Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Phần A: Khoa học tự nhiên, Công nghệ và Môi trường
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2023.185

HIỆU CHUẨN CẢM BIẾN ÁP LỰC ĐẤT TRONG PHÒNG THÍ NGHIỆM

Đặng Trâm Anh[1], Nguyễn Chí Ngôn[2*] và Lương Vinh Quốc Danh[3]
[1]Khoa Kỹ thuật Công trình Giao thông, Trường Bách Khoa, Trường Đại học Cần Thơ
[2]Khoa Tự động hóa, Trường Bách Khoa, Trường Đại học Cần Thơ
[3]Khoa Điện tử Viễn thông, Trường Bách Khoa, Trường Đại học Cần Thơ
**Tác giả liên hệ (Corresponding author): ncngon@ctu.edu.vn*

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 23/03/2023
Sửa bài (Revised): 17/04/2023
Duyệt đăng (Accepted): 25/04/2023

Title: *Calibration of earth pressure sensors in the laboratory*

Author(s): *Dang Tram Anh, Nguyen Chi Ngon* and Luong Vinh Quoc Danh*

Affiliation(s): *Can Tho University*

TÓM TẮT

Cảm biến áp suất đất được sử dụng để đo giá trị ứng suất đất tại điểm lắp đặt trong khối đất, ở vị trí giao diện đất-kết cấu công trình. Dữ liệu cảm biến đo được ảnh hưởng rất nhiều vào điều kiện làm việc của chúng. Do đó, việc hiệu chuẩn cảm biến áp suất đất là rất cần thiết để đánh giá đúng giá trị áp lực đất phục vụ trong việc xây dựng công trình. Nghiên cứu tập trung trong việc hiệu chuẩn cảm biến, cảm biến áp suất đất (earth pressure cell-EPC) kiểu màng ngăn có đường kính 30 mm của hãng Kyowa được sử dụng để so sánh độ nhạy của nó trong các thí nghiệm với các điều kiện tải khác trong hai môi trường khác nhau. Kết quả cho thấy, khi hiệu chuẩn trong chất lỏng, cảm biến cung cấp độ nhạy cao hơn so với khi hiệu chuẩn trong đất cát bão hòa có bề dày lớp cát bằng 6,5 lần DEPC. Phương trình hiệu chuẩn đạt được đều là tuyến tính với hệ số hiệu chuẩn là 0,99996 và giá trị hồi quy R2 hiệu chỉnh là 1,0 đối với môi trường chất lỏng; các hệ số tương ứng là 0,40411 và 0,99609 đối với môi trường đất cát. Điều này có thể là nghiên cứu cơ sở ứng dụng cho việc đo đạc ứng suất của đất trong thực tế.

Từ khoá: *Cảm biến áp suất đất, đo áp suất, độ dày lớp cát, hiệu chuẩn trong đất, thiết bị hiệu chuẩn*

ABSTRACT

The soil pressure sensor is used to measure the soil stress value at the installation point within the soil mass, at the interface position between the soil and the structure of the construction work. The sensor data is greatly influenced by their working conditions. Therefore, sensor calibration is essential to evaluate the soil pressure values for construction purposes. The research focuses on sensor calibration. It uses a 30mm diameter rigid diaphragm type of earth pressure cell (EPC) from the Kyowa company to compare its sensitivity in experiments under different loading conditions in two different environments. The results show that the sensor provides higher sensitivitythan when calibrated in sand with a sand layer thickness of 6.5 times the D_{EPC}. The calibration equation achieved is linear, with a calibration coefficient of 0.9999 and an adjusted R^2 value of 1.0 for the fluid environment. The corresponding coefficients are 0.40411 and 0.99609 for the sand environment. This could be fundamental research applied for measuring soil stress in practice.

Keywords: *Calibrator, in-soil calibration, pressure gauge, sand layer thickness, soil pressure sensor*

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, công nghệ phần cứng và phần mềm phát triển mạnh mẽ đã góp phần cho sự phát triển thiết bị đo, đặc biệt đối với cảm biến ứng suất để đo trạng thái ứng suất của đất. Việc đo ứng suất trong khối đất hoặc tại giao diện đất-kết cấu công trình luôn là vấn đề cần nghiên cứu vì tầm quan trọng của nó trong các lĩnh vực địa kỹ thuật, kết cấu và các lĩnh vực có liên quan. Việc hiệu chuẩn cảm biến đóng vai trò then chốt để đánh giá áp lực đất một cách chính xác vì sự tương quan giữa áp suất đầu vào và áp suất đầu ra của đầu dò cảm biến thay đổi theo điều kiện làm việc cũng như vị trí lắp đặt của chúng như báo cáo của Selig (1980), Weiler and Kulhawy (1982).

