
PHÂN TÍCH VỀ KẾT CẤU VÀ VẬN HÀNH CỦA HỆ ĐƯỜNG SẮT CAO TỐC CHO GIẢI PHÁP GIAO THÔNG CÔNG CỘNG

STRUCTURAL AND OPERATIONAL INVESTIGATION OF HIGH-SPEED RAIL-WAY FOR MASS TRANSPORT SOLUTION

ThS. ĐINH VĂN NGUYỄN⁽¹⁾, PGS.TS. KI DU KIM⁽²⁾

⁽¹⁾ *Bộ môn Xây dựng Dân dụng - Công nghiệp, Khoa Công trình
(Nghiên cứu sinh TS ngành Kết cấu công trình, Học viện Công nghệ Châu Á (AIT), Thái Lan,
Email: [DinhVan.Nguyen@ait.ac.th](mailto: DinhVan.Nguyen@ait.ac.th); Tel: +66-2-524-6587)*

⁽²⁾ *Khoa Kết cấu công trình (STE), Học viện Công nghệ Châu Á (AIT), Thái Lan
(Khoa Kỹ thuật Xây dựng và Hệ thống Môi trường, Đại học Konkuk (KU), Seoul, South Korea)*

Tóm tắt:

Đường sắt cao tốc là một giải pháp giao thông công cộng tương lai cho vùng đô thị và liên vùng. Một số cơ cấu tàu hỏa cao tốc được mô tả. Hệ thống tàu có khớp nối mà đang được vận hành ở Châu Âu, Hàn Quốc chứng tỏ có nhiều ưu điểm. Một số phương pháp phân tích động lực học tàu khi đang vận hành được giới thiệu. Mô hình tương tác động lực tàu- đường sắt- nền/ cầu được ứng dụng để lập chương trình tính toán tàu cao tốc loại có khớp nối tương tác với cầu. Việc lựa chọn loại tàu phù hợp, tính toán động lực học khi thiết kế tàu - cầu - đường sắt cần được quan tâm hơn, thiết thực với Việt Nam khi mà hệ thống đường sắt toàn quốc đang được lập kế hoạch nâng cấp.

Abstract:

High-speed railway is concluded one of future mass transport solutions for congested urban regions and larger inter- regions. Several types of high-speed train are described. The articulated train systems, which are operating in Europe, Korea are proved more advantageous. Series of dynamic analysis models of train during operating are introduced. The train-track-bridge dynamic interaction is modeled, formulated and programmed for practical analysis of articulated high-speed train and bridge interaction. Proper choice of train type and dynamic analysis in design of train-track- bridge need more care, especially for the case of Vietnam as the national railway systems are planned to be upgraded.

1. Giới thiệu chung

Trong các vùng đô thị đông dân, các loại hình giao thông mặt đất như xe buýt, tàu thường, tàu điện trở thành khó khả thi bởi sự giao cắt với các phương tiện khác gây ách tắc giao thông, tốc độ vận hành chậm, và chiếm dụng đất lớn. Một trong những giải pháp tốt nhất là tàu chạy trên cao. Loại hình này có ưu điểm lớn như là an toàn cao, khối lượng vận chuyển lớn, không giao cắt với các phương tiện khác, diện tích đất sử dụng tối thiểu, và nếu thiết kế đẹp sẽ là cảnh quan hiện đại của đô thị, và hơn nữa, rất thích hợp cho tốc độ vận hành cao. Trong các vùng rộng hơn, hay giữa các vùng đô thị, giao thông công cộng bằng tàu hỏa, đặc biệt là tàu cao tốc được đánh giá cao ở nhiều nước, và có đầy đủ ưu điểm như trong giao thông đô thị nói trên. Tuy giá thành xây dựng của hệ thống đường sắt- tàu hỏa, nhất là tàu cao tốc là khá cao, lại yêu cầu đầu tư ban đầu lớn, tuy nhiên đây là giải pháp tốt cho phát triển bền vững, bảo vệ môi trường tốt và có hiệu quả kinh tế- xã hội cao [1]. Hệ thống đường sắt cao tốc cần rất nhiều cầu song, cầu cạn để tránh giao cắt với các phương tiện khác, và cũng giảm thiểu ảnh hưởng tiếng ồn, chấn động gây ra với môi trường xung quanh. Chẳng hạn [4], hệ thống đường sắt cao tốc Hàn Quốc KTX dài 412 km, thì trong đó 112 km (27%) là đường sắt trên cao.

