

Penggunaan teknik gelombang permukaan (SASW) dalam kajian geologi kejuruteraan

MOHD AZMI ISMAIL¹, ABDUL RAHIM SAMSUDIN¹, KHAIRUL ANUAR MOHD NAYAN² &
ABDUL GHANI RAFEK¹

¹Program Geologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi

²Jabatan Kejuruteraan, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi

Abstrak: Teknik gelombang permukaan adalah teknik seismos tanpa musnah yang digunakan untuk menentukan sifat-sifat dinamik sub-permukaan pada tahap terikan yang rendah. Ujian lapangan boleh dilakukan samada di permukaan tanah atau turapan. Dengan penghasilan dan pengukuran gelombang permukaan di lapangan, lengkung serakan, iaitu plot halaju gelombang permukaan melawan panjang gelombang akan dihasilkan. Lengkung serakan ini seterusnya akan menjalani analisis songsangan bagi mendapatkan profil kekukuhan sebenar tapak berkenaan. Teknik ini berpotensi untuk digunakan dalam sektor kejuruteraan geologi. Hasil ujian gelombang permukaan yang dilakukan ke atas dua jenis tapak yang berlainan, iaitu teres potongan dan tambakan termampat adalah dibentangkan. Hasil ujian SASW dibandingkan dengan kaedah-kaedah ujian piawai seperti SPT dan meter-tekanan.

Abstract: Surface wave technique is a non-destructive seismic technique that can be used to determine the low-strain dynamic properties of sub-surface. This technique can either be performed on soil or pavement surfaces. By generating and measuring surface waves in the field, a dispersion curve of surface wave velocity versus wavelength is constructed. An inversion of the dispersion data was then employed to produce the actual stiffness profile of the site. The test method has potential applications in engineering geology sector. Results from surface wave tests on two different sites of cut and compacted fill terraces are presented. The results from SASW test were then compared to the standard test of the SPT and the pressure-meter tests.

PENGENALAN

Ujian tanah dan batuan dalam geologi kejuruteraan masih bergantung kepada penggunaan berbagai teknik dan peralatan dalam menghasilkan data yang boleh meyakinkan. Pada dasarnya kekuatan dan kekukuhan bahan-bahan yang dikaji adalah merupakan parameter penting dalam ujian kejuruteraan geologi. Parameter tersebut boleh diperolehi menggunakan ujian secara *in situ* dan ujian di makmal. Secara idealnya pengukuran perlu dilakukan secara *in situ* bagi mengekalkan parameter semulajadinya. Tambahan pula ujian di makmal terdedah kepada gangguan kepada sampel, isipadu yang kecil, dan perubahan terikan dan tegasan menimbulkan ketakpastian pengukuran. Kaedah geofizik adalah merupakan satu teknik *in situ* yang dapat memberikan maklumat geologi bagi isipadu bahan yang besar. Termasuk dalam kategori ini adalah berbagai teknik seismos. Adalah diketahui umum bahawa dengan mengukur halaju gelombang seismos, sifat-sifat mekanik bahan yang diuji dapat diperolehi.

Salah satu kaedah yang dapat mencirikan sub-permukaan ialah dengan mengukur halaju gelombang permukaan. Halaju perambatan gelombang permukaan di dalam sesuatu media bergantung kepada nilai modulus elastik dan ketumpatan bahan tersebut. Teknik Analisis Spektrum Gelombang Permukaan (SASW) yang diperkenalkan sejak tahun 1980an adalah merupakan satu teknik geofizik tanpa musnah yang berupaya memberikan profil kekukuhan tapak secara cepat. Kertas ini

membincangkan prinsip asas pengukuran dan contoh penggunaan SASW dalam pencirian tapak di dua lokasi yang berlainan serta perbandingan hasil ujian dengan teknik piawai.

KAEDAH KAJIAN

Gelombang Permukaan

Gelombang permukaan yang dikenali sebagai gelombang Rayleigh merambat di sepanjang permukaan bebas suatu media dan kesannya berkurangan mengikut kedalaman. Gelombang Rayleigh yang terhasil dari hentaman menegak adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Di dalam ruang setengah yang homogen, isotropik dan elastik, halaju gelombang Rayleigh tidak dipengaruhi oleh frekuensi. Bagaimanapun, di dalam media berlapis (tidak homogen), halajunya berubah dengan perubahan frekuensi. Pergantungan halaju terhadap frekuensi di dalam media heterogen ini dikenali sebagai serakan, dan plot halaju fasa melawan frekuensi disebut sebagai lengkung serakan. Halaju fasa menggambarkan perambatan gelombang bagi setiap frekuensi gelombang yang dihasilkan.

