



BỘ XÂY DỰNG
Ministry Of Construction - MOC
VIỆN KHOA HỌC CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG
Vietnam Institute for Building Science and Technology - IBST
Add: 81 Trần Cung, Nghĩa Tân, Cầu Giấy, Hà Nội
Website: www.ibst.vn - Email: vkhnxd@ibst.vn - Tel: 04 37544196 - Fax: 04 36361197

CÁC PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH ĐỘNG PHI TUYẾN KẾT CẤU THEO LỊCH SỬ THỜI GIAN TRONG SAP 2000 (PHẦN 2)

ThS. **TRẦN NGỌC CƯỜNG**
Viện KHCN Xây dựng

Tóm tắt: Trong phần 1, bài báo đã trình bày những đặc điểm cơ bản của năm phương pháp phân tích phi tuyến động được tích hợp sẵn trong phần mềm SAP 2000. Trong phần 2 này, bài báo sẽ giải thích các thông số khi áp dụng phân tích động phi tuyến, đồng thời đưa ra một số ví dụ minh họa nhằm làm rõ đặc điểm của các phương pháp đã trình bày ở phần 1.

1. Các thông số cơ bản

a. Cửa sổ Load Case Data

Cửa sổ *Load Case Data – Nonlinear Direct Integration History* trong SAP2000 được dùng để định nghĩa các phương pháp phân tích và kiểu phân tích. Các thuật ngữ trong cửa sổ này đều đơn giản và dễ hiểu nên có thể không cần giải thích thêm. Góc bên dưới trong phần *Other*

Parameters có hai ô, ô *Time Integration* để chọn phương pháp phân tích và điều chỉnh các thông số đầu vào, ô *Nonlinear Parameters* dùng để chỉnh các thông số phụ (hình 1). Nhập số bước thời gian xuất ra (*Number of Output Time Steps*) và giá trị bước thời gian xuất ra (*Output Time Step Size*) vào hai ô tương ứng như trong Hình 1. Lưu ý đây là số bước thời gian và giá trị bước thời gian xuất ra chứ không phải là bước thời gian tính toán (Δt) như trong các công thức trình bày ở phần 1 của bài báo [1], bước thời gian tính toán được chương trình tính tự động, căn cứ vào điều kiện hội tụ của kết quả. Tuy nhiên, do giá trị bước thời gian tính toán của chương trình luôn nhỏ hơn hoặc bằng giá trị bước thời gian xuất ra, do đó giá trị bước thời gian xuất ra này có thể được dùng để khống chế giá trị lớn nhất của bước thời gian tính toán Δt .

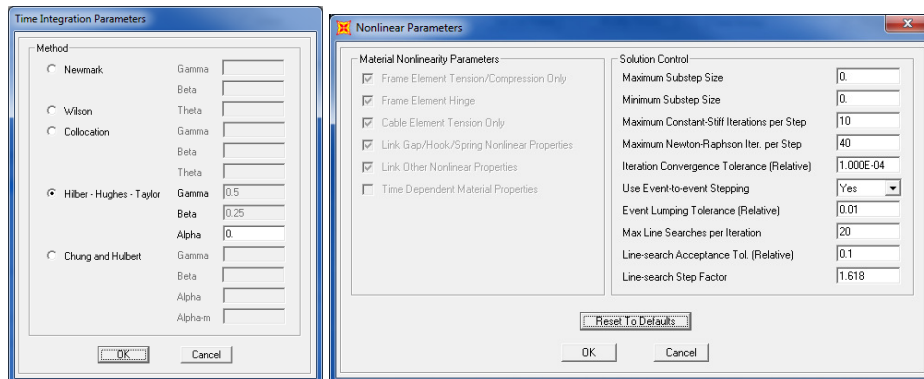
Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	ChiChiEQ	0.5
Accel	U1	ChiChiEQ	0.5

Hình 1. Cửa sổ Load Case Data

b. Cửa sổ Time Integration Parameters

Cửa sổ *Time Integration Parameters* (hình 2) cho phép chọn phương pháp phân tích và các hệ số đầu vào (như α , β , γ , θ ,...). Việc chọn phương

pháp và các thông số đầu vào này căn cứ vào yêu cầu tính toán và các tính chất số của mỗi phương pháp như đã phân tích ở phần 1 bài báo này [1].



Hình 2. Cửa sổ *Integration Parameters* và *Nonlinear Parameters*

c. Cửa sổ Nonlinear Parameters

Ý nghĩa của các thông số trong cửa sổ *Nonlinear Parameters* (hình 2) được giải thích như sau [2]:

- *Maximum Substep Size (a)*: Quy định giá trị lớn nhất cho một bước thời gian tính toán (Δt). Khi người dùng đặt giá trị này, đầu tiên chương trình sẽ tính toán với giá trị Δt bằng giá trị lớn nhất. Nếu như kết quả tính không hội tụ, chương trình sẽ tự động chia nhỏ hơn bước thời gian Δt và lặp lại quá trình tính toán. Giá trị *Maximum Substep Size* không được lớn hơn giá trị bước thời gian xuất ra. Trong trường hợp không gán giá trị cho thông số này (mặc định bằng 0), chương trình sẽ tự động gán giá trị bằng giá trị bước thời gian xuất ra (*Output Time Step*);

- *Minimum Substep Size (b)*: Quy định giá trị nhỏ nhất cho một bước thời gian Δt tính toán. Khi phân tích phi tuyến, nếu kết quả tính không hội tụ sau một số bước tính toán nhất định, SAP2000 sẽ tự động giảm giá trị Δt và lặp lại quy trình tính toán. Do thời gian phân tích phụ thuộc vào số lượng các bước tính toán này, để tránh lãng phí thời gian xử lý và tránh cho chương trình bị lỗi tràn bộ nhớ (lỗi *Run-time error*), người dùng có thể quy định số bước thời gian nhỏ nhất mà chương trình sẽ sử dụng, ví dụ bằng 0,005 giây. Nếu đã giảm giá trị Δt đến giá trị nhỏ nhất này mà kết quả vẫn không hội tụ thì chương trình sẽ tự động dừng lại và đưa ra cảnh báo;

