

TCVN

TIÊU CHUẨN QUỐC GIA

TCVN 9489 : 2012

ASTM C1383 - 04

Xuất bản lần 1

**BÊ TÔNG – XÁC ĐỊNH CHIỀU DÀY CỦA KẾT CẤU DẠNG
BẢN BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẢN XẠ XUNG VÀ ĐẬP**
*Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness
of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*

HÀ NỘI - 2012

Mục lục

	Trang
Lời nói đầu	4
1 Phạm vi áp dụng.....	5
2 Tài liệu viện dẫn.....	6
3 Thuật ngữ và định nghĩa.....	6
3.1.1 Trở kháng âm	6
3.1.2 Phổ biên độ	6
3.1.3 Sự chuyển đổi Fourier.....	6
3.1.4 Phương pháp phản xạ va đập.....	6
3.1.5 Thời gian va đập.....	7
3.1.6 Sóng xung.....	8
3.1.7 Vận tốc sóng xung.....	8
3.1.8 Tần suất lấy mẫu.....	8
3.1.9 Chu kỳ lấy mẫu.....	8
3.1.10 Khoảng lấy mẫu.....	8
3.1.11 Sóng bề mặt.....	8
3.1.12 Dạng sóng.....	8
3.2 Các thuật ngữ riêng của tiêu chuẩn này	9
3.2.1 Vận tốc sóng xung P biểu kiến trong tám bản.....	9
3.2.2 Tám bản.....	9
4 Ý nghĩa và sử dụng	9
QUY TRÌNH A – ĐO VẬN TỐC SÓNG XUNG P.....	11
5 Nguyên tắc.....	11
6 Thiết bị, dụng cụ.....	11
7 Chuẩn bị bề mặt thử.....	13
8 Cách tiến hành	13
9 Phân tích số liệu và tính toán.....	14
QUY TRÌNH B – THÍ NGHIỆM PHẢN XẠ XUNG VA ĐẬP.....	15
10 Tóm tắt phương pháp thử.....	15
11 Thiết bị, dụng cụ.....	16
12 Chuẩn bị bề mặt thử.....	17
13 Cách tiến hành.....	17
14 Phân tích các số liệu.....	20
15 Diễn giải các kết quả (các lỗi hệ thống).....	20
16 Báo cáo thử nghiệm.....	22
17 Độ chụm và độ chệch	22
Phụ lục A Sai số hệ thống	23

Lời nói đầu

TCVN 9489:2012 được xây dựng trên cơ sở hoàn toàn tương đương với ASTM C1383 – 04 *Standard test method for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method* với sự cho phép của ASTM quốc tế, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, USA. Tiêu chuẩn ASTM C1383 – 04 thuộc bản quyền của ASTM quốc tế.

TCVN 9489:2012 do Hội Công nghiệp Bê tông Việt Nam biên soạn, Bộ Xây dựng đề nghị, Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng thẩm định, Bộ Khoa học và Công nghệ công bố.

Bê tông - Xác định chiều dày của kết cấu dạng bản bằng phương pháp phản xạ xung và đập

Standard test method for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method

1 Phạm vi áp dụng

1.1 Tiêu chuẩn này quy định quy trình xác định chiều dày của bản bê tông, mặt đường bê tông, bản mặt cầu, tường hoặc các kết cấu dạng bản khác bằng phương pháp phản xạ xung và đập.

1.2 Theo phương pháp này, có hai quy trình sau:

1.2.1 Quy trình A: Đo vận tốc sóng xung P

Quy trình này đo thời gian cần thiết để sóng xung P sinh ra bởi sự va đập điểm, trong thời gian ngắn, dịch chuyển giữa hai đầu thu đặt tại khoảng cách đã biết dọc theo bề mặt kết cấu. Tốc độ sóng xung P được tính bằng cách chia khoảng cách giữa hai đầu thu cho thời gian dịch chuyển.

1.2.2 Quy trình B: Thí nghiệm phản xạ xung và đập

Quy trình này đo tần số của sóng xung P sinh ra bởi sự va đập điểm, trong thời gian ngắn, được phản xạ giữa hai mặt đối diện song song với nhau của bản bê tông. Chiều dày bản được tính từ tần số đo này và tốc độ sóng P thu được theo quy trình A.

1.2.3 Trừ khi có quy định khác, cả hai quy trình A và B phải được thực hiện tại mỗi điểm cần đo chiều dày.

1.3 Các giá trị trong tiêu chuẩn này theo đơn vị của hệ SI.

1.4 Các đoạn văn chú thích của tiêu chuẩn này, chỉ cung cấp tài liệu giải thích. Những đoạn văn đó (trừ các bảng biểu và hình vẽ) không được coi là yêu cầu của tiêu chuẩn này.

1.5 Tiêu chuẩn này không đề cập đến tất cả các vấn đề liên quan đến an toàn khi sử dụng. Người sử dụng tiêu chuẩn này có trách nhiệm thiết lập các nguyên tắc về an toàn và bảo vệ sức khỏe cũng như khả năng áp dụng phù hợp với các giới hạn quy định trước khi đưa vào sử dụng.

2 Tài liệu viện dẫn

Các tài liệu viện dẫn sau đây là rất cần thiết khi áp dụng tiêu chuẩn này. Đối với các tài liệu viện dẫn ghi năm công bố thì áp dụng bản được nêu. Đối với các tài liệu viện dẫn không ghi năm công bố thì áp dụng phiên bản mới nhất, bao gồm cả các bản sửa đổi, bổ sung (nếu có).

ASTM C597, *Test Method for Pulse Velocity Through Concrete (Phương pháp đo tốc độ xung qua bê tông)*.
ASTM E1316, *Terminology for Nondestructive Examinations (Thuật ngữ đối với các thí nghiệm không phá hủy)*.

3 Thuật ngữ và định nghĩa

3.1 Định nghĩa

3.1.1

Trở kháng âm (Acoustic impedance)

Tích số của tốc độ sóng xung P và mật độ được sử dụng trong các tính toán về các đặc tính phản xạ sóng ứng suất tại các mặt giới hạn.

3.1.2

Phổ biên độ (Amplitude spectrum)

Đồ thị của biên độ tương đối ứng với tần số có được từ dạng sóng khi sử dụng kỹ thuật chuyển đổi Fourier.

3.1.3

Sự chuyển đổi Fourier (Fourier transform)

Kỹ thuật số được sử dụng để chuyển các dạng sóng kỹ thuật số từ phạm vi thời gian sang phạm vi tần số.

3.1.3.1

Giải thích

Các cực trị trong biên độ phổ tương ứng với các tần số trội trong dạng sóng.

3.1.4

Phương pháp phản xạ va đập (Impact-echo methods)

Phương pháp thí nghiệm không phá hủy nhận tín hiệu đã gửi dựa trên việc sử dụng va đập cơ học trong thời gian ngắn để tạo sóng ứng suất nhanh và sự sử dụng bộ chuyển đổi thu tín hiệu băng rộng đặt cạnh điểm va đập.

3.1.4.1

Giải thích

Các dạng sóng được chuyển đổi thành tần số và phổ biên độ hình thành được phân tích để có các tần số trội trong sự phản hồi của kết cấu đối với va đập. Các tần số này được sử dụng để xác định chiều dày của kết cấu hay sự hiện diện của các khuyết tật.

