

TẠO BẢNG GIA TỐC NỀN TỪ PHỔ PHẢN ỨNG GIA TỐC ĐÀN HỒI SỬ DỤNG CHUỖI FOURIER

TS. Đinh Văn Thuật¹

Tóm tắt: Bảng gia tốc nền nhân tạo được sử dụng là dữ liệu đầu vào cần thiết cho phân tích kết cấu động phi tuyến theo thời gian trong trường hợp thiếu các dữ liệu ghi chép động đất. Bài báo này trình bày một phương pháp sử dụng kỹ thuật biến đổi chuỗi gần đúng Fourier để tạo giả các bảng gia tốc nền có biên độ phổ phản ứng gia tốc đàn hồi sát với phổ phản ứng gia tốc được qui định trong tiêu chuẩn thiết kế TCXDVN 375:2006 và có góc pha dao động biến đổi khác nhau. Phương pháp này đã được xây dựng thành chương trình tính và được minh họa qua ví dụ xét đến các điều kiện địa chấn và nền đất ở Hà Nội. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng các bảng gia tốc nền nhân tạo được sử dụng hiệu quả trong phân tích kết cấu động phi tuyến theo thời gian.

Summary: Artificial ground accelerations are used as required input data for the nonlinear inelastic dynamic time-history analyses of structures in the case of lacking of real earthquake records. This paper presents a method using the Fourier transform techniques for generation of artificial earthquake ground motions whose elastic response acceleration spectra are identical to those specified in the design code TCXDVN 375:2006 and phase angles are varied. The method was programmed and reflected by examples taking into consideration of the seismic and geological conditions in Hanoi. The results show that the generated motion accelerations were effectively used for nonlinear dynamic response analyses of structures.

Nhận ngày 12/8/2011; chỉnh sửa 25/8/2011; chấp nhận đăng 30/9/2011

1. Mở đầu

Tiêu chuẩn TCXDVN 375:2006 [1], được biên soạn theo Tiêu chuẩn Eurocode 8 [2], có quy định trong một số trường hợp riêng biệt cần áp dụng phương pháp phân tích động phi tuyến theo thời gian cho thiết kế kháng chấn kết cấu nhà nhiều tầng. Phương pháp phân tích động phi tuyến là một công cụ hữu hiệu để xét đến mức độ biến dạng dẻo, khả năng hấp thụ và phân tán năng lượng khác nhau của các cấu kiện kết cấu; đặc biệt đối với công trình có hình dạng không đều đặn trong mặt bằng và theo chiều cao, có mức độ biến dạng phi tuyến về vật liệu lớn, chịu ảnh hưởng đáng kể của các dạng dao động bậc cao và được xây dựng trên nền đất có cường độ yếu hoặc có cấu tạo địa chất phức tạp [3-8].

Tuy nhiên, vấn đề khó khăn khi thực hiện phân tích động theo thời gian cần phải có các bảng gia tốc nền là các dữ liệu đầu vào sử dụng cho từng vị trí xây dựng công trình. Trong khi đó ở nước ta các dữ liệu ghi chép được từ các trận động đất xảy ra trong quá khứ là rất hiếm [9]. Do vậy, để phục vụ cho thực hành tính toán thiết kế cũng như cho nghiên cứu khảo sát thì việc xác định các bảng gia tốc nền như thế nào cho phù hợp với đặc điểm địa chấn tại nơi xây

¹ Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng.
E-mail: thuatvandin@ gmail.com

dựng công trình là cần thiết. Trong trường hợp may mắn nếu vị trí xây dựng công trình có các đặc trưng nền đất (tính chất cơ lý, cấu tạo, độ sâu) và đặc trưng địa chấn (độ lớn, khoảng cách, cơ chế phát sinh) tương tự với một vị trí nào đó ở nước khác đã có sẵn các dữ liệu động đất được ghi chép thì ta có thể sử dụng trực tiếp các dữ liệu đó. Tuy nhiên, điều này rất khó đạt được vì tính chất phức tạp của sóng động đất và ngay cả đối với cùng một vị trí xây dựng, các kết quả ghi chép được cũng thường khác nhau nhiều. Ví dụ, có thể đặc trưng về đỉnh gia tốc nền (PGA) của sóng động đất được lựa chọn là đảm bảo, nhưng các đặc trưng quan trọng khác lại không được đảm bảo như đỉnh vận tốc nền (PGV), khoảng thời gian ảnh hưởng, nội dung tần số dao động, các biên độ phổ phản ứng của hệ một bậc tự do...

Hơn nữa, ngay cả trường hợp các băng gia tốc nền có các giá trị biên độ phổ phản ứng gần tương tự nhau, nhưng kết quả phân tích phản ứng động phi tuyến của kết cấu nhà nhiều tầng theo chiều cao là khác nhau đáng kể; chẳng hạn chuyển vị tương đối giữa hai tầng liền kề có thể có giá trị lớn nhất ở các vị trí tầng dưới, tầng trên hoặc tầng giữa của nhà [8]. Kết quả phân tích khảo sát đã chỉ ra rằng sự biến đổi khác nhau về góc pha dao động của sóng động đất là một trong những nguyên nhân chính làm thay đổi đáng kể phân bố biến dạng phi tuyến của công trình theo chiều cao, mặc dù biến dạng tổng cộng của các tầng nhà đối với các trường hợp là khác nhau không đáng kể. Tiêu chuẩn thiết kế qui định số lượng các băng gia tốc nền cho mỗi vị trí xây dựng cần đảm bảo tối thiểu là 7 để từ đó có thể sử dụng được giá trị ứng xử trung bình từ các kết quả phân tích kết cấu động phi tuyến dưới tác dụng của các băng gia tốc nền [1,2]. Như vậy, việc tạo ra các băng gia tốc nền có các đặc trưng thoả mãn các yêu cầu thiết kế là cần thiết. Vấn đề này đang là một thách thức đối với các nhà nghiên cứu và kỹ sư thiết kế nhằm cung cấp các dữ liệu đầu vào phù hợp cho việc phân tích kết cấu động theo thời gian.

