

Földrengés tapasztalatok Japán nagygátaknál

Dr. Nagy László

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar,
Geotechnika és Mérnökgeológiai Tanszék

Kivonat

Magyarországon – elsősorban amerikai és európai példák alapján - az a vélekedés terjedt el, hogy földrengésre még nem mentek tönkre gátak. A két legismertebb tönkremenetel a Sheffield- és az Alsó San Fernando-gát esete. Az Egyesült Államokban a Santa Barbara földrengés (1925) tönkretette a 11 méter magas Sheffield-gátat, mert anyaga nem volt eléggé tömör, így nem tudott ellenállni a gát alsó részén kialakuló pórusvíznyomás növekedésének (*Seed és tsi. 1969*). A San Fernando földrengés (1971) súlyos károkat okozott mind a 43 m magas Alsó San Fernando-gátnál, mind a 25 m-es magasságú San Fernando felső gátnál (*Seed és tsi. 1975, Seed 1979*). Ezt a két gátat hidraulikus feltöltéssel építették, és egy törésvonal mellett helyezkedtek el, ezért ezek a gátak jelentősen károsodtak, tönkrementek, és kis szerencséivel nem szakadtak át. (magyarul *Nagy - Illés, 2021*) Kevésbé ismert azonban a japán gátak viselkedése földrengés hatására, annak ellenére, hogy közismert az ország erős földrengés veszélyeztetettsége. Ez a tanulmány a 15 méternél magasabb japán gátaknál földrengések során bekövetkezett károsodásokat és tönkremeneteleket tekinti át szakirodalmi adatok alapján.

Kulcsszavak

Földrengés, földgát, károsodás, gyorsulás, Japán, nagygátak,

BEVEZETÉS

Nagyon ritka, hogy völgyzárógátak földrengés következtében károsodjanak, tönkremenjenek. A ritkán előforduló eseteknél részletes vizsgálat, illetve „back analysis” segít az események rekonstruálásában a tönkremenetel megértésében és a pontosabb biztonsági megközelítés kidolgozásában. A gátak dinamikus terheléssel, szeizmikus hatásokkal szembeni ellenállásához elengedhetetlen a földrengés biztos tervezése, mely a kivitelezési kérdéseken át a szerkezeti kialakításon keresztül, a komplex méretezési kérdéseket is magába foglalja.

Egy 1978. évi felmérés kimutatta, hogy Japánban több mint 250000 föld- és kőszórásgát van. A gátak 75% -a több mint 100 éves és mintegy 80 %-ban 10 m-nél alacsonyabb. Más szerkezetekhez hasonlóan a föld- és kőszórásgátak is szenvedtek a múltbeli földrengések káros következményeitől. A földrengések által okozott károk geotechnikai elemzése hasznos információkkal szolgált a földrengések okozta gát károk elleni intézkedések végrehajtásához. A gátak 1985. évi geotechnikai-talajmechanikai felmérése hasznos volt, megállapították, hogy a földrengés által károsodott gátak többsége kisméretű földgát volt, és javaslatok születtek a földrengés által okozott károk elleni intézkedések végrehajtásához (Tani 1991).

A Japánt megrázó erős földrengések ellenére viszonylag kevés gátszakadásról lehet beszámolni, a Manno-ike gát mellett az egyetlen viszonylag jól dokumentált gátszakadás a Fujinuma gát szakadása volt 2011-ben a „nagy Tohoku” földrengés idején.

A MANNO-IKE GÁT

Japánban a föld- és kőszórásgátak földrengés okozta károk párhuzamosak jelentkeztek a gátépítés történetével. Úgy tűnik, hogy nem is egy gátszakadás volt földrengés következtében. A legkorábbi ismert eset 1854-ben történt. Az *Ansei Nankai* (M8,4) földrengés okozta a 701-ben a helyi rizstermesztés föllendítésére épített és többször magasított *Manno-tó* gátjának

tönkremenetelét (Ono és társai, 2011). A Manno-ike (az „Ike” tavat jelent magyarul) Japán egyik legrégebbi mezőgazdasági víztározója. A Mannou-ike gátjának magassága 22,0 m, a korona hossza 155,8 m, a tározott térfogat 113 000 köbméter volt, segítségével 3003 ha területet öntöztek. A gát átszakadását valószínűleg egy buzgár okozta egy hónappal a földrengés után (*Manno-ike Irrigation Association 1929*).

A GÁTKÁROSODÁSOK FELMÉRÉSE A XX. SZÁZADBAN

A *Nohbi* földrengés (1891) megrongálta az "Iruka-ike" gátat (*Aichi Prefektúra*). Azonban az első földrengés utáni felmérést csak az észak-tangói földrengést (1927) követően végezték. Az 1. táblázat áttekinti a földrengések által okozott károkat a földgátakban 1927 óta.

Sorszám	Földrengés neve	Időpontja	Magnitúdó Mj	Károsodott gátak száma
1.	Kitalango	1927. 02.07.	7,5	90
2.	Oga	1939.05.01.	7,0	74
3.	Niigata	1964.06.16.	7,5	146
4.	Matsushiro	1965-70	5,4	57
5.	Tokachi-oki	1968.05.16.	7,9	202
6.	Miyagiken-oki	1978.06.12.	7,4	83
7.	Nihonkai Chubu	1983.05.26.	7,7	238
8.	Chibaken Toho-oki	1987.12.17.	6,7	9
9.	Kushiro-oki	1993.01.15.	7,8	1
10.	Notohanto-oki	1993.02.07.	6,6	21
11.	Hokkaido Hansei-oki	1993.07.12.	7,8	18
12.	Sanriku Harika-oki	1994.12.28.	7,5	7
13.	Hyogoken Nambu	1995.01.17.	7,2	1362
14.	Sorachichuo	1995.08.13.	5,6	1
15.	Miyagiken Hokubu	1996.09.11.	5,9	5
16.	Kagoshimaken Satsuma	1997.03.05.	6,2	3
17.	Yamaguchiken Hokubu	1997.07.15.	6,1	2

