

Felszínközeli geológiai szerkezetek vizsgálata 3-D analóg szeizmikus modellezéssel¹

ORMOS TAMÁS²

Az analóg szeizmikus modellezést az alkalmazott geofizikában különösen akkor használják, ha a geológiai szerkezetet szisztematikus vizsgálatnak nem vethetjük alá, ha ismételt mérésekre van szükség pl. különböző adatfeldolgozási módszerek tesztelésénél, ha olyan hatásokat kívánunk elkülönítetten vizsgálni, amelyek a normál méréseknél nem tisztán jelentkeznek, ha egy elméletet akarunk ellenőrizni, illetve ha a szeizmikus probléma numerikusan csak jelentős egyszerűsítésekkel, vagy egyáltalán nem lenne tárgyalható.

A dolgozat az analóg szeizmikus modellezést, és annak céljára a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén felépített berendezést ismerteti. Ezt követően egy háromdimenziós kétréteges sasbércmodell refrakciós mérésekkel történő kimutathatóságára végzett numerikus és 3-D analóg modellvizsgálatok eredményeiről számol be.

T. ORMOS: 3-D analogue seismic modelling in prospecting of nearsurface geological structures

Analogue seismic modelling in geophysical prospecting is especially applied when geological structures cannot be subjected to systematical investigations, or repeated measurements are required — for example for testing processing methods —, or the investigation of separated effects superposed in practice is needed. Besides these analogue seismic modelling can be an effective tool for checking theoretical assumption and for problems when seismic numerical modelling can only be done with significant restrictions or it cannot be done at all.

This paper reviews the basis and techniques of analogue seismic modelling, and describes the analogue modelling system developed at the Geophysical Department of the University of Miskolc. Then the results on numerical and 3-D analogue seismic refraction modelling for the detectability of upthrust with two layers are presented.

1. Bevezetés

Az analóg (vagy másképpen fizikai) szeizmikus modellezésen — modellszeizmikán — a kőzetösszetétel méretarányosan lekicsinyített „másán” végzett „szeizmikus” vizsgálatokat értjük.

Az analóg szeizmikus modellezést több évtizede alkalmazzák a rugalmas hullámok reflexiójának, refrakciójának, transzmissziójának, diffrakciójának, abszorpciójának tanulmányozására, mintegy összekötő kapocsként a „valódi” és numerikus-számítógépi szimulációs vizsgálatok között. Az alkalmazott geofizikában különösen akkor használják,

- ha a geológiai szerkezetet jellegénél fogva szisztematikus vizsgálatnak nem vethetjük alá;
- ha ismételt mérésekre van szükség pl. különböző adatfeldolgozási módszerek tesztelésénél;
- ha olyan hatásokat kívánunk elkülönítetten vizsgálni, amelyek a normál méréseknél nem tisztán jelentkeznek;
- ha egy elméletet akarunk ellenőrizni;
- ha a szeizmikus probléma numerikusan csak jelentős egyszerűsítésekkel, vagy egyáltalán

nem lenne tárgyalható [BEHRENS, DRESEN 1982].

A természet és modell kapcsolatát a modelltörvényekkel teremtjük meg [O'BRIEN, SYMES 1971; BEHRENS, WANIEK 1972]. Az alábbi összefüggések a legfontosabb és egyben a viszonylag legkönnyebben kezelhető paraméterek: a távolságok (pl. hullámút, rétegmélység, -vastagság, észlelési geometria stb.), periódusidők, frekvenciák, terjedési sebességek között teremtenek kapcsolatot.

$$S_V = V^m / V'; S_L = L^m / L'; S_T = T^m / T'; S_L = S_V \cdot S_T$$

ahol S_V , S_L , S_T a sebesség, hosszúság és idő skála-paramétereket; V^m , V' a hullámsebességeket; L^m , L' hosszúságokat (pl.: hullámhosszak); T^m , T' időket (pl. periódusidők) jelentik.

(Az m és t indexek a modellre, ill. a természetre utalnak, míg az L , T , V a hosszúságot, az időt és a sebességet jelöli.)

Látható, hogy a skála-paraméterek a természet és modell közti méretarányt fejezik ki, és egymástól függetlenül nem változtathatóak. A gyakorlatban háromdimenziós modellezés esetében az 1. táblázat szerinti természet—modell megfeleltetés ajánlható O'BRIEN és SYMES [1971] nyomán.

A kitézített feladatnak megfelelően három- (3-D) vagy kétdimenziós (2-D) modelleket kell készítenünk.

A kétdimenziós modellek 2—3 mm vastag lemezből készülnek, amelyek mintegy a kétdimenziós

¹ Beérkezett: 1995. április 26-án

² Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék, H- 3515 Miskolc, Egyetemváros

Mennyiség	Dimenzió	Skálaparaméter	A paraméter javasolt értéke
Tömeg	M	S_M	10^{-15}
Hosszúság	L	S_L	10^{-5}
Idő	T	S_T	10^{-5}
Sűrűség	ML^{-3}	$S_M S_L^{-3}$	0.5-3
Sebesség	LT^{-1}	$S_L S_T^{-1}$	1
Rugalmassági állandó	$ML^{-1}T^{-2}$	$S_M S_L^{-1} S_T^{-2}$	0.5-3
Poisson hányados	-	S_P	1
Jóssági tényező, Q	-	S_Q	0.2-100
Hullámhossz	L	S_L	10^{-5}
Frekvencia	T^{-1}	S_T^{-1}	10^5

1. táblázat. A skálaparaméterek értékei [O'BRIEN és SYMES 1971 nyomán]
 Table 1. Quantities of the scaling factors [after O'BRIEN and SYMES 1971]

földtani szerkezet metszetét képezik le. Ez esetben természetesen csak kétdimenziós hullámterjedés modellezhető, azonban „cserébe” a könnyű kezelhetőséget, módosíthatóságot, a földtani metszet mentén való hullámterjedés tanulmányozhatóságának lehetőségét kapjuk.

