

# BÀI HỌC TỪ NHỮNG CÔNG TRÌNH BÊ TÔNG KHỐI LỚN HƯ HỒNG DO TẤN CÔNG NỘI SUN-PHÁT

## LESSONS LEARNED FROM THE DAMAGE OF MASSIVE CONCRETE STRUCTURES BY INTERNAL SULFATE ATTACKS

Nguyễn Văn Hường

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; Email: nvhuongttdud@gmail.com

**Tóm tắt:** Trên thế giới, nhiều công trình bê tông khối lớn có dấu hiệu của hiện tượng trương nở do các nguyên nhân từ bên trong của bê tông (tính chất của cốt liệu, loại xi măng, tính chất của nước trộn,...). Các phản ứng bên trong của bê tông có thể biểu hiện dưới hai dạng bệnh: Phản ứng kiềm cốt liệu và tấn công nội sun-phát. Bài báo này quan tâm đến bệnh gây hư hỏng công trình bê tông khối lớn do tấn công nội sun-phát. Trong bối cảnh Việt Nam chưa có nhiều nghiên cứu chuyên sâu trong phòng thí nghiệm cũng như các nghiên cứu hiện trường, do đó thông qua việc khảo sát, phân tích một số công trình bê tông khối lớn đã hư hỏng do tấn công nội sun-phát kết hợp với các thành tựu khoa học trong lĩnh vực này, bài báo này góp phần làm sáng tỏ các cơ chế tấn công nội sun-phát đối với công trình bê tông khối lớn.

**Từ khóa:** bê tông khối lớn; tấn công nội sun-phát; giãn nở; cốt liệu; xi măng

**Abstract:** In the world, many massive concrete structures have signs of the expansive phenomena by internal causes of concrete (the nature of aggregate, the type of cement, the properties of the mixed water,...). The inside reactions of the concrete can be expressed in two types of pathologies: the reaction of aggregative alkali and the internal sulfate attack. The present paper is concerned about the disease that damages the massive concrete works due to internal sulfate attacks. In the context of Vietnam there are few intensive researches in the laboratory as well as field studies, so through the surveys, analyses of some massive concrete structures that were damaged by internal sulfate attacks, in combination with scientific achievements in this field, this paper contributes to clarifying the mechanisms of the internal sulfate attacks for massive concrete works.

**Key words:** massive concrete; internal sulfate attack; expansion; aggregate; cement

### 1. Đặt vấn đề

Sự tấn công của sun-phát là một trong những mối đe dọa lớn đối với độ bền của bê tông. Tùy thuộc vào nguồn gốc của các ion sun-phát, sự tấn công của sun-phát được chia thành hai nhóm: tấn công ngoại sun-phát (External Sulfate Attack: ESA) và tấn công nội sun-phát (Internal Sulfate Attack: ISA). Trong khi tấn công nội sun-phát do các ion sun-phát đến từ các thành phần của cấp phối bê tông thì tấn công ngoại sun-phát do nguồn sun-phát đến từ môi trường bên ngoài. Sự phá hoại do tấn công nội sun-phát là vấn đề tương đối mới so với tấn công ngoại sun-phát bởi vì nó được phát hiện từ những năm 1980 [5].

Tùy theo điều kiện môi trường, sự tấn công nội sun-phát thường xảy ra theo hai cơ chế:

- Tấn công nội sun-phát ở nhiệt độ môi trường (internal sulfate attack at ambient temperature): cơ chế này là do hoạt động của sun-phát trong bê tông cứng khi bê tông chứa một hàm lượng sun-phát (đến từ xi măng, phụ gia, nước, cốt liệu) cao hoặc do hoạt động của các hợp chất hóa học khác của lưu huỳnh chứa trong cốt liệu [11]. Đối với công trình sử dụng lượng bê tông lớn ví dụ như đập hoặc cầu phải đặc biệt lưu ý đến loại cốt liệu dùng, nó có thể chứa các loại khoáng tiềm ẩn sự không ổn định theo thời gian trong môi trường tồn tại và có thể phản ứng với các khoáng của xi măng hoặc sản phẩm hydrat của xi măng tạo thành các hợp chất gây trương nở. Hiển nhiên, chúng ta có thể dùng cốt liệu chứa những loại sun-phát không tan hoặc khó tan (ví dụ nó tồn tại dưới dạng baryte  $BaSO_4$ ), ngược lại không thể dùng cốt liệu chứa sun-phát tan vừa hoặc tan mạnh (ví dụ anhydrite  $CaSO_4$ ). Mặt khác, một số loại cốt liệu có thể chứa sun-phua sắt (thường ở dạng pyrite  $FeS_2$  và/ hay pyrrhorite  $Fe_7S_8$ ), nếu cốt liệu này dùng cho bê tông thì ban đầu một

