

A ROBBANTÁSOS MERÉNYLETEK ELLENI VÉDEKEZÉS SORÁN FELMERÜLŐ KÉRDÉSEK, SZÁMÍTÁSI MÓDSZEREK ÉS ALKALMAZÁSUK – A PROBLÉMAKÖR MÚLTJA ÉS JELENE

*Román Zsolt, okleveles építőmérnök
BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke*

A cikk egy vázlatos áttekintést kíván nyújtani a nagyszabású terrorista robbantások hatásairól és a védekezés lehetőségeiről. A védekezés vonatkozásában részletesebben kifejtjük az épületeink, szerkezeteink ilyen terhekre történő statikai, szilárdsági méretezési eljárásainak lényegét.

This article offers a briefing on the effects of large-scale terrorist bombings, and the possible ways of defense against them. Regarding defense, we focus on presenting the basis of dynamic design methods to be used when analyzing our buildings and structures.

A TÉMA JELENTŐSÉGE

A robbantásos merényletek hatásai elleni védekezés mára már egy jól elkülöníthető ágazattá vált úgy a katasztrófák elleni építőmérnöki tervezésben, mint műszaki katonai vonatkozásban. A téma születése a második világháború utáni első 10-20 évre tehető, amikor a kezdődő hidegháború miatt jelentős méretű atomrobbanásra lehetett számítani. Az észvesztő tempójú atomfegyverkezés során számos atomrobbantást hajtottak végre, melyek vizsgálata során megjelent az igény a robbanások erősségének parametrizált jellemzésére. A fegyverkezés mellett párhuzamosan megindult a védekezés is. Az atomrobbanások elleni épülettervezésből fejlődött ki aztán – a téma mintegy naprakészen tartásaként – a hagyományos, és tetszőleges robbanóanyagokkal kivitelezett robbantások elleni tervezés. Napjainkban tulajdonképpen a világ bármely pontján lehet számítani akár balesetből, akár terrortámadásból származó




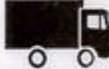
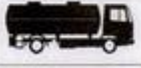

robbanásra, melyek ellen a kritikus létesítményeinket meg kell védeni. Az, hogy ha kis valószínűségű eseménnyé is, de reális veszéllyé váltak a robbantások, sok tényező együttes hatásának köszönhető, melyek közt a teljesség igénye nélkül említhetjük:

- a szovjetunió felbomlását, és a globalizációt, melynek sok tűzfészek köszönhető világszerte,
- a technika rohamos fejlődését, melynek következtében szakértés nélküli egyének is képesek robbantások végrehajtására.

A tudomány rohamos fejlődése miatt ugyanakkor már rendelkezésre állnak azok a lehetőségek, melyekkel a kellő mértékű védelem szinte tetszőleges méretű robbanások esetén biztosítható az emberélet védelmi követelmények szavatolása mellett. Ezen lehetőségek vázlatos bemutatása a célja ennek az értekezésnek.

A TERHELÉSEK MEGHATÁROZÁSA – AVAGY MIRE SZÁMÍTSUNK?

A terhek felvétele mindig egy szituáció feltételezésével kezdődik. A földemek hasznos terhénél feltételezzük, hogy rendeltetésszerű terhelés mellett maximum mennyi tömeg kerül egy négyzetméterre. A mértékadó terhek végül statisztikai, valószínűségelméleti számítások után kerülnek meghatározásra. Ugyancsak igaz ez a természeti terhek esetében. A robbanásoknál ez nem működik, de legalábbis nem olyan egzakt módon, mint a többi esetben. A baleset jellegű robbanások még csak-csak kezelhetők, el tudjuk képzelni milyen jellegű baleset történik, és meghatározható a felszabaduló energia. Az erőszakos robbantásoknál színre lép az emberi tényező, ami kiszámíthatatlanná teszi. Nem lehet meghatározni, hogy a merénylet során mi a mértékadó robbanóanyag mennyiség, mert nem tudni, hogy a merénylet mihez jut hozzá, mennyihez jut hozzá, és azt milyen formában hozza működésbe. Az amerikai katasztrófavédelem által készített táblázat a gépkocsi típusától teszi függővé a mértékadó robbanóanyag mennyiséget.

ATF	VEHICLE DESCRIPTION	MAXIMUM EXPLOSIVES CAPACITY	LETHAL AIR BLAST RANGE	MINIMUM EVACUATION DISTANCE	FALLING GLASS HAZARD
	COMPACT SEDAN	500 Pounds 227 Kilos <i>(In Trunk)</i>	100 Feet 30 Meters	1,500 Feet 457 Meters	1,250 Feet 381 Meters
	FULL SIZE SEDAN	1,000 Pounds 455 Kilos <i>(In Trunk)</i>	125 Feet 38 Meters	1,750 Feet 534 Meters	1,750 Feet 534 Meters
	PASSENGER VAN OR CARGO VAN	4,000 Pounds 1,818 Kilos	200 Feet 61 Meters	2,750 Feet 838 Meters	2,750 Feet 838 Meters
	SMALL BOX VAN <i>(14 FT BOX)</i>	10,000 Pounds 4,545 Kilos	300 Feet 91 Meters	3,750 Feet 1,143 Meters	3,750 Feet 1,143 Meters
	BOX VAN OR WATER/FUEL TRUCK	30,000 Pounds 13,636 Kilos	450 Feet 137 Meters	6,500 Feet 1,982 Meters	6,500 Feet 1,982 Meters
	SEMI-TRAILER	60,000 Pounds 27,273 Kilos	600 Feet 183 Meters	7,000 Feet 2,134 Meters	7,000 Feet 2,134 Meters

1. kép – Az amerikai katasztrófavédelem által javasolt mértékadó robbanóanyag mennyiségek

A táblázat is csak tulajdonképpen annyit tesz, hogy megmondja, milyen típusba mennyi robbanóanyag fér el. Statisztikai adatok a gyakorlatilag is használt robbanóanyag mennyiségről nincsenek, nem is lehetnek. Így a mennyiséget tekintve marad a lehető legrosszabb eset feltételezése. Másik kérdés az előfordulási valószínűség. Mekkora valószínűséggel számolhatunk egy robbantásos merényletre? Oly sok tényezőtől függ, hogy tulajdonképpen megjósolhatatlan. Tervezőként vagy választjuk a legrosszabb esetre történő méretezést, vagy – mintegy elhárítva magunkról a felelősséget – több esetet és előfordulási valószínűséget megvizsgálva olyan diagramokat és táblázatokat adunk a megbízók kezébe, melyből ők maguk olvashatják le, hogy a kívánt biztonsági szinthez (emberélet épsége, szerkezet épsége, stb...) és a számított merénylet szintjéhez (baleset jellegű, kis/nagy erejű merénylet) milyen szerkezet tartozik. Korlátozottan ugyan, de ugyanez a „jellemzés” elkészíthető már meglévő épületek esetében is. Ez az eljárás a földrengés elleni tervezés szülötte, és Performance Based Design néven vonult be a szakmába.

Felelőtlenség volna ugyanakkor, ha a témával ilyen mélyen foglalkozva, pont a hatásokat egyszerűsítene le a tervező táblázatokkal, és biztonság javára tett

közelítésekkel. A terrorista merényletek ha nem is éles határokkal, de kategorizálhatók. A kollektív bosszúállás céllal kivitelezett merényletek egyik fajtája a mai háborúk öngyilkos merényletei. Más térségekben más robbanóanyagok használata a jellemző. Míg az IRA-nál gyakori volt a Semtex, addig Timothy McVeigh elképesztő mennyiségű ANFO-t pakolt 1995-ben Oklahomában a pokolgéppé változtatott teherautójába. A közel-keleti robbantásoknál a felborult politikai rendszerek és törvényen kívüli térségek miatt a merénylők hadianyagokhoz is hozzájutnak, így ott a gázpalackok, régebbi hadieszközök adják a robbanóanyag mennyiségét (2. 3. 4. 5. 6. képek). A robbanóanyagot jelentős mennyiségben tartalmazó hadianyagok a tüzérségi lövedékek és az aknagránátok. A 1. és 2. táblázat ezekről, és tartalmukról közöl adatokat. (Források: [1][2][3][4][5])

Úrméret	Típusjelzés	Töltet tömege [kg]	Robbanóanyag		Hossza [mm]
122mm	OF462	3.68	TNT	Amatol 40/60	560
	OF471H	3.8	TNT		
	OF471	3.6	TNT		
152mm	OF530	6.86	TNT		650
	OF550	7.00	TNT		
	OF551	6.53	TNT		
	F533 (régi)	8.00	TNT		
	OF540	6.25	TNT		
	F542(régi)	5.86	TNT		

1. táblázat – Tüzérségi lövedékek adatai

Úrméret	Típusjelzés	Töltet tömege [kg]	Robbanóanyag		Hossza [mm]
82mm	O832	0.4	TNT	Schneiderite	313
	O832DU	0.435	TNT	Dinitronaftalin	330
120mm	OF843	2.67(TNT)/1.58(Amatol)	TNT	Amatol 40/60	656
	OF843B	1.4	TNT	Dinitronaftalin	668
	F843	3.9	TNT		750

2. táblázat – Aknagránátok adatai



2. kép – ANFO hordók [6]



3. kép – Aknagránátok [7]



4. kép – Tüzérségi lövedékek és gázpalackok [7]



5. kép – Aknagránátok [8]



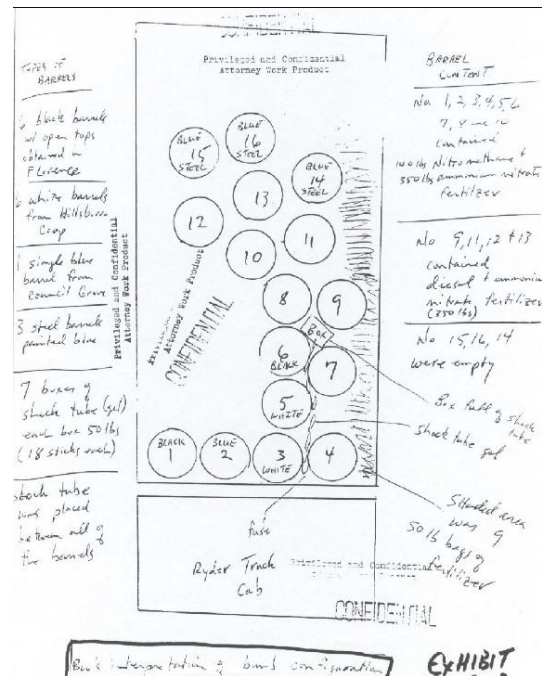
6. kép – Tüzérségi lövedékek [9]

A terroristák célja a minél nagyobb pusztítás elérése, ezért gyakori a gyúlékony anyagok hozzáadása. Az 4. képen látható, hogy gázpalackok is elhelyezésre kerülnek a járműben.

