

# NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG ỨNG XỬ CỦA BÊ TÔNG XỈ THÉP BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ RỜI RẠC

## DISCRETE ELEMENT MODEL FOR SIMULATING BEHAVIOR OF STEEL SLAG CONCRETE

<sup>1</sup>KS. Nguyễn Xuân Khánh, <sup>2</sup>TS. Trần Văn Tiếng.  
<sup>2</sup>Trường đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM, Việt Nam.

### TÓM TẮT

*Xi thép là sản phẩm phụ của ngành công nghiệp luyện thép và việc sử dụng xỉ thép làm cốt liệu lớn cho bê tông đã giải quyết được các tồn tại của ngành công nghiệp luyện thép cũng như ngành vật liệu xây dựng. Việc nghiên cứu các ứng xử của bê tông xỉ thép sẽ mang lại những lợi ích hết sức quan trọng trong việc ứng dụng nó vào thực tiễn. Bài báo này trình bày thí nghiệm nén và mô hình ứng xử của bê tông xỉ thép bằng phần tử rời rạc. Kết quả đường quan hệ giữa ứng suất và biến dạng gần như trùng nhau, chứng tỏ kết quả mô phỏng là đáng tin cậy.*

**Từ khóa:** Bê tông, cốt liệu xỉ thép, cốt liệu tự nhiên, cường độ, module đàn hồi, hệ số poisson.

### ABSTRACT

*Steel slag is a byproduct of the siderurgy industry and the use of steel slag as coarse aggregate for concrete has solved the problems of the siderurgy industry as well as the construction of materials industry. Researching in the behavior of steel slag concrete will have extremely important benefits in its practical application. This article represents the elastic module determined experiment and behavior model of steel slag concrete by discrete element method. Meanwhiles, based on this result, it can be seen between relative line of simulation and experiment, the two results are almost closed to each others then and the result is very reliable.*

**Keywords:** Concrete, steel slag aggregate, nature aggregate, strength, elastic modulus, poisson, ratio.

## 1. GIỚI THIỆU

Xi thép hay bê tông xỉ thép là những vật liệu tái chế được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau ở nhiều nước trên thế giới [1], [2]. Trong những năm gần đây, Việt Nam cũng đã có những nghiên cứu về việc ứng dụng xỉ thép trong xây dựng [3]–[6]. Tuy nhiên, để có thể đưa được các nghiên cứu này vào thực tiễn thì đòi hỏi khối lượng thực nghiệm rất lớn và chi phí thường rất cao. Do đó, việc dùng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng vật liệu bê tông xỉ măng dùng cốt liệu lớn là xỉ thép là hết sức cần thiết

## 2. PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ RỜI RẠC VÀ MÔ PHỎNG

### 2.1. Khái niệm về DEM và thông số đầu vào

Phương pháp phần tử rời rạc là một tập hợp các phần tử độc lập nằm trong giới hạn

nhằm nâng cao tính chính xác trong tính toán mô phỏng, từ đó áp dụng trong tính toán dự đoán ứng xử của các cấu kiện sử dụng bê tông xỉ thép góp phần thúc đẩy sử dụng loại bê tông này trong ngành xây dựng của nước ta

Trong bài báo này trình bày quá trình thực nghiệm xác định quan hệ giữa ứng suất và biến dạng, xây dựng luật ứng xử của bê tông dùng cốt liệu lớn là xỉ thép; Mô phỏng số mẫu bê tông xỉ măng dùng cốt liệu lớn là xỉ thép bằng phương pháp phần tử rời rạc; So sánh kết quả mô phỏng số thực nghiệm để điều chỉnh mô hình số

kích thước của vật liệu. Trong nghiên cứu này, sử dụng phương pháp phần tử rời rạc cổ điển do Cundall & Strack đề xuất năm 1979. Trong nghiên cứu này, module đàn hồi được sử dụng trong mô phỏng số là giá trị được tính theo công thức kinh nghiệm ACI[5], các giá trị  $\phi$ ,  $\sigma_T$  (giới hạn chịu kéo của các phần

tử rời rạc) được lấy từ kết quả hiệu chuẩn. Thông số đầu vào của mô hình được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1 Thông số đầu vào cho mô hình của từng cấp phối.

