

Đánh giá khả năng kháng xuyên của một số vật liệu cát ứng dụng đắp ụ bảo vệ tàu bay

Nguyễn Văn Hiếu¹, Dương Duy Khánh^{1*}, Nguyễn Xuân Bằng¹, Trần Công Bình²

¹Học viện Kỹ thuật Quân sự, 236 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, Hà Nội, Việt Nam

²Khoa Ra đa, Học viện Phòng không Không quân, xã Đoài Phương, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 20/3/2025; ngày chuyển phản biện 24/3/2025; ngày nhận phản biện 14/4/2025; ngày chấp nhận đăng 18/4/2025

Tóm tắt:

Giải pháp đắp ụ dã chiến sử dụng vật liệu địa phương để bảo vệ tàu bay trước khả năng xuyên phá của vật thể xuyên nhọn là giải pháp thường được áp dụng khi triển khai nhanh kết cấu bảo vệ tại các sân đỗ tàu bay. Giải pháp này có ưu điểm là tính linh hoạt, cơ động cao, dễ thi công và tiết kiệm chi phí so với các giải pháp kết cấu bảo vệ tàu bay khác. Bài báo tập trung mô phỏng số bằng phần mềm Abaqus khả năng xuyên của các vật thể xuyên bằng thép, khi sử dụng vật liệu nhồi là cát sạn san hô ở vùng biển Đông và cát đỏ tại khu vực Phan Thiết ở Việt Nam. Kết quả nghiên cứu mô phỏng số chỉ ra rằng, vật liệu cát sạn san hô tại khu vực quần đảo xa bờ của Việt Nam có khả năng kháng xuyên tốt hơn so với cát đỏ Phan Thiết vốn có mô đun cỡ hạt nhỏ. Chiều sâu xuyên của vật thể xuyên trong trường hợp môi trường cát đỏ và cát sạn san hô lần lượt là 0,700 và 0,495 m, tương ứng với hệ số K_x tính toán là $69,3 \cdot 10^{-7}$ và $49,0 \cdot 10^{-7}$. Đây là cơ sở ban đầu cho việc nghiên cứu thiết kế và ứng dụng dạng kết cấu ụ dã chiến bảo vệ tàu bay sử dụng vật liệu địa phương.

Từ khóa: Abaqus, ụ dã chiến, vật liệu nhồi, vật thể xuyên.

Chỉ số phân loại: 2.1, 2.5

Assessment of the penetration resistance of sand materials for aircraft protection fortifications

Van Hieu Nguyen¹, Duy Khanh Duong^{1*}, Xuan Bang Nguyen¹, Cong Binh Tran²

¹Military Technical Academy, 236 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Hanoi, Vietnam

²Radar Faculty, Air Defense-Air Force Academy, Doai Phuong Commune, Hanoi, Vietnam

Received 20 March 2025; revised 14 April 2025; accepted 18 April 2025

Abstract:

Constructing field fortifications using local materials to protect aircraft from sharp penetrating objects is a common practice when rapidly deploying protective structures at aircraft aprons. This approach offers several advantages of high flexibility, mobility, ease of construction, and cost-effectiveness compared to other aircraft protective structural solutions. This article focuses on numerical simulations using Abaqus to analyse the penetration capability of steel penetrators when coral sand from the East Sea of Vietnam and red sand from the Phan Thiet area are used as filling materials. The numerical simulation results indicate that coral sand from the offshore islands of Vietnam exhibits higher penetration resistance than Phan Thiet red sand, which has a smaller grain size modulus. The penetration depths of the penetrator in red sand and coral sand are 0.70 m and 0.495 m, respectively, corresponding to calculated penetration resistance coefficients (K_x) of $69.3 \cdot 10^{-7}$ and $49.0 \cdot 10^{-7}$, respectively. These findings provide an initial basis for the design and application of field fortification structures for aircraft protection using local materials.

Keywords: Abaqus, field fortification, filling material, penetrating object.

Classification numbers: 2.1, 2.5

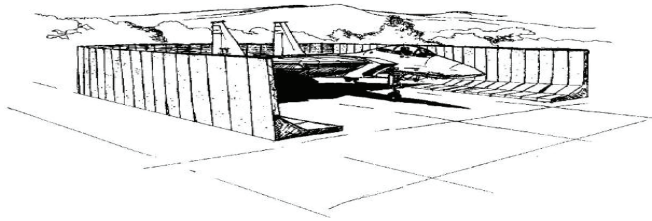
*Tác giả liên hệ: Email: khanhduong@lqdtu.edu.vn

