jelen cikk az ipari padlók méretezés cikksorozat utolsó cikke, amelyben olyan state-of-the-art méretezési módszereket mutatunk be, amelyek során a létező legfejlettebb végeselem módszereket használjuk. A méretezés a jelenlegi számítógép teljesítmények mellett lassúnak tűnhet, azonban összehasonlítva az eredményeket az irodalmi kísérletekkel és méretezési módszerekkel, a módszer pontossága és gazdaságossága igazolható. Számos külföldi ipari padló méretezése készült ezzel a módszerrel, amelyekből néhány referenciát bemutatunk cikkünk végén.

JUHÁSZ KÁROLY PÉTER TARTÓSZERKEZETI TERVEZŐ, SZAKÉRTŐ, LABORVEZETŐ, BME SZILÁRDSÁGTANI ÉS TARTÓSZERKEZETI TANSZÉK, CZAKÓ ADOLF LABORATÓRIUM
SCHAUL PÉTER DOKTORANDUSZ, OKLEVELES ÉPÍTŐMÉRNÖK, BME ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉSI TANSZÉK
NAGY LÓRÁNT TARTÓSZERKEZETI TERVEZŐ, JKP STATIC KFT.

1. BEVEZETÉS

A cikksorozat korábbi részeiben bemutatásra kerültek az ipari padló méretezésének mindennapokban használt lehetőségei, ki- térve az aktuális szabványok és irányelvek által használt képletekre, méretezési formulák- ra. Mivel ezen formulák jelentős közelítések- et tartalmaznak, csak bizonyos teher- sémákra használhatók és a padló teherbírását nagy biztonsággal határozzák meg, ezért bizonyos esetekben szükség lehet olyan méretezés elkészítésére is, mely az említett irányelvek alapján nem lehetséges. Ilyenre lehet példa egy bonyolult teherelrendezés, a padló válto- zó keresztmetszeti mérete vagy az ágyazás egyenlőtlensége. Ezekben az esetekben le- hetőség van végeselemes számítások elké- szítésére, melyekkel a padló teherbírása az említett körülmények mellett is meghatároz- ható. A végeselemes számítás egy eszköz a mérnökök kezében, mely a megfelelő nemli- neáris anyagmodellek, geometriai modell és megtámasztási viszonyok mellett a szerkezet valós viselkedését mutatja be egy adott teher hatására. Fontos azonban megjegyezni, hogy a betonszerkezetek viselkedése a bonyolult törési mechanizmus miatt igen nehéz, azt kellő pontossággal csak néhány szoftver tud- ja kezelni. Ugyanakkor a végeselemes számí- tásokkal lehetőség nyílik a pontos teherbírás

meghatározása mellett a valós repedéskép megjelenítésére, a szerkezet optimalizálásá- ra, valamint a szerkezet tényleges mozgása- inak követésére is, így bizonyos esetekben elengedhetlenné válhat alkalmazása.

2. LINEÁRIS ÉS NEMLINEÁRIS VÉGESELEM MÓDSZEREK KÖZÖTTI KÜLÖNBSÉGEK

A legtöbb végeselemes szoftver, mely minden mérnökirodában megtalálható, tartalmaz betonszerkezetek méretezésére anyagmodelleket. Azonban ezen anyagmo- dellek csak az első repedés megjelenéséig képesek megfelelő pontossággal követni a szerkezet viselkedését, hiszen az anyagi viselkedést leíró függvény egy egyenesből áll, melynek két végpontja a húzási, illetve a nyomási tönkremenetelhez tartozó feszültsé- g-alakváltozás pár. Ilyen anyagmodellel a betonban található erősítés nem vehető figyelembe, hiszen a beton még I. feszültség- állapotban van, repedések nem jelentkeznek rajta, tehát az erősítés is csak korlátozottan működik a szerkezetben. A legtöbb hasonló szoftver képes meghatározni a szükséges vasalási mennyiséget, azonban ezt is csak a betonban lévő feszültség, illetve a felven- ni kívánt többletfeszültség alapján. Az ilyen anyagmodellekkel rendelkező szoftvereket

