

MÔ HÌNH HÓA KHỚP DẪO TRONG ĐÁNH GIÁ PHÁ HOẠI ĐỊA CHẤN CỦA CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP DỰA TRÊN MẠNG NƠON NHÂN TẠO

Phan Hoàng Nam^{a,*}, Hồ Mạnh Hùng^a, Nguyễn Minh Hải^a, Hoàng Phương Hoa^a

^a*Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng,
54 Nguyễn Lương Bằng, quận Liên Chiểu, Đà Nẵng, Việt Nam*

Nhận ngày 15/9/2021, Sửa xong 08/11/2021, Chấp nhận đăng 18/11/2021

Tóm tắt

Bài báo trình bày khả năng áp dụng mạng nơon nhân tạo (Artificial neural network - ANN) trong xây dựng mô hình khớp dẻo của cột bê tông cốt thép (BTCT) chịu động đất nhằm phục vụ cho mô hình hóa số, phân tích ứng xử và đánh giá phá hoại địa chấn của loại kết cấu này. Phương pháp dựa trên bộ dữ liệu thí nghiệm gia tải lặp đảo chiều của cột BTCT tiết diện chữ nhật. Cụ thể, mối quan hệ giữa các tham số đầu vào và các tham số tới hạn của cột trước hết được thiết lập dựa trên mô hình ANN. Trong đó, cơ sở dữ liệu thí nghiệm của 800 mẫu được chia thành các tập huấn luyện, tập kiểm thử và tập xác thực cho mô hình. Phân tích mạng tối ưu trước hết được thực hiện. Kết quả cho thấy kiến trúc ANN 2 lớp ẩn và 24 nơon trong 1 lớp ẩn có khả năng ước lượng tốt nhất. Tính hiệu quả của mô hình trong việc ước lượng các tham số tới hạn của cột với các cơ chế phá hoại khác nhau được xác thực với các kết quả thực nghiệm đã được công bố. Nghiên cứu chỉ ra rằng mô hình đề xuất có thể áp dụng để phân tích ứng xử địa chấn cũng như đánh giá được trạng thái sụp đổ của cột BTCT tiết diện chữ nhật với độ chính xác cao.

Từ khoá: cột BTCT; mạng nơon nhân tạo; thí nghiệm gia tải lặp đảo chiều; mô hình khớp dẻo; ứng xử địa chấn.

PLASTIC HINGE MODELING FOR SEISMIC DAMAGE ASSESSMENT OF RECTANGULAR REINFORCED CONCRETE COLUMNS BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Abstract

This paper presents the possibility of applying an artificial neural network (ANN) model in the development of plastic hinge models of reinforced concrete (RC) columns; this allows rapidly modeling, analyzing responses, and assessing damage states of this type of structure. The method is based on a dataset of the cyclic loading test collected to build a plastic hinge model for rectangular RC columns. In particular, the relationship between the input parameters and the critical parameters of RC columns is first established based on the ANN model. In which, the dataset of 800 specimens from the literature is divided into the training set, test set, and validation set for the model. The optimal ANN architecture analysis is first performed. The results show that the ANN model with 2 hidden layers and 24 neurons in one hidden layer gives the best prediction. The effectiveness of the training model on predicting modeling parameters of the plastic hinge model of an RC column is verified with available experimental data. The study shows that the proposed model can be applied to rapidly analyze the seismic response, including both nonlinear static and dynamic, as well as the collapse assessment of rectangular RC columns with high accuracy.

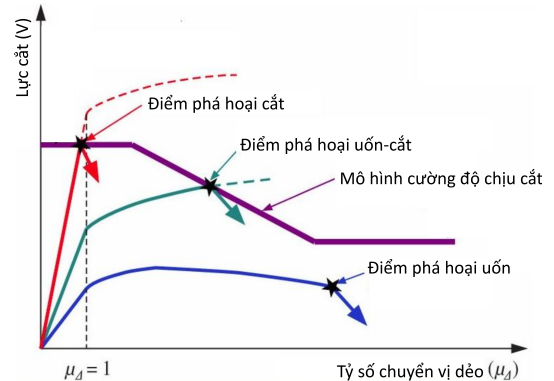
Keywords: RC column; artificial neural network; quasi-static cyclic loading test; plastic hinge model; seismic response.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(7V\)-11](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(7V)-11) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: phnam@dut.udn.vn (Nam, P. H.)

1. Giới thiệu

Trong thiết kế kháng chấn cho kết cấu công trình như khung, nhà cao tầng, công trình cầu, v.v., cột (hay trụ cầu) bê tông cốt thép (BTCT) được xem là kết cấu chịu lực chính, hư hỏng phát sinh từ kết cấu này có thể dẫn đến phá hoại một phần hoặc sụp đổ toàn bộ công trình. Do vậy, trong bài toán đánh giá mức độ phá hoại của công trình nhà cao tầng hay cầu chịu động đất, rất nhiều nghiên cứu đã tập trung vào đánh giá sự làm việc cũng như cơ chế phá hoại của thành phần kết cấu này. Các nghiên cứu chỉ ra rằng trong quá trình diễn ra động đất, cột chịu đồng thời tải trọng đứng và ngang dẫn đến 3 cơ chế phá hoại chính, đó là (i) phá hoại cắt, (ii) phá hoại uốn-cắt và (iii) phá hoại uốn. Mô hình ứng xử của 3 cơ chế phá hoại này được biểu diễn trên Hình 1 [1]; trong đó, μ_d là tỷ số chuyển vị dẻo.



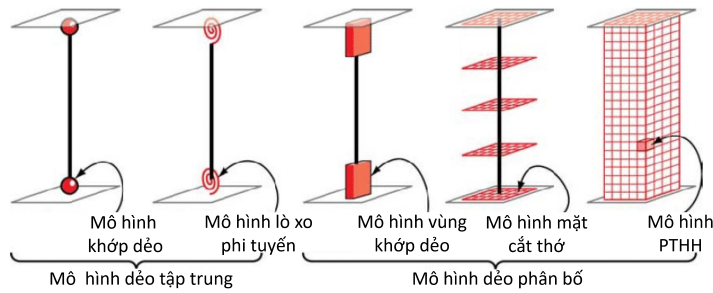
Hình 1. Mô hình cường độ chịu cắt và 3 cơ chế phá hoại của cột BTCT chịu động đất

Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã tập trung xây dựng mô hình cường độ và các cơ chế phá hoại của cột. Điển hình, Sezen và Moehle [1] đã xây dựng công thức xác định cường độ chịu cắt cho cột BTCT tiết diện chữ nhật với hàm lượng cốt đai thấp. Nghiên cứu dựa trên 51 mẫu thí nghiệm cột chịu tải trọng ngang để hiệu chuẩn công thức kinh nghiệm. Trong nghiên cứu tiếp theo, Elwood và Moehle [2] đã tiếp tục tập trung vào xây dựng một biểu thức thực nghiệm cho các cột BTCT có hàm lượng cốt đai thấp. Nhóm tác giả đã sử dụng bộ dữ liệu thí nghiệm tương tự với nghiên cứu của Sezen và Moehle [1] để hiệu chuẩn mô hình tỷ số chuyển vị. Công thức kinh nghiệm đã được thiết lập cho phép xác định giá trị tỷ số chuyển vị ứng với trạng thái phá hoại cắt của cột. Bên cạnh đó, Zhu và cs. [3] cũng đã trình bày một phương pháp để phân loại các cơ chế phá hoại cắt và uốn của cột BTCT đang tồn tại. Tiếp theo, các tác giả đã dựa trên 125 mẫu thí nghiệm để xây dựng mô hình cường độ chịu cắt cho mỗi cơ chế phá hoại và mô hình tỷ số chuyển vị ứng với trạng thái phá hoại dọc trục của cột.