1. Đặt vấn đề

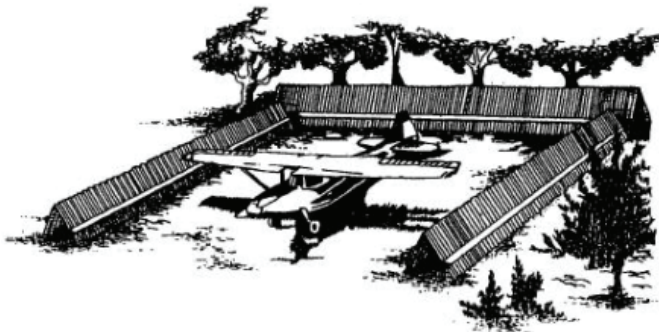
Tàu bay là phương tiện quan trọng và có giá trị cao, đặc biệt tại các sân bay nằm trong khu vực có an ninh phức tạp. Thông thường, tàu bay được bố trí riêng lẻ và áp dụng các biện pháp bảo vệ chuyên biệt.

Các giải pháp bảo vệ hiện có cho tàu bay quân sự trên sân đỗ chủ yếu sử dụng các loại ụ kiên cố bằng bê tông cốt thép đổ tại chỗ. Loại kết cấu này, tuy có khả năng chịu lực tốt và bền vững, lại gặp nhiều hạn chế về thời gian và chi phí lắp đặt, đồng thời không thể di chuyển hoặc điều chỉnh một cách nhanh chóng khi có yêu cầu thay đổi vị trí bảo vệ. Trong các trường hợp cần thiết phải mở rộng hoặc di chuyển kết cấu bảo vệ, các giải pháp kiên cố hiện tại bộc lộ rõ nhược điểm về tính cơ động.

Ngoài ra, một số giải pháp khác sử dụng các vật liệu tạm thời như khối bê tông đúc sẵn (hình 1) hoặc các module bảo vệ di động dạng Landing mat shield (tấm chắn bằng kim loại hoặc composite) (hình 2) cũng gặp phải các hạn chế nhất định đó là nặng nề, thiếu linh hoạt trong việc cơ động. Do đó, việc phát triển một giải pháp bảo vệ vừa có khả năng chống xuyên phá, vừa có thể lắp ráp và tháo dỡ nhanh chóng là điều cần thiết để đáp ứng yêu cầu trong các tình huống đặc biệt.



Hình 1. Kết cấu ụ chứa tàu bay bằng các khối bê tông đúc sẵn lắp ghép.



Hình 2. Kết cấu ụ chứa tàu bay bằng các tấm kim loại lắp ghép.

Ở các quốc gia có nền quân sự phát triển như Mỹ, Nga, Trung Quốc... việc bảo vệ tàu bay quân sự trong điều kiện tác chiến thường được đảm bảo bằng các hệ thống ụ lắp ghép, nhằm giảm thiểu nguy cơ phá hủy hàng loạt chiến đấu

cơ khi căn cứ không quân bị tấn công. Các ụ lắp ghép này thường ứng dụng vật liệu địa kỹ thuật và tận dụng vật liệu sẵn có tại sân bay như đất, cát, đá, sỏi... (hình 3), mang lại nhiều thuận lợi trong tác chiến và ít chịu ảnh hưởng từ thay đổi quy hoạch khu vực sân đỗ khi triển khai các nhiệm vụ khác nhau.



Hình 3. Ụ lắp ghép dã chiến bảo vệ máy bay trên căn cứ không quân của Nga.

Từ những lý do trên, nghiên cứu này sử dụng phương pháp mô phỏng số bằng phần mềm Abaqus để đánh giá khả năng kháng xuyên của một số loại cát, làm cơ sở đề xuất một giải pháp kết cấu bảo vệ dạng ụ lắp ghép từ các mô đun cấu kiện địa kỹ thuật chứa vật liệu trơ. Đây là loại kết cấu lắp ghép nhanh, dễ tháo dỡ và có khả năng kháng xuyên tương đối tốt. Ưu điểm của giải pháp đề xuất là chi phí thấp, khả năng cơ động cao, có thể dễ dàng thay đổi vị trí hoặc điều chỉnh cấu trúc bảo vệ mà không cần mất nhiều thời gian thi công, đáp ứng yêu cầu linh hoạt trong các điều kiện phức tạp.

2. Cơ sở lý thuyết bài toán tính xuyên

Khi tính toán bài toán xuyên của vật thể xuyên trong môi trường được nghiên cứu bởi nhiều nước như Nga, Anh, Mỹ, Thụy Điển, Úc,... Trong đó, tại Việt Nam hiện nay, khi xét đến bài toán xuyên của vật thể xuyên, phổ biến nhất có thể xem xét sử dụng công thức lý thuyết thực nghiệm của Bê-rê-gian (1) [1-4].

$$h_x = \lambda_1 \lambda_2 K_x \frac{P}{d^2} V_0 \cos\left(\frac{1+n}{2}\alpha\right) \quad (1)$$

trong đó: h_x là chiều sâu xuyên của vật thể xuyên (m); P là trọng lượng vật thể xuyên (kg); V_0 là tốc độ của vật thể xuyên ngay trước khi va chạm (m/s); α là góc chạm của vật thể xuyên (độ); n là hệ số đổi hướng của vật thể xuyên trong môi trường tính theo kết quả thực nghiệm, đối với các môi trường đất mềm thì chọn $n=1$.