Kết cấu cầu đường sắt hay nền đường sắt chịu tải trọng động di động gây ra bởi tương tác của tàu đang chạy. Các tải trọng động có cường độ lớn này gây ra xung động lớn, và hiện tượng mỏi cho kết cấu nền, cầu. Đặc biệt, khi tàu trọng tải lớn chạy ở tốc độ cao trên cầu, đường sắt sẽ gây ra dao động lớn ảnh hưởng đến độ bền, tuổi thọ cũng như khả năng làm việc của nền, cầu. Vì thế nên việc tính toán phân tích chính xác dao động của nền, cầu trong lúc tàu đang vận hành, là rất quan trọng. Hơn nữa, tiện nghi của hành khách trên tàu, độ an toàn của tàu cũng rất cần xét đến, thông qua dao động và gia tốc của tàu khi vận hành. Việc phân tích động lực học của tàu và

cầu, nên khá phức tạp do tương tác lẫn nhau giữa tàu, hệ đường sắt, và nền, và do tương tác cục bộ giữa các bộ phận của tàu, một mặt khi tàu chạy sẽ gây ra tải trọng động có tần số có thể kích thích dao động riêng của cầu, làm cho dao động của cầu càng lớn. Hiện nay, khi tốc độ vận hành của tàu tăng cao, lên đến 300 km/giờ hoặc hơn, thì độ chính xác trong việc phân tích tính toán tương tác động lực học tàu- đường sắt- nền/ cầu trở nên yếu tố quan trọng trong thiết kế nền, cầu đường sắt.

3. Một số loại tàu cao tốc

3.1. Tàu hỏa cao tốc cấu tạo thường (High-speed ordinary/ classical train) (Nhật, Đài Loan)

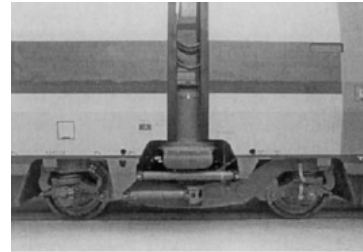
Trong tàu có cấu tạo thường, mỗi thân toa xe được đặt trên 2 giá chuyển hướng, và tàu được cấu thành bằng các toa độc lập, và các toa này dao động độc lập nhau khi tàu vận hành. Do vậy, khi tàu chạy ở tốc độ cao, hoặc tại những đoạn ray không đồng nhất, có thể gây ra dao động khá lớn. Tuy nhiên, một số nước vẫn áp dụng cơ cấu này cho tàu cao tốc như Nhật (tàu Shinkansen, bắt đầu vận hành từ năm 1960 với vận tốc 200 km/ giờ, và đến nay tốc độ vận hành lên đến 300 km/giờ). Gần đây, hệ thống này cũng được dùng cho tàu cao tốc ở Đài Loan (MRT), đang trong giai đoạn xây dựng và kiểm nghiệm [1].

3.2. Tàu hỏa cao tốc loại nối khớp (Articulated high-speed train) (Châu Âu, Hàn Quốc)

Trong tàu hỏa loại nối khớp, thường là tàu cao tốc, giá chuyển hướng (bogie) nằm ở giữa hai thân toa xe và liên kết với 2 thân xe này bằng các nút khớp, nên được gọi là giá chuyển hướng nối khớp. Vì thế, dao động gây ra trên mỗi thân xe, đặc biệt tại chỗ nối hai thân xe, có thể được giảm đi đáng kể nhờ cơ cấu giá chuyển hướng nối khớp nói trên. Hệ thống tàu nối khớp nâng cao độ tiện nghi so với tàu có cấu tạo thường, đặc biệt trong vận hành ở các tốc độ cao. Mặt khác, đầu máy không dùng hệ thống giá chuyển hướng nối khớp này, mà được đặt trên 2 giá chuyển hướng loại thường. Một toa xe chuyển tiếp nằm giữa đầu máy và toa xe khách ngoài cùng, toa chuyển tiếp này đặt trên một bogie loại thường, và chung một bogie loại nối khớp với toa hành khách. Cấu hình này cho phép từng đầu máy có thể nối thêm vào, và từng toa hành khách cũng có thể nối thêm vào giữa. Cấu hình này làm việc cơ học khác với cấu hình của tàu thông thường. Tàu cao tốc dạng nối khớp này, hiện đã vận hành với tốc độ tới 350 km/giờ ở Pháp-Bỉ (tàu TGV), Đức (tàu ICE), và đang trong giai đoạn thử nghiệm ở Hàn Quốc (tàu KTX) [4, 5].



