





ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

NGUYỄN ĐÌNH DƯ

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG
PHƯƠNG PHÁP CFEM
TRONG CƠ VẬT RẮN BIẾN DẠNG

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật
Mã số: 9520101.01

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ CƠ KỸ THUẬT



Hà Nội - 2022

Công trình được hoàn thành tại:
Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

Người hướng dẫn khoa học: **GS.TSKH. Nguyễn Đình Đức**
PGS.TS. Bùi Quốc Tính

Phản biện:.....

.....

Phản biện:.....

.....

Phản biện:.....

.....

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng cấp Đại học Quốc gia
chấm luận án tiến sĩ họp tạivào
hồi.....giờ.....ngày.....tháng.....năm.....

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- **Thư viện Quốc gia Việt Nam**

- **Trung tâm Thông tin - Thư viện, Đại học Quốc gia Hà Nội**

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Nguyễn Đình Dur, Nguyễn Đình Đức, Bùi Quốc Tính (2017). Một phương pháp tích phân mới cho phần tử tứ giác nội suy kép (CQ4) cải thiện ma trận độ cứng. Hội Nghị Cơ Học Toàn Quốc Lần X. 8-9/12/2017. Tập 4, Cơ học tính toán.
2. Nguyễn Đình Dur, Nguyễn Đình Đức, Bùi Quốc Tính (2018). Áp dụng PTHH nội suy kép phân tích vật liệu chức năng đàn hồi tuyến tính 2D. Hội nghị Khoa học toàn quốc Cơ học Vật rắn lần thứ XIV, Đại học Trần Đại Nghĩa, Thành phố Hồ Chí Minh Nội, 19-20/7/2018.
3. Nguyễn Đình Dur, Nguyễn Đình Đức, Bùi Quốc Tính (2019). Phương pháp tích phân mới áp dụng cho phần tử lục diện nội suy kép (CHH8) cải thiện thời gian tính toán. Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc. Kỷ niệm 40 năm thành lập Viện Cơ học, Hà Nội, 09/04/2019.
4. Nguyễn Đình Dur, Nguyễn Đình Đức, Bùi Quốc Tính (2019). Phân Tích Động Bài Toán Nứt Phẳng Của Vật Liệu FGM Bằng Phần Tử Tứ Giác Mở Rộng Nội Suy Kép (XCQ4). Hội nghị khoa học toàn quốc lần thứ nhất về Động lực học và Điều khiển. Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng.
5. Du Dinh Nguyen, Minh Ngoc Nguyen, Nguyen Dinh Duc, Jaroon Rungamornrat, Tinh Quoc Bui (2021). Enhanced nodal gradient finite elements with new numerical integration schemes for 2D and 3D geometrically nonlinear analysis. Applied Mathematical Modelling, 93, pp. 326-359.
6. Du Dinh Nguyen, Dinh Duc Nguyen, Tinh Quoc Bui (2021). Analysis of linear elastic fracture mechanics for cracked functionally graded composite plate by enhanced local enriched consecutive-interpolation elements. VNU Journal of Science: Mathematics – Physics, Vol. 37, No. 1, pp. 1-11.
7. Du Dinh Nguyen, Minh Ngoc Nguyen, Nguyen Dinh Duc, Tinh Quoc Bui (2022). Modeling the transient dynamic fracture and quasi-static crack growth in cracked functionally graded composites by the extended four-node gradient finite elements. Composite Structures, 284, 115056.

Danh mục này gồm 07 công trình.

MỞ ĐẦU

Tính cấp thiết của đề tài

Cho đến thời điểm này, cơ học tính toán là một phần không thể thiếu trong sự phát triển của khoa học kỹ thuật, nổi bật là kỹ thuật mô phỏng, chuẩn đoán ứng xử của kết cấu. Và FEM là nền tảng chủ yếu trong các chương trình tính toán hiện hành. Tuy nhiên, FEM vẫn tồn tại một số thuộc tính cố hữu và cần cải tiến. Do đó, việc cải tiến phương pháp FEM luôn là động lực thúc đẩy các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước quan tâm. Đó cũng là lý do phương pháp Phần tử hữu hạn nội suy kép (CFEM) ra đời và được NCS thực hiện trong luận án này.

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Luận án tập trung phân tích đặc tính cơ học của vật liệu FGM nguyên vẹn và bị nứt bao gồm nứt tĩnh, nứt động và lan truyền vết nứt. Trạng thái vật liệu đàn hồi tuyến tính (định luật Hooke's) và biến dạng nhỏ (tuyến tính hình học). Đồng thời phân tích phi tuyến hình học vật liệu thông thường đàn hồi tuyến tính cho bài toán 2D và 3D.

Phương pháp nghiên cứu

Luận án tập trung vào việc phát triển thêm các phương pháp tiếp cận số hiện có như Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và Phương pháp phần tử hữu hạn mở rộng (XFEM), dựa trên kỹ thuật Thủ tục nội suy liên tiếp (CIP). Nó được chứng minh thông qua các ví dụ số và so sánh với dữ liệu tham khảo có sẵn, rằng các công thức được đề xuất có sự thể hiện liên tục các trường đạo hàm, độ chính xác cao hơn và hiệu quả thời gian cao hơn. Ngoài ra, khả năng ứng dụng của kỹ thuật CIP được áp dụng cho phi tuyến hình học với sự hỗ trợ của mô hình tích phân mới.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của nghiên cứu

Luận án đề xuất một công thức cho các bài toán đứt gãy cho vật liệu FGM đàn hồi tuyến tính hai chiều bằng sự kết hợp giữa phần tử hữu hạn tăng cường CIP và các hàm làm giàu. Cách tiếp cận hiện tại là sự cải tiến của phương pháp phần tử hữu hạn mở rộng (XFEM) bằng cách sử dụng CIP, với mục tiêu là độ chính xác cao hơn và biểu diễn trơn tru các trường đạo hàm.

Đồng thời, luận án cũng đề xuất công thức tính toán cho bài toán phi tuyến hình học với kết cấu 2D và 3D bằng sự kết hợp giữa phần tử hữu hạn tăng cường CIP và mô hình tích phân mới EM và EF với số điểm tích phân ít hơn mô hình tích phân Gaussian nổi tiếng. Cách tiếp cận với thủ tục CIP không làm tăng số DOF nhưng vẫn đem lại hiệu quả cao trong khi FEM truyền thống có bậc thấp không mang lại được trừ khi dùng phần tử bậc cao. Trong khi mô hình tích phân mới thì giảm chi phí thời gian tính toán.

Cấu trúc của luận án

Luận án bao gồm bốn chương, nội dung mỗi chương bao gồm cơ sở lý thuyết và các thảo luận về kết quả số. Cuối cùng là kết luận, hướng phát triển của luận án.

CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN VỀ PHƯƠNG PHÁP CFEM

1. Tổng quan về cơ vật rắn biến dạng

Cơ học chất rắn là một trong những ngành quan trọng của khoa học vật lý liên quan đến sự biến dạng và chuyển động của môi trường rắn liên tục dưới tác dụng của tải trọng bên ngoài như lực, chuyển vị và gia tốc dẫn đến lực quán tính trong vật thể, sự thay đổi nhiệt, tương tác hóa học, lực điện từ, và nhiều hơn thế. Những thành tựu của ngành Cơ học vật rắn biến dạng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều ngành kỹ thuật bao gồm ô tô, tàu thủy, năng lượng, hàng không vũ trụ, xây dựng, v.v. Thiết kế và nâng cao chất lượng của sản phẩm là một vấn đề quan trọng mà các ứng dụng kỹ thuật như vậy cần hướng đến.

Trong khi đó, cơ vật rắn biến dạng vật liệu composite ngày càng thu hút được nhiều sự chú ý trong ngành công nghiệp do tỷ lệ khả năng chịu lực trên trọng lượng cao hơn so với các vật liệu thông thường. Tuy nhiên, các giao diện phân lớp vật liệu sắc nét đặc trưng trong composite, dễ bị phân tách bề mặt do sự tập trung/ngưng ứng suất cao tại các lớp vật liệu. Do đó, vật liệu FGM ra đời như là sự thay thế hoàn hảo do tính chất vật liệu biến đổi liên tục theo một hàm số cho trước. Tùy theo điều kiện môi trường sử dụng mà điều chỉnh các thông số cho phù hợp. Ngày nay, FGM đã được áp dụng trong các lĩnh vực kỹ thuật khác nhau, ví dụ: hàng không vũ trụ, năng lượng hạt nhân, vật liệu sinh học, điện tử và quang học, v.v.

