

# PHÂN TÍCH TƯƠNG TÁC NỀN-CÔNG TRÌNH CỦA NHÀ MÁY ĐIỆN HẠT NHÂN

## SOIL-STRUCTURE INTERACTION OF NUCLEAR POWER PLANT

Trần Phương

Viện Khoa học công nghệ xây dựng, Email: [phuongtran.ibst@gmail.com](mailto:phuongtran.ibst@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.59382/pro.intl.con-ibst.2023.ses1-22>

**TÓM TẮT:** Các nhà máy điện hạt nhân là các công trình đặc biệt có thiết kế móng bè, kích thước lớn, đặt tại khu vực có địa chất tốt. Tuy nhiên, tại các khu vực cần phải xét đến tải trọng động đất, phân tích tương tác nền-công trình của nhà máy điện hạt nhân là cần thiết. Các phân tích phi tuyến của tính toán tương tác nền-công trình có thể thực hiện trong miền thời gian hoặc miền tần số. Phân tích trong miền thời gian có ưu điểm là có thể dễ dàng sử dụng các mô hình vật liệu phi tuyến, hoặc phi tuyến hình học. Tuy nhiên phương pháp này bị giới hạn bởi điều kiện biên của vùng địa chất gần công trình, các phương pháp tính hiện nay giả thuyết sóng động đất truyền tới công trình theo phương thẳng đứng. Giả thuyết này nhằm hạn chế những sai số do phương pháp phần tử hữu hạn có thể gây ra tại điều kiện biên. Bài báo này trình bày một phương pháp tính toán mới, kết hợp giữa phân tích bằng phần tử hữu hạn và phần tử biên, trong đó có thể xét đến trường hợp sóng động đất truyền tới công trình theo một góc phương vị cho trước. Bài báo phân tích ảnh hưởng của phương truyền sóng tới phổ phản ứng của Nhà máy điện hạt nhân số 7 Kashiwazaki-Kariwa. Kết quả phân tích cho thấy, phương pháp tính toán mới có thể xét đến ảnh hưởng của phương truyền sóng tới kết quả phân tích tương tác nền-công trình.

**TỪ KHÓA:** Tương tác nền, biến thiên dao động động đất theo không gian, phân tích phi tuyến

*ABSTRACTS: Nuclear power plants are special facilities with large foundation designs, located in areas with good geology. However, in areas where seismic loads need to be considered, analyzing the soil-structure interaction of nuclear power plants is essential. Nonlinear analyses of soil-structure interaction can be performed in the time domain or frequency domain. Time domain analysis has the advantage of easily incorporating nonlinear material models or geometric nonlinearity. However, this method is limited by the boundary conditions of the geological region near the structure, as current analysis methods assume vertically propagating seismic waves towards the structure. This assumption is made to limit the errors that finite element methods can introduce at the boundaries.*

*This paper presents a new computational method that combines finite element method and boundary element method, in which the propagation of seismic waves towards the structure can be considered at a predetermined angle. The paper analyzes the impact of wave propagation on the response spectrum of the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant Unit 7. The results of the analysis show that the new computational method can consider the influence of the angle of incoming wave on the soil-structure interaction analysis.*

**KEYWORDS:** Soil-structure interaction, spatial variation ground motion, non linear analysis.

### 1. GIỚI THIỆU

Khi xảy ra động đất, sóng địa chấn truyền từ chấn tiêu đến khu vực công trình gây ra chuyển dịch của nền đất. Các dao động của nền đất truyền tới công trình tạo ra các tác động động lực học lên công trình, có thể gây hư hỏng đến công trình và thiết bị gắn trên công trình. Đối với các công trình có tầm quan trọng đặc biệt như nhà máy điện hạt nhân, việc nghiên cứu tác động của sóng động đất đến công trình không chỉ xét đến khả năng

chống chịu của công trình mà còn xét đến sự an toàn của các thiết bị gắn trên công trình. Khi xảy ra động đất, các thiết bị gắn trên công trình cũng dao động cùng với công trình, tuy nhiên tính chất của dao động tác động lên các thiết bị này phụ thuộc vào: (i) tính chất của sóng dao động, (ii) tính chất nền đất của công trình, (iii) đặc trưng của công trình [1]. Do vậy, để xét đến các dao động tác động lên thiết bị ta cần có một phương pháp tính toán có thể xét đến cả 3 đặc trưng trên.

