

Autóbusz borítóvizsgálat szimulációjának feltételei

Dr. Matolcsy Mátyás

az AUTÓKUT volt főosztályvezetője

1. Bevezető

Az ENSZ-EGB 66. előírása szabályozza azt, hogyan kell minősíteni egy autóbuszt a tetőszilárdság szempontjából felborulás esetén. Az előírás 15 éve van hatályban, s annak elismerése - sőt hangsúlyozása - mellett, hogy annak idején nagy lépést jelentett az autóbuszok passzív biztonságának növelésében, időközben az is nyilvánvalóvá vált, hogy több szempontból átdolgozásra, továbbfejlesztésre szorult. Az autóbuszok borulásos baleseteinek gyakorisága, veszélyessége nem csökkent [1] és a 15 éves nemzetközi jóváhagyási gyakorlat rámutatott arra, hogy a különböző országokban (az előírásban megengedett négy, a gyakorlatban alkalmazott öt vizsgálati módszer alapján) történő jóváhagyások nem, vagy nem biztos, hogy egyenértékűek. S ennek okát elsősorban nem az egyes országokban működő vizsgáló állomásokban (Technical Service) kell keresni, hanem a túl "pongyola, laza" előírásban ami sokféle értelmezést, vizsgálati gyakorlatot tesz lehetővé. Ezzel viszont az EGB előírások egyik alapvető kritériuma sérül: az előíráshoz csatlakozó tagországok kölcsönösen elfogadják egymás jóváhagyását azzal, hogy ha bármelyik ország részéről gyanú merül fel egy jóváhagyással kapcsolatban, joga van felülvizsgálni a jóváhagyás alapját képező dokumentumokat, illetve maga is elvégezheti a vizsgálatot. De ennek csak akkor van értelme, ha a vitázó felek ugyanazt a vizsgálatot, ugyanúgy végzik el. Ennek a feltételei a jelenlegi 66-os előírásban nincsenek egyértelműen rögzítve. Magyar kezdeményezésre (1996 őszén) majd spanyol és angol támogatásra a GRSG (az EGB-nek az a szakbizottsága, amelyik a 66-os előírást kezeli, felügyeli) létrehozott egy speciális szakértői csoportot 1997-ben, amelynek vezetésével, elnöklésével a jelen cikk szerzőjét bízták meg. A szakértői csoportnak ma már sok tagja van: Magyarország, Spanyolország, Anglia, Németország, Hollandia, Csehország, Franciaország, Belgium, Dél-Afrika és bejelentkezett Olaszország és Lengyelország is. A nemzetközi szintű munka több irányban, több problémakör vitájával, tisztázásával folyik. Egyik feladat a standard borítási vizsgálat számítógépes szimulációjának feltételeit tisztázni. A jelen dolgozat ennek a témakörnek néhány fontos kérdését tárgyalja azzal az igénnyel is, hogy lehetőséget adjon a hazai szakembereknek a témához való hozzászólásra, az elmondottak kiegészítésére vagy vitatására, a végső magyar álláspont kialakítására.

2. Mit is szimulálunk?

A 66-os előírás definiál egy egyszerűen végrehajtható borítási vizsgálatot, - mint standard borulási balesetet - és azt mondja ki követelménynek, hogy ezen borulás (borítás) eredményeképpen egy jól definiált túlélési térnek sértetlennek kell maradnia, abba nem nyomódhat, hatolhat be semmiféle szerkezeti elem, ami eredetileg nem volt benne. Az előírás egy komplett autóbusz borítási vizsgálatán túl (ami egy 800 mm mély, vízszintes, beton fenekű árokba történő lefordulást jelent) még további módszereket enged meg a jóváhagyáshoz szükséges bizonyítás

eszközöként. Ezek: szegmensek (keretek) ingás ütővizsgálata, szegmensek (keretek) borítóvizsgálata, és a számítás. A számításhoz a gyakorlatban két nagyon eltérő változata honosodott meg: -szegmensek (keretek) laboratóriumi kvázi-statikusan vizsgálati eredményeit, képlékeny csuklók energiaelnyelését alapulvevő számítási módszerek -a komplett borítási folyamatot dinamikusan szimuláló programokkal végzett vizsgálatok, elemzések.

A 66-os előírást kidolgozók közül ma már csak e sorok írója tagja a GRSG-nek, így ő emlékezhethet arra az igen fontos feltételezésre, amellyel a standard borítási kísérlet mellett a másik három vizsgálati módszert is megengedi az előírás: az ekvivalencia elvére. Ez az akkori viták során két dolgot jelentett: a) a jóváhagyás alapvizsgálata a standard borítás, a komplett autóbusszal végzett borítási kísérlet, a másik három helyettesítő módszer külön-külön azért elfogadható, mert feltételezhető, hogy az alapvizsgálattal ekvivalens, lényegében azonos eredményeket produkál. b) szimulálni, helyettesíteni csak az alapvizsgálatot lehet, a helyettesítő vizsgálatok egymással nem felcserélhetők, egyik helyettesítő vizsgálat egy másikkal nem kiegészíthető. Bár az ekvivalencia elve volt az alapja a 66-os előírásnak, az elv azonban tételelesen nem került megfogalmazásra a szövegben. Ez is az egyik oka annak, hogy a gyakorlatban igen sokféle módszert alkalmaznak (pl. ingás ütővizsgálat számítógépes szimulációja), amelyek már követhetetlenek, ellenőrizhetetlenek. Ez az elemzés az ekvivalencia elvéből indul ki, azaz: az autóbusszal tetőszilárdság szempontjából történő jóváhagyásának alapja a komplett autóbusszal standard borítási vizsgálata. A további jóváhagyási vizsgálatok ezzel egyenértékűek kell, hogy legyenek, ezt kell, hogy szimulálják. Ez az elemzés magát a borítási kísérletet elemzi abból a szempontból, hogy mi is az a folyamat, amit szimulálni kell, mik azok a lényeges szempontok, amelyeket figyelembe kell venni a szimuláció során. Az itt elmondottak elsősorban a standard borítási kísérlet számítógépes szimulációjára vonatkoznak, de sok megállapítás érvényes a többi vizsgálati módszerre is.

