

TÍNH TOÁN CHUYỂN VỊ NGANG CỦA KHUNG PHẪNG BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ KỂ ĐẾN PHI TUYẾN VẬT LIỆU BẰNG PHẦN MỀM LIRA-SAPR 2017

CALCULATION OF HORIZONTAL DISPLACEMENT OF A REINFORCED CONCRETE FRAME TAKE INTO ACCOUNT THE NONLINEAR MATERIALS BY LIRA-SAPR 2017 SOFTWARE

NGUYỄN HIỆP ĐỒNG^{a*}

^aKhoa Xây dựng - Đại học Kiến trúc Hà Nội

*Tác giả liên hệ: e-mail: nguyenhiepdong@gmail.com Tel.: 0943686188

Ngày nhận bài: 8/9/2022, Sửa xong: 25/12/2022, Chấp nhận đăng: 30/12/2022

Tóm tắt: Tải trọng ngang ảnh hưởng rất lớn đến chuyển vị ngang của đỉnh khung bê tông cốt thép, đặc biệt là đối với khung có độ cứng nhỏ. Trong các công trình cao tầng đều phải kiểm tra chuyển vị ngang của đỉnh nhà và chuyển vị lệch tầng có thỏa mãn hay không? Bài báo giới thiệu về khảo sát sự ảnh hưởng của tải trọng ngang đến chuyển vị ngang của đỉnh khung phẳng bê tông cốt thép có kể đến phi tuyến vật liệu bằng phần mềm Lira Sapr. Từ đó đưa ra nhận xét sự khác biệt của việc phân tích khung bê tông cốt thép có kể đến phi tuyến vật liệu với phân tích theo sơ đồ đàn hồi.

Từ khóa: tải trọng ngang, chuyển vị ngang, khung phẳng, bê tông cốt thép, phi tuyến vật liệu, phần mềm Lira-Sapr.

Abstract: The horizontal load greatly affects the horizontal displacement of the top of the reinforced concrete frame, especially for the frame with small stiffness. In high-rise buildings, it is necessary to check whether the horizontal displacement of the top of the building and the story drift is satisfied or not. This paper introduces the investigation of the influence of lateral loads on the horizontal displacement of the top of the reinforced concrete flat frame with regard to material nonlinearities using Lira-Sapr software. Therefrom, comment on the difference between the analysis of reinforced concrete frames with regard to material nonlinearity with the analysis according to the elastic.

Keywords: horizontal load, horizontal displacement, flat frame, reinforced concrete, material nonlinearities, Lira-Sapr software.

1. Giới thiệu

Kết cấu khung bê tông cốt thép được sử dụng rất phổ biến trong xây dựng. Việc tính toán nội lực cho loại khung này hiện nay trong các phần mềm

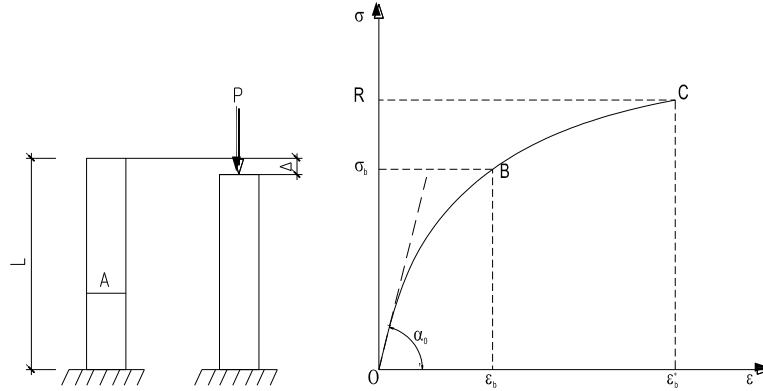
phổ biến hiện nay chủ yếu chỉ mới đề cập đến sự làm việc của bê tông và cốt thép là đàn hồi mà chưa có kể đến sự làm việc phi tuyến của vật liệu. Từ các thí nghiệm cho thấy sơ đồ ứng suất - biến dạng của bê tông là đường cong, điều này nói rằng bê tông là vật liệu phi tuyến tính. Chính vì vậy, việc tính toán các cấu kiện bê tông cốt thép không kể đến sự làm việc phi tuyến của bê tông là chưa chính xác đối với trường hợp khung có chuyển vị lớn. Những công trình có tính tác động động đất thường khung có chuyển vị lớn, khi đó bê tông nứt nhiều nên trong tính toán cần phải kể đến hệ quả của vết nứt [2]. Trường hợp cần tính chính xác thì độ cứng ban đầu không còn chính xác, vì khi này trong các cấu kiện đã nứt rất nhiều, khi đó độ cứng của các cấu kiện, độ cứng của khung giảm đi đáng kể. Trong [2] cho phép khi đó lấy độ cứng giảm của các cấu kiện đi một nửa, tuy nhiên điều này chưa có dẫn chứng cụ thể. Hiện nay đã có nhiều phần mềm có thể tính được khung có kể đến phi tuyến vật liệu và hình học như Ansys, Lira-Sapr 2017... Tuy nhiên việc tính toán khung bê tông cốt thép trong phần mềm Ansys tương đối phức tạp và khó sử dụng, nhưng phần mềm Lira-Sapr lại tương đối đơn giản và dễ sử dụng. Trong phần mềm Lira-Sapr cho phép khai báo mô hình ứng suất – biến dạng của vật liệu phi tuyến bằng các hàm số bậc cao hoặc dạng 2 đường gãy khúc, đảm bảo phù hợp với nhiều loại mô hình vật liệu khác nhau như: bê tông, cốt thép. Tính toán khung phẳng bê tông cốt thép có kể đến phi tuyến vật liệu đã có nhiều tác giả thực hiện [3, 5], nhưng chưa có bài báo nào nghiên cứu về ảnh hưởng của tải trọng ngang đến chuyển vị ngang của khung. Trong bài báo này tác giả thực hiện khảo sát ảnh hưởng của tải trọng ngang đến chuyển vị ngang của khung phẳng có kể đến phi tuyến vật liệu bằng phần mềm Lira-Sapr 2017.