Sóng động đất được hình thành do nhiều nguyên nhân: sự đứt gãy dịch chuyển địa tầng, hoạt động của núi lửa, hoạt động tích nước hồ thủy điện hay các hoạt động gây ra rung động khác của con người. Trong các nguyên nhân trên, động đất do hoạt động kiến tạo địa chất, gây ra đứt gãy dịch chuyển địa tầng có cường độ lớn nhất và gây ra những hậu quả nghiêm trọng đối với hoạt động của con người cũng như các công trình xây dựng. Sóng động đất có bản chất là sóng cơ học, có thể bao gồm các dạng như sóng dọc P (có phương dao động trùng với phương truyền sóng), sóng ngang SH (có phương dao động vuông góc với phương truyền sóng nhưng nằm ngoài mặt phẳng truyền sóng), sóng ngang SV (có phương dao động vuông góc với phương truyền sóng nhưng nằm trong mặt phẳng truyền sóng), các sóng mặt (sóng Rayleigh, sóng Love, sóng Stoneley). Sự lan truyền sóng động đất trong lòng đất từ chấn tiêu đến nơi xét đến động đất phức tạp, phụ thuộc vào đặc điểm địa chất, địa tầng của khu vực sóng truyền qua. Sự lan truyền sóng động đất này khiến cho đặc trưng của sóng động đất bao gồm các thành phần biến đổi theo cả thời gian, không gian và tần số của sóng động đất. Thành phần động đất bao gồm các sóng ngang S, sóng dọc P và các sóng mặt, tuy nhiên năng lượng của các sóng ngang S là lớn nhất. Các sóng ngang S có vận tốc nhỏ hơn các sóng dọc P, nên khi xảy ra động đất, tín hiệu dao động đo được sẽ cho thấy các thành phần sóng P trước rồi đến các sóng S. Các dao động do sóng P có cường độ nhỏ hơn so với sóng S. Do vậy, khi tính toán tác động của động đất lên công trình xây dựng có xét đến tương tác nền-công trình, để đơn giản hoá các phương pháp tính toán, ta thường giả thuyết các sóng dao động là các sóng ngang S, có mặt truyền sóng là mặt phẳng vuông góc với phương truyền sóng, phương truyền sóng theo phương thẳng đứng từ tầng địa chất sâu đến mặt đất [2]. Giả thuyết này dẫn đến các dao động nền đất có phương dao động theo phương ngang và các dao động này là đồng nhất trên cùng một độ sâu địa chất (xem hình). Trên thực tế, do ảnh hưởng của môi trường truyền sóng, các sóng dao động truyền tới công trình không theo phương thẳng đứng mà thường có góc lệch nhất định. Hơn nữa, các sóng địa chấn khi truyền qua các môi trường địa chất khác nhau gặp các hiện tượng phản xạ, khúc xạ và tán xạ. Do vậy, dao động của địa chất tại công trình có đặc trưng biến đổi trong miền thời gian, miền tần số và theo không gian [3] [4] [5] [6]. Để nghiên cứu sự ảnh hưởng của các đặc trưng sóng động đất đến tương tác nền-công trình, Tran và cộng sự đã xây dựng phương pháp phân tích tương tác nền-công trình trong miền thời gian, có xét đến sự biến đổi theo không gian của sóng động đất [7].

Tác giả đã áp dụng sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn [2] trong phân tích nền-công trình của nhà máy điện hạt nhân số 7 Kashiwazaki-Kariwa (KK7) [2] [8] [9]. Dữ liệu tính toán đầu vào về công trình cũng như dữ liệu về sóng động đất được sử dụng theo nguồn cung cấp của chương trình “Benchmark-NNP7” [8].

Bài báo gồm 5 phần: (i) Phần 1 giới thiệu chung về vấn đề trình bày; (ii) Phần 2 giới thiệu về phương pháp tính toán; (iii) Phần 3 Giới thiệu về công trình điện hạt nhân KK7 và các giả thuyết tính toán; (iv) Phần 4 trình bày kết quả tính toán và (v) Phần 5 trình bày một số kết luận.

## 2. PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH TƯƠNG TÁC NỀN TRONG MIỀN THỜI GIAN CÓ XÉT ĐẾN BIẾN THIÊN KHÔNG GIAN CỦA SÓNG ĐỘNG ĐẤT

### 2.1. Độ biến đổi theo không gian của sóng động đất

Độ biến đổi theo không gian của sóng động đất có thể được mô tả dưới dạng toán học bằng cách xét hàm tương quan chéo của trường dao động của đất nền theo không gian lẫn thời gian. Xét chuyển vị ở điểm  $x$  tại thời điểm  $t$  là một hàm ngẫu nhiên  $U(x,t)$ , hàm tương quan chéo giữa hai điểm bất kỳ có thể được định nghĩa như sau:

$$C(x, x', t, t') = \mathbb{E}[U(x, t) \times U(x', t')] \quad (1)$$

Trong đó:  $E$  là mô men xác suất bậc hai.

