

## Pengiraan nilai Penanda Mutu Batuan (RQD) menggunakan kaedah analisis spektral gelombang permukaan

SUHARSONO, ABDUL RAHIM SAMSUDIN & ABDUL GHANI RAFAEK

Pusat Pengajian Sains Sekitaran & Sumber Alam, Fakulti Sains & Teknologi  
Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor

**Abstrak:** Penanda Mutu Batuan (RQD) seringkali digunakan sebagai ukuran mutu jasad batuan. Indeks RQD ini dikira berdasarkan peratus jumlah teras gerudi yang diperolehi semasa penggerudian. Nilai RQD mempunyai hubungan secara empirikal dengan jarak retakan dan darjah luluhawa pada jasad batuan. Skema pengelasan jasad batuan yang berdasarkan kepada hubungan diantara nilai RQD dan kualiti jasad batuan telah dikenalkan oleh Deere (1968). Singh & Goel (1999) telah membuat pengiraan nilai RQD menggunakan halaju gelombang mampatan ( $V_p$ ) yang diukur di lapangan (menggunakan kaedah biasan dan pantulan seismos) dan halaju  $V_p$  sampel teras gerudi batuan yang diperolehi melalui ujian ultrasonik di makmal. Kertas kerja ini membincangkan teknik baharu bagi pengiraan nilai RQD menggunakan kaedah analisis spektral gelombang permukaan yang pada masa ini telah digunakan dan dikembangkan untuk menentukan kekukuhan daripada tanah dan jasad batuan serta jalan raya dan konkrit. Dalam teknik baharu ini, halaju gelombang ricih ( $V_s$ ) yang diukur melalui kaedah Analisis Spektral Gelombang Permukaan (SASW) beserta halaju  $V_s$  yang diperolehi daripada ujian ultrasonik sampel teras batuan di makmal digunakan bagi mengira nilai RQD melalui persamaan,

$RQD (\%) = 100^{(1-\delta)}$ , dimana  $\delta = \left[ \frac{(V_{su} - V_{sb})^2}{(V_{su} + V_{sb})^2} \right]$  dan  $V_{sb}$  serta  $V_{su}$  adalah halaju gelombang ricih yang diukur dengan kaedah SASW serta ujian ultrasonik. Kaedah baharu ini telah diuji kebolehgunaannya ditiga tapak kajian iaitu Bandar Tasik Selatan, Kepong dan Bandar Sri Damansara dan hasil yang diperolehi bersesuaian (tidak melebihi 10%) dengan nilai RQD yang diperolehi daripada data lubang gerudi.

**Abstract:** Rock quality designation (RQD) is often utilised as a measure of overall quality of rock mass. The RQD index is based on a modified computation of percent rock core recovery during drilling. The RQD value can be empirically related to the relative frequency of discontinuities and condition of weathering of the rock mass. A rock mass classification scheme based on the relationship between the RQD and rock mass quality has been designed by Deere(1968). Singh & Goel (1999) had calculated the RQD values using compressive wave velocity ( $V_p$ ) measured in the field (using the conventional refraction and reflection seismics) and compressive wave velocity ( $V_p$ ) obtained from the standard ultrasonic test of the core samples in the laboratory. This paper describes a new proposed method of RQD computation using Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) method which is currently used and developed for determining the stiffness of subsurface soil and rocks as well as for pavement and concrete materials. In this new technique, the velocity of shear wave ( $V_s$ ) derived from the SASW measurement together with the ultrasonic shear wave velocity test of the core samples in the laboratory were used to compute the RQD values using the following equation,

$RQD (\%) = 100^{(1-\delta)}$ , where  $\delta = \left[ \frac{(V_{su} - V_{sb})^2}{(V_{su} + V_{sb})^2} \right]$  and  $V_{sb}$  and  $V_{su}$  are the shear wave velocities derived from the SASW and ultrasonic velocity test respectively. This new method has been tested at three study sites, Bandar Tasik Selatan, Kepong and Bandar Sri Damansara. The calculated RQD values were in good agreement (within 10% difference) with those of RQD values obtained from the bore hole data.