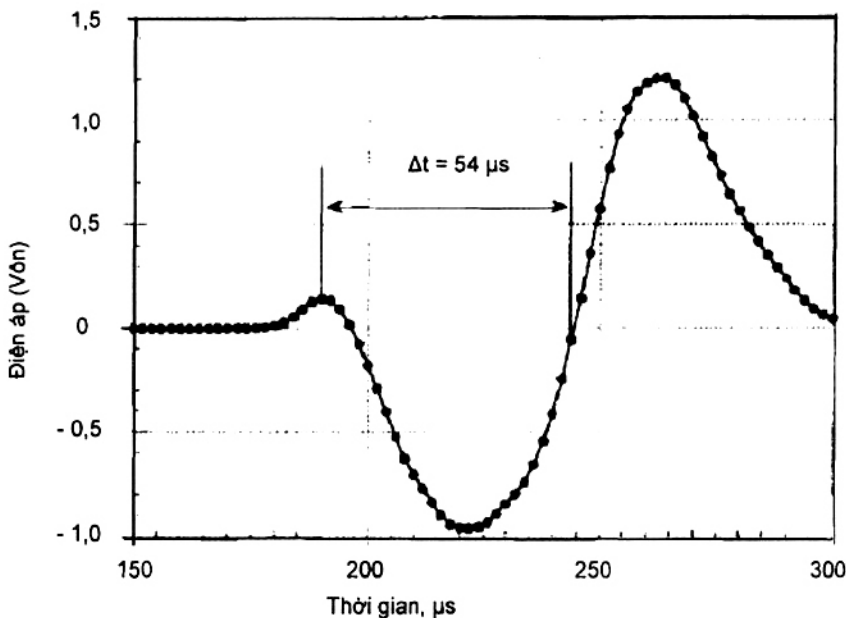
3.1.5 Khoảng thời gian va đập (Impact duration)

Khoảng thời gian mà đầu va đập gây ra các sóng ứng suất khi tiếp xúc với bề mặt thí nghiệm. Nó cũng được coi như thời gian tiếp xúc.

3.1.5.1

Giải thích

Khoảng thời gian va đập là yếu tố then chốt quyết định sự thành công của hai quy trình thí nghiệm trong tiêu chuẩn này. Các khoảng thời gian va đập sẽ được khuyến cáo trong tiêu chuẩn này. Trong thực tế, khoảng thời gian va đập phụ thuộc vào loại đầu va đập và điều kiện của bề mặt tại vị trí va đập. Các bề mặt nhẵn, cứng sẽ cho khoảng thời gian va đập ngắn hơn so với các bề mặt nhám và mềm. Người sử dụng nên kiểm tra xem các khoảng thời gian va đập có nằm trong các khoảng khuyến cáo hay không. Đo gần đúng khoảng thời gian va đập có thể có được từ một phần của dạng sóng tương ứng với sự tới của sóng bề mặt. Hình 1 nêu ví dụ về phần sóng bề mặt của dạng sóng và chỉ ra khoảng thời gian tiếp xúc gần đúng.



Hình 1 - Hình phóng to của phần sóng bề mặt của dạng sóng cho thấy chiều rộng của tín hiệu sóng bề mặt tương ứng với thời gian tiếp xúc của sự va đập

3.1.6

Sóng xung P (P-wave)

Sóng ứng suất giãn (dọc hay chính) gây nên sự dịch chuyển của hạt song song với hướng lan truyền sóng. Sóng này tạo các ứng suất bình thường (kéo hay nén) khi lan truyền.

3.1.7

Vận tốc sóng xung P (P-wave speed)

Vận tốc sóng xung P lan truyền qua môi trường rắn bán vô hạn.

3.1.7.1

Giải thích

Vận tốc sóng xung P chính là tốc độ sóng xung nén đo được theo ASTM C597.

3.1.8

Tần suất lấy mẫu (Sampling frequency)

Mức mà tại đó các điểm có dạng sóng được ghi nhận; nghịch đảo của khoảng lấy mẫu được thể hiện bằng Hz hay số mẫu/giây (cũng được gọi là mức lấy mẫu).

3.1.9

Chu kỳ lấy mẫu (Sampling period)

Thời gian của dạng sóng bằng số điểm trong dạng sóng nhân với khoảng lấy mẫu.

3.1.10

Khoảng lấy mẫu (Sampling interval)

sự chênh lệch thời gian giữa hai điểm sát nhau bất kỳ trong dạng sóng.

3.1.11

Sóng bề mặt (Surface wave)

Sóng ứng suất mà trong đó sự dịch chuyển của hạt dạng elip và biên độ của sự chuyển động của hạt giảm nhanh theo chiều sâu. Nó cũng được biết dưới tên sóng Rayleigh hay sóng R (Rayleigh wave – R-wave).

3.1.12

Dạng sóng (waveform)

Tín hiệu nhận được từ một đầu thu biểu thị bằng đồ thị của điện thế theo thời gian.

3.1.13

Tham khảo Thuật ngữ trong ASTM E1316 đối với các thuật ngữ bổ sung khác, có liên quan đến thí nghiệm siêu âm không phá hủy, để có thể áp dụng cho phương pháp thử này.

3.2 Các định nghĩa riêng của tiêu chuẩn này

3.2.1

Vận tốc sóng xung P biểu kiến trong bản (Apparent P-wave speed in a plate)

Thông số bằng 0,96 của vận tốc sóng xung P:

$$C_{p,plate} = 0,96C_p \quad (1)$$

trong đó:

$C_{p,plate}$ vận tốc sóng xung P biểu kiến trong bản, m/s ;

C_p vận tốc sóng xung P trong bê tông xác định theo quy trình A, m/s.

3.2.1.1

Giải thích

Thông số này được sử dụng để tính chiều dày trong các phép đo phản xạ và đập ở các bản bê tông. Vận tốc sóng xung P trong vật liệu bê tông được chuyển thành vận tốc sóng xung P biểu kiến trong bản và được sử dụng để tính chiều dày bản theo công thức sau :

$$T = \frac{C_{p,plate}}{2f} \quad (2)$$

trong đó:

T chiều dày bản, m ;

f tần số của kiểu chiều dày sóng xung P của bản có được từ phổ biên độ, Hz.

3.2.2

Bản (Plate)

Mọi kết cấu khối hộp có kích thước cạnh ít nhất gấp sáu lần chiều dày .

3.2.2.1

Giải thích

Các kích thước cạnh tối thiểu là cần thiết để giúp cho các loại tấm bản dao động, tránh khỏi sự phiền phức khi nhận diện các tần suất kiểu độ dày trong phổ biên độ. Các kích thước cạnh tối thiểu và chu kỳ lấy mẫu hợp lý có tính tương quan, và được giải thích trong Chú thích 11.

4 Ý nghĩa và sử dụng

4.1 Phương pháp thử này có thể sử dụng để thay thế hay kết hợp với phương pháp khoan lấy mẫu để xác định độ dày các loại sàn, bản, bê tông mặt đường, bản mặt cầu, tường hay kết cấu dạng bản

TCVN 9489:2012

khác. Có mức độ nào đó về sai số hệ thống trong độ dày tính được do bản chất gián đoạn của các tín hiệu số khi sử dụng kỹ thuật số. Lỗi sai số hệ thống tuyệt đối phụ thuộc vào chiều dày tấm bản, khoảng cách lấy mẫu và chu kỳ lấy mẫu.

4.2 Do vận tốc sóng có thể thay đổi từ điểm này đến điểm khác trong kết cấu do sự khác biệt về tuổi bê tông hay sự không ổn định của các mẻ bê tông khác nhau, nên vận tốc sóng cần được đo (Quy trình A) tại mỗi điểm mà tại đó cần xác định chiều dày (Quy trình B).

4.3 Đo các chiều dày lớn nhất và nhỏ nhất có thể bị hạn chế bởi các chi tiết của thiết bị đo (các đặc tính phản hồi của bộ chuyển đổi tín hiệu thu và đầu va chuyên dụng). Các giới hạn sẽ được nhà sản xuất thiết bị quy định và không được sử dụng các thiết bị này vượt các giá trị cho phép. Nếu thiết bị thí nghiệm được người sử dụng tự lắp đặt thì các hạn chế độ dày sẽ được thiết lập và quy định thành văn bản.

4.4 Phương pháp này không áp dụng cho các kết cấu có các lớp phủ trên như bản cầu có lớp phủ bê tông atphan hay bê tông xi măng poóc lăng. Phương pháp này dựa trên sự giả định rằng tấm bản có cùng vận tốc sóng xung P theo chiều sâu.

4.5 Quy trình A được thực hiện trên bê tông nên không khí khô cũng như hàm lượng ẩm bề mặt cao có thể ảnh hưởng đến kết quả đo.

