

Tổng quan phân tích ứng xử của hệ thống đất gia cường bằng vật liệu địa kỹ thuật tại mố cầu và vùng chuyển tiếp cầu - đường

The analysis of behavior of geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system: a review

THS NGUYỄN VĂN TÂN^{1,*}, TS PHAN TRẦN THANH TRÚC², TS LÊ BÁ KHÁNH³

¹Công ty Tư vấn xây dựng Vạn Tường, Đắk Nông

²GV, Bộ môn Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Miền Trung

³GVC, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG TP.HCM

*Email: Mr.tan.tvgt@gmail.com

TÓM TẮT

Hệ thống đất gia cường bằng vật liệu địa kỹ thuật (GRS) tại mố cầu và vùng chuyển tiếp cầu - đường là một công nghệ xây dựng mới, được Cục Quản lý Đường cao tốc Liên bang Hoa Kỳ (FHWA) phát triển cách đây gần 20 năm để đáp ứng nhu cầu về cầu có một nhịp thể hệ mới tại Hoa Kỳ. Đặc điểm nổi bật của GRS theo khái niệm của FHWA là khoảng cách nhỏ giữa các lớp cốt gia cường, thường dưới 30 cm, giúp tạo ra sự tương tác hiệu quả hơn so với các hệ thống đất gia cường bằng vật liệu địa kỹ thuật cơ học (GMSE) có khoảng cách lớn hơn (45 ~ 60 cm). Hệ thống đất gia cường bằng vật liệu địa kỹ thuật tại mố cầu và vùng chuyển tiếp cầu - đường (GRS-IBS) mang lại những ưu điểm vượt trội về chi phí, tốc độ thi công, và khả năng thích ứng với nhiều loại địa hình khác nhau. Bài viết này đánh giá tổng quan về hệ thống GRS-IBS và tóm tắt các nghiên cứu trước đây về các yếu tố chính ảnh hưởng đến khả năng làm việc của hệ thống GRS-IBS. Kết quả nghiên cứu sẽ giúp người đọc hiểu rõ hơn về hệ thống GRS-IBS và có định hướng nghiên cứu bổ sung về hệ thống cầu này tương ứng với các sơ đồ cấu tạo và điều kiện làm việc khác nhau.

Từ khoá: Tường chắn đất có cốt; vật liệu địa kỹ thuật; mố cầu; cấu tạo GRS-IBS; yếu tố chính ảnh hưởng; hướng nghiên cứu.

ABSTRACT

The Geosynthetic Reinforced Soil-Integrated Bridge System (GRS-IBS) is a new construction technology developed by the Federal Highway Administration (FHWA) nearly 20 years ago to meet the needs of a new generation of medium-span bridges in the United States. The outstanding feature of GRS according to the FHWA concept is the close spacing reinforcement, typically ranging from 0.2 to 0.3 m, which helps to create more effective interaction than geomechanical reinforced soil (GMSE) systems with larger spacing reinforcement of 45 ~ 60 cm. GRS-IBS offers outstanding advantages in terms of cost, construction speed, and adaptability to various terrains. This paper provides an overview of the GRS-IBS system and summarizes previous studies on the main factors affecting the performance of the GRS-IBS system. The research results will help readers better understand the GRS-IBS system and have additional research directions on this bridge system corresponding to different structural diagrams and working conditions.

Keywords: Reinforced earth retaining wall; geotechnical materials; bridge abutment; GRS-IBS structure; main influencing factors; research direction.

1 GIỚI THIỆU

Hệ thống đất gia cường bằng vật liệu địa kỹ thuật tại mố cầu và vùng chuyển tiếp cầu - đường (GRS-IBS) do Cục Quản lý Đường cao tốc Liên bang (FHWA) phát triển, đã được triển khai thành công tại Hoa Kỳ nhằm đáp ứng nhu cầu của thể hệ cầu nhịp giản đơn mới. GRS-IBS có đặc điểm nổi bật là khoảng cách nhỏ giữa các lớp cốt gia cường, giúp tăng cường hiệu quả tương tác so với các hệ thống đất ổn định cơ học bằng vật liệu địa kỹ thuật (GMSE) truyền thống. Với

chi phí thấp, thời gian thi công ngắn, và khả năng thích ứng cao với nhiều loại địa hình, GRS-IBS không chỉ đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật mà còn giảm thiểu tác động môi trường, đóng góp vào sự phát triển bền vững trong xây dựng cầu đường.