Mô hình hóa và mô phỏng số đã trở thành một công cụ quan trọng giúp các kỹ sư và nhà thiết kế đưa ra quyết định trong quá trình/thiết kế kỹ thuật, nhằm nâng cao chất lượng và độ bền của sản phẩm. Phân tích tuyến tính thường chỉ dựa vào cấu hình không định dạng của cấu trúc để dự đoán cấu hình bị biến dạng, với giả thiết là biến dạng và biến dạng nhỏ. Tuy nhiên, trong hầu hết các ứng dụng kỹ thuật, sự thay đổi hình học của các miền vẫn đề rất quan trọng và do đó không thể bỏ qua, ví dụ trong phân tích độ ổn định cấu trúc hoặc trong quá trình tạo hình kim loại. Rõ ràng, các bài toán hình học phi tuyến liên tục trở thành một chủ đề nghiên cứu quan trọng trong cộng đồng khoa học.

1.2. Phần tử hữu hạn và các thuộc tính của nó

Việc giải các bài toán kỹ thuật bằng phương pháp giải tích thì gặp rất nhiều khó khăn và tốn nhiều thời gian. Do đó, với sự hỗ trợ của máy tính, phương pháp số là sự lựa chọn phù hợp với thực tế. Phương pháp số phổ biến nhất hiện nay là FEM, do tính tiện dụng và dễ dàng sử dụng. Tuy nhiên, FEM vẫn còn một số thuộc tính cố hữu cần cải tiến như sau:

- Lưới phần tử hữu hạn là điều kiện tiên quyết của phương pháp. Điều này là khó khăn cho các vấn đề cần được cập nhật lại lưới sau mỗi bước giải của bài toán. Vấn đề này thường gặp trong các bài toán mô phỏng lan truyền vết nứt và tương tác của vật liệu nhiều pha như lỏng – rắn, sự điều chỉnh lưới phải được cập nhật cho phù hợp.

- Các phần tử phải thỏa mãn các điều kiện hình học nhất định. Nếu các phần tử bị bóp méo, ví dụ: một phần tử tứ giác bốn nút mất đi độ lồi của nó do biến dạng lớn, thì kết quả thu được từ phương pháp số có sai số tăng lên đáng kể, không tin cậy.

- Các trường đạo hàm thu được từ FEM, như trường ứng suất và biến dạng trong cơ vật rắn, thì không liên tục về mặt vật lý tại các nút của phần tử.

- Các hiện tượng bị khóa của phần tử, có thể kể đến như khóa thể tích đối với các vật liệu gần như không nén được (hệ số Poisson tiến đến 0.5), hoặc khóa cắt thường được tìm thấy trong các kết cấu tấm/vỏ chịu uốn.

1.3. Xu thế phát triển của các phương pháp số

Việc cải tiến FEM được thực hiện bởi rất nhiều nghiên cứu trước đây, chủ yếu tập trung vào hai hướng chính. Xu thế thứ nhất là tạo ra một phương pháp số mới hoàn toàn so với FEM, có thể kể đến là phương pháp Dạng hình học (IGA), phương pháp không lưới (EFG), phương pháp phần tử biên (BEM). Xu hướng thứ hai là phát huy tối đa điểm mạnh của FEM và giảm đi điểm yếu của nó. Có thể nhắc đến phương pháp phần tử hữu hạn làm mịn (S-FEM) với nhiều cách như làm mịn trên nút, trên cạnh và làm mịn phần tử. Một cách tiếp cận khác được sử dụng trong luận án này chính sử dụng kỹ thuật nội suy kép (CIP) để can thiệp trực tiếp vào hàm dạng phần tử. Điều này dẫn đến bậc tự do không tăng so với FEM truyền thống khi cùng một mức lưới ban đầu. Hơn hết, thuộc tính Kronecker-delta trong FEM truyền

thông vẫn được giữ nguyên trong CIP. Với tất cả những tính chất có được như trên, thủ tục CIP đáng để nghiên cứu và nhiều hứa hẹn phát triển trong tương lai.

1.4. Lịch sử hình thành và phát triển của phương pháp CFEM

- Những nghiên cứu của phương pháp CFEM khi mới bắt đầu của thủ tục CIP được giới thiệu trong các tạp chí thì chỉ dành cho các phần tử tám giác 3 nút 2D với các phân tích tĩnh cho bài toán đàn hồi tuyến tính và được phát triển bởi nhóm tác giả C.Zheng, được công bố vào năm 2010. Phương pháp lúc này có tên gọi là TFEM – nghĩa là phương pháp phần tử hữu hạn có hàm dạng được nội suy hai lần. Sau đó, nhóm tác giả X.Peng cũng với phần tử tam giác 3 nút và áp dụng phân tích nút bài toán đàn hồi tuyến tính trong miền 2D, kết quả được công bố vào năm 2017.

- Năm 2013, NCS khi đó đang hoàn thành luận văn thạc sĩ, có cơ hội tiếp cận được phương pháp CFEM, nhận thấy được tiềm năng to lớn của phương pháp nên đã chủ động nghiên cứu và phát triển dưới sự hướng dẫn của PGS.TS Bùi Quốc Tính. Sản phẩm đầu tiên là một bài báo được công bố vào năm 2014, phân tích hầu hết các vấn đề cơ bản của bài toán Cơ vật rắn với vật liệu đồng nhất đàn hồi tuyến tính 2D. Phần tử sử dụng và được phát triển bởi nhóm là phần tử tứ giác 4 nút nội suy kép (CQ4). Thuật ngữ thủ tục CIP cũng bắt đầu được sử dụng từ bài báo này, CIP được viết tắt từ ngôn ngữ tiếng anh “Consecutive Interpolation Procedure”, nghĩa là thủ tục nội suy kép. Kỹ thuật CIP được sử dụng trong quá trình xây dựng các công thức toán học của hàm dạng.

- Năm 2014, NCS bắt đầu mở rộng hướng nghiên cứu áp dụng phương pháp sang các vấn đề mới như bài toán dao động tự do, dao động cưỡng bức cho vật liệu thông thường và vật liệu áp điện. Tuy gặp rất nhiều khó khăn nhưng cuối cùng kết quả là một bài báo cũng được công bố vào năm 2016.

- Cũng trong khoảng thời gian năm 2014, vấn đề về Cơ học phá hủy cũng được NCS quan tâm và nghiên cứu. Đó là sự kết hợp giữa NCS và người đồng nghiệp Zuoyi Kang, là một NCS của PGS.TS Bùi Quốc Tính tại Viện công nghệ Tokyo Nhật Bản. Các kết quả rất khả quan thu được từ phương pháp CFEM, một bài báo công bố trên tạp chí Acta Mechanica về phân tích nút tĩnh bài toán đàn hồi tuyến tính 2D.

Đó là đầu tiên có sự kết hợp giữa hàm dạng CQ4 và các kỹ thuật làm giàu để mô tả đặc trưng trường biến dạng và ứng suất trong vùng có vết nứt, bài báo được công bố vào năm 2015. Tiếp đến là một công bố về bài toán động có vết nứt cho cả vật liệu thông thường đẳng hướng và tổng hợp dị hướng, kết quả được công bố năm 2017 trên tạp chí Composite Structures.

- Trong thời gian luận án này được triển khai, từ năm 2017, tác giả nhận thấy thủ tục CIP được triển khai cho các vấn đề cơ nhiệt cho phần tử 2D và 3D, được phát triển bởi tác giả Nguyễn Ngọc Minh, công tác tại trường Đại học Bách Khoa Tp.HCM dưới sự hướng dẫn của PGS.TS Bùi Quốc Tính.

- Đồng thời trong năm 2019, một cách tiếp cận khác với thủ tục CIP cho phần tử tấm/vỏ sử dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc nhất phân tích ứng xử của tấm.

- Nhìn chung, thủ tục CIP đã được xây dựng hầu hết cho các phần tử 2D và 3D nhưng vẫn còn mang tính riêng rẽ cho từng phần tử, cho tới thời điểm bắt đầu luận án, đó là một điểm trừ của phương pháp.