- *Maximum Constant-Stiffness Iterations per Step (c)* và *Maximum Newton-Raphson Iterations per Step (d)*: Phương pháp tính lặp với ma trận độ cứng là hằng số còn được gọi là phương pháp *Newton-Raphson cải tiến (Modified Newton-Raphson)*. Đầu tiên chương trình sẽ tính lặp bằng phương pháp *Modified Newton-Raphson*, sau số bước đã quy định ở (c), nếu kết quả không hội tụ thì chương trình sẽ chuyển sang tính bằng phương pháp *Newton-Raphson* với số bước ở (d), khi đó ma trận độ cứng sẽ được cập nhật sau từng vòng lặp. Nếu cả hai trường hợp này kết quả đều không hội tụ, chương trình sẽ tự động chia nhỏ bước thời gian và lặp lại quá trình tính toán. Theo [2], tính lặp bằng phương pháp *Modified Newton Raphson* thường nhanh hơn (do không phải cập nhật ma trận độ cứng sau mỗi vòng lặp), tuy nhiên tính bằng phương pháp *Newton-Raphson* lại hiệu quả hơn, đặc biệt là với kết cấu dạng sợi cáp và kết cấu có xét đến hiệu ứng phi tuyến hình học. Nếu gán cả hai giá trị ở hai ô này đều bằng 0 thì chương trình sẽ tự động tính số vòng lặp cho phép theo yêu cầu;

- *Iteration Convergence Tolerance (Relative) (e)*: Sai số tương đối cho phép. Sau mỗi vòng lặp, SAP2000 sẽ kiểm tra giá trị sai số, nếu giá trị sai số nhỏ hơn giá trị sai số cho phép thì chương trình sẽ thoát vòng lặp và chuyển sang bước tiếp theo. Giá trị sai số càng nhỏ thì kết quả tính càng chính xác, nhưng mất thêm thời gian để chương trình xử lý;

- *Event-To-Event Stepping (f)* và *Event Lumping Tolerance (g)*: đây là tùy chọn và sai số

cho phép áp dụng với các khớp dẻo nhằm làm giảm số vòng tính lặp trong một bước. Người dùng có thể sử dụng có hoặc không sử dụng với tùy chọn này. Lưu ý rằng tùy chọn này không dùng cho loại cấu kiện cốt sợi (*fiber frame*);

- *Maximum Line Searches per Iteration (h)*, *Line-Search Acceptance Tolerance (Relative) (i)* và *Line-Search Step Factor (j)*: *Line-search* là một thuật toán của SAP 2000 nhằm cải thiện hiệu quả của việc tính lặp bằng cách thử tăng hoặc giảm độ biến thiên của kết quả tính toán nhằm thu được một sai số nhỏ nhất. Do tính hiệu quả và khả năng hội tụ của thuật toán tính lặp *Newton-Raphson* phụ thuộc vào việc chọn giá trị thử ban đầu, thuật toán *line-search* là một bước đệm nhằm giúp cho việc chọn ra giá trị này. Thuật toán này tuy làm tăng khối lượng tính toán trong mỗi bước nhưng lại có thể làm giảm số vòng lặp và cải thiện tính hội tụ của vòng lặp.

Trong các thông số tính toán mô tả ở trên, với những bài toán kết cấu thông thường, người dùng chỉ cần quan tâm đến các thông số từ (a) đến (e), các thông số từ (f) đến (j) có thể để theo giá trị mặc định mà chương trình đưa ra. Cũng cần lưu ý thêm rằng khi sử dụng cho họ phương pháp ngoại hiển thức hoặc khi phân tích động với hệ kết cấu đàn hồi tuyến tính, chỉ cần quan tâm đến giá trị thông số (a) và (b) mà không cần quan tâm đến các thông số còn lại do thuật toán không cần phải tính lặp trong những trường hợp này.

Các thông số cơ bản trình bày trong phần này cũng như các kiến thức liên quan đến về động lực học công trình có thể được tham khảo thêm tại các tài liệu [3], [4], [5].

2. Các ví dụ tính toán

Như đã trình bày ở phần 1 của bài báo [1], SAP 2000 tích hợp sẵn năm phương pháp phân tích phi tuyến động khác nhau. Tuy nhiên, trong phạm vi sử dụng để tính toán kết cấu các công trình thường gặp, về cơ bản chỉ cần quan tâm đến ba đặc điểm chính sau:

Phương pháp sử dụng thuộc họ ngoại hiển thức hay nội ẩn thức;

Phương pháp sử dụng có hay không có hệ số cản nhớt số (*numerical damping ratio*);

Độ chính xác trong kết quả tính toán của phương pháp được sử dụng.

Căn cứ vào các đặc điểm này, để cho người dùng dễ dàng hơn khi lựa chọn các phương pháp tính, các ví dụ tính toán sau đây sẽ chỉ tính toán với các phương pháp sau:

- Phương pháp *Newmark Explicit Method* (viết tắt là NEM): phương pháp ngoại hiển thức có điều kiện ổn định, không có hệ số cản nhớt số (chọn $\beta=0$ và $\gamma=0,5$ trong phương pháp Newmark);

- Phương pháp Hilber – Hughes – Taylor với hệ số $\alpha = 0$ (viết tắt là HHT(0)): đây là phương pháp nội ẩn thức không có điều kiện ổn định, không có hệ số cản nhớt số. Trường hợp tính này cũng tương đương với việc sử dụng phương pháp AAM như đã giải thích ở Phần 1 của bài báo;

- Phương pháp Hilber – Hughes – Taylor với hệ số $\alpha < 0$ (viết tắt là HHT(α)): đây là phương pháp nội ẩn thức không có điều kiện ổn định và có hệ số cản nhớt số.

Các phương pháp này có các đặc điểm tính toán gần như bao gồm đủ các trường hợp tính toán thông thường nên người dùng có thể chỉ cần sử dụng các trường hợp tính này mà không cần dùng đến các phương pháp khác.

