

**UNIVERSITA KARLOVA V PRAZE**

**Přírodovědecká Fakulta**

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky

---



---

**URČENÍ RYCHLOSTI SMYKOVÉ VLNY  
NA VZORCÍCH ZEMIN V TRIAXIÁLNÍM PŘÍSTROJI**

---

Diplomová práce

**Matěj Petružálek**

---

Vedoucí diplomové práce: **Doc. RNDr. Jan Vilhelm, CSc.**

Odborný konzultant: **Ing. Jan Boháč, CSc.**

Praha, září 2006

## **ABSTRAKT**

Tématem diplomové práce je určení rychlosti příčných vln prozařováním vzorků zemin v triaxiálním přístroji vybaveném piezokeramickými krystaly, tzv. bender elements. Pro určování rychlosti příčných vln se používá metodika měření a interpretace buď v časové, nebo ve frekvenční oblasti. Dosavadní zkušenosti však ukazují, že výsledné rychlosti určené oběma postupy se často liší, a to až do 40% procent. Vzhledem k tomu, že rychlost příčných vln je podkladem pro výpočet smykového modulu, je nejednoznačnost v jeho určení vážnou překážkou pro jeho využití. Moderní geotechnické analýzy a následné modelové výpočty ale stanovení smykového modulu odpovídajícího pružné deformaci vyžadují, a proto je této problematice v současnosti věnována zvýšená pozornost.

Náplní diplomové práce je analýza známých postupů měření rychlosti příčných vln, zhodnocení bender elements jako zdroje vlnění, návrh vlastní metodiky měření a jeho realizace na několika vzorcích zemin.

Pomocí experimentů s různou délkou vzorků a na základě modelování možných časů příchodů přímých a druhotných vln byly navrženy úpravy metodiky pro určení rychlosti příčných vln.

Měření realizovaná pomocí laserového interferometru dovolila identifikovat zpoždění pohybu vysílacího elementu za zdrojovým elektrickým napětím.

## **SUMMARY**

The subject of this thesis is the shear wave velocity determination in the triaxial apparatus by means of bender elements. The measurement and interpretation methods in time domain or frequency domain are usually used for determination of shear wave velocity. To-date experience indicates that velocities determined by both time domain and frequency domain methods often differ by up to 40%. Taking into account that shear wave velocity is used for evaluation of shear modulus, the uncertainty in its determination is a serious objection to its use. However modern geotechnical analyses require evaluation of the shear modulus corresponding to elastic deformation. Therefore this problem is a topical one.

This thesis aims are: analyses of previous procedures used for determination of shear wave velocity, evaluation of bender elements as a source of seismic waves, suggestion of a better procedure for shear wave velocity determination, demonstration of this procedure on some soil samples.

By experiments with different sample lengths and on the basis of modelling the straight waves and converted wave arrival times modifications of the procedure for shear wave velocity determination were proposed.

The measurements made by a laser interferometer allowed me to identify the time delay between the time of the source electric voltage and the onset of the bending of the transmitting element.

## OBSAH

1.	ÚVOD .....	1
2.	SOUČASNÝ STAV .....	2
2.1	Smykový modul a jeho měření pro geotechnické analýzy .....	2
2.2	Princip měření rychlosti smykových vln v triaxiálním přístroji pomocí BE .....	5
2.3	Měření a interpretace v časové oblasti .....	8
2.3.1	Obdélníkový impuls .....	11
2.3.2	Sinový impuls .....	12
2.3.3	Určení času průchodu smykové vlny na materiálech s větší tuhostí .....	14
2.4	Měření a interpretace ve frekvenční oblasti .....	15
2.4.1	Frekvenční analýza dat metody sinového pulsu .....	17
2.4.2	Technika fázově citlivé detekce (Phase sensitive detection technique) .....	18
2.4.3	Určení času průchodu metodou $\pi$ -bodů .....	18
2.4.4	Metoda sweepového vstupního signálu .....	19
2.5	Srovnání výsledků měření v časové a frekvenční oblasti .....	20
3.	CHARAKTERISTIKA BE JAKO ZDROJE SEISMICKÝCH VLN .....	22
3.1	Mechanické chování BE-měření pomocí selfmonitoring elementu .....	22
3.2	Analýza BE s pomocí laserového interferometru .....	24
3.3	Shrnutí výsledků interferometrického měření .....	29
4.	ŠÍŘENÍ VLN GENEROVANÝCH BE VE VZORKU KONEČNÝCH ROZMĚRŮ .....	31
4.1	Stanovení časů šíření vybraných typů vln .....	33
4.2	Registrace příchozích vln .....	37
4.3	Vliv druhotných vln na interpretaci v časové oblasti .....	38
4.4	Vliv druhotných vln na interpretaci ve frekvenční oblasti .....	39
4.5	Návrh experimentálního uspořádání v případě existence druhotných vln .....	40

5.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	41
5.1	Měřicí systém a použitý materiál vzorků .....	41
5.2	Měření na suchém pískovém vzorku v plexisklové formičce .....	42
5.3	Měření na nasycených pískových vzorcích v triaxiální komoře .....	43
6.	ZPRACOVÁNÍ, VYHODNOCENÍ A INTERPRETACE .....	45
6.1	Zpracování, vyhodnocení a interpretace v časové oblasti.....	45
6.2	Zpracování, vyhodnocení a interpretace ve frekvenční oblasti.....	48
7.	VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE.....	50
7.1	Návrh úpravy metodiky měření pomocí BE .....	52
8.	ZÁVĚR.....	54
9.	PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY .....	55

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Smykový modul v závislosti na smykovém přetvoření (upraveno podle Atkinson 2000).....	3
Obr. 2.2 Náčrt umístění vzorku zeminy v triaxiální komoře .....	4
Obr. 2.3 Lokální snímače deformace nalepené na membráně testovaného vzorku (převzato z Atkinson 2000) .....	4
Obr. 2.4 Obecné schéma konstrukce BE-vysílač (převzato z Lings a Greening 2001) .....	6
Obr. 2.5 BE ukotvené v podstavách triaxiálního přístroje (převzato z Atkinson 2000) .....	6
Obr. 2.6 Schéma zapojení bender elements (upraveno podle Lings a Greening 2001) .....	6
Obr. 2.7 Schéma měřicího systému pro určení rychlosti smykové vlny v triaxiálním přístroji .....	7
Obr. 2.8 Vztah mezi časem průchodu a délkou vzorku (převzato z Viggiani a Atkinson 1995).....	8
Obr. 2.9 Analytické řešení pohybu částic v monitorovacím bodě generované příčným sinovým pulsem (podle Sanches-Salineru a kol. (1986) převzato z Jovicic a kol. (1996)) ..	9
Obr. 2.10 Overshooting při měření provedeném na poloskalní hornině - zdrojové napětí sestupná hrana obdélníkového pulsu (podle Jovicic a kol 1996) .....	10
Obr. 2.11 Typický výstupní signál generovaný náběžnou hranou obdélníkového pulsu na obrazovce osciloskopu (podle Viggiani a Atkinson 1995) .....	12
Obr. 2.12 Vliv poměru $R_d$ na registrovaný seismogram, časová osa je normalizovaná časem příchodu $T_d$ (převzato z Jovicic a kol. 1996).....	13
Obr. 2.13 Zjednodušení registrovaného seismogramu při použití modifikovaného sinového vstupního signálu (převzato z Jovicic a kol. 1996) .....	15
Obr. 2.14 Odečet času příchodu mezi adekvátními maximy nebo minimy vstupního a výstupního signálu (převzato z Jovicic a kol. 1996) .....	15
Obr. 2.15 Frekvenční interpretace signálů naměřených v časové oblasti (převzato z Viggiani a Atkinson 1995) .....	17
Obr. 2.16 Periodické fázové spektrum funkce vzájemné korelace vstupního a výstupního signálu (převzato z Greening, Nash 2004) .....	19

Obr. 2.17 Rozbalené fázové spektrum funkce vzájemné korelace z obrázku 2.16 s vloženými $\pi$ -body (křížky) naměřenými metodou $\pi$ -bodů na identickém vzorku za stejných podmínek (převzato z Greening a Nash 2004) .....	20
Obr. 3.1 Schéma-selfmonitoring element (podle Schultheiss (1982) v Greening a Nash (2004)).....	22
Obr. 3.2 Odezva vysílacího elementu (dole) na zdrojové elektrické napětí (nahore) (převzato z Jovicic a kol. (1996)).....	23
Obr. 3.3 Frekvenční a fázové spektrum funkce vzájemné korelace vstupního napětí a odezvy selfmonitoring elementu (převzato z Greening a Nash (2004)).....	24
Obr. 3.4 Schéma měření rychlosti pohybu vysílacího elementu laserovým interferometrem .....	24
Obr. 3.5 Závislost mezi vstupním elektrickým napětím a výstupním elektrickým napětím, které je úměrné rychlosti pohybu vysílacího elementu.....	25
Obr. 3.6 Amplitudová frekvenční charakteristika rychlosti pohybu vysílacího elementu (normováno).....	26
Obr. 3.7 Fázová frekvenční charakteristika rychlosti pohybu vysílacího elementu .....	27
Obr. 3.8 Odezva vysílacího elementu na vstupní signál tvaru sinového pulsu.....	28
Obr. 4.1 Vznik druhotných vln na seismickém rozhraní po dopadu podélné vlny .....	31
Obr. 4.2 Vznik čelné vlny na seismickém rozhraní .....	32
Obr. 4.3 Dráhy šíření některých seismických vln ve vzorku .....	33
Obr. 4.4 Vznik a šíření přeměněných odražených vln ve vzorku .....	34
Obr. 4.5. Vznik a šíření čelných vln ve vzorku v triaxiálním přístroji.....	36
Obr. 4.6 Čelná vlna šířící se po plexisklové stěně komory triaxiálního přístroje .....	37
Obr. 6.1 Synchronizované normované výstupní signály s identifikací některých registrovaných vln (měření na nasyceném vzorku písku o výšce 93,2 mm při efektivním napětí 100 kPa).....	46
Obr. 6.2 Interpretace frekvenčně-fázového grafu (měřeno na stejném vzorku jako obr. 6.1) .....	49

## SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Rozdíl v určení času průchodu mezi metodami časové a frekvenční oblasti.....	21
Tab. 6.1 Rychlosti materiálů pro výpočet času příchodu druhotných vln.....	47
Tab. 7.1 Vypočtené rychlosti a jejich relativní chyby pro měřené vzorky .....	51



## SEZNAM PŘÍLOH ZA TEXTOVOU ČÁSTÍ

PŘÍLOHA 1 - program *propickwin*

PŘÍLOHA 2 - program *casv\_prichodu*

PŘÍLOHA 3 - program *frekv\_analyza*

Tuto diplomovou práci jsem vypracoval na Ústavu Hydrogeologie, Inženýrské geologie a Užité geofyziky pod vedením Doc. Jana Vilhelma, CSc. Prohlašuji, že jsem ji vypracoval samostatně, použil pouze svá měření a převzaté prameny jsem řádně citoval. Souhlasím s jejím zapůjčením ke studijním účelům.

Práce vznikla za podpory projektu GAČR 103/04/0672 „*Mikromechanický a makromechanický popis chování geomateriálů*“ a projektu GAUK 236/2006 „*Závislost seismicky určeného příčného modulu zemin na měřítkovém faktoru*“.

Je mou milou povinností poděkovat mnohým, kteří mi při přípravě diplomové práce pomáhali. Zejména Doc. Janu Vilhelmovi, CSc., kterému děkuji za odborné vedení a pomoc během celého průběhu přípravy diplomové práce i za hodnotné připomínky při závěrečném zpracování textu, Ing. Janu Boháčovi, CSc. za vedení a pomoc při realizaci provedených experimentů a Prof. Johnu Atkinsonovi za uvedení do problematiky měření rychlosti příčných vln.

Dále bych chtěl touto cestou poděkovat Geofyzikálnímu ústavu AV ČR za možnost provedení interferometrických měření, Ing. Petru Jedličkovi za pomoc s jejich realizací a Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR za zapůjčení nábojového zesilovače.

Děkuji i všem ostatním zainteresovaným osobám, rodičům a všem přátelům, kteří také umožnili vznik této práce.

V Praze

10.9.2006

Matěj Petružálek

## 1. ÚVOD

Téma této diplomové práce se vztahuje k určování fyzikálních parametrů zemin v geotechnice. Konkrétně se jedná o určování příčného modulu zemin pomocí prozařování válcových vzorků zemin příčnou seismickou vlnou. Toto prozařování se děje v podmínkách řízené všesměrné a osově napjatosti, které jsou modelovány jednoosým zatěžovacím systémem a tlakovou komorou (v geotechnice označované jako triaxiální přístroj).

Prozařování horninových vzorků pomocí kompresních P-vln o ultrazvukových frekvencích je z hlediska geofyziky poměrně dobře zvládnutou technikou. Z hlediska geotechniky je ale podstatně významnější určování rychlosti příčných vln, protože to může být využito ke stanovení příčného modulu pružnosti a ten je jedním z významných vstupních parametrů pro modelové výpočty. Prozařování pomocí příčných vln však přináší komplikace v tom, že pokud se ve vzorku šíří současně s příčnou vlnou i vlna podélná, přichází příčná vlna v zadním vstupu. Vzhledem k omezeným rozměrům vzorku pak registrujeme složitou interferenční vlnu, a stanovení rychlosti průchodu příčné vlny se stává poměrně složitou úlohou. Ve srovnání s prozařováním horninových vzorků je situace dále komplikována výrazně vyšším útlumem seismického vlnění v zeminách.

V geotechnice se objevila řada postupů, které se snaží nalézt vhodný a provozně spolehlivý způsob měření rychlosti příčných vln. Za nejvýznamnější lze považovat zavedení speciálních piezokeramických zdrojů a přijímačů příčných vln – tzv. bender elements. Ty by měly zajistit, že zdroj bude generovat pouze příčné seismické vlny. Dále byla provedena řada studií zabývajících se vlivem různého časového průběhu vysílaného impulsu (délka, frekvence, tvar) na interpretovatelnost prošlého vlnění. Využíváno je i vysílání spojitého harmonického signálu v určitém intervalu frekvencí, případně vysílání delšího signálu obecného tvaru (sweep). Interpretace je realizována v časové i frekvenční oblasti. Dosavadní publikované výsledky však ukazují na nejednoznačnost použitých technik a výsledky určení rychlosti příčných vln na jednom materiálu se liší podle použité experimentální metodiky.

Cílem diplomové práce je experimentální ověření vlivu různých parametrů měření (geometrie, amplituda, frekvence) na výsledné registrované vlnové pole, vysvětlení pozorovaných rozdílů při použití různých metodik měření a návrh metodiky měření rychlosti příčných vln v triaxiálním přístroji.

## 2. SOUČASNÝ STAV

### 2.1 Smykový modul a jeho měření pro geotechnické analýzy

Jakékoli těleso reaguje na změnu zatížení tím, že se deformuje. Pokud se po odlehčení vrátí do původního stavu před zatížením, nazývá se tato deformace elastická (pružná, vratná). Vztah, který popisuje elastickou deformaci tělesa, se nazývá Hookův zákon. Většina materiálů se podle Hookova zákona chová do určitého zatížení, dokud napětí nedosáhne jisté meze. Tato mez se jmenuje mez úměrnosti. Po překročení meze úměrnosti dochází k nevratné deformaci materiálu, tato deformace se také nazývá anelastická. Zobecněný Hookův zákon pro izotropní elastické kontinuum:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \theta + 2G \varepsilon_{ij} , \quad (2.1)$$

kde  $\sigma_{ij}$  je tenzor napětí,  $\delta_{ij}$  je Kroneckerovo delta,  $\theta$  je relativní objemová deformace,  $\varepsilon_{ij}$  je tenzor relativní deformace,  $\lambda$  a  $G$  jsou Laméovy koeficienty. Koeficient  $G$  se nazývá smykový modul. Dále je místy v textu pojem smykový modul nahrazen pojmem tuhost (vhodný český ekvivalent anglického odborného termínu stiffness). Z Hookova zákona vyplývá, že smykový modul  $G$  vyjadřuje poměr smykového napětí ke smykovému přetvoření a lze jej považovat za odpor tělesa proti účinku smykové deformace. Parametr  $\lambda$  nemá žádný přímý fyzikální význam.

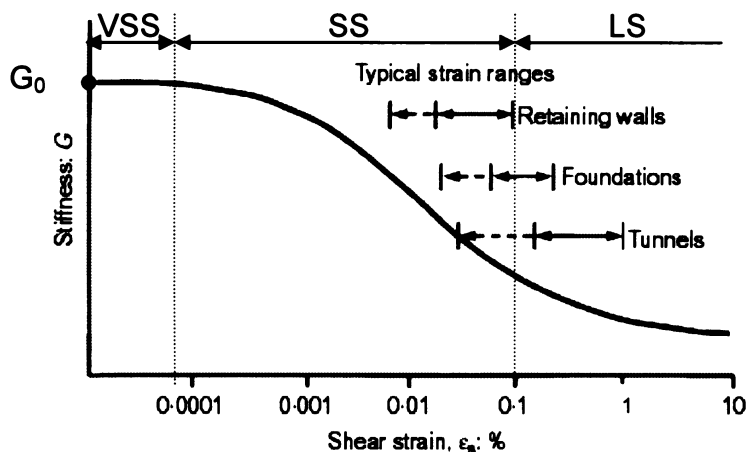
Pro charakterizaci zemin je běžné uvádět smykový modul jako jednu konstantní hodnotu. Tato hodnota se ale pro jednu a tutéž zeminu liší v závislosti na metodě použité pro určení smykového modulu.

Smykový modul určený z rychlosti seismických vln (dynamické zatížení) se nazývá v české literatuře seismický smykový modul (dynamický smykový modul). V zahraniční literatuře se vhodněji nazývá maximální smykový modul (viz obr. 2.1).

Jako smykový modul přetvárný (statický) je v české literatuře označován modul určený z měření deformace při statickém zatížení. Hodnota přetvárného modulu není v průběhu deformace konstantní, ale s rostoucí deformací klesá. Přes tuto zřejmou skutečnost je výsledkem použití statických metod pro určení smykového modulu konstantní hodnota přetvárného modulu. Velikost takto určeného přetvárného modulu je vždy menší než velikost maximálního smykového modulu.

Rozdíl ve velikosti smykových modulů, v závislosti na použité metodě pro jejich zjištění, vysvětlil ve své Rankinově přednášce Atkinson (2000). Velikost smykového modulu namáhané zeminy není konstantní, ale závisí na jejím stavu. Stav namáhané zeminy je možné popsat pomocí velikosti relativního smykového přetvoření, ke kterému během

namáhání dochází. Závislost smykového modulu (tuhosti) na relativní smykové deformaci je naznačena na obrázku 2.1 (dále křivka tuhosti).



**Obr. 2.1 Smykový modul v závislosti na smykovém přetvoření (upraveno podle Atkinson 2000)**  
*VSS-velmi malá přetvoření; SS-malá přetvoření; LS-velká přetvoření; G<sub>0</sub>-maximální smykový modul.*

Na obrázku 2.1 je osa relativních smykových přetvoření přibližně rozdělena na velmi malá přetvoření (VSS), malá přetvoření (SS) a velká přetvoření (LS).

V intervalu velmi malých přetvoření je smykový modul konstantní, nezávislý na velikosti přetvoření. Intervalu velmi malých přetvoření odpovídá smykový modul určený z rychlosti seismických vln. Tento smykový modul, který je nezávislý na velikosti přetvoření, se nazývá maximální smykový modul a značí  $G_0$  (obr. 2.1). To znamená, že zemina se při průchodu seismických vln přetváří lineárně. Deformace, způsobená průchodem příčné vlny, je vratná a lineární. Tento způsob lineárního přetváření bude v dalším textu nazýván elastickým přetvářením a odpovídající deformace elastickou deformací.

Při zkouškách se statickým zatížením odpovídají hodnoty měřených deformací malým a velkým přetvořením. V intervalu malých a velkých přetvoření smykový modul není konstantní, ale s rostoucím přetvořením jeho hodnota klesá. Jako přetvárný modul je označována konstantní hodnota smykového modulu určená nevhodnou interpretací statických zkoušek. Smykový modul totiž v tomto intervalu přetvoření není ani zdaleka konstantní (viz obr. 2.1).

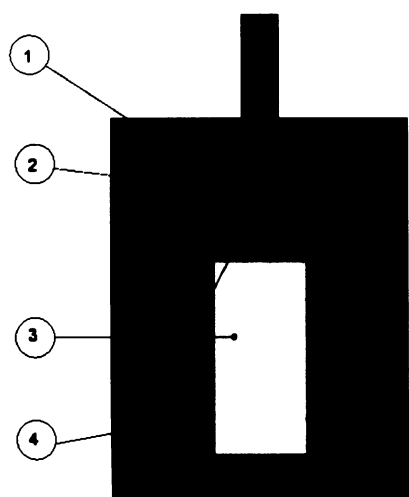
Maximální smykový modul  $G_0$  je důležitým parametrem dynamických geotechnických analýz sloužících k předpovědi chování zemin reagujících na dynamické zatížení, např.: zemětřesení, výbuchy, vibrace způsobené provozem strojů, vibrace způsobené dopravou.

Pokud se při řešení geotechnických úloh předpokládá statické zatížení zeminy, a pro zjednodušení se uvažuje konstantní smykový modul, je vhodné určit velikost smykového

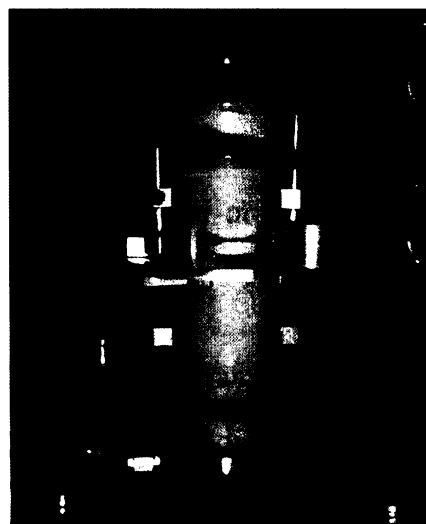
modulu z křivky tuhosti na základě velikosti předpokládané deformace. Na obrázku 2.1 jsou naznačeny typické intervaly relativních smykových přetvoření pro běžně řešené geotechnické úlohy.

Protože i při statickém zatížení dochází k přetvoření jehož velikost leží v intervalu středních a velmi malých přetvoření, je i pro popis chování zemin v režimu statického zatížení mnohem vhodnější použít celou křivku tuhosti než konstantní přetvárný smykový modul. Tento moderní přístup se začíná používat zejména při numerickém modelování předpovědi chování zatěžovaných zemin. Příkladem tohoto moderního přístupu je simulace chování masivu při stavbě tunelu Mrázovka v centru Prahy (Boháč a kol. 2002). Pro stanovení křivky tuhosti testované zeminy je nutné znát její chování na celé škále přetvoření, což znamená, že kromě statických metod testování zemin, určujících smykový modul v oblasti malých a velkých přetvoření, je nutné použít také dynamické metody testování zemin pro určení maximálního smykového modulu  $G_0$ .

Pro laboratorní určení tuhosti zemin v intervalu malých a velkých přetvoření se běžně používá takzvaný triaxiální přístroj (obr. 2.2) vybavený lokálními snímači deformací (obr. 2.3). Přesto, že se nejedná o pravý triaxiální přístroj, jak vyplývá z následujícího textu, bude dále tento přístroj takto nazýván, jak je běžné v odborné geotechnické literatuře.