- Với sự phát triển bền vững của FEM cùng với tính ưu việt của thủ tục CIP. Phương pháp CFEM hứa hẹn là một phương pháp phổ biến trong tương lai. Do đó, vào năm 2017, tác giả quyết định đăng ký làm NCS tại trường Đại học Công Nghệ - Đại học Quốc Gia Hà Nội dưới sự hướng dẫn của GS.TSKH Nguyễn Đình Đức và PGS.TS Bùi Quốc Tính. Chủ đề hướng đến về vật liệu FGM thông thường và bị nứt, phân tích phi tuyến hình học vật liệu thông thường cho cả vấn đề 2D và 3D. Kết quả nghiên cứu như là một sự hoàn thiện cho sự phổ biến của phương pháp CFEM.

CHƯƠNG 2

THỦ TỤC NỘI SUY KÉP CHO CÁC VẤN ĐỀ 2D VÀ 3D

2.1. Thủ tục nội suy kép CIP

Xét một miền vật thể Ω được bao bọc bởi biên Γ và được chia thành nhiều miền con Ω_e , mỗi miền con thường được gọi là một phần tử. Đỉnh của mỗi phần tử được gọi là nút. Một điểm \mathbf{x} thuộc phần tử được nội suy thông qua hàm $u(\mathbf{x})$ với thủ tục CIP như sau [23]–[26], [39, 41]:

$$u(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^n R_I(\mathbf{x}) \hat{u}_I = \mathbf{R}\hat{\mathbf{u}}, \quad (2.1)$$

với n là tổng số nút, \hat{u}_I là giá trị hàm $u(\mathbf{x})$ tại nút I , và cuối cùng $R_I(\mathbf{x})$ là hàm dạng CIP tại nút I . Một điểm khác biệt của CFEM so với FEM là miền nội suy luôn lớn hơn. Vecto \mathbf{R} chứa các hàm dạng được biểu diễn tổng quát như sau:

$$\mathbf{R}(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^n \left(\phi_I(\mathbf{x})\mathbf{N}^{[I]} + \phi_{Ix}(\mathbf{x})\bar{\mathbf{N}}_{.x}^{[I]} + \phi_{Iy}(\mathbf{x})\bar{\mathbf{N}}_{.y}^{[I]} + \phi_{Iz}(\mathbf{x})\bar{\mathbf{N}}_{.z}^{[I]} \right), \quad (2.2)$$

trong đó $\mathbf{N}^{[I]}$ chính là vecto các hàm dạng Lagrange của FEM thông thường tại nút I . $\bar{\mathbf{N}}_{.x}^{[I]}$, $\bar{\mathbf{N}}_{.y}^{[I]}$, $\bar{\mathbf{N}}_{.z}^{[I]}$ lần lượt là các đạo hàm trung bình của hàm dạng Lagrange tại nút I theo các phương x , y , và z tương ứng.

$$\bar{\mathbf{N}}_{.x}^{[I]} = \sum_{e \in S_I} \left(w_e \cdot \mathbf{N}_{,x}^{[I][e]} \right). \quad (2.3)$$

$\mathbf{N}_{,x}^{[I][e]}$ là giá trị đạo hàm của hàm dạng $\mathbf{N}^{[I]}$ tại nút I được tính theo phần tử thứ e , w_e là trọng số và được tính bởi

$$w_e = \frac{\Delta_e}{\sum_{\bar{e} \in S_I} \Delta_{\bar{e}}}, \quad e \in S_I. \quad (2.4)$$

S_I là tập hợp các phần tử có chung nút I và Δ_e là một đại lượng đặc trưng cho kích thước phần tử. Đối với phần tử 2D thì Δ_e được tính là diện tích còn phần tử 3D thì là thể tích.

Thêm nữa, các hàm bổ sung ϕ_I , ϕ_{Ix} , ϕ_{Iy} , ϕ_{Iz} trong phương trình (2.2) là cốt lõi của phương pháp CFEM và được viết tổng quát như sau:

$$\phi_i(\mathbf{x}) = N_i + N_i^2(\Sigma_1 - N_i) - N_i(\Sigma_2 - N_i^2), \quad (2.5)$$

$$\phi_{ix}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1, j \neq i}^{ne} \left(N_i^2 N_j + \frac{1}{2} N_i N_j (\Sigma_1 - N_i - N_j) \right) \quad (2.6)$$

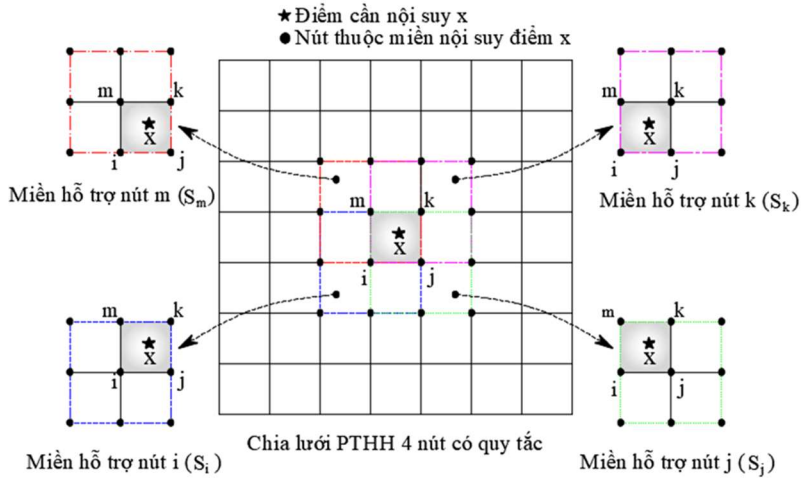
Ở đây, N là các hàm dạng Lagrange. Các đại lượng Σ_1 và Σ_2 được định nghĩa bởi

$$\Sigma_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{ne} N_i, \quad \text{và} \quad \Sigma_2(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{ne} N_i^2 \quad (2.7)$$

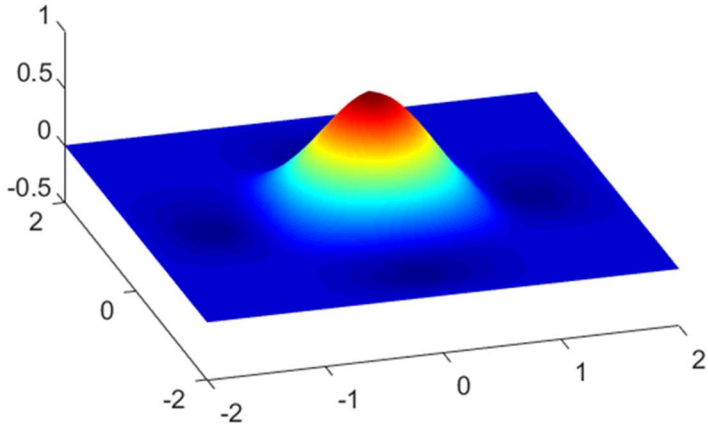
n_e là số nút của phần tử e , i là chỉ số nút ($i = 1, 2, 3, \dots, n_e$). Các hàm ϕ_{iy} , ϕ_{iz} dễ dàng nhận được bằng cách thay thế tọa độ x trong phương trình (6) bởi tọa độ y và tọa độ z . Ngoài ra, để duy trì thuộc tính Kronecker-delta, các hàm phụ ϕ_i , ϕ_{ix} , ϕ_{iy} và ϕ_{iz} trong phương trình (2.2) phải được xác định cho từng loại phần tử và phải thỏa mãn các điều kiện sau.

$$\begin{aligned}
 \phi_i(x_j) &= \delta_{ij}, & \phi_{i,x}(x_j) &= 0, & \phi_{i,y}(x_j) &= 0, & \phi_{i,z}(x_j) &= 0, \\
 \phi_{ix}(x_j) &= 0, & \phi_{ix,x}(x_j) &= \delta_{ij}, & \phi_{ix,y}(x_j) &= 0, & \phi_{ix,z}(x_j) &= 0, \\
 \phi_{iy}(x_j) &= 0, & \phi_{iy,x}(x_j) &= 0, & \phi_{iy,y}(x_j) &= \delta_{ij}, & \phi_{iy,z}(x_j) &= 0, \\
 \phi_{iz}(x_j) &= 0, & \phi_{iz,x}(x_j) &= 0, & \phi_{iz,y}(x_j) &= 0, & \phi_{iz,z}(x_j) &= \delta_{ij},
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

