

## DỰ BÁO ĐỘ LÚN CHO NỀN ĐẤT YẾU GIA CỐ BẮC THẨM VỚI SỰ CẢN THẨM THEO THỜI GIAN

NGUYỄN BÁ PHÚ, BÙI VĂN HỒNG LĨNH, NGUYỄN QUANG DŨNG  
*Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Công nghiệp thành phố Hồ Chí Minh,  
nguyembaphu@iuh.edu.vn*

**Tóm tắt.** Bài báo trình bày một phương pháp dự báo độ lún cho công trình đường trên nền đất yếu có gia cố bắc thẩm, trong đó phương trình dự báo lún được đề xuất dựa vào sự thay đổi độ cản thẩm của bắc thẩm theo thời gian. Dựa vào lời giải giải tích, mối quan hệ giữa độ cản thẩm với thời gian được đề xuất. Sau đó mối quan hệ này sẽ được kiểm chứng qua kết quả của sự giảm khả năng thoát nước trong thí nghiệm cụ thể. Trên cơ sở đó phương pháp dự báo độ lún và đường cong lún theo thời gian sẽ được đề xuất và kiểm chứng bằng kết quả quan trắc hiện trường cho một công trình cụ thể. Kết quả cho thấy rằng phương pháp dự báo lún đề xuất cho kết quả phù hợp với kết quả quan trắc. Từ đó kiến nghị sử dụng phương pháp đề xuất để dự báo lún cho công trình đường trên nền đất yếu được gia cố bằng bắc thẩm.

**Từ khóa.** Bắc thẩm, nền đất yếu, độ cản thẩm, lún, cố kết.

### SETTLEMENT PREDICTION OF PVD-IMPROVED GROUND WITH TIME DEPENDENT WELL RESISTANCE

**Abstract.** This paper presents a new settlement prediction method of PVD-improved soft soil ground, in which the equation of settlement prediction method is proposed based on the time dependent well resistance. Based on an analytical solution, a time factor-well resistance relationship is established. This relationship is then verified through large sample consolidation test. The new method for settlement prediction is proposed based on the time factor-well resistance relationship. The proposed method is applied to a test embankment. The proposed method provided a good agreement with field data. It is suggested that the proposed method in this study can be used to predict settlement of PVD-improved ground under embankment.

**Keywords.** Prefabricated vertical drain, soft soil ground, well resistance, settlement, consolidation

#### 1 GIỚI THIỆU

Dự báo lún cố kết của nền đất yếu dưới nền đường luôn là vấn đề khó khăn và thách thức không nhỏ trong ngành địa kỹ thuật xây dựng [1-6]. Đặc biệt khi công trình đường xây dựng trên nền đất yếu có bề dày lớn được gia cố vật liệu thoát nước như bắc thẩm, cọc cát, việc dự báo lún còn tồn tại nhiều khó khăn [7-8]. Việc sử dụng những lời giải giải tích để dự báo lún cho nền đường đôi khi không hiệu quả vì chúng chứa nhiều thông số khó có thể xem xét hết trong phương pháp giải tích [9]. Điều này có thể lấy ví dụ tại công trình cải tạo tại cửa sông Nakdong, Busan, Hàn Quốc, độ lún và thời gian cố kết được đánh giá chênh lệch đến 200 đến 600% [8]. Sự chênh lệch này được giải thích bởi các thông số như tải trọng ngoài, chiều dài thoát nước, độ xáo trộn, độ cản thẩm của bắc đôi khi chưa được đánh giá chính xác [7-9].

Trong các phương pháp dự báo lún hiện nay, phương pháp đồ họa [9] thường được sử dụng vì tính đơn giản của nó. Tuy nhiên phương pháp này thường cho kết quả thấp hơn so với kết quả quan trắc và phụ thuộc vào số gia thời gian được chọn [8-11]. Phương pháp Hyperbolic đề xuất bởi Tan và cộng sự [12] cũng thường dùng ở Việt Nam, tuy nhiên phương pháp này thường cho kết quả lớn hơn kết quả quan trắc [8]. Những phương pháp dự báo lún thường được sử dụng trên thế giới và Việt Nam và nhược điểm của những phương pháp này sẽ được trình bày phần sau. Nhìn chung những phương pháp này có nhược điểm là kết quả dự báo lún cuối cùng chỉ dựa vào dữ liệu lún đo được tại một giai đoạn thi công đắp trên nền đất yếu [13]. Những phương pháp này có nhược điểm là không thể xây dựng đường cong lún theo thời gian dựa vào độ lún cực hạn. Vì sự ảnh hưởng các thông số như độ cản thẩm và sự xáo trộn của đất do thi công bắc thẩm dẫn đến các giá trị thu được thử phân tích ngược thường nhỏ hơn các giá trị thực tế [8].

