

XÁC ĐỊNH VẬN TỐC TRUYỀN SÓNG NGANG V_s VÀ CÁC THAM SỐ ĐÀN HỒI CỦA MÔI TRƯỜNG ĐẤT ĐÁ BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH SÓNG MẶT ĐA KÊNH

NGUYỄN NHẬT KIM NGÂN¹, NGUYỄN NGỌC THU², ĐINH QUỐC TUẤN²

¹ Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM, 227 Nguyễn Văn Cừ, P.4, Tp. Hồ Chí Minh

² Liên đoàn Bản đồ Địa chất miền Nam, 200 Lý Chính Thắng, Q.3, Tp. Hồ Chí Minh

Tóm tắt: Bài báo trình bày phương pháp phân tích sóng mặt đa kênh (phương pháp MASW), là một trong các phương pháp địa chấn không phá hủy, không yêu cầu có lỗ khoan tại khu vực khảo sát, để xác định vận tốc truyền sóng ngang V_s và các tham số đàn hồi trong công tác đánh giá nền móng công trình xây dựng. Kết quả đo đạc của phương pháp phân tích sóng mặt đa kênh được trình bày dưới dạng mặt cắt 1D, thể hiện sự thay đổi vận tốc truyền sóng V_s theo độ sâu. Kết quả phân tích của phương pháp MASW phù hợp với thành phần thạch học của lỗ khoan tại khu vực khảo sát. Sai số trung bình của giá trị V_s theo mỗi mét độ sâu giữa hai phương pháp MASW và down-hole vào khoảng 15,5%.

I. MỞ ĐẦU

Vận tốc truyền sóng ngang V_s là tham số quan trọng nhất trong việc đánh giá độ cứng của môi trường đất đá bên dưới mặt đất, góp phần trong việc tính toán các hệ số đàn hồi của môi trường, phục vụ cho việc thiết kế kháng chấn các công trình xây dựng. Trước đây, để đo các tham số này, người ta thường sử dụng phương pháp down-hole và cross-hole, cả hai phương pháp này đều đòi hỏi phải sử dụng lỗ khoan, do đó việc đo đạc trở nên tốn kém và thời gian khảo sát kéo dài [7]. Từ năm 1999, phương pháp phân tích sóng mặt đa kênh ra đời, do Tiến sỹ Choon Park (Đại học Kansas, Hoa Kỳ) sáng lập, MASW là một trong các phương pháp địa chấn thăm dò không phá hủy cho phép xác định vận tốc truyền sóng V_s mà không yêu cầu có lỗ khoan tại khu vực khảo sát, quy trình đo đạc đơn giản, tiết kiệm chi phí và thời gian khảo sát [7]. Tuy nhiên, ở nước ta hiện nay vẫn chưa có một nghiên cứu sâu rộng nào về phương pháp MASW nhằm ứng dụng vào thực tế. Do đó, chúng tôi đã tiến hành nghiên cứu và chứng minh khả năng ứng dụng của phương pháp MASW tại một lỗ khoan thuộc Quận 9, Tp. Hồ Chí Minh. Kết quả của MASW được so sánh với kết quả của phương pháp down-hole và đối chiếu với cột địa tầng khu vực.

II. CƠ SỞ CỦA PHƯƠNG PHÁP MASW

1. Giới thiệu

Phương pháp phân tích sóng mặt đa kênh dựa vào đặc điểm phân tán của sóng mặt (sóng Rayleigh). Trong môi trường bất đồng nhất bên dưới mặt đất, sóng Rayleigh lan truyền với vận tốc khác nhau tương ứng với mỗi tần số khác nhau. Vận tốc ứng với mỗi tần số gọi là vận tốc pha. Vận tốc truyền sóng ngang V_s được xác định thông qua mối liên hệ giữa vận tốc pha và V_s [1, 3, 6]. Ngày nay, trên thế giới, MASW được sử dụng rộng rãi trong khảo sát địa kỹ thuật và môi trường, đánh giá độ cứng nền móng công trình xây dựng, khảo sát nền đường, xác định ranh giới địa chất, dự báo tình trạng sạt lở thông qua khảo sát sự biến đổi của giá trị V_s theo thời gian [7].

