

A kumulatív abszolút sebesség, mint kár-indikátor értelmezése

Dr. Katona Tamás János

Paksi Atomerőmű Zrt.,
Paks, Pf. 71 H-7031, +3620 942 22 25

A földrengés hatására bekövetkező károk és a tervezésnél alapvető inputként kezelt maximális vízszintes gyorsulás közötti korreláció – a káresemények értékelése alapján – nem egyértelmű. Fontos lenne olyan kár-indikátort találni, amely a rengés mérhető jellemzőiből egyértelműen származtatható, s amely segítségével egy, az üzemeltetést meghaladó földrengés után az atomerőmű állapotát minősíteni lehetne, s amelyet egyúttal kötni lehetne a tervezési alapadatokhoz (maximális vízszintes gyorsulás, válaszspektrum). Jelen dolgozatban értelmezzük a káreseményekkel jól korreláló kumulatív abszolút sebesség, a CAV fizikai tartalmát, rávilágítunk, miért tapasztalható jó korreláció a CAV és a káresemények között.

Bevezetés

Az utóbbi években történt, atomerőműveket érintő, nagy földrengések nem okoztak szignifikáns károkat az atomerőművek -nukleáris előírások és szabványok szerint tervezett- szerkezeteiben és komponenseiben (lásd az Onagawa Atomerőmű esetét 2005-ben, a Shika és a Kashiwazaki-Kariwa Atomerőmű esetét 2007-ben és a Hamaoka Atomerőműét 2009-ben). Általános tapasztalat az is, hogy a maximális vízszintes szabadfelszíni gyorsulás értéke (PGA) nem jól korrelál a kár mértékével. Ezt az említett nagy rengések, különösen pedig a Kashiwazaki-Kariwa Atomerőmű esete bizonyította, ahol a 2007. évi Niigata Chuetsu-Oki földrengés a tervezés alapját jelentő PGA-nál kétszer nagyobb gyorsulásokat okozott [1]. A PGA és a kár közötti gyenge korrelációt több esetben az atomerőművek környezetében kipattant, úgynevezett near-field rengések is demonstrálják, amelyekre a relatíve nagy amplitúdójú és magasfrekvenciás talajmozgások jellemzőek, s amelyek az atomerőműben kárt nem okoztak [2].

A földrengésre tervezett, különösen pedig a nukleáris szabványok szerint tervezett létesítmények relatív kármentessége az esetenként tapasztalt jelentős PGA ellenére nyilvánvalóan azzal magyarázható, hogy a tervezésnél alkalmazott megfelelőségi kritériumok lényeges tartalmak beépítéséhez vezetnek. Ezért a szerkezet maximális vízszintes szabadfelszíni gyorsulás függvényében kifejezett kapacitása, C_{SSE} nem a sérülékenységre, hanem a sérülésmentességre ad információt, s nagy megbízhatósággal garantálja, hogy a tervezési alapba tartozó földrengés-teher esetén a sérülés valószínűsége igen kicsi legyen. Ugyanakkor az atomerőmű rendkívüli szerkezeti és technológiai komplexitása, s a közös okú meghibásodások miatt ez a determinisztikus bizonyosság elégtelen a földrengésbiztonság megfelelő értékeléséhez, s különösen pedig ahhoz, hogy egy földrengés utáni állapotról ítéletet mondhassunk.

Az EPRI (Electric Power Research Institute, USA) által elvégzett vizsgálatok azt igazolták, hogy a kumulatív abszolút sebesség (CAV, azaz a szabadfelszíni talajgyorsulás vízszintes összetevője abszolút értékének integrálja a rengés időtartamára) a földrengés egyik olyan jellemzője, amely jól, a PGA-nál minőségileg jobban korrelálható a káreseményekkel [3]. Ebből határozták meg a folyamatos üzem fenntartásának feltételét, azaz a sérülésmentesség határát jelentő CAV értéket, amelyet a paksi atomerőmű esetében is alkalmaznak az üzemeltetési földrengés meghaladásának egyik kritériumaként. A kármentesség határa: $CAV = 0,16$ gs. A kármentesség másik kritériuma az, hogy a szabadfelszínen mért gyorsulásjel 5% csillapításnál számított válaszspektrumának amplitúdója a $2 \cdot 10$ Hz tartományban nem haladja meg a 0,2 g értéket. A fenti kritériumok a relatíve kis rengések esetén a biztos kármentesség megállapítására szolgálnak és közönséges létesítmények káreseményeinek feldolgozására épülnek.