3. A borítási kísérlet, mint folyamat

A standard borítási vizsgálat egy időben lejátszódó, ütközéssel kombinált dinamikus mozgásfolyamat. Ezt a folyamatot alapvetően tömegközéppont, illetve azok reakcióerejei határozzák meg. Bár a szerkezeti elemek jellegére, viselkedésére még részletesen vissza fogunk térni, érdemes itt megemlíteni, hogy a borítási folyamat szempontjából igen jó közelítéssel két részre osztható az autóbusszal: a végig merev egységként "működő" alsó rész (alváz, fenékváz), amely érdemleges, és főleg a túlélési tér szempontjából fontos alakváltozást, torzulást nem szenved, és a talajérés után deformálódó, torzuló felső rész (felépítmény). A két rész valahol a padlószint és a mellő között válik el egymástól, illetve kapcsolódik össze, az autóbusszal típusától (városi, turista, stb.) konstrukciójától (alvázas, önhordó, stb.) és kialakításától (borulókeretek száma, elhelyezése, stb.) függően. Mindkét részhez hozzárendelhető egy tömeghányad és ennek a súlypontja. Tájékoztató, durva közelítésként mondható hogy a tömegarány $3/4-1/4$ az alsó rész "javára".

A [tipikus borítási folyamatnak](#) a főbb fázisai az alábbiak:

a) **Kiindulási helyzet** ($t_0 = 0$) Instabil helyzet, az autóbusszal a két egyoldali kerekén "áll" úgy, hogy súlypontja a kerekeken ébredő függőleges támasztóerők síkjában

van. Az egész folyamat során a súlypont ekkor van a legmagasabb pozícióban. Az autóbusz még semmiféle mozgást nem végez, nem borul, szögsebessége, szöggyorsulása nulla.

b) **Merevtest-szerű forgás** ($0 < t < t_1$) a borulás szakasza. A forgás tengelye a kerekek talppontján átmenő egyenes (O_1). A gravitáció hatására növekvő szöggyorsulás és szögsebesség jellemzi ezt a forgó mozgást, mivel a súlypont köríven mozog és magassága csökken. A támasztóerők a kerék talppontokban hatnak. A mozgásnak ebben a szakaszában az alsó és felső rész merevtest szerűen együtt forog, megkülönböztetésüknek még nincs értelme.

c) **Tetőél felütközése** ($t = t_1$) A tetőhosszсарок mentén bizonyos helyi, lokális deformáció keletkezik, és az O_1 pont mellett itt, az O_2 pontban is megjelenik, felépül egy támasztóerő. A hosszсарок mozgása megáll, a környezetében lévő tömeg mozgása nagyon rövid idő alatt lefékeződik. Ebben az időpontban megszűnik az autóbusz merevtest-szerű forgása, tömegeinek ilyen jellegűen determinált együttmozgása.

d) **Szerkezeti deformáció első szakasza** ($t_1 < t < t_2$) amelyben a képlékeny csuklók működni kezdenek, ennek következtében a felépítmény jelentős torzulást szenved. Már nem érvényes a merevtest szerű forgómozgás, a jelenség leírható két forgástengely körüli "összekapcsolt" forgással: - az alsó rész merev szerkezeti egységként továbbra is az O_1 forgáspont körül forog, súlypontjának magassága tovább csökken. - a felső rész megszűnik merevtest-szerűen viselkedni, torzul, deformálódik. Ennek a résznek a súlypontmagassága is csökken ebben a fázisban.

e) **Mellöv felütközése** ($t = t_2$) Ha a felépítmény nem volt olyan merev, hogy a szerkezeti torzulás, a képlékeny csuklók működése korábban befejeződjön, a mellöv is talajt ér, felütközik, mozgása megáll. Ekkor a mellövnél (O_3) is megjelenik egy új támasztóerő, ezzel egyidőben azonban O_1 -nél a támasztás megszűnik, a kerekek szabaddá válnak, elhagyják a talajt.

f) **Szerkezeti deformáció második szakasza** ($t_2 < t < t_3$) A képlékeny csuklók tovább dolgoznak, a felépítmény torzulása folytatódik. A mozgás jellege alapvetően megváltozik: - az alsó merev rész az O_3 forgáspont körül tovább forog (súlypontja emelkedik), támasztóerők az O_3 forgáspontban, illetve a felépítményhez történő kapcsolódás pontjaiban ébrednek - a felső rész mozgását alapvetően a képlékeny csuklók működése, a nagymértékű képlékeny alakváltozások határozzák meg, már nem jellemezhető egyszerű forgással. Súlypontjának helyzete érdemlegesen nem változik. Támasztóerők az O_2 és O_3 pontokban ébrednek, míg a saját tömegerején kívül a csatlakozási pontokon keresztül az alsó résztől is "kap" dinamikus tömegerőket. Mivel ezen tömegerőknek van vízszintes komponense, amit csak a felépítmény - talaj közötti súrlódóerő tud "megtámasztani", bekövetkezik az autóbusz megcsúszása ebben a fázisban.

