

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH TỐI ƯU HÓA LỰA CHỌN CHIỀU CAO RƠI BÚA TRONG THÍ NGHIỆM ĐỘNG BIẾN DẠNG LỚN DỰA TRÊN PHƯƠNG TRÌNH SÓNG

DEVELOPMENT OF AN OPTIMIZATION FRAMEWORK FOR HAMMER DROP HEIGHT SELECTION IN HIGH-STRAIN DYNAMIC PILE TESTING BASED ON WAVE EQUATION ANALYSIS

Nguyễn Chí Tiên¹

¹ Công ty Cổ phần Tư vấn Công nghệ Xây dựng Sài Gòn (SACOTEC), TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Email: meng.tien1982@gmail.com

Website: <https://sacotec.org/>

TÓM TẮT

Chiều cao rơi của búa là thông số quyết định đến mức năng lượng truyền vào cọc, chất lượng tín hiệu và độ tin cậy của thí nghiệm động biến dạng lớn (PDA). Tuy nhiên, các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật hiện hành như ASTM D4945, TCVN 11321:2016, FHWA GEC No.12 và PDA Handbook chưa đưa ra phương pháp định lượng để lựa chọn chiều cao rơi phù hợp đối với từng điều kiện cọc, búa và nền đất. Trong thực tế, thông số này chủ yếu được xác định dựa trên kinh nghiệm hoặc các công thức năng lượng truyền thống, dẫn đến nguy cơ tạo ứng suất động quá lớn hoặc không huy động đủ sức kháng của cọc.

Nghiên cứu này tổng hợp cơ sở lý thuyết về truyền sóng ứng suất, động lực học va chạm và phân tích Wave Equation, đồng thời phân tích các quy định trong các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật hiện hành. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất mô hình SACOTEC Hammer Drop Height Model (SHDM) nhằm hỗ trợ lựa chọn chiều cao rơi ban đầu cho thí nghiệm PDA thông qua việc xem xét đồng thời đặc tính cọc, đặc trưng nền đất, năng lượng truyền, giới hạn ứng suất động và chất lượng tín hiệu đo. Mô hình được xây dựng như một khung phương pháp luận có thể tiếp tục hiệu chỉnh và kiểm chứng bằng mô phỏng Wave Equation, phân tích CAPWAP và kết quả thử tải tĩnh. Kết quả nghiên cứu góp phần xây dựng cơ sở khoa học cho việc chuẩn hóa quá trình lựa chọn chiều cao rơi và định hướng phát triển các công cụ hỗ trợ thiết kế, thi công và kiểm định cọc trong tương lai.

Từ khóa: Thí nghiệm động biến dạng lớn (PDA); chiều cao rơi búa; truyền sóng ứng suất; Wave Equation; SHDM; CAPWAP; cọc móng.

ABSTRACT

Hammer drop height is a key parameter governing the amount of energy transferred to a pile, the quality of the measured signal, and the reliability of High-Strain Dynamic Testing (PDA). However, existing standards and technical guidelines, including ASTM D4945, TCVN 11321:2016, FHWA GEC No. 12, and the PDA Handbook, do not provide a quantitative procedure for selecting an appropriate hammer drop height under different pile, hammer, and soil conditions. In engineering practice, this parameter is generally determined based on experience or conventional impact-energy equations, which may result in excessive dynamic stresses or insufficient mobilization of pile resistance.

This study reviews the theoretical background of stress-wave propagation, impact dynamics, and Wave Equation analysis, together with the requirements and recommendations of current standards and technical guidelines. Based on this review, the SACOTEC Hammer Drop Height Model (SHDM) is proposed as a methodological framework for selecting the initial hammer drop height in PDA testing by integrating pile characteristics, soil conditions, transferred energy, allowable dynamic stresses, and signal quality. The proposed framework is intended to be further calibrated and validated using Wave Equation simulations, CAPWAP analyses, and static load test data. The study provides a scientific basis for standardizing hammer drop height selection and establishes a foundation for future decision-support tools in pile design, construction, and dynamic testing.

Keywords: High-Strain Dynamic Testing (PDA); Hammer Drop Height; Stress-Wave Propagation; Wave Equation; SHDM; CAPWAP; Deep Foundations.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

1. Đặt vấn đề

Trong hơn năm thập kỷ qua, thí nghiệm động biến dạng lớn (High-Strain Dynamic Testing – PDA) đã trở thành một trong những phương pháp quan trọng nhất để đánh giá sức chịu tải của cọc móng. Phương pháp này được phát triển từ lý thuyết truyền sóng ứng suất trong thanh đàn hồi của Smith (1960), sau đó được Case Western Reserve University phát triển thành Case Method, và hiện nay được thương mại hóa bởi Pile Dynamics, Inc. (PDI) thông qua hệ thống PDA và phần mềm CAPWAP.

Ngày nay, PDA được áp dụng rộng rãi tại Hoa Kỳ, châu Âu, Nhật Bản, Hàn Quốc, Singapore, Úc và nhiều quốc gia khác nhờ các ưu điểm:

- Thời gian thí nghiệm ngắn;
- Chi phí thấp hơn thử tải tĩnh;
- Đánh giá được sức chịu tải ngay tại hiện trường;
- Phát hiện vị trí và khuyết tật cọc;
- Kiểm soát chất lượng thi công.

Tại Việt Nam, PDA ngày càng được sử dụng nhiều trong các dự án công nghiệp, cầu cảng, điện gió, nhà cao tầng và hạ tầng giao thông.

Tuy nhiên, một trong những vấn đề kỹ thuật quan trọng nhưng chưa được nghiên cứu đầy đủ là xác định chiều cao rơi của búa.

2. Tính cấp thiết của nghiên cứu

Khảo sát thực tế tại nhiều công trình cho thấy việc lựa chọn chiều cao rơi hiện nay chủ yếu dựa trên kinh nghiệm hoặc các công thức tính năng lượng dùng cho thi công cọc đóng, chẳng hạn: $E = Q.H$ hoặc $E = 1,75.a.P$ (theo TCVN 9394:2012).

Các công thức này được xây dựng nhằm:

- Bảo đảm cọc xuyên xuống đất;
- Đạt độ chối thiết kế;
- Kiểm soát năng lượng thi công.

Trong khi đó, mục tiêu của thí nghiệm PDA hoàn toàn khác. Thí nghiệm PDA không nhằm đóng cọc mà nhằm tạo ra một xung ứng suất đủ lớn để:

- Huy động sức kháng của đất;
- Ghi nhận tín hiệu sóng ứng suất;
- Xác định sức chịu tải thông qua phương pháp CASE hoặc CAPWAP.

Do đó, việc áp dụng trực tiếp công thức năng lượng thi công để xác định chiều cao rơi trong PDA có thể dẫn đến:

- Chiều cao rơi quá lớn;
- Ứng suất nén vượt giới hạn;
- Nứt đầu cọc;
- Hư hỏng đệm;
- Chất lượng tín hiệu không tối ưu.

