

RESEARCH ON THE CALCULATION OF SOFT GROUND REINFORCED BY TOP-BASE TECHNOLOGY BASED ON NONLINEAR ELASTICITY THEORY AND VERIFICATION BY NUMERICAL MODELING

NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN NỀN ĐẤT YẾU GIA CỐ TOP-BASE DỰA TRÊN LÝ THUYẾT ĐÀN HỒI PHI TUYẾN VÀ KIỂM CHỨNG BẰNG MÔ HÌNH SỐ

Trần Quốc Phong
Trường đại học Quảng Bình

ABSTRACT: Ground improvement using Top-base technology has been widely applied in soft soil treatment due to its economic efficiency and rapid construction process. However, conventional calculations based on the Winkler elastic foundation model do not fully capture the interaction mechanism among the subsoil, Top-base elements, and infill materials. This study proposes a new computational model based on nonlinear foundation theory, in which the Top-base system is considered as a heterogeneous medium consisting of soft soil, reinforcing elements, and infill materials. A new load distribution coefficient is introduced to describe the stress transfer mechanism among these components. The proposed model is validated through three-dimensional finite element analysis using PLAXIS 3D software. The results indicate that the predicted settlement error is less than 10% compared with conventional calculation methods. In addition, a multilayer Top-base solution is proposed for design applications and for the standardization of Top-base technology.

Keywords: Foundation improvement, Top-base, nonlinear behavior, stress-strain relationship, Winkler elastic foundation model.

TÓM TẮT: Gia cố nền móng bằng công nghệ Top-base đang được áp dụng phổ biến trong xử lý nền đất yếu nhờ hiệu quả kinh tế và thời gian thi công. Tuy nhiên, các phương pháp tính toán mô hình đàn hồi Winkler chưa phản ánh đầy đủ cơ chế tương tác giữa đất nền, phần gia cố và vật liệu chèn. Nghiên cứu này đề xuất một mô hình tính toán mới dựa trên lý thuyết nền phi tuyến, trong đó hệ Top-base được xem như môi trường không đồng nhất gồm đất yếu, phần tử gia cường và vật liệu chèn. Một hệ số phân phối tải trọng mới được đưa ra nhằm mô tả sự phân bố ứng suất giữa các thành phần. Mô hình được kiểm chứng thông qua phân tích phần tử hữu hạn ba chiều bằng phần mềm PLAXIS 3D. Kết quả dự báo độ sai số lún nhỏ hơn 10% so với phương pháp tính toán truyền thống. Đề xuất giải pháp Top-base nhiều lớp trong thiết kế và tiêu chuẩn hóa công nghệ Top-base.

Từ khóa: Gia cố nền móng, Top-base, phi tuyến, ứng suất - biến dạng, mô hình đàn hồi Winkler.

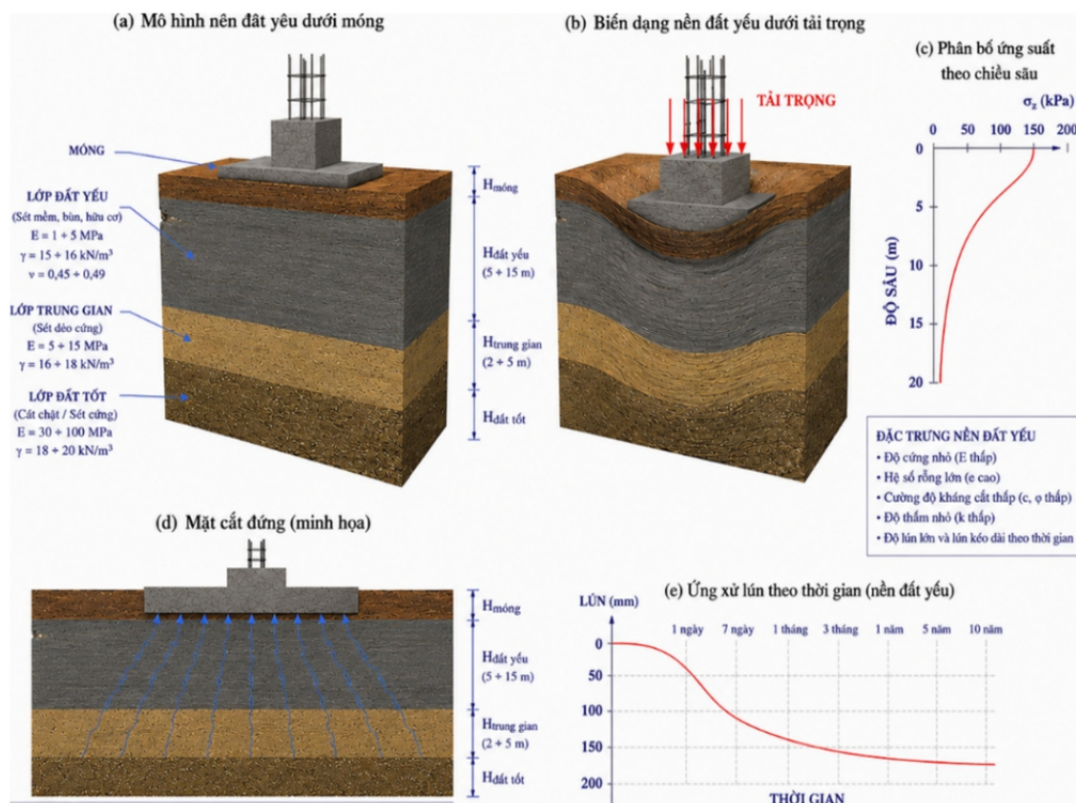
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, sự xuất hiện nhiều công trình có số tầng lớn, tổng diện tích mặt bằng lớn được xây dựng trên địa bàn tỉnh Quảng Trị đòi hỏi nền móng cũng có những giải