2.1 Ví dụ 1: Hệ kết cấu tuyến tính

Hệ kết cấu khung gồm năm bậc tự do với các thông số về khối lượng và độ cứng các tầng (tính cho cả 2 cột) được thể hiện trong hình 3, trong đó độ cứng các tầng được giả thiết là làm việc đàn hồi tuyến tính. Căn cứ vào các thông số này, chu kỳ dao động (*Period*), tần số dao động tự nhiên (*Natural Frequency*), tần số dao động (*Frequency*) và hệ số khối lượng tham gia các dạng dao động (*Participating Mass Ratios*) được tính toán bằng SAP2000 và trình bày trong bảng 1. Vec-tơ của dạng dao động thứ 1 và thứ 5 tính được như sau:

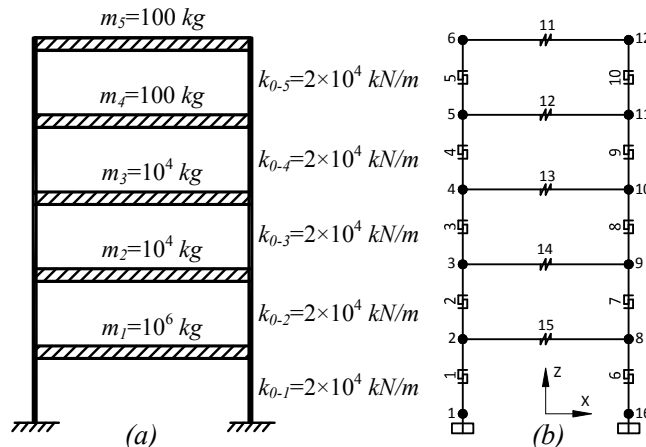
$$v_1 = [0,970 \quad 0,990 \quad 1,000 \quad 1,000 \quad 1,000]^T \quad v_5 = [0 \quad 0 \quad 0,006 \quad -1,621 \quad 1,000]^T \quad (1)$$

Từ bảng 1 có thể thấy các dạng dao động thứ 3, 4, 5 là các dạng dao động bậc cao so với dạng dao động thứ 1 và 2, vì hai lý do: *thứ nhất*, tần số dao động f của các dạng dao động này lớn hơn nhiều lần so với tần số dao động của hai dạng dao động đầu tiên; *thứ hai*, khối lượng kết cấu tham gia vào các dạng dao động 3, 4, 5 là quá nhỏ (nhỏ hơn 0,1% tổng khối lượng) so với dạng dao động 1 và 2. Trong một số trường hợp tính với kết quả

không cần quá chính xác, thậm chí còn có thể coi dạng dao động thứ 2 là dạng dao động bậc cao và chỉ tính với dạng dao động thứ 1.

Cho hệ kết cấu chịu tải trọng là gia tốc nền được giả định có dạng hàm sin như sau:

$$a_g = 1,0 \times \sin(\pi t) \quad (\text{m/s}^2) \quad (2)$$



Hình 3. Hệ kết cấu tuyến tính 5 bậc tự do

Bảng 1. Các thông số động lực học của hệ kết cấu trong ví dụ 1

Dạng dao động	Chu kỳ T (s)	Tần số dao động tự nhiên ω (rad/s)	Tần số dao động f (Hz)	Hệ số khối lượng tham gia dao động
1	1,419	4,427	0,705	0,960
2	0,227	27,707	4,410	0,040
3	0,087	72,191	11,489	0,000
4	0,023	279,070	44,415	0,000
5	0,009	723,990	115,221	0,000

Để xem xét ảnh hưởng của các dạng dao động bậc cao, vận tốc ban đầu (*initial velocity*) tại thời điểm $t = 0$ được lấy bằng không và điều kiện chuyển vị ban đầu (*initial displacement*) tính theo vec-tơ dạng dao động thứ 5 như sau:

$$d(0) = v_5 / 20 = [0 \ 0 \ 0 \ -0,081 \ 0,050]^T \quad (\text{m}) \quad (2)$$

Hệ kết cấu được tính toán bằng cả ba phương pháp NEM, HHT(0) và HHT(-0,1).

Để lựa chọn bước thời gian Δt với phương pháp NEM, căn cứ vào điều kiện ổn định bước thời gian tính toán phải thỏa mãn điều kiện sau:

$$\Omega = \omega_{\max} (\Delta t) \leq 2 \rightarrow (\Delta t) \leq 2 / \omega_{\max} = 2 / 723,99 = 0,0027 (\text{s}) \quad (3)$$

Chọn $\Delta t = 0,002$ giây, căn cứ vào hình 2 của tài liệu [1], sai số tương đối chu kỳ đối với dạng dao động thứ 1 là 0,1% và với dạng dao động thứ 2 là 0,9%. Các giá trị sai số này đủ nhỏ để coi kết quả tính toán là chuẩn khi so sánh với các phương pháp tính khác. Lưu ý nếu giá trị Δt được

chọn không thỏa mãn điều kiện ổn định thì khi tính toán chương trình dễ bị lỗi tràn bộ nhớ.

Với phương pháp HHT, do không có điều kiện ổn định nên bước thời gian được chọn căn cứ theo độ chính xác yêu cầu của kết quả tính. Giả

sử ta chỉ quan tâm đến dạng dao động thứ 1 và 2, độ chính xác của kết quả được lấy theo giá trị sai số tương đối của chu kỳ với sai số cho phép

$$(\Delta t) / T_2 \leq 0,1 \rightarrow (\Delta t) \leq 0,1 * T_2 = 0,1 * 0,227 = 0,023(s)$$

(4)

Chọn $\Delta t = 0,02$ giây cho cả hai trường hợp tính bằng phương pháp HHT(0) và HHT(-0,1) với lưu ý rằng sai số của phương pháp HHT(-0,1) sẽ lớn hơn một chút so với phương pháp HHT(0).

Kết quả tính toán của chuyển vị tầng 1 (nút 2) và tầng 5 (nút 6) được trình bày trong hình 4, chuyển vị của tầng 1 được trình bày cho 5 giây đầu tiên trong khi chuyển vị tầng 5 chỉ in cho 1 giây đầu tiên.

Kết quả tính toán ở hình 4a cho thấy:

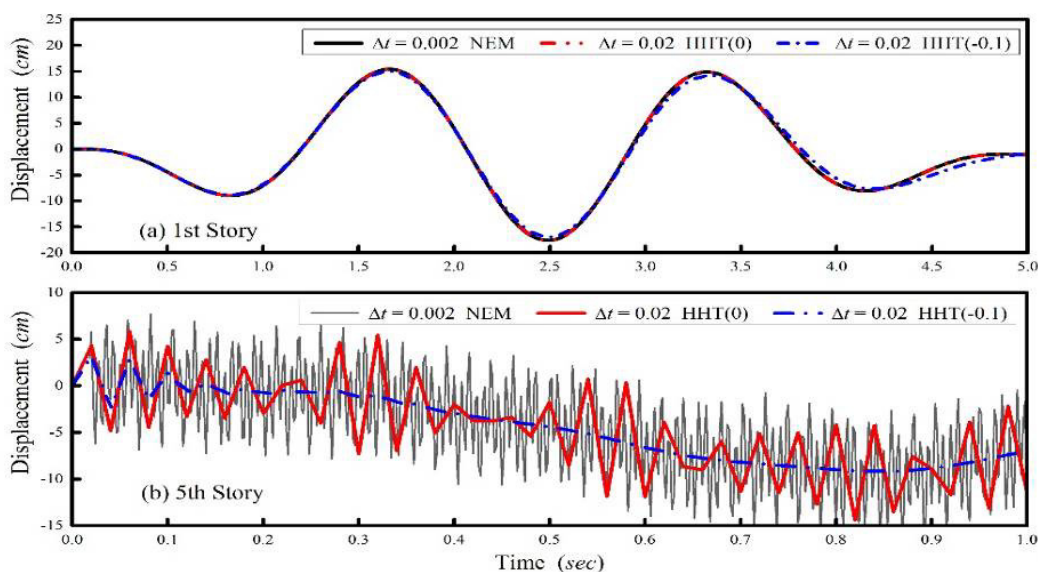
- Đường cong kết quả tính toán bằng phương pháp HHT(0) hoàn toàn trùng khớp với đường cong kết quả tính toán bằng phương pháp NEM (được lấy làm chuẩn), trong khi bước thời gian tính toán của phương pháp HHT(0) lớn gấp 10 lần so với bước thời gian tính toán của phương pháp NEM. Điều này cho thấy phương pháp HHT(0) không bị khống chế bởi điều kiện ổn định nên đã tiết kiệm được khá nhiều công sức tính toán hơn so với phương pháp NEM trong khi vẫn thu được kết quả với độ chính xác tương đương;

- Đường cong kết quả tính toán bằng phương pháp HHT(-0,1) có sự sai lệch nhỏ so với kết quả chuẩn, tuy nhiên, trong các bài toán về xây dựng thì sai số này nhìn chung là chấp nhận được.

là 5%, khi đó giá trị bước thời gian được tính căn cứ vào hình 6 [1] như sau:

Kết quả tính toán ở hình 4b cho thấy:

- Đường cong kết quả tính toán bằng phương pháp NEM và HHT(0) khá “nhiều”, do chuyển vị của tầng 5 bị ảnh hưởng của dạng dao động có tần số cao, trong khi đường cong kết quả tính toán bằng phương pháp HHT(-0,1) chỉ hơi “nhiều” trong khoảng 0,2 giây đầu tiên, sau đó trở nên rất “trơn”. Điều này được lý giải là do hai phương pháp NEM và HHT(0) đều không có hệ số cản nhớt nên không có khả năng loại bỏ ảnh hưởng của các dạng dao động bậc cao, trong khi phương pháp HHT(-0,1) có khả năng này. Việc loại bỏ ảnh hưởng của các dạng dao động bậc cao có ba ý nghĩa: *thứ nhất*, trong các bài toán về xây dựng, các dạng dao động bậc cao ảnh hưởng không đáng kể đến tổng thể ứng xử kết cấu (trong ví dụ này, ba dạng dao động 3, 4, 5 chiếm chưa đến 0,1% tổng khối lượng kết cấu tham gia dao động), do đó việc loại bỏ ảnh hưởng của chúng sẽ làm giảm công sức tính toán; *thứ hai*, kết quả tính toán với các dạng dao động bậc cao thường không chính xác nên không được quan tâm; *thứ ba*, với hệ kết cấu phi tuyến, việc loại bỏ các giá trị “nhiều” trong kết quả tính sẽ làm tăng khả năng hội tụ khi tính lặp và giảm số bước tính lặp, từ đó cũng làm giảm thời gian tính toán.