g) **Szerkezeti deformáció maximuma** ($t = t_3$) A képlékeny csuklók ellenállásával - és más hatásokkal - szemben a tömegerők és reakcióerejük már nem képesek további deformációkat, torzulásokat létrehozni, a képlékeny csuklók működése leáll. Ebben az időpontban érzékelhető a maximális szerkezeti torzulás, amely mind maradó, mind rugalmas alakváltozások eredményeként jön létre. Az előírás szerint

ebben az időpontban, ebben a helyzetben kell a túlélési tér sértetlenségét bizonyítani. Ez az állapot, pozíció a mozgás szempontjából instabil, nem egyensúlyi, az alsó rész súlypontja magasabban van az egyensúlyi állapotnál.

h) **A szerkezeti deformáció vége** (t_4) A maximális szerkezeti deformáció egy része rugalmas, ami a szerkezetben felhúzott rugóként működik, a rugalmas alakváltozások "kirugóznak" és a t_4 időponttól nincs további szerkezeti torzulás. A t_4 időpontban, vagy azt követően a felépítmény torzulása, a túlélési tér veszélyezettsége kisebb, mint t_3 -ban.

i) **Az autóbusz további mozgásai** ($t > t_4$) Ebben a fázisban már nincs szerkezeti alakváltozás, a torzult felépítményű autóbusz ismét merevtest-szerűen viselkedik. Lényegében egy lengő forgómozgást végez O_3 középpont körül mindaddig, amíg az egyensúlyi állapot be nem áll. A borulásnak, a mozgásnak ez a fázisa - a jóváhagyás szempontjából - már nem tartozik a vizsgálandó, szimulálandó folyamatba. A teljes folyamat azonban e nélkül a fázis nélkül nem írható le, nem magyarázható.

j) **Végállapot** ($t = t_5$) A torzult autóbusz és minden egysége mozdulatlanul nyugszik az árok betonján.

Itt szeretnénk még egyszer hangsúlyozni, hogy ez a teljes folyamat nem mindig játszódik le szükségszerűen. Ha a képlékeny csuklók ellenállása, felkeményedése kellően nagy ahhoz, hogy az alakváltozási folyamatokat a dinamikus erőhatásokkal szemben megállítsák, akkor a folyamat már megállhat a szerkezeti deformáció első szakaszában is.

Miközben a fentiekkel globálisan leírtuk a standard borulási folyamatot, egy lényeges kérdést még nem érintettünk. Az autóbuszban vannak nagy, koncentrált tömegű, abszolút merev egységek, mint például a hajtómű, futóművek, hűtő, akkumulátor, üzemanyagtartály, légkondicionáló egység, stb. Ezek rendszerint rugalmasan, néha lengéscsillapítva csatlakoznak az autóbusz vázszerkezetéhez, diszkrét pontokban vannak "felfüggesztve". Ezek a nagy tömegek a borulás első fázisában - a merevtest szerű forgás során - együtt mozognak az összes többi tömeggel. Amikor a tetőhosszarok ütköznek a talajon, a különböző tömegrészek együttmozgása "fellazul", az említett koncentrált tömegek tömegerejük révén a felfüggesztő rugók ellenében az autóbuszhoz képest is "elmozdulnak", a vázszerkezethez viszonyítva lassabban fékeződnek le, mozgásuk a környező tömegrészekhez képest eltérő időpontban fejeződik be, áll le.

4. A folyamat energiamérlege

A borulási folyamat jól leírható, jellemezhető az energia-megmaradás alapján, sorozatos energia mérlegeken keresztül. A kiindulási helyzetben az autóbusz rendelkezik egy helyzeti energiával a végállapothoz képest. Bármely időpontban felírt energia mérlegnek, amely tartalmazza a különféle energiákat, illetve munkákat, ezzel egyenlőnek kell lennie. Itt most nincs hely az energiamérleg matematikai formulálására [2], csak röviden összefoglaljuk azon energia elemeket, komponenseket, amelyeket mai ismeretünk szintjén célszerű az energiamérleg készítésénél figyelembe venni.

Helyzeti energia (E_p) Az autóbusz egész tömegének , és/vagy részeinek (alváz és felépítmény), illetve nagy tömegegységeinek (motor, futómű, stb.) súlypont magassága által definiálható energia. Nem abszolút, nem a vizsgálatától független érték, mert alapvetően függ az autóbusz geometriájától (pl. magassági jellemzőitől) főegység elrendezésétől (pl. padló alatti fekvő motor, vagy álló motor, stb.) a borítás során elszenvedett szerkezeti deformációjától, stb. A helyzeti energiának az instabil kiindulási helyzetben a legnagyobb, és a stabil végállapotban nulla az értéke.

Mozgási energia (E_k) A borítási folyamat során, autóbusz mozgó (forgó) tömegeinek (egész autóbusz, két fő rész, tömegegységek, stb.) a pillanatnyi sebesség (szögsebesség) által meghatározott energiája.

Képlékeny csuklók munkavégzése (W_{ph}) A működésbe lépő képlékeny csuklók - amelyek révén a felépítmény torzulása bekövetkezik - energiát emésztenek, nyelnek el mechanikai (alakváltozási) munka formájában. Ilyen energiaelnyelés a szerkezeti deformáció első és második szakaszában történik.

