

# ỨNG DỤNG THIẾT BỊ CÓ ĐỘ CỨNG ÂM TRONG THIẾT KẾ CHỐNG ĐỘNG ĐẤT CHO CÔNG TRÌNH

## APPLICATION OF NEGATIVE STIFFNESS DEVICE FOR SEISMIC RESISTANT DESIGN OF BUILDINGS

ThS. NGUYỄN THÀNH ĐỒNG<sup>1</sup>, TS. NGUYỄN XUÂN ĐẠI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Viện Kỹ thuật Công binh

<sup>2</sup>Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: thanhdongm2m@gmail.com; +84976016623

**Tóm tắt:** Thiết bị có độ ứng âm (NSD) là cơ cấu giảm chấn thụ động, dựa vào sự dịch chuyển tương đối giữa các khung truyền lực và lực nén trước trong các lò xo cấu thành để phát sinh độ cứng âm làm giảm nội lực và chuyển vị của kết cấu. Bài báo trình bày nguyên lý cấu tạo và hoạt động của thiết bị, nghiên cứu khả năng ứng dụng trong thiết kế kháng chấn cho công trình. Trong nội dung ví dụ tính toán, hệ kết cấu khung phẳng bê tông cốt thép được sử dụng để phân tích nhằm khảo sát hiệu quả giảm chấn của thiết bị NSD. Hệ kết cấu được mô hình hóa và phân tích bằng phương pháp phi tuyến theo lịch sử thời gian bằng phần mềm SAP2000. Kết quả cho thấy, thiết bị NSD có hiệu quả tốt trong việc giảm lực cắt đáy, chuyển vị cho kết cấu.

**Từ khóa:** Thiết kế kháng chấn, thiết bị có độ cứng âm, thiết bị giảm chấn thụ động, phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian.

**Abstract:** A negative stiffness device (NSD) is a passive damper system that is based on the relative movement between the transmission frames and the pre-compression in the springs to generate negative stiffness to reduce the internal force and displacement of structures. The paper presents the device's configuration and operation principle and evaluates its applicabilities for the seismic-resistant design of structures. In the numerical example, a 2D reinforced concrete frame structure is performed to investigate the damping effects of the NSD device. The structure is modelled and analyzed by nonlinear time-history analysis using SAP2000 software. The obtained results show that the NSD device offers high efficiency in reducing base shear force and lateral displacement for structures.

**Keywords:** Seismic resistant design, negative stiffness device, passive damper devices, nonlinear time-history analysis.

### 1. Mở đầu

Động đất là hiện tượng dịch chuyển rất mạnh của bề mặt trái đất gây ra bởi sự giải phóng năng lượng đột ngột phía sâu trong vỏ quả đất (do hoạt động kiến tạo, nổ hạt nhân,...) và hình thành sóng lan truyền đến các công trình trên bề mặt, làm cho công trình chuyển động và gây ra lực quán tính trong kết cấu.

Động đất được xem là một trong những hiện tượng thiên nhiên gây nhiều thiệt hại nhất về tính mạng con người và của cải vật chất xã hội. Thực tiễn lịch sử nhân loại đã chứng kiến sự phá hoại nghiêm trọng của các công trình xây dựng khi chịu tác động của động đất, từ việc hư hại cần phải sửa chữa đến sụp đổ hoàn toàn. Do đó, việc tính toán thiết kế công trình chịu động đất là yêu cầu cần thiết, đặc biệt đối với các công trình quan trọng, công trình mang tính biểu tượng lịch sử, văn hóa,...

Trong các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành [1-4], phương pháp thiết kế kháng chấn được sử dụng phổ biến là thiết kế theo khả năng (Capacity design method). Nguyên lý của phương pháp này là thiết kế chống lại tác động địa chấn dựa vào việc giảm cường độ vật liệu và có kể đến hệ số ảnh hưởng của biến dạng dẻo (ductility ratio) trong tính toán nhằm giảm lực tác động lên kết cấu. Do đó, hệ kết cấu làm việc với độ bền thấp hơn các yêu cầu về đàn hồi. Cụ thể, phương pháp này tính toán đến các trạng thái giới hạn của vật liệu kết cấu, theo đó, khi công trình chịu tác động của động đất mạnh, ứng xử của kết cấu cho phép hình thành các biến dạng ngoài giai đoạn đàn hồi tại một số vị trí (thường được chỉ định sẵn). Trong trường hợp lý tưởng, cách làm này đảm bảo an toàn cho con người khi xảy ra động đất theo thiết kế. Tuy nhiên, việc hình thành các biến dạng dẻo trong kết cấu có thể dẫn đến các phá hoại do biến dạng quá mức, và/hoặc

biến dạng không thể hồi phục khi chịu tác động lớn. Ngoài ra, yêu cầu về việc phải tính toán chi tiết vị trí/bộ phận hình thành các biến dạng dẻo của kết cấu cũng gây nhiều khó khăn cho người thiết kế.

Các giải pháp thiết kế kháng chấn hiện đại ngày nay quan tâm đến các thiết bị phụ trợ, có khả năng làm cách ly, tiêu tán năng lượng dao động, giảm tác động của động đất lên hệ kết cấu chính. Hầu hết các thiết bị đều có những hiệu quả quan trọng trong việc giảm lực cắt đáy và/hoặc chuyển vị của kết cấu công trình, điển hình được biết đến như gối cách chấn [1, 5-8], thiết bị giảm chấn khối lượng (TMD) [9-11].

