

**KIỂM ĐỊNH VÀ QUAN TRẮC CẦU BÊ TÔNG CỐT THÉP
BẰNG PHƯƠNG PHÁP IADP SỬ DỤNG SÓNG ÂM THANH
(ACOUSTIC EMISSION) – QUY TRÌNH TRIỂN KHAI**

Lương Minh Chính¹

Tóm tắt: Trong bài tác giả giới thiệu giải pháp kiểm định và quan trắc công trình cầu bê tông cốt thép bằng phương pháp **IADP** (*Identification of Active Damage Processes - Xác định các quá trình phá hoại chủ động*) dựa trên phân tích các tín hiệu sóng âm thanh (*Acoustic Emission – AE*) được tạo bởi chính quá trình phá hoại dưới tác động của tải trọng khai thác. Trong bài tác giả cũng giới thiệu các bước triển khai kiểm định và quan trắc đối với cầu bê tông cốt thép (cầu yếu) phục vụ công tác quản lý và khai thác hiệu quả cơ sở hạ tầng giao thông ở Việt Nam.

Từ khóa: quan trắc và kiểm định công trình, cầu bê tông cốt thép, sóng âm thanh, hư hại.

1. MỞ ĐẦU

Trong lĩnh vực xây dựng cũng như cơ sở hạ tầng giao thông, đặc biệt đối với các công trình cầu thi kết cấu bê tông cốt thép là loại kết cấu phổ biến, được áp dụng rộng rãi từ hàng chục năm nay. Cũng chính vì thế mà nhiều công trình đã có tuổi và xuống cấp. Để đảm bảo bảo an toàn khai thác các công trình nêu trên, hàng loạt các công tác kiểm định, sửa chữa và gia cố cần phải được triển khai thực hiện.

Trong những năm vừa qua, được sự quan tâm của Chính phủ, hệ thống cơ sở hạ tầng đường bộ đã từng bước được nâng cấp, các cầu yếu đã từng bước được đầu tư xây dựng bằng các dự án riêng hoặc lồng ghép trong các dự án đầu tư nâng cấp mở rộng đường. Tuy nhiên do điều kiện nguồn lực hạn hẹp, đến nay vẫn còn nhiều tuyến chưa được nâng cấp hoặc chỉ mới được nâng cấp phần tuyến nên trên hệ thống quốc lộ trong cả nước vẫn tồn tại các cầu yếu làm ảnh hưởng đến hiệu quả khai thác của các tuyến đường, tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn giao thông, có khả năng ảnh hưởng đến tính mạng và tài sản của người dân.

Dưới tác động liên tục thay đổi của các điều kiện khai thác, điều kiện khí hậu thời tiết trong suốt quá trình khai thác của công trình, các công trình cầu bê tông cốt thép ngày càng xuống cấp, vậy việc triển khai các công tác kiểm định và quan trắc theo chu kỳ đối với các công trình cầu yếu trong quá trình khai thác là hết sức cần thiết.

Một trong những hợp phần quan trọng của quan trắc theo chu kỳ là công tác kiểm tra định kỳ thực hiện bởi các kỹ sư có kinh nghiệm (Lương Minh Chính, 2014). Các công tác kiểm tra phải được hỗ trợ bằng các phương pháp kiểm định không phá hủy cho phép đánh giá được trạng thái kết cấu của công trình, đặc biệt đối với những vị trí khó tiếp cận bằng mắt thường. Việc xác định sớm và chính xác các hư hại xảy ra bên trong kết cấu trong quá trình khai thác cho phép đưa ra các quyết định hợp lý trong khai thác, sửa chữa và bảo trì công trình, cho phép khai thác công trình liên tục không bị gián đoạn.

Đối với các công trình cầu thì việc này càng quan trọng hơn vì sự phát triển của hệ thống cơ sở hạ tầng giao thông phụ thuộc nhiều vào chúng. Trong khi đó có nhiều công trình được

¹ Bộ môn Công trình giao thông, Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy Lợi.

xây dựng trong những thập niên 70 – 80 của thế kỷ trước. Việc phải đóng cầu vì sự suy giảm của trạng thái công trình dẫn đến nhiều thiệt hại về kinh tế. Vì thế việc phát triển và áp dụng các giải pháp kiểm định, quan trắc và bảo trì các công trình cầu yếu là hết sức cần thiết. Hệ thống quan trắc loại này cần phải tập trung vào hai yếu tố (Lương Minh Chính, Goszczyńska B., Swit G. 2015):

- Các sự biến đổi của tải trọng trong quá trình khai thác

- Sự tích lũy của các hư hại bên trong kết cấu.