Lokális deformációs munka (W_l) A borulás során az ütközések, helyi dinamikus hatások okozhatnak olyan helyi alakváltozásokat, amelyek ugyan a karosszéria egészének torzulása, a túlélési tér veszélyeztetése szempontjából másodlagosak, elhanyagolhatóak, az energiaelnyelés szempontjából azonban nem. Nézzük néhány jellegzetes esetét ennek az energiaelnyelésnek:

- Amikor a tetőhosszarok ütköznek a talajjal, ott egy [helyi horpadásos deformáció](#) következik be. Érdemes felhívni a figyelmet arra, hogy ezt az energiaelnyelést ma másodlagosnak tekintjük, nem a tervezett, számított energiaelnyelésnél, hanem az energia szóródásnál (veszteségnél) vesszük figyelembe, de elképzelhető, hogy a jövőben a tetőhosszarok - az oszlopok (keretek) merevítésével - a túlélési teret védő, igen hatásos energiaelnyelő zónaként alakítható ki.
- a mellöv felütközésekor is létrejönnek helyi alakváltozások;
- a koncentrált, nagy tömegű főegységek dinamikus tömegerői a felfüggesztési pontok környezetében maradó alakváltozásokat, töréseket okozhatnak, ami szintén energiaelnyeléssel jár.

Súrlódási munka (W_s) A szerkezeti deformáció első szakaszában a [tetőhosszarok megcsúszik](#) a talajon és ez súrlódási munka formájában energiát emészt fel. Ugyancsak bekövetkezhethet csúszás a szerkezeti deformáció második szakaszában. Itt kell megemlíteni azokat a belső szerkezeti súrlódásokat is, amelyek a dinamikus lengőmozgások csillapítása szempontjából igen fontosak.

Talaj által elnyelt energia (W_g) Mind a tetőhosszarok, mind a mellöv ütközésekor a talaj is elnyel bizonyos energiát a benyomódása és a talajban gerjesztett lengések formájában.

Egyéb szóródott energia (W_o) Ide sorolható az autóbusz szerkezeti elemek lengései, rezgései által elnyelt energia csakúgy, mint a nagy tömegű egységek rugalmas (csillapított) felfüggesztéseinek energia-emésztése. És itt vehetjük egyelőre számításba azokat az energia komponenseket, amelyekre ma még nem fordítunk különösebb figyelmet.

A borulás különböző fázisaiban [az egyes energia komponensek](#) eltérően változnak.

Érdekes megemlíteni, hogy a 66-os előírás most azzal a durva közelítéssel él, hogy a potenciális energia első részének ($E_p^a - E_p^c$) a 75%-át emésztik fel a képlékeny csuklók, ez az energiahányad fordítódik a felépítmény torzulására, ez veszélyezteti a túlélési teret, s a maradék 25% "szóródik szét" egyéb, az előírásban nem részletezett munkavégzésekre, energia elnyelésekre. Az előírás tartalmaz egy másik durva közelítést - ma már mondhatjuk: hibát - akkor, amikor feltételezi, hogy a tetőhosszarok felütközésével megszűnik a további energiaközlés, energia-bevitel a szerkezetbe. A képlékeny csuklók működésével az autóbusz súlypontja tovább süllyed - egészen a mellöv felütközéséig - így további potenciális energia alakul mozgási energiává és "támadja meg" a felépítményt. Korábbi számításaink szerint [4] ez az "energiatöbblet" 20%-tól a 100%-ot meghaladó mértékű lehet az autóbusz magasságától, kialakításától függően, ennek elhanyagolása a szimuláció során több, mint hiba.

5. Szerkezeti megfontolások

A standard borítási vizsgálat szimulációjához nagyon fontos az autóbusz modelljének kialakítása, felépítése. Ennek több vonatkozása van, itt a szerkezet konstrukciójával, kialakításával kapcsolatos kérdéseket tekintjük át. A borulásnál a szerkezetnek a deformációs és energiaelnyelő képessége a fontos, ezen szempontok szerint vizsgáljuk, osztályozzuk a szerkezeti részeket, elemeket.

5.1. Merevség, deformációképesség

A merevségük alapján három kategóriába sorolhatjuk a modellben is megjelenített szerkezeti egységeket, elemeket:

a) **Abszolút merev egységek** a főegységek (motor, sebességváltó, futóművek, stb.) amelyek a borulás során semmiféle érdemleges alakváltozást nem szenvednek. Ide sorolható alváz az autóbuszoknál az alváz szerkezet maga.
b) **Relatív merev egységek**, amelyeken kis, helyi deformációk bekövetkezhetnek, de ezeknek az egyenkénti energiaelnyelő képessége nem jelentős, s főleg nem tervezett, és nincs közvetlen hatásuk a borulási folyamat geometriájára, a túlélési tér alakulására. Ilyennek tekinthető a padlószint alatti szerkezet ("alsó rész"), általában a homlokfal a szélvédő alatt és hátfal a hátfali ablak alatt és bizonyos esetekben a tetőszerkezet. Ez utóbbi azonban alapos mérnöki elemzést igényel, mert van amikor a tető síkjában [merev szerkezetként viselkedik](#), s van amikor a tető "megrogyik", azon belül is kialakulnak képlékeny csuklók.