nevezzük lineáris számításra alkalmas szoft- vereknek. Megtévesztő lehet, hogy jellemző- en van lehetőség ezekben a szoftverekben nemlineáris számítás futtatására, azonban ez a nemlinearitás csak geometriai szinten jelenik meg (kezdeti külpontosság, kimozdult alakra felírt egyensúly, stb.), nem pedig az anyagi viselkedést leíró függvényekben.

A fejlettebb végeselem szoftverek (ABAQUS, ANSYS, ATENA, DIANA) rendel- keznek nemlineáris viselkedést leíró anyag-



modellekkel, sőt legtöbbjükben a felhasználó egyéni függvényként megadhat saját anyagmodellt is az általa vizsgálni kívánt szerkezetnek. Amennyiben az anyagmodell a törés után akár keményedő, akár lágyuló viselkedéssel, de követni tudja a szerkezet globális viselkedését, úgy nemlineáris anyagmodellről beszélünk. Nemlineáris anyagmodell lehet például egy felkeményedést is figyelembe vevő acél anyagmodell.

3. A BETON FEJLETT ANYAGMODELLJE

A beton fejlett végeselemes modellezésének alapja, hogy a beton nyomásra és húzásra történő különböző viselkedését az alkalmazott anyagmodell kezelni tudja^[2]. Ez a feltétel még a fent említett nemlineáris anyagmodelleket kezelni tudó szoftverek nagy részében sem lehetséges, speciális betonszerkezetekre kifejlesztett programok használata szükséges (ATENA, DIANA). Megfelelő eszköz lehet a betonszerkezetek modellezésére a kombinált törési feltételt alkalmazó^[1] anyagmodell, mely nyomásra a William-Menétrey, míg húzásra a Rankine törési feltételt használja. A szakirodalomban több törésmódel-párok is fellelhetők, melyek alkalmasak lehetnek betonszerkezetek modellezésére (Von-Misses és Rankine; Drucker-Prager és Rankine), azonban a legjobb közelítést a fent említett William-Menétrey anyagmodell adja, mely nemcsak a törésig tudja az anyagi viselkedést követni, hanem a repedések utáni viselkedésről is megfelelő információt nyújt. A legfejlettebb végeselemes szoftverek képesek a repedések diszkrét megjelenítésére, valamint a repedéstágasság számítására is. Ehhez fontos definiálni a karakterisztikus hossz értékét, mely a beton feszültség-alakváltozás és feszültség-repedéstágasság diagramja közt teremt kapcsolatot, és leírja a repedések növekedését az

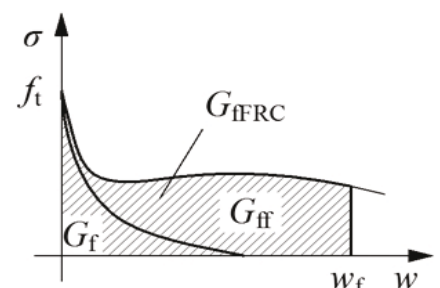


adott feszültségnél. A repedések valós idejű megjelenítése, valamint értékeinek számítása a legfőbb előnye a fejlett végeselemes számítási módnak. Ezen szoftverek lehetőséget nyújtanak az anyagi viselkedést leíró függvények felhasználó általi definiálására is, mely által mód nyílik kísérletek verifikálására, illetve speciális anyagok modellezésére is.

Ahhoz, hogy valós szerkezetek, mint például az ipari padló is modellezhető és méretezhető legyen, szükséges, hogy a betonban található erősítések is modellezhetőek legyenek.