2. Các bước thực hiện tính toán khung phẳng có kể đến phi tuyến vật liệu bằng phần mềm Lira – Sapr 2017

2.1. Thiết lập mối quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu phi tuyến

Mối quan hệ giữa ứng suất với biến dạng chịu nén của bê tông là dạng đường cong

(Hình 1), vì vậy để giải được bài toán phi tuyến vật liệu bê tông cần phải thiết lập được mối quan hệ giữa ứng suất với biến dạng. Nhiều bài báo đã thực hiện nghiên cứu về đề tài này [3-5]. Ở đây trình bày một số cách xây dựng mối quan hệ ứng suất biến dạng như sau:



Hình 1. Biểu đồ ứng suất – biến dạng chịu nén của bê tông

a. Quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông chịu nén có thể xác định từ điều kiện cân bằng về lực được thiết lập bởi phương trình:

$$P = \int_{y_0}^c b(y)F(\varepsilon_y)dy \tag{1}$$

trong đó:

P là ngoại lực;

$F(\varepsilon_y)$ là hàm của ứng suất theo biến dạng;

y_0 và c lần lượt là khoảng cách từ thứ chịu nén ít nhất và thứ chịu nén nhiều nhất tới trục trung hoà;

$$F(\varepsilon_y) = \alpha_1 \varepsilon_y + \alpha_2 \varepsilon_y^2 + \dots + \alpha_{n-1} \varepsilon_y^{n-1} + \alpha_n \varepsilon_y^n = \sum_{i=1}^n \alpha_i \varepsilon_y^i \tag{3}$$

trong đó:

n là bậc của đa thức;

α_i là các hệ số của đa thức;

ε_y là biến dạng tại thứ có khoảng cách y tới trục trung hoà.

Như vậy quan hệ ứng suất - biến dạng sẽ được xác định nếu biết các hệ số α_i và bậc n của biểu thức.

$b(y)$ là hàm của bề rộng tiết diện theo khoảng cách đến trục trung hoà y tính theo công thức: $b(y) = 2\sqrt{(c - y)(h - c + y)}$ (2)

h là đường kính tiết diện;

y là khoảng cách từ thứ đang xét đến trục trung hoà của tiết diện.

Hàm của ứng suất theo biến dạng được giả thiết theo nhiều dạng hàm khác nhau tuy nhiên phổ biến hơn cả thường sử dụng hàm đa thức bậc cao như sau:

Ta có các mối liên hệ sau:

$$\frac{y_0}{c} = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c}; \quad \frac{y}{c} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_c} \tag{4}$$

trong đó ε_0 và ε_c lần lượt là biến dạng tại thứ chịu nén ít nhất và nhiều nhất.