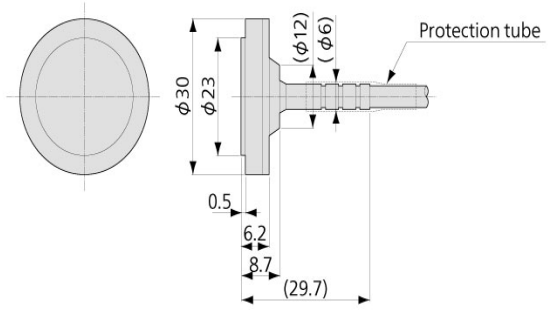
Thí nghiệm hiệu chuẩn cảm biến áp suất đất thường được thực hiện trong môi trường là chất lỏng và cát. Các thí nghiệm hiệu chuẩn EPC trong phòng thí nghiệm ở môi trường chuẩn là chất lỏng thường được các nhà sản xuất cảm biến áp dụng và cho kết quả tương quan giữa áp suất đầu vào và đầu ra là tuyến tính, loại chất lỏng thường được sử dụng là dầu hoặc nước cất theo các nghiên cứu của Ramirez et al. (2010), Bhuiyan et al. (2018), Gade and Dasaka (2020), Jayalath and Wimalasena (2021). Mục đích chính của EPC là đo ứng suất đất trong một khối đất nhưng sự phân bố ứng suất tại bề mặt tiếp xúc giữa EPC và đất có thể không đồng nhất giống như áp suất chất lỏng. Việc chèn cảm biến loại màng cứng vào khối đất có thể dẫn đến hiệu ứng uốn cong. Sự phân bố ứng suất tại vị trí của cảm biến trong đất sẽ thay đổi như một lực hút và cảm biến có xu hướng đánh giá ứng suất cao hơn ứng suất thực tế của đất, hiệu ứng vòm chiếm ưu thế trong đất cát trong khi hiệu ứng vùi chiếm ưu thế trong cát rời theo báo cáo của Labuz (2005), Bhuiyan et al. (2018). Vì vậy, mục tiêu của công việc hiệu chuẩn cảm biến là chứng minh hoạt động của các thiết bị chuyển đổi này và so sánh độ nhạy của chúng (đầu ra của cảm biến trên mỗi tải vật lý được áp dụng) trong các môi trường làm việc khác nhau.

Trong nghiên cứu này, việc hiệu chuẩn chi tiết chất lỏng và đất đã được thực hiện bằng cách sử dụng hai hệ thống hiệu chuẩn đơn giản cho pin cảm biến áp suất đất loại BED A-Kyowa, Nhật Bản. Nghiên cứu hiệu chuẩn cho thấy phương trình hiệu chuẩn của các cảm biến là tuyến tính có giá trị R^2 hiệu chỉnh bằng 1 đối với môi trường chất lỏng. Độ nhạy của cảm biến nhúng trong đất cát thấp hơn so với hiệu chuẩn chất lỏng đối với cát có mật độ khô là 1,6 g/cc.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết bị

Cảm biến BED-A là đầu dò áp suất đất cỡ nhỏ có đường kính ngoài là 30 mm và đường kính bề mặt cảm nhận áp suất là 23 mm. Các thông số kỹ thuật, kích thước chi tiết của EPC được nhà sản xuất Kyowa cung cấp trên trang chính hãng và được trích dẫn trình bày ở Bảng 1 và Hình 1.



Hình 1. Kích thước chi tiết của cảm biến

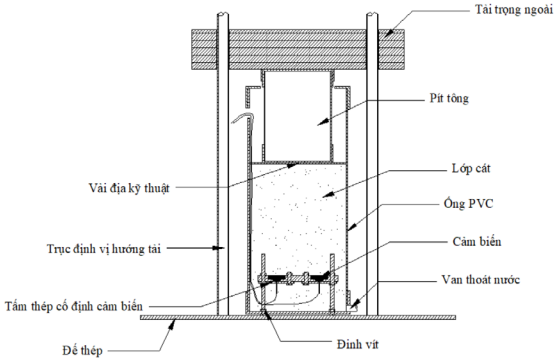
(Bản quyền © Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd.)

