

RÁCSOS HÍDVÁZ REZGÉSEINEK VÉGESELEMES VIZSGÁLATA TERHELT ÁLLAPOTBAN

VIBRATION ANALYSIS OF A BRIDGE FRAME SUBJECTED TO LOADS USING FINITE ELEMENT ANALYSIS

Szirbik Sándor, PhD, Virág Zoltán, PhD

ABSTRACT: This paper deals with the modal analysis of a 3D bridge frame subjected to loadings due to the moving belt resting on conveyor idler rolls, the underlying conveyor belt support frame, and the transported materials to be moved during full-capacity transport. The structure is reused to assist the path of the conveyor belt in the work area. The steel bridge frame, which consists of various structural steel beams, is modeled as a 3D frame using beam elements and various profiles. The purpose of finite element analysis is to provide a starting point for studies of the transient forced vibrations with the results of modal analysis.

1. BEVEZETÉS

A szállítószalagpályák vezetésére szolgáló hídváz szerkezetek ellenőrzése összetett feladat, főleg, ha ezt egy más jellegű anyagszállításra méretezett, korábban már használt és radikálisan átalakított szerkezetre kell megtenni. Szilárdságtani számítások és nyomott rudak kihajlásának ellenőrzésével egy ilyen szerkezetre közöl eredményeket az [1] és [2] munka, melyekben leegyszerűsítve, síkbeli rácsos tartóként kezelve, végeselemes számításokból nyert paraméterek felhasználásával, és döntően kézi számításokkal került ellenőrzésre a szerkezet. A szerkezet térbeli vázszerkezetként tovább vizsgálható a rezgéstani tulajdonságokat is beleértve.

A sajátfrekvenciák és vonatkozó rezgések felhasználhatók dinamikus terhelések szerkezetre gyakorolt hatásainak vizsgálatára, mint például tranziens rezgések elemzése stb. A modal analízist, a sajátértékfeladatok megoldását a numerikusan pontosabban elvégezhető sajátérték-számítással érdemes kezdeni, majd a sajátértékekhez tartozó rezgések előállításával folytatni. A szerkezetek sajátértékfeladatainak numerikus megoldására szolgáló bevett eljárás az altér iteráció és a Lánczos-módszer. Ezek közül, ha a rezgéstani feladat szabadságfoka nagy, vagy a feladat jellege ezt indokolja, akkor a numerikusan általában hatékonyabb Lánczos-módszer választása

célravezetőbb a szoftverek nyújtotta választási lehetőségek közül [3, 4], ahol a megoldás részeként a sajátrezgések képi megjelenítésén a maximális elmozdulás helye a színskálán általában piros színnel jelölt, nagysága pedig egységnyi választott.

E számítások jelentősége a gerjesztésnek kitett szerkezetek esetén a sajátfrekvenciák valamelyikével egybeeső gerjesztési frekvencia okozta rezonanciakatasztrófa megelőzésében van, mivel az a valós szerkezet esetén általában a leggyengébb alkotórészek törésében jelentkezik, gátolva így a szerkezet üzemszerű működését. A rezonanciakatasztrófa lehetséges veszélyei miatt különféle ipari területeken végeznek is erre vizsgálatokat, pl. bányákban alkalmazott kotrógépeknél és szállítószalagoknál [5, 6, 7]. A szerkezetek károsodásai, vagy a tervezett paramétereiktől eltérő megvalósításuk a sajátfrekvenciák olyan változását eredményezik, amely kedvezőtlen lehet.

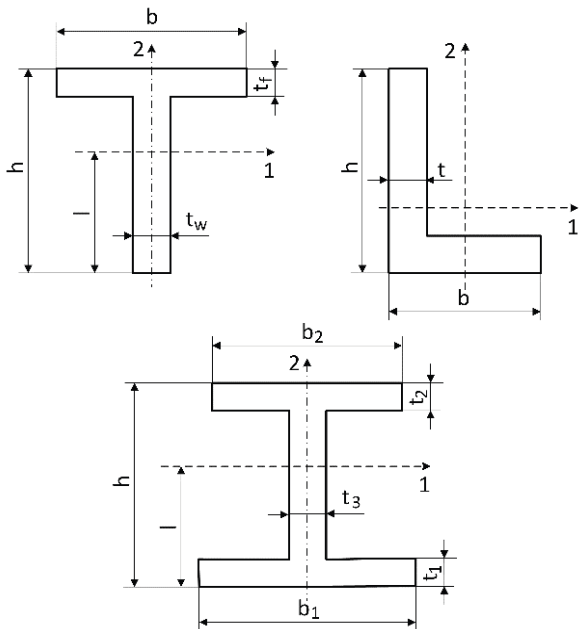
A vizsgált hídszerkezet, a beépíteni kívánt szállítószalag vázelemekkel együtt a szalag mozgásából származó transzverzális rezgéseknek kitett, továbbá a szállítószalag görgők elhasználódásából és tönkremeneteléből származó hatások is gerjeszthetők. A szerkezet sajátfrekvenciáinak ismerete ezen hatások kézbe tartásának legfontosabb része. A hídváz szerkezetet alkotó karcsú rudak sajátfrekvenciái eleve alacsonyak, így az ilyen szerkezet könnyen gerjeszthető és mindezek miatt rendszeres felügyeletet kíván.