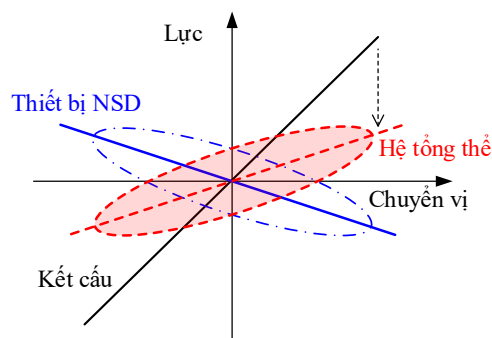
Một cách tiếp cận khác là sử dụng bộ thiết bị có độ cứng âm (NSD – Negative Stiffness Damper), hoạt động theo cơ chế bị động, nhằm tăng các nguồn lực hỗ trợ chuyển động, chống lại các tác động mạnh từ động đất. Dưới tác động của các tải trọng không phải động đất (tác động nhỏ) thiết bị này hầu như không gây ảnh hưởng đến kết cấu. Tuy nhiên, dưới các tác động mạnh, thiết bị sinh ra độ cứng âm chống lại các chuyển động, kết quả là nội lực và chuyển vị trong kết cấu được giảm đáng kể, kết cấu được đảm bảo an toàn. Thiết bị này có ưu điểm là cấu tạo gồm các cơ cấu hoạt động theo nguyên lý phát sinh các tính năng từ sự dịch chuyển tương đối giữa các bộ phận, do đó dễ chế tạo với chi phí thấp nhưng độ bền cao do cơ cấu làm việc ở trạng thái đàn hồi. Tại Việt Nam, các nghiên cứu về thiết bị có độ cứng âm còn (rất) hạn chế, do đó việc tìm hiểu nguyên lý hoạt động và hiệu quả của thiết bị trong thiết kế kháng chấn cho kết cấu công trình có ý nghĩa thực tiễn.

Mục tiêu của bài báo nhằm đánh giá hiệu quả của thiết bị NSD trong ứng dụng thiết kế kháng chấn cho kết cấu công trình. Trước hết, cấu tạo và nguyên lý hoạt động của thiết bị NSD được trình bày một cách khái quát. Mô hình ứng xử của thiết bị được thiết lập bằng các phương trình giải tích thông qua tính toán cân bằng lực bên trong thiết bị. Mô hình khung phẳng bê tông cốt thép điển hình được sử dụng để khảo sát hiệu quả của thiết bị trong tính toán giảm chấn cho kết cấu với điều kiện động đất tại Sơn La – Việt Nam. Các giản đồ gia tốc động đất được lựa chọn và hiệu chỉnh cho phù hợp với điều kiện động đất tại khu vực được xem xét phân tích.

Các nghiên cứu khảo sát được phân tích bởi phần mềm SAP2000, bằng phương pháp phi tuyến theo lịch sử thời gian. Các kết quả lực cắt tại chân cột và chuyển vị tại đỉnh kết cấu, là tham số đáp ứng động đất tiêu biểu của kết cấu, được sử dụng để đánh giá kết quả.

## 2. Cấu tạo và ứng xử của thiết bị NSD

Khái niệm về độ cứng âm được giới thiệu lần đầu tiên bởi Molyneaux [12] trong các đề xuất về hệ thống cách ly rung động cho các thiết bị nhỏ. Ý tưởng này sau đó đã được thực hiện trong việc phát triển các hệ thống cách ly rung động có hiệu quả cao [13-18]. Nguyên lý tác dụng của thiết bị NSD được mô tả như Hình 1. Theo đó, dưới tác dụng của chuyển vị, thiết bị NSD phát sinh ra các lực trái dấu với lực đàn hồi xuất hiện trong kết cấu, kết quả là sự tổng hợp lực trong hệ kết cấu tổng thể giảm xuống đáng kể. Ngoài ra, các cơ cấu tiêu tán năng lượng (thiết bị cản nhớt) có thể được tích hợp vào thiết bị NSD nhằm tăng khả năng tiêu tán năng lượng dao động của hệ kết cấu, giúp nâng cao hiệu quả giảm chấn.



Hình 1. Mô hình ứng xử của thiết bị NSD

Việc áp dụng khái niệm độ cứng âm cho các kết cấu lớn như tòa nhà, cầu,... đòi hỏi phải có những tính toán để giảm nhu cầu về việc gia tải trước cho các bộ phận trong cơ cấu và tổ hợp thiết bị trong một hệ thống mà không có sự gia tăng bất kỳ tải trọng nào lên cấu trúc để đạt được mục tiêu giảm chấn. Những yêu cầu này đã dẫn đến sự phát triển của thiết bị có độ cứng âm ứng dụng trong thiết kế kháng chấn với các thành phần và đặc điểm chính như sau:

- Lò xo chịu nén để tạo ra lực theo hướng chuyển động (do đó, phát sinh độ cứng âm). Độ lớn của lực nén giảm khi độ dịch chuyển tăng để đảm

bảo tính ổn định của hệ trong trường hợp có dịch chuyển lớn;

- Hệ giá đỡ (khung trên, khung dưới) hình chữ V để chống lại lực nén của lò xo và ngăn sự tác động của thành phần tải trọng thẳng đứng của thiết bị lên kết cấu;