Để tiến hành các thử nghiệm hiệu chuẩn EPC trong đất, thiết bị hiệu chuẩn được phát triển bằng cách chế tạo một thiết bị đơn trục không nở hông thông thường phù hợp để thử nghiệm mẫu đất cát có đường kính 168 mm, được mô tả trong Hình 2. Hệ thống thiết bị hiệu chuẩn EPC trong đất được cố định trên một bệ đỡ bằng thép. Phía trên bệ đỡ được bố trí hai thanh thép dẫn hướng để cố định hướng truyền tải. Hệ thống bao gồm hai EPC được đặt trong một ống nhựa PVC có độ ma sát thấp đường kính 168 mm cao 360 mm bao quanh các cảm biến. Hai EPC được đặt hướng mặt cảm nhận lên phía trên trong một khoang PVC có đường kính 168 mm, mỗi EPC cách tâm 37 mm và cách đáy 50 mm. Các EPC được neo trong các tấm thép và được cố định vào hệ thống bằng đinh vít. Dây cáp của EPC nối ra bên ngoài qua thành bên của hệ thống, đầu ra của dây cáp nằm phía trên lớp cát, tránh sự thoát nước trong quá trình thí nghiệm. Một lỗ thoát nước có vòi được thiết kế tại đáy của hệ thống hiệu chuẩn có tác dụng điều chỉnh mực nước trong quá trình hiệu chuẩn. Cát được đổ vào không gian hình trụ bên trong ống nhựa PVC, tác dụng áp lực lên bề mặt hoạt động của EPC. Hệ thống nắp và thiết bị truyền tải bên trên được thiết kế linh hoạt như một pít tông. Phần bên trên của hệ thống là một ống nhựa PVC có đường kính 114 mm được nối với các tấm thép di động để tạo ra áp suất trong quá trình kiểm tra hiệu chuẩn. Một đầu bít PVC 114 mm (đường kính ngoài 123 mm) tạo thành nắp của thiết bị và áp trực tiếp lên bề mặt lớp cát thí nghiệm.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật

Đặc tính	
Công suất định mức	200 kPa
Phi tuyến tính	Trong vòng ± 2 % RO
Độ trễ	Trong vòng ± 1 % RO
Đầu ra định mức	0,25 mV / V trở lên
Đặc điểm môi trường	
Nhiệt độ an toàn	-10 đến 60 ºC
Nhiệt độ bù	0 đến 50 ºC
Hiệu ứng nhiệt độ về 0	Trong vòng ± 0,4% RO / ºC
Nhiệt độ ảnh hưởng đến đầu ra	Trong khoảng ± 0,4% / ºC
Đặc điểm điện từ	
Kích thích an toàn	4 VAC hoặc VDC
Kích thích được đề xuất	2 đến 4 VAC hoặc VDC
Điện trở đầu vào	120 Ω ± 1,7 %
Điện trở đầu ra	120 Ω ± 1,7 %
Cáp	Cáp được bảo vệ bằng chloroprene 4 ruột (0,08 mm^2), đường kính 4 mm, dài 3 m, có thanh ở đầu (Dây chắn được nối với vỏ.)
Tính chất cơ học	
Vượt tải an toàn	120 %
Trọng lượng	Khoảng 120 g

(Bản quyền © Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd.)