Thay biểu thức (2) và (3) vào (1) và đổi biến số dựa vào (4) ta có:

$$P = \frac{2c^2}{\varepsilon_c} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_c} \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \varepsilon_y^i \right) \sqrt{\left(1 - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_c}\right) \left(\frac{h}{c} - 1 + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_c}\right)} d\varepsilon_y \tag{5}$$

Đặt $f_0 = \frac{P}{2c^2}$ ta có:

$$f_0 = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_c} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\varepsilon_c} \varepsilon_y^i \right) \sqrt{\left(1 - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_c} \right) \left(\frac{h}{c} - 1 + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_c} \right)} d\varepsilon_y \quad (6)$$

Tích phân phương trình (6) trên miền $(\varepsilon_0 - \varepsilon_c)$ bằng tích phân số theo phương pháp Gauss cho kết quả dạng:

$$f_0 = \sum_{j=1}^m \left[w_j \left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\varepsilon_c} \eta_j^i \right) \sqrt{\left(1 - \frac{\eta_j}{\varepsilon_c} \right) \left(\frac{h}{c} - 1 + \frac{\eta_j}{\varepsilon_c} \right)} \right] \quad (7)$$

trong đó:

η_j và w_j – các tọa độ và trọng số thứ j của tích phân Gauss

m - số điểm lấy tích phân.

Các tọa độ và trọng số của tích phân Gauss được xác định từ các cận lấy tích phân như sau:

$$\eta_j = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_0}{2} + \xi_j \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{2} \quad (8)$$

$$w_j = H_j \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{2} \quad (9)$$

Với ξ_j và H_j là các hệ số của tọa độ và trọng số trong tích phân Gauss được cho sẵn trong các tài liệu về tích phân số.

Viết lại phương trình (7) với α_i là ẩn số:

$$f_0 = \sum_{i=1}^n k_i \alpha_i \quad (10)$$

trong đó:

$$k_i = \sum_{j=1}^m \left[\left(\frac{w_j}{\varepsilon_c} \eta_j^i \right) \sqrt{\left(1 - \frac{\eta_j}{\varepsilon_c} \right) \left(\frac{h}{c} - 1 + \frac{\eta_j}{\varepsilon_c} \right)} \right] \quad (11)$$

Phương trình (10) được thiết lập cho một trạng thái cân bằng, tức là với một cặp số liệu $f_0 - \varepsilon_c$ ở một cấp tải. Đối với tập hợp các số liệu đưa vào phân tích ta có được một hệ các phương trình f_0 (α_i). Giải hệ phương trình này bằng phân tích hồi quy tuyến tính sẽ thu được giá trị α_i cần tìm.

đều cũng có thể được xác định dựa vào điều kiện cân bằng về mô men tương tự như trên. Phương trình cân bằng mô men được viết như sau:

$$M = \int_{y_0}^c b(y) F(\varepsilon_y) y dy \quad (12)$$

b. Quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông chịu nén trong điều kiện biến dạng dọc trục không

Thay biểu thức (3) vào (12) và đổi biến số dựa vào phương trình (4) ta có:

$$M = \frac{2c^3}{\varepsilon_c^2} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_c} \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \varepsilon_y^i \right) \sqrt{\left(1 - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_c} \right) \left(\frac{h}{c} - 1 + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_c} \right)} \varepsilon_y d\varepsilon_y \quad (13)$$

Đặt $m_0 = \frac{M}{2c^3}$ và thực hiện tích phân phương trình (13) trên miền $(\varepsilon_0 - \varepsilon_c)$ bằng tích phân số theo phương pháp Gauss cho kết quả dạng:

$$m_0 = \sum_{j=1}^m \left[\frac{w_j}{\varepsilon_c} \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \eta_j^{i+1} \right) \sqrt{\left(1 - \frac{\eta_j}{\varepsilon_c} \right) \left(\frac{h}{c} - 1 + \frac{\eta_j}{\varepsilon_c} \right)} \right] \quad (14)$$

Viết lại phương trình (14) dưới dạng:

$$m_0 = \sum_{i=1}^n k'_i \alpha_i \tag{15}$$

$$\text{với } k'_i = \sum_{j=1}^m \frac{w_j}{\varepsilon_c} \frac{\mu_j^{i+1}}{\varepsilon_v} \sqrt{\left(1 - \frac{\eta_j}{\varepsilon_c}\right) \left(\frac{h}{c} - 1 + \frac{\eta_j}{\varepsilon_c}\right)} \tag{16}$$

Phương trình (15) được thiết lập cho một trạng thái cân bằng, tức là với một cặp số liệu $m_0 - \varepsilon_c$ ở mỗi cấp tải. Đối với một cặp số liệu đưa vào phân tích ta có được một hệ các phương trình $m_0(\alpha_i)$. Giải hệ phương trình này bằng phân tích hồi quy tuyến tính sẽ thu được các giá trị α_i cần tìm.