### PENDAHULUAN

Retakan-retakan dan darjah luluhawa pada jasad batuan merupakan dua ciri paling penting bagi menentukan mutu kejuruteraan jasad batuan. Ciri-ciri berkenaan dapat dihipotesis dengan parameter penggerudian yang dilakukan mengikut teknik gerudi yang baik. Pengalaman telah menunjukkan bahawa perolehan teras batuan itu sahaja tidak sentiasa merupakan petunjuk mutu yang boleh dipercayai. Walau bagaimanapun didapati bahawa perolehan teras batuan yang dikemaskini, iaitu hanya untuk teras yang berukuran 10 cm atau lebih boleh dipercayai (Singh & Goel, 1999). Ukuran mutu kejuruteraan ini dinamakan Penanda Mutu Batuan (Rock Quality Designation, RQD). Hubungan antara nilai Penanda Mutu Batuan dan mutu jasad batuan telah dicadangkan oleh Deere (1968) seperti pada Jadual 1.

Secara ringkas, Penanda Mutu Batuan boleh ditakrifkan sebagai panjang kumulatif daripada teras batuan yang lebih panjang dari 10 cm dibahagi kepada panjang gerudi keseluruhan :

$$RQD = \frac{\text{panjang kumulatif teras batuan} > 10 \text{ cm}}{\text{panjang keseluruhan gerudi}} \times 100\%$$

International Society of Rock Mechanics dalam Singh & Goel (1999) telah mencadangkan bahawa peralatan gerudi yang harus digunakan bagi menentukan nilai RQD adalah *double-tube core barrel* dengan menggunakan satu mata gerudi intan dan ukuran teras batuan sekurang-kurangnya NX (54.7 mm). Cara pengiraan nilai RQD pada lubang gerudi ditunjukkan pada Rajah 1.

Kaedah lainnya yang telah dicadangkan bagi pengiraan nilai RQD adalah menggunakan kaedah seismos yang memanfaatkan perbezaan sifat-sifat kenyal daripada lapisan batuan yang mengesan penjalaran halaju gelombang seismos. Kesan retakan (ketakselajaran) pada jasad batuan boleh ditaksir dengan cara membandingkan halaju gelombang mampatan (biasan mahupun pantulan) terhadap halaju gelombang ultrasonik pada sampel teras batuan yang dilakukan di makmal, mengikut persamaan,

$$RQD = [V_F/V_L]^2 \times 100\% \quad (1)$$

dimana  $V_F$  adalah halaju gelombang mampatan dengan

kaedah biasan atau pantulan, dan  $V_L$  adalah halaju gelombang mampatan daripada sampel teras batuan (Singh & Goel, 1999).

Pada dua dekad terakhir, telah berkembang kaedah Analisis Spektral Gelombang Permukaan (SASW) dalam kejuruteraan geoteknik. Kaedah ini telah berjaya menghasilkan parameter kekukuhan lapisan tanah ( $G_{max}$ ) pada pencirian tanah, penilaian semula asfalt dan konkrit. Merujuk pada kejayaan kaedah SASW pada kerja-kerja kejuruteraan, kertas kerja ini bertujuan menggunakan halaju perambatan gelombang Rayleigh (yang kemudiannya disongsangkan menjadi halaju gelombang ricih) bagi menaksir nilai RQD. Penggunaan gelombang Rayleigh ini diharapkan lebih berkesan berbanding dengan penggunaan gelombang mampatan, kerana dalam penggunaan kaedah seismos cetek, hampir dua per tiga (63%) daripada daya punca gelombang (tukul/beban jatuhan) menjalar dalam bentuk gelombang permukaan (Matthews *et al.*, 1996).

### METODOLOGI

Hao *et al.* (2001) telah melakukan ujikaji peletupan pada tapak batuan yang banyak mengandungi retakan-retakan. Percepatan (getaran) pada permukaan batuan diukur dan dianalisa sepanjang tiga lintasan iaitu yang selari, tegaklurus dan 45° daripada retakan batuan utama. Telah diperolehi hasil bahawa gelombang mampatan teratenuasi lebih pantas jika ianya menjalar ke hala tegaklurus kepada retakan batuan utama, manakala pada penjalaran yang sehalu dengan retakan batuan utama ianya teratenuasi lebih lambat. Komponen-komponen radial dan menegak daripada getaran permukaan pada titik yang sama pada permukaan dapat dikorelasikan, namun tidak terkorelasi pada seluruh frekuensi yang lebih besar dari 2500Hz, kerana pada tanah dan jasad batuan julat frekuensi gelombang yang dihasilkan adalah 0-2500Hz.