4.6 Quy trình B có thể áp dụng cho bản bê tông đặt trên nền đất, sỏi, bê tông atphan thấm nước hay bê tông xi măng poóc lăng gầy, do vậy có sự khác biệt về trở kháng âm giữa bản bê tông và lớp nền hoặc sẽ có nhiều lỗ rỗng khí ở mặt tiếp xúc giữa bản bê tông và nền làm xuất hiện các phản xạ đo được. Nếu các điều kiện này không được đáp ứng, thì dạng sóng sẽ có biên độ thấp và phổ biên độ sẽ không có cực trị trội ở tần số tương ứng với độ dày (phương trình 2). Nếu mặt tiếp xúc giữa bê tông và nền là nhám thì phổ biên độ sẽ có cực trị tù thay cho nhọn của bề mặt tiếp xúc nhẵn.

4.7 Các quy trình mô tả nêu trên không bị ảnh hưởng bởi tiếng ồn giao thông hay sự rung tần số thấp của kết cấu gây ra bởi sự di chuyển bình thường của các phương tiện giao thông trên kết cấu.

4.8 Các quy trình trên không áp dụng trong trường hợp có ồn (nhiều) cơ học gây ra bởi thiết bị va đập (máy búa đóng cọc...) trên kết cấu.

4.9 Quy trình A không áp dụng trong trường hợp nhiễu điện biên độ lớn được gây ra bởi chẳng hạn như máy phát điện hay các nguồn khác có ảnh hưởng đến hệ thống thu nhận dữ liệu.

QUY TRÌNH A – ĐO VẬN TỐC SÓNG XUNG P

5 Tóm tắt phương pháp

5.1 Sử dụng sự va đập lên bề mặt bê tông để tạo các sóng ứng suất nhanh. Các sóng này lan truyền dọc theo bề mặt bê tông và qua hai đầu thu tín hiệu đặt trên cùng đường thẳng với điểm va đập và tại các khoảng cách cách nhau đã biết.

5.2 Sự chênh lệch về thời gian của tín hiệu sóng xung P (sóng ứng suất với vận tốc lớn nhất) khi đến tại mỗi đầu thu được sử dụng để xác định vận tốc sóng xung P bằng cách lấy khoảng cách đã biết giữa hai đầu thu tín hiệu chia cho thời gian truyền tín hiệu.

6 Thiết bị, dụng cụ

6.1 Đầu va đập

Đầu va đập phải có dạng cầu hay chỏm cầu. Nó sẽ tạo ra khoảng thời gian va đập (30 ± 10) μs với năng lượng đủ để tạo sự dịch chuyển bề mặt do sóng xung P mà có thể ghi nhận bởi hai đầu thu (xem Chú thích 1). Đầu va sẽ được định vị để tạo sự va lên điểm trên đường thẳng đi qua hai đầu thu ở khoảng cách (150 ± 10) mm từ đầu thu thứ nhất.

CHÚ THÍCH 1: Các bi thép cứng có đường kính ($5 + 8$) mm được gắn trên các thanh lò xo thép để có thể tạo các va đập thích hợp.

6.2 Các đầu thu tín hiệu

Hai đầu thu băng rộng đáp ứng sự dịch chuyển vuông góc với bề mặt. Các đầu thu này cần phải có khả năng đo được các dịch chuyển nhỏ tương ứng với sự tới của sóng xung P gây ra bởi sự va đập dịch chuyển dọc theo bề mặt. Diện tích tiếp xúc nhỏ giữa pin điện áp và bề mặt bê tông là cần thiết để ghi nhận chính xác sự tới của sóng xung P (xem Chú thích 2). Sử dụng vật liệu thích hợp để kết nối đầu thu với bê tông.

CHÚ THÍCH 2: Đầu thu sự dịch chuyển thông dụng được làm từ pin điện áp hình côn có đường kính đầu (tiếp xúc) đo là 1,5 mm và đầu cuối rộng có gắn khối đồng thích hợp. Tấm chì dày khoảng 0,25 mm là vật liệu kết nối thích hợp cho loại đầu thu như thế.

6.2.1 Các đầu thu thích hợp nên được công bố bằng văn bản trước về khả năng đo chính xác đối với các chiều dày bản theo phương pháp này.

6.3 Thiết bị định vị

Bộ định vị (gá) cần bảo đảm giữ được các đầu thu ở khoảng cách nhau cố định. Bộ định vị này không được cản trở khả năng của đầu thu đo dịch chuyển của bề mặt. Nó được chế tạo để giảm thiểu khả

TCVN 9489:2012

năng truyền sóng xung P qua nó nhằm ngăn ngừa ảnh hưởng đến việc đo thời gian dịch chuyển của sóng xung P. Các đầu thu sẽ được đặt cách nhau khoảng 300 mm. Đo và ghi nhận khoảng cách thực giữa các tâm của các đầu thu với độ chính xác tới 1 mm.

CHÚ THÍCH 3: Sự chính xác của phép đo bị ảnh hưởng nếu khoảng cách giữa các mũi của hai đầu thu không được biết chính xác. Bộ định vị nên được thiết kế và chế tạo bằng các vật liệu phù hợp nhất để giảm thiểu sự mất ổn định của khoảng cách giữa các đầu thu do sự thay đổi nhiệt độ.

6.4 Hệ thống thu nhận dữ liệu

Bao gồm phần cứng và phần mềm để thu nhận, ghi và xử lý dữ liệu đầu ra của hai đầu thu. Hệ thống này có thể là một máy tính xách tay có thể ghi dữ liệu ở hai kênh hoặc có thể là một máy xách tay phân tích dạng sóng ở hai kênh.

6.4.1 Tần suất lấy mẫu của mỗi kênh sẽ là 500 kHz hoặc cao hơn (khoảng thời gian lấy mẫu là 2 μ s hoặc ít hơn). Hệ thống sẽ có khả năng khởi động từ tín hiệu của một trong các kênh ghi.

6.4.2 Dải điện áp và sự chuyển điện áp của hệ thống thu nhận dữ liệu sẽ trùng hợp với độ nhạy của các đầu thu sao cho sự tới của sóng xung P được xác định chính xác.

CHÚ THÍCH 4: Ví dụ, thẻ thu nhận dữ liệu của máy tính với dải điện áp $\pm 2,5$ V và sự chuyển đổi 12 bit là thích hợp đối với đầu thu tín hiệu mô tả trong chú thích 2.

6.4.3 Hệ thống hiển thị sẽ bao gồm các con trỏ (trên màn hình), bao gồm cả số liệu về thời gian và điện áp của các điểm ở mỗi dạng sóng tương ứng với sự tới của sóng xung P.

6.4.4 Hệ thống thu nhận dữ liệu sẽ hoạt động bởi nguồn điện mà không tạo ra các nhiễu điện đo được bởi các đầu thu và hệ thống thu nhận dữ liệu trong trường hợp hệ thống được đặt ở độ nhạy điện áp yêu cầu để đo các sự tới của sóng xung P.

CHÚ THÍCH 5: Các hệ thống thu nhận dữ liệu dùng nguồn pin là thích hợp.

6.5 Cáp và đầu nối

Để nối các đầu thu tín hiệu với hệ thống thu nhận dữ liệu. Các đầu nối cần có chất lượng cao và nối chặt với cáp. Cáp phải được bọc để giảm nhiễu điện.

6.6 Thiết bị kiểm tra chức năng

Thiết bị dùng để kiểm tra tất cả các bộ phận của hệ thống thí nghiệm hoạt động ổn định trước khi bắt đầu tiến hành thí nghiệm.

CHÚ THÍCH 6: Có thể bao gồm cả một mẫu thử tham khảo mà sự phản ứng va đập của các mẫu này được xác định trước và có thể được so sánh với số liệu đầu ra của hệ thống thí nghiệm.

7 Chuẩn bị bề mặt thí nghiệm

7.1 Bề mặt thí nghiệm cần phải khô. Bụi và các mảnh vỡ nhỏ cần được loại bỏ khỏi bề mặt nơi mà vận tốc sóng xung P được xác định.