A háromdimenziós modellek segítségével tanulmányozhatjuk a legjobban a valósághoz közelítő hullámterjedést, viszont ezek a modellek legtöbbször igen nagy méretűek, nehezen kezelhetők, módosíthatók. Amennyiben a modellezendő földtani szituáció és feladat ezt megengedi egy vagy több közeget folyadék képviselhet, ekkor azonban a transzverzális hullámok és egyes hullámkonverziók tanulmányozásáról le kell mondanunk.

A modellek szilárd anyagául fémeket, műanyagokat használnak. A kőzetek változatosságához mérten a rendelkezésre álló, szóba jöhető modellanyagok (pl. alumínium, plexiüveg, bonamid stb.) nem túl széles választékát pl. kétkomponenses műgyantákhoz különböző mennyiségben hozzákevert fém-, kőzet-, kvarcliszt, gipszek, fogtechnikai anyagok bővíthetik.

A gyakorlatban az ultrahangos modellezési technika nyert széles körű alkalmazást. E módszerrel a „valódi” mérésekhez hasonló észlelési geometria mellett nagyfrekvenciájú ultrahangimpulzust bocsátunk modellünkbe, majd a választ villamos feszültséggé alakítva és azt felerősítve oszcilloszkópon tanulmányozzuk, illetve digitálisan rögzítjük a modell-szeizmogramot. Hullámforrásként és modellgeofonként legtöbbször megfelelően kialakított piezokerámiákat alkalmaznak [O'BRIEN, SYMES 1971; DRESEN 1969]. A modellezéshez szükséges ultrahang frekvenciája a 10 kHz—5 MHz tartományba esik. A modellmérés számítógép-vezérelt digitális laboratóriumi mérés technikát, a mérések feldolgozása a szeizmikus gyakorlatban használthoz igen hasonló, vagy azzal teljesen megegyező programcsomagok meglétét igényli.

A dolgozatban összefoglaljuk a modellépítéssel és műszerezettséggel kapcsolatos legfontosabb ismereteket és tapasztalatokat, ismertetjük a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén megvalósított modellszeizmikus mérőrendszert, végezetül egy 3-D sasbérc-

cel modellezhető földtani szerkezet refrakciós modellméréssel való kimutathatóságát vizsgáljuk meg, amellyel a rendszer működését is bemutatjuk.

2. Az analóg szeizmikus modellek konstrukciója

A bevezetőben megfogalmazott célok és feladatok teljesítésénél arra törekszünk, hogy a modelltörvények szem előtt tartásával a valóságot minél jobban megközelítő modellt építsünk. A tervezéskor a rendelkezésre álló műszerezettség paraméterei alapján elsősorban a modell méretének, valamint anyagának célszerű megválasztása nagyon fontos azért, hogy végül is a kívánt méréseket még megfelelő pontossággal elvégezhessük a lehető legkisebb modellméret mellett.

A modell méretének meghatározásában a tervezett modell bonyolultsága, az elérhető építési pontosság, a nemkívánatos hullámok (pl.: oldalreflexiók) kiküszöbölésének módja, az észlelés geometriájának (adók, vevők pozícionálásának) pontossága, a jelregisztrálás frekvenciatartománya és teljesítménye, a regisztrálás frekvenciatartománya (mintavételezés) és dinamikája játszanak fontos szerepet.

A tervezett modell méretarányának (skálaparaméterének) megfelelően a hosszúságok a valóságosnál hozzávetőlegesen 4—5 nagyságrenddel lesznek kisebbek (1. táblázat). Ezért elősorban bonyolultabb földtani struktúrák (pl. vékony rétegek, változó vastagságú összletek, erősen görbült felületek, vetők stb.) esetén megvizsgálándó az, hogy a skálaparaméter által megszabott méretarány mellett megfelelő pontossággal egyáltalán megépíthető-e. A problémát fordítva megközelítve tehát a modellépítés pontossága szabja meg a legkisebb földtani objektum modellméretét, a modell bonyolultsága pedig a teljes modell méretét. Egy megvalósított négyréteges modell méretei példaképpen a következők: skálaparaméter $S_L=12\ 000$; a legvékonyabb réteg 2,5 cm vastag; a modell horizontális mérete 120 cm, vastagsága 76 cm, amelyet megfelelően nagy méretű, vízzel telt kádba süllyesztettek [TATHAM et al. 1983]. 3-D to

mográfiai vizsgálatokhoz is hasonló méretű modelleket alkalmaztak [LO et al. 1988].