λ_1 là hệ số phụ thuộc phần thon của vật thể xuyên được tính theo công thức (2).

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{l_t}{1,5d}} \quad (2)$$

trong đó: l_t là chiều dài phần thon đầu vật thể xuyên (m), với $1,5d \leq l_t \leq 2,5d$; d là đường kính thân vật thể xuyên (m); λ_2 là hệ số xác định theo công thức (3).

$$\lambda_2 = 2,8\sqrt[3]{d} - 1,3\sqrt{d} \quad (3)$$

K_x là hệ số xuyên được xác định cho các loại vật liệu đất, cát tại bảng 1.

Bảng 1. Xác định hệ số xuyên K_x đối với vật liệu đất, cát [1].

| STT | Loại môi trường | Hệ số K_x |
|-----|----------------------------|---------------------|
| 1 | Cát chặt có độ ẩm tự nhiên | 45.10 ⁻⁷ |
| 2 | Cát ngậm nước | 68.10 ⁻⁷ |
| 3 | Cát lấp (không đầm lèn) | 90.10 ⁻⁷ |
| 4 | Á cát | 50.10 ⁻⁷ |
| 5 | Á sét | 60.10 ⁻⁷ |
| 6 | Đất sét chặt trung bình | 70.10 ⁻⁷ |

Để xác định chiều sâu xuyên theo lời giải giải tích, ta sử dụng các thông số của vật thể xuyên theo bảng 2.

Bảng 2. Thông số cơ bản của vật thể xuyên [5, 6].

| STT | Chỉ tiêu | Đơn vị | Thông số |
|-----|---------------------------|--------|----------|
| 1 | Đường kính d | mm | 12,979 |
| 2 | Chiều dài L | mm | 64,6 |
| 3 | Chiều dài phần thon L_1 | mm | 33,30 |
| 4 | Khối lượng | g | 51,30 |
| 5 | Tốc độ chạm mục tiêu | m/s | 500 |
| 6 | Góc chạm mục tiêu | độ | 0 |

Khi đó, với các loại vật liệu đất, cát ở trạng thái khác nhau (bảng 1), xác định được chiều sâu xuyên khác nhau theo lời giải giải tích theo công thức (1), nhận được kết quả tại bảng 3.

Bảng 3. Tổng hợp kết quả chiều sâu xuyên đối với các loại môi trường.

| STT | Loại môi trường | Hệ số K_x | Chiều sâu xuyên h_x (m) |
|-----|----------------------------|---------------------|---------------------------|
| 1 | Cát chặt có độ ẩm tự nhiên | 45.10 ⁻⁷ | 0,45 |
| 2 | Cát ngậm nước | 68.10 ⁻⁷ | 0,69 |
| 3 | Cát lấp (không đầm lèn) | 90.10 ⁻⁷ | 0,91 |
| 4 | Á cát | 50.10 ⁻⁷ | 0,51 |
| 5 | Á sét | 60.10 ⁻⁷ | 0,61 |
| 6 | Đất sét chặt trung bình | 70.10 ⁻⁷ | 0,71 |

3. Thiết lập mô hình tính và mô phỏng số

3.1. Các thông số đầu vào thiết lập mô hình tính

Các thông số hình học mô đun điển hình: Trên cơ sở tính toán theo phương pháp lý thuyết, chiều sâu xuyên lớn nhất là 0,91 m đối với loại vật liệu cát lấp (không đầm lèn). Để đảm bảo an toàn khi thiết kế, chế tạo mô đun cấu kiện, nhóm tác giả đề xuất kích thước điển hình cho 1 mô đun cấu kiện là 1x1x1,1 m. Việc lựa chọn kích thước thành có thể lắp ụ đạt chiều cao từ 3,3÷4,4 m khi xếp từ 3÷4 tầng, đáp ứng cơ bản cho phần thân chính của các loại tàu bay quân sự, là các đối tượng cần được bảo vệ trong các tình huống đặc biệt.

Thông số vải địa kỹ thuật lớp bảo vệ: Nhóm tác giả đề xuất sử dụng loại vải địa kỹ thuật không dệt ART25. Vải địa kỹ thuật không dệt ART25 được sản xuất từ polypropylene (PP), một loại polymer bền bỉ, có tính kháng cao với môi trường và khả năng chịu lực tốt. Chất liệu polypropylene giúp vải ART25 chống lại hóa chất và độ ẩm, đồng thời giữ ổn định trong các điều kiện khắc nghiệt, giúp duy trì hiệu quả trong các ứng dụng dài hạn (bảng 4).

Bảng 4. Các chỉ tiêu kỹ thuật vải địa kỹ thuật không dệt ART25 [7].

| STT | Chỉ tiêu | Phương pháp thử | Đơn vị | ART25 |
|-----|---|-----------------|-----------------------|-------|
| 1 | Cường độ chịu kéo (Tensile strength) | ASTM D 4595 | kN/m | 25 |
| 2 | Dãn dài khi đứt (Elongation at break) | ASTM D 4595 | % | 50/80 |
| 3 | Kháng xé hình thang (Trapezoidal tear strength) | ASTM D 4533 | N | 520 |
| 4 | Sức kháng thủng thanh (Puncture resistance) | ASTM D 4833 | N | 750 |
| 5 | Sức kháng thủng CBR (CBR puncture resistance) | DIN 54307 | N | 4000 |
| 6 | Rơi côn (Cone drop) | BS 6906/6 | mm | 11 |
| 7 | Hệ số thấm tại 100 mm (Permeability at 100 mm) | BS 6906/3 | l/m ² /giờ | 60 |
| 8 | Kích thước lỗ O_{90} (Opening size O_{90}) | EN ISO 12956 | micron | 70 |
| 9 | Độ dày P=2 kPa (Thickness under 2 kPa) | ASTM D 5199 | Mm | 2 |
| 10 | Trọng lượng (Mass per unit area) | ASTM D 5261 | g/m ² | 315 |

Thông số vật liệu nhồi: Vật liệu trơ được đề xuất để đổ đầy vào các bao vải địa kỹ thuật là các vật liệu địa phương, có sẵn, nhờ đó tận dụng tối đa nguồn vật liệu tự nhiên ngay tại chỗ. Loại vật liệu này không chỉ đáp ứng tiêu chuẩn tro về mặt hóa học, nghĩa là không phản ứng hoặc phân hủy khi tiếp xúc với các yếu tố môi trường, mà còn có ưu điểm ổn định cơ học cao khi được đầm nén vào các cấu kiện bao.

Trong bài toán xét hai loại vật liệu đổ đầy bao gồm cát đỏ tại TP Phan Thiết (Bình Thuận) và là cát sạn san hô tại các quần đảo xa bờ ở khu vực biển Đông, Việt Nam. Các thông số cơ lý của hai loại vật liệu này được thể hiện ở bảng 5.

Bảng 5. Chỉ tiêu cơ lý đối với cát đỏ Phan Thiết [8-12] và cát sạn san hô [13].

| STT | Chỉ tiêu | Đơn vị | Giá trị | |
|-----|---------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | Cát đỏ Phan Thiết | Cát sạn san hô |
| 1 | Khối lượng riêng | kg/m ³ | 1610 | 2077 |
| 2 | Mô đun Young | N/m ² | 20,59x10 ⁶ | 30,86x10 ⁶ |
| 3 | Hệ số Poisson | | 0,35 | 0,34 |
| 4 | Lực dính | N/m ² | 28,85x10 ³ | 29,83x10 ³ |
| 5 | Góc ma sát trong | độ | 34,8 | 46,49 |
| 6 | Góc trương nở | độ | - | 9,52 |
| 7 | Góc ma sát ngoài với thép | độ | - | 30,66 |

Do chưa có số liệu thí nghiệm về hệ số ma sát giữa cát đỏ Phan Thiết và thép nên nhóm tác giả tính toán hệ số ma sát giữa cát và bề mặt thép theo công thức (4) [14-16].

$$\mu = \operatorname{tg}\phi \quad (4)$$

trong đó: μ là hệ số ma sát giữa cát và bề mặt thép; ϕ là góc ma sát ngoài giữa cát và bề mặt thép, được tính theo công thức (5) [15].

$$\phi = \frac{2}{3}\varphi \quad (5)$$

trong đó: φ là góc ma sát trong của đất, cát.