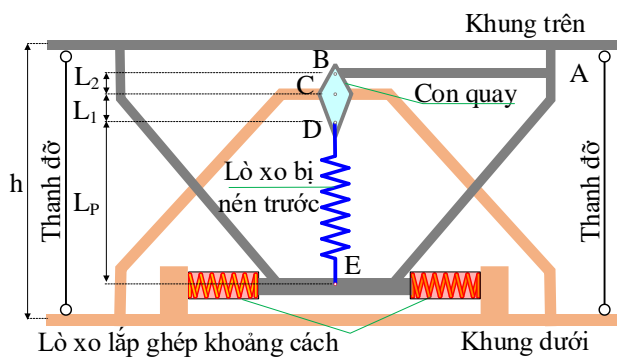
- Bộ cơ cấu giá đỡ nhằm giảm các yêu cầu về việc gia tải trước nhằm tạo ra hệ thống có tính ứng dụng phù hợp với thực tế;

- Hệ thống cung cấp độ cứng dương đến giá trị chuyển vị được dự kiến sẵn (nhỏ hơn chuyển vị

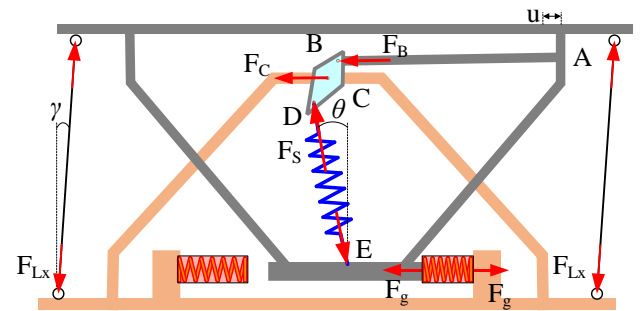
thực tế của kết cấu), để việc tổ hợp độ cứng dương và độ cứng âm của thiết bị trong phạm vi này có kết quả xấp xỉ bằng 0. Theo đó, hệ thống cung cấp độ cứng dương là cần thiết, nhằm loại bỏ ảnh hưởng của độ cứng âm trong phạm vi chuyển vị được dự kiến, và được mô phỏng dưới dạng ứng xử song tuyến tính;

- Thiết bị cản nhớt (có thể có) được lắp song song với thiết bị có độ cứng âm nhằm tăng khả năng tiêu tán năng lượng của thiết bị.

Cấu tạo của thiết bị NSD điển hình được minh họa trong hình 2.



Hình 2. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động của thiết bị NSD



Ứng xử của thiết bị NSD được hình thành bởi chuyển động của con quay và lò xo DE được gia tải trước với lực nén là  $P_{in}$  và độ cứng  $K_S$ , thông qua các điểm chuyển động là A, B, C, D, E.

Xem xét chuyển động của thiết bị NSD như sau: Khung trên dịch chuyển sang bên phải một đoạn  $u$  như hình vẽ. Dịch chuyển này, thông qua thanh AB làm cho con quay bị xoay, điểm B trên con quay dịch chuyển sang phải một đoạn  $u$ . Mặt khác, lò xo DE được kết nối với khung phía trên tại E, cũng bị dịch chuyển sang phải đoạn bằng  $u$ . Ta có:

$$x_B = u; \quad x_E = u \quad (1)$$

Từ mối quan hệ hình học, dễ dàng xác định được điểm D trên con quay dịch chuyển sang trái một đoạn là:

$$x_D = u \frac{L_1}{L_2} \quad (2)$$

Do hoạt động xoay của con quay, điểm B dịch chuyển xuống một đoạn là:

$$y_B = L_2 - \sqrt{L_2^2 - u^2} \quad (3)$$

Tương tự, điểm D dịch chuyển lên một đoạn là:

$$y_D = L_1 - \sqrt{L_1^2 - \left(u \frac{L_1}{L_2}\right)^2} = L_1 - L_1 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{L_2}\right)^2} \quad (4)$$

Khoảng cách theo phương ngang giữa hai điểm D và E khi đó là:

$$x_{DE} = x_D + x_E = u \left( \frac{L_1}{L_2} + 1 \right) \quad (5)$$

Khoảng cách theo phương đứng giữa hai điểm D và E là:

$$y_{DE} = L_p + y_D = L_p + L_1 - L_1 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{L_2}\right)^2} \quad (6)$$

Chiều dài của lò xo DE khi đó là :

$$L_S = \sqrt{\left( L_P + L_1 - L_1 \sqrt{1 - \left( \frac{u}{L_2} \right)^2} \right)^2 + \left[ u \left( \frac{L_1}{L_2} + 1 \right) \right]^2} \quad (7)$$

Do lò xo DE bị giãn 1 đoạn bằng  $(L_S - L_P)$ , lực đàn hồi trong lò xo DE khi đó được tính bằng:

$$F_S = P_{in} - K_S (L_S - L_P) \quad (8)$$

Xét cân bằng mô men tại C đối với con quay, ta có:

$$F_B (L_2 - y_B) = F_S \cos \theta \cdot x_D + F_S \sin \theta \cdot (L_1 - y_D) \quad (9)$$

Hợp lực theo phương ngang tại vị trí con quay ta có:  $F_C = F_B + F_S \sin \theta$  (10)

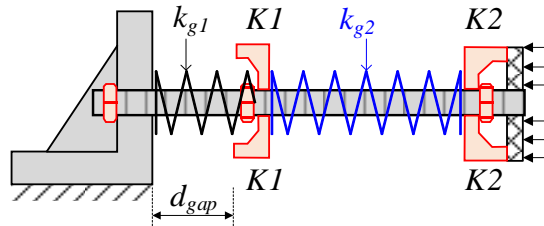
Tổng hợp lực tác dụng lên khung dưới theo phương ngang (dấu của các lực xét theo chiều của chuyển vị  $u$  được giả thiết ban đầu):

$$F_{NSD} = -F_C - 2F_{Lx} + F_g \quad (11)$$

trong đó,  $F_{Lx}$  là lực trong các thanh đỡ, xác định từ điều kiện cân bằng lực theo phương đứng của khung trên như sau:

$$2F_{Lx} = F_S \cos \theta \tan \gamma \approx F_S \cos \theta \frac{u}{h} \quad (12)$$