2. Sóng Rayleigh

Sóng Rayleigh hình thành do sự giao thoa giữa sóng dọc P và sóng ngang SV khi đến bề mặt ranh giới tự do (ranh giới giữa môi trường đất đá bên dưới và môi trường không khí trên bề mặt). Phương trình truyền sóng Rayleigh thể hiện mối tương quan giữa vận tốc pha sóng Rayleigh và vận tốc truyền sóng khối V_S , V_P [1]:

$$\left(2 - \frac{c^2}{V_S^2}\right) = 4 \left(1 - \frac{c^2}{V_P^2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{c^2}{V_S^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Trong đó: c : vận tốc pha của sóng Rayleigh; V_S : vận tốc truyền sóng ngang; V_P : vận tốc truyền sóng dọc

Đặt $\xi = (c/V_S)^2$ và $q = (V_S/V_P)^2$, viết lại phương trình (1):

$$\xi^3 - 8\xi^2 + 8(3+2q)\xi + 16(q-1) = 0 \quad (2)$$

Hệ số Poisson [4, 6, 8]:

$$\sigma = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad (3)$$

Modun Young [4, 6, 8]:

$$E = \frac{\rho V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{(V_P^2 - V_S^2)} \quad (4)$$

Modun biến dạng trượt [4, 6, 8]: $G = \rho V_S^2$ (5)

Đối với môi trường đất đá của vỏ Trái đất, thường hệ số Poisson có giá trị 0,25 và $q = 1/3$, phương trình (2) trở thành [1]:

$$\xi^3 - 8\xi^2 + \frac{56}{3}\xi - \frac{32}{3} = 0 \quad (6)$$

Phương trình trên có 3 nghiệm số [1]:

$$\xi = 4; \quad \xi = 2 + 2/\sqrt{3}; \quad \xi = 2 - 2/\sqrt{3} \quad (7)$$

Xét điều kiện biên cho bài toán hàm sóng, nhận nghiệm thứ 3 ($\xi = 0,8453$) [1].

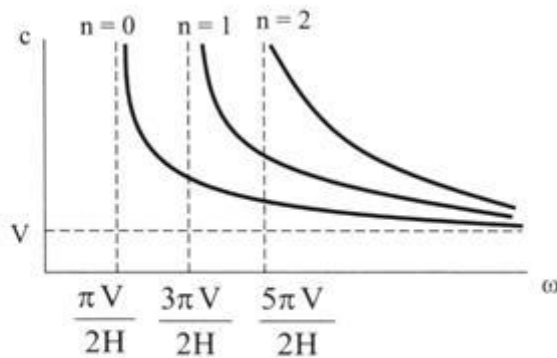
Trong môi trường bán không gian đàn hồi, sóng Rayleigh truyền với vận tốc pha [1,10]: $c = \sqrt{\xi} \cdot V_S$ (8)

3. Phương trình vận tốc pha và đường cong vận tốc pha

Xét một phân lớp có bề dày H , vận tốc truyền sóng trong phân lớp là V , phương trình vận tốc pha là một hàm vận tốc pha c theo tần số ω [1]:

$$c(\omega) = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{V^2} - \left[\left(n + \frac{1}{2} \right) \pi \right]^2 \frac{1}{H^2 \omega^2} \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (n = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (9)$$

Đường cong vận tốc pha cơ bản ứng với $n = 0$, đường cong vận tốc pha bậc 1, 2, 3,... ứng với các giá trị $n \geq 1$. Đối với các giá trị $c(\omega)$ thực, mẫu số trong biểu thức (6) phải lớn hơn không. Tần số ω_{cutoff} tương ứng với giá trị không của mẫu số gọi là tần số ngưỡng, không có giá trị thực $c(\omega)$ cho $\omega < \omega_{\text{cutoff}}$ (Hình 1) [1].



Hình 1. Đường cong vận tốc pha cơ bản ($n = 0$) và bậc cao ($n \geq 1$).

Tần số ngưỡng của đường cong vận tốc pha bậc n [1]:

$$\omega_{\text{cutoff}} = \frac{\pi \left(n + \frac{1}{2} \right) V}{H} \quad (10)$$

4. Quy trình đo đạc, phân tích và giải bài toán ngược

Phương pháp phân tích sóng mặt đa kênh sử dụng hệ 24 hoặc 48 geophones, cách đều nhau, điểm nổ ở đầu tuyến. Máy địa chấn sẽ ghi nhận lại dao động của môi trường đất đá dưới dạng băng ghi địa chấn. Tất cả các dạng sóng bao gồm sóng phản xạ, sóng khúc xạ, sóng trực tiếp, sóng mặt,... đều được thu nhận trên băng ghi địa chấn [3, 7].