Trong xây dựng đường trên nền đất yếu, việc đắp hay chất tải được thực hiện theo giai đoạn để đảm bảo tính ổn định của nền đường do cường độ của lớp đất yếu rất nhỏ. Do đó, để tăng tính hiệu quả việc quản lý

thi công đường, cần có một phương pháp dự báo lún theo thời gian dựa vào những số liệu quan trắc ở những giai đoạn sớm hơn, so với các giai đoạn đắp tải cuối cùng. Nếu độ lún dự báo theo thời gian được dự báo chính xác theo các giai đoạn đắp, việc quản lý trở nên hiệu quả, qua đó có thể điều chỉnh và đánh giá thời gian đắp và chiều cao đắp sao cho hợp lý [13].

Sự sai lệch trong dự đoán độ lún cũng như tốc độ cố kết của nền đất yếu có gia cố bắc thấm gây ra nhiều yếu tố khác nhau liên quan đến thông số đầu vào trong tính toán, trong đó khả năng thoát nước của bắc đóng vai trò quan trọng. Trên thực tế, thông số này rất khó và hay giả định để tính toán trong thiết kế [8]. Dựa vào kết quả thí nghiệm về khả năng thoát nước của bắc thấm được thực hiện bởi Kim và cộng sự [14], khả năng thoát nước của bắc giảm dần theo thời gian. Do đó độ cản thấm cũng tăng theo thời gian. Điều này gây cản trở đáng kể đến quá trình cố kết của nền đất yếu có gia cố bắc thấm. Tuy nhiên, việc dự báo độ lún xét đến độ cản thấm theo thời gian vẫn còn khó khăn và hầu như chưa có phương pháp thực hiện. Mục tiêu chính của bài báo này là đề xuất một phương pháp dự báo độ lún của nền đất yếu được gia cố bắc thấm với khả năng thoát nước thay đổi theo thời gian. Đầu tiên, mối quan hệ giữa độ cản thấm theo thời gian sẽ được thiết lập dựa vào những lời giải tích. Sau đó mối quan hệ này sẽ được kiểm chứng và phân tích so sánh với kết quả thí nghiệm cố kết của khối đất có gia cố bắc thấm được thực hiện bởi Kim và cộng sự [14]. Từ mối quan hệ này, phương trình dự báo độ lún của nền đất yếu gia cố bắc thấm sẽ được đề xuất. Cuối cùng phương pháp dự báo đề xuất sẽ được kiểm chứng đánh giá qua dữ liệu quan trắc của công trình cụ thể.

## 2 PHƯƠNG PHÁP DỰ BÁO ĐỘ LÚN ĐỀ XUẤT

### 2.1 Mối quan hệ giữa độ cản thấm theo thời gian

Trong nền đất yếu gia cố bắc thấm, quá trình cố kết trong đất xảy ra chủ yếu theo phương ngang [15-17]. Yoshikuni và Nakanodo [15] đã phát triển một phương trình cố kết theo phương ngang của nền đất yếu gia cố bắc thấm, trong đó độ cản thấm được xem xét, tuy nhiên họ bỏ ảnh hưởng sự xáo trộn của đất do thi công bắc thấm. Phương trình cố kết được thể hiện như sau:

$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{F(n) + 0.8L}\right] \quad (1)$$

trong đó,  $U_h$  là độ cố kết theo phương ngang của nền đất,  $T_h$  là nhân tố thời gian theo phương ngang.  $F(n)$  là hệ số kể đến ảnh hưởng khoảng cách của bắc thấm.  $L$  là hệ số xét đến ảnh hưởng của độ cản thấm. Những hệ số  $F(n)$  và  $L$  lần lượt như sau:

$$F(n) = \ln(n) - 0.75 \quad (2)$$

$$L = \frac{32}{\pi^2} \left( \frac{k_h}{k_w} \right) \left( \frac{H}{d_w} \right)^2 \quad (3)$$

ở đây,  $n = d_e / d_w$ , với  $r_e$  và  $r_w$  lần lượt là đường kính của vùng đất ảnh hưởng và đường kính quy đổi của bắc thấm.  $H$  là chiều dày lớp đất.  $k_h$  và  $k_w$  lần lượt là hệ số thấm theo phương ngang của đất nền và hệ số thấm theo phương đứng của bắc thấm.  $k_w$  được tính như sau:

$$k_w = q_w / A_{PVD} \quad (4)$$

ở đây  $q_w$  là khả năng thoát nước của bắc thấm và  $A_{PVD}$  là diện tích mặt cắt ngang của bắc thấm. Chú ý rằng, trong phương trình (1),  $T_h = C_h t / d_e^2$ , trong đó  $t$  là thời gian và  $C_h$  là hệ số cố kết theo phương ngang, được tính như sau:

$$T_h = \frac{k_h}{\gamma_w m_v} \quad (5)$$

ở đây,  $\gamma_w$  là trọng lượng riêng của nước và  $m_v$  là hệ số nén thể tích của đất nền.

Gần đây, Deng và cộng sự [18] một lời giải tích để tính toán quá trình cố kết của nền đất, trong đó độ cản thấm được xem xét với sự thay đổi khả năng thoát nước theo thời gian như sau:

$$\bar{u}_r = u_0 \left( \frac{1 + \alpha_0 e^{-a_3 T_h}}{1 + \alpha_0} \right)^{8 / (a_3 \mu_0)} \quad (6)$$

ở đây  $\bar{u}_r$  là áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư trung bình trong vùng ảnh hưởng,  $u_0$  là áp lực nước lỗ rỗng thẳng

đư ban đầu. Hệ số  $a_3$  được tính như sau:

$$a_3 = A_3 \frac{4r_e^2}{C_h} \tag{7}$$

ở đây,  $r_e$  là bán kính vùng ảnh hưởng ( $d_e/2$ ),  $A_3$  là hệ số sử dụng đánh giá sự giảm khả năng thoát nước theo thời gian, giá trị  $A_3$  nằm trong phương trình thể hiện sự giảm khả năng thoát nước theo thời gian như sau:

$$q_w = q_{wo} e^{-A_3 t} \tag{8}$$

ở đây  $q_{wo}$  là khả năng thoát nước của bắc thấm tại thời điểm ban đầu ( $t = 0$ ). Giá trị  $\alpha_o$  là hệ số được trình bày như sau:

$$\alpha_o = \frac{q_{wo} \mu_o}{\pi k_h (2Hz - z^2)} \tag{9}$$

ở đây, giá trị  $\mu_o = \ln \frac{n}{s} + \frac{k_h}{k_s} \ln s - 0.75$  với  $s = d_s/d_w$ , trong đó  $d_s$  là đường kính vùng ảnh hưởng xáo trộn

đất do thi công bắc thấm.  $k_s$  là hệ số thấm của đất trong vùng xáo trộn.

Từ phương trình (6) và phương trình (1), độ cản thấm theo thời gian của bắc thấm thu được như sau:

$$L(t) = \frac{-T_h a_3 F(n)}{\ln \left( \frac{1 + \alpha_o e^{-a_3 T_h}}{1 + \alpha_o} \right)} - F(n) \tag{10}$$

**2.2 Đánh giá tính hợp lý của mối quan hệ độ cản thấm với thời gian**

Để đánh giá sự giảm khả năng thoát nước theo thời gian, Kim và cộng sự [14] đã tiến hành thí nghiệm cố kết cho trụ đất gia cố bắc thấm. Mẫu đất được lấy từ khu vực công trường Hwa-Jun gần cảng Busan. Đặc điểm của mẫu đất như sau: hàm lượng nước  $w = 53\%$ , giới hạn nhão  $w_L = 54\%$ , giới hạn dẻo  $w_p = 27\%$ , hệ số thấm của đất theo phương ngang  $k_h = 3.6 \times 10^{-10}$  (m/s), hệ số cố kết theo phương ngang  $C_h = 1.0 \times 10^{-7}$  (m<sup>2</sup>/s). Trụ đất gia cố bắc thấm có các thông số để tính cố kết của đất được cho như Bảng 1. Chú ý rằng, các giá trị cho ở đây được lấy từ Kim và cộng sự [14] và Deng và cộng sự [18].

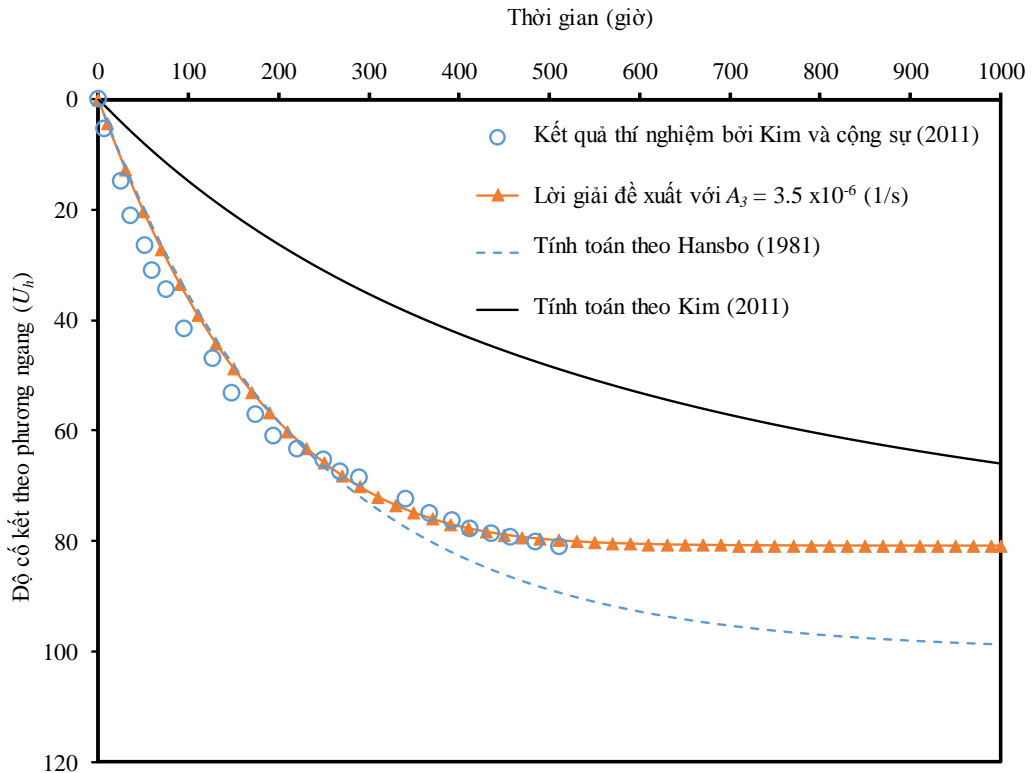
Bảng 1: Các thông số liên quan đến ứng xử của bắc thấm trong tính toán cố kết

Thông số	Giá trị
$d_w$ (m)	0.05
$d_s$ (m)	0.3
$d_e$ (m)	0.6
$H$ (m)	2
$k_h/k_s$	1.05
$q_w$ (m <sup>3</sup> /năm)	5

Dựa vào kết quả đo đặc khả năng thoát nước theo thời gian, hệ số  $A_3$  được xác định bằng  $3.5 \times 10^{-6}$  (1/s) [14]. Bài báo này sử dụng các thông số này để tính toán độ cố kết theo thời gian khối đất. Độ cố kết của khối đất theo thời gian dựa vào mối quan hệ giữa độ cản thấm theo thời gian thu được từ phương trình (10) và phương trình (1) như sau:

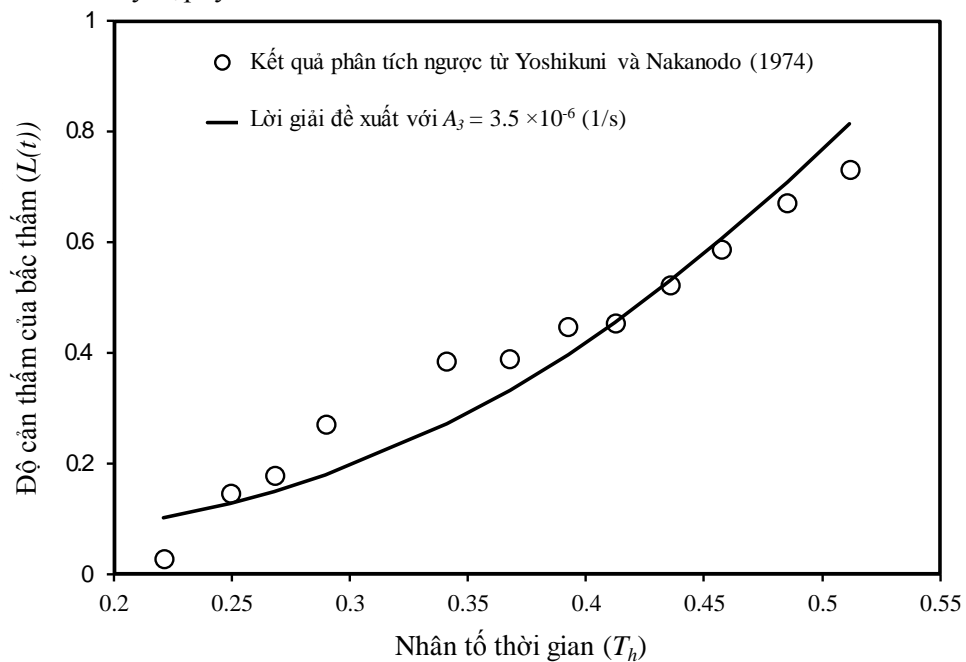
$$U_h = 1 - \exp \left[ \frac{8 \ln \left( \frac{1 + \alpha_o e^{-a_3 T_h}}{1 + \alpha_o} \right)}{a_3 F(n)} \right] \tag{11}$$

Dựa vào phương trình cố kết số (11), quá trình cố kết được phân tích và so sánh với lời giải Hansbo [16] và Kim và cộng sự [14]. Kết quả được trình bày như Hình 1.



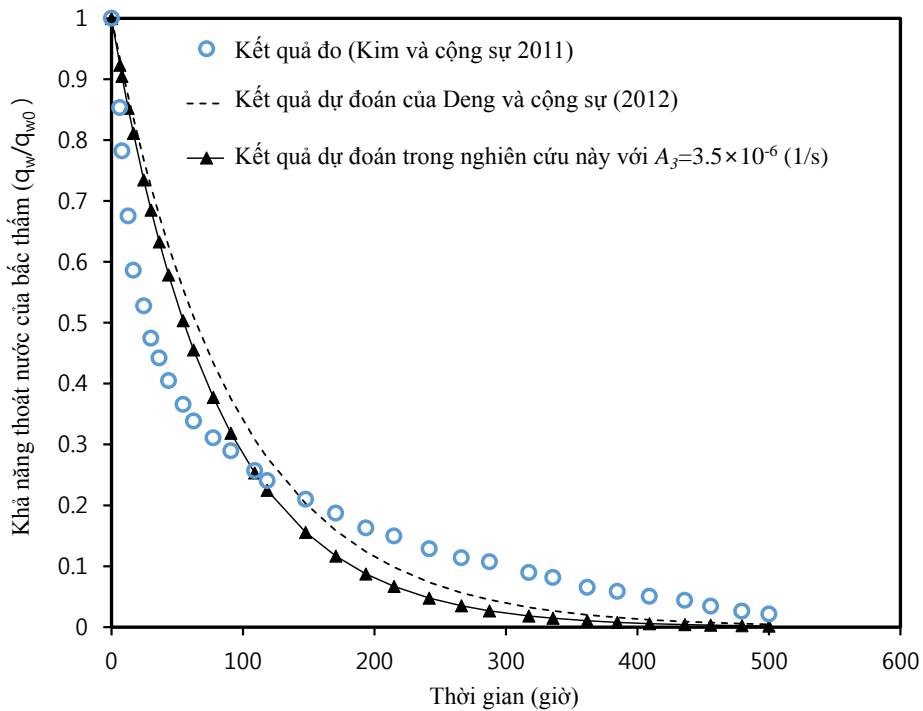
Hình 1: Kết quả tính toán độ cố kết theo thời gian sử dụng mối quan hệ đề xuất và những lời giải khác

Kết quả cho thấy việc sử dụng lời giải với mối quan hệ độ cản thấm được đề xuất trong bài báo này cho kết quả phù hợp với số liệu đo đạt bởi Kim và cộng sự [14]. Mối quan hệ độ cản thấm theo thời gian theo Kim và cộng sự [14] là tuyến tính, trong khi đó mối quan hệ này là phi tuyến trong phương pháp đề xuất (Phương trình 10). Hình 2 trình bày mối quan hệ giữa độ cản thấm với nhân tố thời gian. Kết quả cho thấy sử dụng mối quan hệ đề xuất khá phù hợp với kết quả quan trắc, được phân tích ngược từ Yoshikuni và Nakanodo [15]. Do đó có thể thấy rằng, việc sử dụng mối quan hệ giữa độ cản thấm của bắc thấm theo thời gian đề xuất trong nghiên cứu này hợp lý.



Hình 2: Mối quan hệ giữa độ cản thấm của bắc thấm và nhân tố thời gian

Giá trị  $A_3=3.5 \times 10^{-6}$  (1/s) sử dụng trong nghiên cứu này cho kết quả dự đoán sự giảm khả năng thoát nước theo thời gian khá phù hợp. Kết quả dự báo sự thay đổi khả năng thoát nước theo thời gian với hệ số  $A_3=3.5 \times 10^{-6}$  (1/s) được trình bày như Hình 3.



Hình 3: Dự đoán sự giảm khả năng thoát nước của bắc thẩm

**2.3 Phương pháp dự báo lún đề xuất**

Độ cố của nền đất yếu gia cố bắc thẩm theo phương ngang tại thời gian  $t$ , bỏ qua ảnh hưởng cố kết theo phương đứng được tính như sau [8, 19-20]:

$$U_t = \frac{S_t}{S_\infty} \tag{12}$$

ở đây  $S_\infty$  là độ lún cuối cùng của nền đất yếu, độ lún cuối cùng ở đây được xem như nền đất cố kết hoàn toàn.  $S_t$  là độ lún của nền đất yếu tại thời điểm  $t$ . Kết hợp với Phương trình (11),  $S_t$  được viết lại như sau:

$$S_{(t-theory)} = S_\infty \left( 1 - \exp \left[ \frac{8 \ln \left( \frac{1 + \alpha_o e^{-a_3 T_h}}{1 + \alpha_o} \right)}{a_3 F(n)} \right] \right) \tag{13}$$

Độ lún quan trắc tại thời gian  $t$  được tính toán như sau:

$$S_{(t-Observation)} = \chi \left( 1 - \exp \left[ \frac{8 \ln \left( \frac{1 + \alpha_o e^{-a_3 T_h \text{ (at observed time)}}}{1 + \alpha_o} \right)}{a_3 F(n)} \right] \right) \tag{14}$$

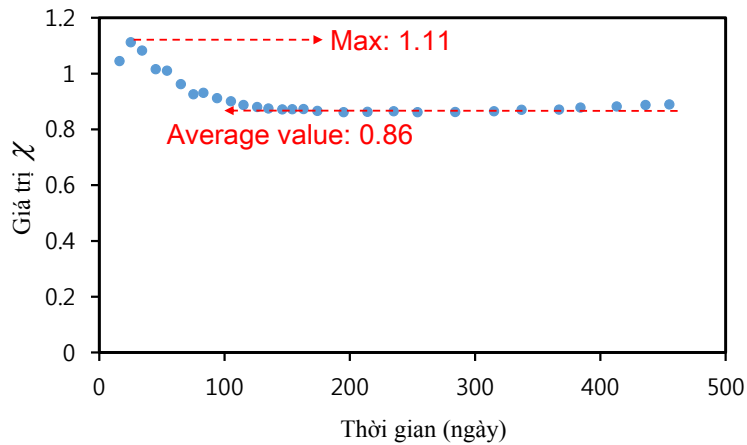
Tiếp theo, độ lún cuối cùng được tính toán như sau:

$$S_{(final-prediction)} = \lim_{x \rightarrow \infty} S_{(t-prediction)} = \chi \left( 1 - \exp \left[ \frac{8 \ln \left( \frac{1}{1 + \alpha_o} \right)}{a_3 F(n)} \right] \right) \tag{15}$$

ở đây giá trị  $\chi$  được xác định dựa vào kết quả quan trắc độ lún trong một giai đoạn thi công, được xác định như sau:

$$\chi = \frac{S_{(t_i)}}{\left[ 1 - \exp \left[ \frac{8 \ln \left( \frac{1 + \alpha_o e^{-a_3 T_{hi}}}{1 + \alpha_o} \right)}{a_3 F(n)} \right] \right]} \quad (16)$$

ở đây  $S_{(t_i)}$  là độ lún quan trắc tại thời điểm  $t_i$ .  $T_{hi}$  là nhân tố thời gian, được xác định tại thời điểm  $t_i$ . Nhóm tác giả của bài báo này phân tích và khảo sát giá trị  $\chi$ , kết quả cho thấy giá trị  $\chi$  thay đổi từ 0.8 đến 1.2. Lấy ví dụ phân tích cho trường hợp tại công trường cảng Busan, được trình bày như Hình (4). Kết quả cho thấy rằng giá trị  $\chi$  thay đổi từ 0.86 đến 1.11, giá trị này ổn định tại giá trị 0.86 sau 80 ngày. Điều này được giải thích vì tốc độ cố kết của nền đất yếu lớn hơn trong giai đoạn đầu thi công. Điều này cũng hợp lý so với nghiên cứu của Bo và cộng sự [21].



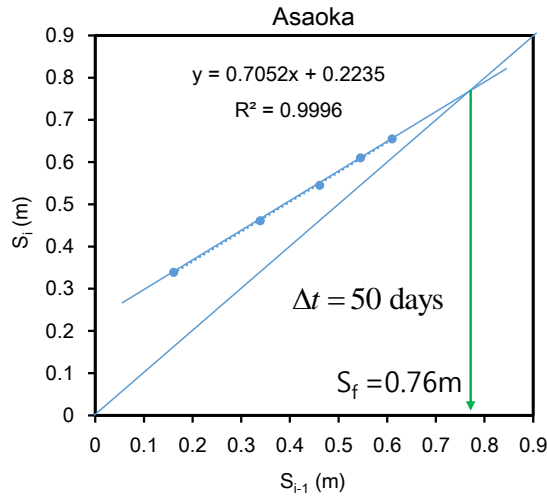
Hình 4: Giá trị  $\chi$  khảo sát tại công trường cảng Busan

### 3 ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP ĐỀ XUẤT CHO CÔNG TRÌNH CỤ THỂ

Để đánh giá khả năng áp dụng phương pháp dự báo lún được đề xuất trong nghiên cứu này, phần này nhóm tác giả sẽ áp dụng phương pháp dự báo lún đề xuất cho công trình cụ thể ở công trường cảng Busan. Dữ liệu quan trắc và các thông số khác được lấy từ Chung và cộng sự [8]. Để đánh giá độ chính xác của phương pháp đề xuất với các phương pháp dự báo khác, nhóm tác giả sử dụng các phương pháp Asaoka [9] và phương pháp Hyperbolic [12].

#### 3.1 Phương pháp Asaoka

Hình 5 trình bày phương pháp dự báo độ lún sau cùng của nền đất yếu gia cố bắc thẩm. Trong trường hợp này, số gia thời gian được chọn  $\Delta t = 50$  ngày. Kết quả cho thấy độ lún sau cùng được dự báo là 0.76 m. Như thảo luận trong Phần 1, giá trị độ lún dự báo theo phương pháp Asaoka cho độ lún nhỏ hơn nhiều so với độ lún thực tế.



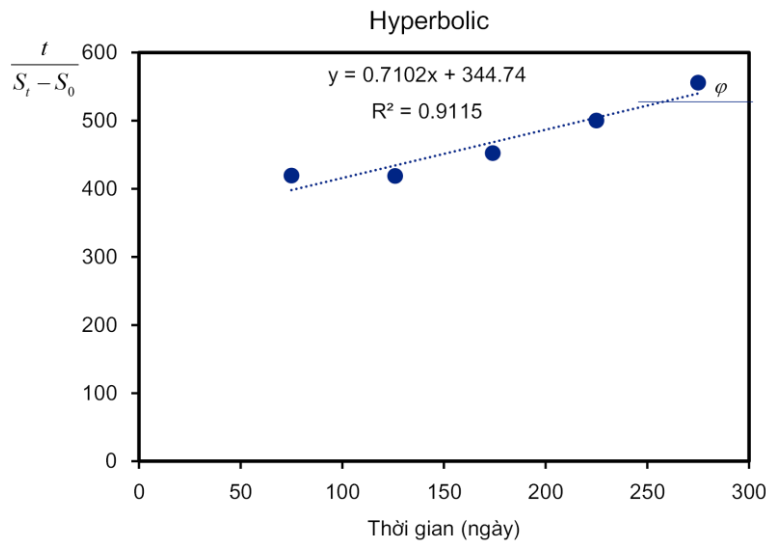
Hình 5: Phương pháp dự báo lún bằng phương pháp Asaoka

**3.2 Phương pháp Hyperbolic**

Hình 6 trình bày phương pháp dự báo độ lún theo phương pháp Hyperbolic. Kết quả độ lún sau cùng của nền đất được tính như phương trình sau:

$$S_f = S_0 + \frac{1}{\beta} = 0.16 + \frac{1}{\tan \varphi} = 1.2 \text{ m} \tag{17}$$

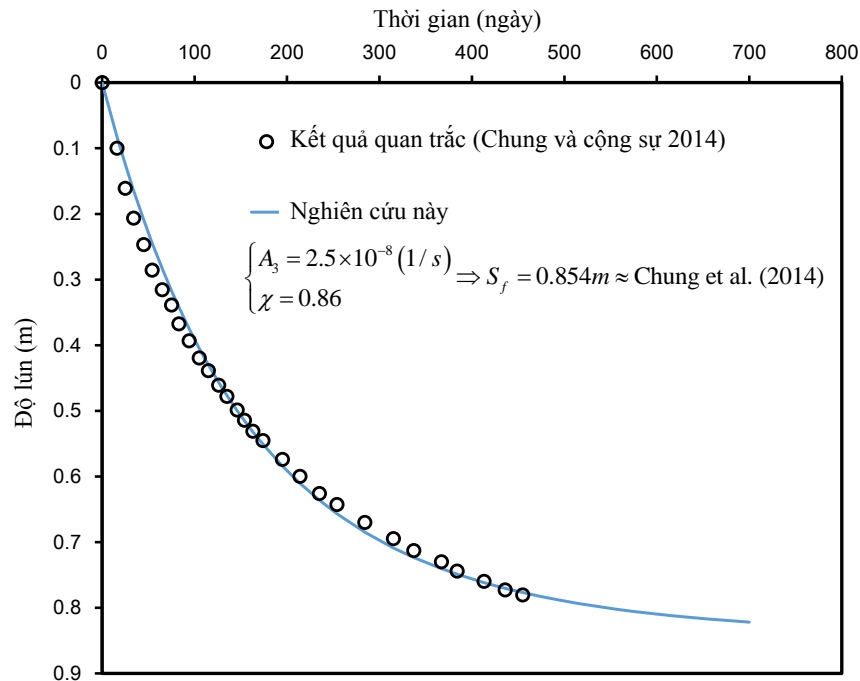
ở đây  $S_0$  là độ lún ban đầu được chọn bằng 0.16 m. Độ lún dự báo theo phương pháp này cho kết quả lớn hơn so với kết quả quan trắc thực tế. Hơn nữa phương pháp này có độ chính xác phụ thuộc vào giá trị  $S_0$  chọn ban đầu.



Hình 6: Phương pháp dự báo lún bằng phương pháp Hyperbolic

**3.3 Phương pháp dự báo lún đề xuất**

Hình 7 trình bày phương pháp dự báo độ lún sau cùng của nền đất yếu cho công trình Cảng Busan. Kết quả cho thấy độ lún sau cùng tính theo phương pháp đề xuất là 0.854 m. Kết quả này phù hợp với báo cáo của Chung và cộng sự [8]. Ngoài ra phương pháp đề xuất cho phép dựng đường cong lún theo thời gian của nền đất yếu. Kết quả cho thấy phương pháp đề xuất cho kết quả phù hợp với dữ liệu quan trắc ở hiện trường. Dựa vào kết quả phân tích, giá trị dự báo sự giảm khả năng thoát nước của bắc thấm  $A_3$  tìm được là  $2.5 \times 10^{-8}$  (1/s). Điều đó cho thấy, dựa vào phương pháp đề xuất có thể thu được quy luật giảm khả năng thoát nước của bắc thấm trong nền đất yếu.



Hình 7: Phương pháp dự báo lún bằng phương pháp đề xuất

#### 4 KẾT LUẬN

Nghiên cứu này trình bày một phương pháp dự báo lún cho công trình đường trên nền đất yếu có gia cố bắc thấm, trong đó phương trình dự báo lún được đề xuất dựa vào sự thay đổi độ cản thấm của bắc thấm theo thời gian. Dựa vào kết quả phân tích và so sánh với các phương pháp dự báo độ lún khác, có thể rút ra những kết luận chính như sau:

- Mối quan hệ phi tuyến giữa độ cản thấm với thời gian được đề xuất. Mối quan hệ này cho kết quả dự báo về quy luật thay đổi độ cản thấm theo thời gian khá phù hợp với kết quả thí nghiệm.
- Phương pháp dự báo độ lún theo thời gian được đề xuất và cho kết quả dự báo khá chính xác so với dữ liệu quan trắc thực tế.
- Kiến nghị sử dụng phương pháp dự báo lún đề xuất để dự báo lún cho công trình đường trên nền đất yếu được gia cố bằng bắc thấm.

#### 5 LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Công nghiệp Tp. HCM trong Đề tài có mã số 20/1.2 XD03.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Yun, D-H., Nguyen, B-P., Kim J-H., and Kim, Y-T. A Study of Consolidation Behavior of Clay Ground with Partially Penetrated PVD under Artesian Pressure. *J. Korean Geosynthetics Society* Vol.15 No.1 March. 2016. Pp: 47 - 57.
- [2] Kim, Y-T., Nguyen, B-P., and Yun, D-H. (2018). "Analysis of Consolidation Behavior of PVD-Improved Ground Considering a Varied Discharge Capacity". *Engineering Computations*, 35(3): 1183-1202.
- [3] Kim, Y-T., Nguyen, B-P., and Yun, D-H. (2018). (2018). "Effect of Artesian Pressure on Consolidation Behavior of Drainage-installed Marine Clay Deposit" *ASCE' Journal of Materials in Civil Engineering*: 30(8): 04018156-1-13.
- [4] Nguyen, B-P., Yun, D-H., and Kim, Y-T. (2018). "An Equivalent Plane Strain Model of PVD-Improved Ground" *Computers and Geotechnics* 103: 32-42.



- [5] Nguyen, B-P. and Kim, Y-T. (2019). “An analytical solution for consolidation of PVD-installed deposit considering nonlinear distribution of hydraulic conductivity and compressibility” *Engineering Computations*. 36(2): 707-730.
- [6] Nguyen, B-P. and Kim, Y-T. (2019). “Radial consolidation of PVD-installed normally consolidated soil with discharge capacity reduction using large-strain theory” *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2): 243-254.
- [7] Chung, S.G., 1999. Engineering properties and consolidation characteristics of Kimhae estuarine clayey soil. In: Thick Deltaic Deposits, ATC-7 Workshop, Special Publication, the 11th ARC on SMGE, Seoul, pp. 93-108.
- [8] Chung, S.G., Kweon, H.J., and Jang, W.Y., 2014. Observational method for field performance of prefabricated vertical Drains. *Geotextiles and Geomembranes*. 1-12.
- [9] Asaoka, A., 1978. Observational procedure of settlement prediction. *Soils Found*. 18 (4), 87-101.
- [10] Edil, T.B., Fox, P.J., Lan, L.T., 1991. Observational procedure for settlement of peat. In: Proceedings of the International Conf. on Geotechnical Engineering for Coastal Development Theory and Practice on Soft Ground, Geo-Coast '91, Yokohama, Japan, pp. 165-170.
- [11] Arulrajah, A., Nikraz, H., Bo, M.W., 2004. Factors affecting field instrumentation assessment of marine clay treated with prefabricated vertical drains. *Geotext. Geomembrs* 22 (5), 415-437.
- [12] Tan, T.S., Inoue, T., Lee, S.L., 1991. Hyperbolic method for consolidation analysis. *J. Geotech. Eng. ASCE* 117 (11), 1723-1737.
- [13] Kim, T-H., Im, E-S., Lee, K-Y., Jung, C-H., Kim, C-H. (2017). New effective construction management of the soft ground improvement. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017.
- [14] Kim, R., Hong, S.J., Lee, M.J. and Lee, W. (2011). “Time dependent well resistance factor of PVD.” *Marine Georesources & Geotechnology*, 29(2): 131-144.
- [15] Yoshikuni, H., Nakanodo, H., 1974. Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability. *Soils Found*. 14 (2), 35-46.
- [16] Hansbo, S. (1981). 'Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains'. 10th ICSMFE, Anonymous, ed., A.A. Balkema, Rotterdam-Boston, 677-682.
- [17] Hansbo, S. (1983) Discussion Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Vol. 3, Spec. Session 2, 1148–1149.
- [18] Deng Y.B., Xie K.H., Lu M.M, Tao H.B. & Liu G.B. (2013). “Consolidation by prefabricated vertical drains considering the time dependent well resistance.” *Geotextiles & Geomembranes*, 36:20-26.
- [19] Chung, S.G., Lee, N.K., Kim, S.R., 2009. Hyperbolic method for prediction of prefabricated vertical drains performance. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 135 (10), 1519-1528.
- [20] Chung, S.G., Lee, N.K., 2010. Smear effect and well resistance of PVD-installed ground based on the hyperbolic method. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 136 (4), 640-642.
- [21] Bo, M.W., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A. and Leong, M. (2016). “Laboratory measurements of factors affecting discharge capacity of prefabricated vertical drain materials.” *SoilsandFoundations*2016;56(1):129–137.

Ngày nhận bài: 10/02/2020

Ngày chấp nhận đăng: 04/09/2020