



Received: 21-03-2026  
Accepted: 01-05-2026

ISSN: 2583-049X

## **Frequency-Based Vibration Energy Indicators for Assessing Mechanical Degradation in Riverbank Soils**

<sup>1</sup> Bao Quynh Le, <sup>2</sup> Hong Dien Le

<sup>1,2</sup> Infrastructure Development Department, Ho Chi Minh City University of Transport, Vietnam

Corresponding Author: **Bao Quynh Le**

### **Abstract**

Progressive mechanical degradation in riverbank soils is governed by gradual reductions in small-strain stiffness and concurrent increases in material damping under repeated low-amplitude environmental excitation. These processes modify wave propagation characteristics within the soil mass and result in systematic changes in the frequency distribution of vibration energy. This study evaluates frequency-based vibration energy indicators as physically grounded measures for assessing mechanical degradation in riverbank soils within a soil dynamics framework. Ground vibration records are analyzed in the frequency domain using power spectral density (PSD) techniques to quantify band-limited vibration energy within low-, mid-, and high-frequency ranges. Energy ratios between frequency bands and high-frequency spectral attenuation slopes are derived to characterize stiffness- and damping-controlled components of the dynamic response. The results show a consistent

redistribution of vibration energy from high- to low-frequency bands along the riverbank, reflecting progressive softening of the soil skeleton and enhanced energy dissipation at small strain levels. In particular, increases in the low-to-high frequency energy ratio and steepening of high-frequency spectral decay are indicative of mechanically degraded zones. Because the proposed indicators are normalized in the frequency domain, they exhibit reduced sensitivity to excitation amplitude and allow meaningful spatial comparison between measurement points. The findings demonstrate that frequency-based vibration energy indicators provide a non-invasive and mechanically interpretable approach for assessing progressive mechanical degradation in riverbank soils, complementing conventional geotechnical investigations focused on large-strain behavior.

**Keywords:** Ground Vibration, Frequency-Domain Analysis, Power Spectral Density, Vibration Energy Redistribution, Mechanical Degradation, Riverbank Soils

### **1. Introduction**

Riverbank soils are inherently vulnerable to progressive mechanical degradation driven by water level fluctuations, seepage, erosion, and repeated low-amplitude environmental loading. These processes gradually alter the soil fabric, leading to reductions in small-strain stiffness and increases in material damping, which weaken bank stability over time. Importantly, such mechanical degradation often develops well before visible deformation or failure occurs, making early-stage assessment particularly challenging [1-3].

Conventional geotechnical investigation methods, including strength testing and deformation monitoring, are primarily sensitive to medium- to large-strain behavior. As a result, they provide limited insight into early degradation processes that occur at very small strain levels under cyclic or ambient excitation [4]. In contrast, ground vibration measurements capture the dynamic response of soils at small strains and directly reflect changes in stiffness, damping, and energy dissipation mechanisms [5].

From a soil dynamics perspective, wave propagation in viscoelastic media is strongly frequency-dependent. Progressive stiffness degradation and increased damping preferentially attenuate high-frequency vibration components while relatively enhancing low-frequency energy, even when excitation amplitude remains nearly constant [6, 7]. This behavior leads to a systematic redistribution of vibration energy across frequency bands, which can be quantified using power spectral density (PSD) analysis. High-frequency energy has been shown to be sensitive to inter-particle contact stiffness and microstructural integrity, whereas low-frequency components reflect the overall dynamic response of the soil mass and boundary conditions [8].

Based on these principles, frequency-based vibration energy indicators—such as band-limited spectral energy, low-to-high frequency energy ratios, and high-frequency attenuation slopes—have emerged as physically interpretable metrics for assessing soil mechanical conditions at small strains [9]. PSD-based approaches further reduce sensitivity to excitation amplitude, enabling spatial comparison between measurement points along riverbanks under similar loading conditions [10]. Nevertheless, a coherent synthesis of these indicators and their relevance for assessing progressive mechanical degradation in riverbank soils remains limited. This study therefore focuses on frequency-based vibration energy indicators as tools for evaluating mechanical degradation in riverbank soils, with emphasis on their physical interpretation and applicability within a soil dynamics framework.