Qua phép biến đổi Fourier, băng ghi địa chấn được biến đổi từ miền thời gian ($t-x$) sang miền tần số ($f-c$). Từ đó xác định đường cong vận tốc pha, nơi hội tụ năng lượng cực đại của sóng mặt dựa vào hình ảnh phổ sóng (Hình 2b). Trên hình ảnh này, các dạng sóng khác sẽ nằm ngoài vùng năng lượng cực đại, bị cô lập và loại bỏ trong quá trình phân tích. Vận tốc truyền sóng ngang V_s được xác định thông qua mối liên hệ giữa vận tốc pha của sóng Rayleigh và V_s [3, 7],

Các điểm trên đường cong vận tốc pha sẽ được lựa chọn cho quá trình giải bài toán ngược. Kết quả cuối cùng là mặt cắt 1D thể hiện sự thay đổi vận tốc truyền sóng ngang V_s theo độ sâu, dãy tần số từ thấp đến cao sẽ cho phép nghiên cứu sự thay đổi V_s từ sâu đến nông (Hình 3) [3].

Vận tốc pha sóng Rayleigh c được xác định thông qua hàm F [9]:

$$F(f_j, c_j, V_s, V_p, \rho, h) = 0 \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

Trong đó: c_j : vận tốc pha sóng Rayleigh tại tần số f_j ; $V_S=(V_{S1}, V_{S1}...V_{Sn})$, $V_P=(V_{P1}, V_{P2}, ...V_{Pn})$, $\rho=(\rho_1, \rho_2,\rho_n)$ $h=(h_1, h_2,,h_n)$: các véc tơ có các thành phần là vận tốc truyền sóng ngang, vận tốc truyền sóng dọc, mật độ và bề dày của các phân lớp mô hình [9].

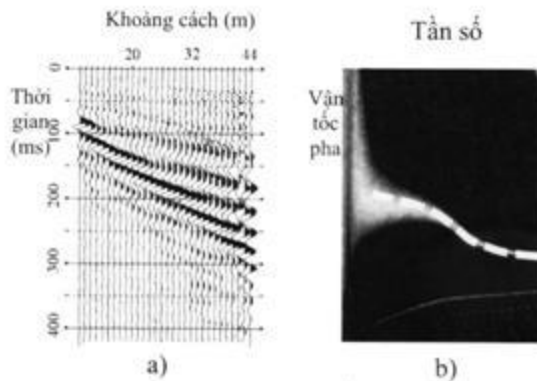
Đối với một tập giá trị các tham số mô hình (V_S, V_P, ρ, h) tại một tần số f_j xác định, nghiệm của phương trình (11) sẽ là các giá trị vận tốc pha. Đối với đường cong vận tốc pha bao gồm m điểm số liệu sẽ có tập hợp m phương trình (11) được dùng để xác định các giá trị vận tốc pha tại các tần số f_j . Vận tốc pha sóng Rayleigh là một hàm của bốn tham số V_S, V_P, ρ, h . Tuy nhiên, chỉ có sự thay đổi của V_S tác động chủ yếu lên vận tốc pha sóng Rayleigh. Do đó, giá trị vận tốc truyền sóng V_S có thể được xác định thông qua các giá trị vận tốc pha sóng Rayleigh. Ma trận Jacobian J của mô hình tương ứng với vận tốc V_S tại tần số f_j [9]:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F/\partial V_{Sj}}{\partial F/\partial c} \end{bmatrix}_{f=f_j} \quad (12)$$

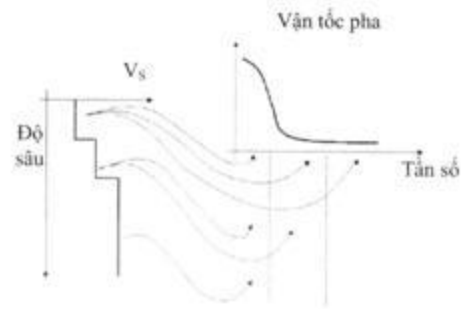
Gọi $x=[V_{S1}, V_{S1}...V_{Sn}]$ là véc tơ gồm n phân tử chứa các giá trị vận tốc V_S của mô hình V_S , $b = [b_1, b_2, ..., b_m]$ là véc tơ gồm các giá trị đo đạc của vận tốc pha sóng Rayleigh tại m tần số khác nhau, ta có [9]: $J\Delta x = \Delta b$ (13)

Trong đó: $\Delta b = b - c(x_0)$: độ sai khác giữa giá trị đo đạc và giá trị mô hình; $c(x_0)$: vận tốc pha của mô hình tương ứng với vận tốc truyền sóng s ban đầu x_0 ; Δx : độ hiệu chỉnh được tính toán [9].

