



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

BETONGERENDÁK REPEDÉS OKOZTA KÁROSODÁSÁNAK VIZSGÁLATA FREKVENCIAMÉRÉSEKKEL

A PhD értekezés tézisei

KOVÁCS Tamás

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszéke

Tudományos vezető:

Dr. habil FARKAS György

Egyetemi tanár

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszéke

Budapest, 2010.

1. BEVEZETÉS

A tapasztalatok szerint az építőmérnöki szerkezetek az előírt szinten, az előírt megbízhatósággal (az előírt biztonság és használhatóság mellett) a tervezési élettartam alatt üzemeltethetők gazdaságosan. Ezen időszak alatt különböző, a tartósságukat kedvezőtlenül befolyásoló károsító hatások érik őket. A közelmúltban „Használati élettartamra való tervezés” címmel megjelent *fib* Model Code a megfelelő tartószerkezeti állapotnak a tervezési élettartam alatti fenntartásához az 1.1. táblázat szerinti állapotvizsgálatok alkalmazását javasolta.

1.1. táblázat Állapotvizsgálati szintek a „Használati élettartamra való tervezés” c. *fib* Model Code szerint

Állapotvizsgálat szintjei	A felülvizsgálat mértéke	Példák
3. szint (CCL3)	Kiterjedt felülvizsgálat	A károsodás szempontjából fontos jellemzők rendszeres felülvizsgálata és/vagy <i>monitoring</i> rendszer üzemeltetése
2. szint (CCL2)	Szokásos felülvizsgálat	Rendszeres, szakember általi szemrevételezés
1. szint (CCL1)	Szokásos felülvizsgálat	Alkalomszerű felülvizsgálat
0. szint (CCL0)	Nincs felülvizsgálat	Felülvizsgálat <i>nem lehetséges</i> , pl. a megközelíthetőség hiánya miatt

Az építőmérnöki szerkezeteknél alkalmazott állapotvizsgálatok célja a károsodás kimutatása. *Rytter (1993)* szerint egy teljes körű károsodásvizsgálati eljárásnak a következő négy szintje van:

1. szint: *Felismerés*: Annak felismerése, hogy a szerkezet valamely pontján károsodás keletkezett
2. szint: *Lokalizáció*: A károsodás helyének meghatározása a szerkezeten
3. szint: *Mértékbecslés*: A károsodás mértékének meghatározása
4. szint: *A fennmaradó használati élettartam* becslése

A jelen értekezés különbséget tesz „károsodás-kimutatás” és „károsodás-értékelés” között. A károsodás-értékelés olyan értékelési eljárást (módszert) jelent, mely a szerkezeti válasz elemzése alapján információt szolgáltat a szerkezet teljesítőképességéről. A károsodás-kimutatás a károsodás-értékelés előfeltételeként az előző rendszer (1-4. szintek) első három szintjére irányuló tevékenységeket fedi le.

A károsodásvizsgálat – az alkalmazott módszer által vizsgált (mért vagy számított) paraméter jellegétől függően – statikai (hagyományos statikus próbaterhelés) vagy dinamikai (rezgésvizsgálat) alapon is elvégezhető. A rezgésvizsgálatokhoz általában kevesebb felszerelés szükséges és ezek a szerkezet funkcióját kisebb mértékben korlátozzák, mint a hagyományos statikus próbaterhelések.

1.1. Rezgésvizsgálaton alapuló meglévő módszerek károsodás-kimutatáshoz és értékeléshez

A rezgésvizsgálaton alapuló károsodás-kimutatás ötlete speciális építőmérnöki szerkezetek esetén merült fel, amikor az olajipar figyelme a tengeri szerkezetek (olaj fűrotornyok, világítótornyok) felülvizsgálatára összpontosult. Napjainkban a rezgésvizsgálaton alapuló károsodás-kimutatást elsősorban hidak monitoring programjának részeként alkalmazzák.

E módszerek alapja az, hogy a szerkezet modális jellemzői (önrezgésszámok, sajátalakok, csillapítási jellemzők) a fizikai (tömeg, merevség, belső csillapítás) és a szerkezeti (geometria, megtámasztási feltételek) jellemzők függvénye. Ezért a fizikai és/vagy szerkezeti jellemzőkben bekövetkező bármilyen változás a modális jellemzők megváltozását eredményezi, mely egy alkalmas diagnosztikai módszerrel kimutatható. A meglévő módszereket gyakran az eljárás során vizsgált (mért és/vagy számított) dinamikai jellemzők szerint a következőképpen osztályozzák (*Doebling és társai, (1996, 1998)*):

- Az önrezgésszámok megváltozásán alapuló módszerek,
- A sajátalakok vagy az azokból számított jellemzők megváltozásán alapuló módszerek,
- A csillapítási jellemzők megváltozásán alapuló módszerek,
- A dinamikai úton mért hajlékonyság megváltozásán alapuló módszerek,
- A szerkezeti mátrixok módosításán alapuló módszerek,
- Nemlineáris módszerek.

A kísérleti és gyakorlati alkalmazás szempontjából e módszerek hatékonysága eltérő i) a vizsgált dinamikai jellemzőben megjelenő, szerkezetre vonatkozó információtartalom mértékétől, ii) a szükséges számítási igénytől és iii) a módszer károsodásra való érzékenységétől függően.

1.2. A kutatás háttere

A rezgésvizsgálaton alapuló károsodásvizsgálati módszerek elsősorban a károsodás felismerésére, lokalizálására és esetenként a mértékének a meghatározására irányulnak, azonban a szerkezet teljesítőképességéről nem adnak információt. Ezért szükség van olyan károsodás-értékelési módszerekre, melyek nemcsak dinamikai alapon történő károsodás-kimutatásra alkalmasak, hanem a szerkezet teljesítőképességéről is információval szolgálnak. Ez az alapja egy, az előző rendszer szerinti 3. szintet követő új, 3a károsodásvizsgálati szint meghatározásának:

3a szint: A szerkezet teljesítőképességének *értékelése* károsodás-értékelés alapján.

1.3. A kutatás célkitűzései

A kutatás elsődleges célja 3a szintű, repedezettséggel összefüggő károsodás-értékelés végrehajtása betongerendákon, kísérleti körülmények között. A 3a szintű vizsgálat elérése érdekében a kutatás célkitűzései a következők:

- A meglévő, rezgésvizsgálaton alapuló károsodásvizsgálati módszerek által képviselt vizsgálati szintek bemutatása. A 3a szintű kísérleti vizsgálat eléréséhez szükséges feladatok meghatározása.
- A repedés okozta károsodás kísérleti modellezése különböző típusú betongerendákon.
- Numerikusan rögzített rezgésadatok kezelésére alkalmas jelfeldolgozó eljárások kidolgozása, majd a meghatározott dinamikai jellemzők (jelen esetben az első két önrezgésszám) statisztikai értékeléséhez szükséges adatbázis létrehozása. A károsodási állapotok megkülönböztetésére alkalmas frekvenciavizsgálati eljárások kidolgozása.
- A repedés okozta károsodás kimutatására és a mértékének a meghatározására alkalmas károsodási indexek definiálása (károsodás-kimutatás).
- A szerkezet mért dinamikai jellemzői és a legfontosabb teljesítőképességi adatai közötti összefüggések meghatározása (károsodás-értékelés).
- A módszer (vagy annak egy részének) alkalmazása meglévő szerkezeten.

A napjainkban végzett helyszíni próbaterheléseket általában akkor tekintik sikeresnek, ha a vizsgált paraméter számított (modell alapú) és szerkezeten mért (nem modell alapú) értéke közötti különbség nem halad meg elfogadott mértékét. Ez a mérték a számítási modellben alkalmazott (geometriára, anyagjellemzőkre, terhekre, anyagmodellre, stb. vonatkozó) feltételezések következményeiből származó modellbizonytalanságokat veszi figyelembe. A dinamikai modellek esetén a statikai modellekhez képest további, a károsodott, rezgésben lévő szerkezet (gyakran nemlineáris) viselkedésére vonatkozó feltételezésekre van szükség, mely további modellbizonytalanságokat eredményez. Ezét a kutatás további célkitűzése volt az, hogy a károsodási indexek meghatározása dinamikai modellek felépítése és alkalmazása helyett statikai modellek alapján történjen (statikai alapú indexek).

2. A KUTATÁSI EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE

2.1. A károsodás értelmezése és modellezése

A kísérletek során a károsodás modellezése vasbeton gerendák esetén mesterséges repedések létrehozásával, előfeszített vasbeton gerendák esetén mesterséges repedések létrehozásával és feszítőbetétek elvágásával történt. A károsodás mértékét a repedezettség mértéke és az elvágott feszítőbetétek miatti hatékony feszítőerő-csökkenés mértéke jellemezte. Néhány, e kísérlet során már károsodott vasbeton gerendán – szerkezet-megerősítés modellezése céljából – utófeszítést alkalmaztam. A repedések létrehozása és a repedezettség mértékének növelése - egy kísérleti károsodási folyamat keretében – több lépésben, tiszta hajlítással történt. Nyírás miatti károsodást nem modelleztem; a kísérleti paraméterek felvétele ennek megfelelően történt.