Do những dữ liệu về động đất không nhiều, nên khi phân tích tính chất xác suất thống kê của sóng động đất, ta thường đặt giả thiết về tính ổn định, tính đồng nhất và tính lặp của trường chuyển động, từ đó:

$$C(x, x', t, t') = C(|x' - x|, t, t + \tau) = C(|x' - x|, \tau) \quad (2)$$

Hàm mật độ phổ năng lượng và hàm mật độ phổ năng lượng chéo có thể được định nghĩa như là biến đổi Fourier của hàm tương quan và hàm tương quan chéo một cách tương ứng:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

$$S(|x' - x|, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(|x' - x|, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

Hàm mật độ phổ xác suất chéo có thể mô tả tính chất xác suất thống kê ở hai điểm khác nhau trên trường dao động của nền đất. Tuy nhiên, trong ứng dụng kỹ thuật, người ta sử dụng hàm mật độ xác suất chuẩn (coherency) từ việc chuẩn hóa hàm mật độ phổ xác suất chéo với hàm mật độ phổ xác suất tương ứng:

$$\gamma(x, x', \omega) = \frac{S(x, x', \omega)}{\sqrt{S(x, x, \omega)S(x', x', \omega)}} \quad (5)$$

Hàm mật độ xác suất chuẩn có thể được viết dưới dạng sau:

$$\gamma(x, x', \omega) = |\gamma(x, x', \omega)| e^{i\phi(x, x', \omega)} \quad (6)$$

Trong đó:

$$\gamma(x, x', \omega) = \frac{S(x, x', \omega)}{\sqrt{S(x, x, \omega)S(x', x', \omega)}}$$

$$\phi(x, x', \omega) = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(S(x, x', \omega))}{\text{Re}(S(x, x', \omega))} \right)$$

Giá trị tuyệt đối  $|\gamma(x, x', \omega)|$  được gọi là hàm mật độ chuẩn không trễ. Giá trị của nó bằng 1 khi  $\omega$  hay khoảng cách  $|x'-x|$  tiệm cận về giá trị 0 và tiến tới giá trị bằng 0 khi  $\omega$  hay khoảng cách  $|x'-x|$  có giá trị vô cùng. Hàm mật độ chuẩn không trễ mô tả bản chất ngẫu nhiên của sóng động đất biến đổi theo không gian địa chất như là đứt gãy địa tầng, hiệu ứng phản xạ khúc xạ khi truyền sóng và các biến đổi địa chất cục bộ gần khu vực công trình. Đại lượng pha  $\phi(x, x', \omega)$  chỉ mô tả độ lệch pha của sóng địa chất trong quá trình truyền sóng mang tính hệ thống của độ biến đổi không gian địa chất mà được gọi là hiệu ứng truyền sóng. Nhiều mô hình hàm mật độ xác suất chuẩn đã được phát triển trong các nghiên cứu trước đây [6] [10] [11] [12] [13] [14] [15]. Trong các mô hình này, mô hình của Luco và Wong [10] được sử dụng nhiều nhất.

$$|\gamma(|x' - x|, \omega)| = e^{-\left(\frac{v_0|x'-x|}{c_s}\right)^2} \quad (7)$$

$$v = \mu \left( \frac{R}{r_0} \right)^{1/2} \quad (8)$$

trong đó  $c_s$  là vận tốc sóng trong môi trường truyền sóng ngẫu nhiên,  $R$  là khoảng cách sóng truyền trong môi trường ngẫu nhiên,  $r_0$  là đặc trưng ngẫu nhiên của môi trường truyền sóng theo phương truyền,  $\mu$  đặc trưng cho tính chất đàn hồi của môi trường ngẫu nhiên.

## 2.2. Ngoại suy xác suất tính chất thống kê của sóng động đất

Phương pháp ngoại suy xác suất tính chất thống kê từ dữ liệu trên mặt đất cho môi trường trong lòng đất dựa trên lý thuyết truyền sóng [16] có các giả thuyết như sau cho môi trường truyền sóng:

- Môi trường địa chất là môi trường phân tầng theo phương ngang, đồng nhất và bán vô cùng, có đặc trưng cơ học đàn hồi.

- Dao động tại một điểm là tổng dao động gây ra bởi các sóng phẳng truyền đến từ mọi hướng.

Các sóng đơn vị truyền đến là các sóng đàn hồi, có đặc trưng ngẫu nhiên độc lập, ổn định, là các sóng loại SH và P-SV [17].

Cho  $U(r, z, t) = \begin{pmatrix} u(r, z, t) \\ v(r, z, t) \\ w(r, z, t) \end{pmatrix}$  là véc tơ chuyển

động ở một điểm  $x$  bất kỳ độ sâu  $z$  thời điểm  $t$ . Chuyển động này có thể được viết dưới dạng tổng của các sóng đơn vị:

$$U(r, z, t) = \frac{1}{8\pi^3} \iint \tilde{U}(k, z, \omega) e^{i(\omega - k \cdot r)} dk d\omega \quad (9)$$

Trong đó  $k = (k_x, k_y)$  là véc tơ số sóng,  $r = (x, y)$ ,  $dk = (dk_x, dk_y)$ , và  $r \cdot k = k_x x + k_y y$ . Trong đó  $\tilde{U}(k, z, \omega)$  là biến đổi Fourier theo miền số sóng – tần số của chuyển động  $U(r, z, t)$ .

