

Phân tích kết cấu cầu thang Ridolfi bằng phương pháp phần tử rời rạc

Structural analysis of Ridolfi stair using discrete element method

Phan Thanh Lượng

Tóm tắt

Cầu thang Ridolfi là một tác phẩm kiến trúc độc đáo. Tuy nhiên việc chế tạo và dựng lắp hoàn toàn dựa trên kinh nghiệm của nhóm tác giả và thợ thủ công. Vì vậy, việc đánh giá khả năng làm việc của kết cấu là cần thiết để có thể đưa công trình vào sử dụng trong thực tế. Bài báo trình bày các bước xây dựng mô hình số của kết cấu này và tiến hành phân tích ứng xử của các bộ phận cầu thang bằng phương pháp phần tử rời rạc. Kết quả thu được khẳng định sự an toàn của việc sử dụng cầu thang này trong điều kiện bình thường, đồng thời cho thấy ảnh hưởng một số thông số tới sự ổn định của kết cấu.

Từ khóa: Mô hình hóa, phương pháp Phần tử rời rạc, kết cấu gạch đá

Abstract

Ridolfi stair is an exceptional architectural work. However, its creation and installation are mostly based on the experiences of authors and craftsmen. Therefore, the evaluation of the workability of the structure is essential before using it in real constructions. The article presents the process of building a numerical model of the structure and studying the behaviors of stair members by using the Discrete Element Method. Simulation results confirm the safety of the exploitation of the stair in normal conditions of use, and also show the affection of some factors to its stability.

Key words: Modeling, Discrete Element Method, masonry structure

TS. Phan Thanh Lượng

Bộ môn Kết cấu Thép - Gỗ, Khoa Xây Dựng
ĐT: 0904197411

Email: luongpt@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 28/5/2020

Ngày sửa bài: 29/5/2020

Ngày duyệt đăng: 9/3/2022

1. Đặt vấn đề

Cầu thang kiểu Ridolfi là một tác phẩm kiến trúc của GS.TS.KTS. C. d'Amato và đồng nghiệp tại đại học Bari, Italy đã được giới thiệu tại triển lãm quốc tế về đá tại Verone năm 2005. Đây là một cầu thang tự đứng với các bậc được làm bằng đá nguyên khối và một hệ thống cáp ứng lực trước ở bên trong. Kết cấu được lắp dựng tại chỗ với liên kết khô không vữa và căng cáp trực tiếp. Tuy nhiên việc lựa chọn hình dạng, kích thước, lựa chọn vật liệu cũng như số lượng và đường kính cáp là hoàn toàn dựa vào kinh nghiệm của người thiết kế và đội ngũ thợ thủ công. Do đó, việc tính toán, phân tích sự làm việc của kết cấu này là cần thiết để đảm bảo điều kiện an toàn trong sử dụng và khả năng áp dụng vào thực tế.

Kết cấu này đã được phân tích, mô phỏng bằng phần mềm ANSYS dựa trên nguyên lý của phương pháp phần tử hữu hạn. Mặc dù đã thu được một số kết quả nhất định, mô hình còn có một số hạn chế và chưa thực sự phù hợp với sự làm việc không liên tục của kết cấu này. Trong những năm gần đây, phương pháp phần tử rời rạc [1] được sử dụng ngày càng rộng rãi trong các nghiên cứu ở nhiều lĩnh vực khác nhau, và cho thấy sự phù hợp trong việc mô phỏng tính toán kết cấu gạch đá trong xây dựng [2]. Do đó, tác giả đã sử dụng phần mềm LMGC90 [3], được phát triển bởi trường đại học Montpellier, Cộng hòa Pháp, dựa trên cơ sở của phương pháp tiếp xúc động không trơn [4], một trong các họ phương pháp rời rạc, để mô hình hóa và phân tích sự làm việc của kết cấu này. Kết quả nghiên cứu nhằm khẳng định sự an toàn cũng như chỉ ra các giới hạn cho phép của các thông số ảnh hưởng đến khả năng sử dụng của công trình.

2. Xây dựng mô hình

2.1. Mô hình hình học

Cầu thang Ridolfi là một kết cấu dạng xoắn ốc chiều cao 3 m, mỗi bậc rộng 1,2 m cao 15 cm được chế tạo từ đá nguyên khối với hình dạng khá phức tạp. Do đó, việc xây dựng trực tiếp mô hình hình học trong các phần mềm phân tích kết cấu là rất khó khăn. Trong nghiên cứu này sử dụng AutoCAD là một phần mềm đồ họa mạnh và phổ biến trong xây dựng. Nhờ đó, mô hình cầu thang được dựng lên với hình dạng và kích thước đúng với kết cấu thực.