A speciális beton- és vasbeton szerkezetekre fejlesztett végeselemes szoftverekben leggyakrabban lehetőség van a betonacélok diszkrét modellezésére, mely azt jelenti, hogy a vasbetétek vonalelemként kerülnek a valóságnak megfelelő pozícióba. Ezzel lehetőség nyílik a valós viselkedés modellezésére, valamint a szerkezetek optimalizálására is, hiszen az analízis során meghatározható, hogy mely vasbetétek vesznek részt a teherviselésben, és hol található vasalási többlet.

Ipari padlók gyakori erősítése az acél vagy szintetikus makro szálerősítés, mely modellezésére ezen fejlett végeselemes programokban szintén van lehetőség. A két leggyakoribb út a szálak diszkrét modellezése, valamint a beton törési energiájának módosítása. Míg az első jellemzően a kutatási modellekben fordul elő, addig a Módosított Törési Energia Módszere (MTEM)^[3] a gyakorlatban is jól használható eszköz szálerősítésű beton szerkezetek modellezésére. A módszer lényege, hogy a beton törési energiáját a szálerősítés hozzáadott törési energiájával módosítjuk (1. ábra). Ezen érték a különböző típusú szálakra és adagolásokra más és más, kimérése laboratóriumi tesztekkel inverz analízissel lehetséges. Ezt a módszert ajánlja szálerősítésű beton alagutak modellezésére az ITATech^[4] nemzetközi alagútszövetség is.



▲ 1. ábra A hozzáadott törési energia elvi sémája^[3]

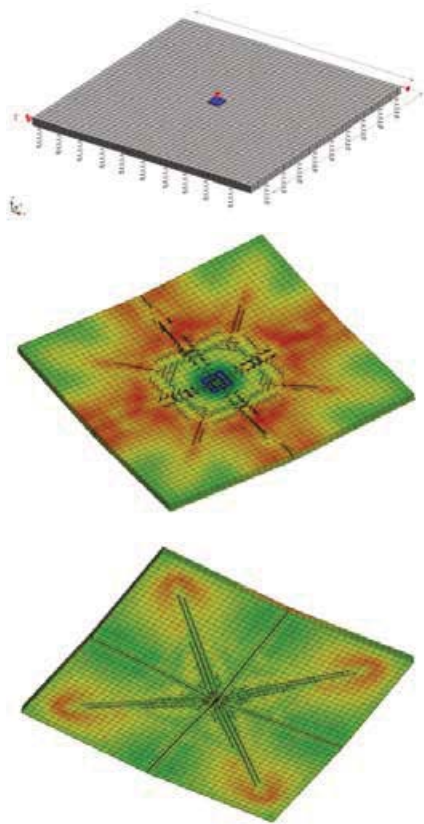
Lehetőség van továbbá időfüggő anyagmodellek definiálására is, melyekkel modellezhető a beton szilárdulása az öntést követő időkből, így a kezdeti zsugorodási repedések kialakulása is figyelembe vehető a méretezés során. Ez az anyagmodell követi a főbb anyagparaméterek (Rugalmassági modulus, húzó- és nyomószilárdság) időbeni változását, és minden számítási lépésben más és más anyagjellemzőkkel veti össze a szerkezetben ébredő feszültségeket. Ennek segítségével megállapítható, hogy mekkora táblában önthető az adott receptúrájú beton, illetve a táblamérethez a megfelelő betonreceptúra is meghatározható, melynél még nem keletkeznek zsugorodási repedések a padló felületén. A számítás során a zsugorodáskompenzáló szerek hatása is figyelembe vehető az anyag paramétereinek definiálásakor, valamint a teherértékek megválasztásakor.

