

# DỰ BÁO ĐƯỜNG CONG LÚN TRÊN MẶT ĐẤT KHI THI CÔNG ĐƯỜNG HÀM BẰNG PHƯƠNG PHÁP HỒI QUY PHI TUYẾN

NGUYỄN TÀI TIẾN, ĐỖ NGỌC ANH

*Trường Đại học Mỏ-Địa chất*

PAUL COUTOIR, DANIEL DIAS

*Grenoble Alpes University, France*

*Email: taitien12@gmail.com*

## 1. Đặt vấn đề

Xây dựng các đường hầm nằm nông trong đất mềm thường dẫn tới sự phát triển của phễu lún trên mặt đất. Trong thực tế, phễu lún bề mặt thường được giả thiết tuân theo phương trình của Peck [10], đặc trưng bởi hai thông số cơ bản là độ lún lớn nhất ( $S_{max}$ ) và khoảng cách từ điểm uốn của phễu lún tới trục thẳng đứng của đường hầm (i). Để dự báo phễu lún hình thành trên mặt đất trong giai đoạn trước khi thi công, những người làm công tác thiết kế, thi công trình ngầm thường dựa vào rất nhiều công thức thực nghiệm khác nhau để xác định giá trị của điểm uốn (i) và dựa vào mức độ dịch chuyển dự kiến của biên đường hầm (thông qua hệ số mất thể tích đất  $V_L$  được tính bằng phần trăm diện tích tiết diện ngang khi đào của đường hầm) để tính toán độ lún lớn nhất ( $S_{max}$ ) [1]. Các công thức thực nghiệm xác định giá trị điểm uốn (i) thường phụ thuộc chủ yếu vào hai thông số là độ sâu đặt đường hầm (H) và đường kính đào của đường hầm (D). Trong thực tế, giá trị điểm uốn (i) còn phụ thuộc vào rất nhiều các thông số khác như môi trường khối đất (đất rời, đất dính, góc ma sát, lực dính kết, độ rỗng,...), các thông số liên quan đến kỹ thuật thi công (thông số vận hành của máy đào hầm, tốc độ đào hầm,...), loại hình kết cấu chống sử dụng,... Rõ ràng, không có công thức chung để dự báo điểm uốn (i) áp dụng cho tất cả mọi trường hợp.

Trên cơ sở các kết quả khảo sát độ lún bề mặt thu được trong mô hình số 2D sử dụng phần mềm Plaxis2D, kết hợp với thuật toán hồi quy phi tuyến để xây dựng lại đường cong lún phù hợp với kết quả phễu lún từ mô hình số, bài báo đã chỉ ra sự phụ thuộc của giá trị điểm uốn (i) vào đường kính

đào của đường hầm và độ sâu đặt đường hầm. Các dữ liệu địa chất thu được từ dự án nhà ga số 5 thuộc sân bay Heathrow ở London, Vương quốc Anh đã được chấp nhận làm thông số đầu vào trong mô hình số [2].

## 2. Phễu lún trên bề mặt đất

Đường cong lún phía trên mặt đất phát sinh khi đào các đường hầm nằm nông trong đất mềm thường được mô tả gần đúng bằng phương trình thực nghiệm của Peck [10]:

$$S = S_{max} \exp[-x^2 / (2 \cdot i^2)] \quad (1)$$

Trong đó: S - Độ lún trên mặt đất tại điểm cách trục thẳng đứng của đường hầm một khoảng bằng x, m;  $S_{max}$  - Độ lún lớn nhất trên mặt đất, m; i - Khoảng cách từ điểm uốn của phễu lún tới trục thẳng đứng của đường hầm, m; x - Khoảng cách từ điểm tính lún đến trục thẳng đứng của đường hầm, m.

Trong thực tế, đường cong lún trên mặt đất thường được dự báo trước khi thi công dựa vào hai thông số cơ bản là độ lún lớn nhất ( $S_{max}$ ) và giá trị điểm uốn (i). Hiện nay tồn tại nhiều công thức thực nghiệm khác nhau để ước lượng giá trị của điểm uốn (i) [1]. Trên cơ sở giá trị điểm uốn (i) kết hợp với mức độ dịch chuyển, biến dạng dự kiến của biên đường hầm, những người làm công tác thiết kế, thi công có thể dự báo độ lún lớn nhất ( $S_{max}$ ) phát sinh sau khi đào đường hầm.

Các đại lượng này sẽ được kiểm chứng sau khi đào đường hầm dựa vào dữ liệu đo quan trắc lún bề mặt tại một số điểm nhất định bố trí trên từng mặt cắt ngang và theo trục dọc của tuyến đường hầm. Vì số lượng các điểm quan trắc lún có giới hạn nên cần thiết phải sử dụng các thuật toán hồi quy để xây dựng đường cong lún trên mặt đất.

**3. Thuật toán hồi quy phi tuyến dự báo phễu lún trên mặt đất**

**3.1. Thuật toán hồi quy**

Phân tích hồi quy là tìm quan hệ phụ thuộc của một biến; được gọi là biến phụ thuộc vào một hoặc nhiều biến khác, được gọi là biến độc lập nhằm mục đích ước lượng hoặc tiên đoán giá trị kỳ vọng của biến phụ thuộc khi biết trước giá trị của biến

$$r_j(S_1, i_1, S_2, i_2) = S_1 \exp\left(-\frac{x_j^2}{2 \cdot i_1^2}\right) + S_2 \exp\left[-\frac{(x_j - u)^2}{2 \cdot i_2^2}\right] - S_j \quad (2)$$

R được xác định bởi ma trận dư của m điểm dữ liệu trong phễu lún [3], [5]:

$$R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

Hàm mục tiêu F được xác định như sau [4]:

$$F = \sum_{j=1}^m r_j(S_1, i_1, S_2, i_2)^2 \quad (4)$$

Hàm F là thước đo tổng thể đánh giá sự khác biệt giữa kết quả dự báo hồi quy phi tuyến và dữ liệu thực tế. Bằng cách giảm thiểu F, giá trị của các tham số (S, i) phù hợp nhất với mô hình dữ liệu có thể được ước tính. Tuy nhiên, nó là vấn đề không giới hạn trong tối ưu hóa. Không giống như phương bình phương nhỏ nhất tuyến tính, mô hình phi tuyến tính không thể trực tiếp thu được các thông số phù hợp nhất từ dữ liệu đo. Nó cần xác định bằng cách lặp đi lặp lại nhiều lần. Từ những đặc điểm trên, ta có thể khai thác để cải thiện trong các tính toán lặp.

Theo Ling Ma [4] để giải bài toán hồi quy trong việc xác định hình dạng phễu lún, phương pháp của Levenberg-Marquardt cho sai số nhỏ nhất và vì vậy được chấp nhận sử dụng trong nghiên cứu này.

**3.2. Giải bài toán hồi quy trong Matlab**

Hàm LMFsolve.m trong Matlab được sử dụng để tìm ra giải pháp tối ưu cho một hệ phương trình có số ẩn nhiều hơn số phương trình của các phương trình phi tuyến khi sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất. Thuật toán Levenberg-Marquardt chuẩn đã được Fletcher sửa đổi và đã được mã hoá trong FORTRAN. Hàm LMFsolve là phiên bản rút ngắn được thực hiện trong Matlab và bổ sung thêm cài đặt các tham số lặp tùy chọn. Bên cạnh đó, một phép xấp xỉ sai phân hữu hạn của ma trận Jacobian được thêm vào như là một hàm cong lồng nhau (hàm để phân bố các kết quả trung gian) [6], [7].

Hàm LMFsolve trong Matlab có dạng như sau:

độc lập. Trong phạm vi của bài báo, nhóm tác giả sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất để tính toán hồi quy phi tuyến tính các dữ liệu lún bề mặt đã đo đạc để phù hợp với mô hình Gauss khi xây dựng đường hầm.

Gọi  $r_j$  là độ lệch của điểm dữ liệu  $j_{th}$  trên đường cong hồi quy phi tuyến với kết quả đo  $S_j$  tương ứng [4]:

```
[x,ssq,cnt]=LMFsolve(Equations,X0); % or
[x,ssq,cnt]=LMFsolve(Equations,X0,'Name',
Value,...); % or
[x,ssq,cnt]=LMFsolve(Equations,X0,Options) %.
```

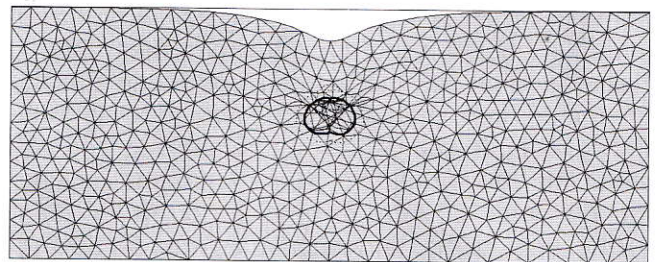
Trong mọi trường hợp, các biến được định nghĩa như sau:

- > Equations là tên của một hàm (chuỗi) hoặc định nghĩa một chuỗi các hàm;
- > X0 là vector của ước lượng ban đầu của các giải pháp;
- > x là phương pháp bình phương nhỏ nhất;
- > ssq là tổng bình phương phần dư;
- > cnt là số lần lặp lại.

Dựa vào hàm hồi quy LMFsolve.m, nhóm tác giả đã xây dựng chương trình tính toán để xây dựng phễu lún phía trên mặt đất từ một vài kết quả dữ liệu đo đạc lún (dữ liệu đầu vào).

**4. Mô hình số 2D mô phỏng đường hầm**

Hình H.1 thể hiện mô hình số 2D trên cơ sở bài toán biến dạng phẳng sử dụng trong phần mềm phần tử hữu hạn Plaxis2D để mô phỏng đường hầm đào trong đất mềm ở độ sâu nhỏ để xác định độ lún phía trên mặt đất gây ra bởi quá trình thi công đường hầm.



H.1. Mô hình 2D đường hầm trong bài toán biến dạng phẳng

Mô hình số có kích thước chiều rộng 200 m, chiều cao 80 m. Hai biên ngang của mô hình được gán điều kiện biên hạn chế dịch chuyển theo phương ngang. Trong khi đó, đáy của mô hình được gán điều kiện hạn chế dịch chuyển theo phương thẳng đứng. Biên phía trên của mô hình

tương ứng với bề mặt đất được để biến dạng tự do.

Trong mô hình số, quá trình giảm tải của đất xảy ra sau khi đào và trước khi lắp dựng kết cấu chống được mô phỏng sử dụng nguyên lý của phương pháp hạn chế dịch chuyển hội tụ (CCM) [9]. Theo đó, ứng suất trong khối đất trên biên đường hầm trước khi lắp dựng kết cấu vỏ chống được giả thiết giảm 30 % so với giá trị ứng suất ban đầu.

Các bước mô phỏng đường hầm như sau:

- Bước 1 (thiết lập mô hình số): xây dựng biên mô hình, lưới phần tử bên trong mô hình, gán điều kiện trường ứng suất, gán điều kiện biên;
- Bước 2 (giảm tải trong khối đất sau khi đào

và trước khi lắp dựng kết cấu chống): giảm tải 30 % ứng suất trong khối đất tác dụng trên biên đào của đường hầm so với trường ứng suất ban đầu [8];

➤ Bước 3: lắp dựng kết cấu vỏ chống và để mô hình đạt tới trạng thái cân bằng mới. xác định độ lún phía trên bề mặt.

Trong mô hình phần tử hữu hạn, khối đất được giả thiết tuân theo mô hình đất hóa cứng. Kết quả nghiên cứu của Hejazi [2] đã chứng minh mô hình đất hóa cứng cho phép mô phỏng gần đúng bản chất của khối đất sét London trong mô hình số. Các thông số của khối đất thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Tính chất cơ lý của đất sét London [2]

Đất	$\gamma_{\text{unsat}}$ , kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{\text{sat}}$ , kN/m <sup>3</sup>	$C_{\text{ref}}$ , kN/m <sup>2</sup>	$\phi$ , độ	$E^{\text{ref}}_{\text{oed}}$ , kN/m <sup>2</sup>	$E^{\text{ref}}_{50}$ , kN/m <sup>2</sup>
Sét	18	19,5	7	20,5°	3,25E+04	3,25E+04

Sử dụng mô hình số trong phần mềm PTHH Plaxis2D, bài báo đã khảo sát ba trường hợp đường hầm có đường kính lần lượt là 4 m, 6 m, 8 m và đào ở các độ sâu khác nhau là: 1,0D; 2,0D; 3,0D; 4,0D; 5,0D. Với mỗi trường hợp tính toán, chiều dày của lớp vỏ chống đường hầm được thay đổi từ 0,3 m đến 0,5 m.

**5. Phân tích kết quả khảo sát trên mô hình số**

Với mỗi trường hợp tính toán, phần mềm PTHH Plaxis2D được sử dụng để thu được đường cong lún phát triển trên bề mặt đất sau khi đào hầm. Sau đó, một chương trình tính toán được xây dựng trên phần mềm Matlab sử dụng thuật toán hồi quy phi tuyến được áp dụng để xác định đường cong lún trên bề mặt đất tuân theo phương trình Gaussian của Peck [10] với hai thông số cơ bản là độ lún lớn nhất ( $S_{\text{max}}$ ) và vị trí điểm uốn (i). Đường cong thu được từ thuật toán hồi quy phi tuyến trong phần mềm Matlab cho kết quả gần đúng nhất với đường cong của phễu lún thu được từ phần mềm PTHH Plaxis2D. Hình H.2 thể hiện sự phụ thuộc của độ lún tối đa trên mặt đất ( $S_{\text{max}}$ ) vào đường kính đường hầm, độ sâu đặt đường hầm tương ứng với các chiều dày kết cấu vỏ chống khác nhau. Đúng như dự đoán, độ lún lớn nhất thu được khi tăng đường kính đường hầm và giảm độ sâu đặt đường hầm. Tuy nhiên, ảnh hưởng của chiều dày vỏ chống đến độ lún phía trên mặt đất có thể bỏ qua.

Có thể nhận thấy, đường hầm có đường kính càng nhỏ, chiều sâu giới hạn gây ảnh hưởng đến độ lún càng nhỏ. Chiều sâu giới hạn gây ảnh hưởng đến độ lún được hiểu là độ sâu của đường hầm mà khi chiều sâu đặt đường hầm lớn hơn giá trị này, độ lún lớn nhất phía trên mặt đất không thay đổi. Chiều sâu giới hạn gây ảnh hưởng đến

độ lún ứng với trường hợp đường hầm có kích thước 4 m, 6 m, 8 m lần lượt là 2D, 3D và 4D (D là đường kính đào của đường hầm). Hình H.3 thể hiện sự thay đổi của vị trí điểm uốn (i) phụ thuộc vào đường kính hầm, độ sâu đặt hầm và chiều dày vỏ chống. Tương tự như đối với độ lún lớn nhất ( $S_{\text{max}}$ ), kết quả phân tích hồi quy phi tuyến sử dụng chương trình Matlab trên cơ sở đường cong lún thu được từ phần mềm PTHH Plaxis2D cho thấy ảnh hưởng không đáng kể của chiều dày kết cấu chống đến giá trị điểm uốn (i). Vì vậy, trên hình H.3 chỉ thể hiện kết quả xác định giá trị điểm uốn (i) trong trường hợp chiều dày kết cấu chống bằng 0,3 m.

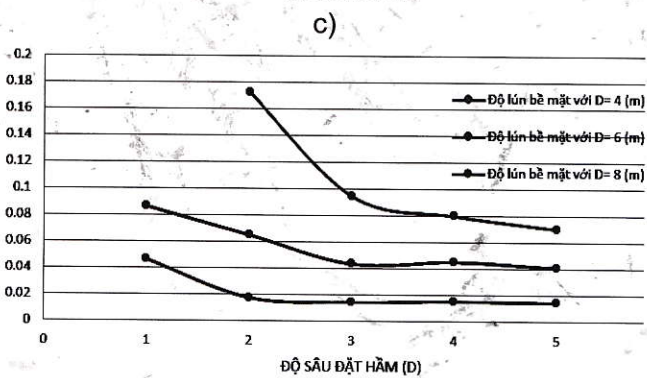
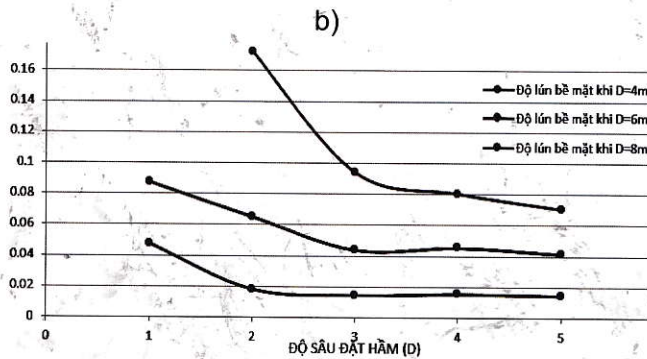
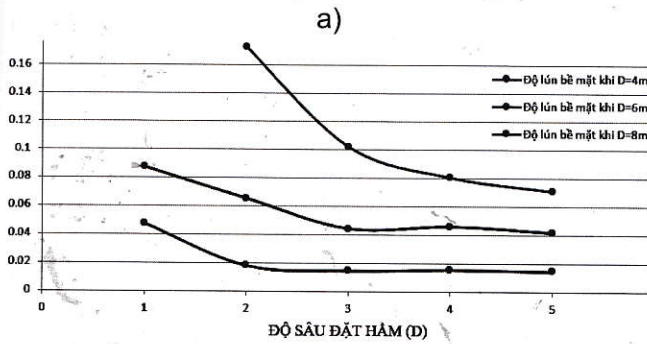
Có thể nhận thấy, khi đường kính đào của đường hầm và chiều sâu đặt hầm tăng lên, khoảng cách từ điểm uốn đến trục thẳng đứng của đường hầm (i) hay độ mở của phễu lún càng lớn. Mối quan hệ giữa chiều sâu đặt đường hầm và giá trị điểm uốn (i) là tuyến tính với cả ba trường hợp đường hầm có đường kính 4 m, 6 m và 8 m.

Trên cơ sở các dữ liệu thu được về giá trị điểm uốn (i) trong các trường hợp được khảo sát, một phương trình liên hệ mới giữa giá trị điểm uốn (i) phụ thuộc vào đường kính đào của đường hầm (D) và độ sâu đặt hầm (H) đã được đề xuất trên cơ sở thuật toán hồi quy đa biến, sai số dự kiến là  $\pm 1,37$  m:

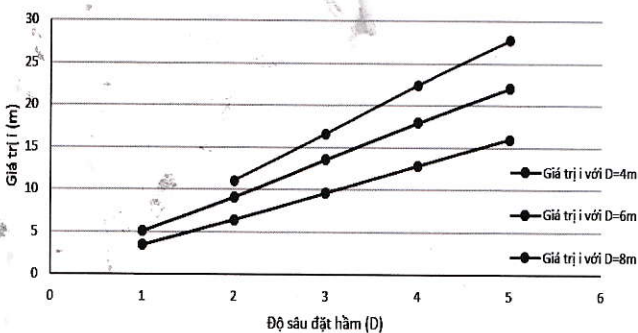
$$I = (1,94.D + 4,09.H - 12,41) \tag{9}$$

Trong đó: i - Khoảng cách từ điểm uốn của phễu lún đến trục thẳng đứng của đường hầm, m; D - Đường kính đào của đường hầm, m; H - Chiều sâu kể từ mặt đất đến mức tâm đường hầm, m.

Bên cạnh độ lún lớn nhất ( $S_{\text{max}}$ ) và giá trị điểm uốn (i), trong quá trình đánh giá độ lún phát sinh khi đào hầm cũng cần chú ý đến đại lượng mất thể tích của đất (VL - Volume Loss).



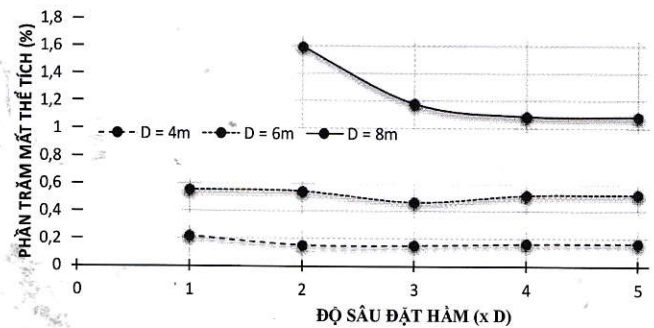
H.2. Sự phụ thuộc của độ lún lớn nhất trên mặt đất vào đường kính hầm, độ sâu đặt hầm và chiều dày vỏ chống



H.3. Quan hệ giữa đường kính đường hầm và giá trị vị trí điểm uốn i

Đại lượng này được tính bằng tỷ số phần trăm của diện tích phễu lún trên mặt cắt ngang hay phần diện tích bị thu hẹp do biến dạng của biên đường hầm chia cho diện tích tiết diện ngang ban đầu khi

đào của đường hầm. Sử dụng kết quả khảo sát từ mô hình PTHH Plaxis2D, hình H.4 thể hiện sự phụ thuộc của giá trị VL vào đường kính và chiều sâu đặt hầm. Chiều dày của kết cấu bằng 0,3 m. Có thể thấy, sự phụ thuộc không đáng kể của giá trị VL vào chiều sâu đặt hầm với các đường hầm có đường kính nhỏ (D=4 m và 6 m). Tuy nhiên, với đường hầm có đường kính lớn (D=8 m), chiều sâu đặt hầm có ảnh hưởng đáng kể với giá trị VL. Khi hầm càng nằm nông, giá trị VL càng lớn. Giá trị giảm dần và đạt đến trị số ổn định khi chiều sâu đặt hầm bằng khoảng 4D.



H.4. Quan hệ giữa phần trăm mất thể tích của đất (V<sub>L</sub>) với độ sâu đặt hầm

6. Kết luận

Quá trình thi công các đường hầm trong đất mềm ở độ sâu nhỏ thường dẫn tới sự hình thành phễu lún trên bề mặt đất có thể dẫn tới nguy cơ phá hủy các công trình trên bề mặt. Dự báo sự hình thành phễu lún và xác định các thông số của phễu lún là vấn đề phức tạp, phụ thuộc vào nhiều yếu tố. Nội dung bài báo đã giới thiệu kết quả khảo sát trên mô hình số bằng phần mềm PTHH Plaxis2D nhằm xác định các thông số đặc trưng của phễu lún trên mặt đất. Dựa vào thuật toán hồi quy phi tuyến kết hợp với dữ liệu thu được từ mô hình số, ảnh hưởng của chiều sâu đặt hầm, đường kính đào của đường hầm, chiều dày kết cấu chống giữ đến giá trị điểm uốn (i) đã được khảo sát. Một phương trình liên hệ mới thể hiện sự phụ thuộc của (i) vào các đại lượng này đã được đề xuất cho phép ước lượng đường cong lún trên bề mặt đất trước khi thi công các đường hầm nằm nông trong đất mềm, làm cơ sở để giảm thiểu, hạn chế các rủi ro có thể xảy ra.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Chakeri H., Ozcelik Y., Unver B., 2013. Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB. Tunnelling and Underground Space Technology 36 (2013) 14-23.
- Hejazi, Y., Dias, D., & Kastner, R., 2008.

Impact of constitutive models on the numerical analysis of underground constructions. Acta Geotechnica, 3, 251-258.

3. Levenberg, K., 1944. A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares, Quart. Appl. Math. Vol. 2, pp 164-168

4. Ling Ma, Lieyun Ding, Hanbin Luo, 2014. Non-linear description of ground settlement over twin tunnels in soil, Tunnelling and Underground Space Technology 42, 144 - 151

5. Marquardt, D., 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, SIAM J. Appl. Math. Vol. 11, pp 431-441.

6. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/16063-lmsolve-m-levenberg-marquardt-fletcher-algorithm-for-nonlinear-least-squares-problems>

7. <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/least-squares-model-fitting-algorithms.html#f204>

8. Moller, S.C. and Vermeer, P.A. (2005). "Prediction of settlements and internal forces in linings due to tunnelling". Fifth International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Preprint Volume, Session 4, 141-149.

9. Ngoc Anh Do, Daniel Dias, Pierpaolo Oreste, 3D numerical investigation on the interaction between mechanized twin tunnels in soft ground; Environmental Earth Sciences, 2014.

10. Peck, R.B., 1969. Deep excavations and tunnelling in soft ground. In: Proc. 7th International

Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State of the Art Volume, 225-290.

**Ngày nhận bài:** 27/03/2017

**Ngày gửi phản biện:** 5/05/2017

**Ngày nhận phản biện:** 18/07/2017

**Ngày chấp nhận đăng bài:** 15/10/2017

**Từ khoá:** đường hầm; mô phỏng số; lún; hồi quy phi tuyến

**SUMMARY**

Tunnelling at shallow depth usually leads to ground settlement. The ground settlement trough over a single tunnel is generally described using Peck's formula, which is represented by the maximum settlement  $S_{max}$  and the distance from the tunnel centerline to the inflexion point of the curve  $i$ . This paper introduces a nonlinear regression procedure to evaluate these two parameters of settlement troughs over a single tunnel on the basis of a numerical analysis. New relationship describing the dependence of settlement trough's parameters on the tunnel depth, tunnel dimension, etc. is presented.

**XÁC ĐỊNH CÁC THÔNG SỐ...**

(Tiếp theo trang 43)

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

1. Gladilin L.V. (1977). An toàn điện trong công nghiệp khai thác mỏ. Moskva. "Nedra" (nguyên bản tiếng Nga).

2. Orlikhin A.P. (1970). Nghiên cứu và thiết kế các phương pháp đo thông số cách điện của mạng điện hạ mô hầm lò với điện áp dưới 1000V. Luận án tiến sĩ. M. "MGI" (nguyên bản tiếng Nga).

3. Sobolev V.G. (1965). Đo tính chất cách điện của cáp mềm mô hầm lò trong điều kiện sử dụng. Moskva (nguyên bản tiếng Nga).

**Ngày nhận bài:** 26/05/2017

**Ngày gửi phản biện:** 5/06/2017

**Ngày nhận phản biện:** 15/08/2017

**Ngày chấp nhận đăng bài:** 15/10/2017

**Từ khoá:** mạng hạ áp 660 V; thông số cách điện; đo thực nghiệm

**SUMMARY**

The article presents an experimental measure method to the insulation parameters of the low voltage 660 V network of Nam Mẫu Coal Company. The experimental results were made at the faces of V8, levels +200/+250 and +305/+348 of V7. From the experimental results, the authors have identified the values and the frequency distribution of the insulation parameters of the low voltage 660 V network Nam Mẫu Coal Company. From there, it is possible to identify the safe level of electric shock when touching the phase of the low voltage network at the Nam Mẫu Coal Company.