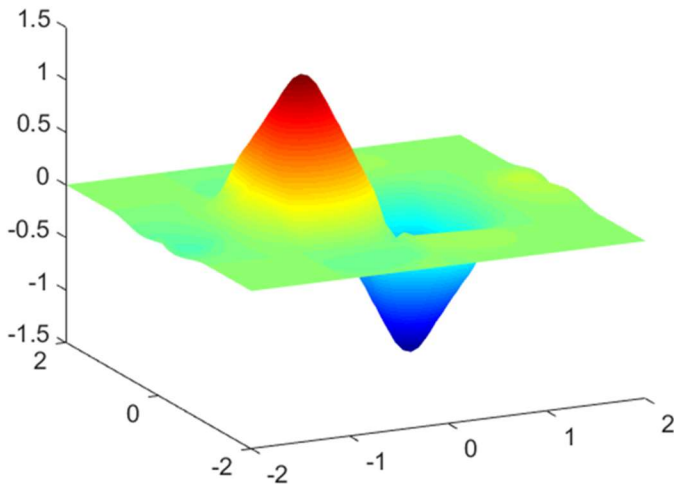
Công thức (2.2) đã được viết code tổng hợp trong matlab, cho cả CT3, CQ4, CTH4 và CHH8. Hình 2.2 thể hiện lượt đồ hỗ trợ điểm cần nội suy của phần tử CQ4 khi áp dụng kỹ thuật CIP. Hình 2.3 và 2.4 là hàm dạng và đạo hàm của phần tử CQ4.



Hình 2.2. Mô hình kỹ thuật CIP cho phần tử tứ giác 4 nút (CQ4) trong cách chia lưới hữu hạn miền 2D.



Hình 2.3. Minh họa hàm dạng cho phần tử CQ4.



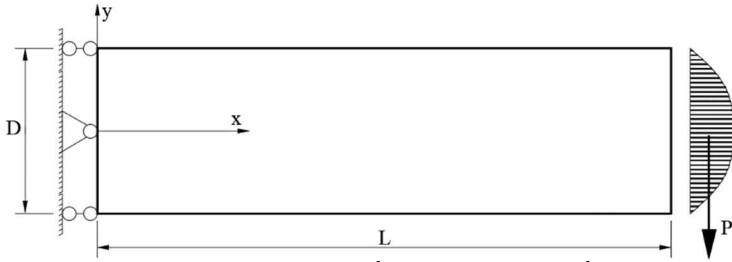
Hình 2.4. Minh họa đạo hàm bậc nhất hàm dạng cho phần tử CQ4

2.2. Một số ví dụ và kết luận

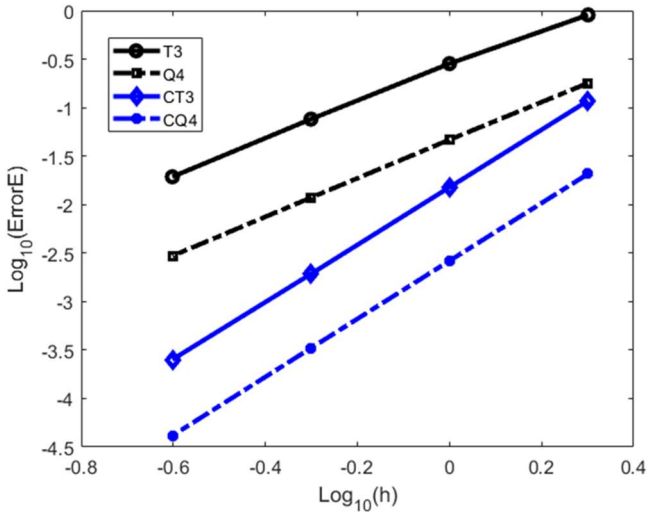
2.2.1. Dầm công son chịu lực cắt

Dầm công son có hình dạng, điều kiện biên và chịu lực tác dụng như hình 2.5. Dầm được chia lưới có quy tắc và bất quy tắc với nhiều mật độ lưới khác nhau. Kết quả cho thấy phương pháp CFEM là chính xác hơn FEM truyền thống khi cùng mức lưới khảo sát, xem hình 2.7.

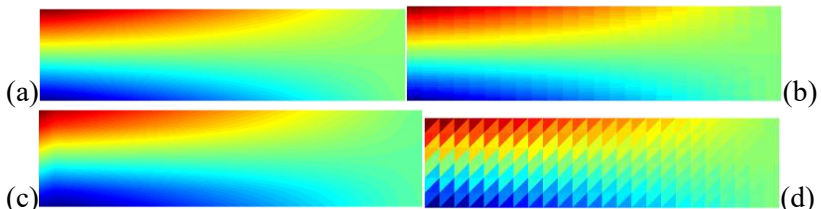
Một trong những tính năng nổi bật chính sự liên tục của trường đạo hàm được thể hiện thông qua trường ứng suất như hình 2.8.



Hình 2.5. Dạng hình học và điều kiện biên của dầm công son



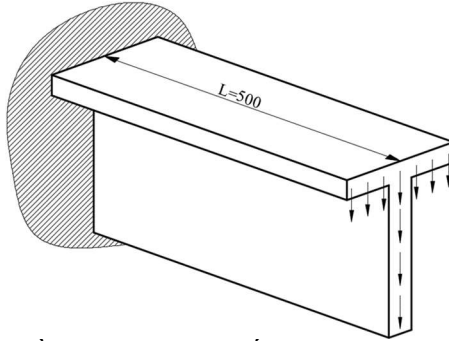
Hình 2.7. Độ hội tụ của năng lượng biến dạng theo kích thước lưới



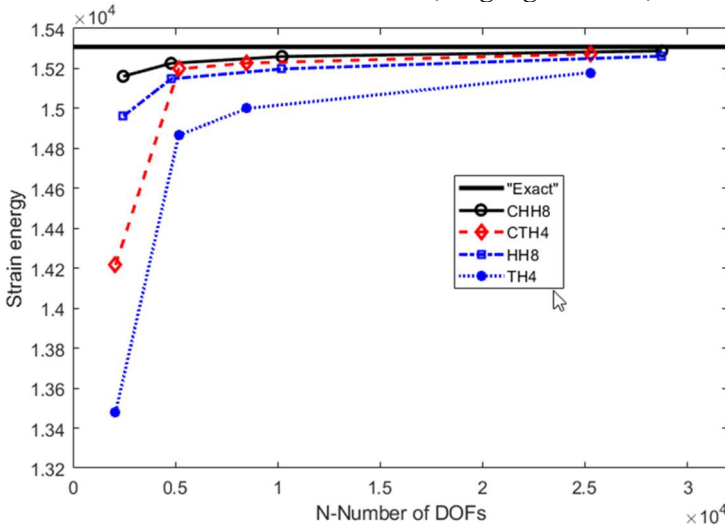
Hình 2.8. Trường ứng suất σ_{xx} được tính bởi bốn kiểu phần tử: CQ4 (a), Q4 (b), CT3 (c), T3 (d)

2.2.2. Dầm Cantilever có tiết diện chữ T

Ví dụ này nhằm minh chứng cho hiệu suất của thủ tục CIP khi sử dụng phần tử CTH4 và CHH8 vào phân tích bài toán đàn hồi tuyến tính 3D. Dạng hình học được thể hiện trong hình 2.15. Kết quả so sánh sự hội tụ giữa CFEM và FEM được thể hiện trong hình 2.18, dữ liệu cho thấy CHH8 là hội tụ nhanh nhất, theo thứ tự đó là đến CTH4, HH8 và TH4.



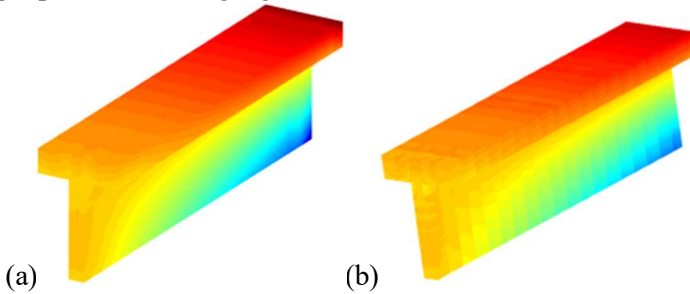
Hình 2.15. Dầm cantilever có tiết diện ngang chữ T chịu uốn



Hình 2.18. Sự hội tụ của năng lượng biến dạng đàn hồi đối với DOFs thu được bởi các loại nguyên tố: TH4, CTH4, HH8 và CHH8.