4. A SZERKEZET MODELLJE

A padló végeselemes modellezésének első lépése a megfelelő geometria megadása a szoftvernek, mely megfelelő közelítésekkel a valósághoz legközelebb eső eredményeket adja. Így fontos az ipari padló alatt lévő talaj, maga a betonpadló és annak erősítése, valamint az egyes terhelő lemezek modelle-



zése is. A különböző padlórészekhez (vágott dilatáció, tüskés dilatáció, mezőszél) külön modellek generálása szükséges, így lehetünk biztosak abban, hogy a szerkezetünk az összes helyen megfelelő teherbírással rendelkezik a rá ható terhekkel szemben.



▲ 2. ábra Ipari padlók végeselemes modellezése

Az altalaj modellezésére több út is létezik, míg az egyikben a talaj külön anyagmodellként kerül felépítésre, megfelelő talajt leíró anyagmodellekkel (pl.: Drucker-Prager vagy Mohr-Coulomb anyagmodell), addig az egyszerűbb, kevesebb számítási időt igénylő, ám hasonló pontosságra képes módszer a talaj nemlineáris rugóval történő modellezése. Ebben az esetben a talajt helyettesítő rugó mevésegeit úgy kell beállítani, hogy nyomásra a talaj valós teherbírását tudja, míg húzásra közel zéró teherbírása legyen.

Az így definiált rugó fölé kerül a beton ipari padló. A méretezést célszerű 3 dimenziós modellben végrehajtani, hiszen a térbeli feszültségállapotok így tudnak megfelelően kialakulni, valamint a bonyolult teherrendezések is csak így követhetők. A beton padlót alkotó végeselemek 20 csomópontú téglatest elemek, melyek megfelelően tudják követni mind a szerkezet térbeli mozgását, mind pedig a repedések terjedését. A padló felépítéséhez szükséges, hogy annak vastagsága mentén legalább 4 végeselem sor helyezkedjen el, ugyanis csak így biztosítható a hajlításból adódó feszültségek megfelelő követése. Mivel a modell futásideje a felhasznált végeselemek számától függ, így amenny-



nyiben van rá lehetőség, célszerű kihasználni a szerkezet szimmetriáját, mely lehetővé teszi, hogy elegendő a szerkezet geometriájának felét (egyszeres szimmetria esetén), vagy negyedét (kétszeres szimmetria esetén) modellezni. A geometria definiálása során fontos a megfelelő esetleges további támaszok működtetése. A programban lehetőség van pontszerű, vonalmenti, valamint felületi támaszok elhelyezésére is.

5. TERHEK ÉS HATÁSOK FELVÉTELE, SPECIÁLIS TEHERESETEK

A végeselemes programban lehetőség van különböző terhek, így például erők, elmozdulások, hőmérsékleti hatások felvételére. Az ipari padlók tervezése során jellemzően az erő jellegű terhek a megszokottak, hiszen a padlót megadott erőkre kell megfeleltetni. Ezen erők kiterjedésüket tekintve lehetnek pontszerűek (kerékterhelés, polclábtétel), vonal mentiek (sín, daruvezető sín), és felületen megoszlók (tárolt anyagok, konténerek). Elmozdulás jellegű teherről padlók vizsgálata során érdemes beszélni, ahol az adott tesztpadlót laboratóriumi körülmények között elmozdulás vezérelten terhelnek, hogy így a padló tönkremenetel utáni leszálló ága is vizsgálható legyen.

Speciális terhelésű padlók is modellezhetők a végeselemes szoftverek segítségével, így például hűtőházak padlói vagy napon lévő padlók hőteherre kerülnek méretezésre. Ebben az esetben a szoftver lehetőséget nyújt a hőteher lineáris változtatására, mely segítségével figyelembe vehető, hogy a felső rétegek jobban áthűlnek/felmelegednek, mint a talajhoz közelebb eső részek. Mint ahogy korábban említettük, lehetőség van továbbá a padló zsugorodásából keletkező alakválto-

zások teherként történő működtetésére, mely a padló kezdeti állapotaiban lehet mértékadó.