pháp nhằm đáp ứng khả năng chịu lực khi tải trọng công trình lên cao. Nhiều giải pháp nền móng được đưa ra để giải quyết tính chất phức tạp của địa chất và cao độ công trình ảnh hưởng đến chiều sâu chôn móng

tác động không nhỏ đến tính chất chịu lực và hiệu quả kinh tế. Cụ thể các công trình được xây dựng trong khu vực trũng, đất yếu, đòi hỏi phải bóc bỏ lớp đất yếu, lớp

phong hóa dày, thay vào đó lớp đất san nền làm ảnh hưởng tính cố kết của nền đất, ảnh hưởng tới cao độ đặt móng.

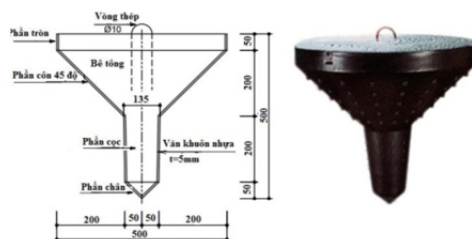
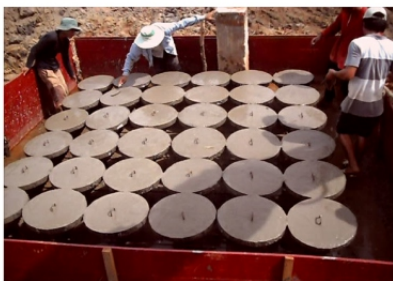


Hình 1. Hình mẫu đặc trưng nền đất yếu và ứng xử nền đất dưới tải trọng

Địa chất khảo sát được xem là yếu với các điều kiện địa chất: đất sét mềm: gồm các loại đất sét hoặc á sét, ở trạng thái bão hòa nước dẻo mềm, dẻo chảy, có cường độ thấp. Đất bùn: Các loại đất tạo thành trong môi trường nước, thành phần hạt rất mịn, ở trạng thái luôn no nước, hệ số rỗng rất lớn, rất yếu về mặt chịu lực; Đất than bùn: là loại đất yếu có nguồn gốc hữu cơ, được hình thành do kết quả phân hủy các chất hữu cơ có ở các đầm lầy (hàm lượng hữu cơ từ 20 - 80%) [1, 2, 5].

Nền đất yếu có nhiều tác động và nguy

cơ gây mất an toàn cho các công trình xây dựng. Việc nghiên cứu nền đất yếu và xác định biện pháp xử lý phù hợp có một ý nghĩa quan trọng [3, 7]. Trong thực tế, cần căn cứ vào điều kiện địa chất công trình cụ thể để sử dụng các biện pháp xử lý về kết cấu công trình, các biện pháp xử lý về móng hay các biện pháp xử lý nền, hoặc sử dụng kết hợp tổ hợp nhiều biện pháp, giải pháp phù hợp có liên quan. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu dựa trên thực nghiệm, thiếu mô hình lý thuyết tổng quát có thể áp dụng trong thiết kế [6].



Hình 2. Giải pháp mặt bằng khối Top-base; cấu tạo phễu Top-base [4]

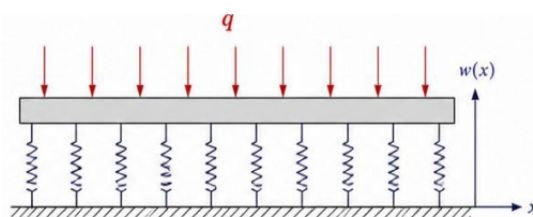
Giải pháp gia cố đất nền Top-base được đề cập trong nghiên cứu ứng dụng trực tiếp trong xử lý nền đất, là một giải pháp sử dụng các phần tử dạng phễu vật liệu composite được lắp đầy bằng bê tông kết hợp với vật liệu rời nhằm tăng khả năng chịu tải và giảm độ lún của nền đất do phân bố lại ứng suất tập trung từ ngoại lực tác dụng hay làm suy giảm ứng suất tại đáy móng [4, 8]. Việc ứng dụng lý thuyết đàn hồi tuyến tính (mô hình đàn hồi) sẽ không phản ánh chính xác sự làm việc thực tế của nền đất yếu, nền đất được gia cố thêm phễu bê tông, khi đó phải tính đến sự làm việc phi tuyến của tổng thể nền đất và sự tương tác giữa các pha vật liệu cấu thành nền đất gia cố. Xây dựng mô hình lý thuyết cho nền Top-base nhằm làm rõ cơ chế phân bố tải trọng, đề xuất công thức tính lún cải tiến và kiểm chứng bằng mô hình số nhằm so sánh hiệu quả làm việc của nền đất không gia cố, được gia cố một lớp Top-base và gia cố hai lớp Top-base theo hướng nghiên cứu đề xuất.

2. NỀN ĐẤT GIA CỐ TOP-BASE - MÔ HÌNH TÍNH TOÁN NỀN ĐẤT YẾU

2.1. Mô hình nền đàn hồi Winkler và những hạn chế

Mô hình nền là mô hình cơ học mô tả tính biến dạng của nền đất dưới tác

dụng của ngoại lực. Mô hình nền Winkler được biểu diễn bằng một hệ thống lò xo đặt thẳng đứng, dài bằng nhau làm việc độc lập với nhau (Hình 3) [2]. Biến dạng của lò xo (đặc trưng cho độ lún của nền) tỷ lệ bậc nhất với áp lực tác dụng lên lò xo. Theo mô hình này, chỉ những lò xo nằm trong phạm vi phân bố tải trọng mới có biến dạng. Do đó, mô hình này còn có tên là mô hình nền biến dạng cục bộ.



Hình 3. Mô hình nền đàn hồi Winkler [2]

Nền đất trong mô hình Winkler được mô phỏng bởi các lò xo độc lập, phân bố liên tục và phản ứng nền tại một điểm chỉ phụ thuộc vào chuyển vị tại điểm đó mà bỏ qua tương tác giữa các điểm trong đất nền. Thực tế chuyển vị của điểm này tạo ra vùng ảnh hưởng đến chuyển vị của các điểm khác lân cận.

Phương trình cơ bản của mô hình Winkler:

$$p(x) = k \cdot w(x) \quad (1)$$

Trong đó:

$p(x)$: áp lực phản ứng của đất nền tại vị trí x ;

k : hệ số nền (modun nền Winkler);

$w(x)$: chuyển vị đứng của kết cấu móng tại vị trí xác định x .