“Exact” là giá trị thu được bằng lưới rất mịn 10800 phần tử HH20 trong ABAQUS

Đối với vấn đề 3D, trường ứng suất thu được từ CFEM cũng cho thấy sự liên tục trong khi FEM là sự bất liên tục. Hình 2.20 thể hiện ứng suất pháp trên mặt cắt ngang.



Hình 2.20. Ứng suất σ_{zz} thu được từ CHH8 (a) và HH8(b)

2.2.3. Kết luận

Thu tục nội suy kép (CIP) đã được phát triển thành công cho các phần tử 2D và 3D. Hơn nữa, một công thức chung để xây dựng các hàm phụ trợ đã được giới thiệu, cho phép ứng dụng CIP vào một loạt các phần tử hữu hạn, từ 1D đến 3D.

Các phần tử được tăng cường CIP rõ ràng là có hiệu suất tốt hơn các phần tử FEM tương ứng của chúng. Điều đó đã chứng minh qua một loạt các ví dụ số từ kết cấu đơn giản đến phức tạp; từ kết cấu 2D sang kết cấu 3D; từ kết cấu có vật liệu thông thường đến kết cấu vật liệu FGM; từ phân tích vấn đề tĩnh đến phân tích dao động riêng. Tất cả là do hàm dạng của phương pháp CFEM có thêm tính chất trơn và mịn giữa các phần tử ngoài những tính chất kế thừa từ FEM tiêu chuẩn.

Với công thức chung được đề xuất trong nghiên cứu luận án, thủ tục CIP có thể được kết hợp vào bất kỳ mã hiện có nào để biến đổi các phần tử hữu hạn tiêu chuẩn thành các phần tử nâng cao CIP.

CHƯƠNG 3

PHÂN TÍCH TĨNH, ĐỘNG VÀ LAN TRUYỀN VẾT NỨT VẬT LIỆU FGM CHO CÁC VẤN ĐỀ HAI CHIỀU

3.1. Giới thiệu

Vật liệu FGM đã và đang trở thành nguyên liệu chính trong thiết kế kết cấu cầu ngành kỹ thuật công nghệ cao. Với đặc tính ưu việt là tính chất vật liệu biến đổi theo một hàm được mặc định. Cũng giống như những vật liệu khác, việc dự báo và xử lý vết nứt phát sinh trong quá trình hoạt động luôn là một thử thách cho các nhà nghiên cứu.

Trong chương này, sự kết hợp giữa phần tử CQ4 và kỹ thuật làm giàu tại vùng nứt, gọi là phần tử XCQ4 áp dụng vào phân tích bài toán nứt tĩnh và nứt động, bài toán lan truyền vết nứt.

Hệ số cường độ ứng suất luôn là mục tiêu chính trong các bài toán phân tích ứng xử của bài toán bất liên tục do nứt. Không ngoại lệ, hệ số ứng suất tĩnh (SIFs) và hệ số ứng suất động (DSIFs) cũng như đường dự báo sự lan truyền vết nứt được đề cập trong chương này. Kết quả thu được từ phương pháp nghiên cứu sẽ được kiểm chứng với những công bố trước đó.

3.2. Mô hình hóa vết nứt

Hiện nay có hai mô hình để mô tả vết nứt trong mô phỏng số, mô hình thứ nhất là mô hình “Vết nứt quán tính” và mô hình thứ hai là mô hình “Vết nứt đột ngột”. Trong nghiên cứu này, NCS sử dụng mô hình “Vết nứt đột ngột”, bằng cách sử dụng nhiều kỹ thuật làm giàu khác nhau. Đặc biệt là sự kết hợp giữa phần tử hữu hạn tăng cường thủ tục CIP với các mô hình toán kỹ thuật làm giàu.

3.3. Cơ rạn nứt trong vật liệu FGM

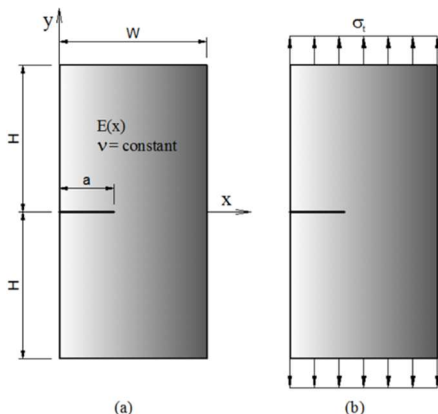
Trường ứng suất và chuyển vị lân cận vùng nứt cũng tương tự như vật liệu đồng nhất. Tuy nhiên, có sự hiệu chỉnh trong mô đun đàn hồi chống cắt trong trường chuyển vị cho phù hợp. Đối với chế độ phá hủy đầu tiên, trường ứng suất và chuyển vị dễ dàng tìm thấy trong các tài liệu chuyên ngành.

3.4. Kết quả số và biện luận

3.4.1. Nứt tĩnh

Một tấm chữ nhật hữu hạn FGM có dạng hình học như hình 3.9, chịu lực kéo ở biên trên và biên dưới. Kết quả phân tích bằng phương

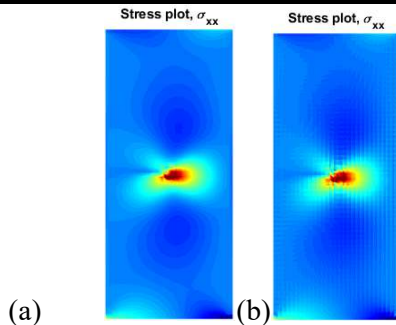
pháp nghiên cứu và các phương pháp đối chứng được thể hiện trong bảng 3.2. Kết quả thu được từ XCFEM là tương đương với các phương pháp khác.



Hình 3.9. (a) Dạng hình học và (b) lực tác dụng

Bảng 3.2. So sánh giữa XCQ4 và các lời giải tham khảo ($a/W = 0.2$)

E_2/E_1	X-PRIM	X-MK (Formula1)	Q8	XCQ4 (Present)	Analytical
0.1	1.311	1.297	1.298	1.302	1.297
0.2	1.408	1.394	1.396	1.396	1.396
1	1.374	1.362	1.368	1.373	1.373
5	1.131	1.120	1.132	1.147	1.132
10	0.998	0.988	1.001	1.021	1.024

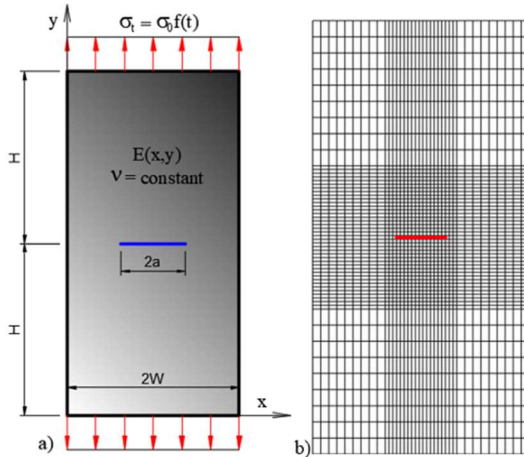


Hình 3.14. Ứng suất σ_{xx} thu được bởi XCQ4 (a) và XQ4 (b)

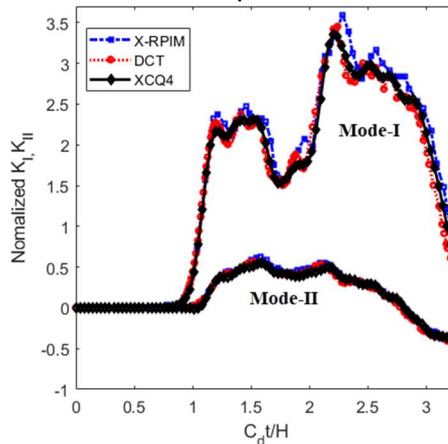
Trường ứng suất thu được từ CFEM là trơn và mịn hơn FEM truyền thống, kết quả được thể hiện trong hình 3.14 cho trường hợp tấm hữu hạn FGM chịu lực cắt biên trên và ngàm biên dưới, vết nứt tại giữa cạnh biên trái.