Fontos lenne ugyanakkor olyan kár-indikátort, indikátorokat és ezekre vonatkozó mennyiségi kritériumokat találni, amelyek segítségével egy, az üzemeltetést meghaladó földrengés után az atomerőmű állapotát minősíteni lehetne. Ebből a szempontból leginkább tanulságos a Kashiwazaki-Kariwa, a világ legnagyobb atomerőművének esete (hét blokk egy telephelyen, 8200 MW elektromos teljesítménnyel), ahol a 2007. évi földrengést követően a teljes kapacitás kiesett és csak két év múltán, igen alapos vizsgálatok után indították újra a blokkokat.

Szembeeslve a problémával, illetve japán kezdeményezésre a NAÜ a földrengés műszerezés, a földrengésre való felkészülés, a földrengés utáni teendők és a visszaindítás feltételei tárgyában négy éve széleskörű kutatási programot indított (Extra-budgetary Project on Seismic Safety of Operating NPPs). A NAÜ a kiadás alatt lévő „Earthquake Preparedness and Response for Nuclear Power Plants” c. dokumentumban (Safety Reports Series) foglalja össze az aktuális ismereteket és az élenjáró gyakorlatot a földrengésre való felkészülés és a földrengést követő teendők tárgyában,

amely jelentős mértékben az EPRI vizsgálataira [3] és [4], illetve az említett japán erőművekben tapasztaltakra támaszkodik. E dokumentum és a NAÜ koordinált kutatások központi problémája a megbízható kár-indikátor, indikátorok meghatározása. A NAÜ említett projektje 2010 után az International Seismic Safety Centre projektként folytatódik. E kutatások egyik központi kérdése a nukleáris létesítményekre alkalmazható kár-indikátorok vizsgálata.

A vázolt probléma megoldása, azaz a megfelelő kár-indikátor és kár-kritériumok meghatározása érdekében pontos összefüggést kellene látni a tervezési alapadatok (maximális vízszintes gyorsulás, válaszspektrum) és a káreseményekkel elég jól korelláló kár-indikátorok, mint a kumulatív abszolút sebesség (CAV) között, amely összefüggés egyúttal a valószínűségi biztonsági elemzésnél használt sérülékenységi függvények empirikus megerősítésére is szolgálhat. E program egy fontos része, hogy értelmezzük a kumulatív abszolút sebesség fizikai tartalmát, ami megmagyarázza, hogy miért tapasztalható jó korreláció a CAV és a káresemények között. Jelen dolgozatban ezt a feladatot oldjuk meg.

A CAV értelmezése

A kumulatív abszolút sebesség a szabadfelszíni talajgyorsulás vízszintes összetevője $a(t)$ abszolút értékének integrálja a rengés T időtartamára:

$$CAV = \int_0^T |a(t)| dt . \tag{1}$$

A szabványos CAV kiszámításánál a $\pm 0,025$ g értéknél kisebb amplitúdókat kiszűrjük [3], ami az integrálás időtartamát is befolyásolja. Korábban bemutattuk, hogy egy adott PGA érték mellett a CAV igen széles tartományban változhat [5].