quá trình oxy hóa sẽ diễn ra trong môi trường ẩm bởi lượng oxy có trong không khí để tạo thành sun-phát, đây là nguyên nhân dẫn đến sự trương nở ban đầu cho bê tông. Sau đó, sun-phát hình thành trong quá trình trên tác dụng với sản phẩm hydrat của xi măng hay khoáng chưa hydrat của xi măng hình thành hợp chất gây trương nở [2].

- Tấn công nội sun-phát do nhiệt (heat-induced sulfate attack): loại tấn công này được ám chỉ bởi sự hình thành ettringite gián đoạn (delayed ettringite formation) [6, 8, 13]. Nó được xem là một trong những mối lo ngại lớn đối với công trình dùng bê tông đúc sẵn dưỡng hộ nhiệt hay bê tông khối lớn. Ettringite ( $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$ ) gián đoạn hình thành theo cơ chế [5, 6, 8, 13]: Đầu tiên, khi bê tông tươi chịu một nhiệt độ cao từ  $65^\circ C$  (do nhiệt hydrat của bê tông khối lớn hay xử lý nhiệt của bê tông đúc sẵn) các phản ứng bình thường (ở nhiệt độ môi trường) của quá trình hydrat xi măng bị thay đổi. Cụ thể nó cản trở sự hình thành của ettringite hay/ và ettringite đã hình thành không ổn định ở nhiệt độ cao và bị phân hủy. Do vậy, các ion sun-phát một phần tồn tại trong dung dịch lỏng rỗng, phần chủ yếu bị hấp thu bởi liên kết vật lý trong C-S-H; Sau đó, nhiệt độ trong vật liệu hạ thấp và tồn tại trong môi trường ẩm (độ ẩm tương đối  $>90\%$  hoặc trong môi trường nước) các ion sun-phát sẽ được giải phóng từ C-S-H kết hợp với các thành phần khác ( $Ca^{2+}$ ,  $Al(OH)_4^-$ ,  $OH^-$ ,  $H_2O$ ) để hình thành ettringite gián đoạn (delayed ettringite) trong bê tông đã đông cứng và gây ra giãn nở dẫn đến nứt nẻ.

Hậu quả do tấn công nội sun-phát gây ra thường quan sát thấy trên bề mặt công trình bê tông, những vết nứt đa hướng tạo thành các ô lưới (độ rộng ô lưới từ  $30 \div 40$  cm) [4], các vết nứt này có thể mở rộng dẫn đến phá hủy kết cấu. Những biểu hiện này thường xuất hiện sau vài năm

thậm chí vài chục năm kể từ khi công trình được xây dựng. Khác với tấn công ngoại sun-phát, sự tấn từ bên ngoài khiến cho kết cấu bị phá hoại từ bề mặt vào bên trong, còn đối với tấn công nội sun-phát ảnh hưởng đồng thời trên toàn bộ kết cấu, nó gây ra sự giãn nở trong toàn khối vật liệu sau đó xuất hiện vết nứt trên bề mặt công trình.

## 2. Phương pháp chẩn đoán công trình bê tông bệnh do tấn công nội sun-phát:

Để chẩn đoán công trình bê tông bị bệnh do tấn công nội sun-phát, các phân tích thạch học và khoáng vật học với các thiết bị thí nghiệm hiện đại có độ chính xác cao trong phòng thí nghiệm: phân tích hóa học, nhiễu xạ tia X (X-ray diffraction: XRD), huỳnh quang tia X (X-ray fluorescence: XRF), kính hiển vi điện tử (scanning electron microscopy: SEM), phân tích nhiệt, độ rỗng,... được thực hiện trên các mẫu lấy từ công trình, mẫu lưu trữ kết hợp với khảo sát hiện trường và phân tích nhật ký thi công.