2. Phương pháp tạo băng gia tốc nền nhân tạo

Các băng gia tốc nền có thể được tạo giả bằng cách điều chỉnh trực tiếp các băng gia tốc thực được ghi chép ở các vị trí có các đặc trưng nền đất gần giống với vị trí xây dựng công trình, chẳng hạn có cùng loại nền đất được qui định trong tiêu chuẩn thiết kế [1,2] nhưng lại khác nhau về độ lớn tác động của động đất. Cụ thể, ta có thể điều chỉnh bằng cách nhân băng gia tốc nền thực với một hệ số nào đó để sao cho giá trị PGA của nó bằng giá trị PGA được sử dụng trong thiết kế. Hoặc tương tự ta có thể điều chỉnh dựa theo giá trị PGV hay theo giá trị gia tốc phổ phản ứng đàn hồi tại chu kỳ dao động cơ bản của kết cấu công trình. Có thể nói phương pháp này khá đơn giản và chỉ có thể phần nào đảm bảo được một trong số các đặc trưng chính của sóng động đất so với yêu cầu thiết kế; không thể đảm bảo cùng lúc một số đặc trưng quan trọng của sóng động đất.

Phương pháp thứ 2 được thực hiện bằng cách tạo mới các băng gia tốc nền với các biên độ phổ phản ứng đàn hồi và góc pha dao động tuân theo những qui luật nào đó. Trong trường hợp nếu tại vị trí khảo sát có sẵn các dữ liệu thực tế thì ta có thể sử dụng phổ phản ứng của sóng động đất thực nhưng góc pha dao động được biến đổi, hoặc có thể sử dụng các phổ góc pha dao động của các sóng động đất thực nhưng các biên độ phổ phản ứng được lấy theo qui định trong tiêu chuẩn thiết kế [10,11,12]. Ngoài ra, các băng gia tốc nền còn có thể được tạo ra bằng cách mô phỏng cơ chế phát sinh của động đất và đường truyền của sóng động đất đến các địa điểm xây dựng được khảo sát. Tuy nhiên phương pháp này khá phức tạp và khó khăn, đặc biệt đối với các kỹ sư xây dựng vì nó liên quan đến nhiều yếu tố khi mô hình hoá và sử dụng nhiều khái niệm trong lĩnh vực địa chấn học. Hiện nay, phương pháp này đang được một số nhà nghiên cứu ở Nhật Bản, Mỹ... quan tâm để mô phỏng những trận động đất rất mạnh có thể xảy ra trong tương lai.

Bài báo này trình bày phương pháp tạo giả bằng gia tốc nền bằng cách sử dụng kỹ thuật biến đổi chuỗi gần đúng Fourier với biên độ phổ phản ứng gia tốc đàn hồi được đảm bảo sát với giá trị qui định trong tiêu chuẩn thiết kế [1] và góc pha dao động được thay đổi một cách ngẫu nhiên. Phương pháp này đã được xây dựng thành chương trình tính sử dụng chuỗi gần đúng Fourier viết dưới dạng số phức. Bài báo cũng trình bày một ví dụ minh họa việc tạo bằng gia tốc nền nhân tạo trong điều kiện ở Hà Nội nhằm làm rõ khả năng ứng dụng của phương pháp tạo giả. Kết quả nghiên cứu sử dụng bằng gia tốc nền nhân tạo đã được trình bày trong một số nghiên cứu khác của tác giả [5,6,7].

3. Chuỗi gần đúng Fourier để tạo bằng gia tốc nền

3.1 Phương trình chuỗi Fourier

Nhà toán học nổi tiếng người Pháp J.B.J Fourier (1768-1830) đã tìm ra chuỗi Fourier được ứng dụng rất thành công trong nhiều lĩnh vực khoa học khác nhau. Ý nghĩa cơ bản của chuỗi Fourier là với mọi hàm số có tính lặp cho dù phức tạp như thế nào thì đều có thể được biểu diễn bằng tổng của những hàm lượng giác $\cos$ và $\sin$ có biên độ, tần số và góc pha dao động khác nhau. Trong đó hàm $\sin$ được bắt đầu từ giá trị bằng không và hàm $\cos$ được bắt đầu từ một giá trị nào đó tùy từng trường hợp cụ thể. Phương trình chuỗi lượng giác Fourier được biểu diễn theo thời gian t như sau:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} [A_k \cos k\omega t + B_k \sin k\omega t] \quad (1)$$

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[A_k \cos k \frac{2\pi}{T_d} t + B_k \sin k \frac{2\pi}{T_d} t \right] \quad (2)$$

trong đó $k = 0, 1, 2, \dots, \infty$; ω là tần số góc; $T_d = 2\pi / \omega$; A_k và B_k là các hệ số Fourier có ý nghĩa là các biên độ lớn nhất ứng với thành phần dao động thứ k và được xác định như sau:

$$A_k = \frac{2}{T_d} \int_0^{T_d} x(t) \cos k\omega t dt ; B_k = \frac{2}{T_d} \int_0^{T_d} x(t) \sin k\omega t dt \quad (3)$$