A modellvizsgálatok rendszerint a valós földtani környezet egy szűkebb térfogatára terjednek ki, ezért csak e térrész megépítése célszerű. Ez esetben a modell szélein olyan, a természetben nem létező „inhomogenitások” jönnek létre, amelyekről a hullámok visszaverődnek és/vagy diffrakciót szenvednek, aminek következtében a vizsgálatok eredményei zavartak, vagy kiértékelhetetlenek lesznek.

E nemkívánatos hullámbeérkezésektől elvben több módon is megszabadulhatunk. A legegyszerűbben akkor járunk el, ha olyan nagy méretűre építjük meg a modellt, hogy a széleiről, sarkairól jövő hullámok beérkezési ideje olyan nagy legyen, hogy a számunkra érdekes folyamatok ez ideig már befejeződjenek. E módszert követve a 3-D modellezésnél igen nagy méretű modelleket kell építenünk.

A következő lehetőség abban áll, hogy a modell széleihez érkező hullámokat lecsillapítjuk, így számottevő rugalmas energia nem képes annak belsejébe visszaverődni. E célra — amennyiben lehetséges — nyersgumival „tapasztják” be a modell felületét, vagy úgy alakítjuk ki azt, hogy azon az odaérkező hullámok szétszóródjanak [TATHAM et al. 1983; MEEKES, RIDDER 1986].

Végezetül, amennyiben olyan modellt építettünk, amelyik folyadékba merül, a „ható” ki-be mozgásával a „ható”-val és „ható” nélkül megmért szeizmogramok különbségének képzésével juthatunk a valóban csak a „ható”-tól függő modellszeizmikus csatornákhöz [LO et al. 1988].

Az analóg modelleken történő modellszeizmikus mérések geometriai elrendezése a „valós” észlelési rendszerekkel megegyezik, azzal a különbséggel, hogy célszerűen több csatornán történik egyidejűleg regisztrálás. Az észlelési geometriára is a modell hosszúság szerinti méretaránya vonatkozik. Eszerint, ha egy geofon pozíciójának pontosságára a valóságban kb. 0,1 m-t feltételezünk, ez a modellünkön kb. 0,01 mm nagyságrendbe eső pontosságú pozicionálást követelne meg, amely egy jó minőségű XY síkplotter felbontásának felel meg. A fent említett geometriai pontosság csak számítógép-vezérelt „manipulátorral” érhető el. [KOEK, FABER 1992; LO et al. 1988; MEEKES, RIDDER 1986].

Még az előzőnél is nehezebb az ultrahangforrásként és -vevőként alkalmazott piezokerámiák méretének megválasztása. A modelltörvények értelmében a modellgeofonként használt piezokerámiát tartalmazó vevő méretének is 0,01 mm-es nagyságrendbe kellene esnie. E nyilvánvalóan megvalósíthatatlan követelmény helyett legkisebb 1 mm átmérőjű vevőket alkalmaznak. Ez a skálaparaméter figyelembevételével 10—100 m átmérőjű „valódi geofonok”-nak felel meg [CHEN, MCMECHAN 1993; KOEK, FABER 1992].

Az adók és vevők méretével kapcsolatban a modell—valóság skálaparaméterétől való jelentős eltérést ma csak a modellek méretének növelésével csökkenthetjük. Ez azonban a korábban leírtak értelmében korlátokba ütközik. Ezért a szeizmikus modellmérések kiértékelése során az adók és vevők aránytalanul nagy méretéből adódó esetleges torzító hatásokkal számolnunk kell.

A rendelkezésre álló modellszeizmikus mérőberendezés egyes jellemzői is befolyásolhatják modellünk méretét. A hullámhosszak „méretarányának” meg kell egyeznie a modell méretarányával, hiszen a hullámhossz és a geológiai szerkezetek méretének viszonya a földtani kutatás szempontjából döntő jelentőségű. Ezért fontos kívánalom a gerjeszthető ultrahang frekvenciájának és amplitúdójának szabályozhatósága. A kívánalom teljesítésének nehézsége abban áll, hogy a digitális technika birtokában szinte tetszőlegesen előállítható villamos jelet nem könnyű alakhűen ultrahanggá alakítani és viszont. A rezgésforrásként és modellgeofonként széleskörűen alkalmazott piezokerámiák alakjának, méretének, mechanikai és elektromos csatolásának — igen munkaigényes — beállításával a kívánt jelalakot megközelítő hozhatunk létre. A 3-D modellezésben alkalmazott ultrahang frekvenciája többnyire 10 kHz—200 kHz frekvenciatartományban van [LO et al. 1988], azonban szükség lehet olykor akár 1,5 MHz alkalmazására is [KOEK, FABER 1992]. A sebességre vonatkozó skálaparaméter értékét egységnyinek feltételezve ez a távolságokra vonatkozó skálaparaméter — kb. 10^{-4} — értéke esetén 1—20 Hz, ill. 150 Hz-nek felel meg.

A modell anyagának kiválasztásakor a bennük terjedő hullámok sebességei, Poisson-hányadosuk, akusztikus impedanciájuk játsszák a legfontosabb szerepet. Valamennyi paraméter tekintetében „hű” modellek készítéséhez korlátozott számban állnak rendelkezésre a kereskedelemben beszerezhető anyagok. A legelterjedtebben alumíniumot, acélt, plexit, gipszet, műgyantákat használnak e célra. [O'BRIEN, SYMES 1971; FREYSTÄTTER, DRESEN 1977].