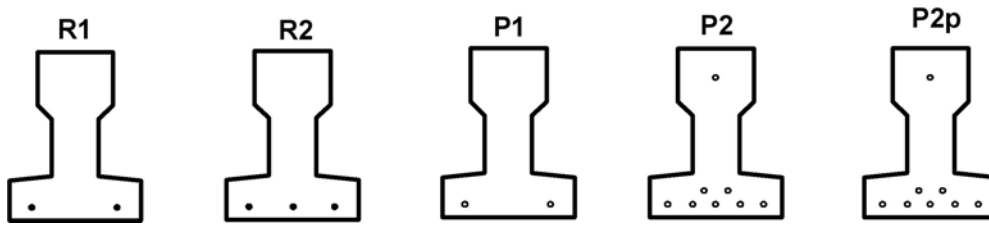
2.2. Kísérleti károsodási folyamat

Azonos betonkeresztmetszetű, 190 mm magasságú, különböző vasalással ellátott (2.1. táblázat, 2.1. ábra), nem feszített (P1, P2, R1, R2) és feszített (P2p) modellgerendákat vizsgáltam.

2.1. táblázat A modellgerendák geometriai és vasalási adatai

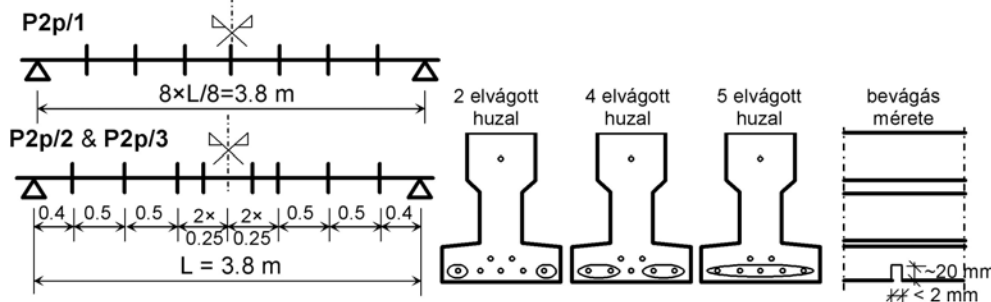
Típus	Gerenda szám	Hossz		Szilárdság $f_{pk}/f_{p0,1k}$ or f_{tk}/f_{yk} [N/mm ²]	Típus (felület)	Vasalás db és ϕ [mm]	Acélhányad, ρ [%]		Kezdeti feszítés
		Teljes hossz L_b [m]	Támasz köz L [m]				$A_s/(b_w d)$	A_s/A_c	
P1	1	3,4	3,2	1770/1520	feszítőacél (tr.)	2 ϕ 5,34	0,527	0,284	nem feszített
R1	4	4,4	3,8	600/500	lágycél (sp.)	2 ϕ 8	1,183	0,636	-
P2	3	4,4	3,8	1770/1520	feszítőacél (tr.)	(7+1) ϕ 4,7	1,436	0,769	nem feszített
R2	3	4,4	3,8	600/500	lágycél (sp.)	3 ϕ 8	1,774	0,955	-
P2p	3	4,4	3,8	1770/1520	feszítőacél (tr.)	(7+1) (5+1) (3+1) (2+1) ϕ 4,7	1,436 1,040 0,645 0,449	0,769 0,549 0,329 0,220	0,61 f_{pk}

Az összes gerenda prizmatikus kialakítású, sem a betonkeresztmetszet, sem a vasalás nem változott a hossz mentén.



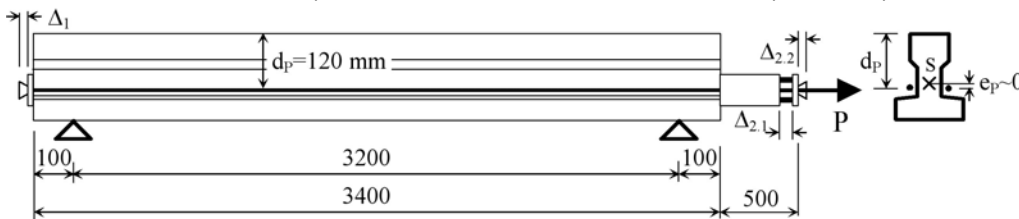
2.1. ábra A modellgerendák keresztmetszete

A P2p típusú gerendák esetén a feszítőbetét-szakadás modellezése a gerenda hossza mentén több keresztmetszetben (szakadási helyek), az alsó övben elhelyezkedő, előírányzott számú betét (feszítőhuzal) betonfedésen keresztüli elfűrészelésével történt (2.2. ábra).



2.2. ábra Huzalelvágások a P2p típusú gerendák esetén

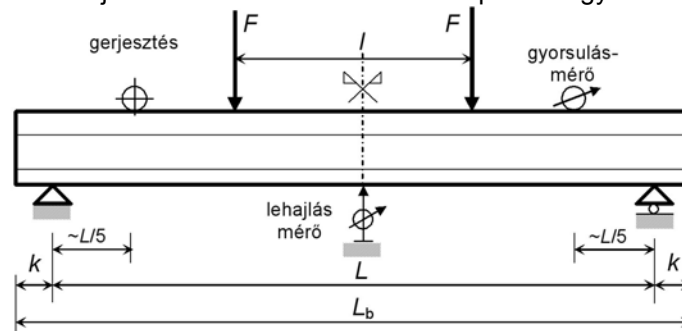
A szerkezet-megerősítés modellezése néhány, a teljes károsodási folyamaton már átessett nem feszített gerenda (P1, R1/4, R2/1, P2/1, P2/2) külső kábeles utófeszítésével történt (2.3. ábra).



2.3. ábra Az utófeszítés elrendezése és geometriája a P1 gerenda esetén

Az összes gerenda egy kísérleti, több, pontosan meghatározott lépésben (melyeket 1-5 (a P2/1 és P2/2 gerendák esetén 1-7) állapotok jelölik) végrehajtott károsodási folyamaton esett át. Ezt követően – egy lehetséges szerkezet-megerősítésként – a kiválasztott, nem feszített gerendák külső kábeles utófeszítése történt (6p-8p állapotok).

Az előírányzott mértékű repedezettséget az egyes károsodási állapotok *terhelési fázisaiban* hoztam létre a 2.4. ábra szerinti négypontos hajlítás során. Minden károsodási állapothoz egy terhelési fázis tartozott.



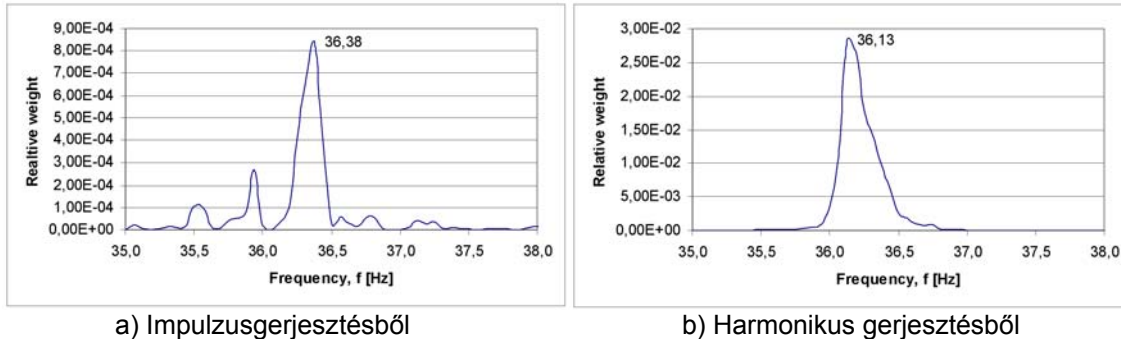
2.4. ábra A gerendák elrendezése a négypontos hajlítás során

Minden károsodási állapot egy *dinamikai mérési fázissal* végződött, melyben az első két önrezgésszám meghatározása történt. Az önrezgésszámok számszerű értékei a rezgési adatok statisztikai feldolgozásából adódtak. Kétfajta gerjesztést vizsgáltam. Az első, egy gerendára kifejtett, gumikalapáccsal létrehozott mechanikai impulzus volt. A második, egy periodikus jelet kibocsátó gerjesztő berendezés (2.4. ábra) által létrehozott közel harmonikus hatás volt, mellyel csak az önrezgésszámok szűk környezetének gerjesztése történt közel állandó gerjesztő erővel. A gyorsulás-idő ($a-t$) jelet az első esetben a gerendák impulzust követő szabadrezgése alatt, a második esetben a gerendák rezonancia közeli, közel harmonikusan gerjesztett rezgése során rögzítettem. A rezonancia állapotát a gerjesztőfrekvenciának a kimérni kívánt önrezgésszámmal történt összehangolása révén hoztam létre.

2.3. Jelfeldolgozás

A rögzített $a-t$ jeleket először diszkrét Fourier transzformációval *egyedi frekvenciaspektrumokká* transzformáltam, majd azokat statisztikailag elemeztem.

Kimutattam, hogy mindkét gerjesztésnek vannak olyan jellegzetességei, melyek az egyedi frekvenciaspektrumokban elfogadhatatlan mértékű hibát eredményezhetnek. E hibák relatív súlyának csökkentése érdekében legalább 30 egyedi frekvenciaspektrum átlagát képeztem, melynek eredményeként átlagos frekvenciaspektrumokat (2.5. ábra) határoztam meg (átlagspektrum-módszer).