A gáz halmazállapotú robbanóanyagok robbanási paramétereit nehéz megállapítani, mert nagyban függenek a oxigénnel való vegyítéstől. A tökéletesen dúsított gáz-oxigén keverékek akár ötszörös TNT egyenértékűséggel is bírhatnak. [10] Ilyen minőségű keverékeket azonban csak ellenőrzött ipari körülmények között lehet előállítani, a véletlenszerű gázszivárgáskor lehetetlen az

ilyen minőségű keverék előállítása. A gázpalackok fizikai robbanása, és az

esetlegesen azt követő másodlagos berobbanása illetve elége a gázoknak bizonyítottan jóval kisebb erejű, mint a hasonló tömegű TNT. [11] Szintén számításba kell venni, hogy bár a robbanási paraméterek egy egytömögű, összefüggő töltetre számolhatók, a vázolt bomba esetében nem feltétlenül biztosított minden elkülönített robbanóanyag mennyiség egy időben történő detonálása. Ha egymástól időben eltolva robbannak, az a robbanás környezetre gyakorolt hatását lényegesen csökkenti. Az egyszerre történő robbantást biztosítandó a robbanótestek robbanó gyújtózsínórral sorba vannak kötve, lásd a piros vezetéket a 3. 4. képeken. A számítás során alkalmazható egy 20%-os biztonság, mely egyrészt az empirikus képletek bizonytalanságát ellensúlyozza, másrészt a töltetek elhelyezését veszi figyelembe a raktérben. Íves alakba rendezéssel ugyanis irányított töltetként viselkedne a bomba, tehát a robbanás energiáját a homorú irányba koncentrálná. Ez a jelenség igen nagy hatásfok



7. kép – Irányított töltet a raktérben

növekedést tud elérni a robbanásoknál, de kisebb, és ellenőrzött körülmények között. Az 1995-ös oklahomai robbantás során a hordók irányított töltetként lettek a raktérben elhelyezve (7. kép) [12], de ennek a jelentősége ennyi bizonytalansági tényező mellett megkérdőjelezhető.

Mérnöki szempontból, annak érdekében hogy figyelembe vehető legyen minden típus, bevezették az arányosítási törvényeket, melyek TNT egyenértékre számolják vissza bármely robbanóanyag tetszőleges mennyiségét. A képletek alkalmazásával megmondhatjuk, hogy mekkora mennyiségű TNT váltana ki ugyanakkora hatást, mint az adott mennyiségű és típusú robbanóanyag. Az egyenértékűsítés a robbanóanyagok égéshőjének alapján történik a következő képlet segítségével:

$$W_E = \frac{H_{EXP}^d}{H_{TNT}^d} W_{EXP}$$

Ahol:

W_E TNT tömeg egyenérték

W_{EXP} az átszámítandó robbanóanyag tömege

H_{EXP}^d az átszámítandó robbanóanyag égési hője

H_{TNT}^d a TNT égési hője

A mérnöki gyakorlatban a TNT-re átszámolás az ún. töltettényező (CF) segítségével történik. Ezt a robbanóanyagok tömegre vonatkoztatott energiatartalma alapján számítják ki, lásd az 3. táblázatot. Az arányosított robbanóanyag mennyiséget úgy kapjuk hogy az adott anyag tömegét megszorozzuk a rá vonatkozó CF értékkel. A szakirodalom külön töltettényezőt szab meg más és más robbanási paraméterek függvényében, így a túlnyomás és impulzus tekintetében más értékkel lehetne számolni, de a különbség a két töltettényező között oly kicsi, hogy gyakran elhanyagolják. [13]

Robbanóanyag	Tömegre vonatkoztatott energia (kJ/kg)	Töltéttényező (CF)
Trinitrotoluene TNT	4520	1,00
Semtex	5660	5660/4520=1,25
Schneiderite	3164	0,70
Dinitronaftalin	3308	0,73
Amatol 40/60	3703	0,82
ANFO	4113	0,91

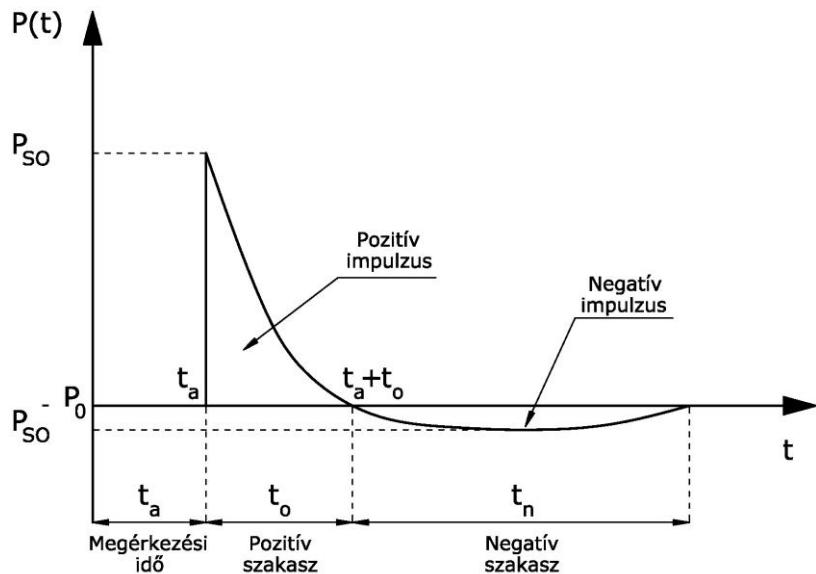
3. táblázat - Robbanóanyagok, energiájuk és töltéttényezőjük [13][14][15][16]

A robbanások egyszerűen és általánosítva történő vizsgálatára bevezettek egy változót, amely figyelembe veszi a robbanás célponttól mért távolságát és a robbanóanyag tömegét is. Ez a változó a $Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}}$ *arányosított távolság*, ahol R a robbanás helyétől mért effektív távolság, W pedig a TNT-re átszámolt robbanóanyag tömege. Vegyük észre a köbös összefüggést, tehát kétszer akkora távolság esetén 8-szoros robbanóanyag mennyiség okozna ugyanakkora hatást. Szintén megjegyzendő, hogy ez csak a túlnyomás értékére igaz, a kiváltott impulzus azonban nagyobb lenne.

TEHERFELVÉTEL MANUÁLISAN

Egy nagy hatóerejű robbanáskor 3000-4000 °C-os forró gázok fejlődnek több száz kilobar nyomáson. A nyomáskiegyenlítődés miatt a nagy nyomású gáz tágulni kezd, és kiszorítja a levegőt az elfoglalt térfogatóból. Ennek következményeként megjelenik a kiterjedő gázok előtt egy összetömörödött levegőréteg, amit lökéshullámnak nevezünk. Ez tartalmazza a robbanóanyag

felszabadult energiájának döntő többségét, 10% csak később ég el a levegőben [17]. A lökeshullámban azonnal felszökik a nyomás egy bizonyos, légköri nyomás fölött álló értékre. Ez a nyomás folyamatosan csökken, ahogy a lökeshullám távolodik a



8. kép – Robbanás nyomás-idő diagramja

robbanás középpontjától. Egy kis idő eltelte után a lökeshullám mögötti szakaszon a légköri nyomás alá csökkenhet, ekkor egy részleges vákuum alakul ki, amely beszívja a környező levegőt.

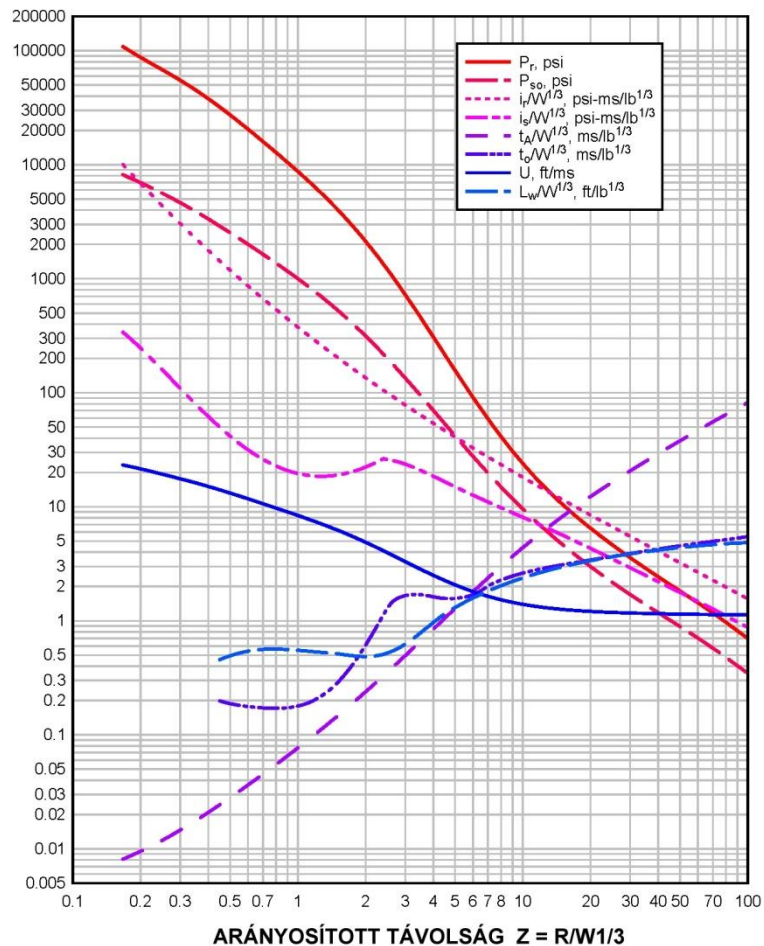
Az 8. kép egy általános lökeshullám természetét mutatja be. A vizsgált ponton a robbanást követően t_A megérkezési idő eltelte után hirtelen kialakul a túlnyomási csúcserték [P_{S0}]. Az ábrán a légköri nyomást a [P_0] jelzi. A túlnyomás t_d idő alatt lecseng. Ezután kialakul a vákuummal járó negatív túlnyomás, [P_{S0}^-], majd $t_d + t_d^-$ idő eltelte után visszatér a légköri nyomás. A P_{S0} értéket a szakirodalom oldalirányú túlnyomásnak, vagy túlnyomási csúcsertékek hívja. A mérnöki számítások és a méretezés alapját ez az érték adja, ebből lehet vonatkoztatni minden más robbanási jellemzőt.