Nhìn từ hạ lưu Đập Torán



Vết nứt trong hành lang của thân đập Torán

**Hình 1.** Đập Torán, Catalan - Spain (nguồn: Endesa-Spain)

Để xác định nguyên nhân hư hỏng của đập Torán, Araújo et al. [1] đã thực hiện các phân tích trên các mẫu cốt liệu và mẫu bê tông của đập Torán như sau:

- **Xác định đặc tính cốt liệu:** đây là một phân tích phức tạp, do đó để xác định chính xác tính chất của cốt liệu Araújo et al. đã thực hiện phân tích trên các thiết bị SEM-EDAX, XRD và XRF. Kết quả đã tìm thấy trong cốt liệu chứa 2% các hợp chất của sun-phua, cụ thể nó tồn tại ở dạng pyrrhotite ( $Fe_7S_8$ ).

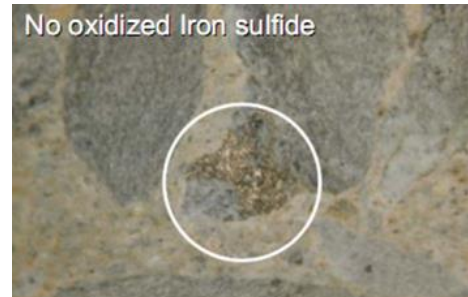
- **Phân tích mẫu bê tông của đập Torán:** các phân tích được thực hiện bởi thiết bị SEM-EDAX. Kết quả trên hình 2 cho thấy rằng: mẫu bê tông nằm ở giữa đập thì hợp chất sắt sun-phua không bị oxy hóa (hình 2a), điều này là do mẫu bê tông bên trong thiếu oxy cần thiết cho quá trình oxy hóa. Trong khi đó, mẫu bê tông lấy ở gần bia đập phần cốt liệu có chứa sắt sun-phua đã bị oxy hóa (hình 2b). Ngoài ra, các phân tích trên các mẫu bê tông cũng tìm thấy ettringite hình thành trong các lỗ rỗng của bê tông (hình 3a) và ettringite hình thành ở mặt phân giới cốt liệu-hồ xi măng đồng thời sinh ra vết nứt trong hồ xi măng (hình 3b).

## 3. Bài học từ các công trình hư hỏng điển hình do tấn công nội sun-phát:

Trên thế giới nhiều công trình bê tông khối lớn (đập bê tông, trụ cầu, móng trụ điện,...) có những biểu hiện hư hỏng và đã được xác nhận là do tấn công nội sun-phát. Ở Việt Nam, nhiều công trình bê tông khối lớn có biểu hiện bệnh lý của tấn công nội sun-phát. Tuy nhiên, đáng tiếc chưa có những đề tài nghiên cứu chuyên sâu để có thể kết luận chính xác nguyên nhân. Vì vậy, bài báo này trình bày những bài học rút ra từ một số công trình thực tế trên thế giới bị hư hỏng do tấn công nội sun-phát.

### 3.1. Đập bê tông trọng lực Torán

Đập Torán (hình 1) cùng với hai đập khác là Tavascán và Graus thuộc loại đập bê tông trọng lực đều được xây dựng ở xứ Catalan Pyrenees (Tây Ban Nha). Cốt liệu đá để xây dựng ba đập này có nguồn gốc từ địa phương nơi xây dựng công trình. Cả ba đập này đều có những biểu hiện giống nhau: xuất hiện mạng lưới các vết nứt trên bề mặt bê tông, bê tông đổi màu, tại các vết nứt có chất rỉ ra màu trắng đục, riêng đỉnh của đập Graus và Tavascán bị chuyển vị về phía thượng lưu.