Trong phương trình (1), thành phần thứ k của hàm $x(t)$ với tần số góc tương ứng là $k\omega$ được biến đổi như sau:

$$\begin{aligned} x_k(t) &= A_k \cos k\omega t + B_k \sin k\omega t = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} (\cos k\omega t \cdot \cos \phi_k - \sin k\omega t \cdot \sin \phi_k) \\ &= \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \cos(k\omega t + \phi_k) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{trong đó } \frac{A_k}{\sqrt{A_k^2 + B_k^2}} = \cos \phi_k \text{ và } \frac{B_k}{\sqrt{A_k^2 + B_k^2}} = -\sin \phi_k .$$

Gọi X_k là biên độ dao động:

$$X_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad (5)$$

và ϕ_k là pha dao động:

$$\phi_k = \arctan\left(-\frac{B_k}{A_k}\right) \text{ với } -\pi < \phi_k < \pi. \quad (6)$$

Như vậy phương trình Fourier và các hệ số Fourier được viết rút gọn như sau:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} X_k \cos(k\omega t + \phi_k) \quad (7)$$

$$A_k = X_k \cos \phi_k ; B_k = -X_k \sin \phi_k \quad (8)$$

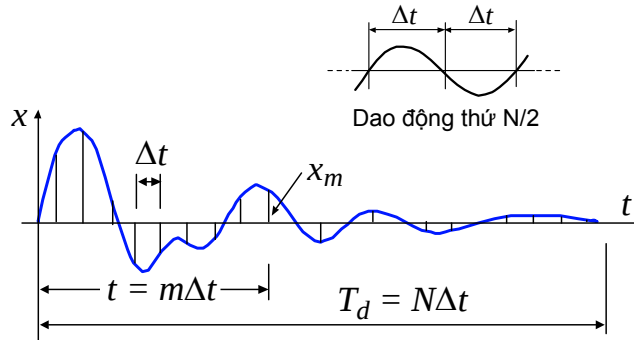
3.2 Chuỗi gần đúng Fourier

Trong phương trình (2) nếu T_d là ký hiệu khoảng thời gian ảnh hưởng, như vậy thời gian t biến đổi từ 0 đến T_d . Ta chia khoảng thời gian T_d thành N khoảng nhỏ bằng nhau Δt với điểm bắt đầu ký hiệu là 0 và điểm kết thúc là N . Như vậy tổng cộng ta có $N+1$ điểm trên trục thời gian và tại mỗi điểm có giá trị thời gian là $t = m\Delta t$ với $\Delta t = T_d/N$ và giá trị của hàm chuỗi tương ứng là x_m với $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$ (Hình 1). Như vậy phương trình chuỗi Fourier ở (2) và các hệ số ở (3) được viết gần đúng cho điểm thứ m có thời gian $t = m\Delta t$ như sau:

$$x_m = \sum_{k=0}^{N/2} \left[A_k \cos \frac{2\pi km}{N} + B_k \sin \frac{2\pi km}{N} \right] \quad (9)$$

$$A_k = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \cos \frac{2\pi km}{N} ; B_k = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \sin \frac{2\pi km}{N} \quad (10)$$

trong đó $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$ và $k = 0, 1, 2, \dots, N/2$.



Hình 1. Chuỗi gần đúng x_m

Trong phương trình (9), khi $k = 0$ ta có $A_0 \cos 2\pi km/N = A_0$ và $B_0 \sin 2\pi km/N = 0$, có nghĩa là không có dao động khi $k = 0$ và giá trị của x_m tại mọi điểm được tính tiến một khoảng bằng A_0 . Khi $k = N/2$ ta có $B_{N/2} \sin \pi m = 0$ và $A_{N/2} \cos 2\pi(N/2)m/N \neq 0$.

Phương trình (9) có thể được viết gần đúng theo thời gian như sau:

$$\tilde{x}(t) = \sum_{k=0}^{N/2} \left[A_k \cos \frac{2\pi kt}{N\Delta t} + B_k \sin \frac{2\pi kt}{N\Delta t} \right] \quad (11)$$

Trong phương trình (11), tần số và chu kỳ dao động của thành phần thứ k là:

$$f_k = \frac{k}{T_d} = \frac{k}{N\Delta t} ; \quad T_k = \frac{1}{f_k} = \frac{T_d}{k} \quad (12)$$

với $k = 1, 2, \dots, N/2$. Tần số dao động thứ nhất là $f_1 = 1/(N\Delta t)$ và chu kỳ tương ứng là $T_1 = T_d = N\Delta t$ (Hình 1). Tần số của thành phần dao động bậc cao nhất là $f_{N/2} = 1/(2\Delta t)$ và chu kỳ tương ứng là $T_{N/2} = 2\Delta t$ (Hình 1). Điều này có nghĩa là những thành phần dao động bậc cao hơn $N/2$ thì không được kể đến trong chuỗi gần đúng (9) và (11). Trong thực hành tính toán đối với các kết cấu công trình dân dụng, giá trị của Δt thường được lấy bằng 0,01 giây, tương ứng với tần số $f_{N/2} = 50$ Hz và chu kỳ $T_{N/2} = 0,02$ giây. Có thể nói những giá trị tần số dao động lớn hơn khoảng 50 Hz hay chu kỳ dao động nhỏ hơn khoảng 0,02 giây thực tế không ảnh hưởng đến kết cấu công trình và các thiết bị máy móc đặt trong công trình. Phổ biên độ Fourier là quan hệ giữa tần số f_k hay chu kỳ T_k được định nghĩa ở (12) và biên độ X_k được xác định theo (5) trong đó hệ số A_k và B_k được xác định theo (10). Tương tự phổ pha dao động Fourier là quan hệ giữa f_k và góc pha ϕ_k được xác định theo (6). Các đường phổ Fourier là cơ sở để đánh giá phạm vi có biên độ dao động và pha dao động trội của chuỗi x_m , hay cụ thể là của băng gia tốc nền được sử dụng trong phân tích tính toán kết cấu chịu động đất.