3.4.2. Nứt động

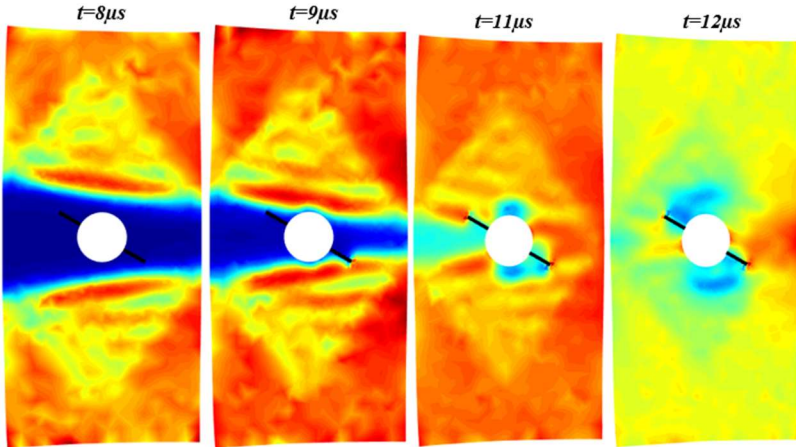
Một tấm chữ nhật FGM có vết nứt trung tâm và chịu lực kéo động tại biên trên và biên dưới như hình 3.16. Hình 3.17 thể hiện hệ số DSIFs theo thời gian giữa CFEM và các lời giải tham khảo. Kết quả thu được là tương đồng giữa các phương pháp.



Hình 3.16. Kích thước hình học và chia lưới mẫu thử CCT



Hình 3.17. So sánh DSIFs giữa XCQ4 và hai phương pháp tham chiếu



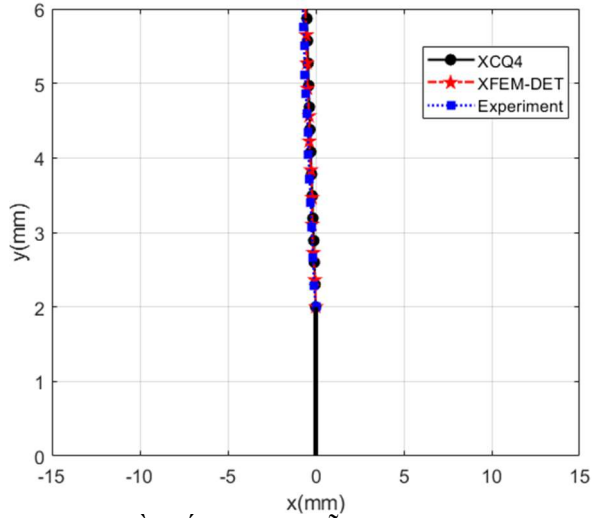
Hình 3.25. Sự lan truyền của sóng đàn hồi được biểu thị bằng sự phân bố của thành phần ứng suất pháp tuyến σ_{yy}

Một khảo sát thú vị về sóng vật lý truyền trong vật liệu FGM cũng được thực hiện trong luận án. Một tấm chữ nhật có lỗ tròn trung tâm và bị nứt nghiêng bắt đầu từ lỗ tròn được phân tích. Hình 3.25 thể hiện sóng lan truyền dưới dạng trường ứng suất. Rõ ràng, sóng do lực tác động tại biên trên và biên dưới cần có thời gian để lan truyền đến vết nứt, từ đó làm tăng hệ số DSIFs.

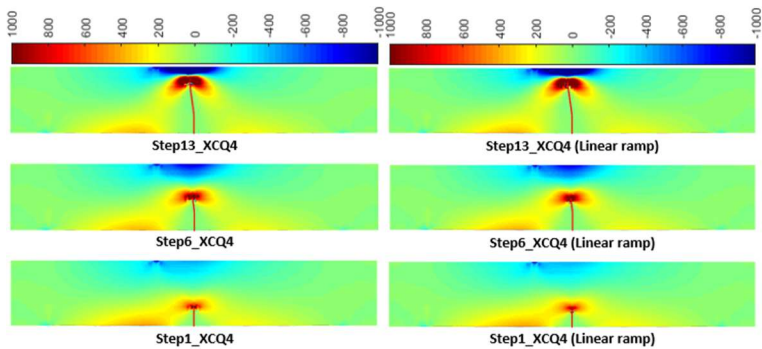
3.4.3. Lan truyền vết nứt

Dự đoán khả năng lan truyền vết nứt trong kết cấu FGM là một yêu cầu quan trọng, từ đó có những biện pháp khắc chế và tránh được những thiệt hại không mong muốn. Hình 3.33 thể hiện đường lan truyền vết nứt của dầm FGM bằng nhiều lời giải. Dữ liệu cho thấy sự trùng giữa phương pháp nhiên cứu và lời giải tham khảo.

Trường ứng suất theo từng giai đoạn lan truyền vết nứt cũng là mục tiêu trong nghiên cứu này, hình 3.35 thể hiện trường ứng suất tại các thời điểm khác nhau bằng hai kỹ thuật làm giàu khác nhau và kết quả là tương đồng.



Hình 3.33. Lan truyền vết nứt của mẫu thử TPB: so sánh giữa XCQ4 và kết quả tham khảo từ XFEM-DET và thí nghiệm



Hình 3.35. Trường ứng suất σ_{xx} của TPB tại các thời điểm khác nhau

3.5. Kết luận

Các phân tích cho thấy độ chính xác, khả năng ứng dụng và hiệu suất của các mô hình hiện tại được xác minh thông qua các so sánh của luận án, tức là các kết quả tính toán của phản ứng động tạm thời và đường lan truyền vết nứt được so sánh với các giải pháp tham chiếu, được lấy từ dữ liệu thực nghiệm và các phương pháp số khác.

Chương 4

PHÂN TÍCH PHI TUYẾN HÌNH HỌC KẾT CẤU 2D VÀ 3D

4.1. Giới thiệu

Với việc liên tục cải tiến về mặt chịu lực và độ bền nên kết cấu ngày càng giảm về trọng lượng và tăng về kích thước. Do đó, sự thay đổi về mặt hình học có ảnh hưởng lớn đến kết quả phân tích nên việc phân tích tuyến tính không còn phù hợp. Việc phân tích phi tuyến hình học là cần thiết. Thông thường, các phần tử bậc cao thì phù hợp hơn để phân tích phi tuyến hình học. Do đó, việc áp dụng phần tử CQ4 và CT3 vào phân tích 2D và CTH4 với CHH8 vào phân tích 3D là phù hợp với yêu cầu của bài toán. Mặt khác, việc phân tích phi tuyến yêu cầu nhiều bước giải lặp nên rất cần nhiều thời gian để tính toán. Trong luận án này, tác giả giới thiệu các kỹ thuật tích phân mới thay thế tích phân Gaussian có độ chính xác tương đương nhưng ít điểm tích phân hơn. Từ đó hiệu suất của phương pháp nghiên cứu được nâng lên một tầm cao mới.

4.2. Phương trình cơ bản trong phân tích phi tuyến hình học

Phân tích phi tuyến hình học có tính đến sự thay đổi hình học do biến dạng và ứng suất ban đầu gán cho phần tử (nếu có). Một điểm trong cấu hình ban đầu được ký hiệu là X và điểm đó trong cấu hình hiện tại được ký hiệu là $x = X + u$, với u là chuyển vị. Việc cập nhật cấu hình đạt được bằng cách sử dụng công thức Lagrange tổng như sau:

$$(K_1 + K_2) \Delta u = F_{ext} - F_{int} = R \quad (4.1)$$

Các hệ số trong phương trình (4.1) sẽ được viết code trong matlab và tiến hành giải lặp. Kết quả thu được sẽ là mối quan hệ giữa lực và chuyển vị. Tất nhiên, một đường cong chuyển vị - lực sẽ được trình bày trong các ví dụ.

4.3. Mô hình tích phân thay thế

Trong phương pháp số, thông thường khi tính ma trận độ cứng hay vec tơ lực thì tích phân Gaussian được sử dụng. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, NCS giới thiệu mô hình tích phân số mới thay thế tích phân Gaussian với số điểm tích phân là ít hơn nhưng độ chính xác vẫn đảm bảo.

Đối với miền bài toán 2D, tác giả sử dụng lại nghiên cứu Jeyakarthikeyan. Bảng 4.1 và 4.2 thể hiện tọa độ điểm tích phân và trọng số tương ứng của mô hình EM và EE.