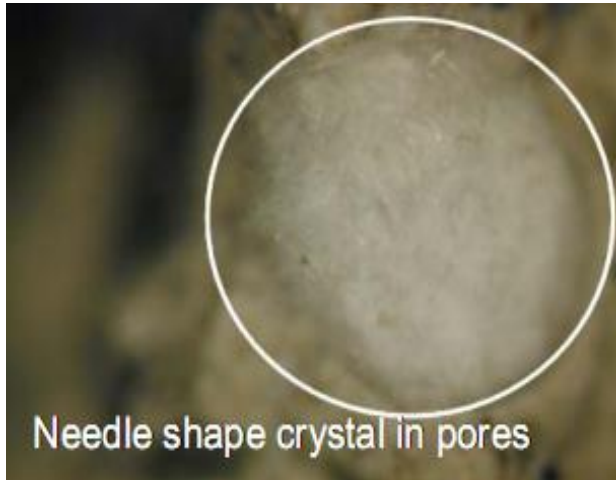
Hình 2a



Hình 2b

**Hình 2.** Sắt sun-phua trong cốt liệu của bê tông: không bị oxy hóa (a) và bị oxy hóa (b) [1]

Từ khảo sát thực tế và các thí nghiệm với công nghệ cao trong phòng thí nghiệm đối với hư hỏng của đập bê tông trọng lực Torán của Araújo và các cộng sự [1] cho thấy rằng đây là một dạng tấn công nội sun-phát ở nhiệt độ thường. Kết hợp với các nghiên cứu của steger [12], Shayan [10], Casanova et al. [2] và Oliveira et al. [9], quá trình tấn công nội sun-phát của đập Torán được khái quát hóa như sau:



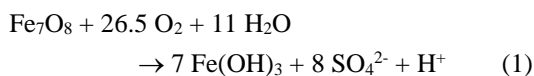
Hình 3a



Hình 3a

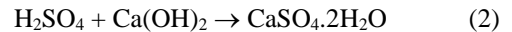
**Hình 3.** Tinh thể ettringite hình thành trong lỗ hổng (a) và hình thành ở mặt phân giới cốt liệu-hỗ xi măng (b) [1]

+ Cốt liệu xây dựng đập có chứa pyrrhorite ( $\text{Fe}_7\text{S}_8$ ), tồn tại trong môi trường ẩm ( $\text{H}_2\text{O}$ ) có sự hiện diện của oxy ( $\text{O}_2$ ). Do đó, quá trình oxy hóa cốt liệu (cụ thể  $\text{Fe}_7\text{S}_8$ ) xảy ra theo phương trình (1).

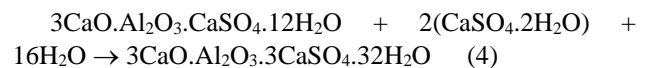
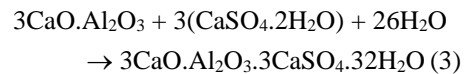


Theo Oliveira et al., quá trình oxy hóa này làm tăng thể tích vật liệu, ước lượng sau khi oxy hóa một mol pyrrhotite để hình thành sắt hydroxyt và axit sunphuaric (1) thì thể tích tăng thêm  $6,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  [9].

+ Axit sunphuaric tác dụng với portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , sản phẩm hydrat của xi măng) để tạo thành thạch cao (gypsum:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) theo phương trình (2).



+ Sau đó sự tấn công của sun-phát có thể được biểu diễn bởi hai phương trình (3) và/ hoặc (4). Phương trình (3) là phản ứng với celit ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) còn dư chưa thủy hóa, trong khi đó phương trình (4) là phản ứng với monosulfoaluminate  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (sản phẩm hydrat của xi măng) tạo thành ettringite  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  trong bê tông cứng [7].



Tuy nhiên, theo các nghiên cứu về quá trình hydrat của xi măng thì celit thủy hóa nhanh trong giai đoạn đầu, phần còn lại sẽ thủy hóa trong khoảng chừng ba năm. Mặt khác, các ion sun-phát tạo thành từ cốt liệu để tạo thành ettringite muộn thường cần thời gian lớn hơn ba năm. Do vậy, ettringite muộn hình thành chủ yếu từ monosulfoaluminate theo phương trình (4). Sự hình thành ettringite muộn theo (4) làm tăng thể tích ước chừng  $248 \text{ cm}^3/\text{mol}$  [9], do đó nó gây giãn nở làm nứt bê tông.