2. RÁCSOS HÍDVÁZ SZERKEZETI KIALAKÍTÁSA ÉS TERHELÉSI ESETEI

A vizsgált szerkezet egy olyan szalaghíd, amely a külszíni bányaművelés során többször is felhasználásra került már a meddő és a lignit elszállításának lebonyolításánál, és a szállítópályák szintbeli találkozásának elkerülésében nyújt segítséget. A rácsos szerkezet többszöri átépítés és megerősítés után nyerte el vizsgált alakját, amely a fejlesztések során aszimmetrikus kialakításúvá vált. A 23 m hosszúságú, 3 m széles és 2,3 m magas főbb méretekkel bíró szerkezet geometriai modellje tíz azonos hosszúságú cellából áll. Ezekben az átlós irányú keresztartók beépítésének iránya egymásra

merőleges, de a cellák elrendezése nem szimmetrikus, mint ahogy az az esetek többségében megszokott, így hat cellában azonos, míg a másik négyen ellentétes a keresztmerezítők állása, mint az kivehető a 2. ábrán is. A szerkezetre alulra és felülre szélfogó rácsok is kerültek.

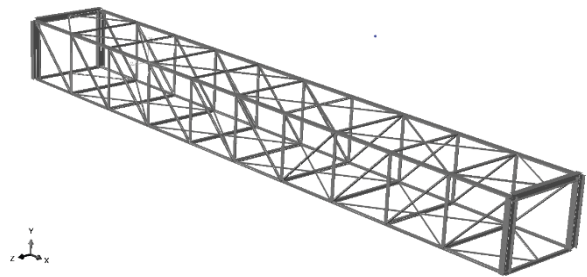
A választott keresztmetszetek geometriai méreteinek megadása az 1. ábrán látható betűjelekhez rendelt számokkal történik. Az alsó keresztartók I keresztmetszetű ($b_1 = b_2 = 100$ mm, $h = 100$ mm, $t_1 = t_2 = 8$ mm, $t_3 = 16$ mm), a felső keresztartók T profilú ($b = 110$ mm, $h = 75$ mm, $t_f = 7$ mm, $t_w = 14$ mm) rudak. Az alsó és felső hosszartók esetén a végeelemes analízis során T alakú profilok $b = 150$ mm, $h = 75$ mm, $t_f = 8$ mm, $t_w = 16$ mm, illetve $b = 200$ mm, $h = 100$ mm, $t_f = 10$ mm, $t_w = 20$ mm méretekkkel rendeltek az alkalmazott rúdelemekhez. A két kapukeret I szerkezeti acélból készül felső gerendája $b_1 = b_2 = 220$ mm, $h = 200$ mm, $t_1 = t_2 = t_3 = 10$ mm méretű, míg a kapuk oszlopainál csupán $h = 315$ mm méretben változik az I gerenda. A szélfogó rácsok L profilokból ($b = 50$ mm, $h = 50$ mm, $t = 6$ mm) kerültek kialakításra. A szerkezet oszlopai összetettebb keresztmetszettel bírnak, ezért ezeket a beépített profilok közül választott téglalapkeresztzettel ($b = 127,08$ mm, $h = 23,43$ mm) helyettesítettük, mert a végeelemes program beépített rúdelem profilok, mint T, L, U stb. profilok és alapsík-idomokkal, úgymint négyzet és körlap választása mellett



1. ábra. Rácsos hídvezhöz alkalmazott szerkezeti acélok rúdelemekhez rendelt profiljai.

szolgáltatót feszültség számítást a rúdelemek tekintetében. Az 1. ábrán berajzolt 1 és 2 jelű tengelyek a profilok rúdelemekhez rendelését, orientációját biztosítják.