Trong phương trình (11),  $F_g$  là lực đàn hồi xuất hiện trong hệ thống lò xo lắp ghép khoảng cách, bộ phận được cấu tạo gồm 2 lò xo, lò xo  $k_{g1}$  được giữ bởi khóa K1 và giá cố định, lò xo  $k_{g2}$  được nén trước và giữ bởi 2 khóa K1-K2, ( $k_{g1} \gg k_{g2}$ ), như minh họa trong hình 3:



Hình 3. Cấu tạo bộ lò xo lắp ghép khoảng cách

Xét trường hợp khóa K2 dịch chuyển từ phải sang trái (nén) đoạn bằng  $u$ , lực đàn hồi do  $k_{g1}$  gây

ra trong hệ NSD do chuyển vị  $u$  của khung trên gây ra trong hệ được xác định theo biểu thức sau:

$$F_g = \begin{cases} k_{g1}u, & 0 \leq u \leq d_{gap} \\ k_{g1}d_{gap} + k_{g2}(u - d_{gap}), & u > d_{gap} \end{cases} \quad (13)$$

trong đó,  $d_{gap}$  là khoảng cách từ vị trí giá cố định đến khóa K1 như minh họa trên hình 3.

Thay các phương trình (8), (9), (10), và (12) vào phương trình (11), ta dễ dàng xác định được lực do hệ thống NSD tạo ra như sau:

$$F_{NSD} = - \left( \frac{P_{in} + K_S L_P}{L_S} - K_S \right) \left( \frac{L_1}{L_2} \right) \left( 2 + \frac{L_2}{L_1} + \frac{L_P + L_1}{\sqrt{L_2^2 - u^2}} \right) u + F_g \quad (14)$$

Bảng 1 trình bày các thông số của bộ thiết bị NSD điển hình, được nghiên cứu bởi Mathew, Qureshi and Jangid [15], có sự hiệu chỉnh thông số  $d_{gap}$  nhằm đảm

bảo tính thực tế trong tính toán chuyển vị cho kết cấu khung bê tông cốt thép để ứng dụng trong ví dụ phân tích kết cấu tại phần dưới đây.

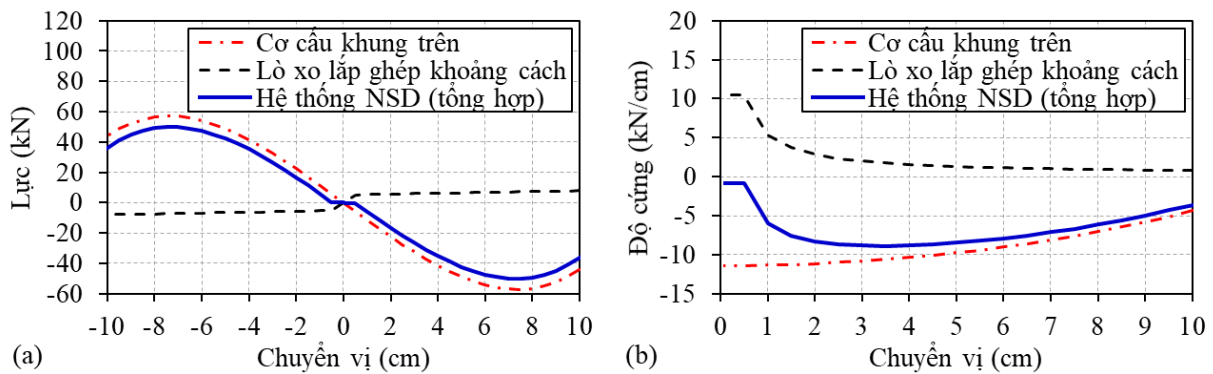
Bảng 1. Thông số cấu tạo của bộ thiết bị NSD điển hình [15])

| Thông số | Giá trị | Đơn vị |
|----------|---------|--------|
| $L_1$    | 0.5842  | m      |
| $L_2$    | 0.2921  | m      |

| Thông số  | Giá trị | Đơn vị |
|-----------|---------|--------|
| $L_s$     | 1.7526  | m      |
| $d_{gap}$ | 0.005   | m      |
| $k_{g1}$  | 1050.72 | kN     |
| $k_{g2}$  | 28.02   | kN     |
| $P_{in}$  | 95      | kN     |
| $K_s$     | 1474    | kN     |

Sử dụng các thông số cho trong bảng 1, từ các phương trình (13) và (14), mối quan hệ giữa lực và chuyển vị của thiết bị được tính toán và vẽ như đồ thị thể

hiện trong hình 4(a), trong đó, cơ cấu lò xo lắp ghép khoảng cách có mô hình ứng xử dạng song tuyến tính, cơ cấu khung trên có mô hình ứng xử dạng độ cứng âm.