Trên cơ sở các nghiên cứu trình bày ở trên, nhiều nghiên cứu tiếp theo sau đó đã tập trung vào xây dựng mô hình vật liệu đơn trục cho ứng xử phi tuyến của cột, đặc biệt là mô hình phá hoại thuần cắt [4]. Mô hình vật liệu đơn trục sau khi thiết lập được gán vào phần tử cột tại vị trí khớp dẻo. Phương pháp mô hình hóa này được gọi là mô hình dẻo tập trung (lumped plasticity model). Trong khi đó, phương pháp mô hình dẻo phân bố (distributed plasticity model) thường được thực hiện thông qua việc mô hình hóa các vùng khớp dẻo, mặt cắt thố hoặc phần tử hữu hạn (PTHH) [5], như thể hiện trên Hình 2. Phương pháp mô hình PTHH thường cho kết quả chính xác hơn so với các mô hình còn lại nhưng tiêu tốn nhiều thời gian trong việc mô hình hóa và phân tích. Bên cạnh đó, nhược điểm của mô hình PTHH cũng như các mô hình dẻo phân bố khác là khó khăn trong đánh giá các trường hợp biến dạng lớn hoặc trạng thái sụp đổ của kết cấu.

Nhiều nghiên cứu trong nước cũng đã sử dụng mô hình PTHH hay mô hình mặt cắt thố kết hợp với các mô hình vật liệu đơn trục để đánh giá ứng xử địa chấn của cột BTCT và xác thực tính chính xác của mô hình so với kết quả thí nghiệm (ví dụ [6, 7]). Tuy nhiên, các nghiên cứu về việc xây dựng một mô hình dẻo tập trung cho cột BTCT còn khá hạn chế. Mô hình dẻo tập trung được biết đến với ưu điểm nổi bật là cho phép giảm thời gian phân tích so với mô hình dẻo phân bố [5], cũng như có khả năng phân tích được biến dạng lớn và đánh giá được trạng thái sụp đổ của kết cấu.

Elwood [8] đã phát triển một mô hình vật liệu đơn trục trên nền tảng phần mềm OpenSees [9]



Hình 2. Mô hình dẻo tập trung và mô hình dẻo phân bố của cột trong phân tích ứng xử địa chấn

nhằm mô phỏng ứng xử phi tuyến và các cơ chế phá hoại của cột BTCT. Mô hình xét đến tương tác giữa các thành phần ứng xử cốt-uốn cũng như sự phá hoại dọc trục của cột. Ibarra và cs. [10] đã phát triển một mô hình dẻo tập trung tương đối đơn giản bao gồm các tham số về cường độ, độ cứng, biến dạng phi đàn hồi, v.v. Mô hình này sau đó đã được sử dụng phổ biến trong các mô phỏng ứng xử địa chấn của khung và nhà cao tầng BTCT, cho phép đánh giá được các trạng thái hư hỏng và trạng thái sụp đổ của kết cấu. Tuy nhiên, tính chính xác của các mô hình trên đòi hỏi sự thiết lập hợp lý của các tham số đầu vào; bên cạnh đó, còn phụ thuộc vào kinh nghiệm của các nhà phân tích.

Trong những năm gần đây, với sự phát triển của khoa học máy tính, lĩnh vực học máy và trí tuệ nhân tạo đang phát triển mạnh mẽ và được ứng dụng trong nhiều ngành khoa học khác nhau. Trong số các kỹ thuật học máy, mạng nơron nhân tạo (ANN) là một phương pháp điển hình được mô hình dựa trên hoạt động của hệ thần kinh sinh học. Nhiều nghiên cứu đã ứng dụng mô hình ANN để ước lượng cường độ của kết cấu bê tông. Điển hình, Oreta và Kawashima [11] đã ước lượng cường độ bê tông lõi và biến dạng của cột BTCT tiết diện tròn dựa trên mô hình ANN. Mô hình ước lượng được phát triển dựa trên bộ dữ liệu thí nghiệm xét đến sự ảnh hưởng của các tham số vật liệu và hình học của cột. Liu và Li [12] đã sử dụng mô hình ANN dựa trên gần 1200 mẫu thí nghiệm để ước lượng các tham số cho mô hình dẻo của cột BTCT. Tác giả đã phát triển cả mô hình song tuyến và tam tuyến tính cho ứng xử địa chấn của cột. Tuy nhiên, trong nghiên cứu của nhóm tác giả, các cơ sở để xây dựng kiến trúc mạng ANN chưa được làm rõ. Hơn nữa, tính chính xác của mô hình trong đánh giá các cơ chế phá hoại thuần cắt hoặc uốn-cắt cũng chưa được xác thực. Với một hướng nghiên cứu tương tự, Lee và cs. [13] đã sử dụng các kỹ thuật hồi quy để ước lượng các tham số cho mô hình dẻo của cột BTCT tiết diện tròn. Nghiên cứu dựa trên một bộ dữ liệu tương đối nhỏ gồm 210 mẫu BTCT tiết diện tròn để xây dựng mô hình hồi quy. Mô hình huấn luyện sau đó được sử dụng để ước lượng các tham số cho mô hình dẻo của trụ cầu BTCT. Gần đây hơn, Hoàn [14] đã giới thiệu và ứng dụng kỹ thuật học máy XGBoost để ước lượng cường độ nén dọc trục của cột ống thép nhồi bê tông tiết diện tròn. Tác giả đã sử dụng kết quả từ 1017 thí nghiệm về loại cấu kiện này để làm dữ liệu để huấn luyện mô hình.

Liên quan đến cơ chế phá hoại của cột BTCT chịu động đất, gần đây, Mangalathu và Jeon [15] đã so sánh kết quả ước lượng của các kỹ thuật học máy khác nhau trong đó có mô hình ANN nhằm phân loại và ước lượng kiểu phá hoại của cột BTCT tiết diện tròn. Kết quả nghiên cứu thể hiện tính ưu việt của mô hình ANN trong việc phân loại chuẩn xác kiểu phá hoại của cột so với các phương pháp khác và phương pháp truyền thống trước đây. Khác với các nghiên cứu thiết lập biểu thức kinh nghiệm được trình bày ở phần đầu, mô hình ANN dựa vào một lượng lớn dữ liệu huấn luyện thay vì bộ dữ liệu hạn chế với các giả thiết nhất định; do đó, mô hình có thể giảm thiểu các lỗi chủ quan liên quan đến việc lựa chọn tham số đầu vào và kinh nghiệm của nhà phân tích.

Trong nghiên cứu này, một phương pháp mô hình theo hướng dữ liệu được thực hiện để xác định

các tham số tối hạn cho mô hình dẻo tập trung của cột BTCT. Mô hình ước lượng ANN được huấn luyện dựa trên một bộ dữ liệu thí nghiệm gia tải lặp đảo chiều của 800 mẫu cột BTCT tiết diện chữ nhật. Tính chính xác của mô hình được xác thực thông qua việc so sánh với các dữ liệu thí nghiệm của các cột BTCT với cơ chế phá hoại khác nhau. Mô hình huấn luyện sau đó được sử dụng để ước lượng các tham số mô hình dẻo tập trung của các cột BTCT chịu tải trọng động đất. Cuối cùng, ứng xử động đất và trạng thái sụp đổ của các cột được đánh giá cụ thể thông qua các phân tích tĩnh và động phi tuyến trên nền tảng phần mềm OpenSees.

2. Mô hình mạng nơron nhân tạo

2.1. Thu thập dữ liệu thí nghiệm

Bộ dữ liệu thí nghiệm gia tải lặp đảo chiều của 800 mẫu cột BTCT tiết diện vuông và chữ nhật được lựa chọn từ nhiều nguồn khác nhau trong nghiên cứu này. Phần lớn dữ liệu được thu thập từ cơ sở dữ liệu của NEEShub [16], và PEER [17] và một số từ các nghiên cứu đã xuất bản khác. Bộ dữ liệu cũng đã được sàng lọc để số lượng các mẫu với 3 cơ chế phá hoại (đó là uốn, uốn-cắt và cắt) tương đồng nhau. Kết quả thí nghiệm của các mẫu cột BTCT với đầy đủ tham số mô hình, kết quả ứng xử trễ và được lựa chọn dựa trên các tiêu chí sau:

(i) Chỉ xét cột có tiết diện vuông và chữ nhật.

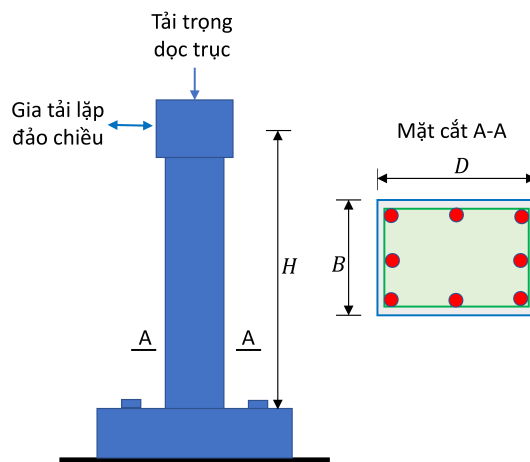
(ii) Trong quá trình gia tải tĩnh, các cột chịu tác dụng của tải trọng dọc trục không đổi. Quy trình gia tải được thực hiện đến khi cột xuất hiện hư hỏng và bị phá hoại (tải trọng ngang giảm ít nhất 20% so với giá trị đỉnh).

Tổng cộng 800 kết quả thí nghiệm gia tải lặp đảo chiều của các cột BTCT đã được thu thập để xây dựng cơ sở dữ liệu cho huấn luyện, kiểm thử và xác thực mô hình ANN. Các tham số hình học và vật liệu của các cột trên Hình 3 có các giới hạn như sau:

- Chiều rộng B của tiết diện cột từ 0,15 – 2 m,
- Chiều sâu D của tiết diện cột từ 0,14 – 2 m,
- Tỷ lệ cốt thép chủ $\rho_l = 0,0028 - 0,069$,
- Tỷ lệ thể tích cốt thép đai $\rho_v = 0,0014 - 0,073$,
- Cường độ chịu nén của bê tông $f'_c = 13,1 - 75,9$ MPa,
- Cường độ chảy của cốt chủ $f_y = 317,9 - 745$ MPa và của cốt đai $f_{yh} = 220 - 880$ MPa,
- Tỷ số lực dọc trục $n = P/(f'_c A_g) = 0 - 0,9$,
- Tỷ số giữa chiều cao cột và chiều sâu của tiết diện $a_d = H/D = 0,24 - 13,2$.

2.2. Kiến trúc ANN

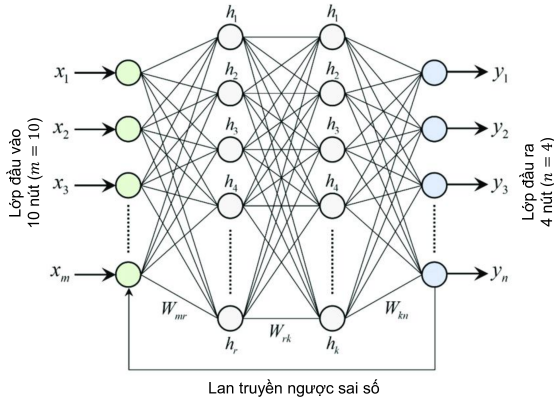
ANN là mô hình xử lý thông tin được mô phỏng dựa trên hoạt động của hệ thống thần kinh sinh vật, bao gồm số lượng lớn các nơron được gắn kết để xử lý thông tin. Mô hình này giống như não bộ của người, được học bởi kinh nghiệm thông qua huấn luyện, có khả năng lưu giữ những kinh nghiệm và sử dụng để ước lượng các dữ liệu chưa biết. Kiến trúc chung của một ANN gồm 3 thành phần đó



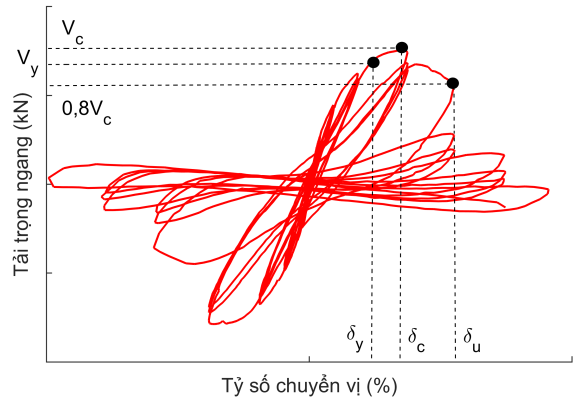
Hình 3. Mô hình và các tham số cột trong thí nghiệm gia tải lặp đảo chiều

là lớp đầu vào, lớp ẩn và lớp đầu ra, như thể hiện trên Hình 4. Trong đó, lớp ẩn gồm các nơon nhận dữ liệu đầu vào từ các nơon ở lớp trước đó và chuyển đổi các dữ liệu này cho các lớp xử lý tiếp theo.