Az (1) egyenletről nyilvánvaló és könnyen belátható, hogy a CAV függ a PGA-tól magától, az erős rengés időtartamától T , a talajmozgás spektrális összetételétől. Célszerű lenne, ha ezeket az összefüggéseket explicit módon megjelenítenénk. Ennek érdekében vizsgáljuk meg az (1) egyenletet az integrálás középpérték-tétele alapján. Legyen $z(t)$ egy tetszőleges integrálható függvény, akkor

$$T \inf(z) \leq \int_0^T z(t) dt \leq T \sup(z) \tag{2}$$

Esetünkben $|a(t)| \geq 0$ miatt

$$0 \leq \int_0^T z(t) dt \leq T \sup(z) . \tag{3}$$

Létezik egy olyan $z(t) = \bar{z}$ értéke a függvénynek, amelyre igaz, hogy

$$\int_0^T z(t) dt = T * \bar{z} . \tag{4}$$

Ezen megfontolások alapján az (1) egyenletet közelítőleg felírhatjuk az $|a(t)|$ várható értékével, $E \{ |a(t)| \}$, az alábbiak formában:

$$CAV = \int_0^T |a(t)| dt : T * E \{ |a(t)| \} \tag{5}$$

Ebben a felfogásban a CAV akár úgy is tekinthető, mint két véletlen változó függvénye. Itt eltekintünk a két változó függőségétől, amely minőségi megfontolások alapján evidens, de igen nehezen számszerűsíthető.

A gyorsulás időfüggvényt gyakran írják $a(t) = I(T)x(t)$ alakban, ahol az $I(t)$ egy ablakfüggvény, amely zérustól eltérő pozitív értékeket vesz fel a $[0, T]$ intervallumban, azaz $I(t) > 0$, míg a $t = 0$ és $t = T$ peremeken és az intervallumon kívül $I(t) = 0$. Itt feltehető, hogy $x(t)$ egy stacionárius normál folyamat, míg $a(t)$ egy nemstacionárius normál folyamat.

Tételezzük fel, hogy az $a(t)$ egy normál, stacionárius véletlen folyamat, amely várható értéke zérus, sűrűségfüggvénye $f_a(a)$, autokorrelációs függvénye pedig $R(\tau)$. Bár $a(t)$ általánosságban és szigorúan véve nem stacionárius folyamat, de a stacionaritás feltételezése nem zavarja eljárásunkat, mivel az az instacionárius esetre is levezethető, ám - a dolgozat szándékával ellentétesen - a kvalitatív tartalmat némileg elfedő írásmóddal.

Az (1) egyenletben a $z(t) = |a(t)|$ egy véletlen folyamat, amelynek valószínűségi sűrűségfüggvénye $f_z(z) = 2 f_a(z) U(z)$. A $z(t) = |a(t)|$ nem normál folyamat, amelynek várható értéke

$$E \{ z(t) \} = \int_{-\infty}^{\infty} |a| f(a) da = \sqrt{\frac{2}{\pi}} R(0) . \tag{6}$$

Itt $R(0)$ az $a(t)$ folyamat autokorrelációs függvénye a $\tau=0$ időeltolásnál. Erre érvényes az alábbi összefüggés:

$$R(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{aa}(\omega) d\omega . \tag{7}$$

ahol $S_{aa}(\omega)$, a talajgyorsulás autospektruma, amelyet a továbbiakban megvizsgálunk.

Számos elméleti munka és gyakorlati útmutató létezik a földrengés talajgyorsulás autospektrumára (power spectral density - PSD) vonatkozóan (lásd például [6] és [7]). Az elméleti munkák jórészt úgy határozzák meg a talajgyorsulás autospektrumát, mint egy egytömegű rendszer választ egy $u(t)$ fehér zaj gerjesztésre, amely egytömegű rendszer csillapítása, ζ_g és sajátfrekvenciája, ω_g a talajréteget jellemzi, azaz

$$S_{KT}(\omega) = S_0 \frac{1 + 4\zeta_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right]^2 + 4\zeta_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} \quad (8)$$

ahol $S_{KT}(\omega)$ az úgynevezett Kanai-Tajimi spektrum, amelynek számos továbbfejlesztett változata létezik (például a Clough-Penzien spektrum). Itt, az egyszerűség kedvéért, tekintettel arra, hogy a célunk a CAV értelmezése és nem konkrét numerikus eredmény meghatározása, azt tételezzük fel, hogy $a(t)$ egy ideális sávkorlátos folyamat, azaz legyen a folyamat autospektruma az alábbi:

$$S_{aa}(\omega) = \begin{cases} S_0 & \omega_1 \leq |\omega| \leq \omega_2 \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases} \quad (9)$$