Teori kekenyalan menunjukkan hubungan di antara halaju gelombang Rayleigh dengan gelombang ricih seperti ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$V_R = CV_s \quad (1)$$

di mana C adalah suatu fungsi yang bergantung kepada nisbah Poisson dan ia bernilai di antara 0.86 - 0.96.

Namun demikian, Nazarian (1984) menunjukkan ralat yang dihasilkan oleh nilai C adalah kurang dari 10%.

Ujian Gelombang Permukaan (SASW)

Terdapat beberapa peringkat yang terlibat dalam pengukuran menggunakan teknik gelombang permukaan di lapangan, iaitu i) penghasilan dan pengesanan gelombang Rayleigh yang bersesuaian, ii) rakaman isyarat gelombang, iii) analisis spektrum data lapangan, iv) penghasilan profil halaju gelombang, dan v) penentuan modulus elastik

Penghasilan/pengesanan gelombang Rayleigh

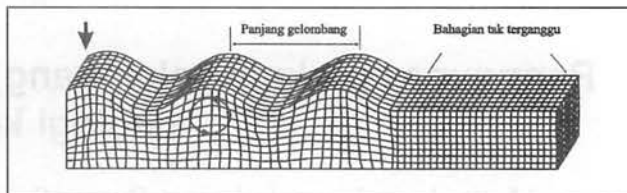
Gelombang Rayleigh berbagai frekuensi dapat dihasilkan dengan melakukan hentaman menegak di permukaan. Julat frekuensi yang diperlukan dalam pengukuran bergantung kepada kedalaman dan resolusi ujian. Frekuensi yang tinggi diperlukan untuk mengesan bahagian yang cetek sementara frekuensi yang rendah adalah untuk mengesan bahagian yang lebih dalam. Nilai frekuensi yang dihasilkan oleh sesuatu punca bergantung kepada luas permukaan sentuhan dan jisim punca tersebut (Matthews *et al.*, 1996). Walaupun setiap bentuk punca menghasilkan suatu julat frekuensi yang agak besar, secara umumnya beban yang lebih besar dan berat menghasilkan isyarat yang didominasi oleh frekuensi rendah.

Perambatan gelombang Rayleigh dikesan menggunakan dua geofon yang dilekatkan di permukaan tapak. Pengesan disusun sebaris dengan titik punca seperti ditunjukkan dalam Rajah 2. Pemilihan jarak di antara pengesan adalah penting dalam pengukuran gelombang permukaan. Untuk pengukuran menggunakan dua pengesan, jarak di antara kedua-dua pengesan (d) adalah sama dengan jarak di antara punca dengan pengesan terdekat. Jarak ini kemudiannya dikembangkan secara berganda untuk jarak yang berikutnya dengan merujuk kepada titik tengah yang ditetapkan. Heisey *et al.* (1982) mencadangkan jarak di antara pengesan seharusnya $\lambda/3 < d < 2\lambda$ di mana λ adalah panjang gelombang yang terlibat.

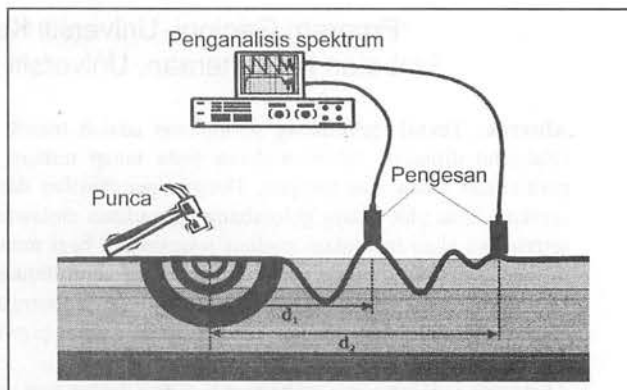
Rakaman isyarat gelombang

Perakam yang digunakan untuk pengukuran pergerakan zarah permukaan tapak sepanjang kajian ini dijalankan adalah penganalisis spektrum dinamik. Isyarat yang dirakam dari pengesan diproses secara digital dalam domain masa (iaitu amplitud melawan masa) dan domain frekuensi (iaitu amplitud spektrum melawan frekuensi). Dua parameter utama yang dirakam dalam pengukuran gelombang permukaan ialah fungsi koheren dan spektrum fasa bagi kedua-dua pengesan.

Fungsi koheren digunakan untuk menilai kualiti data yang diperolehi di lapangan. Isyarat yang mempunyai korelasi yang paling baik di antara pengesan pertama dan pengesan kedua mempunyai nilai koheren menghampiri 1. Sebaliknya nilai koheren yang rendah menunjukkan korelasi yang kurang baik. Data yang mempunyai nilai



Rajah 1. Bentuk canggaaan dan pergerakan zarah semasa perambatan gelombang Rayleigh.