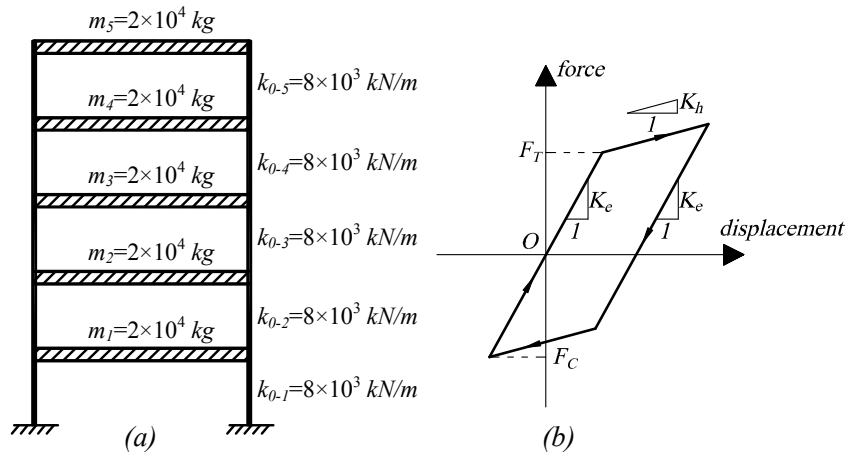


Hình 4. Kết quả tính toán ví dụ 1

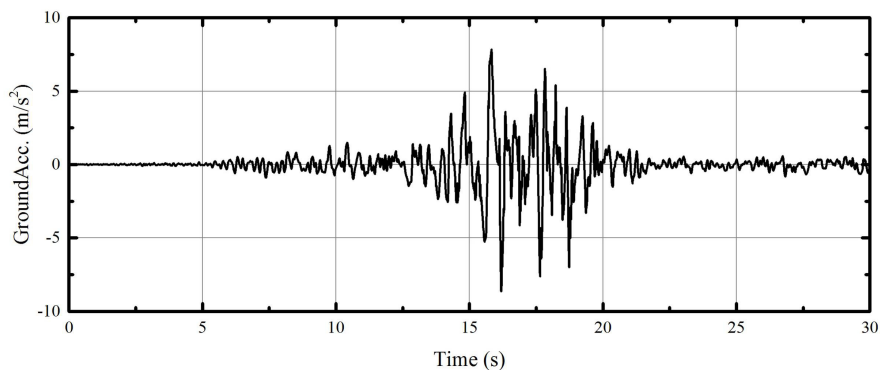
2.2 Ví dụ 2: Hệ kết cấu phi tuyến vật liệu

Hệ kết cấu trong ví dụ 1 được điều chỉnh lại với các thông số về khối lượng và độ cứng như trong hình 5. Giả thiết độ cứng của các tầng là như nhau, quan hệ ứng xử của cấu kiện tầng được giả thiết là quan hệ tuyến tính hai đoạn thẳng. Giá trị $F_T = -F_C = 200 \text{ kN}$ tính cho mỗi cột, $K_e = k_{0-i}$, $K_h = 0,11K_e$. Các thông số động lực học

của hệ kết cấu tính theo độ cứng ban đầu được trình bày trong bảng 2. Hệ kết cấu được tính toán dưới tác dụng của tải trọng động đất theo phương ngang với gia tốc nền ghi nhận được từ trận động đất Chi-Chi xảy ra ở Đài Loan vào năm 1999 (tên phổ ghi gia tốc này theo ký hiệu quốc tế thường dùng là CHY 028), đỉnh gia tốc nền được lấy bằng $0,8g$ (hình 6).



Hình 5. Hệ kết cấu phi tuyến vật liệu 5 bậc tự do



Hình 6. Phổ ghi gia tốc nền CHY 028

Bảng 2. Các thông số động lực học của hệ kết cấu trong ví dụ 2

Dạng dao động	Chu kỳ T (s)	Tần số dao động tự nhiên ω (rad/s)	Tần số dao động f (Hz)	Hệ số khối lượng tham gia dao động
1	1,104	5,6926	0,906	0,880
2	0,378	16,617	2,645	0,087
3	0,240	26,194	4,169	0,024
4	0,187	33,65	5,356	0,008
5	0,164	38,38	6,108	0,002

Hệ kết cấu cũng được tính với ba phương pháp NEM, HHT(0) và HHT(-0,1). Việc lựa chọn bước thời gian tính toán Δt cũng tương tự như ở ví dụ 1. Trong ví dụ này, do phổ ghi gia tốc nền được ghi với bước thời gian $\Delta t = 0,005$ giây nên

SAP 2000 tự động chọn giá trị này làm bước thời gian tính toán nếu như giá trị bước thời gian xuất ra chọn lớn hơn giá trị này. Với hệ kết cấu này, $\Delta t = 0,005$ giây là đủ để thỏa mãn điều kiện ổn định của phương pháp NEM và thỏa mãn yêu cầu về

độ chính xác trong kết quả của phương pháp HHT.

Kết quả tính toán chuyển vị của tầng 1 và tầng 5 được thể hiện trong hình 7, mối quan hệ giữa biến dạng và lực cắt các tầng được thể hiện trong hình 8. Thời gian tính toán của SAP 2000 cho ba phương pháp NEM, HHT(0) và HHT(-0,1) lần lượt là 229 giây, 499 giây và 487 giây. SAP 2000 được chạy trên máy tính cá nhân với chip Intel®Core™i5 CPU M460 @2.53GHz, RAM 4.00 GB.

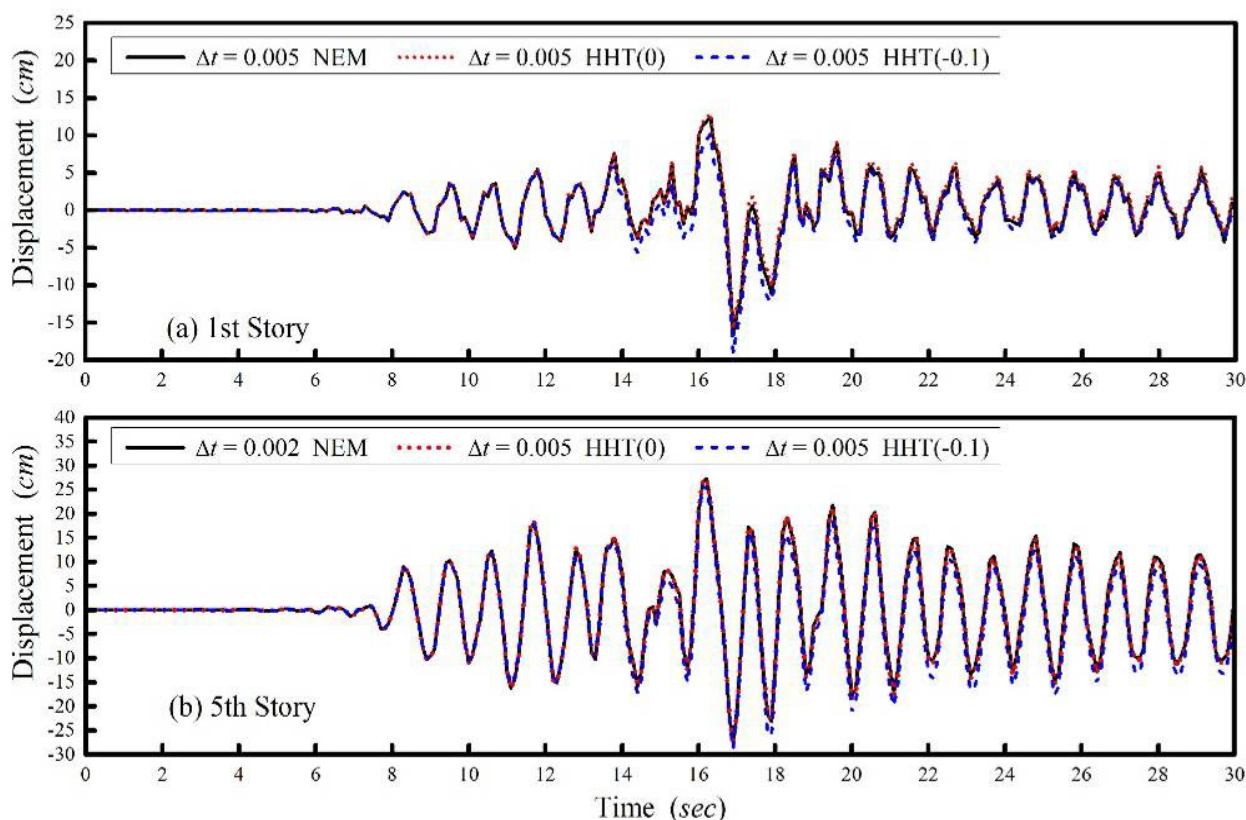
Kết quả tính toán của ví dụ này cho thấy:

- Kết quả tính bằng phương pháp HHT(0) trùng với kết quả tính toán bằng phương pháp NEM, trong khi kết quả tính toán bằng phương pháp HHT(-0,1) có sai số chấp nhận được;
- Hệ kết cấu ứng xử hoàn toàn phi tuyến ở tầng từ 1 đến 4, tầng 5 vẫn trong giai đoạn đàn hồi tuyến tính.

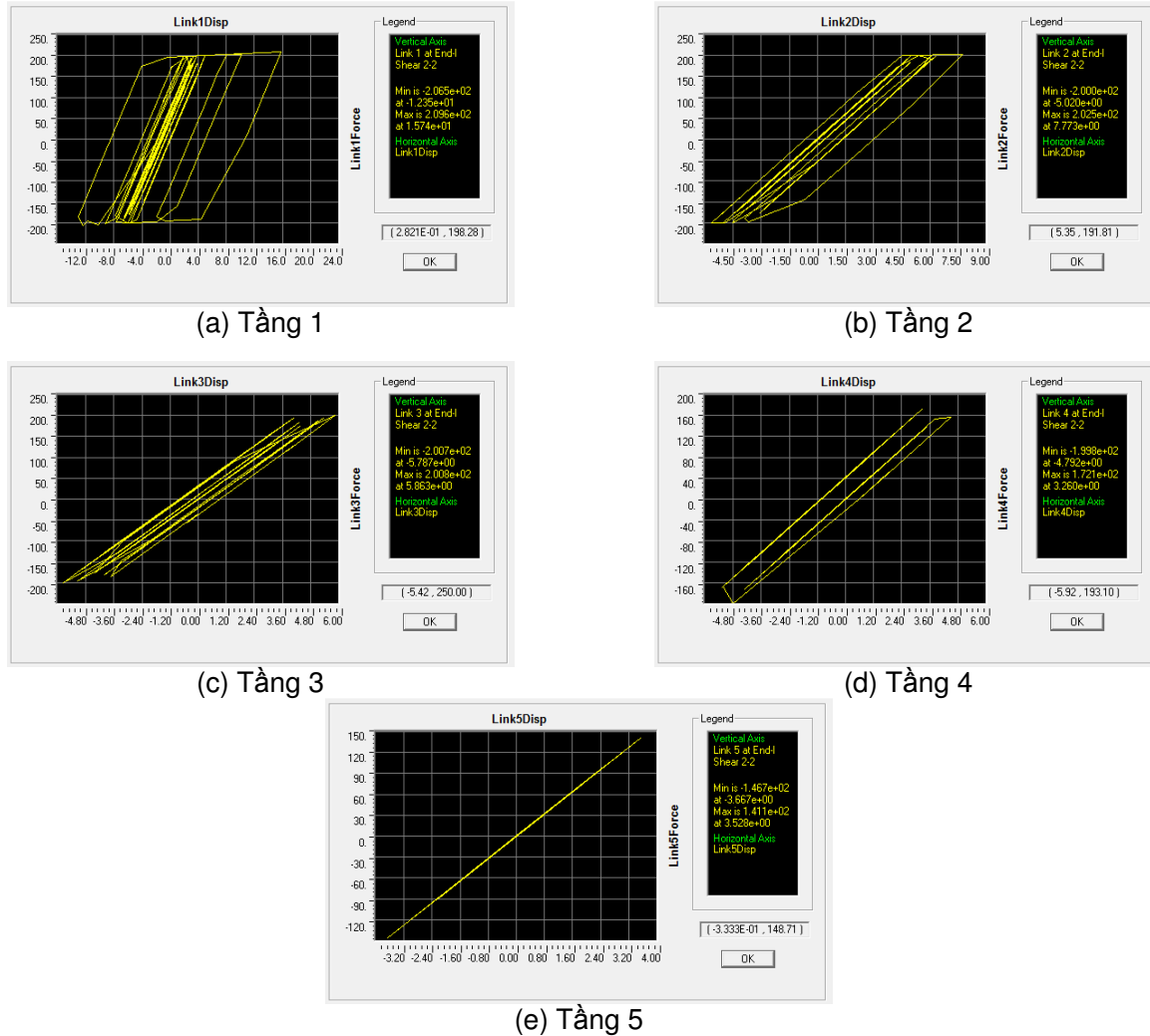
Do hệ kết cấu ở ví dụ này có số bậc tự do thấp, khối lượng các tầng bằng nhau, độ cứng các tầng tương đương cho nên điều kiện ổn định của phương pháp NEM được thỏa mãn dễ dàng, dẫn đến phương pháp này đã được sử dụng rất

hiệu quả biểu hiện qua thời gian tính toán bằng phương pháp NEM chỉ bằng khoảng một nửa so với thời gian tính toán của hai phương pháp còn lại. Điều này được giải thích là do trong mỗi bước tính toán, NEM là phương pháp ngoại hiển thức nên không cần sử dụng thuật toán tính lặp, vì vậy khi cùng số bước tính toán thì tính bằng NEM mất ít công sức hơn. Tuy nhiên, cũng cần nói thêm rằng với những hệ kết cấu phức tạp có nhiều bậc tự do thì khả năng có thể áp dụng được phương pháp NEM một cách hiệu quả là không cao do bước thời gian tính toán bị khống chế bởi điều kiện ổn định.