Amennyiben a modellépítés olyan anyag felhasználását igényli, amelyek „készen” nem kaphatók, a kutatónak magának kell azt előállítania. A legelterjedtebb módszer az, hogy különböző sebességű, sűrűségű és különböző szemnagyságúra őrölt anyagot valamilyen kötőanyaggal szilárdítunk. A különböző komponensek fajtája és aránya szabja meg a modellanyag szeizmikus szempontból lényeges paramétereit. Kötőanyagként a leggyakrabban kétkomponenses műgyantákat (epoxi, araldit stb.) alkalmaznak. Töltőanyagként fém- és közetpor, apró kerámiagömbök (ballontini), gumi stb. szerepelhetnek [SHAMINA 1965; ORMOS 1983; DRESEN et al. 1985; MEEKES, RIDDER 1986]. A kötő- és töltőanyagok tulajdonságától, valamint a keverési aránytól függően megbecsülhetők a „kompozit” anyag rugalmas sajátságai [MEEKES, RIDDER 1986].

A 3-D technikában modellanyagként igen gyakran használnak folyadékot vagy különböző géleket. A már említett hátrányuk mellett alkalmazásuknak előnye is van, mert az ultrahang adók és vevők „csatolása” a modellhez lényegesen egyszerűbb, megbízhatóbb és könnyebben reprodukálható. Ezáltal nyílik lehetőség a megfelelően pontos számítógépi pozicionálásra is. A folyadék alkalmazásának további előnye az, hogy a modell belsejében is van módunk mérések (pl. VSP) végzésére [TATHAM et al. 1983; MEEKES, RIDDER 1986; LO et al. 1988; CHEN, MCMECHAN 1993].

3. Az analóg szeizmikus modellező rendszer

A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének szeizmikus analóg modellező rendszerének megépítései elsősorban a Ruhr-Universität Bochum Geofizikai Intézetében szerzett tapasztalatokra támaszkodtunk egyéb források mellett [BEHRENS, DRESEN 1982; ORMOS 1983; MEISTER, DRESEN 1987; LO et al. 1988].

A szeizmikus modellező berendezés műszer-együttese egy a villamos jelet előállító függvénygenerátorból, teljesítményerősítő(k)ből, ultrahang forrásokból, ultrahang vevőkből, előerősítőkből, szűrőkből, analóg—digitális átalakítókból, valamint vezérlő—adatgyűjtő számítógépből épül fel (1. ábra). A rendszer szerves részei a vezérléshez, illetve a mérési adatgyűjtéshez és feldolgozáshoz szükséges speciális számítógépi programok.

A rendszer „központja” egy laboratóriumi számítógép (Hewlett-Packard 9000/217), amely a mérőműszerek vezérlésére nemzetközileg elterjedten alkalmazott szabványos párhuzamos interface-szel rendelkezik (IEEE 488 / HP-IB). E számítógép segítségével végezzük a mérőrendszer vezérlését, olvaszuk be a mért szeizmikus csatornákat (és egyéb be-

állított mérési paramétereket) a digitális oszcilloszkópról, végezzük el a szükséges számítások egy részét (pl. időbeni szűrés, időablakok alkalmazása, amplitúdó- és fázisspektrumok, a rendszer átviteli tulajdonságai, visszacsatolás stb.), nagy teljesítményű munkaállomásokra (IBM, SUN) továbbítjuk a mérési adatainkat további feldolgozás céljából.

A modellszeizmikus berendezés egyik legfontosabb eleme a digitális programozható függvénygenerátor (1. ábra, Wavetek 275). E számítógép-vezérelt műszerrel széles frekvenciatartományon belül ($1,0 \cdot 10^{-5} - 1,2 \cdot 10^7$ Hz) tetszőleges analóg jelalakot lehet létrehozni. A készülék digitális memóriája maximum 8192 ponton megmintázott 12 bit (70 dB) felbontású adatsort képes fogadni a számítógépről, amelyet a trigger hatására az előre beállított mintavételi idővel (267 ns — 267 s) maximum 10 V feszültségamplitúdóval analóg jelként jelenít meg a kimenetén. A műszer alkalmazása lehetővé teszi az ultrahang adók, ill. vevők valamint a további műszerek saját folyamatainak figyelembe vételét és visszacsatolás útján való korrekcióját [MEISTER, DRESEN 1987].