Ta có hệ số ma sát giữa cát đỏ Phan Thiết và bề mặt thép:

$$\phi_{PT} = \frac{2}{3}\varphi_{PT} = \frac{2}{3} \cdot 34,8^\circ = 23,2^\circ \rightarrow \mu_{PT} = \operatorname{tg}\phi_{PT} = \operatorname{tg}23,2^\circ = 0,43$$

Hệ số ma sát giữa thép và cát sạn san hô được tính theo công thức (4) và cho kết quả như sau:

$$\mu_{SH} = \operatorname{tg}\phi_{SH} = \operatorname{tg}30,66^\circ = 0,59$$

3.2. Mô phỏng số bằng phần mềm Abaqus

Abaqus là một phần mềm mô phỏng số sử dụng các phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), phần tử rời rạc (DEM) và phần tử hạt không lưới (SPH) để giải quyết cho các bài toán khác nhau. Đặc biệt, thích hợp cho việc phân tích các bài toán động lực học phi tuyến với các sự kiện va chạm và biến dạng phức tạp. Phần mềm này sử dụng phương pháp phân tích theo bước thời gian ngắn để giải quyết các vấn đề liên quan đến va chạm, nổ và các hiện tượng động lực học khác. Nhờ vào khả năng xử lý các điều kiện biên và tải trọng phức tạp, Abaqus được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, từ thiết kế kết cấu đến phân tích an toàn cho các thiết bị quân sự và công nghiệp, hỗ trợ tối ưu hóa thiết kế và nâng cao độ tin cậy của sản phẩm.

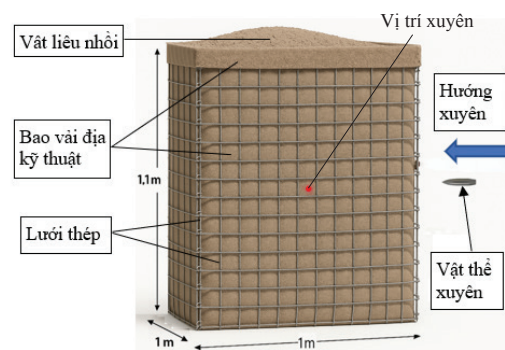
Nghiên cứu này sử dụng phương pháp hạt không lưới hay thủy động lực học hạt mịn (Smoothed Particle Hydrodynamics-SPH), một phương pháp mô phỏng được tích hợp sẵn trong Abaqus nhằm mô phỏng các bài toán biến dạng lớn, đặc biệt là hiện tượng xuyên phá trong môi trường hạt rời như cát sạn san hô, cát đỏ. Phương pháp SPH cho phép vật liệu biến dạng tự do, không bị phụ thuộc vào dạng hình học phần tử như FEM, nhờ đó tránh được hiện tượng suy biến phần tử (element distortion) trong các bài toán xuyên sâu, năng lượng cao. Hơn nữa, SPH có thể mô tả tốt hiện tượng dòng chảy hạt rời, phân tán vật liệu, rất phù hợp với môi trường đất rời.

Nghiên cứu này tập trung mô phỏng bài toán vật thể xuyên vào cấu kiện ụ đã chiến bảo vệ tàu bay. Trong bài toán xuyên này, sự đóng góp của bao vải địa kỹ thuật và lưới thép vào tác dụng chống xuyên là không đáng kể [16], do đó để đơn giản hóa nhưng vẫn đạt được độ chính xác ở mức chấp nhận được, nhóm tác giả không xét đến sự làm việc của bao vải địa kỹ thuật. Ngoài ra, chiều dày vải 2 mm rất nhỏ so với chiều dày khối cát, giả thiết vị trí xuyên vào giữa ô lưới, do đó quá trình mô phỏng xác định chiều sâu xuyên, để thiên về an toàn, bỏ qua ảnh hưởng lớp vật liệu vỏ và lớp lưới.

Đối với bài toán va chạm của vật thể xuyên với vật liệu đất, cát có thể mô phỏng theo mô hình Mohr - Coulomb; mô hình Cam Clay; mô hình tái bền động học Hypoplastic. Trong phạm vi nghiên cứu của bài báo, các tác giả sử dụng mô hình đàn dẻo lý tưởng Mohr - Coulomb để mô hình hoá vật liệu đất, cát do tính đơn giản, các tham số dễ xác định qua thí nghiệm và khả năng mô phỏng phù hợp với ứng xử cơ học của vật liệu trong bài toán xuyên.

Loại vật thể xuyên được sử dụng trong mô phỏng là vật thể xuyên bằng vật liệu thép với các thông số kỹ thuật được thể hiện trong bảng 2. Trong mô phỏng này, coi vật thể xuyên là tuyệt đối cứng và giả thiết vật thể xuyên bay thẳng vuông góc với cấu kiện, không xét đến chuyển động xoay của vật thể xuyên. Mô phỏng với trường hợp vật thể xuyên va chạm với kết cấu ụ bảo vệ tàu bay với vận tốc của vật thể khi va chạm là 500 m/s.