(obr. 2)



(obr. 3)

**Obr. 2.2 Náčrt umístění vzorku zeminy v triaxiální komoře**

*1-triaxiální komora vyplněná vodou; 2-zatěžovací píst; 3-vzorek zeminy uzavřený v nepropustné membráně; 4-horní a dolní podstava triaxiálního přístroje;  $\sigma_R$ -všesměrné napětí v komoře;  $\sigma_V$ -vertikální axiální napětí působící na vzorek.*

**Obr. 2.3 Lokální snímače deformace nalepené na membráně testovaného vzorku (převzato z Atkinson 2000)**

V tomto přístroji je vzorek zeminy uzavřený v nepropustné membráně (obr. 2.3), která jej odděluje od komory vyplněné vodou. Membrána umožňuje vzorku zeminy deformovat se i

v radiálním směru. Pomocí tlaku vody v komoře je možné vystavit vzorek všesměrnému napětí. Horní podstava vzorku je zatížena pístem (deviátorové napětí), a to buď v režimu řízené síly, nebo řízené deformace. Pojem radiální napětí znamená všesměrné napětí působící ze všech stran na plášť válcového vzorku. Jako axiální napětí je označován součet deviátorového a všesměrného napětí. Zkoušený vzorek je tedy možné vystavit kombinaci radiálního a axiálního napětí. Vzorek zkoušené zeminy reaguje na změnu zatížení tak, že se deformuje. Tato deformace je měřitelná pomocí lokálních snímačů deformace (viz obr. 2.3) umístěných přímo na testovaném vzorku až do úrovně  $10^{-3}\%$  (Atkinson 2000), tj. do úrovně malých deformací. Z měření přírůstku deformace vzorku při známém přírůstku zatížení je možné určit smykový modul (proměnný s přetvořením) při malých a velkých přetvořeních.

Pro určení tuhosti v oblasti velmi malých přetvoření se využívá toho, že velikost maximálního smykového modulu  $G_0$  jednoduchým způsobem závisí na rychlosti šíření příčných (smykových) vln  $v_s$  a objemové hmotnosti  $\rho$ :

$$G_0 = \rho \cdot v_s^2 \quad (2.2).$$

Smykovému modulu  $G_0$ , určenému z rychlosti smykových vln, odpovídá velikost relativního smykového přetvoření menší než  $10^{-5}\%$  (podle Davik a Madshus 1985 v Viggiani a Atkinson 1995), což je v intervalu velmi malých přetvoření.

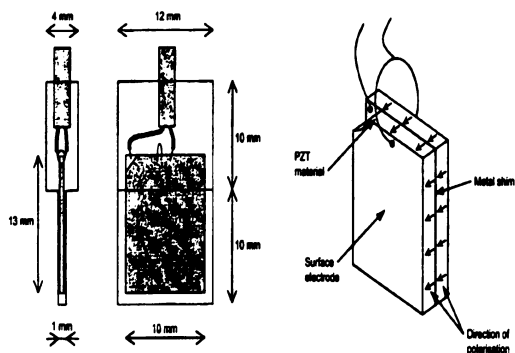
Pro určení rychlosti příčných vln na vzorcích zemin je nutné umístit do vzorku zdroj a snímač příčných vln. Jako vhodný zdroj a zároveň snímač tohoto typu vlnění se ukázaly piezokeramické krystaly, tzv. bender elements (dále BE). Triaxiální přístroj vybavený těmito piezokeramickými krystaly je tedy možné použít pro stanovení celé křivky tuhosti na jednom a tomtéž vzorku zeminy.

Křivka tuhosti by měla v blízké budoucnosti nahradit dnes často používaný zjednodušující přístup, založený na předpokladu konstantního přetvárného modulu, ve všech analýzách geotechnických konstrukcí.

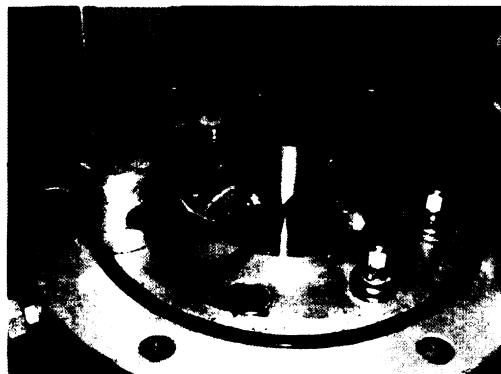
## 2.2 Princip měření rychlosti smykových vln v triaxiálním přístroji pomocí BE

Pro generování a zachycení smykových vln pomocí BE se využívá elektromechanických vlastností piezokeramických látek, které BE tvoří. Vysílač funguje jako transformátor elektrického napětí na mechanickou energii. Naopak přijímač mění mechanickou energii na měřitelné elektrické napětí. První použití BE pro určení rychlosti střížných vln je přisuzováno Shirley (1977), Shirley a Hampton (1978). Dnes je nejvíce rozšířená

konstrukce BE podle Dyvik a Madshus (1985). Na obrázku 2.4 je schéma konstrukce vysílacího BE.



(obr. 2.4)

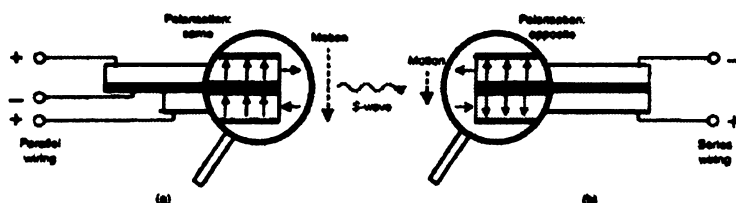


(obr. 2.5)

**Obr. 2.4** Obecné schéma konstrukce BE-vysílač (převzato z Lings a Greening 2001)

**Obr. 2.5** BE ukotvené v podstavách triaxiálního přístroje (převzato z Atkinson 2000)

Každý jeden element tvoří dvě tenké spojené destičky z piezokeramické hmoty. Po jejich stranách a mezi nimi jsou umístěny plošné elektrody, zapojené buď paralelně (vysílač), nebo do série (přijímač) (obr. 2.6).



**Obr. 2.6** Schéma zapojení bender elements (upraveno podle Lings a Greening 2001)

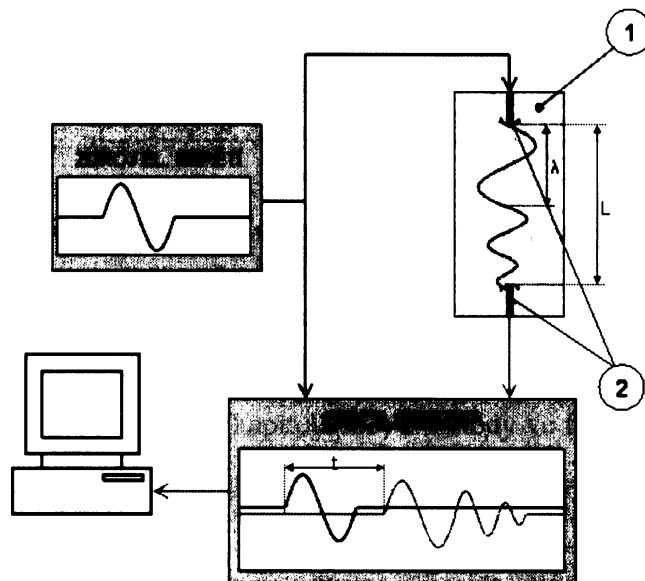
(a) vysílač; (b) přijímač; červeně plošné elektrody; šipky mezi nimi-směr polarizace.

Takto složené BE jsou zapouzdřeny v pryskyřičném obalu, který brání vodivému kontaktu mezi vlastními BE a okolním prostředím. BE jsou ukotveny v horní a dolní podstavě triaxiálního přístroje (obr. 2.5) tak, že po umístění vzorku mezi tyto podstavy do něj zasahují.

Na obrázku 2.7 je schéma celého měřicího systému. Zdrojem elektrického napětí může být pulsní generátor, funkční generátor nebo i zvuková karta počítače. Zdroj napětí generuje časově proměnné napětí (dále jen vstupní signál), které způsobuje ohýbání vysílacího elementu. Pohyb vysílacího elementu je zdrojem střížné vlny šířící se vzorkem. Po průchodu vzorkem způsobí střížná vlna ohýbání přijímacího elementu. Pohyb přijímacího



elementu generuje měřitelné napětí, jehož velikost je úměrná velikosti zrychlení pohybujícího se snímače. Časový průběh tohoto napětí (dále jen výstupní signál) je zesílen a zobrazen pomocí digitálního osciloskopu. Osciloskop zobrazuje jak vstupní tak i výstupní signál. Z obrazovky osciloskopu je možné odečíst čas průchodu střížné vlny, jak je naznačeno na obrázku 2.7. Spojení osciloskopu s počítačem umožňuje digitální záznam vstupního a výstupního signálu pro pozdější vyhodnocení.



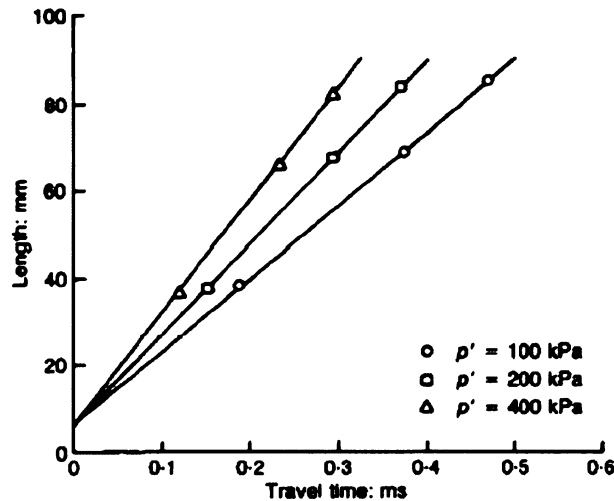
**Obr. 2.7** Schéma měřícího systému pro určení rychlosti smykové vlny v triaxiálním přístroji  
*1-vzorek testované zeminy; 2-bender elements; L-vzdálenost šíření;  $\lambda$ -vlnová délka; t-čas průchodu; osciloskop- modře vstupní a zeleně výstupní signál.*

Rychlost průchodu střížné vlny  $v_s$  se počítá podle vztahu:

$$v_s = \frac{L}{t}, \quad (2.3)$$

kde  $L$  je vzdálenost šíření a  $t$  je čas průchodu střížné vlny.

Vzdálenost šíření střížné vlny  $L$  odpovídá podle Viggiani a Atkinsona (1995) vzdálenosti volných konců BE (naznačeno na obr. 2.2 a obr. 2.7). Jejich tvrzení vychází z obrázku 2.8. Na obrázku 2.8 je graf měření časů průchodu na vzorcích o třech různých délkách. Závislost času průchodu na délce vzorku je lineární. Průsečík všech tří přímků pro tři různá všesměrná napětí s osou délek vzorku odpovídá součtu do vzorku přechínajících částí elementů (6 mm).



Obr. 2.8 Vztah mezi časem průchodu a délkou vzorku (převzato z Viggiani a Atkinson 1995)

Snaha o nalezení jednoznačného procesu určení času průchodu střížné vlny a jeho automatizaci vedla k hledání různých postupů měření a interpretace, které se dají obecně rozdělit na metody v časové oblasti (kapitola 2.3) a metody ve frekvenční oblasti (kapitola 2.4).

### 2.3 Měření a interpretace v časové oblasti

Termín měření času průchodu střížné vlny v časové oblasti označuje proces, při kterém je nejprve nalezen čas vzniku střížné vlny a čas jejího příchodu. Čas vzniku střížné vlny je odečítán ze vstupního signálu. Čas příchodu je odečítán z výstupního signálu. Čas průchodu střížné vlny vzorkem získáme jako rozdíl těchto dvou odečtených časů (naznačeno na obrázku 2.7).

Čas vzniku příčné vlny je určován v místě prvního nasazení vstupního signálu a nemusí být totožný s okamžikem přivedení budícího elektrického napětí. Výsledkem měření, kdy je vysílací element v přímém kontaktu s přijímacím elementem, lze určit celkové zpoždění měřicího systému. Takto určené zpoždění měřicího systému je v řádu jednotek mikrosekund a je pravděpodobně způsobeno polarizací vysílacího elementu. Vzhledem k tomu, že časy průchodu měřené na nejkratších vzorcích (délka 76 mm) jsou v řádu stovek mikrosekund, zpoždění měřicího systému se zanedbává.

Vysílací element generuje jak příčnou (smykovou) vlnu, tak i podélnou (kompresní) elastickou vlnu. Podélná vlna má větší rychlost šíření než vlna příčná. Na rozhraní vzorku navíc vznikají vlny odražené, přeměněné a lomené, které se na části své dráhy mohou šířit rychlostí větší než je rychlost střížných vln v zemině. Potom tedy přímo se šířící střížná

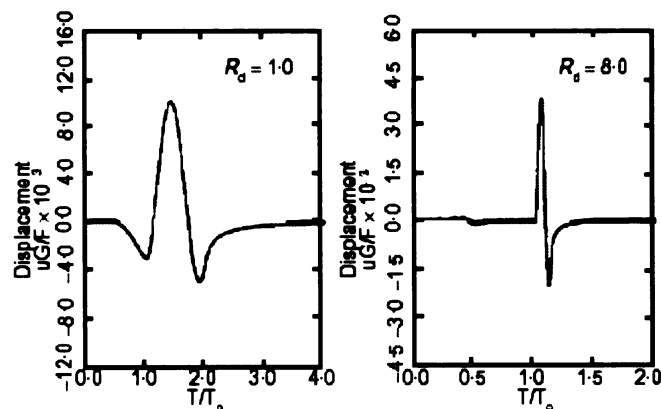
vlna nemusí přicházet v prvním nasazení. Z důvodu krátké vzdálenosti šíření (běžně 76 mm) a malého průměru vzorku (běžně 36 mm) nedochází mezi postupným registrováním jednotlivých vln k jejich ztlumení, a tak registrujeme složitou interferenční vlnu. Proto je hledání nasazení střížné vlny v zadních vstupech výstupního signálu obtížné a nejednoznačné.

Zjednodušení výstupního seismogramu lze dosáhnout vhodnou volbou vstupního signálu, zejména s ohledem na frekvenční spektrum generované smykové vlny (ve vztahu k rychlosti šíření příčné vlny a rozměrům vzorku). V závislosti na frekvenčním spektru vstupního signálu dochází ke dvěma jevům, které výrazně znesnadňují nalezení času příchodu střížné vlny ve výstupním seismogramu. Tyto jevy jsou v literatuře nazývány ‘efekt blízké zóny’ (near field effect) podle Sanches-Salineru a kol. (1986) v Jovicic (1997) a ‘overshooting’ podle Jovicic a kol. (1996).

Na základě práce Sanches-Salineru a kol. (1986) je jako efekt blízké zóny v odborné literatuře (Viggiani a Atkinson (1995), Jovicic a kol. (1996), Greening a Nash (2004),...) označován jev, kdy dochází k registraci přímých vln, tlumících se velmi rychle se vzdáleností šíření, před registrací hledané přímo se šířící střížné vlny. Tyto vlny se šíří rychlostí podélných vln. Vliv tohoto jevu na registrovaný seismogram vyjádřili Sanches-Salineru a kol. (1986) pomocí poměru  $R_d$  definovaného vztahem:

$$R_d = \frac{L}{\lambda} = \frac{L \cdot f}{v_s}, \quad (2.4)$$

kde  $L$  je vzdálenost šíření,  $\lambda$ ,  $f$ ,  $v_s$  jsou parametry procházející střížné vlny-vlnová délka, frekvence a rychlost. Závislost registrovaného seismogramu na poměru  $R_d$  je zachycena na obrázku 2.9.

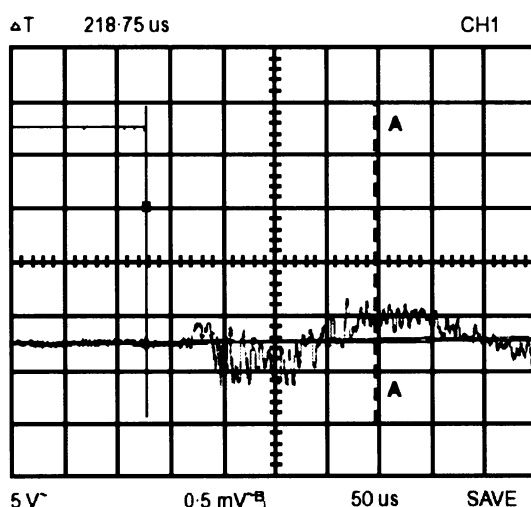


Obr. 2.9 Analytické řešení pohybu částic v monitorovacím bodě generované příčným sinovým pulsem (podle Sanches-Salineru a kol. (1986) převzato z Jovicic a kol. (1996))  
Časová osa normovaná časem příchodu příčné vlny  $T_a$ .

Na obrázku 2.9 je vliv efektu blízké zóny zřetelný pro výstupní signál s  $R_d = 1$ , kdy příchodu smykové vlny neodpovídá místo prvního nasazení na výstupním signálu. Vliv efektu blízké zóny na výstupní signál s poměrem  $R_d = 8$  je zanedbatelný.

Při měření v triaxiálním přístroji je výška vzorku zeminy a tím i vzdálenost šíření  $L$  pevně daná. Rychlost střížné vlny  $v_s$  závisí na testované zemině a napět'ovém režimu v triaxiálním přístroji. Pro vyčíslení poměru  $R_d$  je třeba ji odhadnout. Jediný parametr, který je tedy možné měnit pro ovlivnění velikosti poměru  $R_d$ , je frekvenční obsah procházející střížné vlny, který přibližně odpovídá frekvenčnímu spektru vstupního signálu.

Výsledkem jevu nazývaného overshooting je znečitelnění výstupního seismogramu. Odečtení času příchodu smykové vlny (není v prvním nasazení výstupního signálu) ze seismogramu ovlivněného tímto jevem je nemožné. Overshooting se vyskytuje na seismogramech, když spektrum vstupního signálu obsahuje vyšší frekvenční komponenty. Velikost frekvence, při které dochází k tomuto jevu, klesá s rostoucí tuhostí zkoušeného materiálu. Na obrázku 2.10 je ilustrován vliv overshootingu na výstupní seismogram. Vstupním signálem byla v tomto případě sestupná hrana obdélníkového pulsu, jejíž spektrum obsahuje vždy vysokofrekvenční komponentu. Na obrázku 2.11 je odezva na stejný vstupní signál neovlivněná overshootingem. V případě obrázku 2.10 byla testovaným materiálem poloskalní hornina (Jovicic a kol. 1996) s výrazně vyšší tuhostí než rekonstituovaný jíl v případě obrázku 2.11 (Viggiani a Atkinson 1995).



**Obr. 2.10 Overshooting při měření provedeném na poloskalní hornině - zdrojové napětí sestupná hrana obdélníkového pulsu (podle Jovicic a kol 1996)**

Abychom se vyhnuli problémům se zkreslením signálu výše popsányi efekty, je třeba použít vhodně zvoleného vstupního signálu, tj. s takovým frekvenčním obsahem, aby

nedocházelo k overshootingu a vliv efektu blízké zóny byl minimální. Přibližný frekvenční rozsah použitelný pro měření v triaxiálním přístroji je 1-20 kHz. Jak spodní hranice (efekt blízké zóny) tak horní hranice (overshooting) je závislá na tuhosti testované vzorku.

V časové oblasti se používá několik metod měření času průchodu příčné vlny, které se dají rozdělit podle tvaru vstupního signálu. Stručná charakteristika těchto metod je uvedena v následujících podkapitolách.

### 2.3.1 Obdélníkový impuls

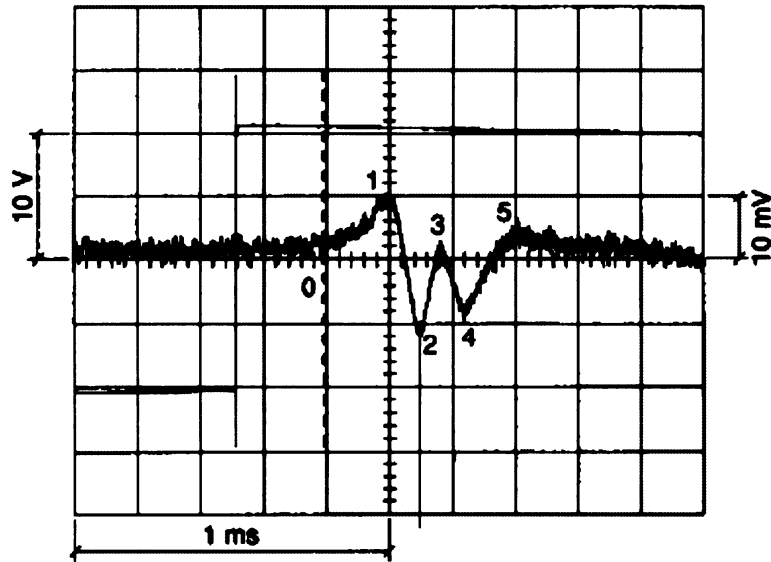
V této metodě je vstupním signálem obdélníkový impuls, který je generován většinou pulsním generátorem. Délka obdélníkového impulsu je volena tak, aby mezi náběžnou a sestupnou hranou došlo k úplnému ztlumení výstupního signálu. Skok budícího elektrického napětí hrany pravoúhlého impulsu je běžně v intervalu 5-20V. Okamžik vzniku střížné vlny je ztotožňován s jednou z hran obdélníkového impulsu podle toho, která je právě uvažována jako zdroj zaregistrované střížné vlny.

Typický výstupní signál buzený náběžnou hranou obdélníkového impulsu je na obrázku 2.11. Než byly publikovány práce Viggiani a Atkinson (1995) a Jovicic a kol. (1996), bylo běžně používáno buzení střížné vlny náběžnou nebo sestupnou hranou obdélníkového pulsu. Čas příchodu byl pokládán do místa prvního nasazení výstupního signálu, které odpovídá bodu 0 na obrázku 2.11.

Viggiani a Atkinson (1995) a Jovicic a kol. (1996) provedli na základě teoretických předpokladů z práce Sanches-Salineru a kol. (1986) měření, jejichž vstupním signálem byl sinový puls. Z porovnání času průchodu určených z těchto měření a výstupním signálem obdélníkového impulsu vyplývá, že příchodu střížné vlny při použití obdélníkového impulsu odpovídá místo první inverze výstupního signálu (bod 1 na obrázku 2.11).

Registrovaný signál mezi prvním nasazením a první inverzí výstupního signálu (mezi body 0 a 1 na obrázku 2.11) vysvětlují Jovicic a kol. (1996) na základě práce Sanches-Salineru a kol. (1986) jako vliv měření v blízké zóně. Efekt blízké zóny je podle nich způsoben nízkofrekvenční komponentou, která je v širokém spektru náběžné hrany vždy obsažena.

Protože široké spektrum náběžné hrany obdélníkového impulsu obsahuje také vysokofrekvenční komponenty, je výstupní signál, v závislosti na tuhosti zkoušeného materiálu, náchylný k overshootingu (Jovicic a kol. 1996).

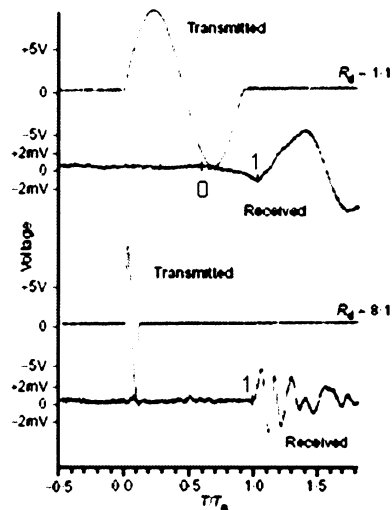


**Obr. 2.11** Typický výstupní signál generovaný náběžnou hranou obdélníkového pulsu na obrazovce osciloskopu (podle Viggiani a Atkinson 1995)

Pokud je tedy jako zdrojový signál používána náběžná hrana obdélníkového impulsu, je nutné při interpretaci výstupního seismogramu vědět, že času příchodu střížné vlny odpovídá místo první inverze výstupního signálu. Použití vstupního signálu tvaru obdélníkového impulsu je omezené tuhostí testovaného vzorku. Pokud je tato tuhost tak velká, že dochází k overshootingu, je výstupní signál z hlediska nalezení času příchodu smykové vlny neinterpretovatelný (viz obr. 2.10).

### 2.3.2 Sinový impuls

Vstupní signál ve tvaru sinového impulsu je zachycen na obrázku 2.12. Běžně používaná amplituda budícího elektrického napětí je 10V nebo 20V (peak to peak). Za čas vzniku střížné vlny je považováno první nasazení vstupního signálu. Hlavní výhodou buzení sinovým pulsem je, že jeho spektrum je, na rozdíl od spektra náběžné hrany obdélníkového pulsu, tvořeno převážně jednou frekvenční komponentou. Potom je tedy možné, na základě teoretických předpokladů (vztah 2.4) vycházejících z práce Sanches-Salineru a kol. (1986) v Jovicic a kol. (1996), minimalizovat efekt blízké zóny vhodnou volbou frekvence budícího sinového pulsu. Běžný frekvenční rozsah používaný při měření je 1-20 kHz.