Hình 4. Quan hệ lực-chuyển vị của thiết bị NSD (ví dụ phân tích)

Hình 4(b) thể hiện sự biến thiên của độ cứng của thiết bị theo hàm của chuyển vị, dễ dàng nhận thấy khi giá trị chuyển vị “u” nằm trong phạm vi “ $d_{gap}$ ” độ cứng của hệ thống lò xo lắp ghép khoảng cách có giá trị bằng (nhưng trái dấu) với độ cứng âm của cơ cấu khung trên, dẫn tới độ cứng của thiết bị gần như bằng “0”. Nguyên lý cơ học này có ý nghĩa rằng, với các giá trị chuyển vị nhỏ (do tác động của các lực không phải động đất), thiết bị không (hoặc rất ít) ảnh hưởng đến sự làm việc của kết cấu. Trong khi đó, dưới tác dụng mạnh (như động đất), các giá trị chuyển vị nằm ngoài phạm vi “ $d_{gap}$ ” thiết bị phát sinh độ cứng âm nhằm giảm lực theo phương ngang và chuyển vị cho công trình. Mặt khác, ở trạng thái này, hệ thống lò xo lắp ghép khoảng cách có độ cứng dương rất nhỏ ( $k_{g2}$ ) và ít tác động đến hiệu quả của độ cứng âm.

## 3. Ứng dụng giảm chấn cho công trình

Trong ví dụ phân tích dưới đây, thiết bị NSD được xem xét ứng dụng trong giảm chấn cho công trình trong điều kiện động đất tại Việt Nam thông qua phân tích số bằng phần mềm SAP2000.

### 3.1 Mô tả thông số kết cấu công trình

Như phân tích ở trên, nguyên lý hoạt động của thiết bị được xem xét trong mặt phẳng. Do đó, không mất tính tổng quát, xem xét ứng dụng thiết bị cho khung phẳng bê tông cốt thép gồm 3 nhịp 4 tầng như hình 6. Chiều cao tầng là 4,0m cho tầng 1

và 3,6m cho các tầng còn lại. Nhịp dầm được lựa chọn là 4m. Kích thước tiết diện của cột bằng 220mm x 220mm, của dầm bằng 220mm x 400mm. Kết cấu cột và dầm được làm bằng bê tông cấp độ bền B25 theo TCVN-5574:2018 [19]. Vị trí lắp đặt thiết bị được lựa chọn tại nhịp giữa, tầng 1 của khung kết cấu (hình 6).

Trong phân tích này, nhóm tác giả chỉ khảo sát hiệu quả của thiết bị trong việc giảm tác động của động đất lên kết cấu công trình mà không xét đến tác dụng của các tải trọng khác (như tải gió,...). Ngoài ra, khối lượng dao động của kết cấu được phần mềm tự động tính toán thông qua phân khai báo mô hình.

### 3.2 Gia tốc động đất

Xem xét kết cấu công trình đặt tại Sơn La – Việt Nam với điều kiện nền đất loại B, tỷ số cản 5%. Phổ phản ứng đàn hồi gia tốc động đất tại vị trí đặt công trình được tính toán theo TCVN-9386:2012 [4] và thể hiện như trong hình 5.

Trong phạm vi nghiên cứu này, thiết bị NSD được sử dụng có ứng xử phi tuyến, do đó phương pháp phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian được nhóm tác giả lựa chọn sử dụng để đảm bảo phân tích được đầy đủ trạng thái phi tuyến trong quá trình chịu lực. Để thực hiện mục tiêu nghiên cứu đó, các giản đồ gia tốc động đất (bản ghi gia tốc động đất theo thời gian) của các trận



động đất tại Kobe, Nhật Bản (16-01-1995) và tại Tây Bắc Trung Quốc (11-4-1997) được xem xét lựa chọn và hiệu chỉnh cho phù hợp bằng phương

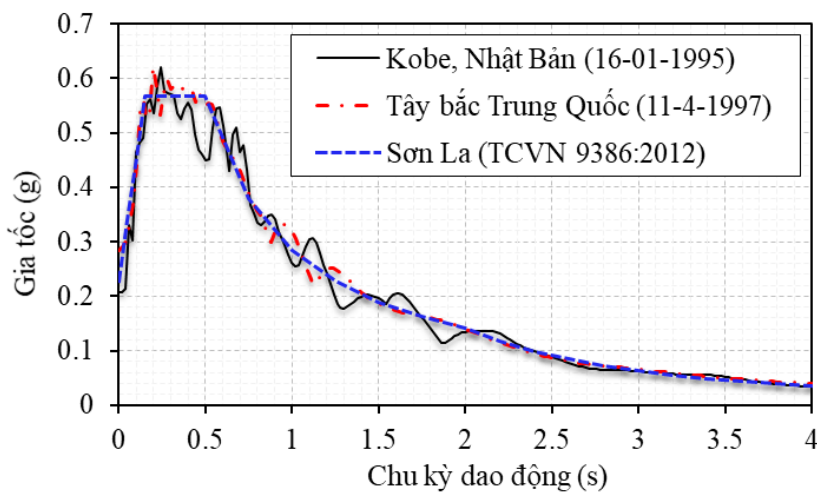
pháp do tác giả Nguyễn Xuân Đại [20] đã đề xuất. Thông số của các trận động đất được trình bày trong bảng 2.