Bảng 4.1. Trọng số và tọa độ của điểm tích phân trong mô hình tích phân EM

Điểm	Trọng số	Tọa độ
1	4/3	[-0,5; -0,5]
2	4/3	[0,5; -0,5]
3	4/3	[0,5; 0,5]
4	4/3	[-0,5; 0,5]
5	-4/3	[0; 0]

Bảng 4.2. Trọng số và tọa độ của điểm tích phân trong mô hình tích phân EE

Điểm	Trọng số	Tọa độ
1	2/3	[-1; 0]
2	2/3	[0; -1]
3	2/3	[1; 0]
4	2/3	[0; 1]
5	4/3	[0; 0]

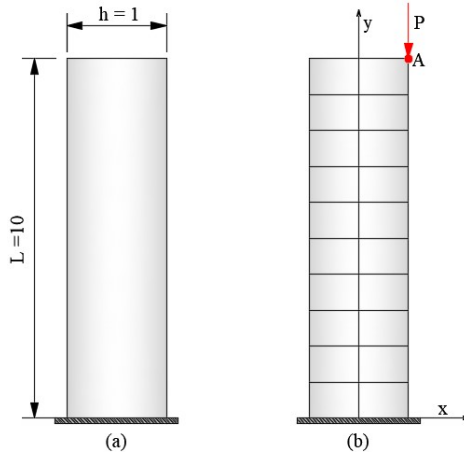
Bảng 4.3. Điểm tích phân và trọng số tương ứng trong mô hình tích phân thay thế 3D-EM

Điểm tích phân	Trọng số
$(-0.5, -0.5, -0.5)$	4/3
$(0.5, -0.5, -0.5)$	4/3
$(-0.5, 0.5, -0.5)$	4/3
$(0.5, 0.5, -0.5)$	4/3
$(-0.5, -0.5, 0.5)$	4/3
$(0.5, -0.5, 0.5)$	4/3
$(-0.5, 0.5, 0.5)$	4/3
$(0.5, 0.5, 0.5)$	4/3
$(0.0, 0.0, 0.0)$	-8/3

Đối với miền bài toán 3D, tác giả đề xuất hai mô hình tích phân thay thế có tên gọi là mô hình 3D-EM và mô hình EF (Mid-Face). Thông số chi tiết về tọa độ điểm tích phân và trọng số tương ứng được thể hiện trong bảng 4.3.

4.4. Ví dụ số và thảo luận

Ví dụ đầu tiên là cột chịu nén lệch tâm như hình 4.3. Chuyển vị ngang của điểm A giữa các phương pháp được thể hiện trong bảng 4.4.



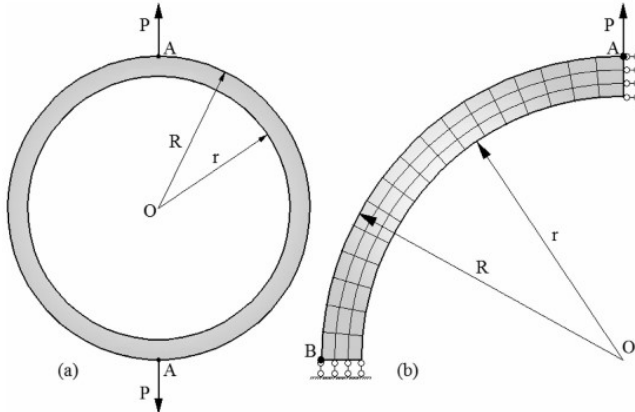
Hình 4.3. Cột nén lệch tâm, a) Hình học, b) Chia lưới

Bảng 4.4. Chuyển vị phương ngang của điểm A

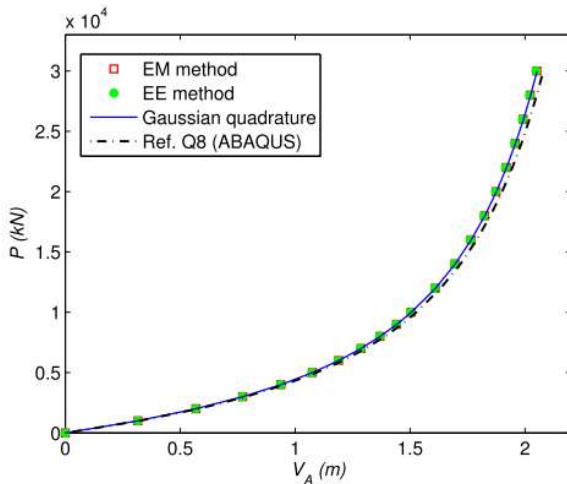
P	FEM			CFEM		FE-LSPIM
	T3	Q4	Q8	CT3	CQ4	
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
400	0.043	0.092	0.150	0.111	0.145	0.150
800	0.093	0.218	0.396	0.273	0.381	0.394
1200	0.151	0.397	0.850	0.524	0.819	0.856
1600	0.219	0.671	1.965	0.962	1.823	1.932
1800	0.258	0.869	3.057	1.318	2.804	2.984
2000	0.301	1.132	4.377	1.837	4.079	4.314
2200	0.348	1.493	5.490	2.585	5.236	5.446
2400	0.400	1.998	6.278	3.539	6.063	6.235
2600	0.458	2.691	6.789	4.512	6.603	6.748
2800	0.523	3.554	7.116	5.325	6.940	7.062

Kết quả cho thấy phương pháp nghiên cứu có độ chính xác tương đương với phần tử bậc cao Q8. Trong khi FEM truyền thống (T3 và Q4) có sai số rất lớn và không phù hợp để phân tích phi tuyến.

Ví dụ tiếp theo là vòng tròn nhẫn chịu lực kéo như hình 4.10. Phần tử CQ4 được áp dụng với ba mô hình tích phân số. Kết quả cho thấy độ chính xác là tương đương giữa ba mô hình tích phân được thể hiện trong hình 4.14.

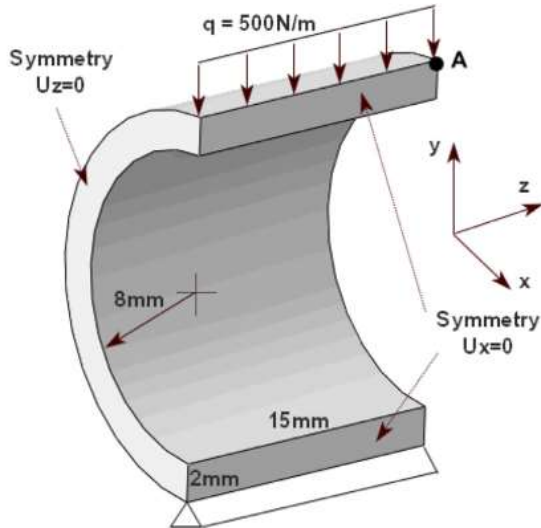


Hình 4.10. Dạng hình học và cách chia lưới của vòng nhẫn

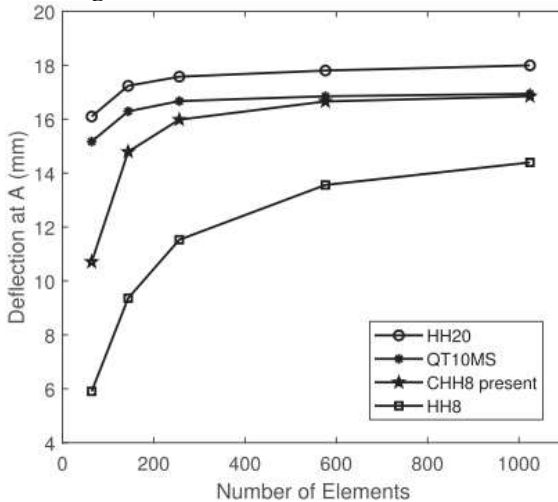


Hình 4.14. Đường cong chuyển vị - lực tại điểm A thu được giữa các phương pháp với lời giải tham khảo

Trong miền 3D, hình trụ tròn chịu tải phân bố đều trên đường thẳng được phân tích, dạng hình học được thị trong hình 4.26. Kết quả được thể hiện trong hình 4.28, dữ liệu cho thấy có sự thống nhất giữa CHH8 và QT10MS và gần sát với HH20. Hiệu quả rất thấp đối với phần tử HH8.