Rajah 2. Tatasusunan peralatan SASW di lapangan.

koheren yang melebihi 0.9 sahaja digunakan dan dianggap sebagai menepati kriteria bagi penerimaan data (Nazarian & Stokoe, 1984). Berikutnya spektrum fasa digunakan untuk mengira perbezaan fasa bagi setiap frekuensi, ϕ , di antara kedua isyarat (yang dikesan oleh pasangan pengesan) yang disebabkan oleh masa yang tertangguh, perambatan yang tertangguh, atau perbezaan laluan gelombang.

Analisis spektrum data lapangan

Berdasarkan kepada ciri-ciri serakan gelombang Rayleigh, lengkung serakan menghubungkan di antara frekuensi (atau panjang gelombang) dan halaju fasa akan diplot. Bagi kes di mana masa perambatan, t , menyamai kala gelombang ($T = 1/f$) perbezaan fasa ialah 360° . Oleh yang demikian, masa perambatan di antara dua pengesan untuk setiap frekuensi dalam spektrum fasa dikira menggunakan persamaan berikut:

$$t(f) = \frac{\phi(f)}{360f} \quad (2)$$

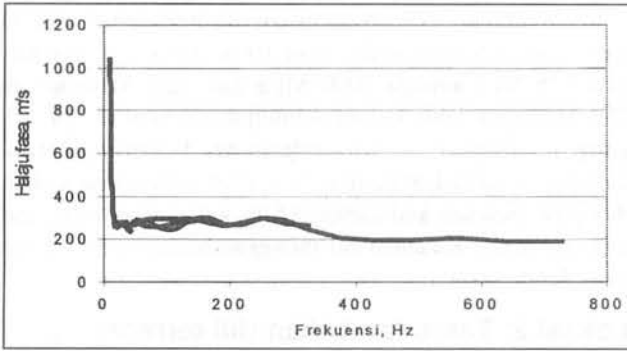
di mana f adalah frekuensi, $t(f)$ adalah masa perambatan bagi frekuensi tersebut, dan $\phi(f)$ adalah perbezaan fasa dalam frekuensi berkenaan. Oleh itu, halaju gelombang Rayleigh bagi frekuensi berkenaan adalah:

$$V_R(f) = \frac{d}{t(f)} \quad (3)$$

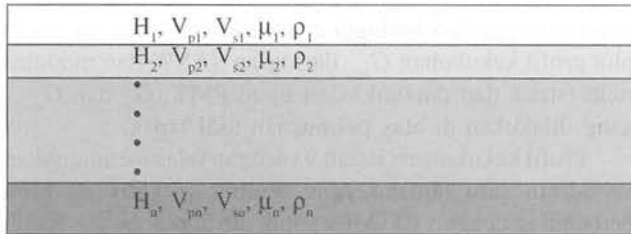
dan panjang gelombang bagi gelombang Rayleigh tersebut adalah:

$$L_R(f) = \frac{V_R(f)}{f} \quad (4)$$

Dengan mengulangi prosedur yang digariskan melalui persamaan (2) hingga (4) bagi setiap frekuensi dan jarak pengesan, lengkung serakan lapangan akan dapat dihasilkan (Rajah 3).



Rajah 3. Contoh lengkung serakan lapangan yang diperolehi dari ujian SASW.



Rajah 4. Andaian parameter-parameter profil permulaan bagi setiap lapisan.

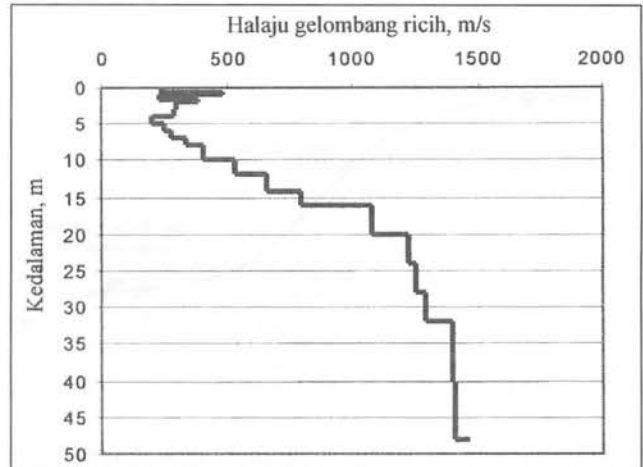
Halaju gelombang yang diperolehi di lapangan bukanlah halaju sebenar gelombang Rayleigh, tetapi adalah halaju ketara atau halaju fasa. Kehadiran lapisan yang mempunyai halaju yang lebih tinggi atau lebih rendah di permukaan atas mempengaruhi pengukuran halaju bagi lapisan di bawahnya. Oleh itu, kaedah permodelan yang dinamakan kaedah songsangan diperlukan untuk mendapatkan halaju sebenar gelombang Rayleigh daripada halaju ketara tersebut.