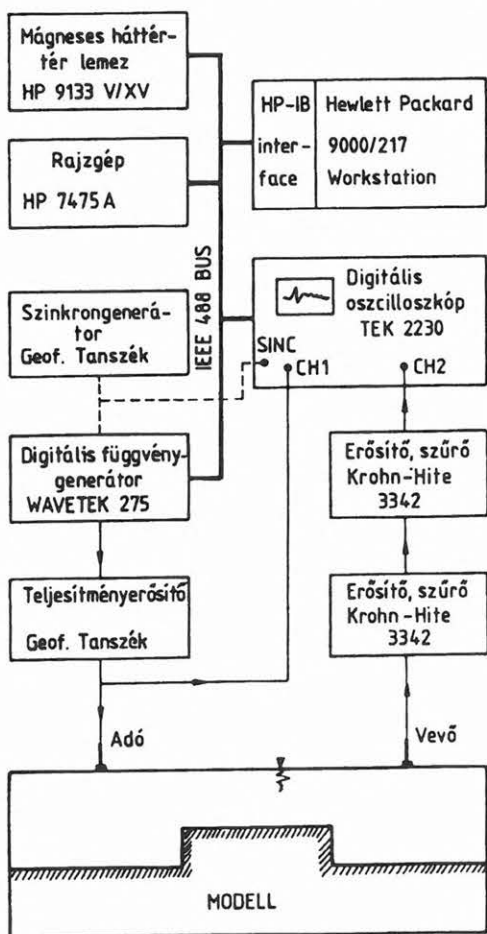
A megfelelő energiájú ultrahang hullámok gerjesztéséhez speciális szélessávú nagyfrekvenciás teljesítményerősítőre van szükség (1. ábra). A teljesítményerősítőt a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén készítettük, amely tervezésénél a szeizmikus modellezés mellett ultrahangos anyagvizsgálat lehetőségeit is szem előtt tartottuk. (frekvenciasáv $1,0 \cdot 10^3 - 5,0 \cdot 10^6$ Hz, maximális kimenő feszültség 80 Vpp).

A modellről visszaérkezett a modellgeofon által villamos feszültségváltozássá alakított kicsiny és nagyon gyakran „zajos” jelek szelektív erősítésére és szűrésére Krohn—Hite 3342 típusú analóg szűrő—erősítő műszereket alkalmazunk (max. erősítés 80 dB, max. frekvencia 10^5 Hz).

A felerősített és a feladatnak megfelelően szűrt jelsorozat egy digitális kétcsatornás számítógép-vezérelt 100 MHz-es oszcilloszkóppal (1. ábra, Tektronix 2230) regisztráljuk. Digitális memóriája max. 4096 mintából álló jelsorozatot fogad 8 bit (48 dB) felbontással. Fontos „szolgáltatása” az automatikus összegzés, ill. átlagolás, amelyre az ultrahang frekvenciatartományába eső nagy amplitúdójú rádiófrekvenciás kvázi véletlen zajok amplitúdójának csökkentése miatt van szükség.

A modellező berendezés időbeli vezérlését egy, a Geofizikai Tanszéken készült szinkrongenerátor látja el (1. ábra), amellyel változtatható szélességű 300 V feszültségű impulzus is előállítható.

A szeizmikus modellező rendszer irányítását végző számítógépi programok a számítógép és a mérőműszer „interface”-einek a speciális mérési feladatoknak megfelelő „szoftver”-összekapcsolását végzik el, amellyel a műszerek egyes kiválasztott mérési paraméterei változtathatók a számítógépről, valamint a kiadandó és mért jelek és szeizmogramok „olvashatók át” a számítógépből a műszerbe és viszont. A szeizmogramok a további feldolgozás céljaira SEG-Y formátumban állnak rendelkezésre.



1. ábra. A Geofizikai Tanszék szeizmikus analóg modellező rendszerének felépítése

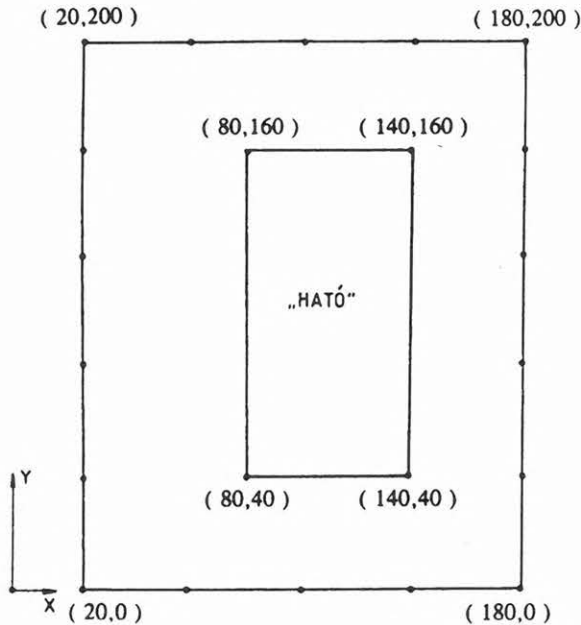
Fig. 1. Block diagram of the seismic analogue modelling system at the Department of Geophysics

4. Sasbérc kimutathatóságának vizsgálata refrakciós módszerrel

A mérnökgeofizikai gyakorlatban többször előfordul, hogy olyan térrész kutatása a feladat, amely felett nincs módunk geofizikai méréseket végezni (pl.: épületek, zagytárolók stb.). Az analóg modellezés adta lehetőségekre építve annak az esetnek megvizsgálását tűztük ki célul, miként mutatható ki egy nagy sebességű aljzat lokális kiemelkedése — sasbérc („ható”) — refrakciós módszerrel.