Việc quan trắc và kiểm định hợp lý các công trình cầu sẽ hỗ trợ các cơ quan chức năng quản lý và khai thác công trình hợp lý hơn, kéo dài tuổi thọ của công trình, tối ưu hóa các công tác duy tu bảo dưỡng và sửa chữa, sử dụng nguồn vốn bảo trì một cách hợp lý.

2. HIỆN TRẠNG CÁC CẦU YẾU TRÊN HỆ THỐNG CÁC QUỐC LỘ

Theo số liệu quản lý và thống kê của Tổng

Bảng 1. Phân bố các cầu yếu thuộc nhóm ưu tiên 1 trên toàn quốc theo từng khu vực

Khu vực	Phía Bắc	Miền Trung – Tây Nguyên	Phía Nam	Cả nước
Số lượng cầu yếu	15	34	30	79

- Nhóm ưu tiên 2 - bao gồm 264 cầu yếu nằm trên quốc lộ có mật độ giao thông thấp hơn hoặc có đường song hành. Trong

Bảng 2. Phân bố các cầu yếu thuộc nhóm ưu tiên 2 trên toàn quốc theo từng khu vực

Khu vực	Phía Bắc	Miền Trung – Tây Nguyên	Phía Nam	Cả nước
Số lượng cầu yếu	105	137	22	264

Từ những yếu tố trên việc phát triển các phương pháp kiểm định và quan trắc mới với kết cấu bê tông cốt thép có nhiều ý nghĩa thiết thực để nâng cao chất lượng quản lý và khai thác cơ sở hạ tầng giao thông, khi mà:

- Tải trọng khai thác hiện nay ở các cầu phần lớn đều vượt quá tải trọng thiết kế

- Nhiều công trình cầu đã có tuổi thọ cao, có nhiều hư hại đã xuất hiện và tích lũy

- Các quy trình kiểm tra kiểm định hiện nay

cục Đường bộ đến thời điểm năm 2014 trên các tuyến quốc lộ trong cả nước vẫn tồn tại 343 vị trí cầu yếu trong tổng số 4239 vị trí cầu. Hầu hết các cầu được xây dựng trước năm 1975, kết cấu thượng bộ, hạ bộ đã bị xuống cấp, rung lắc mạnh và độ võng lớn; một số cầu không đáp ứng nhu cầu thoát lũ, khổ cầu hẹp. Một số cầu được đầu tư sau năm 1975 tuy nhiên có tải trọng thiết kế thấp và bắt đầu có dấu hiệu xuống cấp hoặc không đảm bảo thoát lũ do diễn biến bất thường của khí hậu. Các vị trí cầu này đều có tải trọng khai thác không đồng bộ với tuyến. Dựa trên mật độ giao thông, tính chất tuyến đường (độc đạo hoặc có đường song hành), hiện trạng của từng cầu, Bộ GTVT phân danh mục cầu yếu thành 2 nhóm cụ thể như sau (Báo cáo, 2012):

- Nhóm ưu tiên 1 - bao gồm 79 cầu yếu nằm trên các tuyến có mật độ giao thông lớn, đường độc đạo, các giải pháp sửa chữa không khả thi.

trường hợp nguồn lực khó khăn có thể sửa chữa để duy trì tình trạng khai thác như hiện nay.

có tính chủ quan, các phương pháp kiểm định chỉ mang tính chất cục bộ chứ không bao quát tổng thể công trình.