Sau khi các bậc cầu thang được xây dựng chính xác dạng khối 3D trong AutoCAD, chúng được chuyển qua Gmsh, một phần mềm đồ họa trung gian, để chuyển thành các đối tượng dạng mặt và được chia lưới với độ mịn theo yêu cầu. Lưới chia này dùng để kiểm tra và thiết lập các tiếp xúc giữa các phần tử, một trong những nội dung cơ bản của phương pháp phần tử rời rạc. Cách chia lưới có thể sẽ ảnh hưởng đến khối lượng tính toán cũng như độ chính xác của các kết quả phân tích. Cuối cùng, các đối tượng này được đưa vào LMGC để xây dựng lên mô hình hình học của kết cấu (hình 2).

2.2. Mô hình cơ học

Việc phân tích kết cấu trong một hệ rời rạc gồm hai nội dung chính: xác định tiếp xúc giữa các phần tử và mô phỏng ứng xử cơ học của tiếp xúc đó.

Bằng các công cụ và thuật toán mạnh mẽ, phong phú, LMGC90 cho phép xây dựng mô hình số của kết cấu này với mỗi bậc cầu thang là một phần tử có hình dạng phức tạp như nguyên dạng mà vẫn đảm bảo khả năng xác định tiếp xúc giữa các phần tử. Ở đây, thuật toán tô màu được áp dụng để giảm bớt khối lượng tính toán. Theo đó, mỗi phần tử sẽ được gán một màu nào đó, và trong quá trình phân tích sẽ chỉ tìm kiếm tiếp xúc giữa các phần tử có màu nhất định trong một phạm vi nhất định. Bằng cách đó sẽ giảm đáng kể thời gian xử lý.

Tiếp theo, tiếp xúc giữa các bậc đá là tiếp xúc trượt thuần túy và sẽ được mô phỏng bằng một tiếp xúc khô dạng Coulomb. Trong tiếp xúc này, lực tiếp tuyến sẽ tỉ lệ với lực pháp tuyến theo hệ số ma sát f . Cuối cùng, các cáp ứng lực trước được mô tả bằng liên kết dạng dây căng (chỉ chịu kéo không chịu nén) giữa các

điểm ảo được bổ sung bên trong phần tử, lực căng trước được biểu diễn bằng một biến dạng ban đầu của dây này.

2.3. Số liệu tính toán

Các số liệu ban đầu được lấy như sau:

- Vật liệu đá: khối lượng riêng $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$; hệ số ma sát bề mặt $f = 0,8$

- Cáp ứng lực trước: mô đun đàn hồi $E = 1,95.105 \text{ MPa}$; đường kính $d = 1,5 \text{ cm}$; diện tích tiết diện $A = 1,77 \text{ cm}^2$; độ cứng đơn vị $k = E.A = 3,4515.10^4 \text{ kN}$

- Lực căng trước: lực căng được mô tả bằng biến dạng ban đầu của dây cáp $e_0 = 10^{-3}$ tương đương với lực căng $F = 34,515 \text{ kN}$

- Tải trọng sử dụng: được lấy với giả thiết trên mỗi bậc có 1 người khối lượng 50 kg gây ra tải trọng $P = 490,5 \text{ N/bậc}$

- Gia tốc trọng trường: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Trong quá trình phân tích, hệ số ma sát f và lực căng F sẽ được thay đổi để khảo sát ảnh hưởng của các thông số này đến sự làm việc của kết cấu.

2.4. Phân tích kết quả

Kết quả phân tích cho phép xác định lực căng trong cáp, áp lực giữa bề mặt tiếp xúc của các bậc cũng như giữa bậc dưới cùng và đế, và một thông số quan trọng nữa là chuyển vị của các bậc, đặc biệt là bậc trên cùng. Từ đó, ta có thể kiểm tra khả năng chịu lực của cáp cũng của bậc đá. Ngoài ra, sự ảnh hưởng của một số yếu tố như hệ số ma sát giữa các bậc, sai số bề mặt, cách chắt tải cũng như lực căng cáp đến sự làm việc của kết cấu cũng được khảo sát.