Hình 2. Tàu cao tốc KTX (Korea Train eXpress), Hàn Quốc



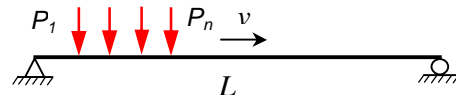
Hình 3. Giá chuyển hướng cơ cấu nối khớp, tàu KTX

4. Một số phương pháp tính toán phân tích động lực học tàu hỏa khi đang vận hành

4.1. Mô hình dãn lực di động

Tàu được mô hình bằng dãy lực P_1, \dots, P_n di chuyển với vận tốc v . Đây là mô hình đơn giản và cổ điển nhất dùng trong nghiên cứu dao động, biến dạng của cầu, đường do phương tiện gây ra.

Tuy nhiên, ảnh hưởng của tương tác giữa cầu/ đường với phương tiện không được xét đến, và lực quán tính của phương tiện cũng bị bỏ qua. Mô hình này chỉ phù hợp khi khối lượng của tàu là nhỏ hơn rất nhiều so với khối lượng của cầu, và không xét đến độ tiện nghi của tàu.

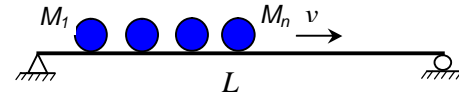


Hình 3. Mô hình tàu bằng lực di động

4.2. Mô hình dây khối lượng di động

Tàu được mô hình bằng dây các khối lượng M_1, \dots, M_n di chuyển với vận tốc v . Mô hình này chính xác hơn mô hình dây lực di động, đặc biệt khi các thành phần lực quán tính của tàu là lớn.

Tuy nhiên, mô hình này có một số nhược điểm, như không tính được dao động cũng như độ tiện nghi của tàu, nhất trong trường hợp ray hoặc mặt đường không đồng nhất bằng phẳng, hay khi tàu chạy với tốc độ cao. Đây cũng không phải là mô hình chính xác cao khi xét đến hệ thống giám sát, giảm chấn của tàu.



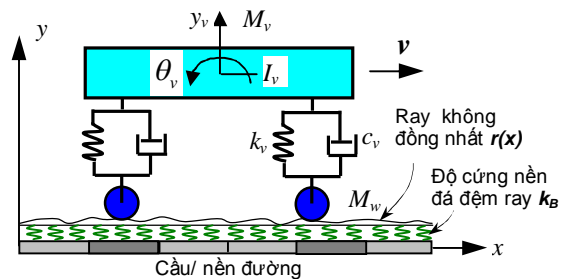
Hình 4. Mô hình tàu bằng dây khối lượng di động

4.3. Mô hình tương tác 2 chiều của Tàu cao tốc cấu tạo thường với Ray - Cầu/ đường

Mỗi toa hay đầu máy của tàu cao tốc cấu tạo thường chạy trên cầu/ đường ray được mô hình riêng rẽ bằng hệ gồm một dầm cứng đặt trên hai bộ phận giảm sóc- giảm chấn như hình 5. Mỗi bộ giảm sóc- giảm chấn có độ cứng theo và cản động phương đứng k_v, c_v .

Trong hệ này, hình dạng không đồng nhất của ray là $r(x)$, đệm ray (thường bằng đá dăm) được mô hình bằng các lò xo đàn hồi với độ cứng theo phương đứng k_B .

Chuyển động của dầm cứng (mô hình thân xe) bằng 2 tọa độ tổng quát $\{y_v, \theta_v\}$, trong đó y_v



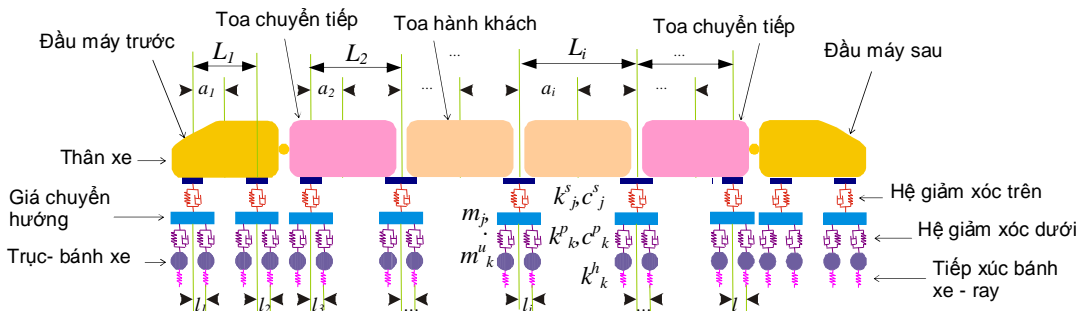
Hình 5. Toa xe tàu cấu tạo thường mô hình bằng hệ tương tác 2 chiều Tàu-Ray- Đường