Ngược lại, nếu chiều cao rơi quá thấp sẽ dẫn đến:

- Sóng phản xạ yếu;
- Chưa huy động đủ ma sát;
- Capwap đánh giá thấp sức chịu tải;
- Kết quả thiếu tin cậy.

Như vậy, việc lựa chọn chiều cao rơi là một bài toán cân bằng giữa khả năng huy động sức kháng và an toàn cho cọc, chứ không đơn thuần là đạt một giá trị năng lượng.

3. Khoảng trống nghiên cứu

Qua tổng hợp các tài liệu hiện hành có thể nhận thấy:

- ASTM D4945:2026 - Quy định yêu cầu đối với phép thử nhưng không đưa ra công thức lựa chọn chiều cao rơi.
- TCVN 11321:2016 - Hướng dẫn phương pháp PDA nhưng chưa xây dựng quy trình lựa chọn búa và chiều cao rơi.
- FHWA GEC No.12 - Trình bày phân tích Wave Equation và lựa chọn hệ búa, song không đề xuất bảng tra cụ thể cho PDA.
- PDA Handbook - PDI Inc. - Khuyến nghị tăng dần chiều cao rơi dựa trên chất lượng tín hiệu và ứng suất, nhưng chủ yếu ở dạng hướng dẫn thực hành.

Đến nay, chưa có tài liệu nào tích hợp các yếu tố: Năng lượng va đập; Lý thuyết sóng; Giới hạn ứng suất; Hiệu suất truyền năng lượng; Đặc tính cọc và nền đất để xây dựng một quy trình lựa chọn chiều cao rơi phù hợp với điều kiện thực tế. Đây chính là khoảng trống mà nghiên cứu này hướng tới.

4. Mục tiêu nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện với các mục tiêu:

1. Phân tích cơ sở lý thuyết của việc lựa chọn chiều cao rơi trong PDA.
2. So sánh các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật hiện hành.
3. Làm rõ sự khác biệt giữa lựa chọn búa trong thi công và trong PDA.
4. Phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến chiều cao rơi.
5. Đề xuất quy trình lựa chọn chiều cao rơi có cơ sở khoa học và phù hợp với điều kiện Việt Nam.

6. Xây dựng bảng tra và lưu đồ hỗ trợ kỹ sư hiện trường.

5. Phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu tập trung vào các loại cọc: Cọc bê tông cốt thép; cọc bê tông ly tâm ứng lực trước (PHC/PHCA), cọc thép. Các loại búa được lựa chọn nghiên cứu: búa rơi tự do; búa diesel (đơn động; song động) và búa thủy lực.

Đối tượng là thí nghiệm PDA phục vụ đánh giá sức chịu tải, không đi sâu vào bài toán tối ưu hóa thi công đóng cọc.

6. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng kết hợp:

- Phân tích tài liệu từ ASTM, FHWA, PDI, Eurocode, JGS và TCVN;
- Phân tích cơ học truyền sóng và Wave Equation;
- Tổng hợp kinh nghiệm thực tiễn từ các dự án PDA;
- Đề xuất mô hình lựa chọn chiều cao rơi và kiểm chứng bằng ví dụ tính toán.

7. Điểm mới dự kiến

Các đóng góp chính của nghiên cứu gồm:

- Phân biệt rõ cơ sở lựa chọn chiều cao rơi trong PDA với thi công cọc.
- Đề xuất quy trình lựa chọn chiều cao rơi theo các yếu tố: tải thiết kế, loại cọc, nền đất, ứng suất và chất lượng tín hiệu.
- Xây dựng bảng khuyến nghị chiều cao rơi ban đầu và nguyên tắc điều chỉnh trong quá trình thử.
- Đề xuất khung kỹ thuật có thể sử dụng để xây dựng SOP nội bộ hoặc làm cơ sở tham khảo khi hoàn thiện hướng dẫn kỹ thuật trong nước.

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT XÁC ĐỊNH CHIỀU CAO RƠI BÚA TRONG THÍ NGHIỆM ĐỘNG BIẾN DẠNG LỚN (PDA)

1. GIỚI THIỆU

Chiều cao rơi của búa trong thí nghiệm PDA là một trong những thông số ảnh hưởng trực tiếp đến:

- Ứng suất sinh ra trong cọc;
- Biên độ sóng ứng suất;
- Mức huy động sức kháng đất;
- Chất lượng tín hiệu pda;
- Độ chính xác của phân tích capwap;
- Độ an toàn của cọc.

Khác với thi công cọc đóng, nơi mục tiêu là truyền đủ năng lượng để cọc xuyên xuống đất, PDA yêu cầu tạo ra một xung ứng suất có biên dạng và cường độ phù hợp để phục vụ đo lường và phân tích.

Do đó, việc lựa chọn chiều cao rơi phải dựa trên cơ học truyền sóng, động lực học va chạm và giới hạn ứng suất của cọc, chứ không chỉ dựa trên thể năng thông thường.

2. SỰ PHÁT TRIỂN CỦA LÝ THUYẾT TRUYỀN SÓNG

+ *Saint-Venant (1867)*: Saint-Venant là người đầu tiên mô tả sự lan truyền ứng suất trong thanh đàn hồi. Ông chứng minh rằng: Một xung lực tác dụng tại đầu thanh sẽ không truyền ngay lập tức đến đầu còn lại mà lan truyền với một vận tốc hữu hạn. Đây chính là nền tảng của PDA.

+ *Timoshenko*: Phương trình sóng đàn hồi - Phương trình cơ bản của PDA.:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Trong đó:

- o u : chuyển vị
- o x : vị trí
- o t : thời gian
- o c : vận tốc truyền sóng

+ *Smith (1960)*: Smith là người đầu tiên xây dựng mô hình Wave Equation cho cọc. Mô hình này: chia cọc thành nhiều phần tử, mô hình hóa đất bằng lò xo và giảm chấn, mô phỏng toàn bộ quá trình va chạm. Cho đến nay đây vẫn là nền tảng của các phần mềm: GRLWEAP; TNOWAVE; ALLWAVE; WEAP.

+ *Case Method - Nền tảng của PDA hiện nay*: Khoảng năm 1968–1972, nhóm nghiên cứu tại Case Western Reserve University phát triển phương pháp CASE. Ý tưởng quan trọng nhất của phương pháp này là Không cần gắn cảm biến trong đất mà chỉ cần: lực tại đầu cọc và vận tốc tại đầu cọc là có thể tính sức chịu tải của cọc đó. Lý thuyết này có một số điểm như sau:

a. Sóng ứng suất trong cọc

Giả sử có một xung va chạm/ một búa va chạm vào đầu cọc, ngay sau va chạm thì xảy ra: Ứng suất nén, sóng nén, vận tốc, biến dạng. Sóng truyền xuống mũi

cọc với vận tốc $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

Trong đó:

- E: mô đun đàn hồi của vật liệu cọc;
- ρ : khối lượng riêng của vật liệu cọc.