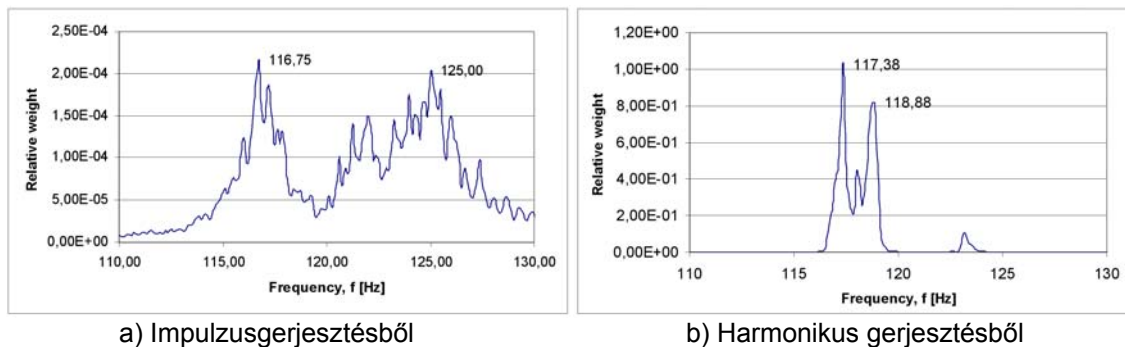


a) Impulzusgerjesztésből

b) Harmonikus gerjesztésből

2.5. ábra Átlagos frekvenciaspektrumok az első önrezgésszám (f_1) meghatározásához (P1 ger., 0 állapot)

Az átlagos frekvenciaspektrumokból az f_1 önrezgésszám általában nagy megbízhatósággal kiolvasható volt. Ez esetben a megbízhatóság mértékét az egyedi frekvenciaspektrumok maximális ordinátáihoz tartozó frekvenciák relatív szórása jellemezte. Azonban megfigyelhető volt, hogy jelentős mértékben összerendezett gerendák esetén az akár impulzus-, akár harmonikus gerjesztésből származó jelek alapján meghatározott átlagos frekvenciaspektrumokban az f_2 önrezgésszám környezetében gyakran többszörös csúcsok jelentkeztek (2.6. ábra). Ennek feltételezett oka az aszimmetrikussá vált repedéskép miatt kialakuló nem szimmetrikus merevségeloszlás volt. Ennek következtében a szigorúan antimetrikus sajátalakhoz tartozó önrezgésszám kismértékben eltolódott és egy újabb, az eltolódott önrezgésszámhoz közeli, másodlagos csúcsot eredményező, (virtuális) frekvencia jelent meg a frekvenciaspektrumban. E feltételezés kétféleképpen is alátámasztható volt. Egyrészt az ilyen többszörös csúcsok az f_1 önrezgésszám környezetében - melyhez tartozó módusban a teljes gerenda azonos fázisban rezeg – elhanyagolható számban fordultak elő. Másrészt az f_2 körüli többszörös csúcsok csak erőteljes repedezettséghez tartozó állapotokban (ahol a nem szimmetrikus repedéskép előfordulásának valószínűsége nagyobb) jelentkeztek.



a) Impulzusgerjesztésből

b) Harmonikus gerjesztésből

2.6. ábra Az f_2 környezetében többszörös csúcsot tartalmazó átlagos frekvenciaspektrumok (P1 g., 4. áll.)

Mivel nem szimmetrikus repedéskép gyakran előfordult és terhelés révén lényegében nem volt elkerülhető, ezért ahol az átlagos frekvenciaspektrumban a lokális al-csúcsok relatívan távol estek egymástól, fontos volt állást foglalni a tekintetben, hogy mi tekinthető önrezgésszámnak e többszörös csúcsok környezetében. A kiértékelés során két esetet különböztettem meg. A gyakoribb esetben az egyes al-csúcsok nem voltak dominánsak a másikkhoz képest (közel azonos relatív súlyuk volt) az egyedi frekvenciaspektrumokban. Ez esetben az f_2 önrezgésszámot az egyedi frekvenciaspektrumok lokális al-csúcsaihoz tartozó frekvenciák egyszerű átlagaként határoztam meg (átlagfrekvencia-módszer). Azonban olyan esetekben, amikor az al-csúcsok relatív súlya számottevően különbözött és így az egyik az összes egyedi frekvenciaspektrumban domináns volt a másikkhoz képest (ez az eset fordult elő akkor, ha a két fél gerendahosszon kialakuló hajlítási merevség jelentősen különbözött egymástól), az átlagfrekvencia-módszer csak a domináns csúcsokat vette figyelembe. Ekkor a harmonikus gerjesztéshez szerkesztett egyedi frekvenciaspektrumokon pontosan meghatároztam mindkét al-csúcsához tartozó frekvenciákat, majd azokat azonos relatív súllyal vettem figyelembe az átlagfrekvencia számítása során. Az átlagfrekvencia-módszer alkalmazása során a többszörös csúcsok jelenlétével kapcsolatos információvesztés elkerülése érdekében az átlagfrek-

venciához tartozó szórást is meghatároztam (mely sokkal nagyobbra adódott, mint többszörös csúcsok nélküli frekvenciák esetén).

A P1 gerenda esetén a kétfajta gerjesztésből származó a - t jelek alapján számított önrezgésszámok szoros egyezése miatt a további vizsgálatokhoz általában az impulzusgerjesztéshez tartozó jeleket használtam.

2.4. A károsodási indexek meghatározása

Károsodási indexeket a szerkezet állapotával kapcsolatos információk numerikus formában történő megadása céljából definiálnak. Bármilyen szerkezeti károsodás az indexben foglalt szerkezeti információt módosítja, melyet az index értékének megváltozása jelez.

A jelen kutatás során károsodási indexeket a károsodás-kimutatáshoz alkalmaztam, és azokat a következőképpen osztályoztam. A szerkezettel kapcsolatos információtartalom jellege alapján globális vagy lokális indexeket különböztettem meg. Lokális index esetén az index értéke a gerenda egy lokális szakaszának jellemzőitől függ. A globális indexek általában a gerenda több (lehetőleg összes) szakaszának jellemzőitől függő szerkezeti paraméterekből számíthatók.

A nem modell alapú indexek vagy a terhelési fázisok során vagy azt követően mért statikai jellemzők, vagy azokból számítási modell alkalmazása nélkül származtatott értékek. A modell alapú indexeket egy előzetes modellen alapján számítással határozzák meg. A jelen kutatás során a nem modell alapú indexeket egyrészt a gerendák szerkezeti viselkedésének kísérleti jellemzésére, másrészt a számított modell alapú indexek alkalmazhatóságának megegyezőségi vizsgálatokkal való ellenőrzésére használtam.

A károsodási indexek meghatározása a következő feltételezéseken alapult:

- A repedések környezetében elnyelt energia mértéke egyenesen arányos az adott terhelési fázisban működő terhelő erők által a gerendával közölt munkával.
- A hajlítási merevség csökkenése egyenesen arányos a repedezettség mértékével, melynek mértékét a repedések száma és tágassága jellemez.

A károsodási indexeket úgy definiáltam, hogy ha a károsodási folyamat egy közbelső állapotában nem keletkezik új károsodás, akkor az indexnek az adott állapothoz tartozó értéke legyen azonos a megelőző állapothoz tartozó értékkel. Az indexek e halmazott formája a károsodás mértékének becslésére (3. szint) használható. A károsodás felismeréséhez (1. szint) a halmazott index egymást követő állapotok során kialakuló növekményét kell meghatározni, melynek értéke új károsodás hiányában zérus. A jelen kutatásban az alkalmazott károsodási indexeket ez utóbbi növekményes formában határoztam meg:

A következő nem modell alapú (mért) károsodási indexeket határoztam meg:

- Összegzett repedéshossz-növekmény (Δl_r)** – globális index
Az összegzett repedéshossz az egyedi repedések hosszát összegzi a gerenda egyik oldalán.
- Mezőközépi teljes (Δa_{tot}) és maradó (Δa_{res}) lehajlás-növekmény** – globális index
- Mezőközépi repedéstágasság-növekmény (Δw)** – lokális index
Ezen index a mezőközépi keresztmetszet $\sim 0,5$ m-es környezetében előforduló, legnagyobb tágasságú, lélegző repedést tágasságára vonatkozik.

A modell alapú indexek névleges geometriai méreteken, az anyagjellemzők várható értékén és a működtetett terhek névleges értékein alapultak. Lineárisan rugalmas, felső korlát nélküli feszültség-fajlagos alakváltozás függvényen alapuló, ezért a számítási modellben a képlékeny alakváltozások figyelembevételére nem alkalmas anyagtörvényt alkalmaztam. A szerkezeti viselkedést az Eurocode 2 szerinti görbület

$$\rho(x) = \zeta(x) \frac{M(x)}{E_{cm} I_{II}(x)} + [1 - \zeta(x)] \frac{M(x)}{E_{cm} I_I(x)} \quad (1)$$

és repedéstágasság

$$w_{calc} = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (2)$$

modellekkel írtam le. A jelen kísérleti vizsgálatokhoz a következő modell alapú (számított) károsodási indexeket határoztam meg:

- Összegzett repedésfelület-növekmény (ΔA_r)** – globális index (2.7. ábra), ahol

$$A_r = \sum_{L_{r,i}} \frac{s_{r,i}}{s_{r,max}} A_{r,i} \quad (3)$$

ahol $L_{r,i}$ a gerenda berepedt hossza az i -edik károsodási állapotban, $s_{r,i}$ azon távolság az $L_{r,i}$ hosszban belül, melyen a w_{calc} és a h_r értékek (mindkettő szerepel az $A_{r,i}$ mennyiségben) átlagolva lettek.