Việc tính các hệ số k_i từ biểu thức (11) và k'_i từ biểu thức (16) trong trường hợp tổng quát tương đối phức tạp. Trong trường hợp thí nghiệm theo phương pháp của Hognestad và các công sự, nén mẫu với trục trung hoà cố định tại một đường tiếp tuyến với mặt cắt ngang ($c=h$), thì các biểu thức trên sẽ được đưa về biểu thức đơn giản như sau:

Thay các biểu thức (8) và (9) lần lượt vào các phương trình (11) và (16) với $\varepsilon_0 = 0$ và $c = h$ ta có:

$$k_i = \sum_{j=1}^m \frac{H_j (1 + \xi_j)^i \sqrt{1 - (\xi_j)^2}}{2^{i+2}} \varepsilon_c^i \tag{17}$$

$$k'_i = \sum_{j=1}^m \frac{H_j (1 + \xi_j)^{i+1} \sqrt{1 - (\xi_j)^2}}{2^{i+3}} \varepsilon_c^i \tag{18}$$

Các phương trình (17) và (18) cho thấy k và k' là các hàm chỉ phụ thuộc vào một biến số ε_c . Hơn nữa từ hai phương trình này còn có thể rút ra $k'_i \frac{k_{i+1}}{\varepsilon_{cm}}$

với $i = 1$ đến $n-1$. Các hệ số của hai phương trình này có thể được thiết lập sẵn đối với mỗi phương án tích phân số, hay nói cách khác với mỗi số điểm tích phân được chọn.

c. Ngoài ra cũng có thể biểu diễn đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng theo Hognestad (1951), sử dụng hàm parabol để biểu diễn nhánh đường cong có giá trị ứng suất tăng:

$$\sigma = f_{cm} \left[2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon'_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon'_0} \right)^2 \right] \tag{19}$$

trong đó:

f_{cm} là cường độ chịu nén;

ε'_0 là biến dạng khi ứng suất đạt giá trị f_{cm} .

d. Theo Desayi và Krishnan (1964) đã mô tả cả hai nhánh tăng và giảm ứng suất trên đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng và biểu diễn như sau:

$$\sigma = \frac{E_c \cdot \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon'_0} \right)^2} \tag{20}$$

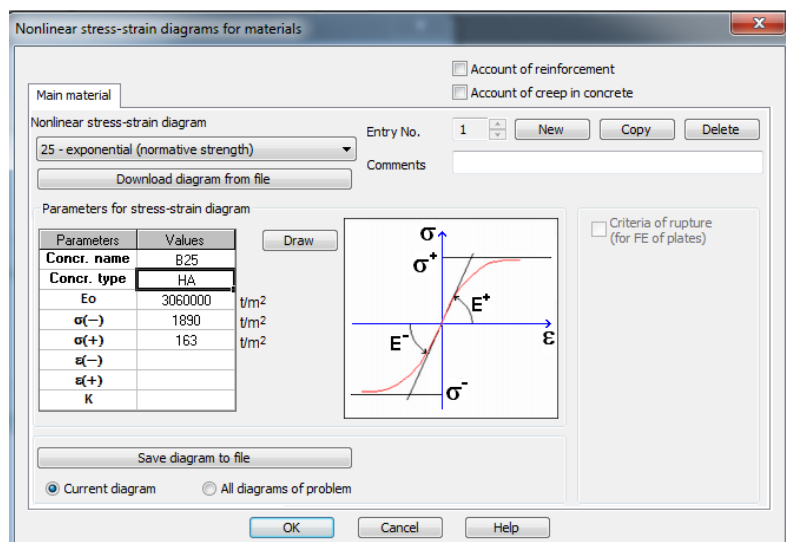
2.2. Tính toán khung bê tông cốt thép có kể đến phi tuyến vật liệu bằng phần mềm Lira-Sap

Việc tính toán khung phẳng bê tông cốt thép trong phần mềm Lira-Sap hoàn toàn tương tự như các phần mềm phổ biến khác: Etabs, Sap2000,... Cần lập sơ đồ tính khung, khai báo vật liệu, khai báo tiết diện, gán điều kiện biên và tải trọng tính toán. Tuy nhiên để tính khung phẳng bê tông cốt thép có kể đến phi tuyến vật liệu, cần phải bổ sung thêm mô hình phi tuyến của bê tông và cốt thép trong phần mềm, bố trí cốt thép trước trong tiết diện và chia nhỏ tải trọng, cụ thể các bước thực hiện như sau:

a. khai báo vật liệu phi tuyến

Trong phần mềm Lira-Sap 2017 có hỗ trợ khai báo vật liệu có kể đến làm việc phi tuyến. Việc khai báo tương đối đơn giản. Có thể lựa chọn các mô hình ứng suất-biến dạng đường cong, dạng hai đoạn được thiết lập sẵn trong phần mềm hoặc nhập thủ công từng các điểm khi có mô hình cho trước.