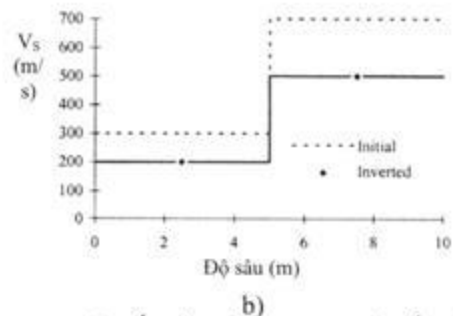
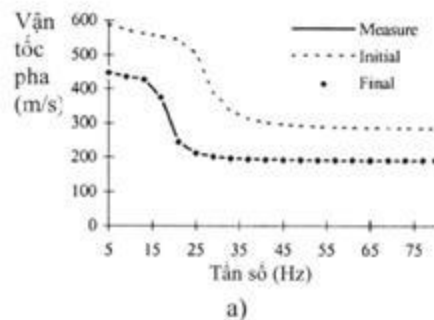
Giải phương trình (13) thông qua thuật toán tối ưu hóa, phương pháp bình phương tối thiểu. Sau mỗi vòng lặp, véc tơ Δx được tính toán và thêm vào các giá trị của mô hình. Quá trình lặp sẽ tiếp diễn cho đến khi sai số giữa số liệu đo đạc và số liệu mô hình (Δb) giảm xuống đến một giá trị hợp lý [2, 9].



Hình 2. a) Băng ghi địa chấn; b) Hình ảnh phổ sóng mật sau quá trình biến đổi Fourier, đường cong vận tốc pha là nơi tập trung năng lượng sóng cực đại.



Hình 3. Kết quả của MASW: V_S thay đổi theo độ sâu. Tần số cao cho thông tin môi trường vật chất gần bề mặt, tần số thấp cho thông tin môi trường ở độ sâu lớn hơn.



Hình 4. Mô hình môi trường hai phân lớp. a) Các đường cong vận tốc pha: đường cong vận tốc pha đo đạc, đường cong vận tốc pha mô hình ban đầu và đường cong vận tốc pha mô hình sau cùng của quá trình giải bài toán ngược; b) Mật cắt $1D V_S$ mô hình ban đầu và mật cắt $1D V_S$ sau cùng của quá trình giải bài toán ngược.



a)



b)



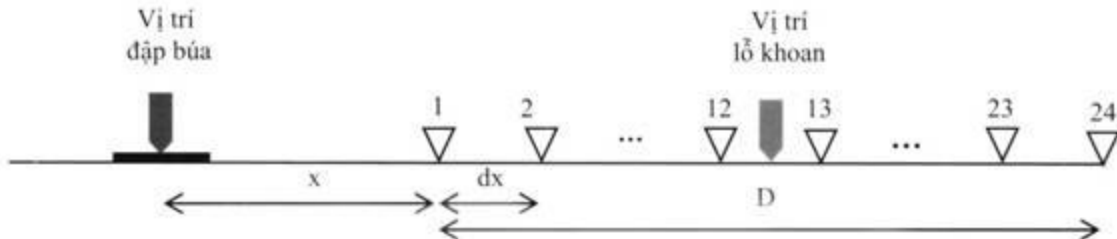
c)

Hình 5. a) Máy địa chấn RAS 24; b) Geophones 10 Hz; c) Búa và đe gỗ.

III. ỨNG DỤNG THỰC TẾ

Để minh họa tính hiệu quả của phương pháp MASW và so sánh với kết quả của down-hole, các tác giả tiến hành đo đạc phương pháp này tại một lỗ khoan, thuộc khu vực dự án khu công nghệ cao, Quận 9, Tp. Hồ Chí Minh. Hệ thống đo đạc gồm 24 geophones tần số 10 Hz được kết nối với máy địa chấn RAS-24 do hãng Seistronix Hoa Kỳ sản xuất, búa có khối lượng 7 kg và đe gỗ được dùng trong khảo sát (Hình 5) Tuyến đo có độ dài $D=23$ m với các geophone cách đều

nhau $dx=1$ m, khoảng cách từ geophone đầu tiên đến điểm nổ là $x = 5$ m, lỗ khoan nằm giữa geophone 12 và 13 (Hình 6, 7). Thiết lập thời gian thu sóng $t=2$ s và bước lấy mẫu $\Delta t=0,25$ ms.