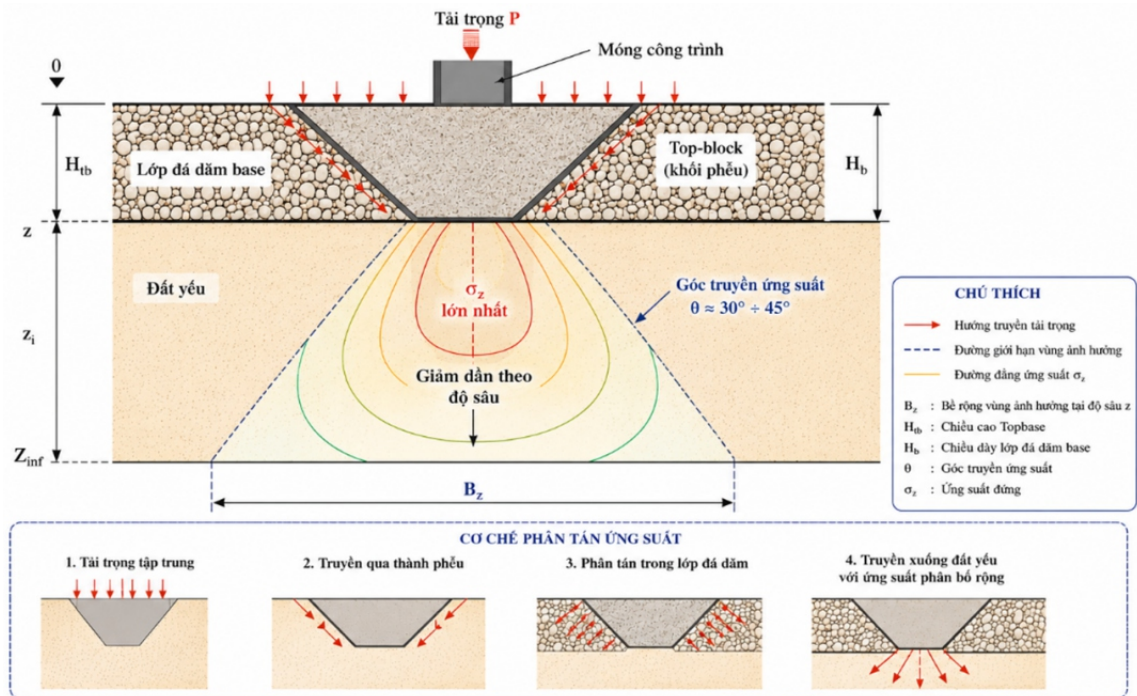
Phương trình cơ bản của mô hình Winkler ta thấy áp lực và độ lún là mối quan hệ bậc nhất, tuy nhiên bản chất đất nền không phải là vật liệu đàn hồi tuyến tính. Do đó, để áp dụng được hệ số nền Winkler cổ điển trong thiết kế nền móng thì đảm bảo đất nền dưới đáy móng còn trong miền đàn hồi.

Nền đất yếu và nền đất có gia cố bằng các vật liệu ngoài sẽ tạo nên những nền đất không đồng nhất và làm việc phi tuyến. Thực tế chuyển vị của điểm này tạo ra vùng

ảnh hưởng đến chuyển vị của các điểm khác lân cận nên việc áp dụng nền đàn hồi vào tính toán sẽ không còn phù hợp. Cần xét đến tương tác giữa các lớp vật liệu cấu tạo nên nền đất hay bản thân nền đất yếu đã làm việc không tuyến tính.

2.2. Mô hình số mô phỏng nền đất gia cố Top-base

Hệ nền gia cố Top-base được lý tưởng hóa thành hệ đàn hồi gồm ba yếu tố: Đất yếu (yếu tố nền cơ bản); phễu Top-base (yếu tố gia cường); vật liệu rời (yếu tố trung gian). Việc phân tích đơn lẻ các thành phần này cho phép xem nền như một môi trường không đồng nhất với các đặc trưng cơ học tương đương [4, 10].



Hình 4. Sơ đồ phân bố ứng suất và vùng ảnh hưởng dưới khối phễu Top-base

Giải pháp gia cố Top-base một lớp cho đáy móng

Để mô tả sự phân bố tải trọng giữa các thành phần, hệ số phân phối tải trọng η được đề xuất. Hệ số này phản ánh mức

độ tham gia chịu tải của từng lớp cấu tạo trong hệ nền.

$$\eta = \frac{E_t A_t}{E_t A_t + E_s A_s} \quad (2)$$

Trong đó: E_t : mô đun đàn hồi của phần Top-Base; E_s : mô đun đàn hồi của đất yếu; A_t, A_s : diện tích tương ứng.

Độ lún tổng của nền gia cố được xác định theo:

$$S = \eta S_t + (1 - \eta) S_s \quad (3)$$

Trong đó: S_t : độ lún của vùng gia cường; S_s : độ lún của đất nền.

Khác với các phương pháp tính toán thông thường, phương trình đề xuất không giả thiết biến dạng đồng đều và kể đến sự tương tác các lớp vật liệu cấu thành nền đất nên có thể dùng để tính toán.