A feltételezés alátámasztására vegyük a NUREG-0800 dokumentumot [7], ahol a Regulatory Guide 1,60 szerinti, a vízszintes gyorsulás szabványos válaszspektrumához illeszthető gyorsulás-időfüggvények autospektrumára (1,0 g PGA értékhez normálva) a NUREG/CR-5347 [8] és NUREG/CR-3509 alapján [9] azt találjuk, hogy a PSD, $S_0(f)$ felírható, mint

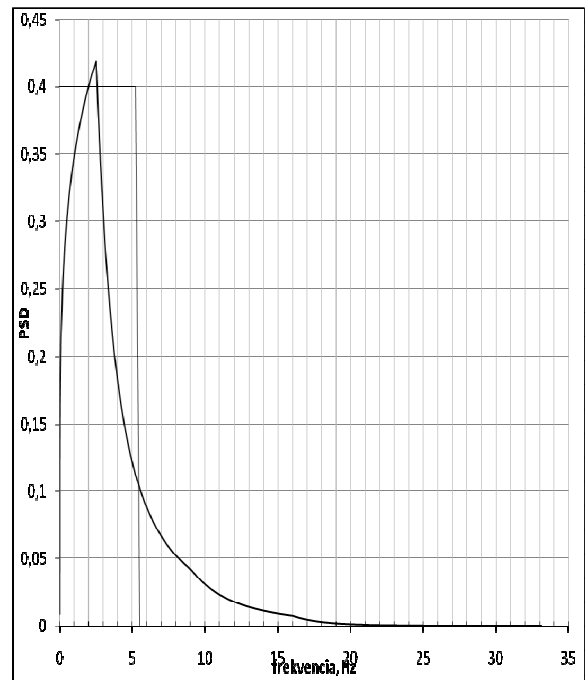
$$S_0(f) = \frac{2|F(f)|^2}{2\pi T_D} \quad (10)$$

ahol $F(f)$ a talajgyorsulás Fourier amplitúdója, T_D pedig az erős rengés időtartama, amelyen a gyorsulás diagram Fourier amplitúdó-spektrumát meghatározzuk. Ez pozitív frekvencia tengelyen értelmezett egyoldalú PSD.

A mesterséges gyorsulás-idő függvények generálásánál a (10) egyenlet szerinti PSD értékének meg kell haladni az alábbi (11) egyenlettel megadott PSD értékeinek 80 százalékát a 0,3 Hz - 24 Hz tartományban.

$$\begin{aligned} & \text{ha } f \leq 2,5 \text{ Hz:} \\ & S_0(f) = 0,419 \text{ m}^2/\text{sec}^3 (f/2,5 \text{ Hz})^{0.2} \\ & \text{ha } f \text{ a } 2,5 \text{ Hz és } 9,0 \text{ Hz között van:} \\ & S_0(f) = 0,419 \text{ m}^2/\text{sec}^3 (2,5 \text{ Hz}/f)^{1.8} \\ & \text{ha } f \text{ } 9,0 \text{ Hz és } 16,0 \text{ Hz között van:} \\ & S_0(f) = 418 \text{ cm}^2/\text{sec}^3 (9,0 \text{ Hz}/f)^3 \\ & \text{ha } f > 16 \text{ Hz} \\ & S_0(f) = 74,2 \text{ cm}^2/\text{sec}^3 (16,0 \text{ Hz}/f)^8 \end{aligned} \quad (11)$$

A (11) szerinti szabványos cél-PSD látható az 1. ábrán. Az ábrából egyértelműen kitűnik, hogy a jel-energia egy igen szűk frekvencia-sávban koncentrálódik.