Stavropoulous *et al.* (2003) telah pula meneliti penjalaran gelombang Rayleigh pada batuan marmar. Kebergantungan frekuensi kepada halaju gelombang dapat diperolehi dengan menganggap bahawa medium berkelakuan seperti bahan kenyalikat (viscoelastic).

Keputusan-keputusan yang telah diperolehi Singh & Goel (1999) memberikan suatu petunjuk bahawa Penanda Mutu Batuan sememangnya dapat dikira menggunakan kaedah tak langsung iaitu kaedah seismos, sama ada biasan mahupun pantulan. Namun kerana dua alasan utama iaitu pertama, bahawa pada kedalaman yang cetek dua per tiga daya mekanikal punca gelombang seismos akan menjalar dalam bentuk gelombang permukaan, kedua merujuk pula kepada nilai RQD pada persamaan 1 yang tidak dapat dikorelasikan dengan piawai sedia ada, maka penelitian ini

**Jadual 1:** Piawai nilai RQD bagi mutu jasad batuan (Deere, 1968).

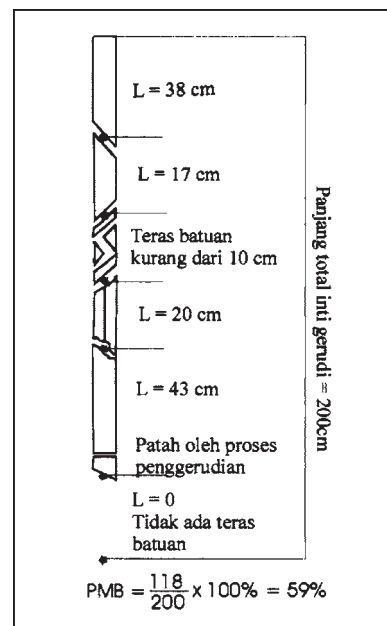
No.	RQD (%)	Mutu Batuan
1.	0 - 25	Sangat Buruk
2.	25 - 50	Buruk
3.	50 - 75	Sederhana
4.	75 - 90	Baik
5.	90 - 100	Sangat Baik

akan mencuba menggunakan gelombang Rayleigh bagi menaksir nilai Penanda Mutu Batuan mengikut piawai Deere (1968).

Kaedah SASW adalah satu kaedah yang pantas, murah dan tidak merosak bagi pencirian tapak pembinaan, lebuh raya dan kejuruteraan geoteknik lainnya. Secara khasnya kaedah ini telah dikembangkan sejak 1980 bagi pengiraan profil nilai modulus ricih pada asfalt dan lapisan tanah (Stokoe *et al.*, 1994; Gucunski *et al.*, 2000; Ganji *et al.*, 1998). Penyelidikan berikutnya menunjukkan kebolegunaan kaedah SASW bagi penilaian konkrit dan jasad batuan (Hao *et al.* 2001; Cho & Lin, 2001; Stavropoulou *et al.*, 2003; Suharsono & Abdul Rahim Samsudin, 2003).

Gelombang Rayleigh berbagai frekuensi dapat dihasilkan dengan membuat hentakan menegak di permukaan menggunakan tukul atau beban jatuhan sebagai punca tenaga. Dua buah pengesan gelombang sama ada geofon mahupun akselerometer disusunatur dengan jarak yang telah ditentukan (Rajah 2). Hubungan antara panjang gelombang yang terlibat dengan jarak kedua-dua pengesan gelombang seharusnya mengikuti persamaan  $\lambda/3 < d < 2\lambda$ , di mana  $\lambda$  adalah panjang gelombang yang terlibat (Heisey *et al.*, 1982 dalam Matthews, 1996).

Proses songsangan bagi menghasilkan profil halaju gelombang ricih dilakukan dengan menggunakan perisian WinSASW 2.0 (Joh, 1996). Kaedah songsangan ini menggunakan teori perambatan gelombang kenyal di dalam media berlapis, yang dimulakan dengan mengandaikan suatu profil ramalan yang terdiri daripada beberapa lapisan. Bagi setiap lapisan, ketebalan ( $h$ ), halaju gelombang ricih ( $V_s$ ), nisbah Poisson ( $\mu$ ) atau halaju gelombang mampatan ( $V_p$ ) dan ketumpatan jisim ( $\rho$ ) perlu dianggarkan. Berasaskan kepada profil awal ini, satu lengkung serakan dimodelkan secara teori menggunakan teori kekenyalan. Lengkung



**Rajah 1.** Pengukuran dan pengiraan nilai RQD daripada lubang gerudi.

serakan teori ini kemudiannya dipadankan dengan lengkung serakan lapangan. Jika kedua-dua lengkung serakan tersebut tidak sepadan, nilai parameter bagi profil anggaran tadi mesti diubahsuai.