Điều cần thiết là thiết lập một phương pháp kiểm định, quan trắc mang tính khách quan, dựa trên phân tích các hiện tượng hư hại xảy ra trong kết cấu, bao quát toàn bộ công trình. Giải pháp này phải là phương pháp không phá hủy, không có ảnh hưởng đến kết cấu và khai thác của công trình và cho phép:

- Phát hiện và xác định chính xác các vị trí phát triển hư hại
- Quan trắc quá trình phát triển hư hại theo thời gian
- Phản ánh được quá trình hư hỏng dưới sự ảnh hưởng của các yếu tố tác động khác nhau
- Quan trắc trong điều kiện hiện trường phức tạp, không ảnh hưởng đến khai thác của công trình.
- Đánh giá ảnh hưởng của các tổ hợp tải trọng khai thác và các yếu tố môi trường lên các hư hại.
- Loại bỏ hay hạn chế tối đa các yếu tố chủ quan trong quá trình đánh giá trạng thái kết cấu công trình cũng như đưa ra các quyết định.
- Cung cấp cơ sở dữ liệu để có thể dự báo tuổi thọ của cả hoặc một phần công trình cầu.

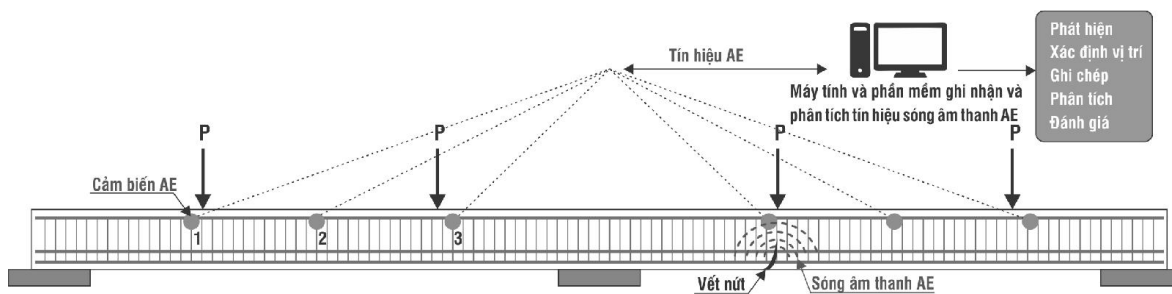
Những yêu cầu trên có thể đạt được nhờ ứng dụng phương pháp quan trắc bằng sóng âm thanh (AE), bằng cách phân tích và so sánh các tín hiệu sóng âm thanh thu thập được trong quá trình nghiên cứu và kiểm định công trình với cơ sở dữ liệu mẫu được xây dựng trong suốt quá trình phát triển của phương pháp này, cho phép phát hiện và xác định chính xác vị trí cũng như phân loại yếu tố dẫn đến các hư hại trong kết cấu. Phương pháp này có thể áp dụng cho cả kết cấu bê tông cốt thép (IADP – Identification

Active Destructive Process (Hóla J., Schabowicz K., 2010.) và cả kết cấu dự ứng lực (RPD – (Goszczyńska B., 2014), thậm chí cả kết cấu thép (Świt G., 2011), cho phép quan trắc cục bộ cũng như tổng thể kết cấu hay công trình nhằm phát hiện sự phát triển của các hư hại bên trong kết cấu dưới tác động của các tổ hợp tải trọng khai thác thực tế.

Mục tiêu của bài báo này nhằm giới thiệu phương pháp IADP cùng với các bước nghiên cứu, kiểm tra, cho phép kiểm định và quan trắc kết cấu bê tông cốt thép.

3. NỀN TẢNG CỦA PHƯƠNG PHÁP IADP

Sóng âm thanh (Acoustic Emission – AE) là một loại sóng đàn hồi mất dần, được hình thành bởi hiện tượng giải phóng đột ngột năng lượng dồn ứ trong vật liệu bởi sự quy tụ và mở rộng các hư hại siêu nhỏ trong vật liệu. Còn việc mất dần của sóng do hiện tượng hấp thụ - chuyển đổi từ công năng sang nhiệt năng của vật liệu. Vì thế việc xuất hiện các tín hiệu sóng âm thanh AE là dấu hiệu xuống cấp của vật liệu so với lúc trước khi xuất hiện các tín hiệu đó. Hiện tượng sóng âm thanh AE thể hiện sự hư hại của vật liệu đồng thời thể hiện sự xuống cấp của kết cấu làm từ vật liệu đó.