Giải pháp gia cố Top-base hai lớp cho đáy móng

Theo lý thuyết phân tích cấu tạo của khối block Top-base sẽ gia cố tập trung tại tâm đáy móng theo tiết diện giảm dần [9]. Từ cơ sở phân bố ứng suất và chuyển vị của Top-base một lớp, ta có phương trình cho Top-base 2 lớp. Điểm cần chú ý trong mô hình này là sự giảm tiết diện ở các tầng dưới để tối ưu ứng suất, tiết diện này được tính toán theo đúng góc nghiêng phần tử cấu tạo hình học ban đầu.

Sơ đồ cơ học giả thiết: hai tầng phần tử nằm ở độ sâu z_1, z_2 ; mỗi tầng có: Mô đun đàn hồi E_{t1}, E_{t2} ; diện tích thay thế A_{t1}, A_{t2} .

Nền đất chia thành 3 lớp: lớp trên, lớp giữa (giữa 2 tầng phần tử), lớp dưới. Hệ số phân phối tải theo lớp: Lớp 1:

$$\eta_1 = \frac{E_1 A_1}{E_1 A_1 + E_s A_s} \quad (4)$$

Lớp 2 (chịu tải sau khi đã phân phối qua lớp 1):

$$\eta_2 = \frac{E_2 A_2}{E_2 A_2 + E_s A_s} \quad (5)$$

Cơ chế truyền tải qua lớp thứ nhất:

$$P_1 = \eta_1 P \quad (6)$$

Một phần tải còn lại xuống lớp 2:

$$P_2 = (1 - \eta_1) \eta_2 P \quad (7)$$

Xuống đất tự nhiên:

$$P_s = (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) P \quad (8)$$

Việc gia cố Top-base trong nền đất yếu đã tạo ra sự phân tầng tải trọng và giảm chiều sâu ứng suất kéo theo sự giảm độ lún xuống đất tự nhiên làm tăng khả năng ổn định của công trình. Tùy thuộc vào độ lớn tải trọng công trình mà đưa ra phạm vi bố trí Top-base và nguyên tắc giảm tiết diện theo các lớp Top-base. Kết quả phân tích cơ học cho kết quả tổng lún của nền đất:

$$\text{Tổng lún: } S = S_1 + S_2 + S_s \quad (9).$$

Trong đó: độ lún lớp 1: $S_1 = \frac{P_1}{k_1}$;
độ lún lớp 2: $S_2 = \frac{P_2}{k_2}$; độ lún đất dưới gia cố Top-base : $S_s = \frac{P_s}{k_s}$; Với: $k_i = \frac{E_i}{H_i}$ (độ cứng lớp tương đương).

2.3. Mô hình số và kiểm chứng bài toán gia cố nền móng Top-base

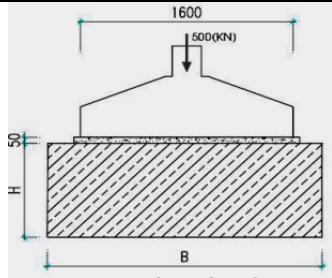
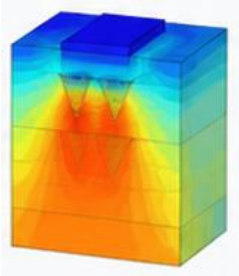
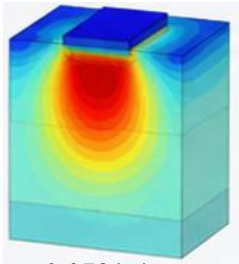
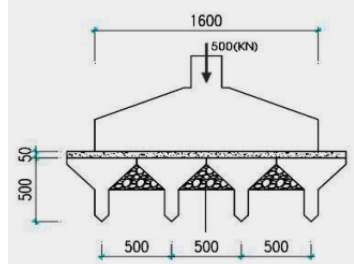
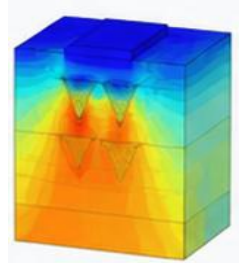
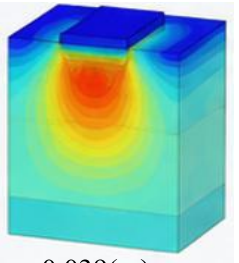
Để kiểm chứng hiệu quả của giải pháp gia cố Top-base cho nền đất yếu với tùy biến các lớp khác nhau so với nền đất yếu tự nhiên, các bài toán được đưa ra đồng nhất thông số đầu vào cho các tùy biến gia cố. Một phân tích số được thực hiện bằng phần mềm PLAXIS 3D với các trường hợp: Nền không gia cố, nền gia cố nhóm phần tử một lớp, nền gia cố nhóm

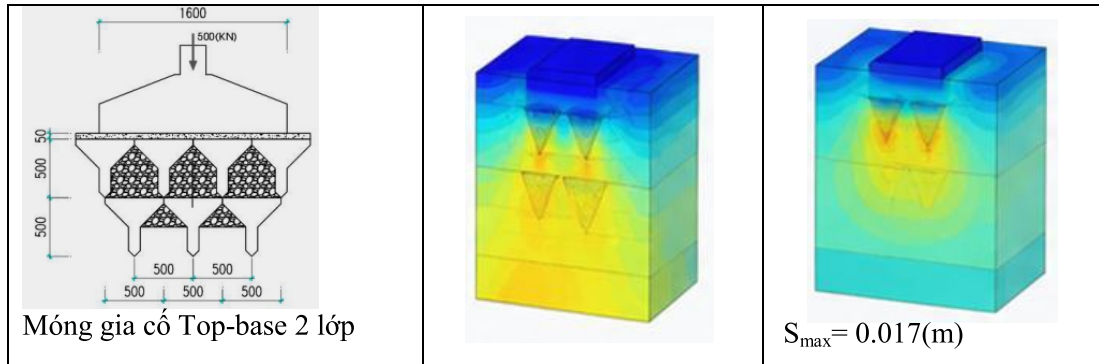
phần hai lớp [6, 8, 9]. Việc tính toán kích thước và số lượng phần cho bài toán được tính toán chi tiết trong các nghiên cứu của tác giả và đưa ra thông số cụ thể cho phân tích dựa vào thông số đầu vào đã thiết lập. Phần mềm Plaxis 3D tính toán cho móng đơn kích thước 1,6x1,6(m) dưới tải

trọng 50 tấn (500kN), mô hình Top-base một lớp bố trí 12 phần, mô hình Top-base 2 lớp số lượng 18 phần với khoảng cách tâm – tâm là 0,5m (bằng đường kính miệng phần). Đặc trưng hình học và tính chất cơ lý của nền đất yếu và phần Top-base [1, 4].

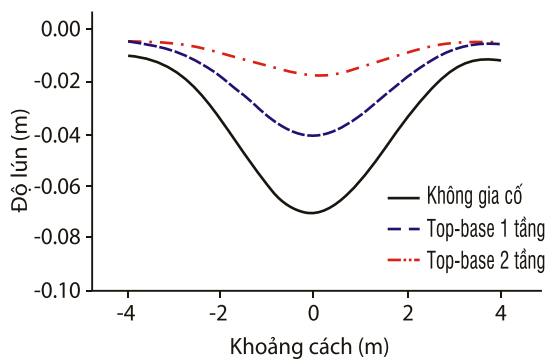
Bảng 1. Thông số kỹ thuật của nền đất yếu và phần Top-base trong mô phỏng số

THÔNG SỐ ĐẤT YẾU	
Mô hình vật liệu	Soft Soil (Undrained)
Mô đun biến dạng E	8 MPa
Lực dính không thoát nước cu	20 kPa
Góc ma sát trong φ	8°
Hệ số Poisson ν	0.45
Trọng lượng riêng γ	16 kN/m ³
TOP-BASE	
Mô đun đàn hồi E _{tb}	200 MPa
Hệ số Poisson ν_{tb}	0.20
Trọng lượng riêng γ_{tb}	24 kN/m ³
Đường kính miệng trên	0.50 m
Đường kính miệng dưới	0.30 m
Chiều cao phần	0.50 m

Sơ đồ hình học	Ứng suất đứng (δv)	Độ lún tổng (U_z)
 Móng trên nền đất yếu		 $S_{max} = 0.078(m)$
 Móng gia cố Top-base 1 lớp		 $S_{max} = 0.039(m)$



Hình 5. Mô phỏng số Plaxis 3D các bài toán gia cố móng bằng phễu Top-base



Hình 6. Biểu đồ thể hiện độ lún theo tâm móng

Nhận xét biểu đồ: nền đất yếu được mô phỏng trong mô hình số phản ánh đúng sự làm việc thực tế, phi tuyến và ứng suất cực đại tại ngoại lực tập trung, đường ứng suất thể hiện sự tương tác giữa các điểm chuyển vị trong nền đất. Chuyển vị lún của nền đất giảm theo các tùy biến gia cố Top-base 1 lớp và 2 lớp với tỷ lệ giảm lún 40% đến 60% so móng đặt trên nền đất yếu thông thường.