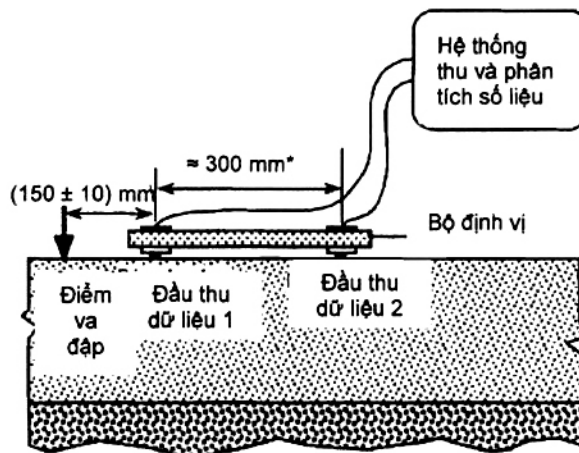
7.2 Nếu bề mặt thí nghiệm quá nhám thì khó đạt được tiếp xúc tốt giữa đầu thu tín hiệu và bề tông, bề mặt bê tông nên được mài nhẵn để có tiếp xúc tốt. Loại bỏ bụi bẩn trước khi kết nối đầu thu với bề mặt bê tông.

CHÚ THÍCH 7: Độ nhám của bề mặt có thể gây ra các vấn đề khi trực tiếp khi thí nghiệm mặt đường cao tốc có kết cấu nhám hay các bề mặt có khe, rãnh. Tại các kết cấu mới, các thành phần đường hộ bê tông cần loại bỏ tại vị trí thí nghiệm để các đầu thu tiếp xúc tốt với bề mặt thí nghiệm và đạt được va đập nhanh.

8 Cách tiến hành

8.1 Sơ đồ bố trí thí nghiệm theo Quy trình A được thể hiện trong Hình 2.

8.2 Lắp thiết bị (các đầu thu, bộ định vị, đầu va đập). Kiểm tra sự hoạt động ổn định của hệ thống thí nghiệm. Đặt thiết bị lên bề mặt bê tông và đặt đầu va đập sao cho vị trí điểm va đập trùng với đường nối hai tâm hai của hai đầu thu ở khoảng cách (150 ± 10) mm cách đầu thu thứ nhất. Nếu thí nghiệm trên bề mặt nhiều khe, rãnh, thì thí nghiệm song song các rãnh, sao cho đường qua các tâm đầu thu và đầu va đập không cắt rãnh. Nếu có vết nứt, thì đặt thiết bị sao cho không có vết nứt nào cắt đường chạy qua điểm va đập và các tâm đầu thu.



* Đo khoảng cách thực giữa các tâm đầu thu dữ liệu chính xác đến 1 mm

Hình 2 - Sơ đồ bố trí thí nghiệm theo Quy trình A

8.3 Khởi động và đặt hệ thống thu nhận dữ liệu với các thông số thu nhận dữ liệu đúng (tần suất lấy mẫu, dải điện áp, mức khởi động, độ trễ,...).

CHÚ THÍCH 8: Đối với một số hệ thống, nên đặt các thông số thu nhận dữ liệu sao cho khoảng 100 điểm được ghi nhận trước điểm thu thứ nhất (trigger point). Các thông số bộ trước điểm thu thứ nhất này sẽ cho phép đánh giá giá trị đường cơ sở ở dạng sóng trước khi sóng xung P tới. Do nhiễu điện, tín hiệu có thể dao động trước sự tới của sóng xung P, và biết trước biên độ của các dao động này sẽ giúp nhận diện sự tới của sóng xung P.

8.4 Thực hiện va đập. Kiểm tra các dạng sóng thu nhận được. Nếu các dạng sóng từ hai đầu thu tín hiệu chấp nhận được, thì lưu các số liệu để dùng cho các phân tích tiếp theo sau. Nếu các sóng xung tới P không thể nhận biết chắn chắn, thì thí nghiệm lại ở cùng vị trí hay di chuyển đến vị trí khác để có sự tiếp xúc tốt hơn giữa các đầu thu và bề tổng.

CHÚ THÍCH 9: Hình 3 là một ví dụ minh họa sự đặt đúng của các dạng sóng với các mũi tên chỉ vào các điểm tương ứng với các sự tới của sóng xung P ở mỗi dạng sóng. Trong trường hợp này các sóng xung tới P tại các vị trí đầu thu được nhận biết rõ bởi sự tăng của các dạng sóng cao hơn các mức nền. Vận tốc sóng xung P tính được là $0,3/(0,000076)=3950$ m/s, và đó là giá trị hợp lý.

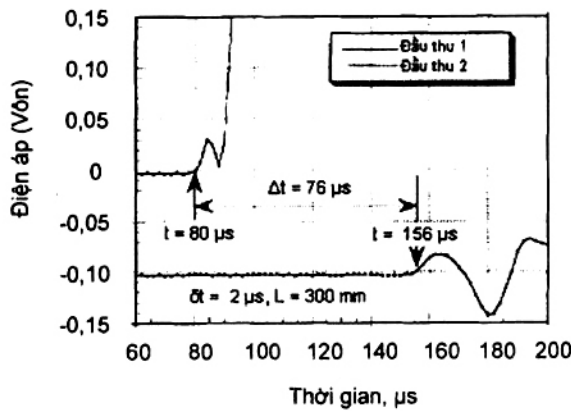
9 Phân tích số liệu và tính toán

9.1 Xuất hiện trên màn hình của hệ thống thu nhận dữ liệu (máy vi tính) là các dạng sóng từ hai đầu thu do vậy chúng được dựng đồ thị theo cùng một trục thời gian.

9.2 Nhận biết thời gian tới của sóng xung P trực tiếp trong mỗi dạng sóng. Sự tới của sóng xung P được nhận biết tại điểm thứ nhất khi điện áp thay đổi từ giá trị đường nền (xem Hình 3). Sử dụng con trỏ để hiển thị các chỉ số đọc về điện áp và thời gian tại các điểm tương ứng với các sự tới của sóng xung P. Xác định mức độ chênh lệch thời gian, Δt , giữa sự tới của sóng xung P tại mỗi dạng sóng. Sự chênh lệch thời gian này là thời gian dịch chuyển. Việc đo tự động sự tới của sóng xung P ở các dạng sóng cho phép có các dạng sóng ổn định (không chứa nhiễu) trước khi sóng xung P tới.

9.3 Sử dụng thời gian dịch chuyển đã đo, Δt , và khoảng cách đã đo giữa các đầu thu, L, để tính vận tốc sóng xung P :

$$C_p = \frac{L}{\Delta t} \quad (3)$$



**Hình 3 - Ví dụ các dạng sóng thu được khi sử dụng Quy trình A
(chỉ phần đầu của các dạng sóng được thể hiện)**

9.4 Thực hiện hai lần đo thí nghiệm tại mỗi vị trí thí nghiệm. Nếu thời gian dịch chuyển đã đo là như nhau trong cả hai trường hợp, thì tiến hành thí nghiệm tiếp các điểm khác. Nếu hai thời gian dịch chuyển này khác nhau bởi một khoảng thời gian lấy mẫu hay nhiều hơn, thì thực hiện thí nghiệm lần 3 và chấp nhận thời gian dịch chuyển lặp lại là giá trị đúng. Nếu hai trong ba số đo không giống nhau, thì cần kiểm tra để bảo đảm các đầu thu có tiếp xúc tốt với bề mặt và lặp lại thí nghiệm.

9.5 Tính vận tốc sóng xung tới P biểu kiến theo phương trình (1).

9.6 Quy trình thay thế – Trong các thí nghiệm mà độ chính xác tối đa của đo chiều dày đo là không quan trọng, thì vận tốc sóng xung P biểu kiến trong bê tông, được chấp nhận xác định bằng hiệu chỉnh trực tiếp với chiều dày đã đo ở các điểm trong kết cấu. Xác định chiều dày của kết cấu, xác định tần suất chiều dày tại cùng điểm phù hợp với Quy trình B, và sử dụng phương trình (2) để tính vận tốc sóng biểu kiến. Người mua dịch vụ thí nghiệm và công ty thí nghiệm sẽ phải thỏa thuận với nhau cho phép hay không cho phép thực hiện quy trình thay thế này. Hai bên sẽ phải thỏa thuận tiếp về số lượng và vị trí của các điểm hiệu chỉnh và phương pháp xác định chiều dày bê tông. Khi sử dụng quy trình thay thế này, thì không áp dụng quy trình quy định trong Điều 15.