3.3 Chuỗi số phức Fourier

Trong tính toán, việc biểu diễn các hàm số dưới dạng số phức thường đem lại nhiều thuận tiện. Công thức Euler biểu diễn về số phức như sau:

$$e^{\pm i\theta} = \cos \theta \pm i \sin \theta \quad (13)$$

$$\cos \theta = \frac{1}{2}(e^{i\theta} + e^{-i\theta}) ; \sin \theta = -\frac{1}{2}i(e^{i\theta} - e^{-i\theta}) \quad (14)$$

trong đó i là số ảo được định nghĩa là $i = \sqrt{-1}$ hay $i^2 = -1$. Thay $\theta = 2\pi km / N$ vào (14) rồi thế vào (9) và biến đổi ta được chuỗi gần đúng Fourier viết dưới dạng số phức như sau:

$$x_m = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} (A_k - iB_k) e^{i(2\pi km / N)} \quad (15)$$

với $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$ và $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$. Phương trình (15) được viết gọn lại như sau:

$$x_m = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{i(2\pi km / N)} \quad (16)$$

trong đó C_k được gọi là biên độ số phức Fourier:

$$C_k = \frac{A_k - iB_k}{2} \quad (17)$$

Trong phương trình (17), A_k là phần thực và B_k là phần ảo. Thay hệ số A_k và B_k ở (10) vào (17) rồi sử dụng công thức Euler (13) ta được:

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-i(2\pi km / N)} \quad (18)$$

KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ ỨNG DỤNG

với $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$. Khi $k = 0$ thì $C_0 = 0$. Hơn nữa, giá trị tuyệt đối của biên độ C_k đối xứng qua trục đi qua điểm $N/2$. Điểm này được gọi là điểm gấp (folding point) với $|C_{N-k}| = |C_k|$ trong đó $k = 1, 2, \dots, N/2$. Thay (8) vào (17) ta có:

$$C_k = \frac{1}{2} X_k (\cos \phi_k + i \sin \phi_k) \quad (19)$$

với $k = 1, 2, \dots, N/2$. Phương trình (19) có thể được viết như sau:

$$C_k = \frac{F_k}{T_d} (\cos \phi_k + i \sin \phi_k) \quad (20)$$

trong đó F_k là biên độ phổ dao động Fourier:

$$F_k = \frac{T_d}{2} X_k = \frac{N \Delta t}{2} X_k \quad (21)$$

Trung bình của tổng bình phương các giá trị x_m được gọi là năng lượng trung bình của chuỗi. Từ đó, định lý Parseval được viết như sau:

$$\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 = \sum_{k=0}^{N-1} |C_k|^2 \quad (22)$$

trong đó giá trị tuyệt đối của biên độ phổ số phức:

$$|C_k| = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} = \frac{F_k}{T_d} \quad (23)$$

Sử dụng tính chất đối xứng qua điểm gấp tại $k = N/2$ ta có:

$$\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 = |C_0|^2 + 2 \sum_{k=1}^{N/2-1} |C_k|^2 + |C_{N/2}|^2 \quad (24)$$

Thay $T_d = N \Delta t$ vào (24) ta được phương trình:

$$\sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 \Delta t = T_d |C_0|^2 + 2 \sum_{k=1}^{N/2-1} (T_d |C_k|^2) + T_d |C_{N/2}|^2 \quad (25)$$

Phổ năng lượng là quan hệ giữa vế bên phải của (25) và tần số dao động f_k (Hz) hoặc tần số góc ω_k với

$$f_k = k \Delta f ; \quad \omega_k = 2 \pi k \Delta f ; \quad \Delta f = \frac{1}{N \Delta t} \quad (26)$$

với $k = 1, 2, \dots, N/2$.

3.4 Phương pháp biến đổi nhanh chuỗi Fourier

Để tính các hệ số Fourier C_k ở (17) với $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ từ hàm x_m ta cần phải thực hiện N^2 phép tính. Tương tự để biến đổi ngược C_k thành x_m ở (16) ta cũng cần thực hiện N^2 phép