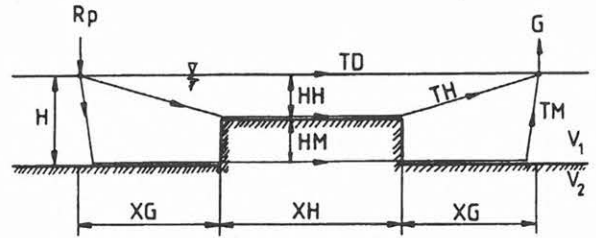
Vizsgálatainkhoz olyan, két közegből álló modellt készítettünk el, amelyben az aljzatot plexivel, a fedőösszletet vízzel modelleztük. A sasbércet egy, az aljzatával megegyező anyagú plexi hasábbal modelleztük, amely a modelltől eltávolítható.

A „felszíni” szeizmikus modellméréseket egy, a sasbércet körülfogó téglalap alakú keret mentén végeztük el úgy, hogy mind a rezgésforrások, mind a modellgeofonok e kereten helyezkedjenek el. (A geometriát egy későbbi tomográfiai feldolgozás céljából választottuk, amely nem e cikk tárgya.) 2. ábrán a sasbérc „ható” és a mérőkeret egymáshoz viszonyított helyzetét és méretét ábrázoltuk a sarokpontok koordinátaival együtt.



2. ábra. A sasbérc és a szeizmikus modellmérések helyei felülnézetben a sarokpontok X,Y koordinátaival
Fig. 2. Top view of the upthrust and of the actual layout of the measurements with X, Y coordinates of the edges

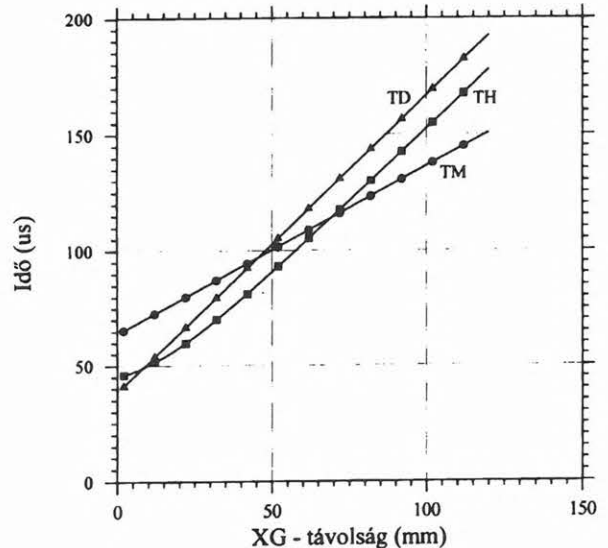
Az észlelési geometria (a mérőkeret méretei) helyes megválasztása igen fontos, hiszen arra kell törekednünk hogy, a sasbérc „ható” méreteitől és a sebességektől függően az első hullámbeérkezések túlnyomó többsége a sasbérctől származzon. A tervezéshez az egyszerűség kedvéért kétdimenziós modellt választottunk, amely a vizsgált 3-D modell egy metszetének tekinthető (3. ábra). A 2-D modellben három hullámfajta út-idő függvényeit vizsgáltuk. Az R_p rezgésforrás és G modellgeofon közötti közvet-



3. ábra. A sasbérc 2-D metszete és a hullámutak
Fig. 3. 2-D section of the upthrust and wave-path

len hullám TD , a sasbérctől refraktált hullám TH , és az aljzatról refraktált hullám TM terjedési időit számítottuk ki a sasbérc „szélétől” mért XG távolság függvényében. Az egyszerűség kedvéért a rezgésforrást ugyancsak XG távolságra helyeztük el a sasbérc szemközti oldalélétől számítva (3. ábra). A fedőösszlet vastagságát az aljzat felett H -val, a sasbérc felett HH -val, a sasbérc kiemelkedésének magasságát HM -mel, a longitudinális hullámsebességeket V_1 -gyel, ill. V_2 -vel jelöljük.

A három hullámra vonatkozó menetidőgörbéket a 4. ábrán mutatjuk be, amelyeket a modell alábbi paramétereit mellett számoltunk ki: $XH = 40$ mm, $H = 40$ mm, $HH = 20$ mm, $V_1 = 1560$ m/s, $V_2 = 2770$ m/s. Az ábráról látható, hogy a „ható” élétől számítva létezik egy szakasz, amelyen belül a sasbérctől származó hullámok érkezik be a leghamarabb. A „ható”-hoz közel eső szakaszon a közvetlen hullám, míg a távol eső szakaszon az aljzatról érkező refraktált hullám előzi meg a „ható”-ról származót. A méréseket tehát úgy kell megterveznünk, hogy mind a rezgésforrások, mind a geofonok e szakaszra essenek, amely helyzetét és szélességét számítjuk ki a modell paramétereinek függvényében a következőkben. A



4. ábra. A közvetlen hullám (●), az aljzatról származó refrakció (▲), és a sasbérc felszínéről származó hullámok beérkezéseinek út-idő függvényei. ($XH = 60$ mm)
Fig. 4. Travel time curves of the direct waves (●), the refracted waves from the basement (▲), and the refracted waves from the upthrust (■). ($XH = 60$ mm)