A világháború után több módszert is kidolgoztak a P_{S0} értékének meghatározására, pl.:

Newmark és Hansen (1961) (földközeli robbanás, félgömbszerű terjedésre) [18]

$$P_{S0} = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{W}{R^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [\text{bar}]$$

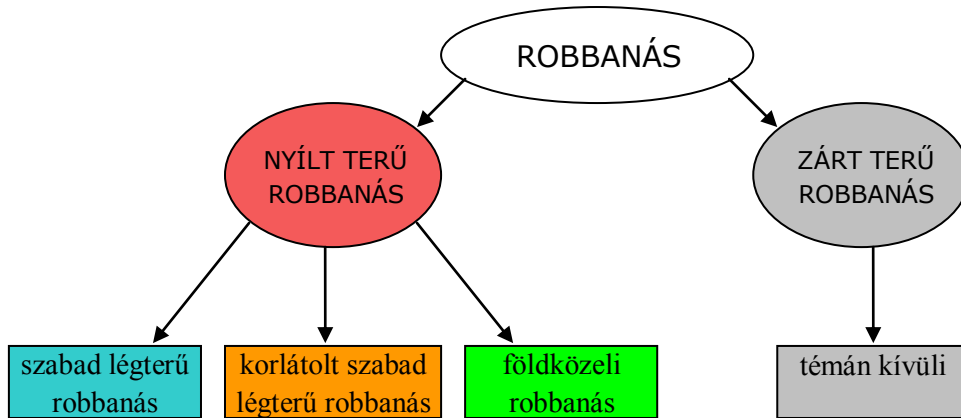
A robbanásveszély elleni tervezésben maradandót nyújtó, Amerikai Honvédelmi Minisztérium által kiadott TM5-1300 útmutató nomogrammos formában (9. kép) szolgáltatja az összes robbanási paramétert, az arányosított távolság függvényében.



9. kép – Robbanási paraméterek az arányosított távolság függvényében

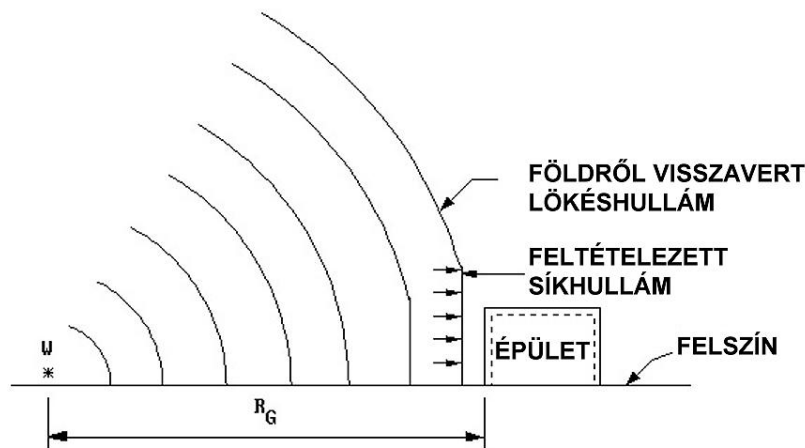
A túlnyomás és a lecsengési idők mellett az impulzus az, ami jellemzi a lökéshullám karakterisztikáját egy adott pontban. Impulzusként a nyomásgörbe alatti területet értjük, ez jellemzi a kifejtett energiát.

A robbanásálló épületekkel foglalkozó szakirodalom a robbanási típusokat a következő formában csoportosítja:



10. kép – Robbanási típusok csoportosítása

Ezek közül a földközeli robbanás olyan robbanás, ami vagy a földhöz közel történik, vagy közvetlenül a felszínen. A lökéshullám félgömbszerűen terjed. A hullámot felerősíti a földről való visszaverődés. Pl.: autóbomba.

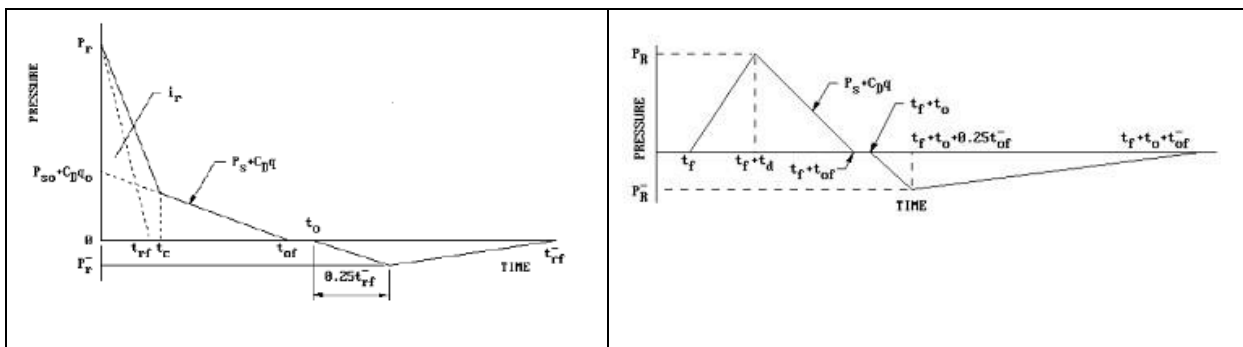


11. kép – Földközeli robbanás

A földközeli robbanáskor a lökéshullám bár visszaverődik a földfelszínről, itt nem önálló hullámként terjed tovább, hanem egyesül a kezdeti lökéshullámmal, felerősíti azt, és együtt alkotják a félgömbszerű terjedés alapját. A lökéshullám energiája kb. 1.8-szer több a földközeli robbanásnál. Megjegyzendő, hogy ha a földet teljesen merev visszaverő felületnek tételezzük fel, és nincs kráterképződés, akkor az értékek pontosan 2-szer akkorák lennének, mint a szabad légterű robbanásnál [13]. A különbséget elég a túlnyomási csúcserősnél

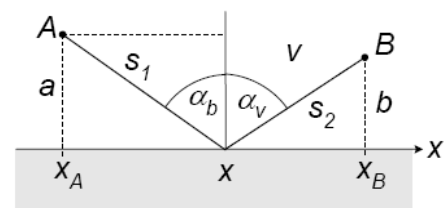
figyelembe venni, a származtatott mennyiségek azzal együtt változnak. A 9. kép a félgömbszerű terjedés esetén mutatja a származtatott mennyiségeket. A sík hullám feltételezésekor (11. kép) az épület magasságában a lökeshullám görbületétől eltekintünk, és függőleges síkként vesszük figyelembe, így egyenletes megoszló nyomást gyakorol az épület homlokzatára. Megjegyzendő továbbá, hogy földfelszín közeli robbanáskor kráter keletkezik a földben, mely a robbanás energiájának akár 10-20%-át is felemészti [19].

Kézi teherfelvételnél a vizsgált ponton felvehető nyomás-idő függvényt idealizálni kell, hogy a kidolgozott számítási módszerekkel kezelhető legyen. A idealizálás során a visszaverő felületek terhe (homlokfalak, amelyet először ér el valamilyen szögben a lökeshullám) az 12/a. képen vázoltak szerint alakul, míg a tető, hátsó fal és oldalsó falak terhe a 12/b. kép szerint alakul.

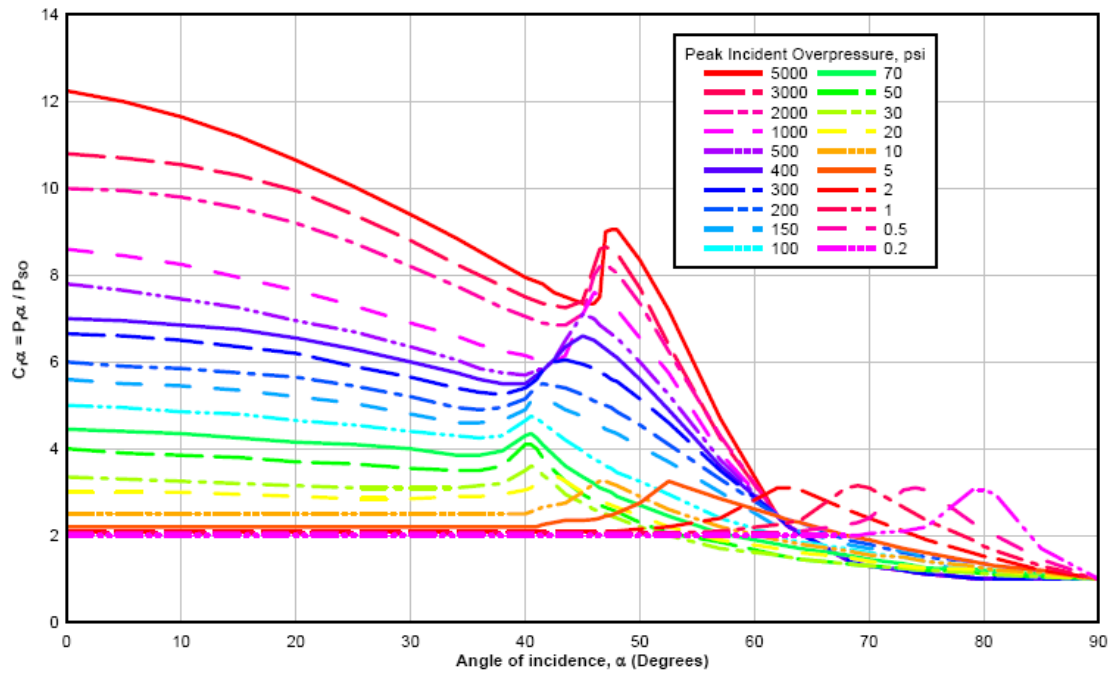


12/a-b. kép – Homlokfal és oldalfal, tető, hátfal idealizált teher-idő függvénye

Külön kiemelő a homlokfalak esetében történő visszaverődés figyelembe vétele. A visszaverő felületeken a teherfüggvény maximális értékét nem az empirikus úton meghatározott túlnyomás adja, hanem annak egy visszaverődési tényezővel felszorozott értéke. E tényező két változó függvénye, a túlnyomásé, amelyet meg kívánunk növelni, és a felület normálisához mért szögé (beesési szög).