là chuyển vị đứng và θ_v là góc xoay quanh khối tâm của thân xe. Chuyển động quay trong mặt phẳng của thân xe có thể tính được bằng mô hình này qua chuyển động của 2 bộ giảm sóc- giảm chấn. Hai hệ phương trình dao động của toa xe và của cầu/ đường là phụ thuộc lẫn nhau do sự tiếp xúc của bánh xe với ray. Để giải ta cần phải dùng đến thuật toán lặp. Mô hình này đáp ứng yêu cầu khi cho phép xét đến tính toán dao động của toa xe để xét độ tiện nghi của tàu, tuy nhiên khối lượng tính toán tăng do dùng phép lặp [10].

5. Mô hình tương tác 2 chiều của Tàu cao tốc nối khớp - Ray - Cầu/ đường (dạng KTX, TGV)

Mỗi toa tàu gồm thân tàu, hệ giảm sóc trên, giá chuyển hướng, hệ giảm sóc dưới và hệ trục-bánh xe. Đặc tính riêng biệt của tàu cao tốc nối khớp là hai toa xe hành khách cạnh nhau liên kết với nhau bằng một giá chuyển hướng cơ cấu nối khớp. Cả đoàn tàu liên kết tổ hợp với nhau bằng các giá chuyển hướng (bogie), nên chuyển động độc lập của mỗi toa xe bị ngăn cản. Vì thế, các hiện tượng dao động thường xảy ra trong các tàu có cơ cấu phổ thông được kiểm chế bớt ở tàu có giá chuyển hướng nối khớp này

- Tàu KTX gồm 02 đầu máy, 02 toa xe chuyển tiếp, và các toa xe hành khách, như hình vẽ 6.



Hình 6. Mô hình 2 chiều, các bộ phận và thông số của tàu cao tốc kiểu nối khớp, Hàn Quốc (KTX)

5.1 Mô hình và lập công thức tính toán

- Các bậc tự do (tọa độ tổng quát) toa xe thứ i (như hình 7)
 $v_j =$ Chuyển vị đứng của thân toa xe
 $u_j =$ Chuyển vị ngang của giá chuyển hướng
 $\theta_j =$ Chuyển vị xoay của bogie
 $w_{2i-1} =$ Chuyển vị đứng của trục bánh xe thứ 1

$w_{2i} =$ Chuyển vị đứng của trục bánh xe thứ 2

• Hai giả thiết là thân toa xe và giá chuyển hướng (bogie) là các miếng cứng có khối lượng, và tốc độ tàu khi vận hành tại khoảng thời gian khảo sát là không đổi.

• Trong quá trình tương tác tiếp xúc giữa tàu và ray, lực tương tác truyền qua diện tích tiếp xúc giữa bánh xe và ray. Sự tiếp xúc này, qua quan hệ giữa lực nén và biến dạng, được mô hình là lò xo đàn hồi có độ cứng k_h và đơn giản hóa làm việc tuyến tính.

- Hệ phương trình dao động của toàn bộ tàu KTX có dạng:

$$[M]^{tr} \{\ddot{U}\}^{tr} + [C]^{tr} \{\dot{U}\}^{tr} + [K]^{tr} \{U\}^{tr} = \{F\}^{tr} \quad (1)$$

Trong đó $[M]^{tr}$ là ma trận khối lượng, $[C]^{tr}$ là ma trận cản động, $[K]^{tr}$ là ma trận độ cứng, và $\{U\}$ là vector chuyển vị (hay bậc tự do) của tàu.