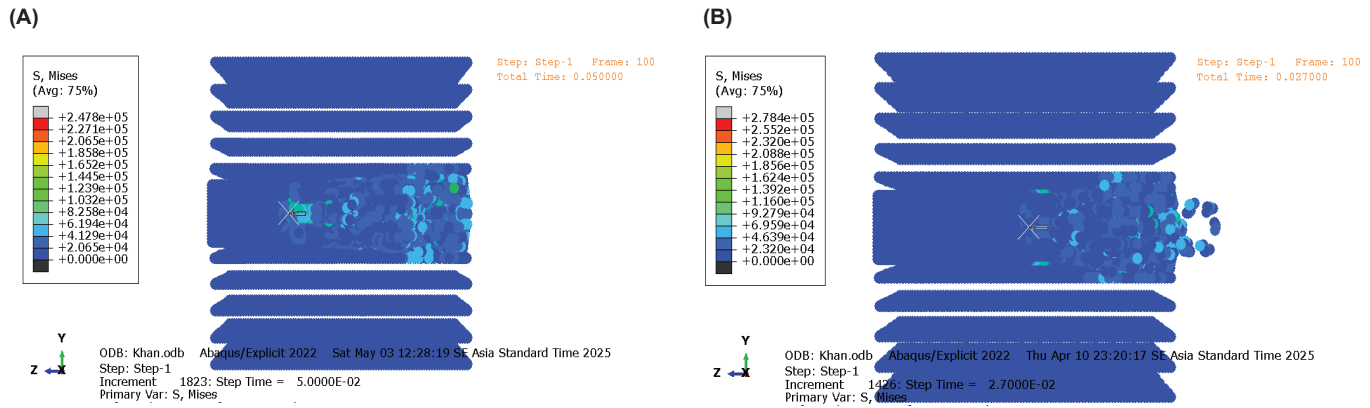
Vật thể xuyên có kích thước rất nhỏ so với môi trường xuyên, do vậy điều kiện biên được khống chế theo các phương của cạnh khối lập phương bao cát (hình 4).



Hình 4. Mô hình bài toán.

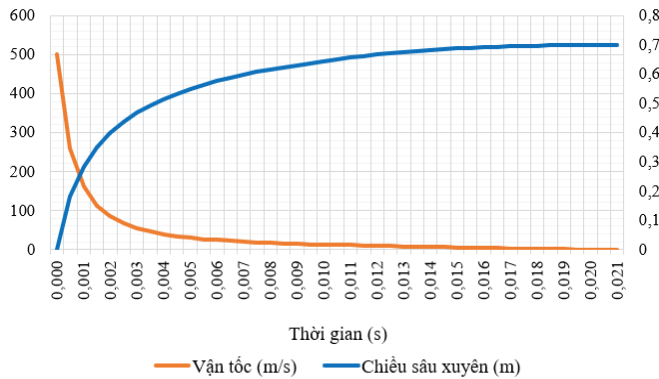
4. Kết quả và bàn luận

Kết quả mô phỏng số bằng phần mềm Abaqus được thể hiện trong hình 5A đối với cát đỏ Phan Thiết và hình 5B đối với cát sạn san hô tại các quần đảo ở khu vực biển Đông, Việt Nam.

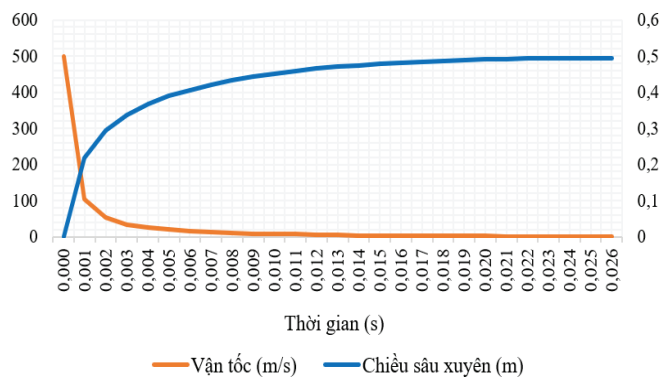


Hình 5. Mô phỏng số tác dụng xuyên của vật thể xuyên vào vật liệu cát đỏ Phan Thiết (A) và cát sạn san hô (B).

Căn cứ kết quả mô phỏng, ta thiết lập được biểu đồ xác định sự phụ thuộc của chiều sâu xuyên với thời gian chuyển động và vận tốc của vật thể xuyên trong hai môi trường vật liệu nghiên cứu thể hiện trên các hình 6 và 7.



Hình 6. Chiều sâu xuyên và vận tốc đầu đạn theo thời gian đối với cát đỏ Phan Thiết.



Hình 7. Chiều sâu xuyên và vận tốc đầu đạn theo thời gian đối với cát sạn san hô.

Kết quả mô phỏng số chỉ ra rằng: Chiều sâu xuyên đối với trường hợp vật liệu cát đỏ Phan Thiết là 0,700 m đạt được tại thời điểm $t=0,021$ giây; đối với vật liệu cát sạn san hô tại các quần đảo ở khu vực biển Đông, Việt Nam là 0,495 m tại thời điểm $t=0,026$ giây.