- Számított mezőközépi teljes lehajlás-növekmény (Δa_{calc})** – globális index
- Számított mezőközépi repedéstágasság-növekmény (Δw_{calc})** – lokális index
- Alakváltozási energia-növekmény (ΔW)** – globális index, ahol

$$W = \int_{L_r} M(x) \rho(x) dx \quad (4)$$

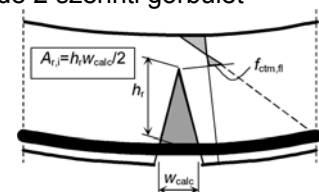
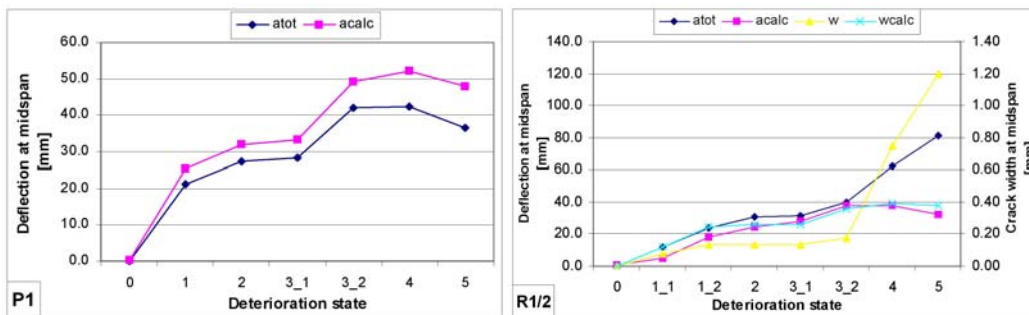


Fig.2.7 Assumed section of an individual crack

Ezen index azon a feltételezésen alapul, hogy egy megelőzően hajlításra berezpett, majd egy $M(x)$ nyomatékka úja megterhelt vasbeton gerendában az új terhelés hatására létrejövő károsodás-növekmény egyenesen arányos az új terheléshez tartozó alakváltozási energiának a megelőző terheléshez tartozó alakváltozási energián felüli növekményével.

A modell-alapú indexeknek a szerkezeti viselkedés jellemzésére való alkalmasságát a (lehajlás és repedéstágassággal kapcsolatos) nem modell alapú indexekkel való megfelelés vizsgálatával ellenőriztem (2.8. ábra).



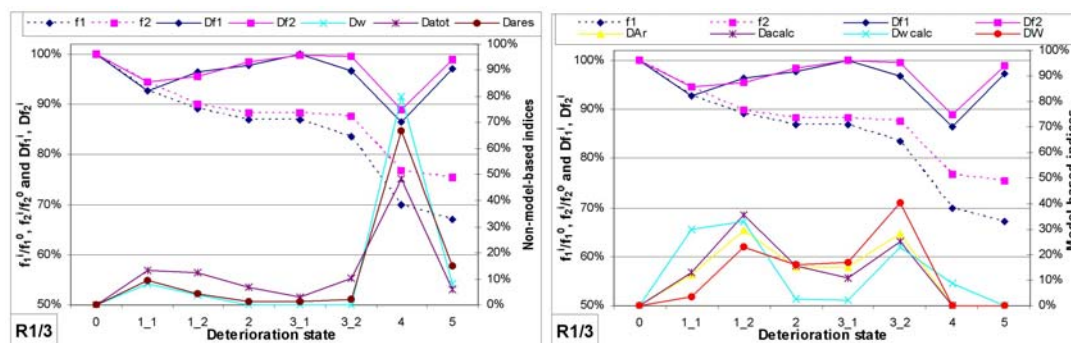
2.8. ábra A nem modell alapú és modell alapú indexek megfelelési vizsgálata

Azon állapotokat kivéve, melyekben képlékeny alakváltozások léptek fel (pl. R1/2 gerenda 4. és 5. állapot), a lehajlással és repedéstágassággal kapcsolatos megfelelő indexek között általában jó egyezés adódott. Mindez összhangban volt a modell alapú indexeknél alkalmazott (lineárisan rugalmas) anyagtvénnyel.

2.5. Károsodás-kimutatás és károsodás-értékelés a modellgerendákon

Károsodás-kimutatáshoz a károsodási indexek és a mért önrezgésszámok ($\Delta f = f - f^{-1}$; i a károsodási állapot számát jelöli) növekményes formáit használtam.

A felismerés (1. szint) során a valószínű károsodást a károsodási indexek egyes állapotokhoz tartozó nagy értékei jelzik. A tényleges károsodást a Δf (Δf_1 és/vagy Δf_2) függvénynek a károsodási index függvényéhez hasonló alakja igazolja vissza (felismert károsodás). A legtöbb gerenda esetén általában jó egyezés adódott mind az alkalmazott nem modell alapú (2.9a ábra) indexek függvényeinek alakja, mind az alkalmazott modell alapú indexek (2.9b ábra) függvényeinek alakja, mind a nem modell alapú és modell alapú indexek függvényeinek alakja között. A többi indexszel ellentétben a Δw_{calc} index a lokális jellege miatt rendszeresen nagyobb károsodást jelzett az első repedéshez tartozó állapotokban, majd kisebb károsodás-növekményt mutatott az ezt követő állapotokban. A képlékeny alakváltozásokat egyértelműen kimutatták a nem modell alapú indexek és teljesen figyelmen kívül hagyták a modell alapú indexek. A károsodásokat mind a Δf_1 , mind a Δf_2 függvények jelezték az első repedéshez és a képlékeny alapváltozáshoz tartozó állapotokban.

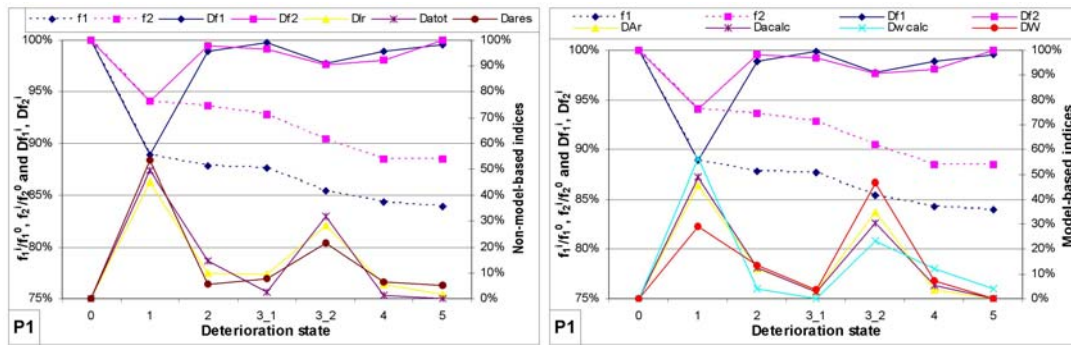


2.9. ábra A nem modell alapú és a modell alapú indexek összehasonlítása az R1/3 gerenda esetén

A mértékbecslés (3. szint) a növekményes indexek értékeinek nagyságra összpontosít. Ezen értékek a vizsgált állapotban kialakuló károsodás mértékével arányosak. Nagy amplitúdók adódtak az összes gerenda esetén az első repedés megjelenéséhez tartozó állapotokban és az érintett gerendák esetén a képlékeny alakváltozások megjelenésekor. Az e zónákon kívül gerendaszakaszok intenzív repedezettségét az indexek nagy értékei szintén jelezték (pl. P1 gerenda 32 állapot, 2.10. ábra). A Δf függvények amplitúdójának hasonló arányai alátámasztották a károsodási indexek előrejelzését.

A lokalizálás (2. szint) a Δf_1 és Δf_2 azonos állapotokhoz tartozó amplitúdóinak állapotonkénti összehasonlításán alapult (a Δf függvények lefutásának vizsgálata). Egy önrezgésszám-változást legnagyobb mértékben a hozzá tartozó sajátalak maximális amplitúdóinak környezetében kialakuló károsodás befolyásol. Ezért – az alkalmazott teherelrendezést figyelembe véve – a mezőközéphez közeli terhelő erőkhöz tartozó állapo-

tokban $\Delta f_1 > \Delta f_2$, a mezőközepétől távoli erők esetén $\Delta f_1 < \Delta f_2$ arány volt várható, melyet az eredmények alátámasztottak (2.10. ábra).