Cần lưu ý rằng công nghệ đất gia cường bằng vật liệu địa kỹ thuật (GRS) thường bị nhầm lẫn với công nghệ đất ổn định cơ học bằng vật liệu địa kỹ thuật (GMSE). Hai công nghệ này đều sử dụng các thành phần cơ bản giống nhau như vật liệu nền, vật liệu địa kỹ

thuật, và kết cấu mặt bao. Tuy nhiên, khoảng cách gia cường gần ($S_v \leq 30$ cm) trong hệ thống GRS mang lại hiệu suất kết hợp vượt trội so với các hệ thống GMSE có khoảng cách gia cường lớn hơn (thường từ 45 ÷ 60 cm). Để tận dụng tối đa hiệu quả tương tác này, tài liệu [2] đã đưa ra quy trình thiết kế cụ thể cho GRS, với sự khác biệt chủ yếu nằm ở thiết kế độ ổn định bên trong so với GMSE.



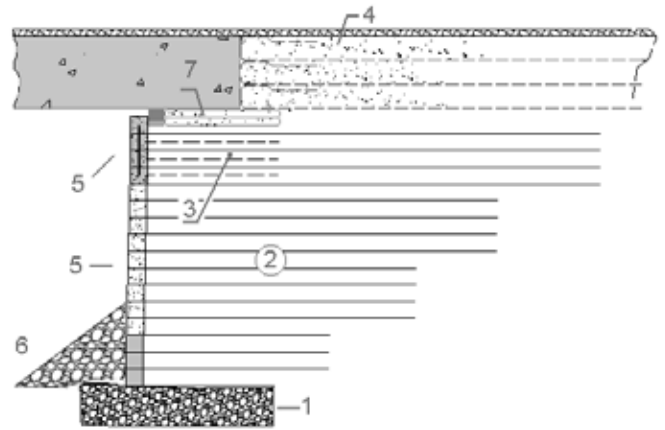
a. $S_v \approx 16$ inches b. $S_v \approx 8$ inches c. $S_v \approx 4$ inches.

Hình 1. Ứng xử composite của khối GRS và khối GMSE [1]

Bài viết này cung cấp một cái nhìn tổng quan về hệ thống GRS-IBS và tóm tắt các nghiên cứu trước đây về các yếu tố chính ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống. Kết quả nghiên cứu sẽ giúp người đọc hiểu rõ hơn về GRS-IBS và có thể định hướng cho các nghiên cứu liên quan.

2 CẤU TẠO CỦA GRS-IBS

GRS-IBS bao gồm ba thành phần chính, tất cả đều sử dụng công nghệ GRS: (1) móng bằng đất gia cố (RSF), (2) móng cầu bằng đất gia cường bằng vật liệu địa kỹ thuật (GRS Abutment) và (4) kết cấu chuyển tiếp cầu - đường (Hình 2). Trong hệ thống GRS-IBS, nhịp cầu được đặt trực tiếp lên nền đất gia cường (7) mà không cần các cấu hỗ trợ khác.



Hình 2. Mặt cắt điển hình của GRS-IBS [1]

Bảng 1. Một số thành phần của GRS-IBS

| Thành phần | Mô tả |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) Móng bằng đất gia cố (RSF) | Cấu tạo bằng vải địa kỹ thuật bọc kín và được thiết kế với chân trụ rộng hơn để nâng cao khả năng chịu tải của móng GRS. |
| (2) Móng cầu bằng đất gia cường bằng vật liệu địa kỹ thuật (GRS Abutment) | Đất đắp sử dụng vật liệu dạng hạt, thoát nước tốt, lớp vật liệu địa kỹ thuật được đặt ở các khoảng cách gần nhau theo phương thẳng đứng ($\leq 0,3$ m). |
| (3) Vùng gia cố gối đỡ dầm | Được xây dựng trực tiếp bên dưới gối dầm để tăng khả năng chịu tải. Khoảng cách cốt gia cường = 0,15 m |
| (4) Phần đường dẫn đầu cầu (RIA) | Được gia cường bằng vật liệu địa kỹ thuật để tăng khả năng chịu tải. |
| (5) Tường bao khối đất có cốt | Có thể sử dụng các loại tường bao khác nhau như gạch block, tấm panel, tường đổ tại chỗ v.v.... Tường bao dạng block được sử dụng phổ biến nhất với ba hàng trên cùng được liên kết với nhau và phun vữa. |
| (6) Đá học hoặc rọ đá | Cần có lớp chống xói bổ sung ở chân móng để tránh xói mòn cho GRS-IBS |
| (7) Gối đỡ dầm | Trực tiếp đỡ dầm, truyền tải từ kết cấu nhịp xuống vùng gia cố gối đỡ dầm. |