Songsangan lengkung serakan lapangan

Proses bagi mendapatkan halaju perambatan sebenar pada kedalaman yang berbeza (profil halaju) dari lengkung serakan lapangan dikenali sebagai songsangan. Songsangan akan dilakukan secara kaedah empirik dan analisis.

Songsangan empirik digunakan bagi mendapatkan profil awal halaju gelombang di lapangan. Dalam kaedah ini, kedalaman berkesan, z , ditentukan bagi setiap halaju gelombang dari lengkung serakan lapangan. Amplitud gelombang Rayleigh berkurangan dengan kedalaman (z) dan dalam kaedah songsangan mudah ini, nisbah λ/z dianggap tetap. Bagi tapak yang mempunyai nilai kekukuhan yang bertambah secara ketara, Gazetas (1982) mencadangkan nisbah $\lambda/z = 3$ digunakan bagi kebanyakan tapak tanah. Halaju gelombang ricih pula diperolehi dengan mendarab halaju gelombang Rayleigh dengan faktor 1.1 berdasarkan persamaan (1). Kaedah songsangan empirik hanya sesuai untuk tapak geologi yang menunjukkan pertambahan halaju gelombang kecil dengan kedalaman (Ganji *et al.*, 1998).

Apabila model yang lebih tepat dan jitu diperlukan, kaedah songsangan analisis menggunakan teori perambatan gelombang elastik di dalam media berlapis digunakan.



Rajah 5. Contoh profil halaju gelombang ricih hasil sonsangan lengkung serakan yang ditunjukkan oleh Rajah 3 menggunakan perisian FitSASW.

Kaedah ini mengandaikan suatu profil ramalan yang terdiri daripada beberapa lapisan. Bagi setiap lapisan, ketebalan (H), halaju gelombang ricih (V_s), nisbah Poisson (μ) atau halaju gelombang mampatan (V_p), dan ketumpatan jisim (ρ) perlu diberikan (Rajah 4).

Berdasarkan kepada profil awal ini, satu lengkung serakan dimodelkan secara teori. Lengkung serakan teori ini dipadankan dengan lengkung serakan lapangan. Jika kedua-dua lengkung tersebut tidak sepadan, nilai parameter bagi profil bayangan tadi diubah. Prosedur ini diulang sehingga kedua-dua profil tersebut sepadan. Beberapa kaedah permodelan telah diperkenalkan untuk penggunaan dalam SASW. Dalam kajian ini pendekatan kaedah perpindahan matriks dinamik yang diperkenalkan oleh Kausel & Roesset (1981) telah digunakan. Rajah 5 menunjukkan hasil sebenar profil songsangan data lengkung serakan dari Rajah 3.

Penentuan Modulus Elastik

Setelah profil halaju perambatan gelombang ricih untuk setiap lapisan diperolehi dari proses songsangan lengkung serakan, nilai modulus ricih dan modulus Young dapat dianggarkan menggunakan persamaan-persamaan berikut:

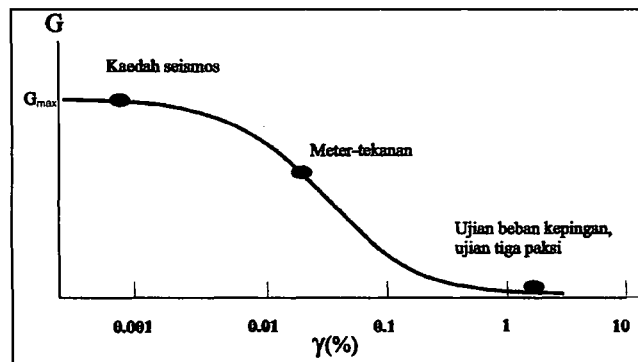
$$G = \frac{\gamma}{g} V_s^2 \tag{6}$$

dan

$$E = 2(1+\nu)G \tag{7}$$

di mana G ialah modulus ricih, E ialah modulus Young, Nilai-nilai γ (berat unit bahan), g (pecutan graviti), dan ν ialah nisbah Poisson.

