



PREDICTING COMPRESSIBILITY CHARACTERISTICS OF SOIL WITH OEDOMETER TEST BASED ON NONLINEAR REGRESSION ANALYSIS

Pham Duc Tiep *, Tran Nam Hung , Nguyen Thanh Le

Le Quy Don Technical University, No 236, Hoang Quoc Viet Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 11/1/2021

Revised: 18/6/2021

Accepted: 11/7/2021

Published online: 15/8/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.6.4>

* *Corresponding author*

Email: phamductiep@lqdtu.edu.vn

Abstract. When calculating consolidation settlement, it is necessary to process the Oedometer test data to obtain the consolidation parameters of the soil sample. In this paper a single variable nonlinear regression model to predict settlement of the soil sample over time when conducting consolidation test is established. The regression coefficients include the elastic modulus - E_s (Young' modulus), coefficient of consolidation - C_v and the secondary compression index - C_α with 3 different settlement stages (elastic settlement, primary consolidation settlement and secondary consolidation settlement). Nonlinear regression analysis is carried out based on consolidation test data corresponding to a certain load. The results showed that the nonlinear regression model predicts the settlement of the soil sample that fits well the experimental results, and thereby can be used to provide the consolidation parameters for the calculation of settlement in practice.

Keywords: nonlinear regression analysis, regression coefficient, elastic modulus, coefficient of consolidation, secondary compression index, Oedometer test.

© 2021 University of Transport and Communications



ỨNG DỤNG PHÂN TÍCH HỒI QUY PHI TUYẾN XÁC ĐỊNH ĐẶC TRƯNG NÉN LÚN CỦA MẪU ĐẤT DỰA TRÊN KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM NÉN CỐ KẾT

Phạm Đức Tiệp *, Trần Nam Hưng , Nguyễn Thành Lê

Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, Số 236 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 11/1/2021

Ngày nhận bài sửa: 18/6/2021

Ngày chấp nhận đăng: 11/7/2021

Ngày xuất bản Online: 15/8/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.6.4>

* Tác giả liên hệ

Email: phamductiep@lqdtu.edu.vn

Tóm tắt. Khi cần tính toán độ lún của công trình theo thời gian, phải tiến hành xử lý số liệu thí nghiệm nén cố kết để cung cấp các tham số đặc trưng của mẫu đất. Bài báo này thiết lập mô hình hồi quy phi tuyến đơn biến để dự báo độ lún của mẫu đất theo thời gian khi tiến hành thí nghiệm nén cố kết. Các hệ số cần tìm của hàm hồi quy bao gồm mô đun đàn hồi E_s , hệ số cố kết C_v và chỉ số nén thứ cấp C_α đều đặc trưng cho đất ứng với 3 giai đoạn lún khác nhau là lún tức thời, lún cố kết sơ cấp và lún cố kết thứ cấp. Phân tích hồi quy phi tuyến được thực hiện trên cơ sở bộ số liệu thí nghiệm cố kết ứng với một tải trọng nhất định. Kết quả chỉ ra rằng, mô hình hồi quy phi tuyến dự báo độ lún của mẫu đất sát với kết quả thực nghiệm, và do đó có thể được sử dụng để cung cấp các tham số nén lún phục vụ tính toán độ lún trong thực tế.

Từ khóa: phân tích hồi quy phi tuyến, hệ số hồi quy, mô đun đàn hồi, hệ số cố kết, chỉ số nén thứ cấp, thí nghiệm cố kết.

© 2021 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khi tiến hành nén cố kết một mẫu đất, dưới tác dụng của tải trọng mẫu bị lún và có thể chia độ lún làm 3 giai đoạn sau đây:

- Lún tức thời: Giai đoạn này diễn ra gần như đồng thời với việc tăng tải trọng thử nghiệm trong phòng thí nghiệm và trước khi bắt đầu thoát nước. Một phần là do nén các túi khí nhỏ trong không gian lỗ rỗng và một tỷ lệ nhỏ là do nén đàn hồi của pha rắn trong mẫu đất (có thể phục hồi trở lại khi tải trọng được loại bỏ). Theo [1] độ lún trong giai đoạn này được

gọi là “lún đàn hồi” bởi vì lý thuyết đàn hồi được sử dụng cho mục đích tính toán. Sự ứng xử của đất không phải là đàn hồi. Tuy nhiên, lý thuyết đàn hồi được sử dụng rộng rãi và chấp nhận trong địa kỹ thuật cho việc tính toán độ lún tức thời do tính đơn giản của nó.