Khi phân tích trong miền số sóng – tần số, ta có thể xác định chuyển động ở độ sâu từ chuyển động trên bề mặt thông qua ma trận chuyển  $T(k, z, \omega)$  [18]:

$$\tilde{U}(k, z, \omega) = T(k, z, \omega) \tilde{U}(k, 0, \omega) \quad (10)$$

Ma trận tương quan chéo ở độ sâu  $z$  có thể được định nghĩa như sau:

$$C(r, r', z, t, t') = \mathbb{E} [U(r, z, t) U^T(r', z, t')] \quad (11)$$

Trong đó  $T$  là ký hiệu cho chuyển vị. Theo giả thuyết sự ổn định và đồng nhất theo phương ngang của trường sóng, ma trận tương quan chéo chỉ phụ thuộc vào khoảng cách  $|r'-r|$  và độ trễ thời gian. Do đó phương trình 10 có thể được viết như sau:

$$C(|r' - r|, z, \tau) = \mathbb{E} [U(r, z, t) U^T(r', z, t')] \quad (12)$$

Ma trận mật độ phổ năng lượng chéo có được từ biến đổi Fourier của phương trình

$$C(r, r', z, t, t') = \mathbb{E} [U(r, z, t) U^T(r', z, t')] \quad (11):$$

$$\hat{S}(k, z, \omega) = \mathcal{F}_{k\omega} [\mathbb{E} [U(r, z, t) U^T(r', z, t')]] \quad (13)$$

Trên bề mặt  $z = 0$ , ma trận mật độ phổ năng lượng chéo có thể viết:

$$\hat{S}(k, 0, \omega) = \mathcal{F}_{k\omega} [\mathbb{E} [U(r, 0, t) U^T(r', 0, t')]] \quad (14)$$

Cuối cùng, ta thay phương trình (13) và (14) vào phương trình (11) và (12), ta được mối quan hệ giữa hàm mật độ phổ năng lượng chéo giữa bề mặt và độ sâu  $z$ :

$$\hat{S}(k, z, \omega) = T(k, z, \omega) \hat{S}(k, 0, \omega) T^T(k, z, \omega) \quad (15)$$

## 2.3. Sóng SH

Cho  $a_j^{SH}(t)$  là sóng tới đơn vị trong miền thời gian và  $S_0^{SH}(\theta_j, \omega)$  là phổ của sóng tới với góc tới  $\theta_j$ .

Theo phương pháp đại diện phổ [24], sóng tới thứ  $j^{\text{th}}$  có thể được xây dựng như sau:

$$a_j^{\text{SH}}(t) = \sum_{i=1}^K \sqrt{S_0^{\text{SH}}(\theta_j, \omega_i) \Delta\omega} e^{i\varphi_j^{\text{SH}}(\omega_i)} e^{i\omega_i t} \quad (16)$$

Và biến đổi Fourier trong miền tần số là:

$$\tilde{a}_j^{\text{SH}}(t) = \sqrt{S_0^{\text{SH}}(\theta_j, \omega)} e^{i\varphi_j^{\text{SH}}(\omega)} \quad (17)$$

Trong đó  $\varphi_j^{\text{SH}}(\omega)$  là một biến ngẫu nhiên phân bố đều trên  $[0; 2\pi]$ . Chuyển động ngoài mặt phẳng theo phương Oy ở một điểm  $x = (x, y, z)$  trong môi trường là kết quả của sự chồng chập của N sóng tới và sóng phản từ bề mặt tự do của môi trường:

$$\tilde{v}(x, y, z, \omega) = \sum_{j=1}^N \sqrt{S_0^{\text{SH}}(\theta_j, \omega) \Delta\theta} e^{i\varphi_j(\omega)} (e^{-ik_{xj}x - ik_{zj}z} + e^{-ik_{xj}x + ik_{zj}z}) \quad (18)$$

Trong đó:

$$\theta_j \text{ nằm trong khoảng } \left[ -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]$$

$c_s$  là vận tốc sóng

$$k_{xj} = \frac{\sin\theta_j}{c_s} \omega \text{ là số sóng theo phương ngang}$$

theo phương Ox

$$k_{zj} = \frac{\cos\theta_j}{c_s} \omega \text{ là số sóng theo phương đứng theo}$$

phương Oz

Do ta chỉ xét đến sóng nằm ngoài mặt phẳng Oxy, tọa độ theo phương được lược bỏ. Hàm mật độ phổ năng lượng chéo giữa hai điểm bất kỳ trong môi trường được viết như sau:

$$S_{vv}(x, x', z, z', \omega) = \mathbb{E}[\tilde{v}(x, y, \omega) \tilde{v}^*(x', z', \omega)] \quad (19)$$

Trong đó \* biểu thị liên hợp phức.

$$S_{vv}(x, x', z, z', \omega) = \sum_{j=1}^N S_0^{\text{SH}}(\theta_j, \omega) \Delta\theta (e^{-ik_{xj}(x-x') - ik_{zj}(z-z')} + e^{-ik_{xj}(x-x') - ik_{zj}(z+z')} + e^{-ik_{xj}(x-x') + ik_{zj}(z-z')} + e^{-ik_{xj}(x-x') + ik_{zj}(z+z')}) \quad (20)$$