1. táblázat Károsodott földgátak száma különböző földrengéseknél

Az *Ojika* földrengés (1939) által okozott károkat Akiba és Semba (1941) vizsgálta. A legfontosabb következtetésük szerint a homok töltéseknél a földgátak jelentős károkat szenvedtek. Ez arra utal, hogy a megfolyósodás komoly károkat okozhatott az ilyen töltéseknél. Később a földgátaknál a keletkezett károk részletes felmérésre kerültek a *Niigata* földrengés (1964), a *Tokachi-Oki* földrengés (1968), a *Miyagi-Oki* földrengés (1978), a Közép-Japán-tengeri földrengés (1983) és a Chiba-Toho-oki földrengés (1987) után. Különösen sok gát károsodott *Hyogoken Nambu* földrengésnél 1995-ben (1. táblázat). Összesen 1927 óta az összeírt károsodott gátak száma meghaladta a 2300-at, ami azt jelenti, hogy igen bőséges merítési lehetőség volt a statisztikai elemzéshez. Az évek teltevel a földrengések során keletkezett károk felmérése, a tapasztalt jelenségek leírása és dokumentálása egyre tökéletesedett, így ma részletes ismeretekkel rendelkeznek a nagygátak földrengés káraitól (Tani 1993).

OJIKÁ FÖLDRENGÉS

Az 1939. évi *Ojika* (Japán *Honsu*-sziget) M6,6 földrengés során 74 gát károsodott, ebből 12 teljesen tönkrement (A tönkrement töltés nem feltétlenül jelent gátszakadást, a gát megnyílását, mert lehet, hogy víz sem volt benne), 40 gátnál pedig rézsűcsúszást jelentettek (*Akiba - Semba*, 1941). A földrengés következtében a becsült gyorsulás a súlyosan károsodott gátaknál 0,3 – 0,4 g között változott.

Számos alacsony, öntözési célból épült földgát károsodott a földrengés során. Ezeknek az átfogó összehasonlító felmérését *Akiba - Semba*, (1941) végezte a károsodások jobb megértése érdekében (2. táblázat). A részletes felmérés 58 erősen sérült töltésre és 12 nem jelentősen sérült töltésre készült. A töltések magassága 1,5 m és 18 m között változott, de a töltés magassága és a sérülés mértéke között nem volt nyilvánvaló kapcsolat. Hasonlóképpen, bár a vizsgált töltések közül 31-nél találták meg a töltésépítési nyilvántartást, a károsodás és az építési eljárások közötti összefüggést nem lehetett meghatározni.

A 2. táblázat a különböző típusú károsodásokhoz kapcsolódó töltések számának részletezését mutatja. E szerint a rézsű meghibásodásai és repedései (a kidudorodást is enyhe lejtőn való meghibásodásnak tekintették) a töltések legalább 80 %-ában okoztak károkat, a többi töltés nagy részében azonban a károk típusát nem határozták meg, mivel azok teljesen tönkrementek.

Rézsű suvadások és töltésrepedések	Számosság
Felvízi rézsű suvadása	17
Alvízi rézsű suvadása	6
Mindkét rézsű suvadása	8
Teljes tönkremenetel meg nem határozható mechanizmussal	9
Meg nem határozható repedések és műtárgy	2
Csak műtárgy	1
Csak repedések (elsődlegesen függőleges)	9
Összesen	52

2. táblázat *Ojika földrengés, rézsű suvadások és töltésrepedések*

Sorszám	Szemeloszlás [%]			Megjegyzés
	> 0,1 mm	0,01 – 0,1 mm	< 0,01 mm	
1	85	15	0	
2	84	15	1	
3	82	15	3	
4	66	18	16	
5	72	21	9	
6	79	12	9	
7	77	13	10	
8	92	5	3	
9	81	6	13	
10	34	38	28	Laza töltés
11	14	59	27	Laza töltés
12	36	31	33	Buzgárosodás

3. táblázat *Az Ojika földrengésnél 1939-ben károsodott gátak szemeloszlása*

A töltésépítő anyag szemeloszlásának néhány jellemző pontját mutatja a 3. táblázat a teljesen tönkrement töltések esetén. Amint az a táblázat adataiból kitűnik, a 12 töltésből 9-et elsősorban homokból készítettek. Agyagos homokból épített töltéseknél bekövetkezett három meghibásodás esetében kettőt a gyengén tömörített talaj elmosása okozta a nemrégiben javított leürítő vezetékeknél, míg a harmadik a leürítő vezeték törése miatt kialakult buzgár okozta.

A földrengés és következményeinek vizsgálata során a következő fontosabb megállapításokat tették:

1. Nagyon kevés adat volt a gát meghibásodásáról a földrengés során. A legtöbb gát tönkremenetel néhány órával vagy akár 24 órával a földrengés után történt.
2. A sérülések és tönkremenetek nagy részénél a töltések homokos talajból épültek (3. táblázat); az agyag talajból épült töltéseknél nem történt teljes tönkremenetel.

3. Még az epicentrumhoz közel lévő töltéseknél sem voltak agyagból épült töltések a teljesen tönkrement töltések között; azonban az epicentrumtól nagyobb távolságra koncentráltak a homok talajból álló teljesen tönkrement töltések.

A múltbeli adatok felhasználásával az mondható (Tani 1993), hogy a földrengés erőssége (M_j) és az epicentrumtól a mért megrongált földgát távolsága között van összefüggés. Amennyiben az M_j magnitúdó $6,1 < M_j < 8$ közé esik, és az epicentrumtól való távolság nagyobb, mint 11 km, a földgátak károsodásának kritikus távolsága a következő összefüggés alapján határozható meg: $\log R = 0,846 M_j - 4,14$ ahol M_j : a Japánban alkalmazott magnitúdó, R : a kritikus távolság az epicentrumtól (km). Természetesen ennek az egyenletnek a megbízhatósága a talajviszonyoktól, a földgát anyagától és állapotától is függ.