Hình 2. Cấu tạo mô hình hiệu chuẩn trong đất

2.2. Thí nghiệm hiệu chuẩn trong môi trường chất lỏng

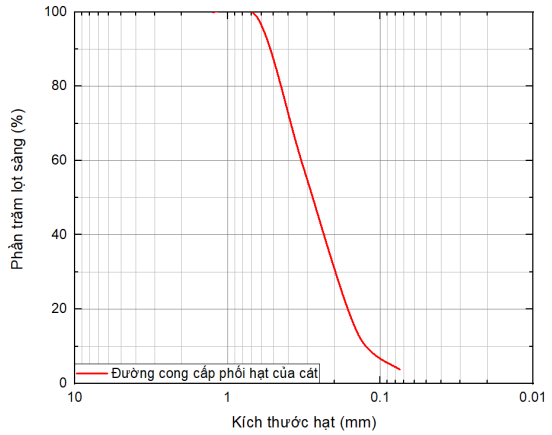
Thí nghiệm hiệu chuẩn trong môi trường lỏng sử dụng loại nước đã khử khí và áp suất áp dụng bởi một xilanh khí nén. Hai cảm biến áp lực Kyowa cỡ nhỏ có đường kính 30 mm được sử dụng để xác minh độ chính xác của thiết bị hiệu chuẩn đã phát triển. Trong đó, 01 EPC được nối với bộ chuyển đổi Input Adapter của Kyowa (Kyowa device_K.D) và 01 EPC được nối với bộ chuyển đổi Master của nghiên cứu này phát triển (Project device_P.D). Dữ liệu đầu ra của cảm biến được ghi lại ở mỗi cấp tăng tải cũng như dỡ tải. Các số đọc tương ứng với mỗi lần tăng/dỡ tải thu được khi áp suất chất lỏng đã ổn định, thường trong 30 giây. Nhiều chu kỳ áp tải/dỡ tải đã được thực hiện để kiểm tra hiệu chuẩn trên mỗi đầu dò. Lấy ngẫu nhiên kết quả đo của hai chu kỳ tải thứ nhất và thứ năm trình bày trong Hình 4.

2.3. Thí nghiệm hiệu chuẩn trong môi trường cát

Trong nghiên cứu này, cát mịn (phân loại theo tiêu chuẩn xây dựng Việt Nam TCVN 7570:2006) được sử dụng để thực hiện hiệu chuẩn các EPC. Đường cong phân bố kích thước hạt của cát sử dụng trong thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 2 và Hình 3.

Bảng 2. Thành phần hạt của cát dùng trong thí nghiệm

Kích thước lỗ sàng mm	Phần trăm lọt sàng %
2,50	100,00
1,25	100,00
0,63	98,13
0,315	57,51
0,14	13,30
0,075	3,77



Hình 3. Biểu đồ thành phần hạt cát sử dụng trong nghiên cứu

Thiết bị hiệu chuẩn được thiết kế theo nguyên lý nén đơn trục, sử dụng ống nhựa cứng có độ dày 2,5 mm và đường kính trong bằng 168 mm được gắn chặt trên đế thép. Cảm biến được lắp trên giá cố định bên trong lòng ống, bên dưới lớp cát với các độ dày lần lượt là: 100 mm, 120 mm và 150 mm để quan sát ảnh hưởng của độ dày lớp cát đến mối quan hệ giữa các cấp tải trọng đặt vào và áp suất đo được.

Độ dày lớp cát được quan sát với các tỷ lệ độ dày của lớp cát và đường kính của EPC được giới hạn tương ứng là 2,5 đến 15 trong nghiên cứu của Trudeep and Dasaka (2013), tác giả đã lưu ý với độ dày lớp cát bằng 0,25 D_{EPC} và 0,5 D_{EPC} thể hiện biến dạng đo được phi tuyến tính và thất thường, đồng thời cũng đưa ra kết luận rằng độ dày lớp cát tối ưu là 1,5 D_{EPC} cho D_{EPC} 40 mm. Tương tự nghiên cứu của Gade and Dasaka (2020) đã khảo sát với năm độ dày cát khác nhau từ 50 mm đến 150 mm cho cảm biến kiểu màng ngăn có D_{EPC} bằng 30 mm và báo cáo kết luận độ dày cát tối ưu thu được là 4,17 D_{EPC}.

Một tấm thép không gỉ có độ dày 10 mm được phay lỗ ren hai bậc theo bề dày của tấm thép có đường kính là 32 mm và 25 mm để cố định các EPC. Hai EPC được lắp đặt cố định tại vị trí các lỗ ren trên tấm thép. Tấm thép được gắn trên giá đỡ cố định, bề mặt phẳng ngang song song với mặt đáy và ở vị trí cách đáy của ống trụ 6 cm. Dùng vải địa kỹ thuật bao xung quanh để bảo vệ cáp EPC. Bề mặt bên trong của ống nhựa được dán tấm decal bóng và bôi trơn để giảm ma sát thành bên.