3. Các kết quả nghiên cứu

3.1. Ảnh hưởng của quá trình gia tải và phương pháp chắt tải

Một đặc điểm của mô hình rời rạc là tính toán dựa trên phương trình cân bằng động của các phần tử theo thời gian. Do đó, thời điểm và tốc độ gia tải cũng là một yếu tố cần quan tâm.

a. Tốc độ gia tải

Hình 3 biểu diễn biến động chuyển vị theo phương ngang của bậc thang trên cùng trong quá trình chắt tải. Trong các phân tích tiếp theo, đại lượng này cũng được lựa chọn theo dõi để đánh giá sự làm việc của kết cấu dựa trên tính nhạy cảm với các ứng xử của kết cấu dưới tác động bên ngoài.

Ở đây, ứng lực trước của cáp và trọng lượng bản thân được đặt vào kết cấu ngay lập tức ở thời điểm bắt đầu tính toán, và sau 30s, toàn bộ hoạt tải được đặt vào một cách tức thời. Biểu đồ cho thấy rất rõ, khi đặt tải lên mô hình, luôn luôn xuất hiện một pha “sốc” làm kết cấu bị dao động, làm ảnh hưởng đến tính chính xác của kết quả tính toán. Mặc dù đến cuối cùng kết cấu có thể ổn định ở trạng thái cân bằng, nhưng tại thời điểm chắt tải, dao động quá lớn có thể dẫn tới chuyển vị vượt mức cho phép hoặc thậm chí gây sập đổ công trình. Để hạn chế hiện tượng này, cần quan tâm đến cách chắt tải và tốc độ gia tải lên mô hình làm sao phù hợp với thực tế và hạn chế ảnh hưởng đến tính toán.



Hình 1. Cầu thang kiểu Ridolfi tại triển lãm Verona 2005 [5]

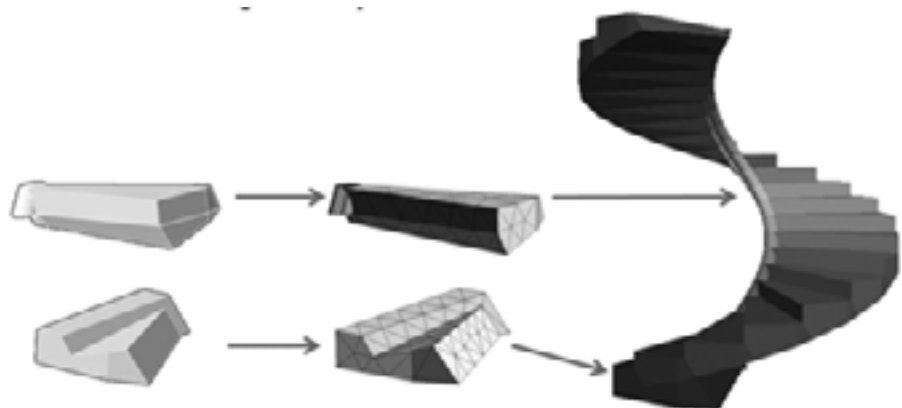
Sau khi so sánh, phân tích mức độ ảnh hưởng [5], tác giả lựa chọn phương án chắt tải như sau:

- + Trước hết, lực căng cáp sẽ được đưa vào ngay từ đầu.
- + Tiếp theo, trọng lượng bản thân kết cấu sẽ được đặt vào bằng cách tăng dần đều trong 10s.
- + Dừng lại 2s để dao động trong kết cấu tắt hẳn.
- + Cuối cùng, bắt đầu chắt hoạt tải lên kết cấu, lần lượt từng bậc từ dưới lên trên, mỗi bậc trong 1s thông qua một hàm tuyến tính, tổng cộng 20 bậc trong vòng 20s.