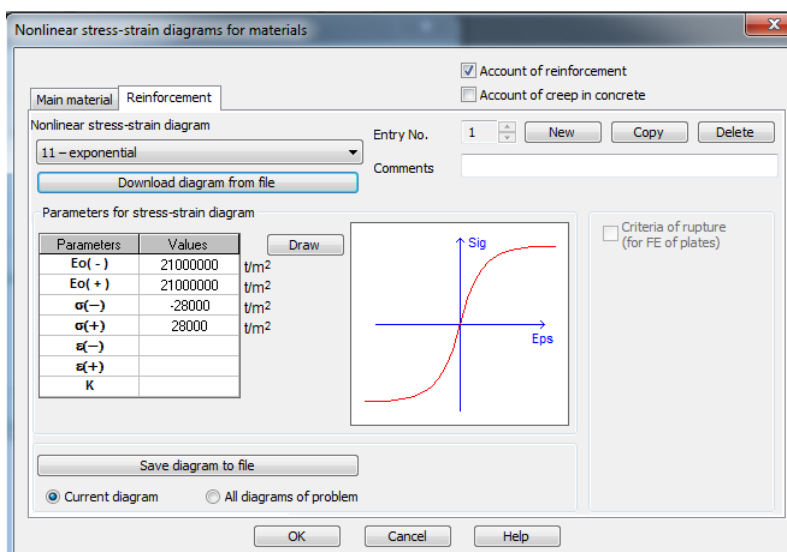
- Bê tông: trong phần mềm đã được thiết lập sẵn nhiều dạng mô hình khác nhau, tuy nhiên sử dụng phổ biến có hai dạng sau: dạng hai đoạn thẳng, dạng đường cong trơn bậc cao. Cả hai dạng này chỉ cần lựa chọn bê tông cấp độ bền (Concrete name) là phần mềm tự thiết lập các số liệu như: cường độ chịu nén $\sigma(-)$, cường độ chịu kéo $\sigma(+)$, mô đun đàn hồi ban đầu E_0 , và bổ sung tỷ đối biến dạng giới hạn chịu nén $\varepsilon(-)$ và chịu kéo $\varepsilon(+)$ nếu cần tính nứt (Hình 2).



Hình 2. Khai báo mô hình phi tuyến của bê tông

- Cốt thép: việc khai báo số liệu với cốt thép tương tự như với bê tông. Trong phần mềm cũng đã thiết lập sẵn hai dạng mô hình vật liệu, khi tính toán chỉ cần nhập các số liệu như: mô đun đàn hồi

chịu nén $E_0(-)$, chịu kéo $E_0(+)$, cường độ cốt thép chịu nén $\sigma(-)$, chịu kéo $\sigma(+)$, tỷ đối biến dạng giới hạn chịu nén $\varepsilon(-)$ và chịu kéo $\varepsilon(+)$ phần mềm sẽ tự thiết lập dạng đường cong mô hình vật liệu (Hình 3).

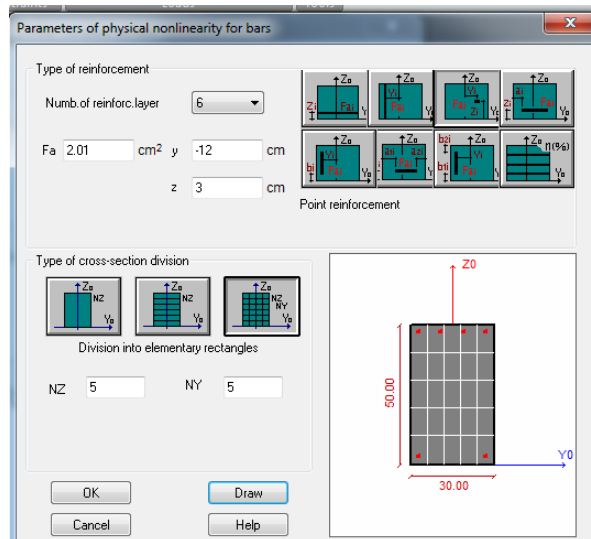


Hình 3. Khai báo mô hình phi tuyến của cốt thép

b. Bố trí cốt thép trong tiết diện

Ngoài ra, để tính toán khung bê tông cốt thép có kể đến phi tuyến vật liệu thì tiết diện của các cấu kiện cần phải được bố trí cốt thép trước. Thông thường, diện tích cốt thép và cách bố trí cốt thép được lấy từ kết quả của tính khung bê tông cốt thép theo sơ đồ đàn hồi. Lưu ý, diện tích cốt thép tính theo sơ đồ đàn hồi có thể nhỏ hơn so với tính khung có kể đến phi tuyến vật liệu ở một số tiết diện nào đó vì khung khi đó có chuyển vị