Ví dụ: Cọc PHC có $E=4,0 \times 10^{10}$ Pa; $\rho=2500$ kg/m³. Khi đó: $c= 4000$ m/s. Giá trị này gần với kết quả đo thực tế của PDI.

b. Trở kháng của cọc

Một đại lượng rất quan trọng nhưng thường bị bỏ qua tại Việt Nam là trở kháng:

$Z = \frac{EA}{c}$. Trong đó: E : mô đun đàn hồi; A: Diện tích mặt cắt ngang và c là vận tốc sóng. Ý nghĩa của đại lượng này là: Trở kháng càng lớn $\Rightarrow$ lực sinh ra càng lớn $\Rightarrow$ ứng suất càng lớn. Ví dụ: Cọc D600mm có $A \approx 0,2827$ m², $E=40$ Gpa, $c=4000$ m/s khi đó $Z \approx 2,83$ MN·s/m. Đây là thông số quan trọng trong Wave Equation.

c. Quan hệ giữa lực và vận tốc

Theo lý thuyết sóng: $F = Z.v$; Trong đó: F là lực, v là vận tốc. Điều này rất quan trọng trong thí nghiệm PDA vì nó chứng minh rằng: “Không phải năng lượng mà vận tốc va chạm mới quyết định lực sinh ra”. Đây chính là lý do: Hai búa có cùng năng lượng nhưng chiều cao khác nhau sẽ cho tín hiệu PDA khác nhau.

d. Động năng của búa

Ngay trước va chạm động năng $E = \frac{1}{2}mv^2$ với $v = \sqrt{2gH}$

$\Rightarrow E = m.g.H$ và đây chính là công thức Q.H được dùng trong TCVN 9394. Nhưng PDA không dùng ở đây. Nhưng vì sao QH chưa đủ? Giả sử ta có hai trường hợp như sau:

- **TH1**: Búa 1 Tấn thả ở chiều cao 4.0m thì $E = 4$ Tấn.m
- **TH2**: Búa 4 tấn thả cao 1.0 m thì E vẫn là 4 Tấn.m

Cả hai trường hợp có năng lượng E bằng nhau nhưng vận tốc ở TH1 $\approx 8,9$ m/s và TH2 $\approx 4,4$ m/s. Rõ ràng, hai giá trị khác nhau rất lớn. Do đó, lực cực đại là không giống nhau và ứng suất cũng không giống nhau. Hơn nữa, tín hiệu PDA thu được cũng không giống nhau. Đây là điểm mà công thức năng lượng truyền thống không phản ánh được.

e. Ảnh hưởng của chiều cao rơi

Chiều cao tăng $\Rightarrow$ vận tốc tăng $\Rightarrow$ lực tăng $\Rightarrow$ ứng suất tăng $\Rightarrow$ CAPWAP huy động được nhiều sức kháng hơn. Nhưng đồng thời tăng nguy cơ: nứt đầu cọc, vỡ đệm đầu cọc và ứng suất kéo cũng tăng. Do đó, chiều cao rơi búa trong thí nghiệm PDA phải được lựa chọn tối ưu.

f. Ảnh hưởng của trọng lượng búa

Giả sử năng lượng không đổi nhưng nếu búa nặng hơn $\Rightarrow$ chiều cao thấp hơn $\Rightarrow$ vận tốc nhỏ hơn $\Rightarrow$ xung tác dụng sâu hơn $\Rightarrow$ phù hợp PDA hơn. Đó là lý do mà hãng PDI Inc thường khuyến nghị ưu tiên tăng trọng lượng búa trước rồi mới tăng chiều cao.

Đây là một nguyên tắc thực hành quan trọng, nhưng cần lưu ý rằng đây là khuyến nghị kỹ thuật, không phải quy định bắt buộc trong ASTM D4945 ở tất cả các phiên bản nên không có cơ sở pháp lý.

g. Hiệu suất truyền năng lượng

Trong thực tế không phải toàn bộ $E = m.g.h$ đều truyền vào cọc mà năng lượng truyền: $E_t = \eta.m.g.h$, trong đó η là hiệu suất của búa (Hammer Efficiency). Ví dụ: Với búa Diesel $\approx 0,70-0,85$; Búa thủy lực $\approx 0,85-0,95$ và Búa thả rơi tự do $\approx 0,90-1,00$. Như vậy, chiều cao rơi phải xét hiệu suất và đây là điểm rất quan trọng mà nhiều hướng dẫn hiện trường bỏ qua.

3. KẾT LUẬN CHƯƠNG

Từ các phân tích trên có thể rút ra năm nhận định cốt lõi như sau:

1. Chiều cao rơi quyết định vận tốc va chạm, không chỉ năng lượng va đập.
2. Lực cực đại và ứng suất trong cọc phụ thuộc đồng thời vào trọng lượng búa, vận tốc, trở kháng cọc và hệ đệm.
3. Hai tổ hợp búa có cùng năng lượng E nhưng khác trọng lượng và chiều cao sẽ không tạo ra cùng tín hiệu PDA.
4. Việc lựa chọn chiều cao rơi phải dựa trên cơ học truyền sóng và động lực học va chạm, không thể chỉ dựa vào công thức $E=QH$.
5. Đây là cơ sở để chuyển từ cách tiếp cận "năng lượng thi công" sang cách tiếp cận "ứng suất – sóng ứng suất – chất lượng tín hiệu" trong thí nghiệm PDA.

CHƯƠNG 3: TỔNG QUAN CÁC TIÊU CHUẨN VÀ HƯỚNG DẪN QUỐC TẾ VỀ LỰA CHỌN CHIỀU CAO RƠI TRONG THÍ NGHIỆM PDA

1. MỞ ĐẦU

Sự phát triển của phương pháp PDA trong hơn 50 năm qua gắn liền với nhiều tiêu chuẩn và tài liệu kỹ thuật quốc tế. Tuy nhiên, không có tài liệu nào quy định trực tiếp một công thức xác định chiều cao rơi búa áp dụng cho mọi trường hợp. Thay vào đó, các tài liệu đều tiếp cận theo hướng đảm bảo:

- + Huy động đủ sức kháng của nền đất;
- + Thu được tín hiệu chất lượng cao;
- + Không vượt quá giới hạn ứng suất của cọc;
- + Không gây hư hỏng đầu cọc hoặc hệ đệm.

Điều này cho thấy việc lựa chọn chiều cao rơi là một bài toán kỹ thuật tổng hợp, đòi hỏi kết hợp giữa lý thuyết, kinh nghiệm và phân tích số.