**2. Phương Pháp Nghiên Cứu**

**2.1 Nguyên lý tiếp cận**

Nghiên cứu này dựa trên cơ sở cơ học rằng sự suy giảm độ cứng và gia tăng khả năng tiêu tán năng lượng của đất bờ sông sẽ gây ra những biến đổi có hệ thống trong đáp ứng dao động nền ở mức biến dạng nhỏ. Theo lý thuyết động lực học đất, sự suy yếu vật liệu làm suy giảm các thành phần dao động tần số cao và dẫn đến sự tái phân bố tương đối năng lượng về phía các dải tần thấp. Do đó, phân tích năng lượng dao động trong miền tần số có thể được sử dụng như một chỉ báo gián tiếp cho quá trình suy giảm cơ học tiến triển của đất.

**2.2 Phân tích phổ và mật độ phổ công suất**

Tín hiệu vận tốc nền đất  $v(t)$  được biến đổi sang miền tần số bằng phép biến đổi Fourier nhanh (FFT). Mật độ phổ công suất (Power Spectral Density – PSD) của tín hiệu được xác định theo phổ một phía:

$$S_v(f) = \frac{2}{T} |V(f)|^2 \tag{1}$$

Trong đó  $V(f)$  là biến đổi Fourier của tín hiệu vận tốc và  $T$  là thời gian ghi nhận. PSD cho phép biểu diễn phân bố năng lượng dao động theo tần số và giảm ảnh hưởng của nhiễu tức thời trong miền thời gian.

**2.3 Phân tích năng lượng theo dải tần**

Miền tần số được chia thành ba dải đặc trưng:

- Dải tần thấp (LF): 1–10 Hz
- Dải tần trung bình (MF): 10–30 Hz
- Dải tần cao (HF): 30–100 Hz

Năng lượng dao động trong mỗi dải tần được xác định bằng tích phân của PSD:

$$E_i = \int_{f_{i1}}^{f_{i2}} S_v(f) df \tag{2}$$

Trong đó  $i \in \{LF, MF, HF\}$ . Tổng năng lượng dao động được xác định bởi:

$$E_{tot} = E_{LF} + E_{MF} + E_{HF} \tag{3}$$

Để giảm ảnh hưởng của biên độ nguồn kích, năng lượng trong mỗi dải được chuẩn hóa theo tổng năng lượng:

$$\bar{E}_i = \frac{E_i}{E_{tot}} \tag{4}$$

**2.4 Các chỉ số đánh giá suy giảm cơ học**

Tỷ số giữa năng lượng dải tần thấp và dải tần cao (LF/HF) được sử dụng như một chỉ số phản ánh mức độ tái phân bố năng lượng dao động theo tần số:

$$R_{LF/HF} = \frac{E_{LF}}{E_{HF}} \tag{5}$$

Giá trị  $R_{LF/HF}$  tăng cho thấy sự suy giảm tương đối của các thành phần tần số cao, phù hợp với quá trình giảm độ cứng hiệu dụng và gia tăng suy giảm nội tại của đất.

Độ dốc suy giảm năng lượng tần số cao: Đặc tính suy giảm của năng lượng tần số cao được phân tích thông qua năng lượng tích lũy trong dải HF. Trong không gian log–log, năng lượng HF tuân theo quan hệ suy giảm dạng lũy thừa theo tần số, và độ dốc suy giảm được xác định bằng hồi quy tuyến tính. Độ dốc này phản ánh mức độ suy giảm và tán xạ năng lượng trong vật liệu đất.

**2.5 Phân tích theo phương dao động**

Các chỉ số năng lượng được tính toán riêng cho từng thành phần dao động nhằm đánh giá mức độ nhạy cảm của từng phương chuyển động đối với quá trình suy giảm cơ học. Việc so sánh giữa các phương giúp làm rõ vai trò của biến dạng cắt và cơ chế trượt tiềm năng trong ổn định bờ sông.