- Lún cố kết sơ cấp: giai đoạn nén phụ thuộc vào thời gian do sự tiêu tán của áp lực nước lỗ rỗng thặng dư và được tính toán theo lý thuyết cố kết của Terzaghi.

- Lún cố kết thứ cấp: giai đoạn nén thứ cấp tiếp tục sau khi áp lực nước lỗ rỗng thặng dư của giai đoạn cố kết sơ cấp gần như tiêu tán hết. Cơ chế này phức tạp, nhưng sự nén lún thứ cấp được cho là sự chuyển động liên tục của các hạt đất khi cấu trúc đất điều chỉnh chính nó dẫn đến sự gia tăng ứng suất hữu hiệu. Nén lún thứ cấp thường không thể phục hồi khi loại bỏ tải trọng.

Mỗi một giai đoạn lún đều có các tham số đặc trưng riêng như: mô đun đàn hồi - E_s (mô đun Young), hệ số cố kết - C_v và chỉ số nén thứ cấp - C_a . Đây là các tham số quan trọng cho tính toán lún đối với công trình xây dựng dân dụng, cầu và đường.

Hiện nay ở Việt Nam, để xử lý kết quả thí nghiệm nén cố kết mẫu đất dính bão hòa thường áp dụng tiêu chuẩn TCVN 4200:2012 - “Đất xây dựng – phương pháp xác định tính nén lún trong phòng thí nghiệm” [2]. Tiêu chuẩn này áp dụng phương pháp đồ thị của D. Taylor và A. Casagrande [3] để xác định hệ số cố kết C_v . Còn các tham biến trong giai đoạn lún đàn hồi và lún thứ cấp không được đề cập đến.

Asaoka [4, 5] đưa ra phương pháp dự báo độ lún cuối cùng và hệ số cố kết căn cứ vào kết quả thực nghiệm đo lún trên cơ sở xây dựng được mối liên hệ giữa các độ lún ở các bước thời gian liên tiếp nhau như sau:

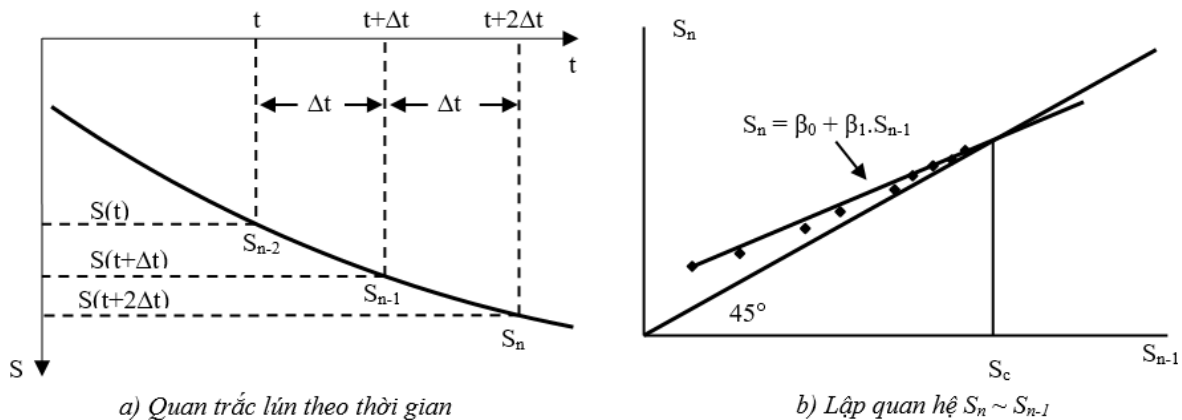
$$S_n = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_{n-1} \quad (1)$$

trong đó:

S_n – độ lún của nền đất tại thời điểm thứ n;

S_{n-1} – độ lún của nền đất ở thời điểm thứ n-1;

β_0, β_1 – các tham số (hằng số không đổi), β_1 là độ dốc của đường thẳng hồi quy mô phỏng chính xác nhất.