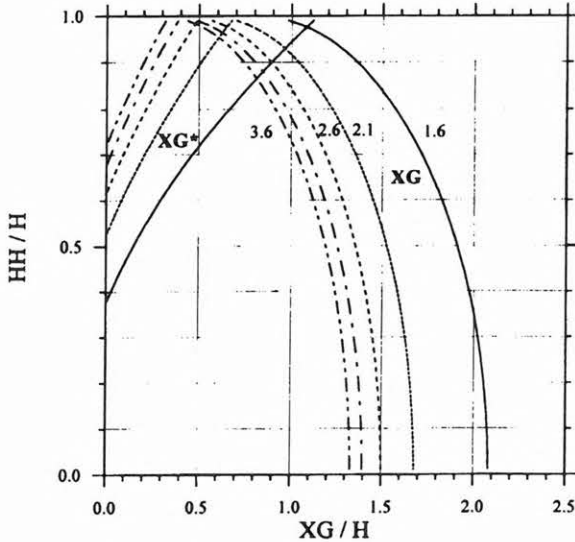
3. ábra jelöléseit használva az aljzatról refraktált és a sasbérc felszínéről érkező hullámok út-idő függvényeinek metszéspontjának a sasbérc szélétől mért XG távolságát dimenziótlan formában a következő — egyszerű levezetéssel nyerhető — összefüggésből számítjuk ki (a rezgéskeltés és az észlelés szimmetriáját továbbra is feltételezzük, 3. ábra):

$$\frac{XG}{H} = \frac{1 + V_2/V_1 \sqrt{1 - \left(\frac{HH}{H}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 - 1}}$$

A közvetlen és a sasbérc felszínéről érkező hullámok út-idő függvényeinek metszéspontja és a sasbérc széle között mért XG^* távolság az előzőhöz hasonlóan az alábbi dimenziótlan összefüggésből nyerhető:

$$\frac{XG^*}{H} = \frac{\left(\frac{HH}{H}\right)^2 - \left(\frac{XH}{2H}\right)^2 \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right)^2}{\frac{XH}{H} \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right)}$$

A fenti egyenletek segítségével megadható az a tartomány az $XG/H - HH/H$ síkon, amelyen belül kell a forrást és a geofont elhelyezni ahhoz, hogy a sasbérc felszínéről kapjunk első beérkezéseket. Egy $XH = 80$ mm szélességű sasbérc esetében különböző sebességarányok mellett mutatunk be görbeseregeket az 5. ábrán. Az azonos paraméterű XG és XG^* -vel jelölt függvények és a koordinátatengelyek zárják közre az imént említett tartományt.



5. ábra. Görbesereg azon tartomány meghatározásához, amelyen belül az első hullámbeérkezés a sasbérc felszínéről érkezik. A görbék paramétere a V_2/V_1 sebességviszony. ($XH=80$ mm)

Fig. 5. Set of curves for the determination of the range, within which the waves arrive from the upthrust at first. Parameter of curves is the ratio of velocities: V_2/V_1 . ($XH=80$ mm)

Az 5. ábra alapján megállapítható, hogy egy sasbérc „ható” felszínéről származó hullámok első beérkezésékként való detektálhatósága a sasbérc szélétől mért változó helyzetű és szélességű szakaszon lehetséges, amelyet a közvetlen és a sasbérc felszínéről érkező hullámok út-idő függvényeinek metszéspontjához tartozó távolság, valamint az aljzatról refraktált és a sasbérc felszínéről beérkező hullámok által hasonlóan kijelölt távolság zárja közre. E sáv szélessége a sasbérc szélesedésével nő, ha a sasbércet elfedő összlet vastagsága csökken (HH csökken) változatlan aljzattmélység esetén, valamint ha a V_2/V_1 sebességkontraszt csökken. Az iménti 2-D vizsgálatok eredményeinek alapján háromdimenziós mérések esetére becsülhető egy sasbérc körüli sáv helyzete és szélessége, amelyen belül kell a mérőkeretet elhelyezni. Az analóg szeizmikus modellméréseket a fentiek alapján tevezttük meg.

5. 3-D refrakciós modellszeizmikus mérések egy sasbérc kimutatására

A plexiből készült modellt egy kb. $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ alapterületű modellkádban helyeztük el. A sasbérc „ható” egy szintén plexiből készült téglatest modellezte, amely mérete $60\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ volt. A sasbérc helyét az aljzat felszínén megjelöltük, azért, hogy eltávolítása után mindig eredeti helyzetébe állíthassuk vissza. A fedőösszletet víz képviselte, amelynek aljzat feletti vastagsága 40 mm , a sasbérc felett 20 mm volt. A rezgésforrások és modellgeofonok pozicionálását kézi úton végeztük el egy, a modell felszínének közvetlen közelében a modellhez rögzített, mm beosztású keret segítségével. Ezen a kereten jelöltük ki a források és modellgeofonok helyeit egymástól 40 mm távolságra (2. ábra).

A modell rezgésforrást BaTi piezokerámia körlepkéből készítettük (átmérő 18 mm , vastagság 3 mm). A körlepkát — tengelyével a modell felszínével párhuzamosan — úgy állítottuk be, hogy az egy műanyagból készült körlepká (átmérő 5 mm) közvetítésével a modell felszínét érintette. Az ultrahangot a piezokerámiára vezetett 300 V nagyságú és $1\text{ }\mu\text{s}$ időtartamú pozitív feszültségimpulzussal állítottuk elő.