**Bảng 2.** Thông số gia tốc động đất dùng trong phân tích

| STT | Động đất, ngày                | Trạm đo             | Mw  | R (km) | PGA (g) |
|-----|-------------------------------|---------------------|-----|--------|---------|
| EQ1 | Kobe, 16-01-1995              | Nishi-Akashi, Japan | 6.9 | 7.1    | 0.509   |
| EQ2 | Tây Bắc Trung Quốc, 11-4-1997 | Jiashi, China       | 6.1 | 27.7   | 0.3     |

Hình 5 trình bày phổ phản ứng đàn hồi gia tốc tại Sơn La, tính theo TCVN-9386:2012 [4] và phổ phản ứng gia tốc của các giản đồ gia tốc động đất đã được hiệu chỉnh. Như đồ thị hình vẽ, các giản đồ gia tốc động đất sau hiệu chỉnh có phổ phản ứng

gia tốc phù hợp tốt với phổ phản ứng đàn hồi gia tốc theo tiêu chuẩn (đáp ứng được nội dung khớp phổ phản ứng). Do đó, việc sử dụng các giản đồ gia tốc này trong phân tích động đất cho kết cấu tại Sơn La là phù hợp với thực tiễn.

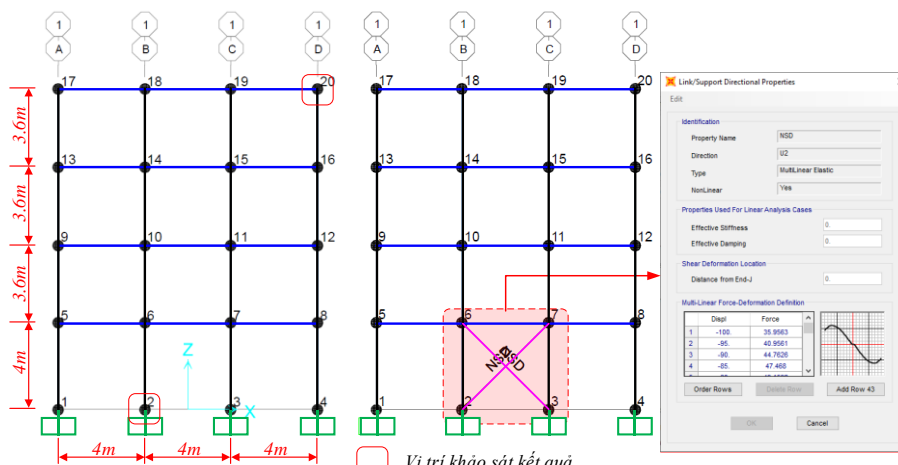


**Hình 5.** Phổ phản ứng gia tốc động đất sử dụng trong phân tích

### 3.3 Mô hình hóa thiết bị NSD bằng SAP2000

Có nhiều phương pháp để mô phỏng số thiết bị NSD với mức độ phức tạp khác nhau. Trong điều kiện phân tích kết cấu bằng phần mềm SAP2000 và sử dụng phần tử thanh cho kết cấu dầm và cột, phần tử NSD được mô hình đơn giản hóa bằng các liên kết đàn hồi (lò xo – link

element) có ứng xử đàn hồi phi tuyến (nonlinear multi-elastic). Ứng xử phi tuyến của phần tử NSD được khai báo dưới dạng quan hệ lực-chuyển vị, như thể hiện trong đồ thị hình 4. Kết quả mô hình hóa hệ kết cấu và thiết bị, với các vị trí được lựa chọn để nghiên cứu, so sánh và phân tích kết quả, được thể hiện trong hình 6.



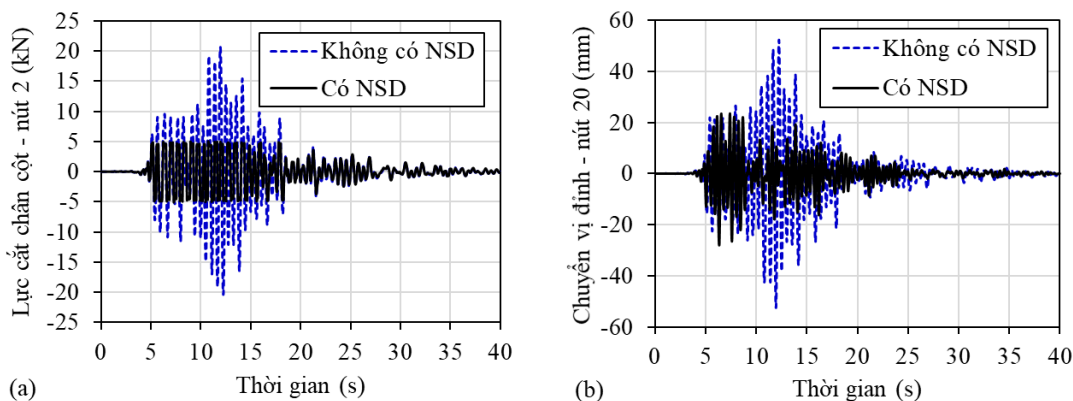
**Hình 6.** Mô hình phân tích số

## 4. Kết quả và bình luận

Trong khuôn khổ nghiên cứu này, giá trị chuyển vị tại đỉnh (nút 20) và giá trị lực cắt tại chân cột (nút 2) được lựa chọn để phân tích hiệu quả của thiết bị NSD.

