

ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH ĐỘNG PHI TUYẾN THEO LỊCH SỬ THỜI GIAN MỚI VÀO PHẦN MỀM OPENSEES

TS. TRẦN NGỌC CƯỜNG

Công ty TNHH Tham&Wong Việt Nam

Tóm tắt: Bài báo này giới thiệu việc ứng dụng một phương pháp phân tích động phi tuyến theo lịch sử thời gian mới vào phần mềm OpenSees để giải các bài toán động phi tuyến trong xây dựng. Ưu điểm nổi bật của phương pháp phân tích này là có thể tiết kiệm được lên đến 95% thời gian tính toán so với phương pháp truyền thống. Việc ứng dụng này cho phép áp dụng phương pháp phân tích mới với các mô-đun tính toán có sẵn trong OpenSees.

Từ khóa: động phi tuyến, integration method, OpenSees.

Abstract: This paper introduces the application of a novel direct integration method into the OpenSees framework to solve the problems of dynamic structures. The main advantage of the novel method is that it can save up to 95% the computational effort in compare to the use of a traditional integration method such as average acceleration method while the accuracy of the results is almost the same. The application of the method allows solving complicated nonlinear problems using the available modules in OpenSees software.

1. Phương pháp phân tích động phi tuyến theo lịch sử thời gian

Phân tích động lực học phi tuyến theo lịch sử thời gian (gọi tắt là động phi tuyến) có các tên gọi khác nhau bằng tiếng Anh như *direct integration method*, *transient algorithms*, *time-history analysis*, hoặc *step-by-step method*[1]. Phương pháp này được đánh giá là một trong những công cụ mạnh nhất để phân tích sự làm việc của kết cấu công trình dưới các tác động động học như va chạm, nổ, sóng, đặc biệt là tác động động đất. Khi áp dụng phương pháp phân tích động phi tuyến này, các thông số dao động của công trình như chuyển vị, vận tốc, gia tốc được tính toán theo từng bước thời gian nhỏ. Phương pháp này cho phép phân tích với độ chính xác cao sự làm việc của kết cấu công trình, cả phân tích tuyến tính đàn hồi và phân tích phi tuyến hình học hoặc phi tuyến vật liệu, do đó nó được khuyến

khích áp dụng trong nhiều tiêu chuẩn của các nước trên thế giới như Mỹ [2], Canada [3], Châu Âu [4]. Tiêu chuẩn thiết kế chống động đất hiện hành của Việt Nam [5] cũng khuyến khích áp dụng phương pháp này bên cạnh phương pháp khá quen thuộc với các kỹ sư thiết kế ở Việt Nam là phương pháp phổ phản ứng đàn hồi. Lưu ý rằng phương pháp phổ phản ứng đàn hồi không cho phép phân tích phi tuyến sự làm việc của kết cấu mà sự làm việc phi tuyến chỉ được mô phỏng một cách tương đối qua hệ số ứng xử η .

Tuy nhiên, phương pháp phân tích động phi tuyến này có một nhược điểm rất lớn, đó là nó thường tốn rất nhiều công sức và thời gian tính toán. Phương pháp động phi tuyến đôi khi yêu cầu thời gian và công sức tính toán gấp hơn 10 lần so với sử dụng phương pháp phổ phản ứng đàn hồi, tùy thuộc vào độ phức tạp của kết cấu được phân tích, tính phi tuyến vật liệu sử dụng cho kết cấu và tổng thời gian phân tích (*duration time*). Nhược điểm này là do trong số các phương pháp phân tích động phi tuyến được dùng phổ biến hiện nay như phương pháp Newmark [6], Wilson- θ [7], HHT [8], WBZ [9], Generalized – α [10], chúng đều là các phương pháp nội ẩn thức (*implicit*). Khi phân tích động phi tuyến trong mỗi bước các phương pháp này đều có yêu cầu dùng thuật toán tính lặp Newton-Raphson để tìm ra kết quả [11]. Sử dụng thuật toán tính lặp Newton-Raphson thường tốn khá nhiều thời gian và công sức tính toán do phải thử nhiều lần cho đến khi tìm ra được kết quả với sai số nhỏ hơn sai số cho phép định sẵn theo yêu cầu về độ chính xác của kết quả. Số vòng lặp phụ thuộc vào độ phức tạp của kết cấu và tính phi tuyến của vật liệu, thường rơi vào khoảng từ 10 đến 25 vòng cho một bước. Có một trường hợp tính của phương pháp Newmark thuộc họ phương pháp ngoại hiển thức (*explicit*) tương ứng với giá trị $\beta = 0$ và $\gamma = 0.5$, trường hợp tính này không cần sử dụng thuật toán Newton-Raphson, tuy nhiên nó lại có điều kiện ổn định. Khi tính toán với hệ kết cấu với các dạng dao

động bậc cao (*high-mode*) có tần số dao động lớn (*high-frequency*), giá trị bước thời gian của phương pháp ngoại hiển thức này thường rất nhỏ do bị khống chế bởi điều kiện ổn định, do đó tuy công sức tính toán trong một bước là nhỏ nhưng số bước tính toán lại rất lớn nên công sức tính toán chung vẫn không được giảm đi.