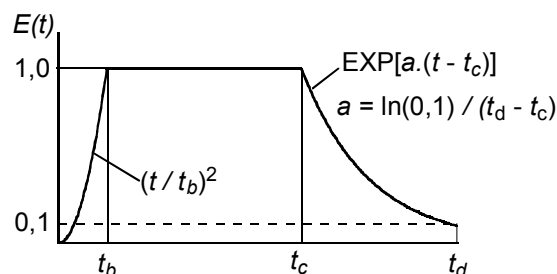
tính. Như vậy khối lượng và thời gian tính toán yêu cầu rất lớn, đặc biệt khi số điểm phân chia N càng lớn. Để giảm thời gian tính toán, Cooley và Tukey [13] đã thành công trong việc phát triển một phương pháp để biến đổi nhanh chuỗi Fourier (Fast Fourier Transform - FFT). Theo phương pháp này chỉ cần thực hiện $\log_2 N$ phép tính lặp để sắp xếp các số liệu tính toán theo thứ tự chẵn hay lẻ và cuối cùng chỉ cần thực hiện các phép tính cộng đơn giản. Tổng cộng khối lượng phép tính là $N \log_2 N$, bằng khoảng 0,15% đến 0,3% so với phương pháp tính toán thông thường. Chú ý, để áp dụng phương pháp này được hiệu quả thì giá trị N yêu cầu lấy bằng lũy thừa của 2, chẳng hạn là $2^{12} = 4096$ hay $2^{13} = 8192$. Có thể thêm vào phía sau dãy số các giá trị bằng không để đảm bảo điều kiện trên.

4. Chương trình tạo băng gia tốc nền

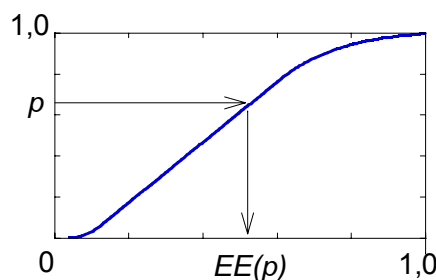
Sử dụng ngôn ngữ lập trình Fortran, tác giả tiến hành xây dựng chương trình tạo băng gia tốc nền từ phổ phản ứng gia tốc đàn hồi được qui định trong tiêu chuẩn thiết kế TCXDVN 375:2006 [1] sử dụng chuỗi gần đúng Fourier. Chương trình tạo giả băng gia tốc nền có tên GEMA và gồm các bước chính sau:

Bước 1: Xác định đường phổ phản ứng gia tốc đàn hồi S_e với hệ số cản nhớt $\xi = 5\%$ cho vị trí xây dựng công trình theo TCXDVN 375:2006, được gọi là đường phổ mục tiêu (target spectrum). Đường phổ mục tiêu có thể sử dụng đường phổ phản ứng vận tốc đàn hồi hoặc phổ năng lượng.

Bước 2: Giả thiết đường bao của băng gia tốc nền cần tạo $E(t)$ như ở Hình 2, trong đó thời gian t_b , t_c và t_d có thể được xác định phụ thuộc vào độ lớn của động đất và khoảng cách từ vị trí khảo sát đến chấn tâm hay đến vết đứt gãy [10]. Đường bao $E(t)$ cũng có thể được giả thiết là một hàm mũ trong toàn khoảng thời gian từ 0 đến t_d [14].



Hình 2. Đường bao của băng gia tốc nền nhân tạo



Hình 3. Đường phân bố xác suất tích lũy của góc lệch pha dao động

Bước 3: Giả thiết hình dạng phân bố của đường bao góc lệch pha dao động $\Delta\phi_k$ giống với đường bao của băng gia tốc nền được giả thiết ở Bước 2, vì theo kết quả phân tích đối với

KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ ỨNG DỤNG

các băng gia tốc nền thực đã chỉ ra rằng hình dạng của hai đường bao này thường khá sát nhau [10,11]. Tiếp theo, xác định đường phân bố xác suất tích lũy $EE(t)$ đối với góc lệch pha dao động với giá trị lớn nhất của $EE(t)$ được qui bằng đơn vị, như vậy $EE(t)$ có giá trị từ 0 đến 1 (Hình 3). Từ đó, xác định góc lệch pha $\Delta\phi_k$ dựa theo biến số xác suất ngẫu nhiên phân bố đều trong khoảng (0, 1) và xác định góc pha có giá trị trong khoảng $(0, \pm 2\pi)$ như sau:

$$\phi_{k+1} = \phi_k + \Delta\phi_k ; \Delta\phi_k = 2\pi EE(p) \quad (27)$$

với $k = 0, 1, 2, \dots N/2-1$. Có thể sử dụng góc lệch pha hay góc pha của các sóng động đất thực khi có sẵn các dữ liệu phù hợp.

Bước 4: Xác định hệ số phức Fourier theo (20) với biên độ phổ F_k là tung độ phổ phản ứng gia tốc đàn hồi thiết kế $S_{e,k}$ xác định ở Bước 1:

$$C_k = \frac{S_{e,k}}{T_d} (\cos \phi_k + i \sin \phi_k) \quad (28)$$

trong đó $k = 1, 2, \dots N/2$ và $T_d = N\Delta t$. Do phổ phản ứng gia tốc được qui định trong tiêu chuẩn thiết kế là trơn tru nhằm mô tả các tác động động đất lớn nhất có thể lên kết cấu công trình trong toàn bộ phạm vi chu kỳ dao động xem xét nên các băng gia tốc nền nhân tạo có đường phổ mục tiêu là phổ phản ứng đàn hồi $S_{e,k}$ thường có xu hướng làm tăng năng lượng tác động lên công trình (xác định theo (25)) so với từng trường hợp băng gia tốc nền thực riêng rẽ. Điều này là do phổ phản ứng của băng gia tốc nền thực chỉ xuất hiện điểm cực đại ở một vài vị trí nhất định. Tuy nhiên, nếu xét xác suất với nhiều băng gia tốc nền có các đặc trưng khác nhau có thể xuất hiện tại vị trí xây dựng thì giả thiết sử dụng ở (28) có thể phù hợp hơn trong thực hành thiết kế kết cấu công trình.