Nilai G bagi bahan tanah sangat bergantung kepada nilai terikan yang dikenakan (Jardine *et al.* 1986). Nilai kekukuhan yang diperolehi dari ujian seismos termasuk SASW adalah dikenali sebagai G_{max} . Ia mewakili kekukuhan pada tahap terikan yang sangat rendah (0.001%) dan merupakan modulus ricih maksima yang ditunjukkan oleh sesuatu bahan. Kaedah-kaedah lain yang digunakan



Rajah 6. Kekukuhan ricih, G , bergantung kepada jenis ujian yang digunakan.

untuk penentuan G adalah betul untuk terikan yang lebih besar (Rajah 6).

TAPAK KAJIAN DAN HASIL

Pengukuran gelombang permukaan telah dilakukan di tapak projek pembinaan Kampung Siswa (Kamsis) H, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi. Rajah 7 menunjukkan kedudukan kawasan kajian. Kawasan ini dipilih untuk kajian kerana terdapat data rujukan yang telah diperolehi sepanjang projek pembinaan ini berjalan. Data yang diperolehi dari teknik-teknik rujukan seperti ujian tusukan piawai (SPT) dan meter-tekanan (PMT) akan dapat dibandingkan dengan data dari ujian gelombang permukaan. Terdapat dua jenis tapak yang dipilih untuk kajian ini, iaitu teres potongan dan teres tambakan.

Geologi kawasan ini adalah terdiri daripada batuan Formasi Bukit Kenny yang berusia Paleozoik Atas. Formasi ini terdiri daripada selanglapis di antara batu filit dan batu kuarzit yang terhasil dari proses metamorfisme gred rendah hingga sederhana batu lodak dan batu pasir. Pemerhatian di lapangan menunjukkan batuan filit yang merupakan batuan dominan di sini telah terluluhawa. Telerang kuarza dan oksida besi didapati dengan banyaknya di permukaan singkapan.

Kajian yang dilakukan menggunakan dua geofon (frekuensi semulajadi 2-Hz) dengan sela jarak 1 m, 2 m, 4 m, 8 m, dan 16 m. Beberapa set tukul dan pemberat telah digunakan bagi mendapatkan seluruh julat frekuensi yang diperlukan untuk ujian ini.

Lokasi 1: Teres potongan (Cut terrace)

Tapak yang akan menempatkan Blok A ini telah dipotong sedalam 4 m dari ketinggian asal. Garis survei yang dipilih merentasi lubang gerudi J4 yang mempunyai ujian SPT yang dilakukan di atas teres potongan ini (PL 58 m). Plot profil anggaran bilangan hentaman, N dari ujian SPT dan modulus ricih maksima (G_{max}) dari ujian SASW ditunjukkan dalam Rajah 8.

Bahagian permukaan atas, iaitu sehingga kedalaman 5 m terdiri daripada bahan yang lebih lembut. Ia ditunjukkan oleh kedua-dua plot di mana nilai G_{max} pada bahagian tersebut adalah sekitar 175 MPa dan anggaran

nilai N adalah 375. Nilai-nilai ini bertambah secara mendadak sehingga kedalaman 10 m, iaitu G_{max} berubah dari 175 MPa kepada 3000 MPa dan nilai N mencecah 750. Bahagian lebih dalam menunjukkan nilai G_{max} dan N yang meningkat secara sederhana. Penurunan nilai kekukuhan pada kedalaman 11 - 13 m jelas pada kedua-dua plot. Selepas kedalaman 15 m kekukuhan mencapai nilai tertinggi. Keadaan ini menggambarkan sifat batuan yang lebih segar.

Lokasi 2: Teres tambakan (fill terrace)

Tapak yang akan menempatkan Blok B ini telah ditambah setinggi 2 - 10 m. Berdasarkan garisan kontur yang terdekat, ketinggian garis survei sekarang adalah 6 m lebih tinggi dari ketinggian asal. Rajah 9 menunjukkan plot profil kekukuhan G_{max} dari ujian SASW dan modulus ricih (statik dan dinamik) dari ujian PMT (G_{ur} dan G_{dyn}) yang dilakukan di atas permukaan asal tapak.

Profil kekukuhan (Rajah 9) dengan jelas menunjukkan kehadiran satu lapisan yang lembut (sekitar 10 MPa berbanding dengan 100 MPa untuk tanah potongan - Rajah 8) yang diwakili oleh lapisan tambakan setebal 5 - 6 m. Kekukuhan kemudiannya bertambah secara linear sehingga kedalaman 10 m. Model mencadangkan terdapatnya satu lapisan yang mempunyai nilai kekukuhan yang sama setebal kira-kira 4 m di antara kedalaman 10 m hingga 14 m. Lapisan ini diikuti oleh beberapa siri lapisan yang menunjukkan kekukuhan yang meningkat dengan kedalaman. Oleh kerana sela pengesanan maksima yang digunakan di sini adalah 16 m, bahagian yang lebih dalam daripada tidak dapat dimodelkan. Profil kekukuhan dari ujian SASW menunjukkan korelasi yang baik dengan ujian PMT. Anggaran nilai G_{dyn} tersebut dikira menggunakan nilai minima dalam persamaan berikut (Bellotti *et al.*, 1986 dalam Kramer, 1996) yang digunakan untuk bahan berpasir.