**Obr. 2.12** Vliv poměru  $R_d$  na registrovaný seismogram, časová osa je normalizovaná časem příchodu  $T_d$  (převzato z Jovicic a kol. 1996)  
*0-vliv efektu blízké zóny; 1-příchod smykové vlny.*

Na obrázku 2.12 jsou zachyceny výstupní signály pro dvě vstupní frekvence 1,8 kHz ( $R_d = 1,1$ ) a 15 kHz ( $R_d = 8,1$ ) naměřené pomocí BE v triaxiálním přístroji na vzorku kaolínu. Výstupní signál pro poměr  $R_d = 1,1$  je v souladu s teoretickými předpoklady ovlivněn efektem blízké zóny, příchodu příčné vlny odpovídá místo první inverze výstupního signálu (bod 1 na obrázku 11). Zatímco na výstupním signálu pro poměr  $R_d = 8,1$  je efekt blízké zóny nepozorovatelný, příchodu příčné vlny odpovídá místo prvního nasazení výstupního signálu. Výsledky těchto experimentů (Jovicic a kol. 1996) spolu s výsledky měření Viggiani a Atkinson (1995) potvrdily teoretické předpoklady práce Sanches-Salineru a kol. (1986) pro určení rychlosti střížných vln v triaxiálním přístroji.

Volba vstupního signálu tvaru sinového pulsu, jehož spektrum je tvořené převážně jednou frekvenční komponentou, je výhodná také pro měření v materiálech s vyšší tuhostí. Je totiž možné volit frekvenci vstupního signálu tak, aby nedošlo k overshootingu.

Při měření času průchodu pomocí sinového pulsu se tedy volí vstupní frekvence tak, aby výstupní signál nebyl ovlivněn ani efektem blízké zóny ani overshootingem. V tomto případě představuje místo prvního nasazení výstupního signálu čas příchodu střížné vlny ( $R_d = 8,1$  na obrázku 2.12). Z důvodu overshootingu při vyšších vstupních frekvencích, který znemožňuje interpretaci výstupního signálu, je nutné měření na materiálech s větší tuhostí provádět v blízké zóně. Při měření v blízké zóně pak odpovídá času příchodu střížné vlny, stejně jako v případě obdélníkového impulsu, místo první inverze výstupního signálu ( $R_d = 1,1$  na obrázku 2.12). Pro zvýšení jistoty určení času příchodu je vhodné

provést měření na více frekvencích vstupního signálu. Takto určené časy průchodu pro několik různých frekvencí vstupního signálu by měly být stejné.

Podobnost tvaru vstupního a výstupního signálu vedla Viggiani a Atkinsona (1995) k použití funkce vzájemné korelace vstupního a výstupního signálu pro hledání času průchodu střížné vlny. Funkci vzájemné korelace  $CC_{xy}(t)$  lze vyjádřit vztahem:

$$CC_{xy}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T X(T) \cdot Y(T+t) dT, \quad (2.5)$$

kde  $T$  je délka integračního intervalu,  $X(T)$  vstupní signál,  $Y(T)$  výstupní signál a  $t$  velikost vzájemného posunu obou signálů.

Časový posun  $t$  absolutního maxima funkce vzájemné korelace vstupního a výstupního signálu představuje podle Viggiani a Atkinson (1995) hledaný čas průchodu střížné vlny. Použití funkce vzájemné korelace pak umožňuje automatizaci procesu určení rychlosti střížné vlny.

### 2.3.3 Určení času průchodu smykové vlny na materiálech s větší tuhostí

Pro zpřesnění měření na zeminách s velkou tuhostí, které je nutné realizovat v blízké zóně, protože při vyšších generovaných frekvencích dochází k overshootingu, uvádí Jovicic a kol. (1996) možnost srovnání časů příchodu získaných několika způsoby:

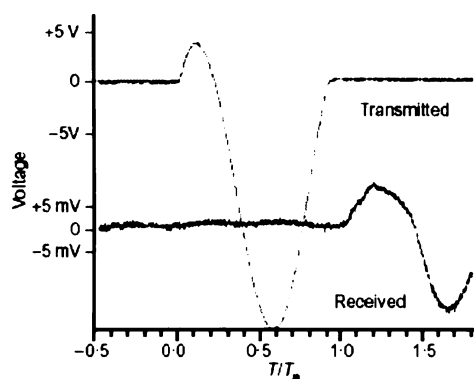
-první inverze sinového pulsu – měření v přítomnosti efektu blízké zóny (použití bodu 1 pro  $R_d=1,1$  podle obrázku 2.12)

-první nasazení deformovaného sinového pulsu – zmenšení vlivu blízké zóny na registrovaný seismogram deformací vstupního sinového pulsu (viz obr. 2.13)

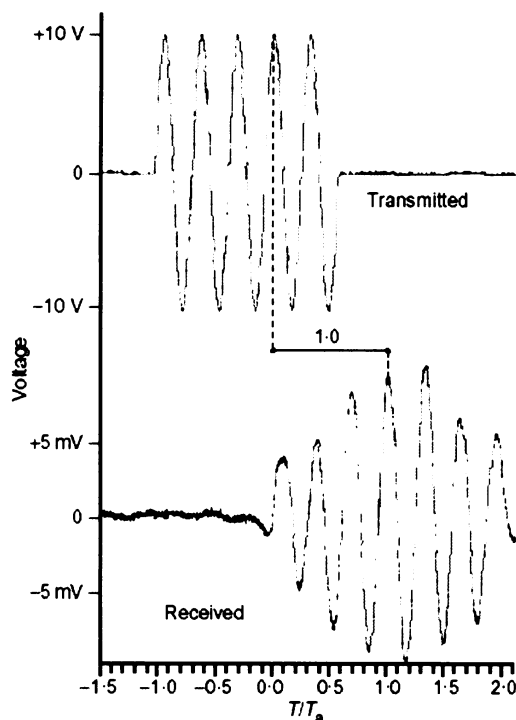
-odečet času průchodu z adekvátních maxim nebo minim vstupního a výstupního sinového signálu tvořeného několika periodami (viz obr. 2.14.)

Relativní chyba v určení času průchodu smykové vlny z výše zmíněných tří experimentů, má velikost do  $\pm 1\%$  (Jovicic a kol. 1996). Použitím způsobu měření, se vstupním signálem sinové vlny o několika periodách, nelze získat stejné časy průchodu pro různé vstupní frekvence díky vlivu fázových skoků, ke kterým dochází při rezonančních frekvencích vysílacího elementu (Greening a Nash 2004).





(obr. 2.13)



(obr. 2.14)

**Obr. 2.13** Zjednodušení registrovaného seismogramu při použití modifikovaného sinového vstupního signálu (převzato z Jovicic a kol. 1996)

**Obr. 2.14** Odečet času příchodu mezi adekvátními maximy nebo minimy vstupního a výstupního signálu; (převzato z Jovicic a kol. 1996)  
*Vstupní signál je sinová vlna o několika periodách.*

## 2.4 Měření a interpretace ve frekvenční oblasti

Jako zpracování ve frekvenční oblasti se označují postupy, které využívají k určení času průchodu signálu vzorkem frekvenční spektra signálů, přičemž někdy využívají i specifické budící signály – časově neomezený harmonický signál na dané frekvenci, nebo signál s časově proměnnou frekvencí. V následujícím textu budou popsány některé postupy používané při zpracování ve frekvenční oblasti.

Tyto postupy často využívají stanovení vzájemného časového posunu mezi vstupním a výstupním signálem s využitím fázového posunu mezi těmito signály. Základní myšlenka vychází z toho, že pokud je čas průchodu harmonického signálu vzorkem menší, než jaká je délka periody tohoto harmonického signálu, lze k určení času průchodu použít stanovení fázového zpoždění prošlého signálu za budícím signálem. Pokud tedy použijeme kontinuální harmonický budící signál vhodné frekvence, je čas průchodu roven fázovému

zpoždění mezi těmito dvěma signály. Tento časový posun lze stanovit použitím dříve uvedené funkce vzájemné korelace. V případě kontinuálního harmonického signálu bude funkce vzájemné korelace periodická (s periodou harmonického signálu) a její fázový posun bude určen hledaným časovým posunem. Je tedy možné hledaný časový posun určit prostřednictvím výpočtu fázového spektra funkce vzájemné korelace mezi vstupním a výstupním signálem.

Výpočet spektra funkce vzájemné korelace může být realizován buď tak, že spočteme funkci vzájemné korelace podle vztahu 2.5 a na ni pak aplikujeme Fourierovu transformaci, nebo aplikujeme Fourierovu transformaci přímo na vztah 2.5 a spektrum funkce vzájemné korelace  $G_{xy}$  počítáme podle vztahu:

$$G_{xy}(f) = L_x(f) \cdot L_y^*(f), \quad (2.6)$$

kde  $L_x$  je spektrum vstupního signálu a  $L_y^*$  je komplexně sdružené spektrum ke spektru výstupního signálu  $L_y$ . Pokud nedochází k disperzi seismických vln, je čas průchodu příčné vlny nezávislý na její frekvenci (tzv. konstantní čas průchodu). Při konstantním čase průchodu signálu vzorkem by bylo fázové zpoždění konstantní, nezávislé na frekvenci. Pokud toto konstantní fázové zpoždění budeme vynášet v souřadném systému, kdy na ose  $y$  budeme měřit fázové zpoždění v počtu period odpovídajících dané frekvenci, získáme lineární závislost mezi frekvencí a fázovým spektrem. To bude ovšem platit jen potud, pokud fázové zpoždění mezi budícím a registrovaným signálem nepřesáhne celou periodu signálu. Fázové zpoždění se totiž počítá při výpočtu spektra pomocí Fourierovy transformace tak, že spadá do intervalu délky  $2\pi$  (jedna perioda) (viz obr. 2.14 (a) a obr. 2.15). Abychom stejně mohli postupovat i v případě frekvencí, odpovídajících periodám kratším, než je časový posun mezi budícím a registrovaným signálem, používáme místo fázového spektra intervalu délky  $2\pi$  tak zvané rozvinuté fázové spektrum (viz obr. 2.14 (b) a obr. 2.16). Toto rozvinuté fázové spektrum funkce vzájemné korelace je v dalším textu nazýváno frekvenčně-fázový graf.

Směrnice tohoto lineárního frekvenčně-fázového grafu  $d\Phi/df$  se vztahuje k času příchodu  $t$  podle vztahu:

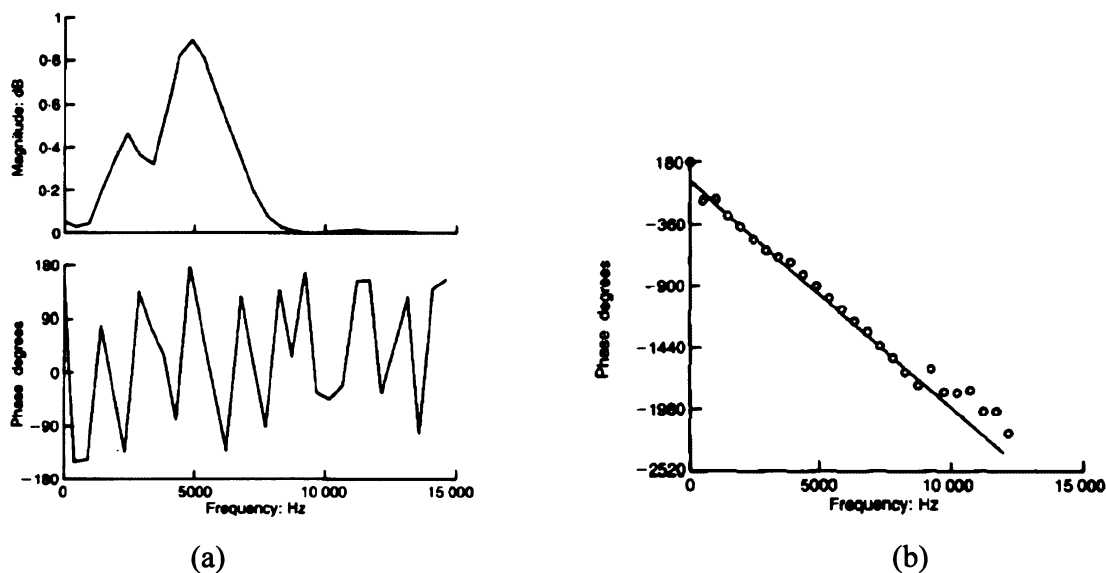
$$t = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{df}, \quad (2.7)$$

kde  $d\Phi$  je přírůstek fázového posunu v radiánech a  $df$  je přírůstek frekvence.

Tohoto principu využívají postupy využívající frekvenční analýzy sinového pulsu, fázově citlivá detekce, určení času průchodu metodou  $\pi$ -bodů a metoda sweepového vstupního signálu.

### 2.4.1 Frekvenční analýza dat metody sinového pulsu

Viggiani a Atkinson (1995) použili frekvenční způsob interpretace na data naměřená v časové oblasti metodou sinového pulsu. Tvar vstupního a výstupního signálu je obdobný těm na obrázku 2.12 ( $R_d = 8,1$ ). Fourierovou transformací vstupního a výstupního signálu byla získána jejich spektra. Podle vztahu (2.6) je získáno spektrum funkce vzájemné korelace. Na obrázku 2.15a je amplitudové a fázové spektrum funkce vzájemné korelace. Rozbalením periodického fázového spektra se získá frekvenčně fázový graf, který je na obrázku 2.15b.



**Obr. 2.15** Frekvenční interpretace signálů naměřených v časové oblasti (převzato z Viggiani a Atkinson 1995)

(a) amplitudové a fázové spektrum funkce vzájemné korelace vstupního a výstupního signálu.  
 (b) frekvenčně-fázový graf.

Proložením přímky metodou nejmenších čtverců body frekvenčně-fázového grafu je získána směrnice frekvenčně-fázového grafu. Podle vztahu 2.7 je vypočten čas průchodu přímo se šířící příčné vlny vzorkem zkoušené zeminy.

### 2.4.2 Technika fázově citlivé detekce (Phase sensitive detection technique)

V této metodě je vstupním signálem kontinuální sinová vlna o určité frekvenci. Výstupní signál, buzený tímto vstupním signálem, prochází přes lock-in amplifier, který měří fázový posun mezi vstupním signálem a komponentou výstupního signálu se stejnou frekvencí jako má vstupní signál. Pro proměření touto metodou je nejprve určen čas průchodu některou z metod v časové oblasti. Změny v čase průchodu  $dt$  způsobené změnami stavu vzorku v průběhu triaxiální zkoušky jsou určovány podle vztahu:

$$dt = \frac{d\Phi}{2\pi f}, \quad (2.8)$$

kde  $d\phi$  je změna fázového posunu ve stupních a  $f$  je frekvence vstupní sinové vlny.

Touto metodou se nedá určit přímo čas průchodu střížné vlny. Je použitelná jen pro určení změn času průchodu. Při použití vstupního signálu s vyšší frekvencí roste přesnost měření změn času průchodu. Díky poměrně snadné automatizaci měření umožňuje tato metoda kontinuální měření změn v rychlosti příčných vln v průběhu triaxiální zkoušky (Blewett a kol. 1999). Pokud je určena počáteční rychlost, je možné pomocí takto určených změn v čase průchodu určit, jak se mění rychlost příčných vln v průběhu triaxiální zkoušky.

### 2.4.3 Určení času průchodu metodou $\pi$ -bodů

Metoda  $\pi$ -bodů byla vyvinutá Kaarsbergem (1975) a byla poprvé použita pro testování basaltických hornin a vysušených jílu. Pro měření času průchodu přímo se šířící příčné vlny v triaxiálním přístroji ji poprvé použili na vzorcích z rekonstituovaného jílu Greening a Nash (2004).

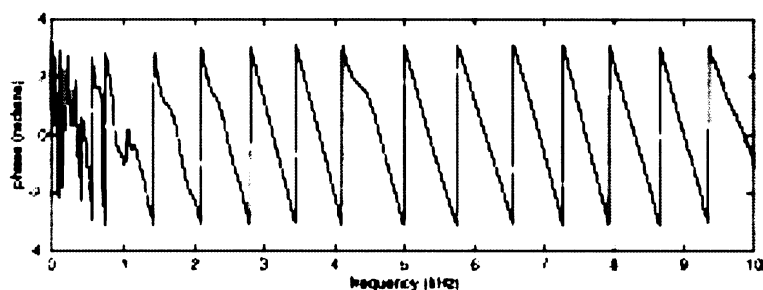
V této metodě je vstupním signálem kontinuální harmonická sinová vlna. Výstupním signálem je také kontinuální harmonická vlna se stejnou frekvencí, jakou má vstupní signál, fázově posunutá. Oba signály jsou zobrazeny pomocí dvoukanálového osciloskopu. Podstatou této metody je, že se plynule mění frekvence vstupní vlny od nejnižších hodnot k vyšším a hledá se taková frekvence, kdy je vstupní signál s výstupním úplně ve fázi nebo úplně mimo fázi. Nejnižší takovou frekvencí je určen první tzv.  $\pi$ -bod, který je bodem frekvenčně fázového grafu. Postupným zvyšováním frekvence procházející vlny jsou určovány další frekvence  $\pi$ -bodů. Velikost fázového posunu mezi dvěma sousedními  $\pi$ -body je právě jedno  $\pi$ . Tímto způsobem je možné získat body frekvenčně-fázového grafu. Takto získané  $\pi$ -body jsou zobrazeny křížky na obrázku 2.17. Získanými  $\pi$ -body se

metodou nejmenších čtverců proloží přímka, z její směrnice se podle vztahu 2.7 určí čas průchodu smykové vlny.

#### 2.4.4 Metoda sweepového vstupního signálu

V této metodě je vstupní signál harmonický, kontinuální, a jeho frekvence roste lineárně s časem. Tento signál je nazýván sweep. V daném případě je oproti předcházejícím metodám situace poněkud odlišná. Sweep představuje signál s definovaným lineárním přírůstkem časového zpoždění jednotlivých frekvenčních komponent.

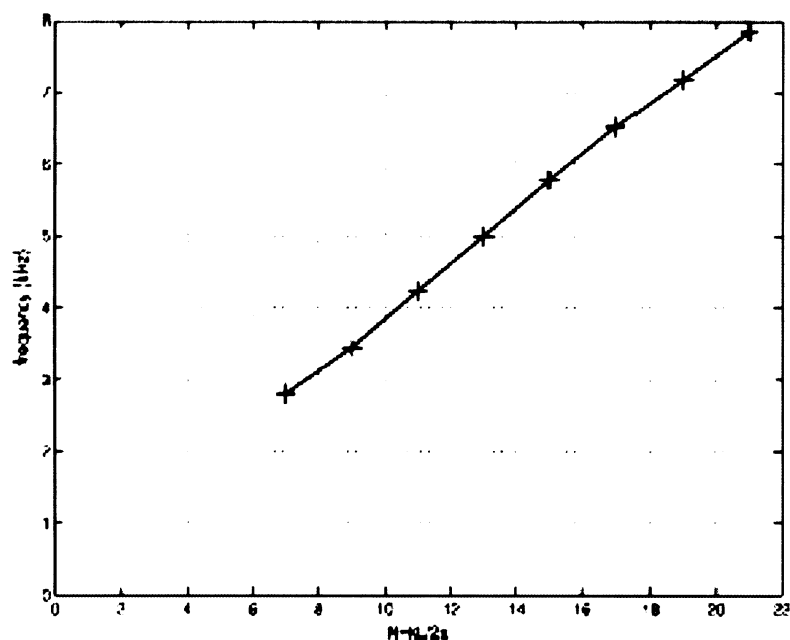
Amplituda budícího elektrického napětí (peak to peak) je obvykle 10-20 V. Pomocí spektrálního analyzátoru je prováděna A-D konverze a následná rychlá Fourierova transformace vstupního a výstupního signálu. Spektrální analyzátor po provedení této transformace vypočte fázové spektrum funkce vzájemné korelace (obr. 2.16).



**Obr. 2.16 Periodické fázové spektrum funkce vzájemné korelace vstupního a výstupního signálu (převzato z Greening, Nash 2004)**  
*Vstupní signál je lineární sweep 0-10 kHz.*

Rozvinutím takto získaného fázového spektra se dostane frekvenčně-fázový graf. Frekvenčně-fázový graf určený touto metodou, doplněný  $\pi$ -body změřenými metodou  $\pi$ -bodů, je na obrázku 2.17.

Z výsledků měření zachycených na obrázku 2.17 vyplývá, že  $\pi$ -body odpovídají měření provedenému se sweepovým vstupním signálem, a tedy pomocí obou metod je určen stejný čas průchodu příčné vlny. Metoda se vstupním signálem sweepového charakteru je na rozdíl od metody  $\pi$ -bodů rychlejší, spolehlivější (poskytne daleko více bodů frekvenčně-fázového grafu) a je relativně snadno automatizovatelná.



**Obr. 2.17** Rozbalené fázové spektrum funkce vzájemné korelace z obrázku 2.16 s vloženými  $\pi$ -body (křížky) naměřenými metodou  $\pi$ -bodů na identickém vzorku za stejných podmínek (převzato z Greening a Nash 2004)

## 2.5 Srovnání výsledků měření v časové a frekvenční oblasti

Pro měření času průchodu příčné vlny v triaxiálním přístroji je možné použít metody v časové oblasti (tzv. impulsní metody) a metody v oblasti frekvenční. Pokud je v obou případech určován čas průchodu příčné vlny, měly by být tyto časy stejné.

Porovnáním časů průchodu příčné vlny získaných z impulsních metod a frekvenčních metod se ve svých pracích zabývali Bodare a Massaarsch (1984), Viggiani a Atkinson (1995) a Greening a Nash (2004). Bodare a Massarsch (1984) měřili časy průchodu příčné vlny in situ ve vrtech metodou nazývanou cross-hole test. Viggiani a Atkinson (1995) a Greening a Nash (2004) prováděli svá měření na vzorcích z rekonstituovaného jílu v triaxiálním přístroji pomocí BE. Ve všech případech bylo zjištěno, že časy průchodu určené impulsními metodami jsou menší než ty naměřené frekvenčními metodami.

Pro každé z uvedených měření časů průchodu v časové a ve frekvenční oblasti byl vypočten průměrný čas průchodu, ke kterému je vztažena velikost relativní chyby uvedené v tabulce 2.1.

**Tab. 2.1 Rozdíl v určení času průchodu mezi metodami časové a frekvenční oblasti**

$L$  - vzdálenost šíření;  $d$  - průměr vzorku;  $f$  - průměrná vstupní frekvence;  $v_s$  - rychlost šíření příčných vln;  $R_d$  - poměr určující tvar výstupního signálu v časové oblasti (vztah 2.4);  $\Delta t/t$  - relativní chyba v určení času průchodu.

Měření provedli	Testovaný materiál	$L$	$d$	$f$	$v_s$	$R_d$	$\Delta t/t$
		[ mm ]	[ mm ]	[ Hz ]	[ m/s ]		[ % ]
Bodare a Massarsch (1984)	překonsolidovaný jíl	2500		100	125	2,0	40
Viggiani a Atkinson (1995)	rekonstituovaný jíl	70	38	5000	140	2,5	14
Greening a Nash (2004)	rekonstituovaný jíl	90	182	5000	149	3,0	42
Greening a Nash (2004)	rekonstituovaný jíl	182	90	5000	133,5	6,8	10

Velikost takto určené relativní chyby času průchodu může mimo jiné záviset na tuhosti zkoušeného materiálu, velikosti a průměru vzorku, frekvenci vstupního signálu.

Měření času průchodu příčné vlny v triaxiálním přístroji se používá pro určení rychlosti šíření příčných vln, ze které je podle vztahu 2.2 určován maximální smykový modul, důležitý parametr geotechnických analýz. Vliv nejistoty v určení času průchodu příčné vlny na určovaný smykový modul je možné přiblížit pomocí vztahu pro výpočet relativní chyby v určení maximálního smykového modulu  $\Delta G_0/G_0$  pomocí relativních chyb měřených veličin:

$$\frac{\Delta G_0}{G_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + 2 \frac{\Delta L}{L} + 2 \frac{\Delta t}{t}, \quad (2.9)$$

kde relativní chyba v určení času průchodu je  $\Delta t/t$ , relativní chyba v určení hustoty je  $\Delta \rho/\rho$ , relativní chyba v určení vzdálenosti šíření je  $\Delta L/L$ . Ze vztahu 2.9 vyplývá, že vlivem nejistoty v určení času průchodu (z měření v tab. 2.1 až do 40%), se relativní chyba v určení maximálního smykového modulu zvětší o dvojnásobek této nejistoty. Nejistota v určení času průchodu smykové vlny vede k velké nejednoznačnosti v určení maximálního smykového modulu, parametru důležitém pro analýzy všech geotechnických konstrukcí.

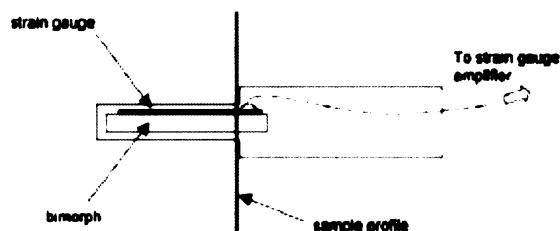
### 3. CHARAKTERISTIKA BE JAKO ZDROJE SEISMICKÝCH VLN

Pro co nejpřesnější určení času průchodu smykové vlny vzorkem v triaxiálním přístroji je podstatné znát chování vysílacího BE jako seismického zdroje. Je tedy třeba analyzovat, jaký mechanický pohyb vysílací element generuje v reakci na časový průběh budícího elektrického napětí.

V první části této kapitoly jsou na základě odborné literatury popsány výsledky měření realizované pomocí tzv. 'selfmonitoring' elementu. Ve druhé části jsou uvedeny výsledky provedeného měření laserovým interferometrem. Na závěr jsou srovnány výsledky obou typů měření s ohledem na jejich význam pro měření času průchodu smykových vln vzorkem v triaxiálním přístroji.

#### 3.1 Mechanické chování BE-měření pomocí selfmonitoring elementu

Mechanické chování BE ve svých pracích zmiňují Jovicic a kol. (1996), Jovicic (1997) a Greening a Nash (2004). V všech těchto pracích je mechanické chování vysílacího elementu popisováno na základě měření realizovaného pomocí tzv. „selfmonitoring“ elementu (podle Schultheiss (1982) v Jovicic a kol. (1996)). Selfmonitoring element je pizokeramická destička, která je součástí vysílacího elementu, a je zapojená jako přijímač (obr. 3.1).

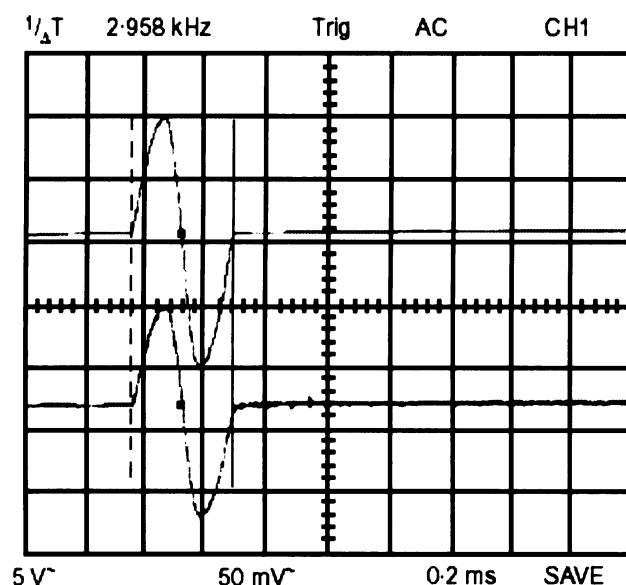


Obr. 3.1 Schéma-selfmonitoring element (podle Schultheiss (1982) v Greening a Nash (2004))

Jak se vysílací element ohýbá, generuje selfmonitoring element měřitelné elektrické napětí, které je odezvou na zrychlení pohybu vysílacího elementu.

Jovicic a kol. (1997) použili selfmonitoring element pro zjištění, jakým způsobem reaguje vysílací element na různé frekvence sinového pulsu. Vysílací element byl umístěn v poloskalní hornině. Výsledky jejich měření jsou zachyceny na obrázku 3.2.





**Obr. 3.2** Odezva vysílacího elementu (dole) na zdrojové elektrické napětí (nahore) (převzato z Jovicic a kol. (1996))

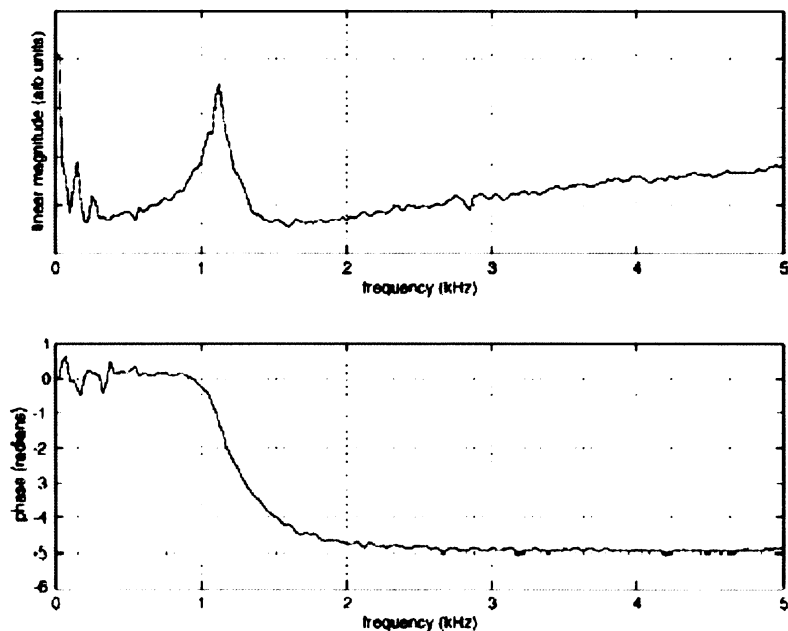
*Velikost gridu: 5V pro vstupní signál; 50mV pro výstupní signál; frekvence vstupního signálu-3kHz.*

Z obrázku 3.2 vyplývá, že mezi pohybem elementu a zdrojovým napětím není žádné zpoždění, a zrychlení pohybu vysílacího elementu má téměř přesně tvarově stejný časový průběh jako vstupní elektrické napětí.

Greening a Nash (2004) provedli měření pomocí selfmonitoring elementu na vzorku jílu pro zjištění vlivu rezonanční frekvence elementu na fázové spektrum. Vstupní signál byl lineární sweep. Z výsledku jejich měření vyplývá, že při rezonanční frekvenci elementu dochází k fázovému skoku ve fázovém spektru. Na základě této skutečnosti byly zdůvodněny i nelineární části frekvenčně-fázového grafu při frekvenční interpretaci měření v triaxiálním přístroji. Na obrázku 3.3 jsou zachyceny výsledky tohoto měření ve formě amplitudového a fázového spektra funkce vzájemné korelace mezi časovým průběhem vstupního elektrického napětí a časovým průběhem napětí generovaného selfmonitoring elementem.

Z obrázku 3.3 vyplývá zřejmá souvislost mezi rezonanční frekvencí vysílacího elementu a fázovým skokem ve fázovém spektru.

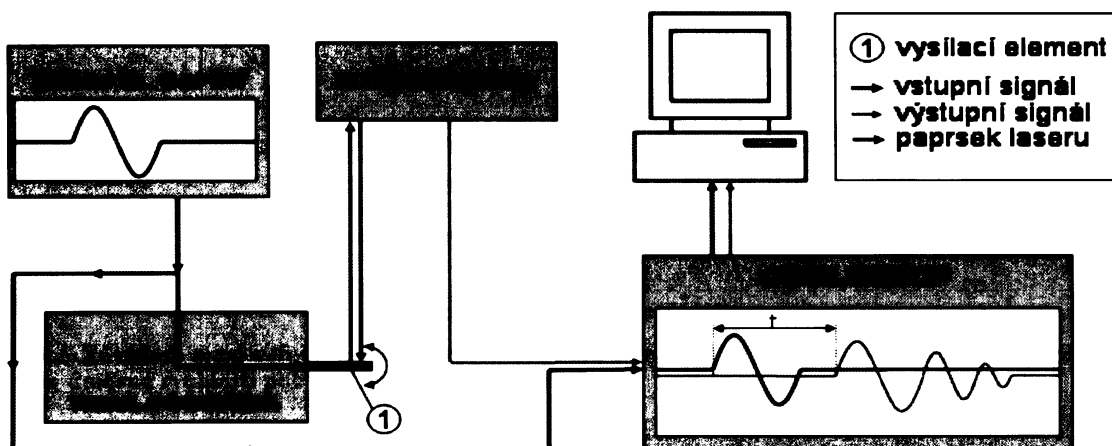
Konstantní fázové spektrum mimo oblast resonance elementu znamená, že mezi zdrojovým elektrickým napětím a registrovaným napětím, které odpovídá zrychlení pohybu vysílacího elementu, není žádné zpoždění.



Obr. 3.3 Frekvenční a fázové spektrum funkce vzájemné korelace vstupního napětí a odezvy selfmonitoring elementu (převzato z Greening a Nash (2004))

### 3.2 Analýza BE s pomocí laserového interferometru

Pro realizovaná měření byl použit laserový interferometr POLYTEC 3000, který pro účely měření na diplomové práci poskytl GFÚ AVČR. Laserový interferometr je zařízení, které umožňuje bezkontaktně (pomocí odražejícího se světla laseru) měřit rychlost pohybu testovaného objektu. Pomocí interferometru lze tedy nezávisle analyzovat rychlost pohybu vysílacího BE, který používáme jako zdroj příčné elastické vlny. Schéma realizovaného měření rychlosti pohybu vysílacího BE pomocí laserového interferometru je na obrázku 3.4.

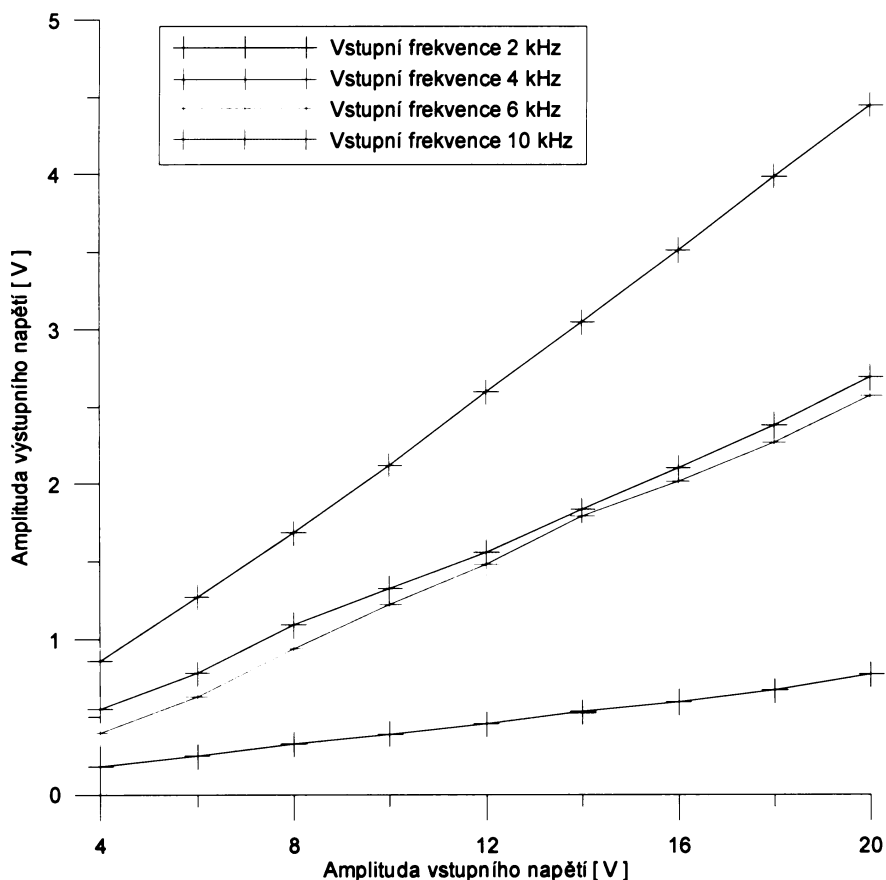


Obr. 3.4 Schéma měření rychlosti pohybu vysílacího elementu laserovým interferometrem

Při popisu měření laserovým interferometrem budeme jako výstupní signál označovat elektrické napětí generované laserovým interferometrem, které je úměrné měřené rychlosti pohybu.

Při měření s laserovým interferometrem byly využity všechny používané typy časového průběhu budícího elektrického napětí.

Pokud je budícím elektrickým signálem, přivedeným na BE, kontinuální sinová vlna o určité frekvenci, je výstupním signálem rovněž kontinuální sinová vlna se stejnou frekvencí. Z výsledků měření pomocí signálů o různých frekvencích a amplitudách vyplývá, že pokud zvětšujeme amplitudu vstupního signálu, roste amplituda výstupního signálu. Nárůst amplitudy výstupního signálu v závislosti na signálu vstupním je lineární. Na obrázku 3.5 jsou výsledky měření pro několik frekvencí vstupní sinové kontinuální vlny v běžně používaném frekvenčním rozsahu.

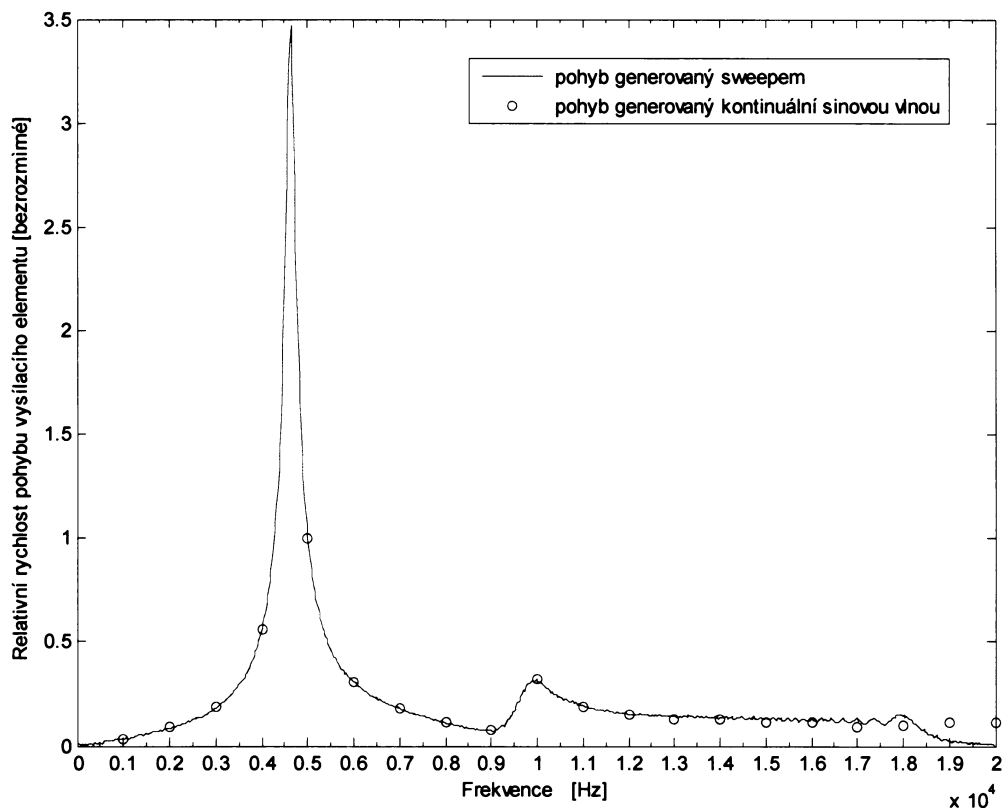


**Obr. 3.5** Závislost mezi vstupním elektrickým napětím a výstupním měřeným elektrickým napětím, které je úměrné rychlosti pohybu vysílacího elementu

Z toho, že přímky na obrázku 3.5 nejsou rovnoběžné, vyplývá, že rychlost pohybu závisí také na frekvenci vstupní kontinuální vlny. Časový průběh rychlosti pohybu je možné

získat vynásobením výstupního signálu citlivostí provedeného interferometrického měření (v našem případě 5 mm/s/V).

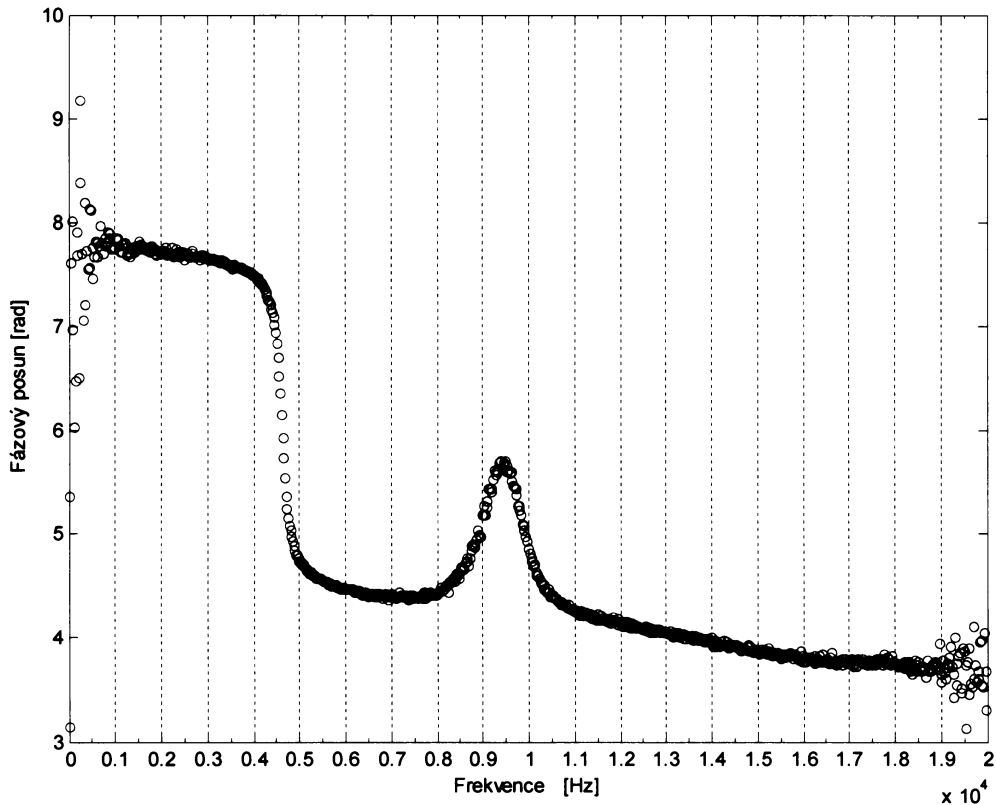
Na obrázku 3.6 je zachycena amplitudová frekvenční charakteristika vysílacího elementu. Při měření byly použity vstupní signály kontinuální sinové vlny s vstupní amplitudou 10V a lineární sweepový signál s frekvenčním rozsahem 0,1-20kHz, délkou trvání 40 milisekund a amplitudou 10V.



**Obr. 3.6 Amplitudová frekvenční charakteristika rychlosti pohybu vysílacího elementu (normováno)**

Z obrázku 3.6 vyplývá, že amplitudovou frekvenční charakteristiku vysílacího elementu je možné stanovit jak měřením amplitud procházejících kontinuálních sinových vln, tak i výpočtem amplitudového spektra výstupního signálu generovaného lineárním sweepem. Určení frekvenční charakteristiky pomocí sweepového vstupního signálu je mnohem rychlejší a přesnější, protože z jediného měření získáme spojitou frekvenční charakteristiku. Z obrázku 3.6 vyplývá, že netlumený vysílací element má dvě výrazná rezonanční maxima na frekvencích 4750 Hz a 9800 Hz.

Na obrázku 3.7 je zachycen frekvenčně-fázový graf (fázová frekvenční charakteristika vysílacího elementu) odpovídající stejnému měření se sweepovým vstupním signálem jako amplitudové spektrum na obrázku 3.6.

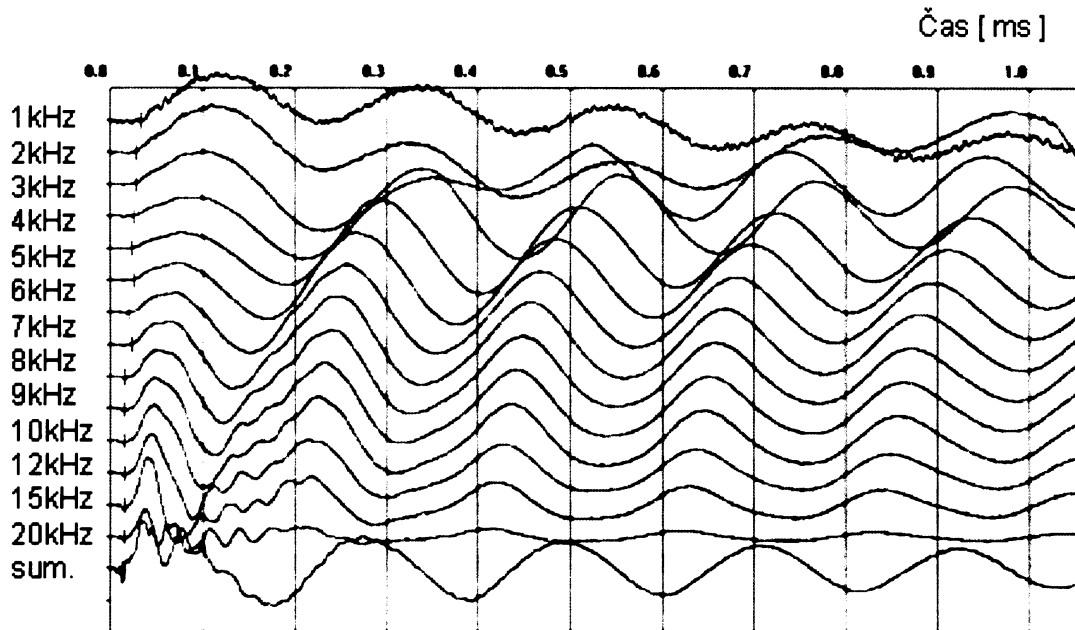


**Obr. 3.7 Fázová frekvenční charakteristika rychlosti pohybu vysílacího elementu**  
*Lineární části jsou proloženy červenými úsečkami (určení zpoždění vysílacího elementu).*

Fázová frekvenční charakteristika na obrázku 3.7 je po částech lineární. Její linearita je porušena v okolí rezonančních frekvencí vysílacího elementu. Pokud na lineární části frekvenčně-fázového grafu použijeme frekvenční způsob interpretace, získáme časy zpoždění vysílacího elementu za zdrojovým napětím. Velikost tímto způsobem určených zpoždění vysílacího elementu ze tří lineárních částí frekvenčně-fázového grafu (viz obr. 3.7) se pohybuje mezi 12-15 mikrosekundami.

Na obrázku 3.8 jsou výstupní signály generované časově omezeným vstupním signálem. Vstupními signály byly v tomto případě sinové pulsy o frekvencích v intervalu 1-20 kHz s amplitudou zdrojového elektrického napětí 10V. Pro zobrazení časového průběhu výstupních signálů je používán program Pickwin (firmy OYO), který se využívá k odečtu prvních nasazení při zpracování dat refrakční seismiky (obr. 3.8). Vlastní postup

transformace dat z formátu digitální osciloskopické karty do formátu programu Pickwin je uveden v kapitole 6.1.