Theo giả thiết môi trường đồng nhất và các sóng đơn là độc lập, ta có:

$$S_{vv}(dx, z, z', \omega) = \sum_{j=1}^N S_0^{\text{SH}}(\theta_j, \omega) \Delta\theta e^{ik_{xj}dx} (e^{-ik_{zj}(z-z')} + e^{-ik_{zj}(z+z')} + e^{ik_{zj}(z+z')} + e^{ik_{zj}(z-z')}) \quad (21)$$

Ta có thể suy ra hàm mật độ phổ năng lượng chéo giữa hai điểm trên cùng một mặt phẳng ngang. Trên bề mặt :  $z = z' = 0$

$$S_{vv}(dx, 0, \omega) = 4 \sum_{j=1}^N S_0^{\text{SH}}(\theta_j, \omega) \Delta\theta e^{ik_{xj}dx} \quad (22)$$

Ở độ sâu :  $z = z'$ :

$$S_{vv}(d_x, z, \omega) = \sum_{j=1}^N S_0^{\text{SH}}(\theta_j, \omega) \Delta\theta e^{ik_{xj}d_x} (2 + e^{-2ik_{zj}z} + e^{2ik_{zj}z}) \quad (23)$$

Dạng liên tục của phương trình (23) được cho như sau:

$$S_{vv}(d_x, 0, \omega) = 4 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S_0^{\text{SH}}(\theta, \omega) e^{ik_{xj}d_x} d\theta \quad (24)$$

Phương trình (24) có thể được viết theo miền số sóng như sau:

$$\hat{S}_{vv}(k_x, 0, \omega) = \frac{4c_s}{\omega} S_0^{\text{SH}}(\theta, \omega) \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{k_x c_s}{\omega}\right)^2}} \quad (25)$$

Ta có:

$$S_0^{\text{SH}}(\theta, \omega) = \hat{S}_{vv}(k_x, 0, \omega) \frac{\omega}{4c_s} \sqrt{1 - \left(\frac{k_x c_s}{\omega}\right)^2} \quad (26)$$

Trong đó  $\theta = \arcsin\left(\frac{k_x c_s}{\omega}\right)$  là góc tới được suy ra từ định nghĩa ban đầu.

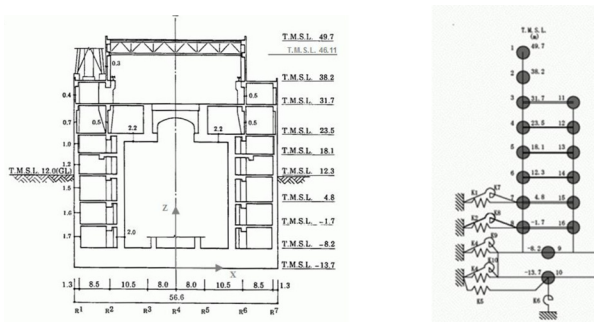
Mối quan hệ giữa phổ của các sóng đơn và hàm mật độ chuẩn trên bề mặt có được là:

$$S_0^{\text{SH}}(\theta, \omega) = \hat{\gamma}_{vv}(k_x, 0, \omega) S_{vv0}(\omega) \frac{\omega}{4c_s} \sqrt{1 - \left(\frac{k_x c_s}{\omega}\right)^2} \quad (27)$$

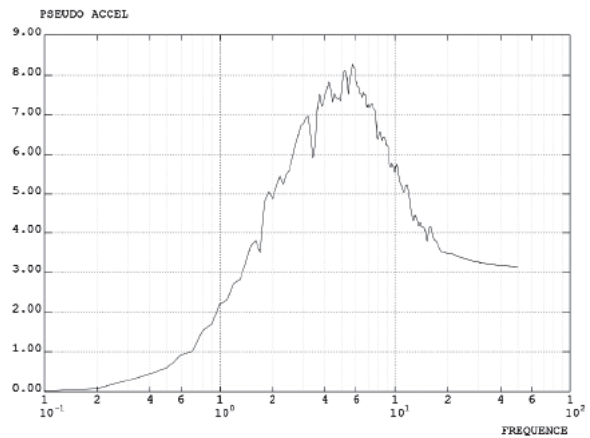
Nó cho ta thấy phổ của các sóng đơn có thể được tính từ hàm mật độ chuẩn đã cho  $\hat{\gamma}(k_x, 0, \omega)$  và phổ của chuyển động  $S_0(\omega)$  trên bề mặt, từ đó chuyển động ngoài mặt phẳng ở bất kỳ điểm nào trong môi trường cũng có thể tính được từ phương trình (18).