Hệ (1) được khai triển từ phương trình Lagrang:
$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial T}{\partial \dot{g}_i} \right\} - \left\{ \frac{\partial T}{\partial g_i} \right\} + \left\{ \frac{\partial V}{\partial g_i} \right\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial g_i} \right\} = q_i$$

(2)

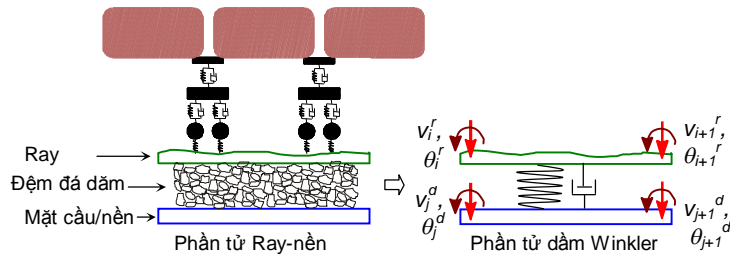
Trong đó T , V và D lần lượt là tổng động năng, thế năng, và năng lượng tiêu tán do cản nhớt của toàn hệ tàu, g_i là tọa độ tổng quát, và q_i là ngoại lực tương ứng với tọa độ tổng quát g_i . Lần lượt lập các biểu thức động năng, thế năng và năng lượng tiêu tán do cản nhớt của các đầu máy trước, đầu máy sau, toa xe hành khách và toa xe chuyển tiếp rồi thay vào phương trình (2), để khai triển ra hệ phương trình dao động (1).

- Mô hình tính toán đường ray (Track):

Đường ray gồm có ray (rail), tà vẹt (sleeper) và nền đá dăm (ballast)

- Ray mô hình như dầm phẳng

- Hệ tà vẹt và nền đá dăm mô hình bằng dầm Winkler. Mỗi phần tử dầm Winkler gồm có 4 nút, mỗi nút có 2 bậc tự do là chuyển vị đứng và chuyển vị xoay. Nền đá dăm được giả thiết là có độ cứng phân phối đều.



Hình 8. Mô hình đường ray (track) bằng phần tử dầm Winkler

- Mô hình cầu:

- Cầu được mô hình bằng dầm có tiết diện không đổi, thay đổi, dạng tiết diện có thể là đặc (chữ nhật, chữ I), tiết diện hộp hở, hộp kín, hoặc đặc trưng tiết diện cho trước [3].

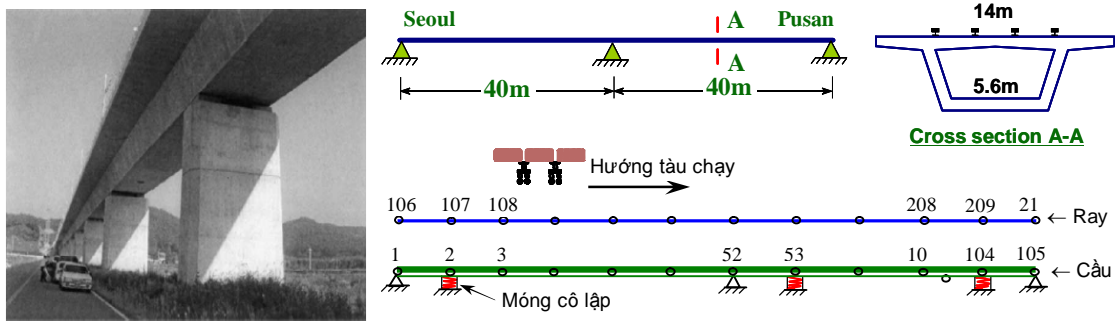
- Phương trình dao động của cầu:
$$[M]^s \{\ddot{U}\}^s + [C]^s \{\dot{U}\}^s + [K]^s \{U\}^s = \{F\}^s \quad (6)$$

Vectơ ngoại lực tác dụng lên tàu $\{F\}^T$ và vectơ ngoại lực tác dụng lên cầu $\{F\}^S$ tại các bậc tự do là phụ thuộc lẫn nhau tại vị trí tiếp xúc giữa bánh xe và ray, nên phương trình dao động của tàu (1) và cầu (6) phải giải đồng thời bằng phương pháp lặp, dùng tích phân số Newmark [7].