Bước 5: Sử dụng phương pháp FFT để biến đổi ngược hệ số Fourier thành chuỗi Fourier:

$$x_m = \sum_{k=0}^{N/2} [C_k \cos(k\omega t + \phi_k)] \quad (29)$$

với $m = 0, 1, 2, \dots N-1$.

Bước 6: Xác định băng vận tốc và băng chuyển vị nền từ chuỗi x_m (băng gia tốc nền) nhận được ở Bước 5, chẳng hạn theo phương pháp giả thiết gia tốc là tuyến tính trong khoảng thời gian Δt và sử dụng chuỗi gần đúng Taylor. Điều chỉnh lại các giá trị của x_m để thỏa mãn các điều kiện biên của băng vận tốc và băng chuyển vị tương ứng.

Bước 7: Từ băng gia tốc nền x_m sau khi được điều chỉnh ở trên, sử dụng phương pháp FFT để tính hệ số phức Fourier C_k và đồng thời xác định đường phổ phản ứng gia tốc tương ứng $\tilde{S}_e$ với hệ số cản nhớt $\xi = 5\%$.

Bước 8: Tính tỷ số sai lệch giữa các giá trị phổ phản ứng gia tốc trước và sau khi được điều chỉnh tương ứng ở Bước 1 và Bước 6: $R_k = S_{e,k}/\tilde{S}_{e,k}$. Đồng thời điều chỉnh biên độ Fourier tương ứng cho từng điểm: $\tilde{C}_k = C_k \times R_k$ trong đó C_k được xác định ở Bước 7.

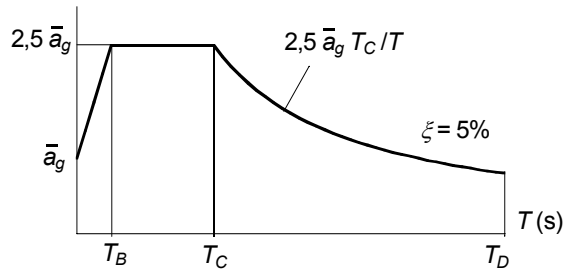
Bước 9: Kiểm tra mức độ hội tụ so với đường phổ mục tiêu:

$$err = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N/2} (1 - R_k)^2}{N/2}} \leq 5\% \quad (30)$$

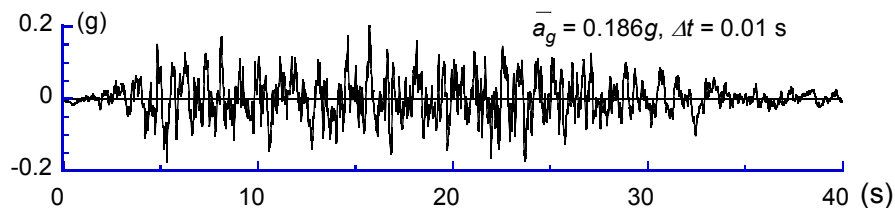
Nếu điều kiện (30) không thỏa mãn, cần quay lại Bước 5 để thực hiện phép tính lặp đến khi điều kiện (30) được thỏa mãn và tương ứng xác định được bằng gia tốc nền x_m cần tạo.

5. Kết quả tính toán minh họa

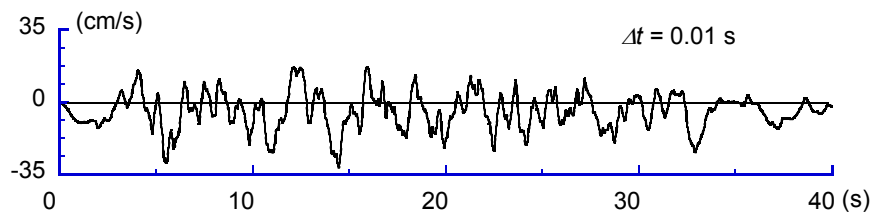
Ví dụ minh họa sau sẽ cho thấy rõ hơn mục đích sử dụng của chương trình GEMA trong điều kiện ở Hà Nội. Vị trí xây dựng công trình xét đến có các đặc điểm sau [1]: đỉnh gia tốc nền tham chiếu trên nền đá gốc (loại A) $a_{gR} = 0,11g$ với $g = 980 \text{ cm/s}^2$ là gia tốc trọng trường; đặc điểm nền đất loại D với hệ số nền $S = 1,35$; các giá trị chu kỳ phổ gia tốc nền $T_B = 0,2$ giây và $T_C = 0,8$ giây; hệ số tầm quan trọng của công trình $\gamma_I = 1,25$. Như vậy, đỉnh gia tốc nền thiết kế là $\bar{a}_g = \gamma_I a_{gR} S = 0.186g$. Hình 4 mô tả đường phổ phản ứng gia tốc đàn hồi của hệ một bậc tự do được xây dựng theo tiêu chuẩn thiết kế [1]. Để đơn giản, đường phổ phản ứng trong khoảng T_C và T_D được coi là tỷ lệ nghịch bậc nhất với chu kỳ dao động T . Phạm vi chu kỳ phổ dao động được xem xét từ 0,02 đến 5 giây, hay phạm vi tần số dao động là 0,2 đến 50 Hz.