Tên cấp phối	$\sigma_T$ (Pa)	$\varphi$ (Độ)	Khối lượng thể tích (kg/m <sup>3</sup> )	Hệ số poisson	Module đàn hồi (Gpa)
XT01	0.5e <sup>6</sup>	8.53	2532.12	0.17	26.63
XT02	0.5e <sup>6</sup>	11.85	2600.18	0.14	31.86
XT03	0.5e <sup>6</sup>	19.79	2592.12	0.16	35.15

## 2.2. Mô phỏng

### 2.2.1. Mô hình ứng xử DEM cho bê tông xi thép

Trong nghiên cứu này, bê tông xi thép được mô phỏng bằng phương pháp phần tử rời rạc cổ điển do Cundall & Strack đề xuất. Các phần tử rời rạc là hình cầu có đường kính

- Bước 1: xác định tương tác giữa các phần tử rời rạc dựa vào thông số và bán kính tương tác.
- Bước 2: sử dụng luật tương tác (luật ứng xử cục bộ) để tính lực tương tác giữa hai phần tử rời rạc, lực này gồm lực pháp tuyến và lực tiếp tuyến.

Đối với loại vật liệu có tính dính và ma sát, quá trình mô phỏng sẽ có hai dạng tương tác. Dạng tương tác đầu tiên là tương tác có tính dính (link interaction) được hình thành trong quá trình bắt đầu mô phỏng. Kiểu tương tác thứ hai là tương tác tiếp xúc (contact interaction) được hình thành trong quá trình mô phỏng [8]. Các tương tác này được kiểm soát bởi hệ số  $\gamma$ , hai phần tử tương tác khi [8]:

$$D_{ab} = \gamma(R_a + R_b) \quad (1)$$

Trong đó:  $R_a$  và  $R_b$ , lần lượt là bán kính của hai quả cầu,  $D_{ab}$  là khoảng cách từ trọng tâm của  $DE_a$  đến  $DE_b$ . Những giá trị trên là không đổi trong suốt quá trình tương tác và được tính toán duy nhất một lần trong khi sự tương tác được thiết lập. Hai quả cầu tiếp xúc nhau khi  $\gamma = 1$ .

Để giảm thời gian tính toán, lực tương tác trong mô phỏng của các phần tử rời rạc

bất kỳ được tỷ lệ với cốt liệu trong bê tông xi thép. Các phần tử rời rạc độc lập với nhau và tuyệt đối cứng. Mẫu mô phỏng là tập hợp các phần tử rời rạc, các phần tử này không chịu tác dụng của tải trọng, trình tự của thuật toán gồm có các bước sau [8]:

- Bước 3: tính tổng lực tác dụng lên mỗi phần tử rời rạc.
- Bước 4: áp dụng định luật Newton II để tính gia tốc cho từng phần tử rời rạc, gia tốc này sẽ được phân tích theo thời gian để tìm vị trí mới.
- Trình tự này lặp lại trong mọi bước thời gian  $i$  và dừng lại thí nghiệm kết thúc.

chỉ cần là lực tương tác đàn hồi tuyến tính. Trong mô hình mô phỏng, véc tơ lực tương tác  $\mathbf{F}$  có thể phân tích thành véc tơ lực pháp tuyến  $\mathbf{F}_n$  và véc tơ lực tiếp tuyến  $\mathbf{F}_s$ . Hai lực này được tính từ chuyển vị pháp tuyến tương đối và gia số chuyển vị tiếp tuyến tương ứng, thông qua các hệ số độ cứng  $K_n$  theo phương pháp tuyến và  $K_s$  theo phương tiếp tuyến [8]. Từ đó, đã có đề xuất xác định các hệ số độ cứng  $K_n$  theo phương pháp tuyến [8], độ cứng  $K_s$  theo phương tiếp tuyến [8]. Các hệ số độ cứng biểu diễn tương tác trong giai đoạn tuyến tính đàn hồi được xác định như sau:

$$\begin{cases} K_n = 2E \frac{R_A R_B}{(R_A + R_B)} \\ K_s = \alpha K_n \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó:  $K_n$  là độ cứng theo phương pháp tuyến và  $K_s$  độ cứng theo phương tiếp tuyến của các véc tơ lực.  $R_A, R_B$  lần lượt là

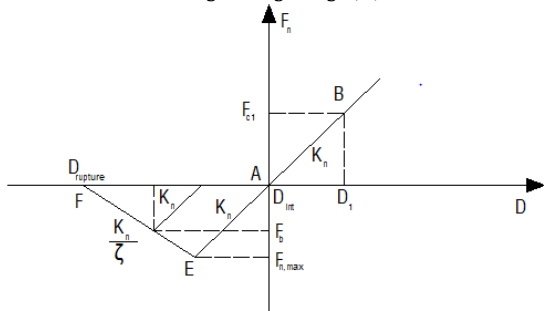
bán kính của các DE. E là mô dule đàn hồi của bê tông xi thép.