Hình 6. Sơ đồ tuyến đo MASW (ngày 9/12/2014, thuộc khu vực dự án khu công nghệ cao, Quận 9, Tp. Hồ Chí Minh): khoảng cách giữa các geophon $dx=1$ m; khoảng cách nguồn $x=5$ m; độ dài tuyến đo $D=23$ m.



Hình 7. Lỗ khoan nằm giữa geophone 12 và 13 trên tuyến đo MASW. Lỗ khoan được dùng trong khảo sát địa chấn lỗ khoan (down-hole) và xác định thành phần thạch học, mật độ đất đá thuộc khu vực dự án khu công nghệ cao, Quận 9, Tp. Hồ Chí Minh (ảnh chụp ngày 9/12/2014).

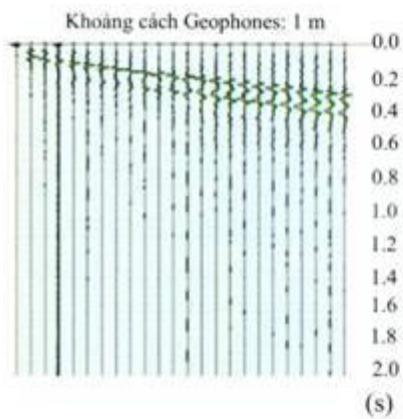
Băng ghi địa chấn sẽ được xử lý bằng phần mềm Easy MASW của Công ty Geostm (Ý). Hình ảnh phổ sóng mặt thu được thông qua phép biến đổi Fourier đối với băng ghi địa chấn. Trên hình ảnh này, các thông tin của đường cong vận tốc pha sẽ được phân tích để từ đó xác định giá trị vận tốc truyền sóng ngang V_S trong từng phân lớp đất đá bên dưới bề mặt.

IV. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH

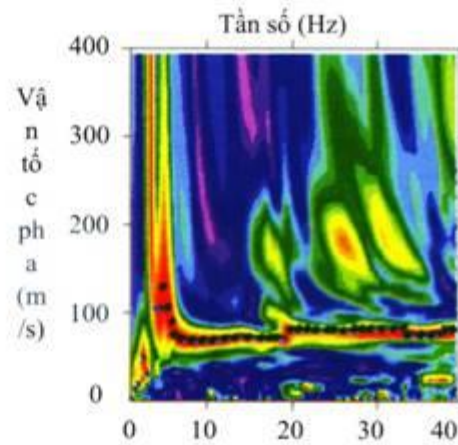
Chúng tôi sử dụng phần mềm Easy MASW trong quá trình phân tích số liệu. Băng ghi địa chấn chưa qua xử lý gồm 24 geophones được hiển thị trong phân mem Easy MASW như Hình 8. Áp dụng phép biến đổi Fourier cho băng ghi địa chấn từ miền thời gian qua miền tần số, chọn giới hạn tần số 0-40 Hz và vận tốc pha 0-400 m/s để phân tích, hình ảnh phổ sóng mặt được thể hiện trong Hình 9. Xác định đường cong vận tốc pha thông qua vùng năng lượng sóng tích trừ cực đại, từ các điểm cực đại trên đường cong này (các điểm xanh dương), chọn các điểm số liệu sử dụng trong quá trình giải bài toán ngược (các điểm xanh lá).

Đường cong vận tốc pha ban đầu của mô hình được chương trình xây dựng dựa vào giá trị các cực đại năng lượng trên hình ảnh phổ sóng (Hình 10). Tổng số vòng lặp được lựa chọn theo mặc

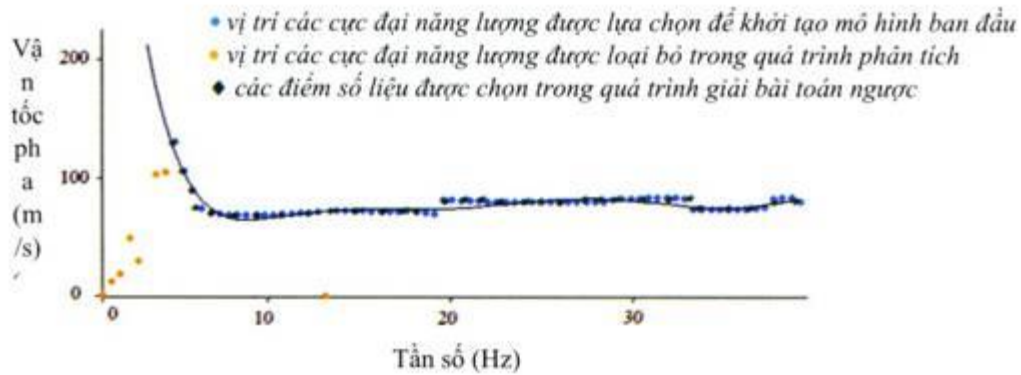
định của chương trình Easy MASW 1.000 vòng và tổng số phân lớp môi trường là 9 lớp. Tiến hành quá trình nghịch đảo dữ liệu cho đến khi vòng lặp hội tụ. Sai số giữa số liệu mô hình và số liệu đo đạc sau 1.000 vòng lặp đạt đến giá trị 1,241% (Hình 11).



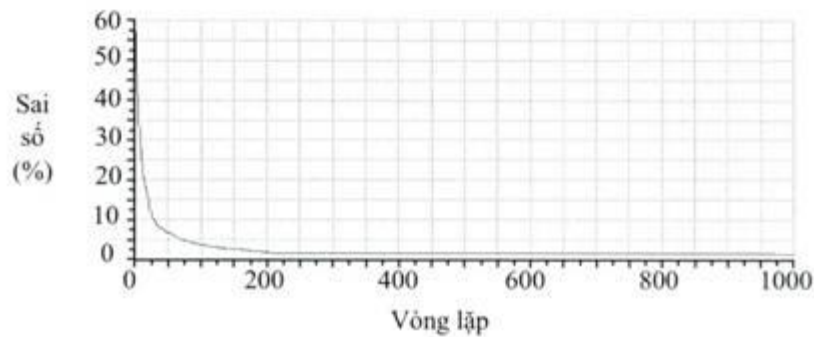
Hình 8. Băng ghi địa chấn (MASW)



Hình 9. Hình ảnh phổ sóng mặt và đường cong vận tốc pha (vùng màu đỏ); • vị trí các cực đại năng lượng; ● các điểm số liệu được chọn cho quá trình giải bài toán ngược.

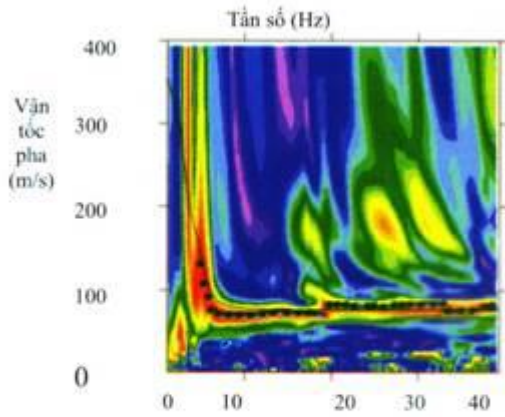


Hình 10. Đường cong vận tốc pha mô hình ban đầu (đường liền nét màu đen)

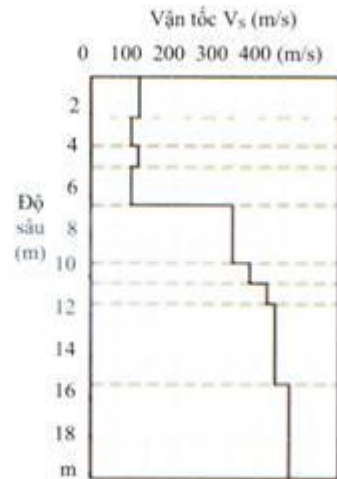


Hình 11. Sai số giữa số liệu mô hình và số liệu đo đạc thực tế qua các vòng lặp.

Sau quá trình giải bài toán ngược, đường cong vận tốc pha của mô hình cuối cùng được thể hiện trên hình ảnh phổ sóng mặt (Hình 12) và hình ảnh mặt cắt 1D thể hiện sự thay đổi vận tốc truyền sóng V_S theo độ sâu được biểu diễn trong Hình 13.



Hình 12. Đường cong vận tốc pha sau quá trình giải bài toán ngược (đường liên nét màu xanh lá);
 • vị trí các cực đại năng lượng được lựa chọn để khởi tạo mô hình ban đầu; • các điểm số liệu được chọn cho quá trình giải bài toán ngược (32 điểm).



Hình 13. Vận tốc truyền sóng V_S theo độ sâu (Easy MASW)

Kết quả minh giải của phương pháp phân tích sóng mặt đa kênh (MASW) cho thấy sự thay đổi V_S theo độ sâu: vận tốc truyền sóng V_S từ mặt đất đến hơn 6 m tương đối thấp (72-86 m/s) tương ứng với lớp đất sang lấp và lớp bùn gần mặt ở trạng thái mềm xốp. Từ độ sâu trên 6 m đến khoảng hơn 15 m, V_S thay đổi từ 257- 360 m/s phản ánh vận tốc truyền sóng trong các phân lớp sét.

Vận tốc truyền sóng dọc V_p có thể được xác định từ nhiều nguồn: xác định thời gian sóng đến đầu tiên của mặt cắt địa chấn (Hình 8) và sử dụng biểu đồ thời khoảng (phương pháp địa chấn khúc xạ) để xác định vị trí V_p , hoặc sử dụng giá trị V_p được đo trong thành lỗ khoan (down - hole), ... Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng giá trị V_p được đo đạc trong lỗ khoan [5]. Từ các giá trị V_S , V_p và mật độ đất đá (Bảng 3), sử dụng công thức (3), (4), (5) tính toán các tham số đàn hồi của môi trường: hệ số Poisson, mô đun Young và mô đun biến mặt cắt. Các kết quả được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị vận tốc truyền sóng V_s , V_p và các tham số đàn hồi

Độ sâu (m)	Chiều dày lớp (m)	Hệ số Poisson (σ)	Mật độ ρ (kg/m^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Mô đun Young E (MPa)	Mô đun biến dạng cắt G (MPa)
1,99	1,99	0,484	1.610	86,30	494,35	35,60	11,99
3,44	1,45	0,485	1.420	72,40	419,35	22,10	7,44
4,45	1,01	0,490	1.420	85,90	602,43	31,22	10,48
6,34	1,89	0,499	1.940	71,90	1.534,15	30,07	10,03
9,25	2,91	0,487	2.000	257,30	1.620,60	393,80	132,41
10,26	1,01	0,485	2.000	288,10	1.668,61	492,91	166,00
11,29	1,03	0,481	2.000	320,50	1.668,61	608,45	205,44
15,27	3,98	0,479	2.100	334,10	1.667,49	693,42	234,41
20,00	4,73	0,476	1.990	360,70	1.690,64	764,38	258,91

Bảng 2 thể hiện kết quả đo đạc giá trị V_s theo phương pháp down-hole [5]. Để so sánh kết quả của hai phương pháp phân tích sóng mặt đa kênh (MASW) và down-hole, giá trị V_s của hai phương pháp này được vẽ trên cùng một đồ thị trong Hình 12 tương ứng với cột địa tầng của khu vực (Bảng 3). Sai số trung bình của giá trị V_s theo mỗi mét độ sâu của hai phương pháp MASW và down-hole vào khoảng 15,5%.

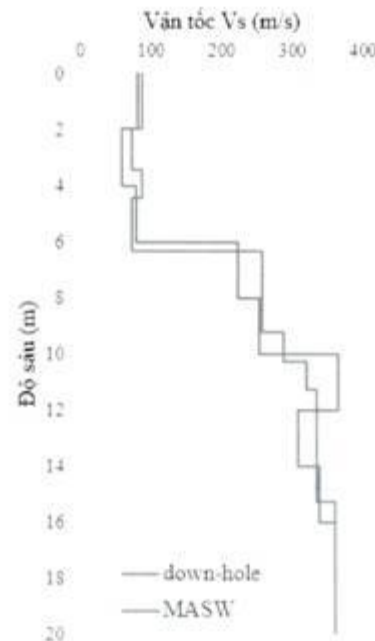
Bảng 2. Giá trị V_s theo phương pháp down-hole

(Công tác địa chấn lỗ khoan dự án khu công nghệ cao, Quận 9, Tp. Hồ Chí Minh, Liên đoàn Bản đồ Địa chất miền Nam, 2015)

Độ sâu (m)	T_s (ms)	V_s (m/s)
2	55,75	80,72
4	63,10	57,74
6	77,13	78,15
8	83,76	223,11
10	90,39	253,21
12	95,30	363,97
14	101,30	308,36
16	106,89	338,00
18	112,2	360,66

Bảng 3. Cột địa tầng khu vực khảo

Độ sâu (m)	Bề dày (m)	Ký hiệu	Mật độ (g/cm^3)	Thành phần thạch học
1,6	1,6		1,61	Lớp cát sang lấp
5,2	3,6		1,42	Bùn sét pha mùn, thực vật màu xám đen, mềm
6,5	1,3		1,94	Sét màu xám đen nâu, nén chặt
15,0	8,5		2,00	Sét lẫn sạn sỏi màu xám đen nâu vàng, nén chặt
16,0	1,0		2,10	Cát màu xám, bờ rời
19,5	3,5		1,99	Sét pha cát, màu vàng xám, nén chặt



Hình 14. Vận tốc truyền sóng V_s theo MASW và down-hole.

V. KẾT LUẬN

Phương pháp phân tích sóng mặt đa kênh được tiến hành tại lỗ khoan thuộc khu vực Quận 9, Tp. Hồ Chí Minh cho kết quả về sự phân bố vận tốc V_s theo độ sâu tương đối chính xác khi so sánh với thành phần thạch học của khu vực và kết quả đo trong thành lỗ khoan (phương pháp down-hole).

So với các phương pháp địa chấn truyền thống down-hole và cross-hole, phương pháp phân tích sóng mặt đa kênh là phương pháp địa chấn không phá hủy với nhiều ưu điểm như quy trình đo đạc, thu thập, phân tích số liệu nhanh và đơn giản, không yêu cầu có lỗ khoan tại khu vực khảo sát, cho phép khảo sát độ cứng của nền móng, môi trường đất đá bên dưới mặt đất thông qua vận tốc truyền sóng ngang V_s [8, 10, 11].

Tuy nhiên, hiện nay tại Việt Nam, phương pháp MASW vẫn chưa được sử dụng phổ biến. Do đó, trong thời gian tới, cần nghiên cứu và xây dựng quy trình cho phương pháp MASW nhằm giải quyết các yêu cầu ngày một gia tăng trong lĩnh vực địa kỹ thuật và môi trường.

VĂN LIỆU

1. **Augustin u., 1999.** Principles of Seismology. *Cambridge University Press, United Kingdom*, p. 474.
2. **Choon B.P., Miller R.D., Xia J., 1999.** Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics, Vol. 64, No. 3, p. 800- 808.*
3. **Claudio S., 2012.** Surface wave methods, *PhD thesis, Dottorato di Ricerca in Geoingegneria Ambientale.*
4. **Nguyễn Ngọc Thu, Vũ Trọng Tấn, Đinh Quốc Tuấn, 2014.** Công tác đo địa chấn lỗ khoan dự án tòa nhà tổng lãnh sự Đức. *Liên đoàn Bản đồ Địa chất miền Nam.*
5. **Nguyễn Ngọc Thu, Vũ Trọng Tấn, Võ Thị Hồng Quyên, 2015.** Công tác đo địa chấn lỗ khoan dự án Khu công nghệ cao, Quận 9, Tp. Hồ Chí Minh. *Liên đoàn Bản đồ Địa chất miền Nam.*
6. **Peter M.S., 2009.** Introduction to Seismology, Second edition. *Cambridge University Press, United State of America, New York*, p. 396.
7. **Taipodia J., Babu K.P., Kiran B., et al., 2013.** Subsurface characterization using MASW: Preliminary experimentation and analysis. *National Conference on Recent Advances in Civil Engineering.*
8. **Vũ Trọng Tấn, 2010.** Nghiên cứu áp dụng các phương pháp địa chấn lỗ khoan xác lập quy trình tính các thông số đàn hồi phục vụ kết cấu nền móng và kháng chấn trong xây dựng công trình tại vùng Tp. Hồ Chí Minh và các tỉnh lân cận. *Báo cáo thuyết minh đề tài cấp bộ, Liên đoàn Bản đồ Địa chất miền Nam.*
9. **Xia J., Miller R.D., Choon B.P., 1999.** Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics, Vol. 64, No. 3, p. 691-700.*
10. **Xia J., Miller R.D., Yixian X., et al., 2009.** High frequency Rayleigh wave method. *Journal of Earth Science, Vol. 20, No. 3, p. 563-579*