Hình 4. Đường phổ phản ứng gia tốc đàn hồi thiết kế



a) Bảng gia tốc nền nhân tạo

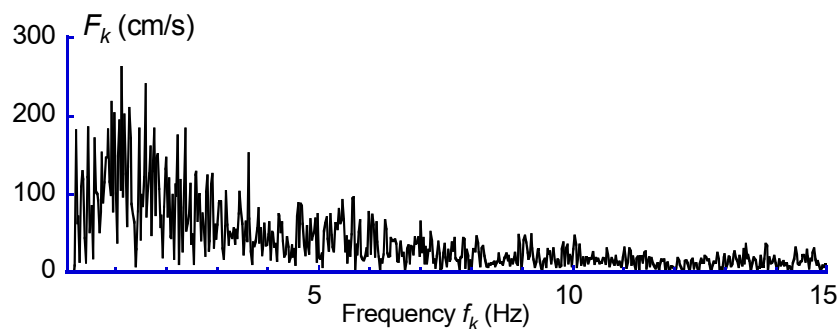


b) Bảng vận tốc nền nhân tạo

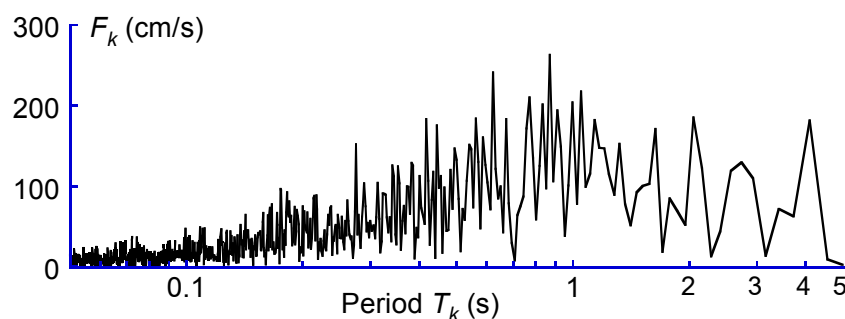
Hình 5. Ví dụ bảng gia tốc và bảng vận tốc nền nhân tạo

KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ ỨNG DỤNG

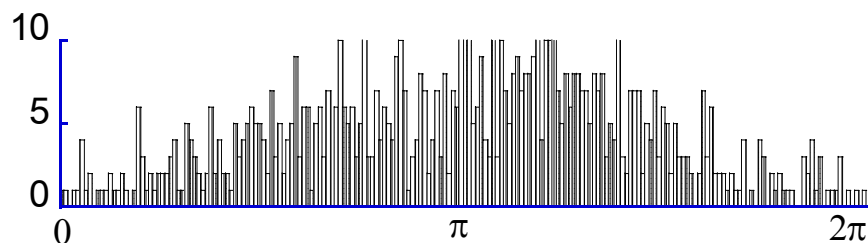
Đường bao của băng gia tốc nền cần tạo được giả thiết như ở Hình 2 với các giá trị thời gian $t_b = 5$, $t_c = 25$ và $t_d = 40,96$ giây ($N = 4096$, $\Delta t = 0,01$ giây). Khoảng thời gian $t_d - t_b = 20$ giây lớn hơn giá trị nhỏ nhất (10 giây) được qui định trong tiêu chuẩn [1].



a) Phổ biên độ dao động (tần số)



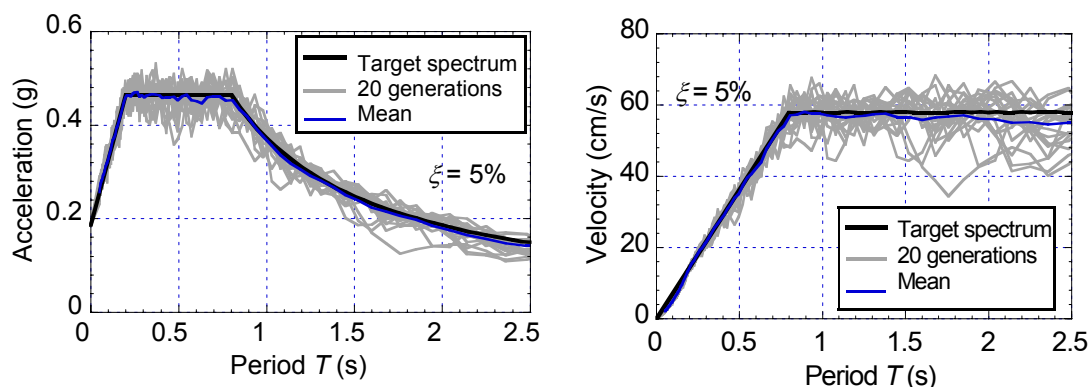
b) Phổ biên độ dao động (chu kỳ theo tỷ lệ logarit)



c) Góc lệch pha dao động $\Delta\phi_k$ (rad)

Hình 6. Phổ biên độ và góc lệch pha dao động Fourier của một băng gia tốc nền nhân tạo

Sử dụng chương trình GEMA, Hình 5 chỉ ra kết quả băng gia tốc nền và băng vận tốc nền được tạo giả. Có thể nhận thấy băng gia tốc nền nhân tạo có số lượng vòng lặp khá lớn và như vậy chứa đựng nội dung năng lượng tích lũy lớn hơn so với các băng gia tốc nền thực. Điều này là do các băng gia tốc nền nhân tạo phải đảm bảo về biên độ phổ phản ứng sát với đường phổ mục tiêu trong toàn bộ phạm vi tần số dao động được xem xét. Hình 6 biểu thị kết quả của phổ biên độ dao động Fourier, F_k , (theo tần số và chu kỳ dao động) và góc lệch pha dao động Fourier, $\Delta\phi_k$, tương ứng với trường hợp băng gia tốc nền nhân tạo ở Hình 5.