A 4. táblázat a 15–30 m magasságú öntözéshez létesített gátak építési idejét, mutatja 1985 előtt (Tani 1993). A gátak száma összesen 1 872, amiből 1506 földgát, amiből 438 db nagyon régi, ami még a Meiji korszak előtt épült. Ezek többségét az "Edo" korszak alatt helyezték üzembe. A második világháború után szerte a világon gátépítési boom volt.

Építés ideje	-1867	1868-1945	1946-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1985	Építés alatt	Tervezett	Összes
Darab	438	610	51	189	193	148	18	186	39	1872
Százalék	23.4	32.6	2.7	10.1	10,3	7,9	1,0	9,9	2,1	100

4. táblázat A 15 méternél magasabb gátak építési ideje Japán területén (az idézett közlemény 1993 évi, ezért ér véget az időhorizont 1985-ben)

Az 5. táblázat a 15–30 m magas föld- és kőszórás gátakat részletezi Japánban, amelyek jelentős földrengés okozta károkat szenvedtek. Ez a táblázat azt mutatja, hogy a Manno-ike eset kivételével egyetlen nagyméretű, 15-30 m magas föld- és kőszórás gát sem szenvedett súlyos kárt a nagy földrengéstől. Az 5. táblázatban a károsodás mértékére az 1. ábra károsodás típusait alkalmazták (Tani 1993).

Az 5. és 6. táblázatban található hivatkozások a földrengés okozta töltés sérülésére vonatkoznak 15-30 m magas és 30 méternél magasabb gátak esetén Japánban. (Tani 1993) A 6. táblázat azt mutatja, hogy nincs nagyméretű töltés 15-30 m magas földgátak között, ahol súlyos földrengés okozta károkat megtapasztaltak, kivéve a Manno-ike gátat. A 6. táblázat ugyanakkor megmutatja a földrengések során végzett megfigyeléseket a 30 métert meghaladó magasságú nagy földgátaknál Japánban.

Földrengés	Dátum	Magnitúdó (M_j)	Gát neve	Elkészült	Magassága (m)	Anyaga	A károsodás	A károsodás mértéke
Ansei-Nankai	1854.07.24.	8,4	Manno-ike	700 körül	23	Föld	Egy hónappal a földrengés után szivárgást jelentettek a töltésen, 6 nappal később átszakadt.	Átszakadt
Nobi	1981.10.28.	8,4	Iruka-ike	1633	29	Föld	Hosszírányú repedés a koronán	Enyhe
Kanto-Dai	1923.09.01.	7,9	Ohno tározó	1914	34	Föld*	24 cm korona süllyedés, repedés a korona oldalában	Közepes
			Murayama felső	1923**	24	Föld	Korona süllyedés 20 cm	Enyhe
			Murayama alsó		16	Föld	Hosszírányú repedés a koronán	Enyhe
Oga	1939.05.01.	7,0	Iwakure Tameike	1931	17	Föld	Hosszírányú repedés a koronán	Enyhe
Matsushiro	1965. 08	5,4	Ohike	1927	16	Föld	Hosszírányú repedés	Enyhe
			Shionoiri	1936	25	Föld	Hosszírányú repedés	Enyhe
Niigata	1964.06.16.	7,5	Takinosawa	1954	15	Föld	Repedések a rézsűn	Enyhe
			Fujita	1952	18	Föld	Repedések a rézsűn és a koronán	Enyhe
			Bajjin	1950	22	Föld	Repedések a koronán	Enyhe

			Hase Ike	1953	16	Föld	Alvízi rézsűn csurgás	Enyhe
			Ohkura	1807	16	Föld	Repedések a koronán	Enyhe
			Hirusawa	1948	24	Föld	Repedések a koronán	Enyhe
			Kamonotani	1933	15	Föld	Erős csurgás az alapon	Erős
			Nishino	1935	18	Föld	Repedések a koronán	Enyhe
			Sekishiba	1958	30	Föld	Ismeretlen	-
			Bakura	1931	21	Föld	Csurgás a töltés aljában	Közepes
Tokachi-Oki	1968.05.16.	7,9	Tanosawa	1926	23	Föld	Repedések a koronán, süllyedés	Közepes
			Koganezawa	1938	21	Föld	Repedések a koronán	Enyhe
Akita-Touhou	1970.10.26.	6,5	Yunosawa	1930	27	Föld	Suvadás, repedések a koronán	Közepes
							Repedések a koronán	Enyhe
Miyagi-Oki	1978.06.12.	7,4	Ushino	1965	23	Föld	Suvadás a felvízi felszínen	Enyhe
			irusawa	1948	24	Kőszórás	Oldalsó repedések	Enyhe
1983 Közép-Japán-tenger	1983.05.26.	7,7	Megurisekida	-	18	Föld	Repedések, csurgás az alpból	Enyhe
			Hongo	1956	17	Föld	A korona süllyedése 50 cm	Közepes
			Higashidaisa	1940	17	Föld	Csurgás az alpból	Enyhe
			Ohzutsumi	1940	15	Föld	Repedések a felszínen	Enyhe
Chiba-Touhouoki	1987.12.17.	6,7	Konaka	1936	21	Föld	Repedések a koronán	Enyhe
			Tameike					

*Beton maggal, **Építés alatt

5. táblázat Földrengés következtében károsodott 15-30 méter magas földgátak Japánban.