QUY TRÌNH B – THÍ NGHIỆM PHẢN XẠ VA ĐẬP

10 Tóm tắt phương pháp thử

10.1 Va đập tại bề mặt bê tông gây các sóng ứng suất, trong đó sóng xung P có ý nghĩa quan trọng nhất. Sóng xung P lan truyền vào trong bản bê tông và bị phản xạ tại mặt đối diện.

10.2 Phản xạ nhiều lần của sóng xung P giữa các bề mặt bản bê tông làm tăng sự cộng hưởng chiều dày đo nhanh với tần số liên quan đến chiều dày bản.

10.3 Đầu thu dữ liệu, đặt sát với điểm va đập ghi nhận sự dịch chuyển bề mặt gây ra bởi sự tới của các sóng phản xạ. Kết quả ở đầu thu được ghi được như dạng sóng theo thời gian.

10.4 Các dạng sóng thu nhận được được chuyển thành dạng tần số bằng cách sử dụng kỹ thuật chuyển đổi Fourier và thu được phổ biên độ. Cộng hưởng chiều dày sinh ra một cực trị trội dễ nhận thấy trong phổ, có thể dễ nhận biết. Giá trị tần số của cực trị này được sử dụng kết hợp với vận tốc sóng xung P biểu kiến thu được từ Quy trình A, để tính chiều dày của bản bằng phương trình (2).

11 Thiết bị, dụng cụ

11.1 Đầu va đập

Đầu va đập nên hình cầu hay chỏm cầu. Nó phải tạo đủ năng lượng lên bản bê tông cứng sao cho có được phổ biên độ xác định tốt với cực trị đơn trội. Khoảng thời gian va, t_c , cần nhỏ hơn (xem 3.1.5) so với thời gian dịch chuyển của sóng xung P, như sau :

$$t_c < \frac{2T}{C_p} \quad (4)$$

CHÚ THÍCH 10: Các bi thép cứng có đường kính (8 + 16) mm được gắn trên các thanh lò xo thép và các đầu va cơ học hình chỏm cầu được sử dụng thích hợp cho mặt đường cao tốc thông dụng bằng bê tông.

11.2 Đầu thu

Đầu thu băng rộng ghi nhận sự dịch chuyển vuông góc với bề mặt. Đầu thu này cũng giống như đầu thu mô tả trong Quy trình A.

11.3 Hệ thống thu nhận dữ liệu

Để thu nhận, ghi nhận và xử lý số liệu đầu ra của đầu thu. Hệ thống này có thể giống như hệ thống mô tả trong Quy trình A.

11.3.1 Tần suất lấy mẫu điển hình là trong khoảng 500 kHz (khoảng thời gian 2 μ s) và 250 kHz (khoảng thời gian 4 μ s).

11.3.2 Số lượng điển hình của các điểm lấy số liệu để ghi nhận dạng sóng là 1024 hoặc 2048.

11.3.3 Khoảng thời gian điển hình của dạng sóng ghi được (chu kỳ lấy mẫu) là 4096 μ s hoặc 8192 μ s.

CHÚ THÍCH 11: Chu kỳ lấy mẫu là tích số của số lượng các điểm ghi nhận và khoảng thời gian lấy mẫu. Giá trị nghịch đảo của chu kỳ lấy mẫu xác định khoảng tần số trong phổ biên độ có được theo phương pháp chuyển đổi Fourier nhanh. Chu kỳ lấy mẫu 4096 μs tương ứng khoảng tần số 244 Hz và chu kỳ lấy mẫu 8192 μs tương ứng 122 Hz. Khoảng tần số nhỏ hơn cho phép đo chiều dày chính xác hơn. Tuy nhiên chu kỳ lấy mẫu nên được chọn có xem xét đến kích thước cạnh của bản bê tông so với chiều dày của bản. Nếu kích thước cạnh nhỏ hơn của bản lớn hơn ít nhất 20 lần chiều dày, thì có thể sử dụng chu kỳ lấy mẫu 8192 μs . Nếu kích thước cạnh nhỏ hơn của bản lớn hơn ít nhất 10 lần chiều dày, thì có thể sử dụng chu kỳ lấy mẫu 4096 μs . Đối với kích thước cạnh nhỏ hơn, sử dụng chu kỳ lấy mẫu ngắn hơn, sẽ gây ra sự không chính xác của đo chiều dày đo được. Các hạn chế này là cần thiết để bảo đảm rằng dạng sóng không bao gồm sự dịch chuyển liên quan đến các loại rung khác mà có thể gây nhiễu đến khả năng nhận biết tần số chiều dày của bản trong phổ biên độ.

11.3.4 Dải điện áp để thu nhận số liệu nên sao cho biên độ của dạng sóng là đủ để cho phép kiểm tra bằng mắt các đặc tính chủ yếu của nó; chẳng hạn như tín hiệu sóng bề mặt và các dao động tiếp theo sau.

CHÚ THÍCH 12: Dải điện áp quá cao có thể làm xuất hiện dạng sóng với biên độ nhỏ làm nó khó kiểm tra. Dải điện áp quá thấp có thể gây mất một phần tín hiệu thu. Bộ số hóa với ít nhất 12 bit chuyển đổi được khuyến cáo sử dụng.

11.3.5 Phần mềm được cung cấp để thu nhận, ghi nhận, hiển thị và phân tích số liệu. Phần mềm sẽ tính phổ biên độ từ dạng sóng ghi nhận được. Phổ biên độ sẽ hiển thị ngay lập tức sau khi dạng sóng được ghi nhận. Phần mềm để xác định tần số chiều dày cũng cho phép dùng con trỏ thủ công.

11.3.6 Hệ thống thu nhận dữ liệu sẽ hoạt động bằng nguồn năng lượng không gây ra nhiễu điện được đo bởi đầu thu và hệ thống thu nhận dữ liệu khi mà hệ thống này được đặt ở dải điện áp sử dụng để thí nghiệm (xem Chú thích 5).

11.4 Cáp và đầu nối

Như mô tả ở Quy trình A.

11.5 Thiết bị kiểm tra chức năng

Như mô tả ở Quy trình A.

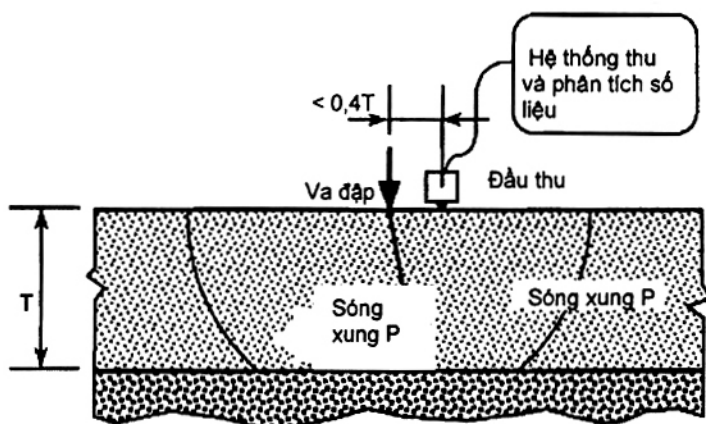
12 Chuẩn bị bề mặt thử

12.1 Loại bỏ bụi bẩn và các mảnh vỡ nhỏ khỏi bề mặt ở nơi cần xác định chiều dày.

12.2 Nếu bề mặt thí nghiệm rất nhám thì khó có tiếp xúc tốt giữa đầu thu và bề mặt, nên mài bề mặt sao cho có tiếp xúc tốt (xem Chú thích 7).