a) Phổ phản ứng gia tốc đàn hồi

b) Phổ phản ứng vận tốc đàn hồi

Hình 7. Phổ phản ứng gia tốc và vận tốc đàn hồi của 20 băng gia tốc nền nhân tạo

Hình 7 chỉ ra kết quả của các đường phổ phản ứng gia tốc và phổ phản ứng vận tốc đàn hồi với hệ số cản nhớt $\xi = 5\%$ được tính theo chương trình GEMA, trong đó các đường nét nhạt là các giá trị của 20 băng gia tốc nền nhân tạo và các đường nét mảnh đậm là giá trị trung bình của chúng. Kết quả đã chỉ ra rằng các đường phổ phản ứng của các băng gia tốc nền nhân tạo khá sát so với đường phổ mục tiêu (đường nét đậm trơn) được qui định trong tiêu chuẩn thiết kế, với tổng sai số trong toàn khoảng chu kỳ xem xét là nhỏ hơn 5%. Nếu số lượng các băng gia tốc nền nhân tạo giả càng nhiều thì giá trị trung bình của chúng càng sát với đường mục tiêu. Tuy nhiên điều này sẽ làm tăng đáng kể khối lượng và thời gian tính toán khi sử dụng phương pháp phân tích động ứng xử phi tuyến theo thời gian của hệ kết cấu. Kết quả khảo sát đã chỉ ra rằng nên sử dụng số lượng băng gia tốc nền nhân tạo từ 10 đến 20 là có thể đảm bảo cho kết quả phân tích ứng xử chấp nhận được.

6. Kết luận

Phương pháp tạo giả băng gia tốc nền từ phổ phản ứng gia tốc đàn hồi được qui định trong tiêu chuẩn thiết kế TCXDVN 375:2006 [1] sử dụng kỹ thuật biến đổi chuỗi gần đúng Fourier với góc pha dao động biến đổi khác nhau đã được trình bày một cách hệ thống và được thiết lập thành chương trình tính GEMA. Các băng gia tốc nền được tạo giả nhằm cung cấp dữ liệu đầu vào cho phân tích động phi tuyến theo thời gian đối với kết cấu công trình. Điều này là khá cần thiết trong điều kiện hiện nay còn thiếu các dữ liệu ghi chép về động đất. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng các băng gia tốc nền nhân tạo sử dụng hiệu quả trong phân tích kết cấu động phi tuyến theo thời gian và đã được trình bày trong một số nghiên cứu của tác giả [5,6,7].

Tài liệu tham khảo

1. TCXDVN 375:2006, *Thiết kế công trình chịu động đất*, Hà Nội.
2. EN 1998-1:2004, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*, Part 1.
3. Nguyễn Lê Ninh (2007), *Động đất và thiết kế công trình chịu động đất*, Nxb Xây dựng, Hà Nội.
4. Nguyễn Lê Ninh (2011), *Cơ sở lý thuyết tính toán công trình chịu động đất*, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
5. Dinh Van Thuat (2011), "Story strength demands of irregular frame buildings under strong earthquakes", *Journal of The Structural Design of Tall and Special Buildings*, John Wiley & Sons, USA, first published online: 6/2011.

6. Đinh Văn Thuật (2010), “Đánh giá chuyển vị ngang phi tuyến của kết cấu nhà nhiều tầng chịu động đất dựa theo phân tích tĩnh phi tuyến và phổ thiết kế trong TCXDVN 375:2006”, *Tạp chí KHCN Xây dựng, ĐHXD*, số 8, trang 5-15.
7. Đinh Văn Thuật (2011), “Phân tích ứng xử phi tuyến của khung nhà nhiều tầng được thiết kế theo Snip II-7-81 chịu các băng gia tốc nền nhân tạo”, *Tạp chí Kết cấu Công nghệ Xây dựng*, số 7, trang 31-41.
8. Dinh Van Thuat, et al. (2000), “Seismic evaluation of RC frame and wall structures predicting response displacement”, *Proc. JCI*, 22(3), pp. 1411-1416.
9. Nguyễn Đăng Bích, Nguyễn T. Đệ, Nguyễn Đình Xuyên, Phạm Đình Nguyên (1/2005), “Phổ phản ứng gia tốc chuẩn kiến nghị dùng trong thiết kế kháng chấn ở Việt Nam”, *Tạp chí KHCN Xây dựng*, IBST.
10. Osaki Y. (1979), “On the significance of phrase content in earthquake ground motion”, *EESD*, Vol.7.
11. Osaki Y. (1994), *Introduction to spectral analysis of earthquake motions*, Tokyo.
12. Umemura H., Dinh Van Thuat, Ichinose T. (2001), “Generation of ground motions with identical spectral amplitude and shape envelope”, *Proc. AIJ*, 23339, pp. 677-678.
13. Cooley J.W., Tukey J.W. (1965), “An Algorithm for the machine calculation of complex Fourier series”, *Mathematics of Computation*, Vol. 19.
14. Jennings P.C., Housner G.W., Tsai N.C. (1969), “Simulated earthquake motions for design purposes”, *4th WCEE*, Santiago.