3 ƯU ĐIỂM - NHƯỢC ĐIỂM CỦA GRS-IBS

3.1 Ưu điểm của GRS-IBS

Giảm chi phí xây dựng: GRS-IBS có thể tiết kiệm từ 25 tới 60% chi phí xây dựng và yêu cầu bảo trì vòng đời ít hơn hoặc đơn giản hơn so với các phương pháp truyền thống như cầu BTCT.

Thời gian thi công ngắn: Do sự đơn giản trong thiết kế và thi công, GRS-IBS có thể được hoàn thành trong thời gian ngắn hơn, giảm thiểu gián đoạn giao thông.

Khả năng thích ứng cao: GRS-IBS có thể được áp dụng trong nhiều điều kiện địa hình khác nhau, bao gồm cả những khu vực có địa chất phức tạp.

Giảm thiểu tác động môi trường: Việc sử dụng ít vật liệu và thiết bị hạng nặng giúp giảm thiểu tác động đến môi trường xung quanh.

3.2 Nhược điểm của GRS-IBS

Thiếu dữ liệu về tính năng dài hạn: Mặc dù GRS-IBS đã được sử dụng trong khoảng 20 năm, nhưng vẫn còn thiếu dữ liệu về tính năng lâu dài so với các phương pháp xây dựng cầu truyền thống. Điều này có thể tạo ra sự không chắc chắn cho một số kỹ sư và các bên liên quan.

Độ nhạy với chất lượng thi công: Hiệu suất của GRS-IBS phụ thuộc nhiều vào chất lượng thi công. Các quy trình thi công kém, chẳng hạn như đặt các lớp địa kỹ thuật không đúng cách hoặc đầm nén không đủ, có thể dẫn đến các vấn đề về hiệu suất.

Sự chấp nhận và quen thuộc: Là một công nghệ tương đối mới, GRS-IBS có thể gặp phải sự phản đối từ các bên liên quan quen thuộc hơn với các phương pháp truyền thống. Điều này có thể là một rào cản đối với việc áp dụng rộng rãi.

4 TỔNG HỢP CÁC NGHIÊN CỨU VỀ GRS VÀ GRS-IBS

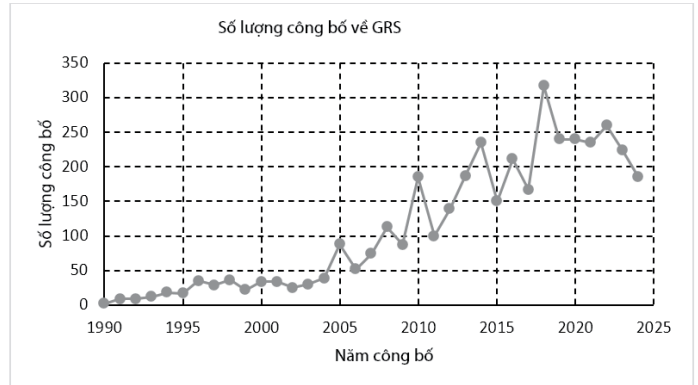
4.1 Mức độ quan tâm đối với các nghiên cứu về GRS

Hình 3 minh họa số lượng nghiên cứu về GRS được công bố hàng năm từ năm 1992 đến 2024, dựa trên thống kê từ trang web Scopus [11]. Cần lưu ý rằng Hình 3 chỉ thể hiện số lượng công bố trên các tạp chí thuộc hệ thống Scopus, vì vậy, số lượng công bố thực tế có thể cao hơn. Thống kê cho thấy vào những năm 1990, số lượng công bố hàng năm chỉ dưới 10 bài. Tuy nhiên, sau đó, chủ đề GRS đã nhận được sự quan tâm đáng kể từ cộng đồng nghiên cứu toàn cầu, dẫn đến sự gia tăng liên tục trong số lượng công bố. Từ năm 2019, số lượng công bố dao động xung quanh con số 200 bài mỗi năm, điều này cho thấy nhu cầu sử dụng GRS và sự cần thiết của các nghiên cứu về GRS vẫn còn rất cấp thiết.