13 Cách tiến hành

13.1 Hình 4 là sơ đồ thử nghiệm phản xạ và đập ở tấm bản.



Hình 4. Sơ đồ bố trí thí nghiệm phản xạ va đập (Quy trình B)

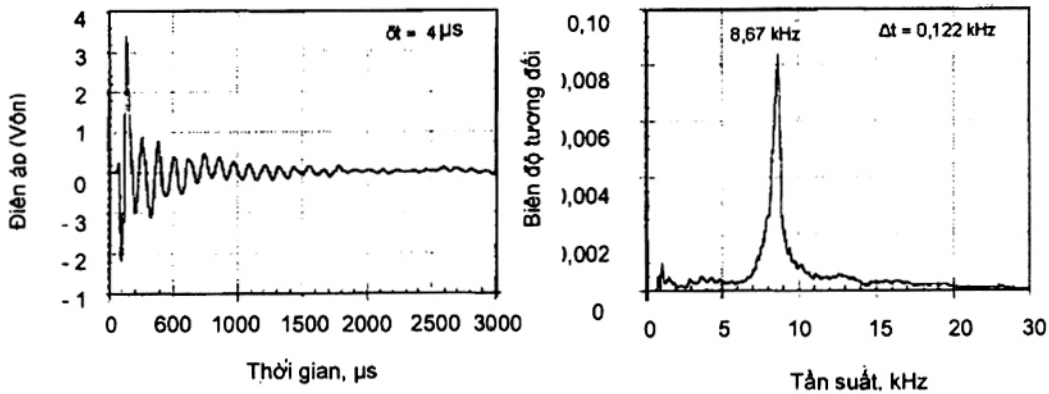
13.2 Đặt đầu thu lên bề mặt bê tông tại nơi cần đo độ dày. Đặt bộ va đập để tạo va đập ở khoảng cách ít hơn 0,4 độ dày bản (quy ước) cách đầu thu.

13.3 Hệ thống thu nhận với các thông số thu nhận số liệu chính xác (tần suất lấy mẫu, dải điện áp, độ trễ, mức khởi động ...) được chuẩn bị sẵn sàng. Việc thu nhận số liệu được bắt đầu bởi tín hiệu đầu thu hay bởi bộ va đập hoạt động. Nếu cần thiết, thiết lập các thông số thu nhận số liệu bằng các thí nghiệm thử sơ bộ.

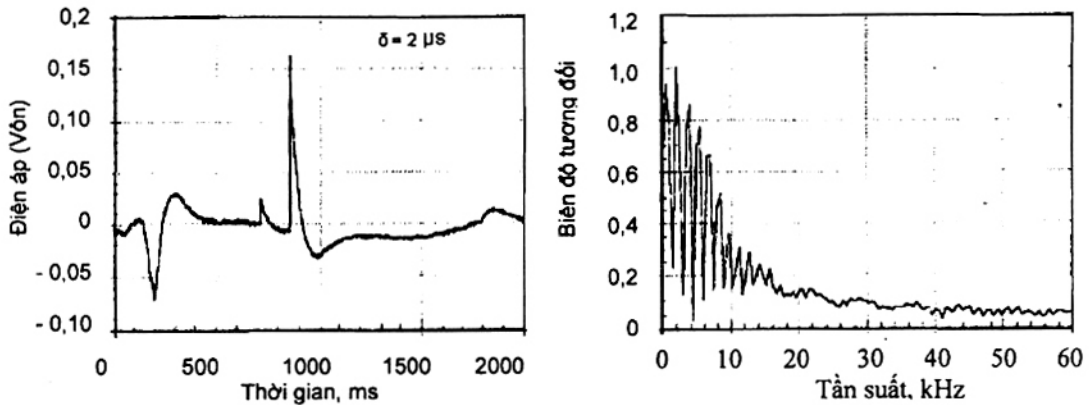
CHÚ THÍCH 13: Đối với một số hệ thống, khuyến cáo đặt các thông số tiếp nhận số liệu sao cho khoảng 100 điểm được ghi nhận trước điểm khởi động (điểm thu thứ nhất). Phần đầu của dạng sóng cho thông tin về thời gian tiếp xúc của sự va đập và có thể giúp nhận biết các dạng sóng lỗi do tiếp xúc kém, nhiễu điện, hay các yếu tố khác.

13.4 Thực hiện sự va đập. Kiểm tra dạng sóng thu nhận được và phổ biên độ tương ứng. Để đánh giá khả năng thích hợp của dạng sóng, cần phải kiểm tra xem liệu phần của dạng sóng tương ứng với sóng bề mặt là dạng đúng hay không và sóng bề mặt có được theo sau bởi dao động chu kỳ tương ứng với các đa phản xạ giữa mặt ranh giới của bản bê tông. Phổ biên độ của dạng sóng thích hợp sẽ có cực trị trội đơn ở tần số phù hợp với độ dày bản bê tông.

CHÚ THÍCH 14: Hình 5 cho ví dụ về dạng sóng theo thời gian thích hợp và phổ biên độ tương ứng của nó trong thí nghiệm bản bê tông. Khoảng thời gian lấy mẫu là 4 μ s và số lượng các điểm ở dạng sóng hoàn thành (không thể hiện) là 2048.



Hình 5 - Dạng sóng và phổ biên độ để thí nghiệm phản xạ và đập chấp nhận của bản bê tông dày 250 mm



Hình 6 - Ví dụ về thí nghiệm phản xạ và đập không phù hợp, do dạng sóng không thể hiện các dao động theo chu kỳ và phổ biên độ không có cực trị đơn.

13.5 Nếu dạng sóng và phổ biên độ chấp nhận được, thì lưu lại dạng sóng và phổ biên độ ban đầu đó. Lặp lại thí nghiệm để kiểm tra các kết quả. Nếu các kết quả được lặp lại và ổn định, thì chuyển đến các điểm đo tiếp sau. Nếu dạng sóng và phổ biên độ không phù hợp (xem Chú thích 15), thì cần kiểm tra lại bề mặt thí nghiệm xem có bị rác bụi hay không và xem lại đầu thu dữ liệu có tiếp xúc tốt với bề mặt bê tông hay không. Cũng cần kiểm tra xem bề mặt điểm va đập có phẳng và có rác, bụi không, đồng thời xem lại kích thước chính xác của đầu đo sử dụng. Lặp lại thí nghiệm cho đến khi dạng sóng và phổ biên độ thu được thật ổn định.

CHÚ THÍCH 15: Hình 6 thể hiện ví dụ các kết quả thí nghiệm phản xạ và đập sai. Đồ thị dạng sóng thiếu sự dao động theo chu kỳ và phổ biên độ không có cực trị đơn.

14 Phân tích các số liệu

14.1 Xác định tần số của cực trị biên độ cao trong phổ biên độ.

14.2 Tính chiều dày của bản theo phương trình (2).

15 Diễn giải các kết quả (các lỗi hệ thống)

15.1 Các lỗi hệ thống xuất hiện trong việc xác định vận tốc sóng và chiều dày bản bê tông là do bản chất kỹ thuật số của các dạng sóng và phổ biên độ. Do vậy có các lỗi hệ thống ở trong các vận tốc sóng xung P và các chiều dày bản đã tính. Phần phụ lục sẽ cung cấp các phép lấy đạo hàm của các biểu thức cho các lỗi hệ thống tối đa.

15.2 Lỗi hệ thống trong Quy trình A – Lỗi hệ thống tối đa trong vận tốc sóng xung P đã tính được thể hiện bằng phương trình sau:

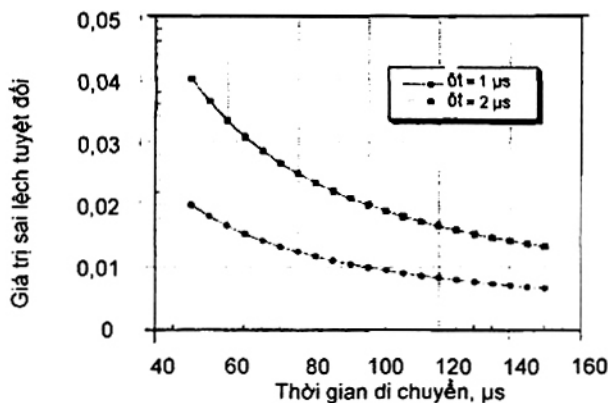
$$e_p = \pm \frac{\delta t}{\Delta t} \tag{5}$$

trong đó: δt khoảng lấy mẫu;

Δt thời gian di chuyển của sóng xung P đo được.