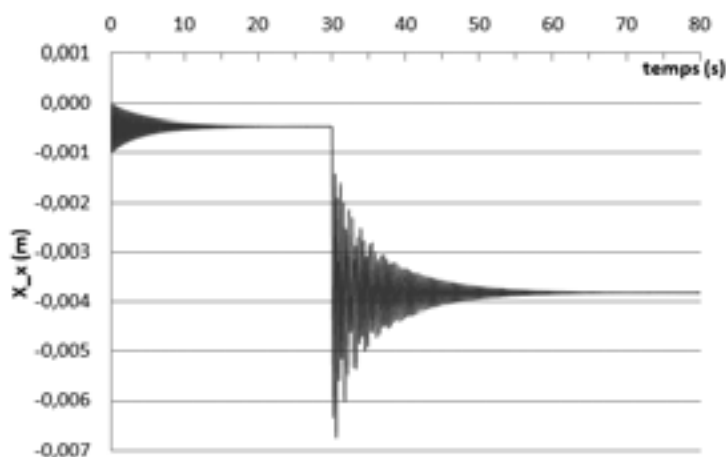
Trong các tính toán tiếp theo đều sử dụng mô hình chắt tải này. Kết quả cho thấy hiện tượng “sốc” giảm gần như hoàn toàn (hình 4, hình 5, hình 7).

b. Cường độ tải trọng

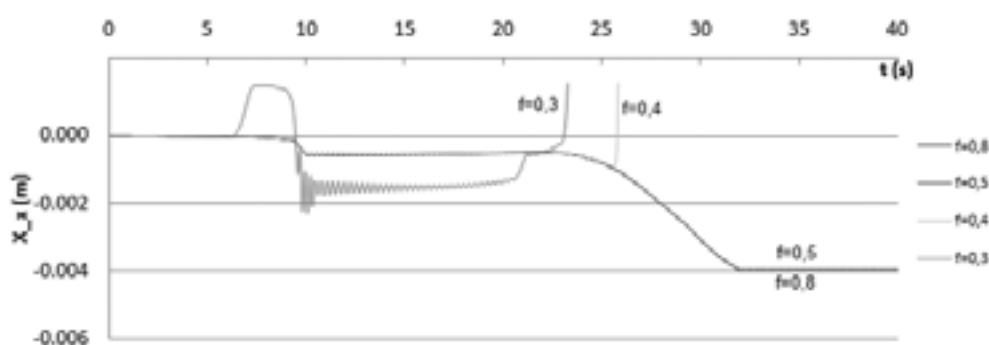
Một thử nghiệm cũng được tiến hành để đánh giá ảnh hưởng của cường độ tải trọng. Căn cứ vào hoạt tải ban đầu $P = 490,5 \text{ N/bậc}$, giá trị này được tăng gấp 2, 4 và 8 lần rồi tính toán chuyển vị của kết cấu dưới tác động của tải trọng



Hình 2. Xây dựng mô hình hình học (AutoCad – Gmsh – LMGC90)



Hình 3. Chuyển vị theo phương trục X của bậc thang trên cùng



Hình 4. Ảnh hưởng của hệ số ma sát đến chuyển vị của bậc đỉnh

(bỏ qua trọng lượng bản thân). Kết quả so sánh thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Tải trọng và chuyển vị lớn nhất tương ứng

Hệ số tải trọng	1	2	4	8
Chuyển vị lớn nhất (m)	-1,48E-05	-2,85E-05	-1,29E-03	-1,63E-02

Kết quả này cho thấy, khi tải trọng đủ lớn, chuyển vị tăng nhanh hơn rất nhiều so với độ tăng tải trọng. Điều đó chứng tỏ sự làm việc phi tuyến của kết cấu này. Như vậy, không thể áp dụng nguyên lý cộng tác dụng khi phân tích kết cấu này cũng như những kết cấu tương tự.

3.2. Ảnh hưởng của hệ số ma sát bề mặt

Để khảo sát ảnh hưởng của hệ số ma sát f đến sự làm việc của kết cấu, các thông số đầu vào được giữ nguyên, riêng giá trị hệ số này được thay đổi dần để đánh giá. Kết quả được thể hiện như trong hình 4. Nhiều số liệu đã được tính toán, trong bảng chỉ thể hiện những giá trị có tính chất điển hình.

Kết quả khảo sát cho thấy, với hệ số ma sát trên 0,5 kết cấu luôn ổn định và làm việc bình thường, chuyển vị lớn nhất ở bậc trên cùng khoảng 4 mm. Như vậy, với hệ số ma sát thực tế giữa đá với đá khoảng 0,8 thì kết cấu hoàn toàn đủ khả năng chịu lực. Với hệ số ma sát $f = 0,4$, kết cấu bị mất ổn định ở khoảng 26s, tức là trong khi đang chất hoạt tải. Với hệ số ma sát $f = 0,3$, kết cấu bị đổ sớm hơn, ở khoảng 23s, nhưng tại thời điểm khoảng 7s, trong khi chất tĩnh tải, thì có một chuyển vị nhỏ gây dao động trong kết cấu.