**PERSAMAAN NILAI RQD BERASAS KAEDAH SASW**

Mengikut Wood & Jedele (1985) halaju gelombang ricih pada jasad batuan yang diperolehi menggunakan kaedah SASW biasanya lebih besar daripada 425 m/s, manakala Yang (1995) dan Athanasopoulos *et al.* (2000) mendedahkan nilai halaju gelombang ricih pada jasad batuan lebih besar daripada 800 m/s. Sementara itu Abdul Rahim Samsudin *et al.* (2003) memperolehi nilai halaju gelombang ricih lebih besar daripada 500 m/s bagi jasad batuan (Jadual 2).

Berasaskan pengamatan halaju gelombang ricih daripada batuan granit pada berbagai-bagai tapak ujikaji dengan menggunakan kaedah SASW di daerah Selangor Darul Ehsan dan halaju ultrasonik terhadap sampel tangan serta teras batuan, satu persamaan empirikal baharu dicadangkan bagi menghubungkan halaju gelombang ricih pada jasad batuan dengan piawai nilai Penanda Mutu Batuan iaitu :

$$PMB (\%) = 100^{(1-\delta)} \tag{2}$$

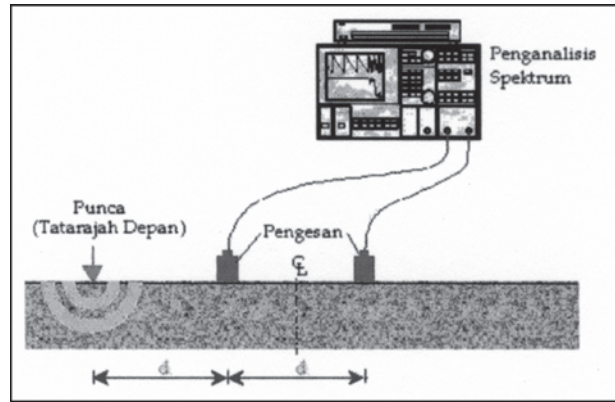
dimana  $\delta = \frac{(V_{su} - V_{sb})^2}{(V_{su} + V_{sb})^2}$  dan  $V_{su}$  adalah halaju gelombang ricih menggunakan ujian ultrasonik.  $V_{sb}$  adalah halaju gelombang ricih daripada kaedah SASW. Persamaan empirikal ini diterbitkan berasaskan kepada kenyataan bahawa halaju gelombang permukaan pada jasad batuan akan dipengaruhi oleh ketumpatan retakan. Retakan-retakan ini dianggap telah terisi oleh bahan pengisi. Ketumpatan retakan inilah yang dikorelasikan dengan panjang teras-teras batuan yang diperolehi dalam kegiatan penggerudian. Selain daripada itu juga diperlukan parameter halaju gelombang pada bahan batuan (intact rock), yang dalam penelitian ini digunakan halaju ultrasonik pada teras batuan yang dihasilkan daripada kegiatan penggerudian.

**HASIL DAN PERBINCANGAN**

Profil halaju gelombang ricih melawan kedalaman untuk ketiga-tiga tapak ujikaji telah diperolehi daripada kaedah

**Jadual 2:** Had halaju gelombang ricih pada jasad batuan oleh beberapa peniliti.

Peniliti	Pemalar Atenuasi (s/m)	Halaju $V_s$ (m/s)
Yang (1995)	$7.5 \times 10^{-3}$	>800
Athanasopoulos <i>et al.</i> (2000)	$<6.4 \times 10^{-4}$	>800
Wood & Jedele (1985)	$<5.0 \times 10^{-4}$	>425
Abdul Rahim Samsudin <i>et al.</i> (2003)	$<2.0 \times 10^{-3}$	>500



**Rajah 2.** Susunatur kaedah Analisis Spektral Geolombang Permukaan (SASW).

SASW (Jadual 3). Nilai halaju gelombang ricih daripada teras batuan dikira berasaskan ujian ultrasonik di makmal. Sampel teras batuan daripada tapak Bandar Tasik Selatan berupa Batu Kapur memberikan nilai  $V_{su}$  purata adalah 3425 m/s, sedangkan batuan granit daripada tapak Bandar Sri Damansara dan FRIM Kepong adalah 3150 m/s.