13. kép – A beesési szög értelmezése

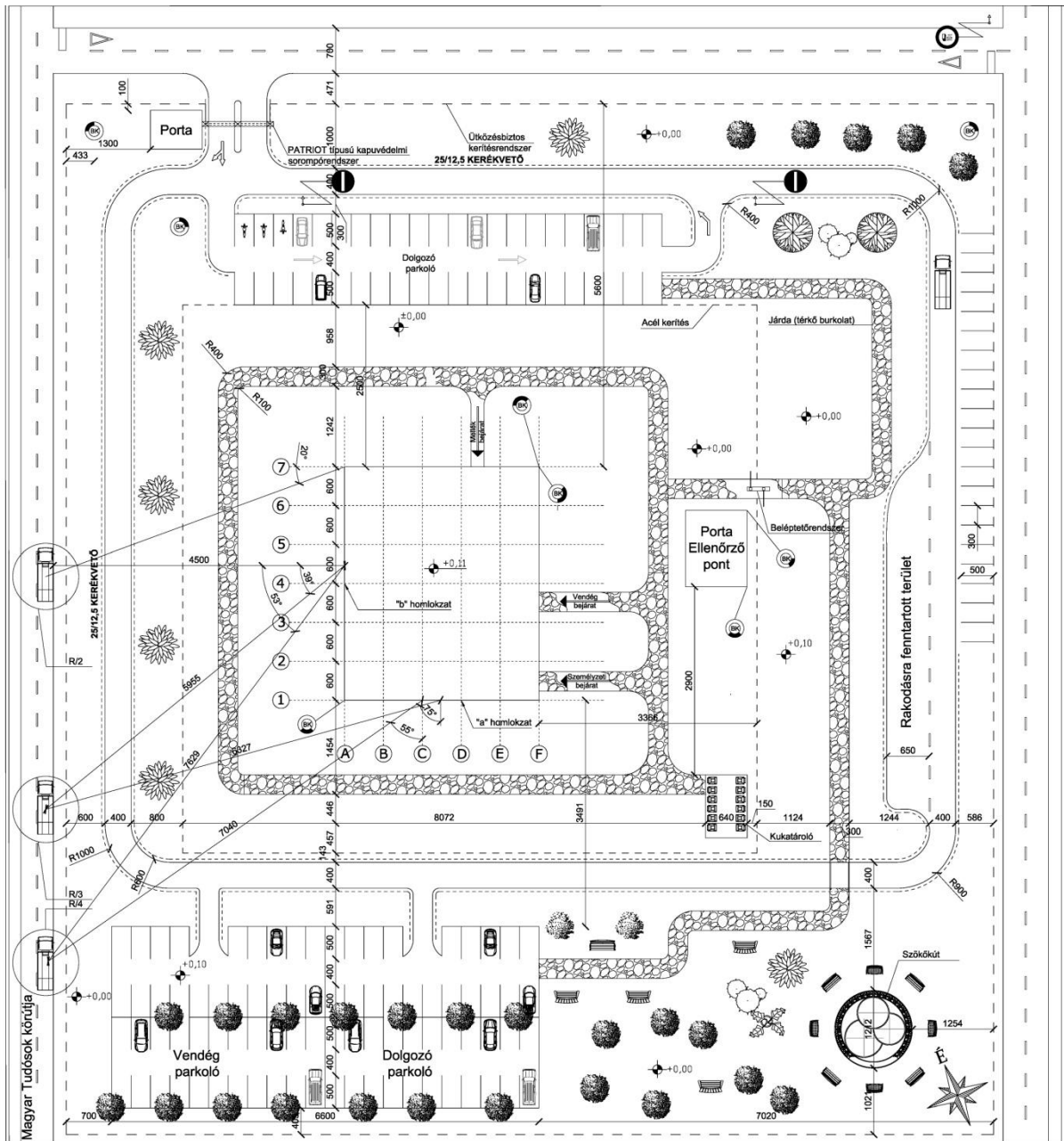


14. kép – A visszaverődési tényező értéke [20]

Vegyük észre az 14. képen a 40-50 fok körüli tartományt, ahol az a nem várt áramlástechnikai jelenség figyelhető meg, hogy a felületet szögben érő lökéshullám nagyobb hatást fejthet ki, mintha merőlegesen érné a felületet. Ezen kívül még nagy jelentősége van a meghatározott visszavert túlnyomás lecsengési idejének is, mely a homlokfal geometriájától, és az ablakok mennységétől függ. Ennek részleteire most itt nem térünk ki, részletesebben a [20][21] forrásokban olvasható.

A TERVEZÉS FOLYAMATA

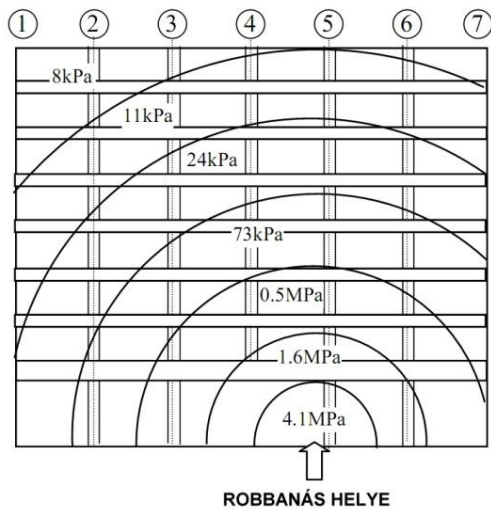
A robbanásoknak a távolsággal hirtelen csökkenő nyomása miatt nagy a lokális hatása. E lokális hatás elkerülése érdekében születtek meg a biztonsági távolságokra tett javaslatok. A 15. képen az amerikai ajánlásokat betartó helyszínrajz látható [30].



15. kép – Biztonsági távolságokat betartó helyszínrajz [30]

Az ajánlások kiterjednek az utak, kukák épülettől mért távolságára, mint potenciálisan veszélyes helyek, megszabják a kétlépcsős beléptetési rendszer kiterjedését, parkolók elhelyezését. Ezen kívül az épület fenntartási és építészeti vonatkozásban betartandó szabályokat is érdemes megfontolni a statikai tervezés előtt. Ezeknek megfelelően nem mindegy milyen alakú homlokzatot alakítunk ki, milyen az épületgépészet, a szemetesek elhelyezése, csatornák kérdése,

postás vagy karbantartó személyzet beengedésének kérdése stb... A témával részletesebben foglalkozik a [22] könyv.



16. kép – Gyűrűs homlokzati szétterjedés

Ezzel az új tervezések esetén kellően távol helyeztük a robbanást az épülettől. Ekkor jó eséllyel teljesül a sík hullámok elve, így az épület viselkedését a globális viselkedése fogja meghatározni. Abban az esetben, ha nincs lehetőség a biztonsági távolságok betartására, vagy meglévő épületet szeretnék ellenőrizni, akkor számolni kell az épülethez közeli robbanásokkal. Ezek lokális hatást

fejtenek ki, a sík hullámok elve egyáltalán nem teljesül. Ebben az esetben a lökéshullám a homlokzaton gyűrűs formában terjed szét, és gyorsan csökken a kifejtett nyomás értéke (16 kép). A lokális vizsgálatnál a tervező dönt, hogy az – esetünkben – földszinti oszlopok mindegyikét oly erősre tervezi, hogy ellenálljon a robbanásnak, vagy a szerkezet egészét tervezi olyanná, hogy állékony maradjon bármelyik földszinti oszlop lokális tönkremenetele esetén. Ha a szerkezet egésze nincs „felkészítve” a terhek átrendeződésére, akkor az oszlop hiánya miatt máshol is túllépi a tervezési ellenállást a ható teher, és ott is tönkremegy egy szerkezeti elem, és ez a folyamat akár az egész épületen végigfuthat, annak összedőlését eredményezve. Ezt nevezik a szakirodalomban „progressive collapse”-nek.

Az épület elemzésében a következő lépés a nyílászárók kérdésének tisztázása. Ennek jelentősége nem másból adódik, mint hogy a nyílászárók betörése esetén a szerkezet terhelési szélessége maga az oszlop szélessége lesz, míg ha valamilyen módon robbanásálló a homlokzatunk (robbanásálló üvegezés, ablak nélküli betonfalak), akkor azoknak a felfogatási pontjaiknak megfelelően a

terhelést, mely az egész homlokzaton hat, szét kell osztani a szerkezeti elemekre. A különbség a két változat között több, mint jelentős. Ha új tervezésről beszélünk, akkor az emberélet védelmi szempontok miatt nem is jöhet szóba a hagyományos homlokzat. Ennek igazolása rendkívül egyszerű, a [30]-ben elvégzett vizsgálat az épülettől 9m, ill. 45 m-re feltételezett mértékadó robbanásra azt mutatta, hogy első esetben maga a lökéshullám is okozna halálos áldozatokat, a második esetben csak a repeszhatás. A vizsgálat alapjául a TM5-1300-ban közölt nomogramok szolgálták, melyek a lökéshullámok emberre



17. kép – Ablakok nagy képlékeny alakváltozás után

gyakorolt hatását összegzik. Meglévő épületek környezetében feltételezett robbanás vizsgálatokor általános feladat az üvegszilánkok kellően nagy sugarú körben való repeszhatásának számítása, illetve a közeli szerkezeti elemek saját terhelési felületük szerinti vizsgálata. Szintén nem lehet figyelembe venni a robbanásálló

homlokzatot egy bizonyos robbanóanyag mennyiségen felül. A robbanásálló többrétegű hőkezelt üvegek teherbírása korlátozott. Ha vetünk egy pillantást az amerikai Graham Windows internetes katalógusára [23], akkor láthatjuk, hogy a kínálatukban a legerősebb ablak, melynek mérete 1.7m x 1.3 m, 24 psi túlnyomásnak, illetve 116 psi-ms pozitív impulzusnak ellenáll. Ha kiszámoljuk 500kg TNT 30m-re lévő felületre kifejtett nyomását, akkor azt kapjuk, hogy: 27psi, és 198psi-ms, tehát az ablak nem felelt meg. További odafigyelést igényel az ablakok megfelelő befogása a homlokzatba. Ha mégis bekerül az épület belsejébe a lökéshullám, akkor az ottani lefutását kell vizsgálni, egyrészt, hogy milyen távolságon belül esik a halálos érték alá a túlnyomás, másrészt a belső

szerkezeti elemeket lehet vizsgálni, pl. a födémekre ható felemelő erőt, ami egy olyan hatás, amire eredetileg semmilyen mértékben nem tervezték a szerkezetet. A TM5-1300 ajánl egy formulát az épületen kívül és belül haladó lökeshullám által kiváltott hatások együttes figyelembe vételére, de ez a nagyfokú közelítés a számítástechnika fejlődésével lényegtelenné vált.