A szalaghíd mindkét végén, a szélső kapuk jelentős mértékben megerősítettek, ezek a többi elemhez képest jóval masszívabb I gerendákból állnak. A számításokból kiderül, hogy a szerkezet robusztusságát ezek alapvetően javítják, mind szilárdságtani, mind rezgéstani szempontból. A hosszartók néhány szakaszára a korábbi felhasználásokból adódó merevítések kerültek, de ezeket nem modelleztük, így a hosszartók mentén a rúdelemek azonos profilúak a háromdimenziós szerkezeti modellen, ahogy a szerkezet időjárási körülményekből adódó károsodásait, rozsdásodását is figyelmen kívül hagytuk, mivel nem tekintettük őket jelentős mértékűnek.



2. ábra. Rácsos hídszerkezet geometriai modellje.

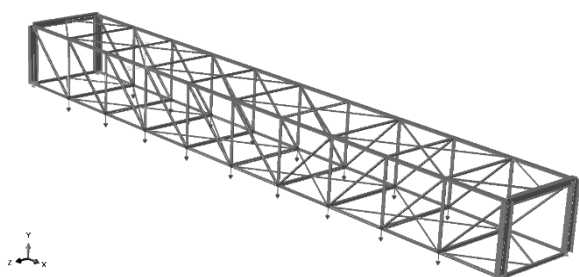
A szállítandó anyag megváltozása és a szállítópályák radikális átalakítása a szalaghíd teherbírásának, szilárdságtani ellenőrzésének kérdéseit Ladányi [1] munkája részletesen ismerteti, amely egy kétdimenziós modell vizsgálatán keresztül valósult meg. Az általunk vizsgált térbeli, 2. ábrán látható szerkezet ezek eredményeit jól alátámasztják.

A szerkezet háromdimenziós modellje a valós szerkezetet alkotó többféle keresztmetszetű szerkezeti acél méretpontos bevitelével, illetve ahol a profil összetett geometriával bírt, például az oszlopoknál, velük azonos geometriai jellemzőkkel bíró általános keresztmetszet felvételével készült.

Az acélminőségre jellemző szokásos $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa értékű Young modulus, a $\nu = 0,25$ Poisson-szám, valamint a $\rho = 7,85 \cdot 10^{-9}$ t / mm³ sűrűség, mint számításokhoz szükséges anyagjellemzők lettek figyelembe véve. A végeelemes számítások alapján, az elkészített geometriai modell és a sűrűség segítségével, a szerkezet tömegét 6,2 tonnában állapítottuk meg.

A megtámasztásokat is egyszerűsített módon a hídszerkezet négy alsó sarokpontjában írtuk elő oly módon, hogy azok gátolják a szerkezet térbeli merevtestszerű mozgását, de ne okozzanak befeszülést két támasztási pont között. Az egyik támasztási pontban így egy térbeli csuklós támasz,

míg a másik három sarokpontban térbeli görgős támasz definiált.



3. ábra. Rácsos hídszerkezet végeelemes modelljén előírt terhelések.

Vizsgálataink során megkülönböztettünk három terhelési esetet, amelyek közül az A jelű az az eset, amikor nincs terhelve a térbeli rácsos szerkezet, azaz nincs még beépítve a szállítópálya.

A szállított anyag tömegének kiszámítása laza halmazsűrűség esetén $\rho_h = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ t / mm}^3$ értékkel, és az [1] munkában ismertetett anyagkeresztmetszettel történt. A szállítószalagra szállítás közben ható terhelések mérésrel vagy szimulációkkal is megállapíthatók az ömlesztett szilárd anyag és a szalag megereszkedési arányai alapján [5], és ezáltal a szállító görgőkre ható terhelésen keresztül a vázszerkezet anyagszállításból adódó terhelése is. A szállító görgők állapotfelügyelete pedig már akusztikus szenzorokkal is megoldható [6].

A második, B jelű terhelési esetben az [1] munka alapján már folytonos üzemnél fellépő, így állandónak tekintett terhelést vettünk figyelembe, ahol a szállítandó meddőkőzet és a szállítószalag, valamint a hozzátartozó vázelemek súlyát osztottuk szét egyenlően az alsó hossztartókon. A laza sűrűségű anyagtömeggel számolva a terhelést a szerkezet alsó keresztartók csatlakozási pontjaiban téve, a terhelésszétoosztás a tartószerkezet támaszok közé eső, kilenc-kilenc csatlakozási pontban elhelyezett 15 kN-os erőkkel valósult meg, így írva elő az összesen 270 kN terhelést a 3. ábrán láthatóan, kis lefelé mutató vektorokkal bejelölt módon.