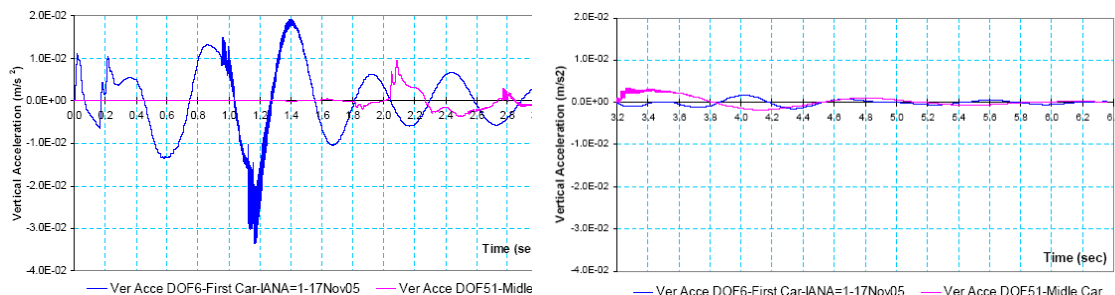
Thuật giải hai phương trình (1) và (6) được mô tả chi tiết ở [7]. Mô hình tương tác tàu - đường ray - cầu và thuật giải được lập thành chương trình tính toán bằng ngôn ngữ FORTRAN, trở một mô-đun mới của bộ chương trình tính toán – phân tích kết cấu bằng phương pháp phần tử hữu hạn XFINAS [3] đang phát triển.

5.2. Ví dụ tính toán: KTX chạy qua cầu Yeonjae, Hàn Quốc, $V_{max}=350$ km/giờ

- Tàu cao tốc (KTX) bao gồm 02 đầu máy, 02 toa trung gian, và 16 toa hành khách, với tổng chiều dài tàu là 380.15m. Vận tốc lớn nhất của tàu là $V_{max}=350$ km/giờ.
- Cầu: dầm liên tục 2 nhịp 2 x 40 m, dạng tiết diện hộp bê tông ứng suất trước, như hình 9.

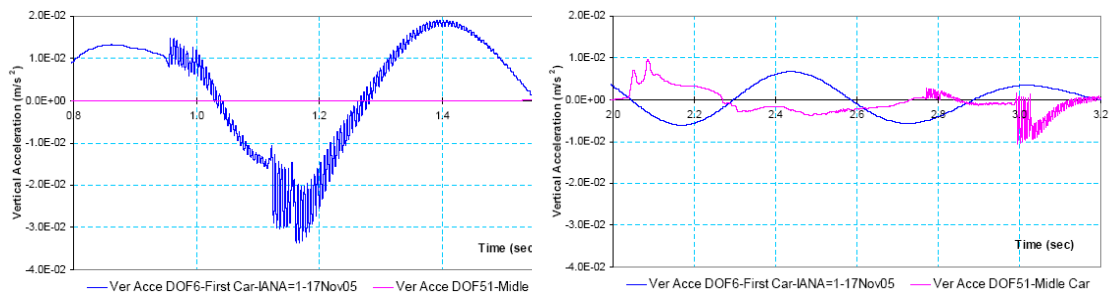


Hình 9. Cầu tàu KTX Yeonjae, Hàn Quốc, và mô hình Phần tử hữu hạn để tính toán



(a) Gia tốc đứng, tại đầu máy, t = 0.–3.2sec

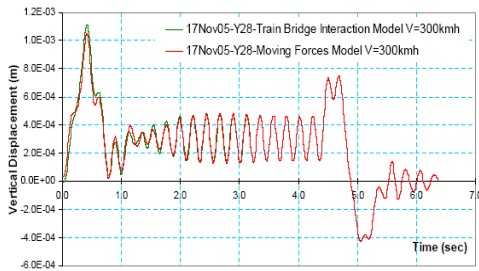
(b) Gia tốc đứng, đầu máy & toa khách, 3.2–6.4sec



(c) Gia tốc đứng, tại đầu máy, t = 0.8 -1.6 sec

(d) Gia tốc đứng, tại toa khách, t = 2.0 – 3.2 sec

Hình 10. Gia tốc trên tàu tại đầu máy, toa khách, V = 300 km/ giờ ở các khoảng thời gian



Hình 11. Chuyển vị đứng ở giữa nhịp cầu

6. Kết luận:

- Kết quả từ mô hình tương tác tàu-cầu có biên độ lớn hơn của mô hình lực di động, do kể đến ảnh hưởng lực quán tính.

- Dao động của cầu tại giữa nhịp cầu đạt cực đại sớm, ngay khi đầu máy 1 vừa đến giữa nhịp, sau đó giảm dần cả biên độ lẫn chu kỳ, rồi lại tăng lên khi đầu máy cuối cùng qua cầu và biên độ đổi dấu

- Gia tốc đứng của đầu máy là lớn nhất, tức độ tiện nghi ở đầu máy thấp nhất.