Ví dụ này cũng cho thấy rằng với một hệ kết cấu đơn giản chỉ gồm 5 bậc tự do, tuy nhiên khi phân tích phi tuyến động cần đến gần 500 giây (phương pháp HHT). Đây chính là một trong những nhược điểm của những phương pháp phi tuyến động thường dùng hiện nay, do đó cần có yêu cầu phát triển những phương pháp tính toán mới tiết kiệm thời gian và công sức tính toán hơn mà vẫn đảm bảo độ chính xác của kết quả, ví dụ như phương pháp được giới thiệu trong tài liệu [3].



Hình 7. Kết quả tính toán chuyển vị tầng ở ví dụ 2



Hình 8. Quan hệ giữa chuyển vị - lực cắt tầng (đơn vị: kN-cm)

2.3 Ví dụ 3: Hệ kết cấu có xét đến hiệu ứng phi tuyến hình học

Xét hệ khung thép hai tầng có kích thước và số hiệu thanh, số hiệu nút như trong hình 9. Cột và dầm khung đều có tiết diện chữ I với kích thước cột và dầm như sau:

$$\begin{aligned} \text{Cột: thanh 1, 2, 3, 4: } & b = 10 \quad h = 15 \quad t_f = 1 \quad w = 0,5 \quad (\text{cm}) \\ \text{Dầm: thanh 5, 6: } & b = 15 \quad h = 30 \quad t_f = 1,5 \quad w = 1 \quad (\text{cm}) \end{aligned} \quad (5)$$

Mô-đun đàn hồi của vật liệu thép $E = 200000$ MPa. Khối lượng mỗi tầng bằng 10 tấn, chia đều cho hai nút ở hai đầu cột (chia vào các nút 2 ,3, 5, 6 mỗi nút 5 tấn).

Tải trọng tác dụng lên hệ kết cấu gồm có tải trọng thẳng đứng để tạo hiệu ứng $P-\Delta$ và tải trọng ngang. Tải trọng đứng gồm có lực $P = 100$ tấn tác dụng vào nút 3 và 6 và phần tải trọng bản thân do khối lượng các tầng gây ra. Tải trọng ngang là chuyển vị nền với gia tốc có dạng hình sin như sau:

$$a_g = 10 \times \sin(\pi t) \quad (\text{m/s}^2) \quad (6)$$

Căn cứ vào các thông số đầu vào, chu kỳ dao động thứ 1 của hệ kết cấu tính được $T_1 = 0,663$ giây, chu kỳ dao động cao nhất của hệ là chu kỳ thứ 12 (hệ có 12 bậc tự do khi phân tích phẳng) tính được là $T_{12} = 0,020$ giây.

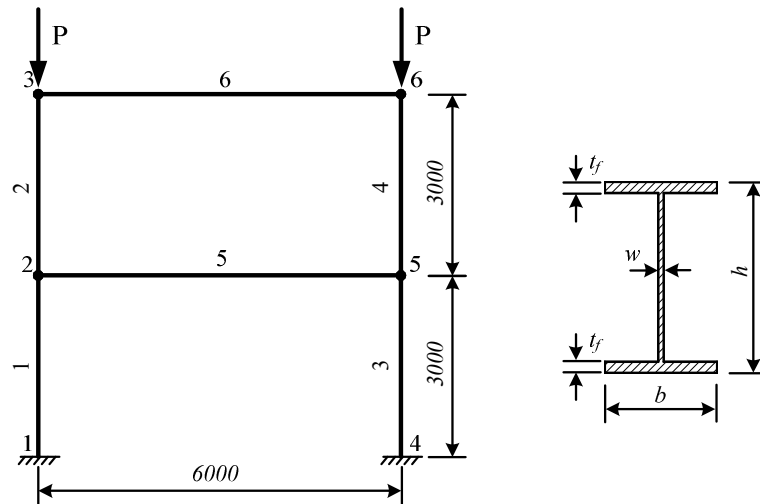
Để xem xét riêng ảnh hưởng của hiệu ứng bậc hai $P-\Delta$, giả thiết rằng sau khi biến dạng vật liệu của khung vẫn làm việc đàn hồi tuyến tính.

Bước thời gian tính toán Δt nếu phân tích bằng phương pháp NEM để thỏa mãn điều kiện