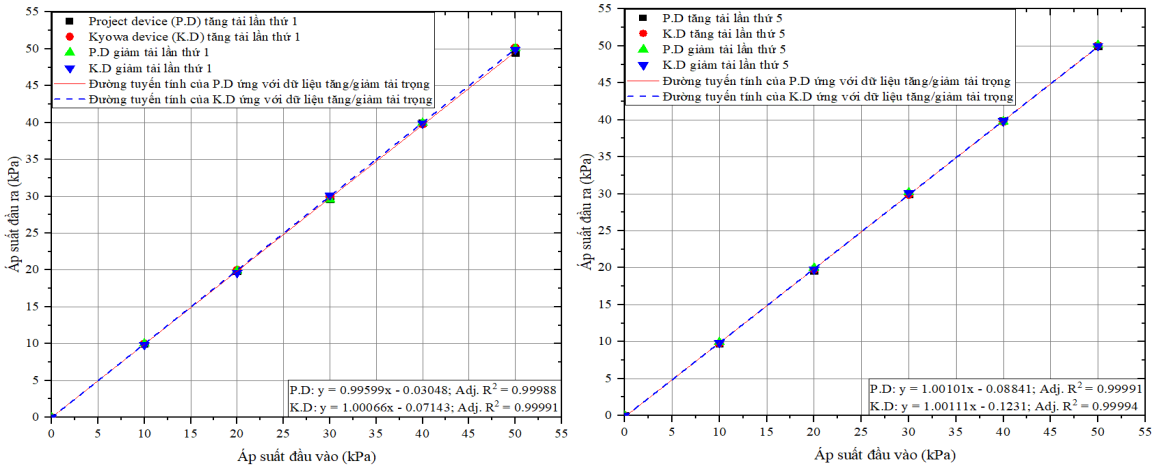
Phương pháp gia tải bằng tải trọng tĩnh của lớp cát bão hòa nước với độ dày lớp cát phía trên mặt cảm biến được quan sát và tải áp tăng thêm bởi trọng lượng của các tấm thép được đặt bên trên một trục truyền tải để truyền và phân phối áp suất đồng đều trên bề mặt lớp cát như trình bày trong Hình 2. Phía trên bề mặt cát được phủ một lớp vải địa kỹ thuật giúp thoát nước nhanh và giữ được độ lún đều cho lớp cát tại bề mặt tiếp nhận tải áp. Theo dõi ứng suất trong khối cát do tải trọng tác động thông qua các biến dạng gây ra trong EPC.

Áp suất được đặt ở mỗi mức tăng là 5 kPa được qui đổi thành tải áp trên bề mặt của thanh truyền tải và mức tăng tiếp theo chỉ thực hiện sau khi đạt được các số đọc ổn định của mức tăng trước đó (thường khoảng 2-5 phút) trong dải áp suất từ 0 đến 35 kPa. Cấp tải áp được sử dụng thấp hơn 50% giá trị lớn nhất của dải áp suất của cảm biến để tránh gây biến dạng quá mức cho đầu dò. Thực hiện thí nghiệm với 02 EPC tại cùng một vị trí bề mặt đặt cảm biến để xem xét độ tin cậy của dữ liệu đầu ra EPC.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hiệu chuẩn trong môi trường chất lỏng

Tương quan giữa áp suất đầu vào và áp suất đầu ra dựa trên kết quả đo được của cảm biến bằng phương pháp hồi quy là xấp xỉ bậc nhất. Số liệu đo được của các cảm biến của các chu kỳ xếp dỡ tải lần thứ nhất và lần thứ năm được trình bày trong Hình 4. Kết quả cho thấy hệ số tương quan độ nhạy của cảm biến và hệ số tương quan hồi quy R bình phương hiệu chỉnh lần lượt là 0,99599 và 0,99988 của cảm biến gắng với P.D; 1,00066 và 0,99991 của cảm biến gắng với K.D trong lần đo thứ nhất, trong lần đo thứ 5 có các giá trị tương ứng là 1,00101 và 0,99991 của P.D; 1,00111 và 0,99994 của K.D. Điều này chứng tỏ hiệu chuẩn EPC trong môi trường chất lỏng cho kết quả là tuyến tính giữa áp suất đầu vào và đầu ra, phù hợp với thông tin của nhà sản xuất đồng thời cũng giống với các kết quả của các nghiên cứu trước đây của Trudeep and Dasaka (2013), Gade and Dasaka (2020), Jayalath and Wimalasena (2021).