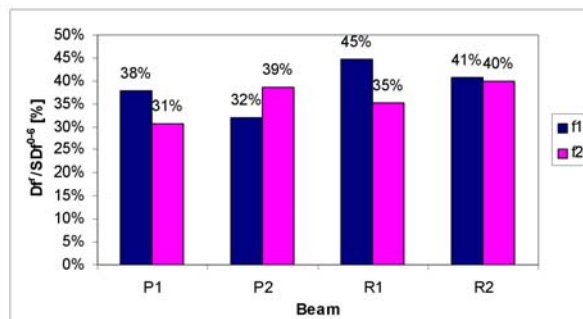
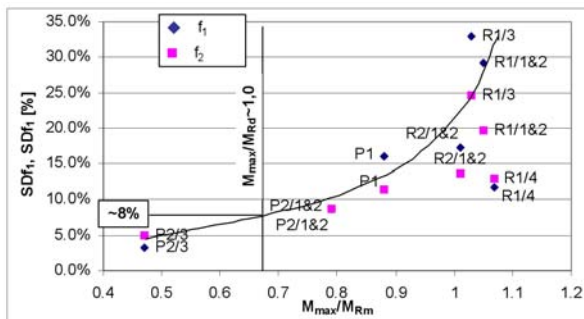
2.10. ábra Az önrezgésszám változása és a károsodási indexek értékei a P1 gerenda esetén

A károsodás-értékelés a mért önrezgésszámok (és azok származtatott jellemzői) és a szerkezet teljesítő-képessége közötti összefüggések meghatározására irányult. A fő cél az önrezgésszám-változások alapve-tő tendenciáinak és lehetséges tartományainak meghatározása volt a jellegzetes károsodási állapotokban.

▪ A nem feszített (vasbeton) gerendák esetén a következő összefüggéseket vizsgáltam:

a) Az erőtani kihasználtság hatása az önrezgésszámok csökkenésére ($\Sigma\Delta f$)

Az erőtani kihasználtság mérőszáma a mezőközepi legnagyobb hajlítónyomaték (M_{max}) és egy ellenállás-oldali oldali paraméter, mint pl. M_r , M_{Rd} vagy M_{Rm} hányadosa volt. Az M_{max}/M_{Rd} arány használata tervezés-kor, az M_{max}/M_{Rm} arányé kísérletek esetén javasolt. Az f csökkenését ($\Sigma\Delta f$) általában a $\Sigma\Delta f = f^{ast} - f^0$ össze-függéssel számítottam, ahol f^{ast} és f^0 az f_1 és f_2 értékei voltak sorrendben a legnagyobb M_{max} -hoz (legna-gyobb károsodás) és a 0 állapothoz (nincs károsodás) tartozó károsodási állapotokban (2.11. ábra). Látha-tó, hogy a $\Sigma\Delta f$ egyértelműen növekedett az M_{max}/M_{Rm} arány növekedésével. $M_{max}/M_{Rm} \approx 0.9$ -tól kezdve a $\Sigma\Delta f$ sokkal nagyobb mértékben növekedett, mint azt megelőzően, ami egyértelműen jelezte a képlékeny alak-változások megjelenését. Az $M_{max}/M_{Rm} \approx 1$ arányhoz tartozó gerendák esetén $\Sigma\Delta f > 15\%$ volt megfigyelhető. Tervezéskor $M_{max}/M_{Rm} \approx 0.67$ érvényes, ahol – a károsodás nélküli állapothoz képest – $\sim 8\%$ önrezgésszám-csökkenés (mind az f_1 , mind az f_2 esetén) adódott.



2.11. ábra $\Sigma\Delta f$ az M_{max}/M_{Rm} arány függvényében 2.12. ábra Δf [%] az első repedések megjelenésekor

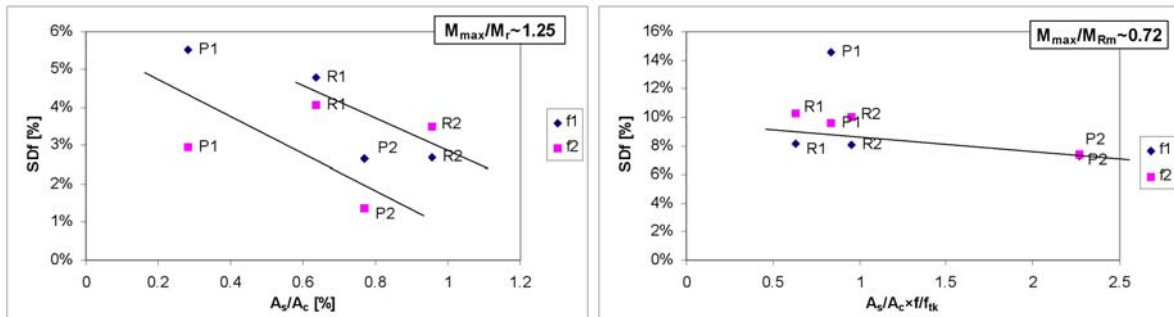
b) Az első repedések hatása a Δf értékére

Az első repedések megjelenését, melynek vasbetonszerkezetek esetén fontos gyakorlati jelentősége van, mindegyik gerenda esetén jelentős károsodás kísérte. A 2.12. ábra azt mutatja, hogy ez a pillanat milyen látványosan kimutatható az önrezgésszám változásával. A Δf az önrezgésszám csökkenését jelenti az első repedések megjelenéséhez tartozó állapotban, míg a $\Sigma\Delta f^{0-6}$ a gerendák rugalmas állapotához tartozó (első hat) károsodási állapotokban bekövetkezett önrezgésszám-csökkenések összegét jelenti. Látható, hogy az összes gerenda figyelembevételével Δf legalább a $\Sigma\Delta f^{0-6}$ érték 31%-ára adódott. Ez alátámasztotta, hogy az önrezgésszámok változása jól jelzi a az első repedések létrejöttét.

c) A vasalás típusának és mennyiségének hatása az önrezgésszámok csökkenésére ($\Sigma\Delta f$)

Tiszta hajlítással terhelt vasbeton gerendák esetén a repedezettség mértéke szoros összefüggésben van a vasalás mennyiségével. A 2.13. ábra az acélhányad ($\rho = A_s/A_c$) hatását mutatja az önrezgésszámokban a károsodási folyamat egy jellegzetes állapotáig (melyet az M_{max}/M_r arány jellemez) bekövetkezett csökkenés ($\Sigma\Delta f$) mértékére. Vegyük észre, hogy az első repedések miatti károsodást nem befolyásolja az acélszilárd-ság (ha az acélok a repedések kialakulását követően rugalmas állapotban maradnak). $M_{max}/M_r \approx 1.25$ ese-tén (azonnal az első repedések kialakulása után) a $\Sigma\Delta f_1$ és a $\Sigma\Delta f_2$ 1% és 6% közé esett. A terhelő erők elhelyezkedése az f_1 értékét nagyobb mértékben befolyásolta, mint az f_2 értékét. Az azonos típusú (azonos felületi tulajdonságú) vasalást tartalmazó gerendák esetén a $\Delta\Sigma f$ mértéke egyértelműen csökkent a ρ nö-

vekedésével. Azonos ρ értékek esetén nagyobb $\Delta\Sigma f$ adódott a jobb tapadási tulajdonságú betonacélt tartalmazó gerendák esetén, mint a rosszabb tapadási tulajdonságú (megfeszítetlen) feszítőhuzalt tartalmazó gerendák esetén. Hasonló tendenciák, de 4% és 15% közé eső, nagyobb $\Delta\Sigma f$ értékek adódtak a $M_{\max}/M_r \approx 3.05$ arány esetén is. A 2.14. ábra a 2.13. ábrához hasonló összefüggést mutat, de $M_{\max}/M_{Rm} \approx 0.72$ esetére. Vegyük észre, hogy az M_{Rm} rendkívül érzékeny az acélszilárdságra, ezért ez itt a szilárdsággal módosított mechanikai acélhányadot ($\rho_f = \rho f/f_{tk}$) alkalmaztam. Látható, hogy a $\Delta\Sigma f$ értékek $\sim 8\%$ körül adódtak és nem voltak érzékenyek a ρ_f -re. Ez alátámasztotta az a) pontban ezzel kapcsolatban leírtakat.



2.13. ábra $\Delta\Sigma f$ és ρ kapcsolata $M_{\max}/M_r \approx 1.25$ esetén **2.14. ábra** $\Delta\Sigma f$ és ρ_f kapcsolata $M_{\max}/M_{Rm} \approx 0.72$ esetén

- Az előfeszített gerendák esetén a belső, tapadási feszítés és e feszítés leépülésének, valamint a repedezettségnek a hatását vizsgáltam az önrezgésszámokra.

Kimutattam, hogy a belső, tapadási feszítés alkalmazása önmagában, egyéb feszítőbetét-szakadással vagy repedezettséggel kapcsolatos károsodás hiányában is befolyásolja a gerendák önrezgésszámait.

Elhanyagolható mértékű repedezettség esetén az önrezgésszámok nem voltak érzékenyek a belső, tapadási feszítés kismértékű leépülésére. Azonban a belső, tapadási feszítés leépülése nagyobb mértékű önrezgésszám-csökkenést eredményezett olyan gerendák esetén, melyeken jelentős mértékű repedezettség jelentkezett a feszítőerő leépülését megelőzően, összehasonlítva a feszítőerő-leépülés kezdete előtt repedésmentes gerendákkal.