7. Đề xuất cải tạo, nâng cấp hệ thống đường sắt quốc gia Việt Nam trong giai đoạn sắp tới

- Trong bản quy hoạch [9], hệ thống đường sắt Việt Nam trong thời gian tới được đầu tư rất lớn để nâng cấp từ đường ray khổ 1.000mm lên khổ 1.435mm, và xây dựng mới. Vì thế nên xây dựng một số đoạn đường ray với cơ sở hạ tầng (nền đường, cầu) đáp ứng cho tàu hỏa cao tốc. Một số tuyến có lưu lượng vận tải khách và hàng hóa lớn như Hà Nội- Hải Phòng, Hà Nội- Nam Định-Thanh Hóa- Vinh, TP Hồ Chí Minh- Cần Thơ- Mỹ Tho nên nâng cấp luôn thành đường sắt cao tốc, vì hiệu quả kinh tế- xã hội trong thời gian dài sẽ rất lớn. Đề xuất phương án chọn loại tàu hỏa cao tốc loại nối khớp (loại TGV, hay KTX) do ưu điểm an toàn và tiện nghi hơn như đã phân tích ở mục 2. và mục 5.

- Các cầu trên tất cả các tuyến đường sắt nên được thiết kế, xây dựng hoặc gia cường đủ đáp ứng cho tàu cao tốc vận hành. Bởi tuổi thọ của cầu ít nhất là 50-100 năm, nên việc nâng cấp một lần nữa cho đường sắt cao tốc trong tương lai sẽ tốn kém và phức tạp hơn rất nhiều.

- Giao thông đô thị ở các thành phố lớn cần khẩn trương xây dựng các hệ thống đường sắt trên cao. Đặc biệt là ở Hà Nội, bởi đường phố trong nội đô hẹp, khó phát triển hơn nữa hệ thống xe buýt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

- [1].Chen, George S.Y., 2005. *Taiwan's Sustainable Transportation Development Policy for the 21st Century*. National Policy Foundation, Taiwan.
- [2].Dinh Van Nguyen, K.D. Kim, and P. Warnitchai, 2006. *Three- dimensional modeling and dynamic analysis of articulated high-speed train-bridge interaction*. Proceedings of The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-10), Bangkok, Thailand. Volume 3: Wind and Earthquake Engineering, pp. 369-374.
- [3].Kim, Ki Du, 2004. *XFINAS Theory Manual 2.0*: Asian Institute of Technology, Thailand.
- [4].Kim, Man-Cheol, Chung Woo-Jin, and Kang Kee-Dong, 2001. Performance Evaluation of KHSR Bridge using Two-Dimensional Train/Track/Bridge Interaction Analysis Method *Korea Railroad Research Institute Report*. 374-1, Woulam-Dong, Uiwang-City, Kyonggi-Do, 437-050, Korea.
- [5].Kwark J.W., Choi E.S., Kim Y.J., Kim B.S., Kim S.I., 2004. Dynamic behavior of two-span cont. concrete bridges under moving high-speed train. *Computers and Structures* 82 (2004) 463-474.
- [6].Dinh Van Nguyen, K.D. Kim, P. Warnitchai, and D.M. Duc, 2006. "Evaluation of passenger ride comfort, noise and operation safety of elevated high-speed trains". Proceedings of The 12th International Seminar on Transport Research Symposium (ISSOT-12), Bangkok. pp. 166-175.
- [7].Dinh Van Nguyen, 2004- nay (Đang tiến hành). *Dynamic Analysis of High-speed Train- Bridge Interaction*: D.Eng. Dissertation. Structural Engineering FoS. Asian Institute of Technology.
- [8].Dinh Van Nguyen, 11-2005. *Dynamics Analysis of Bridge under moving Vehicles*: School Seminar, School of Engineering and Technology. Asian Institute of Technology.
- [9].Thủ tướng Chính phủ, 2002. *Quyết định phê duyệt "Quy hoạch tổng thể phát triển ngành giao thông vận tải đường sắt Việt Nam đến năm 2020"*. Hà Nội, Việt Nam
- [10]. Yang Y.B., Yau J.D., and Wu Y.S., 2004. *Vehicle-Bridge Interaction Dynamics: with Applications to High-Speed Railways*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Người phản biện: TS. Hà Xuân Chuẩn