HATÁRÁLLAPOTOK DEFINIÁLÁSA

Mindenekelőtt figyelembe kell venni az impulzív terhelések vizsgálatokor az anyagszilárdságok növekedését. Ez a téma már igen jól körbe van járva, és használható javaslatok születtek arra, hogy milyen mértékben érdemes megnövelni az anyagok (beton, szerkezeti acél) tervezési szilárdságát. Lokális vizsgálatoknál, ahol az alakváltozás rendkívül gyorsan játszódik le, akár 2-3-szoros értékkel is számolhatunk, általánosabb vizsgálatoknál 1-2 közötti a növekedés mértéke.

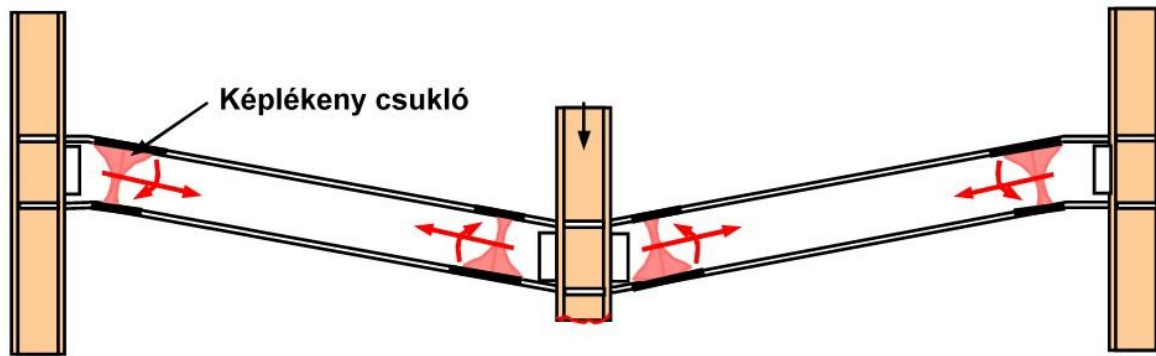
Az ilyen nagy terhek vizsgálatokor csak a képlékeny tervezésre hagyatkozhatunk. Ez annyit tesz, hogy a szerkezetet úgy tervezzük meg, hogy a hatásoknak csak a rugalmas alakváltozási tartományán túl, tehát maradandó alakváltozásokkal fog megfelelni. Ebben az esetben a szerkezet, vagy szerkezeti elem határállapotát, melyre tervezünk nem egy szilárdsági érték adja, hanem mérnöki megfontolások és kísérletek által meghatározott alakváltozások. Acél elemeknél a rugalmas és képlékeny alakváltozás hányadosát, a duktilitást korlátozzák, vasbeton elemeknél inkább a támaszelfordulásokat. A [24]-ben közölt adatok szerint:

Szerkezeti elem	Súlyos károk	Életveszélyes szerkezet
Hagyományos vb. födém vagy oszlop	5°	10°
Húzott membrán vb. födém	12°	20°
Vasalatlan téglafal	8°	15°
Acél gerenda	10° vagy 12-es duktilitás	20° vagy 25-ös duktilitás

4. táblázat – Szerkezeti elemek alakváltozásának korlátozása [24]

Ezek az alakváltozások mind a képlékeny tartományon belül vannak. Rendkívül fontos felhívni a figyelmet arra, hogy ezen adatok csupán egy szakmai értekezésben közölt ajánlások. Nincsenek szabvány szintre emelve, így a tervezőt nem mentesítik a felelősség alól a legkisebb mértékben sem. Nem tudni pontosan, hogy a szerzők milyen megfontolások alapján, milyen szerkezet egységeként mondják ki egy elemre egy bizonyos deformáltságnál, hogy az a szerkezet életveszélyes.

A tervezés folyamán előre ki kell jelöljünk azokat a zónákat ahol meg szeretnénk engedni a szerkezetnek a képlékenyedést. Ezek lesznek az ún. disszipatív zónák, melyek energiát nyelnek el. Egy alsó oszlop kivétele esetén történő átrendeződés esetét mutatja a 18. kép. Ezen energiaelnyelő elemeknek az alakváltozását a fenti táblázat szerint korlátozzuk, továbbá megfeleltetjük még az épület másként értelmezett alakváltozási korlátnak is. Ilyen a TM5-1300 által közölt maximális tetőszinti eltolódás, melyre $H/64$ értéket javasolnak (H az épület magassága), a rácsozottan merevített acélkeretekre pedig egy rácsozott duktilitási tényezőt korlátoz.

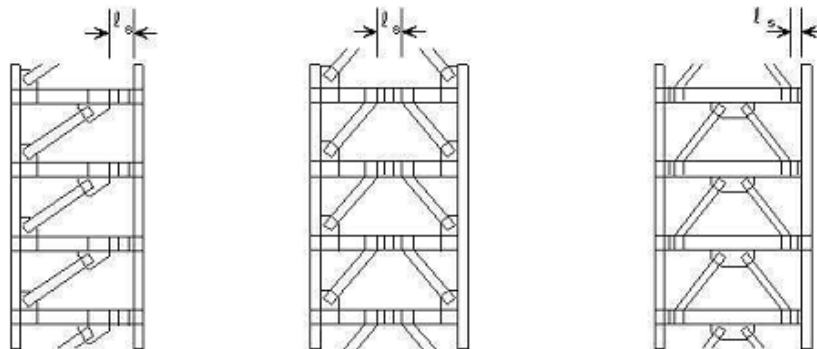


18. kép - Gerendák energiaelnyelő képlékeny zónái [Abolhassan Astaneh-Asl. [25]]

Vannak olyan részletek azonban, ilyen pl. az oszlopok, melyekre azt írjuk elő, hogy ne lépjen ki a rugalmas tartományból, mert az az állékonyságot veszélyeztetné (progressive collapse!). És itt lehet visszatérni az előző táblázat alkalmazásának elkerülésére. Ha a tervező van annyira tájékozott és összeszedett, hogy saját megfontolások alapján olyan szerkezetet hoz létre, amelynek vannak, és maradnak ép tartószerkezeti főelemei, és a lokális hatásokat is figyelembe véve bizonyos oszlopokat kivéve is megfelel a szerkezet, akkor semmi jelentősége nincs annak, hogy egy földszinti oszlop eléri a 10° -os támaszelfordulást, hisz a szerkezet erre tervezve lett. A nagy alakváltozások korlátozásaira egyébiránt az általános mérnöki gyakorlat is megfogalmaz szabályokat, ilyen pl. a p - Δ hatás korlátozása, mely a megváltozott geometriájú elemek egyensúlyával foglalkozik.

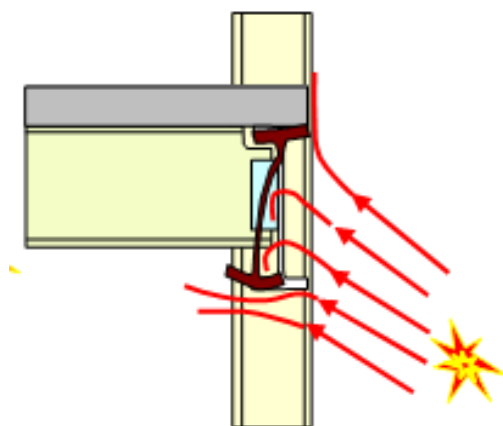
Globális vonatkozásban a merevítő rendszer megválasztásának van jelentősége, illetve a födémtípus is fontos, mert attól függ, hogy mennyire vehető figyelembe a födémnek a síkjában ható merevítő hatása. Acél merevítő rendszereknél a hagyományos „X” rácskozás helyett érdemes külpontos bekötést használni, ezzel kontrollálható a képlékeny csuklók kialakulásának helye, valamint megnőhet tőle az épület lengésideje is, ami előnyösebbé teszi az impulzív terhekkel szemben. Szintén előnyösen befolyásolja az épület viselkedését a tömeg:

ellentétben a földrengésekkel szemben, itt a tömeg segít az igénybevételek csökkentésében.



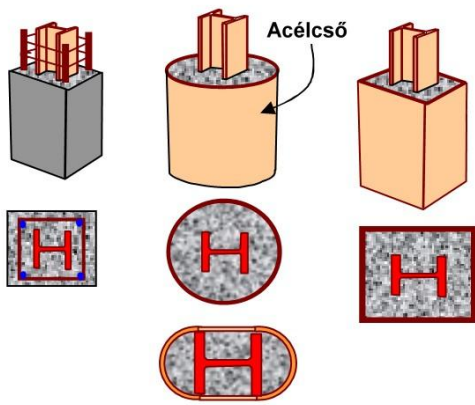
19. kép - Külpontos merevítő rendszerek

A vasbeton merevítő magok képlékeny vizsgálatát több bizonytalanság és egyszerűsítés mellett tudjuk csak megtenni, de amennyiben a falak duktilis viselkedése biztosított, a merevítőmag is jó megoldás lehet az épület merevítésére. Az épület javításának szempontjából viszont nem lényegtelen, hogy rudakat, gerendákat kell-e cserélni, vagy esetleg egy épület merevítőmagját kellene helyrehozni. Meg kell jegyezni, hogy ez a földrengés ellen tervezett épületeknél is egy óriási kérdés, hogy mit kezdjenek egy ugyan állva maradt, de sok helyen képlékenyedett szerkezettel.