### 3.2. Cầu Ondes

Ondes là cây cầu được xây dựng ở Toulouse, một thành phố ở miền nam nước Pháp. Nó hoàn thành và đưa vào khai thác vào năm 1955. Cầu gồm năm nhịp đơn với chiều dài tổng cộng 202m, các trụ cầu có chiều cao trung bình 6.8m, trên móng là hai trụ tròn đường kính 2m, phía trên hai trụ tròn liên kết với nhau bởi dầm ngang với chiều cao 1.5m, chiều rộng 2.7m, chiều dài 8.2m (hình 4).

Theo kết quả nghiên cứu của Divet et al. [3], sự hư hỏng do tấn công nội sun-phát chỉ biểu hiện ở dầm ngang của trụ pin P2. Những vết nứt hiện rõ vào năm 1982 ở hai đầu dầm. Sau đó, diễn biến do tấn công nội sun-phát tiếp tục được theo dõi và được mô tả như sau: phương và độ mở rộng của vết nứt phụ thuộc vào cách bố trí cốt thép trong dầm, độ mở của vết nứt thay đổi từ vài phần mười đến vài mi-li-mét tùy thuộc vào vị trí trên dầm ngang, vị trí có độ ẩm lớn do nước rỉ từ mặt cầu xuống xuất hiện khe nứt dày và độ mở rộng lớn hơn (hình 4), các vết nứt theo phương ngang xuất hiện nguy hiểm hơn và có vết nứt với độ mở rộng tới 7mm. Các vết nứt phát triển mạnh ở hai đầu dầm trong khi đó ở phần giữa dầm không quan sát thấy vết nứt.



Nhìn tổng thể cầu Ondes



Vết nứt ở đầu dầm ngang ở trụ pin P2, năm 2005

**Hình 4.** Cầu Ondes (Pháp)

Để xác định nguyên nhân gây ra sự hư hỏng này, Divet *et al.* [3] đã tiến hành khảo sát, phân tích và tính toán trên các mẫu lấy từ hiện trường và hồ sơ công trình. Họ đã dùng mô đun TEXO của phần mềm CESAR-LCPC của IFSTTAR (Pháp) để xác định quá trình nhiệt độ sinh ra tại vị trí đầu của dầm ngang của trụ cầu P2 bởi quá trình hydrat xi măng. Với số liệu đầu vào gồm: cấp phối của bê tông, kích thước hình học, nhiệt độ môi trường trong suốt quá trình thi công và sau đó (tính trong 10 ngày) cho ra kết quả: nhiệt độ lớn nhất đạt được là 80°C và nhiệt độ lớn hơn 70°C được duy trì khoảng 70 giờ. Nhiệt độ này thỏa mãn điều kiện cần cho sự hình thành ettringite gián đoạn. Ngoài ra, kết hợp với phân tích mẫu trích lấy ở đầu dầm bởi SEM Divet *et al.* đã xác nhận rằng sự phá hoại này là hậu quả của tấn công nội sun-phát do nhiệt.

Một điểm nữa rất quan trọng cũng được rút ra từ công trình này là: mặc dù đã tiến hành sửa chữa bằng cách bơm vật liệu để bịt kín các vết nứt đồng thời dùng lớp chống thấm ở mặt ngoài vào năm 1995 nhưng vào tháng 7 năm 1996 lại tiếp tục xuất hiện vết nứt không liên tục đồng thời các vết nứt mới tiếp tục phát triển và mở rộng trong thời gian sau đó. Điều này có thể thấy rằng rất khó để ngăn chặn hay kìm hãm sự phát triển ettringite gián đoạn nếu nó đã xảy ra.