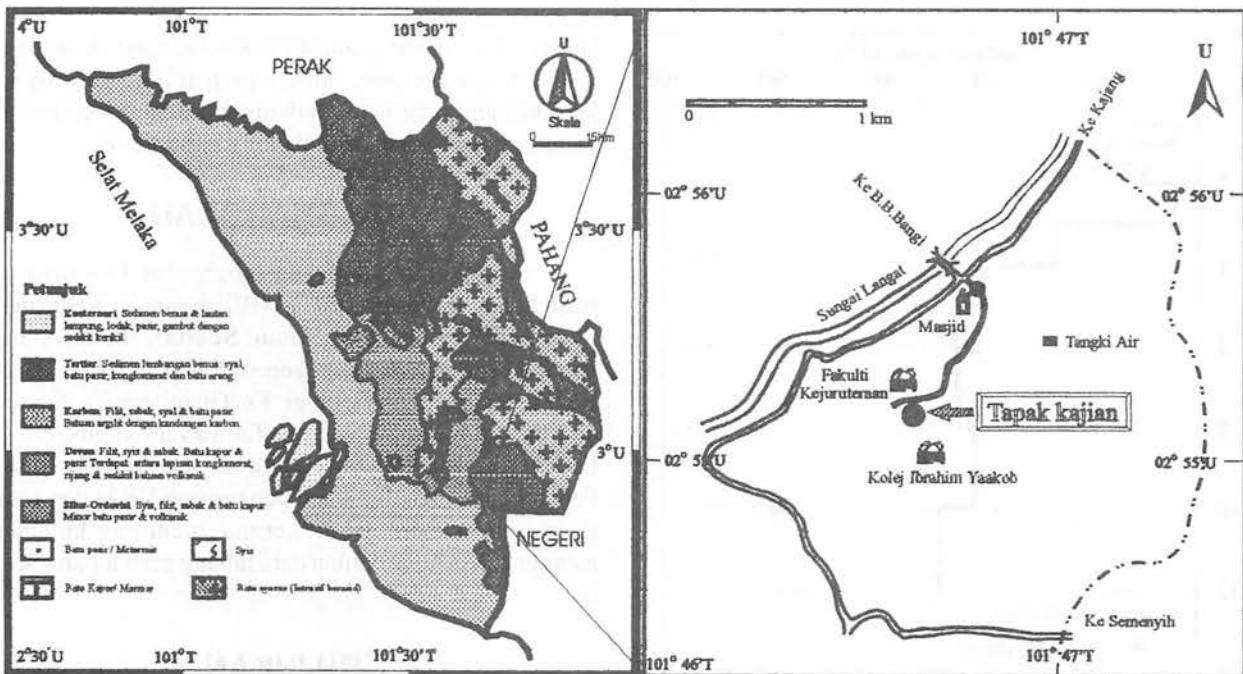
$$3.6 \geq \frac{G_{max}}{G_{ur}} \leq 4.8 \quad (8)$$

Adalah dijangkakan julat nisbah tersebut adalah lebih kecil untuk bahan yang mempunyai kejelekitan yang tinggi seperti lempung. Walau bagaimanapun, nilai 3.6 dianggap sesuai kerana kawasan kajian terdiri daripada campuran dari batu pasir dan batu lodak yang termetamorf sederhana.

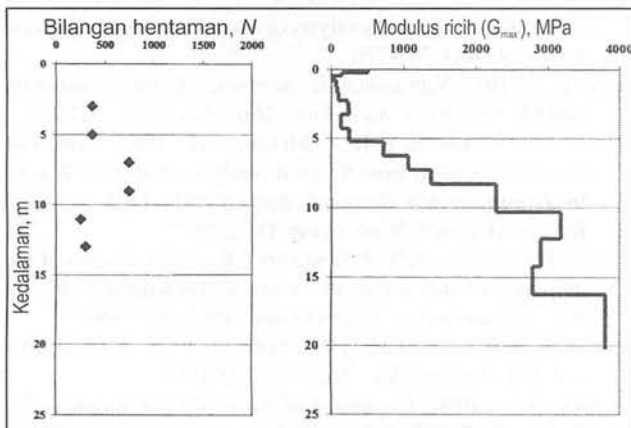
Lokasi 3: Teres tambakan

Ujian SASW di atas tapak tambakan setinggi 4 m yang akan menempatkan Blok H ini dibuat merentasi lubang gerudi E5 yang mempunyai hasil ujian PMT. Rajah 10 menunjukkan plot profil G_{max} dari ujian SASW dan G_{dyn} dari PMT yang dikira menggunakan persamaan (5). Lapisan tambakan menunjukkan nilai G_{max} yang agak rendah iaitu lebih kurang 10 MPa. Data yang diperolehi dari ujian SASW untuk sela 16 m tidak baik berkemungkinan disebabkan oleh gangguan cerucuk yang telah ditanam sebelum ujian dibuat.