**Obr. 3.8** Odezva vysílacího elementu na vstupní signál tvaru sinového pulsu

*Vlevo frekvence vstupního sinového impulsu; sum. - součtová vlna; červeně - první nasazení = časové zpoždění vysílacího elementu za zdrojovým elektrickým napětím.*

Místu prvního nasazení výstupního signálu je přiřkládán význam zpoždění rychlosti pohybu vysílacího BE za budícím napětím. Na výstupních signálech na obrázku 3.8 je vidět závislost času zpoždění na frekvenčním obsahu vstupního budícího signálu. Velikost zpoždění rychlosti pohybu vysílacího elementu klesá s rostoucí frekvencí vstupního signálu a pohybuje se v intervalu 15-30 mikrosekund. Průměrná hodnota zpoždění pohybu BE je 20 mikrosekund (pro frekvence 1-20 kHz).

Po uvedení do pohybu dokmitává vysílací element na své první rezonanční frekvenci (4750 Hz). Čas potřebný k úplnému vyznění pohybu vysílacího elementu je daleko nižší, je-li vysílací element vetknut do vzorku, který způsobuje jeho tlumení.

Závislost velikosti časového zpoždění mezi budícím elektrickým napětím a měřenou rychlostí pohybu vysílacího elementu nebyla zjištěna ani pro nejmenší používané frekvence (1 kHz).

### 3.3 Shrnutí výsledků interferometrického měření

Při realizaci měření pomocí piezokeramických snímačů (přijímací BE nebo selfmonitoring element) je registrovaný časový průběh elektrického napětí úměrný velikosti časového průběhu zrychlení pohybu piezokeramického snímače.

V případě provedení měření pomocí laserového interferometru je časový průběh registrovaného elektrického napětí úměrný časovému průběhu rychlosti pohybu vysílacího elementu.

Časy odpovídající prvnímu nasazení na registrovaném seismogramu jsou totožné v případě měření zrychlení, rychlosti i pohybu vysílacího elementu. Proto je možné o zpoždění vysílacího elementu změřené pomocí laserového interferometru přímo opravit veškerá realizovaná měření času průchodu příčné vlny vzorkem v časové oblasti i frekvenční oblasti.

Při měření rychlosti příčných vln v triaxiálním přístroji je předpokládáno, že zpoždění pohybu vysílacího elementu je v porovnání s časem průchodu zanedbatelné. Proto může být čas vzniku pohybu vysílacího elementu ztotožňován s prvním nasazením vstupního signálu.

Zdá se, že tento předpoklad potvrzují výsledky měření realizovaného pomocí selfmonitoring elementu (viz kapitola 3.1). Vzhledem k tomu, že se v tomto případě nejedná o nezávislé měření, nemusí výsledky měření odpovídat chování vysílacího elementu. Zejména výsledek měření provedeného Jovicicem a kol. (1996) (obr. 3.2), kdy změřený výstupní signál téměř přesně kopíruje tvar vstupního elektrického napětí a není vidět postupné zatlumení pohybu elementu, nevyznívá v porovnání s měřením realizovaném pomocí laserového interferometru příliš důvěryhodně.

Výsledky provedeného nezávislého interferometrického měření (viz kapitola 3.2) prokazují, že velikost zpoždění pohybu vysílacího elementu za zdrojovým elektrickým napětím je větší, než jak se běžně uvádí v literatuře. V předchozí podkapitole je z měření rychlosti pohybu vysílacího elementu laserovým interferometrem určeno časové zpoždění frekvenční i časovou metodou. Průměrné časové zpoždění v časové oblasti je 20 mikrosekund. Z lineárních částí frekvenčně-fázového grafu vychází zpoždění kolem 15 mikrosekund.

Souvislost mezi rezonančními frekvencemi a nelineárními částmi frekvenčně-fázového grafu uvedená v práci Greening a Nash (2004) byla potvrzená také měřením rychlosti pohybu elementu (viz obr. 3.6 a obr. 3.7).

Při měření v triaxiálním přístroji je vysílací element vetknut do zkoušeného vzorku. To znamená, že oproti měření pomocí interferometru je daleko více tlumen. Tlumení vysílacího elementu se může projevit ve velikosti zpoždění pohybu vysílacího elementu za registrovaným vstupním signálem i ve frekvenční a s ní spojené fázové charakteristice vysílacího elementu.

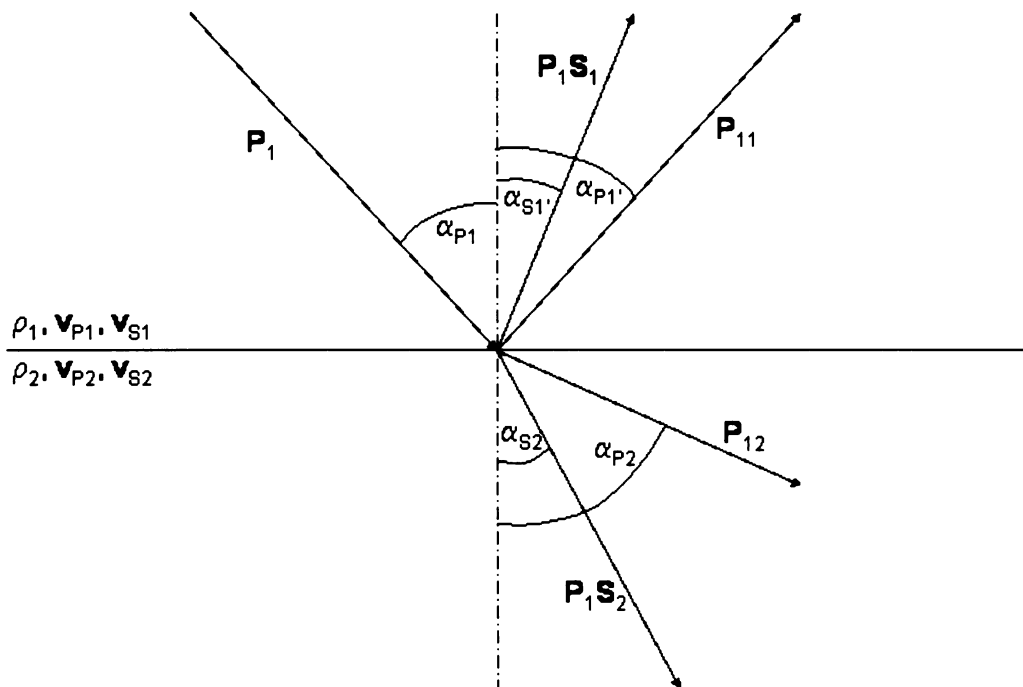
Protože podstatou této práce je měření na různě dlouhých vzorcích, je nutné počítat s časem potřebným k aktivaci vysílacího elementu, který se projeví relativně nejvíce na nejkratších vzorcích. Význam časového zpoždění pohybu vysílacího elementu pro určení rychlosti příčných vln na vzorcích zemin v triaxiálním přístroji roste s rostoucí tuhostí zkoušeného materiálu.



#### 4. ŠÍŘENÍ VLN GENEROVANÝCH BE VE VZORKU KONEČNÝCH ROZMĚRŮ

Zdroj typu BE, i když je navržen jako zdroj příčných vln, generuje ve skutečnosti jak příčné vlny, tak vlny podélné. Vzorek pro měření v triaxiálním přístroji má navíc konečné rozměry, a na jeho hranicích dochází po dopadu seismických vln ke vzniku druhotných vln: odražených, lomených, přeměněných. Některé z druhotných vln dopadají na přijímací element a mohou být registrovány. Společnou registrací druhotných a přímo se šířících příčných vln vzniká složitá interferenční vlna, kterou registrujeme jako výstupní signál. Doposud používané metody zpracování a interpretace výstupního signálu vycházejí z předpokladu, že registrovaný seismogram představuje odezvu pouze na přímo se šířící příčnou vlnu a složitý interferenční charakter registrovaného vlnění neuvažují.

Při dopadu podélné nebo vertikálně polarizované příčné vlny na rozhraní vznikají stejné typy druhotných vln. Na obrázku 4.1 je zachycen vznik druhotných vln po dopadu podélné vlny.



**Obr. 4.1** Vznik druhotných vln na seismickém rozhraní po dopadu podélné vlny

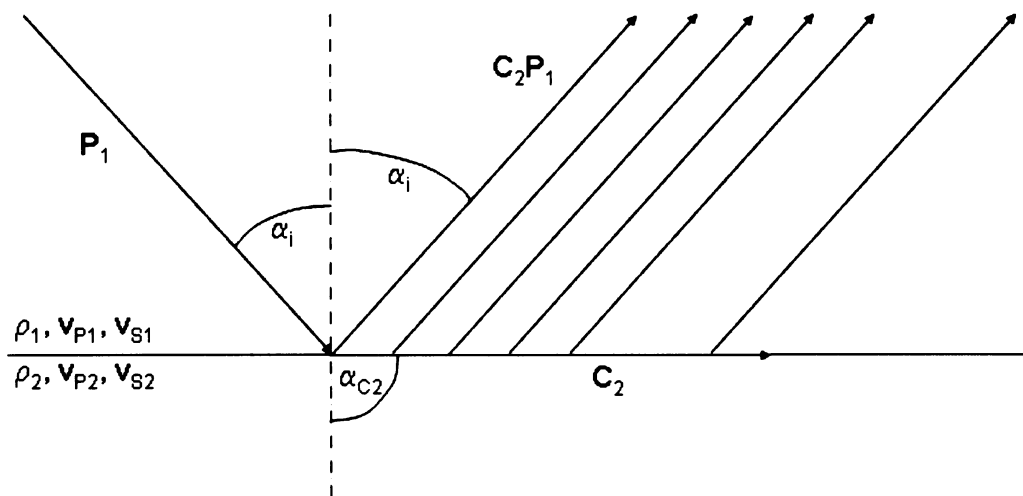
$\rho_1, v_{P1}, v_{S1}$  - vlastnosti prvního prostředí: hustota, rychlost podélných vln, rychlost příčných vln;  $\rho_2, v_{P2}, v_{S2}$  - vlastnosti druhého prostředí;  $P_1$  - dopadající podélná vlna;  $P_1S_1$  - přeměněná odražená příčná vlna;  $P_{11}$  - odražená podélná vlna;  $P_1S_2$  - přeměněná lomená příčná vlna;  $P_{12}$  - podélná lomená vlna;  $\alpha_{P1}$  - úhel dopadu podélné vlny;  $\alpha_{S1'}$ ,  $\alpha_{P1'}$  - úhly odrazu;  $\alpha_{S2}$ ,  $\alpha_{P2}$  - úhly lomu.

Na rozhraních dochází nejenom k lomu a odrazu vlnění, ale i k přeměnám vln. Pro všechny vlny pak platí vztah:

$$\frac{\sin \alpha_{P1}}{v_{P1}} = \frac{\sin \alpha_{P1'}}{v_{P1}} = \frac{\sin \alpha_{S1'}}{v_{S1}} = \frac{\sin \alpha_{P2}}{v_{P2}} = \frac{\sin \alpha_{S2}}{v_{S2}} \quad (4.1).$$

Ve vztahu 4.1 byla použita symbolika vysvětlená u obrázku 4.1. Tento vztah se nazývá Snellův zákon.

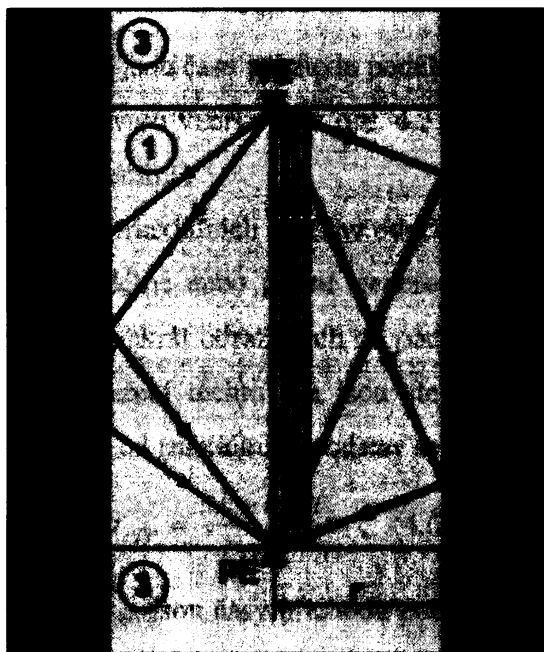
Úhel dopadu, při kterém dochází k lomu seismické vlny pod úhlem  $90^\circ$  (lomená vlna se šíří podél rozhraní), se nazývá kritickým úhlem. Pokud dopadá seismická vlna pod úhlem větším než je kritický úhel, nedochází ke vzniku lomených vln (vznikají pouze odražené vlny). Lomená vlna, která vzniká při dopadu pod kritickým úhlem, se šíří podél rozhraní a nazývá se čelná vlna (obr. 4.2). Čelná vlna se šíří rychlostí seismických vln prostředí, do kterého se vlny lomí. Jak se čelná vlna šíří podél rozhraní, generuje podle Huyghensova principu pod kritickým úhlem vlnu, která se šíří testovanou zeminou, a dopadá-li na přijímací element, může být registrována.



**Obr. 4.2 Vznik čelné vlny na seismickém rozhraní**  
*P<sub>1</sub>-dopadající podélná vlna; Č<sub>2</sub>-čelná vlna; Č<sub>2</sub>P<sub>1</sub>-podélná vlna generovaná čelnou vlnou; α<sub>i</sub>-kritický úhel; α<sub>c2</sub> = 90°- úhel lomu při vzniku čelné vlny.*

Stanovení amplitud druhotných vln vznikajících na rozhraní není obecně jednoduché, závisí na amplitudě dopadající vlny, parametrech prostředí mezi nimiž se rozhraní nachází, úhlu dopadu na toto rozhraní a typu dopadající vlny.

Na obrázku 4.3 jsou naznačeny dráhy šíření některých seismických vln, které by mohly komplikovat určení času příchodu přímo se šířící příčné vlny ve vzorku.



- dráha přímých vln
- dráha vln odražených od pláště vzorku
- dráha vln odražených od triaxiálních podstav
- dráha čelné vlny
- dráhy přeměňných vln (P→S; S→P)
- ▼ VE - vysílací element
- ▲ PE - přijímací element
- L- vzdálenost mezi volnými konci BE
- r- poloměr triax. vzorku
- ① vzorek zeminy:  $(\rho_1, v_{P1}, v_{S1})$
- voda v komoře:  $(\rho_2, v_{P2}, v_{S2})$
- ③ triax. podstavy:  $(\rho_3, v_{P3}, v_{S3})$

Obr. 4.3 Dráhy šíření některých seismických vln ve vzorku

#### 4.1 Stanovení časů šíření vybraných typů vln

Jedním z úkolů této práce je posoudit vliv seismických vln vznikajících na hranicích vzorku na určení času příchodu přímo se šířící smykové vlny. Z tohoto důvodu budou tyto vlny dále blíže popsány, a to pomocí dráhy šíření a času průchodu.

Přímé vlny nejsou ovlivněny hranicemi vzorku a šíří se po dráze mezi volnými konci přijímacího a vysílacího elementu stálou rychlostí, která závisí na typu vlnění (P, S), na zkoušeném materiálu a na napět'ových podmínkách. Čas příchodu přímých vln se vypočte podle vztahů:

$$t_P = \frac{L}{v_{P1}}, \quad (4.2)$$

$$t_S = \frac{L}{v_{S1}}, \quad (4.3)$$

kde  $t_P$  je čas příchodu přímo se šířící podélné vlny;  $t_S$  je čas příchodu přímo se šířící příčné vlny;  $L$  je vzdálenost mezi volnými konci BE;  $v_{P1}$ ,  $v_{S1}$  jsou rychlosti šíření podélných a příčných seismických vln ve vzorku testované zeminy.

Dráha vln odražených od pláště triaxiálního vzorku je zachycena na obrázku 4.3. Jejich čas průchodu vzorkem se vypočte podle vztahu:

$$t_{PP} = \frac{2\sqrt{(L/2)^2 + r^2}}{v_{PI}} \quad , \quad (4.4)$$

$$t_{SS} = \frac{2\sqrt{(L/2)^2 + r^2}}{v_{SI}} \quad , \quad (4.5)$$

kde  $t_{PP}$  a  $t_{SS}$  jsou časy příchodu podélné a příčné od pláště vzorku odražené vlny;  $L$  a  $r$  jsou parametry tvaru vzorku (viz obr. 4.3);  $v_{PI}$  a  $v_{SI}$  jsou rychlosti podélných a příčných vln v testované zemině.

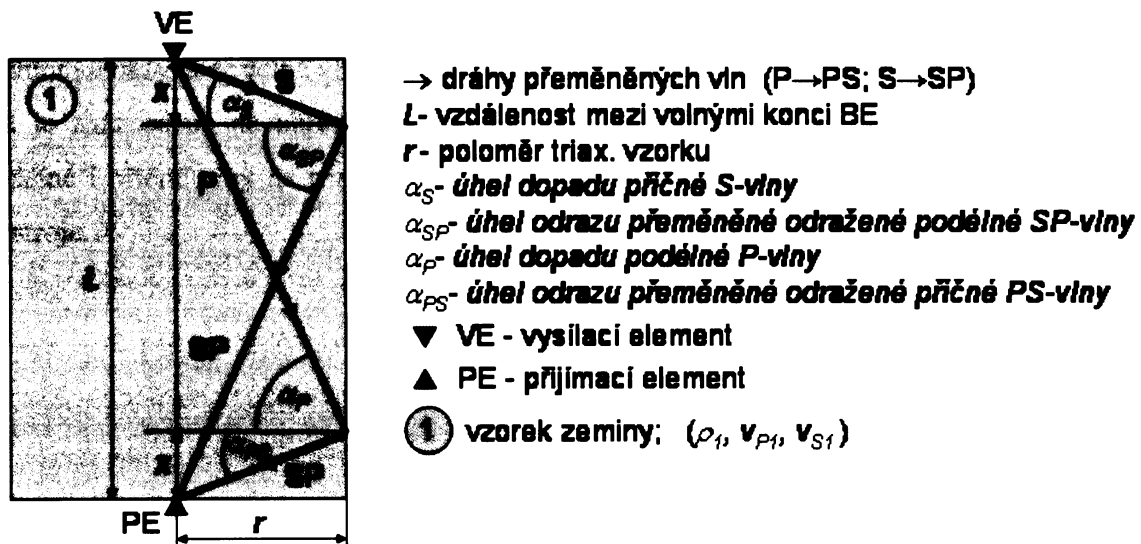
Dvakrát od triaxiálních podstav odražené vlny vznikají jako druhotné vlny po normálovém dopadu podélné nebo příčné generované vlny na podstavy triaxiálního přístroje. Dráha šíření vln dvakrát odražených od podstav triaxiálního vzorku je naznačena na obrázku 4.3. Rychlosti šíření těchto vln jsou stejné po celé jejich dráze šíření. Časy příchodu vln odražených od triaxiálních podstav se vypočtou podle vztahu:

$$t_{PPP} = \frac{3L + l_1 + l_2}{v_{PI}} \quad , \quad (4.6)$$

$$t_{SSS} = \frac{3L + l_1 + l_2}{v_{SI}} \quad , \quad (4.7)$$

kde  $t_{PPP}$  a  $t_{SSS}$  jsou časy příchodu podélné a příčné od podstav triaxiálního vzorku dvakrát odražené vlny;  $L$  je vzdálenost mezi volnými konci BE;  $l_1$  je hloubka vetknutí vysílacího elementu do vzorku;  $l_2$  je hloubka vetknutí přijímacího elementu do vzorku;  $v_{PI}$  a  $v_{SI}$  jsou rychlosti podélných a příčných vln v testované zemině.

Při dopadu vln generovaných vysílacím elementem na rozhraní mezi vzorkem a vodou v triaxiální komoře vznikají také přeměněné vlny. Přeměněné odražené vlny mohou být registrovány. Vznik přeměněných odražených vln ve vzorku konečných rozměrů je zachycen na obrázku 4.4.



Obr. 4.4 Vznik a šíření přeměněných odražených vln ve vzorku

Příčná přeměněná odražená vlna vzniká po dopadu podélné vlny na rozhraní. Podélná přeměněná odražená vlna vzniká po dopadu příčné vlny na rozhraní.

Předpokládáme-li homogenní izotropní vzorek, potom rychlost šíření příčných ani podélných vln nezávisí na směru jejich šíření, a ze Snellova zákona vyplývá pro přeměněné vlny vztah:

$$\frac{\sin \alpha_S}{v_{Sl}} = \frac{\sin \alpha_{SP}}{v_{Pl}} = \frac{\sin \alpha_P}{v_{Pl}} = \frac{\sin \alpha_{PS}}{v_{Sl}}, \quad (4.8)$$

kde je použita stejná symbolika jako v případě obrázku 4.4. Ze vztahu 4.8 vyplývá, jak je znázorněno na obrázku 4.4., že  $\alpha_S = \alpha_{PS}$  a  $\alpha_P = \alpha_{SP}$ . To znamená, že jednotlivé úseky drah, na kterých mají obě přeměněné vlny stejnou rychlost, si odpovídají. Potom je čas průchodu obou přeměněných vln (podélná na příčnou, příčná na podélnou) shodný.

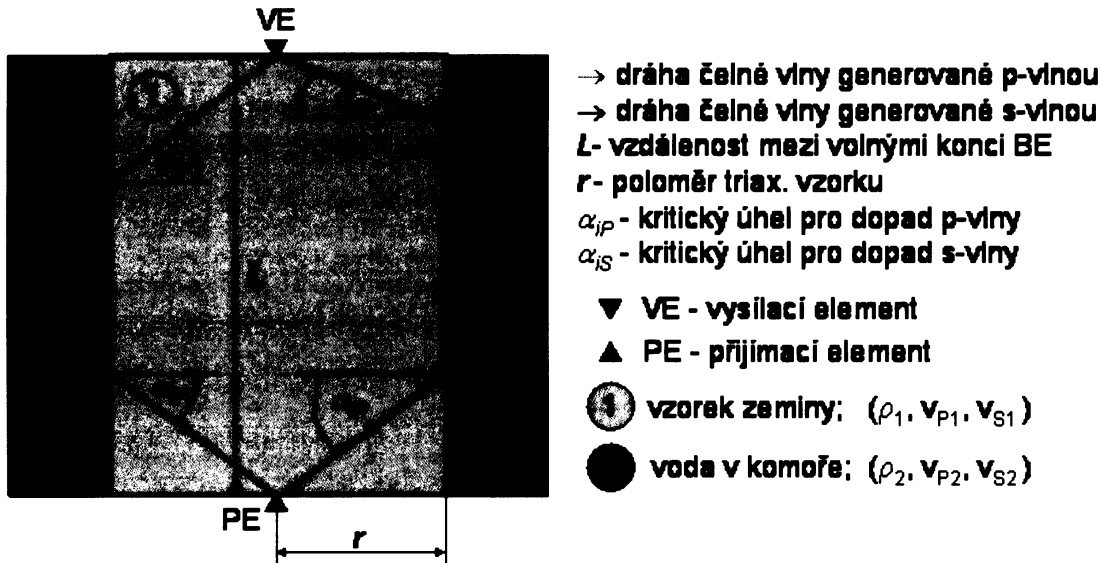
Čas průchodu přeměněných odražených vln se vypočte tak, aby platil vztah 4.8, podle vztahu:

$$t_{PS} = t_{SP} = \frac{\sqrt{x^2 + r^2}}{v_{Sl}} + \frac{\sqrt{(L-x)^2 + r^2}}{v_{Pl}}, \quad (4.9)$$

kde je použita symbolika z obrázku 4.4,  $t_{PS}$  je čas příchodu příčné přeměněné vlny vyvolané dopadem podélné vlny na rozhraní,  $t_{SP}$  je čas příchodu podélné přeměněné vlny vyvolané dopadem příčné vlny na rozhraní.

Při dopadu podélné nebo příčné vlny na rozhraní mezi pláštěm vzorku a vodou vyplňující komoru triaxiálního přístroje vznikají také lomené podélné vlny. Tyto vlny se šíří rychlostí podélných vln prostředí, do kterého se lomí (voda). Lomená příčná vlna na tomto rozhraní nevzniká, protože kapaliny mají nulový smykový modul. Pokud dopadá na rozhraní vlna pod kritickým úhlem, vzniká podélná lomená vlna, která se šíří podél rozhraní a nazývá se čelná vlna (obr. 4.5).

Jak je znázorněno na obrázku 4.5, podélná čelná vlna může být generována dopadem podélné i příčné vlny na rozhraní mezi vzorkem a vodou vyplňující komoru triaxiálního přístroje.



Obr. 4.5. Vznik a šíření čelných vln ve vzorku v triaxiálním přístroji

Ze Snellova zákona vyplývají pro šíření čelných vln vztahy:

$$\frac{\sin \alpha_{iP}}{v_{P1}} = \frac{\sin 90^\circ}{v_{P2}} \Rightarrow \sin \alpha_{iP} = \frac{v_{P1}}{v_{P2}} \quad (4.10. a),$$

$$\frac{\sin \alpha_{iS}}{v_{S1}} = \frac{\sin 90^\circ}{v_{P2}} \Rightarrow \sin \alpha_{iS} = \frac{v_{S1}}{v_{P2}}, \quad (4.10. b).$$

Ve vztazích (4.10.a) a (4.10.b) je použita stejná symbolika jako v případě obrázku 4.5. Vztah (4.10. a) odpovídá čelné vlně vzniklé po dopadu podélné vlny. Vztah (4.10. b) odpovídá čelné vlně vzniklé po dopadu příčné vlny.

Čas průchodu čelné vlny vzorkem, generované dopadem podélné vlny, se vypočte podle vztahu:

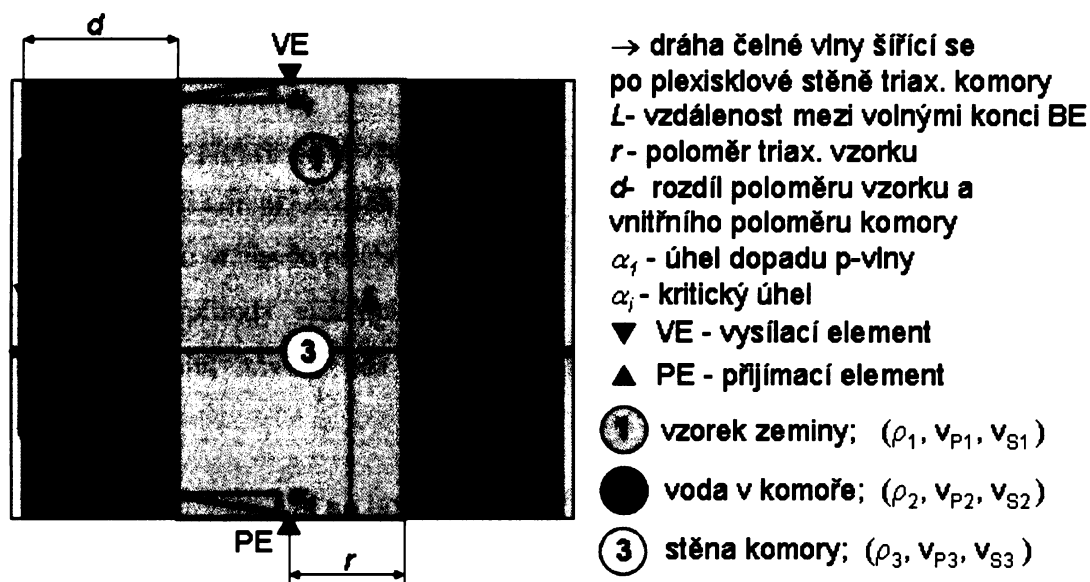
$$t_{PC} = \frac{2r}{v_{P1} \cos \alpha_{iP}} + \frac{L - 2r \cdot \operatorname{tg} \alpha_{iP}}{v_{P2}} \quad (4.11. a),$$

čas průchodu čelné vlny triaxiálním vzorkem, generované dopadem příčné vlny, se vypočte podle vztahu:

$$t_{SC} = \frac{r}{v_{S1} \cos \alpha_{iS}} + \frac{r}{v_{P1} \cos \alpha_{iP}} + \frac{L - r(\operatorname{tg} \alpha_{iP} + \operatorname{tg} \alpha_{iS})}{v_{P2}} \quad (4.11. b).$$

Symbolika ve vztazích (4.11. a) a (4.11. b) je stejná jako na obrázku 4.5.

Čelná vlna šířící se po rozhraní mezi vodou vyplňující triaxiální komoru a stěnou triaxiální komory (plexisklo) může být také registrována. Dráha této čelné vlny je naznačena na obrázku 4.6.



Obr. 4.6 Čelná vlna šířící se po plexisklové stěně komory triaxiálního přístroje

Ze Snellova zákona je možné pro šíření této čelné vlny určit vztahy:

$$\frac{\sin \alpha_i}{v_{P2}} = \frac{\sin 90^\circ}{v_{P3}} \Rightarrow \sin \alpha_i = \frac{v_{P2}}{v_{P3}} \quad (4.12. a),$$

$$\frac{\sin \alpha_l}{v_{P1}} = \frac{\sin \alpha_i}{v_{P2}} \Rightarrow \sin \alpha_l = \frac{v_{P1}}{v_{P3}}, \quad (4.12. b).$$

Ve vztazích (4.12. a) a (4.12. b) je použita stejná symbolika jako na obrázku 4.6. Čas příchodu čelné vlny šířící se po stěně komory triaxiálního přístroje  $t_{PPC}$  se vypočte podle vztahu:

$$t_{PPC} = \frac{2r}{v_{P1} \cos \alpha_l} + \frac{2d}{v_{P2} \cos \alpha_i} + \frac{L - 2(r * \operatorname{tg} \alpha_l + d * \operatorname{tg} \alpha_i)}{v_{P3}}, \quad (4.13).$$

Ve vztahu (4.13) je použita stejná symbolika jako na obrázku 4.6.

## 4.2 Registrace příchozích vln

Na přijímací element tedy dopadají vlny generované vysílacím elementem (přímá podélná vlna a přímá příčná vlna) spolu s druhotnými vlnami (odražené, přeměněné, čelné), které vznikají na hranicích vzorku. Vlivem dopadu seismických vln na přijímací element dochází k jeho ohýbání, a tím vzniká elektrické napětí úměrné zrychlení pohybu elementu. Nejlépe jsou tedy přijímacím elementem registrovány takové vlny, které s ním nejnádhěji ohýbají. Těmito vlnami jsou příčné vertikálně polarizované vlny (vzhledem k ploše elementu) dopadající ve směru zploštění elementu a podélné vlny dopadající kolmo k plochým stranám snímače.

Velikost amplitudy elektrického napětí, kterou se ve výstupním signálu projeví jednotlivé registrované vlny, závisí na:

- amplitudě příchozích vln
- charakteru příchozích vln (podélná, příčná)
- směru příchodu příchozích vln

Na velikosti amplitudy elektrického napětí, kterou se projeví registrované vlny ve výstupním signálu, závisí, zda je možné tyto vlny v registrovaném seismogramu identifikovat.

### **4.3 Vliv druhotných vln na interpretaci v časové oblasti**

Příchozí vlny jsou v časové oblasti registrovány jedna po druhé v závislosti na času příchodu. Každá z registrovaných vln má v časové oblasti nějakou časově omezenou délku trvání. Tak jak postupně jednotlivé vlny přicházejí, jsou registrovány, načítají se na sebe, a tvoří tak výstupní signál.

Nejpoužívanější metoda pro měření v časové oblasti je metoda využívající vstupního signálu tvaru sinového impulsu (Viggiani a Atkinson 1995; Jovicic a kol. 1996). Při použití sinového impulsu pro generování smykové vlny se za místo jejího příchodu ve výstupním signálu pokládá buď první nasazení výstupního signálu (v případě, že výstupní signál není ovlivněn efektem blízké zóny) nebo první inverze výstupního signálu (v případě, že výstupní signál je ovlivněn efektem blízké zóny). To znamená, že při interpretaci výstupního signálu v časové oblasti není počítáno s vlivem druhotných seismických vln vznikajících na rozhraní vzorku. Přímou šířící se podélná vlna a některé z druhotných vln přichází dříve než hledaná přímo se šířící příčná vlna. Pokud je některá z těchto dříve příchozích vln registrována dříve než příčná přímo se šířící vlna, tak nejběžněji používaná interpretace výstupního signálu založená na pracích Viggiani a Atkinson (1995) a Jovicic a kol. (1996) není správná. To znamená, že místu výstupního signálu, kterému je přikládán význam příchodu přímo se šířící příčné vlny, odpovídá příchod některé z rychlejších vln.

Před přímo se šířící příčnou vlnou mohou přicházet tyto vlny: přímá podélná vlna, odražená podélná vlna, dvojnásobně odražená podélná vlna, přeměněné vlny, čelné vlny. S možným příchodem těchto vln před registrací smykové vlny se při interpretaci výstupního signálu vůbec nepočítá.

Zda budou tyto vlny registrovány, závisí na jejich charakteru (příčná, podélná), amplitudě a směru dopadu na přijímací element. Vzhledem k charakteru vysílacího a přijímacího



elementu se dá předpokládat, že přímo se šířící podélná vlna nebude vůbec registrovaná. Vliv přeměněných vln na registrovaný seismogram by rovněž neměl být významný z důvodu úhlu dopadu na přijímací element vzhledem k jejich polarizaci. Velký význam by mohly mít čelné vlny, které se šíří podél rozhraní rychlostí výrazně větší než je rychlost příčných vln v proměřované zemině. Čelné vlny se navíc tlumí s rostoucí vzdáleností šíření pomaleji než přímo se šířící příčná vlna. Jsou to čelné vlny šířící se podél rozhraní: vzorek-voda v komoře, voda v komoře-stěna triaxiální komory (plexisklo).

Jedním z úkolů této práce je posoudit, zda při běžně používané interpretaci výstupního signálu v časové oblasti (Viggiani a Atkinson 1995; Jovicic a kol. 1997), odpovídá času příchodu smykové vlny skutečně místo výstupního signálu, kterému je tento význam přisuzován. V případě, že tomu tak není, nalézt, pokud je to možné, na výstupním signálu místo skutečného příchodu smykové vlny.

#### **4.4 Vliv druhotných vln na interpretaci ve frekvenční oblasti**

Ve frekvenční oblasti jsou registrovány stejné vlny jako v oblasti časové. Protože vstupní signál je ve frekvenční oblasti kontinuální (časově neomezený), jsou i všechny vlny procházející vzorkem kontinuální a rovněž výstupní signál je kontinuální. To znamená, že oproti časové oblasti, kde jsou přicházející vlny registrovány jedna po druhé, jsou ve frekvenční oblasti všechny přicházející vlny registrovány současně (nezávisle na čase). Takovýto registrovaný kontinuální výstupní signál (interferenční vlna) je v časové oblasti neinterpretovatelný.

Ve frekvenční oblasti se tento výstupní signál interpretuje pomocí frekvenčně-fázového grafu (viz kapitola 2.4). Velikost fázového posunu mezi vstupním signálem a výstupní interferenční vlnou je závislá na fázových posunech všech registrovaných vln. Čím je větší amplituda elektrického napětí, kterou se registrované vlna projevuje ve výstupním signálu, tím víc se projeví fázový posun této vlny na velikosti celkového fázového posunu.

Za předpokladu, že je testovaný materiál homogenní, nedochází k disperzi seismických vln a přímo se šířící příčná vlna je v registrované vlně výrazně amplitudově dominantní, může být frekvenčně-fázový graf lineární. Potom je možné využít interpretačních dříve uvedených postupů zpracování ve frekvenční oblasti.

Naproti tomu naměřený lineární frekvenčně-fázový graf ale obecně neznamena, že je příčná vlna ve výstupním signálu amplitudově dominantní. Znamená pouze, že u registrovaných amplitudově významných vln nedochází ke změnám ve vzájemném

poměru amplitud v závislosti na frekvenci, tj. že nedochází k disperzi seismických vln. Protože amplitudová dominance přímo se šířící střížné vlny ve výstupním signálu nebyla prokázána, není obecně vhodné pro určení rychlosti smykové vlny používat interpretační metody ve frekvenční oblasti.

#### **4.5 Návrh experimentálního uspořádání v případě existence druhotných vln**

Při použití interpretačních postupů v časové i frekvenční oblasti pro měření na jednom a tomtéž vzorku by měly být určené časy průchodu smykové vlny stejné. Jak vyplývá z takto provedených měření (Bodare a Massaarsch (1984), Viggiani a Atkinson (1995) a Greening a Nash (2004)), jsou časy průchodu určené v časové oblasti menší než ve frekvenční oblasti. Velikost relativní chyby z těchto měření je až do 40% (viz kapitola 2.5).

Jednou z možností, jak vysvětlit tuto rozdílnost určených časů, je vliv registrace druhotných vln, který není při interpretaci v časové ani ve frekvenční oblasti uvažován. Druhotné vlny mohou významným způsobem ovlivnit charakter výstupního signálu z hlediska určení času průchodu příčné vlny v časové i frekvenční oblasti.

Pokud jsou některé z druhotných vln registrovány dříve než příčná vlna, neodpovídají interpretační postupy v časové oblasti této skutečnosti. Místu výstupního signálu, kterému je přikládán význam příchodu příčné vlny, může odpovídat příchod některé z rychlejších druhotných vln.

Jsou-li některé z druhotných vln v porovnání s amplitudou příčné vlny amplitudově významné, mají tyto vlny velký vliv na velikost celkového fázového posunu mezi vstupním a výstupním signálem, a tím i na určovaný čas průchodu příčné vlny.

Pro zjištění vlivu druhotných vln na interpretaci výstupního signálu je nutné ve výstupním signálu nejprve tyto druhotné vlny nalézt. Přímé vlny, které jsou generovány vysílacím elementem, mají spolu s čelnými vlnami lineární závislost mezi nalezeným časem průchodu a vzdáleností mezi volnými konci BE. Závislost mezi časem průchodu ostatních druhotných vln a vzdáleností mezi volnými konci BE lineární není. Pokud tedy realizujeme měření na vzorcích s různou délkou, je možné na základě těchto vlastností vyčlenit v registrovaném seismogramu časy příchodu přímých vln od časů příchodu druhotných vln. Identifikace času příchodu příčné vlny ve výstupním signálu je jeden z hlavních úkolů této práce.

## 5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V kapitole experimentální část jsou popsány jednotlivé realizované experimenty. Zdůvodnění realizace těchto experimentů je v kapitole 4.5. Nejdříve je popsáno to, co mají experimenty společné: materiál, měřicí systém a použité metodiky měření. V další části kapitoly jsou popsány dva experimenty, které byly provedeny (měření v plexisklové formičce, měření v triaxiálním přístroji).

### 5.1 Měřicí systém a použitý materiál vzorků

Přibližné schéma měřicího systému je zachyceno na obrázku 2.7. Jako zdroj elektrického napětí pro buzení seismických vln byl použit pulsní generátor TPG 110 (obdélníkový impuls) a AD počítačová karta AD14DSP, JanasCard (sinový impuls, sweep).

Pro generování a zachycení příčné vlny byly použity bender elements vyrobené na Geotechnical Engineering Research Centre, City University of London, UK. Součet délek BE je 15,55 mm.

Pro registraci vstupního signálu a výstupního signálu byla použita dvoukanálová osciloskopová karta NI 5102 se softwarem VirtualBench od firmy National Instruments. Při digitalizaci využívá tato karta 8 bitový AD převodník. Software VirtualBench neumožňuje měnit maximální amplitudu digitalizace, která je 10V peak to peak (LSB = 39 mV). Protože maximální amplituda výstupního signálu je v řádu jednotek milivoltů, bylo nezbytné umístit před osciloskopovou kartu zesilovač. Při měření byl použit nábojový zesilovač Charge Amplifier Type 2635, Brüel & Kjaer, který pro účely měření na diplomové práci poskytl ÚSMH AVČR. Zesilovač umožňuje zesílit procházející signál až tisíckrát, a jeho amplitudová i fázová frekvenční charakteristika je v používaném rozsahu frekvencí konstantní. Tento zesilovač způsobuje konstantní fázové zpoždění 180° v oblasti používaných frekvencí (do 20 kHz), které má za následek otočení polarity výstupního signálu. Software VirtualBench umožňuje zaznamenat vstupní a výstupní signál ve formě souboru ASCII.

Z důvodu elektrického šumu musí být všechny kabely použité při měření stíněné a jednotlivé součásti měřicího systému uzemněné. Měření bylo realizováno v prostředí s pokud možno co nejmenším seismickým šumem.

Horní vysílací a spodní přijímací element jsou při měření natočeny paralelně tak, že první nasazení má stejnou polaritu jako budící impuls. Polarita prvního nasazení se dá určit pomocí měření s BE na kontakt.

Podstatou provedených experimentů je měření na vzorcích s odlišnou výškou, ale stejnými rychlostmi podélných a příčných vln, které charakterizují zkoušený materiál. Při výběru vhodného materiálu pro realizovaná měření bylo proto nejpodstatnější, aby z něj bylo možné takové vzorky udělat. Z těchto důvodů a také pro rychlou přípravu vzorku byl jako vhodný materiál vybrán písek. Proměřovaný křemenný písek pochází z ložiska Ottendorf-Okrilla (Sosna 2003). Pro stavbu vzorků byla použita zrnitostní frakce 0,1-0,5 mm.

Pro měření interpretované v časové oblasti byly použity vstupní signály tvaru: obdélníkového pulsu (amplituda budícího elektrického napětí 5V), sinového impulsu (amplituda budícího elektrického napětí 10V). Frekvence sinových impulsů byly v rozsahu 1-20 kHz.

Pro měření interpretované ve frekvenční oblasti byl použitý up-sweepový vstupní signál s lineárním nárůstem frekvence od 100 Hz do 20 kHz. Délka sweepového signálu byla 40 milisekund.

Výstupem každého jednotlivého provedeného měření je soubor formátu ASCII, který obsahuje vstupní a výstupní signál. Pro pozdější zpracování těchto souborů je vhodné při měření používat stejnou vzorkovací frekvenci a počet vzorků vstupního a výstupního signálu.

Při většině měření pro interpretaci v časové oblasti byla použita vzorkovací frekvence 4 MHz s délkou záznamu 5 milisekund (20 000 vzorků).

Při většině měření pro interpretaci ve frekvenční oblasti byla použita vzorkovací frekvence 0,4 MHz s délkou záznamu 50 milisekund (20 000 vzorků).

Všechny experimenty popsané v této kapitole byly provedeny v Laboratoři mechaniky zemin, PŘF-UK, Praha a k jejich realizaci bylo využito přístrojové vybavení tohoto řešitelského pracoviště.

## **5.2 Měření na suchém pískovém vzorku v plexisklové formičce**

První série měření byla z důvodů zjednodušení navržena jako měření na vzorcích zemin mimo triaxiální komoru. Pro omezení vzorku je místo gumové membrány použita plexisklová 5-ti dílná formička o vnitřním průměru 40 milimetrů. Z jednotlivých pět centimetrů vysokých identických dílů je možné sestavit formičku pro vzorek o výšce 3-20 cm.

Cílem experimentu je naměřit výstupní signály v časové i frekvenční oblasti pro několik vzorků s identickými rychlostmi příčných a podélných vln a odlišnými výškami.

Testovaným materiálem byl suchý písek, popsáný v úvodní části kapitoly. Výhodou suchého písku v plexisklové formičce je existence výrazného seismické rozhraní mezi pískem a plexisklem, a tím i možná registrace druhotných vln.

Postup při stavbě a následném prozařování suchého pískového vzorku v plexisklové formičce:

1. Na spodní triaxiální podstavu je nasunutá plexisklová formička (vnitřní průměr 40 mm).
2. Do plexisklové formičky je z trychtýře volně nasypáno předem zvážené množství písku.
3. Do plexisklové formičky je vsunuta horní triaxiální podstava, tak, že mezi spodní a horní triaxiální podstavou je proměřovaný vzorek.
4. Pomocí konsolidačního rámu je vzorek zatížen vertikálním napětím 20 kPa a při tomto napětí zkonsolidován.
5. Změření výšky vzorku pomocí posuvného (mikrometrického) měřítka.
6. Realizace prozáření seismickými vlnami pro interpretaci v časové i frekvenční oblasti. Tímto způsobem je proměřeno pět vzorků s odlišnou výškou.

### **5.3 Měření na nasycených pískových vzorcích v triaxiální komoře**

Cílem měření v komoře triaxiálního přístroje je ověření významu výsledků měření provedeného v plexisklové formičce při měření realizovaném v komoře triaxiálního přístroje. Oproti měření v plexisklové formičce jsou hraniční podmínky v komoře triaxiálního přístroje odlišné.

Vzorek byl ze stejného písku jako v předchozím případě, ale při tomto experimentu byl nasycený vodou, jak je běžné při většině triaxiálních zkoušek. Průměr prozařovaných vzorků byl 38 mm, což odpovídá průměru nejčastěji zkoušených vzorků v triaxiálním přístroji.

Při měření v komoře triaxiálního přístroje byla navíc použita triaxiální komora Wykeham Farrance spolu s kontroléry GDS (měření tlaku v komoře a zkoušeném vzorku; měření objemových změn vzorku) a měřidlo pórového tlaku P102, MAYWOOD INSTRUMENTS.

Postup při stavbě a následném prozařování nasyceného pískového vzorku v triax. komoře:

1. Na spodní podstavu triaxiálního přístroje je navlečená nepropustná membrána a triaxiální formička; vnitřek membrány je vyplněn částečně vodou (propojení s byretou).
2. Do vody v membráně je z trychtýře volně sypán písek, tak aby hladina vody byla vždy nad úrovní nasypaného písku.
3. Písek v membráně je zhutněn poklepem na boky formičky a dovnitř membrány je zasunuta horní podstava s vysílacím elementem.
4. V uzavřeném vzorku je pomocí byrety propojené s pórovým prostorem vzorku vyvolán negativní pórový tlak 10 kPa, a potom je odstraněna triaxiální formička (vzorek drží negativní pórový tlak).
5. Změření průměru a výšky vzorku pomocí posuvného (mikrometrického) měřítka.
6. Naplnění komory vodou a postupné zvýšení napětí v komoře (0 kPa → 10 kPa) a ve vzorku (-10 kPa → 0 kPa) tak, aby efektivní napětí bylo stále stejné (10 kPa) (nedochází k objemovým změnám vzorku)
7. Po skončení prozařování je každý vzorek vysušen a zvážen.

Prozáření pískového vzorku pro interpretaci v časové a frekvenční oblasti je realizováno při několika napěťových stavech:

(komora : pórový tlak : efektivní napětí):

- a) (10 kPa : 0 kPa : 10 kPa)
- b) (110 kPa : 100 kPa : 10 kPa)
- c) (150 kPa : 100 kPa : 50 kPa)
- d) (200 kPa : 100 kPa : 100 kPa)

Mezi napěťovými stavy [b] ; c] a [c] ; d]) je vzorek zkonsolidován při odpovídajících změnách efektivních napětí. Objemová změna vzorku je měřena pomocí kontroléru GDS.

## 6. ZPRACOVÁNÍ, VYHODNOCENÍ A INTERPRETACE

Výstupem provedeného prozařování na jednom vzorku je několik souborů obsahujících vstupní a výstupní signál v digitalizované formě. S ohledem na zjednodušení zpracování byla volena u všech měření jednotná vzorkovací frekvence a délka registrovaných záznamů. Nejdříve je nutné provést zpracování naměřených výstupních signálů, tj. převést naměřené výstupní signály do takové formy, že se na nich dá co nejlépe určit čas průchodu jednotlivých registrovaných vln. Určení času průchodu jednotlivých vln je označováno termínem vyhodnocení. Interpretací se rozumí přiřazení seismických vln (přímé, druhotné,..) k určeným časům příchodu.