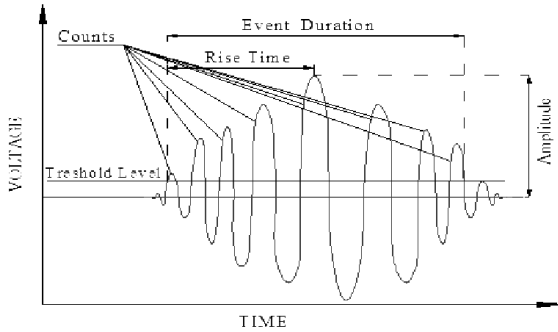


Hình 1. Sơ đồ tạo tín hiệu sóng âm thanh bởi các hư hại và cách thu nhận tín hiệu

Việc giải thoát năng lượng đột ngột bằng tín hiệu sóng âm thanh (AE) sẽ được thu nhận bởi các cảm biến âm thanh lắp trên kết cấu, sau đó được phân tích bằng phần mềm chuyên dụng. Thông thường đó là các cảm biến áp điện (piezoelectric) hoạt động trong biên độ 0.1 –

2.0 MHz, thể hiện tần số thu nhận của sóng âm thanh. Ở hình 2 thể hiện sơ đồ tạo các tín hiệu sóng âm thanh AE bởi các quá trình hư hại và cách thu nhận tín hiệu đó trên một ví dụ của dầm bê tông cốt thép hai nhịp. Trong phương pháp này sóng âm thanh sẽ được phân tích trên

cơ sở 12 tính chất: số lượng đỉnh sóng, số lượng đỉnh sóng đạt tần số cao nhất, thời gian của tín hiệu, thời gian tăng âm của tín hiệu sóng, tần số của sóng (amplitude) – thể hiện bằng mV hoặc dB, năng lượng của sóng, công

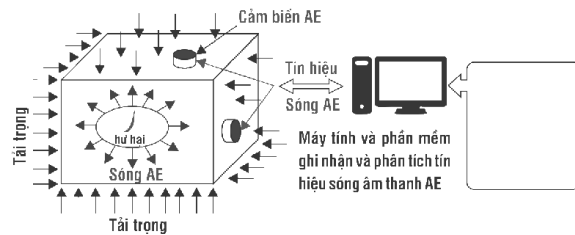


Hình 2. Biểu đồ sóng âm thanh AE

Việc phát hiện các hiện tượng và quá trình dẫn đến hư hại của kết cấu bê tông cốt thép và xác định được mức độ hư hại cần phải phân tích so sánh với cơ sở dữ liệu mẫu, tương tự như thế đối với kết cấu dự ứng lực (Hoła J., Schabowicz K., 2010). Đối với kết cấu bê tông cốt thép thì cơ sở dữ liệu mẫu đã được thiết lập trong suốt quá trình nghiên cứu thí nghiệm các bộ phận kết cấu, đồng thời hiệu chỉnh các yếu tố xuất hiện của từng loại hư hại hoặc một nhóm các hư hại với các tính chất của sóng âm thanh thu nhận được qua các cảm biến. Nếu như trong đầm bê tông thường xuất hiện một vết nứt đủ lớn để phá hủy đầm thì trong bê tông cốt thép chúng ta có thể quan sát được quá trình xuất hiện và phát triển của các vết nứt, cũng như có thể quan sát các hiện tượng tạo ra các sóng âm thanh khác nhau như: mất sự bám dính giữa bê tông và cốt thép, chuyển dịch của các thanh cốt thép hay chày dẻo cốt thép, hoặc thậm chí sự phá hủy của bê tông ở vùng chịu nén và cuối cùng là đứt cốt thép.

Cơ sở dữ liệu mẫu được thiết lập bởi rất nhiều thí nghiệm trên các mẫu đầm bê tông cốt thép khác nhau, cũng như trên các mẫu bê tông

suất của sóng, điện áp trung bình có hiệu của sóng, năng lượng tuyệt đối của sóng, tần số trung bình của sóng, tần số tiếng vang và tần số ban đầu (hình 1) (Goszczyńska B., Świt G., Trzempczyński W., 2013).