Lực tương tác pháp tuyến được xác định bằng việc cập nhật luật ứng xử cục bộ (hình 1) và tính trong hai quá trình thí nghiệm, thí nghiệm kéo và thí nghiệm nén. Lực tương tác pháp tuyến được tính bởi:

$$F_n = K_n(D_{ab} - D_{eq}) \quad (3)$$

Trong bê tông các hạt cốt liệu được liên kết với nhau bằng chất kết dính là xi măng. Do đó, giữa các DE sẽ tồn tại khả năng chịu kéo trong quá trình tương tác. Trong giai đoạn chịu kéo lực tương tác pháp tuyến sẽ được tính theo công thức (3). Tuy nhiên, lực tương tác này sẽ bị mất đi khi  $D_{ab} > D_{rupture}$ . Khi đó, véc tơ lực tương tác tiếp tuyến  $F_s$  được tính toán bởi sự cập nhật hướng tương tác phụ thuộc vào hướng của đường nối tâm của hai phần tử tương tác với nhau, và cộng thêm gia số của véc tơ lực tiếp tuyến  $\Delta F_s$  [8], xác định bởi

$$\Delta F_s = F_s \Delta U_s \quad (5)$$



Hình 1. Lực tương tác pháp tuyến giữa hai phần tử rời rạc.

Để mô phỏng ứng xử của các vật liệu có tính rời rạc như bê tông tiêu chuẩn Mohr – Coulomb hiệu chỉnh (hình 1) được sử dụng [8]. Lực tương tác pháp tuyến cực đại  $F_{n,max}$  được định nghĩa như một hàm của cường độ chịu kéo thông qua lực dính C. Lực tương tác tiếp tuyến cực đại  $F_{s,max}$  được đặc trưng bởi lực pháp tuyến  $F_n$ , lực dính C, góc ma sát tương tác  $\Phi_c$  và góc nội ma sát  $\Phi_i$  [3]. Lực  $F_{n,max}$ ,  $F_{s,max}$  được xác định bởi:

❖ **Lực pháp tuyến cực đại**

$$F_{n,max} = -CA_{int} \quad (6)$$

❖ **Lực tiếp tuyến cực đại**

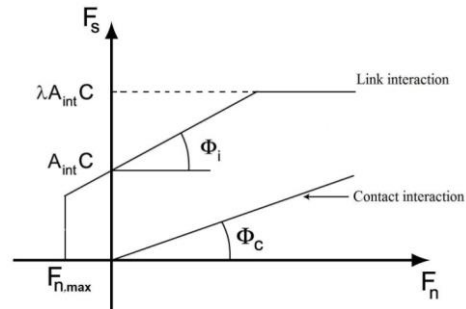
➤ **Tương tác mà sát – dính**

$$F_{s,max} = F_n \tan \Phi_c + CA_{int} \quad (7)$$

➤ **Tương tác thuần tiếp xúc**

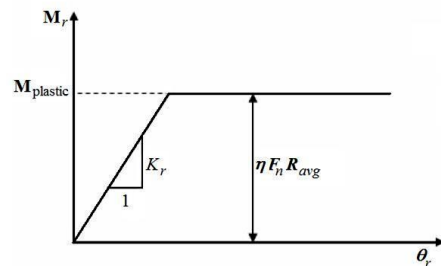
$$F_{s,max} = F_n \tan \Phi_c \quad (8)$$

Với  $A_{int} = \pi (\min(R_a, R_b))^2$  là diện tích bề mặt tương tác, C là lực dính.



Hình 2. Tiêu chuẩn Mohr-Coulomb dùng trong mô hình.

Khi sử dụng các phần tử là hình cầu để mô phỏng, trong quá trình mô phỏng xảy ra biến dạng cắt sẽ chuyển tiếp mô men giữa các hạt. Giá trị mô men này sẽ được giới hạn lại sao cho góc ma sát ứng với mô men này là phù hợp nhất đối với vật liệu bê tông xi thép như hình 3.



Hình 3. Luật về mô men chuyển tiếp giữa các DE.

2.2.2. Mẫu thí nghiệm số

Xây dựng các mẫu thí nghiệm số bê tông xi thép, mô phỏng các ứng xử của mẫu thí nghiệm số, xác định mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng.

Các mẫu thí nghiệm số được sử dụng là mẫu hình hộp chữ nhật có kích thước 150×150×300 mm, số lượng hạt trong mẫu là 10000 hạt hình cầu với đường kính thay đổi bất kỳ (Hình 4).



Hình 4. Mẫu vật liệu mô phỏng số.