A speciális teheresetek között feltétlenül szükséges megemlíteni a tűzterhelést is. Végeselemes szoftver segítségével, hasonlóan a zsugorodási modellhez, lehetőség van hőmérséklettől függő anyagmodell definiálására, mely így figyelembe tudja venni a beton paramétereinek csökkenését a hőmérséklet-növekedés hatására.

A felsoroltakon kívül lehetőség van még a betonacélok korróziójának, a beton kúszásának, valamint a betonacélok tapadásromlásának a figyelembe vételére is.

A végeselemes számítások során mód nyílik a statikus terhek mellett dinamikus és fárasztó jellegű terhelések modellezésére is. Dinamikus esetben a teherátadás sebessége is modellezhető, mellyel akár ütközésszerű teheresetek szimulálása is lehetséges. A fáradási számítások betonszerkezetek esetén is kiemelt fontosságúak, ha a padlón a teher ismétlődésszáma igen magas, így például rendszeres forgalomnak kitett raktárcsarnokok ipari padlói, vagy olyan padlók, melyeken ipari daru síne fekszik. Ebben az esetben a végeselemes szimulációval lehetőség nyílik annak a megállapítására, hogy a padló elviseli-e az akár több milliós terhelési ciklust, illetve, hogy hányadik ciklus után merül ki a teherbírási tartaléka. Ilyen számításokkal életciklus-tervezés is lehetségessé válik.

6. ÖSSZEHASONLÍTÁS LABORÁTORIUMI KÍSÉRLETEKKEL

A szakirodalomban viszonylag kevés valódi méretű padlótesztelés lelhető fel, mely oka valószínűleg a nagy laborigény és a tesztelés bonyolultsága.



Az alábbi grafikon egy valós teszt [5] és a különböző irányelvek, ipari padlóra vonatkozó számítási képletek, valamint vége-selemes számítások eredményeit tartalmazza (3. ábra). Az eredmények az ipari padló mezőközepére vonatkoznak. Jól látható, hogy az egyes analitikus számítások a padló teherbírását alulról közelítik, a számításokban jelentős tartalék van. Falkner és Shentu vége-selemes számításai nem járnak messze a valós teszt eredményeitől, ugyanakkor magasabb teherbírási értéket határoznak meg,

mint a tényleges teherbírás, így a közelítés nem a biztonság javára történik. A fent bemutatott számítási móddal elkészítettük a saját vége-selemes modellünket is, mely szintén jó közelítést ad a padló tényleges teherbírására.

Ezek alapján kijelenthető, hogy a vége-selemes szoftverek segítségével jó közelítés adható a padló teherbírására, a szabványok által meghatározott formulák csak jelentős biztonsággal tudják meghatározni az ipari padlók törőterhét.

7. HAZAI ÉS KÜLFÖLDI REFERENCIÁK

A fent bemutatott módszerrel több nemzetközi projekt számításai is elkészültek. Számtalan esetben a bonyolult teherelrendezés, vagy a változó padlóvastagság nem tette lehetővé a szabványok alkalmazását, ebben az esetben készültek a számítások vége-selemes szoftver felhasználásával. Több alkalommal a már elkészült ipari padló teherbírását kellett meghatározni utólagosan, a csarnok funkcióváltása miatt. Ezekben az esetekben a valósághoz igen közelálló teherértékre volt szükség, hiszen a beruházás csak abban az esetben valósulhatott meg. A szabványok által bemutatott tervezési mód nem tette lehetővé a jelentős biztonságok miatt a számítások elvégzését, így a vége-selemes szoftverek használata feltétlenül szükségessé vált. Magyarországi példa a méretezési módszer használatára a