1. **Deformálódó keretek.** A modern autóbuszok nagy, magas oldalablakokkal, vékony ablak- és ajtóoszlopokkal rendelkeznek. Ezeknek az oszlopoknak rendszerint szerkezeti folytatása van az oldalfalakban, tetőszerkezetben és így együtt egy keretszerkezetnek tekinthetők. Ezek a keretek alakulnak ki a képlékeny csuklók, amiknek a "működése" során bekövetkezhet a felépítmény jelentős mértékű torzulása, a túlélési tér sérelme. A [kereteknek különböző típusait](#), formáit ismerjük.

a) Az egyszerű, normál keret, amelyet ablakoszlopok, oldalfal oszlopok, tetőborda alkotnak s rendszerint a fenékváz egy keresztartóhoz csatlakoznak. A normál keret a keresztmetszet egy síkjában helyezkedik el.

b) Biztonsági (boruló) keret, amelyet rendszerint egy normál keret megerősítésével alakítanak ki. Ennek eredményeképpen nő a keret teherbírása, szilárdsága és energiaelnyelő képessége.

c) Kvázi-keretnek nevezzük azt, amely a szabályos normál kerettől kis mértékben

eltér, például az ablakoszlop nem folytatása az oldalfal oszlopnak (vagy a tetőbordának), attól kis mértékben eltolt, azonban ez az excentricitás (e) nem lehet túl nagy, közös szerkezeti csomópontjuk még merevnek tekinthető.
d) Részleges keret az, amikor a keret elemek nem alkotnak zárt hurkot. Ennek speciális esete egy magában álló ajtó- vagy ablakoszlop.

5.2. Egyéb szerkezeti elemek szerepe, hatása

Az autóbusz szerkezeti modelljének kialakításakor mindazokat a szerkezeti elemeket, konstrukciós megoldásokat figyelembe kell venni, hatásukat be kell építeni, amelyek befolyásolhatják a képlékeny csuklók elhelyezkedését és karakterisztikáját. Általános elvként megfogalmazva mindazon szerkezeti elemeket figyelembe kell venni, amelyek részben vagy egészben növelik a keretek teherbírását és energiaelnyelő képességét. [Néhány konkrét példát](#) mutat az alábbi felsorolás: [3]

- homlok és hátfal az üvegezés alatt, amelyek várható merevségét gondosan elemezni kell: esetenként viselkedhetnek merev elemként, máskor jelentős torzulásra képesek
- kerékdobok - amennyiben a padlószint fölé nyúlnak - jelentős támasztást (merevséget) adhatnak az oldalfalnak, oldaloszlopoknak
- ülés alatti dobogók és egyéb, padlószint fölé nyúló dobozok a kerékdobokhoz hasonló hatást fejtenek ki.
- ülések, amennyiben egyidejűleg az oldalfalhoz és a padlóhoz is rögzítettek, szintén merevítik az oldalfalakat
- belső falak, térelválasztó elemek, (pl. a vezetőtér falai) - WC, konyha, szekrények, stb., amelyek rendszerint utólagos beépítéssel kerülnek be az autóbuszba, nagy merevséget kölcsönözhetnek a felépítménynek
- fűtő, szellőző csatornák, amelyek a padló-, ill. tetősarokban futnak - a tetőbe épített szerkezeti egységek (szellőzők, vészkijáratok, légkondicionáló berendezés, stb.) merevítik a tetőszerkezetet.

6. Képlékeny zónák, csuklók

6.1. Definíció

A nemzetközi szakirodalomban - bár gyakran használják a fogalmakat - nincs egységes definíció a fenti kifejezésekre. Az alábbiakban megpróbáljuk ezt a hiányt pótolni.

Képlékeny zóna a járműnek az a speciális, geometriailag behatárolható része (eleme), amelyben a különböző balesetek, ütközések során keletkező dinamikus erők hatására: - nagyméretű képlékeny (maradó) alakváltozás koncentrálódik - az eredeti alak, geometria (keresztmetszet, hossz) lényegesen torzul, megváltozik - a helyi horpadások révén stabilitásvesztés lép fel - deformációs munkaemésztés, energiaelnyelés történik

Képlékeny csukló a képlékeny zóna speciális esete, rudakon, csöveken, egyszerű, a keresztmetszeti méreteihez viszonyítva hosszú szerkezeti elemeken - ill. azok kombinációin - alakul ki. A rúd (cső) merev részei a képlékeny csukló működése révén egymáshoz képest elfordulnak, vagy egymáshoz közelítve elcsúsznak [5]

Ennek megfelelően definiálhatók elemi lineáris és rotációs képlékeny csuklók, valamint kombinált, összetett csuklók.

A szerkezeti modell kialakításához egyik alapvető mérnöki feladat annak meghatározása, hogy hol, milyen típusú és milyen karakterisztikájú képlékeny csukló működésével kell számolni.

6.2. Képlékeny csuklók kialakulásának helye

A modellezés egyik, ma is legvitatottabb kérdése a képlékeny csuklók helyének meghatározása a szerkezetben. Három lehetséges módszer kínálkozik:

- korábbi borulások balesetek és borítás vizsgálatok mérnöki elemzésein nyugvó mérnöki tapasztalat alapján
- a vizsgálandó, modellezendő autóbusz valós nagyságú szerkezeti elemeivel (dinamikus, vagy kvázi-statikusan terheléssel) végzett laboratóriumi vizsgálatok alapján
- számítógéppel végzett részletes VEM analízis eredményei alapján.

Ez utóbbi módszer - a számítógép kapacitásának növekedésével és a VEM programok finomodásával - az idők folyamán egyre népszerűbb lett, mivel az objektivitást sugallja.