#### 2.4. Phân tích tương tác nền-công trình

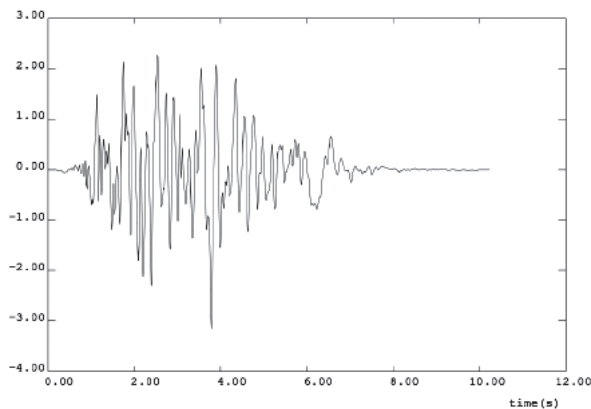
Tương tác nền-công trình được phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn, sử dụng mã nguồn mở CAST3M [19]. Trường sóng động đất SH được tính toán bằng phương pháp phần tử biên, sử dụng mã nguồn MISS3D [20]. Để tích hợp được trường sóng động đất tính toán bằng phương pháp phần tử biên MISS3D vào chương trình CAST3M, nhóm tác giả đã xây dựng giao diện chương trình con trên phần mềm lập trình Matlab cho phép xác định trường chuyển động, vận tốc tính toán từ MISS3D, từ đó xác định các điều kiện biên và điều kiện ban đầu trong tính toán phần tử hữu hạn trong CAST3M. Điểm mới của phương pháp này là sử dụng phương pháp thu gọn miền không gian của Bielak [21] thay thế cho phương pháp biên đàn hồi [22] [23], cho phép loại bỏ những sai số về phương pháp tính tại vùng biên của không gian được phân tích bằng phương pháp PTHH, đồng thời giúp làm giảm đáng kể tài nguyên tính toán.



Hình 1. Sơ họa cấu tạo KK7



Hình 3. Phổ của sóng dao động tại mặt đất



Hình 2. Sóng dao động tại mặt đất

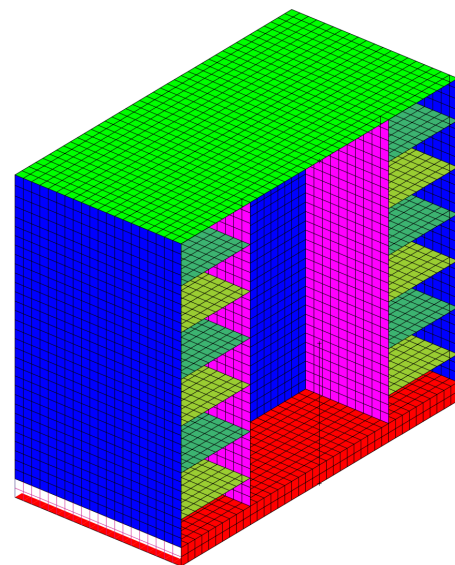
### 3. GIỚI THIỆU MÔ HÌNH CÔNG TRÌNH KK7

Trận động đất ngày 16 tháng 7 năm 2007 Niigataken-Chuetsu-Oki (NCO) xảy ra tại Nhật Bản đã ảnh hưởng nghiêm trọng đến Nhà máy điện hạt nhân Kashiwazaki-Kariwa nằm cách tâm chấn 16 km. Tổ chức năng lượng nguyên tử quốc tế IAEA đã thực hiện chương trình tính toán KARISMA (Kashiwazaki-Kariwa Research Initiative for Seismic Margin Assessment) [8] với mục đích đánh giá các phương pháp mô phỏng được sử dụng bởi các thành viên của tổ chức.

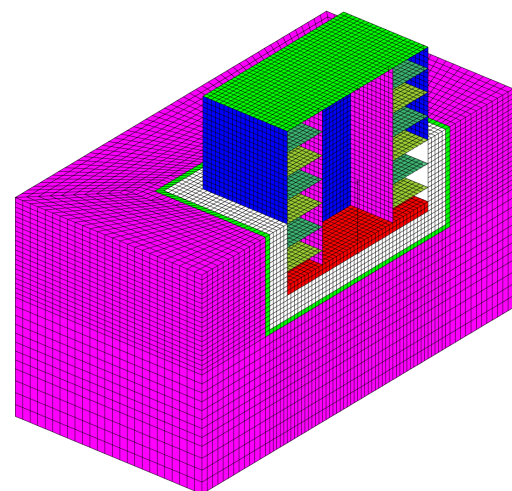
Mô hình phần tử hữu hạn dạng đơn giản của tổ hợp KK7 được xây dựng (xem Hình 4), bao gồm công trình và vùng địa chất gần công trình. Chương trình tính toán CAST3M cho phép xét đến tính phi tuyến của vật liệu bê tông cốt thép và của nền [19]. Trong trường hợp tính toán này, nhóm tác giả đã giả thuyết đất nền ở xa công trình là không gian bán vô cùng đàn hồi, đất nền ở gần công trình được xét đến trong tính toán là lớp đất đầu tiên (xem Hình 5). Phần thiết bị gắn với công trình được mô phỏng đơn giản là con lắc đơn đặt tại giữa công trình.