Hình 3. Sóng âm thanh hình thành do hư hại trong kết cấu

khác nhau với các tải trọng và tổ hợp tải trọng khác nhau, ví dụ như tải trọng lặp đi lặp lại mô phỏng tác động của hoạt tải do xe chạy. Cơ sở dữ liệu mẫu này đã được áp dụng thử nghiệm đối với các công trình thực tế. Cơ sở dữ liệu mẫu này được phân loại trên cơ sở 12 tính chất đặc trưng của sóng âm thanh, đối với kết cấu bê tông cốt thép thì được phân loại như sau:

- Class 1 – Xuất hiện nứt trong vữa bê tông khô
- Class 2 – Xuất hiện nứt trong ranh giới giữa vữa bê tông khô và hạt cốt liệu
- Class 3 – Xuất hiện các vết nứt siêu nhỏ
- Class 4 – Các vết nứt phát triển
- Class 5 – Mất sự kết dính quanh khu vực xuất hiện nứt
- Class 6 – Dịch chuyển cốt thép chịu nén/phá hoại phần bê tông chịu nén/đứt cốt thép chịu kéo.

Các nghiên cứu (Świt G., 2011) triển khai trên 26 đầm đơn giản và 14 đầm liên tục hệ siêu tĩnh đã chỉ ra rằng, các tín hiệu được tạo bởi các hiện tượng: phá hủy bê tông do nén, dịch chuyển cốt thép và đứt cốt thép xuất hiện trước khi kết cấu bị phá hủy gần như cùng một lúc, do

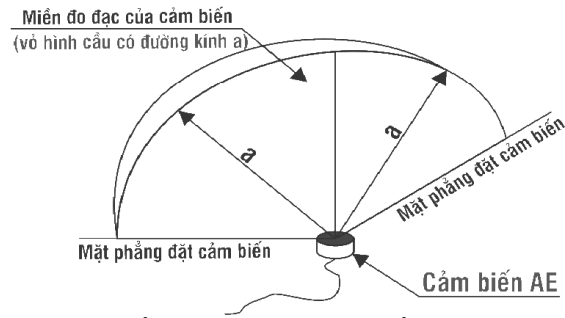
đó phân loại class 6 là tổng hợp của các hư hại nêu ở trên.

Trên cơ sở nghiên cứu thực nghiệm quá trình phát triển các vết nứt trong kết cấu bê tông cốt thép dưới tác động của các tải trọng lặp đi lặp lại, người ta đã đề xuất ra 6 nhóm phân loại tương tự nhằm đánh giá trạng thái kết cấu công trình dựa trên phân loại các quá trình phát triển hư hại.

- Class 1 và 2 – Kết cấu làm việc bình thường, ổn định
- Class 3 – Cần cảnh báo
- Class 4 - Ảnh hưởng đến tuổi thọ của công trình
- Class 5 - Ảnh hưởng đến khả năng chịu tải của công trình
- Class 6 – Mất ổn định, mất an toàn.

4. XÁC ĐỊNH CÁC QUÁ TRÌNH HƯ HẠI

Sóng đàn hồi AE được giải phóng trong quá trình xuất hiện các hư hại sẽ được thu nhận bởi các cảm biến lắp trên kết cấu, miền đo đặc của cảm biến được xác định bởi một vòm hình cầu có đường kính bằng “a” (hình 4), đường kính “a” sẽ phụ thuộc vào độ nhạy của cảm biến, cường độ của âm thanh phát ra. Có thể giả thuyết rằng, đường kính “a” ứng với một chiều dài suy giảm tín hiệu âm thanh (ví dụ 10 dB) và có thể xác định được bằng thí nghiệm (Goszczyńska B., Świt G., Trąmpezyński W., 2013).