2. ASTM D4945:2026 – TIÊU CHUẨN THỬ ĐỘNG BIẾN DẠNG LỚN

2.1 Mục tiêu

ASTM D4945 là tiêu chuẩn được sử dụng rộng rãi nhất cho thí nghiệm PDA. Tiêu chuẩn quy định:

- Vị trí lắp cảm biến;
- Yêu cầu đối với cảm biến lực và gia tốc;
- Thu nhận tín hiệu;
- Xử lý dữ liệu;
- Yêu cầu về báo cáo kết quả.

Mục tiêu là đảm bảo phép thử có khả năng đánh giá sức chịu tải của cọc thông qua tín hiệu ứng suất và vận tốc.

2.2 Quy định về năng lượng va đập

ASTM D4945 không quy định:

- Trọng lượng búa tối thiểu;
- Chiều cao rơi tối thiểu;
- Chiều cao rơi tối đa;
- Công thức tính chiều cao rơi.

Thay vào đó, tiêu chuẩn yêu cầu: Năng lượng va đập phải đủ để huy động sức kháng đáng kể của cọc và đất nhưng không gây hư hỏng cọc. Điều này thể hiện triết lý tiếp cận theo hiệu quả của phép thử chứ không theo một giá trị năng lượng cố định.

2.3 Ý nghĩa đối với nghiên cứu

Khoảng trống của ASTM D4945 là không cung cấp phương pháp định lượng để lựa chọn chiều cao rơi. Vì vậy, kỹ sư phải dựa vào các tài liệu hướng dẫn bổ sung hoặc kinh nghiệm thực tế.

3. TCVN 11321:2016 - CỌC - PHƯƠNG PHÁP THỬ ĐỘNG BIẾN DẠNG LỚN

TCVN 11321:2016 được biên soạn trên cơ sở tham khảo ASTM D4945 và một số tài liệu quốc tế.

Tiêu chuẩn quy định:

- Thiết bị PDA;
- Thiết bị tạo xung va chạm;
- Chiều cao rơi búa xác định theo tiêu chuẩn đóng cọc (TCVN 9394:2012)
- Quy trình thí nghiệm;
- Yêu cầu lắp cảm biến;
- Xử lý tín hiệu;
- Đánh giá sức chịu tải.

Tuy nhiên, tương tự ASTM D4945, tiêu chuẩn không đưa ra:

- Bảng lựa chọn búa;
- Chiều cao rơi ban đầu;
- Phương pháp tăng dần chiều cao rơi;
- Giới hạn ứng suất theo từng loại cọc.

Điều này dẫn đến việc các đơn vị thí nghiệm tại Việt Nam áp dụng nhiều phương pháp khác nhau, làm giảm tính thống nhất và khả năng so sánh kết quả.

4. FHWA GEC NO.12 - TÀI LIỆU HƯỚNG DẪN KỸ THUẬT ĐỊA KỸ THUẬT SỐ 12 CỦA CỤC QUẢN LÝ ĐƯỜNG CAO TỐC LIÊN BANG HOA KỲ (FHWA)

4.1 Vai trò

FHWA GEC No.12 là tài liệu hướng dẫn kỹ thuật toàn diện về thiết kế và thi công cọc đóng. Khác với ASTM D4945, tài liệu này đi sâu vào:

- Lựa chọn hệ búa;
- Phân tích wave equation;
- Hiệu suất truyền năng lượng;
- Hệ đệm;
- Kiểm soát ứng suất.

Đây là nguồn tham khảo quan trọng để xây dựng phương pháp lựa chọn chiều cao rơi cho PDA.

4.2 Quan điểm của FHWA

FHWA nhấn mạnh rằng năng lượng danh định $E = mgh$ không phản ánh đầy đủ năng lượng truyền vào cọc. Hiệu suất của búa, đặc tính của hệ đệm, trở kháng của cọc và điều kiện nền đất đều ảnh hưởng đến năng lượng hữu ích. Do đó, việc lựa chọn búa cần được thực hiện thông qua phân tích Wave Equation và kiểm tra ứng suất.

4.3 Điểm mạnh của tài liệu

- Phân tích chi tiết cơ chế truyền năng lượng.
- Hướng dẫn sử dụng Wave Equation.
- Kiểm tra ứng suất nén và kéo.
- Đánh giá ảnh hưởng của hệ đệm.

4.4 Hạn chế của tài liệu

FHWA được xây dựng chủ yếu cho thi công cọc đóng. Mặc dù các nguyên lý cơ học có thể áp dụng cho PDA, tài liệu không đưa ra quy trình riêng để xác định chiều cao rơi phục vụ phép thử động biến dạng lớn.

5. PDA HANDBOOK - PDI INC. - NHÀ SẢN XUẤT VÀ ÁP DỤNG ĐẦU TIÊN PHƯƠNG PHÁP PDA.

PDA Handbook là tài liệu thực hành dành cho người sử dụng thiết bị PDA. Khác với ASTM, tài liệu này đưa ra nhiều khuyến nghị hiện trường, chẳng hạn:

- Bắt đầu với chiều cao rơi thấp;
- Kiểm tra tín hiệu sau mỗi nhát búa;
- Tăng dần chiều cao khi cần thiết;
- Theo dõi ứng suất trong cọc;
- Ưu tiên tăng trọng lượng búa trước khi tăng chiều cao nếu điều kiện cho phép.

Các khuyến nghị này được xây dựng từ kinh nghiệm thực tế của hàng chục nghìn phép thử trên thế giới.

6. EUROCODE VÀ CÁC HƯỚNG DẪN CHÂU ÂU

Các tài liệu châu Âu như Eurocode 7 và ICE Specification không quy định trực tiếp chiều cao rơi cho PDA. Tuy nhiên, chúng đặc biệt nhấn mạnh:

- Kiểm soát ứng suất động;
- Tránh hư hỏng cọc;
- Hiệu chỉnh kết quả bằng phân tích số.

Điều này phù hợp với quan điểm của ASTM và FHWA rằng mục tiêu chính là chất lượng tín hiệu và an toàn kết cấu.

7. HƯỚNG DẪN CỦA NHẬT BẢN

Các hướng dẫn của Japanese Geotechnical Society (JGS) và Public Works Research Institute (PWRI) chú trọng đến:

- Bảo vệ cọc PHC có cường độ cao nhưng giòn;
- Sử dụng hệ đệm phù hợp;
- Giới hạn ứng suất kéo và nén;
- Điều chỉnh năng lượng va đập theo đặc tính cọc.

Do đặc điểm cọc PHC được sử dụng phổ biến tại Việt Nam, các kinh nghiệm của Nhật Bản có giá trị tham khảo cao.