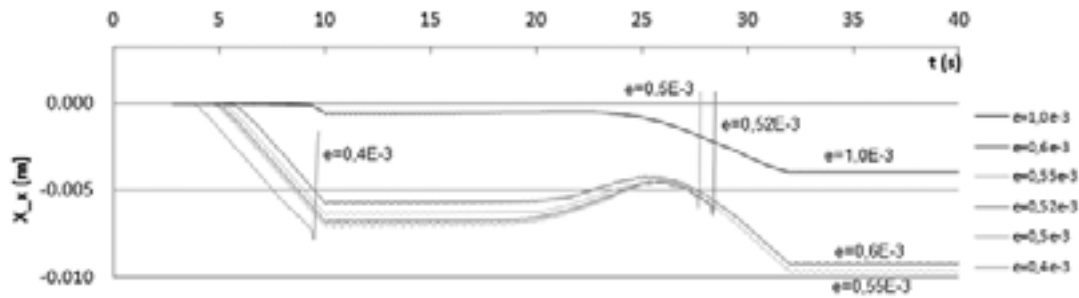
3.3. Ảnh hưởng của lực căng cáp

Trong phần này, các số liệu khác được giữ nguyên, riêng giá trị lực căng cáp được thay đổi thông qua điều chỉnh biến dạng căng ban đầu để đánh giá mức độ ảnh hưởng cũng như xác định lực căng giới hạn. Kết quả khảo sát ảnh hưởng của lực căng cáp như trong hình 5.

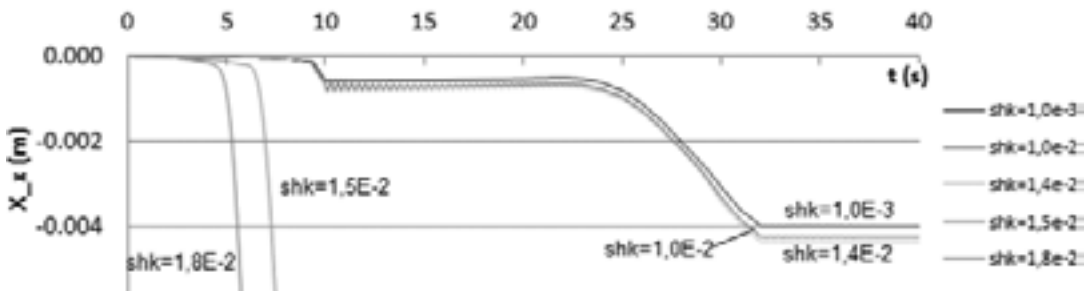
Với biến dạng ban đầu lớn hơn $0,55 \cdot 10^{-3}$ (tương đương lực căng khoảng 20kN), kết cấu đảm bảo làm việc ổn định với chuyển vị bậc đỉnh khoảng 4 đến dưới 10 mm. Với biến dạng ban đầu $e = 0,52 \cdot 10^{-3}$, công trình bị mất ổn định tại thời điểm khoảng 28s, trong quá trình chất hoạt tải. Điều đó có nghĩa kết cấu có thể chịu được tải trọng bản thân và một phần hoạt tải, nếu chất tải toàn bộ các bậc thì công trình sẽ sập đổ. Tương tự, với $e = 0,4 \cdot 10^{-3}$ cầu thang bị phá hoại sớm hơn, tại thời điểm 9,5s dưới tác dụng của trọng lượng bản thân, khi tĩnh tải được chất gần như toàn bộ.

3.4. Ảnh hưởng của sai số hình học

Một đặc điểm của kết cấu gạch đá là quá trình sản xuất, vận chuyển và lắp dựng sử dụng rất nhiều thao tác thủ công, đồng thời độ cứng vật liệu không lớn, do đó dễ dẫn tới những sai lệch, sụt mẻ cấu kiện. Điều này trong nhiều trường hợp làm ảnh hưởng tới độ chính xác của bề mặt tiếp xúc là bộ phận truyền lực chính trong hệ kết cấu này dẫn tới diện tích tiếp xúc thực tế không đảm bảo đủ như thiết kế ban đầu. Trong các trường hợp thông thường, các giai đoạn chế tạo được thực hiện và giám sát tốt, thì sai số này có thể nhỏ không đáng kể. Nhưng nếu điều kiện kỹ thuật không đảm bảo, gây sai số lớn thì có thể ảnh hưởng nghiêm trọng đến