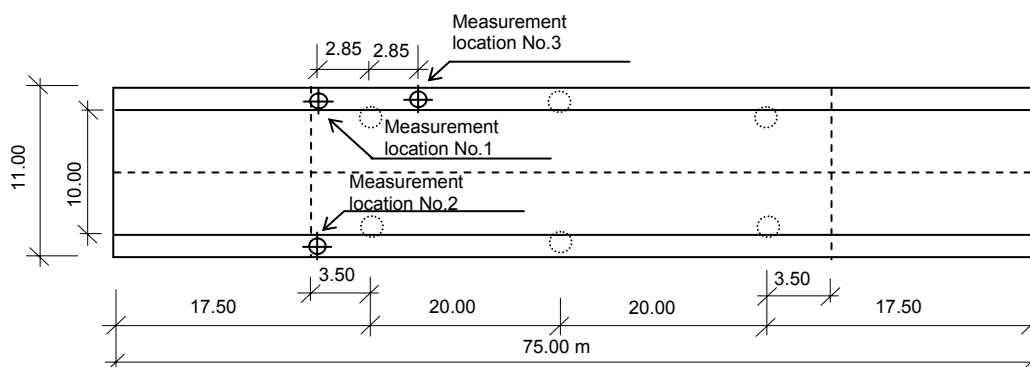
- A jelentős mértékű repedés okozta károsodást szenvedett, nem feszített gerendákon az utófeszítés hatását vizsgáltam az önrezgésszámokra.

Mivel a meglévő repedések megnyílását utófeszítéssel jelentős mértékben csökkenteni lehet, ezért az utófeszítő-erő növelésével a már károsodott gerendák hajlítási merevségének fokozatos növekedésére lehetett számítani. A kísérletek igazolták, hogy kis és közepes intenzitású utófeszítő-erő esetén az mért önrezgésszámok (f_m) sokkal nagyobb mértékben változtak, mint a (lineárisan rugalmas, másodrendű numerikus modellen, a hossz mentén állandó értékű hajlítási merevség feltételezésével) számított önrezgésszámok. Mindez azt jelezte, hogy a gerendák meglévő repedezettsége sokkal nagyobb mértékben befolyásolja az f_m értékét, mint a feszítőerő növekedése.

Kimutattam, hogy a gerendák hajlítómerevségének repedés okozta csökkenése (repedésmentes állapothoz viszonyítva) még nagy intenzitású utófeszítéssel sem szüntethető meg, ha a károsodás során képleken alakváltozások léptek fel az acélbetétekben.

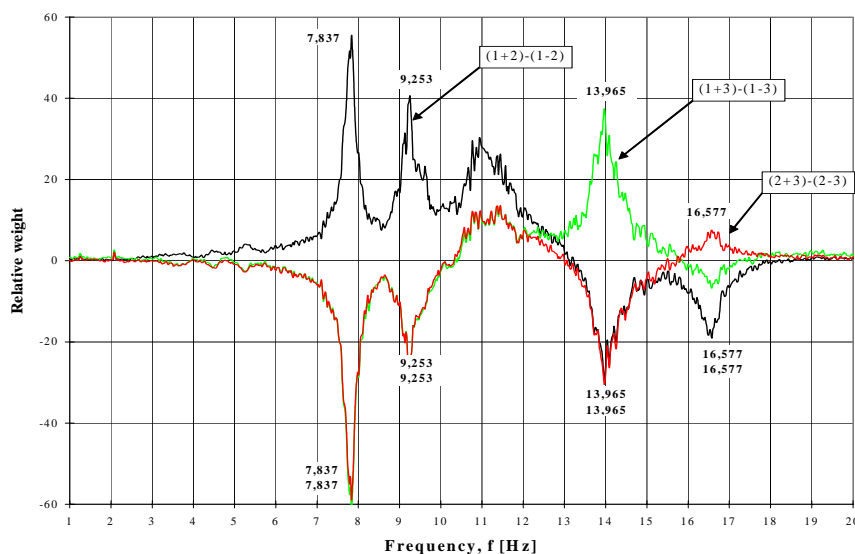
2.6. A frekvenciamérések gyakorlati alkalmazása egy közúti hídon

Az önrezgésszám-mérések gyakorlati károsodásvizsgálat során való alkalmazhatóságát egy négytámasztós, vasbeton közúti hídon vizsgáltam. A teherviselő szerkezet egy hagyományos Gerber-rendszerű, 11.0 m széles takaréküreges lemez volt (2.15. ábra).



2.15. ábra A vizsgált híd és a mérőhelyek elrendezésének vázlata

A vizsgálat célja annak igazolása volt, hogy a szerkezet első néhány önzegésszáma megbízhatóan meghatározható a híd üzemszerű állapotában. Ezért a híd gerjesztéséhez a szokásos közúti forgalmat használtam. A gyorsulásmérők száma, azok elhelyezkedése a szerkezeten, a helyszínen rögzített $a-t$ jelsorozat hossza (~40 perc) és az alkalmazott mérőberendezés beállításai ennek megfelelően lettek felvéve és meghatározva. Az $a-t$ jelek rögzítése az alkalmazott három mérőhelyen egyidejűleg történt.



2.16. ábra Az átlagos frekvenciaspektrumok lineáris kombinációjaként meghatározott fáziskép-spektrumok

A híd első négy önzegésszámát lefedő, előirányzott (5-20 Hz) frekvenciatartományon a gerjesztő hatás elegendően nagy intenzitásúnak és egyenletesnek bizonyult. Kijelölt mérőhely-párok mérőhelyein rögzített $a-t$ jelek összegeiből és különbségeiből átlagos frekvenciaspektrumokat határoztam meg. A mért önzegésszámokhoz tartozó sajátalakok kinyerése érdekében fáziskép-spektrumokat állítottam elő ezen átlagos frekvenciaspektrumok 2.16. ábra szerinti különbségeinek megszerkesztésével. Annak eldöntése, hogy a figyelembevett mérőhely-párok az adott módusban azonos vagy ellentétes fázisban rezegnek-e, kiolvasható az e mérőhelyekhez tartozó fáziskép-spektrum vizsgált önzegésszámhoz tartozó értékének előjeléből. A fáziskép-spektrumok használata lehetővé tette a meghatározott önzegésszámokhoz tartozó sajátalakok reprodukálását.

3 A KUTATÁS GYAKORLATI ALKALMAZHATÓSÁGA ÉS A TOVÁBBFEJLESZTÉS LEHETŐSÉGEI

A bemutatott kísérleti, rezgésvizsgálaton alapuló károsodásvizsgálati módszer egy önzegésszám-mérési eljárásból és egy repedés okozta károsodás-értékelési eljárásból áll. A mérési eljárás alacsony költségek mellett alkalmas vasbeton, elő- és utófesztített vasbeton szerkezetek önzegésszámainak időszakos vagy folyamatos megfigyelésére. Alkalmazása elsősorban gerenda jellegű hídszerkezeteken célszerű, ahol a szokásos közúti forgalom felhasználható a híd gerjesztéséhez. A mért önzegésszámok és a szerkezet teljesítőképességi jellemzői között kidolgozott összefüggések felhasználásával a vizsgált szerkezet használati élettartama alatt a szerkezet teljesítőképességében bekövetkező bármilyen változás felismerhető, lokalizálható és a mértéke megbecsülhető az önzegésszámokban bekövetkező változás mért értékei alapján.

A bemutatott módszer továbbfejlesztése két irányban lehetséges. Az első a mért dinamikai jellemzők körének bővítése, mellyel a helyszíni mérések által a szerkezet dinamikai viselkedéséről szerzett információtaralom lenne megnövelhető. Ez akkor javasolt, ha a helyszíni mérésekhez szükséges (idő és költség) ráfordítás egy elfogadható szint alatt tartható. Ebből a szempontból a csillapítási jellemzők vizsgálata célszerű. A másik irány a szerkezet teljesítőképessége és a mért dinamikai jellemzők közötti meglévő összefüggések további pontosítása vagy új összefüggések meghatározása. E területen érzékenységi vizsgálatok elvégzése, az összefüggések statisztikai szintű megalapozása, a károsodás értelmezésének a hajlítási repedésen túlrá való kiterjesztése kívánatos.

4 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

4.1. Új tudományos eredmények magyarul

1. tézis

Irodalmi elemzés alapján rámutattam, hogy a meglévő, vasbeton szerkezeteknél alkalmazott dinamikai alapú károsodásvizsgálati módszerek elsősorban a károsodás kimutatására, lokalizálására és esetenként a mértékének a meghatározására irányulnak, míg a szerkezet teljesítőképességével kapcsolatban kevés információval szolgálnak, emiatt gyakorlati alkalmazhatóságuk korlátozott.

Ez alapján egy új károsodásvizsgálati szintet (3a szint) határoztam meg. A 3a szintnek megfelelő módszerek a károsodás-kimutatáson túl alkalmasak a szerkezet erőtani állapotának az értékelésére is. Rámutatam, hogy e módszerek hatékony gyakorlati alkalmazáshoz szükség van

- előzetes statikai modellen alapuló, az erőtani állapottal összefüggő károsodási indexek meghatározására, melyek alkalmasak a károsodás kimutatására és a mértékének a közelítő meghatározására (károsodás-kimutatás), továbbá
- a szerkezet mért dinamikai és erőtani jellemzői közötti összefüggések meghatározására (károsodás-értékelés).