4.2 Tổng quan về cấu tạo của một số mô hình nghiên cứu

Một số nghiên cứu điển hình về GRS-IBS, được thu thập từ việc đánh giá tài liệu trong giai đoạn từ năm 2005 đến 2018, đã được tóm tắt trong Bảng 4. Chiều cao móng dao động từ 2,2 đến 11 m, với chiều dài nhịp từ 3,65 đến 25 m. Dựa trên hồ sơ giám sát, tất cả các cây cầu

đều cho thấy hiệu suất tốt, với biến dạng dọc và ngang được kiểm soát hiệu quả. Độ lún đo được và độ dịch chuyển ngang của móng GRS đều nhỏ hơn giá trị cho phép mà FHWA đã quy định.



Hình 3. Số lượng các nghiên cứu theo năm về GRS [11]

Bảng 4 Tóm tắt về một vài nghiên cứu trường hợp điển hình đã chọn về các dự án GRS-IBS

| Nhà nghiên cứu | Năm xây dựng | Loại vật liệu địa kỹ thuật (ĐKT) | Loại đất móng | Kích thước của Mố GRS | | | |
|------------------------------------------|--------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
| | | | | Chiều cao, H [m] | Chiều rộng, B [m] | Chiều dài nhịp, L [m] | Góc ma sát đất đắp [°] |
| Adams và cộng sự (2007) [3] | 2005 | Vải ĐKT | Đất sét cổ kết trước | 4.7 | 10.4 | 25 | 37 |
| Mohamed và cộng sự (2011) [16] | 2009 | Lưới ĐKT | Đất sét dẻo mềm | 3 | 5.2 | 14 | 42.8 |
| Garnier-Villarreal và cộng sự (2014) [7] | 2012 | Vải ĐKT | Cát sỏi | 2.54 | - | - | 49 |
| Meechan và cộng sự (2017)[14] | 2013 | Vải ĐKT | Đất sét cứng - cát chặt vừa | 4.8 | 12.2 | 8.7 | 40 |
| Budge (2014) [5] | 2013 | Lưới ĐKT | Sét cứng | 6.9 | - | 23.6 | 44 |
| Saghebfar và cộng sự (2017) [18] | 2015 | Vải ĐKT | Sét siêu dẻo | 3.8 | 13 | 22 | 50.9 |
| Macmillan và cộng sự (2017) [13] | 2015 | Vải ĐKT | Sét cứng | 11 | Đường 4 làn xe | Nhiều nhịp | 42.8 |
| Gebremariam và cộng sự (2020a) [8] | 2015 | Vải ĐKT | Sét cứng | 2.2 | 8.5 | 3.65 | 47.6 |
| Stallings (2020) [20] | 2017-2018 | Vải ĐKT | Đá sa thạch | 3.6 | 10 | 22 | 46 |
| Welegerima (2020) [22] | 2018 | Vải ĐKT | Đất cát được bao phủ bởi đá phong hóa | 7.95 | 8 | 10 | 31.5 |

4.3 Tổng quan về ảnh hưởng một số tham số

4.3.1 Tổng hợp các nghiên cứu tham số

Kết quả của các nghiên cứu tham số chính ảnh hưởng đến khả năng làm việc của GRS-IBS sử dụng mô hình số được tóm tắt ở Bảng 5.