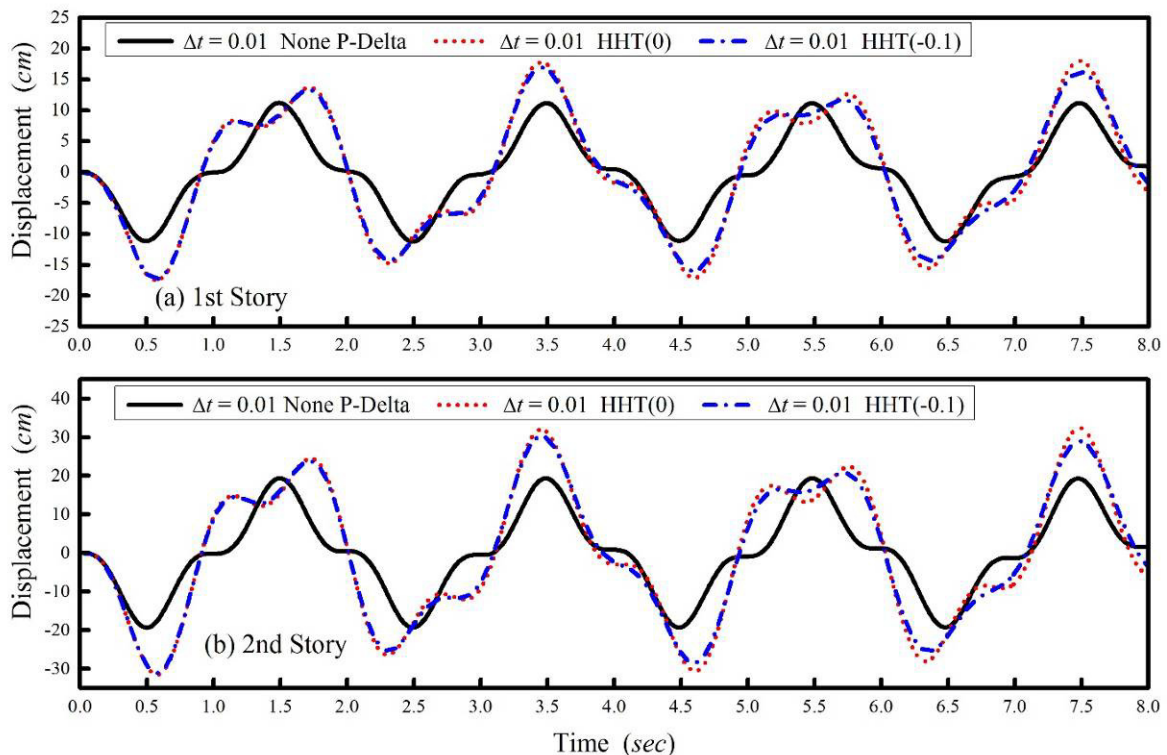
ổn định sẽ là $\Delta t \leq 0,006$ giây, do đó chỉ chọn phương pháp HHT(0) và HHT(-0,1) để phân tích. Bước thời gian tính toán được chọn là 0,01 giây.

Kết quả tính toán chuyển vị của tầng 1 (nút 2) và tầng 2 (nút 3) với hai trường hợp có và không kể đến hiệu ứng $P-\Delta$ được thể hiện trong hình 10. Với trường hợp không kể đến hiệu ứng $P-\Delta$, hệ

được tính toán bằng phương pháp tách dạng dao động (chọn ô *Modal* trong phần *Time History Type* ở cửa sổ *Load Case Data*). Để chọn tính toán với hiệu ứng $P-\Delta$ thì cần đánh dấu vào ô *P-Delta Plus Large Displacement* (hiệu ứng $P-\Delta$ và chuyển vị lớn) trong cửa sổ *Load Case Data*.



Hình 9. Hệ khung thép hai tầng



Hình 10. Kết quả tính toán chuyển vị tầng ở ví dụ 3

Cũng như kết quả ở ví dụ 1 và 2, kết quả tính toán bằng phương pháp HHT(-0,1) có chút sai số so với kết quả tính toán bằng phương pháp

HHT(0). Kết quả tính toán cũng cho thấy rằng với hệ kết cấu này, hiệu ứng $P-\Delta$ làm chuyển vị của tầng tăng lên khoảng 1,6 lần (32,4 cm so với 19,3

cm ở tầng 2 và 18,0 cm so với 11,2 cm ở tầng 1). Trong tiêu chuẩn thiết kế chống động đất hiện hành của Việt Nam [4] có quy định về việc sử dụng hệ số ứng xử q để xem xét để khả năng làm việc phi tuyến của hệ kết cấu khi kết cấu được phân tích bằng phương pháp phổ phản ứng đàn hồi. Ví dụ này cho thấy có thể ứng dụng phân tích phi tuyến động bằng SAP 2000 để tìm hệ số ứng xử q cho các trường hợp mà tiêu chuẩn chưa có quy định rõ ràng.

3. Kết luận

Bài báo (phần 1 và 2) đã giới thiệu đặc điểm và phạm vi của các phương pháp phân tích phi tuyến động được tích hợp sẵn trong phần mềm SAP 2000. Phần 1 trình bày đặc điểm của cả năm phương pháp, tuy nhiên, chỉ hai phương pháp được khuyến nghị áp dụng trong phạm vi tính toán thông thường là phương pháp Newmark và phương pháp Hilber – Hughes – Taylor với ba trường hợp tính khác nhau như trình bày trong phần 2.

Bài báo (phần 2) đã giải thích ý nghĩa các thông số cơ bản của chương trình SAP 2000 khi phân tích động phi tuyến kết cấu, đồng thời đã trình bày các ví dụ để làm rõ đặc điểm của các phương pháp phân tích động phi tuyến tích hợp sẵn trong SAP 2000. Với các hệ kết cấu có số bậc tự do thấp, tần số dao động của dạng dao động cao nhất không lớn, có thể sử dụng phương pháp NEM để tiết kiệm thời gian phân tích. Sử dụng phương pháp HHT(0) – phương pháp mặc định trong SAP 2000 – là phù hợp cho phần lớn

các trường hợp tính toán thông thường. Trong một số trường hợp tính, việc giảm giá trị hệ số α trong khoảng $[-1/3, 0]$ nhằm loại bỏ ảnh hưởng của các dạng dao động bậc cao để tăng khả năng hội tụ khi tính lặp và giảm thời gian tính toán có thể được áp dụng. Việc giảm giá trị hệ số α làm giảm độ chính xác trong kết quả tính, tuy nhiên, sai số nhìn chung có thể chấp nhận được.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. N. Cường (2016), "Các phương pháp phân tích động phi tuyến kết cấu theo lịch sử thời gian trong SAP 2000 (phần 1)", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, số 1.
- [2] Computers and Structures, "SAP2000 Watch and Learn," [Trực tuyến]. Available: <http://www.csiamerica.com/products/sap2000/watch-and-learn>. [Đã truy cập 1 1 2016].
- [3] A. K. Chopra (1995), *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*, Englewood Cliffs, N.J.
- [4] R. W. Clough and J. Penzien (1975), *Dynamics of Structures*, New York: McGraw-Hill.
- [5] T. J. Hughes (1987), *The Finite Element Method*, Toronto, Canada: General Publishing Company Ltd.
- [6] S.-Y. Chang, 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.
- [7] TCVN 9386:2012 (2012), *Thiết kế công trình chịu động đất*, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.

Ngày nhận bài: 12/01/2016.

Ngày nhận bài sửa lần cuối: 20/6/2016.