15.2.1 Phương trình (5) dựa trên giả thiết cho rằng không có nhiễu điện tại các đồ thị dạng sóng, do vậy sự tới của sóng xung P có thể được nhận biết dễ dàng. Hình 7 thể hiện lỗi hệ thống tối đa do khoảng thời gian lấy mẫu là hàm của thời gian dịch chuyển. Vận tốc sóng xung P được tính theo phương trình (3) như sau:

$$C_p \pm e_p C_p \tag{6}$$



Hình 7 – Sai lệch hệ thống tối đa do khoảng lấy mẫu như là hàm của thời gian di chuyển.

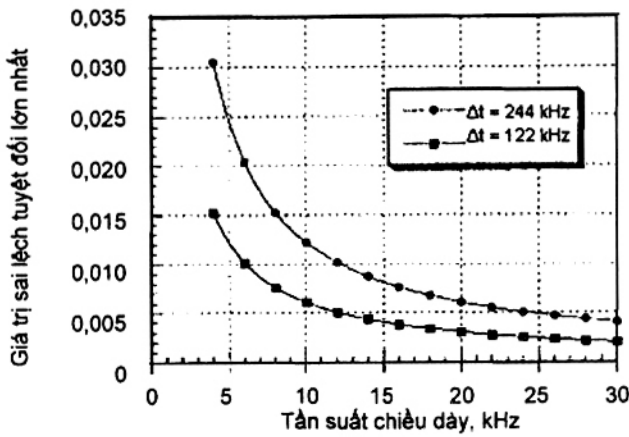
15.3 Lỗi hệ thống trong Quy trình B - Lỗi hệ thống tối đa trong độ dày đã tính do độ phân giải tần số được tính theo phương trình sau:

$$e_f = \pm \frac{\Delta f}{2f} \quad (7)$$

trong đó: Δf khoảng tần suất trong phổ biên độ;

f tần số ứng với cực trị biên độ cao trong phổ biên độ.

15.3.1 Hình 8 thể hiện lỗi hệ thống tối đa của chiều dày tính được gây ra do độ phân giải tần số như là hàm số của tần số đã đo. Tần số cao hơn ứng với chiều dày nhỏ hơn và lỗi hệ thống ít hơn khi chiều dày giảm.



Hình 8 - Lỗi hệ thống lớn nhất do khoảng tần suất là hàm của tần suất độ dày.

15.4 Lỗi hệ thống kết hợp – Sự đánh giá lỗi hệ thống kỳ vọng tối đa của chiều dày đã tính đối với cả hai nguồn gây lỗi được thể hiện trong phương trình sau:

$$e = \sqrt{e_p^2 + e_f^2} \quad (8)$$

15.5 Báo cáo kết quả đo chiều dày – chiều dày bản được tính theo phương trình (2) như sau:

$$T \pm eT \quad (9)$$

16 Báo cáo thử nghiệm

16.1 Báo cáo các thông số dữ liệu được sử dụng. Các thông số này bao gồm khoảng thời gian lấy mẫu, dải điện thế, độ phân giải điện áp, số lượng các điểm trong đồ thị dạng sóng và khoảng tần số trong phổ biên độ.

16.2 Vị trí mỗi điểm thí nghiệm trên kết cấu, điều kiện bề mặt thí nghiệm và nó có được mài hay không.

16.3 Đối với các bản bê tông nằm trên nền, cần phải báo cáo chi tiết loại vật liệu nền nếu biết.

16.4 Vận tốc sóng xung P theo 15.2.1.

16.5 Chiều dày bản theo 15.5.

16.6 Nếu quy trình thay thế theo 9.6 được sử dụng để xác định vận tốc sóng xung P, thì cần báo cáo số liệu hiệu chỉnh trước khi tiến hành thí nghiệm và việc sử dụng các số liệu này như thế nào khi tính chiều dày bản.

17 Độ chụm và độ chệch

17.1 Độ chụm và độ chệch của phương pháp này hiện nay chưa rõ ràng. Các số liệu so sánh chiều dài đo theo lõi khoan với chiều dày tấm của các thí nghiệm theo phiên bản trước của phương pháp thử này được nêu trong tài liệu tham khảo trích dẫn ở Chú thích 3. Tài liệu đó cho thấy có sự khác biệt ở chiều dày bản đo theo lõi khoan và phương pháp đo này là trong khoảng $\pm 3\%$ đối với chiều dày bản dao động từ 200 mm đến 290 mm.

Phụ lục A
(tham khảo)
Sai số hệ thống

A.1 Khái quát

A.1.1 Phương pháp thí nghiệm này dựa trên việc sử dụng các phương pháp lấy mẫu kỹ thuật số và phương pháp phân tích tín hiệu kỹ thuật số. Do vậy, các đồ thị dạng sóng theo thời gian và phổ biên độ được tập hợp từ các điểm gián đoạn với các khoảng cách xác định tùy thuộc các thông số thu nhận dữ liệu. Phương pháp này có kết quả với sai số hệ thống của thời gian dịch chuyển đo được hoặc là tần số chiều dày và các giá trị thật của chúng. Các phần dưới đây sẽ giải thích việc xác định như thế nào các giá trị tối đa của các lỗi hệ thống này. Do các sai số hệ thống này, vận tốc sóng xung P và chiều dày bản xác định bằng phương pháp này có kết quả là các khoảng giá trị.

A.2 Sai số hệ thống của vận tốc sóng xung P

A.2.1 Hình A.1 thể hiện sơ đồ phân đầu của các đồ thị dạng sóng (điện áp theo thời gian) ghi được từ hai đầu thu trong Quy trình A. Các chấm đen thể hiện các điểm được ghi nhận bởi hệ thống thu nhận dữ liệu. Các đường liền thể hiện các dịch chuyển bề mặt mà thực chất là hàm theo thời gian. Thời gian dịch chuyển đo được bằng sự khác biệt thời gian Δt giữa hai điểm mà ở đó các điện áp tăng cao hơn các giá trị nền. Thời gian dịch chuyển đã đo khác với thời gian dịch chuyển thực $\Delta t'$. Từ Hình A.1, nó có thể được thể hiện như:

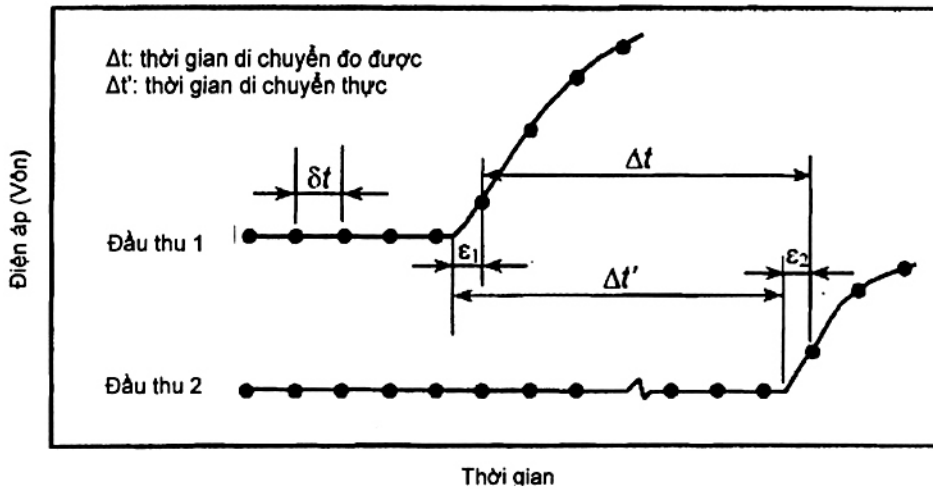
$$\Delta t = \Delta t' - \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (\text{A.1})$$

$$\Delta t' - \Delta t = \epsilon_1 - \epsilon_2 \quad (\text{A.2})$$

Sai số tương đối của vận tốc sóng xung P đã tính do các sự khác biệt giữa thời gian dịch chuyển.