Bảng 5 Tóm tắt các thông số thiết kế chính ảnh hưởng đến khả năng làm việc của GRS

| Tham chiếu | Gia cố | | | | Đắp nền | | | Hình thái | | | | |
|------------|-------------|--------------------|-----------|-------------|------------|-------------|--------|-----------|--------------|----------------|------------|-------------|
| | Khoảng cách | Cường độ / độ cứng | Chiều dài | Đế chịu lực | Góc ma sát | Độ liên kết | Độ nén | Lớp mặt | Chiều cao mố | Chiều dài nhịp | Khoảng lùi | Độ rộng RSF |
| | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|----|----|---|----|----|---|----|----|----|----|----|----|
| Nick và cộng sự (2016) [17] | √√ | √ | - | - | √√ | | - | - | - | - | - | - |
| Zheng và Fox (2017) [25] | - | √√ | √ | √ | - | | √√ | - | √√ | - | √ | - |
| Zheng và cộng sự (2018a) [26] | √√ | √√ | - | √ | √√ | √ | - | - | √√ | - | √ | - |
| Abu-Farsakh và cộng sự (2019) [1] | √√ | √ | - | - | - | | - | - | √√ | √√ | - | - |
| Ardah và cộng sự (2021) [4] | - | - | √ | √ | √√ | | - | - | - | - | √ | √ |
| Hatami và Doger (2021) [10] | √ | - | - | - | - | | - | √√ | - | - | - | - |
| Zheng và cộng sự (2018b) [27] | √√ | - | - | √√ | - | | - | - | - | - | - | - |
| Khosrojerdi và cộng sự (2020) [12] | √√ | √ | √ | | √√ | | | | √ | √ | | √√ |
| Shen và cộng sự (2020) [19] | √√ | √ | | | √√ | | | | | | √√ | |
| Talebi và Meehan (2015) [21] | - | √√ | - | - | √√ | √ | - | - | - | - | - | - |
| Gebremariam và cộng sự (2020b) [9] | - | - | - | √ | √√ | √ | - | - | - | - | √ | - |
| Mirmoradi và Ehrlich (2015) [15] | - | √√ | - | - | - | - | √√ | √√ | - | √√ | - | - |

Lưu ý: √ - Các thông số đã được nghiên cứu, √√ - Các thông số đã được nghiên cứu và có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất của hệ thống GRS.

4.3.2 Kết quả nghiên cứu tham số chính

Các kết quả nghiên cứu cho thấy, với **bước cốt nhỏ** sẽ sinh ra thêm áp lực hông bổ sung, từ đó ngăn chặn chuyển động theo phương ngang, làm tăng sức chịu tải và độ ổn định bên trong của móng GRS (Wu và Pham, 2013 [23]); Abu-Farsakh và cộng sự, 2019 [1]) nhận thấy rằng khoảng cách gia cố tác động đến khả năng làm việc của GRS và vượt trên cả độ cứng của gia cố ở khoảng cách gia cố từ 0,2 m trở xuống. Họ cũng gợi ý rằng khoảng cách gia cố là 0,2 m có thể là giá trị ngưỡng cho đặc tính tổng hợp của GRS-IBS.

Ảnh hưởng của **góc ma sát lớp đắp nền** là do độ bền cắt bên trong, thứ kiểm soát lực giữa các hạt của đất. Việc giảm góc ma sát sẽ làm tăng biến dạng kéo cục bộ của lớp gia cố. Một nghiên cứu của Zheng và cộng sự cho thấy lực kéo cục bộ giảm khi độ dính tăng lên. Tuy nhiên, ảnh hưởng không còn nhiều ý nghĩa đối với các giá trị độ liên kết cao hơn, đặc biệt đối với giá trị độ liên kết lớn hơn 10 kPa. Hàm lượng hạt mịn cao hơn và đất đắp nền ẩm dự kiến sẽ ảnh hưởng đến các quan sát trong phạm vi này.

Chiều cao móng cầu được cho là do đặc tính biến dạng của GRS-IBS. Abu-Farsakh và cộng sự (2019)[16] nhận thấy chiều cao móng có tác động đáng kể đến chuyển vị ngang của tường móng; tuy nhiên, nó ít tác động vào sự phát triển của biến dạng dọc theo lớp gia cố. Đối với cùng một chiều dài nhịp có sự thay đổi chiều cao móng, thì sự dịch chuyển ngang lớn nhất được quan sát thấy diễn ra tại một vị trí tương tự, tức là ở 2/3 chiều cao móng.