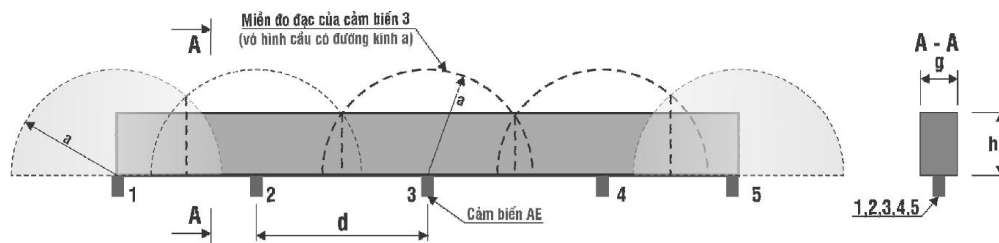


Hình 4. Miền đo đặc của cảm biến âm thanh AE

Có nhiều biện pháp để xác định vị trí phát tín hiệu AE, nhưng cơ bản hiện nay sử dụng hai biện pháp đơn giản (chủ yếu được áp dụng cho các kết cấu dầm) để xác định vị trí hư hại: theo phân vùng quan trắc, theo mặt phẳng.

4.1. Xác định theo vùng quan trắc

Hình 5 trình bày một sơ đồ lắp đặt các cảm biến âm thanh AE bên dưới một dầm bê tông cốt thép, các tín hiệu từ một điểm bất kỳ trong miền đo đặc của cảm biến số 3 sẽ đến cảm biến số 3 nhanh hơn so với các cảm biến số 2 và số 4 (trong thực tế, khi cảm biến số 3 thu nhận được tín hiệu đo đặc thì thiết bị sẽ tự động ngắt các cảm biến 1, 2, 4 và 5) như thế ta sẽ dễ dàng xác nhận được vị trí của hư hại nằm trong miền đo đặc của cảm biến 3. Kích thước của miền đo đặc này phụ thuộc vào khoảng cách giữa các cảm biến “d” và đường kính “a” (Gołaski L., Goszczyńska B., Świt G., Trąmpezyński W., 2012).

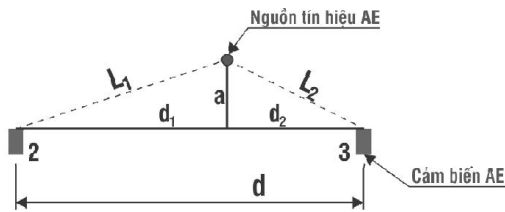


Hình 5. Các vùng quan trắc bao phủ trên toàn chiều dài của dầm

4.2. Xác định theo mặt phẳng

Vị trí của nguồn tín hiệu âm thanh AE nằm trên mặt phẳng vuông góc với đường thẳng 2-3 nối giữa các cảm biến với khoảng cách là “a” (hình 6) có thể được xác định trên cơ sở chênh lệch của thời gian Δt thu nhận tín hiệu của các

cảm biến 2 và 3. Khi ta biết được vị trí và khoảng cách chính xác của các cảm biến 2 và 3, tốc độ của sóng âm thanh V và sự chênh lệch thời gian Δt ta sẽ xác định chính xác được vị trí của nguồn âm thanh AE (Gołaski L., Goszczyńska B., Świt G., Trąmpezyński W., 2012).



Hình 6. Xác định nguồn âm thanh AE trên mặt phẳng

5. QUY TRÌNH ĐO ĐẠC TRONG KIỂM ĐỊNH VÀ QUAN TRẮC

Để có thể áp dụng một cách có hiệu quả phương pháp IADP vào kiểm định và quan trắc các công trình cầu yếu trong thực tế cần có một quy trình cho phép đo đạc và đánh giá một cách khách quan các hư hại diễn ra trong kết cấu, đặc biệt dưới tác động của tải trọng khai thác. Sơ đồ quy trình đo đạc cho các kết cấu bê tông cốt thép, có thể áp dụng đối với các công trình cầu yếu được thể hiện ở hình 7.



Hình 7. Quy trình triển khai đo đạc và quan trắc bằng phương pháp sóng âm thanh IADP

Sau quá trình phân tích các kết quả đo đạc đối với kết cấu bê tông cốt thép cho thấy sự cần

thiết phải lắp đặt các cảm biến âm thanh AE cho đảm liên tục ở các vị trí chịu uốn – áp dụng phương pháp xác định theo mặt phẳng, trái lại đối với các vị trí trên gối – áp dụng phương pháp xác định theo vùng quan trắc, để có thể phân tích vùng chịu ảnh hưởng moment âm và xem xét sự ảnh hưởng của vùng chịu cắt.