Thông qua kết quả chiều sâu xuyên, có thể xác định hệ số K_x của cát đỏ Phan Thiết và cát sạn san hô tại quần đảo xa bờ của Việt Nam theo công thức (1), nhận được kết quả như sau: $K_x^{PT} = 69,3 \times 10^{-7}$; $K_x^{SH} = 49,0 \times 10^{-7}$.

Thông qua kết quả mô phỏng, có thể nhận thấy cát sạn san hô có khả năng kháng xuyên tốt hơn so với cát đỏ Phan Thiết, điều này do mô đun cỡ hạt và đặc tính móc xếp của các hạt với nhau đối với cát sạn san hô tốt hơn nhiều so với các hạt mịn của cát đỏ Phan Thiết. Điều này cũng đã được khẳng định qua các nghiên cứu về cát sạn san hô [13, 17-24] và cát đỏ Phan Thiết [8-12].

Kết quả h_x , K_x đối với 2 loại vật liệu thông qua mô phỏng là cơ sở ban đầu để lựa chọn mô hình thử nghiệm. Để có được kết quả chính xác, cần thông qua thí nghiệm nhiều lần về hệ số ma sát giữa vật liệu vật thể xuyên và cát, thí nghiệm thực tế khả năng xuyên của vật thể xuyên tốc độ cao vào môi trường các loại vật liệu cát khác nhau, với các độ chặt, độ ẩm khác nhau.

Trong khuôn khổ nghiên cứu mô phỏng của bài báo bằng phần mềm Abaqus, kết quả cho thấy hiệu quả chống xuyên đáng kể của vật liệu cát sạn san hô. Điều này mở ra khả năng tận dụng vật liệu này tại các vị trí biển đảo xa bờ của Việt Nam, đặc biệt trong việc xây dựng các kết cấu dã chiến bảo vệ con người, bảo vệ các phương tiện có giá trị cao tại vùng biển đảo.

5. Kết luận

Trên cơ sở nghiên cứu mô phỏng số bằng phần mềm Abaqus, xác định chiều sâu xuyên của vật thể xuyên vào môi trường cát sạn san hô tại vùng biển đảo xa bờ Việt Nam và cát đỏ Phan Thiết nhận thấy, khả năng kháng xuyên của vật liệu cát sạn san hô tốt hơn so với cát đỏ Phan Thiết với hệ số xuyên lần lượt là $K_x^{PT}=69,3 \times 10^{-7}$, $K_x^{SH}=49,0 \times 10^{-7}$ và chiều sâu xuyên tương ứng là $h_x^{PT}=0,700$ m, $h_x^{SH}=0,495$ m.

Hệ số xuyên này cũng phù hợp với các hệ số xuyên đối với môi trường đất, cát theo công bố trong các tài liệu của Nga và Việt Nam.