Chiều dài nhịp phản ánh độ lớn của tải trọng tác dụng lên móng GRS, do đó ảnh hưởng đến giá trị biến dạng gia cố của các lớp vải địa kỹ thuật. Tuy nhiên, sự thay đổi chiều dài nhịp không làm thay đổi hình dạng phân bố biến dạng dọc theo vật liệu địa kỹ thuật. Sự dịch chuyển ngang tăng khi tăng chiều dài nhịp và vị trí dịch chuyển tối đa di chuyển lên trên.

Hiệu quả của việc đầm nén đã được báo cáo trong các nghiên cứu trước đây (Xu và cộng sự, 2019 [24]; Ehrlich và cộng sự, 2012 [6]). Zheng và cộng sự (Zheng và Fox, 2017 [25]) nhận thấy rằng việc tăng công đầm nén cho đất đắp nền có thể làm

giảm độ lún dưới gối cầu và áp lực lên móng. Tuy nhiên, nó dẫn đến độ dịch chuyển ngang lớn hơn. Cụ thể, ứng suất nén lớn hơn sẽ tạo ra biến dạng độ lún lớn hơn cho mỗi bậc trong quá trình thi công, nhưng độ lún này sẽ được bù trừ cho vị trí bậc tiếp theo. Ứng suất nén cao hơn cũng dẫn đến ứng suất chảy lớn hơn, do đó hạn chế khả năng nén của móng.

5 KẾT LUẬN

GRS-IBS là một công nghệ xây dựng cầu tiên tiến, mang lại nhiều lợi ích về mặt kinh tế và kỹ thuật. Tuy nhiên, để công nghệ này được áp dụng rộng rãi hơn, cần có thêm các nghiên cứu và phát triển các tiêu chuẩn kỹ thuật phù hợp. Với tiềm năng phát triển lớn, GRS-IBS hứa hẹn sẽ trở thành một giải pháp thay thế quan trọng trong ngành xây dựng cầu trong tương lai.