lớn hơn. Việc này trong quá trình tính toán cần kiểm tra có tiết diện nào bị phá hoại hay không? Nếu phát hiện tại tiết diện nào đó bị phá hoại thì cần bổ sung thêm cốt thép cho hợp lý và tính lại. Việc bố trí cốt thép trong tiết diện ở phần mềm Lira-Sapra 2017 tương đối đơn giản. Có thể lựa chọn vào từng điểm hoặc theo dải. Trên (Hình 4) bố trí cốt thép theo từng điểm, chọn cốt số nào (Numb. of reforc.layer), sau đó khai báo diện tích F_a và tọa độ theo y, z .

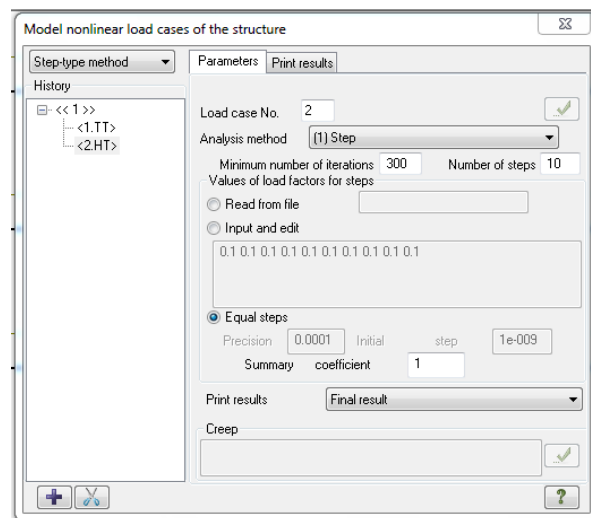


Hình 4. Bố trí cốt thép trong tiết diện theo từng điểm

c. Thực hiện tính toán

Sau khi đã hoàn thiện xong các bước trên, đến bước tính toán. Bước này trong phần mềm sử dụng phương pháp chất tải liên tiếp. Để thực hiện được bước này thì trong phần tính toán cần chọn phương pháp tính là phi tuyến và lựa chọn phương pháp chất tải liên tiếp (Step-type

method). Tại đây cần phải thực hiện chia nhỏ tải trọng ra nhiều phần bằng nhau, chia càng nhiều bước thì kết quả tính càng chính xác tuy nhiên việc tính toán sẽ mất nhiều thời gian hơn. Trong (Hình 5) cần khai báo số lượng bước chia tải (Nuber of steps), số lượng vòng lặp nhỏ nhất (Minimum muber of iterations).



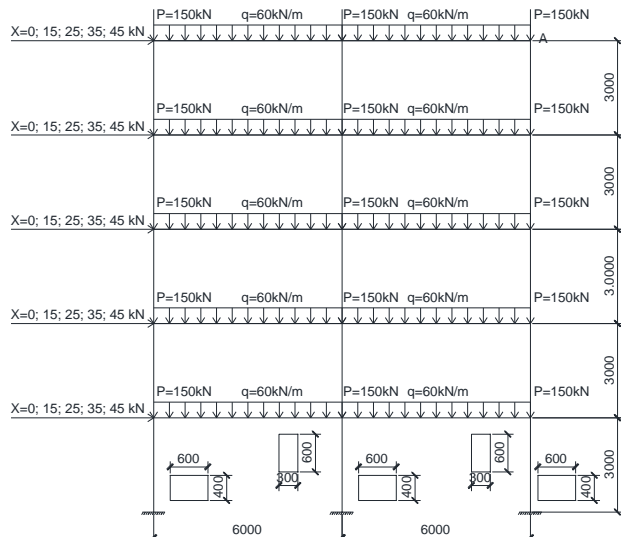
Hình 5. Chia nhỏ tải trọng để tính theo mô hình phi tuyến

Khi tính toán đã hoàn tất, việc quan trọng là phải kiểm tra xem có cấu kiện nào bị phá hoại hay không, nếu có phần cấu kiện nào bị phá hoại thì cần phải điều chỉnh bổ sung thêm cốt thép để sao cho cấu kiện đó không bị phá hoại.