Trong nghiên cứu này, lớp đầu vào gồm các nơon nhận dữ liệu là 10 tham số đầu vào của cột BTCT, bao gồm chiều rộng cột (B), chiều sâu cột (D), tỷ lệ cốt chủ (ρ_l), tỷ lệ thể tích cốt đai (ρ_v), cường độ chịu nén của bê tông (f'_c), cường độ chảy của cốt chủ (f_y), cường độ chảy của cốt đai (f_{yh}), tham số liên quan đến bước cốt đai ($s/l_d \sqrt{f_y/100}$) (trong đó s là bước cốt đai, l_d là đường kính cốt chủ), tỷ số lực dọc trục [$P/(f'_c A_g)$] (trong đó A_g là diện tích tiết diện cột) và tỷ số giữa chiều cao cột và chiều sâu của tiết diện (a_d).



Hình 4. Kiến trúc chung của ANN



Hình 5. Xác định các tham số tối hạn từ kết quả thí nghiệm gia tải lật đảo chiều của cột BTCT

Lớp đầu ra gồm 4 tham số tối hạn của cột bao gồm tải trọng ngang cực hạn (V_c), tỷ số chuyển vị chảy (δ_y), tỷ số chuyển vị tương ứng với V_c (δ_c) và tỷ số chuyển vị tương ứng với $0,8V_c$ (δ_u). Các tham số này được mô tả trên Hình 5 và được xác định từ kết quả thí nghiệm của từng mẫu cột trong bộ dữ liệu [16, 17]. Như vậy, số lượng nơon đầu vào và đầu ra trong mô hình ANN lần lượt là 10 và 4, tương ứng với các ma trận đầu vào $\mathbf{x} = x_1, x_2, \dots, x_{10}$ và ma trận đầu ra $\mathbf{y} = y_1, y_2, \dots, y_4$.

Thuật toán lan truyền ngược sai số (cascade-forward backpropagation network) được sử dụng cùng với hàm truyền dạng phi tuyến (sigmoid). Cụ thể, dữ liệu đầu vào được truyền từ lớp vào tới các lớp ẩn để tính toán dữ liệu đầu ra; từ đó, tín hiệu lỗi được tính toán từ sai số giữa dữ liệu thí nghiệm và dữ liệu ước lượng, sau đó được lan truyền ngược lại từ lớp ra đến các lớp trước đó để hiệu chỉnh các trọng số của mạng.

2.3. Huấn luyện và xác thực mô hình ước lượng

Trước khi huấn luyện mô hình ANN, tất cả các tham số đầu vào và đầu ra của cột từ 800 mẫu thí nghiệm được tiêu chuẩn hóa trong phạm vi $[-1 \ 1]$ và được thiết lập là các ma trận đầu vào và đầu ra. Tiếp theo sau đó, các tập huấn luyện, kiểm thử và xác thực của mô hình được thiết lập một cách ngẫu nhiên từ bộ dữ liệu đầu vào với tỷ lệ lần lượt là 0,7, 0,15 và 0,15. Các tham số khác được sử dụng để huấn luyện mô hình bao gồm sai số dừng lặp là 10^{-5} , tốc độ học là 0,15 và số lần lặp tối đa là 1000.

Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng hiện chưa có một quy tắc cụ thể nào trong việc lựa chọn số nơon tại các lớp ẩn; do vậy, trong nghiên cứu này, một phân tích tham số trước hết được thực hiện nhằm mục tiêu tối ưu hóa mô hình ước lượng. Cụ thể, số lớp ẩn và số lượng nơon trong 1 lớp ẩn được khảo sát. Tính năng của mô hình sau đó được đánh giá thông qua giá trị sai số toàn phương trung bình ($MS E$)

và hệ số tương quan (R) giữa giá trị dự đoán và giá trị thí nghiệm của tập dữ liệu xác thực. Trong đó, MSE được xác định là

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (1)$$

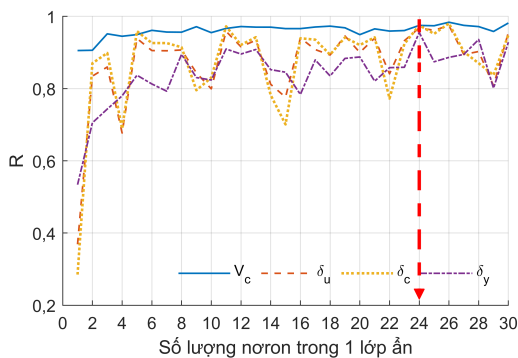
với y_i là giá trị thí nghiệm, \hat{y}_i là giá trị ước lượng và n là số mẫu.

Phân tích tham số được thực hiện lần lượt với kiến trúc ANN có 1, 2 và 3 lớp ẩn. Trong mỗi trường hợp, vòng lặp được thực hiện cho 1-30 nơron trong một lớp ẩn. Kết quả phân tích được ghi lại ở Bảng 1. Trong đó, tính năng làm việc của mô hình được đánh giá thông qua giá trị trung bình của R và MSE đối với việc ước lượng 4 tham số đầu ra. Số nơron tối ưu trong 1 lớp ẩn lần lượt cho 3 trường hợp là 22, 24 và 22. Ứng với kiến trúc mạng tối ưu này, trường hợp 2 lớp ẩn cho kết quả R lớn nhất và MSE nhỏ nhất. Bên cạnh đó, xét khía cạnh thời gian phân tích, trường 1 lớp ẩn có thời gian huấn luyện nhanh nhất là 496,0 s, trong khi đó trường hợp 2 lớp ẩn tiêu tốn 2813,3 s và trường hợp 3 lớp ẩn tiêu tốn thời gian huấn luyện nhiều nhất là 7405,6 s. Thời gian huấn luyện được đo lường trên máy tính bàn CPU Intel core i7-9700 với 8Gb Ram. Từ kết quả phân tích tham số có thể kết luận rằng mô hình ANN 2 lớp ẩn với 24 nơron trong 1 lớp ẩn có tính năng làm việc tốt nhất và được lựa chọn cho các phân tích ước lượng tiếp theo.

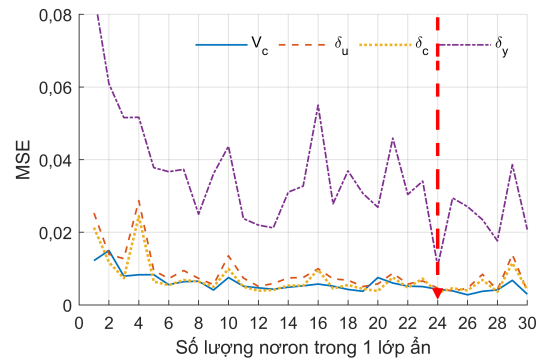
Bảng 1. Kết quả phân tích tham số tối ưu cho mô hình ANN

Số lớp ẩn	Số nơron tối ưu trong 1 lớp ẩn	Giá trị R trung bình cho 4 tham số đầu ra	Giá trị MSE trung bình cho 4 tham số đầu ra	Tổng thời gian huấn luyện cho 1-30 nơron/1 lớp ẩn
1 lớp	22 nơron	0,9187	0,0108	496,0 s
2 lớp	24 nơron	0,9660	0,0057	2813,3 s
3 lớp	22 nơron	0,9322	0,0092	7405,6 s

Hình 6 thể hiện một ví dụ kết quả khảo sát ảnh hưởng của số nơron trong 1 lớp ẩn đến tính năng của mô hình ước lượng cho 4 tham số đầu ra; trong đó, số lượng nơron trong 1 lớp ẩn được khảo sát cho các trường hợp từ 1 đến 30 nơron cho trường hợp mạng ANN có 2 lớp ẩn. Số nơron trong 1 lớp ẩn tối ưu là 24 nơron và được lựa chọn trên cơ sở giá trị R lớn nhất và MSE nhỏ nhất cho cả 4 tham số đầu ra.