20. kép – Acélgerenda lokális hatásra való tönkremenetele
[Abolhassan Astaneh-Asl. [25]]

A lokális szerkezeti részleteknél arra kell odafigyelni, hogy a meghatározott szükséges alakváltozások tényleg létre tudjanak jönni. Ez vasbetonnál megfelelő duktilis kengyelezést, gondos oszlop-gerenda kapcsolatokat jelent, acélnál pedig teljes beolvadású tompavarratokat. Az acél oszlopok, ha közvetlenül érintkeznek a lökéshullámmal, nagyon könnyen tönkremennek lokális stabilitásvesztéssel –

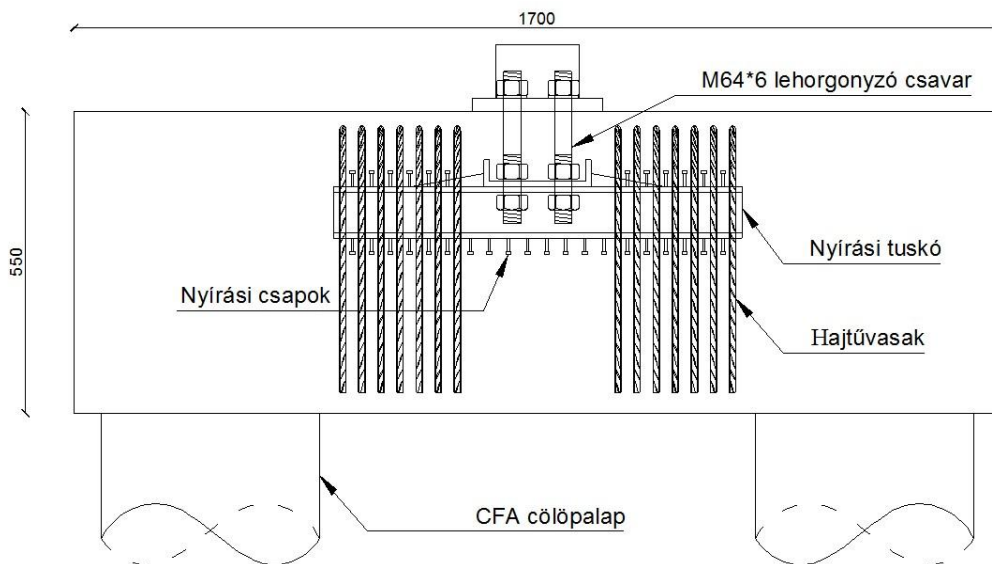


21. kép – Egyszerűbb talpcsomópontok [Abolhassan Astaneh-Asl. [25]]

övhorpadás, gerinchorpadás, torzulásos stabilitásvesztések -, ezért érdemes lehet betonkiöntéssel öszvér oszloppá változtatni őket. Ilyen kompozit csomópontokat mutat az 21. kép.

Az alapozásokba gyakran több ezer kN nagyságú nyomó, illetve húzóerőt kell közvetíteni, itt is speciálisan megerősített részlettervezésre van szükség (22. kép).

Vasbeton elemeknél a szimmetrikus vasalás is követelmény, a szerkezet belengésének következtében a vízszintesen ható erők megfordulnak, és a csillapítástól függően a másik irányba is hat egy bizonyos hányaduk. Ha erre nincsen vasalva a vasbeton elem, az azonnali tönkremenetel lehetőségét hordozza magában.



22. kép - 5000 kN húzóerő felvételére méretezett talpcsomópont [21]

A LEGJELENTŐSEBB MERÉNYLETEK ADATAI

1995 Oklahoma



23. kép – A Murrah Federal Building a támadás előtt és után

Használt robbanóanyag (TNT-ben kifejezve):	kb. 2 tonna
Robbanási távolság:	közvetlenül az épület mellett
Halálos áldozatok száma:	168
Sérültek száma:	680

A robbanás több száz méteres körzetben rongálta meg az épületeket. A betörő ablakokból származó üvegszilánkok felelősek az áldozatok 5%-ért, a sérültek 69%-ért [26].

1996 Khobar



24. kép – a Khobar Towers a támadás előtt és után

Használt robbanóanyag (TNT-ben kifejezve):	kb. 2 tonna /egyeb becslések szerint 8000 kg/
Robbanási távolság:	22 m
Halálos áldozatok száma:	19
Sérültek száma:	372

A katasztrófát két tényező mérsékelte. A biztonsági ponton áttört járművet idejében észrevették, és az evakuálás megkezdődött, a robbanás pillanatában az épület oldalán elhelyezett, vastag márványból készült lépcsőházban tartózkodtak sokan, amely hely biztonságosnak bizonyult. A kerítés tövében végig betonbarikádok voltak elhelyezve, melyek a lökeshullámot felfelé térítették, megelőzve ezzel az alsó szint súlyos károsodását (és ezáltal valószínűleg az épület összeomlását) [27].

1998 Nairobi



25. kép – A nairobi USA nagykövetség épülete a támadás után (jobb oldalt)

Használt robbanóanyag (TNT-ben kifejezve):	900 kg
Robbanási távolság:	40m
Halálos áldozatok száma:	212

Sérültek száma:

4000

Amint a 25. képen is látható, jelentős szerkezeti károsodás nem történt, ugyanakkor a halálos áldozatok száma meghaladja a nagyobb robbanással járó khobari merénylet áldozatainak számát. Ennek oka a két szomszédos épület közelsége (hullámok felerősödése) és a nyílászárók betörése. Az örök lélekjelenlétének köszönhetően nem került közelebb az épülethez a jármű, tehát a beléptető rendszer valóban csökkentette a veszélyt.

2009 Bagdad



26. kép – A iraki Igazságügyi Minisztérium épülete a támadás után [28]

Használt robbanóanyag (TNT-ben kifejezve):

-

Robbanási távolság:

20 m

Halálos áldozatok száma:

132

Sérültek száma:

500

Amint a 26. képen látszik, szerkezeti károsodás jóformán nem történt, azonban minden ablak betört, a lökéshullám az épület belterében pusztított.

2008 Irak

Tanulságos eset az alább bemutatott robbantás. Az irakban lévő USA támaszpont robbanásvédő fallal volt körülvéve, mely a robbanás energiája nagy részének elnyelésére hivatott. A támaszpont felvételén tisztán látható, mi maradt a – valószínűleg pongyolán megtervezett – védőfalból.





PÉLDÁK PROGRESSIVE COLLAPSE-RA



27. kép - London - St Mary Axe (1992)



28. kép – Irak (2008)

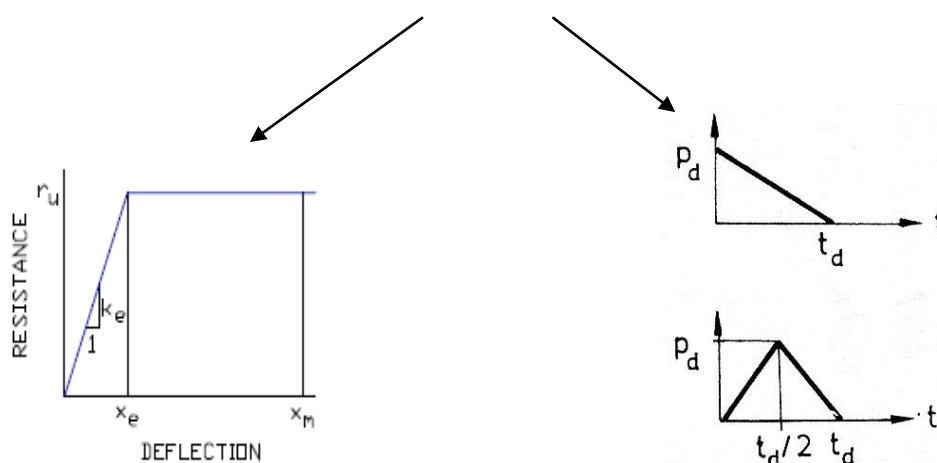
MÉRETEZÉSI ELJÁRÁSOK ÁTTEKINTÉSE

A robbanásból származó terhek specialitása az időfüggő (tranziens) jelleg. A tranziens terhekre történő méretezéshez szükséges matematikai és szilárdságtani apparátus már jóval azelőtt feltalálásra került, hogy azok gyakorlati alkalmazása szükségessé vált volna. Méltó volna megemlíteni azon – jól ismert – tudósok neveit, akik a legtöbbet tettek hozzá az emberiség tudományosságához, s megadták azokat az alapokat, melyeket közvetlenül vagy közvetve használva lehetővé vált az alábbi méretezési eljárások kifejlődése. A teljesség igénye nélkül elég megemlíteni Euler, Lagrange, Rankine, Duhamel vagy Newmark nevét. Amennyiben a teherfelvétel a robbanóanyag mennyiség, minőség és távolság függvényében empirikus módon, **kézi számítással** történik:

Egy tranziens teher legegyszerűbb kezelési módja az ekvivalens statikus teher módszere. Ekkor a ható teher teherfüggvényének és a vizsgált szerkezet, illetve szerkezeti elem lengésidejének függvényében egy dinamikus tényezőt határozunk meg, mellyel módosítva a teher maximális értékét, megkapjuk az ekvivalens terhet, amire statikus úton méretezünk. A módszer csak nagyon leegyszerűsített esetekben alkalmazható megbízhatóan.

Pontosabb megoldáshoz a szerkezet (vagy szerkezeti elem) gerjesztett rezgőmozgását leíró

$$m\ddot{x}(t) + R(x) = p_d \cdot \varphi(t)$$



differenciálegyenlet megoldásával érhetjük el. Az egyenlet jobb oldalán a teherfüggvény szerepel, míg a bal oldalon megjelenik a szerkezet merevségeként a teherbírásfüggvény. Az egyenlet megoldására a szakirodalomban válasznomogrammok találhatóak, melyekből meghatározható a szerkezet(i elem) válasza. Ez a módszer azon az eleven alapul, miszerint a „a teher által az elmozdulási úton végzett külső munka egyenlő a rendszer alakváltozási (potenciális) energiájával”. Alkalmazása a teher és a szerkezet jellemzőinek függvényében érvényességi tartományba sorolt.