A gyakorlat azonban ezt nem támasztja alá: nem igaz az a feltevés ennek a módszernek, hogy a képlékeny csukló ott fog kialakulni, ahol a VEM számítás szerinti feszültség meghaladja a szerkezeti anyag folyáshatárát. A képlékeny csuklók kialakulása igen szűk területre korlátozódó feszültségkoncentráció és alakhibák együttes hatására bekövetkező lokális horpadások következménye, amely már a szerkezeti folyáshatár alatt bekövetkezhet. Ma az mondható, hogy a képlékeny csuklók helyének kijelöléséhez a laboratóriumi vizsgálatokkal "megerősített" speciális mérnöki tapasztalat a legmegfelelőbb alap.

A képlékeny csuklók általában a kereteken helyezkednek el, [lehetséges számuk, pozíciójuk](#) sokféle lehet. Egy kereten nyolc csuklóval már a legbonyolultabb konstrukció is kezelhető, olyan autóbusz talán nincs is, amelynél minden kereten mind a nyolc csukló működtetése szükséges. A négycsuklós keret (PH₂, PH₃, PH₆, PH₇) ma a leggyakrabban használt, azonban ma már tudjuk, hogy ez a modell csak erősen korlátozott feltételek mellett érvényes (hagyományos távolsági autóbuszoknál "egyenszilárdságú" keretek esetén).

A modell kialakításánál meg kell adni, dokumentálni kell a vázszerkezet összes képlékeny csuklóját, megadva az alábbiakat: - minden kereten minden csukló pozícióját - minden csukló típusát, fajtáját - minden csukló karakterisztikáját.

Az egységes csuklóelrendezés alkalmazása érdekében célszerű "fiktív" csuklókat is alkalmazni. Ezeknek két fajtája lehet: a nagyon lágy és nagyon merev csuklók. A számításoknál nem kezelhető végtelen merev, illetve nulla merevségű csuklók helyett ilyenkor célszerű a többinél 2-3 nagyságrenddel merevebb, illetve lágyabb csuklót "beépíteni" a szerkezetbe.

I. táblázat

Keretek	Képlékeny csukló típusa					
	PH1	PH2	PH3	PH4	PH5	PH6
R1	<i>végtelen</i>	A	A1	A	A1	<i>végtelen</i>
R2	B	C	C1	C	C1	B1
R3	D	E	E1	F	F	G
R4	H	F	F	F	F	H1
R5	E	E1	F	F	K	
R6	L	E	E1	F	F	M
R7	H	F	F	F	F	H1
R8	H	F	F	F	F	H1
R9	N	O	P	P1	O1	N1

Az I. táblázat példának bemutat egy kilenc keretes autóbust a (R1 R9), keretenként hat képlékeny csuklóval (PH1 ...PH6) és a csuklótípusok elrendezését. Az eltérő betűk eltérő konstrukciójú, karakterisztikájú képlékeny csuklókat jelöl, az azonos betűk azonosakat. A betű mögé írt 1-es (pl. B és B1) azt jelzi, hogy azonos konstrukciójú a képlékeny csukló helye (például ablakoszlop a mellővnél, jobb és bal oldalon), de a terhelése ellentétes irányú. Ezt fontos figyelembe venni, mert az ellentétes (eltérő) terhelés eltérő csukló karakterisztikát eredményezhet. A táblázatbeli példa mutatja, hogy az R1 kereten két csuklót fiktív, nagyon merev (végtelen) karakterisztikával vettünk figyelembe.

6.3. Képlékeny csuklók karakterisztikája [5]

Minden [képlékeny csuklót karakterisztikájával](#) - terhelés és deformáció függvénykapcsolata - jellemezhetünk. A függvény általános alakja tipikus stabilitást veszítő görbe, ahol a $d > d_m$ deformáció esetén a csukló egyre kisebb ellenállást fejt ki, "összeomlik" egy adott $L - L_m$ terhelés hatására is. Az elvi karakterisztika mellett öt különféle - négyzet keresztmetszetű, vékonyfalú - acélcsövön kialakuló rotációs képlékeny csukló (nyomaték - szögelfordulás) jelleggörbét is mutatja. Az $L(d)$ görbe alatti terület (integrál) magadja a csukló által az adott deformáció során elnyelt energiát. A képlékeny csuklókkal kapcsolatban van még egy alapvetően fontos kérdés: a működési tartományuk meghatározása [5].

7. Keretek kölcsönhatása, csavarómerevség

Mint láttuk, a szerkezet modellezésének leggyakoribb és legpraktikusabb módja a keretből való építkezés. A keretek deformálódó egységek, pontosabban képlékeny csuklókkal összekötött merev elemekből, rudakból állnak. A keretek azonban a borítási vizsgálat során nem egymástól függetlenül deformálódnak, hanem egymással kölcsönhatásban állnak. Ezt a kölcsönhatást a keretek között lévő szerkezetek - oldalfalak, tető, padló szerkezet, stb. - biztosítják. A "gyengébb" keretet a szomszédos "erős" keretek nem engedik jobban deformálódni, mint ahogy ők deformálódnak. A padló sarkok, merev tetőélnél a hosszsarok egyenes marad, amiből a gyengébb keretek sarokpontjai sem tudnak kilépni. A keretek kölcsönhatása - legalább is a deformációs folyamat elején, annak első fázisában arányos a felépítmény keretek közötti részének csavarómerevségével. Minél nagyobb a csavarómerevség, annál erősebb a kölcsönhatás. Itt lép be az ablaküvegek szerepe a tetőszilárdság kérdésébe: ha az üvegek a tetőél felütközésekor nem törnek ki,

nagyobb csavarómerevséggel számolhatunk. Igen nagy a szélvédők és a hátfal üvegnek a hatása a csavarómerevségre, sajnos azonban ezek elsők között törnek ki. A borítóvizsgálat számítógépes szimulálásához a karosszéria merevségi mátrixát VEM analízissel lehet meghatározni. A számítógépes szimulációnak egyik fontos eleme a korábban már említett szerkezeti csillapítás is, ami nélkül a lengőmozgások - tapasztalataink szerint - nem kezelhetők.