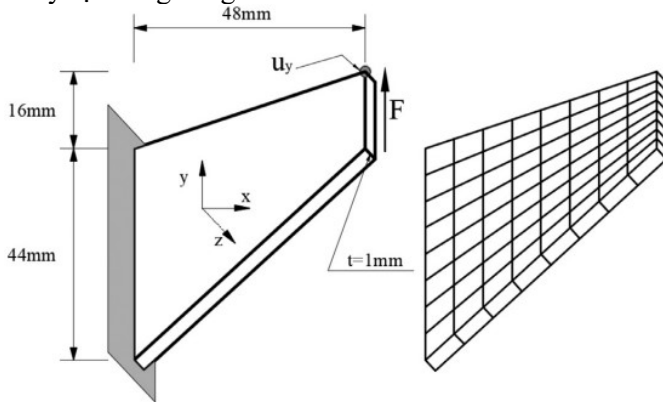


Hình 4.26. Dạng hình học của hình trụ tròn và các điều kiện biên

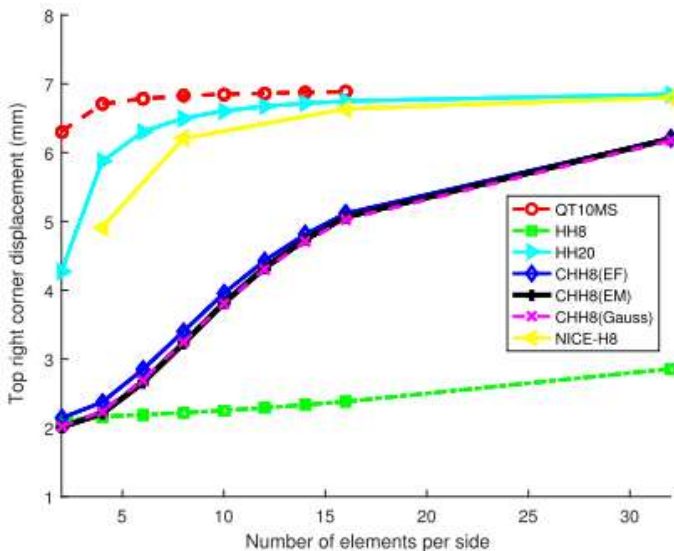


Hình 4.28. So sánh hội tụ của chuyển vị điểm A giữa các phương pháp

Một phép thử với yêu cầu cao hơn là vật liệu gần như không nén được. Một dầm công son biến dạng mặt phẳng của Cook, như minh họa trong Hình 4.34. Chuyển vị đứng tại đỉnh của dầm được minh họa trong hình 4.35. Theo quan sát, HH8 sai số rất nhiều, CHH8 thì tốt hơn nhưng không bằng HH20. Các kỹ thuật tích phân thay thế cũng được xem xét và cho thấy sự tương đồng.



Hình 4.34. Dạng hình học 3D tấm Cook và cách chia lưới



Hình 4.35. Chuyển vị đỉnh theo mật độ lưới giữa các phương pháp

KẾT LUẬN

Trong luận án này, phương pháp CFEM với chia khóa là kỹ thuật nội suy liên tiếp (CIP) đã được áp dụng thành công cho một loạt các vấn đề về cơ vật rắn biến dạng bao gồm vật liệu thông thường, vật liệu FGM bị nứt và phân tích phi tuyến hình học kết cấu 2D và 3D. Hai phần mở rộng chính như sau:

1. Phân tích tĩnh, động và lan truyền vết nứt trong vật liệu tổng hợp FGM

Phần tử XCQ4 của phương pháp CFEM lần đầu tiên được phát triển để nghiên cứu các vấn đề cơ rạn nứt đàn hồi tuyến tính vật liệu tổng hợp FGM. Các chi tiết và đóng góp mới của phương pháp nghiên cứu thì được trình bày trong chương 3. Tuy nhiên có thể tóm tắt ngắn gọn như bên dưới:

- Hiệu suất của phần tử XCQ4 khi phân tích các vấn đề cơ rạn nứt đàn hồi tuyến tính vật liệu tổng hợp FGM đã được nghiên cứu và chứng minh trong nhiều trường hợp: hệ số cường độ ứng suất SIFs được toán cho cả hai trường hợp vấn đề tĩnh và động và dự đoán sự lan truyền vết nứt dưới tác dụng của tải tĩnh.

- Kỹ thuật làm giàu tại đỉnh nứt cũng được thay thế bằng các dạng hàm ram dốc thay cho bốn hàm nhánh tiệm cận truyền thống. Lần đầu tiên áp dụng cho vật liệu tổng hợp FGM nhưng kết quả mang lại là tương đồng nhưng tổng số DOFs là ít hơn.

- Cuối cùng, XCQ4 cho thấy sự chính xác là tốt hơn phần tử XQ4 của FEM truyền thống tương ứng.

2. Phân tích phi tuyến hình học kết cấu 2D và 3D kết hợp mô hình tích phân thay thế

Phần tử CQ4 và CHH8 của phương pháp CFEM với bậc của hàm dạng là cao hơn phần tử Q4 và HH8 tương ứng trong FEM đã áp dụng thành công vào phân tích phi tuyến hình học kết cấu 2D và 3D. Cùng với đó là các mô hình tích phân thay thế với số điểm tích phân ít hơn tích phân Gaussian truyền thống tăng hiệu suất của phương pháp CFEM do giảm được chi phí tính toán. Một bảng tóm tắt các kết luận chính như bên dưới:

- Phần tử hữu hạn tuyến tính T3, Q4 và HH8 là không phù hợp áp dụng vào phân tích phi tuyến hình học.

- Phần tử CQ4 và CHH8 của phương pháp CFEM là phù hợp để phân tích phi tuyến hình học với độ chính xác cao, tương

đương với phần tử bậc cao tương ứng là Q8 và HH27 trong khi tổng số bậc tự do là ít hơn rất nhiều.

- Về mặt tích phân số, hiệu quả thậm chí có thể được cải thiện bằng cách sử dụng các phương pháp EM, EE cho vấn đề 2D và 3D-EM, EF cho vấn đề 3D, thay vì tích phân Gaussian thông thường. Các mô hình tích phân thay thế sử dụng số điểm tích phân ít hơn tích phân Gaussian truyền thống, do đó tiết kiệm thời gian tính toán.

- Đối với các vật liệu gần như không thể nén được, phần tử CQ4 và CHH8 rõ ràng mang lại hiệu suất tốt hơn phần tử tuyến tính Q4 và HH8. Tuy nhiên, nó không tốt bằng phần tử bậc hai Q8, HH20 và các phần tử được kết hợp với biên dạng giả định. Do đó, việc cải tiến hơn nữa công thức CQ4 và CHH8 là cần thiết trong công việc trong tương lai.

3. Công thức chung của kỹ thuật nội suy kép CIP

Một vấn đề cản trở việc áp dụng CIP là mỗi loại phần tử hữu hạn cần một bộ hàm phụ trợ riêng biệt. Được mô tả trong Chương 2, công thức chung của CIP tăng cường giúp giải quyết vấn đề nút thắt ở trên. Công thức chung cho phép kết hợp CIP vào nhiều loại nguyên tố, từ 1D đến 3D. Sự đóng góp này làm cho CIP trở nên hấp dẫn hơn và mở ra khả năng triển khai CIP như một phần bổ sung vào bất kỳ mã FEM hiện có nào trên thị trường.

NHỮNG VẤN ĐỀ CÓ THỂ PHÁT TRIỂN TỪ LUẬN ÁN

Luận án đã giới thiệu một cải tiến, có thể được thực hiện như một phần hỗ trợ cho Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) nổi tiếng. Những phát triển tiềm năng liên quan đến luận án này có thể được giải quyết như sau:

1. Một vấn đề rất thú vị về chủ đề phân tích phi tuyến vật liệu. Vì các ứng dụng trong kỹ thuật thường liên quan đến tối ưu sử dụng vật liệu, nghĩa là kết cấu làm việc ở trạng thái dẻo.
2. Lồng ghép các kỹ thuật biến dạng giả định vào công thức của CFEM để phân tích phi tuyến vật liệu siêu đàn hồi, vật liệu siêu đàn hồi bị nứt.
3. Vấn đề cơ nhiệt trong vật liệu FGM cũng là một đề tài thú vị. Vì vật liệu FGM hiện nay đã được ứng dụng khá phổ biến trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật như hàng không vũ trụ, vận tải và xây dựng. Vấn đề nứt và dự đoán sự phát triển vết nứt trong vật liệu tổng hợp FGM cũng là một đề tài đáng quan tâm.