

عنوان مقاله :
تعیین نسبت میرایی مواد و سرعت موج برشی
با استفاده از آزمایش
Seismic Cone Penetration (SCPT)

تهیه کننده: علی بهاری زاده - شماره دانشجویی: ۸۶۱۱۴۸۰۰۱

استاد راهنما:
جناب آقای دکتر حداد

چکیده :

از آزمایش نفوذ مخروط (SPCT) برای تعیین تغییرات سرعت موج برشی (و طولی) در عمق خاک در موقعیت‌های متفاوتی در بلژیک استفاده شده است. استفاده از روش همگرایی با افزایش تعداد نمونه‌ها ثابت کرده است که می‌توان از آزمایش SPCT یک روش مطمئن استفاده کرد. علاوه بر این، از روش ثبت شیب طیفی (SRS) در تبدیل فوریه در پاسخ‌های به دست آمده جهت تعیین تغییرات میرایی مصالح با عمق استفاده شده است. این روش برای امواج محاسبه شده تولیدی برای سه نوع پروفیل مختلف خاک با مشخصات معلوم و شتاب افقی اندازه‌گیری شده در طول آزمایش SPCT در دو سایت می‌باشد.

اثر روش‌های تحلیل سیگنال در نسبت میرایی محاسبه شده برای مصالح به دست آورده شده است. اثر قابل ملاحظه‌ای از طول پنجره در سیگنال‌های پیش‌بینی شده بر روی نسبت میرایی مواد محاسبه شده به کار رفته است. بنابراین به این نتیجه رسیده است که استفاده از تابع پنجره باید حتی‌الامکان محدود شود در یکی از دو سایت نتایج آزمایش ستون تشدید و ارتعاش پیچشی بر روی نمونه‌ای دست نخورده جهت ارزیابی قادر سرعت موج برشی و نسبت میرایی مواد در سایت اندازه‌گیری شده است.

۱- مقدمه

برای آنالیزهای پاسخ زمینی در نسبت‌های کوچک تغییر شکل (کرنش برشی مهندسی $\gamma \leq 10^{-5}$) در موارد مربوط به مسائل دینامیک اندر کنش خاک-سازه در سطوح تحریک کم و جهت مطالعه ارتعاشات ناشی از بار گرافیک در مناطق مسکونی عمدتاً فرض می‌گردد که خاک دارای یک رفتار الاستیک خطی است. نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده این مطلب هستند که کرنش‌های کوچک خصوصیات دینامیکی خاک (برشی M نسبت به V) به طور عمده‌ای پیش‌بینی صحت مدل‌های عددی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند، جدا از ضرائب الاستیک یک توضیح و تفسیر مناسب از میرایی مواد در خاک جهت پیش‌بینی‌های صحیح لازم است. میرایی مصالح به واسطه اصطکاک بین ذرات جامد در اسکلت خاک و به واسطه حرکت نسبی بین ذرات و آب منفذی به وجود می‌آید و می‌بایست از میرایی هندی متمایز گردد. میرایی مصالح عمدتاً در حوزه‌ی فرکانس تعیین می‌گردد و با استفاده از ضرائب پیچیده Lame صورت می‌پذیرد قسمت موهومی وابسته به سیستم‌های میرایی مواد هیسترتیک D_p و D_s در تغییر شکل‌های معکوس و ... می‌باشد معادله 1 و 2

$$\mu^* = \mu(1 + 2D_s i) \quad (1)$$

$$(\lambda + 2\mu)^* = (\lambda + 2\mu)(1 + 2D_p i) \quad (2)$$

جهت تعیین مشخصات دینامیک خاک آزمایشات در محل بسیاری قابل انجام است. تست‌های آزمایشگاهی (ستون تشدید) ارتعاش پیچشی آزاد آزمایش المان بندر (آزمایش سه محوری) روش‌های مناسبی برای انجام مطالعات پارامتریک (تنش محصورکنندگی و دانسیته نسبی) با هزینه نسبی کم می‌باشند. استخراج نمونه دست نخورده در خاک‌های غیر چسبنده اشباع هوا امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این نمونه کار تنها دربرگیرنده مشخصات حجم محدودی از خاک می‌باشد. آزمایش ستون تشدید قابلیت تعیین M و D_s در حدود تغییر شکل‌های کوچک را فراهم می‌آورد. ولیکن آزمایش آونگ اصطکاک پیچشی به تغییر شکل‌های بزرگ محدود می‌باشد. آزمایش بندر نیز جهت M به کار می‌رود ولیکن تحقیقات اخیر نشان دهنده این مطلب است که تعیین D_s مشکل می‌باشد و این مسئله به واسطه بازه فرکانس نسبی بالای آزمایش (1-5KHz) می‌باشد. آزمایش سه محوری نیز در فرکانس‌های پایین‌تر قابل انجام است (1-100Hz) اما سطوح کرنشی بالاتر هستند ($8 > 10^{-4}$) آزمایش بندر قابلیت انجام آزمایش در تغییر شکل‌های کوچکتر را فراهم می‌آورد.

از معایب روش‌های آزمایشگاهی در مقایسه با روش‌های صحرائی و سایت در این است که در آزمایشات صحرائی تنش واقعی و دانسیته نسبی خاک حفظ می‌شود. رایج است که تفاوت بین روش‌های آزمایشگاهی مخرب (SCPT, Cross-hole, down-hole) با آزمایشات غیر مخرب همانند آنالیز طیفی امواج سطحی (ASW) مشخص کرده که دسته دوم نیاز به حفر گمانه ندارند که این یک عامل اقتصادی است در حالی که آزمایشات آزمایشگاهی همچون ستون تشدید و آونگ پیچشی را می‌توان به عنوان روش‌های جهت تعیین نسبت میرایی مواد در نظر گرفت و آزمایشات آزمایشگاهی در تعیین میرایی مواد هنوز در حد اولیه هستند. آقای لای و همکاران کارهای بنیانگذاری در راستای تعیین نسبت میرایی مواد از آزمایش SASW انجام داده‌اند و یک الگوریتم شبیه‌سازی برای تعیین μ_0 و D_s در هر لایه بر اساس تغییر شکل‌های اولیه از تعداد موج تابش مستقل از فرکانس (فاز سرعت و کاهندگی در مقایسه با توابع انتقال یافته محاسبه شده از طریق منحنی‌های آزمایشگاهی کاهندگی به انجام رسانده‌اند.

در این مقاله تمرکز اصلی بر روی استفاده از روش SCPT جهت تعیین سرعت موج برشی و به طور خاص تعیین میرایی مواد می‌باشد. آقای رابرتسون و همکاران از جمله نفرات اولیه بودند که جهت تعیین سرعت انتشار امواج در خاک از روش SCPT استفاده نمودند و در طی مطالعات مختلف نشان دادند که نتایج آزمایشات Cross-hole shooting و SCPT دارای تفاوت خوبی با یکدیگر می‌باشند امروزه استفاده از روش SCPT به عنوان یک روش مطمئن جهت تعیین سرعت امواج به کار می‌رود پیشرفت‌های بسیاری جهت تعیین نسبت میرایی با عمق با استفاده از روش SCPT که کمی بحث برانگیز است نیز انجام گرفته است. نتایج به دست آمده از روش ضرائب کاهندگی وابسته به فرضیات میرایی هندی می‌باشد ولیکن در روش شیب نسبت طیفی (SRS) میرایی هندسی و انعکاس و انکسار امواج در آن اثرگذار نیست.

این مقاله متمرکز در رابطه با آزمایش SCPT جهت تعیین کرنش‌های کوچک مشخصات خاک با تأکید بر کاربرد روش SRS جهت تعیین نسبت میرایی مواد اندازه‌گیری شده در طول SCPT می‌باشد. مقاله با یک خلاصه‌ای از آزمایش SCPT و روش‌های پردازش اطلاعات شروع می‌شود. قسمت دوم در رابطه با سیگنال‌های تولیدی که از مدل عددی شرایط SCPT در سه نوع خاک به کار رفته است تشریح شده است. این آنالیز تئوری در ادامه با دو کاربرد آورده شده است. مشخصات دینامیکی خاک (سرعت موج برشی و نسبت میرایی مواد) در ۵ سایت در بلژیک برای پارامترهای ورودی در یک مدل عددی برای ارتعاشات القاء شده در راه‌آهن و جاده می‌باشد. این آزمایشات اجازه ارزیابی و استفاده از SCPT با مواد مختلف خاک می‌باشد این مسئله در مقاله حاضر با دو مورد در دو سایت تشریح شده است.

سایت اول Waremmه که تحت اثر قطارهایی با سرعت بالا است که متشکل از یک لایه همگن لای بر بستر گچی می‌باشد و سایت دو در سایت دانشگاه Ghent متشکل از یک لایه همگن خاک ماسه‌ای بر روی ماسه لای‌دار می‌باشد.

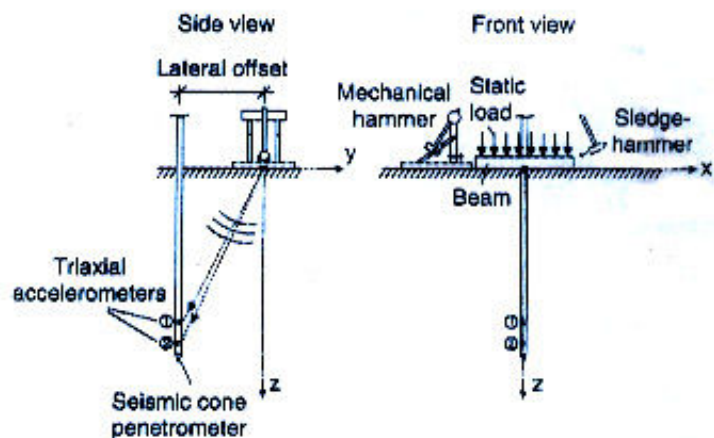


Fig. 1. Side view and front view of the SCPT setup using a dual cone.