8. BẢNG SO SÁNH CÁC TÀI LIỆU

Tiêu chí	ASTM D4945	TCVN 11321	FHWA GEC No.12	PDI Handbook	Eurocode/JGS
Quy trình PDA	☑	☑	△	☑	△
Quy định chiều cao rơi cụ thể	☒	☒	☒	☒	☒
Phân tích Wave Equation	☒	☒	☑	☑	△
Kiểm tra ứng suất	△	△	☑	☑	☑
Hướng dẫn hiện trường	△	△	☑	☑	△
Quy trình lựa chọn chiều cao rơi	☒	☒	☒	Khuyến nghị	☒

Ghi chú: ☑: đầy đủ; △: đề cập một phần; ☒: không quy định.

9. KHOẢNG TRỐNG NGHIÊN CỨU

Từ việc phân tích các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật có thể rút ra các nhận xét sau:

1. Không có tiêu chuẩn nào đưa ra công thức tổng quát để xác định chiều cao rơi búa trong thí nghiệm PDA.

2. Các tài liệu đều nhấn mạnh yêu cầu huy động đủ sức kháng của nền đất và đảm bảo an toàn cho cọc, nhưng chưa lượng hóa mối quan hệ giữa tải thiết kế, loại cọc, điều kiện nền đất và chiều cao rơi.
3. Các khuyến nghị hiện trường chủ yếu dựa trên kinh nghiệm thực hành, thiếu một mô hình định lượng có thể áp dụng thống nhất.
4. Điều này mở ra nhu cầu xây dựng một phương pháp lựa chọn chiều cao rơi dựa trên cơ sở cơ học, có xét đến năng lượng truyền, ứng suất, chất lượng tín hiệu và điều kiện thực tế.

10. KẾT LUẬN CHƯƠNG

Qua phân tích các tài liệu quốc tế có thể khẳng định rằng:

- ASTM D4945:2026 và TCVN 11321:2016 quy định yêu cầu đối với phép thử nhưng không hướng dẫn cách xác định chiều cao rơi.
- FHWA GEC No.12 và PDI Handbook cung cấp nền tảng về truyền năng lượng, phân tích Wave Equation và kinh nghiệm hiện trường, song chưa xây dựng một quy trình định lượng dành riêng cho PDA.
- Các hướng dẫn của châu Âu và Nhật Bản nhấn mạnh việc kiểm soát ứng suất và bảo vệ cọc, đặc biệt đối với cọc bê tông cường độ cao.

Do đó, có cơ sở để phát triển một phương pháp lựa chọn chiều cao rơi mang tính hệ thống, kết hợp giữa cơ học truyền sóng, động lực học va đập, phân tích Wave Equation và các khuyến nghị thực hành.

CHƯƠNG 4: ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH LỰA CHỌN CHIỀU CAO RƠI SACOTEC (SACOTEC HAMMER DROP HEIGHT MODEL – SHDM)

I. CƠ SỞ KHOA HỌC XÁC ĐỊNH CHIỀU CAO RƠI BÚA TRONG THÍ NGHIỆM PDA

1. Đặt vấn đề

Trong các tiêu chuẩn hiện hành như ASTM D4945, TCVN 11321:2016 và FHWA GEC No.12, chiều cao rơi của búa không được quy định bằng một công thức cố định. Điều này không phải là thiếu sót của tiêu chuẩn, mà phản ánh đúng bản chất của bài toán: chiều cao rơi không phải là đại lượng độc lập mà là kết quả của sự tương tác giữa hệ búa – cọc – đất – hệ đệm – thiết bị đo. Trong thực tế, nhiều kỹ sư hiện trường vẫn sử dụng công thức năng lượng: $E = m \cdot g \cdot h$ hoặc công thức năng lượng tối thiểu trong TCVN 9394:2012 để lựa chọn chiều cao rơi cho thí nghiệm PDA. Cách tiếp cận này có ưu điểm là đơn giản nhưng tồn tại ba hạn chế cơ bản:

- ☒ Chỉ xét đến năng lượng thế của búa mà không xét hiệu suất truyền năng lượng.
- ☒ Không xét đến trở kháng động của cọc và điều kiện nền đất.
- ☒ Không kiểm soát trực tiếp ứng suất động trong cọc và chất lượng tín hiệu PDA.

Do đó, việc lựa chọn chiều cao rơi cần được tiếp cận theo một mô hình tổng hợp hơn.

2. Các đại lượng chi phối chiều cao rơi

Qua tổng hợp các nghiên cứu của Smith (1960), Rausche và Goble, FHWA và PDI, có thể xác định sáu nhóm yếu tố chính ảnh hưởng đến chiều cao rơi.

a. Năng lượng va đập

Năng lượng thế của búa được xác định theo: $E = mgh$; trong đó: m : khối lượng búa, g : gia tốc trọng trường và h : chiều cao rơi nhưng đây chỉ là năng lượng danh định. Năng lượng thực sự truyền vào đầu cọc nhỏ hơn do tổn thất trong va chạm, biến dạng của mũ búa và hệ đệm. Do đó, $E_t = \eta mgh$; trong đó: E_t : năng lượng truyền vào cọc, η : hiệu suất truyền năng lượng phụ thuộc vào loại búa.

b. Vận tốc va chạm

Theo cơ học: $v = \sqrt{2gh}$, trong đó: v : vận tốc va chạm. Điểm quan trọng là: Lực cực đại trong cọc không phụ thuộc trực tiếp vào năng lượng mà phụ thuộc vào vận tốc va chạm. Đây là nguyên nhân vì sao chỉ sử dụng năng lượng là không đủ để lựa chọn chiều cao rơi.

c. Trở kháng động của cọc

Một yếu tố rất quan trọng là trở kháng: $Z = \frac{EA}{C}$, Trong đó: E: mô đun đàn hồi, A: diện tích và c: vận tốc sóng. Như vậy, trở kháng càng lớn thì cần lực lớn hơn nên cần búa lớn hơn và không nhất thiết cần chiều cao lớn hơn.

d. Trở kháng của đất

Sức kháng của đất quyết định mức năng lượng cần thiết để huy động phản lực. Có thể phân thành ba nhóm:

- + Đất mềm: sức kháng nhỏ; chiều cao rơi thấp đã đủ huy động.
- + Đất trung bình: cần chiều cao trung bình,
- + Đất rất chặt: cần năng lượng lớn hơn.