Vizsgáltunk egy C terhelési esetet is, mert a beépíteni kívánt szállítószalag vázelemek teljes szélessége kizárja azt, hogy mellette a rácsos szerkezetben belül, a felügyeletet biztosító járda kialakításra kerüljön, mert a szalaghíd oldalsó síkjainak távolsága elfoglalja a hídszerkezet szélességét. Így a megközelíthetőség biztosításának megoldása, ha a szerkezet egyik oldalán, konzolos tartókra helyezve alakítanak ki egy járdát. Ez a felépítés bevált már a bányában üzemelő munkagépeken is, mint például marótárcsás és merítéklétrás kotrók, hányóképzők stb. A rácsos szerkezetre

konzolosan telepített járda tömege miatt modelünkre a B jelű állapothoz képest némi többletsúly adódik. Ezt a C számítási verzióban úgy kezeljük, hogy az egyik oldalon található kilenc terhelési pontnál megnöveltük az alkalmazott részerők nagyságát 1,5 kN mértékben. Tehát ebben az esetben az egyik oldalon egyenletesen szétoosztott 148,5 kN erőt működtettünk, a másikon pedig továbbra is 135 kN-t. Így a fellépő aszimmetrikus terhelés a szilárdságtani vizsgálatokban a háromdimenziós szerkezetre már csavaró igénybevétel is kifejt amellett, hogy a terhelés kismértékű növekedését is okozza. A szilárdsági számítások eredményeiben ez nem jelentet nagymértékű változást. Azt tapasztaltuk, hogy a hídváz a statikus terhelésekre kapott tényleges biztonsági tényezője mind három terhelési esetben meghaladta az $n = 3$ értéket és lehajlásának legnagyobb mértéke hídközépen csak 21,6 mm-nek adódott.

3. VÉGESELEMES ANALÍZIS

A numerikus mechanika végeelem-módszere a vázszerkezet pontos geometriai modelljének egyszerű geometriájú, elegendő számú kicsiny elemre történő felosztásán alapul. A gyakorlatban jól használható végeelemes elemcsaládok két végpontú, közöttük a mezőket jól közelítő interpolációkkal bíró elemeket tartalmaznak. A szerkezet modelljében az egyes végeelemek a valóságos kapcsolódásoknak megfelelően illeszkednek egymáshoz az elemek határain kijelölt csomópontokban tett, illetve az illeszkedő csomópontok elmozdulásaiban történő előírások felhasználásával. Hajlítottnyírt rúdelemeket lineáris approximáció választása mellett alkalmazva a kijelölt rezgéstani feladatok jól kezelhetők, mert az elméleti háttérrel tekintve jól kidolgozott és gyakorlati problémák megoldásában [4] is jól használható, megbízható eszköz.

A rácsos hídszerkezet rezgéstani vizsgálati során a felterhelt esetekben a frekvenciaszámítások csak egymást követő két lépésben végezhetőek el. Első lépésben kerül sor az alkalmazott terheléssel a rugalmas alakváltozást szenvedő szerkezet deformált alakjának meghatározására. Ezt a lépést az NIgeom beállítása határozza meg, így az Abaqus figyelembe veszi a geometriai nemlinearitást a terhelt alak kiszámításában és áttudja a deformált alakot adni a következő lépésben végzett lineáris perturbációnak. Az első lépésnek alárendelt második lépésben kerül sor a terhelt alak geometriáján a sajátértékek kinyerésére. A dinamikai és rezgéstani és az NIgeom beállítást használó feladatokban a lineáris approximációt alkalmazó végeelemek használata mindig célravezetőbb. A meghatározott és növekvő sorrendbe állított első néhány domináns sajátfrekvenciához tartozó rez-

géskép ezután kerül meghatározásra, mert bizonyítható módon a sajátfrekvenciák mindig pontosabban számíthatók, mint a rezgéseképek és így a frekvenciákból számított sajátrezgéseképek lesznek pontosabbak. A megoldások a geometriától és az anyagminőségtől függenek, melyeket az alkalmazott alátámasztás döntően befolyásol. A rezgéseképek felhasználhatók később a gerjesztett szerkezet viselkedésének modellezésére.