Sai số tương đối của vận tốc sóng xung P tính được do các sự khác biệt giữa thời gian dịch chuyển đo được và thời gian di chuyển thực có thể được thể hiện như sau:

$$e_p = \frac{C_p - C'_p}{C'_p} = \frac{\frac{L}{\Delta t} - \frac{L}{\Delta t'}}{\frac{L}{\Delta t'}} = \frac{\Delta t'}{\Delta t} - 1 = \frac{\Delta t' - \Delta t}{\Delta t} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\Delta t} \quad (\text{A.3})$$



Hình A.1 - Sơ đồ phân đầu của các đồ thị dạng sóng thu được từ Quy trình A

Giá trị tuyệt đối tối đa của sai số e_p xảy ra khi hoặc là $\epsilon_1 = 0$ và $\epsilon_2 = \delta t$; hoặc là khi $\epsilon_1 = \delta t$ và $\epsilon_2 = 0$. Khi $\epsilon_1 = 0$ và $\epsilon_2 = \delta t$:

$$e_p = \frac{-\delta t}{\Delta t} \quad (A.4)$$

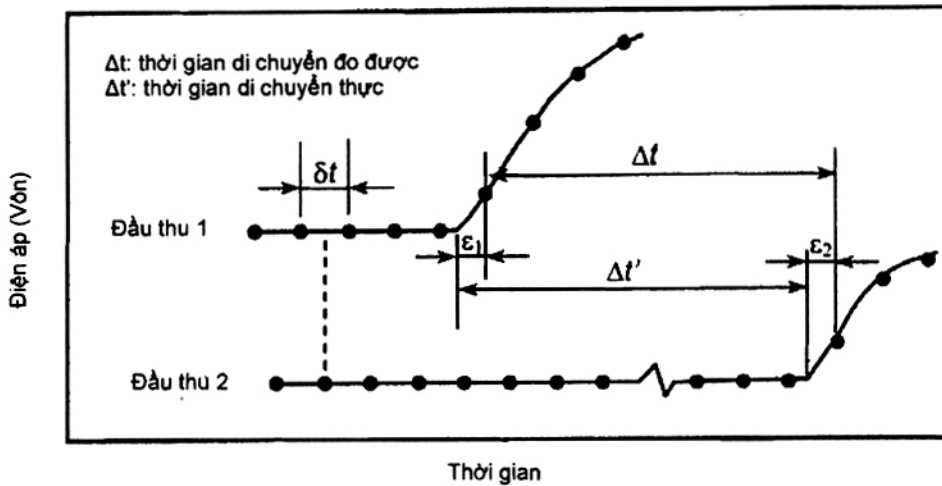
Khi $\epsilon_1 = \delta t$ và $\epsilon_2 = 0$:

$$e_p = \frac{+\delta t}{\Delta t} \quad (A.5)$$

Do vậy, sai số hệ thống tối đa của vận tốc sóng xung P do việc lấy mẫu theo thời gian là:

$$e_p = \pm \frac{\delta t}{\Delta t} \quad (A.6)$$

A.2.2 Các công thức trên giả thiết rằng hai đồ thị dạng sóng ghi nhận được do sự lấy mẫu đồng thời ở hai kênh. Hình A.2 là sơ đồ của các đồ thị dạng sóng thu được từ hệ thống thu nhận dữ liệu qua 2 kênh luân phiên. Có thể thấy rằng sai số hệ thống tối đa là như nhau như được nêu trong phương trình A.6 thể hiện khoảng lấy mẫu δt là khoảng thời gian giữa các điểm lân cận trong từng đồ thị dạng sóng.



Hình A.2 - Sơ đồ phân đầu của các đồ thị dạng sóng thu được từ Quy trình A với hệ thống thu nhận dữ liệu lấy mẫu tại mỗi kênh luân phiên.

A.3 Sai số hệ thống của độ dày do khoảng tần suất của phổ biên độ

A.3.1 Hình A.3 là sơ đồ của phổ biên độ có được từ thí nghiệm phản xạ va đập của bản cứng. Cực trị biên độ cao tương ứng với tần suất chiều dày của bản. Các điểm đen là các giá trị kỹ thuật số xuất hiện trên màn hình máy tính, và đường cong liền thể hiện phổ biên độ thực. Tần số đo được f khác với tần số thực f' . Sự khác biệt này dẫn đến sai số hệ thống của độ dày bản được tính theo tần số đã đo.

A.3.2 Sai số tương đối của chiều dày bản tính được có liên quan với tần số đo được và tần số thực như sau:

$$e_f = \frac{T - T'}{T'} = \frac{\frac{0,96 C_p}{2f} - \frac{0,96 C_p}{2f'}}{\frac{0,96 C_p}{2f'}} = \frac{f'}{f} - 1 = \frac{f' - f}{f} \quad (\text{A.7})$$

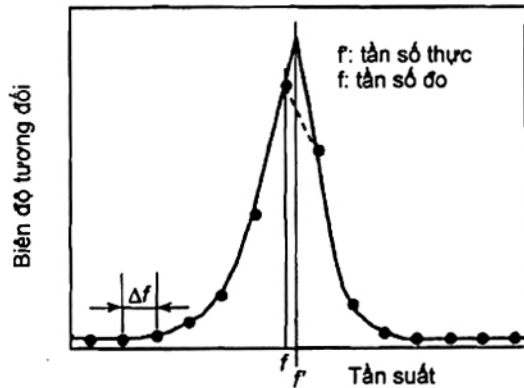
trong đó:

T chiều dày tính được dựa trên tần số chiều dày đo được f ;

T' chiều dày tính được dựa trên tần số chiều dày thực f' .

Giá trị tuyệt đối của chênh lệch lớn nhất giữa f và f' là $\Delta f/2$. Do vậy, sai số hệ thống lớn nhất của chiều dày tính toán bởi khoảng tần số của phổ biên độ là :

$$e_f = \pm \frac{\Delta f}{2f} \quad (\text{A.8})$$



Hình A.3 - Sơ đồ phổ biên độ từ thí nghiệm phản xạ và đập (Quy trình B) với bản cứng.

A.3.3 Phương trình A.8 cho thấy rằng sai số hệ thống của tần số tính toán sẽ giảm khi giảm khoảng tần số Δf . Như giải thích trong chú thích 11 của thí nghiệm này, khoảng tần số được kiểm soát bởi độ dài của đồ thị dạng sóng (độ dài ghi nhận). Do vậy, khi làm thí nghiệm phản xạ xung và đập để đo chiều dày bản, thì sử dụng chiều dài ghi nhận lớn nhất là thực tiễn. Tuy nhiên, độ dài ghi nhận không được quá dài, nếu không thì chuyển động do các dao động khác của bản, gây nên bởi phản xạ của các mặt bên, có thể ảnh hưởng đến đồ thị dạng sóng. Đó là lưu ý nêu trong chú thích 11.

A.4 Sai số hệ thống của chiều dày tính toán

A.4.1 Sai số chiều dày tính từ vận tốc sóng xung P và tần số cực trị bao gồm hai nguồn sai số hệ thống. Cách đặt vấn đề trong phương pháp thử này là để tính sai số kết hợp e như sau:

$$e = \sqrt{e_p^2 + e_f^2} \quad (\text{A.9})$$

A.4.2 Sai số tương đối của chiều dày bản gây ra do hai nguồn sai số hệ thống được thể hiện như sau:

$$\frac{T - T'}{T'} = \pm e \quad (\text{A.10})$$

Và có thể biến đổi như sau:

$$T' = \frac{T}{1 \pm e} \quad (\text{A.11})$$

Đối với các giá trị nhỏ của $|e|$ thì:

$$\frac{1}{1 \pm e} \approx 1 + e \quad (\text{A.12})$$

Do vậy để giải thích cho sai số hệ thống cố hữu trong phương pháp thử này, chiều dày tính theo phương trình 2 sẽ là :

$$T \pm T e \quad (\text{A.13})$$