### 4. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH

Sóng động đất truyền tới công trình được lựa chọn dao động có PGA 2,2 m/s<sup>2</sup> (xem Hình 2), có phổ trong miền tần số như Hình 3. Các trường hợp tính toán bao gồm trường hợp sóng tới là sóng SH

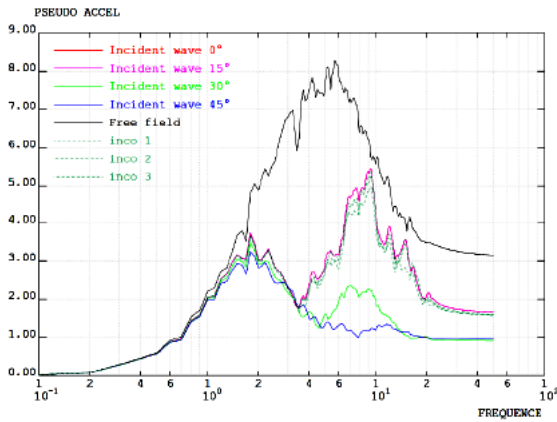


Hình 4. Mô hình PTHH của KK7 dạng đơn giản



Hình 5. Mô hình PTHH của KK7 và đất nền gần công trình

theo phương thẳng đứng 0°, sóng tới có góc tới 15, 30, 45 và sóng có xét tới biến đổi ngẫu nhiên theo không gian theo mô hình Luco-Wong [10]. Kết quả phân tích phổ phản ứng của con lắc đơn đại diện



**Hình 6. Phổ phản ứng của con lắc ứng với các trường hợp tính toán**

cho thiết bị được gắn trên công trình trong Hình 6 cho thấy:

- Với góc tới 15°, kết quả phổ phản ứng gần như không khác so với trường hợp góc tới 0°. Do vậy trong một số trường hợp phân tích tương tác nền-công trình trong các trận động đất xảy ra gần với công trình, giả thiết sóng truyền theo phương thẳng đứng có thể phù hợp, do các góc tới nhỏ không gây ra nhiều ảnh hưởng đến kết quả phân tích.

- Với các góc tới lớn hơn từ 30°, ta thấy phổ phản ứng của con lắc giảm ở tần số 6-10 Hz. Nguyên nhân là tại các góc tới lớn độ trễ pha của sóng lớn hơn, tại các tần số cao (bước sóng nhỏ), các dao động theo phương ngang của công trình bị triệt tiêu do các dao động của sóng tới sau triệt tiêu dao động của sóng tới trước.

- Đối với các dao động ngẫu nhiên, do bỏ qua độ trễ pha trong mô hình Luco-Wong, nên kết quả phổ phản ứng của con lắc đơn gần với kết quả của trường hợp góc tới bằng 0°

## 5. KẾT LUẬN

Báo cáo đã trình bày phương pháp tính và kết quả phân tích tương tác nền-công trình, áp dụng cho 1 trường hợp công trình có kích thước lớn. Phương pháp sử dụng PTHH kết hợp với phần tử biên, phân tích trong miền thời gian nên có thể xét đến phi tuyến của vật liệu là đất nền gần công trình và vật liệu bê tông cốt thép. Ngoài ra, phương pháp này còn cho phép xét đến trường hợp móng được đặt sâu trong đất thay vì chỉ xét đến trường hợp mô hình giản đơn là móng đặt trên nền cứng.

Kết quả phân tích phổ phản ứng của con lắc đơn, đại diện cho thiết bị gắn trên công trình cho thấy, khi sóng tới là sóng SH, kết quả phổ phản ứng ở tần số cao của con lắc phụ thuộc vào góc tới của sóng động đất. Nguyên nhân chính của hiện tượng này là do độ trễ pha khi truyền sóng. Do vậy, cần có

thêm các nghiên cứu đối với sóng SV, P và các sóng mặt trong việc xem xét tác động của độ biến thiên theo không gian của sóng động đất trong phân tích tương tác nền-công trình.