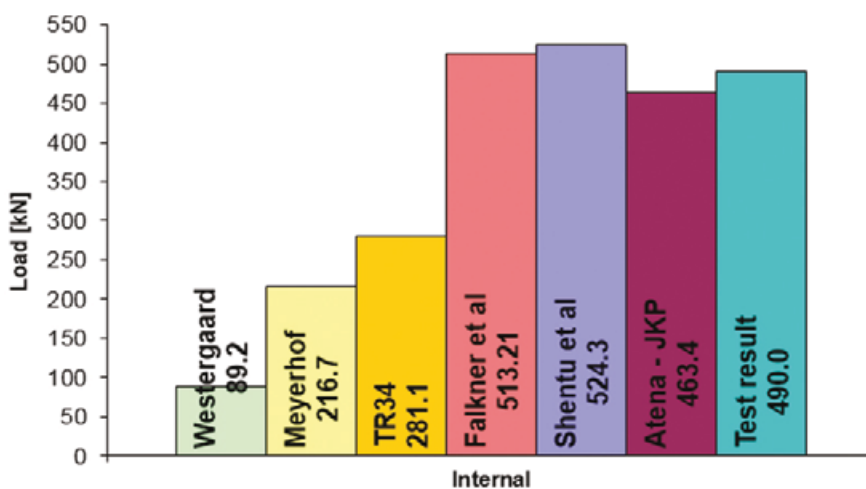
gödöllői gördeszka pálya, ahol a repedésekre vonatkozó szigorú feltételek és a geometria bonyolultsága miatt volt szükség fejlett vége-selemes módszer használatára.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikkben a beton ipari padlók fejlett vége-selemes számítása került bemutatásra. Vége-selemes számításra abban az esetben lehet szükség, ha a padló geometriája, vagy a teher elrendezése bonyolult, és így nem számítható a korábbi cikkekben bemutatott irányelvekkel. Továbbá ezzel a módszerrel a már megépített és esetleg hibásan tervezett vagy kivitelezett padlók ellenőrzése és megerősítése is lehetséges. A repedéskép elemzésével a padló megrepedésének oka is megállapítható. Fontos, hogy erősített betonlemez (vasbetéttel, hegesztett hálóval, vagy valamilyen szálerősítéssel ellátott) csak nemlineáris beton anyagmodellel rendelkező vége-selemes szoftverrel méretezhető pontosan, a mindennapokban szerkezettervezésre használt szoftverek (AXIS, FemDESIGN, ConSteel) erre nem alkalmasak. A fejlett vége-selemes számítási módszer alkalmazásához fejlett számítógépes háttér szükséges, valamint az ezt alkalmazó mérnöknek komoly vége-selemes módszer ismerettel kell rendelkeznie, hogy a paraméterek megfelelően legyenek beállítva.

Az említett előnyök és hátrányok mellett jelenleg ez a módszer alkalmazható speciális ipari padló tervezési esetekben, és a jövőben még nagyobb térnyerése várható.

Atena Load and other Calculated Loads for FRC Concrete_50Mpa



▲ 3. ábra Számítási módszerek összehasonlítása, [5] alapján kiegészítve a saját eredményeinkkel

Felhasznált irodalom:

- [1] Cervenka, J., Papanikolaou V.K. 2008. Three dimensional combined fracture-plastic material model for concrete, *International Journal of Plasticity* (24), pp 2192-2220.
- [2] Cervenka, V., Jendele, L., Cervenka, J. 2013. ATENA Program Documentation: Part 1 Theory. Prague: Cervenka Consulting s.r.o. 318 p.
- [3] Juhász, K.P. 2013, "Modified fracture energy method for fibre reinforced concrete", in: *Proceedings of Fibre Concrete 2013: Technology, Design, Application*. Prague, Czech Republic 2013, pp. 89-90.
- [4] ITAtech Activity Group Support. 2016. ITAtech Design Guidance for Precast Fibre Reinforced Concrete Segments – Vol. 1: Design aspects. ITAtech Report N°7. Avignon: Longrine. 48 p.
- [5] Elsaigh W.A.: A Comparative Evaluation of Plain and Steel Fiber Reinforced Concrete Ground Slabs, University of Pretoria, 2001