۲- تجهیزات و ایستگاه‌گذاری (Set-up) آزمایش

شکل ۱ یک نمای کلی از ایستگاه‌گذاری آزمایش SCPT با استفاده از مخروط دبل نشان می‌دهد مخروط با استفاده از عامل تعیین کننده CPT به داخل خاک نفوذ داده می‌شود. دو شتاب‌نگار سه محوری در فاصله حدود یک متری از محل نوک مخروط قرار داده می‌شود. (شکل ۲). شتاب‌نگارها به وسیله پاسخ فرکانسی خطی آنها در طول کل بازده فرکانسی انتخاب گردیده‌اند ژئوفون‌های مینیاتور دارای فرکانس طبیعی در این بازه فرکانسی می‌باشد بنابراین برای اندازه‌گیری‌های پاسخ‌های دقیق مناسب نمی‌باشند. سرچشمه لرزه‌زا شامل یک میز فولادی که تحت اثر یک چکش یا چکش نوسانی برای تولید امواج برشی و قائم در طول خاک می‌باشد یک تحریک قائم قابلیت انتشار امواج طولی را دارد. فاصله بین نوک مخروط و تیرک در حدود ۱ تا ۱/۲ متر می‌باشد فرض می‌گردد که وسط تیرک دارای تقاطع با منبع تولید موج می‌باشد که برای محاسبه طول زمان عبور بین سرچشمه تولید و گیرنده‌ها به کار می‌رود.

تیرک فلزی توسط وزن عامل تعیین نیروی CPT برای تأمین تنش کوپل برای اصطکاک کافی بین تیرک و خاک و انتقال انرژی به خاک به کار می‌رود آزمایشات SCPT انجام شده در قالب مطالعه حاضر از یک سرچشمه غیر کوپل که در آن سیستمی از غلطک‌ها در بالای تیرک بنا نهاده شده‌اند تا تیرک را از عامل انتقال نیرو جدا ساخته و این هنگامی است که یک نیروی دینامیکی افقی توسط ضربه چکش بر تیرک وارد می‌گردد. از این طریق جرم کل سیستم دارای شتاب گردیده که این مسئله در مقایسه باروش سرچشمه معمولی بدون سیستم‌های غلطکی دارای شتاب بیشتری می‌باشد. مطالعات

مقایسه‌ای بین روش غیرکوپل و سرچشمه معمولی حاکی از اثر مثبت غلطک‌ها که باعث ایجاد امواج برشی با مقادیر ۳-۴ برابر بیشتر می‌باشد. اندازه‌گیر در پاسخ‌ها در هر دو شتاب‌نگار ثبت و ضبط شده و مورد آنالیز از طریق یک دستگاه کامپیوتر با استفاده از برنامه مطلب که تحلیل سیگنال‌ها را برخواهد داشت. فرکانس نمونه عموماً در حدود ۲ هزار هرتز می‌باشد. (۲۰۰۰Hz). آزمایش عموماً با بازه‌های مختلف نیم متری در نوک مخروط جهت استحصال پروفیل خاک انجام می‌پذیرد. برای تحریکات افقی فقط پاسخ در محور افقی به موازات تیرک تولید کننده لرزه مورد آنالیز قرار گرفته است. بنابراین هیچ‌گونه سرعت امواج فشاری مشخص نمی‌کند.

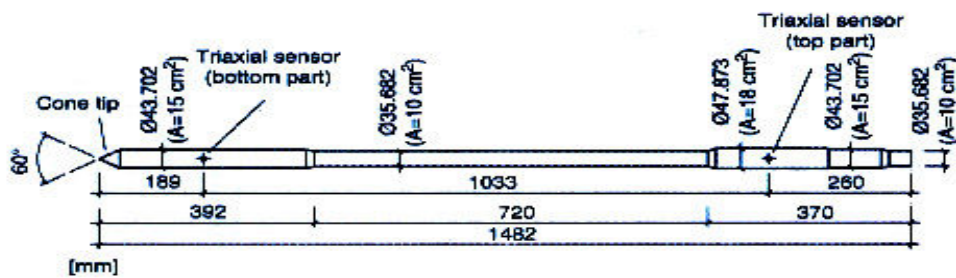


Fig. 2. Dual cone in a 1 m configuration.

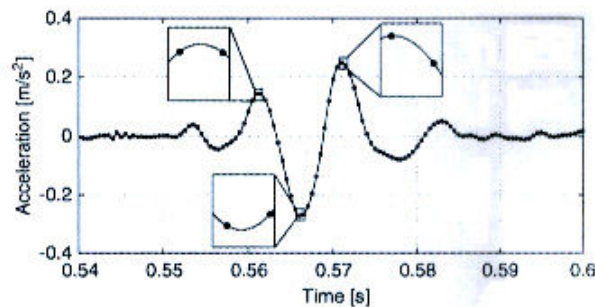


Fig. 3. Results of the up-sampling interpolation on the time history of the acceleration measured at the site in Ghent: original data points (●) and interpolated time history (solid line).

۳- تعیین سرعت موج برشی

۳.۱- روش‌های مستقیم و غیر مستقیم

از آنجا که فاصله بین تولید کننده ارتعاش و گیرنده مشخص می‌باشد زمان رسیدن موج در گیرنده یا تفاوت زمان رسیدن امواج در اعماق مختلف را می‌توان در محاسبه سرعت موج به کار برد. تکنیک‌های متفاوتی جهت استخراج تأخیر زمانی و تمایز بین روش‌های مستقیم و غیر مستقیم وجود دارد. یک خلاصه کلی از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم به وسیله Stokoe و Woods ارائه گردیده است رایج‌ترین روش مستقیم استفاده از تعیین دستی زمان رسیدن امواج می‌باشد یک کوپل مشخصات از نقاط بر روی سیگنال که می‌توان آن را از افزایش ناگهانی دامنه یا حداکثر برای رسیدن زمان امواج بهره برد.

روش کراس اوور از دو سیگنال قطبی متعامد که متعلق به روش‌های مستقیم می‌باشد بهره گرفته است.

رابرتسون از روش کراس اوور برای SCPT استفاده کرده و مشخص گردید این روش قابل اعتماد نمی‌باشد. گروه روش‌های غیرمستقیم همگی نیاز به روش‌های اصلاحی در حوزه زمان و قسمت مخالف آن و حوزه فرکانسی بر پایه طیف توان می‌باشد. در چهارچوب مطالعه حاضر مشخص گردید که روش

اصلاح در حوزه زمانی مؤثرترین و قابل اعتمادترین روش می‌باشد. علاوه بر این، این روش قابلیت اتوماسیون را فراهم می‌آورد. اختلاف زمانی ΔT بین سیگنال‌های $a_1(t)$ و $a_2(t)$ در بالا و پایین شتاب‌نگار در مخروط در حداکثر تابع همبستگی $\Gamma_{21}(t)$ برابر است با

$$r_{12}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} a_1(\tau) a_2(\tau + t) d\tau \quad (3)$$

Table 1
Stratification and dynamic soil characteristics of the simulated sites

Layer	Thickness (m)	C_s (m/s)	C_p (m/s)	ρ (kg/m ³)	D_s (%)	D_p (%)
<i>Case A: homogeneous halfspace</i>						
HS	∞	107.5	215.0	1622	1.0	1.0
<i>Case B: single layer on a halfspace</i>						
L1	7.0	107.5	215.0	1622	3.0	3.0
HS	∞	152.1	304.2	1622	2.3	2.3
<i>Case C: two layers on a halfspace</i>						
L1	3.0	107.5	215.0	1622	3.0	3.0
L2	7.0	215.0	430.0	1622	2.3	2.3
HS	∞	107.5	215.0	1622	1.0	1.0

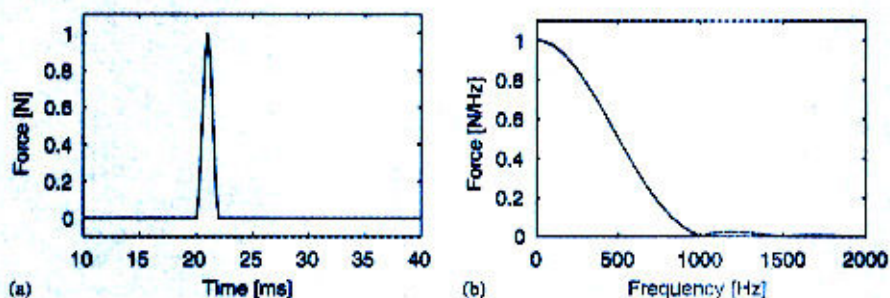


Fig. 4. (a) Time history and (b) frequency content of the normalized impact force.

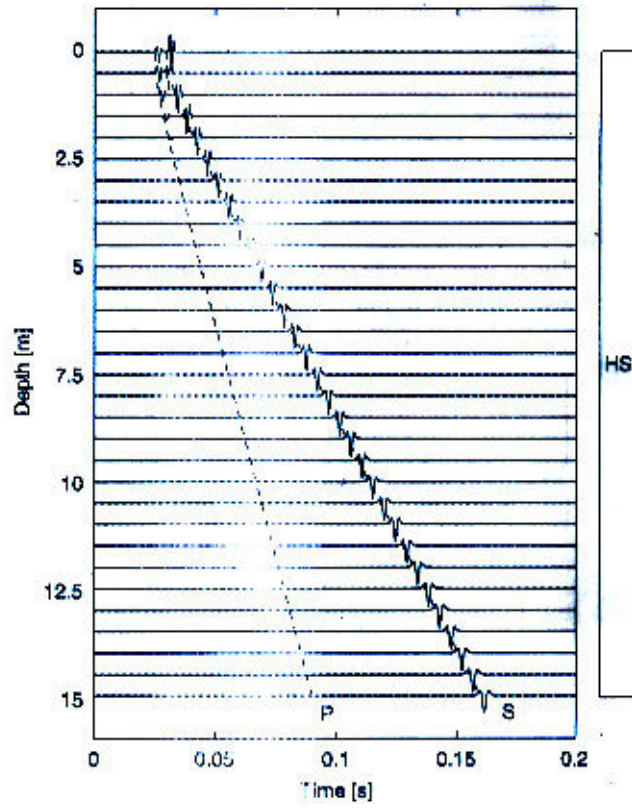


Fig. 5. Time history of the particle acceleration as a function of depth for case A (halfspace).

۲-۳- نمونه‌گیری سیگنال‌ها

فرکانس‌های نمونه‌گیری شده محدود هستند و دقت زمان کوتاه Δt ، در ماکزیمم تقاطع ارتباط در محدوده زمان محدود می‌باشد. نمونه‌گیری فرکانس‌های مشابه 2000Hz در مدت زمان 0.5 ms اندازه‌گیری شده است در نتیجه محاسبه زمان انتقال یافته چندین برابر 0.5 ms بود. محاسبه برای طول مسیر حرکت کوچک بین هر دو گیرنده حدود 1m است. این نتیجه در سرعت موج با دقت ناکافی است بیشتر راه‌حل آشکار برای این مسئله نمونه زیاد یا افزایش فرکانس نمونه‌گیری برای بالا بردن تقاضای ارزش مسئله نمونه‌گیری شده است سیگنال یا علامت‌های دیجیتالی پردازش شده است.