Az energiaegyensúlyi egyenlet

A szakirodalomban „basic impulse equation”-ként is nevezett eljárást külön érdemes kiemelni. Az eljárás elve az, hogy „a terhelés által kiváltott külső kinetikus energia legyen egyenlő a szerkezet belső, alakváltozási energiájával”. Egy kezdetileg nyugalomban lévő, M tömegű rendszernek a rá működtetett impulzusból (I) származó kinetikus energiája:

$$KE = \frac{1}{2} M \dot{x}_0^2 = \frac{I^2}{2M}$$

A vizsgált rendszert egyszabadságfokú rendszerré redukálva (K.LM tényező), az egyensúlyi feltétel az alábbi alakot ölti:

$$\frac{I^2}{2K_{LM}M} = \int_0^x F(x)dx$$

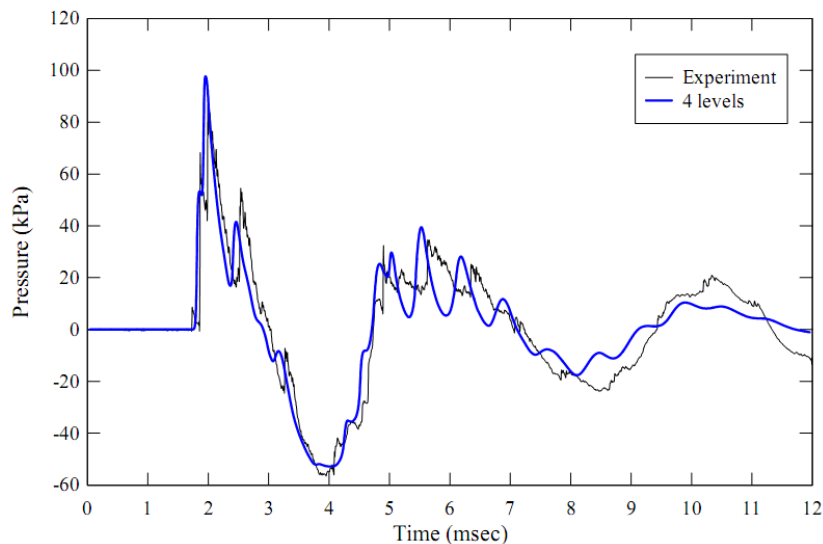
ahol bal oldali a kiváltott kinetikus energia szerepel, jobb oldalt pedig a belső alakváltozási energia. Utóbbi a szerkezet teherbírásfüggvénye (F(x)) alatti területként értelmezzük, és az egyenletben az az „x” elmozdulás az ismeretlen, melynél teljesül az egyensúly. Alkalmazása a teher és a szerkezet jellemzőinek függvényében érvényességi tartományba sorolt. E méretezési elvárás azért kiemelendő, mert egyszerűsége ellenére felhasználható benne a modern, pontos szerkezeti számítás, ugyanis a teherbírásfüggvényt ma már nagyon pontosan

meg tudjuk nem-lineáris számítás útján határozni, így az egyenlet jobb oldala ha úgy tetszik, „kihegyezhető”, a jobb oldalon továbbra is csak a kézi teherfelvétel nagyfokú pontatlansága szerepel.

A szerkezeti oldalról a legpontosabb számítás a második pontban meghatározott differenciálegyenlet numerikus megoldása, esetleg a csillapítás figyelembevételével. Bár megjegyzendő, hogy a képlékeny tervezés során a csillapítás elhanyagolása egy biztonság javára tett jó közelítés. A numerikus megoldás során tetszőleges teherfüggvényt kezelni tudunk. E módszer önálló megoldásként lehetetlen feladat elé állítja a mérnököt, hisz gyakorlatilag kezelhetetlen méretű számításokat eredményez. A megoldhatóságot elősegítette az eljárás végelem-programokba történő implementálása. Ennek során a szerkezetre tetszőleges időpontban, tetszőleges helyen, tetszőleges teherfüggvényű terhet alkalmazhatunk. Ebben az esetben többszabadságfokú feladatok is kezelhetők. A rezgésegyenlet megoldása után a szerkezet bármely irányú elmozdulása tetszőleges időpontban lekérdezhető, melyből aztán a ható igénybevételek visszaszámolhatók, és elvégezhető a méretezés. A problémát továbbra is a terhek pontos felvétele jelenti. A kézi teherfelvétellel az jelenthetné a tervezés csúcsát, ha jellemző csomópontokat kijelölve mindegyikhez meghatározzuk a teherfüggvényt (a lökéshullám homlokzati szétterjedését megpróbálván lekövetni), és erre alkalmazzuk a számítást. Az ablakok betörése miatt fellépő nyílások hatását, és a lecsengési idők pontos meghatározását azonban nem lehetséges pontosítani. A teherfelvétel mindenképpen túlméretezéshez vezet.

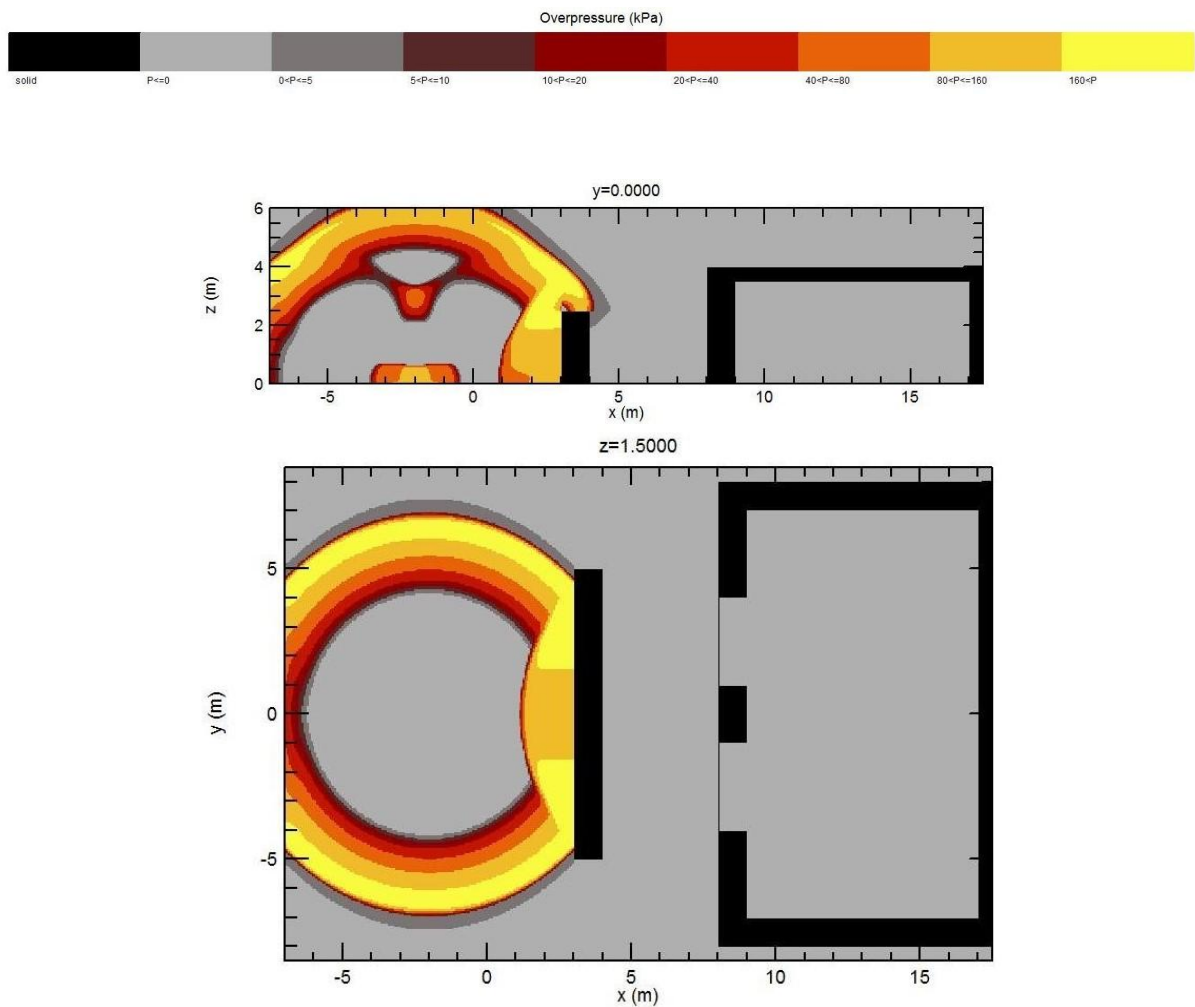
Ezt a problémát hivatott megoldani a teherfelvételt gyökeresen más oldalról megközelítő CFD eljárás. A **CFD (Computational Fluid Dynamics – Numerikus Áramlástan)** tökéletes megoldást kínál az összenyomható közegek áramlásának modellezésére, és egyúttal a közegekben terjedő lökéshullámok

modellezésére is. Ezek az eljárások nem empirikusak, a számítás alapja a trotil Jones – Wilkins – Lee (JWL) féle állapotegyenlete. Az eljárást alkalmazva tetszőleges komplexitású térben, az épületeket merev testekként feltételezve lemodellezhető a lökéshullám szétterjedése, a visszaverődései, homlokzati szétterjedése, stb. Tetszőleges pillanatban meghatározható bármely ponton az ott ható túlnyomás értéke. Innen már csak programozási kérdés az, hogy mindezt egy számítógéppel lefuttatva, az épület nevezetes pontjain lekérdezzük az ott ható teherfüggvényt, a pontos (!) lecsengési idővel. Az eljárás által használt matematikai apparátus igazolására már sok kísérletet végeztek, és teljes bizonyossággal kijelenthetjük, hogy: ma már egészen pontosan meghatározható egy városi környezetben történő robbantás hatására bármely pontban a terhek minden jellemzője. Ilyen szoftvert fejlesztettek ki pl. a Cranfield-i egyetemen. A 29. képen egy lökéshullám összetett térben való lefutása látható. A visszaverődések hatása szépen kivehető, és jól látható, hogy a numerikus számítás közelíti a kísérleti eredményeket.