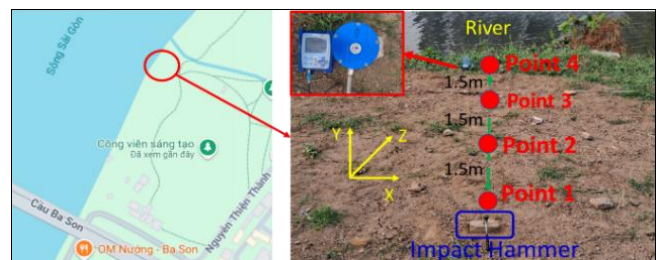
**2.6 Quy trình phân tích**

Quy trình nghiên cứu bao gồm: (i) thu thập tín hiệu dao động nền theo ba phương dưới nguồn kích cố định; (ii) phân tích PSD và phân tách năng lượng theo dải tần; (iii) chuẩn hóa năng lượng và tính toán các chỉ số LF/HF và suy giảm năng lượng tần số cao; và (iv) so sánh không gian các chỉ số để nhận diện các khu vực có dấu hiệu suy giảm cơ học tiến triển.

**3. Thí Nghiệm Hiện Trường và Kết Quả**

**3.1 Thí nghiệm hiện trường**

Nghiên cứu này nhằm khảo sát điều kiện nền đất bằng phương pháp địa chấn tại một khu vực không đồng nhất. Do đó, chúng tôi đã lựa chọn một khu vực nền đất mềm ven sông Sài Gòn. Nước sông sẽ thấm vào nền đất theo hướng vuông góc với dòng sông, tạo ra sự không đồng nhất tại các vị trí khác nhau trên bề mặt đất. Tải trọng và chạm được áp dụng bằng búa cầm tay và tấm gỗ. Mục đích của tấm gỗ là phân tán năng lượng và chạm của búa thành một lực phân bố, nhằm tránh tập trung ứng suất nén tại vị trí nguồn dao động. Nguồn búa chủ yếu được sử dụng cho khoảng cách ngắn, thường nhỏ hơn 5 m tại các vị trí nền đất và nhỏ hơn 10 m tại các vị trí nền đá [9]. Bốn điểm đo, đánh dấu từ Điểm 1 đến Điểm 4, được khảo sát, phân bố đều cách nhau 1,5 m theo hướng vuông góc với dòng sông (Hình 1) nhằm nghiên cứu tính chất đất theo hướng sạt lở. Dữ liệu dao động tự do được thu thập tại mỗi điểm đo, tương ứng với 10 cú và búa.



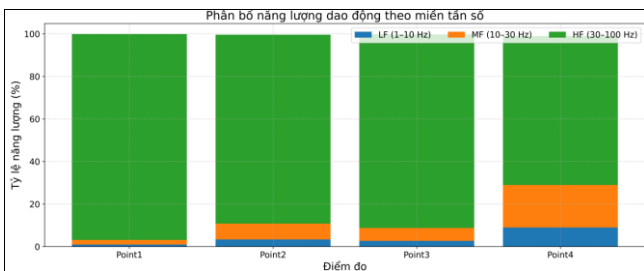
**Hình 1:** Đo dao động nền đất gần sông Sài Gòn

Dữ liệu dao động được thu thập theo ba phương, được ký hiệu như sau:

- X là phương song song với hướng dòng chảy của sông;
- Y là phương vuông góc với dòng sông;
- Z là phương thẳng đứng so với mặt đất;

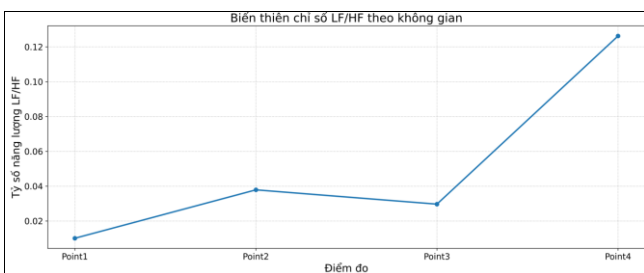
**3.2 Kết quả**

Dựa vào hình 2 trình bày phân bố tỷ lệ năng lượng dao động trong ba miền tần số thấp (LF: 1–10 Hz), trung (MF: 10–30 Hz) và cao (HF: 30–100 Hz) tại bốn điểm đo dọc theo bờ sông. Kết quả cho thấy năng lượng dao động tại tất cả các điểm đều chiếm ưu thế trong miền tần số cao, phản ánh đặc trưng đáp ứng đàn hồi của đất dưới tác động dao động môi trường biên độ nhỏ. Tuy nhiên, sự phân bố năng lượng có sự biến thiên rõ rệt theo không gian. Tại Point 1, năng lượng HF chiếm tỷ lệ cao nhất (≈ 66.8%), trong khi các thành phần LF và MF chiếm tỷ lệ rất nhỏ (< 3%), cho thấy môi trường đất còn duy trì độ cứng cao. Ngược lại, tại các điểm Point 2 và Point 3, tỷ lệ năng lượng LF và MF gia tăng, đi kèm với sự suy giảm năng lượng HF. Đặc biệt, tại Point 4, năng lượng HF giảm mạnh xuống còn khoảng 13.7%, trong khi năng lượng LF và MF tăng đáng kể, cho thấy sự tái phân bố năng lượng về miền tần số thấp. Sự dịch chuyển này phản ánh xu thế suy giảm độ cứng động và gia tăng tiêu tán năng lượng trong đất bờ sông.



**Hình 2:** Phân bố năng lượng dao động theo miền tần số

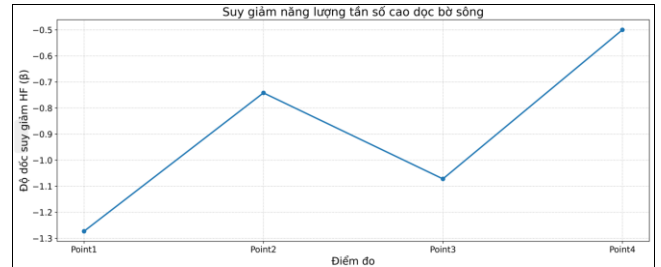
Dựa vào hình 3 thể hiện sự biến thiên của chỉ số LF/HF dọc theo tuyến đo. Giá trị LF/HF tăng dần từ Point 1 (≈ 0.01) đến Point 4 (≈ 0.13), phản ánh sự gia tăng tương đối của năng lượng tần số thấp so với tần số cao. Chỉ số LF/HF cho thấy khả năng phân biệt rõ ràng giữa các khu vực ổn định và suy yếu. Các giá trị thấp tại Point 1 tương ứng với môi trường đất còn cứng, trong khi các giá trị cao hơn tại Point 3 và đặc biệt là Point 4 cho thấy sự phát triển của các cơ chế suy giảm cơ học ở mức biến dạng rất nhỏ. Sự tăng mạnh của LF/HF tại Point 4 cho thấy đây là khu vực có khả năng tồn tại vùng suy yếu cục bộ.



**Hình 3:** Biến thiên chỉ số LF/HF theo không gian

Dựa vào hình 4 trình bày độ dốc suy giảm năng lượng tần số cao ( $\beta$ ) tại các điểm đo. Giá trị  $\beta$  đều âm tại tất cả các điểm, phản ánh xu thế suy giảm năng lượng HF theo không gian. Tại Point 1,  $\beta$  có giá trị âm lớn nhất (≈ -1.27), cho thấy

năng lượng tần số cao suy giảm nhanh, đặc trưng cho môi trường đất còn cứng và ít suy giảm. Ngược lại, tại Point 4, giá trị  $\beta$  tăng lên gần -0.5, cho thấy sự làm phẳng phổ năng lượng tần số cao. Hiện tượng này thường liên quan đến gia tăng suy giảm vật liệu và giảm độ cứng động của đất. Xu hướng giảm độ lớn  $|\beta|$  từ Point 1 đến Point 4 nhất quán với kết quả phân tích phân bố năng lượng và chỉ số LF/HF.



**Hình 4:** Biến thiên chỉ số LF/HF theo không gian

**4. Kết Luận**

Nghiên cứu này đã đề xuất và kiểm chứng một cách tiếp cận dựa trên phân tích năng lượng dao động nền trong miền tần số nhằm nhận diện sớm quá trình suy giảm cơ học của đất bờ sông. Thông qua phân tích phân bố năng lượng trong các miền tần số thấp, trung và cao, kết hợp với chỉ số LF/HF và độ dốc suy giảm năng lượng tần số cao, nghiên cứu cho thấy các chỉ số động học này phản ánh rõ ràng sự thay đổi độ cứng và đặc tính suy giảm của đất ở mức biến dạng rất nhỏ. Kết quả thực nghiệm dọc theo tuyến đo bờ sông cho thấy sự tái phân bố năng lượng từ miền tần số cao sang miền tần số thấp tại các khu vực có dấu hiệu suy yếu cơ học. Đặc biệt, các điểm đo có giá trị LF/HF cao và độ dốc suy giảm HF nhỏ hơn về độ lớn được xác định là những vị trí tiềm ẩn nguy cơ suy giảm cơ học cao hơn, ngay cả khi chưa xuất hiện các biểu hiện biến dạng bề mặt rõ ràng. Điều này khẳng định tính nhạy của phương pháp đối với các trạng thái suy yếu sớm của đất.

Phương pháp đề xuất có ưu điểm là không phá hủy, dễ triển khai ngoài thực địa, và có thể áp dụng với dữ liệu dao động môi trường hoặc nguồn kích thích đơn giản. Do đó, cách tiếp cận này có tiềm năng trở thành một công cụ hỗ trợ hiệu quả trong giám sát ổn định bờ sông và cảnh báo sớm nguy cơ sạt lở.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, phương pháp sẽ được mở rộng thông qua tích hợp phân tích đa phương dao động, hiệu chỉnh theo điều kiện địa chất-thủy văn, và kết hợp với các mô hình địa kỹ thuật truyền thống nhằm nâng cao độ tin cậy và khả năng định lượng mức độ suy giảm cơ học của đất bờ sông.

**5. Lời Cảm Ơn**

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn các thành viên thuộc Phòng Thí nghiệm Cơ học ứng dụng – Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM đã hỗ trợ và cung cấp số liệu phục vụ nghiên cứu. Đồng thời, nhóm nghiên cứu cũng trân trọng cảm ơn các đồng nghiệp đã đóng góp ý kiến và hỗ trợ trong quá trình thực hiện bài báo này.

**6. Tài Liệu Tham Khảo**

- Hardin BO, Drnevich VP. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. 1972; 98(SM7):667-692.

2. Seed HB, Idriss IM. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses, Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, CA, USA, 1970.
3. Kramer SL. Geotechnical Earthquake Engineering. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1996.
4. Leroueil S, Vaughan PR. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*. 1990; 40(3):467-488.
5. Bard P-Y. Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? In *Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, A. Irikura, K. Kudo, H. Okada, and T. Sasatani, Eds. Rotterdam, The Netherlands: Balkema, 1999, 1251-1279.
6. Aki K, Richards PG. *Quantitative Seismology*, 2<sup>nd</sup> ed. Sausalito, CA, USA: University Science Books, 2002.
7. Carcione JM. *Wave Fields in Real Media: Wave Propagation in Anisotropic, Anelastic, Porous and Electromagnetic Media*, 3<sup>rd</sup> ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2014.
8. Santamarina JC, Klein KA, Fam MA. *Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*. Chichester, U.K.: Wiley, 2001.
9. Prieto GA, Lawrence JF, Beroza GC. Anelastic attenuation from ambient seismic noise. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2009; 114(B7).
10. Fäh D, *et al.* Estimation of site effects from ambient vibration measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2003; 93(1):161-180.