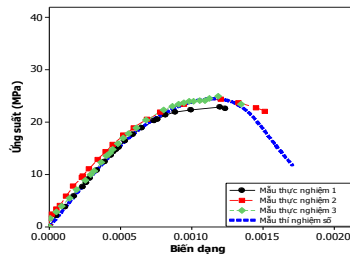
### 2.2.3. Thí nghiệm nén một trục

Điều kiện biên của thí nghiệm nén dọc trục được thể hiện trong hình 4. Mẫu thí nghiệm có 6 biên được xem như 6 tường có  $E = E_{DE}$ ,  $\varphi = 0$ . Chuyển vị ở biên trên là  $\varepsilon_{trên}$  và biên dưới  $\varepsilon_{dưới}$ , biên dưới  $\varepsilon_{dưới} = 0$  ứng với mọi bước thời gian trong quá trình mô phỏng số, biên trên  $\varepsilon_{trên}$  cho chuyển vị với mọi bước thời gian trong quá trình mô phỏng số và

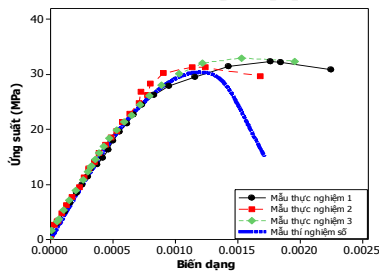
## 3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG SỐ

### 3.1. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng

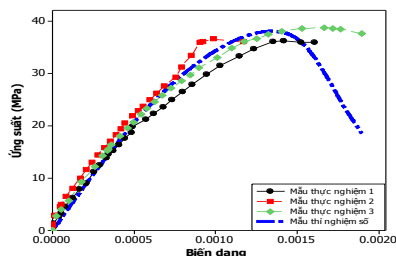
Mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của mẫu bê tông thực nghiệm và mẫu thí nghiệm số ứng với các cấp phối bê tông khác nhau XT01, XT02, XT03 được thể hiện ở Hình 5, 6 và 7.



Hình 5. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng khi nén của bê tông xi thép cấp phối XT01



Hình 6. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng khi nén của bê tông xi thép cấp phối XT02



Hình 7. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng khi nén của bê tông xi thép cấp phối XT03

$\varepsilon_{trên} = 0$  chỉ khi thời gian  $t=0$ .

Mẫu thí nghiệm số có 4 mặt hông, những mặt hông này sẽ không bị giới hạn chuyển vị để cho mẫu thí nghiệm số được phép nở hông trong quá trình mô phỏng. Thí nghiệm mô phỏng dừng lại khi mẫu thí nghiệm số bị phá hoại, kết quả thí nghiệm được thể hiện qua biểu đồ mối quan hệ giữa  $\sigma_1 - \varepsilon_1$ .

Đường biểu diễn quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của mẫu thí nghiệm số có dạng tuyến tính khi tăng tải từ 0 đến 40% giá trị phá hoại là hoàn toàn phù hợp với đường thực nghiệm của bê tông xi thép [5].

Nếu tiếp tục tăng tải cho đến khi phá hoại, ứng suất đạt giá trị lớn nhất, đường biểu diễn quan hệ ứng suất và biến dạng của mẫu thí nghiệm số có dạng đường cong và xấp xỉ với kết quả thực nghiệm trên mẫu bê tông xi thép.

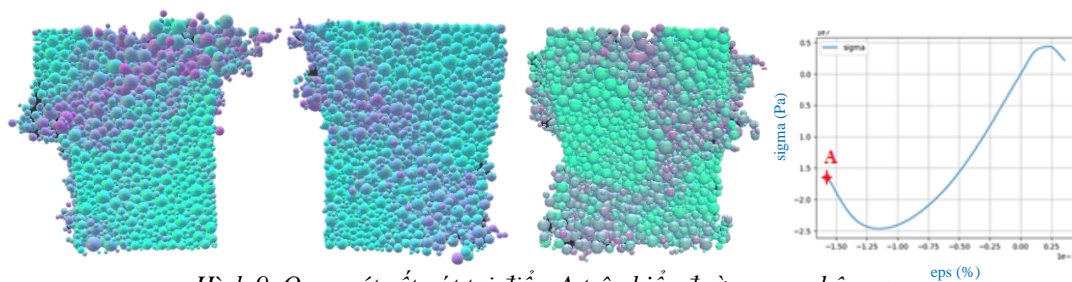
### 3.2. Hình dạng vết nứt

Quan sát các mẫu thực nghiệm khi phá hoại trong Hình 8, nhận thấy ở mặt ngoài, các đường nứt xuất hiện ở biên, có xu hướng nghiêng góc  $45^\circ$ , còn ở bên trong mẫu, các đường nứt cắt ngang cốt liệu, có xu hướng hướng tâm.