3. Ví dụ: Tính toán chuyển vị ngang của khung phẳng bê tông cốt thép có kể đến phi tuyến vật liệu bằng phần mềm Lira-Saprr 2017 khi thay đổi tải trọng Nga

Khung phẳng bê tông cốt thép 5 tầng với vật liệu: bê tông cấp độ bền B20, cốt thép nhóm AIII (CB400), các cột có tiết diện 400x600mm, các dầm có tiết diện 300x600mm, mỗi tầng cao 3 m, khung hai nhịp 6 m và tải trọng theo phương đứng được bố trí như Hình 5. Tải trọng ngang tác dụng lên các đỉnh cột biên trái sẽ tăng từ: X=0; 15 kN; 25kN; 35kN; 45kN (Hình 6).

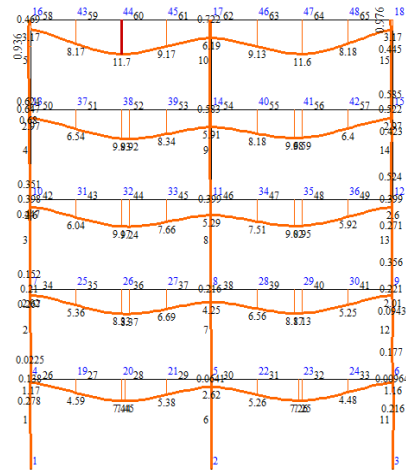
KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG



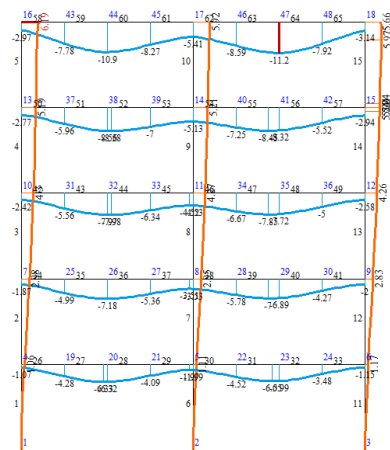
Hình 6. Sơ đồ tính khung bê tông cốt thép 5 tầng

Để tính được khung bê tông cốt thép có kể đến phi tuyến vật liệu thì cần phải biết trước cốt thép được bố trí trong các tiết diện. Do vậy, cần tính trước khung phẳng bê tông cốt thép với các trường hợp tải trọng ngang lớn nhất $X=45kN$ theo sơ đồ đàn hồi. Từ đó tính được

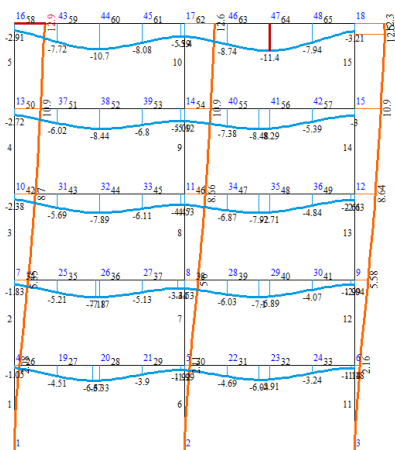
cốt thép cho từng tiết diện của khung theo TCVN 5574 [1]. Sau đó thực hiện các bước tính toán như đã trình bày ở Mục 2. Kết quả chuyển vị của khung bê tông cốt thép cho từng trường hợp tải trọng khác nhau được thể hiện dưới đây (Hình 7):