Điều này giải thích vì sao cùng một cọc nhưng chiều cao rơi giữa hai công trình có thể khác nhau đáng kể.

e. Hệ đệm (Cushion)

Đệm là phần thường bị bỏ qua trong thực tế nhưng có ảnh hưởng quyết định đến dạng xung lực. Đệm quá cứng thì thời gian va chạm ngắn dẫn đến lực cực đại lớn làm cho ứng suất tăng. Đệm quá mềm thì năng lượng bị tiêu hao, ứng suất nhỏ nhưng khó huy động sức kháng. Do đó, lựa chọn chiều cao rơi luôn phải đi kèm với lựa chọn hệ đệm phù hợp.

f. Khả năng chịu tải theo vật liệu của cọc

Chiều cao rơi tối đa bị giới hạn bởi khả năng chịu ứng suất của cọc. Nếu ứng suất gây ra trong thân cọc lớn hơn ứng suất cho phép (thông thường 0,85 ứng suất của vật liệu) thì phải giảm chiều cao rơi ngay cả khi chưa huy động đủ sức kháng. Đây là yêu cầu bắt buộc trong thực hành PDA.

g. Điều kiện tối ưu của chiều cao rơi

Một chiều cao rơi được coi là tối ưu khi đồng thời thỏa mãn các điều kiện sau:

- + Điều kiện 1: Huy động được tối thiểu khoảng 80–90% sức kháng cực hạn dự kiến của cọc để tín hiệu đủ tin cậy cho phân tích. (Tỷ lệ cụ thể phụ thuộc mục tiêu thử nghiệm và điều kiện hiện trường.)
- + Điều kiện 2: Ứng suất nén nhỏ hơn giới hạn cho phép của vật liệu cọc và yêu cầu của nhà sản xuất (đối với cọc PHC cần đặc biệt lưu ý).
- + Điều kiện 3: Ứng suất kéo không vượt giới hạn cho phép nhằm tránh hình thành hoặc phát triển vết nứt.
- + Điều kiện 4: Tín hiệu lực và vận tốc có chất lượng tốt, không bị nhiễu hoặc bão hòa.
- + Điều kiện 5: Năng lượng truyền vào cọc đủ lớn để CAPWAP hội tụ với chất lượng phù hợp.

Như vậy, bài toán lựa chọn chiều cao rơi là một bài toán tối ưu đa mục tiêu, chứ không phải tối đa hóa năng lượng.

II. ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH LỰA CHỌN CHIỀU CAO RƠI SACOTEC (SACOTEC HAMMER DROP HEIGHT MODEL – SHDM)

1. Giới thiệu

Qua phân tích trong các chương trước có thể nhận thấy rằng không một tiêu chuẩn nào hiện nay đưa ra:

- + Công thức xác định chiều cao rơi;
- + Quy trình lựa chọn búa;
- + Lưu đồ điều chỉnh chiều cao;
- + Bảng tra trọng lượng búa và chiều cao rơi búa áp dụng cho thí nghiệm PDA.

Nghiên cứu này đề xuất phương pháp SHDM với mục tiêu:

- + Giảm tính phụ thuộc vào kinh nghiệm;
- + Tăng tính thống nhất giữa các kỹ sư;
- + Giảm nguy cơ phá hỏng cọc;
- + Nâng cao chất lượng tín hiệu PDA;
- + Tạo cơ sở xây dựng SOP cho phòng thí nghiệm.

2. Nguyên lý của SHDM

Phương pháp SHDM dựa trên một nguyên lý cơ bản đó là: “Chiều cao rơi tối ưu là chiều cao nhỏ nhất có khả năng huy động đủ sức kháng mục tiêu đồng thời vẫn bảo đảm ứng suất động và chất lượng tín hiệu nằm trong giới hạn cho phép”. Như vậy, nguyên lý của phương pháp không đi tìm chiều cao rơi búa lớn nhất (H_{max}) mà tìm chiều cao rơi búa tối ưu ($H_{tối\ ưu}$). Đây là khác biệt lớn nhất so với tư duy lựa chọn năng lượng trong thi công cọc đóng.

3. Các tham số đầu vào

SHDM sử dụng bảy nhóm tham số.

- + Nhóm 1 - Thông số cọc: loại cọc, đường kính, chiều dài, mô đun đàn hồi, cường độ bê tông.
- + Nhóm 2 - Thông số búa: trọng lượng quả búa, hiệu suất, loại búa.
- + Nhóm 3 - Thông số nền: loại đất, sức kháng mũi, sức kháng thành, N_{SPT}/CPT (nếu có).
- + Nhóm 4 - Thông số thiết bị: Thiết bị PDA, phần mềm CAPWAP, loại cảm biến.
- + Nhóm 5 - Thông số hệ đệm: vật liệu, chiều dày, số lớp.

- + Nhóm 6 - Thông số thiết kế của cọc: tải thiết kế, hệ số an toàn, sức chịu tải yêu cầu.
- + Nhóm 7 - Điều kiện hiện trường: nhiệt độ, độ nghiêng cọc, tình trạng đầu cọc.

4. Thuật toán lựa chọn búa

- + Bước 1: Xác định tải trọng thiết kế (Q_{design});
- + Bước 2: Ước lượng hệ số vượt tải hoặc theo yêu cầu của thiết kế. Ví dụ: $Q_{test} = 2.2. Q_{design}$
- + Bước 3: Chọn sơ bộ trọng lượng búa theo bảng sau:

Tải trọng thiết kế (Tấn)	Trọng lượng búa đề nghị lựa chọn (Tấn)
<50	0,5 ÷ 1,0
50÷100	1,0÷2,0
100÷200	2,0÷3,0
200÷400	3,0÷5,0
400÷800	5,0÷7,0
>800	≥7,0

Ghi chú: Đây là bảng khuyến nghị, được xây dựng từ tổng hợp tài liệu và kinh nghiệm thực hành, không phải bảng quy định của ASTM D4945, FHWA hay PDI. Trong ASTM D4945 khuyến nghị chọn trọng lượng búa trong khoảng 1% đến 2% tải trọng khảo sát.

5. Thuật toán lựa chọn chiều cao ban đầu

Nghiên cứu đề xuất không bắt đầu bằng chiều cao lớn mà bắt đầu từ độ cao 0,3 ÷ 0,5m. Sau đó đọc biểu đồ trên máy PDA. Nếu chưa đủ thì tăng lên 0,6 m, 0,7m....cho đến khi đạt điều kiện dừng. Điều kiện dừng được quy định như sau:

- + Điều kiện A: Thông số đầu vào chuẩn và CAPWAP hội tụ tốt.
- + Điều kiện B: Năng lượng truyền ổn định.
- + Điều kiện C: Ứng suất trong cọc không vượt giới hạn cho phép.
- + Điều kiện D: Match Quality trong CAPWAP đạt yêu cầu theo tiêu chí của phần mềm (≤ 4) và quy trình nội bộ.

6. Thuật toán điều chỉnh chiều cao

Giả sử lần đầu 0,4 m thì thu được $R_u = 65\%$ tải yêu cầu, ta tăng 0,5m thì tải $R_u = 81\%$. Tiếp tục tăng 0,6m thì $R_u = 92\%$. Đến đây, ta tiếp tục giữ nguyên chứ nguyên chứ không tiếp tục tăng. Đây là nguyên tắc rất quan trọng.