Có hai cách để khắc phục nhược điểm của phương pháp động phi tuyến. Cách thứ nhất là sử dụng những hệ máy tính mạnh, hoặc có thể kết nối song song nhiều máy tính để phân tích một cách đồng thời nhằm làm giảm thời gian tính toán, tuy nhiên cách này thường khá tốn kém tiền bạc cho các chi phí đầu tư, bảo quản và vận hành máy móc. Cách thứ hai đó là khắc phục những nhược điểm nội tại của phương pháp phân tích động phi tuyến bằng cách đề xuất những phương pháp tính mới với hiệu quả tính toán cao hơn trong khi vẫn đảm bảo độ chính xác tương đương với các phương pháp truyền thống.

Một trong những phương pháp đã được phát triển thành công và được giới thiệu trong tài liệu [12]. Phương pháp này có đầy đủ các đặc điểm tính toán của các phương pháp thường được dùng như Newmark, HHT, WBZ, generalized- α như có độ chính xác cấp 2 (*second-order of accuracy*), hệ số cản nhớt số (*numerical damping ratio*) có thể điều chỉnh bằng tham số để loại bỏ ảnh hưởng của các dạng dao động bậc cao. Ưu điểm chính của phương pháp này là tùy thuộc họ phương pháp ngoại hiển thức nhưng lại không có điều kiện ổn định, do đó, nó đã tích hợp được ưu điểm của cả hai loại phương pháp nội ẩn thức và ngoại hiển thức. Thời gian tính toán khi sử dụng phương pháp này đã được chứng minh là có thể tiết kiệm được từ 80% đến 99% so với khi sử dụng phương pháp gia tốc trung bình (*Average acceleration method - AAM*) hoặc phương pháp ngoại hiển thức Newmark (*Newmark explicit method - NEM*) [12]. Trong bài báo này, phương pháp mới được gọi tên là phương pháp CHHT2, viết tắt của cụm từ tiếng Anh "*Chang HHT two-step method*" [12].

Vì phương pháp CHHT2 mới được đề xuất trong thời gian gần đây cho nên dù có nhiều ưu điểm nhưng nó chưa được ứng dụng một cách rộng rãi. Rõ ràng việc người dùng tự áp dụng phương

pháp tính mới này vào vào các phần mềm phân tích kết cấu được dùng phổ biến hiện nay như SAP, ETABS, MIDAS, ANSYS là không khả thi vì các phần mềm này là các phần mềm có mã nguồn đóng (*closed-source*). Việc viết một phần mềm mới để giải một bài toán kết cấu qua tất cả các bước như lập mô hình tính, xây dựng ma trận khối lượng, độ cứng, độ cản nhớt, mô phỏng sự làm việc của cấu kiện và vật liệu, giải phương trình ma trận tìm kết quả, xuất kết quả tính, ... là một việc rất khó khăn và tốn kém thời gian cũng như tiền bạc vì việc này đòi hỏi kiến thức từ nhiều lĩnh vực khác nhau như toán học, khoa học vật liệu, kỹ thuật lập trình. Việc này thường vượt quá sự hiểu biết của một người, ngay cả với những người làm nghiên cứu chuyên nghiệp, do mỗi người thường chỉ nghiên cứu và am hiểu về một số lĩnh vực riêng lẻ. Nhìn chung, việc tự viết một chương trình để giải bài toán kết cấu qua tất cả các bước thường chỉ khả thi với những bài toán đơn giản nhất. Nhược điểm này chính là ý tưởng để xây dựng phần mềm OpenSees với mã nguồn mở và viết bằng ngôn ngữ lập trình hướng đối tượng C++. Với cách xây dựng chương trình theo dạng mô-đun, OpenSees cho phép mỗi người có thể tập trung vào lĩnh vực nghiên cứu của mình mà không cần am hiểu quá sâu về những lĩnh vực khác. Trong trường hợp này, phương pháp CHHT2 được áp dụng vào OpenSees bằng cách chỉ thêm vào một mô-đun mới bên cạnh những mô-đun đã có sẵn của OpenSees.

2. Phần mềm OpenSees

OpenSees là chữ viết tắt của cụm từ tiếng Anh "*Open System for Earthquake Engineering Simulation*". OpenSees là phần mềm được phát triển bởi Trung tâm Nghiên cứu Kỹ thuật Động đất Thái Bình Dương – Hoa Kỳ (PEER) từ năm 1997 [13]. Mục đích chính của OpenSees là dùng để mô phỏng kết cấu công trình hoặc nền đất dưới tác động của động đất. Hiện nay, OpenSees được đánh giá là phần mềm được sử dụng rộng rãi nhất trong việc nghiên cứu động đất công trình, PEER công bố rằng có khoảng 75000 người từ 175 quốc gia (căn cứ vào địa chỉ IP của máy tính) đã truy cập vào trang web chính thức của OpenSees với 1,3 triệu lượt xem (số liệu năm 2013) [14]. Hiện tại, OpenSees đã tạo nên một cộng đồng đồng đẳng những người nghiên cứu, sử dụng, chia sẻ và thảo

luận trên toàn thế giới. Ở Việt Nam cũng có một số nhóm nghiên cứu quan tâm sử dụng phần mềm này.