Lubang gerudi pada tapak Bandar Sri Damansara menunjukkan terdapatnya nilai RQD 64% pada kedalaman 5.8 – 7.3 m, manakala kaedah SASW memberikan nilai RQD 65.8% pada kedalaman 6.0 – 7.0 m. Pada kedalaman 7.3 – 8.8 m nilai RQD daripada lubang gerudi adalah 58%, sedangkan kaedah SASW pada kedalaman 7.0 – 8.0 m memberikan nilai RQD 56.1%. Maklumat paling dalam dari lubang gerudi pada 8.8 – 10.30 m dengan nilai RQD 82%, sedikit perbezaan dari kaedah SASW pada 8.0 – 10.0 m dengan nilai RQD 83.3%. Demikian pula keputusan yang diperoleh pada tapak ujikaji Kepong dan Bandar Tasik

**Jadual 3:** Halaju gelombang ricih melawan kedalaman pada tapak ujikaji..

Bandar Sri Damansara		FRIM Kepong		Bandar Tasik Selatan	
Depth (m)	$V_s$ (m/s)	Depth (m)	$V_s$ (m/s)	Depth (m)	$V_s$ (m/s)
0.0 – 0.5	200.18	0.0 – 0.5	184.24	0.0 – 0.5	106.45
0.5 – 1.0	109.81	0.5 – 1.0	220.67	0.5 – 1.0	152.25
1.0 – 1.5	143.52	1.0 – 1.5	200.94	1.0 – 1.5	211.81
1.5 – 2.0	338.03	1.5 – 2.0	290.71	1.5 – 2.0	188.24
2.0 – 3.0	173.46	2.0 – 3.0	340.68	2.0 – 3.0	256.66
3.0 – 4.0	250.85	3.0 – 4.0	592.47	3.0 – 4.0	304.47
4.0 – 5.0	417.62	4.0 – 5.0	461.87	4.0 – 5.0	471.11
5.0 – 6.0	486.38	5.0 – 6.0	617.31	5.0 – 6.0	424.48
6.0 – 7.0	916.84	6.0 – 7.0	728.20	6.0 – 7.0	460.34
7.0 – 8.0	799.20	7.0 – 8.0	706.31	7.0 – 8.0	429.42
8.0 – 10.0	1150.86	8.0 – 10.0	874.63	8.0 – 10.0	541.55
		10.0 – 12.0	1150.86	10.0 – 12.0	560.72
				12.0 – 14.0	954.34

Selatan dapat dilihat secara jelas pada Rajah 3.

Terdapat beberapa perbezaan yang dapat ditunjuk di antara keputusan-keputusan daripada kedua-dua kaedah. Pertama sekali mengenai kedalaman yang dihasilkan oleh kaedah SASW. Terdapat kekurangan kesesuaian nilai profil kedalaman dan halaju gelombang ricih yang diperolehi daripada kaedah SASW. Masalah ini disebabkan oleh sifat proses songsangan dari perisian yang mesti memulakan dengan pemberian nilai-nilai pendugaan.

Perbezaan berikutnya adalah nilai RQD sendiri di mana keputusan daripada kaedah SASW terdapat sedikit perbezaan daripada data lubang gerudi. Walau bagaimanapun perbezaan nilai ini dapat dikatakan konsisten (kurang daripada 10%) sehingga secara umumnya memberikan hasil yang dapat dipercayai.

### KESIMPULAN

Berdasarkan pengiraan nilai RQD menggunakan rumus baharu dan perbandingannya dengan nilai RQD daripada lubang gerudi, maka beberapa kesimpulan berikut telah diperolehi:

Nilai RQD yang dikira daripada kaedah SASW sedikit berbeza daripada nilai RQD yang diukur daripada lubang gerudi, namun secara umumnya perbezaan ini kurang daripada 10%.

Pengiraan RQD dengan kaedah baharu ini memerlukan sedikit kerja tambahan iaitu pengiraan halaju gelombang ricih menggunakan ujian halaju ultrasonik teras batuan di makmal.

Teras batuan untuk ujian halaju ultrasonik tidak semestinya diperolehi daripada lubang gerudi, tetapi dapat diperolehi daripada singkapan batuan di sekitar tapak kajian.