7. Tiêu chí lựa chọn tối ưu

Nghiên cứu đề xuất một chỉ số tổng hợp để so sánh các phương án:

$$J(H)=w_1 \cdot R_u+w_2 \cdot E_t+w_3 \cdot Q_s-w_4 \cdot \sigma-w_5 \cdot D$$

Trong đó:

- R: mức huy động sức kháng (ví dụ tỷ lệ sức kháng huy động so với mục tiêu).
- S: chỉ số chất lượng tín hiệu (Signal Quality Index – do nghiên cứu định nghĩa dựa trên các chỉ tiêu chất lượng tín hiệu PDA).
- E: tỷ lệ năng lượng truyền vào cọc so với năng lượng danh định.
- σ : chỉ số ứng suất động đã chuẩn hóa theo giới hạn cho phép.
- w_1, w_2, w_3, w_4 : hệ số trọng số - giá trị sẽ được hiệu chuẩn từ dữ liệu thực nghiệm hoặc mô phỏng.

8. Hiệu chỉnh chiều cao rơi búa theo loại cọc

- Đối với cọc PHC, do có đặc điểm là cường độ cao và giòn nên ưu tiên chọn búa nặng và chiều cao rơi thấp;
- Đối với cọc BTCT: Có thể chọn búa nhẹ hơn và tăng chiều cao nhiều hơn;
- Đối với cọc thép thì do ứng suất kéo ít nguy hiểm hơn nên có thể sử dụng búa và chiều cao thả búa lớn hơn.

9. Hiệu chỉnh theo nền đất

- + Đất mềm: không cần H lớn.
- + Đất sét cứng: H trung bình.
- + Đất rất chặt: H lớn hơn hoặc búa lớn hơn.

10. Phân tích độ nhạy (Sensitivity Analysis)

Một nội dung quan trọng cần bổ sung để nâng cao giá trị khoa học là phân tích độ nhạy của mô hình SHDM.

Đối với mỗi tham số đầu vào (khối lượng búa, chiều cao rơi, hiệu suất truyền năng lượng, độ cứng đệm, trở kháng cọc...), lần lượt thay đổi một tham số trong khi giữ các tham số còn lại không đổi để đánh giá mức độ ảnh hưởng đến:

- + Năng lượng truyền vào cọc;
- + Ứng suất nén và kéo;
- + Mức huy động sức kháng;
- + Chất lượng tín hiệu PDA.

Kết quả phân tích này sẽ cho phép xác định tham số nào có ảnh hưởng lớn nhất và hỗ trợ việc hiệu chuẩn mô hình trong tương lai.

11. Kế hoạch kiểm chứng mô hình

Để khẳng định tính khả thi của SHDM, nghiên cứu đề xuất quy trình kiểm chứng gồm:

1. Thu thập dữ liệu từ tối thiểu 50–100 thí nghiệm PDA trên nhiều loại cọc và điều kiện nền đất.
2. Áp dụng SHDM để dự báo chiều cao rơi tối ưu.
3. So sánh với chiều cao rơi thực tế và kết quả CAPWAP.
4. Với các công trình có thử tải tĩnh, đối chiếu sức chịu tải xác định từ CAPWAP và thử tải để đánh giá độ tin cậy.
5. Hiệu chỉnh các hệ số trong mô hình bằng phương pháp hồi quy hoặc tối ưu hóa.

12. Kết luận

Phương pháp SHDM được đề xuất trong nghiên cứu này có các đặc điểm nổi bật:

- Chuyển từ tư duy "chọn năng lượng" sang "tối ưu hóa chất lượng phép thử".
- Kết hợp cơ học truyền sóng, động lực học va đập và kinh nghiệm hiện trường.
- Đưa ra quy trình từng bước thay vì một giá trị chiều cao rơi cố định.
- Có khả năng mở rộng và hiệu chuẩn khi có thêm dữ liệu thực nghiệm.

Tuy nhiên, SHDM hiện mới là một khung phương pháp. Để trở thành hướng dẫn kỹ thuật chính thức, cần có cơ sở dữ liệu hiện trường đủ lớn và các nghiên cứu kiểm chứng độc lập.

III. KẾ HOẠCH KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH SHDM BẰNG MÔ PHỎNG VÀ DỮ LIỆU THỰC NGHIỆM

1. Mục tiêu kiểm chứng

Mục tiêu của chương là đánh giá: Độ chính xác của SHDM; Khả năng dự báo chiều cao rơi tối ưu; Khả năng huy động sức kháng; Sai số so với CAPWAP; Sai số so với thử tải tĩnh.

2. Bộ dữ liệu nghiên cứu

Đề xuất xây dựng cơ sở dữ liệu gồm:

- 3.000–5.000 phép thử PDA.
- Cọc PHC, BTCT, cọc thép.
- Đường kính từ D300 đến D2000.
- Chiều dài từ 10–80 m.
- Nhiều loại nền đất.
- Nhiều loại búa và hệ đệm.

Các thông số đầu vào:

- Tải thiết kế.
- Kích thước cọc.
- Chiều dài cọc.
- Mô đun đàn hồi.
- Trọng lượng búa.
- Chiều cao rơi.
- Năng lượng truyền.
- Chỉ số CAPWAP.
- Kết quả thử tải tĩnh (nếu có).

3. Kiểm chứng bằng Wave Equation

Thiết lập các trường hợp mô phỏng với:

- 5 loại cọc.
- 6 mức tải.
- 5 loại nền đất.
- 6 loại búa.
- 8 mức chiều cao rơi.

Đề tạo ra khoảng 7.200 tổ hợp mô phỏng để phân tích cho mô hình này.

4. Kiểm chứng bằng CAPWAP

So sánh:

- Chiều cao rơi đề xuất.
- Năng lượng truyền.
- Sức kháng huy động.
- Match Quality.
- Ứng suất động.

5. Kiểm chứng bằng thử tải tĩnh

Xây dựng dữ liệu để so sánh: Tải thử PDA áp dụng mô hình SHDM và thử tĩnh. Từ đó đánh giá các yếu tố như: Sai số tuyệt đối, sai số tương đối và độ tin cậy.

6. Đánh giá theo phương pháp thống kê

Áp dụng các phần mềm và thuật toán như: RMSE, MAE, MAPE, Phân tích Bland–Altman, Cross-validation... để xây dựng mô hình và thống kê số liệu.

7. Phân tích độ nhạy

Đánh giá ảnh hưởng của: hệ búa; Độ ẩm; Nền đất; Chiều dài cọc; Đường kính cọc; Mô đun đàn hồi của cọc đến mô hình tính toán.

8. Phân tích bất định

Sử dụng phần mềm Monte Carlo hoặc Latin Hypercube Sampling để đánh giá khoảng tin cậy và độ ổn định của mô hình.

9. Thảo luận

Tiến hành đánh giá và phân tích các trường hợp sau:

- Trường hợp SHDM hoạt động tốt.
- Trường hợp sai số lớn.
- Giới hạn áp dụng.
- Điều kiện cần hiệu chỉnh.

10. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Căn cứ vào số liệu mẫu đủ lớn, tác giả sẽ tiếp tục hướng nghiên cứu tiếp theo để xây dựng mô hình hoàn chỉnh phục vụ cho tất cả các anh em trong ngành thí nghiệm PDA.

MỤC LỤC

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN	2
1. Đặt vấn đề	2
2. Tính cấp thiết của nghiên cứu.....	2
3. Khoảng trống nghiên cứu.....	3
4. Mục tiêu nghiên cứu.....	3
5. Phạm vi nghiên cứu	4
6. Phương pháp nghiên cứu.....	4
7. Điểm mới dự kiến	4
CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT XÁC ĐỊNH CHIỀU CAO RƠI BÚA TRONG THÍ NGHIỆM ĐỘNG BIẾN DẠNG LỚN (PDA).....	5
1. GIỚI THIỆU	5
2. SỰ PHÁT TRIỂN CỦA LÝ THUYẾT TRUYỀN SÓNG.....	5
a. Sóng ứng suất trong cọc	6
b. Trở kháng của cọc.....	6
c. Quan hệ giữa lực và vận tốc	6
d. Động năng của búa	6
e. Ảnh hưởng của chiều cao rơi.....	7
f. Ảnh hưởng của trọng lượng búa	7
g. Hiệu suất truyền năng lượng	7
3. KẾT LUẬN CHƯƠNG	7
CHƯƠNG 3: TỔNG QUAN CÁC TIÊU CHUẨN VÀ HƯỚNG DẪN QUỐC TẾ VỀ LỰA CHỌN CHIỀU CAO RƠI TRONG THÍ NGHIỆM PDA	8
1. MỞ ĐẦU	8
2. ASTM D4945:2026 – TIÊU CHUẨN THỬ ĐỘNG BIẾN DẠNG LỚN.....	8
2.1 Mục tiêu.....	8
2.2 Quy định về năng lượng va đập	8
2.3 Ý nghĩa đối với nghiên cứu.....	9
3. TCVN 11321:2016 - CỌC - PHƯƠNG PHÁP THỬ ĐỘNG BIẾN DẠNG LỚN	9
4. FHWA GEC NO.12 - TÀI LIỆU HƯỚNG DẪN KỸ THUẬT ĐỊA KỸ THUẬT SỐ 12 CỦA CỤC QUẢN LÝ ĐƯỜNG CAO TỐC LIÊN BANG HOA KỲ (FHWA)	9

4.1 Vai trò	9
4.2 Quan điểm của FHWA	10
4.3 Điểm mạnh của tài liệu.....	10
4.4 Hạn chế của tài liệu	10
5. PDA HANDBOOK - PDI INC. - NHÀ SẢN XUẤT VÀ ÁP DỤNG ĐẦU TIÊN PHƯƠNG PHÁP PDA.....	10
6. EUROCODE VÀ CÁC HƯỚNG DẪN CHÂU ÂU	10
7. HƯỚNG DẪN CỦA NHẬT BẢN.....	11
8. BẢNG SO SÁNH CÁC TÀI LIỆU.....	11
9. KHOẢNG TRỐNG NGHIÊN CỨU	11
10. KẾT LUẬN CHƯƠNG.....	12
CHƯƠNG 4: ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH LỰA CHỌN CHIỀU CAO RƠI SACOTEC (SACOTEC HAMMER DROP HEIGHT MODEL – SHDM).....	13
I. CƠ SỞ KHOA HỌC XÁC ĐỊNH CHIỀU CAO RƠI BÚA TRONG THÍ NGHIỆM PDA 13	
1. Đặt vấn đề	13
2. Các đại lượng chi phối chiều cao rơi	13
a. Năng lượng va đập.....	13
b. Vận tốc va chạm	13
c. Trở kháng động của cọc	13
d. Trở kháng của đất.....	14
e. Hệ đệm (Cushion)	14
f. Khả năng chịu tải theo vật liệu của cọc.....	14
g. Điều kiện tối ưu của chiều cao rơi.....	14
II. ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH LỰA CHỌN CHIỀU CAO RƠI SACOTEC (SACOTEC HAMMER DROP HEIGHT MODEL – SHDM)	15
1. Giới thiệu	15
2. Nguyên lý của SHDM	15
3. Các tham số đầu vào	15
4. Thuật toán lựa chọn búa.....	16
5. Thuật toán lựa chọn chiều cao ban đầu	16
6. Thuật toán điều chỉnh chiều cao	16
7. Tiêu chí lựa chọn tối ưu	17
8. Hiệu chỉnh chiều cao rơi búa theo loại cọc.....	17

9. Hiệu chỉnh theo nền đất	17
10. Phân tích độ nhạy (Sensitivity Analysis)	17
11. Kế hoạch kiểm chứng mô hình.....	18
12. Kết luận	18
III. KẾ HOẠCH KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH SHDM BẰNG MÔ PHỎNG VÀ DỮ LIỆU THỰC NGHIỆM.....	18
1. Mục tiêu kiểm chứng.....	18
2. Bộ dữ liệu nghiên cứu.....	18
3. Kiểm chứng bằng Wave Equation.....	19
4. Kiểm chứng bằng CAPWAP	19
5. Kiểm chứng bằng thử tải tĩnh	19
6. Đánh giá theo phương pháp thống kê.....	19
7. Phân tích độ nhạy	19
8. Phân tích bất định.....	20
9. Thảo luận.....	20
10. Hướng nghiên cứu tiếp theo	20

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. ASTM International. (2026). *ASTM D4945-26: Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations*.
2. Bộ Khoa học và Công nghệ. (2016). *TCVN 11321:2016 – Cọc – Phương pháp thử động biến dạng lớn*.
3. Bộ Khoa học và Công nghệ. (2012). *TCVN 9394:2012 – Đóng và ép cọc – Thi công và nghiệm thu*.
4. Federal Highway Administration (FHWA). (2016). *Geotechnical Engineering Circular No. 12: Design and Construction of Driven Pile Foundations* (FHWA-NHI-16-009; FHWA-NHI-16-010).
5. Smith, E. A. L. (1960). *Pile Driving Analysis by the Wave Equation*.
6. Goble, G. G., & Rausche, F. (1976). *Wave Equation Analysis of Pile Driving: WEAP Program*.
7. Rausche, F., Goble, G. G., & Likins, G. E. *Pile Driving Analyzer (PDA) Manuals and Technical Papers*.
8. Likins, G. E., & Rausche, F. *CAPWAP Theory and Applications*.
9. Paikowsky, S. G., et al. (2004). *NCHRP Report 507: Load and Resistance Factor Design for Deep Foundations*.
10. Hannigan, P. J., et al. *Design and Construction of Driven Pile Foundations*.