Modellgeofonként szintén BaTi piezokerámia anyagból készült körlepkát alkalmaztunk. Az 5 mm átmérőjű és 1 mm vastag lapkát tengelyével a modell felszínére merőlegesen helyeztük el úgy, hogy az a modell felszínét érintse.

A modellgeofonon észlelt jelet 3 kHz sarkfrekvenciájú felüláteresztő szűrőn vezettük át és erősítettük. Az A/D átalakítást végző digitális oszcilloszkópon beállított mintavételi idő $0,05\text{ }\mu\text{s}$ volt. A kvázi véletlen zajok elnyomására mindegyik csatornát 256 -szoros összegzéssel (átlagolással) regisztráltuk. A beérkezési idők széles tartományban való változását csatornánként különböző nagyságú időbeli digitális késleltetéssel kompenzáltuk a sűrű mintavételezés és a korlátozott csatornánkénti mintaszám miatt. Így valamennyi beérkezés a regisztrált 50 s csatornahosszra esett. (A késleltetési idők és az egyéb mérési paraméterek a csatornaadatokkal együtt feljegyzésre kerültek.)

tett egyenesek segítségével a fedőösszlet sebességére (víz) $V_1 = 1540$ m/s (korr.: 0,996), az aljzatéra (plexi) $V_2 = 2680$ m/s (korr.: 0,980) értékeket kaptunk, amelyek jól egyeznek az irodalmi adatokkal. A fenti sebességekből és az ordinátametszetből $H=38$ mm aljzatmélység adódik szemben a beállított 40 mm-el.

6. Összefoglalás

A dolgozatban röviden összefoglaltuk az analóg szeizmikus modellezésre vonatkozó legfontosabb ismereteket. Bemutattuk a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén megvalósított modellszeizmikus mérőrendszert. Numerikus vizsgálatok alapján megterveztünk egy későbbi tomográfiai kiértékelést lehetővé tevő refrakciós mérést egy kétréteges 3-D sasbérc „ható” kimutatására. A modellszeizmikus alkalmazott technikával egyértelműen eldönthető az, hogy a regisztrált első hullámbeérkezés a sasbérc „ható”-ról érkezett-e vagy sem.

Köszönetnyilvánítás

A szerző ezúton mond köszönetet az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA 2385) anyagi támogatásáért, és Dr. Dr. hc. Lothar DRESEN úrnak, a Ruhr Universität Bochum Geofizikai Intézete professzorának tapasztalatai átadásáért.

IRODALOM

BEHRENS J., WANIEK L. 1972: Modellseismik, Zeitschrift für Geophysik 38, 1-44
 BEHRENS J., DRESEN L. 1982: Zwei- und dreidimensionale analoge modellseismische Untersuchungen—Interpretationshilfe bei der Erkundung von Lagerstättenstrukturen. 2. Mintrop-Seminar, Bochum, Unikontakt 295-342
 CHEN H. W., MCMECHAN G. A., 1993: 3-D physical modeling and pseudospectral simulation of seis-

mic common-source data volumes. Geophysics 58, 121-133
 DRESEN L. 1969: Das Schwingungsverhalten modellseismischer Geber und das von ihnen erzeugte Wellenfeld in zweidimensionalen Modellen. Dissertation, Technische Universität Clausthal
 DRESEN L., KERNER C., KÜHBACH B. 1985: The influence of an asymmetry in the sequence rock/coal/rock on the propagation of Rayleigh seam waves. Geophysical Prospecting 33, 519-539
 FREYSTÄTTER S., DRESEN L., 1977: Ausbreitung von Rayleigh-Kanalwellen in Steinkohlenflözen — Modellseismische Untersuchungen. Journal of Geophysics 43, 807-828
 KOEK E. A., FABER G. 1992: Seismic modelling facility at Delft University. 54th EAEG Meeting Paris. Abstracts 128-129
 LO T. W., TOKSÖZ M. N., XU S. H., WU R. S., 1988: Ultrasonic laboratory tests of geophysical tomographic reconstruction. Geophysics 53, 947-956
 MEEKES J. A. C., RIDDER J. 1986: Seismic research applied to coal deposits in the Netherlands. TNO Institute of Applied Geoscience, Delft Rapport No. 0586-41
 MEISTER J., DRESEN L. 1987: Hybrid seismic modelling: A technique to combine physical and computer methods for vertical wave incidence. Geophysical Prospecting 35, 815-831
 O'BRIEN P. N. S., SYMES M. P. 1971: Model seismology, Reports on Progress in Physics 34, 697-764
 ORMOS T., 1983: Abschlußbericht über die Tätigkeit an der Ruhr-Universität Bochum am Institut für Geophysik, Arbeitsgruppe Seismik, Megbízó: Deutsche Forschungsgemeinschaft Bonn és a Magyar Tudományos Akadémia. Az.: UNG-113/19/0. Bochum
 SHAMINA O. G. 1965: A method of three-dimensional modelling of a wave-guide layer with solid media. Bull. (Izv.) Acad. Sci. USSR Earth Physics 3, 148-153
 TATHAM R. H., GOOLSBEE D.V., MASSELL W. F., NELSON H. R. 1983: Seismic shear-wave observations in a physical model experiment, Geophysics 48, 688-701