Cấu trúc của OpenSees bao gồm nhiều mô-đun khác nhau. Cũng giống như các phần mềm thương mại phổ biến hiện nay, OpenSees sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn để mô phỏng đối tượng tính toán. Như đã nói ở trên, việc cấu trúc chương trình được chia thành nhiều mô-đun độc lập giúp cho người nghiên cứu chỉ cần tập trung vào lĩnh vực nghiên cứu chuyên sâu của mình mà không cần quá quan tâm về những mô-đun còn lại. Việc chuyên môn hóa trong đó mỗi người có thể tập trung phát triển những một hoặc một số mô-đun thuộc lĩnh vực nghiên cứu sẽ làm cho chương trình có chất lượng tốt hơn so với việc phải xây dựng một chương trình từ đầu đến cuối.

OpenSees có hai ưu điểm nổi bật là *miễn phí* và *mã nguồn mở* (*open-source*). Trong khi những phần mềm phân tích kết cấu thường có giá khá cao, ví dụ một phiên bản *Standalone* dành cho một người dùng của phần mềm SAP2000 có giá lên đến 12000 USD[15], việc được sử dụng miễn phí hoàn toàn là một trong những yếu tố làm cho OpenSees được rất nhiều người trên toàn thế giới quan tâm. Thêm vào đó, mã nguồn của các phần mềm phân tích kết cấu thường đóng, chỉ cho phép người dùng thay đổi, thêm bớt các cấu kiện và đặc tính vật liệu nhưng không thể xem hoặc thay đổi mã nguồn gốc của chương trình. McKenna [16] đã chỉ ra nhược điểm của các phần mềm mã nguồn đóng đó là không thể thử áp dụng những phương pháp mới, phụ thuộc vào ý tưởng và phương pháp của người lập trình, và chậm thay đổi, sửa chữa các lỗi phát sinh. Nhìn chung, OpenSees là phần mềm được phát triển cho mục đích thử nghiệm và nghiên cứu trong khi những phần mềm thương mại thường chỉ được áp dụng trong tính toán và thiết kế thông thường.

Một đặc điểm nữa của phần mềm OpenSees đó là nó được viết chủ yếu bằng ngôn ngữ lập trình hướng đối tượng (*object-oriented*) C++, do đó nó có những ưu điểm của phần mềm viết bằng ngôn ngữ này. *Thứ nhất*, những phần mềm viết bằng ngôn ngữ C++ có đặc điểm là có thể chia chương trình thành các mô-đun riêng biệt, có thể mở rộng, và có thể tái sử dụng các đoạn mã chương trình, do đó

việc phát triển, mở rộng hoặc thêm bớt các mô-đun là có thể thực hiện được. Đây là ưu điểm mà những chương trình viết bằng ngôn ngữ lập trình hướng thủ tục (*procedure-oriented*), ví dụ như ngôn ngữ Fortran, không có được. *Thứ hai*, chương trình viết bằng ngôn ngữ lập trình hướng đối tượng thường hoạt động ổn định hơn, do việc thay đổi, thêm bớt một mô-đun ít làm ảnh hưởng đến các mô-đun còn lại. *Thứ ba*, chương trình xây dựng bằng ngôn ngữ lập trình hướng đối tượng được viết nhanh hơn do có thể tái sử dụng các đoạn mã chương trình, ví dụ khi phát triển hai mô-đun có tính năng gần giống nhau thì người lập trình thường chỉ cần sử dụng mô-đun có sẵn rồi thay đổi những phần khác nhau thay vì phải viết lại từ đầu. *Thứ tư*, việc có thể sử dụng lại các đoạn mã có sẵn làm cho việc phát triển chương trình trở nên nhanh hơn và rẻ hơn.

Bên cạnh những ưu điểm nói trên, OpenSees cũng có một số nhược điểm. *Thứ nhất*, OpenSees không có giao diện đồ họa như các phần mềm thương mại, do đó người dùng phải mất thời gian để làm quen với việc nhập dữ liệu bằng ngôn ngữ TCL. Nhược điểm này có thể được khắc phục bằng một số phần mềm hỗ trợ việc nhập-xuất dữ liệu như OpenSees Navigator hoặc BuildingTcl, dù những phần mềm này hoạt động chưa thật sự tiện dụng như những phần mềm thương mại khác. *Thứ hai*, việc sử dụng ngôn ngữ lập trình hướng đối tượng và viết dưới dạng mô-đun sẽ làm chương trình mất một khoảng thời gian để xử lý, liên kết và tương tác giữa các mô-đun với nhau. McKenna [16] đã chứng minh rằng việc sử dụng ngôn ngữ C++ sẽ làm chương trình mất thêm khoảng từ 10 đến 15% thời gian để xử lý so với việc viết chương trình bằng ngôn ngữ lập trình hướng thủ tục. Tuy nhiên, McKenna cũng chỉ ra rằng thời gian mất thêm này là nhỏ so với thời gian tiết kiệm được từ việc nghiên cứu, lập trình, sửa chữa, mở rộng khi sử dụng ngôn ngữ lập trình hướng đối tượng.