Kapcsolódó publikációk: [1],[3],[4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[14],[15],[17]

2. tézis

Kísérlettel modelleztem egy repedezettségen alapuló károsodási folyamatot hajlított, kéttámaszú, vasbeton és feszített vasbeton gerendákon, melynek során folyamatosan növekvő károsodási szinteken meghatároztam a gerendák első két önrezgésszámát. A károsodást

- vasbeton gerendák esetén négyponthoz elrendezésű koncentrált erőkkel létrehozott, fokozatosan növekvő mértékű repedezettséggel;
- feszített vasbeton gerendák esetén az a) szerinti terhelés és feszítőbetét-eltávolítások kombinált alkalmazásával;
- néhány, előzetesen károsodott vasbeton gerenda esetén külső vezetésű utófeszítéssel (megerősítés szimulációja)

modelleztem. A károsodás mértékét a repedezettség mértékével és a feszítőbetét-eltávolítások számával jellemeztem. Az önrezgésszám-mérésekhez alternatív módon impulzusszerű és periodikus gerjesztést alkalmaztam.

Kapcsolódó publikációk: [1],[3],[4],[5],[6],[7],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15],[17],[18]

3. tézis

Kidolgoztam egy numerikusan rögzített, gyorsulás-idő jelsorozat feldolgozására alkalmas számítási eljárást, melyet felhasználtam a vizsgált gerendák első két önrezgésszámának meghatározásához. Az eljárás diszkrét Fourier-transzformációval meghatározott frekvenciaspektrumok statisztikai elemzésén alapul. Ez alapján kimutattam, hogy:

- mind az átlagos frekvenciaspektrum (átlagspektrum-módszer), mind az egyes frekvenciaspektrumok legnagyobb ordinátájához tartozó frekvenciák átlagaként meghatározott frekvenciaérték (átlagfrekvencia-módszer) önmagában alkalmas a gerendák első két önrezgésszámának elfogadhatóan kis (<1%) relatív szórással történő meghatározására mindazon károsodási állapotokban, ahol a hajlítási merevség eloszlása a gerenda hossza mentén szimmetrikus marad.
- Azon károsodási állapotokban, ahol a hajlítási merevség eloszlása a nem szimmetrikus repedés-kép miatt nem marad szimmetrikus, a frekvenciaspektrumban többszörös csúcsok jelennek meg. Az átlagfrekvenciához tartozó szórás mértéke egyértelműen jelzi a többszörös csúcsok jelenlétét. Ha a csúcsok egyike domináns a többihez képest, akkor az átlagspektrum-módszer és az átlagfrekvencia-módszer kombinált alkalmazására van szükség a lokális csúcsokhoz tartozó frekvenciák átlagával közelített önrezgésszám meghatározásához.
- Ha a frekvenciaspektrumokban nincsenek többszörös csúcsok, akkor az első két önrezgésszám megbízhatóan (<1,5% relatív különbséggel) meghatározható mind impulzusszerű, mind periodikus gerjesztés alkalmazásával. Ha többszörös csúcsok jelentkeznek, akkor a relatív különbség jelentősen megnő (>>1,5%).

Kapcsolódó publikációk: [2],[6],[8],[16],[19]

4. tézis

A repedezettség miatti károsodás vizsgálatára alkalmas, statikai jellemzőkön alapuló, következő károsodási indexeket definiáltam az 1. tézis a) pontjával összhangban, majd osztályoztam azokat és meghatároztam a vizsgált gerendák károsodási állapotaihoz tartozó értékeiket:

- Összegzett repedéshossz-növekmény,
- Mezőközépi teljes és maradó lehajlás-növekmény,
- Mezőközépi repedéstágasság-növekmény,
- Összegzett repedésfelület-növekmény,
- Számított mezőközépi teljes lehajlás-növekmény,
- Számított mezőközépi repedéstágasság-növekmény,
- Alakváltozási energia-növekmény.

Az osztályozás szempontjai a következők voltak:

- a szerkezettel kapcsolatos információtartalom mennyisége (globális vagy lokális index),
- az index vagy az abban foglalt egyéb paraméterek meghatározásához alkalmazott számítási modell hiánya vagy megléte (nem modell alapú (mért) vagy modell alapú (számított) indexek).

A károsodás kimutatásában betöltött szerepüktől függően a károsodási indexeket növekményes (a károsodás felismeréséhez) és halmozott (a károsodás mértékének meghatározásához) formában is meghatároztam. A nem modell alapú és a modell alapú indexeket megegyezősi vizsgálatoknak vettem alá.

Kapcsolódó publikációk: [1],[3],[4],[5],[6],[7],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15],[17],[18]

5. tézis

A károsodási indexek felhasználásával a vizsgált gerendákon károsodás-kimutatást és károsodás-értékelést végeztem.

Az alkalmazott indexek alkalmasnak bizonyultak a mesterségesen létrehozott, repedezettség miatti károsodás felismerésére és a mértékének a becslésére. A kimutatott károsodást a mért önrezgésszám-változások igazolták.

A károsodás-értékelés során számszerű összefüggéseket határoztam meg az önrezgésszám-változások mértéke és

- vasbeton gerendák esetén
 - az erőtani kihasználtság,
 - az első repedések létrejöttkor kialakuló repedezettség mértéke,
 - a vasalás típusa és mennyisége,
- feszített vasbeton gerendák esetén
 - az erőtani kihasználtság,
 - az feszítőerő leépülésének mértéke,
- utófeszített vasbeton gerendák esetén
 - a feszítőerő mértéke

között.

Kapcsolódó publikációk: [5],[15],[17]

6. tézis

Helyszíni frekvenciamérést végeztem és végrehajtottam a hozzá tartozó jelfeldolgozást egy vasbeton közúti híd esetén. A vizsgálat célja annak igazolása volt, hogy a szerkezet első néhány önrezgésszáma megbízhatóan (kis szórással) meghatározható a híd forgalmának fenntartása esetén is. Gerjesztő hatásként a szokásos közúti forgalmat használtam. A gyorsulás-idő jelsorozatot egyidejűleg három mérőhelyen rögzítettem. Kimutattam, hogy

- a közúti forgalomból származó gerjesztő hatás elegendően nagy intenzitású és egyenletes eloszlású volt a híd első négy önrezgésszámát tartalmazó 5-20 Hz közötti frekvenciatartományban. Mérőhelyenként 34 perc hosszúságú, helyszínen rögzített gyorsulás-idő jelsorozat felhasználásával az előírányzott frekvenciatartomány 0,02 Hz felbontású, diszkrét Fourier-transzformált frekvenciaspektrumokkal lefedhető volt.
- a mérőhely-páronként előállított gyorsulás-idő jelsorozat-összegekre és –különbségekre megszerkesztett átlagos frekvenciaspektrumok különbségeiként meghatározott fáziskép-spektrumokkal kimutathatók voltak a mérőhely-párokhoz tartozó mérőhelyek fáziskülönbségei az egyes módusokban. Ez lehetővé tette a mért önrezgésszámokhoz tartozó sajátalakok reprodukálását.

Kapcsolódó publikációk: [2],[6],[8],[16],[19]

4.2. Új tudományos eredmények angolul

New result 1

Based on a literature review, It was concluded that the existing dynamic-based damage identification methods focus mainly on detection, localization and sometimes quantification of damage but do not closely address structural performance-related issues, which limits their practical applicability.

To overcome this, a new damage identification level (Level 3a) was defined. Beyond damage identification, assessment methods fulfilling Level 3a are able to provide information on the structural performance. It was pointed out that the effective practical applicability of these methods requires:

- a) the definition of performance-related damage indices that are based on previous static models and able to identify damage as well as to measure its extent (identification);
- b) the establishment of relationships between the measured dynamic parameters and the performance-related structural properties (assessment).

Related publications: [1],[3],[4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[14],[15],[17]

New result 2

Cracking-induced deterioration processes were modelled in experimental conditions on simply supported, reinforced and prestressed concrete beams under flexure. Meanwhile the first two natural frequencies of beams were determined at gradually increasing damage levels. Damage was modelled by:

- a) gradually intensified cracking due to defined, four-point mechanical loading for the reinforced beams;
- b) the combination of a) and artificially-made tendon cuts for the prestressed beams;
- c) the application of external post-tensioning (simulated strengthening effect) to a few, already deteriorated reinforced concrete beams.

The extent of damage was measured by the extent of cracking and by the number of tendon cuts. Alternatively, single mechanical impact and a periodic signal were used for excitation purposes during the natural frequency measurements.

Related publications: [1],[3],[4],[5],[6],[7],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15],[17],[18]

New result 3

A computational procedure for the evaluation of numerically-recorded acceleration-time signals was developed. By the use of this, the first two natural frequencies of the test beams were determined. The procedure was based on the statistical analysis of discrete Fourier-transformed individual frequency spectrums.