4. EREDMÉNYEK

A szerkezet előbbiek alapján felépített végeselemes modelljével, benne lineáris végeselemekkel és az egyszerűség végett csillapításmentes esettel nyert, növekvő sorrendbe állított sajátfrekvenciáit az 1. táblázat foglalja össze az A, B és C terhelési esetekre. Az eredményekből kitűnik, hogy a szerkezet alapvetően már kis frekvencián rezgésbe hozható, amelyet a karcsú rudak alkalmazása eredményez. A szerkezet felterhelésnek kitett, de ez a rezgéseket kis mértékben befolyásolja, mert a főteherviselő elemek az alsó hosszartók középső részei, illetve a kapuknál lévő első keresztmerevítők [8], így megállapítható, hogy a vizsgált terhelések nem hangolják el a szerkezetet, csak kismértékben módosítják a frekvenciaértékeket, mert a legtöbb rúdelem előfeszítése csak kismértékben változott.

1. táblázat. A sajátfrekvenciák értékei [Hz] az A, B és C jelű terhelési esetekben.

Modus sorszám	Terhelési eset		
	A	B	C
1.	7,727	7,702	7,701
2.	9,285	9,285	9,284
3.	10,095	10,146	10,149
4.	14,480	14,477	14,476
5.	14,738	14,560	14,548
6.	16,004	15,405	15,361

A rezgéstani modellen végzett számításokból természetesen további sajátfrekvenciák is nyerhetők, de azok már nem szükségesek a továbblépéshez, mert az első néhány rezgés a domináns. A sajátfrekvenciákhoz tartozó sajátrezgéseképek pedig a végeselemes analízis eredményei között megtalálhatók.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A háromdimenziós modellen végzett numerikus szimulációk megerősítik a kétdimenziós modellen végzett számításokból levont következtetéseket, de ki is egészítik azokat a deformált alakok pontosabb meghatározásának lehetőségével és a rezgéstani vizsgálatokkal, amelyek szintén szükségesek a rácsos hídszerkezetre telepített szállítószalagpálya üzemeltetésbiztonságának előzetes el-

lenőrzésében. Az előfeszített szerkezetként számolt és állandósuló üzemből származtatott egyenletesen szétosztott terhelésekkel támadott acélszerkezet sajátfrekvenciái kerültek meghatározásra. A terhelési esetek frekvenciái közötti minimális eltérést a szerkezet végein kialakított, megerősített kapuk szerkezetre gyakorolt hatásával, továbbá a szerkezetet alkotó rudak karcsúságával és azok többségénél az előfeszítés megváltozására minimális hatást gyakorló terheléskiosztással indokoljuk. A szállítószalag mozgásából és a görgők elhasználódásából származó, hídvázra ható gerjesztett rezgések vizsgálata nem kerülhető meg, mert a frekvenciák egybeesése kerülendő és ennek vizsgálatához ad kiindulást a modálanalízis elvégzése.

6. IRODALOM

- [1] Ladányi G.: *Rácsos szalaghíd szilárdsági ellenőrzése*, Bányászati és Kohászati Lapok – Bányászat – Kőolaj És Földgáz, 151 (1-2), pp. 2-5. 2018.
- [2] Ladányi G.: *Strength assessment of a truss bridge for belt conveyors*, Annals of the University of Petroșani, Mechanical Engineering, 19, pp. 91–96. 2018.
- [3] Abaqus 6.13 online documentation, Dassault Systems, 2015.
- [4] Bathe, K. J.: *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall Inc.: Englewood Cliffs, NJ, USA, 1996.
- [5] Ilic D., Wheeler, C.: *Measurement and simulation of the bulk solid load on a conveyor belt during transportation*, Powder Technology, 307, pp. 190-202. 2017.
- [6] Wijaya, H., Rajeev, P., Gad, E., Vivekanantham, R.: *Automatic fault detection system for mining conveyor using distributed acoustic sensor*, Measurement, 187, 110330, 2022.
- [7] Popescu, F. D., Radu, S. M., Andras, A., Brînas, I., Marita M. O., Rebedea, N. I.: *The modal analysis, using simulation and modelling, of the boom of the ERC-1400 Bucket Wheel Excavator during operation*, Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, 63 (4), pp. 353-362. 2020.
- [8] Szirbik S., Virág Z.: *Finite element analysis of a steel bridge frame for belt conveyors*, Geosciences and Engineering, 11 (1), 2023.