Rengés	Dátum	Magnitúdó	Gát neve	Gát típusa	Epicentrum távolsága	Max. gyorsulás a gátnál	Károsodás
Kanto-Dai	1923.09.01.	7,9	Ohno	Földgát beton maggal		0,33 g	Korona süllyedés 24 cm, oldalsó repedések a gát tengelyére merőlegesen.
Akita-Nanseibu	1970.10.26.	6,5	Ainono	Földgát	15	0,15 g	Tengelyirányú 5-25 cm széles repedések 40 méter hosszon.
Közép-Japán-tenger	1983.05.26.	7,7	Namioka	Kőszórás középső maggal	160	0,094 g (0,22 g a koronán)	Max. korona süllyedés 6 cm. A földrengés alacsony vízállásnál történt.
Naganoken Seibu	1984.05.26.	6,9	Makio	Kőszórás középső maggal	29	0,5-0,6g	Hosszanti repedések a koronán, felszín közeli kőszórás süllyedése a koronaélnél.
Chiba-Touhou-oki	1987.12.17.	6,7	Nagae	Földgát rézsűs maggal	29	0,262 g	Repedések a korona burkolatában, a korona süllyedése ~2 cm.

6. táblázat A 30 méternél magasabb földgátak károsodása földrengés hatására Japánban

A táblázat tartalmazza az *Akita-Toho* földrengést (1970), Mj6,5, amikor az Ainono gátnál jelentős kárt tapasztaltak. Ezt a gátat 1961-ben fejezték be. Egységes típusú, 41 méter magas. Ezen a gáton szeizmometert szereltek fel. A földrengés után azt jelentették, hogy a szeizmometert a skálán kívülre lendült, így nem tudta regisztrálni a földrengés intenzitását. A földrengés intenzitásának a gát helyére a 15 km-es epicentrum távolságból történő kiszámítására tett kísérlet azt mutatta, hogy az alapkőzetre továbbított szeizmikus hullámok maximális bemeneti gyorsulása $1,5 \text{ m/s}^2$ körül volt. A földrengés utáni felmérés szerint a súlyos károk a gát koronáján több függőleges repedés formájában jelentkeztek, amelyek mintegy 40 m hosszúak, mindegyik 5–25 cm széles volt.

A Közép-Japán-tengeri földrengés hatását a *Namioka*-gátnál tapasztalták, az epicentrumtól 146 km-re. A rögzített adatok azt mutatták, hogy az alapkőzetre továbbított szeizmikus hullámok maximális bemeneti gyorsulása $0,94 \text{ m/s}^2$ volt, a korona $2,23 \text{ m/s}^2$ szeizmikus választ mutatott. A földrengés akkor történt, amikor a gát üres volt, és így csak enyhe károk mutatkoztak.

A Naganoken-Seibu-i földrengés (1984; Mj6,9) az epicentruma közelében lévő *Makio-gátban* nem okozott súlyos károkat. Ezt a gátat 1961-ben fejezték be, egy 105 m magasságú középső

vízzáró maggal épült kőszórás gát. A gát erősen mozgást regisztráló két szeizmométerrel (az egyik a koronán, a másik az alapkőzetben) lett felszerelve. A mérési határ maximális értéke $3,0 \text{ m/s}^2$ volt, de azt javasolták, hogy a földrengés gyorsulása ne hogy túllépje a skálát, esetleg elérheti az $5,0\text{--}6,0 \text{ m/s}^2$ értéket. A földrengés utáni vizsgálat során megállapították, hogy az alsó szakaszon lévő padka $20\text{--}50 \text{ cm}$ szélességben és $10\text{--}50 \text{ cm}$ magasságban mozdult el a lejtőn, anélkül, hogy súlyos károkat okozott volna. A *Makio-gát* tervezéshez K_h vízszintes szeizmikus intenzitása $0,15g$, és a minimális biztonsági tényező $1,40$ volt.

A *Chiba-Tohooiki* földrengés (1988; Mj6,7) károkat okozott a Nagara-gátnál. Ezt a gátat 1985-ben fejezték be, és egy 52 m magas földgát volt, 29 km -re az epicentrumtól. A földrengés maximális szeizmikus gyorsulása $2,62 \text{ m/s}^2$, amely az alapkőzetben felfelé/lefelé irányban terjedt és $3,65 \text{ m/s}^2$ a koronán, ahol csak repedések fordultak elő.

Ezek az esetek azt mutatják, hogy a modern geotechnikai-talajtechnikai tervekkel ellátott gátak földrengésbiztosak, és nem szenvednek súlyos károkat. A gátak csak csekély sérülést szenvednek, még a gát tervezésénél figyelembe vett szeizmikus intenzitás esetén sem (*Tani 1993*).

A földgát károsodások típusa

Földgát károsodások típusát a *Nihonkai Chubu* földrengéskor károsodott gátak csoportosítása alapján állapították meg. A főbb vizuálisan észlelhető károkat osztályozták az árvízvédelmi gátaknál és vasúti töltéseknél alkalmazott kár besorolása szerint. Az *1. ábra* a kártípusok osztályozását mutatja (*Tani és tsi 1985*). Az I. és III. típus. 30% -ot tett ki, ezt követi a II., IV. típus. Az V. típus mindössze $1,8\%$ -ban szerepelt.

Az I. típusban (repedés) a gáttest alakja megmaradt csekély ülepedéssel, és csak repedések keletkeztek. Ezt a típust az jellemzi, hogy sok gát agyagból készült, jó alapozású talajon.

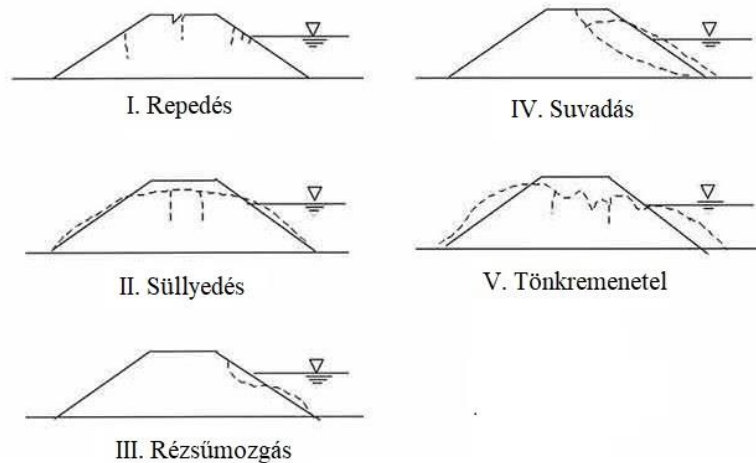
A II. típusban (süllyedés) a gátak alakjukat kísérő repedések ellenére megtartották, és a károsodás fő okát az altalaj okozta.