Hình 8. Vết nứt trên mẫu thí nghiệm thực nghiệm.

Các vết nứt trong mẫu thí nghiệm số hình thành do sự đứt gãy của tương tác giữa các phân tử, và sự tương tác giữa các phân tử chỉ bị phá hủy trong trường hợp chịu kéo (các DE chuyển dịch rời xa nhau). Kết quả mô phỏng ở Hình 9, cho thấy các vết nứt xảy ra trong mẫu thí nghiệm tại vị trí điểm A trên đồ thị ( $\sigma_1 - \varepsilon_1$ ) là vết nứt xiên phù hợp với kết quả trên mẫu bê tông thực nghiệm.



Hình 9. Quan sát vết nứt tại điểm A trên biểu đồ quan hệ  $\sigma_1-\epsilon_1$

#### 4. KẾT LUẬN

Kết quả mô phỏng đã cho thấy được khả năng của luật ứng xử rời rạc mà nghiên cứu này áp dụng.

Hình dạng vết nứt của mẫu thí nghiệm số phù hợp với kết quả thực nghiệm trên mẫu bê tông xi thép. Do đó, có thể dùng kết quả mô phỏng để xu hướng phá hoại của vật liệu khi không có số liệu thực nghiệm.

Đối với thí nghiệm nén dọc trục, trong giai đoạn đàn hồi tuyến tính đường quan hệ

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. Wang, "Properties and utilization of steel slag in engineering applications," 1992.
- [2] H. Yi, G. Xu, H. Cheng, J. Wang, Y. Wan, and H. Chen, "An Overview of Utilization of Steel Slag," in *Procedia Environmental Sciences*, 2012, vol. 16, pp. 791–801.
- [3] V. M. Trần and N. P. N. Tôn, "Nghiên cứu các tính chất của bê tông sử dụng cốt liệu xi thép," *Tạp chí Xây Dựng*.
- [4] T. T. H. Nguyễn, H. V. Nguyễn, Đ. H. Phan, and H. H. Mai, "Ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép cốt liệu xi thép," *Người Xây Dựng*.
- [5] T. T. H. Nguyễn, Đ. H. Phan, and H. H. Mai, "Xác định các đặc trưng cơ học của

$\sigma_1-\epsilon_1$  từ kết quả mô phỏng số tuy có xuất hiện sai số với thực nghiệm nhưng giá trị này là tương đối nhỏ. Đường quan hệ  $\sigma_1-\epsilon_1$  từ mô phỏng số gần như tương đồng với kết quả thực nghiệm, khi so sánh khả năng chịu nén của mô phỏng số  $\sigma_{\max, \text{nén}}$  và cường độ chịu nén từ kết quả thực nghiệm  $R_b$  là gần như bằng nhau.

bê tông sử dụng xi thép như cốt liệu lớn," *Tạp chí Xây Dựng*.

- [6] T. T. H. Nguyễn, Đ. H. Phan, and H. H. Mai, "Hiệu chỉnh thành phần cấp phối bê tông cốt liệu xi thép," *Người Xây Dựng*.
- [7] ASTM Standard C469/C469M, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, vol. i. 2014, pp. 1–5.
- [8] V. T. Tran, "Xây dựng mô hình số nhằm mô phỏng ứng xử của đất bằng phương pháp phần tử rời rạc (DEM)," *Tạp chí Xây Dựng*.

**Xác nhận của GVHD:**



# BÀI BÁO KHOA HỌC

THỰC HIỆN CÔNG BỐ THEO QUY CHẾ ĐÀO TẠO THẠC SỸ

Bài báo khoa học của học viên

có xác nhận và đề xuất cho đăng của Giảng viên hướng dẫn

---



Bản tiếng Việt ©, TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH và TÁC GIẢ

Bản quyền tác phẩm đã được bảo hộ bởi Luật xuất bản và Luật Sở hữu trí tuệ Việt Nam. Nghiêm cấm mọi hình thức xuất bản, sao chụp, phát tán nội dung khi chưa có sự đồng ý của tác giả và Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh.

**ĐỂ CÓ BÀI BÁO KHOA HỌC TỐT, CẦN CHUNG TAY BẢO VỆ TÁC QUYỀN!**

---

Thực hiện theo MTCL & KHTHMTCL Năm học 2018-2019 của Thư viện Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh.