

# Xây dựng mô hình số phân tích giải pháp xử lý nền đất yếu bằng bấc thấm

Developing a numerical model to analyze solutions for soft ground improvement using prefabricated vertical drains

> **THS TRẦN MINH HẢI, GS.TS TRỊNH MINH THỤ, PGS.TS ĐỖ THẮNG\***

Trường Đại học Thủy Lợi; \*Email: dothang@tlu.edu.vn

## TÓM TẮT

Khi xây dựng đường qua vùng có nền đất yếu, giải pháp bấc thấm luôn được ưu tiên xem xét để tăng tốc độ cố kết. Trong bài báo này, tác giả trình bày việc xây dựng mô hình số phân tích bài toán xây dựng nền đắp trên đất yếu gia cường bằng bấc thấm. Mô hình này được kiểm chứng thông qua kết quả quan trắc lún bề mặt, lún sâu, chuyển vị ngang trên bề mặt, chuyển vị ngang theo chiều sâu và áp lực nước lỗ rỗng của công trình thực tế cho thấy đảm bảo độ tin cậy. Kết quả nghiên cứu có thể là tài liệu tham khảo cho các công trình có tính chất tương tự.

**Từ khóa:** Mô hình số; nền đất yếu; bấc thấm.

## ABSTRACT

When constructing roads over areas with soft ground, the prefabricated vertical drains solution is always prioritized for consideration to accelerate the consolidation process. In this paper, the author presents the development of a numerical model to analyze the problem of constructing embankments on soft soil reinforced with prefabricated vertical drains. This model has been validated through observations of surface settlement, deep settlement, surface horizontal displacement, deep horizontal displacement, and pore water pressure from actual projects, demonstrating its reliability. The research results can serve as a reference for projects with similar characteristics.

**Keyword:** numerical model; soft ground; prefabricated vertical drains

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Xử lý nền đất yếu bằng bấc thấm được áp dụng khá phổ biến hiện nay khi xây dựng đường qua vùng có nền đất yếu.

Giải pháp này có tác dụng tăng nhanh tốc độ cố kết, tăng cường độ của đất yếu, rút ngắn thời gian đắp và chờ lún để đạt giá trị yêu cầu về độ lún cố kết cho phép còn lại, đảm bảo tiến độ thực hiện dự án. Tính toán, thiết kế nền đắp trên nền đất yếu có sử dụng giải pháp bấc thấm chủ yếu vẫn theo đường lối giải tích từ hướng dẫn của tiêu chuẩn TCCS 41:2022/TCĐBVN [1] và TCVN 9355:2013 [2] của Việt Nam cũng như tiêu chuẩn JTG/T D31-02:2013 [3], JTG D30:2015 [4] và GB/T 51275:2017 [5] của Trung Quốc. Phương pháp giải tích thường dựa trên các giả định và điều kiện lý tưởng hóa, chẳng hạn như đất đồng nhất (hoặc chia thành từng lớp đồng nhất) và điều kiện biên đơn giản, do đó không phù hợp để mô hình hóa các điều kiện phức tạp và phi tuyến thường gặp trong thực tế.

Plaxis là phần mềm về địa kỹ thuật (ĐKT) được sử dụng phổ biến trên toàn thế giới. Phần mềm sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để mô phỏng trạng thái ứng suất - biến dạng, ổn định của đất và kết cấu. Plaxis hỗ trợ nhiều mô hình đất khác nhau, từ các mô hình đơn giản như Mohr-Coulomb đến các mô hình phức tạp hơn như Hardening Soil, Cam - Clay, Soft Soil. Với giao diện đồ họa trực quan và các công cụ kiểm tra kết quả chi tiết, giúp dễ dàng hiểu và kiểm tra lại các phân tích. Vì vậy, từ công trình thực tế xử lý nền đất yếu bằng bấc thấm có đầy đủ dữ liệu quan trắc, tác giả xây dựng mô hình số theo phương pháp FEM để nghiên cứu trạng thái ứng suất - biến dạng và độ cố kết theo thời gian của nền đất yếu.

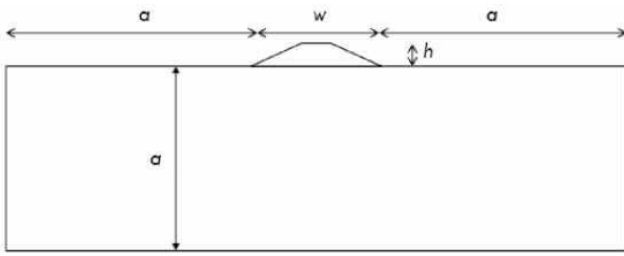
## 2. THIẾT LẬP MÔ HÌNH BÀI TOÁN TRÊN PHẦN MỀM PLAXIS

### 2.1. Mô hình hóa hình học và điều kiện biên

Đường giao thông là công trình dạng tuyến nên trong tính toán thường sử dụng mô hình biến dạng phẳng (chuyển vị và biến dạng dọc tuyến đường coi như bằng không nhưng ứng suất pháp dọc tuyến vẫn được tính đến). Do đó, sử dụng phần mềm Plaxis 2D để mô hình hóa bài toán, giảm được thời gian tính toán so với Plaxis 3D.

Biên phân tích cho bài toán nền đường đảm bảo không ảnh hưởng đến trạng thái ứng suất - biến dạng của nền đất được đề xuất như sau (hình 1):

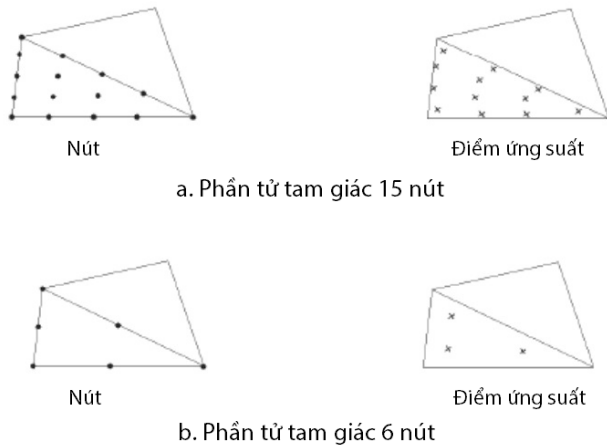
- Phân tích ổn định:  $a \geq 2w$ ;
- Biến dạng thoát nước:  $a \geq 3w$ ;
- Biến dạng không thoát nước:  $a \geq 4w$ .



Hình 1. Sơ đồ biên phân tích bài toán nền đường

**2.2. Phần tử**

Để phân tích bài toán phẳng có thể chọn phần tử hình tam giác 6 nút hoặc 15 nút để mô hình hóa các lớp đất và kết cấu khác (hình 2).



Hình 2. Vị trí nút và điểm ứng suất trong phần tử

Phần tử tam giác 6 nút sử dụng hàm nội suy bậc hai cho các chuyển vị và tích phân số bao gồm 3 điểm Gauss (điểm ứng suất). Phần tử này khá chính xác, cho kết quả tốt trong phân tích các bài toán đơn giản, với điều kiện sử dụng đủ số lượng phần tử. Tuy nhiên, cần thận trọng với mô hình đối xứng trục hoặc tính toán khả năng chịu lực, phân tích ổn định bằng phương pháp triết giảm phi-c. Tải trọng phá hoại hoặc hệ số an toàn thường được dự đoán quá cao khi sử dụng các phần tử 6 nút do hiện tượng suy biến (Mesh Locking) [6, 7]. Để khắc phục những tồn tại trên, phần tử 15 nút được ưu tiên sử dụng. Phần tử tam giác 15 nút sử dụng hàm nội suy bậc 4 cho các chuyển vị và tích phân số bao gồm 12 điểm Gauss. Phần tử 15 nút cho phép mô phỏng chi tiết và chính xác hơn các biến dạng và ứng suất trong mô hình. Điều này đặc biệt quan trọng khi xử lý các vấn đề phức tạp và phi tuyến. Một phần tử 15 nút có thể được coi là sự kết hợp của bốn phần tử 6 nút, vì tổng số nút và điểm ứng suất bằng nhau. Tuy nhiên, một phần tử 15 nút mạnh hơn bốn phần tử 6 nút do sử dụng hàm nội suy là đa thức bậc cao để tránh hiện tượng suy biến. Việc sử dụng phần tử 15 nút cũng dẫn đến tiêu thụ nhiều bộ nhớ hơn và thời gian tính toán dài hơn.

**2.3. Các mô hình cho đất**

**2.3.1. Mô hình Mohr - Coulomb**

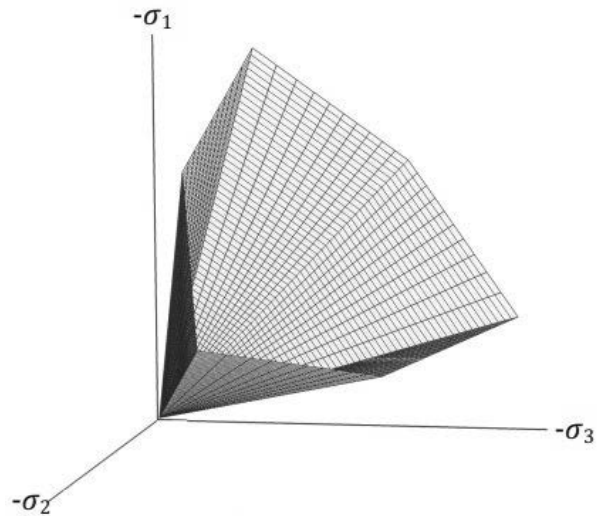
Mô hình Mohr-Coulomb là mô hình đàn hồi - dẻo lý tưởng và cũng là mô hình cơ bản, phổ biến nhất của cơ học đất. Phần đàn hồi tuyến tính của mô hình Mohr-Coulomb dựa trên định luật Hooke. Phần dẻo lý tưởng dựa trên tiêu chuẩn phá hoại Mohr-

Coulomb, được xác định theo quy tắc chảy không kết hợp (non-associated flow rule).

Trong mặt phẳng, tiêu chuẩn phá hoại Mohr-Coulomb như sau:

$$\tau'_f = \sigma'_f \tan \varphi' + c' \tag{2.1}$$

Mô hình này biểu thị trạng thái ứng suất phẳng của một điểm, vòng tròn ứng suất của điểm đó chưa vượt ra khỏi đường bao phá hoại thì vật làm việc đàn hồi. Sự chảy dẻo của vật liệu chỉ xuất hiện khi vòng tròn ứng suất tại một điểm bất kỳ trong vật liệu tiếp tuyến với đường bao phá hoại. Trong không gian ứng suất, mặt phá hoại Mohr - Coulomb có hình dạng như hình 3.



Hình 3. Mặt bao phá hoại Mohr-Coulomb trong không gian ứng suất

Phương trình mặt chảy dẻo trong không gian ứng suất có dạng sau:

$$f = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \varphi' - c' \cos \varphi' \tag{2.2}$$

Thông số đầu vào của mô hình Mohr - Coulomb bao gồm:

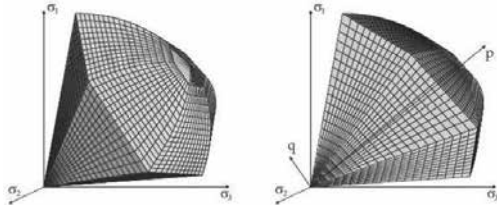
- E: Mô đun đàn hồi của vật liệu (kN/m<sup>2</sup>);
- v: hệ số Poisson φ: góc nội ma sát (độ);
- c: cường độ kháng cắt liệu (kN/m<sup>2</sup>);
- ψ: góc dẫn nở của vật liệu (độ).

**2.3.2. Mô hình Hardening Soil**

Mô hình Hardening Soil lần đầu tiên được Schanz, Vermeer và Bonnie (1998, 1999) đề xuất, sau đó được Benz phát triển (2006). Đây là mô hình được phát triển dựa trên lý thuyết dẻo cổ điển, cho phép mô tả ứng xử không đàn hồi phức tạp và các điều kiện tiếp xúc khác nhau, ứng với các điều kiện địa chất và các đặc tính khác nhau của đất.

Hardening Soil là mô hình đa mặt dẻo, cụ thể là mô hình hai mặt dẻo kết hợp: mặt dẻo trượt (shear yield surface) và mặt dẻo hình chóp mũ (cap yield surface). Sự tăng bền phụ thuộc vào cả biến dạng dẻo và biến dạng thể tích. Khác với mô hình đàn hồi - dẻo lý tưởng, mặt chảy dẻo của mô hình Hardening Soil không cố định trong không gian ứng suất chính mà nó dẫn ra do biến dạng dẻo. Có thể phân ra thành hai loại tăng bền là tăng bền trượt (shear hardening) và tăng bền nén (compression hardening). Tăng bền trượt được dùng để mô phỏng biến dạng không phục hồi do ứng suất lệch gây ra được đặc trưng bởi module biến dạng trong

thí nghiệm ba trục và được mô hình bằng mặt dẻo trượt. Trong khi đó tăng bền nén được dùng để mô phỏng biến dạng không phục hồi do ứng suất nén đẳng hướng gây ra được đặc trưng bởi module biến dạng trong thí nghiệm nén Oedometer và được mô hình bằng mặt dẻo hình chóp mũ. Mặt dẻo trượt sử dụng quy luật chảy dẻo không kết hợp và mặt dẻo chóp mũ sử dụng quy luật chảy dẻo kết hợp (hình 4).



**Hình 4.** Mặt chảy dẻo của mô hình Hardening Soil

Các thông số đầu vào của mô hình Hardening Soil bao gồm:

- Thông số phá hoại như trong Mô hình Mohr-Coulomb:

c: lực dính (có hiệu);

$\varphi$ : góc ma sát trong;

$\psi$ : góc giãn nở;

- Thông số cơ bản cho độ cứng của đất (các thông số độ cứng

Stiffness):

$E_{50}^{ref}$ : độ cứng cát tuyến trong thí nghiệm ba trục;

$E_{oed}^{ref}$ : độ cứng tiếp tuyến trong thí nghiệm oedometer;

m: số mũ biểu thị quan hệ ứng suất - độ cứng;

- Thông số cải tiến:

$E_{ur}^{ref}$ : độ cứng dỡ/tải chất tải (thường lấy  $E_{ur}^{ref} = 3 E_{50}^{ref}$ );

$p^{ref}$ : ứng suất chọn để tính độ cứng (thường lấy  $p^{ref} = 100$  đơn vị ứng suất);

$K^{nc_0}$ : giá trị trong nén cố kết thường (thường lấy  $K^{nc_0} = 1 - \sin\varphi$ );

$R_f$ : tỷ số phá hoại  $q_f/q_a$  (thường lấy  $R_f = 0,9$ );

$\sigma_{tension}$ : cường độ chịu kéo (thường lấy  $\sigma_{tension} = 0$ )

Cincrement: như trong mô hình Mohr - Coulomb (thường lấy

Cincrement = 0).

- Thông số sau có thể được sử dụng thay thế cho các thông số cơ bản độ cứng của đất:

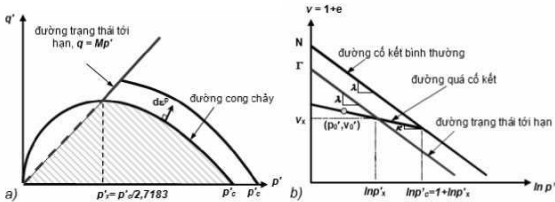
$C_c$ : chỉ số nén;

$C_s$ : chỉ số nở;

$e_{init}$ : độ rỗng ban đầu.

**2.3.3. Mô hình Cam - Clay cải tiến**

Mô hình Cam - Clay cải tiến là một mô hình cơ học đất tiên tiến, được sử dụng để mô phỏng ứng xử của đất sét dưới điều kiện tải trọng khác nhau. Mô hình này là sự phát triển và cải tiến của mô hình Cam-Clay ban đầu, được phát triển vào những năm 1960 bởi Roscoe và các cộng sự tại Đại học Cambridge (hình 5).



**Hình 5.** Quan hệ ứng suất – biến dạng mô hình Cam - Clay cải tiến

Mô hình Cam - Clay là mô hình trạng thái tới hạn, sử dụng các ứng suất hiệu quả. Đường trạng thái tới hạn trên mặt phẳng  $q'/p'$  là:

$$q' = Mp' \tag{2.3}$$

trên mặt phẳng  $v/\ln p'$  là:

$$v = \Gamma - \lambda \ln p' \tag{2.4}$$

trong đó:

v: thể tích đặc trưng,  $v = (1+e)$ ;

$p'$ : ứng suất nén trung bình;

$\Gamma$ : giá trị thể tích riêng (v) tại  $p' = 1,0 \text{ kN/m}^2$ .

$\lambda$ : Độ dốc của đường nén nguyên thủy trong hệ tọa độ  $v - \ln p'$ ;

$M$ : độ dốc của đường trạng thái tới hạn, có quan hệ với góc ma sát trong  $\varphi$  của đất. Đối với trường hợp nén ba trục, M có thể được biểu thị:

$$M = \frac{6 \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'} \tag{2.5}$$

Thông số mô hình Cam - Clay cải tiến gồm:

$\lambda$ : Độ dốc của đường cố kết thường,  $\lambda = C_c / \ln 10$ ;

$\kappa$ : Độ dốc của đường giãn nở,  $\kappa = C_s / \ln 10$ ;

$M$ : Độ dốc của đường trạng thái giới hạn trong mặt phẳng  $p/q$ ;

$\nu_{ur}$ : Hệ số Poisson trường hợp không gia tải;

$e_{init}$ : Hệ số rỗng ban đầu của đất.

Mô hình đất Cam - Clay đã có bước cải thiện đáng kể trong việc mô phỏng ứng xử của đất, tuy nhiên số lượng thông số mô hình khá nhiều. Việc xác định các thông số mô hình cần cả thí nghiệm nén một trục và nén ba trục.

**2.3.4. Mô hình Soft Soil**

Mô hình Soft Soil được sử dụng để nhằm mô phỏng các loại đất yếu, có hệ số nén lớn. Trong thực tế, các loại đất này thường là đất sét, đất bùn ở trạng thái bão hòa nước. Mô hình Soft Soil dựa trên đồng thời cả hai mô hình Mohr-Coulomb và mô hình Cam-Clay, nhưng đã được sự hiệu chỉnh để bao gồm các hiệu ứng phi tuyến của đất yếu (hình 6).

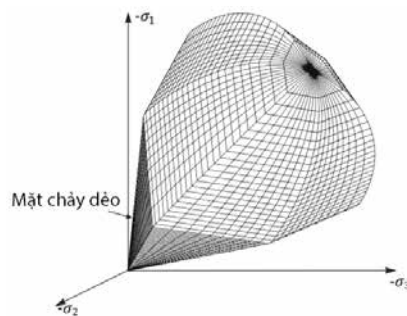
Hàm dẻo có phương trình như sau:

$$f = \bar{f} - p_p \tag{2.6}$$

trong đó:  $\bar{f}$  là hàm của trạng thái ứng suất ( $p':q$ ) và  $p_p$  ( $p_p$  áp lực tiền cố kết).

$$\bar{f} = \frac{q^2}{M^2(p' + c \cdot \cotg \varphi)} + p' \tag{2.7}$$

$$p_p = p_p^0 \exp\left(\frac{-\varepsilon_v^p}{\lambda^* - \kappa^*}\right) \tag{2.8}$$



**Hình 6.** Mặt chảy dẻo của mô hình Soft Soil

Thông số đầu vào của mô hình Soft Soil bao gồm:

- Mô hình này sử dụng năm thông số chính đó là:

$\lambda^*$ : chỉ số nén hiệu chỉnh:

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2,3(1+e)} \quad (2.9)$$

$\kappa^*$ : chỉ số nở hiệu chỉnh:

$$\kappa^* \approx \frac{2}{2,3} \frac{C_r}{(1+e)} \quad (2.10)$$

c: lực dính đơn vị (kN/m<sup>2</sup>);

$\varphi$ : góc ma sát trong (độ).

$\psi$ : góc nở

- Ngoài ra, mô hình còn sử dụng ba thông số nâng cao là:

$\nu_{ur}$ : Hệ số Poisson trường hợp không gia tải;

$K^{nc_0}$ : hệ số áp lực ngang của đất cố kết thường;

M: thông số quan hệ với  $K^{nc_0}$

$$M \approx 3 \sqrt{\frac{(1-K_0^{nc})^2}{(1+2K_0^{nc})^2} + \frac{(1-K_0^{nc})(1-2\nu_{ur})(\lambda^*/\kappa^*-1)}{(1+2K_0^{nc})(1-2\nu_{ur})\lambda^*/\kappa^* - (1-K_0^{nc})(1+\nu_{ur})}} \quad (2.11)$$

### 2.3.5. Lựa chọn mô hình đất dùng trong phân tích giải pháp xử lý nền đắp trên đất yếu

Như đã trình bày ở trên, mô hình Soft Soil dựa trên đồng thời cả hai mô hình Mohr-Coulomb và mô hình Cam-Clay có sự hiệu chỉnh, được sử dụng để mô phỏng các loại đất yếu, có hệ số nén lớn, thường là đất sét, bùn ở trạng thái bão hòa nước. Thí nghiệm quan hệ ứng suất - biến dạng trên máy nén ba trục các mẫu đất sét cho thấy các quan hệ này có dạng phi tuyến. Theo phân tích các mô hình đất ở trên thì mô hình đất Soft Soil có thể mô phỏng phù hợp ứng xử của đất yếu.

Với đất đắp và lớp đất không yếu sử dụng mô hình Mohr-Coulomb. Đây là mô hình đàn hồi - dẻo lý tưởng bao gồm 5 thông số: E,  $\nu$  cho đặc tính đàn hồi; c,  $\varphi$  cho đặc tính dẻo và  $\psi$  là góc giãn nở. Năm thông số này hoàn toàn quen thuộc với những nhà địa kỹ thuật và dễ dàng có được từ thí nghiệm trên các mẫu đất.

### 2.4. Mô hình vải địa kỹ thuật

Vải Địa kỹ thuật (ĐKT) được mô hình hóa là loại vật liệu đàn dẻo. Đây là loại vật liệu hoàn toàn không chịu nén mà chỉ chịu kéo. Các phương trình biểu thị sự làm việc của vải ĐKT như sau:

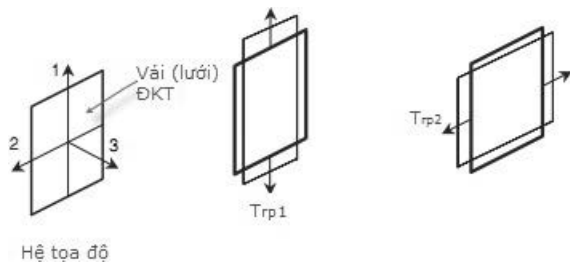
$$T_{rp1} = J_1 \varepsilon_1 \text{ và } T_{rp2} = J_2 \varepsilon_2 \quad (2.12)$$

trong đó:

$T_{rp1}$ ,  $T_{rp2}$ : lực kéo theo phương ứng suất chính 1 và 2;

$J_1$ ,  $J_2$ : mô đun độ dẫn dài của vải ĐKT theo phương 1 và 2;

$\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ : độ dẫn dài tương đối theo phương 1 và 2 trên 1 m dài.

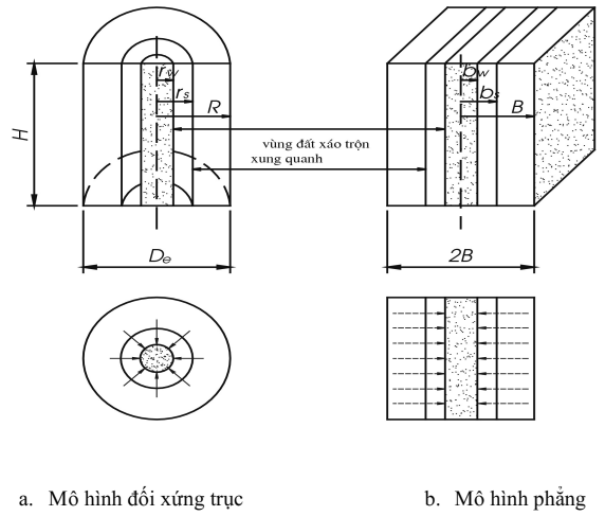


Hình 7. Lực kéo trong vải ĐKT

### 2.5. Mô hình bắc thấm

Do tác dụng của bắc thấm chủ yếu là dùng để thoát nước và bắc thấm có tính chất là một vật liệu đàn hồi nên khi mô phỏng

trong phương pháp phần tử hữu hạn, với bài toán phẳng người ta có thể mô phỏng bắc thấm bằng các phần tử vật liệu đàn hồi thoát nước và có hệ số thấm theo phương thẳng đứng bằng tốc độ thấm của vật liệu bắc thấm. Trên thực tế thì bắc thấm hoạt động theo mô hình đối xứng trục nên khi tính toán theo bài toán phẳng cần phải tính toán lại  $k_{hp}$  và  $k_{wp}$  tương ứng là hệ số thấm ngang và đứng theo mô hình như hình 8. Tuy nhiên, phần mềm Plaxis 2D đã hỗ trợ tự động tính toán điều chỉnh chỉnh hai hệ số thấm này.



Hình 8. Mô hình chuyển đổi hệ số thấm

## 3. ÁP DỤNG MÔ HÌNH SỐ CHO CÔNG TRÌNH THỰC TẾ

### 3.1. Giới thiệu công trình

Đường đầu cầu Cầu An (giai đoạn 2) thuộc tuyến nối cao tốc Hà Nội - Hải Phòng với Cầu Giẽ - Ninh Bình trên địa bàn tỉnh Hưng Yên. Tuyến đường đã hoàn thành giai đoạn 1 với quy mô 2 làn xe có Bnền = 12m và đã mãn tải sớm. Giai đoạn 2 xây dựng hoàn chỉnh sẽ đảm bảo theo quy mô đã quy hoạch là đường cấp II đồng bằng, tốc độ thiết kế chậm chược V=80Km/h. Mặt cắt ngang bao gồm 4 làn xe cơ giới, 2 làn xe thô sơ (hình 9).



Hình 9. Khu vực cầu Cầu An

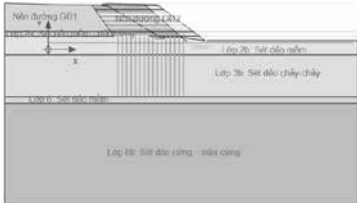
Địa tầng từ trên xuống gồm các lớp như sau [8, 9]:

- Lớp 1: Đất lấp, cát san lấp, thành phần hỗn hợp;
- Lớp 2a: Đất sét ít dẻo, xám nâu, xám vàng, xám trắng, dẻo mềm - dẻo cứng;
- Lớp 2b: Đất sét ít dẻo, đôi chỗ lẫn hữu cơ, xám nâu, xám đen, dẻo mềm;
- Lớp 3a: Đất sét ít dẻo, xám nâu, xám đen, lẫn hữu cơ, dẻo chảy - chảy;
- Lớp 3b: Đất sét ít dẻo, xám nâu, nâu hồng, xám vàng, dẻo chảy - dẻo mềm;
- Lớp 6: Đất sét ít dẻo, đôi chỗ lẫn hữu cơ, xám nâu, xám đen, xám ghi, dẻo mềm;

- Lớp 8a: Đất sét ít dẻo, đôi chỗ lẫn dăm sạn, xám nâu, xám vàng, dẻo mềm- dẻo cứng;
- Lớp 8b: Đất sét ít dẻo, xám nâu, xám vàng, nâu đỏ, xám trắng, dẻo cứng - nửa cứng;
- Lớp 9a: Đất bụi dẻo, xám ghi, xám vàng, xám trắng, nâu đỏ.

**3.2. Mô hình hóa trên phần mềm Plaxis**

Đường đầu cầu Cửu An được mô hình hóa trong bài toán phẳng (plane strain) với phần tử tam giác 15 nút. Bấc thấm được mô hình bằng phần tử drain. Mô hình hóa nền đường đầu cầu Cửu An được thể hiện trên hình 10.



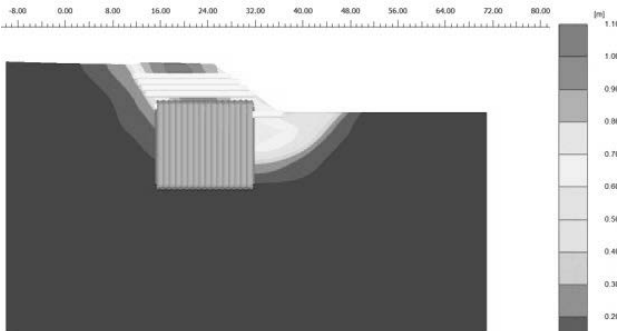
**Hình 10.** Mô hình hóa nền đường trong bài toán phẳng

**Bảng 1.** Thời gian thi công đắp nền đường và chờ cố kết

TT	Đoạn	Thời gian chuẩn bị	Thời gian đắp cát thoát nước	GIAI ĐOẠN 1			GIAI ĐOẠN 2			GIAI ĐOẠN 3			GIAI ĐOẠN 4			Tổng thời gian (ngày)
				Chiều cao đắp	Thời gian đắp	Chờ cố kết	Chiều cao đắp	Thời gian đắp	Chờ cố kết	Chiều cao đắp	Thời gian đắp	Chờ cố kết	Chiều cao đắp	Thời gian đắp	Chờ cố kết	
1	Đ33	15	8	4.00	25	30	5.22	12	180							270
2	Đ34	15	9	4.50	27	45	5.88	14	180							290
3	Đ35	15	9	4.50	28	45	5.50	10	45	6.59	11	180				343
4	Đ36	15	6	4.00	29	30	5.50	15	30	6.57	11	180				316
5	Đ37	15	8	4.00	24	30	5.00	10	30	6.00	10	30	6.79	8	180	345
6	Đ39	15	8	5.00	34	45	6.50	15	45	7.50	10	45	8.48	10	180	407
7	Đ40	15	8	5.00	34	30	6.00	10	30	7.00	10	30	7.91	9	180	356
8	Đ41	15	7	4.50	31	30	5.50	10	30	6.50	10	30	7.43	9	180	352
9	Đ42	15	5	4.50	36	45	5.50	10	45	6.49	10	180				346
10	Đ43	15	5	4.00	31	30	5.00	10	30	5.86	9	180				310
11	Đ46	15	3	3.05	24	180	0.00									222

**3.3. Kết quả phân tích**

Kết quả tính toán được thể hiện trên hình 11 đến hình 14 và



**Hình 11.** Chuyển vị đứng (độ lún) của nền đường

Bài toán được tính toán theo các bước dựa trên thực tế thi công của công trình:

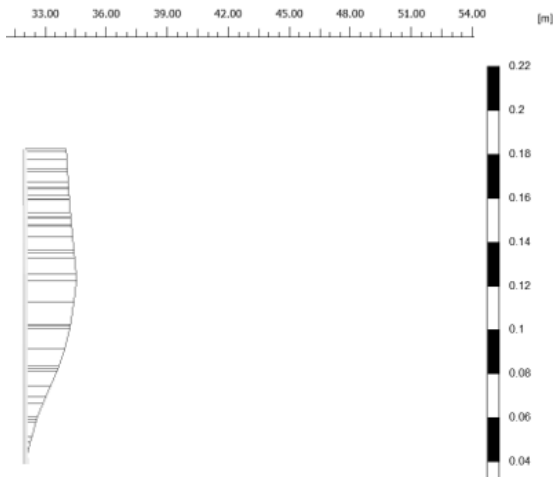
- Bước 1: Trải vải địa kỹ thuật và thi công tầng đệm cát.
- Bước 2: Chờ lún cố kết.
- Bước 3: Thi công bấc thấm.
- Bước 4: Chờ lún cố kết.
- Bước 5: Thi công lớp cát đắp lần 1.
- Bước 6: Chờ lún cố kết.
- Bước 7: Thi công lớp cát đắp lần 2.
- Bước 8: Chờ lún cố kết.
- Bước 9: Thi công lớp cát đắp lần 3.
- Bước 10: Chờ lún cố kết.
- Bước 11: Thi công lớp cát đắp lần 4.
- Bước 12: Chờ lún cố kết.

Thời gian thi công đắp nền đường và chờ cố kết cho từng đoạn theo Hồ sơ thiết kế bản vẽ thi công đoạn đường đầu cầu Cửu An được tổng hợp ở bảng 1

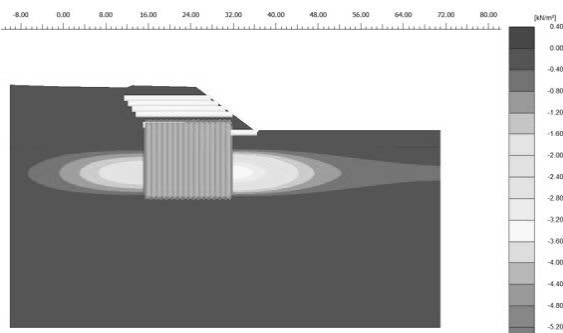
bảng 2.



**Hình 12.** Chuyển vị ngang của nền đường



Hình 13. Chuyển vị ngang theo chiều sâu tại vị trí chân taluy



Hình 14. Áp lực nước lỗ rỗng dư

Bảng 2. Tổng hợp kết quả tính toán tại các đoạn

TT	Đoạn	Chiều cao đắp (m)	Độ lún (cm)	ALNLR dư ban đầu (kG/cm <sup>2</sup> )	ALNLR dư khi kết thúc chờ (kG/cm <sup>2</sup> )	Độ cố kết theo ALNLR (%)
1	Đ33	3.69	86.20	0.254	0.026	89.76
2	Đ34	4.61	107.05	0.286	0.028	90.20
3	Đ35	5.69	107.45	0.245	0.029	88.16
4	Đ36	5.6	117.56	0.217	0.022	89.86
5	Đ37	6.39	94.02	0.360	0.037	89.71
6	Đ39	8.08	131.96	0.363	0.045	87.60
7	Đ40	7.64	89.84	0.296	0.034	88.50
8	Đ41	7.01	91.08	0.303	0.035	88.45
9	Đ42	6.07	91.40	0.363	0.038	89.55
10	Đ43	4.89	81.73	0.141	0.018	87.23
11	Đ46	2.19	46.99	0.125	0.019	84.79

Nhận xét:

Từ hình 11 có thể thấy độ lún lớn tập trung trong phạm vi bề rộng nền đắp giai đoạn 2 và giảm dần trong phạm vi từ vai đường đến chân taluy do tải trọng đắp giảm. Phạm vi nền đắp giai đoạn 1 về cơ bản đã được cố kết dưới tải trọng đắp nên độ lún nhỏ.

Hình 12 và hình 13 cho thấy khu vực chân taluy có chuyển vị lớn hơn so với xung quanh do hiện tượng đẩy ngang (và một phần đẩy trời) dưới tải trọng của khối đắp nền đường. Chuyển vị ngang lớn nhất không phải nằm trên mặt mà ở độ sâu từ vài ba mét trở lên tùy thuộc chiều cao đắp và tính chất nền đất yếu do đó việc bố trí hệ thống quan trắc chuyển vị ngang theo chiều sâu là rất cần thiết. Ngoài ra, trên mặt nền đắp tại chỗ tiếp giáp giữa nền đường mới và nền đường cũ (giai đoạn 1) cũng có chuyển vị ngang lớn do hiện tượng lún không đều, do đó cũng đặt ra vấn đề cần lưu ý khi xử lý chỗ tiếp giáp tránh bị nứt tách mặt đường sau khi đưa vào khai thác.

Từ hình 14 và bảng 2 có thể thấy hiệu quả của việc sử dụng bấc thấm để tăng nhanh độ cố kết của nền đường. Áp lực nước lỗ rỗng dư sau khi kết thúc thời gian chờ cố kết theo dự tính đã tiến gần tới "0" và độ cố kết tính theo mức độ tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng đạt xấp xỉ 90% tại các phân đoạn của đường đầu cầu Cửu An.

### 3.4. So sánh kết quả tính toán theo mô hình số với giải tích và thí nghiệm hiện trường

#### 3.4.1. Về độ lún của nền đường

Tiến hành so sánh độ lún nền đường từ kết quả tính toán theo mô hình số trên phần mềm Plaxis với tính toán giải tích theo tiêu chuẩn hiện hành (giá trị lấy theo Hồ sơ thiết kế bản vẽ thi công) và thí nghiệm hiện trường. Kết quả được tổng hợp ở bảng 3.

Bảng 3. So sánh độ lún tính toán theo các phương pháp

TT	Đoạn	Chiều cao đắp (m)	Độ lún theo mô hình số (cm)	Độ lún theo giải tích (cm)	Độ lún theo thí nghiệm hiện trường (cm)	Sai khác so với giải tích (%)	Sai khác so với thí nghiệm hiện trường (%)
1	Đ33	3.69	86.20	82.59	83.40	4.36	3.35
2	Đ34	4.61	107.05	105.40	102.30	1.56	4.64
3	Đ35	5.69	107.45	104.99	98.80	2.34	8.76
4	Đ36	5.6	117.56	107.42	121.30	9.44	-3.08
5	Đ37	6.39	94.02	116.24	85.40	-19.12	10.09
6	Đ39	8.08	131.96	159.65	127.50	-17.35	3.50
7	Đ40	7.64	89.84	92.48	80.80	-2.86	11.19
8	Đ41	7.01	91.08	95.56	80.20	-4.69	13.56
9	Đ42	6.07	91.40	88.19	88.20	3.63	3.63
10	Đ43	4.89	81.73	73.27	83.80	11.55	-2.46
11	Đ46	2.19	46.99	36.48	75.10	28.80	-37.43

Từ bảng 3 ở trên có thể thấy sai khác giữa tính toán độ lún nền đường theo mô hình số nói chung sai khác không nhiều so với thí nghiệm hiện trường (dưới 15%) và theo giải tích (dưới 20%), ngoại trừ mặt cắt đặc biệt ở đoạn Đ46. Chiều đắp tại Đ46 nhỏ (2.19m) nhưng độ lún quan trắc được xấp xỉ với các đoạn liền kề có chiều cao đắp lớn hơn nhiều (Đ43-4.89m; Đ42-6.07m, Đ41-7.01m và Đ40 - 7.64m). Nguyên nhân của hiện tượng này có thể do việc cấm bấc

thấm gây xáo động trong lớp đất yếu, phá vỡ trạng thái cân bằng ban đầu của nền đất yếu. Điều này dẫn đến độ lún tính toán theo mô hình số sai khác nhiều so với thí nghiệm hiện trường. Nếu coi thí nghiệm hiện trường cho giá trị thực tế thì độ lún tính toán được theo mô hình số trên phần mềm Plaxis sát với thực tế hơn so với tính toán theo đường lối giải tích.

### 3.4.2. Về độ cố kết tính theo mức độ tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng

Kết quả so sánh độ cố kết tính theo mô hình số với tính toán giải tích và thí nghiệm hiện trường được thể hiện ở bảng 4.

**Bảng 4.** So sánh độ cố kết theo các phương pháp

TT	Đoạn	Chiều cao đắp (m)	Độ cố kết theo mô hình số	Độ cố kết theo giải tích	Độ cố kết theo Thí nghiệm hiện trường	Sai khác so với giải tích (%)	Sai khác so với thí nghiệm hiện trường (%)
1	Đ33	3.69	89.76	87.95	90.38	2.06	-0.68
2	Đ34	4.61	90.20	91.01	86.99	-0.89	3.69
3	Đ35	5.69	88.16	92.56	88.31	-4.75	-0.16
4	Đ36	5.6	89.86	90.57	86.76	-0.78	3.58
5	Đ37	6.39	89.71	91.95	85.08	-2.43	5.45
6	Đ39	8.08	87.60	93.34	85.86	-6.14	2.03
7	Đ40	7.64	88.50	89.84	84.76	-1.49	4.41
8	Đ41	7.01	88.45	88.72	85.79	-0.30	3.11
9	Đ42	6.07	89.55	88.76	87.93	0.88	1.84
10	Đ43	4.89	87.23	84.52	87.55	3.21	-0.36
11	Đ46	2.19	84.79	76.58	90.61	10.73	-6.42

Từ bảng 4 cho thấy kết quả tính toán độ cố kết theo phương pháp số khá sát với đường lối giải tích (dưới 7%) và thí nghiệm hiện trường (dưới 6%), ngoại trừ đoạn Đ46 như giải thích ở mục 3.4.1.

## 4. KẾT LUẬN

Từ kết quả tính toán theo mô hình số trên phần mềm địa kỹ thuật Plaxis cho 11 phân đoạn của đường đầu cầu Cửu An, tỉnh Hưng Yên có chiều dài khoảng 500m với hệ thống quan trắc lún bề mặt, lún sâu, chuyển vị ngang trên bề mặt, chuyển vị ngang theo chiều sâu và áp lực nước lỗ rỗng, sau khi so sánh, phân tích số liệu có thể đưa ra một số kết luận như sau:

- Đường đầu cầu Cửu An là công trình dạng tuyến nên được mô hình hóa dạng bài toán phẳng (plane strain) với phần tử tam giác 15 nút (15-node- element). Bắc thấm được mô hình bằng phần tử drain. Việc mô hình hóa này giúp giảm thời gian tính toán so với mô hình 3D nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác.

- Việc lựa chọn mô hình vật liệu đất dùng trong phân tích giải pháp xử lý nền đắp trên đất yếu là phù hợp: đất sét yếu sử dụng mô hình Soft Soil; đất đắp và lớp đất không yếu sử dụng mô hình

Mohr-Coulomb.

- Kết quả tính toán trên mô hình số phù hợp và sát với kết quả thí nghiệm hiện trường hơn so với tính toán theo đường lối giải tích. Độ lún sai khác dưới 15% và độ cố kết tính theo mức độ tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng sai khác dưới 6% so với kết quả thí nghiệm hiện trường. Ngoài ra, mô hình số còn đánh giá được mức độ ổn định nền đường và mô phỏng được trạng thái ứng suất, biến dạng và tương tác với công trình... một cách trực quan.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. TCCS 41:2022/TCĐBVN - Tiêu chuẩn khảo sát, thiết kế nền ô tô trên nền đất yếu, Tổng cục Đường bộ Việt Nam, 2022.
- [2]. TCVN 9355:2013 - Gia cố nền đất yếu bằng bắc thấm thoát nước – Thiết kế, thi công và nghiệm thu, Bộ Khoa học và Công nghệ, 2013.
- [3]. JTG/T D31-02:2013 – Technical Guidelines for Design and Construction of Highway Embankment on soft ground, The Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2013.
- [4]. JTG D30:2015 - Specifications for Design of Highway Subgrades, The Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2015.
- [5]. GB/T 51275:2017 - Standard for monitoring of subgrade on soft ground, Chinese National Standard, 2017.
- [6]. Plaxis 2D – Reference Manual, Bentley, 2021.
- [7]. O. C. Zienkiewicz. R. L. Taylor. J. Z. Zhu - The finite element method: Its basis and fundamentals, Butterworth-Heinemann Publishers, Oxford, 2005.
- [8]. Trần Minh Hải, Trịnh Minh Thụy, Đỗ Thăng, Quan trắc trong quá trình thi công nền đắp trên nền đất yếu, Tạp chí Xây dựng, số 5/2024.
- [9]. Báo cáo kết quả quan trắc xử lý nền đất yếu đường đầu cầu Cửu An, huyện Kim Động, tỉnh Hưng Yên.