نمونه‌گیری‌های زیادی تاکنون دارای وضع نامناسب بوده‌اند، بنابراین مقدار زیادی از اطلاعاتی کلی است. در صورتی که افزایش تجهیزات فراگیری اطلاعات متناسب با ضریب نمونه‌گیری‌های زیاد است.

نمونه‌گیری‌های زیاد (متعدد) می‌تواند خیلی راحت‌تر به وسیله درون‌یابی دست پایین میان نقاط داده‌های اندازه‌گیری شده در طول پردازش سیگنال‌ها به دست آید.

نمونه‌گیری‌های بالا اساس نمونه‌گیری مسائل از پردازش سیگنال‌های دیجیتال است، که اجبار می‌کند که باند محدود سیگنال‌ها به طور کامل شرح داده شود اگر نمونه‌گیری‌ها دست کم دو برابر فرکانس سیگنال ماکزیمم باشد.

این موضوع مطمئناً به وسیله گزینش فرکانس‌های نمونه‌گیری فیزیکی بلند صورت می‌پذیرد. بنابراین، نوسازی سیگنال‌ها بین روشنی نمونه‌گیری‌ها تا هر دقت خواسته شده امکان‌پذیر است. از طرفی، درون‌یابی کردن میان نقاط داده‌های نمونه‌گیری شده زمانی مناسب است که روش درون‌یابی انتخاب شود. الگوریتم‌های نمونه‌گیری شده در برنامه دستورات عمل‌های MATLAB قابل درک است و با شرح دادن سیگنال‌ها به وسیله جا دادن صفرها در بین مقدار داده‌های اصلی شروع می‌شود.

یک گذر باریک مخصوص پاسخ ضربه محدود اجزای فیلتر برای بسط دادن سیگنال‌های ورودی عملی (کاربردی) است برگهای داده اصلی و درون‌یابی میان آنها تغییر نمی‌کند.

فرکانس‌های پوشه فیلتر فرکانس‌های Nyquist از سیگنال‌های اصلی شرح می‌دهد. رکورد زمانی برای درون‌یابی SCPT، 50 برابر بزرگتر از نسبت نمونه‌گیری یا 100KHz به دست آمده است. در این راه، مینیمم فرکانس نمونه‌گیری 20KHz است، که به عنوان تقاضا «درخواست» راهنما SCPT از ISSMGETC10 می‌توان انجام داد. شکل 3 درون‌یابی به وسیله اندازه گرفتن شتاب تاریخچه زمانی در عمق 12.2 متر در محل Ghent شرح می‌دهد.

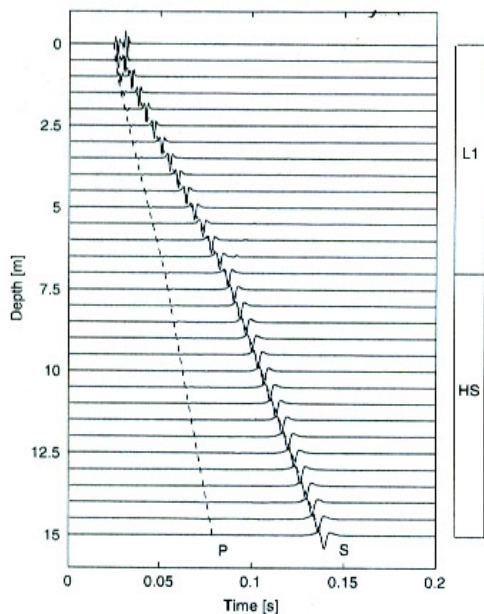


Fig. 6. Time history of the particle acceleration as a function of depth for case B (single layer on a halfspace).

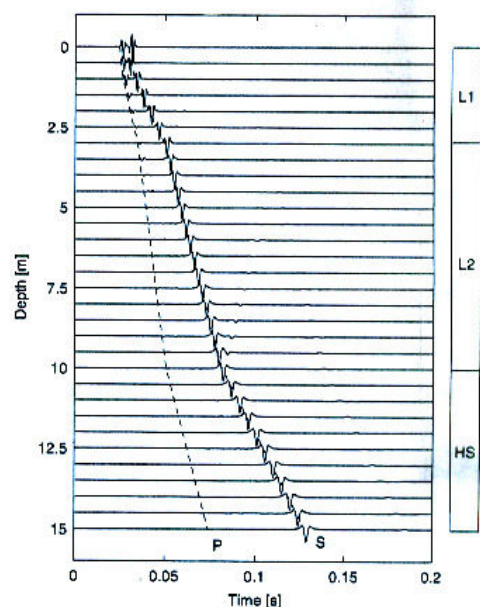


Fig. 7. Time history of the particle acceleration as a function of depth for case C (two layers on a halfspace).

۴. تعیین نسبت میرایی مواد.

این قسمت رؤس مطالب پایه‌های نظری متد SRS بیان می‌شود برای تعیین نسبت میرایی مواد با SCPT، موج برشی هارمونیک (تک بعدی) با فرکانس زاویه‌ای (ω) که به طور عمودی پخش می‌شود ملاحظه می‌شود که با سرعت C_s در جهت مثبت Z پخش می‌شود در نتیجه شتاب جانبی $a_x(z,t)$ برابر است با

$$a_x(z,t) = a_{x0} z^{-n} \exp(i(K_s z - \omega t)) \quad (4)$$

که a_{x0} بزرگی موج و $k_s = 2\pi/\lambda_s$ عدد موج در موج برشی با λ_s که طول موج n بیان کننده کاهندگی موج مقرر در برداشت شعاعی یا میرایی هندسی است. بنابراین Z^{-n} ضریب کاهندگی است، آن همچنین واحد فیزیکی a_{x0} تعیین می‌کند. میرایی مواد به طور طبیعی متفاوت است نسبت به میرایی برداشت شعاعی و به طور عادی به وسیله مجموعه استاندارد برش مطابق با قاعده کلی «اصل» نشان داده می‌شود، در نتیجه فرکانس‌های وابسته پیچیده عدد موج برابر است با

$$K_s = \text{Re}(K_s) + i\text{Im}(K_s)$$

که قسمت موهومی به طور مختصر به عنوان α در نظر می‌گیریم که می‌تواند وابسته به نسبت میرایی مواد باشد.

$$\alpha = \frac{\omega D_s}{C_s} = Af \quad (5)$$

که به طور کل فرض می‌شود که نسبت میرایی مواد (D_s) مستقل از بزرگی حرکات کوچک در کرنش‌های کوچک و مستقل از فرکانس در محدوده فرکانس پایین ذینفع است.

ضریب (وسیله) آخر α تابع خطی از فرکانس f است، بنابراین ضریب ثابت A در معادله (5) برابر $\frac{2\pi D_s}{C_s}$ است.

معرفی تاثیر میرایی ماده‌های از طریق عدد موج پیچیده K_s در معادله ۴ منجر میشود به:

$$a_x(z,t) = a_{x0} z^{-n} \exp(-\alpha z) \exp(+i(\text{Re}(k_s)z - \omega t)). \quad 6$$

دامنه‌ی شتاب در مکان Z برابر است با:

$$\bar{a}_x(z) = a_{x0} z^{-n} \exp(-\alpha z). \quad 7$$

نرخ دامنه‌های شتاب افقی و در دو فاصله‌ی Z_1 و Z_2 برابر است با:

$$\frac{\bar{a}_{x2}}{\bar{a}_{x1}} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^{-n} \exp(-\alpha(z_2 - z_1)). \quad 8$$

لگاریتم طبیعی این نسبت عبارت است از:

$$\ln\left(\frac{\bar{a}_{x2}}{\bar{a}_{x1}}\right) = -n \ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) - \alpha(z_2 - z_1). \quad 9$$

این معادله اساس روش ضریب Attenuation را تشکیل میدهد و به وضوح بیان مینماید نتیجه‌ی این روش بستگی به فرضیاتی دارد که در ارتباط با ماهیت میرایی هندسی یا تشعشی در نظر گرفته میشود، و به وسیله‌ی توان n بیان میشود. از این draw-back با روشهای SRS که بر پایه‌ی شیب نسبت لگاریتمی پایه‌گذاری شده، ممانعت به عمل می‌آید، همانگونه که توسط Kudo، Buttkus، Shima و Stewart شرح داده شده‌اند. مطابق معادله ۵، ضریب Attenuation به طور خطی به فرکانس بستگی دارد، مشتق معادله ۹ با توجه به فرکانس برابر است با:

$$\frac{d}{df} \ln\left(\frac{\bar{a}_{x2}}{\bar{a}_{x1}}\right) = -A(z_2 - z_1). \quad 10$$

این معادله دیگر به توان n که میرایی هندسی را مشخص میکند بستگی ندارد، به علاوه، هر جمله‌ی هندسی که به فرکانس بستگی نداشته باشد حذف خواهد شد. اگر سرعت‌ها به فرکانس وابسته نباشند، که در صورت انتخاب صحیح محدوده‌ی فرکانس برای آنالیز میسر است، این امر شامل تصحیحات عبوری و بازگشتی از فصل مشترک‌های لایه‌ها میشود. اگر Z_1 ثابت نگه داشته شود و Z_2 یا فقط Z تغییر کند، دیفرانسیلگیری نسبت به Z منجر میشود به:

$$\frac{\partial^2 \ln(\bar{a}_{x2} / \bar{a}_{x1})}{\partial f \partial z} = -A.$$

11

فاکتور A با منفی مشتق فضایی شیب نسبت طیفی (لگاریتمی) برابر است. با در نظر گرفتن این نتیجه، و همچنین معادله‌ی ۵، نسبت میرایی ماده‌ای D_S می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

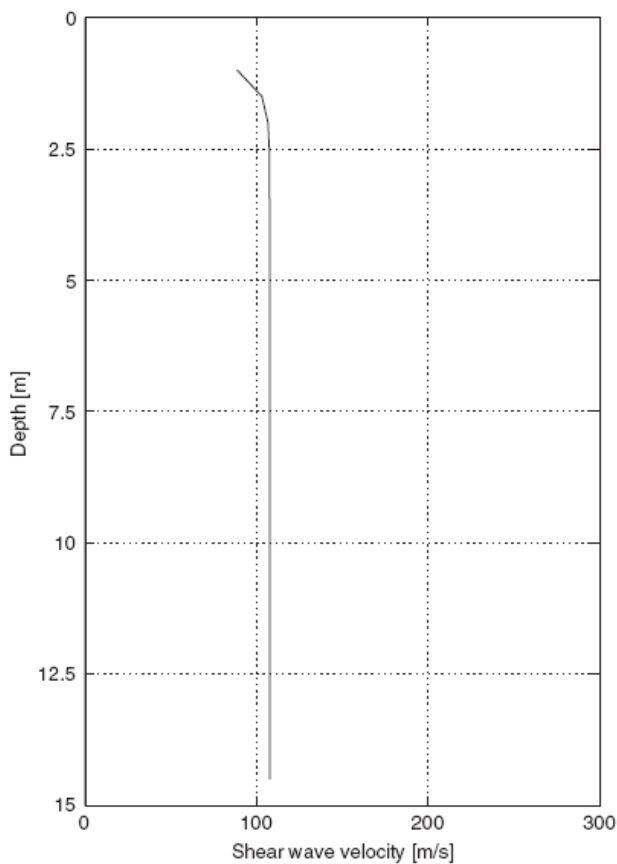


Fig. 8. Calculated shear wave velocity C_s for case A (halfspace).

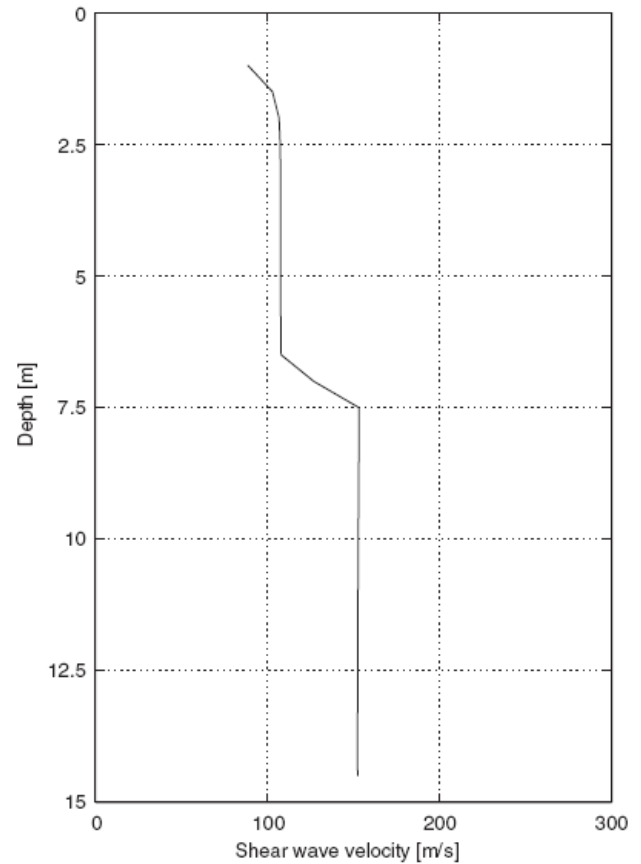


Fig. 9. Calculated shear wave velocity C_s for case B (single layer on a halfspace).

$$D_S = \frac{1}{2Q_S} = \frac{C_S}{2\pi} A = \frac{C_S}{2\pi} \frac{\partial^2 \ln(\bar{a}_{x1} / \bar{a}_{x2})}{\partial f \partial z}, \quad 12$$

که Q_S فاکتور کیفیت است.

در حالت مخروط دوگانه، طول $\Delta z = z_2 - z_1$ ، فاصله‌ی بین **accelerometer** پایینی و بالایی، جایگزین دیفرانسیل z در مخرج میشود:

$$D_S = \frac{1}{2Q_S} = \frac{C_S}{2\pi} A = \frac{C_S}{2\pi} \frac{\ln(\bar{a}_{x1} / \bar{a}_{x2})}{\partial f \Delta z}, \quad 13$$

در عمل، **SCPT** با یک مخروط لرزه‌های دوگانه و اندازه‌گیریها در فواصل ۰/۵ متری انجام میشود. معمولاً ۵ ضربه‌ی چکش در هر عمقی انجام میشود، **drift**های سیگنال خطی حذف میشود زمانهای اندازه‌گیری شده میانگینگیری میشوند تا **signal noise** کاهش یابد. به علاوه، یک فیلتر **Low-**

pass می‌تواند کیفیت سیگنال را در صورت وجود یک noise فرکانس بالا بهبود بخشد. برای سیگنالهای پیچیده، شامل P-wave مستقیم و اجزای موجی بازگشتی، اگر پنجره‌ی مناسبی سیگنالها اعمال شود S-wave مستقیم قابل جداسازی خواهد بود. سیگنالهای مربوط به accelerometerهای پایینی و بالایی در هم آمیخته میشوند و پروفیل سرعت موج برشی تعیین میشود. در مرحله‌ی بعد، روش SRS اعمال میشود تا تغییرات نسبت میرایی ماده‌ای با عمق به دست آید. طیفهای دامنه‌ای و در هر دو سیگنال محاسبه شدند. شیب نسبت لگاریتمی دو دامنه‌ی طیفی در محدوده‌ی فرکانس انتخابی، پارامتر A را تعیین میکند. بر اساس این پارامتر و با آگاهی از سرعت موج برشی C_s ، نسبت میرایی ماده‌ای D_s با معادله‌ی ۱۳ تعیین میشود.

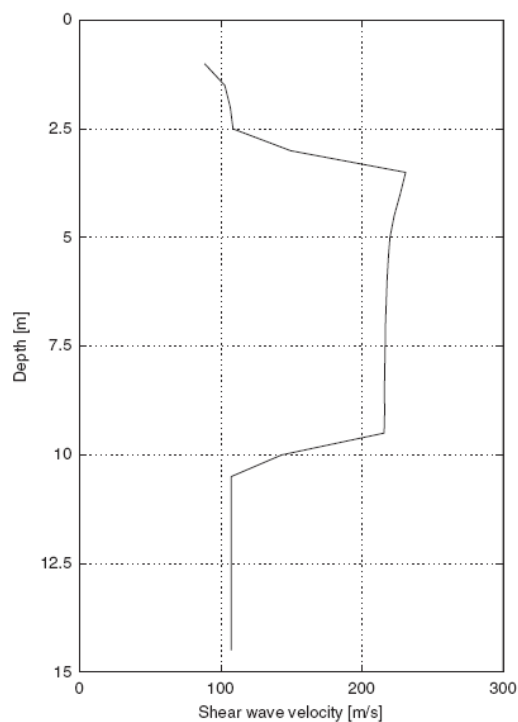


Fig. 10. Calculated shear wave velocity C_s for case C (two layers on a halfspace).

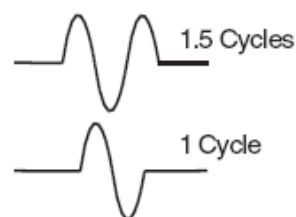


Fig. 11. Schematic views of signals with 1.5 and one cycle.

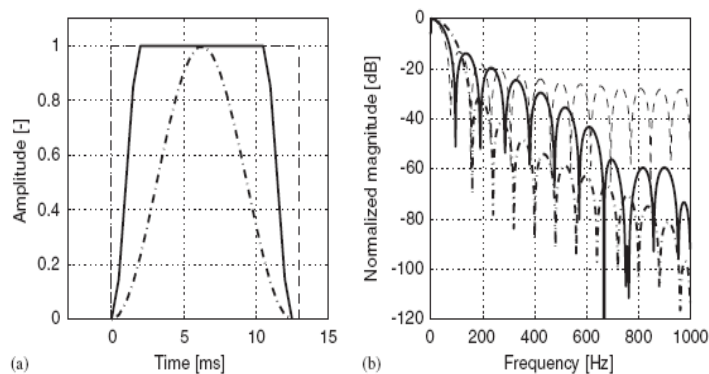


Fig. 12. (a) Time history and (b) frequency content of a tapered window (solid line), a rectangular window (dashed line), and a Hanning window (dash-dotted line) with a typical length of 1.5 cycles.

۵- آنالیز بر پایه سیگنالهای ساخته شده

۵-۱- روش شناسی

سه Stratification خاک متفاوت در نظر گرفته میشود: یک halfspace همگن (حالت A)، یک لایه ساده بر روی halfspace حالت B و دو لایه بر روی halfspace حالت C. مشخصه های Stratification و دینامیک خاک در این سه پروفیل در جدول ۳ خلاصه شدهاند. سرعت موج برشی و نسبت میرایی مادهای از یک نیروی ضربی افقی بهدست میآیند Off-set. افقی بین نیرو و مخروط برابر با ۰/۱ میرومتر است. excitation ضربی چکش به صورت یک بار نقطهای افقی بر روی سطح، که به عنوان نصف یک پرپود Squared sine function با یک پرپود s 004/0 که در زمان به بالاتر از s 020/0 انتقال یافته مدلسازی شده است. زمان و میزان فرکانس تابع نیرو در شکل ۴ نمایش داده شده است. محاسبات در wavenumber-frequency domain و تبدیلات فوریه معکوس به spatial-time domain به ترتیب با استفاده از Filon scheme عمومی و الگوریتم تبدیل فوریه معکوس سریع (FFT) انجام پذیرفت. فاصله زمانی برابر است با $\Delta t = 0.0005$ s، در حالیکه پرپود برابر است با $T = 0.512$ s.

شتابها بر یک خط عمودی در فواصل ۰/۵ متر تا عمق ۱۵ متری اندازهگیری شدند. شکلهای ۵ تا γ particle acceleration های افقی را نمایش میدهند. ورود P-wave و S-wave در این اشکال مشخص شدهاند. برای حالت های B و C در halfspace های لایه های شده، بازتابها و عبورهای body wave فصل مشترک لایهها نیز قابل مشاهده است. در حالت های عملی، ساختار پیچیده پاسخهای اندازهگیری شده که توسط P-wave ها ایجاد میشود، موجهای بازتابی و شکسته شده، noise محیطی و اجزای موج که درون میلههای extention مخروط حرکت میکنند ممکن است این ضرورت را فراهم نمایند که فقط قسمتهای مشخصی از سیگنالها برای تعیین سرعت موج برشی C_s و نسبت میرایی مادهای D_s استفاده شوند. این انتخاب به صورت عملی با اعمال یک window function به سیگنالها در دامنه زمانی به دست میآید.

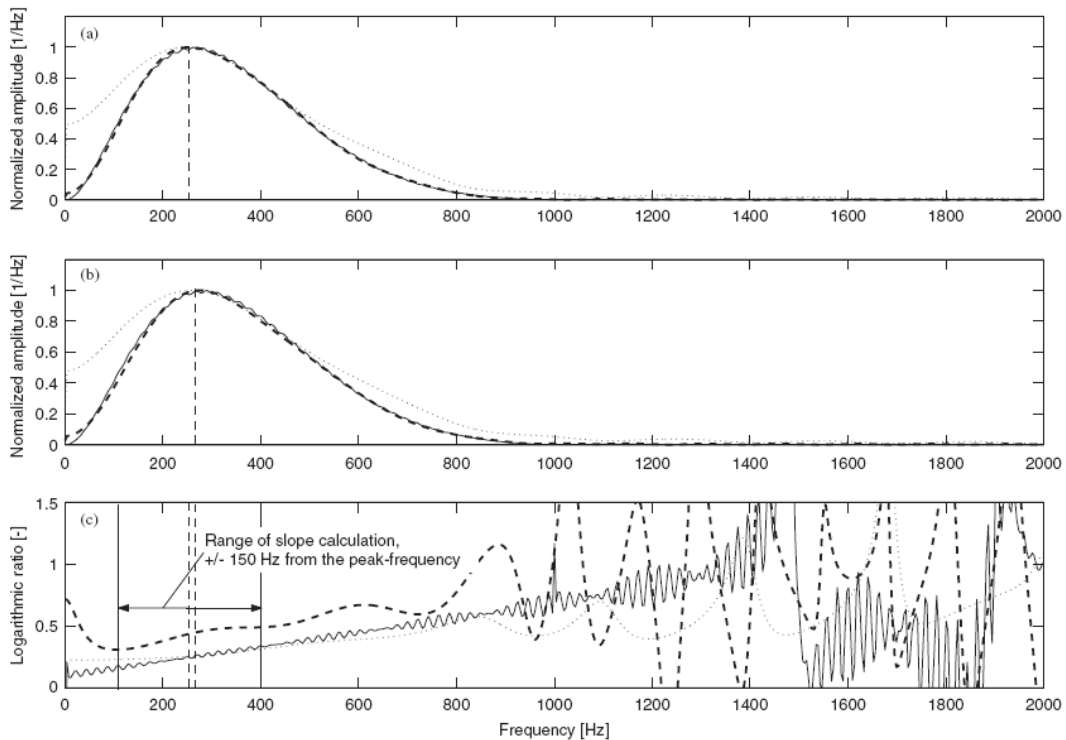


Fig. 13. Influence of the length of a rectangular window on the amplitude spectra and the logarithmic amplitude ratio for the case A of a homogeneous halfspace: (a) spectrum $\hat{a}_{i,2}$ at a depth of 10.5 m, (b) spectrum $\hat{a}_{i,1}$ at a depth of 9.5 m, (c) logarithmic spectral ratio $\ln(\hat{a}_{i,1}/\hat{a}_{i,2})$. Results are shown based on a full signal (solid line), a rectangular window of 1.5 cycles (dashed line), and a rectangular window of 1 cycle (dotted line).

۵-۲- تعیین سرعت موج برشی

تعیین سرعت موج برشی بتا زمانی که دامنه‌ی شتاب افقی بالا باشد، تحت تاثیر window function قرار نمیگیرد. پروفیل‌های سرعت محاسبه شده در شکل‌های ۸ تا ۱۰ آورده شده اند .

تا زمانی که دامنه شتاب افقی بالا باشد، محاسبات سرعت موج برشی از تابع پنجره تاثیر نمی پذیرد. تغییرات سرعت موج برشی در شکل های ۸-۱۰ رسم گردیده است. سرعت های موج برشی دقیق بجز اعماق سطحی کمتر از ۲،۵ متر در مورد نیم فضا، تاحدی به طور کامل حاصل گردید. این احتمال وجود دارد که تفاوت در طول مسیر عبوری بین دو نقطه نزدیک سطح نسبتاً کم باشد، بنابراین انحراف کوچک در محاسبات زمان رسیدن منجر به نتایج نامطلوبی در محاسبات سرعت موج برشی گردد.

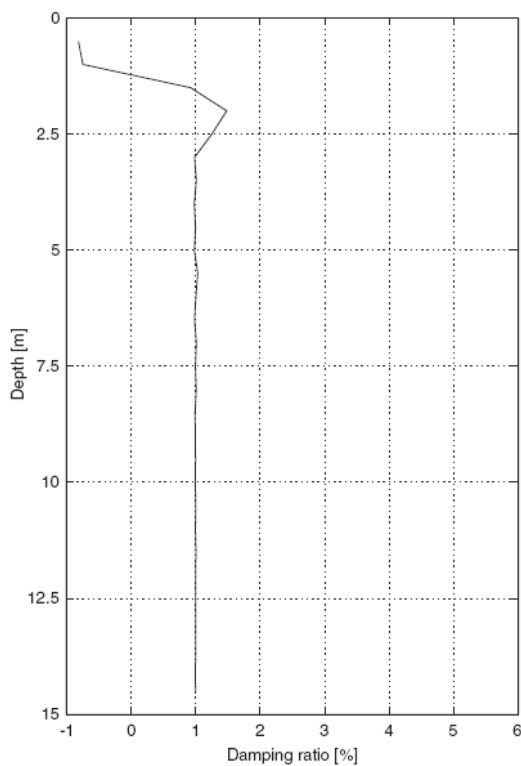


Fig. 14. Calculated material damping ratio D_s for case A (halfspace), based on the full signal.

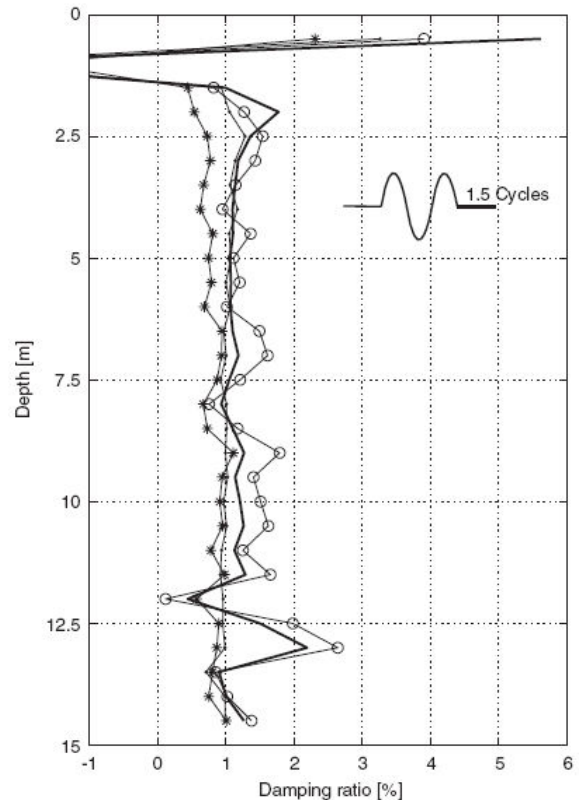


Fig. 15. Calculated material damping ratio D_s for case A (halfspace), based on a windowed signal of 1.5 cycle length: rectangular window (solid line), rectangular window with exact equal length (\bullet), Hanning window ($*$), and tapered window (\circ).

۳.۵. محاسبه نسبت میرایی مادی

روش SRS به همراه SCPT برای محاسبه نسبت میرایی مادی به کار می رود. طیف مختلط پوشش های لایه لایه به همراه انعکاس و انکسار و همچنین صدا های محیطی بسیاری از محققین را بر آن داشت که از یک تابع پنجره با محدوده زمانی برای محاسبات آسان نسبت میرایی مادی به کار برند.

به منظور مطالعه تأثیر طول و شکل تابع پنجره بر روی محاسبه میرایی مادی پاسخ یک نیم فضای همگن در نظر گرفته شد. شتاب افقی در نیم فضا با استفاده از سه طول مختلف پنجره آنالیز می گردد. اول از یک سیگنال کامل بدون پنجره، دوم یک سیگنال با طول ۱.۵ سیکل اول مولفه موج برشی استفاده می گردد (که واقعاً مولفه کامل موج برشی می باشد) و نهایتاً یک سیگنال که فقط شامل سیکل اول موج برشی می باشد. شکل شماتیک سیگنال های ۱.۵ و یک سیکل در شکل ۱۱ نشان داده شده است. سه نوع مختلف پنجره که به کار برده می شود: پنجره باریک، پنجره مستطیلی و پنجره معلق می باشد. تاریخچه زمانی محتوای فرکانسی با ۱.۵ سیکل از یک سیگنال در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

هر پنجره به طور دستی با انتخاب نقطه برخورد صفر با پاسخ انجام می گیرد. ممکن است دو سیگنال پنجره ای دارای اندکی اختلاف در طول باشند. بنابراین تمام محاسبات برای سیگنال های کاملاً برابر انجام می گیرد. در این مورد پذیرفته شد که محتوای یکی از دو سیگنال بیشتر ۱.۵ یا یک باشد. برای سیگنال های مصنوعی استفاده از فیلتر های عبوری کم کاهش صدا ضروری نمی باشد.

به عنوان مثال شکل ۱۳ محاسبه نسبت طیفی لگاریتمی طیفی در عمق متوسط ۱۰ متر را شرح می دهد که براساس \hat{a}_1 و \hat{a}_2 طیفی در شتاب سنج های بالایی و تحتانی به ترتیب در اعماق ۹.۵ و ۱۰.۵ متر می باشد. نتایج بر مبنای سیگنال های کامل (بدون پنجره) و پنجره مستطیلی با یک و ۱.۵ سیکل نشان داده شده است. طیف مربوط به سیگنال های کامل با طیف مربوط به پنجره مستطیلی با یک و ۱.۵ سیکل در یک زمان رخ می دهد. طول منحنی خطی با نسبت طیفی لگاریتمی ۱۵۰ هرترز از طرفین حداکثر طیف فرکانس متناسب می گردد.

شکل ۱۴ تغییرات نسبت میرایی مادی محاسبه شده برای مورد A از نیم فضای همگن را با استفاده از روش SRS نشان می دهد که برای سیگنال کامل بدون پنجره مستطیلی می باشد. این روش برای اعماق بیشتر از ۲.۵ متر پیش بینی تقریباً خوبی دارد.

شکل ۱۵ و ۱۶ نتایج مشابهی برای سیگنال های پنجره ای به ترتیب با ۱.۵ و ۱ سیکل را نشان می دهد. برای طول ۱.۵ سیکل (شکل ۱۵) اگر از پنجره مستطیلی استفاده گردد نتایج بهتری حاصل می گردد. اگر طول پنجره یکسانی در دو سیگنال استفاده گردد نتایج تا حدودی بهبود می یابد. برای پنجره ای با طول ۱ سیکل نتایج روش SRS مقادیر خیلی کم حول نسبت میرایی ۰.۵٪ دارد که مستقل از نوع پنجره می باشد.

مطالعه پارامتریک حاکی از آن می باشد نوع پنجره تأثیر چندانی ندارد. یک پنجره مستطیلی ساده در انتخاب پنجره های با طول یکسان برای هر دو سیگنال کافی می باشد. نتیجه مهم تأثیر طول پنجره بر روی نتیجه نهایی می باشد. مقدار نسبت میرایی مادی با طول های کوتاه و بلند انحراف زیادی دارد. بنابراین نباید از یک پنجره به تنهایی استفاده گردد. این نتیجه در کاربرد توابع پنجره ای بر حسب سیگنال های زمانی در روش هایی که بر مبنای نسبت دامنه طیفی می باشند، بسیار مهم می باشد.

شکل های ۱۷ و ۱۸ تغییرات نسبت میرایی مادی را به ترتیب برای مورد B (یک لایه در نیم فضا) و مورد C (دو لایه در نیم فضا) نشان می دهد. اگرچه این در مورد بسیار پیچیده می باشند. تاریخچه زمانی محاسبه شده برای شتاب افقی بر موج برشی مستقیم غالب می باشد و بنا بر این نیاز به پنجره ای نمی باشد. انحراف نسبت میرایی محاسبه شده از مقدار دقیق نسبت مورد A زیاد می باشد؛ بعلاوه در همسایگی فصل مشترک لایه پراکندگی مشاهده می گردد.

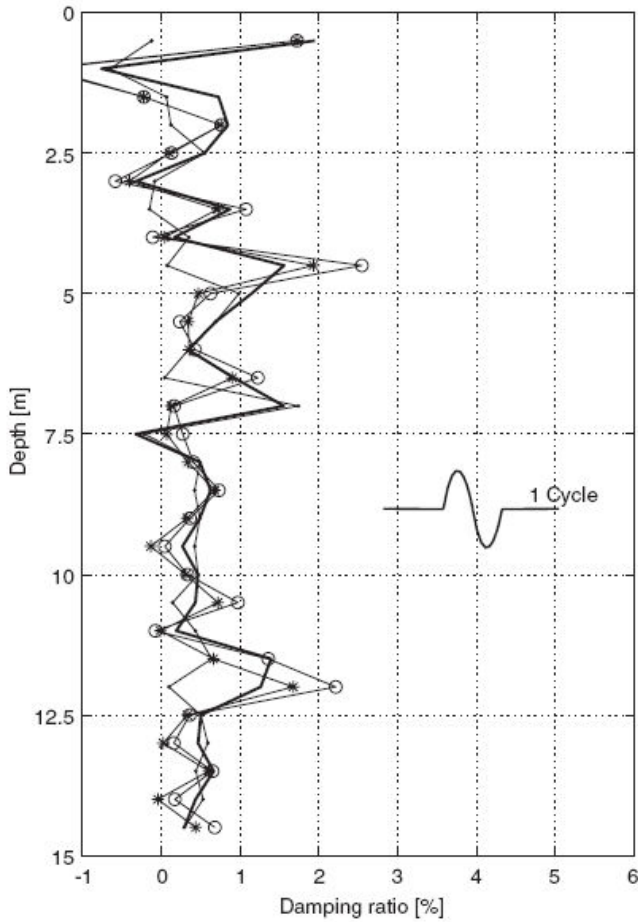


Fig. 16. Calculated material damping ratio D_s for case A (halfspace), based on a windowed signal of 1 cycle length: rectangular window (solid line),
L. Nairi et al. / Soil Dynamics and Earthquake Engng. 107 (2018) 105137
 (*), a

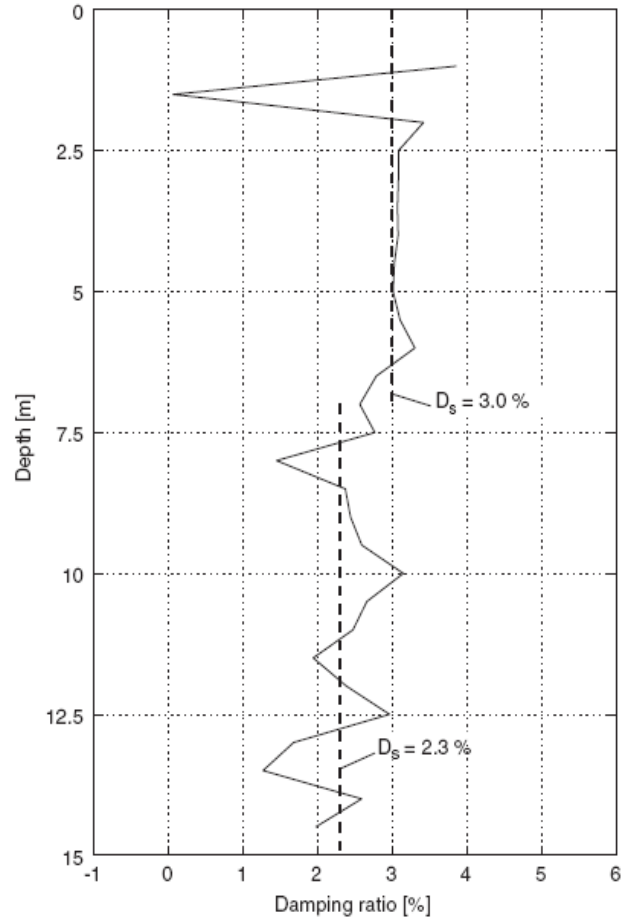


Fig. 17. Calculated material damping ratio D_s for case B (single layer on a halfspace), based on the full signal. The exact values are shown as dashed lines.

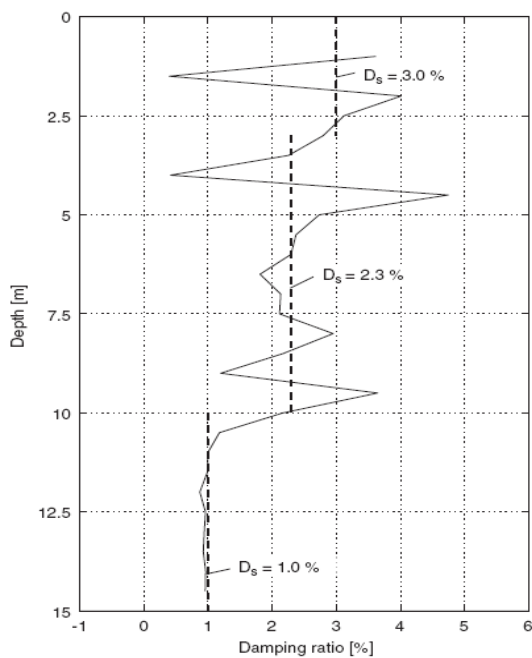


Fig. 18. Calculated material damping ratio D_s for case C (two layers on a halfspace), based on the full signal. The exact values are shown as dashed lines.

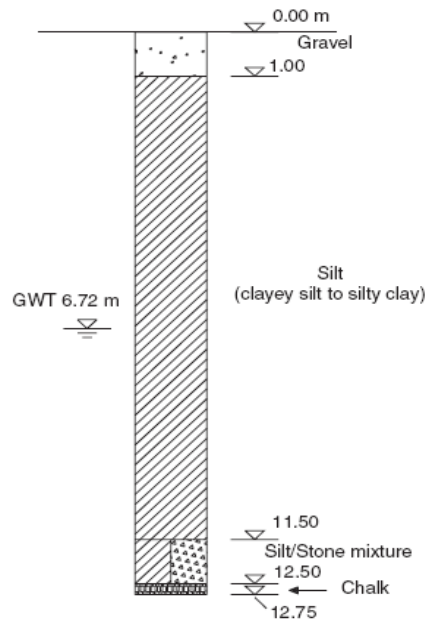


Fig. 19. Stratification of the site in Waremme.

۶. اندازه گیری درجا

در این بخش روش SRS برای محاسبه تغییرات نسبت میرایی مادی با عمق در دو سایت در بلژیک به کار مدل ساختمان برشی اصلاحی می رود. یک سایت در waremme و سایت در محوطه دانشگاه Ghent.

۱,۶. سایت waremme

آزمایش در سایت waremme در نزدیکی قطار سریع السیر L2 بین Brussels و cologne انجام می گیرد. این سایت شامل یک لایه سیلتی به عمق ۱۲٫۵ متر بر روی بستر گچی می باشد. توزیع اندازه دانه های دو نمونه گرفته شده در اعماق ۳-۳٫۴ و ۵-۵٫۴ در شکل ۲۰ معرفی شده است. وزن واحد حجم اشباع 20.3 KN/m^3 و وزن واحد حجم خشک 16.7 KN/m^3 می باشد.

مقدار سرعت موج برشی به طور مناسبی در بیشتر از ۳ متر بعد چند انحراف با عمق افزایش می یابد (شکل ۲۱). آزمایش SASW مقادیر کمتری نسبت به آزمایش SCPT نتیجه می دهد. از آنجا که مخروط لرزه ای در بستر گچی نفوذ نمی کند، سرعت موج برشی در بستر محاسبه نمی گردد. تاریخچه زمانی شتاب افقی اندازه گیری شده شامل فرکانس های بالایی می باشد. که با سیگنال های توسط کاهش داده می شود. بعلاوه یک فیلتر عبوری کم با فرکانس گوشه ۲۰۰ هرتز برای ثابت نگه داشتن محتوای فرکانسی سیگنال های صاف شده به کار برده می شود.

موج اصلی در هر تاریخچه زمانی، متعاقباً با استفاده از یک پنجره مستطیلی به منظور حذف صوت های محیطی گذرا، انتخاب می گردد. طول پنجره در مقیاس بزرگ انتخاب می گردد تا از تاثیرات بر نتایج نهایی اجتناب گردد. شکل ۲۳، سیگنال های فیلتر شده و پنجره انتخاب شده را نشان می دهد. شیب نسبت لگاریتمی با استفاده از خط مستقیم مناسب در محدوده فرکانسی بین ۷۵ تا ۱۳۰ هرتز، که در آن انرژی سیگنال ها مقدار قابل توجهی دارد، بدست می آید (شکل ۲۴).

شکل ۲۵ خلاصه تغییرات نسبت میرایی مادی D_s را با عمق نشان می دهد که از آزمایش های مختلف با استفاده از چکشهای سنگین و چکش های نوسانی بدست می آید. معمولاً نسبت میرایی مادی بین ۰٪ تا ۳٪ می باشد، که مقادیر مشابهی توسط kudo و shima ارائه شده است. مقدار متوسط $\bar{D}_s = 2.1\%$ و ضریب تغییرات $C_v = 81\%$ با فرض نسبت ثابت در تمام لایه سیلتی محاسبه می گردد.