Hình 5. Ảnh hưởng của lực căng cáp đến chuyển vị của bậc đỉnh



Hình 6. Ảnh hưởng của sai số hình học đến chuyển vị của bậc đỉnh

sự làm việc của kết cấu. Do đó nghiên cứu đồng thời tiến hành đánh giá mức độ ảnh hưởng của sai số này thông qua hệ số shk (shrinkage) thể hiện mức độ giảm diện tích bề mặt tiếp xúc giữa hai phần tử:

$$A_{tt} = (1 - shk) \cdot A_{tt}$$

Trong đó:

A_{tt} – diện tích tiếp xúc xác định theo lý thuyết

A_{tt} – diện tích tiếp xúc sử dụng trong tính toán

Hệ số này có tác động trực tiếp đến độ lớn của lực tiếp xúc cũng như cân bằng mômen xoay trong các tiếp xúc kiểu mặt-mặt. Kết quả phân tích ảnh hưởng của sai số hình học thể hiện trong hình 6.

Biểu đồ cho thấy cầu thang làm việc ổn định với sai số hình học nhỏ hơn 1,4%. Vượt quá giá trị này, công trình sẽ bị phá hủy rất nhanh. Kết quả này cho thấy sự nhạy cảm của kết cấu với thông số này.

4. Kết luận và kiến nghị

Kết quả phân tích cho thấy trong điều kiện sử dụng bình thường, với thông số thiết kế và chế tạo đã áp dụng, kết cấu cầu thang kiểu Ridolfi hoàn toàn có thể đảm bảo khả năng làm việc an toàn, đủ điều kiện để đưa vào ứng dụng trong thực tế.

Các tính toán này khẳng định khả năng làm việc và sự cần thiết của cấp ứng lực trước trong việc đảm bảo sự ổn định của công trình này.

Ma sát bề mặt cũng đóng vai trò quan trọng trong sự làm việc ổn định của kết cấu, do đó khi chế tạo những kết cấu tương tự sử dụng vật liệu khác cũng cần quan tâm đến yếu tố này.

Sai số hình học cũng là một yếu tố gây ảnh hưởng đáng kể, nên trong quá trình chế tạo, vận chuyển, dựng lắp cần kiểm soát kỹ để giảm thiểu những sai sót này.

Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy sự làm việc phi tuyến của công trình. Do đó khi tính toán các công trình tương tự cần xem xét kỹ các điều kiện để có thể áp dụng nguyên lý cộng tác dụng.

Bài báo này là một ví dụ minh họa trực quan cho ứng dụng của phương pháp phần tử rời rạc nói chung, và phương pháp tiếp xúc động không trơn nói riêng, trong việc mô hình hóa tính toán kết cấu gạch đá. Một quy trình tương tự có thể áp dụng với các công trình gạch đá khác, bằng cách điều chỉnh các thông số hình học, các quy luật tiếp xúc, các số liệu tải trọng từ đó cho phép phân tích đầy đủ, chính xác sự làm việc của kết cấu. Các kết quả này góp phần thúc đẩy các nghiên cứu cũng như ứng dụng trong lĩnh vực liên quan.

Các phân tích chi tiết hơn về cách thức phá hoại thông qua kiểm soát lực căng trong cáp và phản lực liên kết sẽ được trình bày trong một bài báo tiếp theo./.

Tài liệu tham khảo

1. P.A. Cundall, O.D.L. Strack (1979), A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29, No. 1, 47-65.
2. Phan Thanh Lượng (2020), Ứng dụng phương pháp phần tử rời rạc trong xây dựng, *Tạp chí Kiến trúc & Xây dựng*, số 37, tháng 2.2020.
3. F. Dubois, M. Jean, M. Renouf, R. Mozul, A. Martin, M. Bagnieris (2011), LMGC90, CMSA 2011, 10e Colloque National en Calcul des Structure.
4. M. Jean (1999), The non-smooth contact dynamics method, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 177, no. 3-4, pp. 235-257, Jul. 1999.
5. L. Phan (2015), Etude des structures en maçonnerie du génie civil par la méthode des éléments discrets: apports de la méthode « Non Smooth Contact Dynamics », University Montpellier