29.kép - Kísérleti mérés és numerikus számítás összehasonlítása

A numerikus áramlástan használatának lehetőségeit jól érzékelteti az alábbi példa. A Cranfield-i egyetemen kifejlesztett szoftverrel vizsgálva egy védőfallal ellátott épületet a következőt kapjuk:



30. kép – Lökéshullám terjedésének modellezése komplex környezetben

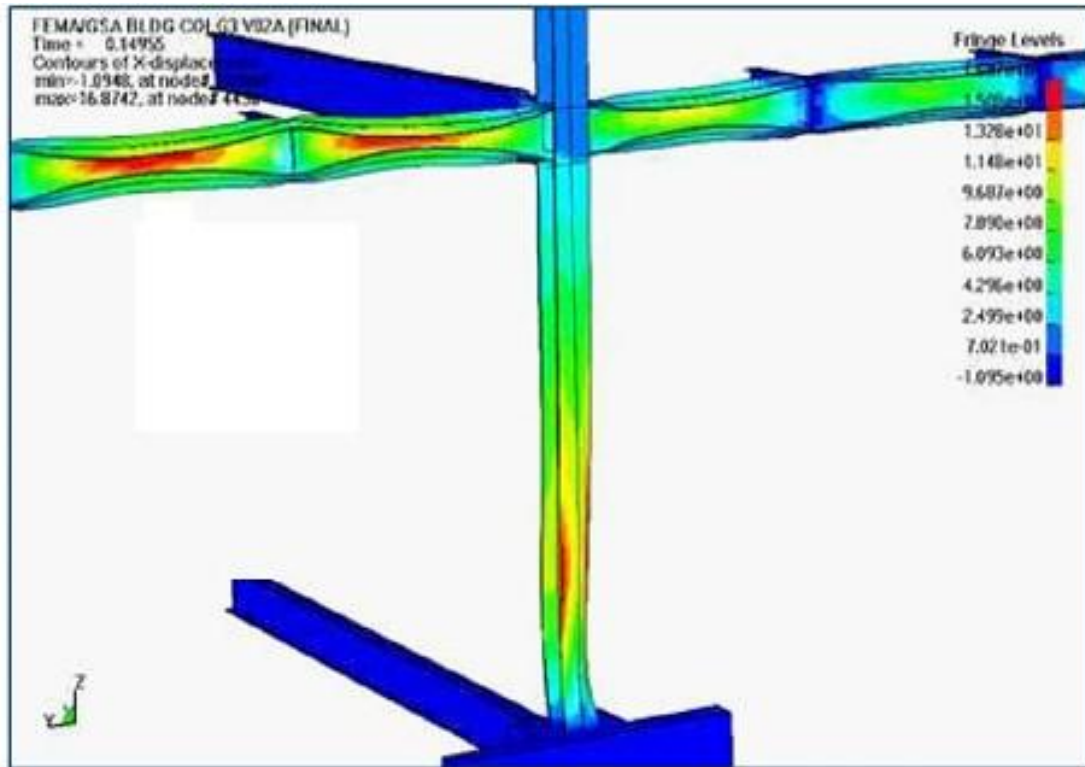
Az ábrából leolvasható:

- A kör pereme mentén lévő vékony piros csík jelenti tulajdonképpen azt a végtelen kicsi felszökési időt, amelyet kézi számításnál el szokás hanyagolni.
- Szépen látszik a védőfal oldalában a kialakult visszavert hullám.
- Néhány ms-ommal később kiolvasható volna az épület ablakain ható túlnyomás és impulzus, mellyel máris megoldhatóvá vált egy olyan feladat (védőfal mögötti ablakok terhei) mely kézi teherfelvétellel tulajdonképpen megoldhatatlan.

A teherfelvétel ilyen módon történő megoldása olyan sok adatot szolgáltat, hogy csakis az előző pontban említett, szintén számítógépes eljárásokon nyugvó numerikus integrálással végezhetjük el a számítást. Ezzel az eljárással például gond nélkül lemodellezhető egy időben fél másodpercben eltolt, különböző helyen történő robbanás, amint a szerkezetet elérve pl. a földszinti oszlopot tönkreteszi, a szerkezet teherviselése módosul, átrendeződik, közben pedig továbbra is hatnak rá a különböző időkben az előre meghatározott terhek. A szerkezet viselkedésének minél pontosabb modellezése csak attól függ, hogy az adott szoftver mennyire intelligensen képes a nem-lineáris számítást végrehajtani. Magyarországon elsőként az InterCad által fejlesztett AxisVM programrendszer 10-es verziójában vált elérhetővé a tranziens terhek Newmark féle megoldási módszere, és a program a dinamikai számítás során figyelembe veszi a szerkezet nem-lineáris elemeit.

A számítások tovább pontosítása nyilván az is lehetne, ha sűrűbben veszünk pontokat, melyekre az oldalirányú erőket meghatározzuk, de ez továbbra az ugyanaz az elv volna. A további pontosítás a modellezés olyan formájú változtatása jelenti, hogy megpróbáljuk a szerkezet és a lökéshullám viselkedését összekapcsolni. Ezek az ún. kapcsolt modellek. Míg az előző változatban az épületet merev testként vettük figyelembe, és végigfuttatuk a lökéshullámot körülötte, addig a kapcsolt analízisben a szerkezet a lökéshullám első ezredmásodpercében már reagál – alakváltozik – a hatásokra, és a következő ezredmásodpercben a lökéshullám már a megváltozott geometriájú szerkezetre fog hatni. Kijelenthető, hogy ezzel a módszerrel jelenleg elértük a legpontosabb megközelítés elvét. A részleteken bizonyára fog csiszolni az elkövetkezendő néhány évtized, de a kapcsolt analízis a szerkezetek körüli áramlások szimulálásának a legjobb módszere. A kapcsolt analízisre az általános célú végelem szoftverek képesek, pl. az ANSYS, vagy annak AUTODYN modulja. Nyomban hozzá kell azonban tenni, hogy ezek a szoftverek igen magas

elméleti tudást igényelnek, szakképzett kezelő felügyelete alatt adnak csak megbízható megoldást, továbbá meg kell jegyezni, hogy a számítások borzasztó időigényesek még egy mai szemmel fejlettnak mondható gép számára is: nem ritkák egy-egy egyszerűbb vizsgálatnál sem a több 10 órás számítási idők.



31. kép - Acélgerendák kapcsolt analízissel kimutatott stabilitásvesztése [Crawford and Magallanes (2009)]

Megemlíthető lenne még ezeken kívül néhány eljárás, pl. a Goschy által közölt vasbeton elemekre vonatkozó szabály [29], de a helyhiány miatt ezektől most eltekintünk.

A naprakész szakirodalmat olvasva az ember belefut több olyan számítógépes alkalmazásba, melyek azt hirdetik magukról, hogy képesek a robbantások hatásainak számítására, de ezek fenntartással kezelendők. Akad néhány program, melyek nem tesznek mást, mint az itt felsorolt első 1-2 lépést

alkalmazzák programozott módon, de ugyanazt az eredményt szolgáltatják, mintha kézzel számoltunk volna. Az elvben semmi különbség.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Hatala A., Kelemen F. Jegyzet a katonai robbanótestek szerkezetének és működésének megismeréséhez és megértéséhez (2003)
- [2] Shirokorad A. B. A szovjet tüzérség enciklopédiája (Широкоград А. Б. Энциклопедия отечественной артиллерии.) (2000)
- [3] <http://www.jaegerplatoon.net/MORTARS5.htm>
- [4] http://www.globalsecurity.org/military/library/report/2002/iraq-osgjs-eod_13-suspected-items.pdf
- [5] Honvédelmi Minisztérium 120mm-es 43M aknavető műszaki leírása és kezelési utasítása (1972)
- [6] http://www.archive.org/download/iraq-war-so-t/er2_512kb.mp4
- [7] <http://www.archive.org/details/mop-is1>
- [8] <http://www.archive.org/details/escaped-from-salool>
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Car_bomb
- [10] <http://www.springerlink.com/content/913m34706pq22657/>
- [11] http://www.nefafoundation.org/miscellaneous/FeaturedDocs/DHS_CompressedGasCylinders.pdf
- [12] <http://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge342/Forensic%20Seismology-revised.pdf>
- [13] G. C. Mays, P. D. Smith Blast effects on buildings (1995)
- [14] M.Y.H. Bangash, T. Bangash Explosion resistant buildings (2004)
- [15] R. Meyer, J. Kohler, A. Homburg Explosives (2002)
- [16] William A. Hustrulid Blasting Principles for Open Pit Mining (1999)
- [17] Honvédelmi Minisztérium Robbantási utasítás (1971)

- [18] T.Ngo, P. Mendis, A. Gupta, J. Ramsay Blast loading and blast effects on structures – An Overview
- [19] A. M. Remennikov A review of methods for predicting bomb blast effects on buildings (2003)
- [20] U.S. Department of Defense Structures to resist the effects of accidental explosions (1990)
- [21] Román Zsolt - Kiss Rita - Vigh László Gergely: Az épületeken kívüli robbanások tervezési következményei (2010) – Magyar Építőipar
- [22] Hunyadi-Lukács-Mueller A robbantások elleni védekezés feladatai (1993)
- [23] <http://www.grahamwindows.com/blast/blast.html>
- [24] Dennis M. McCann, Steven J. Smith – Blast resistant design of reinforced concrete structures (STRUCTURE magazine 2007 April)
- [25] STEEL TIPS –
- [26] http://en.wikipedia.org/wiki/Oklahoma_City_bombing
- [27] http://en.wikipedia.org/wiki/Khobar_Towers_bombing
- [28] <http://www.cnn.com/2009/WORLD/meast/10/25/iraq.violence/index.html>
- [29] Dr. Goschy Béla Építmények tervezése rendkívüli terhekre és hatásokra (1984)
- [30] Román Zsolt - Épületen kívüli robbanások modellezése és vázas épület esetén való alkalmazása – DIPLOMAMUNKA 2009 BME - ZMNE