Perbandingan dengan ujian PMT hanya dapat dilihat



Rajah 7. Peta menunjukkan lokasi tapak kajian.



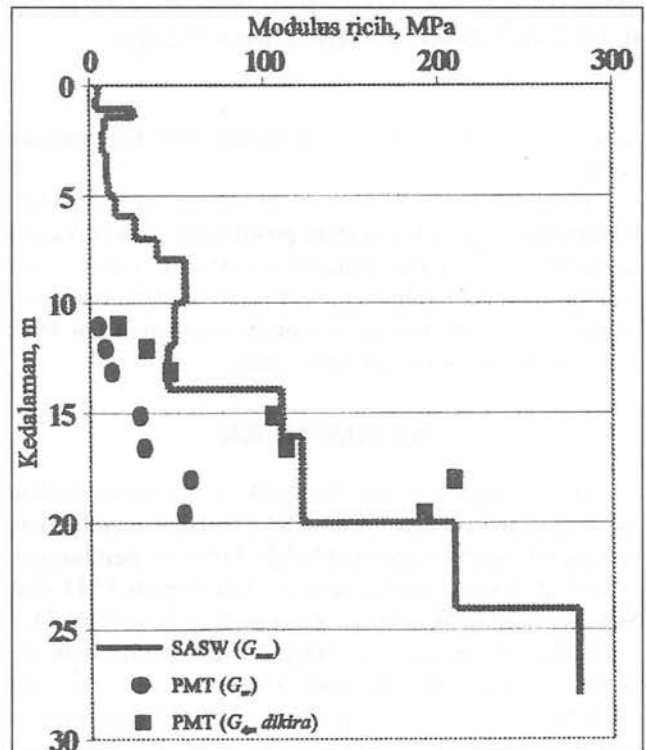
Rajah 8. Perbandingan profil kekuatan dari ujian SASW dan SPT ke atas tapak cadangan Blok A, projek pembangunan Kamsis H, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Selangor.

pada kedalaman 6 - 10 m sahaja. Walau bagaimanapun jika bahagian yang lebih dalam dapat dimodelkan dengan kaedah SASW, korelasi yang lebih baik mungkin dapat dibuat.

PERBINCANGAN

Untuk membandingkan nilai G dari ujian SASW dengan nilai G dari PMT, satu faktor pertukaran adalah diperlukan disebabkan perbezaan tahap terikan yang dihasilkan semasa ujian dijalankan (Rajah 6). Nilai faktor pertukaran ini adalah berbeza mengikut jenis bahan yang diuji. Untuk jenis tanah dan batuan di tapak kajian ini faktor 3.6 adalah dianggap sesuai.

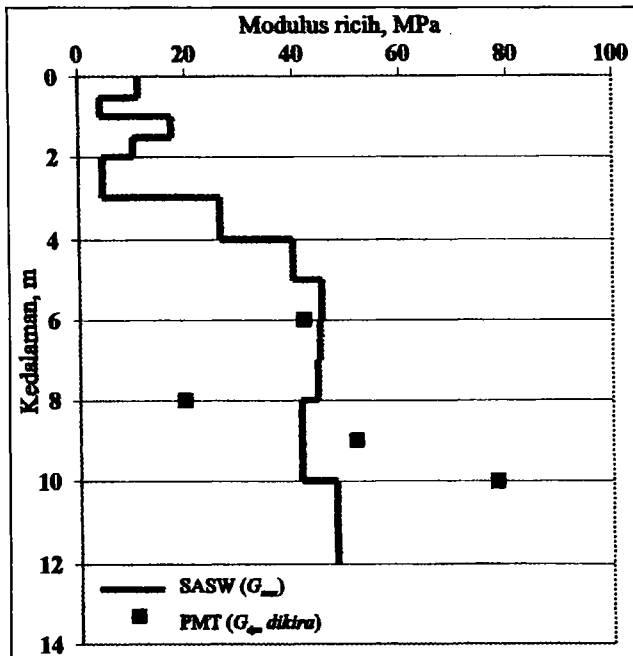
Perbandingan nilai G dari ujian SASW dengan N dari SPT memerlukan bilangan data lapangan yang lebih banyak. Kajian awal ini menunjukkan hubungan yang baik kedua-dua parameter tersebut. Walaupun SPT merupakan kaedah yang telah diterima ramai untuk