Hiện tại, OpenSees đã phát hành phiên bản 2.5.0. Phiên bản này cho phép người dùng ứng dụng nghiên cứu các tác động của gió, động đất, lửa với các kết cấu phi tuyến công trình hoặc nền đất. Đối tượng nghiên cứu có thể được mô hình hóa với nhiều dạng vật liệu bê tông, cốt thép, nền đất, với nhiều dạng cấu kiện cột, dầm, sàn, đất nền khác nhau. OpenSees cũng cho phép mô hình hóa kết

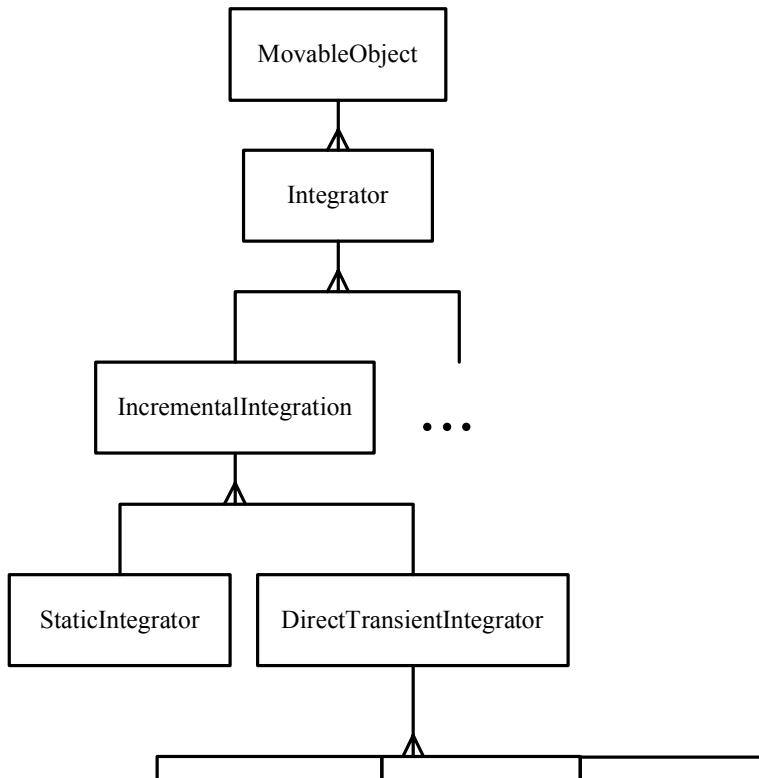
hợp đồng thời cả công trình xây dựng và nền đất trong một mô hình duy nhất. Trong phiên bản 2.5.0, OpenSees cho phép nghiên cứu với hơn 150 loại vật liệu, 100 loại cấu kiện, 15 thuật toán, 20 phương pháp giải phương trình ma trận, 30 phương pháp phân tích phi tuyến trong đó có 15 phương pháp giả lập động (*hybrid simulation*). Có thể nói rằng, OpenSees là một công cụ rất tốt cho việc nghiên cứu và ứng dụng thiết kế, tính toán các tác động động lực học với công trình.

Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng đã có một bài viết giới thiệu việc áp dụng phần mềm OpenSees trong lập trình mô phỏng kết cấu cầu chịu tải trọng động đất [17]. Tuy nhiên, bài báo mới chỉ dừng lại ở việc giới thiệu OpenSees và so sánh

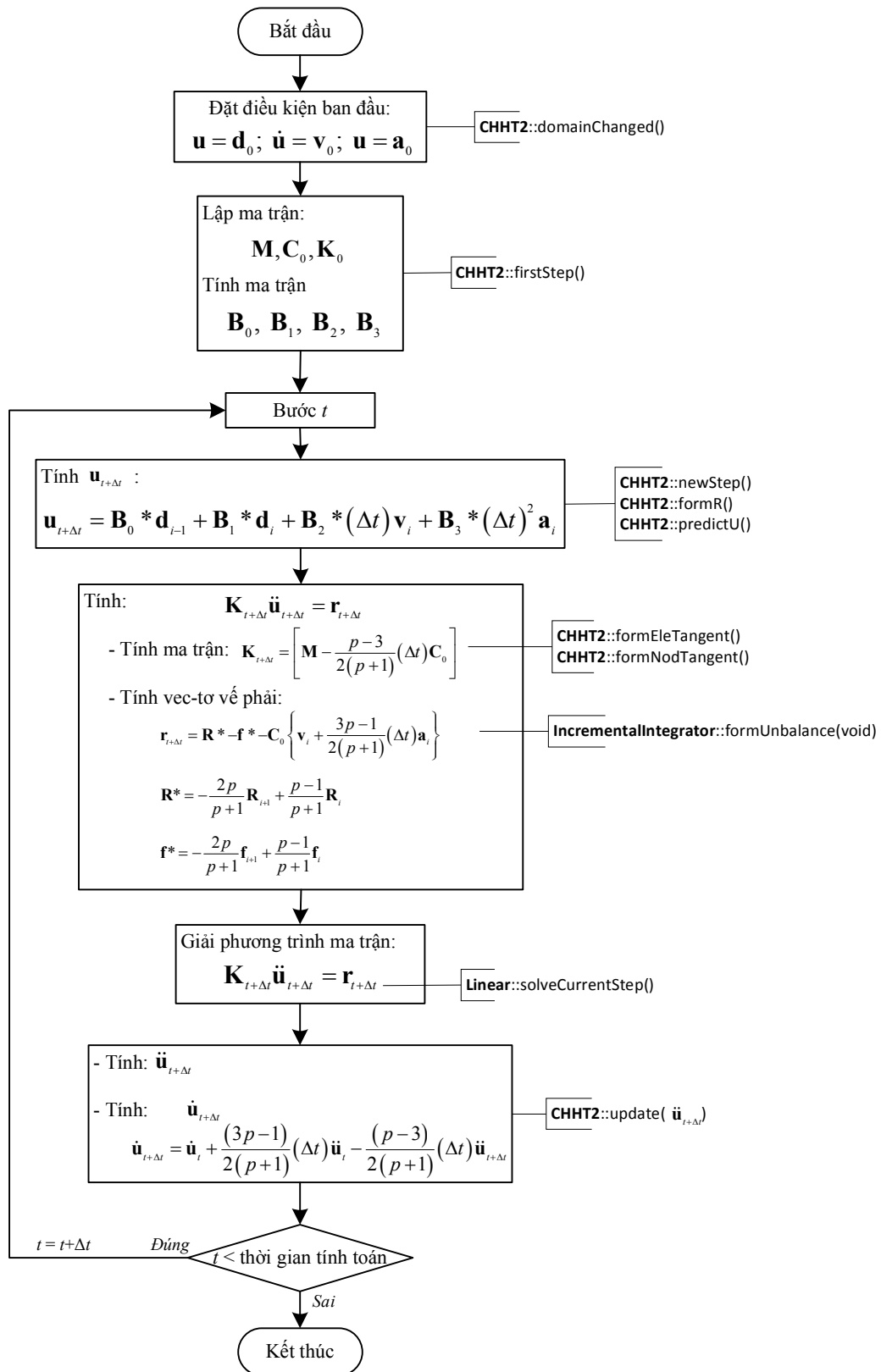
kết quả tính toán với phần mềm Midas/Civil mà chưa có sự thay đổi hay phát triển các mô-đun tính toán trong OpenSees. Do đó, bài báo mới chỉ khai thác được ưu điểm là OpenSees được dùng như một phần mềm miễn phí mà chưa khai thác được ưu điểm mã nguồn mở của chương trình.