Từ các nghiên cứu tham số thông qua việc tiến hành thí nghiệm và phương pháp số, người ta thấy rằng các yếu tố chính ảnh hưởng đến khả năng làm việc của GRS-IBS là: khoảng cách gia cố, cường độ của gia cố, góc ma sát vật liệu đắp, chiều cao móng, chiều dài nhịp, quy trình đầm nén và tải trọng đầm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Abu-Farsakh, M.Y., Ardah, A., Voyiadjis, G.Z., (2019). Numerical parametric study to evaluate the performance of a geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system (GRS-IBS) under service loading. *Transp. Geotech.* 20.
- [2] Adams, M., Nicks, J., (2018). FHWA-HRT-17-080. *Design and Construction Guidelines for Geosynthetic Reinforced Soil Abutments and Integrated Bridge Systems*. Federal Highway Admin. US Depart. of Transp., Washington DC.
- [3] Adams, M.T., Schlatter, W., Stabile, T., (2007). Geosynthetic reinforced soil integrated abutments at the Bowman road bridge in Defiance County, Ohio. *Geo-Devenir: New Peaks in Geotechnics* GSP 165, 1–10.
- [4] Ardah, A., Abu-Farsakh, M., Voyiadjis, G., (2021). Numerical parametric study of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system (GRS-IBS), *Geotext. Geomembranes* 49 (1), 289–303.
- [5] Budge, A.S., (2014). Instrumentation and early performance of a large-grade GRS-IBS wall, *Geo-Congress 2014 Technical Papers. Geo-Charact. Model. Sustain.* GSP 234, 4213–4227.
- [6] Ehrlich, M., Mirmoradi, S.H., Saramago, R.P., (2012). Evaluation of the effect of compaction on the behavior of geosynthetic-reinforced soil walls. *Geotext. Geomembranes* 34, 108–115.
- [7] Garnier-Villarreal, M., Fratta, D., Oliva, M., (2014). Evaluation of the deformation of a geosynthetic-reinforced soil bridge abutment. *Geo-Congr. 2014 Tech. Papers: GeoCharact. Model. Sustain.* GSP 234, 4191–4202.
- [8] Gebremariam, F., Tanyu, B.F., Christopher, B., Leshchinsky, D., Zornberg, J.G., Han, J., (2020a). Evaluation of required connection load in GRS-IBS structures under service loads. *Geosynth. Int.* 27 (6), 620–634.
- [9] Gebremariam, F., Tanyu, B.F., Christopher, B., Leshchinsky, D., Han, J., Zornberg, J.G., (2020b). Evaluation of vertical stress distribution in field monitored GRS-IBS structure. *Geosynth. Int.* 27 (4), 414–431.
- [10] Hatami, K., Doger, R., (2021). Load-bearing performance of model GRS bridge abutments with different facing and reinforcement spacing configurations. *Geotext. Geomembranes* 49 (5), 1139–1148.
- [11] <https://www.scopus.com/home.uri> truy cập ngày 23 tháng 08 năm 2024.
- [12] Khosrojerdi, M., Xiao, M., Qiu, T., Nicks, J., (2020). Prediction equations for estimating maximum lateral displacement and settlement of geosynthetic reinforced soil abutments. *Comput. Geotech.* 125.
- [13] Macmillan, A., Iii, J.C.G., Asce, A.M., Hawkes, M., (2017). Performance evaluation of a multi-span geosynthetic reinforced soil - integrated bridge system. *Geotech. Front.* 278, 482–490. *Walls and Slope GSP*.
- [14] Meehan, C.L., Poggiogalle, T.M., Student, G., Hastings, J., (2017). Long-term Monitoring of a Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Bridge System. Department of Civil and Environmental Engineering, *Uni. of Delaware, DE*.
- [15] Mirmoradi, S.H., Ehrlich, M., (2015). Numerical evaluation of the behavior of GRS walls with segmental block facing under working stress conditions. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 141 (3), 1–8.
- [16] Mohamed, K., Abouzakhm, M., Elias, M., (2011). Applications and performance of geosynthetic-reinforced soil abutments on soft subsurface soil conditions. *Transport. Res. Rec.* 74–81.
- [17] Nicks, J.E., Esmaili, D., Adams, M.T., (2016). Deformations of geosynthetic reinforced soil under bridge service loads. *Geotext. Geomembranes* 44 (4), 641–653.
- [18] Saghebfar, M., Abu-Farsakh, M., Ardah, A., Chen, Q., Fernandez, B.A., (2017). Performance monitoring of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system (GRS-IBS) in Louisiana, *Geotext. Geomembranes* 45 (2), 34–47.
- [19] Shen, P., Han, J., Zornberg, J.G., Tanyu, B.F., Christopher, B.R., Leshchinsky, D., (2020). Responses of geosynthetic-reinforced soil (GRS) abutments under bridge slab loading: numerical investigation. *Comput. Geotech.* 123.
- [20] Stallings, J.J.A., (2020). *Implementation of Geosynthetic Reinforced Soil – Integrated Bridge System (GRS-IBS) Technology in Alabama*, Master Thesis. Auburn University.
- [21] Talebi, M., Meehan, C.L., (2015). Numerical Simulation of a Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Bridge System during Construction and Operation Using Parametric Studies. *Inter. Found. Congress & Equipment Expo*, pp. 1493–1502.
- [22] Welegerima, G.K., (2020). *Numerical Investigation on the Performance of Geosynthetic Reinforced Bridge Abutment : in Case of Bridge No. 5 of Babile - Fik Road Project*. Master Thesis, Addis Ababa Science and Technology University.
- [23] Wu, J.T.H., Pham, T.Q., (2013). Load-carrying capacity and required reinforcement strength of closely spaced soil-geosynthetic composites. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 139 (9), 1468–1476.
- [24] Xu, C., Liang, C., Shen, P., (2019). Experimental and theoretical studies on the ultimate bearing capacity of geogrid-reinforced sand. *Geotext. Geomembranes* 47 (3), 417–428.
- [25] Zheng, Y., Fox, P.J., (2017). Numerical investigation of the geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system under static loading. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 143 (6).
- [26] Zheng, Y., Fox, P.J., McCartney, J.S., (2018a). Numerical simulation of deformation and failure behavior of geosynthetic reinforced soil bridge abutments. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 144 (7).
- [27] Zheng, Y., Fox, P.J., McCartney, J.S., (2018b). Numerical study on maximum reinforcement tensile forces in geosynthetic reinforced soil bridge abutments. *Geotext. Geomembranes* 46 (5), 634–645.