(a) đối với hệ số tương quan R



(b) đối với sai số MSE

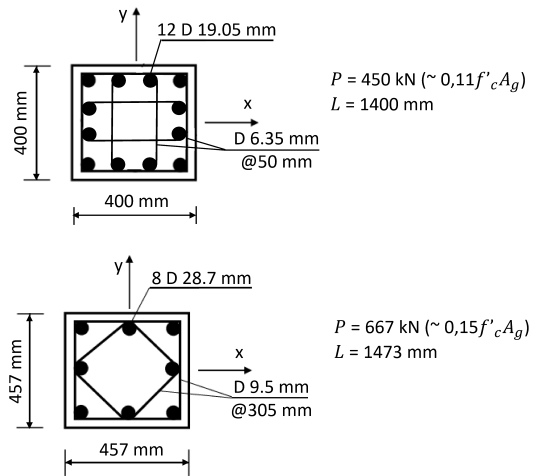
Hình 6. Ví dụ khảo sát tính năng của mô hình ANN 2 lớp ẩn theo số lượng nơron trong 1 lớp ẩn

3. Ứng dụng mô hình huấn luyện trong phân tích ứng xử và phá hoại địa chấn của cột BTCT

3.1. Mô hình hóa

Để ứng dụng mô hình huấn luyện trong việc ước lượng các tham số chính cho mô hình hóa khớp dẻo tập trung, các mẫu cột BTCT tiết diện vuông với cơ chế phá hoại khác nhau gồm mẫu C1-1 từ thí nghiệm của Mo và Wang [18] và mẫu 2CLD12 từ thí nghiệm của Sezen và Moehle [1] được lựa chọn để phân tích đối sánh. Các mẫu thí nghiệm này cùng với các thí nghiệm khác liên quan của nhóm tác giả đã được loại bỏ từ bộ dữ liệu huấn luyện.

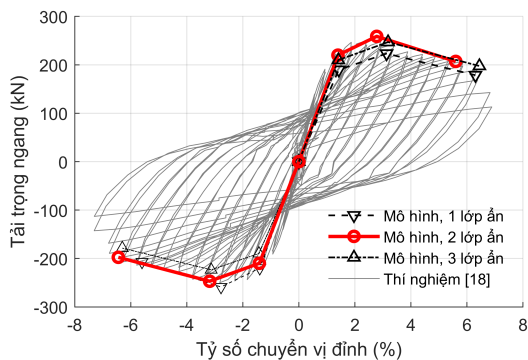
Các cột làm việc theo sơ đồ công xôn với các kích thước mặt cắt ngang, chiều dài làm việc của cột cùng với điều kiện biên và tải trọng tác dụng được thể hiện trên Hình 7. Thêm vào đó, 10 tham số đầu vào của các mẫu cột được trình bày ở Bảng 2. Theo đánh giá từ kết quả thí nghiệm, mẫu C1-1 có kiểu phá hoại uốn và mẫu 2CLD12 có kiểu phá hoại cắt. Kiểu phá hoại cắt thường ít gặp trong các kết cấu được thiết kế mới; tuy nhiên, đối với cột BTCT trong các công trình đã qua nhiều năm sử dụng hoặc không được thiết kế kháng chấn, kiểu phá hoại này thường gặp hơn. Nguyên nhân chính là do cốt thép chịu cắt được thiết kế không đảm bảo.



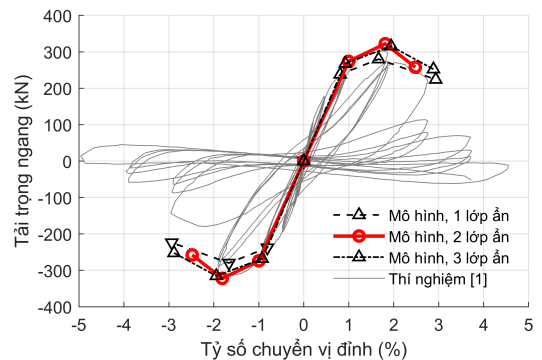
Hình 7. Kích thước hình học và tải trọng của các mẫu cột thí nghiệm

Bảng 2. Tham số hình học và vật liệu của các mẫu cột thí nghiệm cho kiểm chứng mô hình ước lượng

Mẫu thí nghiệm	B (m)	D (m)	ρ_l	ρ_v	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	f_{yh} (MPa)	s_n	n	a_d
C1-1 [18]	0,4	0,4	0,021	0,015	25	497	460	0,05	0,11	3,5
2CLD12 [1]	0,457	0,457	0,025	0,004	21	434	476	0,31	0,15	3,2



(a) Mẫu C1-1



(b) Mẫu 2CLD12

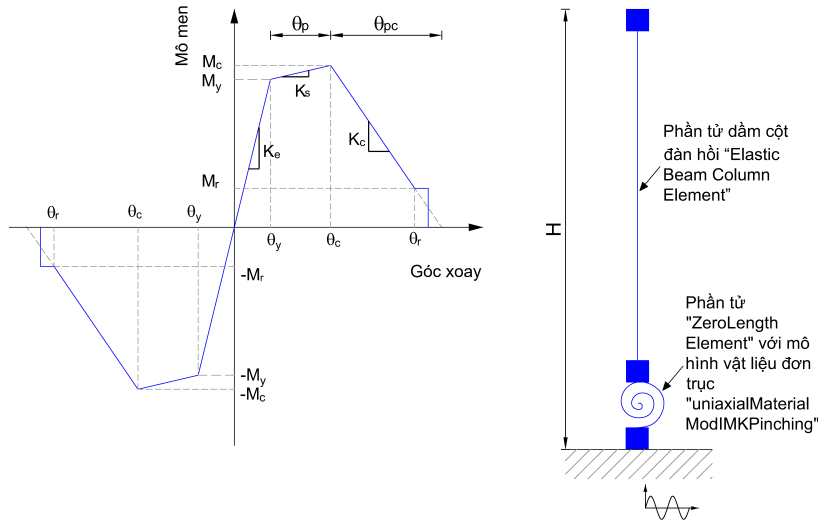
Hình 8. Ước lượng các tham số của mô hình dẻo tập trung sử dụng mô hình huấn luyện

Dựa trên các tham số đầu vào của cột, 4 tham số chính của mô hình dẻo tập trung bao gồm V_c , δ_y , δ_c và δ_u được ước lượng từ mô hình huấn luyện. Kết quả ước lượng của 3 kiến trúc ANN (đó là

1 lớp ẩn, 2 lớp ẩn và 3 lớp ẩn) được thể hiện trên Hình 8 cùng với các kết quả thí nghiệm gia tải lặp đảo chiều.