Hình 7 trình bày kết quả phản ứng động đất theo thời gian của kết cấu chịu tác động của gia tốc động

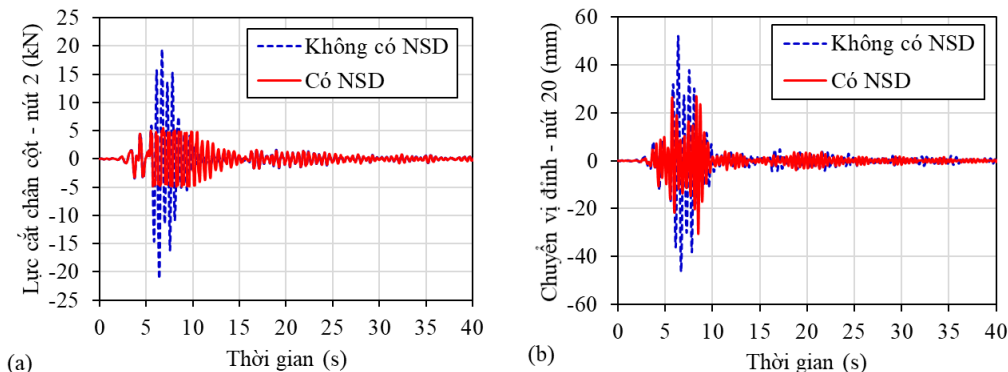
đất Kobe, Nhật Bản. Kết quả thể hiện lực cắt tại chân cột và chuyển vị ngang tại đỉnh của kết cấu khi có sử dụng thiết bị NSD giảm đáng kể so với kết cấu ban đầu (không sử dụng NSD). Cụ thể, kết cấu được lắp đặt NSD cho giá trị lực cắt tại chân cột giảm khoảng 2/3, giá trị chuyển vị ngang tại đỉnh giảm khoảng 1/2 so với kết cấu không sử dụng NSD.



**Hình 7.** Phản ứng động đất của kết cấu chịu tác dụng bởi động đất Kobe, Nhật Bản: (a) Lực cắt tại chân cột, (b) Chuyển vị tại đỉnh kết cấu

Tương tự, hình 8 thể hiện kết quả phản ứng động đất theo thời gian của kết cấu chịu tác động bởi gia tốc động đất tại Tây Bắc Trung Quốc. Các

kết quả thu được có tính tương đồng, thể hiện thiết bị NSD có hiệu quả tốt trong việc giảm các giá trị đáp ứng động cho kết cấu công trình.



**Hình 8.** Phản ứng động đất của kết cấu chịu tác dụng bởi động đất Tây Bắc Trung Quốc: (a) Lực cắt tại chân cột, (b) Chuyển vị tại đỉnh kết cấu

Bảng 3 trình bày chi tiết so sánh kết quả dưới dạng số về phản ứng động đất của kết cấu khi không sử dụng NSD và khi sử dụng NSD. Theo đó, giá trị chuyển vị ngang tại đỉnh kết cấu sử dụng NSD giảm

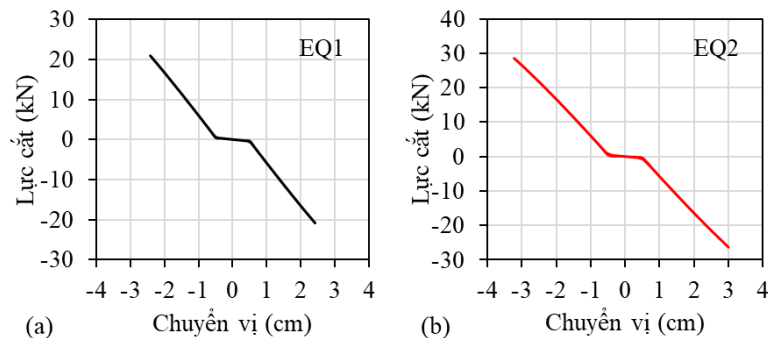
khoảng 50% (từ 35% đến 55%) so với kết cấu không sử dụng NSD. Trong khi đó, giá trị lực cắt tại chân cột của kết cấu sử dụng NSD giảm khoảng 75% (từ 72% đến 77%) so với kết cấu không sử dụng NSD.

**Bảng 3.** So sánh kết quả giữa mô hình sử dụng NSD và không sử dụng NSD

| Thông số              |     | EQ1       |        |              | EQ1       |        |              |
|-----------------------|-----|-----------|--------|--------------|-----------|--------|--------------|
|                       |     | Không NSD | Có NSD | II/I         | Không NSD | Có NSD | IV/III       |
|                       |     | (I)       | (II)   | (%)          | (III)     | (IV)   | (%)          |
| Chuyển vị đỉnh (mm)   | max | 52.28     | 23.50  | <b>44.95</b> | 52.08     | 26.96  | <b>51.78</b> |
|                       | min | -52.45    | -28.02 | <b>53.41</b> | -46.40    | -30.56 | <b>65.87</b> |
| Lực cắt chân cột (kN) | max | 20.65     | 5.04   | <b>24.39</b> | 19.43     | 5.47   | <b>28.16</b> |
|                       | min | -20.39    | -5.10  | <b>25.03</b> | -21.26    | -4.90  | <b>23.04</b> |

Ứng xử phi tuyến của các phần tử NSD đối với hai trường hợp gia tốc động đất được thể hiện tương ứng trong hình 9(a) và (b). Dưới

tác động của động đất, ứng xử của các phần tử NSD thể hiện rõ tính phi tuyến với độ cứng âm.



Hình 9. Ứng xử phi tuyến của phần tử NSD: (a) Động đất Kobe Nhật Bản, (b) Động đất Tây Bắc Trung Quốc

Kết quả các phân tích cho thấy thiết bị NSD, với đặc trưng ứng xử phi tuyến với độ cứng âm, có hiệu quả cao trong việc giảm chấn cho kết cấu công trình, khi đồng thời giảm được lực cắt tại chân cột và chuyển vị ngang tại đỉnh công trình. Hơn nữa, qua ví dụ phân tích với điều kiện động đất tại Sơn La, thiết bị cũng cho thấy khả năng ứng dụng tốt vào thiết kế các giải pháp kháng chấn trong điều kiện Việt Nam.