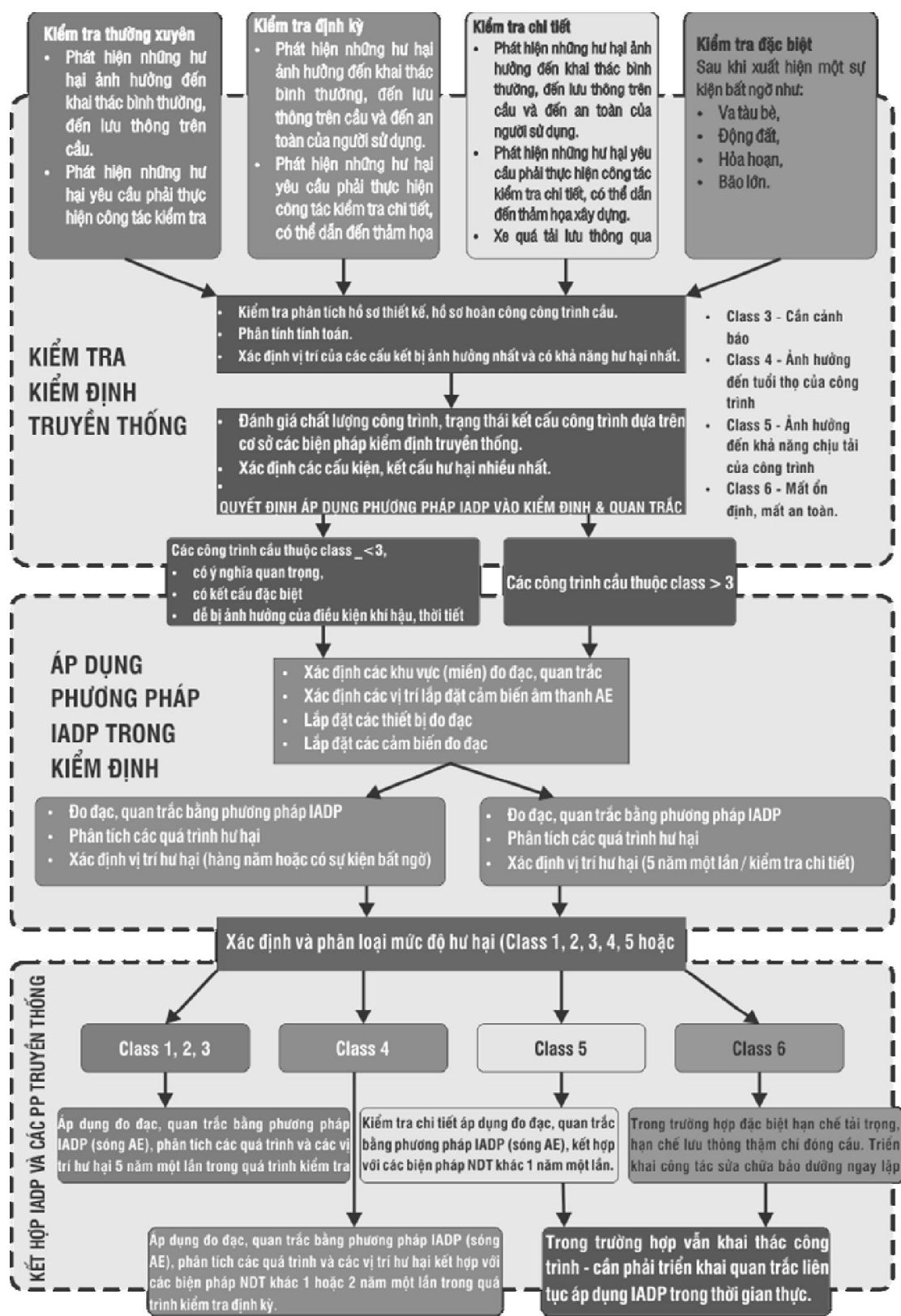
Trên cơ sở áp dụng biện pháp đo đạc quan trắc và phân tích trạng thái kết cấu công trình bằng phương pháp IADP kết hợp với quy trình kiểm tra, kiểm định cầu hiện nay ở Việt Nam, chúng ta có thể đề xuất một vài thay đổi để có thể song song triển khai công tác kiểm định bằng các phương pháp truyền thống. Đồng thời tích hợp các công tác kiểm định và quan trắc bằng IADP như hình 8.