1. ábra: A szabványos válaszspektrumhoz illeszkedő gyorsulás-időfüggvények PSD-je

A fentiek alapján $R(0)$ az alábbi módon közelíthető:

$$R(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{aa}(\omega) d\omega = \frac{S_0}{\pi} (\omega_2 - \omega_1) = \frac{S_0}{\pi} \omega_c \frac{\Delta\omega}{\omega_c} \quad (12)$$

ahol $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ a sáv szélesség és $\omega_c = \omega_1 + \frac{\omega_2 - \omega_1}{2}$ a középfrekvencia.

Fentiek alapján a CAV felírható úgy, hogy az a fizikai tartalom értelmezését segítse.

A CAV-ra az integrálás középérték-tételével kapott (5) egyenletet átírhatjuk a (6) egyenlet, azaz a talajgyorsulás autokorrelációs függvénye felhasználásával az alábbi formában:

$$CAV = T \sqrt{\frac{2}{\pi} R(0)} = T \sigma_a \sqrt{\frac{2}{\pi}} \quad (13)$$

ahol $\sigma_a = \sqrt{R(0)}$, amely azt mutatja, hogy a CAV arányos az erős rengések időtartamával és a gyorsulás amplitúdó szórásával.

Az autokorrelációs függvény és az autospektrum közötti összefüggés alapján kapott (7) egyenletet figyelembe véve, majd kihasználva azt, hogy az $a(t)$ sávkorlátos (lásd a (8) — (12) egyenleteket), a (13) egyenletből kapjuk az alábbi kifejezést:

$$\begin{aligned} CAV &= T \sqrt{\frac{1}{\pi^2} \omega_c \frac{2S_0 \Delta\omega}{\omega_c}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{T} \sqrt{N} \sqrt{\frac{2S_0 \Delta\omega}{\omega_c}} \\ T \omega_c &= T \frac{2\pi}{T_c} = 2\pi N \end{aligned} \quad (14)$$

ahol N nem más, mint a terhelési ciklusok száma az ω_c középfrekvencián a T erős rengés időtartama alatt. Itt még figyelembe vehetjük, hogy az $a(t)$ -t sávkorlátos folyamatként $\Delta\omega$ sávban szinusz-függvények sorozatával közelíthetjük:

$$a(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (15)$$

miközben $a(t)$ teljes energiája $E \{a(t)^2\} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i^2}{2}$, amit úgy

lehet kiosztani, hogy az ω_i frekvenciák egyenlő

$\delta\omega$ intervallumokba essenek és $S_{aa}(\omega_i)\delta\omega = \frac{A_i^2}{2}$ legyen,

ami esetünkben az ω_c középfrekvencián vett egyetlen

szinuszt véve $2S_0\Delta\omega = A_c^2$. Így (14) tovább írható, mint

$$CAV = T \sqrt{\frac{1}{\pi^2} \omega_c \frac{2S_0\Delta\omega}{\omega_c}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{T} \sqrt{N} \sqrt{\frac{2S_0\Delta\omega}{\omega_c}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{T} \sqrt{N} \frac{A_c}{\sqrt{\omega_c}} \quad (16)$$

Itt egy lépést tehetünk a jövőbeli vizsgálatok irányában, amelyek a CAV és a válaszspektrum közötti összefüggés elemzésére irányulnak.

Az összefüggés természetének minőségi szemléltetéséhez elégséges a rengést egy, ω_c frekvenciájú periodikus gerjesztésként feltételezni. Legyen a gerjesztő elmozdulás $u_g(t) = u_{gc} \sin(\omega_c t)$. Ekkor - kiindulva abból,

hogy a válaszspektrum amplitúdója egy adott $\omega = \omega_0$ frekvencián nem más, mint egy ξ csillapítású, ω sajátfrekvenciájú egytömegű lengő rendszer adott gerjesztésre adott válaszának maximuma, s feltételezve, hogy T idő alatt az állandósult mozgás kialakul - a maximális választ az $\omega_0 = \omega_c$ esetben kapjuk. Végül a válaszspektrum amplitúdó az egytömegű lengő rendszer válaszának

analitikus megoldása alapján az a pszeudogyorsulás maximumára kapjuk, hogy

$$\max \{a(t)\} = \omega_c^2 u_{gc} \frac{1}{2\xi} \quad (17)$$

Következtetések

A földrengés által kiváltott talajmozgás szabadfelszíni kumulatív abszolút sebességének fentiekben elvégzett kibontása alapján megállapíthatjuk a következőket:

- 1.) A CAV arányos az erős rengések időtartamával T és az $a(t)$ gyorsulás-időfüggvény „átlagos energiájával” (RMS értékével), avagy σ_a szórásával. Ez lényegében már az (5) és (6) egyenletről következett, s kézenfekvőnek tekinthető.
- 2.) Kézenfekvő fizikai oka van annak, hogy a CAV „jó” kár-indikátor. A földrengés alternáló terhet jelent, és ezért az egyik kár-ok a kisciklusú fáradás. A CAV függ az erős rengés időtartamától T , a terhelési ciklusok számától N és azt ezt kiváltó talajmozgás amplitúdójától A_c , ezért a CAV jól korrelálható a fáradás-típusú tönkremenetellel. A tönkremenetelt jellemző paraméterek és a CAV összefüggését a (16) egyenlet megmutatja.
- 3.) Hasonló értelmező megfontolások tehetők, ha a kár-ok a stabilitás elvesztése.
- 4.) A rengés középfrekvenciájának növekedésével - minden egyéb ettől független körülményt változatlanul hagyva - csökken a CAV értéke, és csökken a kár valószínűsége is. A szerkezet maximális feszültség-amplitúdót okozó választ a gerjesztés frekvencia-tartalma és a szerkezet sajátfrekvenciái egyaránt meghatározzák, s ez utóbbiak a szerkezetek jó részénél 2 ± 20 Hz között vannak.
- 5.) Megmutattuk, hogy bizonyos, a fizikai tartalmat nem torzító egyszerűsítések árán analitikus összefüggés létesíthető a CAV, mint kár-indikátor és a maximális talajgyorsulás és válaszspektruma között.

Irodalomjegyzék

- [1] "Preliminary Findings and Lessons Learned from the 16 July 2007 earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP", August 2007, Mission Report, IAEA, Vienna, http://www.iaea.org/NewsCenter/News/PDF/kashiwazaki060807_vol1.pdf,
- [2] Whorton R.: U.S. Utility Perspectives on Earthquake Response and Seismic Instrumentation, Consultant Meeting on the Advisability of an Automatic Seismic Scram System in Nuclear Power Plants, 3-5 April 1995, Vienna, Austria
- [3] Criterion for determining Exceedance of the Operating Basis Earthquake, EPRI NP-5930, July 1988.
- [4] "Guidelines for Nuclear Plant Response to an Earthquake," EPRI NP-6695, December 1989
- [5] Katona T. J., Új elvi lehetőségek a földrengés PSA bizonytalanságának kezelésében. NUKLEON május:(3. évf.) Paper 63. (2010), <http://mmt.kfki.hu/Nukleon/index.php?action=abstract&cikk=130>
- [6] Gupta I.D., Trifunac M.D., Investigation of Nonstationarity in Stochastic Seismic Response of Structures, Report No. CE 96-01, USC, June 1996, Los Angeles, http://www.usc.edu/dept/civil_eng/Earthquake_eng/CE_Reports/96_01/CHAP2.PDF
- [7] NUREG-0800, Standard Review Plan, 3.7.1 Seismic Design Parameters, U.S. Nuclear Regulatory Commission, March, 2007, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr0800/>
- [8] NUREG/CR-3509, "Power Spectral Density Functions Compatible with NRC Regulatory Guide 1.60 Response Spectra," June 1988.
- [9] NUREG/CR-5347, "Recommendations for Resolution of Public Comments on USI A-40, Seismic Design Criteria," June 1989.