(a) (b)

Hình 4. Kết quả hiệu chuẩn của 2 EPC trong môi trường chất lỏng

Ghi chú: a) Trong chu kỳ hiệu chuẩn thứ nhất, b) Trong chu kỳ hiệu chuẩn thứ năm

3.2. Hiệu chuẩn trong môi trường cát

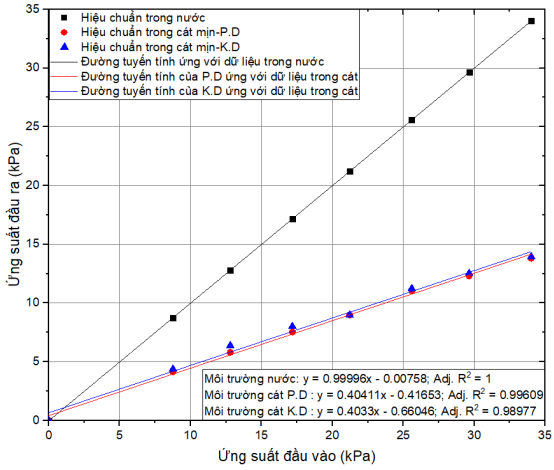
Môi trường hiệu chuẩn ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả đo của EPC. Khi hiệu chuẩn trong môi trường cát, độ chính xác của dữ liệu sẽ bị ảnh hưởng bởi độ chặt của cát và khoảng cách truyền áp lực đến vị trí đặt cảm biến. Trong khi đó, trong môi trường chất lỏng, các yếu tố này sẽ không có tác động quá nhiều đến độ chính xác của dữ liệu. Nhận định đó được thể hiện rõ qua kết quả nghiên cứu được trình bày trong Hình 4 và Hình 5.

Kết quả hiệu chuẩn các cảm biến với bề dày lớp cát mịn bão hòa nước là 150 mm được trình bày trong Hình 5. Có sự phân tán nhỏ giữa áp suất đặt vào và kết quả đo được. Khi bề dày lớp cát là 150 mm, tỷ lệ giữa bề dày lớp cát với đường kính của bề mặt cảm biến của pin áp suất đất là 6,5 D_{EPC}. Các nghiên cứu cho thấy tỷ lệ của độ dày lớp cát và DEPC đã đủ lớn làm cho áp suất truyền trên bề mặt cảm biến được ổn định hơn, điều này có thể nhận thấy từ biểu đồ kết quả đo của hai cảm biến.

Phân tích hồi quy các kết quả thu được từ các thử nghiệm cho thấy sự phù hợp tuyến tính là đủ tốt. Kết quả đo của các cảm biến từ thí nghiệm hiệu chuẩn trong đất cát được so sánh với kết quả của hiệu chuẩn chất lỏng như trình bày ở Hình 5. Áp suất do EPC đo được khi hiệu chuẩn trong môi trường chất lỏng là cao nhất và có độ tin cậy tốt nhất, phương trình hiệu chuẩn là hồi qui tuyến tính với hệ số hiệu chuẩn là 0,99996 và giá trị R bình phương hiệu chỉnh là 1. Giá trị đo của các cảm biến khi hiệu chuẩn trong môi trường đất cát thấp hơn trong chất lỏng, điều này có thể do sự tiêu tán ứng suất bên trong khối cát, kết quả nghiên cứu hiện tại phù hợp với các nghiên cứu trước đó của Labuz and Theroux (2005), Trudeep and Dasaka (2013), Bhuiyan et al. (2018), Gade and Dasaka (2020), Jayalath and Wimalasena (2021).

Trong điều kiện của nghiên cứu này, mức độ hấp thu áp lực của các EPC dao động khoảng 40% so với áp lực ghi được trong môi trường chất lỏng. Cụ thể kết quả hiệu chuẩn của các EPC như sau: hệ số hiệu chuẩn của P.D và K.D lần lượt là 0,40411 và 0,4033 và hệ số tương quan R bình phương hiệu chỉnh của phương pháp hồi quy lần lượt là 0,99609 và 0,98977 tương ứng cho các cảm biến.

Hiệu ứng vị trí làm việc trong môi trường đo đạc đóng một vai trò quan trọng trong phản ứng của EPC. Các hệ số hiệu chuẩn cần đạt được nên được nghiên cứu thực hiện trong các điều kiện môi trường tương tự như điều kiện thực tế tại nơi dự kiến sử dụng để có thể thu được kết quả tin cậy.