6. KẾT LUẬN

Đo đạc và quan trắc bằng phương pháp IADP sử dụng sóng âm thanh AE đối với các kết cấu bê tông cốt thép cho phép chúng ta nhận dạng và xác định các quá trình hư hại xuất hiện bên trong kết cấu dưới tác động của các tổ hợp tải trọng khai thác. Đồng thời phương pháp này có thể được áp dụng như một phương pháp không phá hủy trong công tác kiểm định và đánh giá trạng thái các công trình cầu, đặc biệt là những cầu yếu nêu ở trên mà không cần phải hạn chế lưu thông trên cầu, không ảnh hưởng đến quá trình khai thác của công trình.

Những tiêu chí và chỉ số dẫn đến hư hại công trình được xác định qua công tác đo đạc, nghiên cứu và phân tích bằng IADP cho phép hỗ trợ cơ quan chức năng trong việc quản lý và khai thác công trình cầu cũng như hạ tầng giao thông một cách hiệu quả.

Sơ đồ quy trình đo đạc và nghiên cứu bằng IADP dành cho các công trình cầu nêu trong bài có thể được áp dụng trong công tác kiểm định chất lượng công trình cầu, phù hợp với điều kiện và tiêu chuẩn hiện nay của Việt Nam.



Hình 8. Kiểm định công trình kết hợp với phương pháp IADP phục vụ công tác quản lý cơ sở hạ tầng giao thông

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Lương Minh Chính, (2014). “*Long term structural health monitoring system for cable stayed bridge in Vietnam*” - Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, số 43 năm 2014.
- Lương Minh Chính, Goszczyńska B., Świt G. (2015). “*Application of the acoustic emission method of identification and location of destructive processes to the monitoring of the technical state of pre-stressed concrete bridges*” Hội nghị khoa học Công nghệ Giao thông vận tải lần thứ III, năm 2015.
- Báo cáo, (2012). Báo cáo Thủ tướng Chính phủ về chủ trương đầu tư các cầu yếu trên hệ thống quốc lộ của Bộ GTVT. Tháng 5 năm 2012.
- Hoła J., Schabowicz K., (2010). “*State-of-the-art non-destructive methods for diagnostics testing of building structures – anticipated development trends*”, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10 (3), s. 5–18, 2010.
- Goszczyńska B., (2014). “*Analysis of the process of crack initiation and evolution in concrete with acoustic emission testing*”, Archives of Civil and Mechanical Engineering 14, 2, s. 134–143, 2014.
- Świt G., (2011). “*Analiza procesów destrukcyjnych w obiektach mostowych z belek strunobetonowych z wykorzystaniem zjawiska emisji akustycznej*”, Monografia, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2011.
- Goszczyńska B., Świt G., Trąpczyński W., (2013). “*Monitoring of Active Destructive Processes as a Diagnostic Tool for the Structure Technical State Evaluation*”, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, ISSN 0239–7528, 61 (1), s. 97–108, 2013.
- Gołaski L., Goszczyńska B., Świt G., Trąpczyński W., (2012). “*System for the global monitoring and evaluation of damage processes developing within concrete structures under service loads*”, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 7 (4) s. 273–245, 2012.

Abstract:

INSPECTIONS OF REINFORCED STRUCTURES USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD IADP – TEST PROCEDURES

The paper presents the method for diagnosis and monitoring of bridge structures IADP (Identification of Active Damage Processes) based on the analysis of acoustic emission signals (AE) generated during the service load. The proposed procedure for the diagnosis and monitoring of reinforced concrete structures is proposed, which can be the part of standard diagnosis procedure on the example bridge diagnosis in Vietnam.

Keywords: diagnosis and monitoring, concrete bridge, damage process, acoustic emission.

BBT nhận bài: 18/5/2016

Phản biện xong: 09/6/2016