Rajah 9. Perbandingan profil kekuatan dari ujian SASW dan SPT ke atas tapak cadangan Blok B, projek pembangunan Kamsis H, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Selangor.

mencirikan sesuatu tapak, ia melibatkan kos yang tinggi dan terhad kepada suatu kedudukan tertentu sahaja. Oleh yang demikian, pemilihan kaedah ujian yang boleh memberikan maklumat bagi isipadu bahan yang besar akan menjimatkan kos dan masa.

Perubahan kekuatan dengan kedalaman mungkin boleh dipengaruhi oleh dua faktor utama, iaitu pengaruh beban dan kesan aktiviti luluhawa yang merupakan salah



Rajah 10. Perbandingan profil kekakuan dari ujian SASW dan SPT ke atas tapak cadangan Blok H, projek pembangunan Kamsis H, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Selangor.

satu aspek penting dalam menentukan sifat kejuruteraan kawasan ini.

Kedalaman yang diperolehi dalam ujian SASW bergantung kepada kekakuan profil tapak dan frekuensi terendah yang dapat dihasilkan. Untuk tapak yang mempunyai kekakuan yang tinggi, kedalaman yang didapati akan bertambah, walaupun menggunakan jenis punca dan sela pegasan yang sama.

KESIMPULAN

Data daripada kajian kes yang telah dibentangkan menunjukkan keupayaan teknik SASW dalam memberikan maklumat yang diperlukan oleh jurutera pembinaan, setanding dengan teknik rujukan lain seperti PMT dan SPT. Ia menjimatkan masa dan kos operasi kerana tidak melibatkan penggunaan lubang gerudi dan peralatan besar. Oleh kerana pengukuran yang dibuat meliputi zon yang lebih luas, maklumat yang diperolehi mewakili isipadu sampel yang lebih besar.

Ujian SASW juga berupaya membezakan kehadiran

lapisan tambakan termampat dan ketebalannya dengan tepat. Walau bagaimanapun, tidak seperti teknik seismos yang lain, kehadiran cerucuk berhampiran dengan garis survei mengganggu isyarat gelombang yang dikesan.

PENGHARGAAN

Kajian ini dibiayai sebahagian besarnya oleh peruntukan IRPA 02-02-02-0010 daripada Kementerian Sains, Teknologi dan Alam Sekitar. Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada En. Tajul Arus dan En. Hamid dari Program Geologi; En. Ghani dan En. Sulaiman dari Fakulti Kejuruteraan; dan En. Lakam Mejus, En. Goh Leong Kee dan En. Muzammil di atas bantuan mereka. Penghargaan juga ditujukan pengurusan UKM dan Kausar Corporation Sdn. Bhd. kerana memberi kebenaran menggunakan tapak kajian data lubang gerudi untuk kajian ini.

RUJUKAN

- GANJI, V., GUCUNSKI, N., & NAZARIAN, S., 1998. Automated inversion procedure for spectral analysis of surface waves. *J. Geotech. Engrg.*, 124(8), 757-770.
- GAZETAS, G., 1982. Vibrational characteristics of soil deposits with variable velocity. *J. Num. Anal. Math. Geomech.*, 6, 1-20.
- HEISEY, J.S., STOKOE II, K.H. & MEYER, A.H., 1982. Moduli of pavement systems from Spectral Analysis of Surface Waves. In *Transportation Research Record 852*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 22-31.
- JARDINE R.J., FOURIE, A.B. & BURLAND, J.B., 1986. Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil structure interaction. *Geotechnique*, 36(3), 377-396.
- KAUSEL, E. & RÖESSET, J.M., 1981. Stiffness matrices for layered soil, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 1743-1761.
- KRAMER, S.L., 1996. *Geotechnical Earth Quake Engineering*. Prentice Hall, 653p.
- MATTHEWS, M.C., HOPE, V.S. & CLAYTON, R.I., 1996. The geotechnical value of ground stiffness determined using seismic methods. In: *Proc. 30th Annual Conf. of the Eng. Group of the Geol. Soc.*, University of Lige, Belgium.
- NAZARIAN, S., 1984. *In-situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement systems by Spectral-Analysis-Of-Surface-Wave Method*. Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, 452p.
- NAZARIAN, S. & STOKOE II, K.H., 1984. In-situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves. *Proc. 8th World Conf. On Earthquake Engineering*, 3, 31-38.