Hình 1. Phân tích dự báo lún theo phương pháp Asaoka.

Hệ số cố kết xác định theo công thức sau (trường hợp thoát nước 2 chiều):

$$C_v = -\frac{H^2 \cdot \ln \beta_1}{6 \cdot \Delta t} \quad (2)$$

trong đó:

H – chiều dày lớp đất;

Δt – bước thời gian.

Chunlin [6] sử dụng công thức tính toán độ lún theo thời gian của Terzaghi và biến đổi nó dưới dạng sau:

$$S_t = S_\infty \cdot \left(1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-b \cdot t}\right) \quad (3)$$

trong đó:

S_t – độ lún ở thời điểm t ;

S_∞ – độ lún cuối cùng;

b – tham biến được xác định theo dữ liệu đo và phương pháp Asaoka.

Để đơn giản cho tính toán, Chunlin [6] đã đề xuất một tham biến mới gọi là “độ lún còn lại” tại mỗi thời điểm và xác định theo công thức:

$$S_p = S_\infty - S_t = S_\infty \cdot \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-b \cdot t} \quad (4)$$

Tham biến b trong các công thức (3) và (4) đại diện cho điều kiện thoát nước, được xác định bởi hệ số cố kết C_v và chiều dài thoát nước. Từ công thức (4) có thể suy ra công thức sau:

$$y = \ln \left[\frac{S_p \cdot \pi^2}{8 \cdot S_\infty} \right] = b \cdot t \quad (5)$$

Như vậy, căn cứ vào bộ số liệu đo S_i ở thời điểm t_i , áp dụng phương pháp Asaoka xác định được S_∞ và tập các giá trị y_i ở thời điểm t_i . Công thức (5) cho thấy mối quan hệ giữa y và t là tuyến tính. Trên cơ sở bộ số liệu $(y_i - t_i)$, áp dụng phương pháp bình phương tối thiểu có thể xác định được tham biến b (b là góc dốc của đường bậc nhất).

Cả 2 phương pháp của Asaoka và Chunlin đều căn cứ vào kết quả bài toán cố kết 1 chiều của Terzaghi. Độ lún trong 2 phương pháp này chưa được phân tách thành 3 giai đoạn lún khác nhau. Chính vì vậy, các phương pháp này chỉ xác định được hệ số cố kết C_v mà không xác định được các tham số trong giai đoạn lún đàn hồi và lún cố kết thứ cấp.

Pérsio L. A. Barros [7] đã đề xuất phương pháp hồi quy phi tuyến để phân tích thí nghiệm cố kết mẫu đất. Độ lún tổng theo thời gian được phân tách ra làm 3 thành phần: độ lún đàn hồi, độ lún cố kết sơ cấp và độ lún cố kết thứ cấp. Hàm hồi quy được xác định như sau:

$$S(t) = S_e + S_c(t) + S_s(t) = S_e + S_{100} \cdot U\left(\frac{C_v \cdot t}{H_d^2}\right) + C_a \cdot \frac{H}{1 + e_0} \cdot \log_{10} \max\left(1, \frac{t}{t_0}\right) \quad (6)$$

trong đó:

S_e – độ lún đàn hồi của mẫu đất;

$S_c(t)$ – độ lún cố kết sơ cấp ở thời gian t ;

$S_s(t)$ – độ lún cố kết thứ cấp ở thời gian t ;

S_{100} – độ lún cố kết sơ cấp khi độ cố kết đạt 100% ($U=100\%$);

t_0 – thời gian kết thúc lún cố kết sơ cấp;

H – chiều cao mẫu đất thí nghiệm;

H_d – chiều dài đường thấm, nếu cố kết 1 chiều $H_d=H$, nếu cố kết 2 chiều $H_d=0,5H$;

e_0 – hệ số rỗng ban đầu trước khi tiến hành thí nghiệm.

Theo công thức (6) các hệ số hồi quy (HSQH) cần tìm là: độ lún đàn hồi S_e , độ lún kết thúc giai đoạn cố kết sơ cấp S_{100} , hệ số cố kết sơ cấp C_v và chỉ số nén thứ cấp C_a .

Có thể thấy rằng, Pêrsio L. A. Barros đưa vào hàm hồi quy hệ số biến dạng đàn hồi S_e chưa thực sự có ý nghĩa về mặt ứng dụng thực hành, bởi vì S_e chỉ đại diện cho độ lún tức thời của mẫu đất với kích thước khi tiến hành thí nghiệm. Trong khi đó, để tính toán độ lún tức thời của đất nền, ngoài yếu tố hình dạng của móng cần phải biết giá trị mô đun đàn hồi của đất nền. Do vậy, để có ý nghĩa áp dụng thực tế hơn, tác giả đề xuất thay thế hệ số S_e bởi đại lượng mô đun đàn hồi của đất E_s . Mặt khác, một vấn đề chưa thực sự thỏa đáng là công thức xác định độ lún cố kết thứ cấp đưa vào giá trị e_0 (hệ số rỗng ở thời điểm chưa tiến hành thí nghiệm). Theo [8] thì đại lượng này phải được thay thế bởi hệ số rỗng ở thời điểm kết thúc giai đoạn cố kết sơ cấp e_p mới hợp lý.

Trong bài báo này, tác giả thiết lập lại hàm hồi quy dự báo độ lún cố kết theo thời gian của mẫu thí nghiệm (thí nghiệm cố kết mẫu đất dính bão hòa nước) với 3 HSHQ đại diện cho 3 giai đoạn lún khác nhau (E_s , C_v , C_a) và S_{100} . Thêm nữa, cần thay thế đại lượng hệ số rỗng ở thời điểm ban đầu e_0 bởi hệ số rỗng khi kết thúc giai đoạn lún cố kết sơ cấp e_p . Giá trị e_p là đại lượng dẫn xuất phụ thuộc vào S_e , S_{100} và e_0 . Khi thiết lập được hàm hồi quy, tác giả sẽ phân tích hồi quy phi tuyến để tìm ra các HSHQ trên cơ sở đầu vào là bộ số liệu thí nghiệm nén cố kết mẫu đất ứng với 1 cấp tải nhất định (thời gian đọc t_i và độ lún S_i tương ứng).

2. XÂY DỰNG HÀM HỒI QUY DỰ BÁO LÚN CỦA MẪU ĐẤT THÍ NGHIỆM THEO THỜI GIAN

Như trên đã trình bày, hàm hồi quy phi tuyến $S(t)$ dự báo lún theo thời gian của mẫu đất khi thí nghiệm cố kết được thiết lập gồm 3 thành phần như sau: độ lún tức thời - S_e , độ lún cố kết sơ cấp - $S_c(t)$ và độ lún cố kết thứ cấp - $S_s(t)$. Do đó, công thức của hàm hồi quy được biểu diễn:

$$S(t) = S_e + S_c(t) + S_s(t) \quad (7)$$

2.1. Độ lún tức thời

Theo [9] công thức xác định độ lún tức thời như sau:

$$S_e = \frac{q_0 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sqrt{A}}{E_s \cdot \beta_z} \quad (8)$$

trong đó:

q_0 – tải trọng nén tác dụng lên mẫu thí nghiệm;

ν – hệ số poisson của mẫu đất;

A – diện tích của mẫu đất;

E_s – mô đun đàn hồi của mẫu đất;

β_z – hệ số hình dạng ($\beta_z=1,13$).

2.2. Độ lún cố kết sơ cấp

Độ lún cố kết sơ cấp được xác định trên cơ sở bài toán cố kết 1 chiều của Terzaghi [10]:

$$S_c(t) = S_{100} \cdot U(t) = S_{100} \cdot \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot C_v \cdot t}{4 \cdot H_d^2}\right) \right] \quad (9)$$

2.3. Độ lún cố kết thứ cấp

Độ lún cố kết thứ cấp được xác định theo [8]:

$$S_s(t) = C_\alpha \cdot \frac{H}{1 + e_p} \cdot \log_{10} \max\left(1, \frac{t}{t_0}\right) \quad (10)$$

trong đó:

C_α – chỉ số nén thứ cấp;

H – chiều cao mẫu đất;

t_0 – thời gian kết thúc lún cố kết sơ cấp;

e_p – hệ số rỗng của mẫu đất khi kết thúc lún cố kết sơ cấp và xác định theo mối quan hệ sau:

$$e_p = e_0 - \frac{(1 + e_0) \cdot S_{100}}{H} \quad (11)$$

Giả sử khi mẫu đất có mức độ cố kết đạt 95% thì coi như kết thúc giai đoạn lún cố kết, vì vậy ta có thể xác định thời gian t_0 theo biểu thức:

$$t_0 = \frac{T_{95\%} \cdot H_d^2}{C_v} = \frac{1,129 \cdot H_d^2}{C_v} \quad (12)$$

2.4. Hàm hồi quy phi tuyến cho độ lún tổng

Thay (8), (9) và (10) vào (7) ta nhận được:

$$S(t) = \frac{q_0 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sqrt{A}}{E_s \cdot \beta_z} + S_{100} \cdot \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot C_v \cdot t}{4 \cdot H_d^2}\right) \right] + C_\alpha \cdot \frac{H}{1 + e_p} \cdot \log_{10} \max\left(1, \frac{t}{t_0}\right) \quad (13)$$

- Các hằng số đã được xác định trước: q_0 , ν , e_0 , A , β_z , H_d , và H ;
- Các hệ số hồi quy cần tìm: E_s , S_{100} , C_v , và C_α ;
- Các tham số dẫn xuất theo HSHQ và các hằng số biết trước: e_p xác định theo (11) và t_0 xác định theo (12);

- Tập mẫu quan sát được (D) là toàn bộ dữ liệu đọc được trong quá trình thí nghiệm cố kết mẫu đất dính bão hòa nước:

$$D = [\text{độ lún } S_i \text{ tương ứng ở thời điểm } t_i, i = 1 \div N] \quad (14)$$

trong đó: N – tổng toàn bộ dữ liệu đo được.

Để xác định được các hệ số hồi quy trên, tác giả ứng dụng công cụ *Solver* trong phần mềm Microsoft Excel cho việc phân tích hồi quy phi tuyến đối với hàm đã thiết lập $S(t)$. Phân tích này được thực hiện trên cơ sở phương pháp bình phương tối thiểu, với điều kiện hàm số sau phải đạt cực tiểu:

$$f(E_s, S_{100}, C_v, C_\alpha) = \sum_{i=1}^N [S(t_i) - S_i]^2 \rightarrow \text{Min} \quad (15)$$

3. THỬ NGHIỆM SỐ

Trong phần này, tác giả sẽ lấy kết quả thí nghiệm nén cố kết (Oedometer test) mẫu đất sét được thực hiện bởi Pécisio L. A. Barros [7] để tiến hành phân tích hồi quy phi tuyến nhằm xác định các hệ số E_s , S_{100} , C_v , và C_α trên cơ sở hàm hồi quy thiết lập như ở công thức (13).

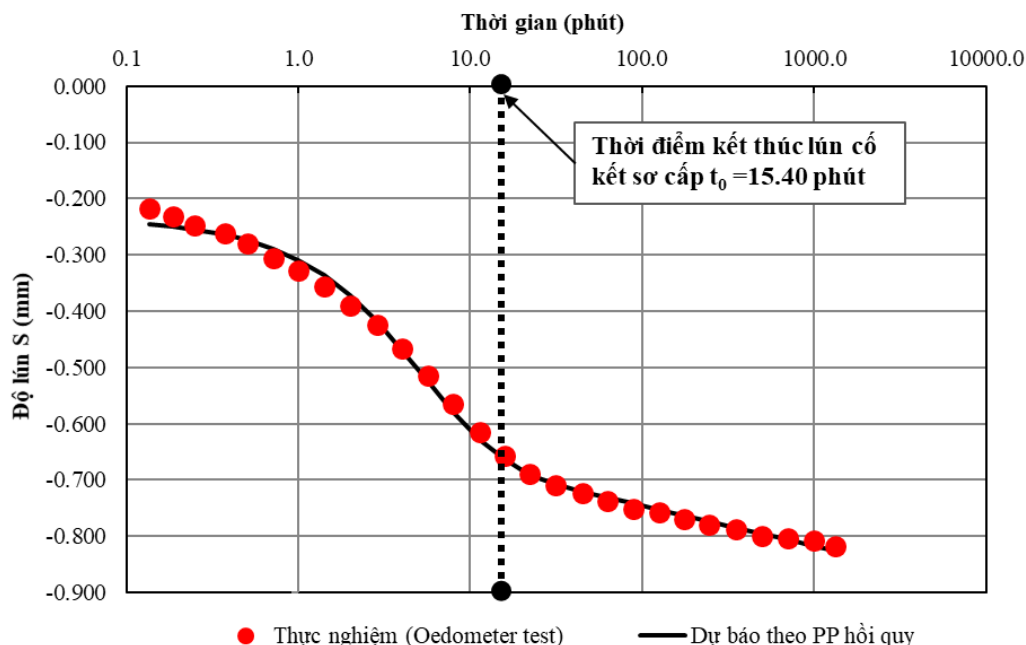
Thí nghiệm cố kết mẫu đất sét có các đặc điểm như sau:

- Đặc trưng mẫu đất thí nghiệm: tỷ trọng hạt $\Delta=2,63$; độ ẩm giới hạn nhão $WL=46\%$; chỉ số dẻo $PI=23\%$; độ ẩm tự nhiên của mẫu $W=36,9\%$; hệ số rỗng ban đầu $e_0=1,0$;
- Kích thước mẫu thí nghiệm: mẫu thí nghiệm hình trụ, đường kính $d=71,4\text{mm}$; chiều cao mẫu $H=20\text{mm}$;
- Tải trọng nén mẫu $q_0=200 \text{ kPa}$;
- Điều kiện thoát nước cho mẫu: thoát nước 2 chiều;
- Kết quả đo độ lún của mẫu S_i ứng với thời gian t_i được thể hiện như trên Hình 2 (các điểm chấm tròn).

Với kết quả thí nghiệm như đã trình bày, sử dụng công cụ *Solver* để tiến hành phân tích hồi quy phi tuyến để xác định các tham số đặc trưng nén lún cho mẫu đất, đồng thời dự báo sự biến đổi độ lún của mẫu theo thời gian. Kết quả được thể hiện như trong Bảng 1 và trên Hình 2.

Bảng 1. Kết quả xác định các tham số đặc trưng nén lún cho mẫu đất sét.

Đặc trưng của mẫu đất	Đơn vị	Phân tích hồi quy phi tuyến
Độ lún tức thời, S_e	mm	-0,1289
Hệ số cố kết, C_v	mm ² /phút	7,3300
Mô đun đàn hồi, E_s	kPa	76241
Chỉ số nén thứ cấp C_α	-	0,00695
Độ lún cố kết sơ cấp (khi $U=100\%$) S_{100}	mm	-0,55857



Hình 2. So sánh đường cong cố kết mẫu được dự báo theo phương pháp đề xuất với kết quả thí nghiệm.

Quan sát Hình 2 và Bảng 1 cho ta thấy:

- Đường cong lún của mẫu được dự báo theo phân tích hồi quy phi tuyến cho kết quả sát với kết quả thí nghiệm (với hệ số R bình phương đạt được $R^2=0,9972$);

- Tỷ lệ độ lún tức thời của mẫu đất sét được thí nghiệm trong bài báo so với tổng độ lún khi kết thúc giai đoạn cố kết sơ cấp là 18% trong khi đó theo tiêu chuẩn 22TCN 262-2000 [11] tỷ lệ độ lún đàn hồi chiếm khoảng từ 10% đến 40%. Như vậy, tỷ lệ độ lún đàn hồi tính được trong bài báo cũng nằm trong phạm vi quy định của tiêu chuẩn nêu trên.

- Mô đun đàn hồi của mẫu đất thí nghiệm tương đối lớn $E_s=76241,17$ kPa. Giá trị này cũng nằm trong phạm vi của bảng tra của tiêu chuẩn TCVN 11823:2017 [9].

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất việc sử dụng phân tích hồi quy phi tuyến để xác định 3 đặc trưng nén lún của mẫu đất tương ứng với 3 giai đoạn lún khác nhau (lún tức thời, lún cố kết sơ cấp, và lún cố kết thứ cấp) căn cứ vào kết quả thí nghiệm cố kết mẫu đất dính. Hàm hồi quy được thiết lập trên cơ sở nghiên cứu của Pécisio L. A. Barros đã được tác giả hiệu chỉnh để hoàn thiện hơn về mặt ứng dụng thực hành (hệ số hồi quy S_e được thay bởi mô đun đàn hồi E_s và hệ số rỗng ban đầu e_0 được thay bởi hệ số rỗng khi kết thúc quá trình cố kết e_p). Kết quả cho thấy, đường cong dự báo lún mẫu đất theo thời gian được xác định theo phương pháp hồi quy phi tuyến đề xuất trong nghiên cứu này bám sát kết quả thí nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Naseri, E.S. Hosseininia, Elastic settlement of ring foundations, Soils and Foundations, 55 (2015), 284–295. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.005>
- [2]. TCVN 4200:2012, Đất xây dựng – phương pháp xác định tính nén lún trong phòng thí nghiệm, Hà Nội, 2012.

- [3]. S. K. Shukla, N. Sivakugan, B. M. Das, Methods for determination of the coefficient of consolidation and field observations of time rate of settlement - An overview, International Journal of Geotechnical Engineering, 3 (2009) 89-108. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2009.03.01.89-108>
- [4]. A. Asaoka, Observational procedure of settlement prediction, Soils and Foundations, 18 (1978) 87-101. https://doi.org/10.3208/sandf1972.18.4_87
- [5]. 384/QĐ-BGTVT, Ban hành Quy định tạm thời về kỹ thuật thi công và nghiệm thu hạng mục xử lý nền đất yếu bằng phương pháp cố kết hút chân không có màng kín khí trong xây dựng công trình giao thông, Bộ GTVT, 2013.
- [6]. L. Chunlin, A simplified method for prediction of embankment settlement in clays, J. R. M. Geo. China, 6 (2014) 61-66. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.12.002>
- [7]. Persio L.A. Barros, Paulo R. O. Pinto, Oedometer Consolidation Test Analysis by Nonlinear Regression, Geotechnical Testing Journal, 31 (2008) 76-83. http://www.fec.unicamp.br/~persio/IC535/consolidationtest_published.pdf
- [8]. Braja M. Das, Khaled Sobhan, Principles of geotechnical engineering, 8th Edition, Cengage Learning, 2014.
- [9]. TCVN 11823-10:2017, Thiết kế cầu đường bộ - Phần 10: Nền móng.
- [10]. Cao Văn Chí, Trịnh Văn Cương, Giáo trình Cơ học đất, Nhà xuất bản Xây dựng, 2003.
- [11]. 22TCN 262-2000, Quy trình khảo sát thiết kế nền đường ô tô trên nền đất yếu, Bộ GTVT, 2000.