Phương pháp phân tích đã sử dụng cho phép nghiên cứu phân tích nền-công trình trong trường hợp xác định được phương trình truyền sóng trong môi trường đàn hồi, do vậy cần có thêm các phát triển, mở rộng công cụ tính toán cho trường hợp sóng tới là các sóng P, SV và tổng hợp của các sóng này.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D. M. Ghiocel and F. Ostadan, “Seismic Ground Motion Incoherency Effects on Soil-Structure Interaction Response of NPP Building Structures”, in *Transactions*, 2007.
- [2] W. Fan and M. Rambach, “Contribution to the IAEA soil-structure interaction KARISMA Benchmark”, in *Transactions*, 2013.
- [3] L. S. Katafygiotis, A. Zerva and D. Pachakis, “An efficient approach for the simulation of spatially variable motions for the seismic response of lifelines”, in *Proc of 13th ASCE Engineering Mechanics Conf*, 1999.
- [4] A. Zerva, “Effect of spatial variability and propagation of seismic ground motions on the response of multiply supported structures”, *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 6, p. 212–221, September 1991.
- [5] H. Nakamura, “Depth-dependent spatial variation of ground motion based on seismic array records”, in *Proceedings, 11th World Conference on Earthquake Engineering*, 1996.
- [6] N. Abrahamson, J. F. Schneider and J. C. Stepp, “Spatial coherency of shear waves from the Lotung, taiwan large-scale seismic test”, *Structural Safety*, vol. 10, p. 145–162, May 1991.
- [7] Tran Phuong, Wang Fan, Clouteau Didier, “Generation of spatial variation ground seismic motion”, in *Compdyn2013*, Kos, Grece, 2013.
- [8] IAEA, “KARISMA Benchmark: Guidance document Part 1: K-K unit 7 R/B structure - Phase I, II & III”, Vienna.
- [9] International Atomic Energy Agency, “Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise”, International Atomic Energy Agency (IAEA), 2013.
- [10] J. E. Luco and H. L. Wong, “Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion”, *Earthquake Engineering & Structural*

- Dynamics*, vol. 14, p. 891–908, 1986.
- [11] B. B. A., L. C. H., J. Penzien, Y. B. Tsai and Y. T. Yeh, “Preliminary Report on the SMART 1 (Strong Motion Array in Taiwan)”, *Earthquake Engineering Research Center*, 1982.
- [12] G. N. Bycroft, “El Centro, California, differential ground motion array”, 1980.
- [13] K. W. Campbell and Y. Bozorgnia, “NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s”, *Earthquake Spectra*, vol. 24, p. 139–171, February 2008.
- [14] H. Hao, C. S. Oliveira and J. Penzien, “Multiple-station ground motion processing and simulation based on smart-1 array data”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 111, p. 293–310, February 1989.
- [15] R. Kassawara and L. Sandell, “Program on Technology Innovation: Effects of Spatial Incoherence on Seismic Ground Motions”, 2007.
- [16] E. Kausel and A. Pais, “Stochastic Deconvolution of Earthquake Motions”, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 113, p. 266–277, February 1987.
- [17] D. Zendagui, M. K. Berrah and E. Kausel, “Stochastic deamplification of spatially varying seismic motions”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 18, p. 409–421, August 1999.
- [18] W. T. Thomson, “Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid Medium”, *Journal of Applied Physics*, vol. 21, p. 89–93, April 2004.
- [19] “<http://www-cast3m.cea.fr/>”, [Online].
- [20] D. Clouteau, “Manual of MISS3D”, Paris, 2000.
- [21] J. Bielak, K. Loukakis, Y. Hisada and C. Yoshimura, “Domain reduction method for three dimensional earthquake modeling in localized regions, Part I: Theory”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 93, pp. 817–824, 2003.
- [22] J. Lysmer and R. L. Kuhlemeyer, “Finite Dynamic Model for Infinite Media”, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 95, p. 859–877, August 1969.
- [23] J. P. Bardet, K. Ichii and C. H. Lin, EERA: a computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits, University of Southern California, Department of Civil Engineering, 2000.
- [24] F. Wang, “Effect of seismic spatial variability on the floor response”.
- [25] N. A. Abrahamson, “Generation of spatially incoherent strong motion time histories”, in *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, 1992.
- [26] A. Chakraborty and B. Basu, “Nonstationary Response Analysis of Long Span Bridges under Spatially Varying Differential Support Motions Using Continuous Wavelet Transform”, *Journal of Engineering Mechanics-ASCE - J ENG MECH-ASCE*, vol. 134, February 2008.
- [27] H. Kameda and H. Morikawa, “Conditioned Stochastic Processes for Conditional Random Fields”, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 120, p. 855–875, April 1994.
- [28] A. D. Kiureghian, “A Coherency Model for Spatially Varying Ground Motions”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 25, p. 99–111, 1996.
- [29] N. Laouami and P. Labbe, “Analytical approach for evaluation of the seismic ground motion coherency function”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 21, p. 727–733, December 2001.
- [30] M. Shinozuka and C. M. Jan, “Digital simulation of random processes and its applications”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 25, p. 111–128, November 1972.
- [31] M. Shinozuka, G. Deodatis and T. Harada, “Digital Simulation of Seismic Ground Motion”, vol. 32, 1987, p. 252–298.
- [32] E. H. Vanmarcke, E. Heredia-Zavoni and G. A. Fenton, “Conditional Simulation of Spatially Correlated Earthquake Ground Motion”, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 119, p. 2333–2352, November 1993.
- [33] A. Whittaker, G. Atkinson, J. Baker, J. Bray, D. Grant, R. Hamburger, C. Haselton and P. Somerville, “Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses”, 2011.