نمونه های سیلتی دست نخورده با استفاده از گمانه زنی در سه عمق مختلف صورت می گیرد و برای آزمایشات ستون تشدید و پیچش نوسانی آزاد استفاده می گردد. مدول برشی و نسبت میرایی بعد از تحکیم تحت چندین فشار محصور شدگی همه جانبه بدست می آید. نتایج مدول برشی و نسبت میرایی مادی در اشکال ۲۶ و ۲۷ نشان داده شده است. میانگین تنش موثر در الاستیک اعماق نمونه گیری شده ۴-۴٫۵، ۵-۵٫۵ و ۱۲-۱۲٫۵ به ترتیب ۱۴۱، ۶۲ و ۷۷ کیلو پاسکال تخمین زده شد. نایج آزمایشگاهی در اشکال ۲۶ و ۲۷ بین تنش موثر فوق الذکر و سرعت موج برشی و میرایی مادی متناظر درون یابی می شود که در اشکال ۲۱ و ۲۵ رسم گردیده است. نتایج آزمایشگاهی برای کرنش برشی مهندسی 10^{-5} معتبر است. در هر دو آزمایش فوق مقدار نسبت میرایی مادی متوسط بین ۰٫۱٪ تا ۰٫۲٪ در محدوده تنش های گفته شده، می باشد. این مقادیر توسط داده های آزمایش صحرایی SCPT مورد تایید قرار گرفته است.

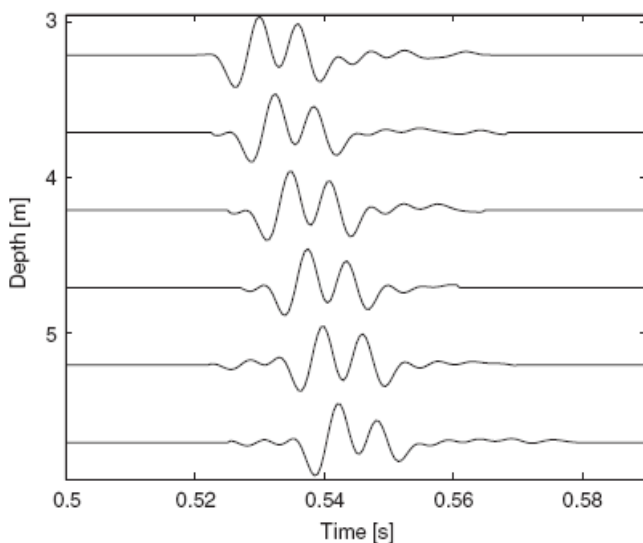


Fig. 23. Windowed main wave train of selected time histories of the horizontal acceleration at the site in Waremme.

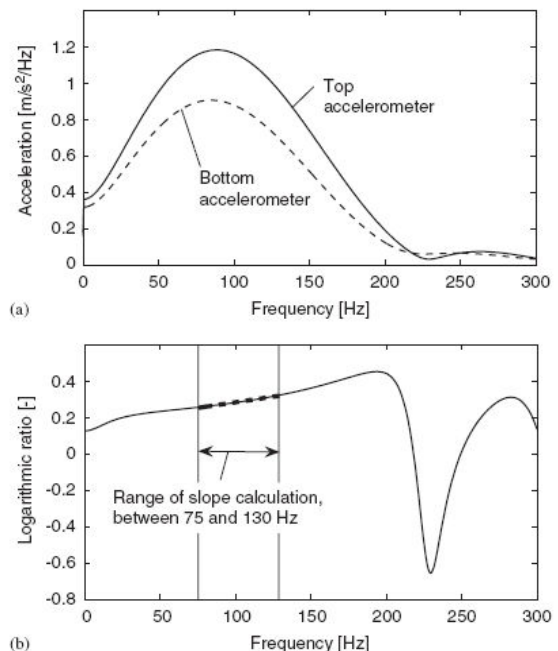


Fig. 24. (a) Amplitude spectra \hat{a}_{d1} in the top accelerometer at a depth of 3.0m and \hat{a}_{d2} in the bottom accelerometer at a depth of 4.0m and (b) corresponding logarithmic amplitude ratio.

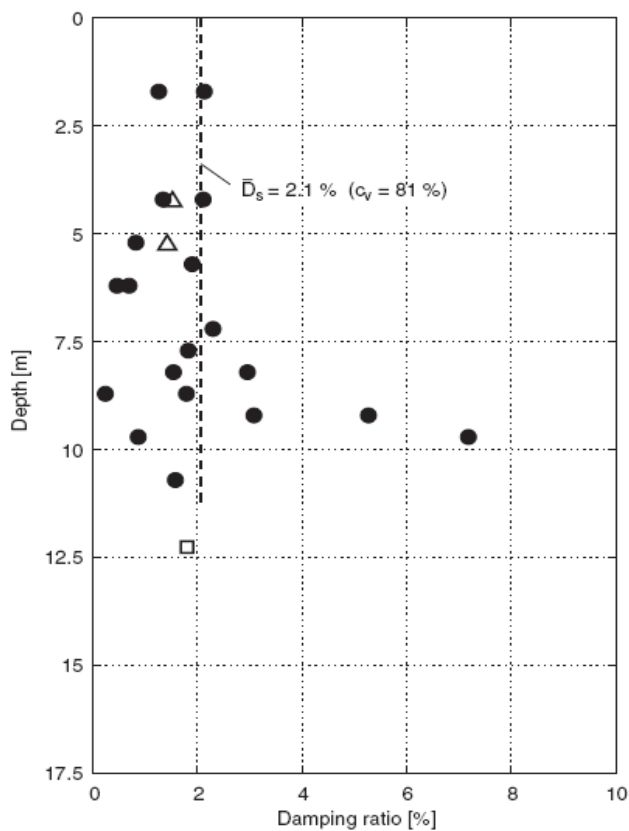


Fig. 25. Material damping ratio D_s at the site in Waremmе as obtained with a SCPT (●) (summary of tests with sledgehammer and swing hammer), a Resonant Column Test (△), and a Free Torsion Pendulum Test (□). The mean value of the SCPT is shown as dashed line.

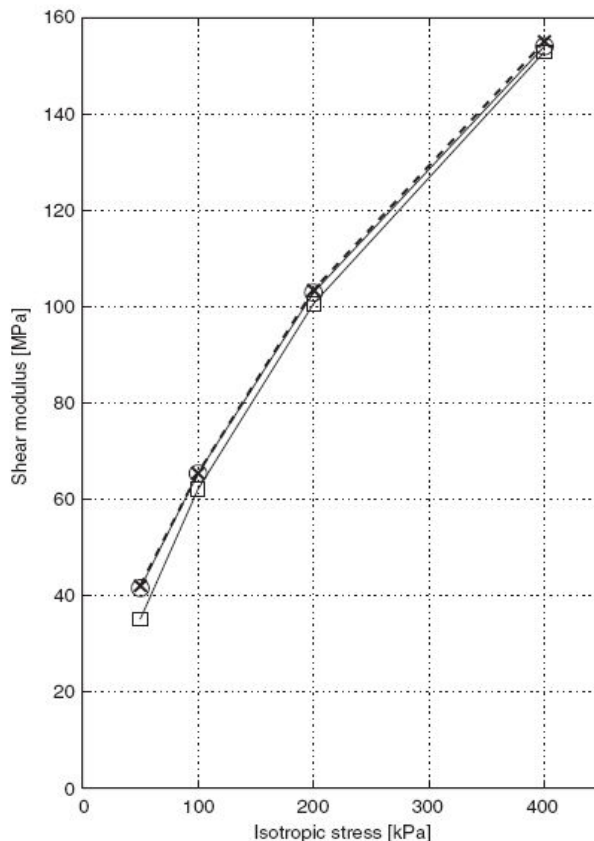


Fig. 26. Shear modulus at a shear strain of 10^{-5} as a function of the isotropic confining stress at the site in Waremmе as obtained with a Resonant Column Test (○, depth 4.0–4.5 m), a Resonant Column Test (*, depth 5.0–5.5 m), and a Free Torsion Pendulum Test (□, depth 12.0–12.5 m).

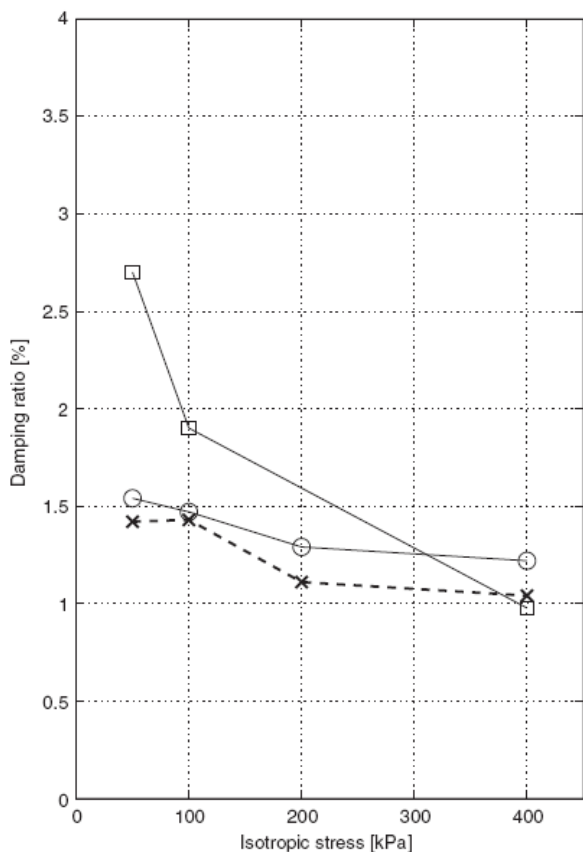


Fig. 27. Material damping ratio D_s at a shear strain of 10^{-5} as a function of the isotropic confining stress at the site in Waremmе as obtained with a

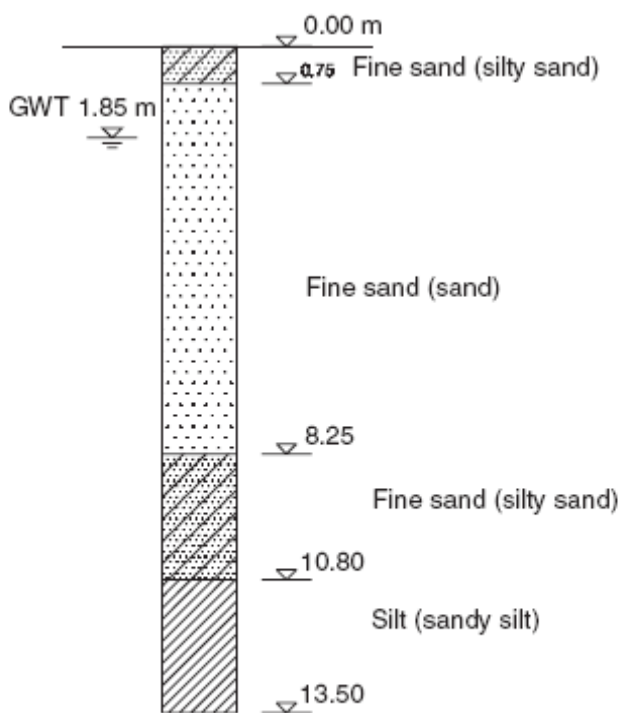


Fig. 28. Stratification of the site in Ghent.