Lebih banyak data diperlukan untuk menguji keberkesanan kaedah ini dan selain daripada itu ujian halaju ultrasonik boleh dicuba digantikan dengan pengukuran SASW menggunakan transduser pada sampel batuan di makmal.

### PENGHARGAAN

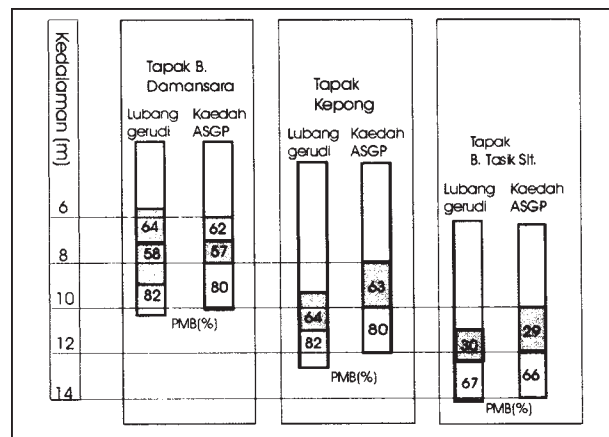
Kegiatan penyelidikan ini ditaja oleh Kementerian Sains, Teknologi dan Alam Sekitar Malaysia melalui projek IRPA 02-02-02-0008-EA 110.

### RUJUKAN

ABDUL RAHIM SAMSUDIN, SUHARSONO & ABDUL GHANI RAFEK, 2003. An alternative analysis of Surface wave data for site characterization, Seminar on Geophysics, Geological Society of Malaysia.

ATHANASOPOULOUS, G.A., PELEKIS, P.C. & ANAGNOSTOPOULOUS, G.A., 2000. Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh wave motions from field measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 19: 277-288.

CHO, Y.S. & LIN, F.B., 2001. Spectral analysis of surface wave response of multi-layer thin cement mortar slab



Rajah 3. Perbandingan nilai RQD di antara kaedah SASW dan lubang gerudi bagi tapak penyelidikan.

structures with finite thickness. *NDT & E International* 34: 115-122.

DEERE, D.U., 1968. Geological considerations, rock mechanics in engineering practice. Wiley, New York.

GANJI, V., GUCUNSKI, N. & NAZARIAN, S., 1998. Automated Inversion Procedure for Spectral Analysis of Surface wave. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 753-770.

GUCUNSKI, N, GANJI, V. & MAHER, M.H., 2000. Effects of soil non-homogeneity on SASW testing. *Geotechnical Special Publication* 58:1083-1097.

Hao, H. *et al.*, 2001. Characteristics of surface ground motions induced by blasts in jointed rock mass. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 21: 85-98.

HEISEY, J.S. *ET AL.*, 1982. Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface wave. In: Matthews, M.C., *et al.* (Eds.), The use of surface waves in the determination of ground stiffness profile. *Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotechnical Engineering* 119: 84-95.

JOH, S.H., 1996. Advances in interpretation and analysis techniques for SASW measurements. Dissertation, The University of Texas at Austin (Unpublished).

MATTHEWS, M.C., *et al.*, 1996. The use of surface waves in the determination of ground stiffness profile. *Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotechnical Engineering* 119: 84-95.

SINGH, B. & GOEL, R.K., 1999. *Rockmass classification - a practical approach in civil engineering*. Elsevier Science Publishing Co., Amsteram, 267p.

STAVROPOULOUS, *ET. AL.*, 2003. Rayleigh wave propagation in intact and damaged geomaterials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 40: 377-387.

STOKOE, K.H., *ET. AL.*, 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method. In: Woods, R. D. (Ed.), *Geotechnical characterization of sites*. Oxford and IBH Publishing Co., New Delhi, 15-26.

SUHARSONO & ABDUL RAHIM SAMSUDIN, 2003. The attenuation effects of surface-wave propagations on rockmass using SASW method. *Bull. of Geological Society of Malaysia* 46: 475-478.

WOOD, R.D., & JEDELE, L.P., 1985. Energy-attenuation from

construction vibration. *In: Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C. and Anagnostopoulos, G.A. (Eds.), Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh wave motions from field measurements. Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 19: 277-288.

YANG, X.J., 1995. Evaluation of man-made ground vibration. *In: Prakash, S. (Ed.), Proc. Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* 3: 1345-1348.



*Manuscript received 31 March 2004*  
*Revised manuscript received 01 October 2004*