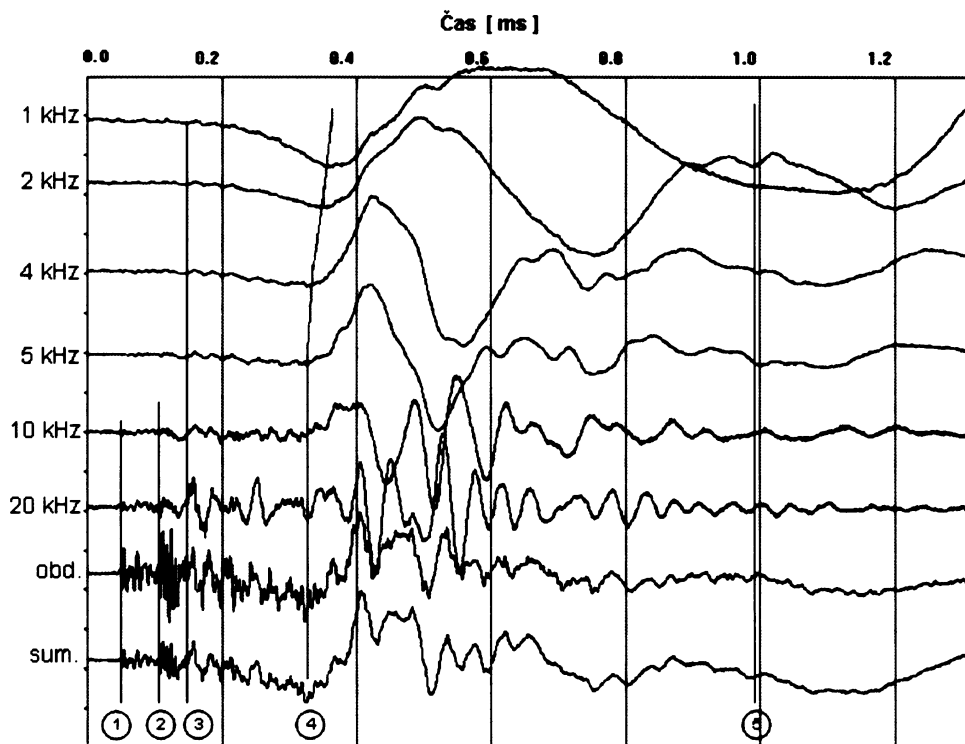
### 6.1 Zpracování, vyhodnocení a interpretace v časové oblasti

V časové oblasti je výsledkem měření několik souborů ve formátu ASCII pro každý zkoušený vzorek a jeho napěťový stav. V každém souboru je digitalizovaný naměřený vstupní a výstupní signál. Jednotlivé soubory se mezi sebou liší použitými vstupními signály (frekvence, tvar). Pro určení nasazení přichozích vln je vhodné interpretovat všechny tyto záznamy odpovídající různému časovému průběhu seismického zdroje najednou. Předpokladem této myšlenky je, že časy příchodu seismických vln nezávisí na frekvenci ani tvaru vstupního signálu. Protože však v každém souboru dochází k nasazení vstupního signálu v jiný čas, je nutné pro společné zobrazení všech naměřených výstupních signálů provést nejprve jejich synchronizaci.

Pomocí funkce vzájemné korelace napěťového pulsu a vstupního signálu se určí první nasazení vstupního signálu. Do času prvního nasazení vstupního signálu se posune nula časové osy výstupního signálu. To se provede pro všechny zaznamenané soubory. Z důvodu použití zesilovače je nutné vynásobit výstupní signály hodnotou -1, a tím otočit jejich polaritu. Pro zobrazení časového průběhu výstupních signálů a odečtu nasazení registrovaných vln je používán program *Pickwin* (firmy OYO), který se využívá k odečtu prvních nasazení při zpracování dat refrakční seismiky (obrázek 6.1). Aby bylo možné program *Pickwin* použít, je nutné aby jednotlivé synchronizované výstupní signály měly stejnou vzorkovací frekvenci a délku a byly uloženy ve formě řádkové matice v souboru formátu ASCII. Program *Pickwin* umožňuje provést odečet nasazení jednotlivých registrovaných vln (obr. 6.1). Pro načtení, synchronizaci a uložení výstupních signálů ve formátu ASCII byl vytvořen program *propickwin* v programovém prostředí MATLAB (PŘÍLOHA 1). Program *propickwin* provádí také normalizaci výstupních signálů

(maximem každého výstupního signálu). Při pozdějším vyhodnocení se ukázalo jako výhodné použít při vyhodnocení a interpretaci výstupních signálů také součtové vlny, která je tvořena součtem synchronizovaných a normalizovaných výstupních signálů.

Na obrázku 6.1 jsou zachyceny naměřené výstupní signály a součtová vlna.



**Obr. 6.1 Synchronizované normované výstupní signály s identifikací některých registrovaných vln (měření na nasyceném vzorku písku o výšce 93,2 mm při efektivním napětí 100 kPa)**

Popis levé vertikální osy: frekvence vstupního sinového pulsu, obd. - obdélníkový impuls; sum. - součtová vlna.

① - přímá podélná vlna, podélná od stěny odražená vlna, čelná vlna šířící se po rozhraní vzorek-voda v komoře; ② - čelná vlna šířící se po stěně triax. komory; ③ - dvakrát od triax. podstav odražená podélná vlna; ④ - přímá příčná vlna; ⑤ - dvakrát od triax. podstav odražená příčná vlna.

Odečet časů potenciálních příchodů registrovaných vln znamená nalezení míst ve výstupním signálu, kde by mohlo docházet k nasazení registrovaných vln. Nasazení jednotlivých registrovaných vln se hledají ve výstupním signálu v místech, kde dochází k jeho změně. Nástup nové vlny je obvykle doprovázen zvětšením amplitudy, která se s rostoucím časem tlumí. Nasazení předpokládaných generovaných i druhotných vln by měla být kladná. Jednoznačné určení příchodu seismické vlny je možné pouze tehdy, je-li vlna v prvním nasazení nebo došlo-li před registrací hledané vlny k zatlumení předchozí registrované vlny. Pokud tomu tak není, což je náš případ, je výhodné pro nalezení příchodu vln použít více výstupních signálů společně zobrazených, které jsou



synchronizované. Na základě předpokladu nezávislosti příchodu na tvaru a frekvenci vstupního signálu se pomocí společné interpretace výstupních signálů zvýší spolehlivost nalezení potenciálních míst příchodu registrovaných vln. Vstupní signály byly v tomto případě sinové pulsy s frekvencemi nejčastěji 1, 2, 4, 5, 10, 20 kHz a obdélníkový puls. Společně se vstupními signály je interpretována také součtová vlna. Protože pohyb vysílacího elementu není úplně nezávislý na frekvenčním obsahu vstupního signálu (viz kapitola 3), určuje se „přesný“ čas příchodu druhotných registrovaných vln z nasazení součtové vlny, které odpovídá vlně identifikované na základě společného vyhodnocení výstupních signálů. Výsledkem společného vyhodnocení výstupních signálů jsou odečtené časy, které mohou odpovídat příchodům jednotlivých registrovaných vln.

Podstatou interpretace je přiřazení skutečných registrovaných vln odečteným časům příchodu. Naměřeným časům budou přiřazovány časy příchodu vln popsanych v kapitole 4.1. Pro výpočet těchto časů je nutné znát rychlostní poměry v měřeném vzorku a rychlosti v okolním prostředí. Rychlosti charakterizující okolní prostředí vzorku jsou převzaty z odborné literatury. Rychlost příčných vln ve vzorku byla určena na základě interpretace provedeného experimentu. Rychlost podélných vln ve vzorku byla odhadnuta z rychlosti příčných vln a poměru  $v_s/v_p$  převzatého z odborné literatury. Tabulka 6.1 obsahuje rychlosti podélných a příčných vln charakterizující jednotlivá prostředí v provedených experimentech.

**Tab. 6.1 Rychlosti materiálů pro výpočet času příchodu druhotných vln**

*Napětí uvedené u suchého písku je vertikální; napětí uvedené u nasyceného písku je efektivní všesměrné; rychlosti v plexiskle jsou z práce Chen a Lawton (1991); rychlosti s-vln v suchém i nasyceném písku jsou určeny z provedených měření; rychlosti p-vln v suchém i nasyceném písku jsou určeny z poměru  $v_s/v_p$  uvedeném v práci Nomokonov (1966) a z určených rychlostí s-vln.*

	Plexisklo	Voda	Suchý volně sypaný písek	Nasycený zhutněný písek		
Napětí [kPa]			20	10	40	100
$v_p$ [m/s]	2740	1430	185	1600	1600	1600
$v_s$ [m/s]	1380	0	110	140	215	280

Rychlost příčných vln ve zkoušeném vzorku je určena z provedených měření, na základě měření na „identických“ vzorcích o různé délce a za předpokladu nezávislosti rychlosti příčných vln na délce vzorku. Čas příchodu příčné vlny je odečítán v místě prvního výrazného kladného nasazení těch výstupních signálů, které jsou nejméně ovlivněny overshootingem a efektem blízké zóny (4 kHz a 5 kHz na obrázku 6.1). Z takto odečtených

časů příchodu a délky dráhy šíření příčné vlny (vzdálenost mezi volnými konci BE podle Viggiani a Atkinson (1995)) byly pro vzorky s odlišnou výškou vypočteny rychlosti příčných vln. Tímto způsobem určené rychlosti byly závislé na délce vzorku.

Pro určení rychlosti příčných vln tak, aby byla nezávislá na výšce vzorku, je nutné do výpočtu zahrnout:

-vliv zpoždění pohybu vysílacího elementu za zdrojovým elektrickým napětím

-vzdálenost šíření příčné vlny brát jako délku vzorku zmenšenou o polovinu součtu délek do vzorku přečnávajících elementů (vzdálenost mezi středy do vzorku pronikajících elementů)

Pro výpočet rychlostí příčných  $v_s$  vln byl stanoven a použit vztah:

$$v_s = \frac{t_s - t_0}{d - l/2l_1} \quad (6.1),$$

kde  $t_s$  je čas příchodu příčné vlny určený interpretací výstupních signálů,  $t_0 = 20 \mu s$  je průměrný čas zpoždění pohybu vysílacího elementu za zdrojovým napětím,  $l_1 = 15,55 \text{ mm}$  je součet délek do vzorku přečnávajících částí elementu,  $d$  je výška vzorku. Pomocí vztahu 6.1 je tedy určena rychlost příčných vln ve vzorku.

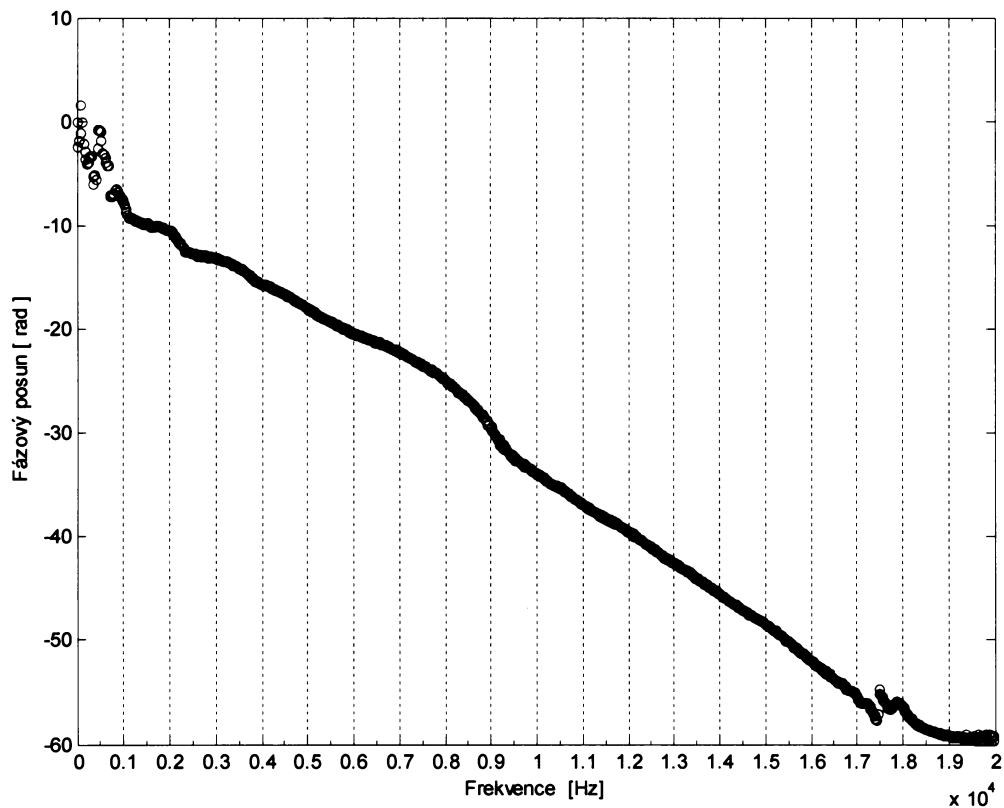
Z rychlostního modelu prostředí (tab. 6.1) a známé geometrie vzorku je možné, pomocí vztahů uvedených v kapitole 4.1, vypočítat časy příchodu některých druhotných vln. Pro výpočet časů příchodu druhotných vln, uvedených v kapitole 4.1, byl vytvořen v programovém prostředí MATLAB program *casy\_prichodu* (PŘÍLOHA 2). Časy příchodu jednotlivých vln vypočtených z rychlostního modelu vzorku a jeho okolí jsou porovnány s časy odečtenými ze zaznamenaných výstupních signálů.

## 6.2 Zpracování, vyhodnocení a interpretace ve frekvenční oblasti

Výsledkem měření pro interpretaci ve frekvenční oblasti je soubor obsahující vstupní signál (lineární sweep) a jemu odpovídající registrovaný výstupní signál. Výsledkem zpracování naměřeného vstupního a výstupního signálu je frekvenčně-fázový graf.

Frekvenčně-fázové grafy získané při realizovaných měřeních nebyly lineární v celém použitém intervalu frekvencí (100Hz-20kHz), proto byly vyhodnocovány po jednotlivých lineárních částech (viz obr. 6.2). Každá lineární část frekvenčně-fázového grafu je metodou nejmenších čtverců proložena přímkou. Ze směrnice přímky je podle vztahu 2.7 určen čas průchodu příčné vlny vzorkem. Pro zpracování a vyhodnocení měření ve

frekvenční oblasti byl vytvořen programovým prostředím MATLAB program *frek\_analyza* (příloha 3).



**Obr. 6.2** Interpretace frekvenčně-fázového grafu (měřeno na stejném vzorku jako obr. 6.1)  
*Červená úsečky – části frekvenčně-fázového grafu použité pro určení časů průchodu příčné vlny.*

Výsledkem vyhodnocení je tedy několik časů. Pro měření na jednom a tomtéž vzorku nemůže příchodu příčné vlny odpovídat více časů. Časy příchodu určené ve frekvenční oblasti jsou větší než čas příchodu příčné vlny v časové oblasti. Časy určené ve frekvenční oblasti odpovídají jen výjimečně některým z příchodů vln určených v časové oblasti.

## 7. VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE

Diplomová práce se zabývá metodou nedestruktivního určování střižného modulu na zeminách prostřednictvím prozařování příčnými vlnami. Tato metodika je v České republice nová a vychází ze zkušeností několika zahraničních pracovišť. V diplomové práci je kriticky hodnocena dosavadní používaná metodika s ohledem na fyzikální podmínky šíření seismických vln prostředím. Konkrétně se ukázalo, že při zpracování výsledků prozařování nelze zanedbávat existenci druhotných a přeměněných vln, bylo provedeno první nezávislé testování chování BE (laserová interferometrie), navržena byla nová metodika stanovení rychlosti příčných vln a ta byla otestována na několika konkrétních vzorcích.

Jedním z problémů, popisovaných autory doposud používané metodiky měření, je nepříznivý vliv jevů blízké zóny a tzv. overshootingu, které komplikují identifikaci nasazení příčné vlny. Na obrázku 6.1 je zřejmý vliv efektu blízké zóny na výstupní signály generované sinovým impulsem o nízkých frekvencích (1kHz, 2kHz) a vliv takzvaného overshootingu na výstupní signály generované sinovým impulsem o frekvencích vyšších než 10 kHz. Výstupní signál generovaný náběžnou hranou obdélníkového impulsu je vzhledem k širokému spektru náběžné hrany ovlivněn jak efektem blízké zóny, tak i overshootingem. První výrazné nasazení výstupních signálů generovaných sinovým impulsem o frekvencích 4 kHz a 5 kHz, na kterých je nejmenší vliv overshootingu a efektu blízké zóny, představuje podle Jovicice a kol. (1996) místo příchodu příčné vlny. Tímto způsobem byla vyhodnocena všechna měření a určený čas je dále uvažován jako čas příchodu příčné vlny.

Podrobným srovnáním výsledků měření na různě dlouhých vzorcích se ukázalo, že pro výpočet rychlosti je nutné oproti dosavadnímu přístupu uvažovat jinak dlouhou dráhu přímé S vlny, šířící se mezi BE.

Pokud časům příchodu příčné vlny přiřadíme jako vzdálenost jejího šíření vzdálenost mezi volnými konci elementů (Viggiani a Atkinson 1995), je rychlost určená podle vztahu 2.3 závislá na délce vzorku, což by nemělo být.

Pokud uvažujeme šířící vzdálenost jako délku vzorku zmenšenou o polovinu součtu do vzorku pronikajících elementů a odečteme od naměřeného času průchodu střední čas potřebný k aktivaci vysílacího elementu, získáme rychlost, která je minimálně závislá na délce vzorku.

Tabulka 7.1 obsahuje rychlosti příčných vln vypočtené původní metodikou (vztah 2.3) a rychlosti příčných vln vypočtené nově navrhaným postupem podle vztahu 6.1.

Vzhledem k tomu, že měřené relativní změny objemu vzorku při konsolidaci byly do 0,2%, je změna výšky vzorku po konsolidaci zanedbána.

Z objemu vzorku, hmotnosti vzorku a předpokládané hustoty skeletu byla spočtena pórovitost vzorku. Vzorky měřené v plexiskle měly pórovitost  $43\pm 1\%$ . Vzorky měřené v triaxiální komoře měly počáteční pórovitost  $41\pm 1\%$

**Tab. 7.1 Vypočtené rychlosti a jejich relativní chyby pro měřené vzorky**

*$v_1$  je rychlost určená původní metodikou podle vztahu 2.3;  $v_2$  je rychlost určená nově navrhovaným postupem podle vztahu 6.1;  $\Delta v_1$  a  $\Delta v_2$  jsou relativní chyby v určení těchto rychlostí.*

	Výška vzorku	$v_1$	$\Delta v_1$	$v_2$	$\Delta v_2$
	[mm]	[m/s]	[%]	[m/s]	[%]
suchý písek v plexisklové formičce; vertikálním napětí $\sigma_v = 10\text{kPa}$	23.5; 71.86; 119.4; 167.6; 198.96;	96	37	112.5	9.4
nasycený písek v triax. přístroji při efektivním napětí $\sigma' = 10\text{ kPa}$ (komora 10 kPa, pórový tlak 0 kPa; komora 110 kPa, pórový tlak 100 kPa)	93.18; 89.05; 34.07;	114.5	33.5	137.7	5.7
nasycený písek v triax. přístroji při efektivním napětí $\sigma' = 50\text{ kPa}$ (komora 150 kPa, pórový tlak 100 kPa)	93.18; 89.05; 34.07;	167.8	33.7	216.5	2.2
nasycený písek v triax. přístroji při efektivním napětí $\sigma' = 100\text{ kPa}$ (komora 200 kPa, pórový tlak 100 kPa)	93.18; 89.05; 34.07;	212.5	35.6	279.8	2.1

Z tabulky 7.1 vyplývá, že rychlosti příčných vln získané podle vztahu 6.1 jsou vyšší než ty určené podle vztahu 2.3. Rozdíl mezi oběma rychlostmi roste s tuhostí zkoušeného materiálu a napětím, kterému je vzorek vystaven. To, že podle vztahu 6.1 byla skutečně určena rychlost smykových vln, vychází nejen z nezávislosti určené rychlosti na délce vzorku, ale je potvrzeno i identifikací některých druhotných vln.

Identifikací druhotných vln v časech před příchodem příčné vlny se dá vysvětlit jev nazývaný podle práce Jovicic a kol. (1996) jako overshooting (srovnej výstupní signál obdélníkového impulsu na obr. 6.1 s obr. 2.10). Vlnami identifikovanými v oblasti tzv. overshootingu jsou pravděpodobně: podélná od stěny vzorku odražená vlna, čelná vlna šířící se vodou v komoře, čelná vlna šířící se plexisklovou stěnou komory triaxiálního přístroje.

Pokud jde o metodiku měření ve frekvenční oblasti, bylo zjištěno, že oproti výsledkům práce Greening a Nash (2004) nebyly směrnice přímek získané interpretací lineárních částí frekvenčně-fázového grafu stejné v celém intervalu frekvencí použitého vstupního signálu (viz obr. 6.2). To znamená, že v použitém intervalu frekvencí není registrována pouze jedna dominantní vlna a že na tomto intervalu frekvencí dochází také ke změnám poměrů amplitud mezi významnými registrovanými vlnami. Z jednotlivých lineárních částí

frekvenčně-fázového grafu byly podle vztahu 2.7 určeny časy, z nichž některý by mohl odpovídat času příchodu příčné vlny. Všechny tímto způsobem určené časy byly větší než čas odpovídající příchodu příčné vlny určený v časové oblasti. Pokud by interpretace v časové oblasti nebyla správná a některý z časů určených ve frekvenční oblasti by skutečně odpovídal příchodu příčné vlny, nevíme, který z nich by to byl.

Rozdíl mezi časy určenými ve frekvenční oblasti a časem průchodu příčné vlny určeným v oblasti časové se dá vysvětlit vlivem registrace druhotných vln, z nichž některé byly ve výstupních signálech v časové oblasti identifikovány. Použití interpretace ve frekvenční oblasti pro určení času příchodu příčné vlny je z výše popsaných důvodů nevhodné.

## 7.1 Návrh úpravy metodiky měření pomocí BE

Pro úspěšné určení času průchodu příčné vlny je nutné použít interpretace měření v časové oblasti. Pro přesné určení času průchodu příčné vlny vzorkem je nutné znát chování vysílacího elementu, tj. čas potřebný k jeho aktivaci a polaritu prvního nasazení. Určit polaritu prvního nasazení je možné na základě měření s BE umístěnými na kontakt. Pro určení zpoždění pohybu vysílacího elementu byl úspěšně použitý laserový interferometr.

Jovicic a kol. (1996) uvádí, že čas příchodu příčné vlny, za předpokladu použití vhodné frekvence vstupního signálu, kdy nedochází k overshootingu ani efektu blízké zóny, je možné určit přímo na obrazovce osciloskopu.

Jako daleko vhodnější pro úspěšné nalezení příchodu příčné vlny se ukázala společná interpretace více výstupních signálů pro různé tvary a frekvenční obsahy vstupního budícího signálu. Potom je možné nalézt takový výstupní signál, který je nejméně ovlivněn efektem blízké zóny a overshootingem. Z tohoto výstupního signálu potom lze podstatně spolehlivěji určit čas příchodu příčné vlny postupem podle Jovicice a kol. (1996). Pro získání co nejpřesnějšího času průchodu příčné vlny vzorkem je nutné od času určeného interpretací výstupního signálu odečíst čas potřebný k aktivaci elementu (v našem případě 20 mikrosekund, zjištěno pomocí proměření laserovou interferometrií).

Při výpočtu rychlostí příčných vln tak, aby tato rychlost byla nezávislá na délce vzorku, byl použit vztah 6.1. Ve vztahu 6.1 je na rozdíl od vztahu 2.3 (Viggiani a Atkinson 1995) uvažována dráha šíření příčné vlny jako délka vzorku zmenšená o polovinu součtu do vzorku pronikajících elementů.

Pro ověření použitelnosti vztahu 6.1 pro výpočet rychlosti příčných vln v triaxiálním přístroji je nutné zjistit:

- zda je tímto způsobem určená rychlost příčných vln nezávislá na tvaru vzorku (výšce a průměru) pro několik odlišných materiálů
- zda čas potřebný k aktivaci vysílacího elementu závisí na jeho tlumení (tuhost vzorku, napětí v triaxiální komoře)

## 8. ZÁVĚR

V diplomové práci byla analyzována frekvenční a časová metoda určení času průchodu příčné vlny vzorkem zeminy v triaxiálním přístroji pomocí piezokeramických krystalů tzv. bender elements. Na základě identifikace druhotných vln byl vysvětlen rozdíl mezi časy určenými v časové a frekvenční oblasti. Byla navržena a demonstrována metodika, s jejíž pomocí lze v časové oblasti ve výstupním signálu spolehlivě identifikovat čas příchodu příčné vlny. Bylo zjištěno, že použití frekvenčního způsobu interpretace pro určení času příchodu příčné vlny není obecně vhodné.