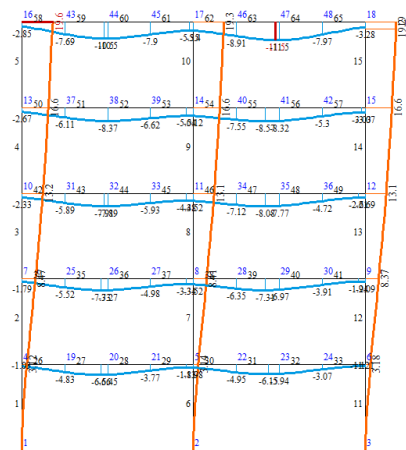
a. Sơ đồ chuyển vị khi $X=0kN$



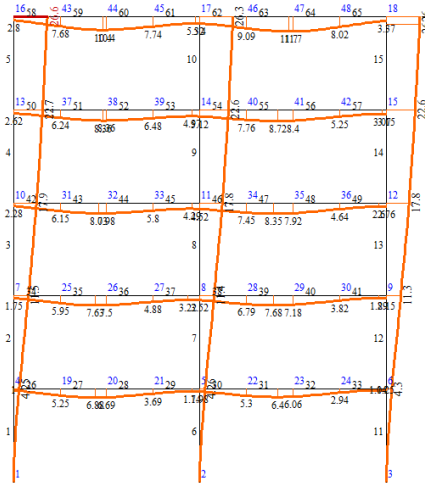
b. Sơ đồ chuyển vị khi $X=15kN$



c. Sơ đồ chuyển vị khi $X=25kN$



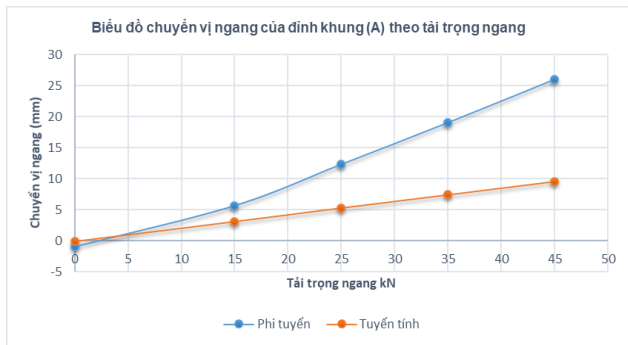
d. Sơ đồ chuyển vị khi $X=35kN$



e. Sơ đồ chuyển vị khi X=45kN
Hình 7. Sơ đồ chuyển vị của các trường hợp tải trọng ngang khác nhau

Bảng 1. Chuyển vị ngang của đỉnh khung (A) phụ thuộc vào tải trọng (mm)

Tải trọng ngang (kN)		0	15	25	35	45
Phân tích khung theo sơ đồ	Tuyến tính (mm)	-0.096	03.11	5.29	7.43	9.56
	Phi tuyến vật liệu (mm)	-0.974	5.65	12.31	19.02	25.98



Hình 8. Biểu đồ chuyển vị ngang của đỉnh khung (A) phụ thuộc vào tải trọng ngang

Nhận xét: Từ biểu đồ (Hình 8) thấy rằng: khi tải trọng ngang nhỏ độ chênh lệch chuyển vị ngang của đỉnh khung (A) giữa phân tích phi tuyến và tuyến tính là nhỏ, nhưng khi tải trọng ngang tăng thì độ chênh lệch này càng lớn. Điều này được giải thích rằng khi tải trọng tác dụng nhỏ thì vật liệu làm việc ở giai đoạn đàn hồi, còn khi tải trọng tăng thì vật liệu sẽ làm việc ở giai đoạn phi tuyến.

Kết luận:

- Chuyển vị ngang của đỉnh khung bê tông cốt thép có kể đến phi tuyến vật liệu lớn hơn rất nhiều so với trường hợp tính toán theo sơ đồ đàn hồi. Với khung có cùng tiết diện và cốt thép thì mức độ chênh lệch chuyển vị ngang của đỉnh khung tăng dần theo tải trọng tăng dần. Từ đó thấy rằng độ cứng của khung bê tông cốt thép có kể đến phi tuyến vật liệu nhỏ hơn nhiều so với khung tính theo sơ đồ đàn hồi. Ở đây, có thể giải thích sau khi bê tông bị nứt, mô đun biến dạng của bê tông giảm và

độ cứng của tiết diện giảm làm cho độ cứng tổng thể của khung giảm đi đáng kể;

- Trường hợp tính khung có chuyển vị lớn như tính khung chịu tác động của động đất cần phải tính khung có kể đến phi tuyến vật liệu vì khi đó độ cứng của khung giảm đi rất nhiều;

- Việc tính toán khung phẳng bê tông cốt thép bằng phần mềm Lira-Sap 2017 tương đối đơn giản, dễ sử dụng, có thể ứng dụng trong học tập cũng như nghiên cứu;

- Cần phải có nhiều nghiên cứu hơn nữa về tính toán khung bê tông cốt thép có kể đến phi tuyến vật liệu để làm rõ sự khác biệt giữa nó với khung tính theo sơ đồ đàn hồi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Tiêu chuẩn quốc gia: TCVN 5574-2018, *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép – Tiêu chuẩn thiết kế*, NXB Xây dựng, Hà Nội.
2. Tiêu chuẩn quốc gia : TCVN 9386-2012, *Thiết kế công trình chịu động đất*, NXB Xây dựng, Hà Nội.
3. Методическое пособие (2017): *Бетонные и железобетонные конструкции. Нелинейные расчеты при проектировании*, Москва.
4. K.H. Schweizerhof, P. Wriggers (1986), *Consistent linearization for path following methods in nonlinear FE Analysis*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.
5. M. A. Crisfield (2000), *Non - linear finite element analysis of solids and structures*, Imperial college of science, Technology and medicine, London, UK.