3. Áp dụng phương pháp phân tích động phi tuyến mới vào OpenSees

Việc áp dụng phương pháp CHHT2 vào phần mềm OpenSees được thực hiện bằng cách thêm vào cấu trúc sẵn có của chương trình một lớp (*class*) có tên CHHT2. Lớp này nằm cùng cấp với các lớp phân tích động phi tuyến khác của OpenSees như Newmark, NewmarkExplicit, HHT như trình bày trong hình 1.



Hình 1. Hệ thống các lớp phân tích động phi tuyến của OpenSees



Hình 2. Sơ đồ khối các bước tính toán của lớp CHHT2

Cấu trúc và các hàm của lớp CHHT2 về cơ bản giống với lớp NewmarkExplicit vì cả hai đều thuộc họ ngoại hiển thức, do đó nhiều đoạn mã được viết cho lớp NewmarkExplicit được tái sử dụng. Điểm khác nhau lớn nhất giữa hai lớp này nằm ở phương

trình tính toán vec-tơ chuyển vị. Trong khi vec-tơ chuyển vị ở bước thứ $(i+1)$ được tính toán bằng phương pháp NewmarkExplicit theo công thức:

$$\mathbf{d}_{i+1} = \mathbf{d}_i + (\Delta t) \mathbf{v}_i + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \mathbf{a}_i$$

thì phương trình tính vec-tơ chuyển vị của phương pháp CHHT2 phức tạp hơn với công thức:

$$d_{i+1} = B_0 d_{i-1} + B_1 d_i + B_2 (\Delta t) v_i + B_3 (\Delta t)^2 a_i$$

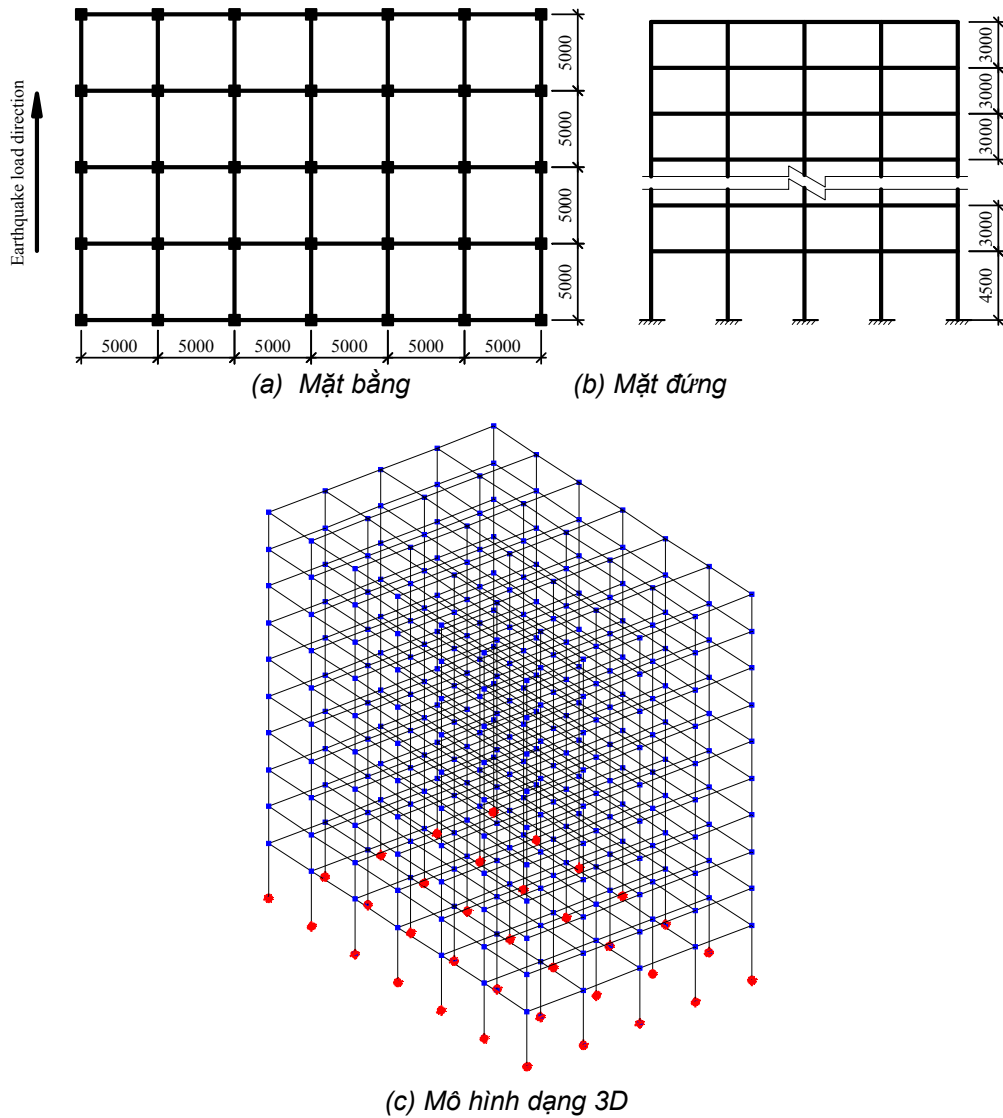
Trong công thức (2), các ma trận từ B_0 đến B_3 được tính từ các ma trận khối lượng M , ma trận độ cản nhớt C_0 và độ cứng ban đầu K_0 (xem chi tiết công thức này tại tài liệu [12]). Sơ đồ khối tính toán các bước của phương pháp CHHT2 được trình bày trong Hình 2.

Trong khuôn khổ của một bài báo không thể giới thiệu đầy đủ các bước áp dụng phương pháp CHHT2 vào OpenSees, do đó bài báo chỉ dừng lại ở

việc giới thiệu kết quả nghiên cứu mà không đi sâu vào trình bày chi tiết các kỹ thuật lập trình của việc áp dụng này.

4. Ví dụ minh họa

Một công trình bê tông cốt thép cao 10 tầng chịu tải trọng động đất được tính toán trong ví dụ này. Bước cột của công trình là 5m, chiều cao tầng 1 là 4,5m trong khi chiều cao các tầng từ 2 đến 9 là 3,0m. Mặt bằng, mặt đứng và mô hình dạng 3D của công trình được thể hiện trong Hình 3, tiết diện các cấu kiện cột, dầm và bố trí cốt thép được in trong Hình 4.



Hình 3. Mô hình công trình 10 tầng

Sử dụng phần mềm OpenSees, các cấu kiện cột, dầm của công trình được mô phỏng như

các cấu kiện dạng sợi (*fiber element*). Cách mô phỏng này cũng thường được sử dụng phổ biến

KẾT CẤU – CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

trong các phần mềm sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn khác như SAP hay ETABS. Vật liệu bê tông được chia làm hai loại, một phần bê tông chịu bó cứng (*confined concrete*) nằm trong lớp thép đai có cường độ cao hơn và

phần bê tông không chịu bó cứng (*unconfined concrete*) nằm ở lớp vỏ bảo vệ bên ngoài. Trong phần mềm OpenSees, bê tông được định nghĩa là loại *Concrete02* với các thông số tính toán như sau:

Bê tông chịu bó cứng:

$$\begin{aligned} f_c &= -286 \text{ kg/cm}^2 & \varepsilon_{c_0} &= -0,0019 & f_{pcU} &= -57,2 \text{ kg/cm}^2 & \varepsilon_U &= -0,0095 \\ \lambda &= 0,1 & f_t &= 40,4 \text{ kg/cm}^2 & E_{tsf} &= 15400 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Bê tông không chịu bó cứng:

$$\begin{aligned} f_c &= -220 \text{ kg/cm}^2 & \varepsilon_{c_0} &= -0,003 & f_{pcU} &= -44 \text{ kg/cm}^2 & \varepsilon_U &= -0,01 \\ \lambda &= 0,1 & f_t &= 30,8 \text{ kg/cm}^2 & E_{tsf} &= 15400 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

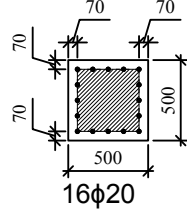
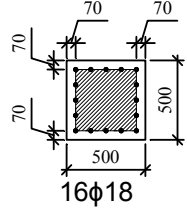
Cốt thép được định nghĩa là loại *Steel01* với các thông số:

$$f_y = 3600 \text{ kg/cm}^2 \quad E = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \quad E_p = 0,05 * E \quad (5)$$

Bản sàn bê tông cốt thép có chiều dày 20 cm, trọng lượng riêng 2500 kg/m³. Phần tải trọng do sàn gây ra được phân bố đều cho các nút ở các tầng. Công trình chịu tác động của tải trọng động đất với gia tốc nền được lấy theo phổ ghi

gia tốc của trận động đất Chi-Chi xảy ra ở Đài Loan vào năm 1999, đỉnh gia tốc nền được lấy bằng 1,5g. Trong mô hình tính của công trình này mỗi nút sẽ có 6 bậc tự do, do đó số bậc tự do của mô hình là 2100.

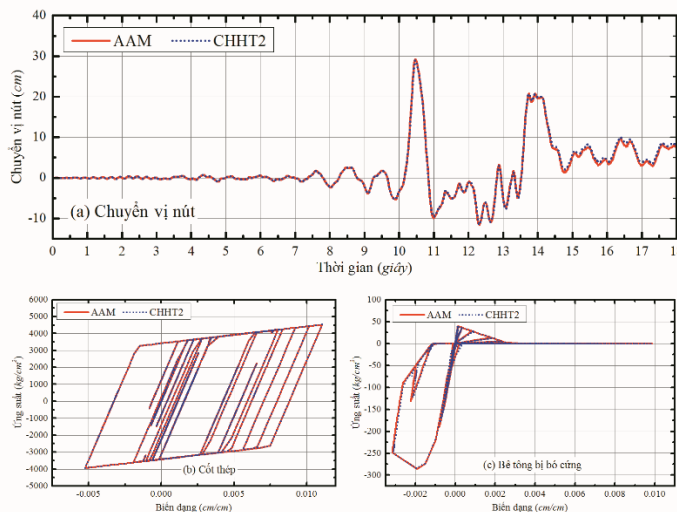
Tầng	Dầm	Cột	
		Cột giữa	Cột biên
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

Tầng	Dầm	Cột	
		Cột giữa	Cột biên
8			
9			
10			

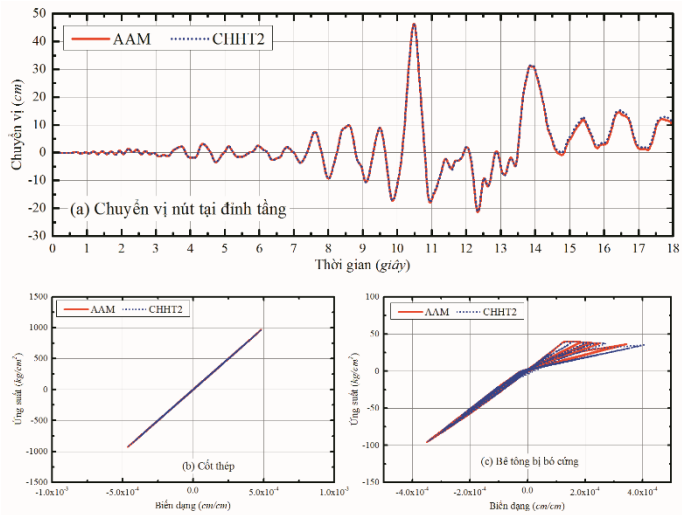
Hình 4. Tiết diện và bố trí cốt thép cấu kiện của công trình

Tần số dao động riêng của ba dạng dao động đầu tiên của công trình trước khi biến dạng phi tuyến được tính bằng OpenSees lần lượt là $\omega_1 = 0,735$, $\omega_2 = 0,747$ và $\omega_3 = 0,760$ (rad/s), tương ứng với chu kỳ dao động riêng là $T_1 = 8,54$, $T_2 = 8,40$ và $T_3 = 8,26$ (giây). Mô hình được tính toán bằng hai phương pháp AAM và phương pháp CHHT2 với giá trị tham số $\rho = 1$, bước thời gian tính toán cho cả hai phương pháp là $\Delta t = 0,005$ giây. Cần nói thêm rằng phương pháp AAM là phương pháp nội ẩn thức được sử dụng rộng rãi và cho kết quả chính xác nhất hiện nay. OpenSees được xử lý bằng máy tính cá nhân với bộ vi xử lý Intel® Core™ i3 – 4160 CPU, RAM 4 GB. Kết quả tính toán chuyển vị nút tại cao độ các tầng và mối quan hệ giữa biến dạng - ứng suất của vật liệu thép và bê tông cột của các tầng 1, 5, 10 được in trong các hình từ Hình 5 đến Hình 7. Thời gian tính toán của hai phương pháp được in trong Hình 8.

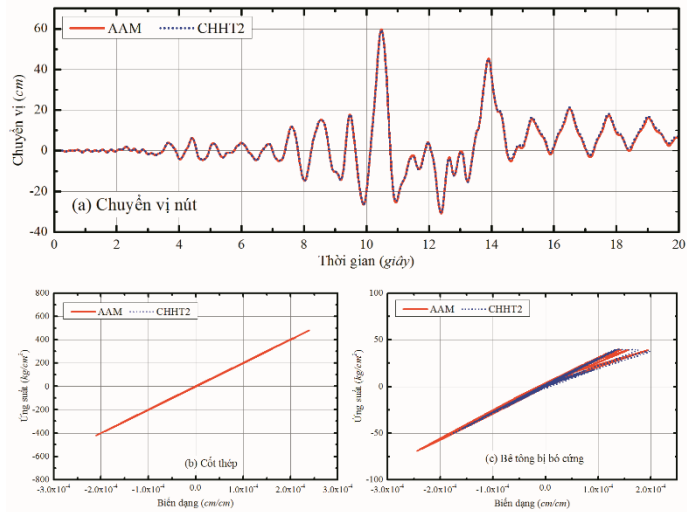
Kết quả tính toán cho thấy đường cong biểu diễn chuyển vị nút của các tầng được tính bằng hai phương pháp AAM và CHHT2 gần như trùng khớp với nhau. Đường cong biểu diễn mối quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu cho thấy vật liệu đã ứng xử hoàn toàn phi tuyến với cả vật liệu thép và bê tông dưới tác động của lực động đất rất lớn. So sánh thời gian phân tích của hai phương pháp cho thấy rằng thời gian phân tích bằng phương pháp AAM là gần 31 giờ trong khi thời gian phân tích bằng phương pháp CHHT2 chỉ hơn 1 giờ, bằng 4,3% so với thời gian phân tích bằng phương pháp AAM. Điều này cho thấy rằng phương pháp CHHT2 cho kết quả phân tích động phi tuyến có độ chính xác tương đương trong khi thời gian phân tích được giảm đi đáng kể.