Hình 5. Kết quả hiệu chuẩn của EPC trong môi trường cát

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu hiện tại đóng góp trong việc nghiên cứu phát triển một thiết bị hiệu chuẩn trong phòng thí nghiệm đơn giản, dễ áp dụng dựa trên các nguyên lý kỹ thuật đã được kiểm định, có thể thực hiện hiệu chuẩn việc đo đạc áp suất của các cảm biến EPC kiểu màng ngăn trong những môi trường làm việc có điều kiện khác nhau như trong nước hay cát.

Các kết luận sau đây có thể được rút ra từ nghiên cứu này:

– Hiệu chuẩn EPC trong môi trường cát bằng thiết bị được phát triển có kết quả đo áp suất đất tương đồng với thiết bị của chính hãng cung cấp. Cụ thể, áp suất đo trong môi trường cát có giá trị hồi quy tuyến tính của hai cảm biến P.D và K.D với hệ số hiệu chuẩn lần lượt bằng 0,40411 và 0,4033.

– Độ dày lớp cát được lựa chọn trong nghiên cứu này có tỷ lệ độ dày bằng 6,5 D_{EPC} cho thấy kết quả tương quan giữa áp suất đầu vào-đầu ra của các cảm biến là tương quan tuyến tính.

– Hiệu ứng vị trí làm việc của cảm biến trong môi trường cần đo đạc đóng một vai trò quan trọng trong phản ứng của EPC. Các hệ số hiệu chuẩn cần đạt được nên được nghiên cứu thực hiện trong các điều kiện môi trường tương tự như điều kiện thực tế tại nơi dự kiến sử dụng để có thể thu được kết quả tin cậy.

Kết quả của nghiên cứu cho thấy cần phải xem xét kỹ lưỡng các giá trị hiệu chuẩn của EPC trước khi sử dụng để đo đạc trong các môi trường khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Bản quyền © Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. (2023). https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/sensors/bed-a/index.html

Bhuiyan, M. Z. I., Wang, S., Sloan, S. W., Sheng, D., & Michel, H. (2018). Calibration of earth pressure cell for a specified laboratory application.– *In Proceedings of the International Conference n Geotechnique, Construction Materials and Environment, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 20-22, 2018,* 263-268.

Bộ Khoa học và Công nghệ. (2006). *Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 7570:2006 về cốt liệu cho bê tông và vữa - yêu cầu kỹ thuật do Bộ Khoa học và Công nghệ ban hành*. https://thuvienphapluat.vn/TCVN/Xay-dung/Tieu-chuan-Viet-Nam-TCVN-7570-2006-cot-lieu-cho-be-tong-va-vua-yeu-cau-901035.aspx

Gade, V. K., & Dasaka, S. M. (2018). Calibration of earth pressure sensors. *Indian Geotechnical Journal, 48*(1), 142-152. https://doi.org/10.1007/s40098-017-0223-0

Gade, V. K., & Dasaka, S. M. (2020). Influence of contacting material on calibration response of diaphragm earth pressure cells. *Indian Geotechnical Journal, 50*(1), 133-141. https://doi.org/10.1007/s40098-019-00363-9

Holcomb, Z. C., & Jarmuz-Smith, S. (2006). *SPSS basics: Techniques for a first course in statistics*. Pyrczak.

Ingram, J. K. (1968). *Development Of A Free-Field Soil Stress Gage For Static And Dynamic Measurements*. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS.

Jayalath, C. P. G., & Wimalasena, K. D. (2021). Laboratory calibration of earth pressure cells. *GEOMATE Journal, 20*(82), 61-67. https://doi.org/10.21660/2021.82.Gx362

Labuz, J. F., & Theroux, B. (2005). Laboratory calibration of earth pressure cells. *Geotechnical Testing Journal, 28*(2), 188-196. https://doi.org/10.1520/GTJ12089

Ramirez, A., Nielsen, J., & Ayuga, F. (2010). On the use of plate-type normal pressure cells in silos: Part 1: Calibration and evaluation. *Computers and Electronics in Agriculture, 71*(1), 71-76. https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.12.005

Selig, E. T. (1980). Soil stress gage calibration. *Geotechnical Testing Journal, 3*(4), 153-158.

Weiler Jr, W. A., & Kulhawy, F. H. (1982). Factors affecting stress cell measurements in soil. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, 108*(12), 1529-1548. https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001393