Có thể nhận thấy rằng kết quả ước lượng của mô hình ANN 2 lớp ẩn phù hợp nhất với đồ thị thí nghiệm, đặc biệt là giá trị cường độ đỉnh và tỷ số chuyển vị tương ứng. Trong khi đó, mô hình ANN 1 và 3 lớp ẩn thể hiện các sai số ước lượng nhất định, đặc biệt là mô hình ANN 1 lớp ẩn. Kết quả ước lượng của 3 mô hình hoàn toàn khớp với nhận định từ phân tích tham số ở trên.

Tiếp theo, mô hình số của cột chịu động đất được xây dựng trên nền tảng phần mềm OpenSees. Trong đó, khớp dẻo được mô hình tại chân cột bằng phần tử “ZeroLength Element”. Phần còn lại của cột được mô hình sử dụng phần tử dầm cột đàn hồi “Elastic Beam Column Element”. Chi tiết mô hình khớp dẻo tập trung của cột BTCT dạng côngxon được thể hiện trên Hình 9. Trong đó, ứng xử phi tuyến tại vị trí khớp dẻo được mô hình bởi quan hệ mô men và góc xoay và được biểu diễn bằng mô hình vật liệu đơn trục “uniaxialMaterial ModIMKPinching” [10, 19]. Đây là một mô hình tam tuyến tính và được sử dụng rộng rãi trong mô hình hóa ứng xử và trạng thái sụp đổ của kết cấu, đặc biệt là có xét đến sự suy giảm cường độ và độ cứng của tiết diện do tải trọng lặp. Như thể hiện trên Hình 9, các tham số của mô hình khớp dẻo tập trung bao gồm độ cứng đàn hồi (K_e), mô men chảy (M_y), mô men cực hạn (M_c), tỷ số biến cứng $\alpha_s = K_s/K_e$ và các miền giới hạn θ_p và θ_{pc} .



Hình 9. Mô hình tam tuyến tính cho ứng xử của khớp dẻo (trái) và mô hình khớp dẻo tập trung của cột công xon chịu động đất (phải)

Các tham số của mô hình khớp dẻo tập trung được liệt kê ở trên có thể được xác định từ các tham số đầu ra của mô hình huấn luyện ANN bao gồm tải trọng ngang lớn nhất V_c và các tỷ số chuyển vị $\delta_y, \delta_c, \delta_u$. Với giả thiết rằng góc xoay của khớp dẻo bằng tỷ số chuyển vị lệch tầng tương đối của cột, các quan hệ sau được sử dụng để xác định các tham số cho quan hệ mô men và góc xoay của khớp dẻo tập trung [19]:

$$K_e = M_y / \delta_y \quad (2)$$

$$M_y = V_y H + P \delta_y H \quad (3)$$

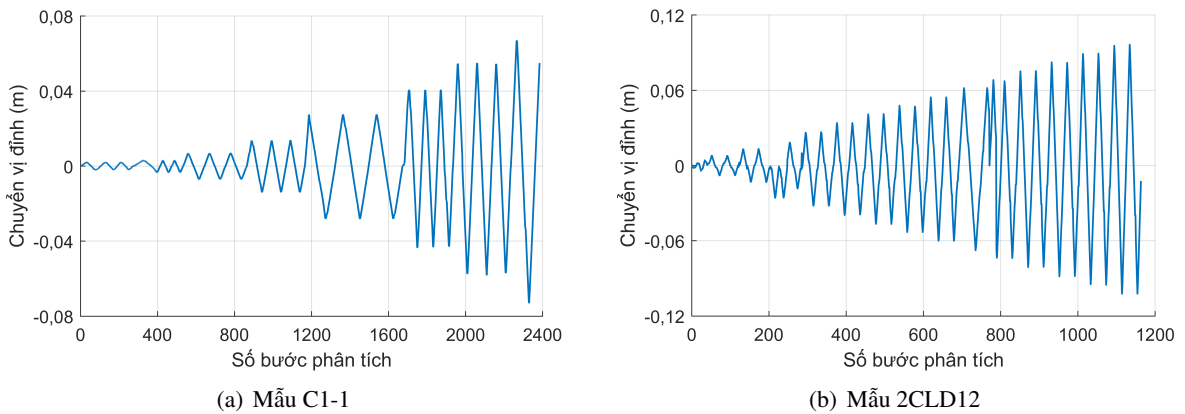
$$K_s = (V_c + P \delta_c - V_y - P \delta_y) H / (\delta_c - \delta_y) \quad (4)$$

$$K_c = 0, 2 / (\delta_u - \delta_c) \quad (5)$$

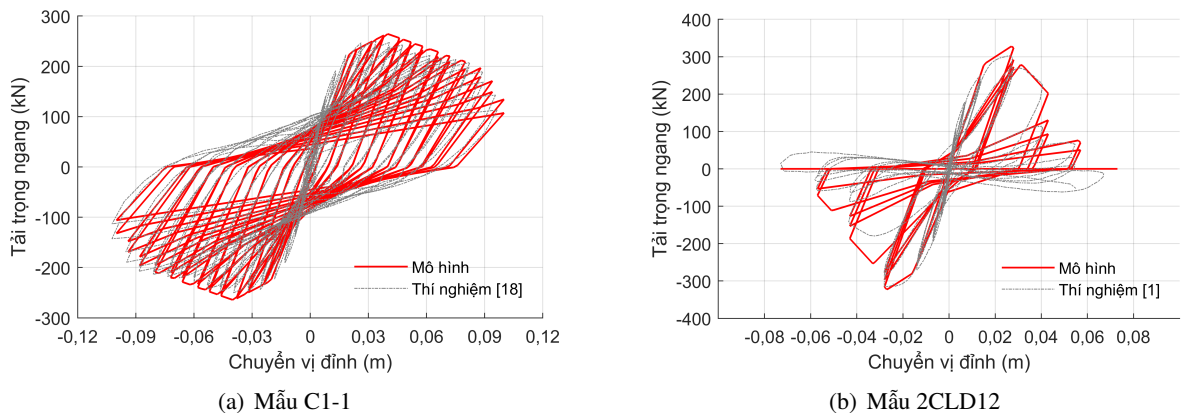
Ngoài các tham số tới hạn chính đã được xác định, mô hình vật liệu đơn trục còn bổ sung thêm các tham số để điều chỉnh sự suy giảm cường độ và độ cứng của tiết diện do tải trọng lặp; các tham số này được hiệu chỉnh tùy theo từng trường hợp cụ thể dựa trên các biểu thức đề xuất bởi Ibarra và cs. [10, 19].

3.2. Phân tích gia tải lặp đảo chiều

Phân tích gia tải lặp đảo chiều dựa trên chuyển vị trước hết được thực hiện, trong đó chuyển vị lặp đảo chiều từ thí nghiệm của Sezen và Moehle [1] (Hình 10(a)) và Mo và Wang [18] (Hình 10(b)) được sử dụng. Kết quả phân tích gia tải lặp đảo chiều của mô hình dầm tập trung được thể hiện trên Hình 11 cùng với kết quả từ thí nghiệm của các nhóm tác giả. Đặc biệt đối với trường hợp 2 (đó là trường hợp cột phá hoại thuần cắt), mô hình có khả năng đánh giá được trạng thái sụp đổ của kết cấu, đó là tại điểm mà tải trọng ngang gần bằng 0. Có thể nhắc lại rằng đây là tính ưu việt của mô hình dầm tập trung so với mô hình dầm phân bố.



Hình 10. Chuyển vị lặp đảo chiều



Hình 11. Kết quả phân tích lặp đảo chiều

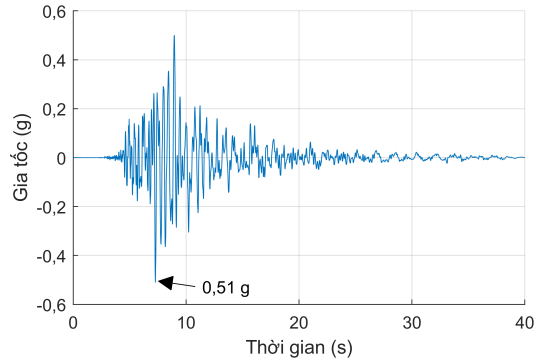
So sánh với đồ thị thí nghiệm, ứng xử tĩnh thu được từ mô hình thể hiện sự phù hợp cao cho cả 2 trường hợp. Như vậy, có thể kết luận rằng mô hình ứng xử của cột dựa trên các tham số được ước

lượng từ mô hình ANN cho kết quả tương đối chính xác và có khả năng đánh giá được trạng thái sụp đổ của kết cấu.

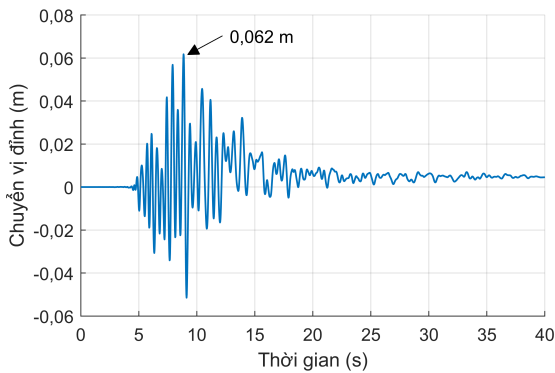
3.3. Phân tích lịch sử thời gian

Phân tích động lực lịch sử thời gian là một bước quan trọng để đánh giá ứng xử động đất của kết cấu. Để thực hiện phân tích, một băng gia tốc nền theo phương ngang của trận động đất Kobe 1995 được lựa chọn. Đồ thị theo thời gian của băng gia tốc nền được thể hiện trên Hình 12, trong đó giá trị gia tốc nền đỉnh $PGA = 0,51$ g.

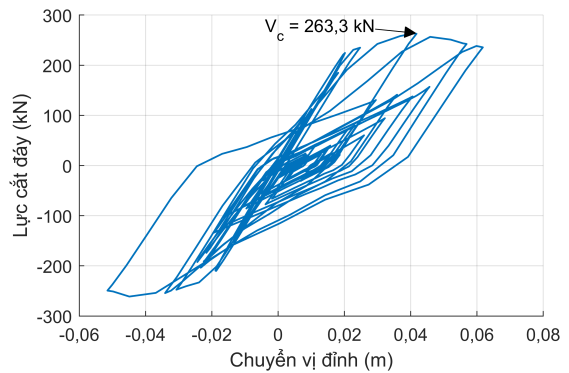
Phân tích lịch sử thời gian được thực hiện với bước thời gian phân tích là 0,02 s và tổng thời gian phân tích là 40 s. Kết quả phân tích cho các mẫu cột C1-1 và 2CLD12 được thể hiện lần lượt trên Hình 13 và Hình 14. Trong đó, dữ liệu lịch sử thời gian của chuyển vị đỉnh cột và ứng xử trễ của cột (biểu diễn bởi quan hệ giữa lực cắt đáy và chuyển vị đỉnh) được trình bày cho mỗi trường hợp. Có thể nhận thấy rằng ứng xử phi tuyến của cột là rất rõ ràng cho cả 2 trường hợp.



Hình 12. Băng gia tốc nền Kobe



(a) Dữ liệu chuyển vị theo lịch sử thời gian

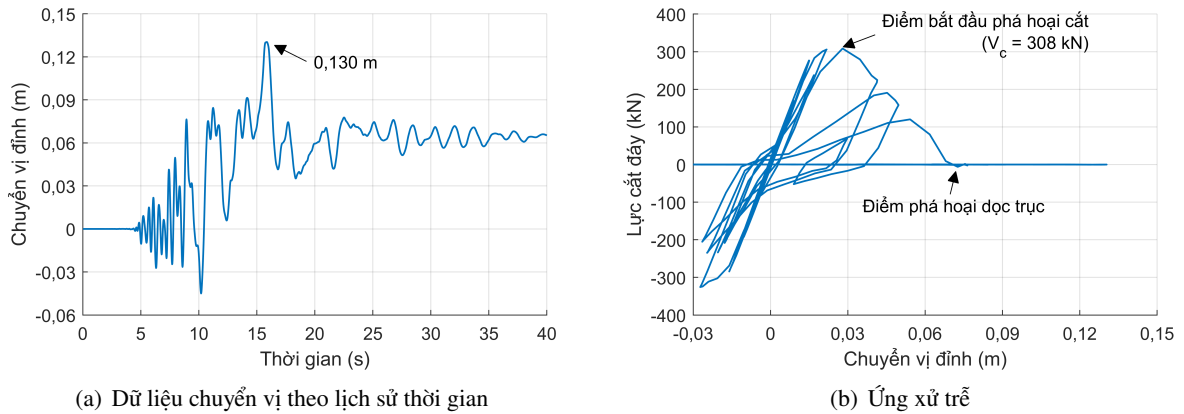


(b) Ứng xử trễ

Hình 13. Kết quả phân tích lịch sử thời gian mẫu C1-1

Đối với trường hợp 1, chuyển vị đỉnh lớn nhất được ghi lại là 0,062 m. Dựa trên đồ thị ứng xử trễ, lực cắt đáy đạt giá trị lớn nhất, $V_c = 263,3$ kN, và có xu hướng giảm nhẹ cùng với sự tăng về biến dạng. Trong trường hợp này, cột làm việc trong thềm dẻo và các trạng thái hư hỏng chưa được ghi nhận, kết cấu đảm bảo khả năng làm việc.

Đối với trường hợp 2, chuyển vị đỉnh lớn nhất được ghi lại là 0,130 m và kết cấu đạt cường độ lớn nhất khi biến dạng còn rất nhỏ. Đây là đặc điểm của cột với kiểu phá hoại thuần cắt. Tiếp theo, chuyển vị của cột thay đổi rất lớn và đột ngột từ thời điểm 15 s, đây cũng là điểm mà cột bắt đầu sụp đổ. Như vậy, kết quả phân tích cho phép xác định được các trạng thái hư hỏng của cột trong suốt quá trình động đất, từ thời điểm bắt đầu hư hỏng đến bị phá hoại hoàn toàn (sụp đổ). Ở đây, tiêu chí đánh giá sụp đổ hay phá hoại dọc trục của cột là giá trị cường độ chịu cắt sụt giảm gần về 0.



Hình 14. Kết quả phân tích lịch sử thời gian mẫu CLD12

4. Kết luận

Bài báo đã tập trung xây dựng một mô hình huấn luyện dựa trên ANN để ước lượng các tham số chính cho mô hình dẻo tập trung của cột BTCT tiết diện chữ nhật chịu động đất. Mô hình ANN được huấn luyện dựa trên 800 dữ liệu thí nghiệm được thu thập. Một số kết luận từ kết quả mô hình hóa và phân tích như sau:

- Từ phân tích tham số, mô hình kiến trúc ANN tối ưu cho ước lượng 4 tham số đầu ra của mô hình khớp dẻo được cấu thành bởi 2 lớp ẩn và 24 nơron trong 1 lớp ẩn.
- Tính xác thực của mô hình được thực hiện bằng việc so sánh kết quả ước lượng với kết quả thí nghiệm của 2 mẫu cột BTCT với 2 kiểu phá hoại khác nhau (đó là phá hoại uốn và phá hoại cắt). Mô hình huấn luyện ước lượng khá chính xác các tham số tối hạn của cột cho cả 2 trường hợp.
- Mô hình dẻo tập trung được xây dựng từ các tham số đầu ra của mô hình huấn luyện cho 2 mẫu cột. Kết quả phân tích gia tải lặp đảo chiều phù hợp cao với đồ thị thí nghiệm bao gồm các giá trị đỉnh, sự thay đổi và suy giảm về cường độ và độ cứng của cột.
- Kết quả phân tích lịch sử thời gian dưới tác dụng của băng gia tốc nền Kobe cho thấy ứng xử phi tuyến của các cột rất rõ ràng. Trong khi cột C1-1 (kiểu phá hoại uốn) làm việc trong giới hạn dẻo, cột 2CLD12 (kiểu phá hoại cắt) đạt giá trị cường độ đỉnh từ rất sớm và sau đó bắt đầu phá hoại và sụp đổ. Như vậy, tính ưu việt của mô hình là cho phép xác định được các trạng thái phá hoại của cột trong suốt quá trình động đất, từ thời điểm bắt đầu hư hỏng đến thời điểm bị phá hoại hoàn toàn.
- Mô hình huấn luyện trong nghiên cứu này có thể sử dụng để ước lượng các tham số mô hình dẻo tập trung cho cột BTCT tiết diện chữ nhật bất kỳ, ví dụ cột trong nhà cao tầng hoặc trụ cầu.

Tài liệu tham khảo

- [1] Sezen, H., Moehle, J. P. (2004). [Shear Strength Model for Lightly Reinforced Concrete Columns](#). *Journal of Structural Engineering*, 130(11):1692–1703.
- [2] Elwood, K. J., Moehle, J. P. (2005). [Drift Capacity of Reinforced Concrete Columns with Light Transverse Reinforcement](#). *Earthquake Spectra*, 21(1):71–89.
- [3] Zhu, L., Elwood, K. J., Haukaas, T. (2007). [Classification and Seismic Safety Evaluation of Existing Reinforced Concrete Columns](#). *Journal of Structural Engineering*, 133(9):1316–1330.

- [4] Phan, H. N., Paolacci, F., Bursi, O. S., Tondini, N. (2017). [Seismic fragility analysis of elevated steel storage tanks supported by reinforced concrete columns](#). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 47:57–65.
- [5] Andreotti, G., Lai, C. G. (2017). [A nonlinear constitutive model for beam elements with cyclic degradation and damage assessment for advanced dynamic analyses of geotechnical problems. Part II: validation and application to a dynamic soil–structure interaction problem](#). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15 (7):2803–2825.
- [6] Hung, N. V., Huy, N. X., Dat, P. X. (2018). [Nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số cột bê tông cốt thép tiết diện chữ L chịu tải trọng động đất](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 12(2):11–17.
- [7] Nam, P. H., Khoa, V. N., Vĩnh, N. H., Hoa, H. P. (2021). [Phân tích ứng xử địa chấn và kiểm soát hư hại kết cấu trụ cầu bê tông cốt thép sử dụng phương pháp phân tích tĩnh và động phi tuyến](#). *Tạp chí khoa học và công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, 19(9):37–42.
- [8] Elwood, K. J. (2004). [Modelling failures in existing reinforced concrete columns](#). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(5):846–859.
- [9] McKenna, F., Fenves, G. L. (2013). Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees). In *Pacific Earthquake Engineering Research Center; University of California: California, CA, USA*.
- [10] Ibarra, L. F., Medina, R. A., Krawinkler, H. (2005). [Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration](#). *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(12):1489–1511.
- [11] Oreta, A. W. C., Kawashima, K. (2003). [Neural Network Modeling of Confined Compressive Strength and Strain of Circular Concrete Columns](#). *Journal of Structural Engineering*, 129(4):554–561.
- [12] Liu, Z., Li, S. (2019). [Development of an ANN-Based Lumped Plasticity Model of RC Columns Using Historical Pseudo-Static Cyclic Test Data](#). *Applied Sciences*, 9(20):4263.
- [13] Lee, C. S., Park, Y., Jeon, J.-S. (2021). [Model parameter prediction of lumped plasticity model for nonlinear simulation of circular reinforced concrete columns](#). *Engineering Structures*, 245:112820.
- [14] Hoàn, P. T. (2021). [Ước lượng khả năng chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông bằng thuật toán máy học](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 15(3V):69–78.
- [15] Mangalathu, S., Jeon, J.-S. (2019). [Machine Learning–Based Failure Mode Recognition of Circular Reinforced Concrete Bridge Columns: Comparative Study](#). *Journal of Structural Engineering*, 145(10): 04019104.
- [16] [NEEShub databases](#).
- [17] [UW-PEER structural performance database](#).
- [18] Mo, Y. L., Wang, S. J. (2000). [Seismic Behavior of RC Columns with Various Tie Configurations](#). *Journal of Structural Engineering*, 126(10):1122–1130.
- [19] Lignos, D. G., Krawinkler, H., Whittaker, A. S. (2010). [Prediction and validation of sidesway collapse of two scale models of a 4-story steel moment frame](#). *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40 (7):807–825.