### 5. Kết luận, hướng phát triển

Bài báo phân tích nguyên lý làm việc và hiệu quả của việc sử dụng thiết bị độ cứng âm (NSD) trong thiết kế kháng chấn cho kết cấu. Ứng xử phi tuyến của thiết bị được mô tả bằng các phương trình giải tích được thiết lập thông qua các phương trình cân bằng lực. Trong ví dụ phân tích số, tác giả tiến hành phân tích kết cấu khung phẳng bê tông cốt thép điển hình chịu tác động của hai giản đồ gia tốc động đất thực được hiệu chỉnh cho phù hợp với điều kiện động đất tại Sơn La, Việt Nam. Một số nhận xét chính rút ra từ bài báo như sau:

- Thiết bị độ cứng âm NSD hoạt động trên cơ sở dịch chuyển tương đối giữa khung trên và khung dưới của thiết bị, thông qua hệ thống lò xo được nén trước mà phát sinh ứng xử phi tuyến với độ cứng âm;
- Thiết bị độ cứng âm có hiệu quả tốt trong việc áp dụng vào kỹ thuật thiết kế kháng chấn cho kết cấu công trình khi góp phần làm giảm cả lực ngang và chuyển vị của kết cấu;
- Ví dụ phân tích kết cấu thấp tầng ở vùng động đất như ở Việt Nam, thiết bị vẫn thể hiện khả năng

giảm chấn tốt và có thể được áp dụng hiệu quả trong thiết kế kháng chấn.

Trên cơ sở các kết quả sơ bộ đã đạt được, các nghiên cứu thực nghiệm cần tiếp tục được tiến hành để xác nhận mô hình lý thuyết và nghiên cứu sản xuất thiết bị. Ngoài ra, việc tích hợp các phần tử tiêu tán năng lượng cho thiết bị cũng đáng được quan tâm để tăng hiệu quả giảm chấn.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. EC8 (2005a). "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings". *European Committee for Standardization Brussels*.
2. ASCE/SEI-41-13 (2014). "Seismic evaluation and retrofit of existing buildings". *American Society of Civil Engineers*.
3. NRCC (2015). "National building code of Canada (NBCC)". *National Research Council of Canada, Associate Committee on the National Building Code*.
4. TCVN-9386:2012 (2012). "Vietnam national standard - Design of structures for earthquake resistances". *Ministry of Science and Technology*.
5. F. Naeim, J. M. Kelly (1999). "Design of seismic isolated structures: from theory to practice". *John Wiley & Sons*.
6. V.T. Nguyen, X.D. Nguyen (2021). "Effects of ground motion spectral shapes on the design of seismic base isolation for multi-story building according to Eurocode 8". *Innovative Infrastructure Solutions*. 6, 1-13.
7. V.T. Nguyen, N.Q. Vu, X.D. Nguyen (2020). "Application of seismic isolation for multi-story



- buildings in moderate seismicity areas like Vietnam". *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, pp. 012119.
8. V.-T. Nguyen, X.-D. Nguyen (2021). "Seismic responses of multi-story building isolated by Lead-Rubber Bearings considering effects of the vertical stiffness and buckling behaviors". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, pp. 012080.
9. X.D. Nguyen, T.H. Vuong (2016). "Optimal design of systems Tuned\_Mass\_Damper for single degree of freedom structural system". *Building Science and Technology Journal*. 174, 8-15.
10. A.M. Kaynia, D. Veneziano, J.M. Biggs (1981). "Seismic effectiveness of tuned mass dampers". *Journal of the Structural Division*. 107, 1465-1484.
11. J.R. Sladek, R.E. Klingner (1983). "Effect of tuned-mass dampers on seismic response". *Journal of structural engineering*. 109, 2004-2009.
12. W. Molyneux "Supports for vibration isolation. 1957". *ARC/CP-322, Aer Res Council, G. Britain*.
13. C.-M. Lee, V. Goverdovskiy, A. Temnikov (2007). "Design of springs with "negative" stiffness to improve vehicle driver vibration isolation". *Journal of sound and vibration*. 302, 865-874.
14. H. Li, Y. Li, J. Li (2020). "Negative stiffness devices for vibration isolation applications: a review". *Advances in Structural Engineering*. 23, 1739-1755.
15. G.M. Mathew, A. Qureshi, R. Jangid (2015). "Optimal placement of negative stiffness damping system". *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, American Society of Mechanical Engineers*, pp. V001T003A018.
16. N. Reggiani Manzo, M.F. Vassiliou (2021). "Simplified analysis of bilinear elastic systems exhibiting negative stiffness behavior". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 50, 580-600.
17. A. Sarlis, M. Constantinou, A. Reinhorn, D. Pasala, S. Nagarajaiah, D. Taylor (2012). "Seismic Protection of Structures Using Novel Negative Stiffness Device". *Proceedings 15th World Conference on Earthquake Engineering, September 23-28, Lisbon Portugal-Paper5498*.
18. Y. Wang, R. Lakes (2004). "Extreme stiffness systems due to negative stiffness elements". *American Journal of Physics*. 72, 40-50.
19. TCVN-5574:2018 (2018). "Vietnam national standard - Design of concrete and reinforced concrete structures". *Ministry of Science and Technology*.
20. X. Dai Nguyen (2022). "A proposed method for selecting and scaling recorded seismic accelerations according to TCVN-9386: 2012". *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-HUCE*. 16, 100-112.

Ngày nhận bài: 15/3/2022.

Ngày nhận bài sửa: 31/3/2022.

Ngày chấp nhận đăng: 31/3/2022.