8. Tömegeloszlás

Mint láttuk, a borulás, a borítóvizsgálat egy dinamikus folyamat (ütközések, tömegerők, stb.) Ahhoz, hogy a folyamat szimulálása, számítása, az így kapott eredmények elfogadhatóak legyenek, a modellnél alkalmazott tömegeloszlásnak a lehető legjobban követnie kell az autóbusz tényleges tömegeloszlását. Ennek érdekében az alábbi alapelveket rögzíthetjük:

- a nagytömegű (pl. 50 kg-nál nagyobb) főegységeket önálló, merev tömegként kell figyelembe venni, a valóságos szerkezeti kapcsolódásukat szimulálva: a felfüggesztési pontok számát, helyét, jellegét (rugalmas, merev, csillapított) ezekre jutó statikus és dinamikus tömeghányadokat figyelembe véve.
- a karosszéria már korábban említett nagy merev részeit (alváz, teljes padló alatti szerkezet, homlok- és hátfal, esetleg a tető, stb.) a saját valódi tömeghányadokkal - azokat vagy megoszló terhelésként, vagy súlypontjukba redukálva - kell a modellben megjeleníteni.
- Ha a modell keretekre alapozva épül fel, a karosszéria tömegét a keretek között arányosan, a tényleges arányokat figyelembe véve célszerű elosztani.
- A kereteknek - a képlékeny csuklók között - vannak merev részei, elemei. Ezekhez a merev részekhez az arányos tömeghányadokat hozzá kell kapcsolni.
- Fontos ellenőrzés, hogy a modellben a fenti elvek alapján szétosztott, elhelyezett tömegek összegének meg kell egyeznie az autóbusz tényleges tömegével.

9. A szimuláció, számítás dokumentálása

Ahhoz, hogy egy borulás szimuláción, számításon alapuló jóváhagyás bárki által ellenőrizhető, átlátható legyen, igen fontos még az egyértelmű dokumentáltság megkövetelése. Ebből a szempontból is nagyon hiányos most a 66-os előírás. Egy fontos szempontot nem szabad figyelmen kívül hagyni ezzel kapcsolatban. Ez az egyik legbonyolultabb - ha nem a legbonyolultabb - előírás a lehetséges jóváhagyó vizsgálatok szempontjából. Főleg a számításos, szimulációs módszer igényel olyan speciális szaktudást (dinamika, csuklós mechanizmusok, szilárdságtan, nagy, képlékeny alakváltozások elmélete, stb.) amely általában nem része a hivatalos vizsgáló állomások (Technical Service) általános műszaki ismereteinek. Egy általános járműves gyakorlattal rendelkező vizsgáló mérnök magában nem tudja eldönteni - s nem is lehet a feladata - hogy egy autóbusz borítási szimuláció általa ismeretlen algoritmusa, számítógépes programja, az autóbusz modellje, stb. alkalmas-e a jóváhagyási eljárás alátámasztására, ha csak nincsenek nagyon világos és szigorú feltételek, követelmények rögzítve a 66-os előírásban ezekre vonatkozóan. És most sajnos nincsenek. Három kérdéskört kellene ezzel kapcsolatban szabályozni, pontosabban mindazokat az adatokat, dokumentumokat az előírásban felsorolni, amiket a számításos, szimulációs jóváhagyási vizsgálatnál dokumentálni kell, része kell, hogy legyen a jóváhagyási műszaki dokumentációnak:

a) A számítás, szimuláció bemenő adatai

Meg kell adni minden olyan adatot, információt, ami a számítás, szimuláció alapját képezte, így például:

- a felépített autóbusz modellt, annak rajzát és a hozzá szükséges magyarázatokat, indokokat, feltételeket
- a modellhez kapcsolódó tömegmátrix minden elemének megadása a szükséges (pl. keretenkénti) részösszegekkel, illetve az autóbusz tényleges tömegével megegyező végösszeggel
- a modellben alkalmazott képlékeny zónák és csuklók teljes dokumentálását (elhelyezkedését, típusát, karakterisztikáját, működési tartományát) az egyértelműséghez szükséges részletrajzokkal, vázlatokkal, fényképekkel, diagramokkal, stb.

b) A számítás, szimuláció kimenő adatai, eredményei

A dokumentált kimenő adatoknak két dolgot kell bizonyítaniuk: egyrészt, hogy a jóváhagyás alapvető kritériuma - a túlélési tér sértetlensége a borítási vizsgálat során - teljesül-e, másrészt, hogy a számítás, szimuláció eredményei reálisak-e, elhíhetők-e, részleteiben alátámasztottak-e? Ennek megfelelően legalább az alábbiak várhatók el:

- túlélési tér minden pontjára egyértelműen bizonyítani, hogy a teljes borítási folyamat alatt, s annak legkritikusabb időpontjában ($t = t_3$ a szerkezeti deformáció vége) sem sérül
- minden képlékeny csuklóra kimutatni, hogy annak működése belül maradt a megadott működési tartományán - számítógépes szimuláció esetén a 3. pontban tárgyalt jellegzetes időpontok (t_1, t_2, t_3) értékét megadni
- néhány jellegzetes támasztó és ütközőerő időbeli lefutásának diagramját mellékelni
- megadni néhány jellegzetes kinematikai paraméter (borítási szög, szögsebesség, szöggyorsulás, felütközésekhez tartozó szögek, súlypont magasság, stb.) időbeli változását, értékét
- néhány jellegzetes időponthoz (t_0, t_1, t_2, t_3) tartozó energiamérleget dokumentálni.

c) A számítás, szimuláció algoritmusa, számítógépes programja

Az egyik legnehezebben rendezhető, megoldható kérdésnek ma a számítás, szimulációhoz használt algoritmusok és számítógépes programok (A/SzP) auditálása tűnik. Ezzel kapcsolatban néhány elvi peremfeltétel rögzíthető: -nem lehet a jóváhagyás alapja bármilyen, ellenőrizetlen A/SzP, hiszen szerzőjének tudatlansága, vagy nagyon is "tudatos" volta alapjaiban rendíti meg a jóváhagyások alapelvét.

- nem lehet egy, vagy két A/SzP-t "hivatalosnak" kinevezni, mert az sértené az egyes országok, vizsgáló állomások szuverenitását, monopolhelyzetet hozna létre és alapvetően ellenkezne a tudomány, a számítástechnika újabb és újabb eredményeinek alkalmazhatóságával.
- mivel különböző, önálló országok vizsgáló állomásairól, jóváhagyó hatóságairól van szó, a jóváhagyásokhoz használt A/SzP-k auditálása csak nemzetközi szinten képzelhető el.
- ahhoz, hogy a nemzetközi szintű auditálás se lehessen szubjektív, kirekesztő, a 66-os előírásban rögzíteni kellene azokat a - *minimális, de elengedhetetlen, általános* -

követelményeket, amelyeket az A/SzP-knek ki kell elégíteniük. Célszerű minden A/SzP-t egy nemzetközileg hitelesített minta-borítás lefuttatásával, ismert végeredménnyel rendelkező próbafeladat megoldásával minősíteni.

Ha elfogadjuk az A/SzP-k nemzetközi szintű auditálásának gondolatát, ahhoz hozzárendelődik néhány - nem egyszerűen kezelhető - adminisztratív jellegű probléma is: jóváhagyott A/SzP-k nyilvántartása, szerzői jog, mások által való hozzáférhetőség kérdése, eseti ellenőrzés a nem kívánt "belenyúlásokkal" szemben, stb. Ezek a kérdések további elemzéseket igényelnek.

10. Zárószó

Annak idején, a 66-os előírás kidolgozásakor a számításos módszert azért vettük fel a lehetséges jóváhagyási vizsgálatok közé, mert az "egyszerű és olcsó". Kis autóbuszgyártók, karosszálók, akik évente néhány tíz, vagy akár csak néhány száz autóbust gyártanak, de ezen belül több típust, nem engedhetik meg maguknak a komplett autóbusz borításvizsgálatát. Egy ilyen borító vizsgálat ma Magyarországon több 10mFt. Az elmúlt 10-15 évben rá kellett jönnünk, hogy le kell számolni az egyszerű és olcsó vizsgálat illúziójával. Ahhoz, hogy a számítás, szimuláció a fentiekben tárgyalt, nemzetközi szinten elfogadható követelményeknek megfeleljen, jelentősen át kell dolgozni a 66-os előírást, meg kell valósítani az ekvivalencia elvét, ami drágább, bonyolultabb, hosszadalmasabb jóváhagyási vizsgálatokat fog megkövetelni. Persze, még így is nagy valószínűséggel a számítás, szimuláció lesz a legolcsóbb módszer, mai árakon néhány millió forintos nagyságrendben, és megmarad a legrövidebbnek is, ha a tényleges autóbusz borításához beszámítjuk a vizsgálandó autóbusz elkészítését is. Vélelmezhető azonban az is, hogy a jövőben meg fog nőni a szerepe a tényleges borítóvizsgálatoknak lefutott (egyéb szempontok szerint már bevizsgált) prototípusokkal, meglévő, lefutott típusokból kialakított típusváltozatokkal.

11. Hivatkozások

1. Matolcsy M.: Elgondolkoztató adatok. (Az autóbuszok továbbra is borulnak) Járművek, 47. évf. (2000) 1-2. szám, p. 22-24.
2. Matolcsy M. - Molnár Cs.: Autóbusz borítási kísérlet mint folyamat és ennek energiamérlege. XXX. Autóbusz Szakértői Tanácskozás előadása, Győr, GTE (2000. aug.) Megjelent magyarul: Járművek 46. évf. (1999) 7-8. szám p. 11-16.
3. Matolcsy M.: Modellézés problémái autóbuszok tetőszilárdságának számításakor (EGB 66-os előírás) XXVIII. Autóbusz Szakértői Tanácskozás előadása, Budakalász, GTE (1997) Megjelent: Járművek 44. évf. 8-9. szám p. 329-338.
4. Matolcsy M.: Study of energy conditions to the rollover process of buses. FISITA Congress, Paris (1998) Előadás száma: F98T649, 8 oldal
5. Matolcsy M.: Crashworthiness of bus structures and rollover protection. Crashworthiness of Transportation Systems: Structural Impact and Occupant Protection. 1997. Cluwer Academic Publisher. p. 321-360.