۲.۶. آزمایش در سایت Ghent

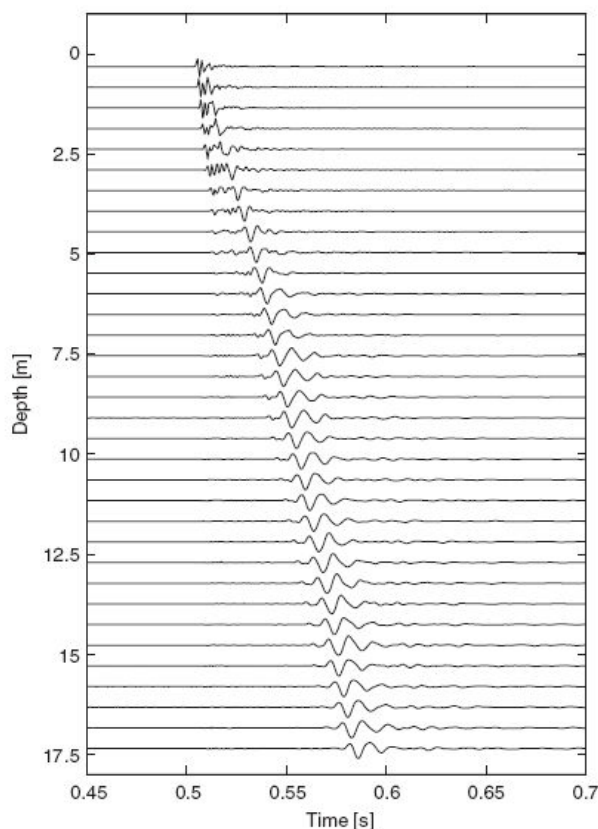
در سایت دانشگاه Ghent یک لایه وسیع از ماسه ریز وجود دارد، که عمق آن حدود ۸ متر است و به تدریج به لایه سیلتی تبدیل شده است. این لایه خاک در شکل ۲۸ نشان داده شده است.

آزمایش SCPT در این سایت با مجموعه ای از شتاب سنج های سه محوری که دارای حساسیت بالاتر و تجزیه و تحلیل بیشتر از شتاب سنج های که در سایت waremme استفاده شد، انجام می گیرد. به خاطر کیفیت بهتر سیگنال، فیلتر با عبوری کم استفاده می گردد و چکش سنگین با ضربه زدن به طرفین راست و چپ تیر مقدار انرژی تحریک را فراهم می کند.

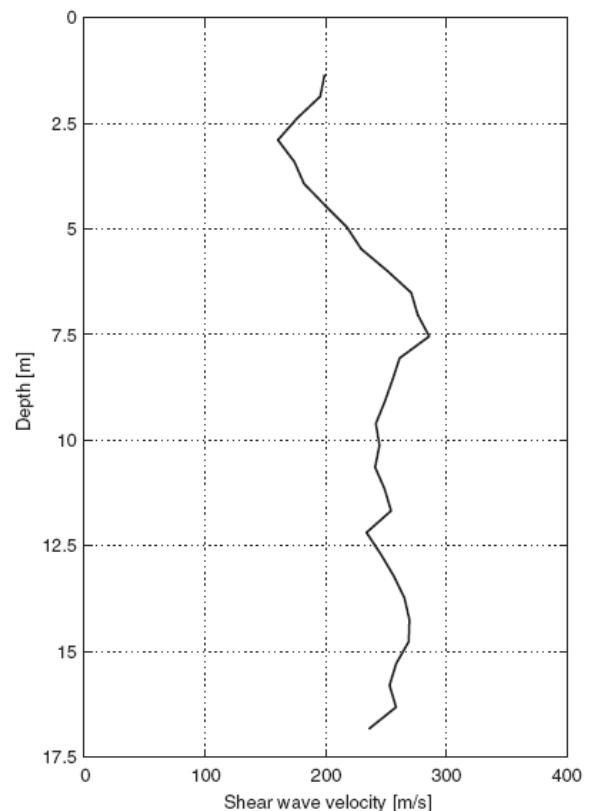
نتایج سرعت موج برشی (شکل ۳۰) از پنجره به کار برده شده مستقل می باشد. مقدار سرعت موج برشی با عمق در لایه ماسه زیر سطحی افزایش می یابد. در لایه های پایین تر و مصالح کمی ریزتر مقدار آن ثابت و برابر m/s ۲۵۰ می باشد.

نسبت میرایی مادی (شکل ۳۱) با استفاده از روش SRS محاسبه می گردد. پنجره ای در این حالت استفاده نمی گردد که به این معنا می باشد که سیگنال های متوسط بدون پروسه بیشتر بر روی سیگنال های اصلی، آنالیز می شوند. نسبت طیفی لگاریتمی با رسم خط مستقیم مناسب در محدوده فرکانسی بالاتر از ۱۵۰ هرتز در طرفین حداکثر طیف فرکانس بدست می آید که متناظر با محدوده فرکانسی آنالیز سیگنال های مصنوعی می باشد. نسبت میرایی مادی در محدوده ۱۰٪ و ۲۰٪ می باشد. با فرض نسبت میرایی ثابت به طور جداگانه برای ماسه ولای های زیرین مقدار نسبت میرایی

$$\bar{D}_S, ۹,۶\% (C_V = 67\%) \text{ برای ماسه ریز و نسبت } ۷\% (C_V = 64\%) \text{ برای لای محاسبه گردید.}$$



19



up: v Fig. 30. Shear wave velocity C_s at the site in Ghent as obtained with SCPT.

Fig. 29. Time history of the horizontal acceleration in the bottom

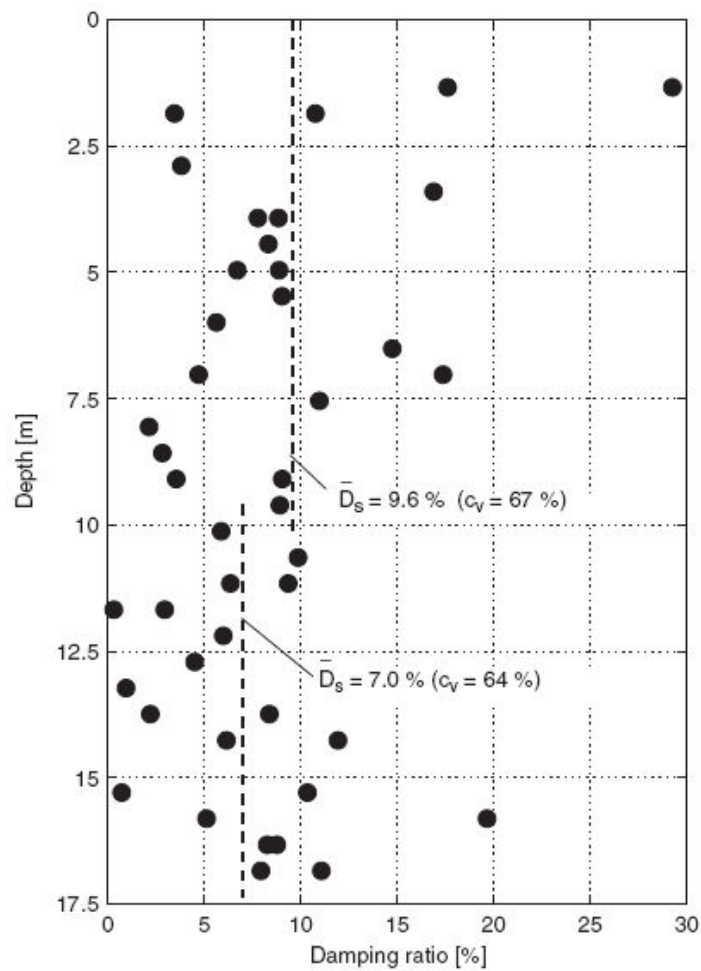


Fig. 31. Material damping ratio D_s at the site in Ghent as obtained with SCPT (summary of tests with sledgehammer strikes from the left and the right side of the source beam). Mean values for each layer are shown as dashed lines.

۷. نتایج

روش شیب نسبت طیفی (SRS) برای استنتاج تغییرات نسبت میرایی مادی با عمق برای یک سایت با استفاده از تاریخچه زمانی شتاب اندازه گیری شده از آزمایش نفوذ مخروط لرزه ای (SCPT) به کار برده می شود. اگرچه نتایج بدست آمده با آزمایش درجا هنوز هم به صورت پراکنده می باشد (که با ضریب تغییرات مشخص می گردد) و نیازمند به کار بردن تکنیک های مناسب برای بهبود بیشتر قبل از اینکه نتایج بتوانند به طور قابل اطمینان در مدل های پیش بینی عددی برای اندرکنش خاک-سازه و مسائل انتشار امواج الاستیک استفاده شود، ثابت شده است که SCPT یک تکنیک با ارزش برای استنتاج نسبت میرایی مادی می باشد. با در نظر گیری اینکه در کنار تکنیک SASW (آزمایش امواج سطحی)، به طور عملی گزینه های موثر با هزینه های کمتر وجود دارد، توسعه بیشتر تکنیک SCPT برای محاسبات درجای نسبت میرایی مادی مطلوب است. بویژه در این مقاله مشاهده شد که افزایش ساختگی در فرکانس نمون تا ۱۰۰ هرتز دقت سرعت موج برشی اندازه گیری شده بهبود می یابد. در این روش، دقت نتایج با تکنیک همبستگی عبوری بدست می آید در حالیکه فرکانس نمونه فیزیکی در طول آزمایش به طور نسبی پایین است. در اندازه گیری تاریخچه زمانی شتاب در استفاده از تابع پنجره هر زمان که ممکن باشد باید اجتناب کرد. استفاده از طول پنجره یکسان برای هر دو رکورد تاریخچه زمانی لرزه ای مفید می باشد. از یک تابع پنجره نسبت به هر نجره مستطیلی به طور کلی بهبود بیشتری حاصل نمی گردد.

پایان