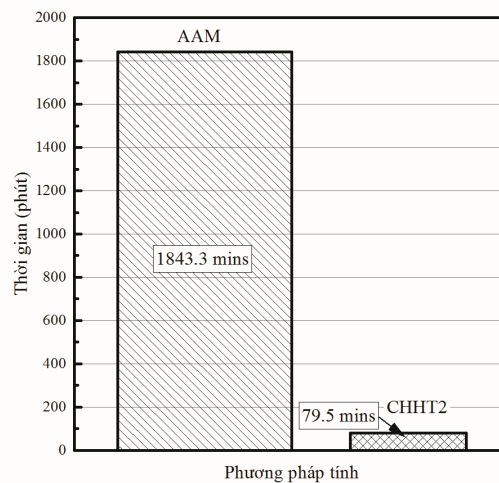
Hình 5. Chuyển vị nút và quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu của cột tầng 1



Hình 6. Chuyển vị nút và quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu của cột tầng 5



Hình 7. Chuyển vị nút và quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu của cột tầng 10



Hình 8. So sánh thời gian phân tích giữa hai phương pháp

5. Kết luận

Bài báo đã giới thiệu một cách ứng dụng phương pháp phân tích động phi tuyến mới để giải

các bài toán kết cấu phức tạp. Ưu điểm chính của phương pháp phân tích mới này là tiết kiệm được rất nhiều công sức và thời gian tính toán so với

phương pháp truyền thống trong khi kết quả thu được vẫn có độ chính xác tương đương. Trong cách ứng dụng này, phương pháp phân tích động phi tuyến được đưa vào như một mô-đun tính toán mới, cho phép sử dụng trên nền tảng những mô-đun sẵn có của OpenSees. Ví dụ minh họa với một công trình 10 tầng với 2100 bậc tự do đã chứng minh phương pháp mới này cho kết quả chính xác tương tự trong khi thời gian phân tích chỉ bằng chưa đến 5% so với một phương pháp truyền thống đang được sử dụng phổ biến.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. W. Clough and J. Penzien (2010), Dynamics of structures, Berkeley (California): Computers and structures, 2010.
- [2] I. C. Council (2009), "International Building Code 2009," Washington, D.C.
- [3] Canadian Commission on Building and Fire Codes (2010), "The National Building Code of Canada," National Research Council, Ottawa.
- [4] E. S. E. 1.-1. Committee European de Normalisation (2004), "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1, General rules, seismic actions and rules for buildings" *European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium*.
- [5] TCVN 9386:2012 (2012), Thiết kế công trình chịu động đất, Hà Nội: Nhà xuất bản Xây dựng.
- [6] N. Newmark (1959), "A method of computation for structural dynamics" *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, vol. 85, pp. 67-94*.
- [7] E. Wilson, I. Farhoomand and K. Bathe (1973), "Nonlinear dynamic analysis of complex structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 1, pp. 241-252*.
- [8] H. Hilber, T. Hughes and R. Taylor (1977), "Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics.," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 5, pp. 283-292*.
- [9] W. Wood, M. Bossak and O. Zienkiewicz (1980), "An alpha modification of Newmark's method" *International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 15, pp. 1562- 1566, 1980*.
- [10] J. Chung and G. Hulbert (1993), "A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: The generalized- α method," *Journal of Applied Mechanics, vol. 60(6), pp. 371-375*.
- [11] A. K. Chopra (1995), Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering, Englewood Cliffs, N.J.
- [12] S.-Y. Chang and T. N. Cường (2015), "Phương pháp phân tích động phi tuyến kết cấu theo lịch sử thời gian không có điều kiện ổn định," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, vol. 4, pp. 3-11*.
- [13] OpenSees, "Open System for Earthquake Engineering Simulation-Home Page," 2015. [Online]. Available: <http://opensees.berkeley.edu/>. [Accessed 20 09 2015].
- [14] S. A. Mahin and F. McKenna (2013), "Report on OpenSees highlights," University of California, Berkeley, California, U.S.A.
- [15] Computers and Structures Inc., 21 08 2015. [Online]. Available: <http://www.csiamerica.com/products/sap2000>. [Accessed 21 08 2015].
- [16] F. T. McKenna (1997), Object-oriented finite element programming: Frameworks for analysis, algorithms and parallel computing - PhD dissertation, California: University of California, Berkeley.
- [17] T. T. Đạt, N. Đ. Phúc và T. A. Bình, "Ứng dụng phần mềm mã nguồn mở OpenSees trong lập trình mô phỏng cầu chịu động đất," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, vol. 4, pp. 12-20, 2015*.

Ngày nhận bài: 27/12/2016.

Ngày nhận bài sửa lần cuối: 13/2/2017.