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả nghiên cứu, phân tích ứng suất tập trung chủ yếu tại

các phễu gia cường và xuất hiện hiệu ứng vòm ứng suất giữa các phễu, ứng suất trong đất yếu giảm đáng kể, độ lún giảm từ 40% đến 60% so với nền tự nhiên.

Một mô phỏng số được thiết lập với các tùy biến Top-base gia cố và trên nền đất yếu để phân tích hiệu quả phân tán ứng suất, giảm ứng suất tại một điểm tập trung tải trọng từ đó làm giảm độ lún tổng trên toàn bộ nền mà kết cấu móng đặt lên. Mô hình số có kể đến sự tương tác giữa các điểm chuyển vị làm thay đổi ứng suất phù hợp với sự làm việc thực tế của nền đất, có sai số nhỏ hơn 10% so với kết quả theo tính toán đàn hồi cục bộ.

Nghiên cứu bố trí nhóm Top-base theo dòng ứng suất cực bố lớn mà công trình tác động xuống nền đất tương ứng với góc nghiêng của phễu Top-base, với nền địa chất lớp đất yếu dày, đề xuất phát triển mô hình gia cố nền đất theo hai tầng Top-base với bố trí kích thước và số lượng cụ thể theo nguyên tắc truyền lực dựa trên hệ số lún nền (η) đã được thiết lập trong nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt:

[1] GS.TS. Cao Văn Chí, PGS.TS. Trịnh Văn Cương (2003), *Cơ học đất*, NXB Xây

dựng, Hà Nội.

[2] Phan Hồng Quân (2012), *Thiết kế nền móng công trình dân dụng và công*

- nghiệp, Nhà xuất bản Xây dựng.
- [3] Đoàn Thế Tường (2015), *Các phương pháp gia cố nền đất yếu*, Nhà xuất bản Xây dựng.
- [4] Nguyễn Ngọc Phúc (2014), “Hiệu quả gia cường móng nông và quy trình tính toán sử dụng giải pháp Top-base”, *Tạp chí kết cấu và công nghệ xây dựng*, (14/1-2014), tr. 5-11.
- [5] Lê Bá Kế (2011). *Tính toán nền móng theo mô hình nền đàn hồi*, Nhà xuất bản Xây dựng.
- [6] Nguyễn Văn Hùng, Trần Quốc Việt (2021), *Phân tích ứng xử nền gia cố bằng phần tử dạng phễu dưới móng nông bằng phương pháp phần tử hữu hạn*. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 15(4), 75-86.
- [7] Bộ Xây dựng Việt Nam TCVN 11823:2017 - *Thiết kế nền đất yếu*.
- Tiếng Anh:**
- [8] Chung, J. H., Lee, S., & Chung, H. K. (2011). *Behavior of Floating Top-Base Foundation on Soft Soils by Laboratory Model Tests*, *Korean Geotechnical Society Journal*, 27(2), 5-15.
- [9] Zhussupbekov, A., et al. (2024), *Design of Conical Foundations with Increased Bearing Capacity in Areas of Undermined Soils*, 14(5), 1816.
- [10] Zhussupbekov, A., et al. (2025), *Experimental and Numerical Study of a Cone-Top Pile Foundation for Challenging Geotechnical Conditions*, (14), 7893.

Lời cảm ơn: Bài báo là sản phẩm của đề tài khoa học công nghệ cấp cơ sở Trường Đại học Quảng Bình, mã số CS.02.2026.

Liên hệ:

TS. Trần Quốc Phong

Khoa Sư phạm, Trường Đại học Quảng Bình

Địa chỉ: 18 Nguyễn Văn Linh, phường Đồng Thuận, tỉnh Quảng Trị

Email: tranqp125@gmail.com

Ngày nhận bài: 11/5/2026

Ngày gửi phản biện: 16/5/2026

Ngày duyệt đăng: 15/8/2026