A III. típus (lejtő károsodása) és IV. (suvadás) alapvetően azonos típusú sérülést mutatott, de a III. típusnál a károk kevésbé súlyosak voltak, mint a IV. típusnál. A legtöbb esetben a töltés nagy része ép maradt, és komoly károkat nem észleltek. A IV. típusban a gáttest egy része suvadással elmozdult, gyakran nagy kárt okozva. Bár a III. típus eredendően kisebb kárt mutatott, mint a IV. típus, mégis volt amikor megfordult az arány.

Az V. típusban a töltés és az altalaj törése alakult ki. Az esetek száma nagyon alacsony volt.

A becsült okok közé tartozik a megfolyósodás a töltésben és az altalajban. Ezen kívül a kivezetési munkák, a műtárgy, az árapasztó, a gátváll elmozdulása és sérülése a teljes mennyiség mintegy 10% -át tette ki.

Nihonkai Chubu földrengés 238 sérült földgátjára és 1834 nem sérült földgátjára vonatkozó kérdőívvel kapott válaszok szerint az agyagos és a kavicsos agyagos talaj károsodása a homokos talajhoz képest 80% -ot tett ki. Ezzel szemben a homokos talaj károsodási aránya az összes földgáttal szemben, beleértve a sértetlen földgátakat is, elérte a 20% -ot, ami közel kétszerese az agyag és a kavicsos agyagnál tapasztalhatónak. Ez a tendencia szembe tűnőbb volt a súlyosan károsodott földgátak károsodási arányánál. A töltés talajából 39 sérült földgát és 18 ép földgát területén vettek mintát, és talajfizikai vizsgálatot végeztek.



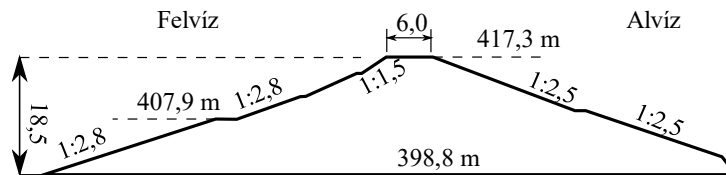
1. ábra A károsodás súlyossága öt fokozatú skálán

Tani (1993) szerint a földrengések sok kárt okoztak a föld- és kőszórásgátaknál. A földrengés által okozott károk és tönkremenetek tanulmányozása hozzájárult a gátak földrengés-ellenállásának jobb megismeréséhez. Figyelembe véve az epicentrum távolságát a gáttól és a földrengés nagyságát, a becslések szerint a gátra továbbított szeizmikus hullámok maximális bemeneti gyorsulása $3,0\text{--}4,0\text{ m/s}^2$ is lehet. Ez ugyan egyértelműen meghaladja a földrengés intenzitására vonatkozó tervezési kritériumokat, de mégsem keletkeztek komoly károk.

A földrengés kárfelmérések eredményei azt mutatják, hogy a nagyméretű föld- és kőszórásgátak nem szenvedtek kritikus károkat, ami arra engedte következtetni, hogy a gáttervezési módszerek (anyagjellemzők felvétele és rézsű állékonyság méretezési módszerek) technológiailag megfelelőek. Ugyanakkor károsodás is szinte csak a nagy méretű földgátaknál történt, különösen néhány súlyos kár tekintetében. Az eredmények azt mutatták, hogy a tervezett földrengés intenzitásnál erősebb földrengések sem okoztak súlyos károkat a magas és jól megépített modern gátak esetén. A föld- és kőszórásgátak a történelmi adatok szerint ellenállnak a földrengésnek.

FUJINUMA GÁT

Ebana folyó felső folyásán, a *Fujinuma*-gát 1937 és 1949 között épült, feladata a környék öntözővizének biztosítása a *Fukushima* prefektúrában *Honsu-szigetén*. A 18,8 méter magas földgát, 6 m korona szélességgel (2. ábra) és 133 m hosszú koronával készült. A beépített földmennyiség 99000 m^3 volt. A gát felvízi oldalán beton keretek között beton paneleket helyeztek el a töltés erózió védelme érdekében, a burkolat nem volt szigetelt, így a víz bejuthatott a töltésbe. A tározó térfogata $1504\ 000\text{ m}^3$, felülete 20 ha volt. Vízigyűjtő területe $8,8\text{ km}^2$. 2011. március 11-én átszakadt 20-25 perccel a *Tohoku* M9,0 földrengést követően. A gátszakadás a legmagasabb keresztmetszében alakult ki (*Kayen és társai, 2011*), ahol szerves réteget találtak a töltésben, másik helyen tuskót találtak, amiből arra következtettek, hogy a töltés alapozása nem lehetett teljesen szakszerű. A tározónak volt egy oldalgátja is, amelyik csak károsodott. A károsodás oka nagy valószínűséggel a hirtelen vízleeresztést követő vízoldali suvadás volt (*Harder és társai, 2011*).



2. ábra A Fujinuma gát keresztmetszelve



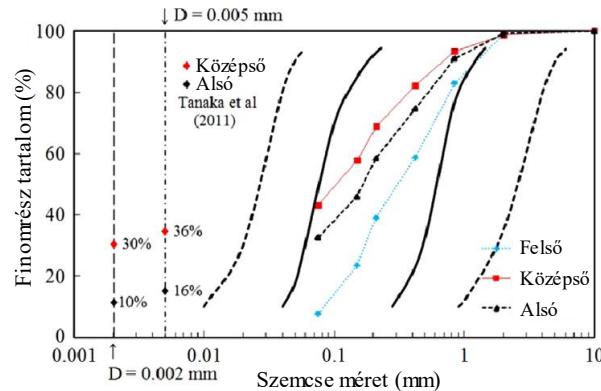
3. ábra Az elmosott Fujinuma gát

Öt házat és egy hidat sodort el a víz, 8 fő eltűnt, 4 személy holttestét megtalálták. A következő napon 252, a földrengéshez közeli gátat vizsgálták át, hat földgát koronáján volt nem mély repedés, egy betongátnál enyhe rézsúhámlás alakult ki. (A quick report on Japanese Dams after the Earthquake 2011). A hivatalos felmérések szerint a Japánban található 210000 víztározó közül 20000 gátja sérülékeny a jövőbeli földrengésekkel szemben (Okuno és társai, 2003).