#### 4. Kết luận

Từ những nội dung đã trình bày trên, bài báo đưa ra những kết luận sau:

- Tấn công nội sun-phát là một bệnh của bê tông, là một trong những nguyên nhân nguy hiểm dẫn đến sự phá hoại công trình bê tông nói chung, đặc biệt là đối với công trình bê tông khối lớn;

- Tấn công nội sun-phát đối với bê tông khối lớn có thể xảy ra theo hai cơ chế: tấn công nội sun-phát ở nhiệt độ môi trường và tấn công nội sun-phát do nhiệt. Trong trường hợp bất lợi công trình có thể chịu sự tấn công đồng thời của hai cơ chế này;

- Hậu quả do tấn công nội sun-phát gây ra sự giãn nở vật liệu dẫn đến nứt nẻ và cuối cùng có thể dẫn tới sự hư hỏng công trình;

- Vì tấn công nội sun-phát là do các tác nhân từ bên trong của thành phần bê tông, cho nên khi công trình đã bị bệnh do tấn công nội sun-phát gây ra thì rất khó kìm hãm hay ngăn chặn.

Để đề phòng hay giảm nhẹ tác hại do tấn công nội sun-phát gây ra cho các công trình bê tông, chúng ta có thể áp dụng các biện pháp sau [8]:

- Tránh dùng cốt liệu có chứa một lượng lớn các hợp chất của lưu huỳnh hay sun-phát dễ tan;

- Tránh trường hợp bê tông tươi chịu nhiệt độ cao trên 65°C trong một khoảng thời gian dài ;

- Nếu không thể tránh được hai giải pháp nêu trên thì bê tông phải dùng các phụ gia khoáng hoạt tính như: tro bay, mê-ta-cao-lanh, hay muối silic.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Araújo G.S., Chinchón S., Aguado A., Evaluation of the behavior of concrete gravity dams suffering from internal sulfate attack, *IBRACON Structures and Materials Journal*, 2008, Vol 1(1), p.84-112.
- [2] Casanova I., Agullo L., Aguado A., Aggregate expansivity due to sulfide oxidation - I. Reaction system and rate model, *Cement & Concrete Research*, 1996, Vol 26(1), p.993-998.
- [3] Divet L., Guemier F., Le Mestre G., Existe-t-il un risque de développement d'une réaction sulfatique d'origine endogène dans les pièces en béton de grande masse? Les cas du pont d'Ondes, *Bulletin des laboratoires des Ponts et chaussées*, 1998, n°213, p.59-72.
- [4] Godart B., Kittel G., Fasseu P., Manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art. *Guide du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, février 1999.
- [5] Mielenz R.C., Maruzin S.L., Hime W.G., Jugovic Z.T., Investigation of prestressed concrete railway tie distress, *American Concrete Institute*, 1995, Vol 17 (12), p.82-68.
- [6] Nguyễn Văn Hương, Nghiên cứu ứng xử của vữa xi măng trong quá trình hình thành ettringite gián đoạn. *Hội thảo hạ tầng giao thông Việt Nam với phát triển bền vững TISDV - NXB Xây dựng*, 2013, p.279-286.
- [7] Nguyễn Văn Hương, Định lượng sản phẩm hydrat của xi măng bằng phương pháp phân tích nhiệt - trọng lượng, *Tạp chí Khoa học & Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, 2013, số 62(1), p.73-78.
- [8] NGUYEN Van Huong, Effets d'additions minérales sur l'apparition de la Réaction Sulfatique Interne: étude paramétrique, développement et optimisation de méthodes accélérées, *Thèse de doctorat, Université de Nantes - France*, 2013.
- [9] Oliveira I., Cavalaro S.H.P., Aguado A., New kinetic model to quantify the internal sulfate attack in concrete, *Cement & Concrete Research*, 2013, Vol 43, p.95-104.
- [10] Shayan A., Deterioration of a concrete surface due to the oxidation of pyrite contained in pyritic aggregates, *Cement & Concrete Research*, 1988, Vol 18(5), p.723-730.
- [11] Skalny J., Marchand J., Odler I., Sulfate attack on concrete, *Taylor & Francis e-Library*, 2003.
- [12] Steger H.F., Oxidation of sulfide minerals: VII. Effect of temperature and relative humidity on the oxidation of pyrrhotite, *Chemical Geology*, 1982, Vol 35(3-4), p.281-295.
- [13] Taylor H.F.W., Famy C., Scrivener K.L., Delayed ettringite formation, *Cement & Concrete Research*, 2001, Vol 31(5), p.683-693.