Dựa trên kết quả nghiên cứu về chiều sâu xuyên và hệ số xuyên, có thể đề xuất các phương án thử nghiệm thực tế để đánh giá khả năng kháng xuyên của các loại vật liệu khác nhau. Những kết quả này sẽ là cơ sở quan trọng để đưa ra giải pháp kết cấu ụ lắp ghép hiệu quả, đảm bảo bảo vệ tàu bay trong các điều kiện khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A.A. Lisogor (1958), *Protective Structures of Defensive Structures and Their Calculation (Manual for Students on Fortification)*, Bibliography, Moscow, 67pp (in Russian).
- [2] N.N. Thuy, V.D. Loi, T.M. Hoang (2021), “Experimental study on determining the penetration depth of projectiles into concrete”, *Journal of Building Materials Research and Development*, **11(3)**, pp.62-66, DOI: 10.54772/jomc.3.2021.74 (in Vietnamese).
- [3] N.X. Bang, N.T. Ta (2021), “Studying the effect of projectile velocity on penetration depth in concrete with the simplified concrete damage plasticity model by abaqus software”, *Journal of Science and Technique, Section on Special Construction Engineering*, **4(1)**, pp.109-117, DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v4.n01.337.sce.
- [4] N.T. Ta, H.Q. Tuan (2017), “Calculate the penetration depth of bomb into different structure by particle flow code”, *Journal of Construction*, **7**, pp.152-154 (in Vietnamese).
- [5] M.S. Pešić, A.B. Živković, A.D. Aničić, et al. (2022), “Numerical analysis of a frontal impact of a 12.7 mm projectile on an armor plate”, *Vojnotehnicki Glasnik/Military Technical Courier*, **70(4)**, pp.897-923, DOI: 10.5937/vojtehg70-38412.
- [6] T. Børvik, S. Dey, L. Olovsson (2014), “Penetration of granular materials by small-arms bullets”, *International Journal of Impact Engineering*, **75**, pp.1-15, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.016.
- [7] H.T. Viet (2025), “ART25 geotextile fabric”, <https://hatangviet.com/san-pham/vai-dia-ky-thuat-art25/>, accessed 9 March 2025 (in Vietnamese).
- [8] D.V. Thuy, N.V. Hieu, P.D. Tiep, et al. (2023a), “Research on applicability natural red sand for the subgrade of highway construction by experiment in the laboratory”, *Journal of Science and Technique, Section on Special Construction Engineering*, **6(2)**, pp.7-20, DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v6.n02.735.sce.
- [9] Airport Design and Construction Consultancy One Member Limited Liability Company ADCC (2021), *Design Explanation for The Construction Drawing of The Investment Project for a Military Airport in Phan Thiet, Binh Thuan Province, Including: Groundworks and Coordination, Temporary Access Roads for Construction, and Construction of a Water Supply System for Construction Activities* (in Vietnamese).
- [10] D.V. Thuy, P.D. Tiep, N.V. Hieu, et al. (2023b), “Influence of loading and relative compaction on liquefaction behavior of reconstituted sand in cyclic triaxial tests”, *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, **45(6)**, pp.1813-1823, DOI: 10.16285/j.rsm.2023.0673 (in Chinese).
- [11] N.Q. Loc (2012), *Study on Stratigraphy and Sediments of Red Sand in The Phan Thiet Area and Assessment of Related Mineral Potential*, Master’s Thesis in Geology, University of Science - VNU - HN (in Vietnamese).
- [12] Department for Roads of Vietnam (2022), *TCCS 38:2022/TCDBVN Flexible Pavement Design - Specification and Guidelines*, 53pp (in Vietnamese).
- [13] N.T. Sang (2024), *Study on The Performance of Helical Steel Pipe Piles in a Coral Sand-Gravel Foundation*, Doctoral thesis in engineering, Le Quy Don Technical University, 150pp (in Vietnamese).
- [14] C. Yang, L. Ding, D. Tang, et al. (2020), “Improved Terzaghi-theory-based interaction modeling of rotary robotic locomotors with granular substrates”, *Mechanism and Machine Theory*, **152**, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103901.
- [15] Ministry of Science and Technology of Vietnam (2014), *TCVN 10304:2014 Pile Foundation - Design Standard*, 81pp (in Vietnamese).
- [16] G. Maselli (2017), *Mitigation of Blast Wave in Drainage of War Devices Near Civil Structures*, Master of civil engineering, University of Rome “La Sapienza”, 106pp.
- [17] V.A. Tuan, P.D. Phong, V.V. Hoang (2022), “Shear strength behaviour of a coral sand in Vietnam”, *Proceedings of The 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia, pp.251-254.
- [18] M.D. Nhan, V.A. Tuan, P.D. Tiep, et al. (2019), “Study on shear strength characteristics of coral sand subjected to cyclic load by direct shear test”, *Journal of Science and Technique, Section on Special Construction Engineering*, **2(1)**, pp.22-29, DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v2.n01.316.sce.
- [19] P.D. Tiep, N.T. Lai, V.A. Tuan (2019), “Experimental study on strength parameters of coral sand by automatic direct shear device”, *Journal of Science and Technique, Section on Special Construction Engineering*, **2(2)**, pp.7-16, DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v2.n02.225.sce.
- [20] K. Dewi, V.A. Tuan, T. Matsumoto (2016), “Numerical study on behaviour of single piles in a coral sand”, *Soft Soils*, pp.27-28.
- [21] V.A. Tuan (2021), “Shear strength behaviour of coral gravelly sand subjected to monotonic and cyclic loading”, *Geomechanics and Engineering*, **25(2)**, pp.89-98, DOI: 10.12989/gae.2021.25.2.089.
- [22] P.D. Tiep, T.N. Hung, N.T. Lai (2024), “Dynamic characteristics of saturated dense coral sand samples”, *Journal of Science and Technique, Section on Special Construction Engineering*, **7(2)**, pp.94-105, DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v7.n02.884.sce.
- [23] C.V. Hoa, V.A. Tuan, N.T. Sang, et al. (2021), “Effect of grain size on shear strength of coral gravel sand”, *Proceedings of The 3rd International Conference on Sustainability in Civil Engineering, Lecture Notes in Civil Engineering*, **145**, pp.87-95, DOI: 10.1007/978-981-16-0053-1_11.
- [24] N.T. Sang, N.T. Lai, P.D. Tiep (2023), “Experimental study of interface shear characteristics between calcareous soil and steel, application to estimate axial bearing capacity of steel pile”, *Journal of Building Science and Technology*, **1**, pp.41-48, DOI: 10.59382/j-ibst.2023.en.vol1-5.