Bylo provedeno nezávislé testování chování bender elements jako zdroje elastického vlnění. Laserovým interferometrem bylo změřeno časové zpoždění potřebné k aktivaci vysílacího elementu. O tento čas je třeba opravit naměřené časy příchodu získané měřením v časové oblasti.

Na základě měření na sérii různě dlouhých vzorků a za předpokladu nezávislosti rychlosti šíření příčných vln na délce vzorku bylo zjištěno, že vzdálenost, se kterou je třeba počítat při určování rychlosti šíření příčné vlny, je dána vzdáleností středů bender elements. Tímto způsobem určené rychlosti šíření příčných vln na vzorcích s odlišnou výškou mají relativní chybu v řádu jednotek procent.



## 9. PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

Atkinson, J. H. (2000). Non-linear soil stiffness in routine design. *Geotechnique* 50, No. 5, str. 487-508.

Blewett, J., Blewett, I. J. & Woodward, P. K. (1999). Measurement of shear wave velocity using phase sensitive detection. *Canadian Geotechnical Journal* 36, No. 5, str. 934-939.

Bodare, A. & Massarsch, K. J. (1984). Determination of shear wave velocity by different cross-hole methods. In: *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, str. 39-45.

Boháč, J., Herle, I. & Mašín, D. (2002). Stress and strain dependent stiffness in a numerical model of a tunnel. In: *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Soil Structure Interaction in Urban Civil Engineering, "Planning and Engineering for the Cities of Tomorrow"*, ETH Zurich, str. 357-364.

Chen, T. & Lawton, D. C. (1991). Seismic modeling for P-P and P-SV AVO analysis. *CREWES Research Project Report*, str. 342-348.

Dyvik, R. & Madshus, C. (1985). Laboratory measurement of  $G_{\max}$  using bender elements. In: *Proc. ASCE Annual Convention: Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, Detroit, str. 186-197.

Greening, P. D. & Nash, D. F. T. (2004). Frequency domain determination of  $G_0$  using bender elements. *ASTM Geotechnical Testing Journal* 27, No. 3

Jovicic, V., Coop, M. R. & Simic, M. (1996). Objective criteria for determining  $G_{\max}$  from bender element tests. *Geotechnique* 46, No. 2, str. 357-362

Jovicic, V. (1997). *The measurement and interpretation of small strain stiffness of soils*. PhD thesis, Geotechnical Engineering Research Centre, City University, London.

Kaarsberg, E. A. (1975). Elastic-wave velocity measurements in rocks and other materials by phase-delay methods. *Geophysics* 40, str. 901-955.

Lings, M. L. & Greening, P. D. (2001). A novel bender/extender element for soil testing *Geotechnique* 51, No. 8, str. 713-717.

Nomokonov, V.P. (1966). Geologičeskoje obosnovanije sejsmorazvjedki. Sejsmičeskije svojstva gornych porod. In: Gurvič, I. I. & Nomokonov, V. P., Sejsmorazvjedka, spravočnik geofyzika 4, Moskva, Nedra, str. 183-210.

Sanches-Salintero, I., Roesset, J. M. & Stokoe, K. H. (1986). *Analytical studies of body wave propagation and attenuation*. Report GR 86-15, University of Texas, Austin.

Schultheiss, P. J.(1982) *The influence of packing structure on seismic wave velocities in sediments*. Marine Geological Report No. 83/1, University College of North Wales.

Shirley, D. J. (1978). An improved shear wave transducer. *Journal of the Acoustical Society of America* 63, No. 5, str. 1643-1645.

Shirley, D. J. & Hampton, L. D. (1978). *Shear-wave measurements in laboratory sediments*. *Journal of the Acoustical Society of America* 63, No. 2, str. 607-613.

Sosna, K. (2003). *Pevnostní charakteristiky směsí písku*. MS Diplomová práce, katedra inženýrské geologie PřF-UK, Praha, 101 str., 3 příl.

Viggiani, G. & Atkinson J. H. (1995). The interpretation of the bender element tests. *Geotechnique* 45, No. 1, 149-155.

## **PŘÍLOHA 1- program propickwin**

### **Určení rychlosti smykové vlny na vzorcích zemín v triaxiálním přístroji**

%program propickwin slouží k načtení naměřených souborů; synchronizaci, normování a otočení polarizace výstupních signálů; vytvoření matice pro vyhodnocení v programu Pickwin

```
clear all; close all; clc;
cesta='C:\Documents and
Settings\Mates\Plocha\Diplomka\Data\Pisek\0207\5\'; %složka s naměřenými
soubory
soubory={'1.txt', '2.txt', '4.txt', '5.txt', '10.txt', '20.txt', 'ctverec.txt'}; %
naměřené soubory
```

```
frekvence=[1000,2000,4000,5000,10000,20000,982]; %vstupní frekvence u
ctverce vznik signálu
```

```
CH0=zeros(20000,length(soubory)+1); %nastavení matice vstupu
CH1=zeros(20000,length(soubory)+1); %nastavení matice výstupu
CH0_S=zeros(20000,1); %nastavení součtové vlny-vstup
CH1_S=zeros(20000,1); %nastavení součtové vlny-výstup
```

```
for i=1:length(soubory)
    soubor=strcat(cesta,soubory{1,i}); %cesta k souboru
    [Time,Ch0,Ch1]=nacteni(soubor); %nacteni měřeného souboru
    txt=[Time Ch0 Ch1];
    if i==length(soubory) %srovnání vzestupu pro obdelnik. impuls
        j=frekvence(1,i); %čas příchodu u ctverce
        fvz=1/(Time(2,1)-Time(1,1));
        n=length(Time)-j+1;
    else
        [n,j,fvz]=srovnani(txt,frekvence(1,i)); %srovnání výstupu pro sinovy
impuls
    end
    I(1,i)=j; %číslo vzorku nasazení vstupního signálu
    Fvz(1,i)=fvz; %matice vzorkovacích frekvencí
    N(1,i)=n; %matice delek výstupu
    CH0(1:n,i)=Ch0(j:n+j-1,1); %matice vstupu
    CH0_S(1:n,1)=CH0_S(1:n,1)+Ch0(j:n+j-1,1)/max(abs(Ch0(j:n+j-
1,1))); %součt. vlna vstup
    CH1(1:n,i)=(-1)*Ch1(j:n+j-1,1); %matice výstupu a kompenzace
zesilovace
    CH1_S(1:n,1)=CH1_S(1:n,1)+(-1)*Ch1(j:n+j-1,1)/max(abs(Ch1(j:n+j-
1,1))); %součt. vlna výstup
end
```

```
CH0(1:end,length(soubory)+1)=CH0_S; %zarazení součtové vlny mezi záznamy-
vstup
CH1(1:end,length(soubory)+1)=CH1_S; %zarazení součtové vlny mezi záznamy-
výstup
```

```
figure
[CH0_norm,MX_CH0,PR_CH0]=vykresleni(CH0,fvz); %vykreslení vstupních
signálů
figure
[CH1_norm,MX_CH1,PR_CH1]=vykresleni(CH1,fvz); %vykreslení výstupních
signálů
```

```
CH0_norm_inv=CH0_norm';
CH1_norm_inv=CH1_norm';
```

## **PŘÍLOHA 1- program propickwin**

### **Určení rychlosti smykové vlny na vzorcích zemin v triaxiálním přístroji**

```
pickwin_soubor='matlab\ascii_CH0.txt';%ukladani souboru vstupnich signalu
pro pickwin
pickwin_soubor=strcat(cesta,pickwin_soubor);
save(pickwin_soubor,'CH0_norm_inv','-ASCII');

pickwin_soubor='matlab\ascii_CH1.txt';%ukladani souboru vystupnich signalu
pro pickwin
pickwin_soubor=strcat(cesta,pickwin_soubor);
save(pickwin_soubor,'CH1_norm_inv','-ASCII');

function [Time,Ch0,Ch1]=nacteni(soubor)
%slouzi k nacteni casu Time, vstupniho signalu Cho a vystupniho signalu Ch1
%ze souboru
fid=fopen(soubor);
z='START DATA';%zacatek dat
k='END DATA';%konec dat
i=0;
while 1
    tline = fgetl(fid);
    i=i+1;
    if strcmp(z,tline) == 1
        zac=i;%pozice zacatku
    end
    if strcmp(k,tline) == 1
        kon=i;%pozice konce
    end

    if ~ischar(tline), break, end

end
N=kon-zac-2;%pocet radku
[Time Ch0 Ch1]=textread(soubor,'%f %f %f',N,'headerlines',zac+1);%vysledne
vektory
fclose(fid);

function [n,i,fvz]=srovnani(soubor,f)
%srovna zaznamy tak, ze zacinaji vsechny v case prvnioho nasazeni vstupniho
%signalu (cas nula)
%soubor=matice zaznamu, cas , vstup, vystup
%f= frekvecne vstupniho sin. impulsu
%i=poradi vzorku,kdy doslo ke vstupu
%n=pocet vzorku vystupniho signalu pro orezani
%fvz=vzorkovaci frekvence zaznamu
fvz=1/(soubor(2,1)-soubor(1,1)); %vzorkovaci frekvence zaznamu
t=0:1/fvz:1/f; %casovy vektor pro sinusovku
vstup=sin(2*pi*f*t);
kor=xcorr(soubor(:,2),vstup);%nalezeni prvnioho nasazeni vstup. signalu
[K,i]=max(kor);
i=i-length(soubor)+1;
CH=soubor(i:end,3);% posunuty a orezany vystupni signal(nula v prvniem nas.
vstup. signalu)
n=length(CH);%pocet vzorku vystupniho signalu pro orezani
```

## **PŘÍLOHA 1- program propickwin**

### **Určení rychlosti smykové vlny na vzorcích zemín v triaxiálním přístroji**

```
function [MATnorm,MX,PR]=vykresleni(M,fvz)
%M=matice; fvz=vzorkovaci frekvence zaznamu v M
%MATnorm=normalizovana a vystredena M
%MX=maxima pro normalizaci
%PR=velikti posunu zaznamu pro vzstradeni

[a,b]=size(M);
P=a;
scale=1.5; %zvetseni
t=(P-1)/fvz;
PR=mean(M);
MX=max(abs(M));
for i=1:b
    MATnorm(1:P,i)=M(1:P,i)/MX(i)-PR(i);%normovani a vystredeni matice
    V_M((i-1)*P+1:i*P) =MATnorm(:,i);%radkovy vektor z matice MG
end
strips(V_M,t,fvz,scale);%vykresleni
```

## **PŘÍLOHA 2- program casy\_prichodu**

### **Určení rychlosti smykové vlny na vzorcích zemin v triaxiálním přístroji**

% program casy\_prichodu slouzi k vypočtu casu prichodu vln které mohou byt registrovany prijimacim BE

```
close all; clear all; clc;
```

```
%zadani parametru
```

```
v = 0.07763;%vyska vzorku [m]
l12= 0.01555; %soucet delek BE
L = v-l12/2; %vzdalenost sireni primych vln
r = 0.01881;%prumer vzorku;
R = (132.8-2*r)/2;%vzdalenost mezi
dr = 0.005; %tloustka steny
vp1 = 1600; % rychlost p-vln v zemine [m/s]
vs1 = 280; % rychlost s-vln v zemine [m/s]
vp2 = 1430; % rychlost p-vln ve vode [m/s]
vs2 = 0; % rychlost s-vln ve vede [m/s]
vp3 = 2740; % rychlost p-vln v plexiskle [m/s]
```

```
cesta='C:\Documents and
Settings\Mates\Flocha\Diplomka\Data\Pisek\2607\100_200\matlab\';
soubory='casy_prichodu.txt'; %vystupni soubor TADY
soubor=strcat(cesta,soubory);
```

```
fid = fopen(soubor,'w');
fprintf(fid,'Vzdalenost sireni primych vln : L = %f10 [m]\n',L);
fprintf(fid,'Polomer vzorku : r = %f10 [m]\n',r);
fprintf(fid,'Vzd. mezi vzorkem a komorou : R = %f10 [m]\n',dr);
fprintf(fid,'Rychlost p-vln v zemine : vp1 = %f10 [m/s]\n',vp1);
fprintf(fid,'Rychlost s-vln v zemine : vs1 = %f10 [m/s]\n',vs1);
fprintf(fid,'Rychlost p-vln ve vode : vp2 = %f10 [m/s]\n',vp2);
fprintf(fid,'Rychlost s-vln ve vode : vs2 = %f10 [m/s]\n',vs2);
fprintf(fid,'Rychlost p-vln v plexiskle : vp3 = %f10 [m/s]\n',vp3);
```

```
tp=1000*L/vp1; ts=1000*L/vs1;%casy sireni primych vln
fprintf(fid,'Cas prichodu prime p-vlny : tp = %f10 [s]\n',tp);
fprintf(fid,'Cas prichodu prime s-vlny : ts = %f10 [s]\n',ts);
```

```
tppp=1000*(3*L+l12)/vp1;tsss=1000*(3*L+l12)/vs1;%vlny odrazene od podstav,i
s delkou BE
fprintf(fid,'Cas prichodu od podstav odrazene p-vlny : tppp = %f10
[s]\n',tppp);
fprintf(fid,'Cas prichodu od podstav odrazene s-vlny : tsss = %f10
[s]\n',tsss);
fprintf(fid,'');
```

```
tpp=1000*2*((L/2)^2+r^2)^(1/2)/vp1;
tss=1000*2*((L/2)^2+r^2)^(1/2)/vs1;%odrazene od steny
fprintf(fid,'Cas prichodu od steny odrazene p-vlny : tpp = %f10
[s]\n',tpp);
fprintf(fid,'Cas prichodu od steny odrazene s-vlny : tss = %f10
[s]\n',tss);
```

## **PŘÍLOHA 2- program casy\_prichodu**

### **Určení rychlosti smykové vlny na vzorcích zemin v triaxiálním přístroji**

```
%vlna ps ,premenena na stene
da=5*pi/180;a1=0*pi/180:da:90*pi/180; sinal=sin(a1); sina2=vs1/vp1*sinal;
a2=asin(sina2);
Li=r*(tan(a1)+tan(a2)); dLi=abs(Li-L); [C,i]=min(dLi);
h=1;
    while C > L/1000 %hledani uhlu dopadu a odrazu pro vlnu ps (sp)
        da=2*da/20; Sa1=a1(i)-10*da; Ha1=a1(i)+10*da;
        a1=Sa1:da:Ha1; sinal=sin(a1); sina2=vs1/vp1*sinal; a2=asin(sina2);
        Li=r*(tan(a1)+tan(a2)); dLi=abs(Li-L); [C,i]=min(dLi);
        h=h+1;
    end
alf1ps=a1(i); alf2ps=a2(i); %uhel dopadu p a premeny s
fprintf(fid,'Uhel dopadajici p-vlny      : alf1ps = %f10
[°]\n',alf1ps*180/pi);
fprintf(fid,'Uhel premenene s-vlny      : alf2ps = %f10
[°]\n',alf2ps*180/pi);
s_ps=r/cos(alf1ps)+r/cos(alf2ps); %draha ps
t_ps=1000*(r/cos(alf1ps)/vp1+r/cos(alf2ps)/vs1); %cas ps
fprintf(fid,'Cas prichodu premenene ps-vlny      : tss = %f10 [s]\n',t_ps);

%lomena vlna PPP
alf_ppp=180/pi*asin(vp1/vp2); x=2*r/cos(pi/180*alf_ppp);
if x < L
    t_ppp= 1000*(x/vp1+(L-x)/vp2);
    fprintf(fid,'Cas prichodu lomene ppp-vlny      : t_ppp = %f10
[s]\n',t_ppp);
else
    fprintf(fid,'Lomena vlna ppp nedopada na BE. ');
end

%lomena vlna SSS
if vs2 == 0
    fprintf(fid,'Lomena vlna t_sss se nesiri v kapalinach.\n ');
else
alf_sss=180/pi*asin(vs1/vs2); x=2*r/cos(pi/180*alf_sss);
if x < L
    t_sss= 1000*(x/vs1+(L-x)/vs2);
    fprintf(fid,'Cas prichodu lomene sss-vlny      : t_sss = %f10
[s]\n',t_sss);
else
    fprintf(fid,'Lomena vlna sss nedopada na BE.\n ');
end
end

%cas prichodu celne vlny jdouci po skle komory t_ppppp
alfai=vp1/vp3; %uhel dopadu na rozhrani vzorek-voda v komore
alfai=vp2/vp3; %kriticky uhel dopadu na rozhrani voda-plexisklo komory
t_ppppp = 2/vp1*r/cos(alfai)+2/vp2*R/cos(alfai)+(L-2*r*tan(alfai)-
2*r*tan(alfai))/vp3;
fprintf(fid,'Cas prichodu lomene vlny t_ppppp      : t_ppppp = %f10
[s]\n',t_ppppp);
fclose(fid);
```

### **PŘÍLOHA 3- program frekv\_analyza**

#### **Určení rychlosti smykové vlny na vzorcích zemín v triaxiálním přístroji**

% program frekv\_analyza slouží k výpočtu ke zpracování a interpretaci měření ve frekvenční oblasti

```
clear all;close all; clc;
```

% načte ze souboru do matice

```
cesta='C:\Documents and Settings\Mates\Plocha\Diplomka\Data\Pisek\2607\100_200\';
```

```
soubory='sw5.txt'; %
```

TADY

```
soubor=strcat(cesta,soubory);
```

```
[time CH_0 CH_1]=nacteni(soubor);
```

```
CH_1=(-1)*CH_1/max(abs(CH_1));
```

```
namereno=subplot(211);
```

```
plot(time,CH_0,'r');%graf sweepu
```

```
hold on;
```

```
plot(time,CH_1,'b');% výstupní signal
```

```
set(gca,'XTick',0:0.001:0.01);
```

```
xlabel('t [ms]');
```

```
ylabel('A [V]');
```

% funkce vzájemné korelace

```
k=xcorr(CH_1,CH_0);%korelace vstupu a výstupu
```

```
fvz=1/(time(2)-time(1));%vzorkovací frekvence
```

```
poc=(length(k)+1)/2;%pocatek časové osy
```

```
k=k(poc:end);
```

```
tk=(0:1/fvz:(length(k)-1)*1/fvz);%časový vektor pro funkci vzájemné
```

```
korelace
```

```
[A,i]=max(k);
```

```
Tk=tk(i)*1000;%čas příchodu ze vzájemné korelace
```

```
korelogram=subplot(212);
```

```
plot(tk,k);%korelogram
```

```
slozka='matlab\sw5_casy.jpg';%
```

TADY

```
uloz=strcat(cesta,slozka);
```

```
saveas(gcf,uloz)%uložení obrázku
```

```
hold off;
```

%vstup

```
x=round(log(length(CH_0))/log(2));%2^x je počet vzorků fft
```

```
nfft=2^x;%počet vzorků pro fft
```

```
LSI=fft(CH_0,nfft);%lineární spektrum vstupu
```

```
[A,por]=min(abs(fvz*(0:(nfft/2)-1)/nfft-20000));
```

```
f0=fvz*(0:por-1)/nfft;%frekvenční vektor vstupu
```

```
ASI=abs(LSI(1:por));%amplitudové spektrum vstupu
```

```
figure
```

```
spevs=subplot(411);
```

```
plot(f0,ASI);%graf amplitudového spektra vstupu
```

```
set(gca,'XTick',0:1000:20000);
```

```
set(gca,'XMinorTick','on');
```

```
xlim([0 20000]);
```

```
xlabel('f [Hz]');
```

```
ylabel('A ');
```

```
MAT(1:por,1)=f0; %MAT je matice výstupu
```

```
MAT(1:por,2)=ASI;
```



### **PŘÍLOHA 3- program frekv\_analyza**

#### **Určení rychlosti smykové vlny na vzorcích zemín v triaxiálním přístroji**

```
%vystup
LSO=fft(CH_1,nfft);%linearni spektrum vystupu
ASO=abs(LSO(1:por));%amplitudove spektrum vystupu
[A,i]=min(abs(f0-5000));% normovani max hodnotou namerenou v sinusovkach
spevy=subplot(412);
plot(f0,ASO/ASO(i));%graf amplitudoveho spektra vystupu
hold on;
set(gca,'XTick',0:1000:20000);
set(gca,'XMinorTick','on');
xlim([0 20000]);
xlabel('f [Hz]');
ylabel('A ');
MAT(1:por,3)=ASO;
hold off;

%spektrum vzajemne korelace
VVS=LSO.*conj(LSI);%vzajemne vykonove spektrum
AVVS=abs(VVS(1:por));%amplitudove vzaj. vyk. spektrum
VVspeA=subplot(413);
plot(f0,AVVS);%graf ampl. vzaj. vyk. spektra
set(gca,'XTick',0:1000:20000);
set(gca,'XMinorTick','on');
xlim([0 20000]);
xlabel('f [Hz]');
ylabel('A ');
FS=angle(VVS(1:por));%faze vzajemneho vykonostniho spektra
VVspeF=subplot(414);
plot(f0,FS);%graf faze vzaj. vyk. spektra(nerozbalenej)
set(gca,'XTick',0:1000:20000);
set(gca,'XMinorTick','on');
xlim([0 20000]);
xlabel('f [Hz]');
ylabel('FAZOVY POSUN [rad]');
MAT(1:por,4)=FS;

slozka='matlab\sw5_spektra.jpg';% TADY
uloz=strcat(cesta,slozka);
saveas(gcf,uloz)%ulozeni obrazku

figure
UFS=(unwrap(FS))';%rozboleni faze vyrezu
plot(f0,UFS,'o','MarkerEdgeColor','b','MarkerSize',5); %rozboleni fazoveho
spektra
set(gca,'XTick',0:1000:20000);
set(gca,'XMinorTick','on');
set(gca,'XGrid','on');
xlim([0 20000]);
xlabel('f [Hz]');
ylabel('A ');
hold on;

roz = 'y'; %zajmove frekvencni intervaly
i=1;

while roz == 'y'
fD(i,1) = input('zadej dolni zajmovou frekvenci [ Hz ] :'); %dolni
frekvence vyrezu
fH(i,1) =input('zadej horni zajmovou frekvenci [ Hz ] :'); %horni
frekvence vyrezu
```

### **PŘÍLOHA 3- program frekv\_analyza**

#### **Určení rychlosti smykové vlny na vzorcích zemin v triaxiálním přístroji**

```
[A,ifD]=min(abs(f0-fD(i,1)));
[A,ifH]=min(abs(f0-fH(i,1)));
koef=polyfit(f0(ifD:ifH),UFS(ifD:ifH),1);%koeficienty linearni regrese
koefb(i,1)=koef(1,1);
S=polyval(koef,f0(ifD:ifH));%proloženi primky
T(i,1)=abs(1000*atan(koefb(i,1))/(2*pi));%určení času příchodu ve
frekvencni oblasti
plot(f0(ifD:ifH),S,'r','LineWidth',2);
hold on;
roz=input('Chces zadat dalsi frekvencni interval? [y] ','s'); %dolni
frekvence vyrezu
i=i+1;
end
hold off;

slozka='matlab\sw5_faze.jpg';% TADY
uloz=strcat(cesta,slozka);
saveas(gcf,uloz)%ulozeni obrazku

slozka='matlab\datasw5.txt';% TADY
uloz=strcat(cesta,slozka);
save(uloz,'MAT','-ASCII');
fid = fopen(uloz,'a');
fprintf(fid,'Cas z korelace : Tk = %f10 [ms]\n',Tk);
for i=1:length(fD)
fprintf(fid,'Cas ze spekter pro frekvencni rozsah %6.1f - %6.1f : T =
%5.4f [ms]\n',fD(i),fH(i),T(i));
end
fclose(fid);

function [Time,Ch0,Ch1]=nacteni(soubor)
%slouzi k nacteni casu Time, vstupniho signalu Cho a vystupniho signalu Ch1
%ze souboru
fid=fopen(soubor);
z='START DATA';%zacatek dat
k='END DATA';%konec dat
i=0;
while 1
tline = fgetl(fid);
i=i+1;
if strcmp(z,tline) == 1
zac=i;%pozice zacatku
end
if strcmp(k,tline) == 1
kon=i;%pozice konce
end

if ~ischar(tline), break, end

end
N=kon-zac-2;%pocet radku
[Time Ch0 Ch1]=textread(soubor,'%f %f %f',N,'headerlines',zac+1);%vysledne
vektory
fclose(fid);
```