Using this technique, the following were pointed out:

- a) Both the average frequency spectrum (average spectrum method) and the average value of frequencies associated with the maximum ordinate in the individual spectrums (average frequency method) were solely able to indicate the first two natural frequencies with an acceptably low (<1%) coefficient of variation for the states of the beams in which the bending stiffness distribution remained symmetric along the beam length.
- b) For states where the bending stiffness distribution became non-symmetrical due to a non-symmetrical crack pattern, multiple peaks occurred in the relevant frequency spectrums. The value of the standard deviation associated with the average frequency clearly indicated the presence of multiple peaks. If one of them was dominant, then the combined use of the average spectrum method and the average frequency method was required to estimate the true natural frequency as the average of the frequencies associated with sub-peaks.
- c) The first two natural frequencies could reliably (with a relative difference less than 1.5%) be determined from vibration signals derived from either impulse or periodic excitation input, if no multiple peaks existed in the related frequency spectrums. If multiple peaks existed, then the relative difference increased significantly (>>1.5%).

Related publications: [2],[6],[8],[16],[19]

New result 4

Static-based damage indices which reflected cracking-related damage and were in accordance with a) of New result 1 were defined as follows:

- Growth of “total length of cracks”
- Growth of total and residual deflection at midspan
- Growth of crack width at midspan
- Growth of “total of crack sections”
- Growth of calculated midspan deflection
- Growth of calculated crack width at midspan
- Growth of internal strain energy

Their values were determined for all deterioration states of the test beams. Their classification was based on:

- their information content on the structure (global or local indices);
- the absence or the presence of any calculation model behind the index itself and their involved parameters (non-model-based (measured) or model-based (calculated)).

Depending on their intended purpose in damage identification, the indices were interpreted in both incremental (for detection purposes) and cumulative (for quantification purposes) forms. Successful conformity checks were carried out between the corresponding non-model-based and model-based indices.

Related publications: [1],[3],[4],[5],[6],[7],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15],[17],[18]

New result 5

By the use of the defined damage indices, damage identification as well as assessment of test beams were carried out.

The defined indices were able to detect and to quantify the introduced artificial, crack-induced damage in the beams. The identified damage was confirmed by the measured natural frequency shifts.

Within the assessment, numerical relationships were established between the natural frequency shifts and:

- for the reinforced concrete beams
 - the internal force level;
 - the extent of cracking immediately after the occurrence of first cracks;
 - the type and amount of reinforcement;
- for the prestressed beams
 - the internal force level;
 - the extent of degradation in prestress;
- for the post-tensioned beams
 - the intensity of the post-tensioning force.

Related publications: [5],[15],[17]

New result 6

An in-situ frequency measurement and the respective signal evaluation were carried out on an operational reinforced concrete highway bridge. The aim of the test was to verify that reliable (with low standard deviation) determination of the first few natural frequencies of the structure was possible under the service load of the bridge. For excitation purposes the normal road traffic was used. The acceleration-time vibration signals were recorded simultaneously in three measurement locations. It was found that:

- a) the excitation force of the normal road traffic was sufficiently high and smooth over the target 5-20 Hz frequency range of the first four natural frequency of the bridge. By the use of 34 min. long in-situ recorded acceleration-time signals at each measurement location, this frequency range could be covered by discrete Fourier transformed frequency spectrums with 0.02 Hz resolution;
- b) the phase spectrums, computed as differences of average frequency spectrums determined from sums and differences of acceleration-time signals belonging to measurement locations of selected measurement location pairs, were capable of indicating the phase differences between the measurement locations of the selected pairs in each mode. This made it possible to reproduce the mode shapes associated with the measured natural frequencies.

Related publications: [2],[6],[8],[16],[19]

5. HIVATKOZOTT PUBLIKÁCIÓK

Könyv, könyvrészlet

- [1] Kovács, T. – Farkas, Gy.: Condition monitoring of reinforced concrete beams by dynamic measurements, Sec. 3.5.4. in book entitled as *New Materials, systems, methods and concepts for prestressed concrete structures*, final report of COST 534, Eds: R.B. Polder, M.C. Alonso, D.J. Cleland, B. Elsener, E. Proverbio, Ø. Vennesland, A. Raharinaivo, Cost Office, 2009, ISBN 9789059863323, pp. 192-194.

Cikk gyűjteményes kötetben

- [2] Kovács T. - Farkas Gy. – Kálló M.: Vasbeton hidak dinamikus jellemzőinek vizsgálata, *BME Vasbetonszerkezetek Tanszéke Tudományos Közleményei* (szerk.: Tassi G., Kovács T.), 1998., Műegyetemi Kiadó, Budapest, pp. 111-124.
- [3] Kovács T. – Farkas Gy.: Károsodásbecslés dinamikai jellemzők alapján, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Tudományos Közleményei* (szerk.: Tassi G., Hegedűs I., Kovács T.), 2001., Műegyetemi Kiadó, Budapest, pp. 125-138.
- [4] Kovács, T. – Farkas, Gy.: Damage assessment by frequency measurements on reinforced concrete beams, *Workshop of COST on „NDT Assessment and New Systems in Prestressed Concrete Structures”*, COST Action 534, Institute for Terotechnology – NRI, Kielce, Poland, September 19-21, 2005. pp. 201-216.
- [5] Kovács, T.: Natural frequency shifts for concrete beams due to deterioration-induced cracks, *Scientific publications of the Dept. of Structural Engineering*, (ed.: Tassi, G., Hegedűs, I., Kovács, T.), 2009., Műegyetemi Kiadó, Budapest, pp. 115-122.

Nemzetközi folyóiratcikk

- [6] Kovács, T. – Farkas, Gy.: Effect of cracking on the dynamic characteristics of concrete beams, *Concrete Structures*, Vol.3, Special issue for *fib* 2002 Osaka Congress, 2002, Budapest, pp. 64-69.

Magyarországon megjelent angol nyelvű folyóiratcikk

- [7] Kovács, T. – Farkas, Gy.: Condition monitoring of a lightly reinforced concrete beam by dynamic measurements, *Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng.*, Vol.49, No.1, 2005. pp. 27-46.

Nemzetközi konferencia-kiadvány

- [8] Kovács, T.: Dynamic investigations on reinforced concrete bridges, *Proc. of the 2nd International PhD Symposium in Civil Engineering*, Budapest, 26-28 August 1998, pp. 197-204.
- [9] Kovács, T. – Farkas, Gy.: The assessment of damage by dynamic characteristics on model beams, *Proc. of the 3rd International PhD Symposium in Civil Engineering*, Vienna, 5-7 October 2000, Volume 1, pp. 297-306.
- [10] Farkas, Gy. – Kovács, T.: The assessment of damage by dynamic characteristics, *3rd Korean-Hungarian Symposium on “New methods in structural engineering”* (organizer: Hungarian Academy of Engineering), Budapest, June 22, 2001.
- [11] Farkas, Gy. – Kovács T.: The assessment of damage by dynamic characteristics, *4th International Conference on Bridges Across the Danube*, Bratislava, Slovakia, September 13-15 2001, pp. 217-222.
- [12] Kovács, T.: The effects of cracking on the natural frequencies for concrete beams, *Proc. of the 4th International PhD Symposium in Civil Engineering*, Munich, 19-21 September 2002, Volume 1, pp. 338-344.
- [13] Kovács, T. – Farkas, Gy.: *Condition monitoring of concrete beams by dynamic measurements*, *Proc. of the IABSE Symposium on „Responding to tomorrow’s challenges in structural engineering”*, Budapest, Hungary, September 13-15 2006, pp. 112-113, CD-ROM
- [14] Kovács, T. – Farkas, Gy.: Damage assessment by dynamic measurements on concrete bridges, *Proc. of the International Conference on Bridges*, Dubrovnik, Croatia, May 21-24 2006, pp. 1067-1074.
- [15] Kovács, T.: Influence of deterioration on the dynamic behaviour of concrete beams, *Proc. of the fib Symposium on Concrete: 21st century superhero + CD ROM*, London, UK, June 22-24, 2009, 8 pages
- [16] Kovács, T.: In-situ dynamic measurements on a concrete bridge, *Proc. of the 5th Central European Congress on Concrete Engineering on „Concrete engineering in urban development”*, Baden, Austria, September 24-25, 2009, pp. 306-310.
- [17] Kovács, T.: Effect of deterioration-induced cracks on the modal properties of concrete beams, *Proc. disk of The Third Int. Congress and Exhibition „Think globally, Build Locally”, ID 628, Washington, USA, May 29-June 2, 2010, 9 pages*

Magyar nyelvű konferencia-kiadvány

- [18] Kovács T. – Farkas Gy.: Károsodásbecslés dinamikai jellemzőkkel, *Műszaki Mechanika 2002.*, MTA-BME Mechanikai Kutatóközösség VII. Tudományos Ülésszaka, Budapest, 2001. január 30., Műegyetemi Kiadó, pp. 61-66.

Technical Report

- [19] Farkas, Gy. – Hegedűs, I. – Koris, K. – Kovács, T.: *Final Scientific Report* by The Dept. of Reinforced Concrete Structures, Budapest Univ. of Techn. and Economics, COPERNICUS Joint Project: "Innovative Simulation Tools for the Durability-Design and Maintenance-Management of Reinforced Concrete Traffic Infrastructure", Contract Number IC15-CT96-0755, Budapest, March 10., 2000.