Az átszakadt töltés (3. ábra), három jól elkülöníthető részből állt, a töltés megmaradt részét vizsgálva ezeket alsó, középső és felső rétegeknek nevezték el. A zavartalan mintákon áteresztőképességi együttható meghatározást és konszolidált drénezetlen (CU) triaxiális vizsgálatokat végeztek. A meghatározott szemeloszlási görbék a 4. ábrán láthatóak. A vastag folyamatos vonalak a megfolyósodásra leginkább hajlamos talajok határát jelzik, míg a szaggatott vonalak a megfolyósodásra képes talajokét (*The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2002*). Egy talaj megfolyósodási hajlamának megbecsléséhez több kritérium is tartozik. *Seed - Idriss (1982)* szerint az agyag talajok akkor hajlamosak a megfolyósodásra, ha az alábbi három feltételt egyidejűleg teljesítik:

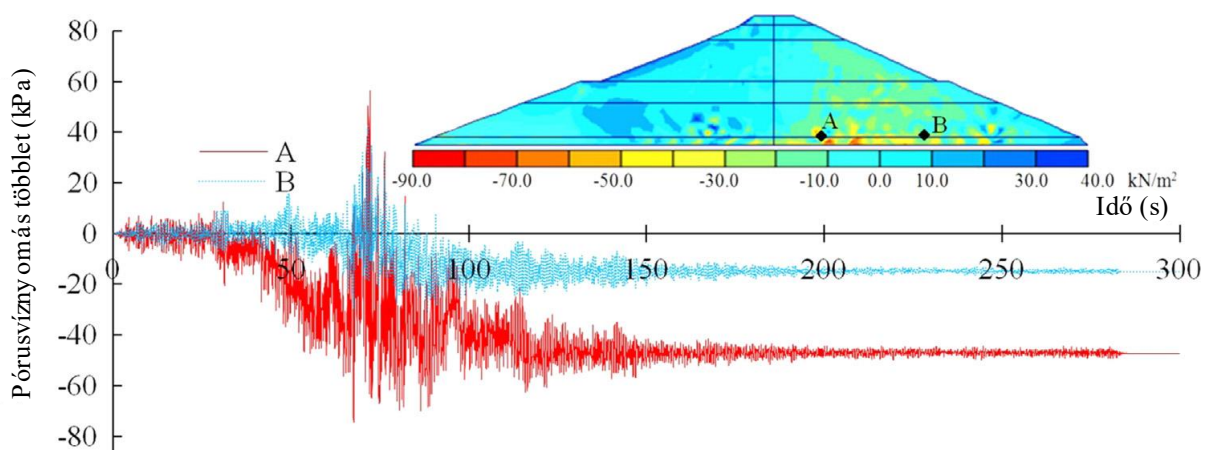
- a talaj 15 %-nál kevesebb 5 μm vagy annál finomabb részecskét tartalmaz,
- folyási határa kisebb, mint $w_L < 35\%$,
- a víztartalom/folyási határ hányadosa nagyobb, mint 0,9.

Andrews és Martin (2000) az alábbi határt húzta meg, amennyiben egy talaj kevesebb, mint 10 % 2 μm vagy annál finomabb szemcsét tartalmaz és a folyási határ kisebb, mint 32%, akkor megfolyósodásra hajlamos talajról beszélünk, amennyiben csak az egyik feltétel teljesül további vizsgálatok szükségesek. A középső és az alsó réteg nem teljesíti *Seed - Idriss*, illetve *Andrews - Martin* első feltételét.



4. ábra A Fujinuma gát rétegeinek szemeloszlása

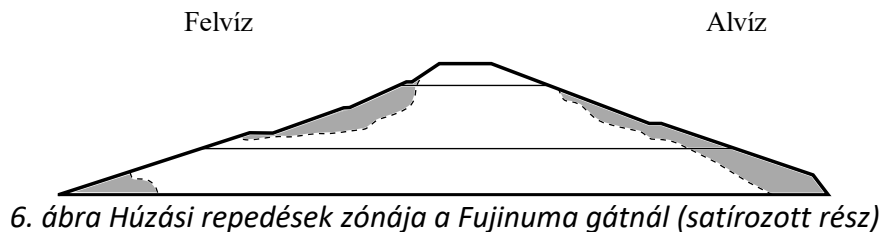
Charatpangoon és társai (2014) a végelelemes modellezéshez Plaxis 2D szoftvert használtak, melynek bemenő paramétereit a laboratóriumi vizsgálatok szolgáltatták. A gát töltés anyagának viselkedését Mohr-Coulomb anyag modellel írták le, ami egy rugalmas tökéletesen képlékeny modell. A 1,64 és 2,45 Hz-es tartományban (első és második rezgés alak) 5%-os Rayleigh csillapítást alkalmaztak (Bentley, 2016). A rétegzett talaj dinamikus viselkedését nem tudta a Mohr-Coloumb talajmodell visszaadni, ugyanis az alakváltozás következtében a változó merevség és a csillapítás nem modellezhető. Az 5. ábra a rengés kezdetét követő 105,19 másodpercében mutatja a többlet pórusvíznyomás értékét a gát keresztmetszetében, az A és B pontban jelentkező pórusvíznyomás többlet pedig a grafikonon követhető végig csaknem 300 másodpercig. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a gát keresztmetszetében megemelkedett a pórusvíznyomás, de az nem volt elég nagy ahhoz, hogy a hatékony feszültségeket kiegyenlítse és a talaj ellenállásának teljes megszűnését okozza. Az alvízi oldalon, ahol a hatékony feszültségek kisebbek lehetnek a pórusvíznyomás jelentős megemelkedése miatt, a talaj nyírási ellenállása lecsökkenhetett, ami jelentős deformációkat okozhatott. A Mohr-Coloumb modell csak térfogati feszültségből származó többlet pórusvíznyomást képes kezelni, vagyis az itt tapasztalt jelenségek modellezésére csak részlegesen alkalmas.



5. ábra Többlet pórusvíznyomás eloszlás a Fujinuma gát keresztmetszetében

Az utólagos helyszíni bejárás és a numerikus vizsgálatok alapján nem volt arra utaló jel, hogy a töltés megfolyósodott volna, igaz nem is maradt meg a töltésből túl sok. A tönkremeneteli mechanizmusokra szemtanúk és mérési adatok hiányában csak következtetni tudtak. A töltés húzási repedései a tönkremenetel kiinduló pontjai lehetnek. A 6. ábrán azok a területek

láthatók besatírozva, ahol a rezgés hatására kialakult húzási feszültségek meghaladták a talaj húzási ellenállását. A felvízi oldalon a repedések mélyebbre hatoltak, illetve mindkét oldalon a töltés lábánál is megjelenhettek. Vélhetően a gyenge felső réteg csúszott meg elsőként a hosszú rengés következtében. A rezgés nagy tartománya miatt rezonancia is létrejöhetett tovább növelve a gátra ható gyorsulási erőket. A pórusvíznyomás emelkedése következtében létrejövő elmozdulások is hozzájárultak a gát megcsúszásához és annak következtében a víz átbukásához.



ÖSSZEFOGLALÁS

Annak ellenére, hogy egy korábbi japán tanulmány azt elemezte, hogy a nagygátak közül a magasabb gátak állékonysága jobb, mint a kisebb (15-30 m magas) gátaké, ebben nem lehetünk teljesen biztosak, hiszen az említett tanulmány ezt a megállapítást történelmi adatok vizsgálatából, nem pedig állékonysági számításokból szűrte le.

A japán földgátak többsége kicsi, de a modern geotechnikai tervezést alkalmazó földgátak még a tervezési kritériumok feletti földrengés intenzitása esetén sem szenvedtek súlyos károkat. Ennek fényében úgy ítélték meg, hogy a nagy méretű gátak erősen ellenállnak a földrengésnek. A történelmi adatok alapján a következő összefoglaló következtetéseket vonták le (Tani 1995):

- A földrengéseknél a földgátakra átadódó maximális gyorsulás elérheti a 2,6–6,0 m/s² értéket. A földrengés statikus intenzitássá történő átváltás azt mutatja, hogy a tervezési kritériumokban figyelembe vett földrengés erősséget ez az érték meghaladja. Nyilvánvaló, hogy még ilyen magas intenzitás sem okoz súlyos károkat a nagyméretű földgátaknál.
- Bár más országokban a 15 m feletti földgátak súlyos károkat szenvedtek, de meg kell jegyezni, hogy ezek vagy hidromechanizációval készültek, vagy zagygátak voltak, de mind a kettőnél a közös a tömörítetlen, laza állapot. (Seed 1979, Seed és tsi 1975, Seed és tsi 1969). A japán földgátak vizsgálata azt mutatja, hogy 15 m feletti magasságú és a jelenlegi gát tervezési módszer szerint épített föld- és kőszórás gátak megfelelő földrengés-ellenállással rendelkeznek, és elegendő biztonságot nyújtanak a földrengésekkel szemben.

A földrengés méretezés a XX. század végén jelentősen fejlődött, új módszerek jelentek meg, amelyek részben háttérbe szorították a koordináta transzformáció alkalmazását, a pseudo-statisztikus vizsgálatot és a Newmark-módszer alkalmazását (Nagy - Illés 2020, 2021). Azonban tisztában kell lennünk azzal, hogy ezek a vizsgálatok csak egyfajta tönkremeneteli mechanizmusra adnak megfelelő közelítést, például olyanra, mint a szemcsés talajok megfolyósodásának biztonsági elemzésére nem alkalmasak. A töltésben vagy az altalajban megnövekedett pórusvíznyomás okozta tönkremenetel más megközelítést igényel. Hosszú ideig úgy gondolták, hogy a részűállékonysági módszerek alkalmazása megfelelő megoldás a megfolyósodás elleni vizsgálatnál is, csak magasabb biztonsági tényezőt kell alkalmazni. Manapság már ez nem járható út.

A bemutatott esetek a gátak és károsodások széles skáláját fedik le, azonban kétségtelen, hogy mai ismereteinkkel, a műszaki elvek betartásával jól megépített gátaknak nem csak a statikus, de a dinamikus igénybevételekkel szembeni ellenállása is megfelelő lehet. A laza, nem megfelelően tömörített vagy nem megfelelően tömöríthető gátaknál a töltés laza szerkezete kisebb ellenállást jelent a dinamikus hatásokkal szemben. Ezt bizonyítja a zagygátak tönkremenetelénél a magas törési hányad a földrengés következtében (Nagy, 2012). Ennél a kötött talajok ellenállása is jobb a dinamikus hatásokkal szemben.

A kőszórás gátak az összes gáttípusból a leginkább földrengésállóak, és talán az íves betongátak a leginkább veszélyesek. Ezért földrengés veszélyes területen amennyiben a helyi természeti adottságok engedik, kőszórás gátat kell építeni, de mindenképpen kerülni kell a hidraulikus kotrással épült laza anyagú gátak építését vagy a zagyolt anyagból épült gátak kialakítását.

Tény, hogy a korábbi tervezői ismeretek, az előző húsz-harminc évben felhalmozódott tudás is szerepet játszik abban, hogy a manapság épülő nagygátak földrengés állékonysága jónak mondható. Különösen a földrengésnek leginkább ellenálló kőszórás gátak földrengés állékonysága kiemelkedő, annak ellenére, hogy eléggé meredek rézsűhajlással készülnek.

Bár újabban egyre több közlemény jelenik meg a gátak és tározók földrengés gerjesztő hatásáról (mint pl. a *Zipingpu* gát leírt károsodásával kapcsolatban is), ami mintegy visszacsatolása a földrengésre történő méretezésnek, de jelentős hátránya ezeknek a publikációknak, hogy nem rendelkeznek építés előtti földrengés mérésekkel és adatokkal, ami az összehasonlítás szempontjából elengedhetetlen volna (Ge és tsi 2009). Kétségtelen az is, hogy csak korlátozott lehet a pórúsvíznyomás behatásának mélysége, tehát csak nagyon sekély mélységű földrengések jöhetnek szóba, és főként aktív vetők mellett. Azokban a mélységekben (pl. 20-30 km-es mélységben), ahol a sekély mélységű földrengések kipattannak, a tározó által indukált például 100 méteres víz (a földben pórúsvíz) növekedés hatása már elenyésző, figyelembe véve a kőzetekben kialakuló boltozati hatást is.

IRODALOMJEGYZÉK

- Akiba M. és Semba H. (1941): The earthquake and its influence on reservoirs in Akita prefecture. J. Agric. Eng. Soc. Japan, 1.
- Andrews D., és Martin G. (2000): Criteria for liquefaction of silty soils, In: Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering. Auckland, New Zealand.
- Bardet J.P. és Davis C.A. (1996): Performance of San Fernando Dams during 1994 Northridge Earthquake. Journal of Geotechnical Engineering, 7. 554–564. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(554).
- Bentley (2016): Plaxis 2D Reference Manual.
- Castro G., Seed R.B., Keller T.O. és Seed H.B. (1992): Steady-State Strength Analysis of Lower San Fernando Dam Slide, Journal of Geotechnical Engineering, 3. 406–427. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:3(406).
- Charatpangoon B., Kiyono J., Furukawa A. és Hansapinyo C. (2014): Dynamic analysis of earth dam damaged by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 50–62. doi:10.1016/j.soildyn.2014.05.002.
- Ge S., Liu M., Lu N., Godt J.W. és Luo G. (2009): Did the Zipingpu Reservoir trigger the 2008 Wenchuan earthquake? Geophysical Research Letters, 20. L20315. doi:10.1029/2009GL040349.
- Harder FL., Kelson IK., Kishida T. és Kayen R. (2011): Preliminary Observations of the Fujinuma Dam Failure Following the March 11, 2011 Tohoku Offshore Earthquake, Japan. Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER). 29.
- ICOLD (1986): Earthquake analysis for dams. Bulletin No. 52.

- Kayen R., Tanaka Y., Tanaka H., Sugano T., Estevez A.I., Cullenward S.S., ... Thomas D. (2011): LiDAR and Field Investigation Of the March 11, 2011 M9.0 Great Tohoku Offshore Earthquake, and April 7, 2011 M7.4 Aftershoc. Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER). 95.
- Nagy L. (2012): Történelmi zagygátszakadások. Hidrológiai Közlöny, 92. évf. 2. szám, 70–72.
- Nagy L. és Illés Zs. (2020): Völgyszárógáták földrengés biztos tervezésének fejlődése, Hidrológiai Közlöny, 100 évf. 2. szám, pp. 28-37.
- Nagy L. és Illés Zs. (2021): Földrengés hatására károsodott gátak, MHT Vándorgyűlés kiadványa.
- Seed HB. (1979): Consideration in earthquake-resistance design of earth and rock dams, Geotechnique 29, No.3, pp. 215-263, doi:10.1680/geot.1979.29.3.215.
- Seed HB., Idriss IM., Lee KL. és Makdisi FI. (1975): Dynamic analysis of the slide in the Lower San Fernando Dam during the earthquake of February 9, 1971. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 7. 651–688.
- Seed HB., Lee KL. és Idriss IM. (1969): Analysis of Sheffield Dam Failure. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 6. 1453–1490.
- The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan (2002): Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan. Japan.
- Zhang J.M., Yang Z., Gao X. and Zhang J. (2015): Geotechnical aspects and seismic damage of the 156-m high Zipingpu concrete-faced rockfill dam following the Ms8.0 Wenchuan earthquake, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 76. pp. 145–156.
- Tani, S., Yasunaka, M., Kawaguchi, N., Kamata, T. (1985): Report on the damage of small earth dams for irrigation by the 1983 Nihonkai-chubu earthquake, Technical Report of the National Research Institute of Agricultural Engineering. Series CE (Japan), ISSN : 0287-0029.
- Tani, S. (1993): Earthquake Damage to Fill Dams, International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/3icchge/3icchge-session03/4>.
- Tani, S. (1991): Consideration of Earthquake Damage to Earth Dam for Irrigation in Japan, Japán öntözési célú földrengés károk figyelembevétele, International Conference in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 1137-1144, St. Louis.
- Seed H.B. (1979): Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams. Géotechnique, 3. 215–263. doi:10.1680/geot.1979.29.3.215.
- Seed H.B., Idriss I.M., Lee K.L. és Makdisi F.I. (1975): Dynamic analysis of the slide in the Lower San Fernando Dam during the earthquake of February 9, 1971. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 7. 651–688.
- Seed H.B., Lee K.L. és Idriss I.M. (1969): Analysis of Sheffield Dam Failure. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 6. 1453–1490.
- Seed H.B. és Idriss I.M. (1982): Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute. Berkeley, California.
- Sherard JRJ, Woodward SF, Gizienski and Clevenger WA (1963): Earth and Earth-Rock Dams, John Willey and Sons, Inc., 156-170, New York.
- Manno-ike Irrigation Association (1929): Construction History of Manno-ike Dam, (japán nyelven)